

ZÍSKÁNÍ DAT Z HLUBOKÝCH HORIZONTŮ DOLU ROŽNÁ

-

ZÁVĚREČNÁ ZPRÁVA

Autoři: Zita Bukovská a kolektiv

Praha, 2020

NÁZEV ZPRÁVY: Získání dat z hlubokých horizontů dolu Rožná - závěrečná zpráva

NÁZEV PROJEKTU: Získání dat z hlubokých horizontů dolu Rožná

IDENTIFIKACE V RÁMCI PROJEKTU: Závěrečná zpráva

ČÍSLO SMLOUVY: SO 2017/023

ŘEŠITELÉ:

Česká geologická služba¹, INSET s.r.o.², Masarykova univerzita³, SG Geotechnika, a.s.⁴, Ústav geoniky AV ČR, v.v.i.⁵, ÚJV Řež, a.s.⁶, DIAMO, s.p.⁷

AUTORSKÝ KOLEKTIV: Bukovská Z.¹, Švagera O.¹, Chabr T.², Leichmann J.³, Sosna K.⁴, Souček K.⁵, Vavro M.⁵, Zuna M.⁶, Navrátil P.⁷, Bohdál P.¹, Bošková M.³, Dobeš P.¹, Filipický D.², Franěk J.¹, Galeková E.⁶, Georgiovská L.⁵, Hanák J.¹, Havlová V.⁶, Hlišnikovský K.⁷, Holeczy D.⁷, Jankovský F.⁶, Jaroš M.⁷, Jelínek J.¹, Jelínek J.⁷, Knésl I.¹, Koucká L.¹, Kryl J.¹, Kříbek B.¹, Kubeš M.³, Kubina L.⁵, Kučera R.¹, Kukutsch R.⁵, Laufek F.¹, Mixa P.¹, Mozola J.³, Násir M. M.⁷, Palát J.⁷, Patočka M.⁷, Pořádek P.¹, Rosendorf T.⁶, Soejono I.¹, Staš L.⁵, Vavro L.⁵, Veselovský F.¹, Vorel J.⁷, Waclawik P.⁵, Wertich V.³, Zajícová V.⁵, Zelinková T.¹

Lukáš Vondrovic

Manažer projektu (SÚRAO)

14. 2. 2020

Petr Mixa

Manažer projektu (Společnost Hluboké horizonty Rožná)

14. 2. 2020



Obsah

1	Obecné vymezení projektu.....	6
1.1	Náplň a cíl zakázky	6
1.2	Lokalizace prací	6
2	Postup řešení projektu	8
2.1	Přípravné práce.....	8
2.1.1	Rešeršní práce.....	10
2.1.2	Terénní práce – rekognoskace.....	10
2.1.3	Lokalizace studovaného bloku, GS a odběrných míst	12
2.1.4	Realizace technických prací a odběr vzorků.....	29
2.3	Laboratorní výzkumné práce	35
2.3.1	Petrografie hornin.....	35
2.3.2	Modelování teplotně-tlakových podmínek metamorfózy	55
2.3.3	Mineralogický výzkum výplně zlomů a poruch.....	67
2.3.4	Geochemická charakteristika hornin.....	84
2.3.5	Stanovení FMV a geotechnických vlastností laboratorními testy	146
2.3.6	Transportní charakteristiky hornin	248
2.3.7	Chemické složení pórové vody krystalických hornin	280
2.4	Výzkumné práce in-situ	306
2.4.1	Stanovení FMV a geotechnických vlastností in-situ	306
2.4.2	Odrazivost povrchu hornin	334
2.4.3	Přetvárné vlastnosti horninového masivu in-situ.....	346
2.4.4	Napěťový stav horninového masivu	352
2.4.5	Popis strukturních elementů kritických pro hodnocení bezpečnosti HÚ	377
2.4.6	Revalidace zbytkového ložiskového potenciálu	422
2.4.7	Charakterizace EDZ.....	490
2.5	Ostatní práce (dílčí plnění 3 a 4)	624
2.5.1	Odhad a charakterizace HHB.....	624
2.5.2	Návrh kvazihomogenních horninových bloků	628
2.5.3	Konceptuální 3D geologický model	633
3	Interpretace výsledků s ohledem na vliv první zóny a hloubku horninového masivu	653
4	Implikace pro HÚ.....	665
5	Shrnutí	671

6 Reference.....677

Seznam elektronických příloh:

Elektronická příloha 1 Realizační projekt prací – získání dat z hlubokých horizontů dolu Rožná (Švagera a Bukovská eds. 2018)

Elektronická příloha 2 Plán kvality – získání dat z hlubokých horizontů dolu Rožná (Vaněček a kol. 2018)

Elektronická příloha 3 Zpráva o vyhodnocení archivních podkladů – získání dat z hlubokých horizontů dolu Rožná (Navrátil a Bukovská eds. 2018)

Elektronická příloha 4 Technická zpráva za rok 2018 – získání dat z hlubokých horizontů dolu Rožná (Bukovská ed. 2018)

Elektronická příloha 5 Technická zpráva za rok 2019 – získání dat z hlubokých horizontů dolu Rožná (Bukovská a Kryl eds. 2019)

Elektronická příloha 6 Seznam dokumentačních bodů odebraných vzorků

Elektronická příloha 7 Lokalizace dokumentačních bodů v projektu QGIS a shapefile (SHP)

Elektronická příloha 8 Všechny zdokumentované vrtné kolonky ve formátu PDF

Elektronická příloha 9 Primární data pro vrtné kolonky pro program LogPlot

Elektronická příloha 10 Fotodokumentace vrtných jader v jádrovnicích

Elektronická příloha 11 Příklad vrtné kolonky BGS20/2V(D)

Elektronická příloha 12 Veškerá zdrojová data ke všem zdokumentovaným vrtným kolonkám (MS Excel)

Elektronická příloha 13 Porovnání metráže puklin měřením akustickým televizorem s vrtnou kolonkou

Elektronická příloha 14 Litologická charakteristika vrtů – zdrojová a upravená data MS Excel

Elektronická příloha 15 Petrografie hornin

Elektronická příloha 16 Lokalizace vzorků pro mineralogický výzkum výplní

Elektronická příloha 17 Hlavní prvky v karbonátech

Elektronická příloha 18 Stopové prvky v karbonátech

Elektronická příloha 19 Fluidní inkluze v karbonátech a křemenu

Elektronická příloha 20 Izotopy C a O v karbonátech

Elektronická příloha 21 Izotopy Sr v karbonátech

Elektronická příloha 22 Izotopy S v sulfidech

Elektronická příloha 23 Geochemická charakteristika hornin

Elektronická příloha 24 Listy FMV

Elektronická příloha 25 Profily vrtů

Elektronická příloha 26 Fotodokumentace jader vrtů

Elektronická příloha 27 Kvalita vrtného jádra pomocí parametru RQD

Elektronická příloha 28 Obrazový výstup z videoinspekce vrtů

Elektronická příloha 29 Interpretace strukturních prvků, identifikovaných ze záznamů OPTV a HiRAT

Elektronická příloha 30 Tomografické řezy před a po vysokotlaké rtuťové porozimetrii

Elektronická příloha 31 Petrofyzikální vlastnosti hornin z lokality Rožná – výzkumná zpráva

Elektronická příloha 32 Výsledky laboratorních zkoušek SG Geotechnika

Elektronická příloha 33 Výsledky triaxiální zkoušky

Elektronická příloha 34 Konfokální mikroskopie

Elektronická příloha 35 Hodnoty porozit (%), hustoty a mineralogické hustoty (g cm^{-3}) měřených na vzorcích pro difúzní experimenty (válečky o průměru cca 48 mm, tloušťky 10 mm)

Elektronická příloha 36 Hodnoty porozit (%), hustoty a mineralogické hustoty (g cm^{-3}) měřených na vzorcích pro difúzní experimenty studia EDZ z vrtů BGS12-H a BGS24-H (válečky o průměru cca 48 mm, tloušťky 10 mm)

Elektronická příloha 37 Souhrnné vyhodnocení efektivních difúzních koeficientů pro vzorky z patrových horizontů (OS, V12, V18, V20, V22).

Elektronická příloha 38 Souhrnné výsledky chemických analýz odebraných vzorků na studium pórové vody – laboratorní experimenty a odběry in-situ měření

Elektronická příloha 39 Seznam vzorků EDZ pro difúzní experimenty a celkové vyhodnocení efektivních difúzních koeficientů.

Elektronická příloha 40 Primární data strukturně geologické dokumentace (.xlsx)*

Elektronická příloha 41 Dokumentace struktur získaných z fotogrammetrických modelů (.xlsx)*

Elektronická příloha 42 Fotodokumentace strukturních fenoménů v přístupných částech dolu Rožná

Elektronická příloha 43 Histogramy četností poruch získaných z archivních geologických map měřítka 1 : 200 000; pozice první zóny (červeně) a čtvrté zóny (zeleně) je převzata z 3D konceptuálního ložiskového modelu

Elektronická příloha 44 Lokalizace úseků, pro které byly zpracovány poruchy z archivních geologických map měřítka 1 : 200 000

Elektronická příloha 45 3D model poruch ve studovaném bloku na 20. patře (MVE)

Elektronická příloha 46 3D model poruch ve studovaném bloku na 20. patře (3D PDF)

Elektronická příloha 47 Geofyzikální měření, seismická tomografie, vertikální rychlostní řez mezi 20. a 21. patrem v úseku mezi GS201 a GS202 (GF-ST-1)

Elektronická příloha 48 Geofyzikální měření – seismická tomografie, horizontální rychlostní řez na úrovni 20. patra mezi Z3-XX (GS201 a GS202), PŠ1-203 a RV4 20-101

Elektronická příloha 49 Geofyzikální měření – reflexní seismika, reflexní řez s hloubkovým měřítkem, 20. patro mezi GS201 a GS202 (GF-RS-1)

Elektronická příloha 50 Geofyzikální měření – reflexní seismika, reflexní řez s hloubkovým měřítkem, 21. patro mezi PŠ213 a úrovní BGS20-2-V(U)

Elektronická příloha 51 Geofyzikální měření – reflexní seismika, reflexní řez s hloubkovým měřítkem, 20. patro, štola Z3-XX mezi GS201 a GS202

Elektronická příloha 52 Geofyzikální měření – seismická refrakční tomografie, rychlostní řez na stěně štoly Z3-XX (20. patro) v úseku mezi GS201 a GS202

Elektronická příloha 53 Geofyzikální měření – seismická refrakční tomografie, rychlostní řez na stěně štoly RV4 20-101 (20. patro)

Elektronická příloha 54 Geofyzikální měření – seismická tomografie, štola Z3-XX (20. patro), rychlostní řez mezi horizontálními vrtvy EDZ20-HA a EDZ20-HB

Elektronická příloha 55 Geofyzikální měření – seismická tomografie, štola Z3-XX (20. patro), rychlostní řez mezi horizontálními vrtvy EDZ20-HB a EDZ20-HC

Elektronická příloha 56 Geofyzikální měření – seismická tomografie, štola Z3-XX (20. patro), rychlostní řez mezi horizontálními vrtvy EDZ20-HC a EDZ20-HD

Elektronická příloha 57 Geofyzikální měření – seismická tomografie, štola Z3-XX (20. patro), rychlostní řez mezi horizontálními vrtvy EDZ20-HD a BGS20-2-V(U)

Elektronická příloha 58 Geofyzikální měření – seismická tomografie, štola Z3-XX (20. patro), rychlostní řez mezi horizontálním vrtem BGS20-1-H a stěnou štoly Z3-XX

Elektronická příloha 59 Geofyzikální měření – seismická tomografie, štola Z3-XX (20. patro), rychlostní řez mezi horizontálním vrtem EDZ20-HA a stěnou štoly Z3-XX

Elektronická příloha 60 Geofyzikální měření – seismická tomografie, štola Z3-XX (20. patro), rychlostní řez mezi horizontálním vrtem EDZ20-HB a stěnou štoly Z3-XX

Elektronická příloha 61 Geofyzikální měření – seismická tomografie, štola Z3-XX (20. patro), rychlostní řez mezi horizontálním vrtem EDZ20-HC a stěnou štoly Z3-XX

Elektronická příloha 62 Geofyzikální měření – seismická tomografie, štola Z3-XX (20. patro), rychlostní řez mezi horizontálním vrtem EDZ20-HD a stěnou štoly Z3-XX

Elektronická příloha 63 Geofyzikální měření – seismická tomografie, štola Z3-XX (20. patro), rychlostní řez mezi horizontálním vrtem BGS20-2-H a stěnou štoly Z3-XX

Elektronická příloha 64 Geofyzikální měření – georadarové měření na stěně chodby Z3-XX (20. patro) v úseku mezi GS201 a GS202

Elektronická příloha 65 Geofyzikální měření – měření georadarem ve vrtu, horizontální vrty EDZ20-HA, EDZ20-HB, EDZ20-HC, EDZ20-HD, časové řezy s interpretací

Elektronická příloha 66 Geofyzikální měření – měření georadarem ve vrtu, vrty na geotechnické stanici GS201, časové řezy s interpretací

Elektronická příloha 67 Geofyzikální měření – měření georadarem ve vrtu, vrty na geotechnické stanici GS202, časové řezy s interpretací

Elektronická příloha 68 Geofyzikální měření – měření georadarem ve vrtu, vrty na geotechnické stanici GS12, časové řezy s interpretací

Elektronická příloha 69 Geofyzikální měření – měření georadarem ve vrtu, vrty na geotechnické stanici GS18, časové řezy s interpretací

Elektronická příloha 70 Geofyzikální měření – měření georadarem ve vrtu, vrty na geotechnické stanici GS24, časové řezy s interpretací

Elektronická příloha 71 Geofyzikální měření – seismokarotáž, horizontální vrty EDZ20-HA, EDZ20-HB, rychlostní model

Elektronická příloha 72 Geofyzikální měření – seismokarotáž, horizontální vrty EDZ20-HC, EDZ20-HD, rychlostní model

Elektronická příloha 73 Geofyzikální měření – seismokarotáž, vrty na geotechnické stanici GS201 (GS20-1-V(U), GS20-1-I, rychlostní model

Elektronická příloha 74 Geofyzikální měření – seismokarotáž, vrty na geotechnické stanici GS201 (GS20-1-H, GS20-1-V(D), rychlostní model

Elektronická příloha 75 Geofyzikální měření – seismokarotáž, vrty na geotechnické stanici GS202 (GS20-2-V(U), GS20-2-I, rychlostní model

Elektronická příloha 76 Geofyzikální měření – seismokarotáž, vrty na geotechnické stanici GS202 (GS20-2-H, GS20-2-V(D), rychlostní model

Elektronická příloha 77 Geofyzikální měření – seismokarotáž, vrty na geotechnické stanici GS12 (GS12-V(U), GS12-I, rychlostní model

Elektronická příloha 78 Geofyzikální měření – seismokarotáž, vrty na geotechnické stanici GS12 (GS12-H, GS12-V(D), rychlostní model

Elektronická příloha 79 Geofyzikální měření – seismokarotáž, vrty na geotechnické stanici GS18 (GS18-V(U), GS18-I, rychlostní model

Elektronická příloha 80 Geofyzikální měření – seismokarotáž, vrty na geotechnické stanici GS18 (GS18-H, GS18-V(D), rychlostní model

Elektronická příloha 81 Geofyzikální měření – seismokarotáž, vrty na geotechnické stanici GS24 (GS24-V(U), GS24-I, rychlostní model

Elektronická příloha 82 Geofyzikální měření – seismokarotáž, vrty na geotechnické stanici GS24 (GS24-H, GS24-V(D), rychlostní model

Elektronická příloha 83 Geofyzikální měření – seismická tomografie mezi vrty geotechnické stanice GS201, rychlostní tomografický řez mezi vrty GS20-1-V(U) a GS20-1-I

Elektronická příloha 84 Geofyzikální měření – seismická tomografie mezi vrty geotechnické stanice GS201, rychlostní tomografický řez mezi vrty a GS20-1-I a GS20-1-H

Elektronická příloha 85 Geofyzikální měření – seismická tomografie mezi vrty geotechnické stanice GS201, rychlostní tomografický řez mezi vrty GS20-1-H a GS20-1-V(D)

Elektronická příloha 86 Geofyzikální měření – seismická tomografie mezi vrty geotechnické stanice GS201, rychlostní tomografický řez mezi všemi vrty stanice GS201

Elektronická příloha 87 Geofyzikální měření – seismická tomografie mezi vrtem BGS20-1-H (geotechnická stanice GS201) a stěnou chodby

Elektronická příloha 88 Geofyzikální měření – seismická tomografie mezi vrty geotechnické stanice GS202, rychlostní tomografický řez mezi vrty GS20-2-V(U) a GS20-2-I

Elektronická příloha 89 Geofyzikální měření – seismická tomografie mezi vrty geotechnické stanice GS202, rychlostní tomografický řez mezi vrty a GS20-2-I a GS20-2-H

Elektronická příloha 90 Geofyzikální měření – seismická tomografie mezi vrty geotechnické stanice GS202, rychlostní tomografický řez mezi vrty GS20-2-H a GS20-2-V(D)

Elektronická příloha 91 Geofyzikální měření – seismická tomografie mezi vrty geotechnické stanice GS202, rychlostní tomografický řez mezi všemi vrty stanice GS202

Elektronická příloha 92 Geofyzikální měření – seismická tomografie mezi vrtem BGS20-2-H (geotechnická stanice GS202) a stěnou chodby

Elektronická příloha 93 Geofyzikální měření – seismická tomografie mezi vrty geotechnické stanice GS12, rychlostní tomografický řez mezi vrty GS12-V(U) a GS12-I

Elektronická příloha 94 Geofyzikální měření – seismická tomografie mezi vrty geotechnické stanice GS12, rychlostní tomografický řez mezi vrty a GS12-I a GS12-H

Elektronická příloha 95 Geofyzikální měření – seismická tomografie mezi vrty geotechnické stanice GS12, rychlostní tomografický řez mezi vrty GS12-H a GS12-V(D)

Elektronická příloha 96 Seismická tomografie mezi vrty geotechnické stanice GS12, rychlostní tomografický řez mezi všemi vrty stanice GS12

Elektronická příloha 97 Geofyzikální měření – seismická tomografie mezi vrtem BGS12-H (geotechnická stanice GS12) a stěnou chodby

Elektronická příloha 98 Geofyzikální měření – seismická tomografie mezi vrty geotechnické stanice GS18, rychlostní tomografický řez mezi vrty GS18-V(U) a GS18-I

Elektronická příloha 99 Geofyzikální měření – seismická tomografie mezi vrty geotechnické stanice GS18, rychlostní tomografický řez mezi vrty a GS18-I a GS18-H

Elektronická příloha 100 Geofyzikální měření – seismická tomografie mezi vrty geotechnické stanice GS18, rychlostní tomografický řez mezi vrty GS18-H a GS18-V(D)

Elektronická příloha 101 Seismická tomografie mezi vrty geotechnické stanice GS18, rychlostní tomografický řez mezi všemi vrty stanice GS18

Elektronická příloha 102 Geofyzikální měření – seismická tomografie mezi vrtem BGS18-H (geotechnická stanice GS18) a stěnou chodby

Elektronická příloha 103 Geofyzikální měření – seismická tomografie mezi vrty geotechnické stanice GS24, rychlostní tomografický řez mezi vrty GS24-V(U) a GS24-I

Elektronická příloha 104 Geofyzikální měření – seismická tomografie mezi vrty geotechnické stanice GS24, rychlostní tomografický řez mezi vrty a GS24-I a GS24-H

Elektronická příloha 105 Geofyzikální měření – seismická tomografie mezi vrty geotechnické stanice GS24, rychlostní tomografický řez mezi vrty GS24-H a GS24-V(D)

Elektronická příloha 106 Seismická tomografie mezi vrty geotechnické stanice GS24, rychlostní tomografický řez mezi všemi vrty stanice GS24

Elektronická příloha 107 Geofyzikální měření – seismická tomografie mezi vrtem BGS24-H (geotechnická stanice GS24) a stěnou chodby

Elektronická příloha 108 Geofyzikální měření, geodetické zaměření prací – 20. patro, seznam souřadnic

Elektronická příloha 109 Geofyzikální měření, geodetické zaměření prací – 21. patro, seznam souřadnic

Elektronická příloha 110 Geofyzikální měření, geodetické zaměření prací – 20. patro, 21. patro, situační výkres zaměřených bodů

Elektronická příloha 111 Geofyzikální měření, geodetické zaměření prací – GS12, seznam souřadnic

Elektronická příloha 112 Geofyzikální měření, geodetické zaměření prací – GS12, situační výkres zaměřených bodů

Elektronická příloha 113 Geofyzikální měření, geodetické zaměření prací – GS18, seznam souřadnic

Elektronická příloha 114 Geofyzikální měření, geodetické zaměření prací – GS18, situační výkres zaměřených bodů

Elektronická příloha 115 Geofyzikální měření, geodetické zaměření prací – GS24, seznam souřadnic

Elektronická příloha 116 Geofyzikální měření, geodetické zaměření prací – GS24, situační výkres zaměřených bodů

Elektronická příloha 117 Vstupní soubory a data pro výpočet v programu DFraM

Elektronická příloha 118 DFN model generovaný programy DFraM a MOVE, uložený v prostředí MOVE 2018.2

Elektronická příloha 119 Databáze strukturních dat upravená pro DFN modelování

Elektronická příloha 120 3D modely úseků stěn chodeb využitých pro DFN modelování v prostředí MOVE 2018.2

Elektronická příloha 121 Čísla dokumentačních bodů, lokalizace, označení a popis vzorků pro ložiskový výzkum

Elektronická příloha 122 Výsledky mikrochemických analýz vzorků, SEM a mikrosonda

Elektronická příloha 123 Profil 1, grafická zóna, 21. patro ložiska Rožná, PXRF data

Elektronická příloha 124 Profil 2, grafická zóna, 18. patro, jáma Jasan, PXRF data

Elektronická příloha 125 Geochemie sodných metasomatitů, archivní vzorky, PXRF data

Elektronická příloha 126 Koncentrace Ta, Nb, Sc, REE a Y v minerálech, data SEM a elektronová mikrosonda

Elektronická příloha 127 Koncentrace prvků v průměrné uranové rudě. Data ICP-MS a PXRF data

Elektronická příloha 128 Chemické složení skarnů, předuranové i pouranové sulfidické mineralizace. PXRF data

Elektronická příloha 129 Chemické složení stratiformní barytové mineralizace, PXRF data

Elektronická příloha 130 Profil baryt-sulfidickou žilou na 24. patře ložiska Rožná. PXRF data

Elektronická příloha 131 Profil křemen-karbonátovou žilou se synchronizací, 20. patro ložiska Rožná, PXRF data

Elektronická příloha 132 Výsledky půdní metalometrie jižně od jámy Bukov, PXRF data

Elektronická příloha 133 Půdní metalometrie na radiometrické anomálii v prostoru ložiska Rožná, PXRF data

Elektronická příloha 134 Výsledky analýz karbonátové žiloviny na grafitizovaných zónách, archivní vzorky, PXRF data

Elektronická příloha 135 Odkaliště K-1 Chemické analýzy rmutu ICP-MS a PXRF data

Elektronická příloha 136 Karotážní měření vrtů

*Elektronická příloha 137 Konceptuální 3D ložiskový model ve formátu *.movd*

Elektronická příloha 138 Konceptuální 3D ložiskový model ve formátu PDF

Elektronická příloha 139 Lokalizace úseků, pro které byly vytvořeny fotogrammetrické modely a odvozena data strukturní dokumentace

Elektronická příloha 140 Primární fotodokumentace pro tvorbu fotogrammetrických modelů

Elektronická příloha 141 Fotodokumentace s měřenými poruchami z tabletu

Elektronická příloha 142 Fotogrammetrické modely přístupných úseků v dole Rožná

Elektronická příloha 143 Histogramy porušení jednotlivých dokumentovaných stěn pro účely stanovení HHB

Elektronická příloha 144 3D geologický model kvazihomogenního horninového bloku na 12. patře v blízkosti jámy R-7S

Elektronická příloha 145 3D geologický model kvazihomogenního horninového bloku na 20. patře v blízkosti jámy R-3

Elektronická příloha 146 Geologická mapa kvazihomogenního horninového bloku na 12. patře v blízkosti jámy R-7S

Elektronická příloha 147 Geologická mapa kvazihomogenního horninového bloku na 20. patře v blízkosti jámy R-3

Elektronická příloha 148 Převodní tabulka legendy ČGS a DIAMO ve formátu XLSX

Elektronická příloha 149 GIS projekt se všemi vstupními prostorovými daty pro 3D konceptuální geologický model komprimovaný do formátu ZIP

Elektronická příloha 150 3D konceptuální geologický model ve formátu MOVE 2018.1 a 3D PDF, komprimovaný do formátu ZIP

Elektronická příloha 151 3D konceptuální geologický model ve formátu MOVE 2018.1 a 3D PDF, komprimovaný do formátu 3D PDF

Elektronická příloha 152 Technické práce (docx)

Elektronická příloha 153 3D model studovaného bloku na 20 p.

Elektronická příloha 154 Primární data seismika

Elektronická příloha 155 Primární data georadar

Elektronická příloha 156 Zdrojová data z karotážních sond HiRAT a OPTV komprimovaná do formátu ZIP

Seznam použitých zkratk:

AAS – atomic absorption spectroscopy
ABI140 – acoustic borehole imager
a.p.f.u. – počet atomů ve strukturní jednotce
Alm – almandinová komponenta
AMF – amfibolit
AP – kyselý potenciál
AV – Akademie věd
AV ČR, v. v. i. – Akademie věd České republiky, veřejná výzkumná instituce
BIS-SH – borehole source
Bpv – balt po vyrovnání
Bq – Becquerel
Bq ml – Becquerel na mililitr
BTPAR – biotitická pararula
BTTPRR – biotitická pararula
CCBO – Compact Conical-ended Borehole Overcoring
cc – kalcit
CDT – Canyon Diablo Troilite
Cs – Cesium
CT – computed tomography
CFS – Close Fractures System
CZS – Crushed Zones System
ČBÚ – Český báňský úřad
ČGS – Česká geologická služba
ČSN EN – české technické normy
ČÚZK – Český úřad zeměměřický a katastrální
DIAMO – DIAMO s. p., o. z. GEAM; název odvozen od sloučeniny diuranát amonný
DIC – Nomarský diferenciální interferenční kontrast
DFN – diskrétní puklinová síť (Discrete Fracture Network)
Do – objemová hustota
Dm – mineralogická hustota
DZ – damage zone
 E_{def} – deformační modul resp. modul přetvárnosti
 E_{def} – modul přetvárnosti
 E_{el} – elastický modul resp. Youngův modul
EDS – Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy
EDZ – excavation damaged zone
ERL – erlanový stromatit
eU – ekvivalent uranu
FDZ – fault damage zone
FEG – Field Emission Gun - autoemisní katoda, Schottkyho katoda
FELGRN – felsický granulit
FMV – fyzikálně-mechanické vlastnosti
FSv ČVUT – Fakulta stavební Českého vysokého učení technického
GEAM – odštěpný závod DIAMO
Gln – galenit

GRN – granulit
Grs – grosulárová komponenta
GS – geotechnická stanice
GSI – metoda určení pevnosti a tvárnosti horninového masivu (Geological Strength Index)
HFS – High field strength elements
HHB – (kvazi)homogenní horninový blok
HiRAT – High Resolution Acoustic Televiewer
HM – horninový masiv
HREE – prvky vzácných zemin
HTO – tritium oxide
HÚ – hlubinné úložiště
HUP – tepelná produkce
Chcp – chalkopyrit
chl – chlorit
ICP-MS – hmotový spektrometr (Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometer)
ICP-OES – emisní spektrometrie s indukčně vázaným plazmatem
ICSD – inorganic crystal structure database
ISRM – International Society for Rock Mechanics
JJV – jiho-jihovýchod
J – jih
JJZ – jihojihozápad
JSD – Jensen-Shannon Divergence
JV – jihovýchod
JZ – jhozápad
K – kolmo (pro část FMV)
LAREM – Laboratoř rentgenové mikroanalýzy
lim – limonit
LREE – prvky vzácných zemin
LS – levá strana
LVR – poměr kapalné a plynné fáze
MF – Metamorphic Foliation
MGMBTPRR – migmatitizovaná biotitická pararula
MIP – vysokotlaká rtuťová porozimetrie
ml – mililitr
MnNCKFMASHTO – MnO-Na₂O-CaO-K₂O-FeO-MgO-Al₂O₃-SiO₂-H₂O-TiO₂-O
MS-ICP-MS – Multicollector-Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometer
MU – Masarykova univerzita
n – neprůběžná puklina
NMO – dynamická korekce
NNP – čistý neutralizační potenciál
NP – neutralizační potenciál
o. z. – odštěpný závod
OFS – Open Fractures systém
OPTV – Optical TeleViewer
P – paralelně (pro část FMV)
P – průběžná puklina
P-T – tlakově-teplotní
P – puklina

PDB – Pee Dee Belemnite
PE – polyetylen
pH – vodíkový exponent
Por – pórovitost
POJn – pukliny otevřené s přibližnou identifikací jejich počtu
POS – systém otevřených puklin
Pr – tlak znovu otevírající trhlinu
Prh – pyrotin
Prp – pyropová komponenta
Prp. Celk – celková pravděpodobnost
PRTG – prášková difrakční rentgenografie
PS – pravá strana
Psi – zavírací tlak na trhlíně
PVJn – pukliny vyplněné s přibližnou identifikací jejich počtu
PVP – podzemní výzkumné pracoviště
PVS – systém vyhojených puklin
PXR – prášková rentgenová difrakce
PXRF – přenosný rentgen-fluorescenční analyzátor
PZ – puklinová zóna
REE – prvky vzácných zemin
REY – prvky vzácných zemin a yttrium
RFA – radiofrekvenční ablace
RQD – Rock Quality Designation
RMR – geomechanická klasifikace hornin (Rock Mass Rating)
RT – rudní těleso
RTG – rentgen
S – foliace
Se – Selen
sec – vteřiny
SFS – Secondary Filled Fractures Thin-Small
SFT – Secondary Filled Fractures Thick
SGG – SG Geotechnika, a.s.
SHN – stěny vrtu hladké
SHP – stěny vrtu víceméně hladké
S-JTSK – systém jednotné trigonometrické sítě katastrální
SMO – systém managementu organizace
SMOW – Standard Mean Ocean Water
SP – střížná puklina
SPKH – stěny vrtu výrazně porušené
s. p. – státní podnik
Sph – sfalerit
SPP – systémový pracovní postup
Sps – spessartinová komponenta
SPTH – serpentinit
S – sever
SSB – (Inset)
SSV – severoseverovýchod
SSZ – severoseverozápad

S – šikmo (pro část FMV)
sulf – sulfidy
SUSC – susceptibilita
SÚRAO – Správa uložišť radioaktivních odpadů
SV – severovýchod
sw – software
SZLAB – středisko zkušebních laboratoří
SZ – severozápad
Sr – Stroncium
TIMS – Thermal ionization mass spectrometry
t – tuna
TTG – tonalit- trondhjemit-granodiorit
U – Uran
UCS – (FMV)
ÚGN – Ústav geoniky AV ČR, v. v. i.
ÚJV – ÚJV Řež, a.s.
URT – uzel rudního tělesa
 V_s – celkový objem látky
 V_p – objem pórů
VJV – východojihovýchod
vl. – vlasová
VO – velkoobjemový
VSV – východoseverovýchod
VTZ – vodní tlakové zkoušky
Výkl. Roz – výklad rozptylu
XAb – podíl albitové komponenty
XAn – podíl anortitové komponenty
XMg – obsah hořčíku
XRF – rentgen-fluorescenční analýza
Z – zlom
ZBZS – závodní báňská záchranná služba
ZDM – základní důlní mapa
ZJZ – západojihozápad
ZSZ – západoseverozápad
ZZ – zlomová zóna
1D – jednorozměrný
2D – dvourozměrný
3D – trojrozměrný, prostorový

Abstrakt

Závěrečná zpráva projektu „Získání dat z hlubokých horizontů dolu Rožná“ prezentuje výsledky studia vlastností horninového masivu s ohledem na přítomnost významné tektonické zóny. Studium se zaměřilo na změnu vlastností v okolí tzv. první zóny ložiska Rožná, ale také na změnu těchto vlastností s hloubkou na úrovni 12.–24. patra bývalého dolu, resp. v intervalu 550–1200 m pod povrchem. Realizované práce zahrnují geologický, petrografický, geochemický popis horninového prostředí, geofyzikální práce (zejm. seismika), studium fyzikálně mechanických vlastností hornin, transportní experimenty a ložiskovou revalidaci ložiska Rožná. Veškeré práce byly provedeny pro účely popsání studované zóny a jejího projevu s důrazem na prokázání bezpečnosti potenciálního umístění hlubinného úložiště

Klíčová slova

Hluboké horizonty, důl Rožná, zlom, porucha, ovlivnění horninového masivu, seismická tomografie, transportní experimenty, DFN model, 3D model, migmatitizovaný vulkanosedimentární komplex, difuze, sorpce, radionuklidy, pórová voda, prognóza zdrojů uranu, vývoj uranové mineralizace s hloubkou, fyzikální a mechanické vlastnosti hornin, vlastnosti horninového masivu, anizotropie horninového masivu, kvalita horninového masivu, napětově-deformační stav horninového masivu, měření napětí in situ, zóna poškození ražbou (EDZ), pórový prostor horniny, rentgenová počítačová mikrotomografie, vrtný georadar, seismokarotáž, seismická refrakční tomografie

Abstract

Final Report of the Project „Data Acquisition from the Deep Horizons of the Rožná Mine“ presents the results of the study of rock mass properties with respect to the presence of a significant tectonic zone. The study focused on the change of properties in the vicinity of the so-called first zone of the Rožná deposit, but also on the change of these properties with a depth of 12–24. floor of the former mine, 550-1200 m below the surface. Realized works included geological, petrographic, geochemical description of the rock environment, geophysical work (esp. seismics), study of physico-mechanical properties of rocks, transport experiments and deposit revalidation of the Rožná deposit. All work was carried out for the purpose of describing the studied zone and its manifestation with an emphasis on ensuring the safety of the potential location of the deep geological repository.

Keywords

Deep horizons, Rožná mine, fault, migmatitised volcano-sedimentary complex, diffusion, sorption, radionuclides, pore water, uranium resources assessment, evolution of uranium mineralization with depth, physical and mechanical properties of rocks, rock mass properties, rock mass anisotropy, rock mass quality, stress-strain state of the rock mass, in situ stress measurements, Excavation Damaged Zone (EDZ), rock pore space, X-ray computed microtomography, Borehole Georadar, Vertical Seismic Profile, Seismic Refraction Tomography

1 Obecné vymezení projektu

1.1 Náplň a cíl zakázky

Náplní prací bylo získání unikátních prostorových geologických dat z uranového dolu Rožná, který je nyní ve stádiu útlumu. Získaná data poskytují informace o prostorové distribuci geologických, geotechnických, geochemických a transportních vlastností horninového prostředí v různých hloubkových úrovních dolu Rožná a definování homogenních horninových bloků. Dále umožňují stanovení obálky porušení vybrané tektonické poruchy (první zóny) a popis zóny porušení, tzv. EDZ, v prostředí blízkém nedaleké potenciální lokalitě HÚ Kraví hora. Zároveň práce zahrnují také ložiskovou revalidaci území. Součástí provedených prací byly také rešeršní práce a shrnutí dostupných archivních materiálů, popisy přístupných podzemních prostor v okolí první zóny na 12.–24. patře dolu, laboratorní práce na odebraných horninových vzorcích a práce v podzemí.

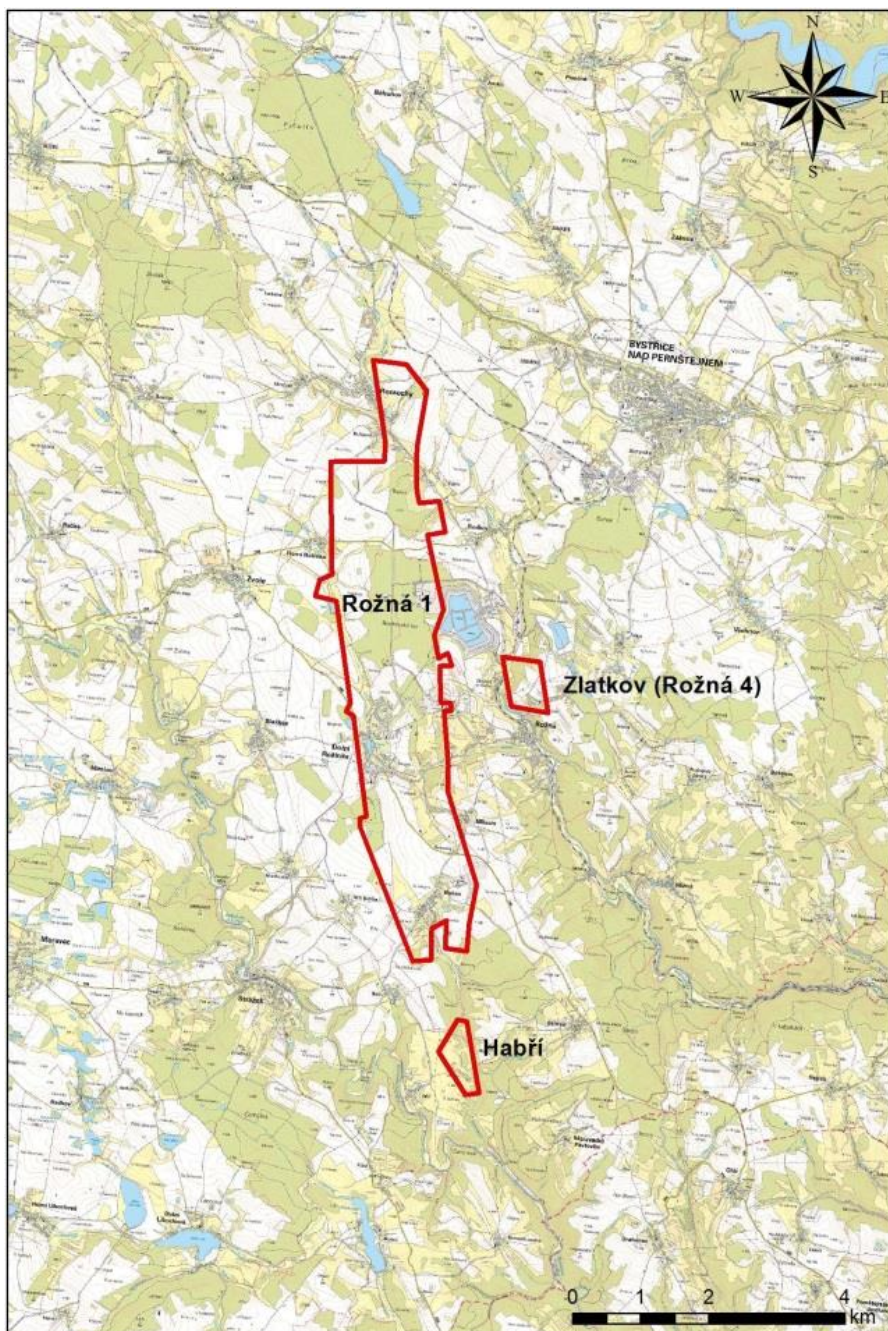
Cílem projektu bylo získání informací o prostorové distribuci geologických, geotechnických, geochemických a transportních vlastností horninového prostředí v různých hloubkových úrovních dolu Rožná v rozsahu 12. až 24. patra, pochopení vlivu významnější tektonické zóny na porušení horninového masivu pro účely lokalizace a hodnocení bezpečnosti lokality HÚ prostřednictvím získaných vlastností horninového prostředí, sledování vývoje geotechnických a geochemických parametrů horninového prostředí s hloubkou, definování homogennějších horninových bloků v rozsahu přístupných prostor, popis zóny EDZ a ložisková revalidace.

1.2 Lokalizace prací

Práce byly realizovány v bývalém hlubinném uranovém dolu Rožná, resp. v jeho kontrolovaném pásmu. Důl Rožná se nachází na Vysočině poblíž obce Dolní Rožínka a je v majetku DIAMO, s.p., o.z. GEAM, s jehož pracovníky byly práce realizovány v úzké součinnosti. V podzemí se práce soustředily na oblast mezi jámami R-7S a R-3 na úrovni 12.–24. patra dolu, tj. cca 600–1200 m pod zemským povrchem. V rámci dílčích prací pak byla zpracovávána archivní data také z ložisek Zlatkov a Habří a dokumentace vrtných jader proběhla ve Skladu hmotné dokumentace SÚRAO. Zpracování dat a laboratorní práce pak proběhly na pracovištích jednotlivých členů Společnosti Hluboké horizonty Rožná a jejich poddodavatelů. Lokalizace dílčích prací je popsána dále v jednotlivých kapitolách, zejména v kapitolách 2.1.3 a 2.1.4.

Studovaná porucha R1 (tzv. první zóna) je jednou ze směrných kataklazitových zón směru zhruba S–J až SSZ–JJV s úklonem 45–70° k Z až ZJZ. Tyto zóny mají mocnost od milimetrů až po několik metrů (maximálně 30 m) a jsou vyplněny grafitickými, koherentními i inkoherentními kataklazity a tektonickou brekcií. Směrná délka těchto zón, na které je vázána hlavní část rozptýlené uranové mineralizace, dosahuje až 15 km (Kříbek a Hájek 2005). Z hlediska zrudnění je zóna R1 jednou z hlavních rudonosných struktur ložiska Rožná. Zrudnění zde tvoří převážně minerály uraninit a coffinit, které jsou rozptýlené v silně chloritizovaných, hematitizovaných, limonitizovaných, argilitizovaných, grafitizovaných a pyritizovaných horninách. Průměrná mocnost rudních těles na zóně R1 se pohybuje okolo 3,5 m, ta jsou nejčastěji vázána na místa, ve kterých se mění sklon, a/nebo na místa protínání zón s diagonálními strukturami. Z hlediska

množství karbonátů na této struktuře se pohybujeme v rozmezí 5–10 % obj. Tyto karbonáty je možné nalézt rozptýleně v jemnozrnné matrix kataklazitů, nebo tvoří prožilky o mocnosti až několika cm. Ve strukturním podloží zóny R1 je výrazně vyvinutý systém puklin a drobných dislokací s úklonem 66–80° k SZ i JV. Jejich dosah se pohybuje nejčastěji v rámci pouhých desítek metrů a často jsou ukončovány právě na struktuře R1. Typickou výplní těchto struktur jsou karbonátové minerály a zároveň je častá přítomnost starší (předuranové) sulfidické mineralizace a sericitizace hornin v jejich okolí. Mezi zónami R1 a R4 probíhají na ložisku ve směrech 320–340° a s úklonem 55–90° systémy zpeřených struktur, které mají mocnost pod 3 m (Kříbek a Hájek 2005). Dále v textu je studovaná zóna popisována obvykle jako první zóna, případně zóna R1.



Obr. 1 Lokalizace dolu Rožná a úseků Habří a Zlatkov na topografickém podkladu (ČÚZK)

2 Postup řešení projektu

2.1 Přípravné práce

V rámci prvního dílčího plnění zakázky byl sestaven realizační projekt prací (Švagera a Bukovská eds. 2018; Elektronická příloha 1) a plán kvality projektu (Vaněček et al. 2018; Elektronická příloha 2). V realizačním projektu byl uveden harmonogram projektu, dle kterého byly práce vymezeny pro dílčí plnění a etapy prací (Obr. 2). Pro přípravu realizačního projektu prací byly provedeny dílčí terénní práce. V druhém dílčím plnění pak byla vyhotovena rešerše, která zpracovala dostupné podklady z archivů DIAMO z oblasti studované v rámci tohoto projektu.

2.1.1 Rešeršní práce

V rámci druhého dílčího plnění byly zpracovány archivní materiály dostupné v rámci archivu DIAMO s.p. a dále materiály z dalších zdrojů (diplomové práce v dané oblasti, odborné články apod.). Výstupem byla Zpráva o vyhodnocení archivních podkladů – získání dat z hlubokých horizontů dolu Rožná (Navrátil a Bukovská eds. 2018; Elektronická příloha 3). Tyto materiály byly využity pro tvorbu 3D geologického a ložiskového modelu, pro ložiskovou revalidaci a pro dílčí vyhodnocení dat z dalších částí projektu.

V rámci zprávy byly digitalizovány archivní materiály, které jsou také obsahem elektronických příloh této zprávy (Navrátil a Bukovská eds. 2018; Elektronická příloha 3). Zpracování materiálů se zaměřilo na podklady, které byly využity pro tvorbu 3D geologického a ložiskového modelu a dalších výstupů a interpretace dat. Jednalo se zejména o následující:

- základní důlní mapy (ZDM – měřické) v měřítku 1 : 1 000 včetně jejich usazení v souřadnicovém systému S–JTSK a včetně legendy;
- geologická dokumentace vynesena do geologické ZDM včetně legendy;
- prvotní dokumentaci horizontálních ražeb vybraných úseků důlních děl k rekognoskaci v měřítku 1 : 200;
- vertikální projekce jednotlivých rudonosných systémů v měřítku 1 : 1 000 s referenčními body;
- příčné řezy 1 : 1 000 ve formě provozní dokumentace;
- databáze zahrnující kovnatost, mocnost a koeficienty zrudnění jednotlivých rudních těles (RT), resp. uzlů rudních těles (URT);
- přepočet zásob k 1. 1. 2018;
- generální výpočet zásob z roku 1984;
- rozsah patrových ražeb ve formátu DXF;
- geologická mapa povrchu v měřítku 1 : 5 000 v rozsahu budoucího 3D geologického modelu;
- strukturně geologická mapa rudního pole Rožná – Olší v úrovni cca 600 m pod povrchem;
- přehled dalších publikovaných prací;
- rešerše zahrnující základní charakteristiku ložiska.

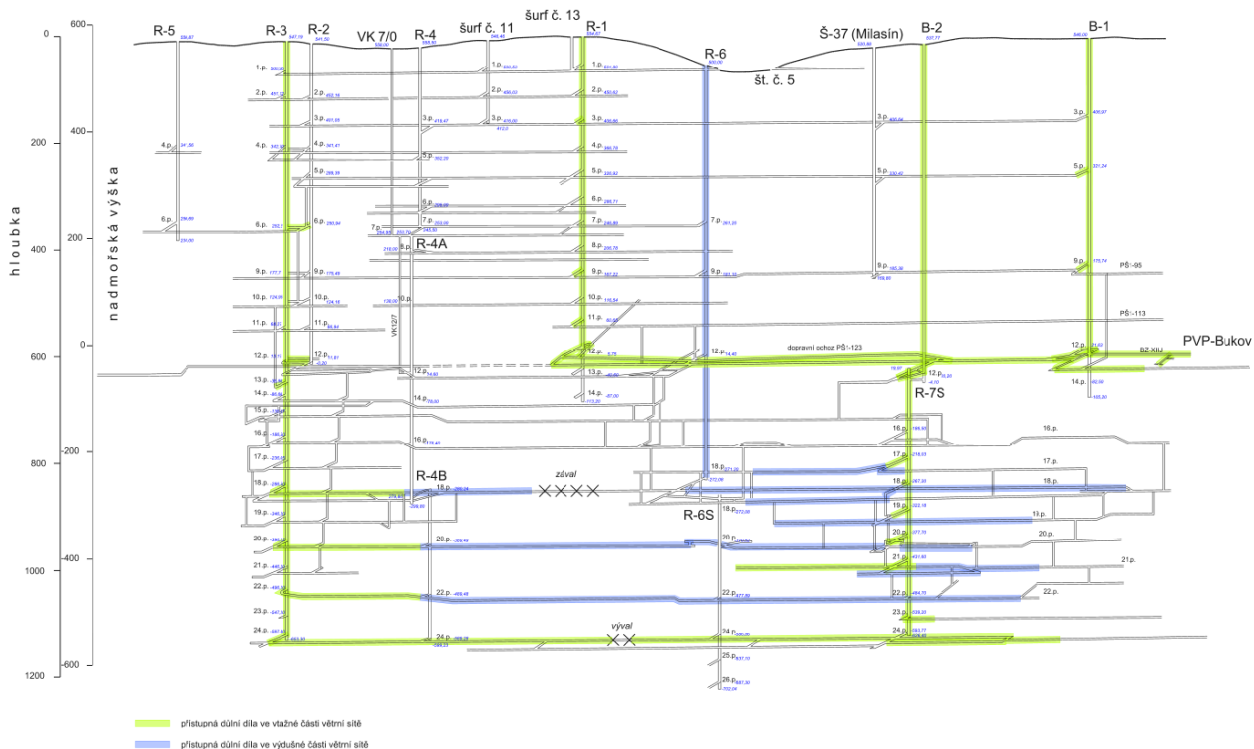
2.1.2 Terénní práce – rekognoskace

V průběhu listopadu 2017 byly provedeny rekognoskační práce, které vedly k určení míst pro geotechnické stanice a odběry velkoobjemových vzorků a také pro přípravu a upřesnění Realizačního projektu prací (Švagera a Bukovská eds. 2018). Pro studium vlivu poruchové zóny byla zvolena v prostorách bývalého dolu nejlépe přístupná porucha R1, tzv. první zóna. V rámci dvou fází byly stanoveny lokace výsledných geotechnických stanic tak, aby se nacházely v co nejpodobnějším horninovém prostředí zejména stran litologie v různých vzdálenostech od první zóny (viz Obr. 10 – Obr. 14). Také v rámci těchto dokumentací byla posbírána první strukturní data, která byla součástí Realizačního projektu prací (Švagera a Bukovská eds. 2018).

2.1.2.1 Rekognoskované a přístupné prostory dolu Rožná

V rámci řešení projektu se práce dle zadání soustředily na prostory dolu mezi 12. a 24. patrem, a to zejména na studovaný horninový blok na 20. patře a lokace geotechnických stanic. Vzhledem k tomu, že důl Rožná je ve stadiu útlumu, nebylo možné využít veškerých prostor. Práce se omezily na přístupné a průchozí chodby ve vtažné části větrní sítě (Obr. 3). Pro účely strukturně geologické dokumentace pak byly studovány veškeré přístupné prostory dle dohody s pracovníky DIAMO s.p. Lokalizace dílčích prací je uvedena v kapitole 1.2 a v odpovídajících kapitolách dále.

Schéma rozfárání a propojení jam ložiska Rožná



Obr. 3 Schéma dolu Rožná s rozsahem přístupných chodeb: axonometrický plán (zdroj DIAMO s. p.); zeleně jsou vyznačeny přístupné a průchozí chodby ve vtažné části větrní sítě, modře pak chodby přístupné ve výdušné části větrní sítě a pouze pro účely dokumentace

2.1.3 Lokalizace studovaného bloku, GS a odběrných míst

V rámci rekognoskačních prací byla naplánována lokalizace jednotlivých geotechnických stanic a míst odběru velkoobjemových vzorků (Obr. 10, Obr. 11, Obr. 12, Obr. 13, Obr. 14). Důraz byl kladen na výběr míst s co nejjednodušší litologií pro dobrou srovnatelnost výsledků analýz napříč hlubokými horizonty. To bylo bohužel velmi komplikované naplnit, s ohledem na pestrout litologickou stavbu oblasti.

Geotechnické stanice byly plánovány umístit do litologicky obdobného prostředí tak, aby získaná data byla srovnatelná. Jednotlivé GS tak byly umístěny na 12., 18., 20., 22. a 24. patře na místech určených v rámci rekognoskace (viz Realizační projekt prací Švagera a Bukovská eds. 2018; Elektronická příloha 1).

Na 20. patře byl vybrán dobře přístupný horninový blok, do kterého zasahuje první zóna, jejíž vliv je v projektu hodnocen. Tento blok je vymezen překopem Z3-XX a chodbami PŠ1-203 a RV4 20-101. V rámci tohoto bloku byly v oblasti jámy R-7S na překopu Z3-XX umístěny dvě geotechnické stanice v nadloží první zóny GS20/1 a GS20/2 (Obr. 10). Dále byly geotechnické stanice umístěny v podloží první zóny poblíž jámy B-2 na 12. patře na dopravním ochozu PŠ1-123 (Obr. 11), na 18. patře poblíž jámy R-7S na překopu Z3-XVIII v podloží první zóny (Obr. 12), na 24. patře v podloží první zóny poblíž jámy R-7S na překopu Z3-XXIV (Obr. 14).

Velkoobjemové vzorky pak byly odebrány obvykle na stěnách protějších geotechnickým stanicím.

2.1.3.1 Lokalizace a popis studovaného bloku

Pro detailní studium ovlivnění horninového masivu první zónou byl vybrán ze tří stran přístupný horninový blok omezený překopy Z3-XX ze severu, RV4 20-101 z jihovýchodu a PŠ1-203 z východu (Obr. 4). V této oblasti je první zóna zastížena na zhruba 30–40 m od křížení Z3-XX s PŠ1-203 a na cca 20–30 m RV4 20-101 od křížení s PŠ1-203. Zóna se projevuje silnou grafitizací a ve většině svého křížení s překopy je zapažená. Lokálně ji ze západní strany doprovází odžilek pozorovatelný na Z3-XX.

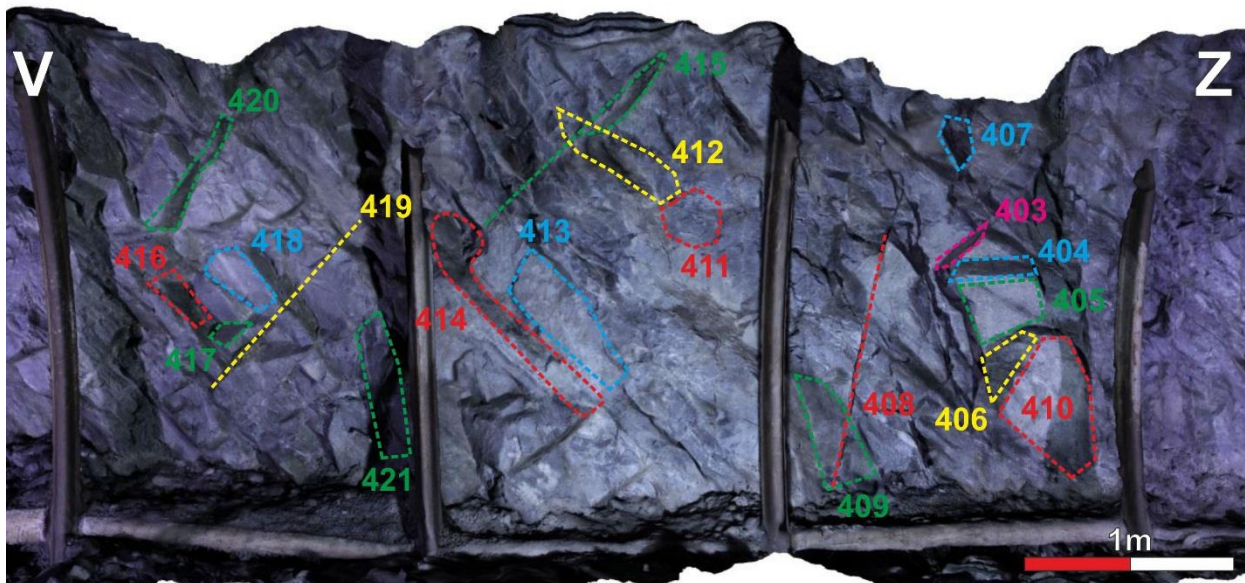
V souvislosti s popisem bloku na 20. patře bylo také naplánováno provedení seismického řezu přes tento blok mezi dílčími překopy (PŠ1-203, RV4 20-101, Z3-XX) a také šikmý řez mezi Z3-XX a Z3-XXI vedený skrze komín R-1-21/20-95P mezi těmito patry.

Detailní pohled na studovaný blok umožňuje Elektronická příloha 153. V daném bloku jsou zastoupeny zejména migmatitizované biotitické pararuly až amfibol-biotitické pararuly.

2.1.3.2 Lokalizace a popis geotechnických stanic

GS20/1

Geotechnická stanice GS20/1 se nachází na překopu Z3-XX (Obr. 10) v prostředí migmatitizovaných biotitických pararul až amfibol-biotitických pararul. Prostředí geotechnické stanice je zdokumentováno na Obr. 4, včetně vyznačení a dokumentace významnějších strukturních prvků v okolí (Tab. 1). Přesné zaměření jednotlivých vrtů je uvedeno v Elektronická příloha 152.



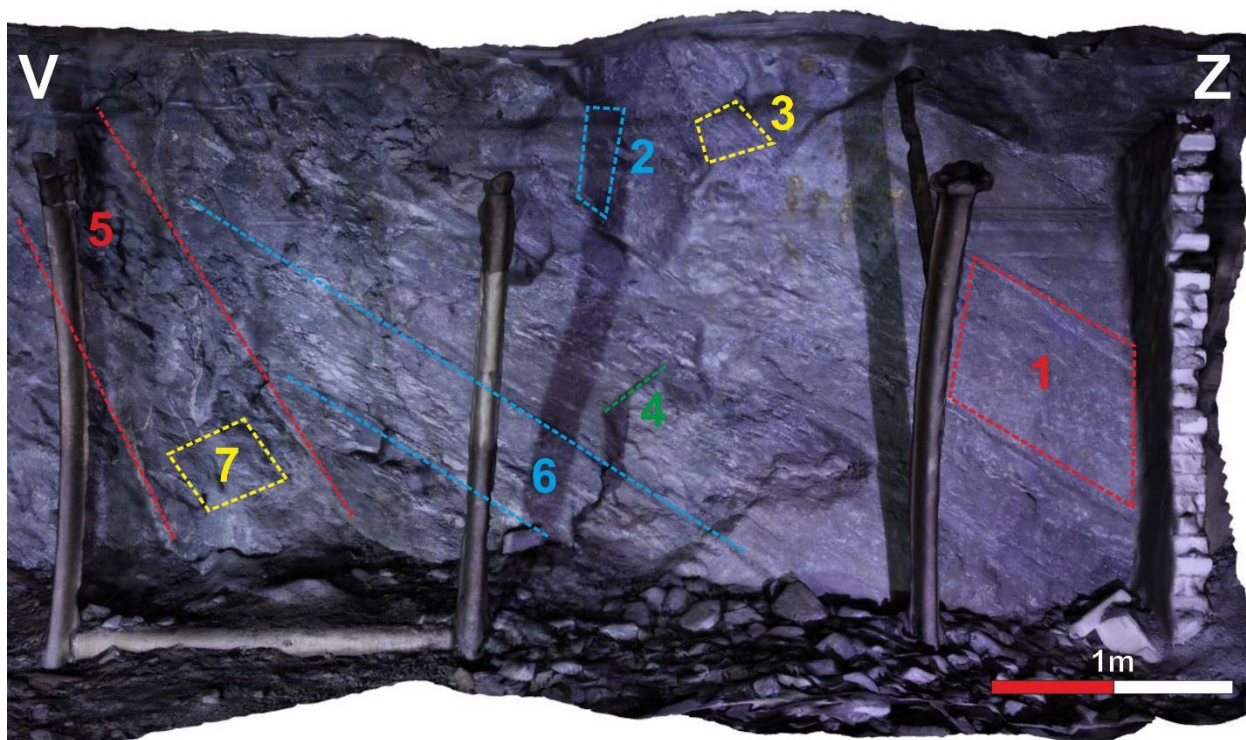
Obr. 4 Pohled na okolí geotechnické stanice GS20/1 s vyznačenými výraznějšími strukturními prvky, jejichž charakteristika je uvedena v Tab. 1

Tab. 1 Charakteristika strukturních prvků v okolí GS20/1 (orientace struktur ve formátu směr sklonu/sklon)

Číslo struktury	Metráž [m]	Průběh	S typ	Orientace struktury		Ukončení pukliny	Mocnost výplně [mm]	Výplň
403	9,6	n	P	120	42	S	3	cc,chl
404	9,6	n	P	0	43	403	vl.	chl
405	9,6	n	P	188	79	403	vl.	cc
406	9,8	n	SP	55	84		2	cc,chl
407	9,4	n	P	288	62	S	1	cc,chl
408	9,0	n	P	85	79	S	2	cc,chl
409	8,8	n	P	318	80	S	1	cc,chl
410	9,9	n	P	172	77		1	cc,chl
411	8,1	n	P	325	74		2	cc,chl
412	8,1	n	P	154	82	S	1	cc,chl
413	7,3	n	P	355	87	S	1	cc,chl
414	7,4	p	SP	312	55		1	cc,chl
415	7,7	n	P	118	45	415	1	cc,chl
416	6,3	p	SP	286	62		1	cc,chl
417	6,3	n	P	15	44	S	vl.	cc,chl
418	6,3	n	P	194	68	417		
419	6,2	n	P	100	43	S	1	cc,chl
420	5,9	n	P	114	48	S	2	cc,chl
421	6,7	n	P	229	80			

GS20/2

Geotechnická stanice GS20/2 (Obr. 5) se nachází na překopu Z3-XX (Obr. 10) v prostředí migmatizovaných biotitických pararul až amfibol-biotitických pararul. Prostředí geotechnické stanice je zdokumentováno na Obr. 5, včetně vyznačení a dokumentace významnějších strukturních prvků v okolí (Tab. 2). Přesné zaměření jednotlivých vrtů je uvedeno v Elektronická příloha 152.



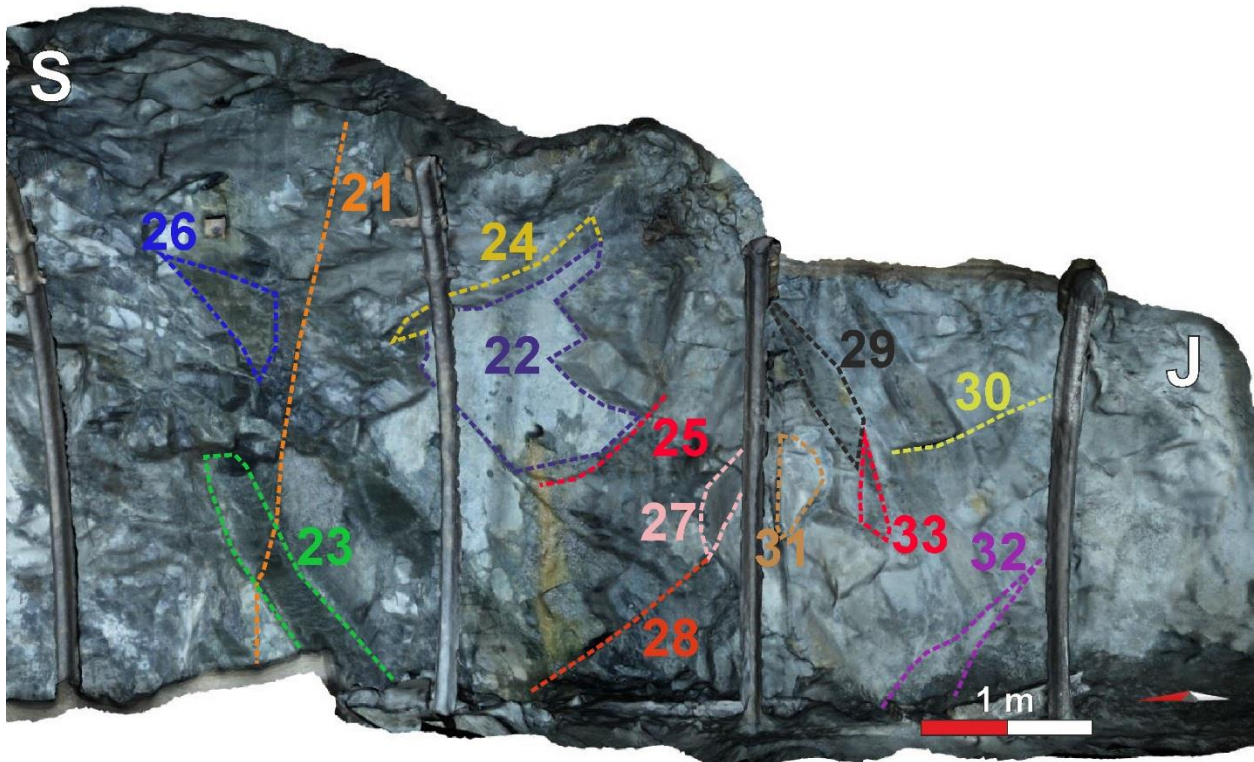
Obr. 5 Pohled na okolí geotechnické stanice GS20/2 s vyznačenými výraznějšími strukturálními prvky, jejichž charakteristika je uvedena v Tab. 2

Tab. 2 Charakteristika strukturálních prvků v okolí GS20/2 (orientace struktur ve formátu směr sklonu/sklon)

Číslo struktury	Metráž [m]	Průběh	S typ	Orientace struktury		Ukončení pukliny	Mocnost výplně [mm]	Výplň
1	124,2	p	P	354	72		vl	cc
2	122,8	p	P	210	81		2	cc
3	123,2	n	P	146	88	1	1	cc,sulf
4	122,8	n	P	117	45			
5	120	p	ZZ	201	78		30	kataklaizity, jíł, chl, cc, jíł.min.
6	120,6	p	P	345	86	S		
7	120,9		P	320	62			

GS12

Geotechnická stanice GS12 se nachází na dopravním ochozu PŠ1-123 v blízkosti staničení 930 m (Obr. 11) v prostředí biotiticko-amfibolických pararul až pyritizovaných kvarcitických rul. Prostředí geotechnické stanice je zdokumentováno na Obr. 6, včetně vyznačení a dokumentace významnějších strukturálních prvků v okolí (Tab. 3). Přesné zaměření jednotlivých vrtů je uvedeno v Elektronická příloha 152.



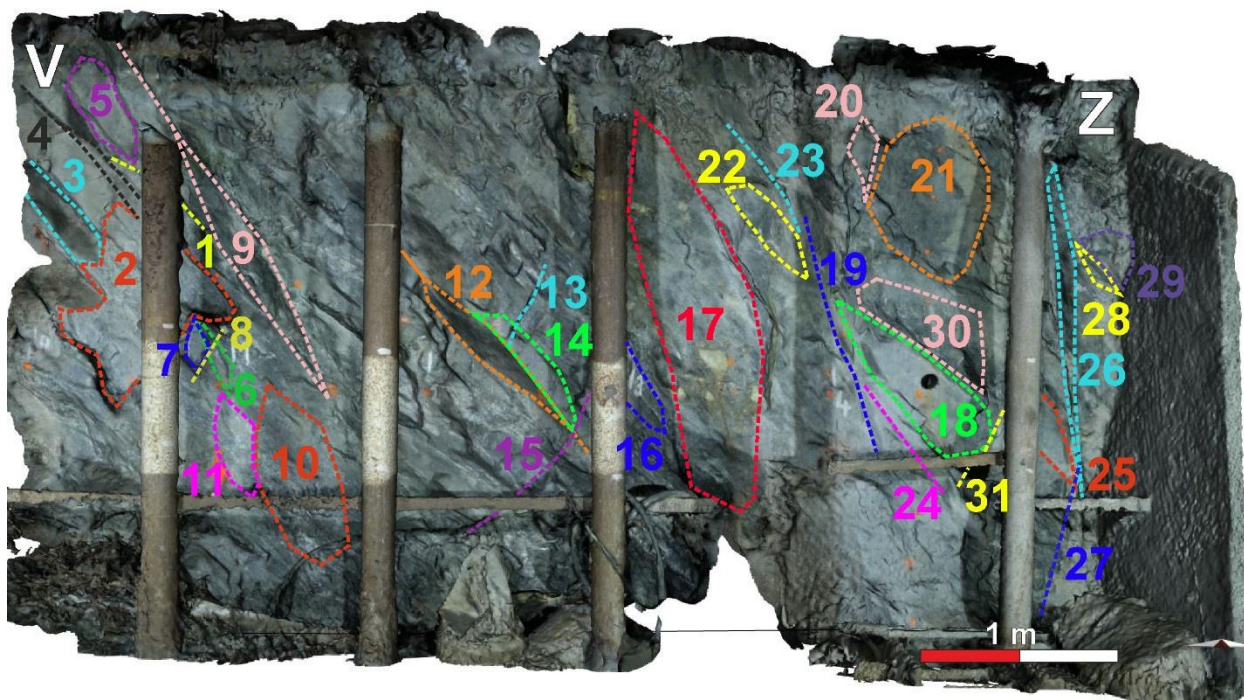
Obr. 6 Pohled na okolí geotechnické stanice GS12 s vyznačenými výraznějšími strukturálními prvky, jejichž charakteristika je uvedena v Tab. 3

Tab. 3 Charakteristika strukturálních prvků v okolí GS12 (orientace struktur ve formátu směr sklonu/sklon)

Číslo struktury	Metráž [m]	Průběh	S typ	Orientace struktury		Ukončení pukliny	Mocnost výplně [mm]
21	4,1	p	P	329	73		
22	3	p	P	293	86		1
23	4,1	p	P	234	51		5
24	3,2	p	P	83	42		1
25	2,3	p	P	64	53	S	
26	4,1	p	SP-Z	237	62		
27	1,9	p	P	347	79		
28	2,6	p	P	67	43		1
29	1,1	p	P	237	57		
30	0,5	p	PZ	56	17	s	2
31	1	p	P	268	83	33	
32	0,5		P	250	81		
33	1,3		P	343	84		

GS18

Geotechnická stanice GS18 se nachází na překopu V3-XVIII v blízkosti staničení 370 m, cca 40 m od jámy R-7S (Obr. 12) v prostředí migmatizovaných biotiticko-amfibolických pararul až biotitických amfibolitů. Prostředí geotechnické stanice je zdokumentováno na Obr. 7, včetně vyznačení a dokumentace významnějších strukturních prvků v okolí (Tab. 4). Přesné zaměření jednotlivých vrtů je uvedeno v Elektronická příloha 152.



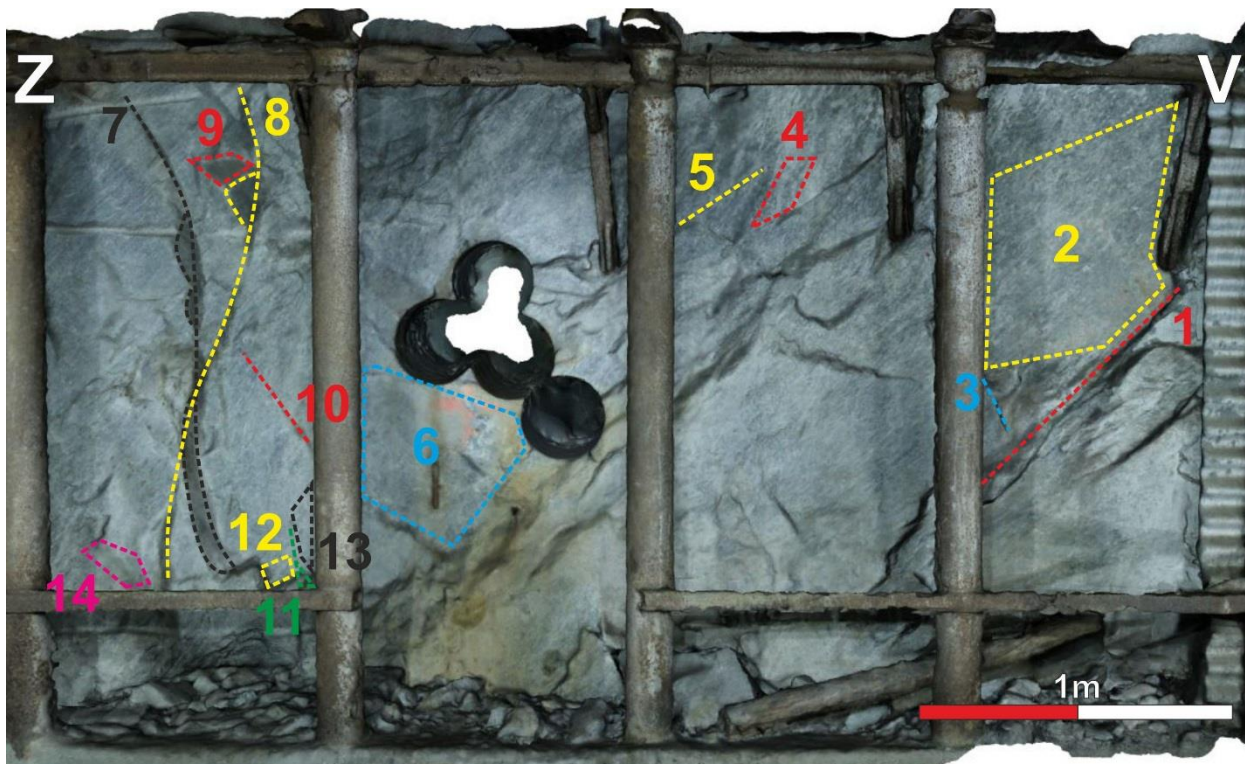
Obr. 7 Pohled na okolí geotechnické stanice GS18 s vyznačenými výraznějšími strukturními prvky, jejichž charakteristika je uvedena v Tab. 4

Tab. 4 Charakteristika strukturních prvků v okolí GS18 (orientace struktur ve formátu směr sklonu/sklon)

Číslo struktury	Metráž [m]	Průběh	S typ	Orientace struktury		Ukončení pukliny	Mocnost výplně [mm]	Výplň
1	0,6	p	S	250	52			
2	0,5	n	P	173	90		2	cc,chl,lim
3	0,3	p	P	330	60		1	cc,chl
4	0,7	p	P	262	50		1	cc
5	0,4	n	P	162	85	4	vl.	cc,chl
6	0,8	n	P	336	60	7,8	1	cc,chl
7	0,9	p	P	176	87		1	cc,chl
8	0,9	p	P	38	52		1	chl,cc
9	1,3	p	Z	250	65		60	cc,chl
10	1,4	n	P	331	65		1	cc
11	1,2	n	P	40	80		vl.	chl
12	2,3	p	P	241	46		2	cc,chl
13	2,5	n	P	98	60	S	1	cc
14	2,6	n	P	172	88	S	vl.	chl
15	2,8	n	P	86	54		1	chl,cc
16	2,9	n	P	314	70		vl.	cc
17	3	p	Z	200	75		3	cc,chl,lim
18	4,4	n	P	192	68		vl.	chl,cc
19	4,1	n	SP	254	74			chl,cc
20	4,2	n	P	120	70	21	vl.	cc
21	4,4	p	P	198	84		1	cc,chl,lim
22	3,8	n	P	332	54	23	vl.	cjl,cc
23	3,8	n	P	8	82	S	vl.	chl,cc
24	4,2	p	S	250	58			
25	5	n	P	344	75	26	vl.	chl
26	5,2	p	P	232	78		4	cc
27	5,3	n	P	295	80	26	vl.	chl
28	5,5	n	P	330	55	29		chl
29	5,4	p	P	212	64		vl.	chl
30	4,6	n	P	359	68		1,5	cc,chl
31	4,7	n	P	54	60	S	1	cc

GS22

Geotechnická stanice GS22 se nachází na překopu Z5-XXII, cca 15 m od jámy R-7S (Obr. 13) v prostředí biotitických amfibolitů až migmatitů s polohou turmalinické kvarcitické pararuly. Prostředí geotechnické stanice je zdokumentováno na Obr. 8, včetně vyznačení a dokumentace významnějších strukturních prvků v okolí (Tab. 5). Přesné zaměření jednotlivých vrtů je uvedeno v Elektronická příloha 152. Tato geotechnická stanice byla využita pro běžnou dokumentaci a odběr velkoobjemového vzorku VO22.



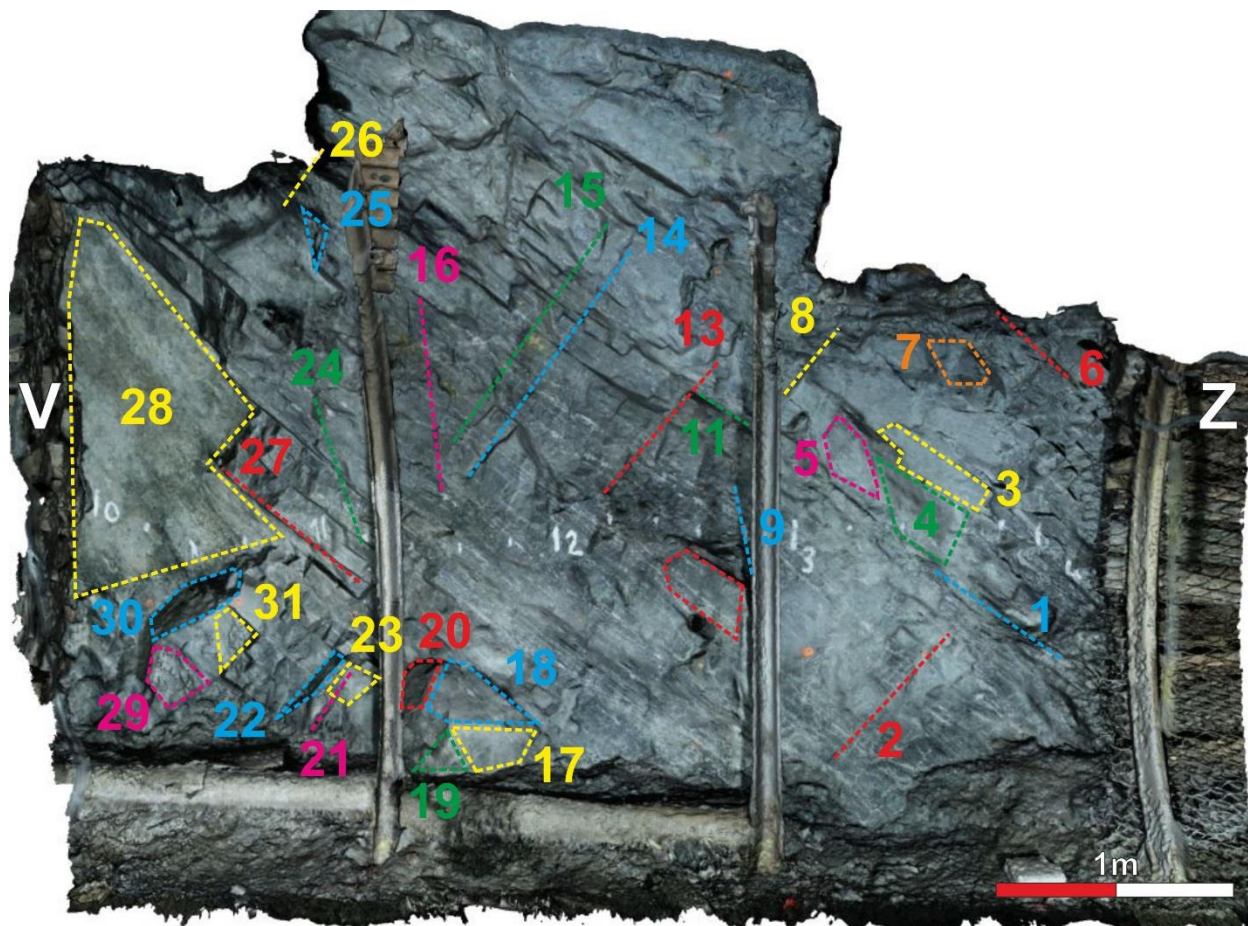
Obr. 8 Pohled na okolí geotechnické stanice GS22 s vyznačenými výraznějšími strukturními prvky, jejichž charakteristika je uvedena v Tab. 5

Tab. 5 Charakteristika strukturních prvků v okolí GS22 (orientace struktur ve formátu směr sklonu/sklon)

Číslo struktury	Metráž [m]	Průběh	S typ	Orientace struktury		Ukončení pukliny	Mocnost výplně [mm]	Výplň
1	15,2	p	S	218	51			
2	15,3	p	P	354	83		3	cc
3	15,6	n	P	60	80	S	1	cc
4	16,4	p	P	7	85		1	cc
5	16,6	p	S	216	46			
6	17,4	p	P	352	84		vl.	chl
7	18,3	p	P	102	80		2	cc,lim
8	18,1	p	P	110	89	7		
9	18,2	p	P	143	55		1	cc
10	17,7	n	P	134	60		1	chl,cc,sulf
11	17,6	n	P	104	72	10	2	chl,cc,lim
12	17,8	n	S	214	35			
13	17,5	n	P	5	73		vl.	chl,cc
14	18,4	n	P	151	75		1	chl,cc

GS24

Geotechnická stanice GS24 se nachází na překopu Z3-XXIV, cca 245 m od jámy R-7S (Obr. 14) v prostředí biotitických amfibolitů s přechody do migmatizovaných biotiticko-amfibolických až migmatizovaných pararul. Prostředí geotechnické stanice je zdokumentováno na Obr. 9, včetně vyznačení a dokumentace významnějších strukturních prvků v okolí (Tab. 6). Přesné zaměření jednotlivých vrtů je uvedeno v Elektronická příloha 152.



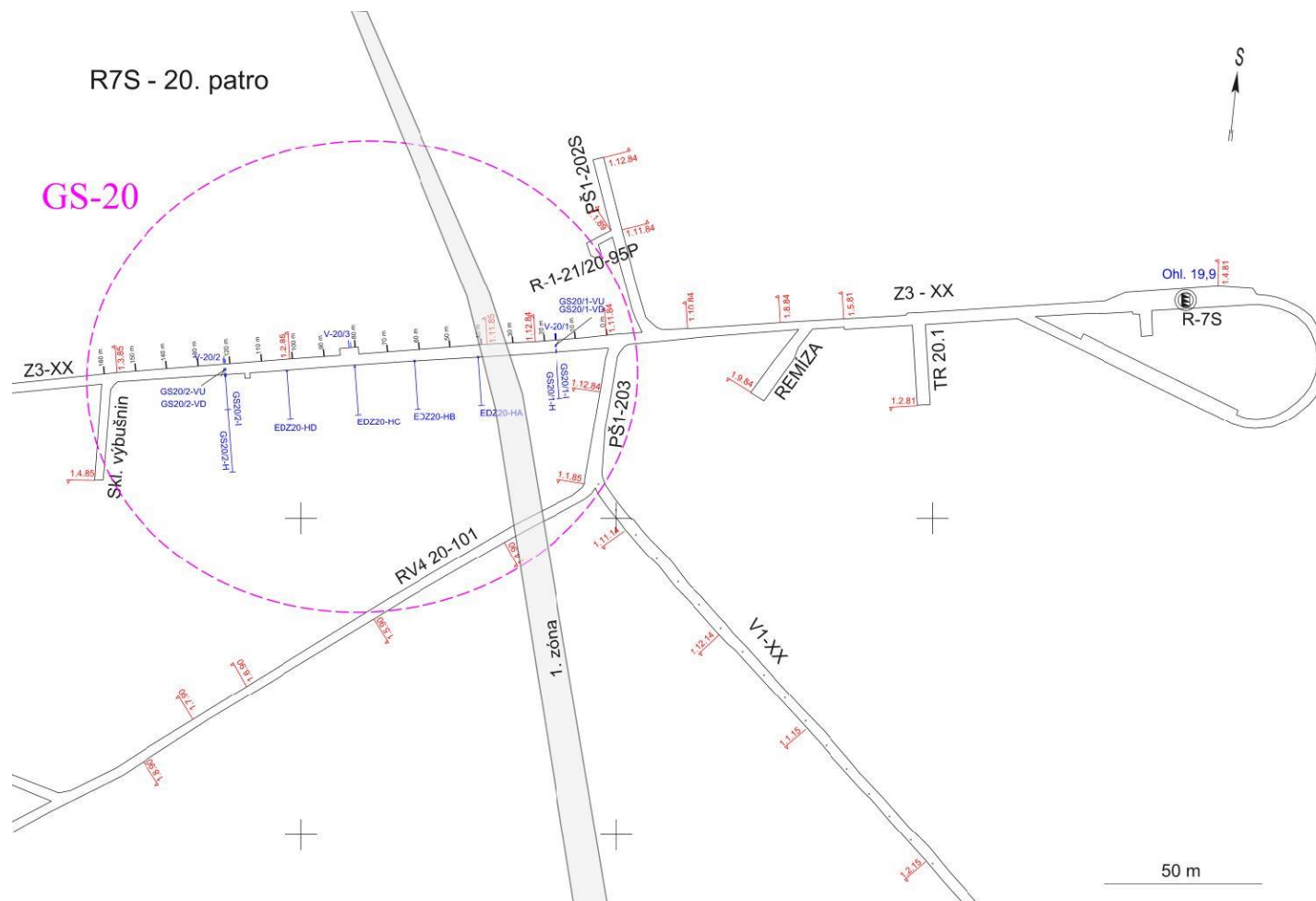
Obr. 9 Pohled na okolí geotechnické stanice GS24 s vyznačenými výraznějšími strukturálními prvky, jejichž charakteristika je uvedena v Tab. 6

Tab. 6 Charakteristika strukturních prvků v okolí GS24(orientace struktur ve formátu směr sklonu/sklon)

Číslo pukliny	Metráž [m]	Průběh	S typ	Orientace struktury		Ukončení pukliny	Mocnost výplně [mm]	Výplň
1	3,9	p	S	199	29			
2	5,9	n	P	24	65	S	vl.	chl
3	3,5	n	P	174	86	S	1	cc
4	3,4	n	P	208	56		1	cc
5	3,2	n	P	130	74	4,S	vl.	cc
6	3,8	n	P	260	52		1	cc,chl
7	3,6	n	P	312	70	S		
8	2,9	n	P	84	58		1	cc,chl
9	2,8	p	P	269	76		1	chl,lim
10	2,5	n	P	1	80		vl.	chl,cc
11	2,8	n	P	359	85		1	chl,cc,sulf
12	2,6	p	S	217	30			
13	2,4	n	P	50	60	S	1	cc,chl
14	1,8	n	P	60	55	S	vl.	chl
15	1,7	p	P	60	55		1	chl
16	1,6	p	P	39	85		1	chl
17	1,7	n	P	160	74		vl.	chl,cc
18	1,6	n	P	347	58		vl.	chl
19	1,5	n	P	40	74	S	vl.	chl
20	1,4	n	P	31	73		vl.	cc,chl
21	1,1	n	P	10	49	S	vl.	chl
22	0,9	n	P	54	48	S	1	chl,cc
23	0,6	n	P	347	75	S	1	chl
24	1,1	n	P	294	75	S	1	chl,cc
25	1	n	P	110	78		1	cc,chl
26	1	p	P	166	88		2	cc,chl,sulf
27	0,8	p	S	243	33			
28	0,2	p	SP	170	80		11	cc,chl
29	0,4	n	P	286	70	S	vl.	cc
30	0,4	p	P	27	50		vl.	chl
31	0,6	n	P	122	88	S	vl.	chl

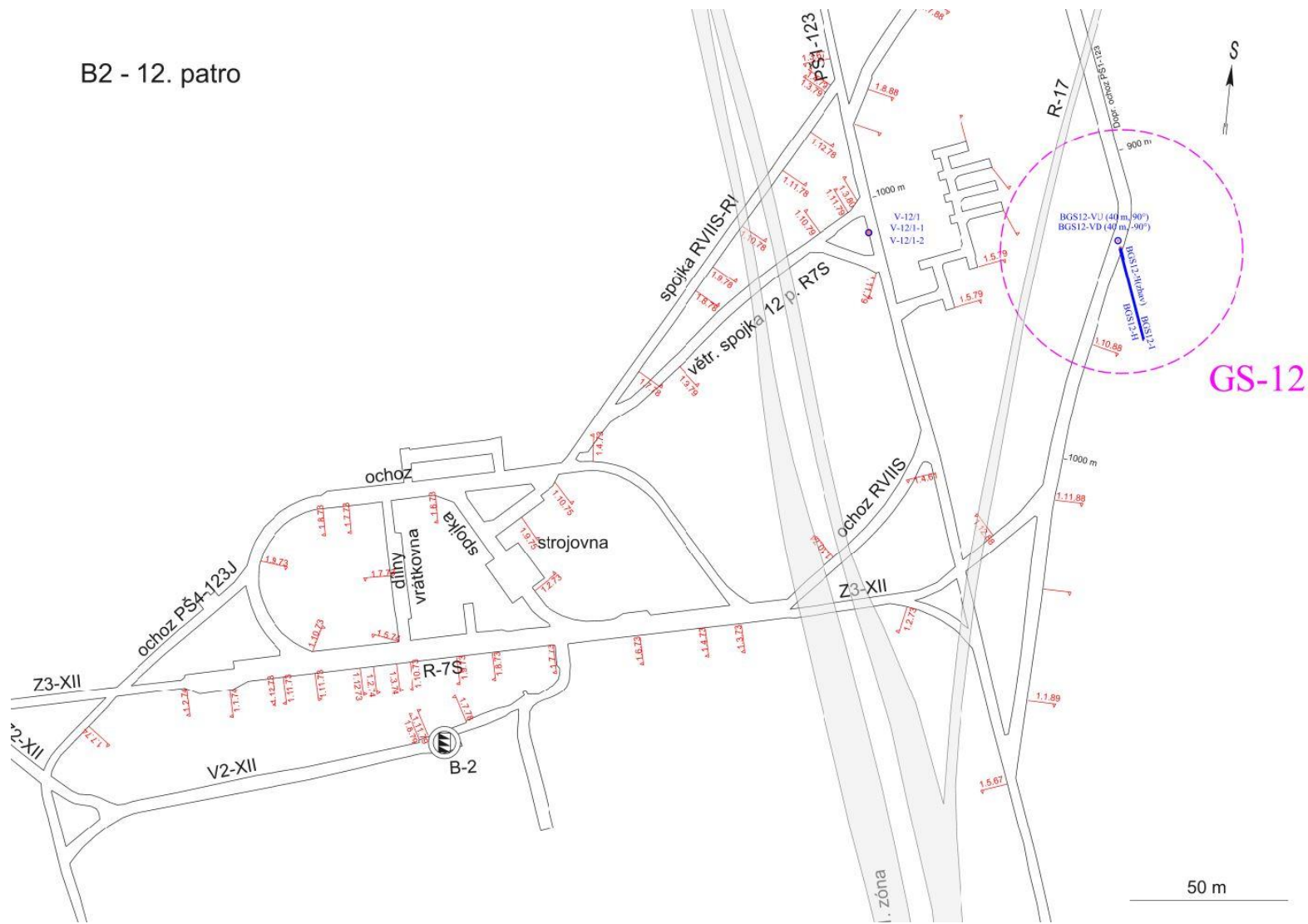
2.1.3.3 Lokalizace geofyzikálních prací

Lokalizace geofyzikálních prací vycházela z pozic jednotlivých geotechnických stanic a z prostorového vymezení přístupného horninového bloku na 20. patře. V rámci geotechnických stanic na 12., 18. a 24. patře se geofyzikální měření soustředilo na nejbližší okolí těchto stanic – k měření byly využity geotechnické vrty a také několikametrové úseky obnažených stěn štol. Provedena byla zejména seismická tomografie v různých modifikacích. V rámci prací na 20. patře bylo možné využít jednak vrty na dvou geotechnických stanicích (GS20-1, GS20-2) a také odkryté stěny výrubu ve štolách Z3-XX, PŠ1-203 a RV4 20-101. Také zde byly jako převažující součást geofyzikálních prací realizovány seismická (zejména tomografická) měření. Průzkum vertikálního horninového bloku mezi 20. a 21. patrem v úseku zhruba vymezeném geotechnickými stanicemi GS20-1 a GS20-2 byl proveden s využitím komínu 1-21/20-95p, kterým byla protažena spojovací kabelová linka. Také v tomto případě se jednalo o použití seismických metod.



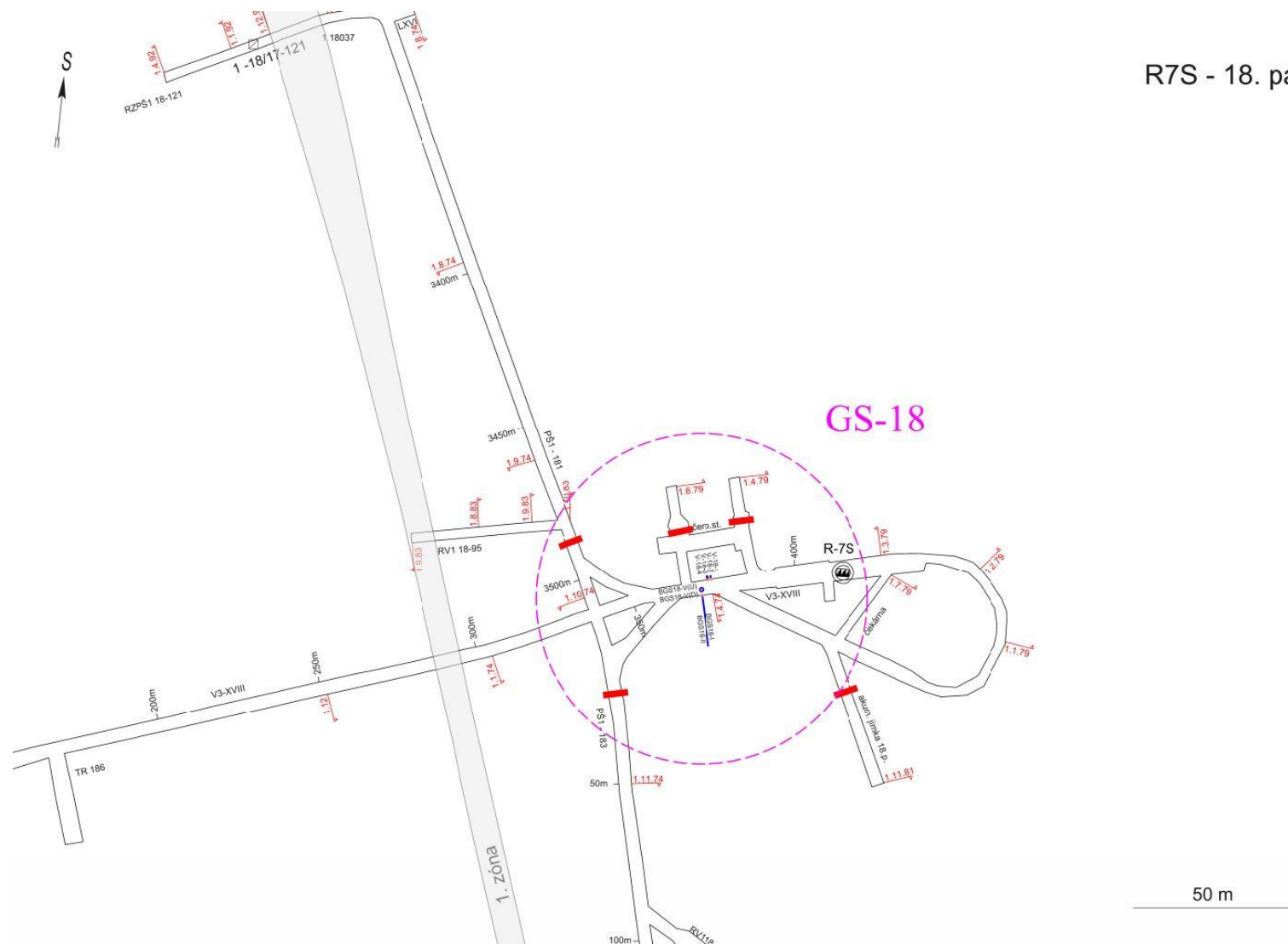
Obr. 10 Lokalizace prací na 20. patře dolu Rožná v blízkosti jámy R-7S

B2 - 12. patro



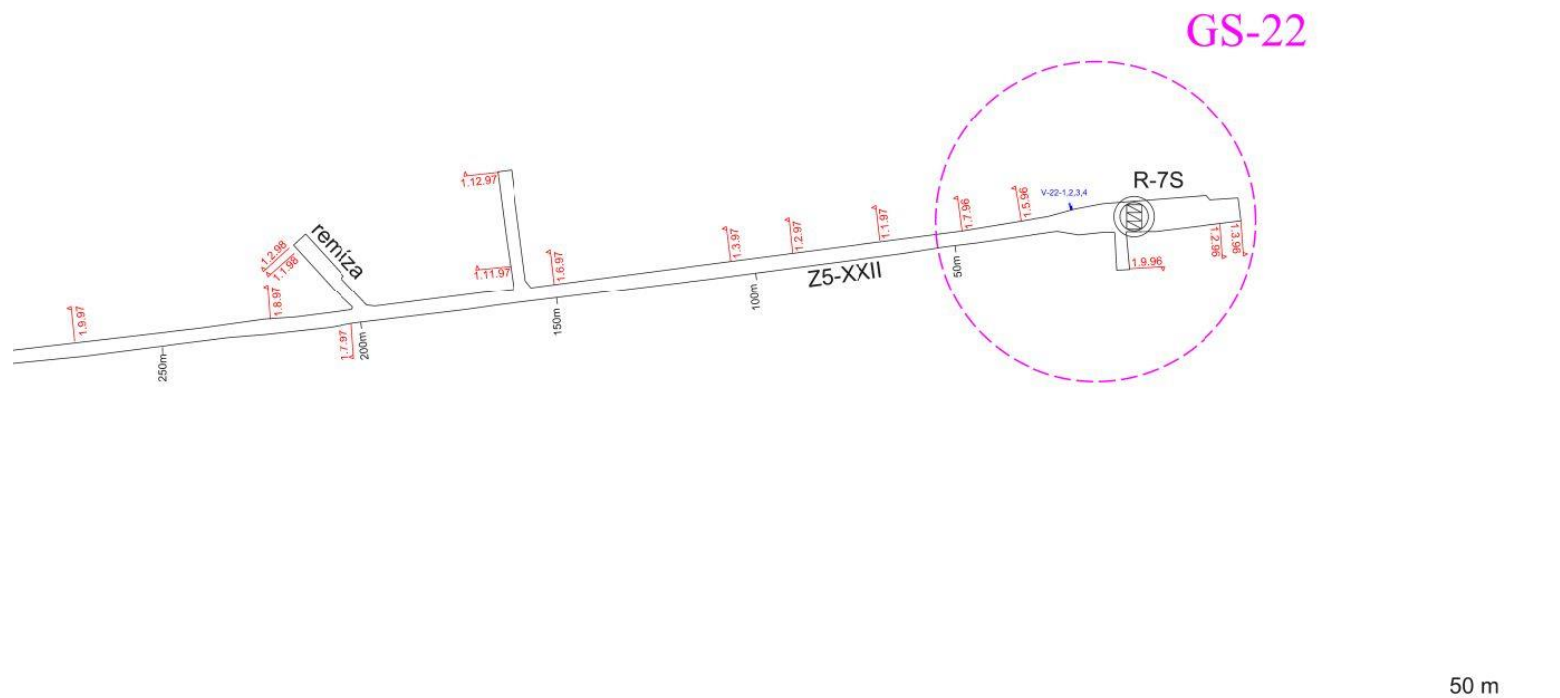
Obr. 11 Lokalizace prací na 12. patře dolu Rožná v blízkosti jámy R-7S

R7S - 18. patro

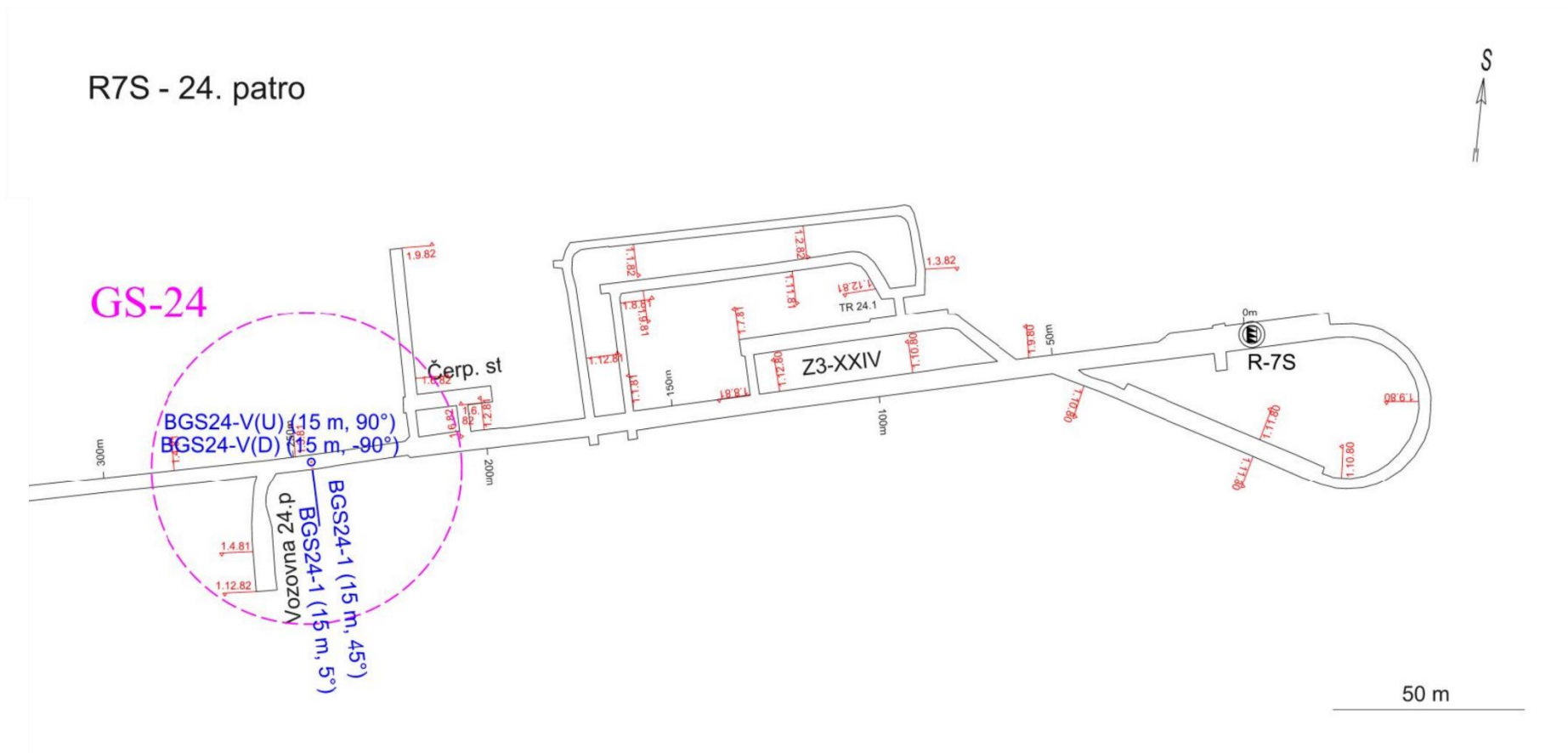


Obr. 12 Lokalizace prací na 18. p. dolu Rožná v blízkosti jámy R-7S

R7S - 22. patro



Obr. 13 Lokalizace prací na 22. p. dolu Rožná v blízkosti jámy R-7S



Obr. 14 Lokalizace prací na 24. p. dolu Rožná v blízkosti jámy R-7S

2.1.4 Realizace technických prací a odběr vzorků

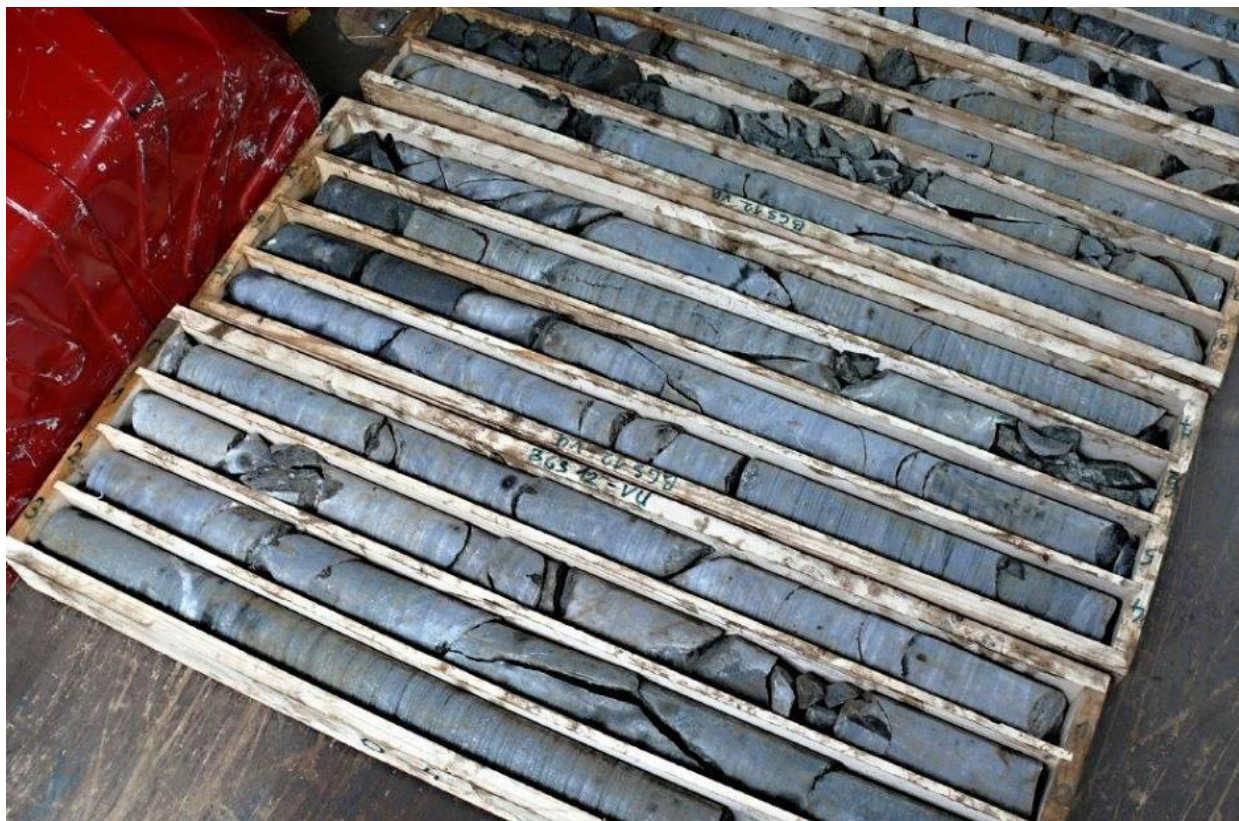
K zajištění prací v kontrolovaném pásmu dolu Rožná bylo nezbytné realizovat množství technických prací, které jsou detailně popsány v Elektronická příloha 152. Technické práce dále zahrnují realizaci vrtných prací pro šest geotechnických stanic a seismické prozařování (vrty o průměru 76 mm, celkem 534,3 bm) a velkoobjemové vrty pro odběr vzorků zejména na geotechnické zkoušky (průměr 300 mm, celkem 35 m; Obr. 15 – Obr. 20).



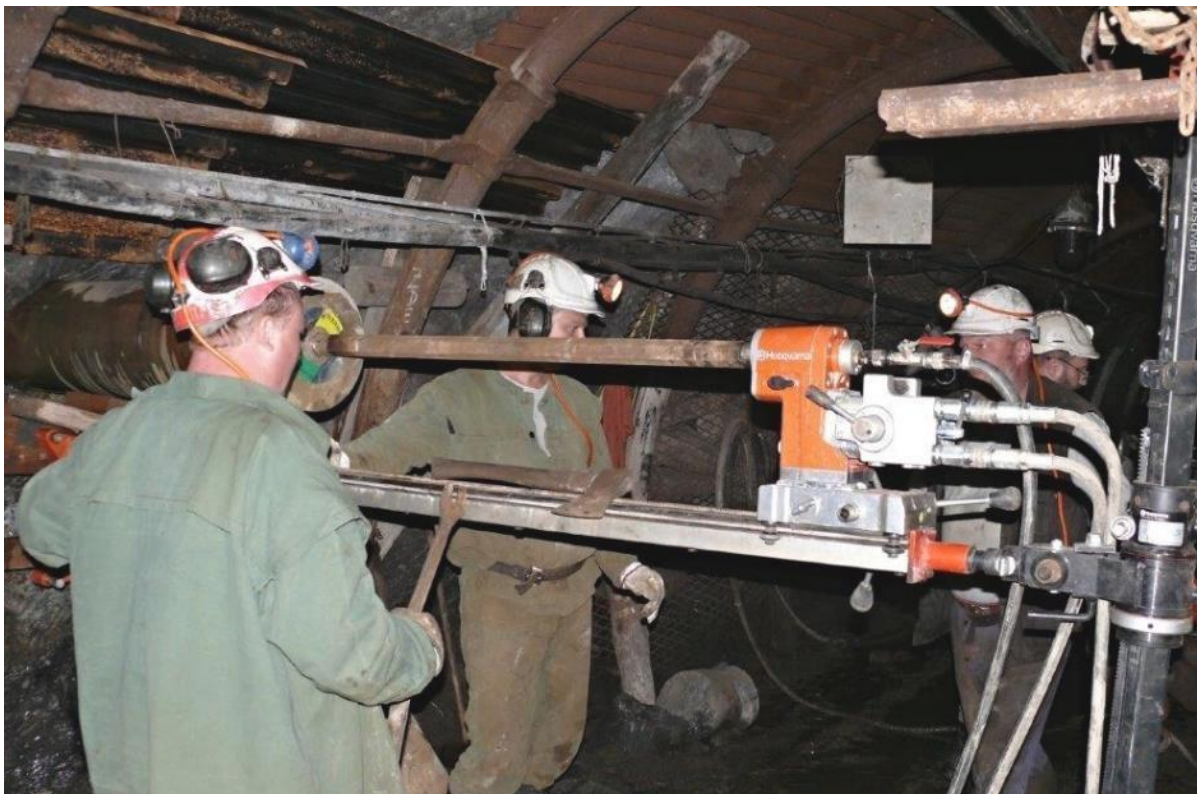
Obr. 15 "Geologická okna" pro výzkumné účely. Částečně odstraněný zátah z vlnitého plechu a tzv. "pakování" (založené volné prostory mezi TH-výztuží a horninou). 20. patro jámy R-7S, podložní chodba. PŠ1-203. 16. 8. 2018



Obr. 16 Vrtání geotechnického vrtu BGS24 V(D) o průměru 76 mm do počvy geotechnické stanice na překopu Z₃-XXIV. 24. patro jámy R-7S ložiska Rožná. 11. 3. 2019



Obr. 17 Vzorkovnice s vrtnými jádry z vrtu BGS12-V(U) – Geotechnická stanice na 12. patře jámy R-7S, podložní chodba PŠ1-123. 6. 11. 2018



Obr. 18 Vrtání velkoobjemového jádrového vrtu V-20/3/1 na 20. patře jámy R-7S, překop Z₃-XX. 16. 8. 2018



Obr. 19 Návrtky po vrtání velkoobjemových vzorků o průměru 300 mm v geotechnické stanici GS18 na 18. patře jámy R-7S, překop V₃-XVIII. 18. 10. 2018



Obr. 20 Velkoobjemové vzorky vrtného jádra o průměru 300 mm. 18. patro jámy R-7S, překop V₃-XVIII. 5. 6. 2018

2.1.4.1 Popis vrtných jader

V rámci zadaného projektu bylo odvrtno a zdokumentováno celkem 24 horizontálních, vertikálních, nebo ukloněných vrtů, které byly následně nalámány / nařezány po 1 m a ukládány v jádrovnicích, které mají kapacitu čtyř metrů (Obr. 22). Tyto vrty byly dále podrobně zdokumentovány a stran ČGS byly následně vytvořeny vrtné kolonky (Elektronická příloha 11) v programu LogPlot7 (Rockware), které obsahují i) podrobnou puklinovou analýzu (vyhotovena ČGS), ii) litologickou charakteristiku (vyhotoveno MU) a iii) hodnoty RQD parametru (vyhotoveno ÚGN AV ČR). Zdokumentovány byly tyto vrty: BGS12-H, BGS12-I, BGS12-V(D), BGS12-V(U), BGS18-H, BGS18-I, BGS18-V(D), BGS18-V(U), BGS20/1-H, BGS20/1-I, BGS20/1-V(D), BGS20/1-V(U), BGS20/2-H, BGS20/2-I, BGS20/2-V(D), BGS20/2-V(U), BGS24-H, BGS24-I, BGS24-V(D), BGS24-V(U), EDZ20-HA, EDZ20-HB, EDZ20-HC, EDZ20-HD.

Postup podrobné puklinové analýzy byl následující: byla provedena fotodokumentace jader v jádrovnicích (Obr. 22), fotografie úseků jader byly spojeny ve vrtné kolonce. S přesností na centimetr byly dokumentovány pukliny dle jejich charakteru (puklina, střížná puklina, podélná puklina, puklinová zóna), mocnost a typ výplně a zároveň případné alterace či drcené zóny. V rámci nomenklatury puklin se ve vrtné kolonce puklinou P rozumí puklina bez viditelné střížné komponenty, nejčastěji tenzní pukliny módu I; střížnou puklinou SP se rozumí nejčastěji reaktivovaná foliace, kdy na ploše pukliny můžeme rozpoznat lineární prvky striace a tedy potenciálního stříhu; podélnou puklinou se rozumí puklina orientovaná ve směru subparalelním s dlouhou osou vrtu, která může nebo nemusí mít střížnou komponentu. Puklinovou zónou se rozumí série puklin stejné orientace na určité metrži. V poznámce je následně upřesněno o jaké

pukliny jde. Tektonickou poruchou se rozumí ta část vrtu, která vykazuje vysokou míru rozrušení, nejčastěji v podobě drtě, tektonického jílu, výrazné grafitizace, nebo je upřesněno v poznámce. Tyto zóny je možné úspěšně korelovat s parametrem RQD. Všechny tyto parametry jsou ve vrtné kolonce uvedeny v legendě (Elektronická příloha 11). Zdrojová fotografická data (ořezaná i neořezaná) jsou v Elektronická příloha 10.

Stran litologické charakteristiky je určen horninový typ na dané metráži (pomocí barevné šrafy), dále je vynesena hodnota magnetické susceptibility, je-li v dané litologii měřena a zároveň je vyznačen odběr vzorků na výbrusy. Zdrojová data a jejich úprava pro účely sestavení vrtné kolonky je v Elektronická příloha 14.

Dále jsou ve vrtných kolonkách vyneseny hodnoty parametru RQD (Rock Quality Designation). Tyto hodnoty jsou zobrazeny v histogramu v pravé části vrtné kolonky. Hodnota parametru RQD je vynesena číselně (%) v levé části histogramu. Zároveň je v pravé části histogramu vyneseno procentuální podíl podrcení horniny (0 % charakterizuje nepodrcenou horninu a 100 % maximálně podrcenou horninu). Tyto data je možno efektivně korelovat s tektonickými poruchami dokumentovanými během analýzy puklinové sítě.

Všechny předchozí údaje byly vyneseny do vrtných kolonek (Elektronická příloha 8) pro jednotlivé vrty pomocí softwaru LogPlot7 (Obr. 21). Každá vrtná kolonka obsahuje v záhlaví na první straně název dokumentovaného vrtu, číslo patra, staničení, úklon vrtu, směr vrtu a přehlednou legendu. Veškeré dokumentované údaje o analýze puklinové sítě použité ve vrtných kolonkách jsou přiloženy v přehledných tabulkách MS Excel (Elektronická příloha 12).

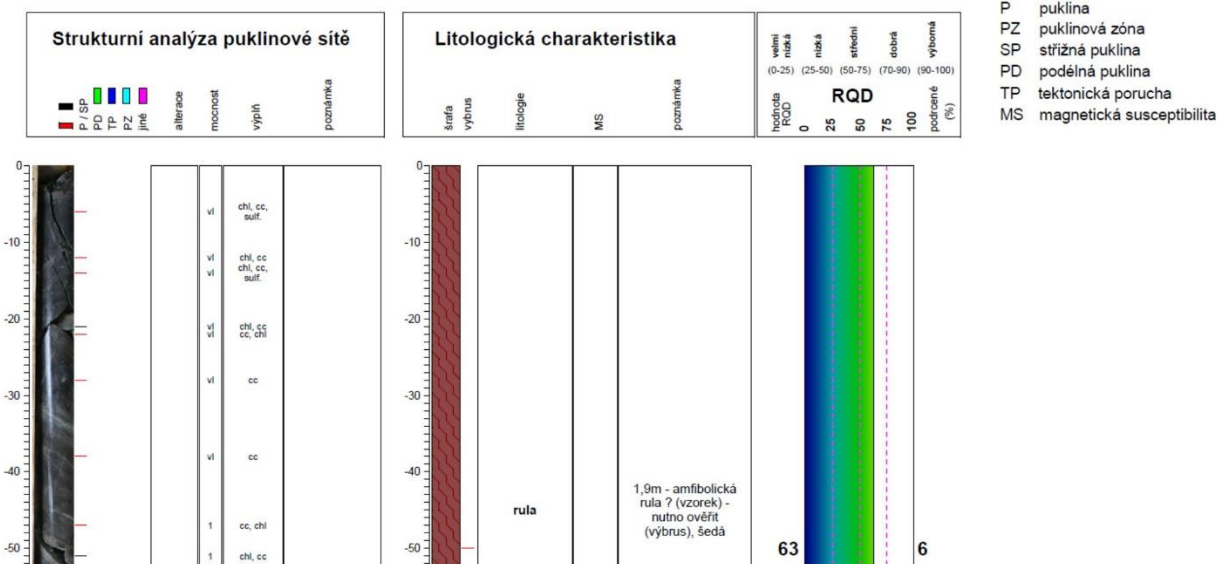
Dokumentace vrtného jádra

Získání dat z hlubokých horizontů dolu Rožná

Česká geologická služba, Masarykova univerzita, Ústav geoniky AV ČR, v.v.i., DIAMO, s.p.

BGS12-I

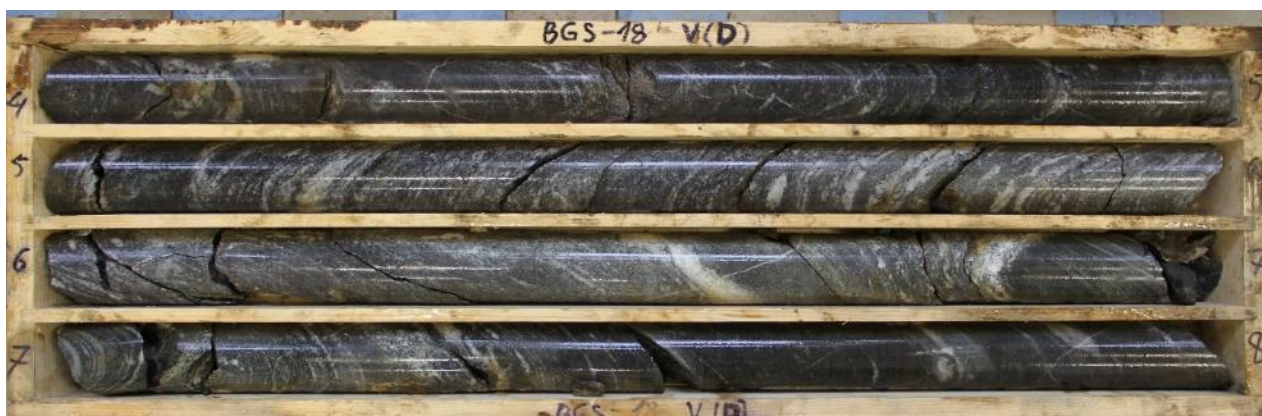
12. patro, D.och.PŠ1-123
staničení: 929.6
směr vrtu: 166
úklon vrtu: +45



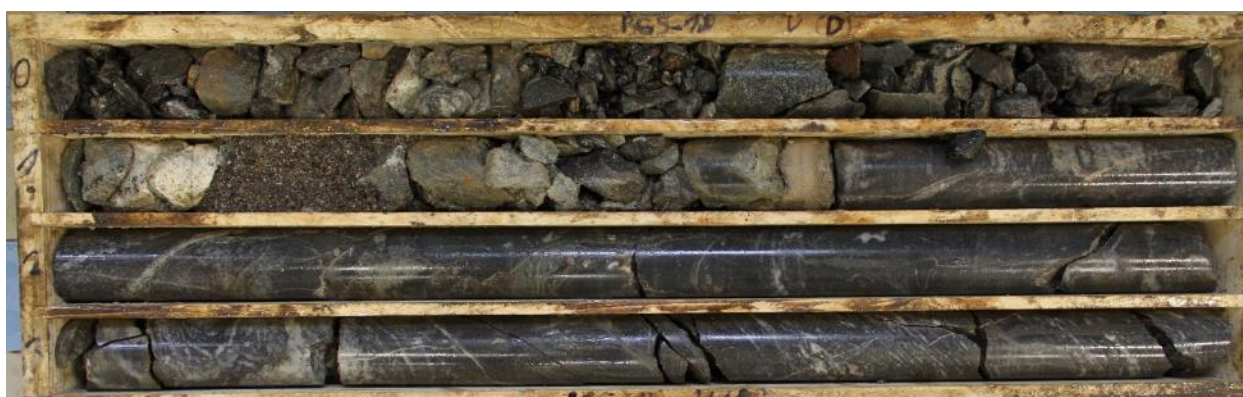
Obr. 21 Náhled dokumentace vrtného jádra

Po porovnání reálných metráží puklin získaných v rámci výsledků měření akustickým televizorem ABI40 (viz Bukovská ed. 2018, měřené AQUATEST, a.s., kapitola 2.4.7.1; dále jen „karotáže“)

s metrážemi puklin, které byly zdokumentovány při popisu vrtných jader, vyšlo najevo, že odvrtné a následně zdokumentované vrty vykazují místy jinou délku, potažmo jinou metráž puklin, než jsou délky/metráže puklin získané karotážními metodami. V některých případech může tímto způsobem narůstat zdánlivá délka celého vrtného jádra uloženého v jádrovnicích (v porovnání s délkou vrtu získanou z karotáže) a v některých případech mohou být délky vrtů (získané z karotáže a z dokumentace vrtných jader) shodné, ale mohou se lišit metráže puklin (dokumentovaných a měřených akustickým televizorem). Hlavní příčinou je primárně nesprávné zalamování vrtných jader a zároveň nedůsledná manipulace s tektonicky rozrušenou horninou (Obr. 22, Obr. 23). Detailnější charakteristika je uvedena v Elektronická příloha 13.



Obr. 22 Ukázka kompaktního vrtného jádra uloženého po 4 m v jádrovnicí (BGS18-VD 4–8 m)



Obr. 23 Ukázka tektonicky silně rozrušené horniny vrtu v jádrovnicí (BGS-18VD 0–4 m)

2.1.4.2 Odebrané vzorky a databáze dokumentačních bodů

Seznam odebraných vzorků a databáze dokumentačních bodů jsou v tabulkové formě uvedeny v Elektronická příloha 6. Lokalizace dokumentačních bodů jsou pak v Elektronická příloha 7.

2.3 Laboratorní výzkumné práce

2.3.1 Petrografie hornin

Cílem petrografického popisu hornin bylo provést základní klasifikaci hornin, zjistit jejich minerální složení a základní stavební znaky tak, aby tato charakteristika mohla být použita pro další analýzy a modelování geochemické stability hornin. Byly studovány vzorky ze všech provedených vrtů, velkopřůměrových vrtů a horniny homogenního bloku.

V zájmovém území převažují dvě litologie, a sice metapelity a metabazity, oba v různém stupni migmatitizace. Typické jsou pozvolné přechody mezi nimi i relativně ostré hranice. Stupeň migmatitizace je u metapelitů významně vyšší než u metabazitů. Erlany a žilné granity jsou zastoupeny pouze okrajově.

Z petrografického hlediska lze horniny klasifikovat jako: biotitické ruly (v různém stádiu migmatitizace), amfibolity (v různém stádiu migmatitizace), migmatity, erlany, grafitizované ruly, kvarcité ruly, granity, žilné karbonáty až karbonátové brekcie obsahující xenolity alterovaných amfibolitů a rul. Velmi hojné jsou horniny smíšeného původu, představující pozvolný přechod pararul do amfibolitů, přes amfibolicko-biotitické až biotiticko-amfibolické ruly (Obr. 24 a Obr. 25).

Biotitické ruly i amfibolity podléhají lokálně dvěma typům alterací. První typ se vyvíjí okolo karbonátových žil a je charakteristický kaolinizací živců. Tmavé minerály jsou nahrazeny chloritem a karbonátem. Druhý typ alterace je typický celkovým zesvětlením horniny. Živce jsou sericitizované, tmavé minerály nahrazené světle zeleným chloritem. Křemen zůstává v obou případech stabilní.



Obr. 24 Vzorek 3b – biotit-amfibolická rula s přechodem do amfibolitu



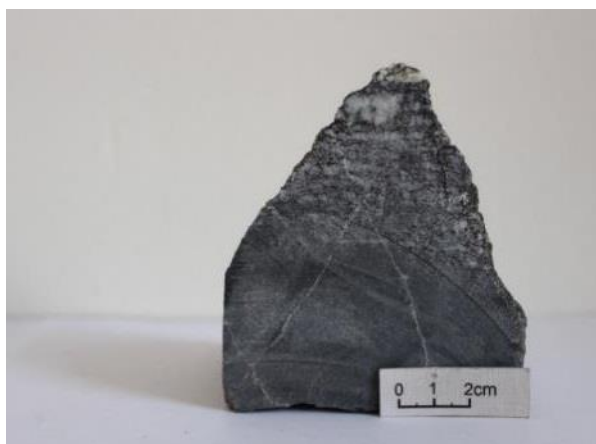
Obr. 25 Vzorek 3b – biotit-amfibolická rula s přechodem do amfibolitu

2.3.1.1 Ruly

Biotitické pararuly přecházejí do kvarcité ruly a pozvolna do amfibolitů, což poté odráží i jejich makroskopické zbarvení. Jemnozrná až středně zrnitá biotitická, amfibol-biotitická až biotiticko-amfibolitová pararuly bývají šedé, tmavě šedé až černé zatímco kvarcité ruly mohou být až světle šedé (Obr. 28 a Obr. 29). Často jsou místy pozorovány několik milimetrů mocné šedobílé pásy tvořené především světlými minerály (Obr. 26 a Obr. 27).



Obr. 26 Vzorek 4 – biotitická až amfibol-biotitická rula



Obr. 27 – Vzorek 6, biotitická rula

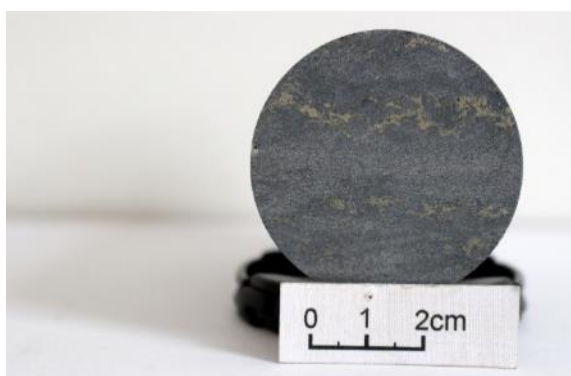


Obr. 28 Vzorek 22b – kvarcitická rula



Obr. 29 Vzorek – 22b, kvarcitická rula

Na rulách především z poloh 12. patra dolu Rožná jsou makroskopicky dobře viditelnými shluky a pásy sulfidů (Obr. 30 a Obr. 31).



Obr. 30 Vzorek 16432 – biotitický kvarcit až kvarcitická rula (12. patro)

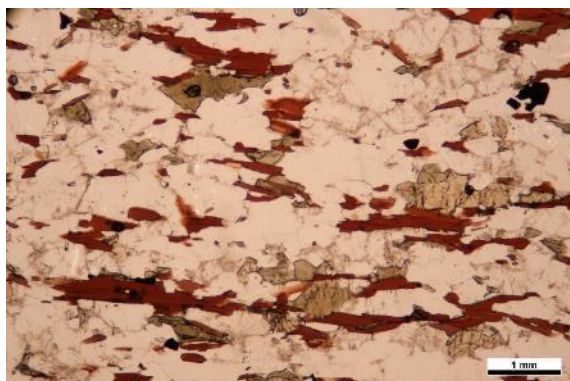


Obr. 31 Vzorek 16432 – biotitický kvarcit až kvarcitická rula (12. patro)

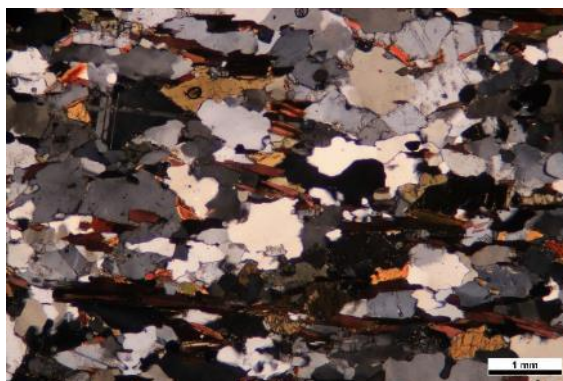
Pararuly jeví výrazně vyšší stupeň migmatitizace než metabazity. Relativně vzácné jsou variety pararul obsahující 1–5 mm velké porfyroblasty granátů. Stavba pararul je převážně plošně-paralelní s lepidogranoblastickou či granoblastickou strukturou.

Ruly jsou tvořeny minerální asociací: biotit, plagioklas, K-živce, křemen, granát a amfibol. Akcesorickými minerály jsou titanit (Obr. 36 a Obr. 37, Tab. 12 v Elektronická příloha 15), rutil, zirkon, apatit, monazit a allanit. Opakní minerály jsou zastoupené pyritem, chalkopyritem, pyrhotinem, ilmenitem, sfaleritem a grafitem.

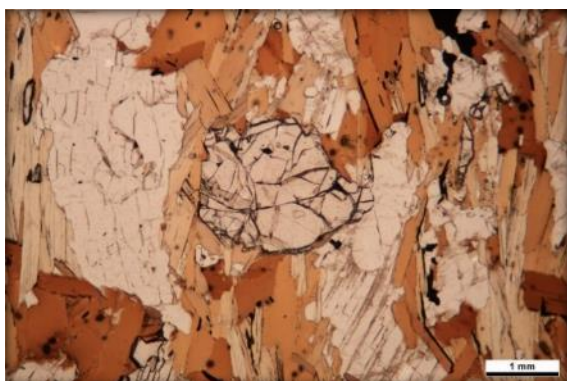
Agregáty biotitu tvoří tabulkovité, lupínkovité až jehlicovité tvary xenomorfního až hypautomorfního omezení (Obr. 32 a Obr. 33). Vykazují intenzivní pleochroismus v oranžovohnědých odstínech. Biotit je zde zpravidla čerstvý, často obsahuje pleochroické dvůrky s akcesorickými minerály. Plagioklas tvoří tabulkovitá xenomorfní zrna a je zastoupený oligoklasem až andezínem (An_{10-40} a Ab_{60-85}) (Tab. 1, 2, 3 v Elektronická příloha 15, Obr. 3 v Elektronická příloha 15). Pro křemen je charakteristické intenzivní undulózní zhášení a xenomorfní omezení. Zrna křemene mohou tvořit menší zaoblené inkluze v plagioklasech či amfibolech. Granáty tvoří často velmi nepravidelně až laločnatě omezené poikiloblasty s inkluzemi křemene, plagioklasu a biotitu (Obr. 35 a Obr. 38). Jeho složení je: almadin 65 %, pyrop 15 %, grosulár 6 % a spessartin 10 % (Tab. 8, 9, 10 v Elektronická příloha 15). V silněji migmatitizovaných rulách se objevuje druhý typ granátu, který je podobný granátům z migmatitů. Jeho omezení je subhedrální až euhedrální a neobsahuje inkluze jiných minerálů (Obr. 34). Rovněž jeho složení se mírně liší: almadin 64 %, pyrop 15 %, grosulár 10 % a spessartin 8 % (Tab. 8, 9, 10 v Elektronická příloha 15). Amfibol tvoří hypautomorfní až xenomorfní zrna, občas může obsahovat i inkluze křemene. Jeho složení se pohybuje v poli obecného amfibolu až tschermakitu. (Obr. 27, Tab. 7 v Elektronická příloha 15, Obr. 1 v Elektronická příloha 15).



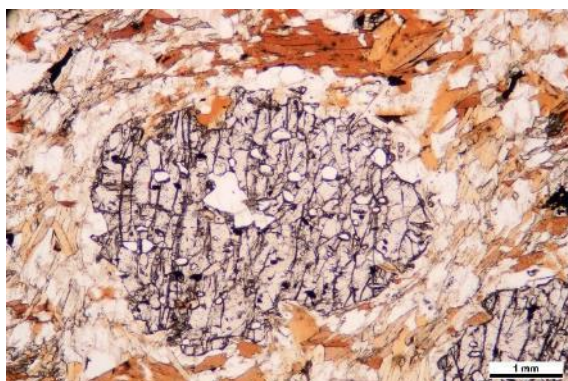
Obr. 32 Vzorek 4 – biotit, plagioklas, křemen, amfibol, opakní minerály



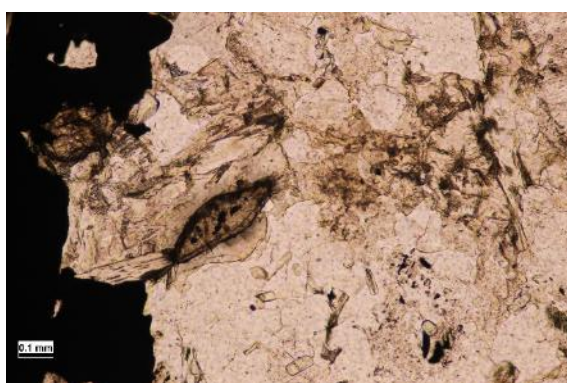
Obr. 33 Vzorek 4 – biotit, plagioklas, křemen, amfibol, opakní minerály (XPL)



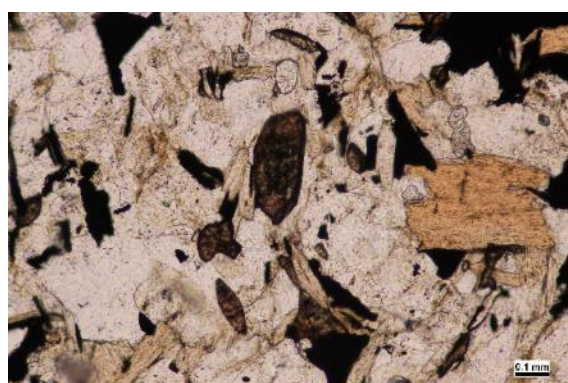
Obr. 34 Vzorek 6 – granát, biotit, plagioklas, opakní minerály



Obr. 35 Vzorek 1 I – granát, biotit, plagioklas, opakní minerály

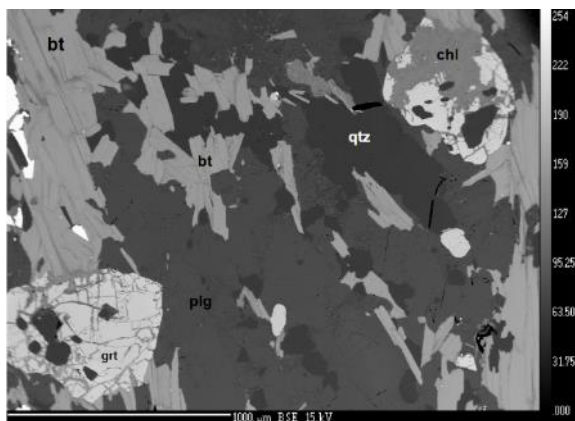


Obr. 36 Vzorek 16432 – titanit, plagioklas, křemen, opakní minerály

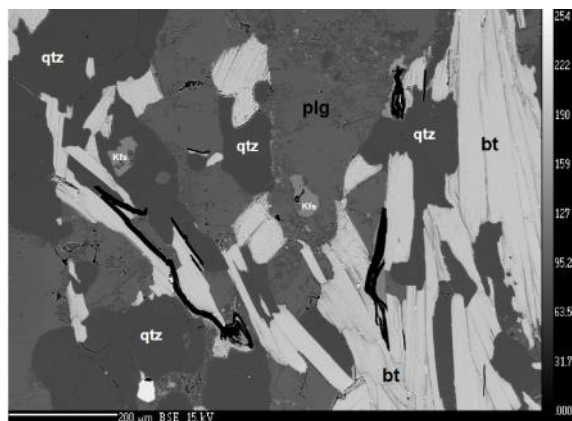


Obr. 37 Vzorek 16432 – titanit, křemen, opakní minerály

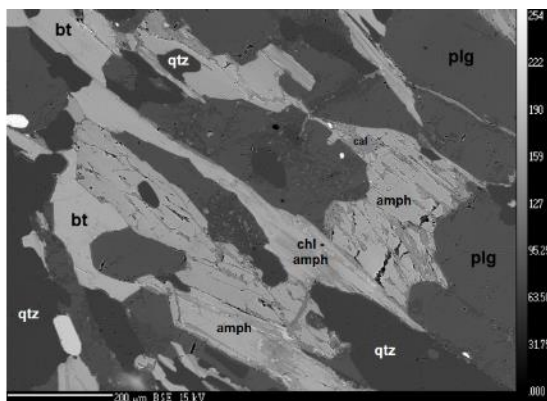
Zrna zirkonu jsou automorfního omezení o velikosti do 50 μm . Monazit je zde čerstvý a vytváří xenomorfně omezená zrna do 60 μm . Apatit zde tvoří sloupcovité krystalky až izometrická zrna do 0,3 mm. Agregáty allanitu jsou velké až 0,2 mm, vytváří shluky inkluzí v plagioklasech. Ilmenit je hojným akcesorickým minerálem (Tab. 13 v Elektronická příloha 15). Tvoří nedokonalá tabulkovitá zrna o velikosti až 0,5 mm, vzácně obsahuje inkluze zirkonu. Dominujícím sulfidem je převážně pyrit. Tvoří nepravidelné agregáty velké až 0,5 mm, často vyplňuje póry (Obr. 41). Chalkopyrit tvoří drobné odmiššeniny v pyritu. Sfalerit tvoří drobná zrna okolo 10 μm . Grafit tvoří drobné lupínky, které mohou být i zprohýbané. Často prorůstá s biotitem dle jeho štěpnosti (Obr. 39).



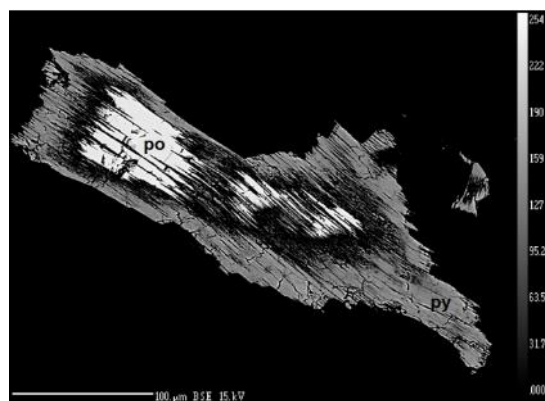
Obr. 38 Vzorek 6 – elektronová mikrosonda - granát



Obr. 39 Vzorek 6 – elektronová mikrosonda - agregáty grafitu



Obr. 40 Vzorek 4 – elektronová mikrosonda - alterace amfibolu



Obr. 41 Vzorek 12 – elektronová mikrosonda - pyrit a pyrhotin

2.3.1.2 Amfibolity

Amfibolity jsou převážně jemnozrnné až středně zrnité, výjimečně hrubozrnné (Obr. 42). Barva horniny je převážně tmavě šedá až černá s občasnými pásy světlých minerálů o mocnosti od 2 až do 10 mm (Obr. 43, Obr. 44 a Obr. 45). Přejechy do okolních pararul jsou pozvolné a projevují se nejčastěji přibýváním biotitu. Ve srovnání s metasedimenty jeví amfibolity menší stupeň migmatitizace. Stavba horniny je plošně-paralelní s granonematoblastickou strukturou, ovšem s přibývajícím biotitem pozorujeme přechod do struktury lepidogranoblastické.

Z hlediska minerálního zastoupení je hornina složena z amfibolu, plagioklasu, biotitu, křemene a titanitu. Akcesoricky jsou zde zastoupeny apatitem a zirkonem. Z opakních minerálů se zde objevují pyrit, pyrhotin, chalkopyrit a ilmenit.



Obr. 42 Vzorek 1 – granátický amfibolit



Obr. 43 Vzorek 7 – biotitický amfibolit

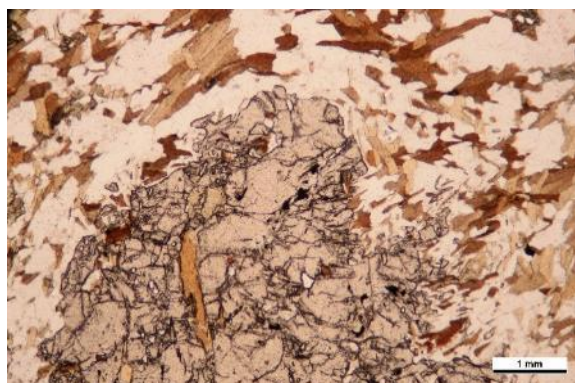


Obr. 44 Vzorek o24b – biotitický amfibolit

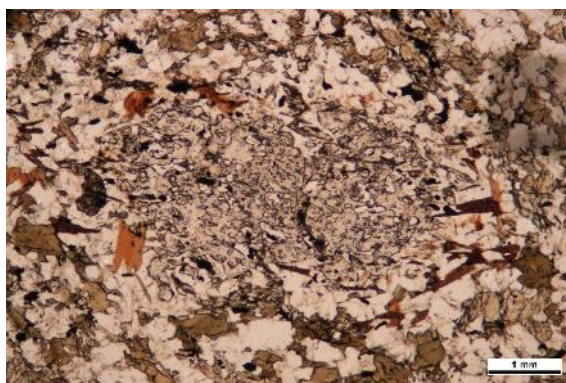


Obr. 45 Vzorek BGS 24 VU 15,25 – biotitický amfibolit

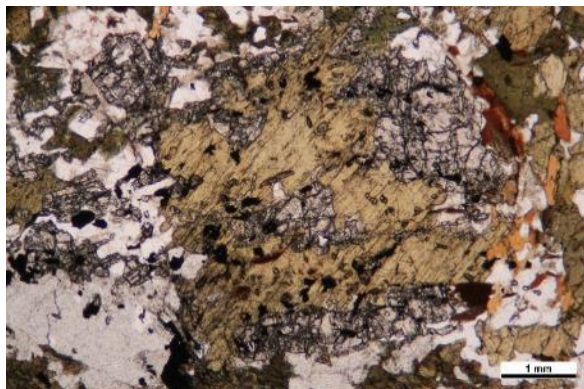
Z hlediska minerálního zastoupení je hornina složena z amfibolu, plagioklasu, biotitu, křemene a titanitu. Akcesoricky jsou zde zastoupeny apatitem a zirkonem. Z opakních minerálů se zde objevují pyrit, pyrhotin, chalkopyrit a ilmenit.



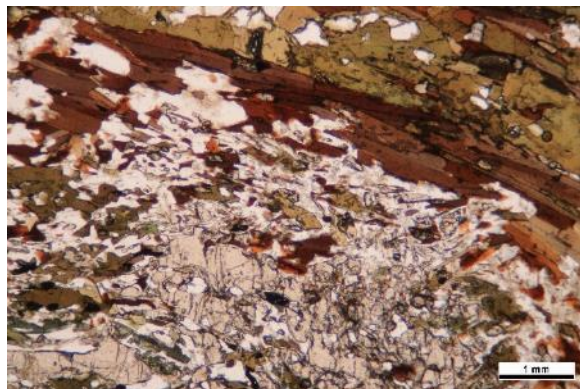
Obr. 46 Vzorek BGS 12 – H - granát, biotit, plagioklas, křemen, opakní minerály



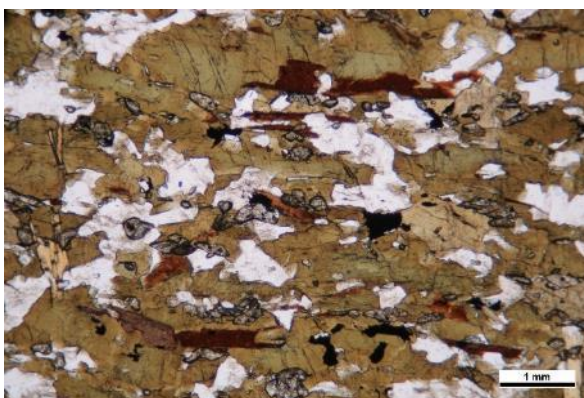
Obr. 47 Vzorek HB 5 – granát, biotit, plagioklas, amfibol, křemen, opakní minerály



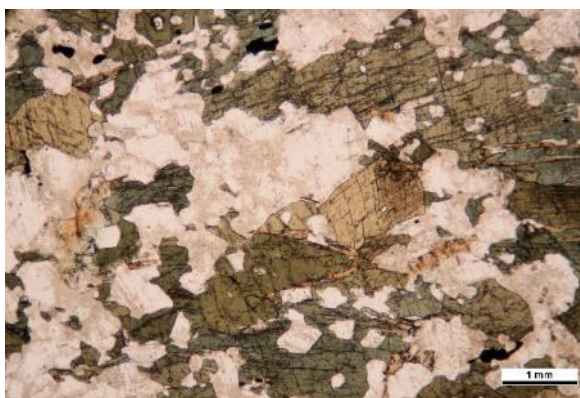
Obr. 48 Vzorek BGS 12 – H - granát, biotit, plagioklas, amfibol, křemen, opakní minerály



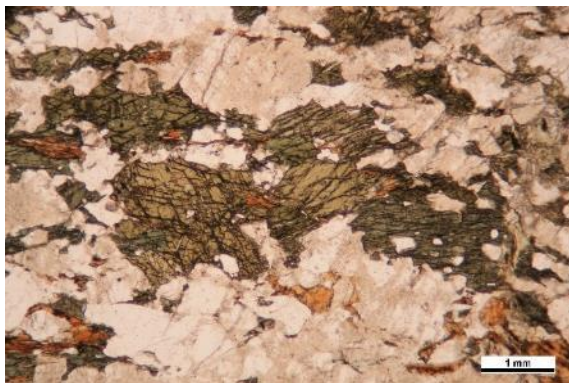
Obr. 49 Vzorek 7c – granát, biotit, plagioklas, amfibol, křemen, opakní minerály



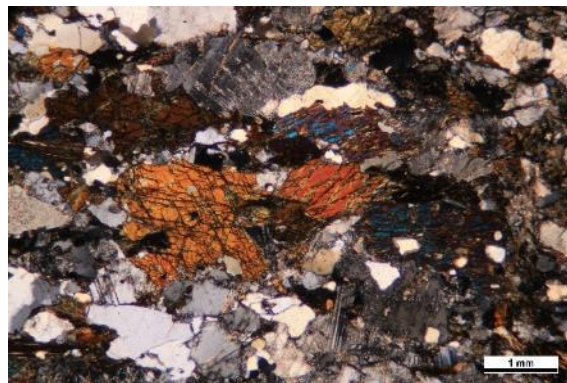
Obr. 50 Vzorek 7a – biotit, plagioklas, amfibol, křemen, titanit, opakní minerály



Obr. 51 Vzorek GBS 24 I 13,5 m – amfibol, plagioklas, křemen a opakní minerály



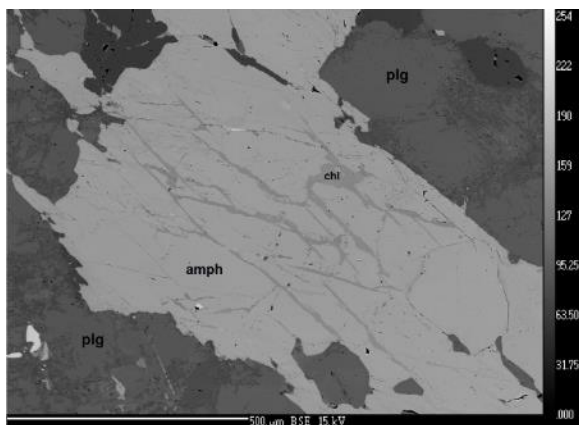
Obr. 52 Vzorek BGS 24 VU 15,25 – biotit, amfibol, plagioklas, křemen a opakní minerály



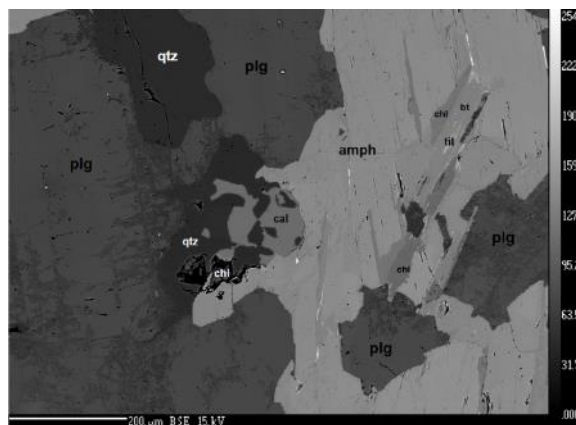
Obr. 53 Vzorek BGS 24 VU 15,25 – biotit, amfibol, plagioklas, křemen a opakní minerály (XPL)

Zrna amfibolu jsou zbarvena v odstínech zelené barvy, xenomorfně omezená a vykazují intenzivní pleochroismus (Obr. 52, Obr. 53 a Obr. 61). Někdy se mají amfiboly charakter poikilblastů s inkluzemi zaoblených zrn křemene a plagioklasu (Obr. 51 a Obr. 52). Jeho množství v hornině se pohybuje mezi 60 – 80 obj. % a jeho složení odpovídá převážně přibližně tschermakitu (Obr. 2 v Elektronická příloha 15). Zrna plagioklasu jsou xenomorfně omezená. Množství plagioklasu se převážně pohybuje v rozmezí 20–50 obj. % a jeho bazicita odpovídá

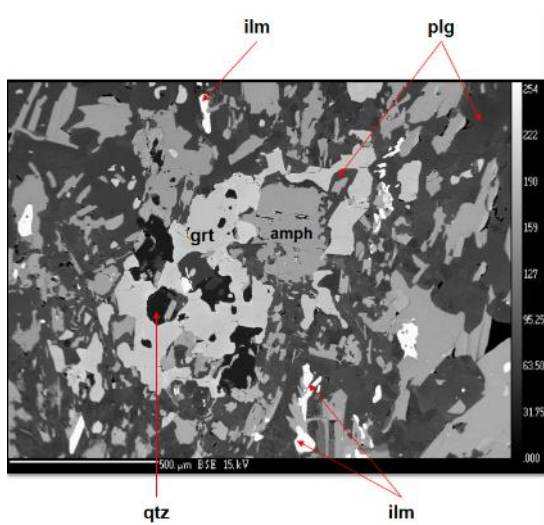
oligoklasu až labradoritu (An_{20-80} a Ab_{20-90}) (Tab 14, 15, 16 v Elektronická příloha 15, Obr. 3 v Elektronická příloha 15). Zrna křemene jsou xenomorfního omezení, obvykle slaběji undulózně zháší. Menší zrna bývají často nepravidelně zaoblena. Křemen se v amfibolitech vyskytuje obvykle do 30 obj. %. Biotit tvoří lupenité, tabulkovité až jehlicovité agregáty xenomorfního až hypautomorfního omezení a často bývá výrazně pleochroický (v odstínech hnědé až béžové) či naopak může být pleochroismus poměrně nevýrazný (Obr. 49 a Obr. 50). Pleochroické dvůrky v biotitech jsou zde pozorovány minimálně. Granáty jsou xenomorfně omezeny. Výjimečně mohou zrna, v hrubozrnějších amfibolitech, dosáhnout velikosti až 1 cm. Tvoří často různě velké izometrické xenoblasty (někdy rozlámané na drobná ostrohranná zrna) až poikiloblasty (Obr. 46, Obr. 47, Obr. 48, Obr. 56, Obr. 57, Obr. 58 a Obr. 60). Mají tzv. cedníkovitou strukturu (Obr. 47 a Obr. 59), uzavírají v sobě malé inkluze biotitu, plagioklasu a křemene. Jejich složení je: almadin 50 %, pyrop 18 %, grosulár 20 % a spessartin 5 % (Tab 22, 23 v Elektronická příloha 15). Granáty pravděpodobně vznikají na úkor okolního biotitu, plagioklasu a amfibolu v rámci progradní metamorfózy. Zrna titanitu jsou hypautomorfně až xenomorfně omezena a mohou dosáhnout až 5 obj. %. Titanit je zde také sekundární a souvisí pravděpodobně s rozpadem biotitu, plagioklasu a amfibolu (Obr. 50, Tab 25 v Elektronická příloha 15). Zrna zirkonu jsou xenomorfního omezení s velikostí kolem 50 μm . Ilmenit je pravděpodobně mladší než metamorfóza horniny (Tab 26 v Elektronická příloha 15). Ojedinele vyplňuje drobné trhliny v amfibolu spolu s kalcitem.



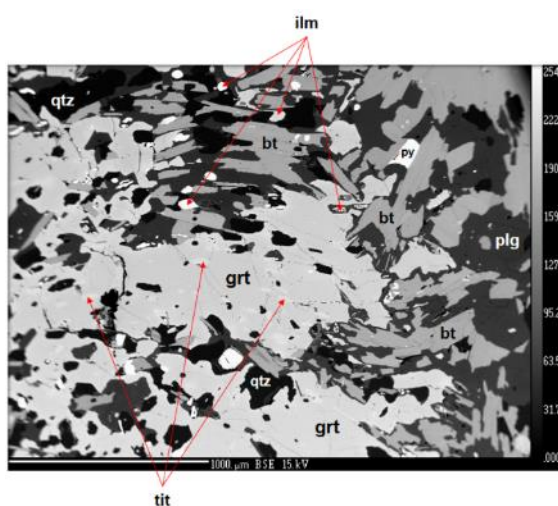
Obr. 54 Vzorek 3b – elektronová mikrosonda - chloritizace amfibolu



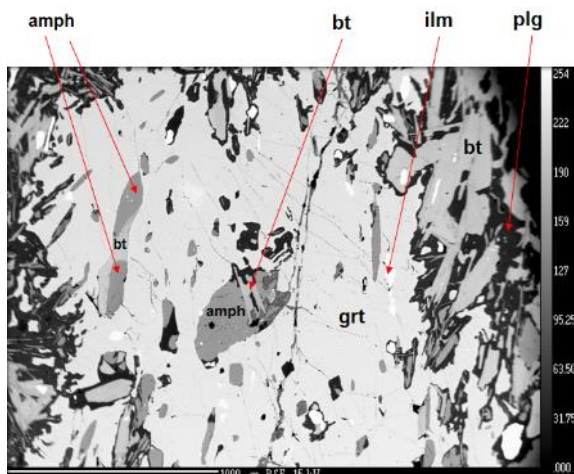
Obr. 55 Vzorek 3b – elektronová mikrosonda - chloritizace amfibolu



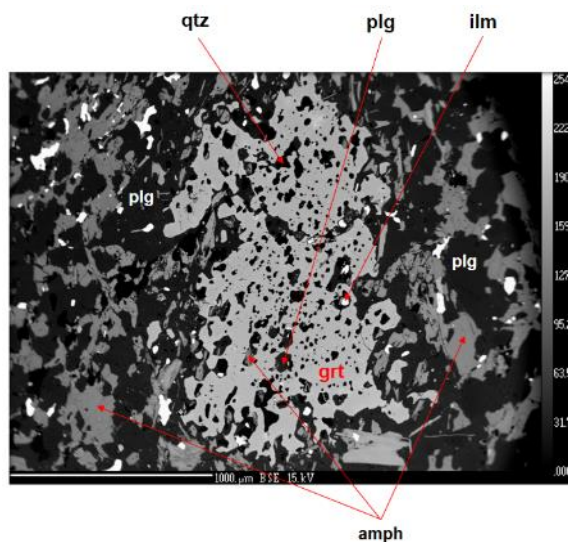
Obr. 56 Vzorek 18b – elektronová mikrosonda - nepravidelně omezená zrna granátu



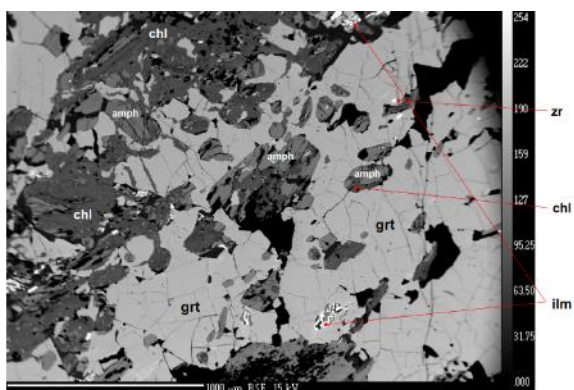
Obr. 57 Vzorek 18b – elektronová mikrosonda - synkinematické porfyroblasty granátu



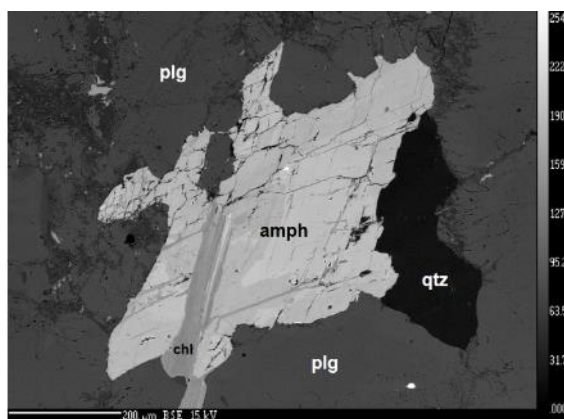
Obr. 58 Vzorek HB 5 – elektronová mikrosonda - nepravidelně omezené poikiloblasty granátu



Obr. 59 Vzorek HB 5 – elektronová mikrosonda - nepravidelně omezené poikiloblasty granátu, grt je v nerovnováze s okolní horninou



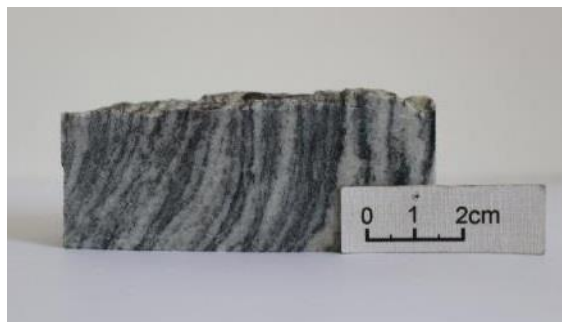
Obr. 60 Vzorek HC – elektronová mikrosonda - uzavřeny v granátu



Obr. 61 Vzorek 2b – elektronová mikrosonda - amfibol v asociaci s plagioklasem a křemenem

2.3.1.3 Migmatity

V různé intenzitě, jsou migmatitizovány převážně biotitické až amfibol-biotitické pararuly. Barva horniny se odvíjí od stupně migmatitizace, převážně je šedá, světle šedá až bílá. Nejčastěji se vyskytují výrazně páskované migmatity, ve kterých se mocnost melanosomu a leukosomu, pohybuje od několika milimetrů po první centimetry (Obr. 62, Obr. 63, Obr. 64 a Obr. 65). Horniny jsou převážně středně zrnité. Stavba horniny je plošně-paralelní s granonematoblastickou až lepidogranoblastickou strukturou.



Obr. 62 Vzorek 5 – sillimaniticko-biotitický migmatit



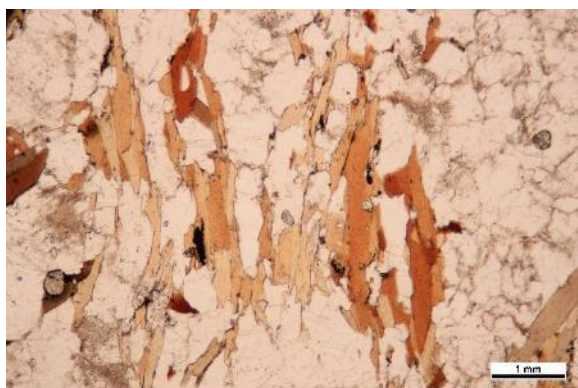
Obr. 63 Vzorek 16467 – biotitický migmatit



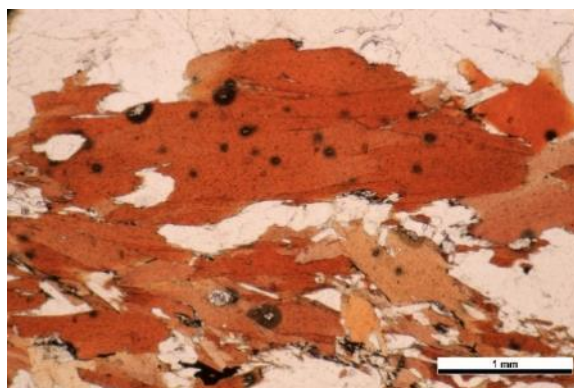
Obr. 64 Vzorek 16295 – sillimaniticko-biotitický leuko migmatit



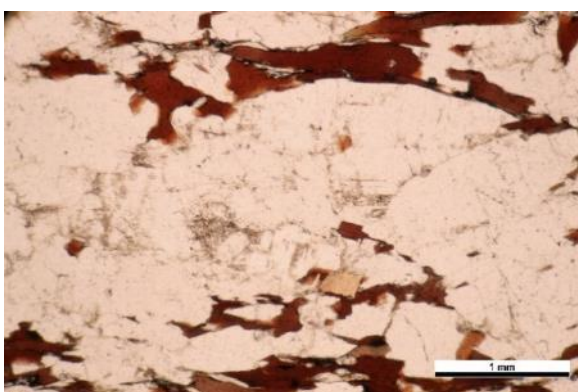
Obr. 65 Vzorek 16295 – sillimaniticko-biotitický leuko migmatit



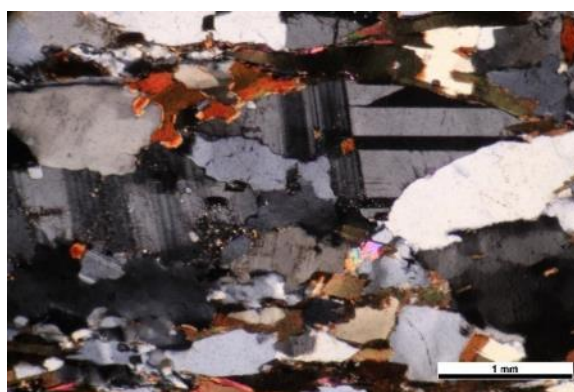
Obr. 66 Vzorek 16295 – biotit, plagioklas, křemen



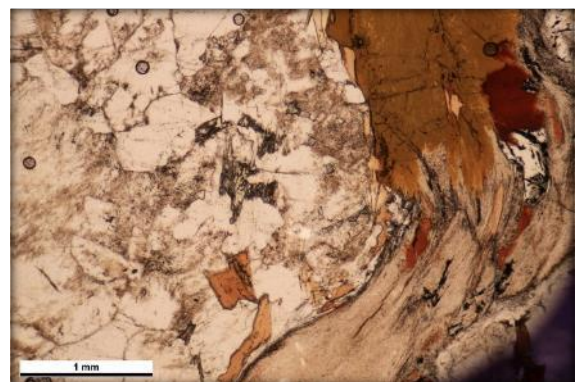
Obr. 67 Vzorek 16295 – pleochroické dvůrky v biotitu



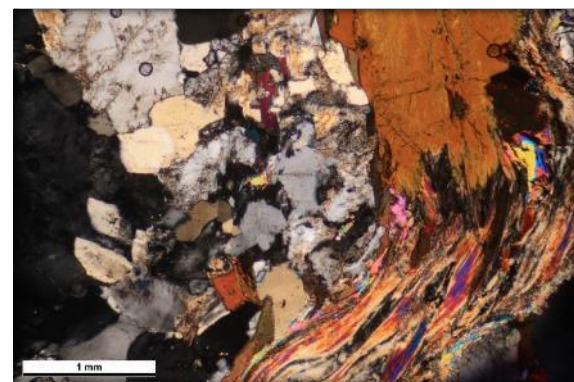
Obr. 68 Vzorek 16295 – biotit, plagioklas, křemen



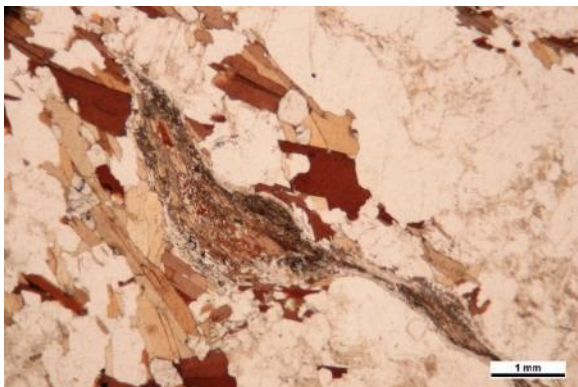
Obr. 69 Vzorek 16295 – biotit, plagioklas, křemen (XPL)



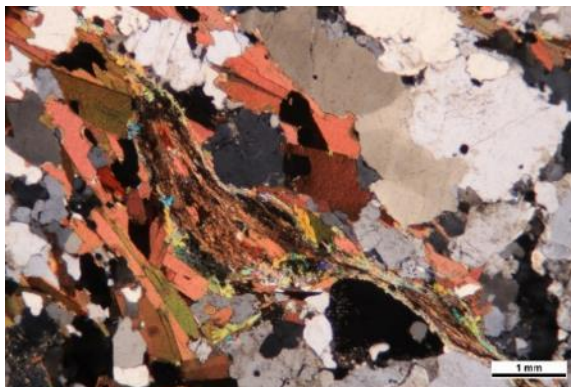
Obr. 70 Vzorek 5c – rozpad biotitu a tvorba sillimanitu



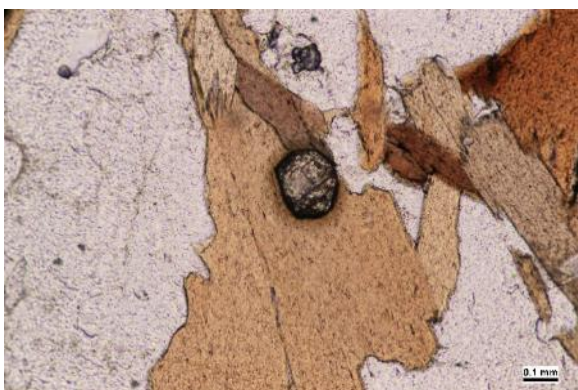
Obr. 71 Vzorek 5c – rozpad biotitu a tvorba sillimanitu (XPL)



Obr. 72 Vzorek 16295 – vznikající sillimanit z biotitu



Obr. 73 Vzorek 16295 – vznikající sillimanit z biotitu (XPL)



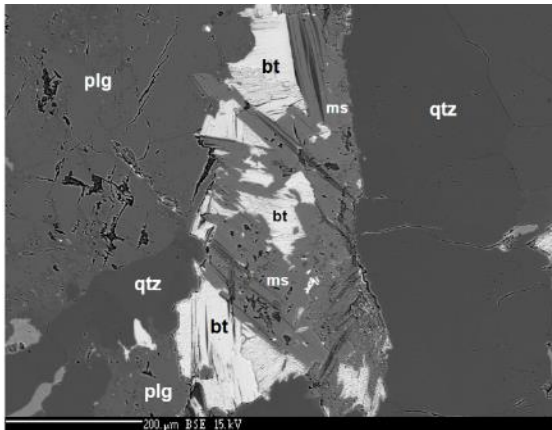
Obr. 74 Vzorek 16467 – monazit, biotit, křemen



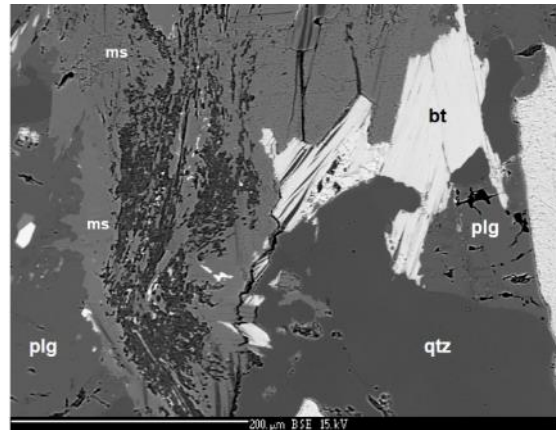
Obr. 75 Vzorek 5a – myrmekit

Minerální složení paleosomu migmatitů je tvořeno asociací biotit, plagioklas, K-živec, křemen. Minerální složení leukosomu je plagioklas, K-živec a křemen. Akcesoricky je zde zastoupen zirkon, monazit, apatit a allanit. Z opakních minerálů se zde objevují pyrit, sfalerit a chalkopyrit. Byly pozorovány dva typy migmatitů. V prvním typu se granát nevyskytuje. V druhém typu se vyskytuje v menším množství muskovit (do 5 obj. %) (Obr. 76, Tab. 29 v Elektronická příloha 15), sillimanit (do 5 obj. %) a K-živce převažují nad plagioklasy. Rovněž jsou zde pozorovány granáty, které zřejmě krystalizovali z taveniny. Agregáty granátu jsou subhedrálního až euhedrálního omezení a neobsahují inkluze jiných minerálů.

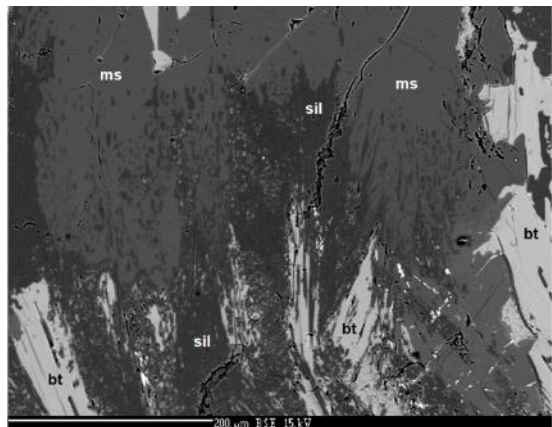
Agregáty biotitu tvoří tabulkovité, lupínkovité až jehlicovité tvary xenomorfního až hypautomorfního omezení (Obr. 66). Barva se pohybuje v odstínech hnědé a béžové a vykazuje intenzivní pleochroismus. Na některých zrnech byly pozorovány pleochroické dvůrky (Obr. 67). Agregáty biotitu mohou být uskupeny do výrazných pásků a pohybují se v hornině kolem 5–10 obj. %. Pokud dochází k rozpadu biotitu, vzniká sillimanit a K-živec (Obr. 70, Obr. 71, Obr. 77, Obr. 78). Sillimanit tvoří zprohýbané tenké vláknité až jehlicovité jemnozrné agregáty s výrazným pleochroismem (Obr. 72 a Obr. 73). Zrna plagioklasu jsou xenomorfně omezená a zastoupena většinou albitem nebo oligoklasem (An_{20} , Ab_{80}) (Obr. 68, Obr. 69, Tab 27 v Elektronická příloha 15). K-živce často dominují nad plagioklasem a tvoří nejčastěji xenomorfně omezená zrna. Zrna křemene jsou xenomorfního omezení, menší zrna bývají zaoblena. Na kontaktu K-živce a křemene bývají vyvinuty myrmekity (Obr. 75). Zirkon a monazit jsou uzavírány v biotitu v pleochroických dvůrcích. Zirkon je typicky zonální, monazit vykazuje pastelové interferenční barvy (Obr. 74). Vzácně se vyskytuje rovněž allanit.



Obr. 76 Vzorek 5c – elektronová mikrosonda - muskovit v asociaci s biotitem



Obr. 77 Vzorek 5c – elektronová mikrosonda - biotit v asociaci se sillimanitem a muskovitem

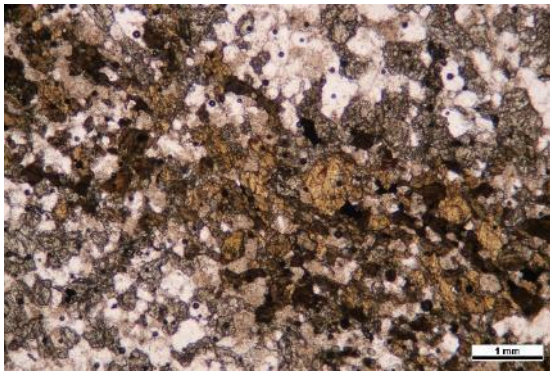


Obr. 78 Vzorek 5c – elektronová mikrosonda - rozpad biotitu za vzniku sillimanitu

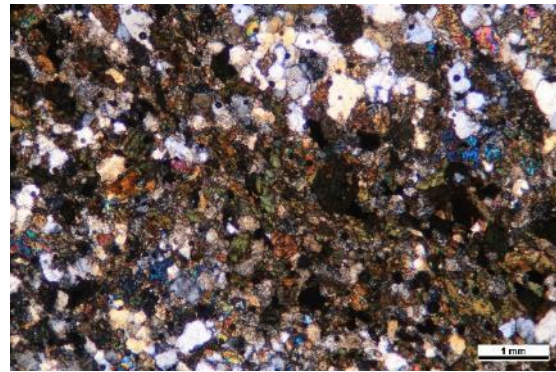
2.3.1.4 Erlany

V podloží zóny R1 se vyskytují horniny, které byly pojmenovány jako erlany nebo stromatity. Jedná se o šedo-zelené jemnozrnné skvrnitě horniny, ve kterých se nepravidelně střídají různé mocné neprůběžné polohy až útržky tmavěji zelené horniny s nepravidelnými polohami až skvrnami šedo-zelené horniny. Struktura horniny je granonematoblastická.

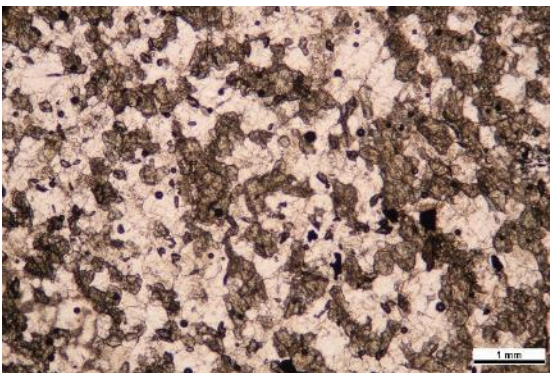
Tmavší polohy jsou tvořeny minerální asociací: amfibol, klinopyroxen (diopsid–hedenbergit) křemen, plagioklas, kalcit, ilmenit, apatit a titanit. Světlejší polohy mají složení obdobné, liší se nepřítomností pyroxenu, vyšším zastoupením plagioklasu, vzácně je přítomen K-živec. Opakní minerály jsou zastoupené pyritem, chalkopyritem, pyrhotinem a Ni–Co–Fe sulfoarsenidy (Obr. 84).



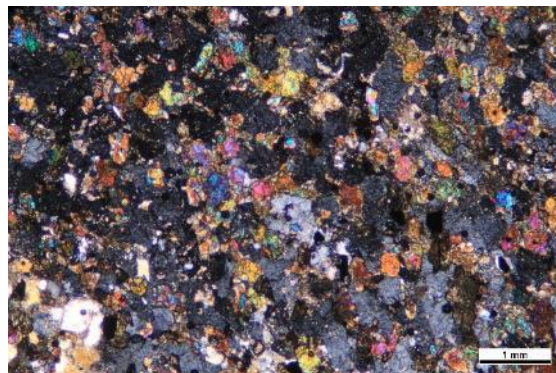
Obr. 79 Vzorek 19a – amfibol, plagioklas, křemen, opakní minerály



Obr. 80 Vzorek 19a – amfibol, plagioklas, křemen, opakní minerály (XPL)

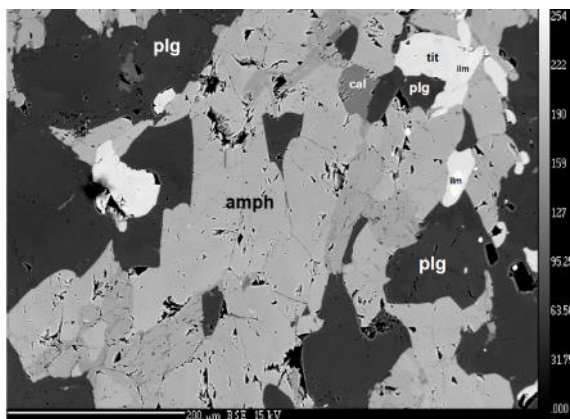


Obr. 81 Vzorek 19a – amfibol, plagioklas, křemen, opakní minerály

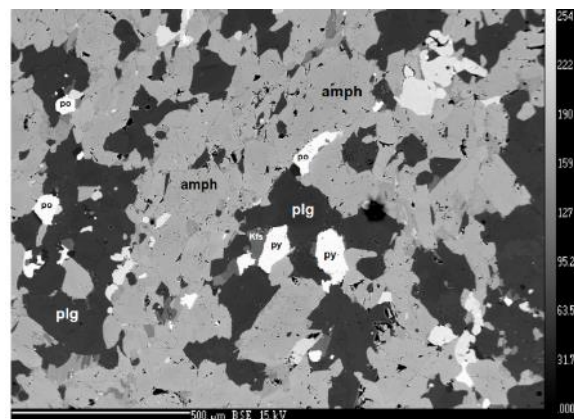


Obr. 82 vzorek 19a – amfibol, plagioklas, křemen, opakní minerály (XPL)

Amfiboly tvoří xenomorfně omezená zrna s nepřilíš výrazným pleochroismem (Obr. 83 a Obr. 84). Jeho složení odpovídá převážně přibližně tschermakitu (Obr. 6 v Elektronická příloha 15, Tab. 31 v Elektronická příloha 15). Zrna plagioklasu jsou xenomorfně omezená a jeho bazicita odpovídá albitu až andezínu (An_{63-95} a Ab_{3-35}). Zrna titanitu jsou hypautomorfně až xenomorfně omezena (Obr. 83).



Obr. 83 Vzorek 19c – elektronová mikrosonda - erlan



Obr. 84 Vzorek 19c – elektronová mikrosonda - erlan

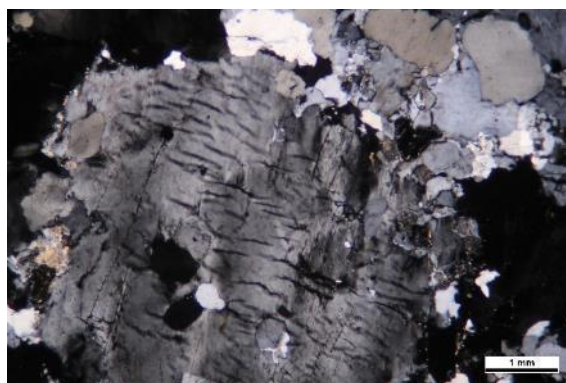
2.3.1.5 Granity

Granity zde tvoří nepravidelná různě mocná (do 3 m) žilná tělesa, vzniklá v důsledku parciálního tavení okolních biotitických a amfibol-biotitických pararul. Barva horniny je velmi světlá, světle šedá až prakticky bílá. Podíl tmavých minerálů je menší než 5 %. Z tmavých minerálů je zde zastoupen granát a biotit. Granity jsou jemnozrnné až středně zrnité s převážně masivní texturou.

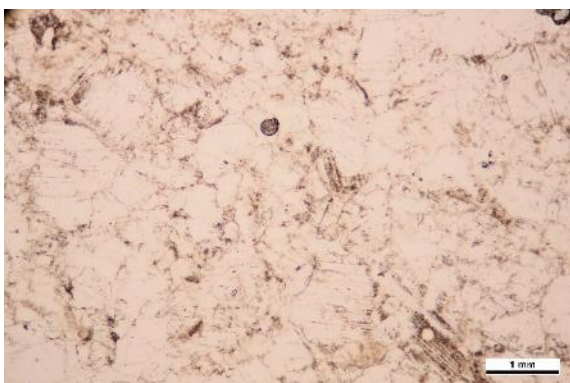
Z hlediska minerální zastoupení je hornina složena z K-živce, plagioklasu, křemene, granátu a biotitu. Z akcesorických minerálů se zde vyskytují zirkon a apatit, jejich velikost ale nepřekračuje 50 μm .



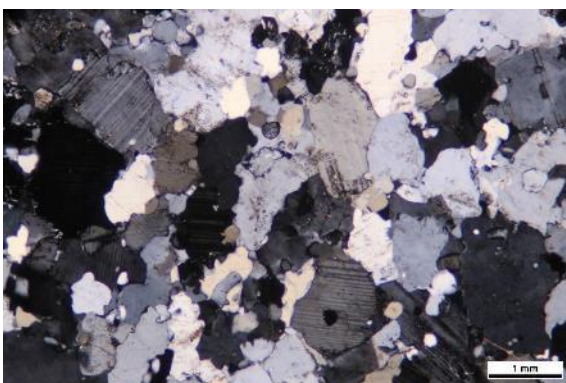
Obr. 85 Vzorek VD 2 – K-živce a křemen



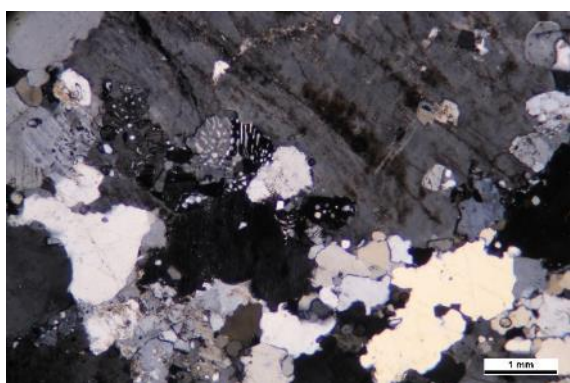
Obr. 86 Vzorek VD 2 – K-živce a křemen (XPL)



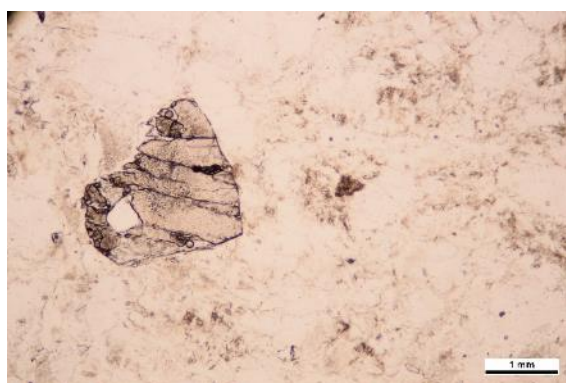
Obr. 87 Vzorek VD 2 – K-živce, plagioklas, křemen



Obr. 88 Vzorek VD 2 – K-živce, plagioklas, křemen (XPL)



Obr. 89 Vzorek VD 2 – myrmekity



Obr. 90 Vzorek VD 2 – zrno granátu

K-živce (Obr. 85, Obr. 86) často převažují nad plagioklasem a na jejich kontaktu jsou ojediněle vyvinuty myrmekity (Obr. 89). Zrna plagioklasu jsou hypautomorfně až xenomorfně omezená (Obr. 87, Obr. 88). Křemen je xenomorfního omezení a bylo pozorováno výraznější undulózní zhášení. Granáty tvoří automorfně až hypautomorfně omezená zrna milimetrových rozměrů, která jsou často popraskaná (Obr. 90). Převažující složkou granátu je almandin (až 70 %), méně pak pyrop (12 %), spessartin (12 %) a grosulár (4 %). Biotit tvoří lištovité agregáty.

2.3.1.6 Alterace

Horniny podléhají lokálně několika typům alterací. Prvním typ se vyvíjí okolo karbonátových žil a je charakteristický úplnou kaolinizací živců, tmavé minerály jsou nahrazeny chloritem a karbonátem (Obr. 91, Obr. 92, Obr. 95, Obr. 96, Obr. 97, Obr. 98, Obr. 99, Obr. 100). Křemen zůstává stabilní. Druhý typ alterace je typický celkovým zesvětlením horniny (Obr. 93, Obr. 94). Živce jsou sericitizované (Obr. 103, Obr. 104), biotit je nahrazen světle zeleným chloritem. Je nápadný svými anomálními levandulově modrými interferenčními barvami (Obr. 101, Obr. 102), které jsou typické právě pro sekundární chlority. Křemen zůstává opět stabilní. Místy byly v horninách postižených druhým typem alterace pozorovány drobné karbonátové žilky (Obr. 105, Obr. 106). Horniny vzácně podléhají rovněž pyritizaci. Obsah pyritu v hornině může přesáhnout i 25 % (Obr. 107, Obr. 108).



Obr. 91 Vzorek BGS 24 VD 9,7 m – zcela alterovaný amfibolit



Obr. 92 Vzorek BGS 24 VD 9,7 m – zcela alterovaný amfibolit



Obr. 93 Vzorek BGS 24 H 9,9 m – alterovaný amfibolit



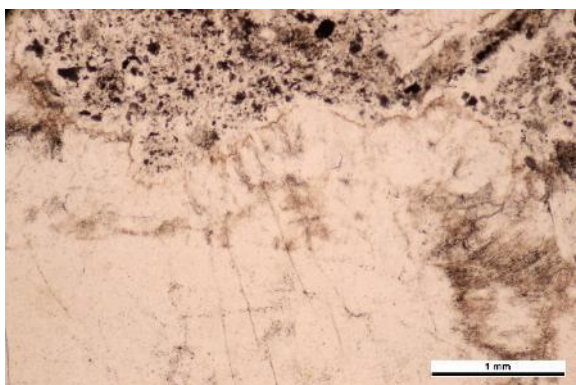
Obr. 94 Vzorek BGS 24 H 9,9 m – alterovaný amfibolit



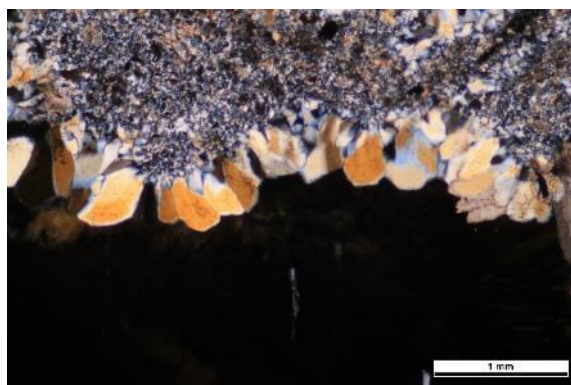
Obr. 95 Karbonátová žíla – 20. patro



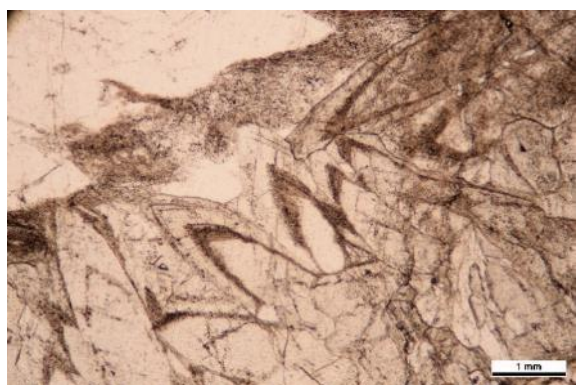
Obr. 96 Karbonátová žíla – 20. patro



Obr. 97 Vzorek BGS 24 VD 9,7 m – Křemenný lem kolem karbonátové žilky



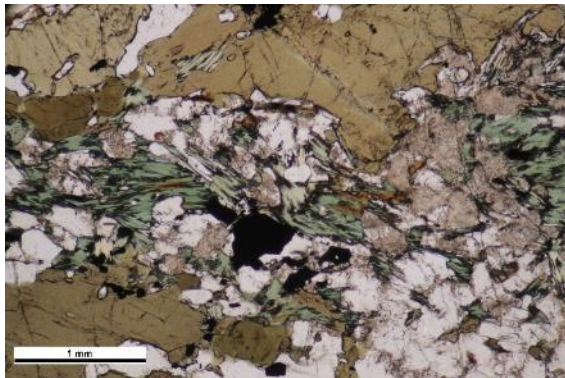
Obr. 98 Vzorek BGS 24 VD 9,7 m – Křemenný lem kolem karbonátové žilky (XPL)



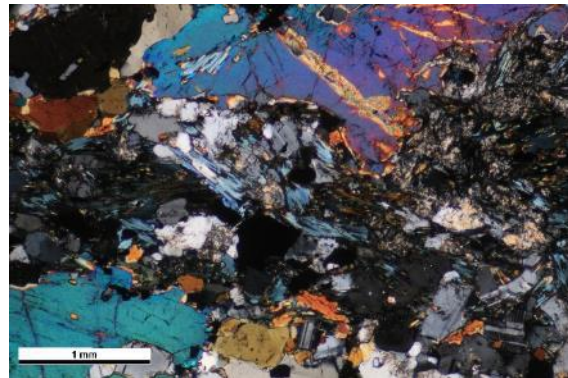
Obr. 99 Vzorek BGS 24 VD 9,7 m



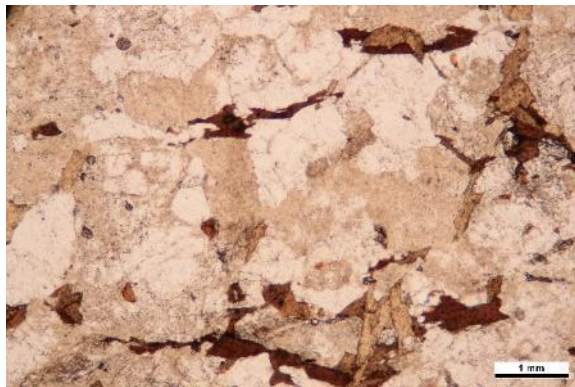
Obr. 100 Vzorek BGS 24 H 9,9 m – karbonát



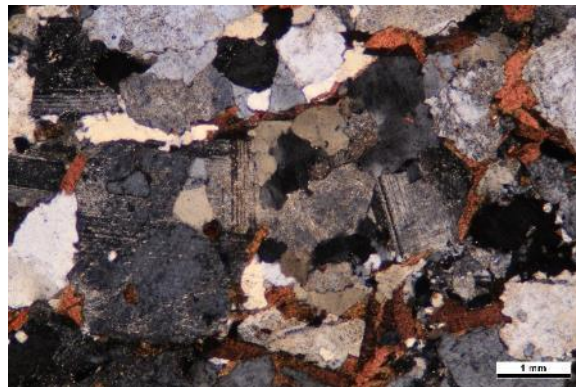
Obr. 101 Vzorek 1 – chloritizace biotitu



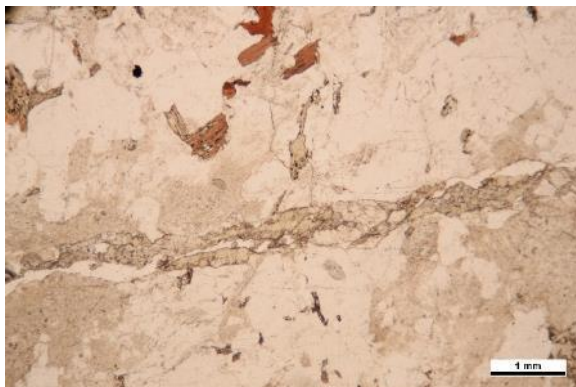
Obr. 102 Vzorek 1 – chloritizace biotitu - anomální levandulově modré interferenční barvy



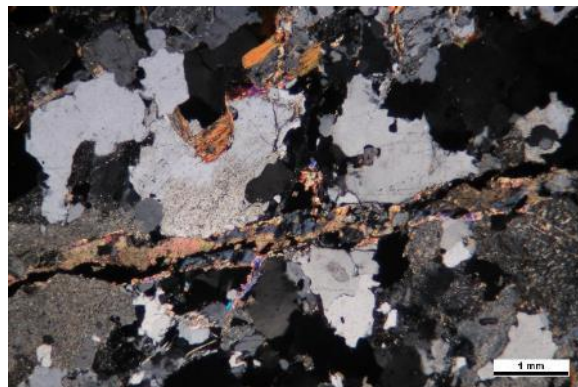
Obr. 103 Vzorek HD 1 – sericitizace plagioklasu



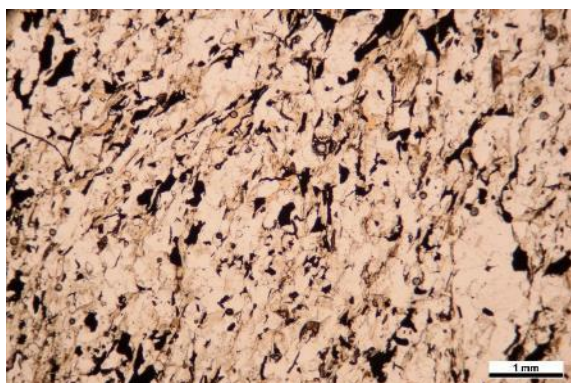
Obr. 104 Vzorek HD 1 – sericitizace plagioklasu (XPL)



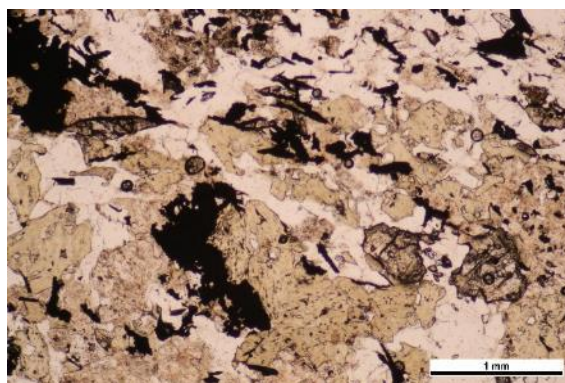
Obr. 105 Vzorek 16295 – karbonátová žilka



Obr. 106 Vzorek 16295 – karbonátová žilka (XPL)



Obr. 107 Vzorek 12 – pyritizace



Obr. 108 Vzorek 12 – pyritizace

2.3.1.7 Sukcese mineralizace, charakterizace metasomatických procesů

Metasomatické procesy, které jsou charakteristické pro rudní struktury ložiska Rožná – episyenitizace, albitizace – nebyly v oblasti, ve které probíhalo řešení projektu, zastíženy. Zóna dokumentovaná na 20. patře byla bez uranového zrudnění.

Zóna je tvořena silně kataklazovanými pararulami, které jsou pronikány řadou karbonátových žilek o mocnosti od několika mm do prvních decimetrů. Samotné ruly jsou postiženy řadou přeměn – živce jsou sericitizovány a karbonatizovány, přičemž plagioklasy vykazují vyšší míru postižení než živce draselné. Biotit je vybělen, méně často chloritizován. V takto alterovaných horninách se lokálně objevuje zvýšené množství grafitu a pyritu (oba do 20 %).

Minerální sukcese převládajících metamorfovaných hornin, jak amfibolitů, tak i metapelitů je převážně prográdní. Pouze lokálně se vyskytují zóny alterace, kde dochází k retrográdním přeměnám a tvorbě chloritu, sericitu, kaolinitu a karbonátů.

2.3.1.8 Geochemické vlastnosti hornin z pohledu jejich redukčního potenciálu

Hlavní horninové typy, ruly i amfibolity obsahují minerály s vysokým obsahem Fe^{2+} – biotit a amfibol. Mikrosondové analýzy biotitu (Tab. 5, 6, 17, 18 v Elektronická příloha 15) i amfibolu (Tab. 7, 19, 20, 21 v Elektronická příloha 15) dokládají, že většina železa se v těchto minerálech vyskytuje ve formě dvojhvalentní a má proto výrazný redukční potenciál. Rovněž celkové obsahy FeO_{tot} . Jsou ve všech horninových typech relativně vysoké. U rul se pohybují mezi 1,28–6,11, u amfibolitů jsou podstatně vyšší – 6,88–12,4. Obsah FeO_{tot} však celkově klesá se stupněm migmatitizace na 1,44–5,8 hm. % (Tab. 2 v Elektronická příloha 15). Většina studovaných hornin navíc obsahuje proměnlivé množství biotitu, který bude redukční potenciál horniny dále zvyšovat. V některých případech alterovaných rul obsah pyritu v hornině dosahuje 20 objemových procent, obsah FeO_{tot} pak stoupá až na 11,7 hm %.

2.3.1.9 Shrnutí petrografie

Studovaná oblast je tvořena vulkanosedimentárním souvrstvím metamorfovaným v amfibolitové facii. Krajním metasedimentárním členem jsou biotitické pararuly, místy s granátem, metavulkanity jsou představovány amfibolity, místy rovněž s granátem. Protolit rul je na základě výsledků chemických analýz možno označit jako metapelity a droby, protolitem amfibolitů pak byly horniny bazického charakteru. Mezi oběma krajními členy jsou přechody jak plynulé – amfibolicko biotitické ruly až biotitické amfibolity, tak poměrně ostré. Je tedy pravděpodobné, že se jedná o původní tufy, tufity i lávy. Zejména metasedimenty jsou v různé míře migmatitizovány. Metatexity většinou převažují nad diatexity. Migmatitizace se projevuje zhrubnutím zrna, světlejší barvou podmíněnou zastoupením neosomu vůči paleosomu, v hornině se zvyšuje zastoupení draselného živce, vzácně se objevuje i muskovit. V melanosomu se vzácně objevuje sillimanit vznikající rozpadem biotitu. Diatexity tvoří většinou nepravidelné avšak více méně konkordantní polohy v metatexitech, jsou velmi světlé, hrubozrnné. Ojediněle byly nalezeny diskordantní žíly leukokrátních granitů, místy s granátem, které představují vykrystalovanou taveninu (segregovaný neosom), který intrudoval do okolních hornin. Amfibolity jsou migmatitizovány v podstatně menší míře. Migmatitizace se v nich projevuje opět zhrubnutím zrna a výskytem malého množství neosomu, který má tonalitové složení, na rozdíl od neosomu uvolněného z metapelitů, který má charakter granitický. Velmi vzácně se objevují horniny dříve označované jako stromatity nebo erlany. Jedná se o nehomogenní horniny, ve kterých se střídají pásy a nepravidelné polohy jemnozrnných pyroxenických amfibolitů se světlejšími, plagioklasem bohatšími amfibolity. Od běžných amfibolitů se liší vyšším zastoupením vápníku. Minerální asociace rul, migmatitů i amfibolitů, zejména nepřítomnost kyanitu, který by indikoval vyšší tlaky a nepřítomnost cordieritu či andaluzitu indikujících tlaky nižší je zcela v souladu s P–T daty 700–750°C a 5–7 kbar získanými P–T modelováním.

2.3.2 Modelování teplotně-tlakových podmínek metamorfózy

Pro P–T modelování byly vybrány 4 vzorky skupinou MU – dva vzorky migmatitické pararuly, jeden vzorek granátického amfibolitu a jeden vzorek amfibolitu bez granátu. Jedná se o vzorky odebrané z 24. patra dolu Rožná s označením dokumentačních bodů 296MPL0001 (vzorek 1), 296MPL0013 (vzorek 7a), 296MPL0010 (vzorek 6a), 296MPL0011 (vzorek 6b) viz Elektronická příloha 6. Ke studiu byla použita pouze data pořízená prof. Leichmannem a Mgr. Michaelou Boškovou. Tato data zahrnují silikátové analýzy vzorků celých hornin a minerální chemické analýzy pořízené na elektronové mikrosondě na společném pracovišti ČGS a MU Brno.

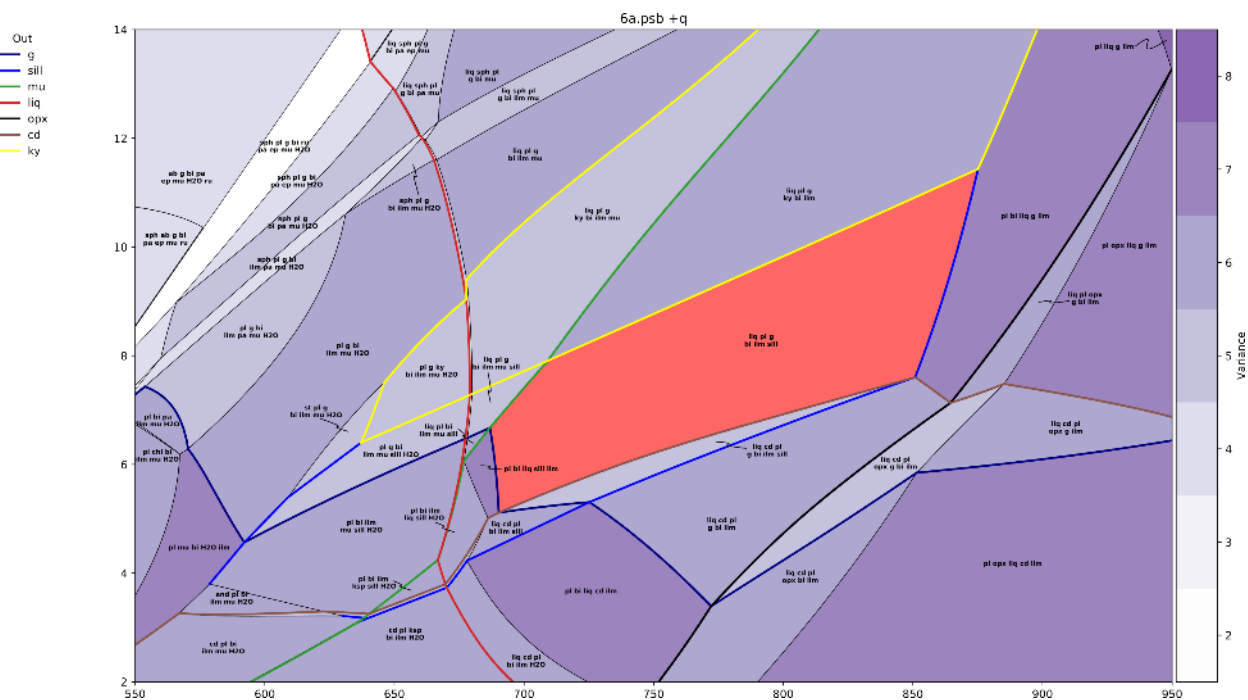
Výpočet odhadu P–T podmínek ekvibrace hornin byl proveden v programu Thermocalc 3.40 a 3.45 (Powell et al. 1998) s použitím databáze ds62.txt (Holland and Powell 2011) v systému MnO-Na₂O-CaO-K₂O-FeO-MgO-Al₂O₃-SiO₂-H₂O-TiO₂-O (MnNCKFMASHTO) s míšivostními modely pevných roztoků hlavních fází podle Green et al. (2016; amfibol, tonalitická tavenina), White et al. (2014; granát, muskovit, biotit, chlorit a ilmenit), Holland a Powell (2011; epidot) a Holland a Powell (2003; živec). Všechny pseudosekce byly počítány s množstvím vody takovým, které odpovídá vodě stanovené v poskytnuté silikátové analýze. Pouze amfibolit bez granátu byl modelován v systému neobsahujícím MnO.

Migmatitická pararula (vzorek 6a a 6b)

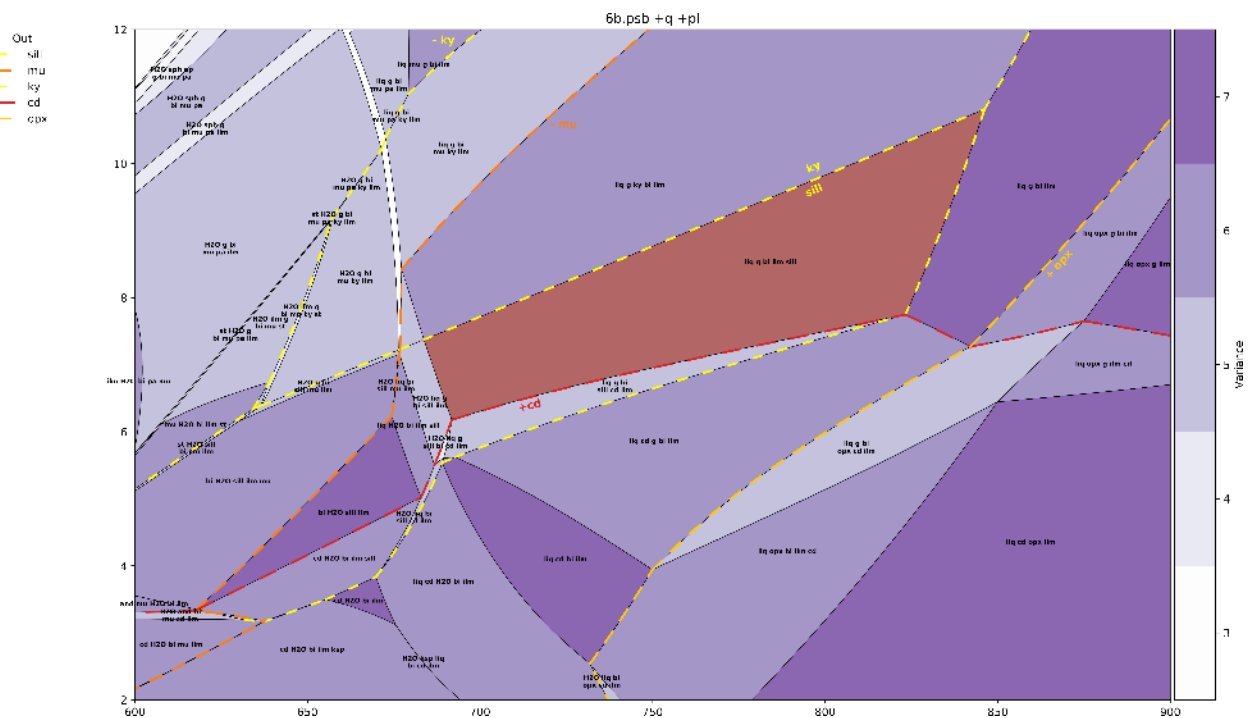
Protože se oba tyto vzorky podobají jak minerálním složením, tak celkovým složením horniny, pro ilustraci byl vybrán pouze vzorek 6a (Obr. 109). Pro vzorek 6b je uvedena pouze pseudosekce (Obr. 110).

Migmatitická pararula 6a je hornina složená z křemene, plagioklasu ($X_{Ab} = 0,81$), K-živce, biotitu ($X_{Mg} = 0,47-0,49$; $TiO_2 = 0,14-0,15$), ilmenitu a drobného xenomorfního granátu ($Alm = 0,68-0,65$; $Sps = 0,10-0,16$; $Prp = 0,18-0,14$; $Grs = 0,04-0,06-0,05$; $X_{Mg} = 0,21-0,17$). Akcesoricky se vyskytuje monazit, rutil, apatit, zirkon, grafit a sulfidy. V některých výbrusech též sillimanit.

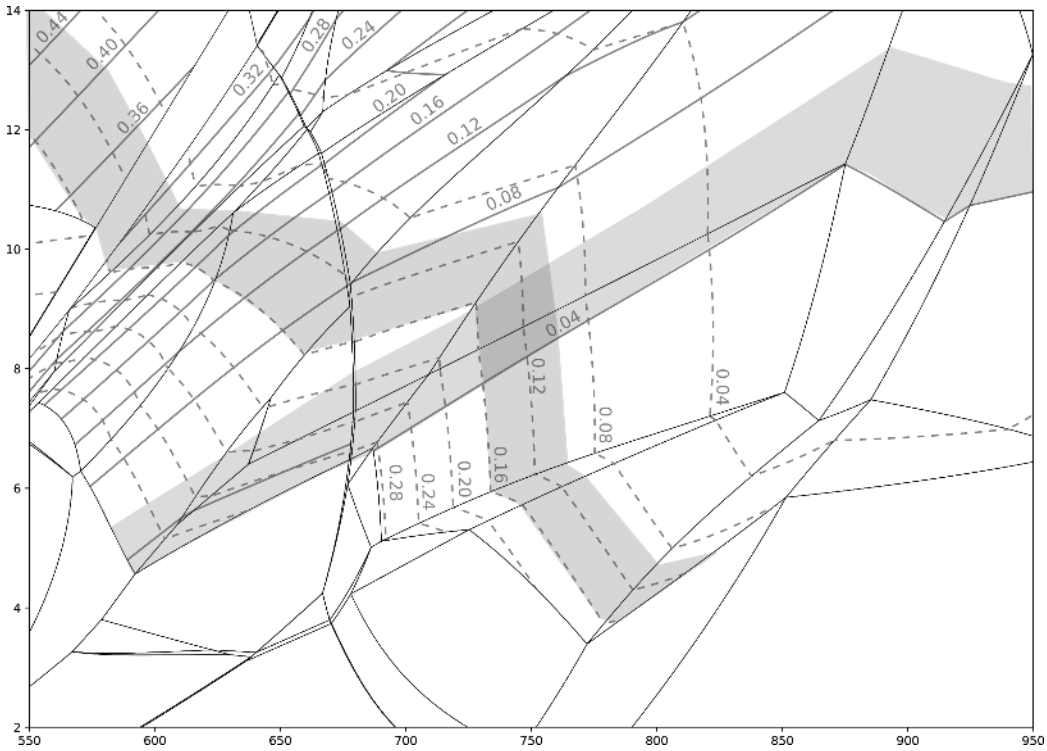
Popsaná minerální asociace odpovídá širokému poli ležícímu za 700–850 °C a 5–9 kbar, tedy za význačnou reakcí rozpadu muskovitu, v poli stability sillimanitu (Obr. 109). Z hlediska chemického složení jednotlivých fází dochází ke značným nesouladům mezi pozorovaným a předpovídaným složením na základě P–T modelování. Složení granátu reprezentované izoplety spessartinu a grosuláru se překrývá s vypočteným polem stability hlavních fází okolo 750 °C, 8 kbar (Obr. 111), avšak měřené X_{Mg} granátu je o 10 % nižší, než předpovídá pseudosekce (Obr. 112). Obdobně je tomu u složení biotitu – zatímco měřený obsah Ti (a.p.f.u.) leží v níže teplotní části preferovaného pole stability, X_{Mg} v biotitu v pseudosekci naprosto neodpovídá změřeným hodnotám (Obr. 113). Anortitová komponenta v plagioklasu předpovídaná pseudosekcí je rovněž nadhodnocená oproti měřeným hodnotám (Obr. 114).



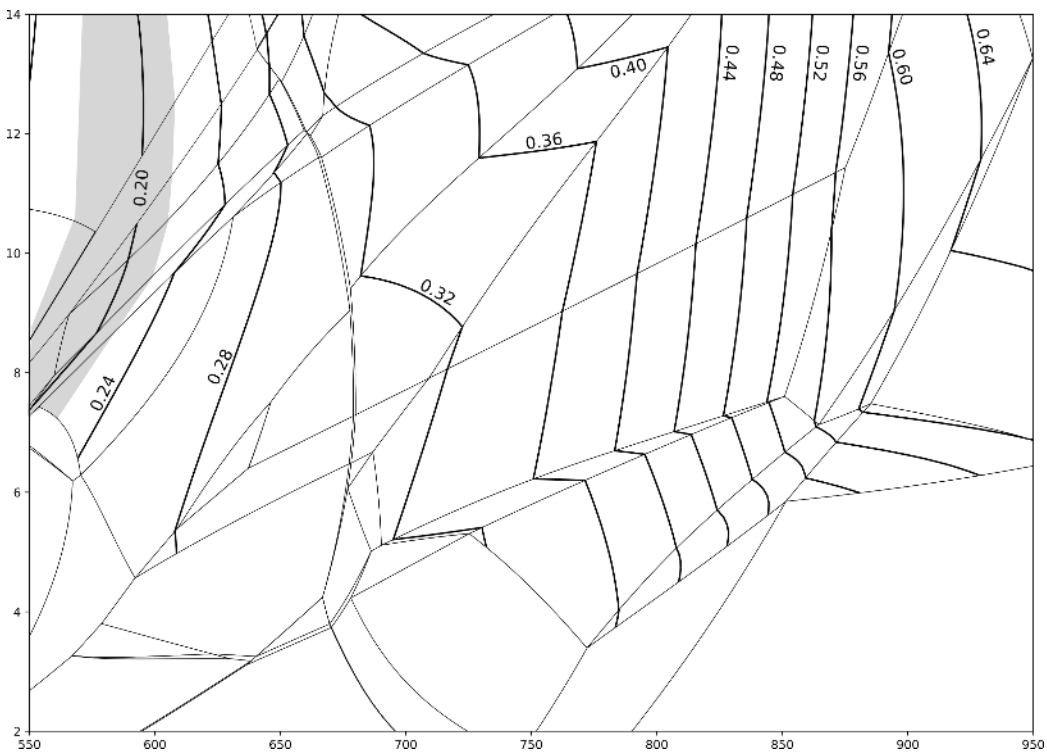
Obr. 109 P–T pseudosekce pro vzorek migmatitické pararuly 6a



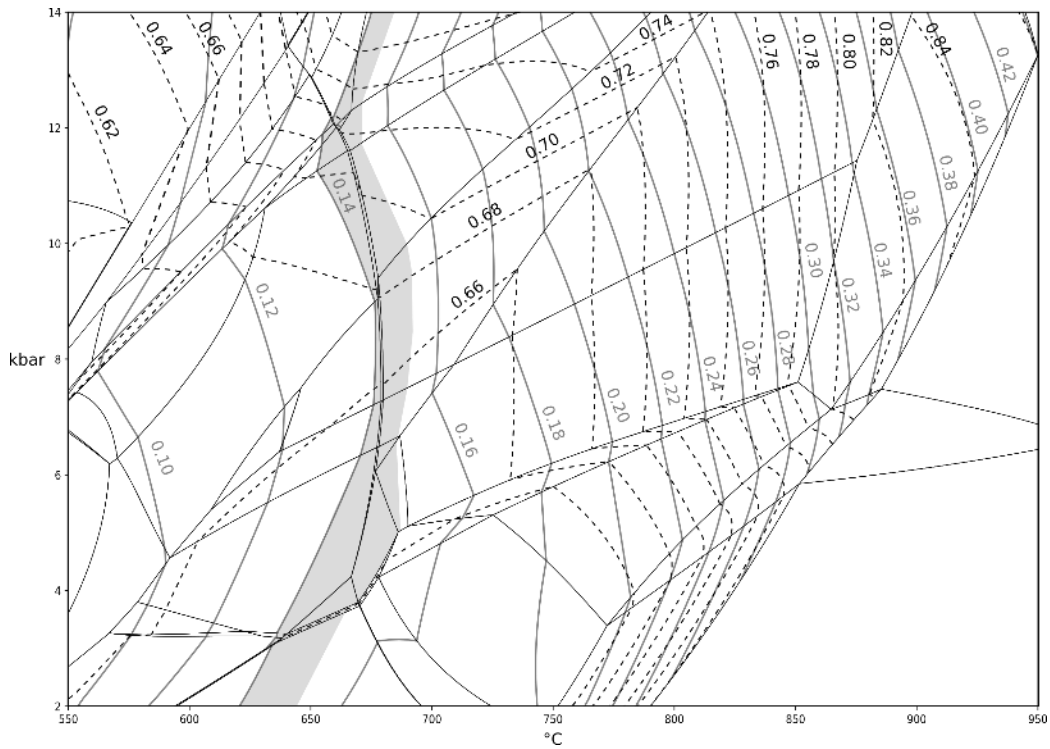
Obr. 110 P–T pseudosekce pro vzorek migmatitické pararuly 6b



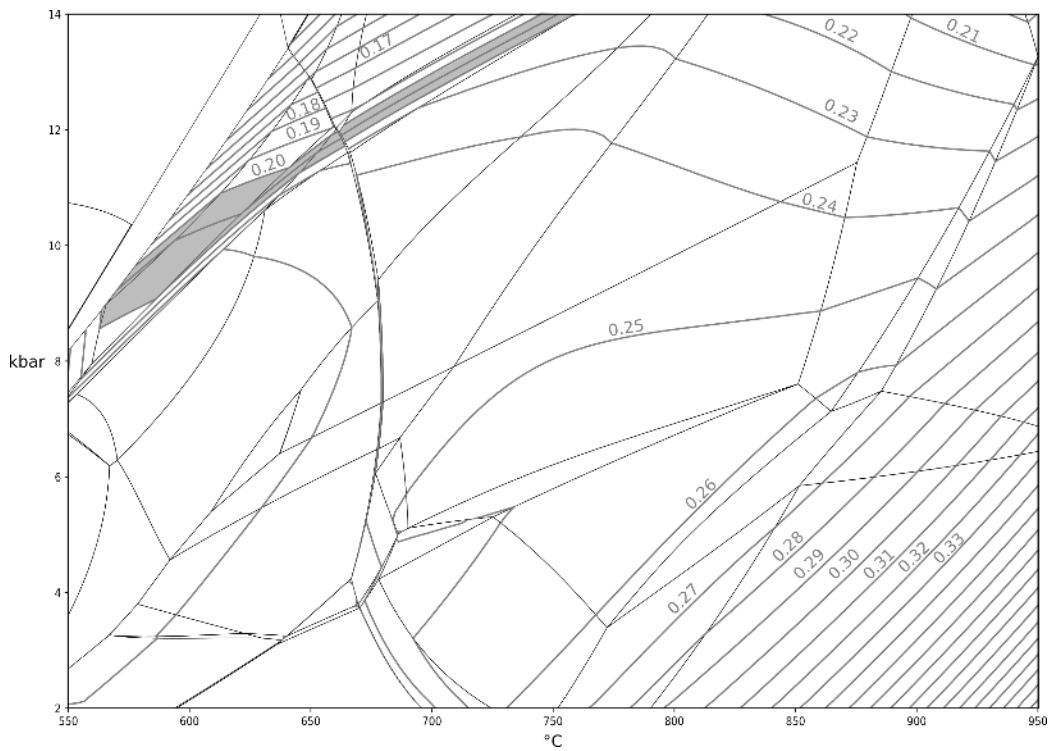
Obr. 111 Izoplety spessartinové (čárkované) a grosulárové komponenty (plně) v granátu ze vzorku 6a. Vyznačená šedá pole odpovídají pozorovanému složení granátu



Obr. 112 Izoplety XMg granátu ze vzorku 6a. Vyznačené šedé pole odpovídá pozorovanému složení granátu



Obr. 113 Izoplety X_{Mg} a Ti (a.p.f.u.) v biotitu. Vyznačené pole odpovídá měřenému složení Ti (a.p.f.u.). Hodnota X_{Mg} předpovídaná pseudosekcí nezahrnuje pozorované složení biotitu

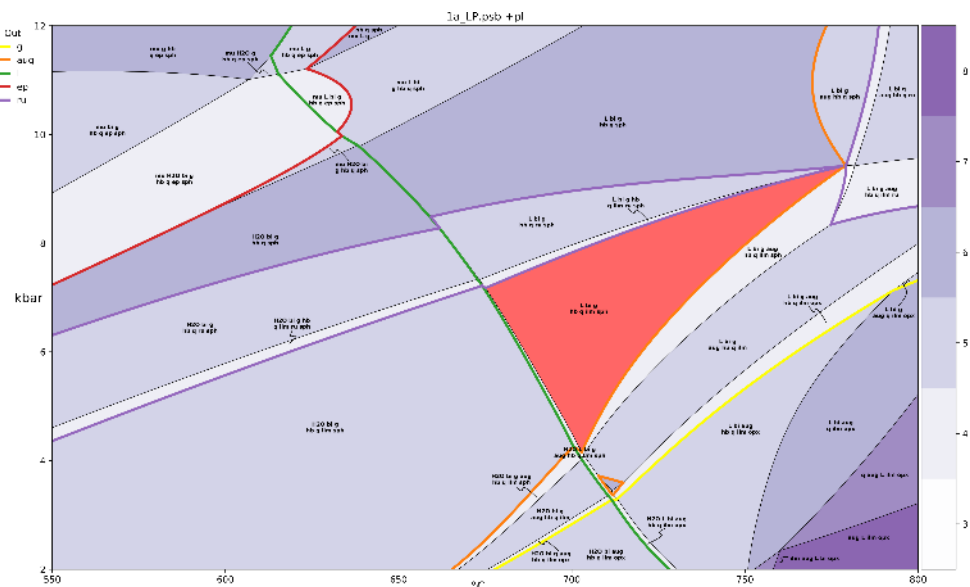


Obr. 114 Izoplety X_{An} v plagioklasu. Vyznačené pole odpovídá pozorovanému složení

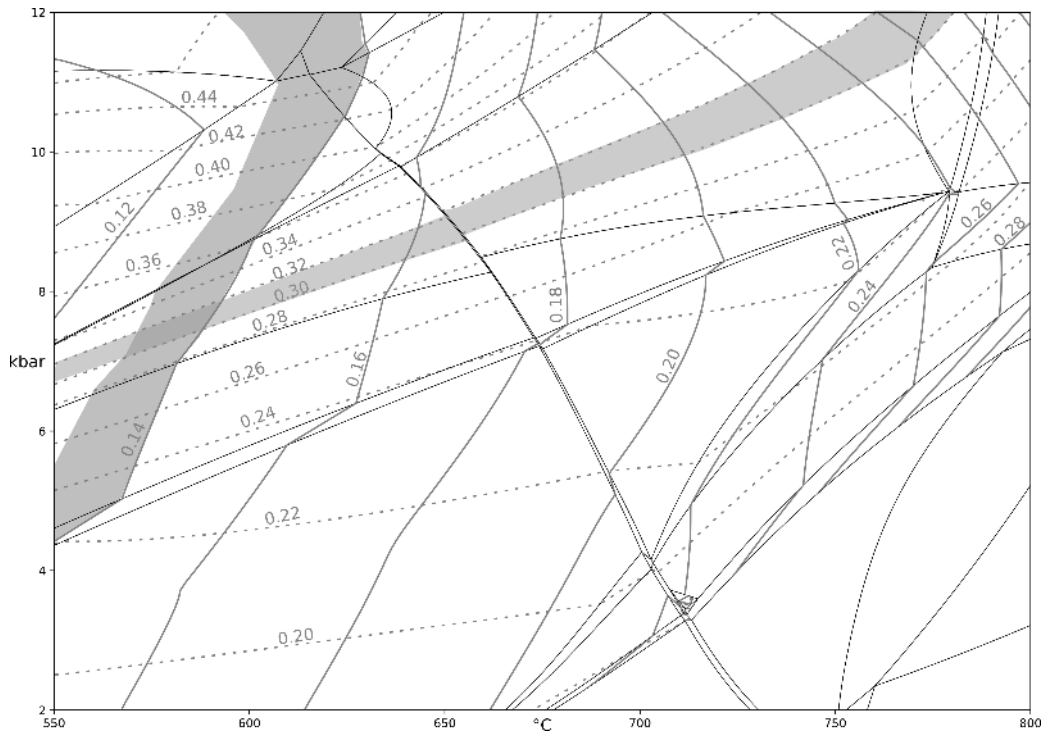
Granátický amfibolit (vzorek 1a)

Granátický amfibolit je složený z amfibolu (feropargasit, $Al(C)/2 = 0,23–0,38$; $Na(B)/2 = 0,04–0,05$; $Na(A) = 0,36–0,54$; $Ca(B)/2 = 0,86–0,91$; $XMg = 0,41–0,44$), plagioklasu ($XAb = 0,68–0,79$), křemene a kostrovitých porfyrblastů granátu ($Alm = 0,56→0,58$; $Sps = 0,03→0,01$; $Prp = 0,09–0,10$; $Grs = 0,31–0,32$; $XMg = 0,14→0,13$) s hojnými inkluzemi, především křemene a amfibolu. Amfibolit podřízeně obsahuje biotit ($XMg = 0,37$; $TiO_2 = 0,32$) a ilmenit, který je nahrazován titanitem. Hornina je ovlivněna retrográdními přeměnami, které se vyznačují zejména nahrazením okrajů amfibolu, granátu a biotitu chloritem ($XMg = 0,30$). Akcesoricky se vyskytuje apatit, zirkon, sulfidy a draselný živec ($XAb = 0,03$).

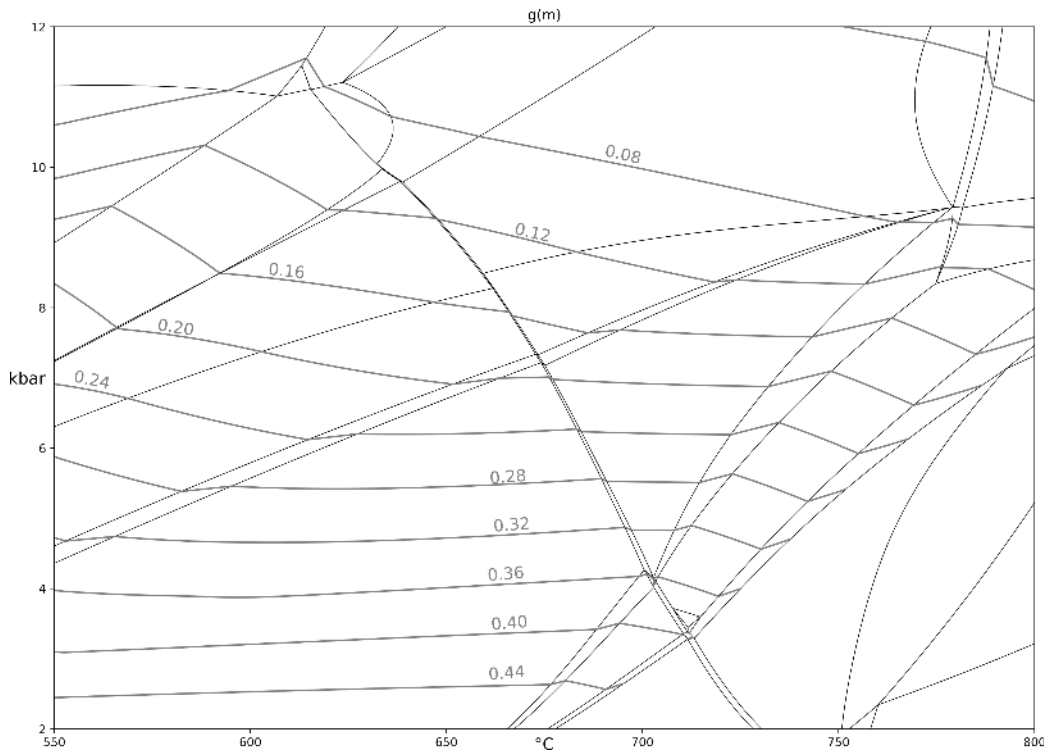
Popsaná minerální asociace odpovídá poli ležícímu za $670–770\text{ °C}$ a $4–8\text{ kbar}$, tedy před význačnou reakcí objevení klinopyroxenu, za absence rutilu a v poli částečného tavení (Obr. 115). Z hlediska chemického složení jednotlivých fází dochází obdobně jako u předchozího vzorku k značným nesouladům mezi pozorovaným a předpokládaným složením z P–T modelování. Složení granátu neodpovídá předvídanému. Izoplety XMg a grosulárové komponenty se protínají mimo pozorované pole stability hlavních fází za teplot okolo 570 °C a 7 kbar (Obr. 116) a tedy v oblasti mimo parciální tavení. Izoplety spessartinové komponenty jsou výrazně nadhodnoceny vůči pozorované koncentraci v granátu (Obr. 117). Složení plagioklasu předvídané pseudosekcí je v pozorovaném poli stability nabohacené anortitovou komponentou vzhledem k měřenému složení plagioklasu (Obr. 118). P–T modelování však ukazuje velmi dobrý soulad mezi pozorovaným složením amfibolu a složením v preferovaném poli stability. Jak měřené zastoupení Al na pozici C, tak parametr Na na pozici A ukazuje překryv s předvídaným složením z P–T modelování (Obr. 119). Obdobně je tomu u zastoupení Na na pozici B a parametr $Ca(B)/2$ (Obr. 120), které ukazují na rovněž velmi dobrý soulad.



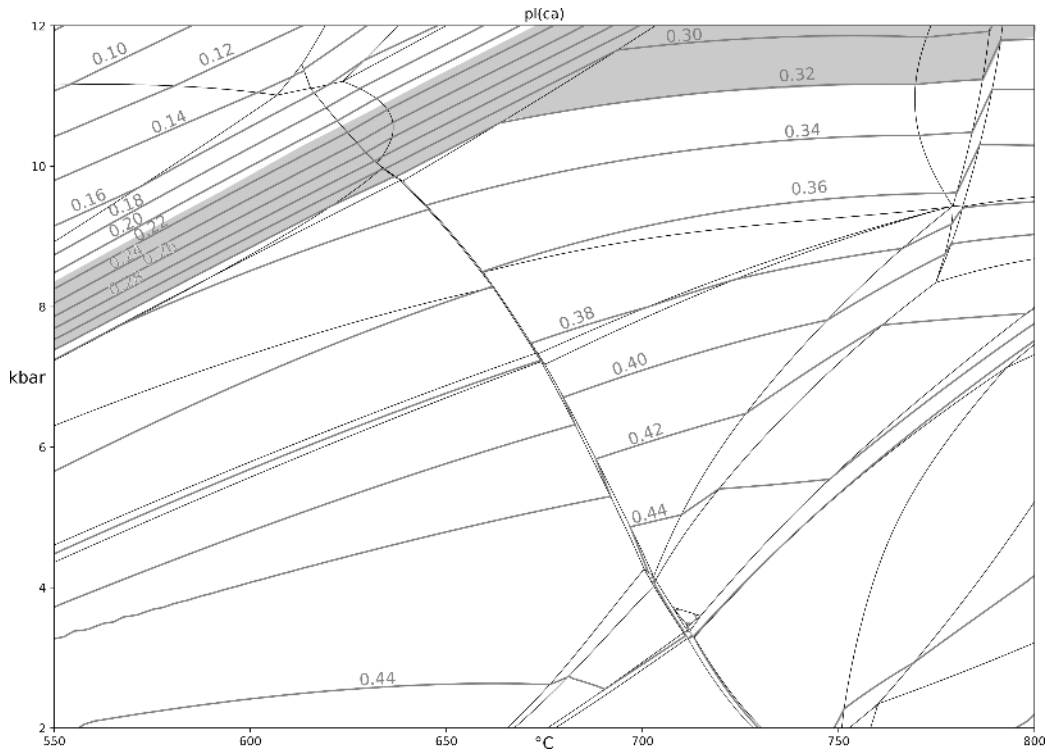
Obr. 115 P–T pseudosekce pro vzorek granátického amfibolitu 1a



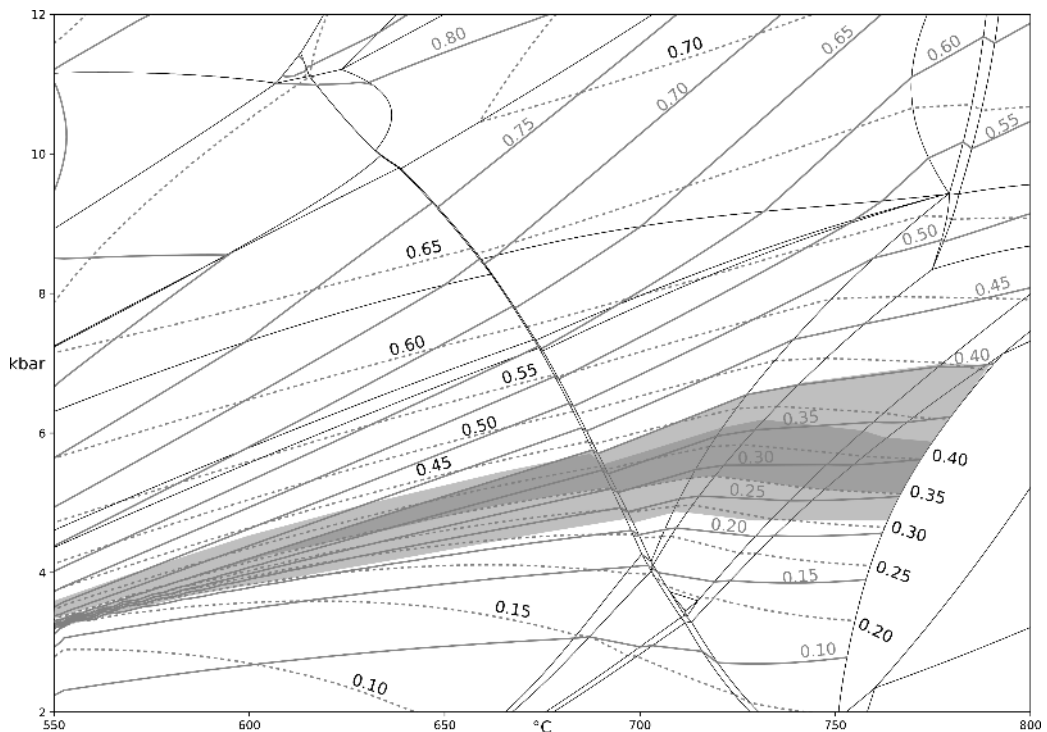
Obr. 116 Izoplety XMg (plně) a grosulárové komponenty (čárkovaně) granátu ze vzorku 1a. Vyznačená šedá pole odpovídají pozorovanému složení granátu



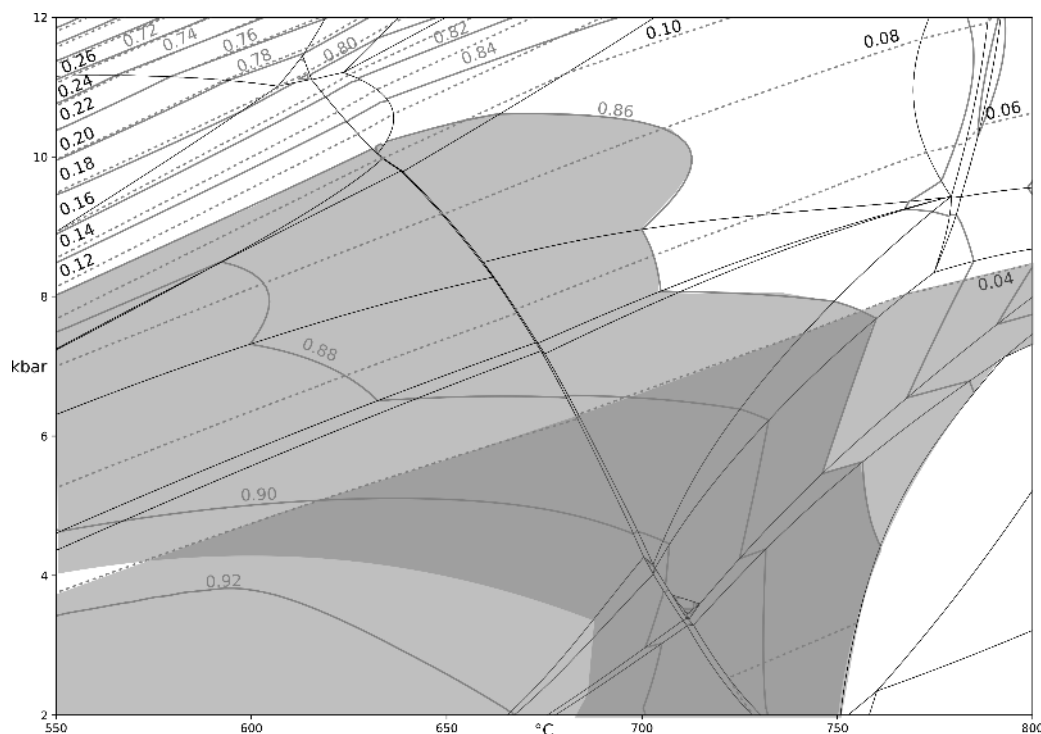
Obr. 117 Izoplety spessartinové komponenty granátu ze vzorku 1a. Pseudosekce předpovídá výrazně vyšší koncentrace, než jsou koncentrace měřené. Pro podrobnosti viz text



Obr. 118 Izoplety anortitové komponenty v plagioklasu vzorku 1a. Vyznačená šedá pole odpovídají pozorovanému složení plagioklasu



Obr. 119 Izoplety Al(C)/2 (plně, šedé popisy izoplet) a Na(A) (čárkovaně, černé popisy izoplet) v amfibolu ze vzorku 1a. Vyznačená šedá pole odpovídají pozorovanému složení amfibolu



Obr. 120 Izoplety Ca(B)/2 (plně, šedé popisy izopleť) a Na(B)/2 (čárkovaně, černé popisy izopleť) v amfibolu ze vzorku 1a. Vyznačená šedá pole odpovídají pozorovanému složení amfibolu

Amfibolit bez granátu (vzorek 7a)

Amfibolit bez granátu je stejnozrná hornina složená z amfibolu (pargasit až feropargasit, $\text{Al(C)/2} = 0,23\text{--}0,41$; $\text{Na(B)/2} = 0,02\text{--}0,04$; $\text{Na(A)} = 0,35\text{--}0,42$; $\text{Ca(B)/2} = 0,93\text{--}0,97$; $\text{XMg} = 0,43\text{--}0,53$), plagioklasu ($\text{XAb} = 0,54\text{--}0,65$), křemene a titanitu, který pravděpodobně nahrazuje rutil. Přítomen je místy také biotit ($\text{XMg} = 0,53$; $\text{TiO}_2 = 0,22\text{--}0,23$). Akcesoricky se vyskytuje apatit, zirkon, pyrit a draselný živec.

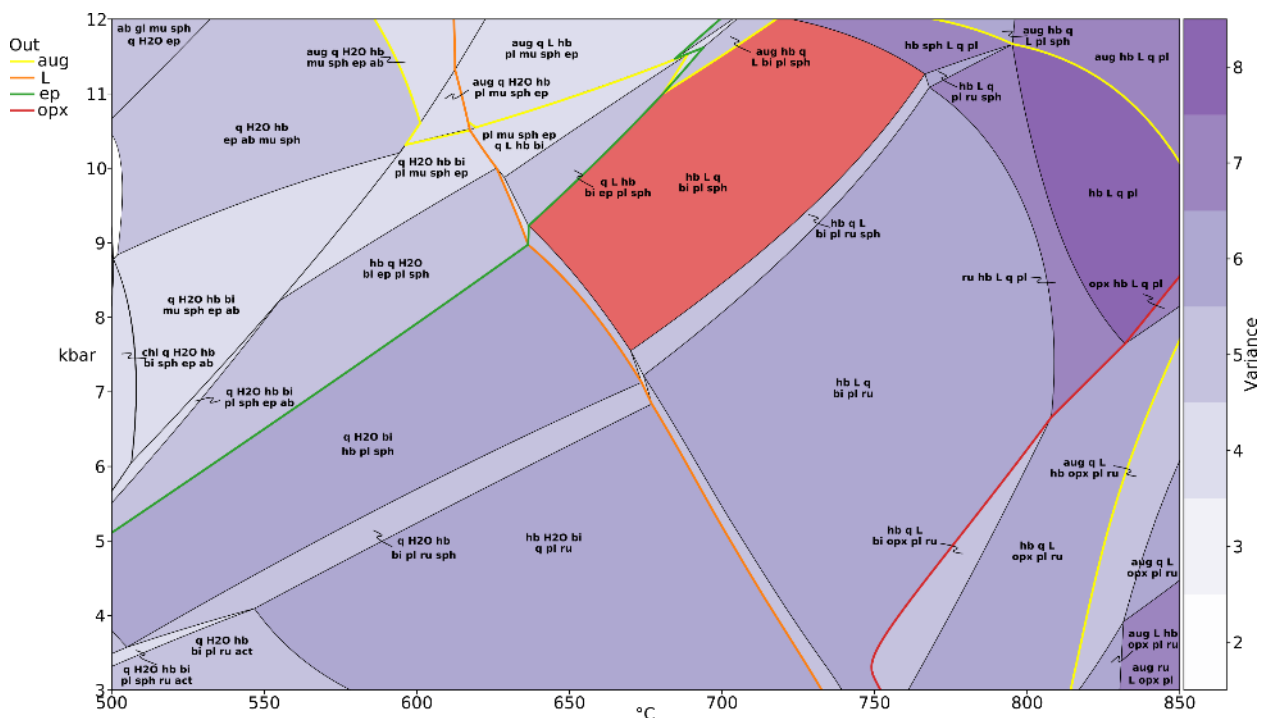
Pro P–T modelování byl zvolen zjednodušený systém bez MnO , z důvodu silné frakcionace Mn do granátu a tedy jeho nerealisticky zvýšenému poli stability, které neodpovídá pozorované granát absentní minerální asociaci.

Minerální asociace horniny je poměrně jednoduchá a za solidem jí odpovídá pole stability mezi $650\text{--}750\text{ °C}$ a $7\text{--}11\text{ kbar}$ (Obr. 121). Zleva je pole vymezeno objevením epidotu a částečným tavením, vyšší teploty by pak znamenaly absenci biotitu v rozporu s pozorováním a zároveň relativně vysoký stupeň tavení.

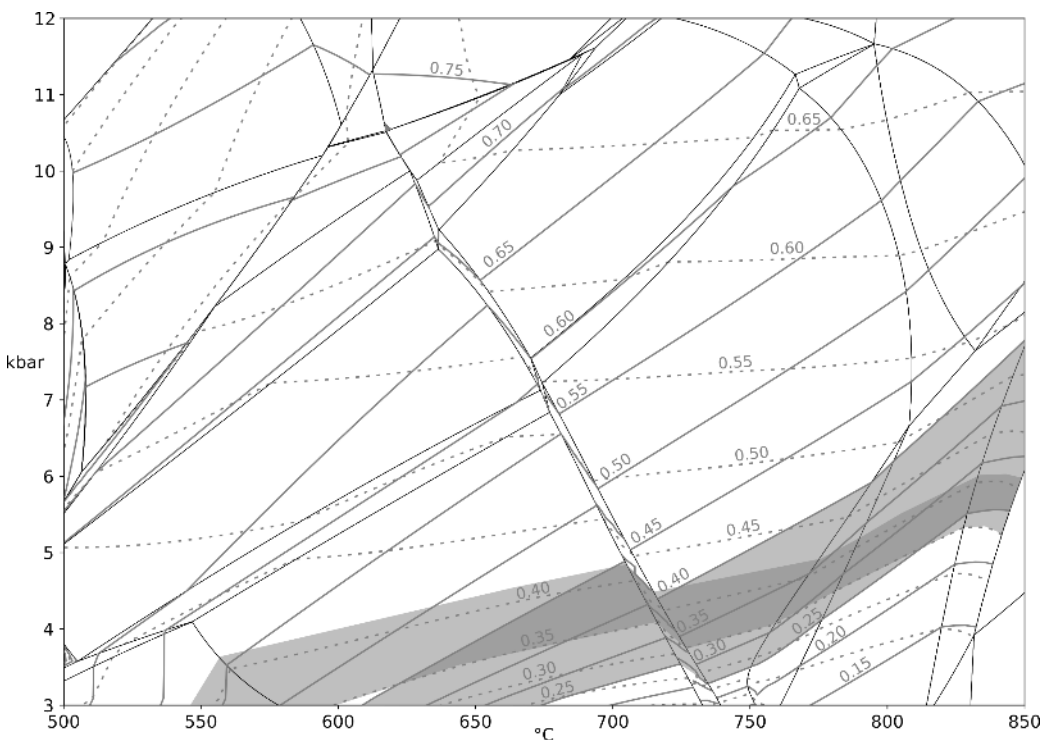
Složení amfibolu předpovídané pseudosekcí je značně odlišné od měřeného. Izoplety Al(C)/2 , Na(B)/2 (Obr. 122) a Na(A) (Obr. 123) předpovídají výrazně nižší tlak ($< 5\text{ kbar}$) a izoplety Ca(B)/2 naopak pro dané složení předvídají nižší tlak.

Široké rozmezí měřeného složení plagioklasu (Obr. 124) se velkou měrou překrývá s favorizovaným polem z Obr. 123 (a to ve vyšších hodnotách albitové komponenty).

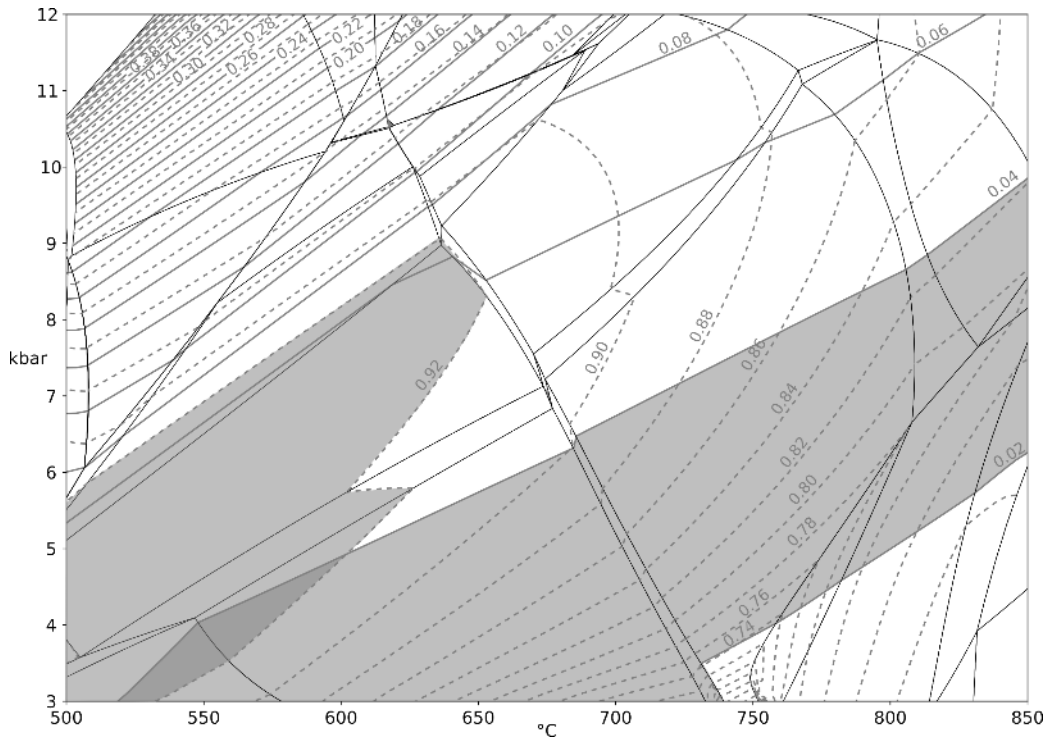
Izoplety XMg v biotitu předpovídané pseudosekcí jsou výrazně nadhodnoceny oproti měřeným hodnotám ($> 0,66$ oproti pozorovaným $0,52$). Tento jev může být způsoben retrográdním původem měřeného biotitu.



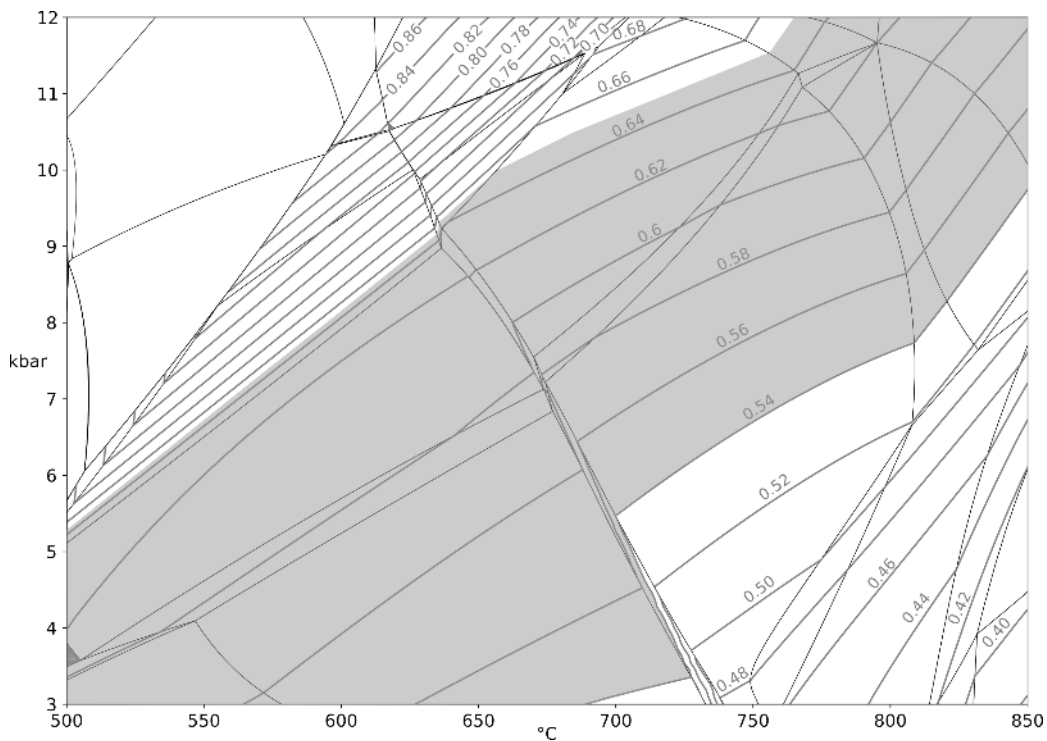
Obr. 121 P–T pseudosekce pro vzorek 7a (amfibolit bez granátu). Preferované pole stability je vyznačeno červeně



Obr. 122 Izoplety Al(C)/2 (plně) a Na(A) (čárkovaně) pro vzorek amfibolitu bez granátu (vzorek 7a). Šedá pole vyjadřují překryv měřených složení ve vzorku



Obr. 123 Izoplety Na(B)/2 (plně) a Ca(B)/2 (čárkovaně) pro vzorek amfibolitu bez granátu (vzorek 7a). Šedá pole vyjadřují překryv měřených složení ve vzorku



Obr. 124 Izoplety XAb v plagioklasu ve srovnání s měřenými hodnotami (šedé pole) pro vzorek 7a

Diskuze a výsledky P-T modelování

P–T modelování ukázalo, pravděpodobné podmínky vzniku pozorované minerální asociace pro metasedimentární migmatit (vzorek 6a, 6b), granátický amfibolit (vzorek 1a) a amfibolit bez granátu (vzorek 7a), avšak pozorované minerální složení se významně liší od modelovaného. Provedené P–T modelování je zatíženo několika nedostatky, které mohou tento nesoulad vysvětlit.

1. Prvním problémem může pravděpodobně být nevhodně zvolené celkové složení horniny. Migmatit je značně páskovaná nehomogenní hornina, a tudíž silikátová analýza představuje jakousi průměrnou hodnotu jednotlivých pásků (zejména melanosom-leukosom). Naopak měřené složení jednotlivých fází vychází pouze z několika cm² domény výbrusu, která se od průměrného složení může značně lišit. Tento problém by bylo možné zhodnotit změřením průměrného složení přímo výbrusu a porovnáním výsledků.

2. Minerální složení fází v částečně tavených horninách je značně citlivé na uvažovaný podíl vody. Při přechodu solidu je však množství vody v přebytku u metasedimentárního migmatitu za $> 6 \text{ kbar} < 2 \%$, a tudíž tento efekt by neměl být zásadní pro uvažované složení fází. Obdobně, uvažovaný podíl vody v amfibolitu se významně neliší od modelovaného.

3. Měřený granát v migmatitu není v rovnováze se zbytkem horniny během tavení. Profil granátem ukazuje, že směrem k okraji značně narůstá koncentrace spessartinu a klesá XMg. Takováto zonálnost je typicky považována za retrográdní a ukazuje na působení difuze během retrogrese případně rozpadu granátu a tedy k setření primární růstové zonality. Obdobně platí i o biotitu, jehož původně značně vyšší XMg hodnota mohla být setřena při retrográdní dráze horniny. Tato možnost pozdější reekvilibrace fází se jeví jako nejpravděpodobnější.

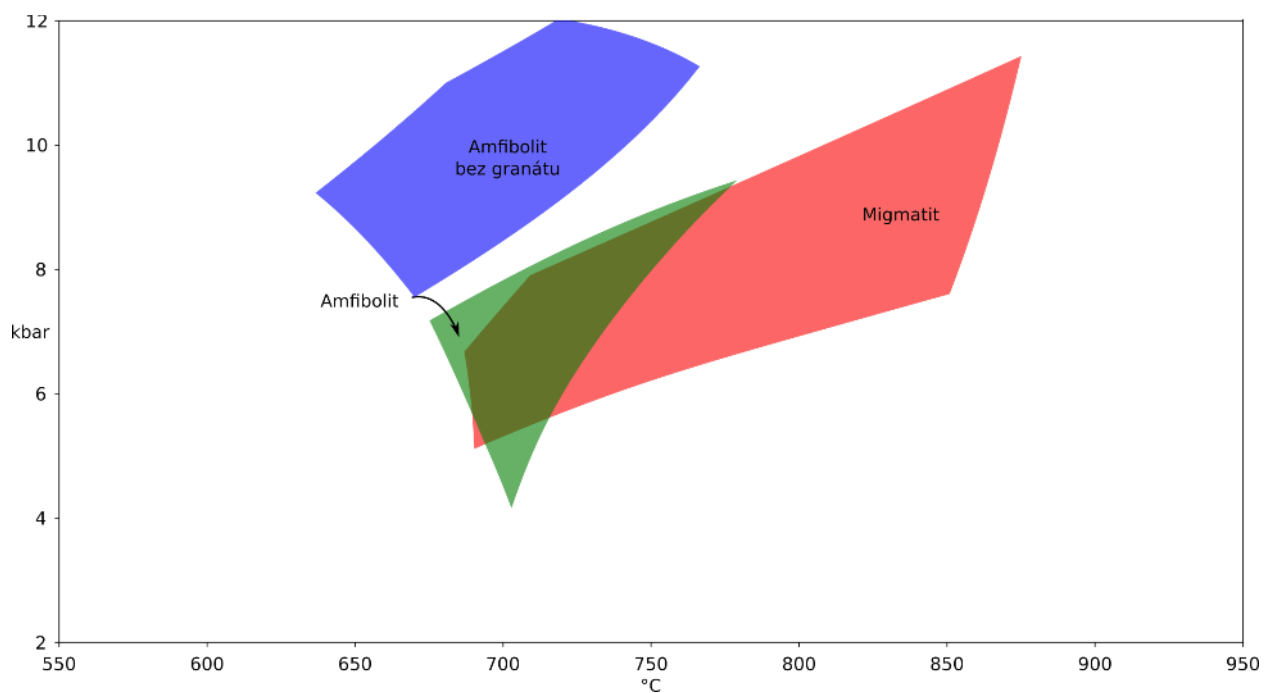
4. Měřený granát v amfibolitu rovněž svým složením neodpovídá předpovídanému složení. V tomto případě je pravděpodobně na vině absence mísivostních modelů v metabazitech, které obsahují manganové koncové členy. V rámci uvažovaných fází je granát téměř jediný, což vede k zcela dominantní frakcionaci Mn do granátu, rozšíření jeho pole stability do nižších teplot a tlaků a výraznému nabohacení spessartinového koncového členu (vzhledem k jeho malé modální proporcii). Kombinovaným efektem může dále být, že granát rostl dříve během prográdní dráhy a není tedy v rovnováze s hlavní metamorfní asociací při částečném tavení.

Odhlédneme-li od nedostatků ve složení jednotlivých fází, hlavní minerální asociace předvídaná pseudosekcemi jak pro migmatit, tak granátický amfibolit ukazuje na překrývající se P–T podmínky pravděpodobné hlavní ekvilibrace, a to za podmínek okolo 700–750 °C a 5–7 kbar (Obr. 125). To je výsledek zcela očekávatelný, neboť jak migmatit, tak amfibolit jsou horniny náležející ke stejnému metamorfnímu komplexu. Amfibolit bez granátu se těmto podmínkám vymyká více, avšak tato hornina byla modelována v jiném systému a obecně je její asociace podstatně chudší, což ztěžuje určení P–T podmínek.

Tato data korespondují s výsledky získanými z projektu PVP Bukov (Bukovská a Verner eds. 2017), kdy vypočtené teploty vzniku amfibolu pomocí amfibol-plagioklasového (Blundy a Holland 1990) termometru ukazují teploty 692–727 °C pro tlaky kolem 5 kbar. Amfibol v pegmatitu uvnitř amfibolitů poskytl P–T podmínky 669–691 °C (Blundy a Holland 1990) a tlaky kolem 5 kbar (Anderson a Smith 1995).

Z hlediska regionálního srovnání jsou relevantní data z článku Tajčmanová et al. (2010), který se zabývá P–T modelováním hornin svrateckého a poličského krystalinika a přílehlými granulitovými

tělesy. Tato oblast sousedí se strážeckým moldanubikem, z něhož byly odebrány vzorky pro P–T studii, viz výše. Horniny granulitové facie zde vykazují maximální teploty 860 °C pro felsické a 1000 °C pro intermediální granulity za tlaků 16 kbar. Při tlacích 6–8 kbar granulitové těleso dosáhlo okolních středně korových podmínek ekvilibrovaných při teplotách 660 °C a 8 kbar. Následně byl celý komplex reekvilibrován za 500–550 °C a 3–4 kbar (Pitra a Guiraud 1996, Košuličová 2007).



Obr. 125 Shrnutí výsledných odhadovaných P–T podmínek

2.3.3 Mineralogický výzkum výplně zlomů a poruch

2.3.3.1 Úvod

Uranové ložisko Rožná bylo vzhledem ke svému významu předmětem mnoha ložiskově geologických výzkumů (např. Arapov et al. 1984, Kříbek a Hájek 2005, Kříbek et al. 2009). V poslední době se výzkumy soustředí i do nově otevřeného podzemního výzkumného pracoviště Bukov v jižní části revíru (Bukovská a Verner 2017, Bukovská et al. 2019).

Ložisko je unikátní v tom, že se zde zachovaly projevy masivní opakované hydrotermální aktivity, která byla spojena s tektonickým režimem. Během tektonických a ložiskově geologických procesů vzniklo několik generací karbonátové mineralizace, která je vhodným nástrojem pro paleohydrogeologické studie (Tullborg et al. 2008, Gehör et al. 2002). Cílem současného výzkumu je navázat na předchozí studie na ložisku a začlenit nové výsledky studia geochemie výplně zlomů a puklin, PT podmínek vzniku minerálů a zdrojů fluid do strukturně a ložiskově geologického modelu ložiska.

2.3.3.2 Mineralizační procesy na ložisku Rožná

Výzkum rudních mineralizací na ložisku Rožná se datuje od 60. let dvacátého století (Bojcov 1974, Arapov et al. 1984). Novější výzkumy shrnují práce Kříbka a Hájka (2005) a Kříbka et al. (2009). Mineralizace na ložisku rozdělují na stratiformní a žilné.

Stratiformní typy jsou zastoupeny polohami baryt-hyalofan-sulfidických rud, polohami pyrhotinu v rulách a amfibolitech a pyritovými polohami v erlanových rulách a mramorech. Jedná se pravděpodobně o metamorfované zrudnění submarinně-exhalačního typu.

Žilné a zonální typy mineralizací zahrnují:

1. křemen-sulfidickou a karbonát-sulfidickou mineralizaci (starší než uranová mineralizace),
2. uranovou mineralizaci, doprovázenou karbonátovými žilami,
3. křemen-karbonát-sulfidickou mineralizaci s barytem (mladší než uranová mineralizace).

Předuranová křemen-sulfidická a karbonát-sulfidická mineralizace tvoří samostatné žíly i prožilky na chloritizovaných a grafitizovaných zónách mylonitů a kataklazitů, případně v hydrotermálně alterovaných horninách.

Uranové zrudnění na ložisku Rožná je vázáno na 1) směrné zóny kataklazitů a 2) k nim zpeřené struktury nižších řádů, 3) na tělesa albitizovaných, hematitizovaných a chloritizovaných hornin v okolí zón a zpeřených struktur a na 4) diagonální struktury křehké deformace (zlomová pásma). Na směrných zónách a k nim zpeřených strukturách je uranové zrudnění kontrolováno litologicky. Mineralizace se vyskytuje v místech, kde jsou okolními horninami jemnozrnné biotitické pararuly. Celkově je na ložisku Rožná známo více než 90 rudních těles vázaných na hlavní i zpeřené směrné struktury (Kříbek a Hájek 2005).

Pouranovou mineralizaci tvoří karbonátové, příp. křemen-karbonátové žíly s barytem a sulfidy. Žíly jsou mocné až několik decimetrů, vyskytují se samostatně nebo tmelí brekie.

Procesy spojené se vznikem uranové mineralizace na ložisku Rožná se podařilo spolehlivě datovat. 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. 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 (Křibek a Hájek 2005).

Anderson et al. (1988) 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.

2.3.3.3 Materiál k výzkumu

Vzorky žilných a puklinových mineralizací byly odebrány z přístupných chodeb a rozrážek z 18., 20., 21., 22. a 24. patra dolu Rožná a vrtů, které byly realizovány v rámci projektu. Vzorky byly rozděleny do několika skupin: karbonátové a křemen-karbonátové žíly, křemenné žíly, sulfidická mineralizace a produkty alteračních procesů. Celkem bylo analyzováno 92 vzorků. Vzorky z vrtů nebyly orientovány. Z chodeb a rozrážek byly odebírány vzorky z poruch SSZ–JJV směru, SSV–JJZ směru, příp. i žíly směru S–J a V–Z.

Pravděpodobně nejstarší jsou křemen-živcové žíly a samostatné křemenné žíly. Křemen-živcové žíly mají mocnost do 10 cm, masivní texturu, minerály jsou hrubozrnné, často doprovázené slídou (Obr. 126 a Obr. 127). Křemenné žíly jsou tvořeny masivním čirým křemenem, mocnost žil je 1 až 5 cm.

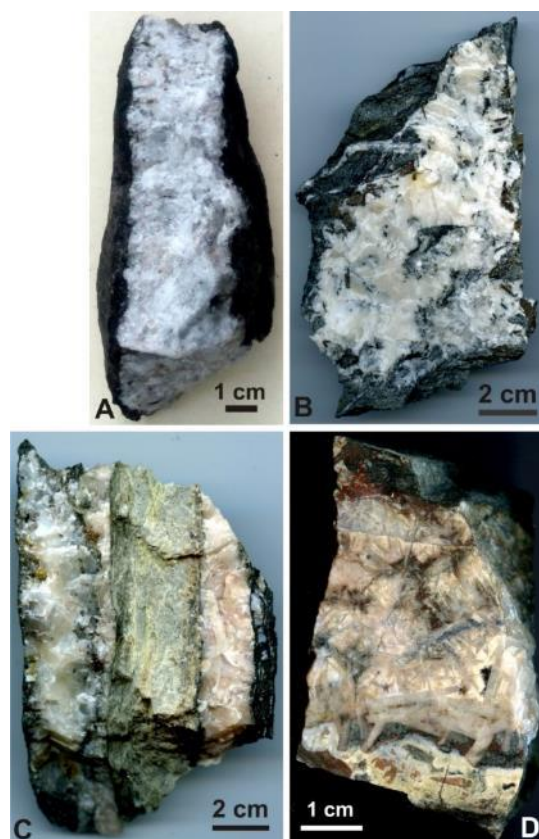
Karbonátové žíly, příp. karbonátové žíly s křemenem, jsou převážně subvertikální, jsou tvořeny převážně jemně až hrubě krystalovaným kalcitem a karbonátem dolomit-ankeritického složení. Kalcit je bezbarvý, bílý až šedý, žlutý až hnědý nebo narůžovělý, dolomit-ankeritický karbonát nahnědlý. U kontaktu 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.

Během ložiskově geologických výzkumů bylo na ložisku Rožná rozlišeno sedm generací kalcitu, které se vyskytují v předrudním, rudním i porudním stádiu vývoje ložiska (Arapov et al. 1984). Vzhledem k izolovanému výskytu žil nebylo možné nově odebrané vzorky spolehlivě zařadit do jednotlivých generací. Kalcity byly klasifikovány na základě geochemických parametrů a jejich srovnání s publikovanými výsledky z ložiska Rožná a PVP Bukov.

Žíly se často nacházejí v silně alterovaných zónách, kde jsou okolní horniny postiženy hematitizací, chloritizací, grafitizací, příp. argilitizací. Alterační minerály jsou jemnozrnné, až do frakce jílových minerálů, mají různou barvu – bílou až šedou, červenohnědou až hnědou a světle až tmavě zelenou.

Ze sulfidických minerálů byl v žilách a puklinách makroskopicky identifikován pouze pyrit. Na stěnách puklin se nalézají jemnozrnné pyritové povlaky, příp. tvoří vtroušené drobně zrnité krystalované agregáty v karbonátových žilách.

Karbonátové výplně tektonických poruch mají většinou nepravidelný průběh a mocnost až 50 cm. Výplně vzorkovaných tektonických poruch měly většinou mocnost do 10 cm a jednoduché minerální složení, bylo ale vzorkováno i několik zajímavých výplní s cyklickým vývojem. Z 24. patra (R7S, PŠ1-24-2) lze jmenovat zónu V–Z směru s křemen-karbonátovými žilami s barytem se sulfidickou a uranovou mineralizací (Obr. 126 a Obr. 127). Jde o zhruba 50 cm zónu alterovaných hornin prosekávaných křemen-karbonátovými žilami s tabulkovitým barytem. Na povrchu jsou patrné sekundární minerály uranu. Textura žil je krustifikační, místy brekciovitá.



Obr. 126 Příklady žilných textur z prostředí ložiska Rožná – A: masivní křemen-živcová žíla (R7S, 20. p., PŠ-1-203), B: kalcitová žíla s prožilkovou texturou (R7S, 21. p., RZ-PŠ1-69) C: žilky karbonátu oddělené alterovanou horninou (R7S, 21. p., RZ-PŠ1-69), D: vícegenerační křemen-karbonátová žíla s barytem a U mineralizací (R7S, 24. p., PŠ1-24-2)

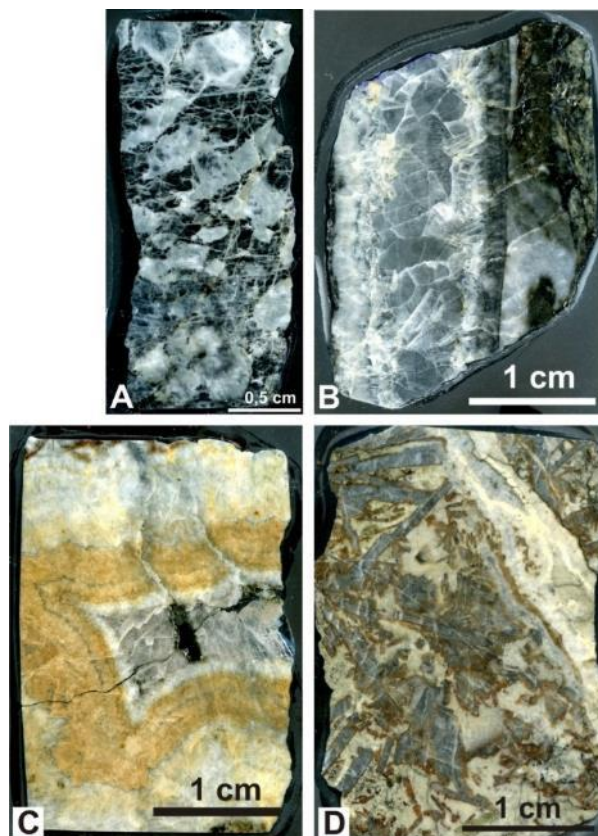
Z 21. patra (R7S, RZ-PŠ1-69) lze jmenovat 10 m mocnou zónu S–J směru se sklonem 45° k Z silně alterovaných grafitizovaných a chloritizovaných hornin s karbonátovými žilami (Obr. 126 a Obr. 127). Karbonátové žíly jsou až několik dm mocné, vyznačují se nepravidelným průběhem. Podle barvy a habitu lze rozlišit několik typů karbonátu, textura je většinou prožilková.

Z 20. patra, z okolí kvazihomogenního bloku, ohraničeného chodbami Z3-XX, PŠ1-203 a RV4 20-201 bylo odebráno cca 30 vzorků, 24 vzorků bylo analyzováno.

Na 20. patře (R7S, Z3-XX, 28 m), v přímém podloží první zóny, se nachází asi 50 cm mocná žilníkovitá struktura SSV–JJZ směru s nepravidelnou, zřejmě polycyklickou karbonátovou výplní.

Rovněž na 20. patře (R7S, RV4-20-201, 158 m) se nachází zhruba 30 cm křemen-karbonátová žíla SSZ–JJV směru s pyritem, sekundárními minerály uranu a karbonáty vzácných zemin (synchysit $\text{Ca}(\text{Ce}, \text{La} (\text{Nd}, \text{Y}))(\text{CO}_3)_2\text{F}$). Žíla je tvořena starším hrubě krystalickým kalcitem, mladším krystalovaným křemenem a mladší generací kalcitu, který nasedá na křemen.

V poruše na 18. patře (R3, Z-XVIII) byly odebrány vzorky samostatných žil dolomit-ankeritického karbonátu, který zde vyplňuje až 30 cm mocnou poruchu. Je rezavě hnědý, hrubě krystalický.



Obr. 127 A Rovnoměrně zrnitá struktura křemen-živcové žíly, B: žíla hrubě zrnitého kalcitu s jemně zrnitým křemenem u okraje žíly, C: přírůstkové zóny kalcitu a dolomit-ankeritického karbonátu, D: křemen-karbonát-barytová žíla protínaná mladší žilkou

2.3.3.4 Metodika laboratorních prací

Laboratorní práce byly provedeny v laboratořích České geologické služby.

Elektronová mikroskopie – LAREM – metodika kvantitativních analýz hlavních prvků

Kvantitativní analýzy karbonátových žil byly provedeny na pracovišti ČGS-LAREM s využitím skenovacího elektronového mikroskopu Tecsán Mira 3GMU s FEG katodou a analytickým systémem EDS 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

Vzorky kalcitu byly naváženy do teflonových kelímků a byly přidány koncentrované HNO_3 a HF v poměru 1:6 (obj/obj). Uzavřené kelímky byly zahřívány na topné desce při 130 °C cca. 72 hodin. Poté byly kyseliny odpařeny do sucha a opakovaně přidáno malé množství koncentrované HNO_3 . 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% HNO_3 (konc/konc) pro měření koncentrací stopových prvků pomocí Agilent 7900x ICPMS. Spolehlivost a stabilita přístroje v průběhu analytické sekvence byly monitorovány pomocí mezinárodního referenčního basaltu BHVO-2.

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 CO_2 . Homogenizační a kryometrická data vykazují reprodukovatelnost $\pm 0,2$ °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 CO_2 a CH_4 byly přepočteny podle Bakker a Diamonda (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 CO_2 bylo změřeno na hmotnostním spektrometru Delta V v laboratořích ČGS. Celková chyba stanovení izotopového složení je $\pm 0,1$ ‰. 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 0,05 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 přístroje Triton Plus (MC-ICP-MS a TIMS 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 $0,710254 \pm 8$ (1SD; n = 15) pro TIMS.

Stabilní izotopy síry v sulfidech

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

Rtg difrakční analýza

Vyseparované minerály byly 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 sek/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 etylenglykolu.

2.3.3.5 Výsledky laboratorních prací

V této kapitole jsou shrnuty a graficky prezentovány výsledky jednotlivých analytických metod. Konkrétní tabulky s výsledky laboratorních analýz jsou k dispozici v elektronické verzi: lokalizace vzorků (Elektronická příloha 16), hlavní prvky v karbonátech (Elektronická příloha 17), stopové prvky v karbonátech (Elektronická příloha 18), fluidní inkluze v karbonátech a křemeni (Elektronická příloha 19), izotopy C a O v karbonátech (Elektronická příloha 20), izotopy Sr v karbonátech (Elektronická příloha 21), izotopy S v sulfidech (Elektronická příloha 22).

Datování alteračních minerálů (illitu) pomocí metody K-Ar nebylo provedeno, především proto, že nebyly nalezeny zóny, které by poskytly dostatek materiálu pro odběr a následné separace.

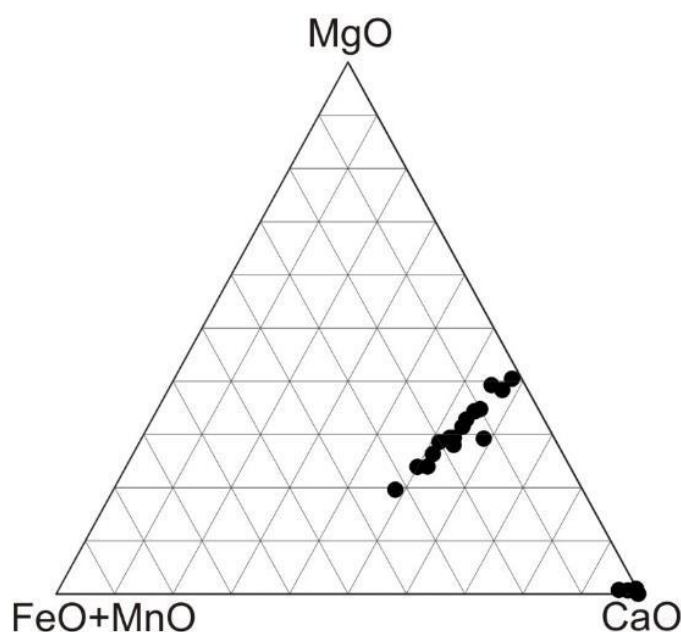
2.3.3.5.1 Kvantitativní analýzy hlavních prvků – LAREM

V sadě 42 vzorků karbonátových žil byly analyzovány obsahy hlavních kationtů, Ca, Mg, Mn a Fe, příp. Sr. 26 vzorků reprezentuje kalcit, 9 vzorků tvoří kalcit i dolomit-ankeritický karbonát, 7 vzorků pak pouze dolomit-ankeritický karbonát (Obr. 128). Ve většině analyzovaných zrn bylo provedeno přibližně pět měření, z kterých byly přepočteny průměrné obsahy.

Obsah CaO v kalcitech se pohybuje v rozmezí od 41,87 do 51,22 %, obsah MgO od 0,01 do 0,25 %, FeO od 0,02 do 1,19 % a MnO od 0,08 do 1,05 %.

Obsah CaO v dolomit-ankeritickém karbonátu se pohybuje v intervalu od 25,19 do 29,22 %. Obsahy MgO a FeO jsou proměnlivé, od téměř čistého dolomitu k dolomit-ankeritickému karbonátu s převahou FeO. Obsah MgO nabývá hodnot 10,53 až 19,82 %, obsah FeO se pohybuje v rozsahu od 0,07 do 16,55 % a obsah MnO od 0,03 do 2,33 %.

Obsah Sr se ve většině vzorků pohybuje v setinách procenta, výjimečně až 0,17 %.



Obr. 128 Kvantitativní analýza hlavních prvků Ca-Mg-Fe-Mn v karbonátových žilách z ložiska Rožná

2.3.3.5.2 Analýza stopových prvků vzácných zemin

Stopové prvky a REE byly stanoveny v setu 42 vzorků karbonátů pomocí ICP-MS. Byly stanoveny obsahy 16 stopových prvků a 14 prvků vzácných zemin.

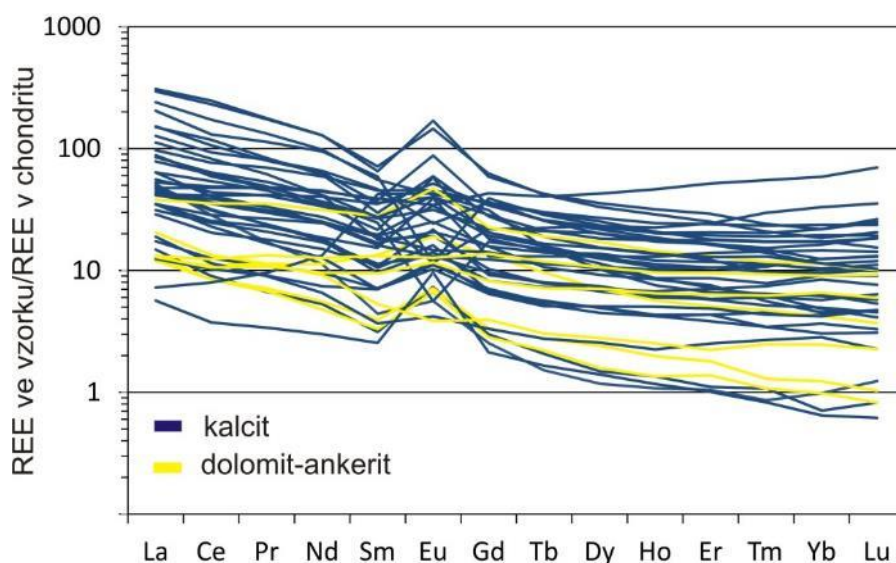
Obsah Sr se ve studovaných vzorcích pohybuje od 47 do 813 ppm, výjimečně až 2771 ppm. Většina hodnot je vyšší než 100 ppm, což svědčí o hydrotermálním původu karbonátových žil (Tullborg et al. 2008). Obsahy Rb jsou naopak nízké, ve většině vzorků pod 1 ppm, jen ve čtyřech vzorcích jsou obsahy vyšší, 12,3 až 44,1 ppm.

Obsah uranu se ve většině vzorků pohybuje pod 1 ppm, nebo v hodnotách blízkých 1 ppm, jen ve čtyřech vzorcích jsou obsahy U vyšší, 15,1 až 74,9 ppm. Rovněž obsahy Th v karbonátech jsou nízké, pouze 0,1 až 1,7 ppm. Obsahy uranu i thoria jsou celkově nižší než v okolních horninách (René 2002), jsou obdobné obsahům v karbonátových žilách z PVP Bukov (Bukovská a Verner 2017).

Obsahy prvků skupiny HFS jsou rovněž nižší než v okolních horninách. Obsah Zr v karbonátech dosahuje 2,2 až 34,6 ppm, obsahy Nb a Ta jsou prakticky ve všech vzorcích pod mezí stanovitelnosti, obsahy Y se pohybují v rozmezí 2,4 až 93,6 ppm.

Křivky normalizovaných obsahů prvků vzácných zemin ukazují, kromě tří vzorků, obdobný trend, mírný pokles od LREE k HREE (Obr. 129). U některých vzorků lze pozorovat pozitivní, resp. negativní Eu anomálii. Pozitivní Eu anomálie může být způsobena substitucí Eu^{3+} za Ca, Eu^{3+} se přednostně uvolňuje v nízkoteplotních roztocích pod 200 °C (Blyth et al. 2009). Negativní Eu anomálie bývá typická pro oxidační prostředí, může být indikátorem lokálních změn redox. podmínek. Ce, jehož negativní anomálie by mohly indikovat nízkoteplotní vznik karbonátů, anomální parametry nevykazuje.

Celkový obsah prvků vzácných zemin (ΣREE) se pohybuje v poměrně širokém intervalu, od 7,2 do 347,2 ppm, je většinou nižší než ΣREE v okolních horninách (René 2002). Velmi proměnlivé obsahy REE ve vzorcích dokládají i poměr La_N/Yb_N v rozsahu 0,81 až 52,03 nebo poměr La_N/Sm_N v rozmezí 0,17 až 11,59.



Obr. 129 Obsah prvků vzácných zemin v žilných karbonátech z ložiska Rožná normalizovaný obsahem REE v chondritech (Anders a Grevese 1989)

2.3.3.5.3 Fluidní inkluze v hydrotermálních minerálech

Fluidní inkluze byly studovány v křemen-živcových a křemenných žilách, v karbonátových, křemen-karbonátových, příp. křemen-karbonát-barytových žilách. Z deskriptivního hlediska byl posuzován jejich vztah k hostitelskému minerálu (primární vs. sekundární vs. primárně sekundární inkluze), poměr kapalné a plynné fáze ($LVR = L/L+V$), tvar a velikost inkluzí.

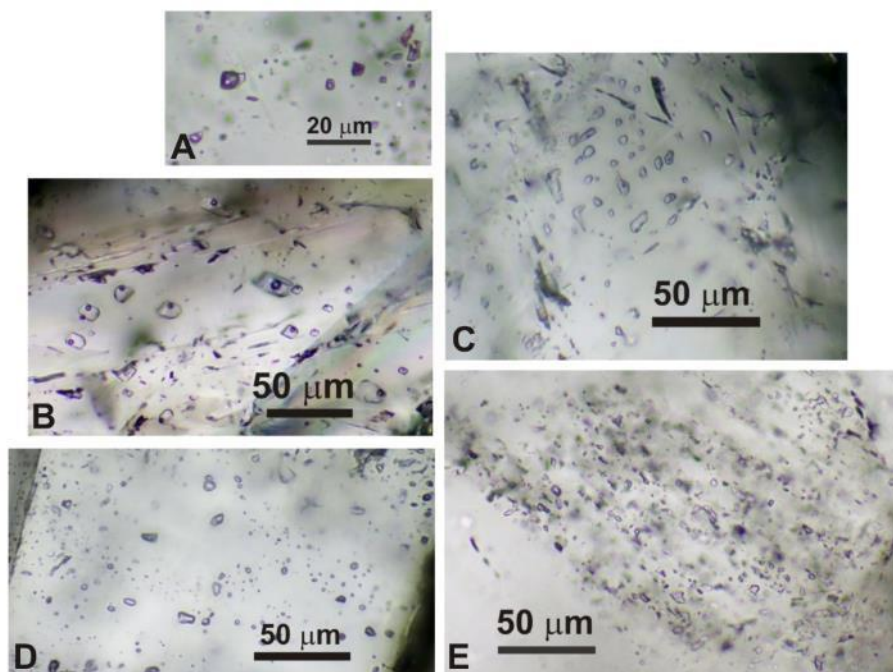
2.3.3.5.4 Karbonátové, křemen-karbonátové a křemen-karbonátové žíly s barytem

Fluidní inkluze byly studovány v několika generacích žilného kalcitu. Inkluze mají různé zaplnění, některé vzorky obsahují primární inkluze s pravidelným zaplněním, s LVR 0,9 až 0,95, dále se vyskytují kalcity s inkluzemi s variabilním zaplněním, i kalcity s jednofázovými kapalnými inkluzemi (Obr. 130). Teploty homogenizace (T_h) byly, pokud to bylo možné, měřeny ve skupinách inkluzí s obdobným LVR, celkově se T_h pohybují v rozsahu 38 až 177 °C (Obr. 130). Teplota tání ledu (T_m) byla měřena v rozmezí od -0,1 do -18,5 °C. Z těchto dat lze odvodit salinitu vodného roztoku, která činí 0,2 až 21,3 hmot. % NaCl ekv. Eutektická teplota (T_e) poskytuje informace o složení vodného roztoku. Hodnoty T_e mezi -52,5 až -56,5 °C indikují, že v roztoku jsou přítomny především NaCl a $CaCl_2$. Srovnáme-li parametry studovaných inkluzí s dříve publikovanými daty z fluidních inkluzí z předrudního, rudního, porudního i pouranového stádia vývoje ložiska Rožná (Kříbek a Hájek 2005), lze říci, že pouze čtyři žíly (tři žíly z chodby Z3-XX, 20. p., jáma R7S, metráž 22 m, 24 m a 106 m a žilka z vrtu BGS-18-H, 4,65m) z více než šedesáti studovaných žil obsahují inkluze s T_h vyššími než 150 °C a lze je korelovat s žilami z rudního stádia. Většina žil vznikla při nižších teplotách v období porudního až pouranového vývoje ložiska Rožná.

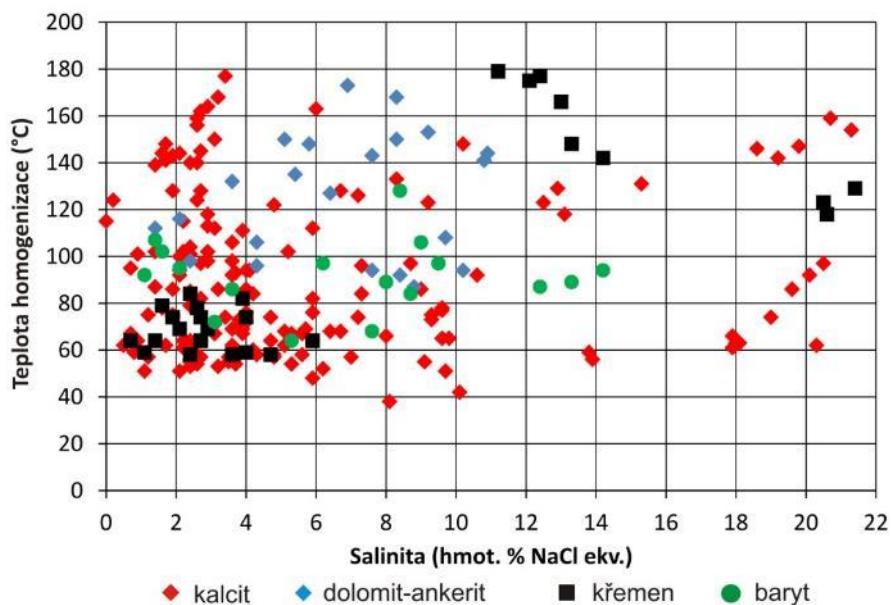
Dolomit-ankeritický karbonát je většinou špatně průhledný, obsahuje jen velmi malé inkluze, kolem 5 μm . Inkluze jsou jednofázové, kapalně, ale i dvoufázové s LVR 0,9, obsahují vodný roztok. T_h primárních inkluzí byly měřeny v rozmezí od 87 do 173 °C, T_m ledu mezi -0,8 až -7,3 °C indikují salinitu 1,4 až 10,9 hmot. % NaCl ekv. Eutektická teplota, měřená v rozmezí -43,4 až -54,2 °C, poukazuje na vyšší podíl $CaCl_2$ v roztoku. Charakter habitu dolomit-ankeritického karbonátu i parametry fluidních inkluzí ukazují na to, že minerál je v žilách přítomen nejméně ve dvou generacích.

V křemeni se vyskytují inkluze s variabilním LVR, dvoufázové inkluze s LVR 0,9–0,95, ale i inkluze jednofázové kapalně. Inkluze jsou malé, většinou do 10 μm , oválné až nepravidelné, obsahují pouze vodný roztok. T_h i T_m byly měřeny v poměrně širokém rozpětí, T_h dosahují hodnot 58 až 179 °C, $T_m = -0,4$ až -18,6 °C, salinita je 0,7 až 21,4 hmot. % NaCl ekv. Křemen, doprovázející kalcit, obsahuje na různých žilách různé typy roztoků (Obr. 131).

Baryt obsahuje značné množství fluidních inkluzí, především jednofázových kapalných, dvoufázové inkluze s LVR 0,9 se vyskytují méně často. Sporadický je i výskyt inkluzí s převahou plynné fáze. Inkluze mají oválný až nepravidelný tvar, velikost do 20 μm , obsahují pouze vodný roztok. T_h dvoufázových primárních inkluzí se pohybují v rozmezí 64–128 °C, T_m ledu je -0,6 až -10,2 °C, což odpovídá salinitě 1,1 až 14,2 hmot. % NaCl ekv. Eutektická teplota -35,5 °C ukazuje na přítomnost Na, Mg a Fe chloridů v roztoku. Poměrně úzký interval T_h a naopak široké rozpětí salinity indikuje izotermální míšení roztoků.



Obr. 130 A: sekundární fluidní inkluze typu H_2O-CO_2 v křemeni křemen-živcové žíly, B: primární dvoufázové inkluze vodného roztoku v kalcitu, C: primárně sekundární inkluze vodného roztoku v kalcitu, D: primární jednofázové kapalné inkluze vodného roztoku v barytu, E: primární jednofázové kapalné inkluze vodného roztoku v pozdním křemeni



Obr. 131 Teplota homogenizace vs. salinita primárních fluidních inkluzí vodného roztoku v karbonátech, křemeni a barytu z hydrotermálních žil ložiska Rožná

2.3.3.5.5 Křemen-živcové a samostatné křemenné žíly

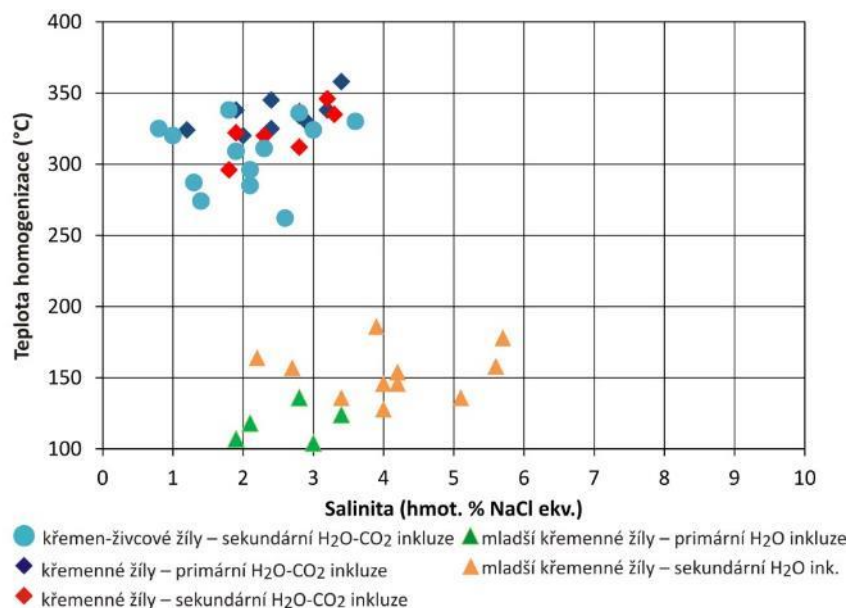
Do této kategorie spadají tři typy žilné výplně. Křemen-živcové žíly (podle rtg analýz Na-Ca živec) a žíly hrubě zrnitého krystalického masivního křemene pravděpodobně představují deriváty metamorfních procesů. Většinou tenké žilky hrubě až drobně zrnitého krystalického křemene pravděpodobně odpovídají mladším výplním z porudního až pouranového stádia.

Křemen-živcové žíly obsahují značné množství fluidních inkluzí, většinou podél vyhojených puklinek, lze je označit jako sekundární. V inkluzích převažuje plynná fáze, LVR je 0,2 až 0,4. Inkluze jsou typu H₂O–CO₂, teplota tání pevného CO₂ (TmCO₂) byla pozorována v rozsahu od –58,1 do –58,8 °C, tyto hodnoty indikují malou příměs CH₄ v plynné fázi. CO₂ homogenizoval na kapalinu (ThCO₂ = 27,3 až 28,7 °C) nebo na plyn (ThCO₂ = 25,8 až 30,0 °C). Hustota plynné fáze činí 0,258 až 0,672 g/cm³. Celková teplota homogenizace byla měřena v rozmezí 262 až 338 °C (Obr. 132), salinita vodného roztoku je nízká, od 0,8 do 3,6 hmot. % NaCl ekv. (Tmklatrátu CO₂ = 8,3 až 9,5 °C).

Rovněž křemenné žíly obsahují CO₂ a H₂O–CO₂ inkluze. Hodnota TmCO₂ primárních plynných CO₂ inkluzí je –61,2 °C a indikuje vyšší, zhruba pětinový, podíl CH₄ ve fluidu. CO₂ homogenizovalo na kapalinu při teplotách –15,2 až 27,2 °C, což odpovídá hustotě 0,680 až 1,008 g/cm³. V primárních inkluzích H₂O–CO₂ převažuje plynná fáze, LVR = 0,2 až 0,5. TmCO₂ byla pozorována v rozmezí –58,1 až –58,7 °C, ThCO₂ na kapalinu při teplotách 10,5 až 28,4 °C, ThCO₂ na plyn při teplotách 29,2 až 30,1 °C. Hustota plynné fáze, odvozená z ThCO₂, se pohybuje v rozmezí 0,337 až 0,860 g/cm³. Celková teplota homogenizace H₂O–CO₂ inkluzí byla měřena v rozsahu 320 až 358 °C. Salinita vodné fáze je nízká, 1,2 až 3,4 hmot. % NaCl ekv. (Tmklatrátu CO₂ = 8,3 až 9,3 °C). Sekundární inkluze H₂O–CO₂ vykazují obdobné hodnoty měřených parametrů.

Výjimečně, pouze v jednom vzorku byly nalezeny sekundární inkluze s metanem. CH₄ homogenizoval na plyn při teplotách –110,8 až –117,4 °C, což odpovídá hustotě CH₄ 0,021 až 0,027 g/cm³.

Mladší, porudní křemenné žilky obsahují pouze velmi drobné H₂O inkluze. Primární inkluze homogenizovaly při teplotách 104 až 136 °C. Tm = –1,1 až –2,0 °C, což odpovídá salinitě vodného roztoku 1,9 až 3,4 hmot. % NaCl ekv. Sekundární inkluze, měřené ve více vzorcích, homogenizovaly při teplotách 128 až 178 °C. Salinita vodného roztoku je trochu vyšší, 2,2 až 5,7 hmot. % NaCl ekv. (Tm = –1,3 až –3,5 °C).



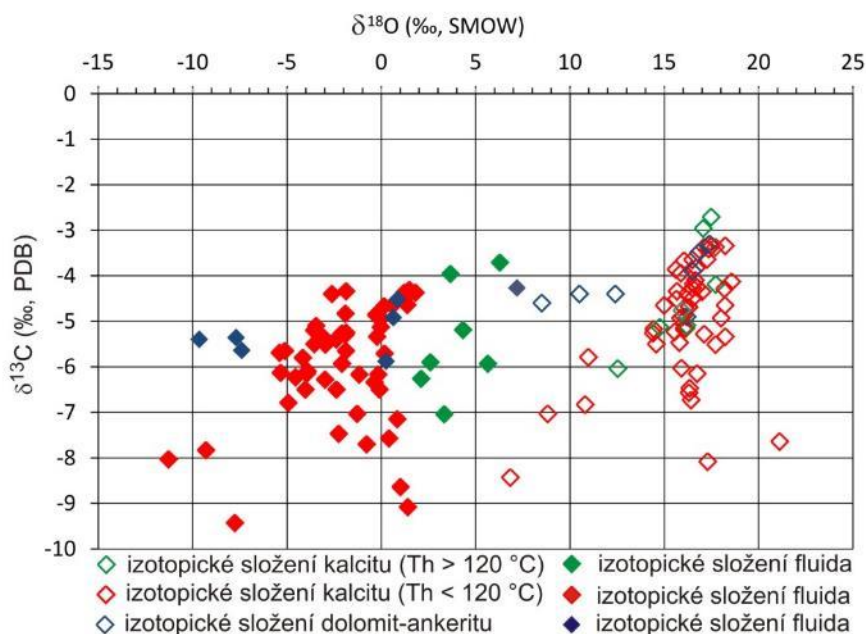
Obr. 132 Teplota homogenizace vs. salinita vodného roztoku z H_2O-CO_2 a H_2O inkluzí ze samostatných křemenných a křemen-živcových žil z ložiska Rožná

2.3.3.5.6 Stabilní izotopy C a O v karbonátech

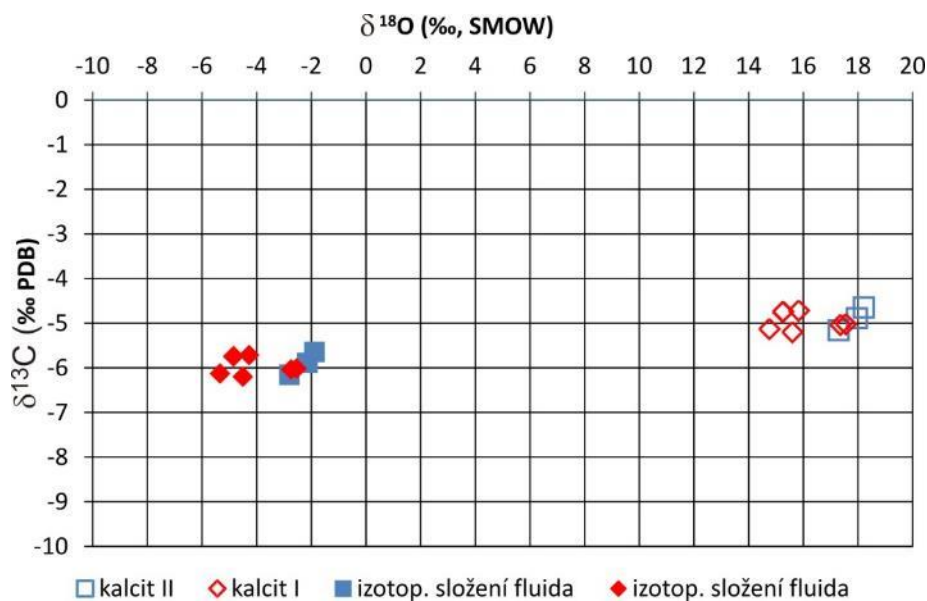
Izotopové složení uhlíku a kyslíku v kalcitech a dolomit-ankeritických karbonátech je poměrně variabilní a poukazuje na různé podmínky krystalizace žil (Obr. 133). Hodnoty $\delta^{13}C$ v kalcitech se pohybují v rozmezí od $-2,7$ do $-8,4$ ‰ (PDB), v dolomit-ankeritickém karbonátu od $-3,3$ do $-4,9$ ‰ (PDB). Tyto hodnoty pravděpodobně odpovídají uhlíku z hlubinného zdroje, příp. směsi uhlíku z více zdrojů.

Hodnoty $\delta^{18}O$ v kalcitech nabývají hodnot $+6,8$ až $+21,11$ ‰ (SMOW), v dolomit-ankeritickém karbonátu od $+8,5$ do $+17,4$ ‰ (SMOW). Na základě dat izotopového složení kyslíku karbonátu a teplot homogenizace fluidních inkluzí bylo vypočteno izotopové složení kyslíku roztoků (Kim a O'Neil 1997). Kalcity mají hodnoty $\delta^{18}O$ fluida celkově mezi $-11,3$ až $+6,3$ ‰ (SMOW), lze rozlišit dvě skupiny dat. Několik kalcitových žil s vyšší teplotou homogenizace (nad 120 °C) má hodnoty $\delta^{18}O$ fluida $+2,1$ až $+6,3$ ‰ (SMOW), což pravděpodobně odpovídá solankám sedimentárních bazénů, s podílem vod metamorfního původu. Tyto údaje jsou obdobné datům K. Žáka (in Kříbek a Hájek 2005) z rudního stádia ložiska Rožná. Hodnoty $\delta^{18}O$ kalcitů s nižší teplotou homogenizace (pod 120 °C) se pohybují v rozmezí od $-11,3$ do $+2,5$ ‰ (SMOW) a je zřejmé, že zdrojovými vodami byly v převažující míře vody meteorického původu. Posun izotopického složení $\delta^{18}O$ fluida do negativních hodnot, oproti žilám z rudního stádia, je zřetelný i u dat z detailně zkoumané nízkoteplotní křemen-karbonátové mineralizace se sekundárními minerály uranu a synchysitem z 20. patra dolu (Obr. 134).

Hodnoty $\delta^{18}O$ fluida v dolomit-ankeritickém karbonátu dosahují hodnot $-9,7$ až $+7,2$ ‰ (SMOW). Jako u kalcitů lze rozlišit více generací dolomit-ankeritického karbonátu, zajímavé jsou hodnoty $\delta^{18}O$ mezi $-9,2$ až $-7,0$ ‰ (SMOW) z pozdních dolomit-ankeritických žil z 18. patra dolu R3, kde zdrojovými vodami byly zřejmě cirkulující vody meteorického původu.



Obr. 133 Izotopové složení uhlíku a kyslíku v karbonátových žilách z ložiska Rožná



Obr. 134 Izotopové složení uhlíku a kyslíku v kalcitech z nízkoteplotní křemen-karbonátové mineralizace s karbonáty vzácných zemin a sekundárními minerály uranu z ložiska Rožná (R7S, RV4₂₀₋₁₀₁, 158 m)

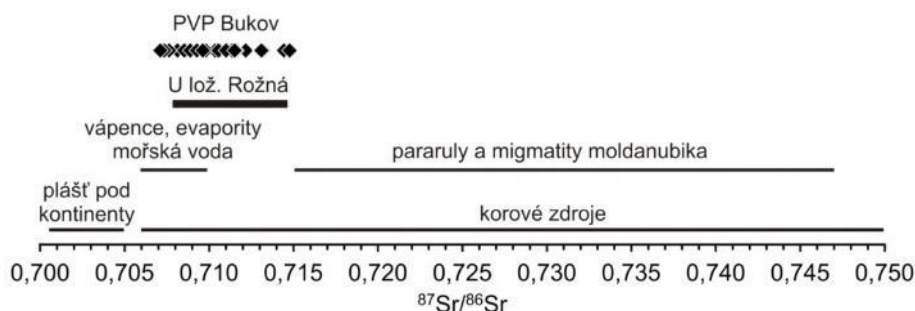
2.3.3.5.7 Izotopy Sr v karbonátech

Izotopové složení Sr bylo analyzováno v sadě 42 vzorků karbonátů. Studované karbonáty z ložiska Rožná mají poměry $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ v poměrně úzkém rozsahu mezi 0,708690 až 0,714530 (Obr. 135). Vzhledem k nízkým obsahům rubidia (většinou pod 1 ppm) a naopak vysokým obsahům stroncia (47–2771 ppm) lze říci, že se poměr $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ od doby krystalizace karbonátů příliš nezměnil. Rozpětí hodnot je obdobné hodnotám z karbonátů z PVP Bukov (0,707158–

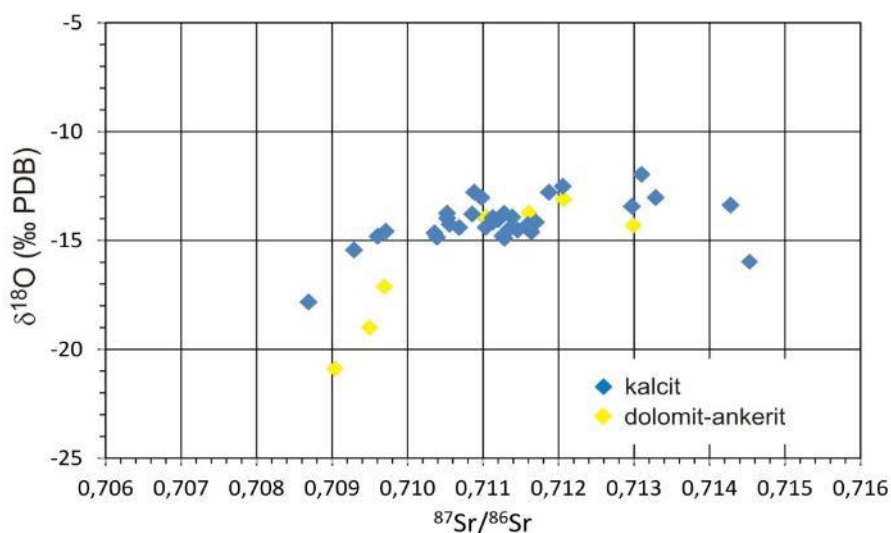
0,714803) (Bukovská et al. 2017) i starším údajům z karbonátů z ložiska Rožná (0,709414–0,711561) (Kříbek a Hájek 2005).

Otázku zdroje Sr nelze zcela jednoznačně určit. Hodnoty poměru $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ se částečně překrývají s daty z vápenců, příp. evaporitů. Hlavním ani metamorfované horniny moldanubika, které mají poměr $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ vyšší (Janoušek et al. 1995). Je však nutné zmínit, že tyto horniny obsahují vyšší obsahy rubidia, tj. vyšší poměr Rb/Sr, a vzhledem k dlouhému časovému rozdílu mezi dobou vzniku hornin a dnešním měřením se iniciální poměr $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ mohl změnit. Je pravděpodobné, že v případě studovaných karbonátů se jedná o směsný zdroj z různých horninových typů vyluhovaný solankami hlubokého oběhu.

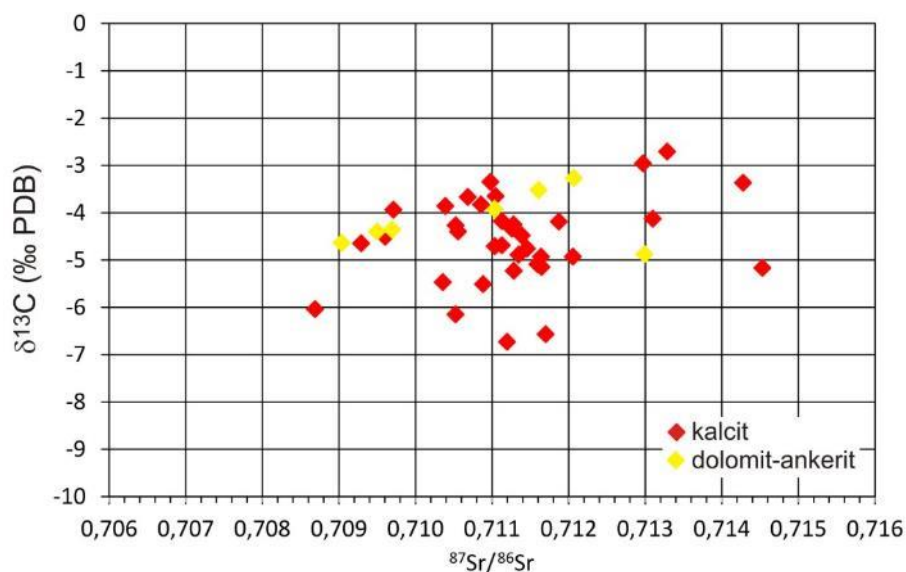
Zajímavé je srovnání $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ vs. $\delta^{18}\text{O}$, resp. $\delta^{13}\text{C}$ v karbonátech. Patrný je trend, kdy postupně klesají $\delta^{18}\text{O}$ a $\delta^{13}\text{C}$ do lehčích hodnot, obdobně jako hodnoty $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (Obr. 136 a Obr. 137). Tento trend indikuje měnící se charakter zdrojových roztoků, ke konci ložiskotvorného procesu převažovaly pravděpodobně vody meteorického původu. Je tomu tak např. u pozdních dolomit-ankeritických žil z 18. patra dolu R3.



Obr. 135 Izotopové složení Sr v karbonátech z ložiska Rožná a PVP Bukov ve vztahu k možným zdrojovým horninám a vodám



Obr. 136 Izotopové složení Sr vs. izotopové složení O v žilných karbonátech z ložiska Rožná



Obr. 137 Izotopové složení Sr vs. izotopové složení C v žilných karbonátech z ložiska Rožná

2.3.3.5.8 Stabilní izotopy síry v sulfidech a barytu

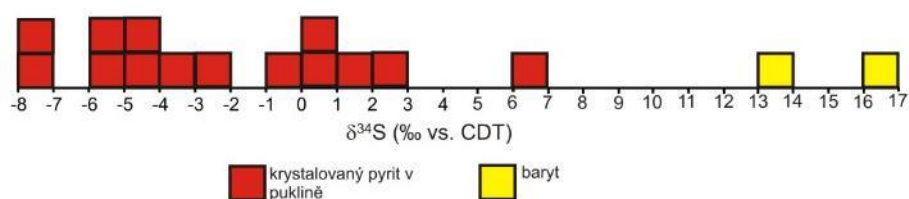
Stanovení izotopového složení síry bylo provedeno jednak v sulfidech, resp. v krystalovaných pyritech z puklin, jednak v barytech (Obr. 138).

Během 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 ložisku Rožná je tedy pravděpodobně mladší než uranová mineralizace. Jemnozrnný krystalovaný pyrit na puklinách má hodnoty $\delta^{34}\text{S}$ v rozmezí od $-7,1$ do $+7,0$ ‰ (CDT). Tyto hodnoty dobře odpovídají hodnotám $\delta^{34}\text{S}$ sulfidů z pouranové křemen-karbonát-sulfidické mineralizace z ložiska Rožná (Kříbek et al. 2009) i sulfidům z prostoru PVP Bukov (Bukovská et al. 2019).

K. Žák (in Kříbek a Hájek 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.

Baryt se na ložisku Rožná vyskytuje v několika typech mineralizace. Vencelides (1991) interpretuje polohy předrudních baryt-sulfidických rud jako metamorfované baryt-sulfidické rudy submarinně exhalčního typu. Baryty se vyznačují vysokými hodnotami $\delta^{34}\text{S}$ mezi $+18,7$ až $+28,6$ ‰.

Křemen-karbonát-barytové žíly z 24. patra dolu R7S pravděpodobně představují produkty mladší porudní mobilizace hydrotermálních fluid. Z těchto žil byly analyzovány dva vzorky barytu, izotopové složení síry vykazuje hodnoty $+16,8$, resp. $+13,8$ ‰ (CDT). Oproti stratiformním barytům jsou tyto hodnoty nižší, odpovídají ale barytům z křemen-karbonát-sulfidické mineralizace z pouranového stádia (Žák in Kříbek a Hájek 2005).



Obr. 138 Izotopové složení síry pyritu a barytu z žil a puklin ložiska Rožná

2.3.3.5.9 Rtg difrakční analýza

Během dlouhodobé tektonické a hydrotermální aktivity v prostoru současného ložiska Rožná došlo k vývoji výrazných, až několikametrových alteračních zón na kontaktu s okolními horninami. Jednotlivé alterační procesy jsou podrobně popsány v publikaci Kříbek a Hájek (2005), zahrnují chloritizaci biotitu, hematitizaci Fe minerálů (rozklad minerálů dvojmocného železa za vzniku hydroxidů Fe a illitu, argilitizaci (illit, kaolinit), pyritizaci, prokřemenění hornin a karbonatizaci. Součástí těchto zón jsou často i hydrotermální žíly.

V rámci této studie tvořily rtg analýzy podpůrnou metodu k určení jednotlivých minerálů v žilách především k jejich rozlišení pro separace. Šlo např. o rozlišení minerálů v kalcit-dolomit-ankerit-barytové mineralizaci, rozlišení K-Na-Ca živců v křemen-živcových žilách, rozlišení pyritu a markazitu, příp. o identifikaci karbonátů vzácných zemin.

2.3.3.6 Interpretace výsledků a závěr

Pravděpodobně nejstarší žíly reprezentují křemen-živcové a křemenné žíly. Žíly obsahují primární i sekundární inkluze H₂O–CO₂. Teploty homogenizace inkluzí se pohybují v rozsahu 260 až 360 °C, salinita vodného roztoku je nízká, od 0,8 do 3,6 hmot. % NaCl ekv. Plynná fáze kromě CO₂ obsahuje malou příměs dalšího plynu, pravděpodobně CH₄. Vysoké teploty homogenizace a přítomnost CO₂ v inkluzích naznačují, že žíly vznikly pravděpodobně v závěru metamorfních procesů.

Žíly, které nejčastěji tvoří výplň zlomů a puklin, jsou tvořeny karbonátem, křemenem, případně barytem. Během ložiskové geologických výzkumů bylo na ložisku Rožná rozlišeno sedm generací kalcitu, které se vyskytují v předrudním, rudním i porudním stádiu vývoje ložiska (Arapov et al. 1984). Vzhledem k izolovanému výskytu žil nebylo možné nově odebrané vzorky spolehlivě zařadit do jednotlivých generací. Kalcity byly klasifikovány na základě geochemických parametrů a jejich srovnání s publikovanými výsledky z ložiska Rožná a PVP Bukov (Kříbek a Hájek 2005; Bukovská et al. 2019).

Karbonátové a křemen-karbonátové žíly jsou tvořeny především kalcitem, méně dolomit-ankeritickým karbonátem, jehož složení se mění od téměř čistého dolomitu po dolomit-ankeritický karbonát s obsahem FeO 16,5 %. Obsah Sr v karbonátech většinou přesahuje 100 ppm, což indikuje hydrotermální původ karbonátů. Obsahy Rb, U, Th, prvků HFS, tj. Zr, Nb, Ta a Y, i obsahy prvků vzácných zemin jsou celkově nízké, nižší než v okolních horninách (René 2002). Karbonáty jsou často doprovázeny křemenem a pyritem, na plochách kontaktu s horninou lze nalézt produkty alteračních procesů.

Mezi produkty alteračních procesů patří chlorit, slída, palygorskit, minerály skupiny smektitu, hematit, kaolinit, a pyrit, dále 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 2005). Dále byl identifikován i plagioklas, K-živec, serpentín a amfibol. Kalcit, dolomit-ankeritický karbonát, křemen i baryt ze studovaných žil obsahují pouze fluidní inkluze vodného roztoku. Teploty homogenizace se pohybují celkově v rozmezí od 40 do 180 °C, jen čtyři žíly pak mají teploty homogenizace vyšší než 150 °C. Salinita vodného roztoku je velmi proměnlivá, od 0,1 do 22 hmot. % NaCl ekv, což svědčí o míšení hydrotermálních roztoků.

Karbonáty se vyznačují poměrně velkou variabilitou izotopového složení uhlíku i kyslíku. Na základě hodnot $\delta^{18}\text{O}$ fluida lze rozlišit dvě skupiny karbonátů. Několik kalcitových žil s vyšší teplotou homogenizace (nad 120 °C) má hodnoty $\delta^{18}\text{O}$ fluida +2,1 až +6,3 ‰ (SMOW), což pravděpodobně odpovídá solankám sedimentárních bazénů, s podílem vod metamorfního původu. Hodnoty $\delta^{18}\text{O}$ kalcitů s nižší teplotou homogenizace (pod 120 °C) se pohybují v rozmezí od -11,3 do +2,5 ‰ (SMOW) a je zřejmé, že zdrojovými vodami byly v převažující míře vody meteorického původu.

Data izotopového složení Sr je obtížné jednoznačně interpretovat. Zřejmě 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 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ odvozený z reakce fluid s plagioklasem.

Zajímavé je srovnání $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ vs. $\delta^{18}\text{O}$, resp. $\delta^{13}\text{C}$ v karbonátech. Hodnoty $\delta^{18}\text{O}$ a $\delta^{13}\text{C}$ postupně klesají do lehčích hodnot, obdobně jako hodnoty $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$. Tento trend indikuje měnící se charakter zdrojových roztoků, ke konci ložiskotvorného procesu převažovaly pravděpodobně vody meteorického původu. Je tomu tak např. u pozdních dolomit-ankeritických žil z 18. patra dolu R3.

Z pohledu geodynamického modelu vývoje ložiska Rožná (Kříbek a Hájek 2005) a na základě geochemických parametrů z fluidních inkluzí, izotopů C, O a Sr a srovnání s dříve publikovanými údaji lze říci, že karbonátové žíly, které krystalovaly při teplotě nad 150 °C, odpovídají rudnímu stádiu vývoje ložiska, období před 280 až 260 Ma. Karbonátové a křemen-karbonátové žíly s barytem s nižšími teplotami vzniku pak spadají do porudního až pouranového stádia, období mezi 260 až 200 Ma.

2.3.4 Geochemická charakteristika hornin

Za účelem stanovení přesného celohorninového chemismu studovaných litologií na ložisku Rožná bylo celkově rozebráno 26 reprezentativních vzorků (jednalo se převážně o velkoobjemové vzorky a části vrtných jader, jejichž seznam a specifikace shrnuje Tab. 1 v Elektronická příloha 23) na analytickou jemnost a následně byly tyto práškové preparáty zaslány do laboratoře ACME v Kanadě, kde využitím metody ICP–OES byly získány koncentrace hlavních oxidů a pomocí metody ICP–MS byla provedena analýza vybraných stopových prvků, společně s prvky vzácných zemin (REE). Dalších 78 analýz bylo provedeno metodou XRF na PřF MU. Celkově tedy bylo provedeno 104 geochemických analýz. Výsledné celohorninové složení klasifikovaných horninových typů je graficky znázorněno ve formě boxplotů a spider diagramů na Obr. 139, Obr. 140, Obr. 141, Obr. 144, Obr. 145, Obr. 149, Obr. 150, Obr. 151, Obr. 152 a uvedeno v Tab. 2 v Elektronická příloha 23. Na základě geochemického složení studovaných litologií, doplněného o detailní petrologické a mineralogické studium, byly jednotlivé typy rozčleněny na tři základní skupiny zastoupené amfibolity, rulami a migmatity, které se v rámci charakterizovaných skupin mezi sebou mohou výrazněji odlišovat v závislosti na jejich chemickém složení (viz podrobná geochemická klasifikace níže).

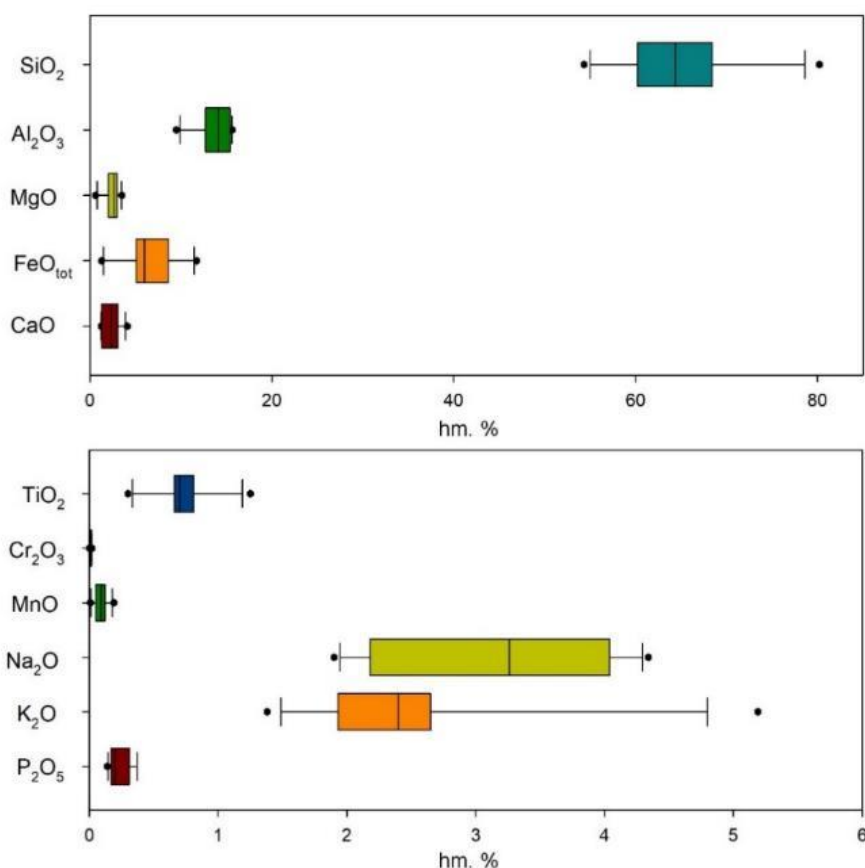
Současně byla využitím přenosného XRF spektrometru typu DELTA v laboratorních podmínkách sledována distribuce hlavních a stopových prvků v jednotlivých studovaných litologiích, za účelem upřesnění a rozšíření souboru dat získaných celohorninovými analýzami v laboratořích ACME v Kanadě. Pro přesnější stanovení koncentrací hlavních oxidů, případně některých stopových prvků, byla délka jednoho měření nastavena na celkový čas 5 min, s využitím geochemického módu Geochem–Vanad. Výsledky přibližně 78 XRF analýz převládajících horninových typů prezentuje Obr. 142, Obr. 143, Obr. 147, Obr. 148, Obr. 153, Obr. 154 a konkrétní naměřené hodnoty shrnuje Tab. 3 v Elektronická příloha 23. Využitím XRF terénního měření byla rovněž sledována homogenita prvkového složení hlavních litologických typů zastoupených v blízkosti první zóny na 20. patře v dole Rožná. Výsledky XRF profilového měření různých horninových typů v blízkém okolí první zóny jsou graficky zobrazeny na Obr. 156, Obr. 157, Obr. 158.

2.3.4.1 Ruly s proměnlivou intenzitou migmatitizace

2.3.4.1.1 Analýzy ACME

Výsledky celohorninových analýz z laboratoří ACME jsou uvedeny v Tab. 2 v Elektronická příloha 23 a graficky znázorněny na Obr. 139 a Obr. 140, ve formě boxplotů, které zobrazují soubor dat (koncentrace hlavních oxidů a vybraných stopových prvků) rozdělených do čtyř částí (kvartilů), z nich každý obsahuje 25 % analýz a umožňují tak zobrazení zastoupení naměřených hodnot v jednotlivých kvartilech. Zatímco chování REE v tomto klasifikovaném litologickém typu a jejich vzájemné srovnání se standardizovanými hodnotami dle normy PAAS (Piper a Bau 2013) je znázorněno na Obr. 141. Stanovené koncentrace hlavních oxidů v rulách, projevujících se variabilní intenzitou migmatitizace, dokládají relativně vysoké průměrné obsahy SiO₂, které zpravidla dosahují více než 60 hm. %. Výjimku představují kvarcitická a turmalinicko-biotiticko-kvarcitická ruly (vzorek 22a, 22b), které byly odebrány na 22. a 24. patře v podobě velkoobjemových vzorků, vykazujících vůbec nejvyšší stanovené koncentrace SiO₂ (max. 80,2 hm. %) ve srovnání s ostatními litologickými typy. Naopak intenzivně alterované ruly vyznačující se vysokým stupněm pyritizace (velkoobjemové vzorky s označením 12, 16 432,

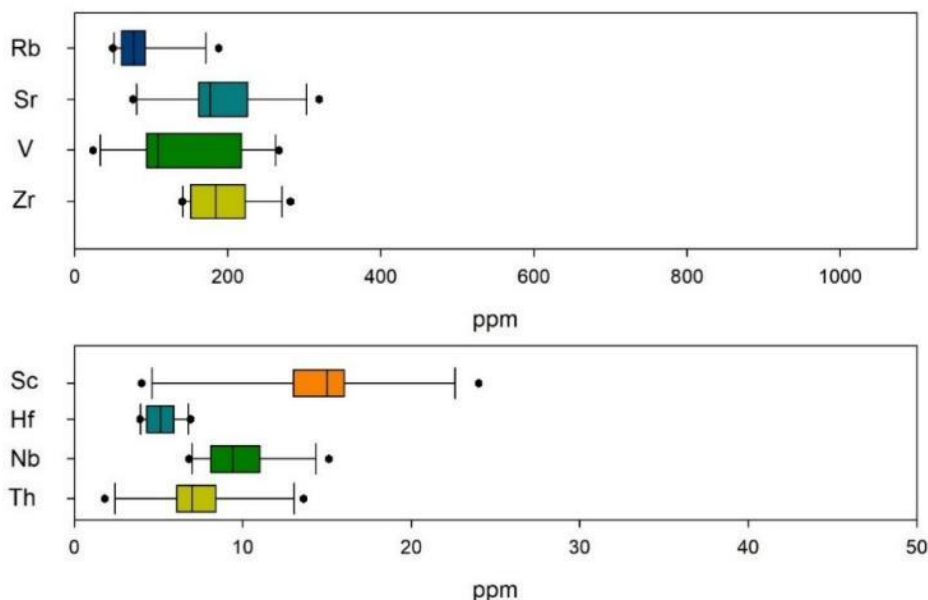
20 P8Z odebrané na 12. a 20. patře) obvykle dosahují nejnižších koncentrací SiO_2 , klesajících až na hodnotu 54,32 hm. %. Studované ruly obecně dosahují relativně nízkých koncentrací MgO (0,6–3,32 hm. %), CaO (1,21–4,1 hm. %), MnO (0,01–0,19 hm. %), TiO_2 (0,3–1,25 hm. %) a Cr_2O_3 (<0,02 hm. %). Vůbec nejnižší celkové obsahy uvedených oxidů byly naměřeny v kvarcitických rulách, které se v závislosti na vysoké koncentraci SiO_2 zákonitě projevují jednak nižším zastoupením hlavních oxidů, zejména FeO_{tot} (1,27–2,33 hm. %), ale také podstatně nižšími obsahy většiny stopových prvků (viz níže). Obsahy Al_2O_3 a FeO_{tot} dosahují relativně vyšších hodnot (12,7–15,54 hm. % a 5,09–7,1 hm. %) a nevykazují příliš výraznou variabilitu mezi jednotlivými analyzovanými vzorky (viz Obr. 139). Nicméně, v důsledku intenzivní pyritizace doprovázené vznikem sekundárních Fe-bohatých sulfidů dochází k viditelnému nárůstu FeO_{tot} (8,61–11,73 hm. %) v silně alterovaných rulách zastoupených vzorky 12, 16 432 a 20 P8Z, zatímco obsahy Al_2O_3 mírně klesají (~ 12 hm. %). Z alkálií dosahují průměrné koncentrace Na_2O (~ 4 hm. %) dvojnásobně vyšších hodnot než K_2O (~2 hm. %), s nejnižšími obsahy typickými pro silně pyritizované ruly (Na_2O ~ 2 hm. %), naopak nejvyšší koncentrace K_2O (5,19 hm. %) byly naměřeny v kvarcitické rulé (vzorek 22a) korespondující s vyšším modálním zastoupením K-živce.



Obr. 139 Stanovené koncentrace hlavních oxidů (ACME analýzy)

Ze stanovených stopových prvků v laboratořích ACME dosahuje nejvyšších hodnot Ba, pohybujících se v řádech stovek ppm v analyzovaných rulách, které se nevyznačují známkami pokročilejších alterací (Tab. 2 v Elektronická příloha 23). Jelikož právě silně přeměněné ruly vykazující vysoký stupeň pyritizace, dosahují extrémně vysokého celohorninového obsahu Ba

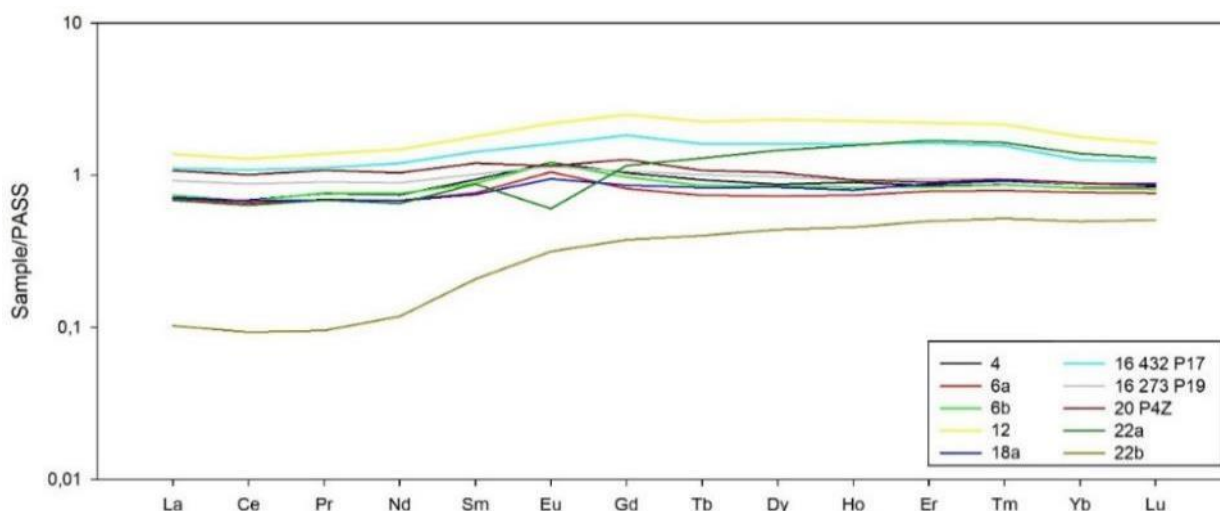
(3339–8299 ppm), který jednoznačně souvisí se sulfidickou mineralizací. Samotná pyritizace byla patrně doprovázena Pb–Zn–Ba zrudněním, eventuálně mohlo být geochemické složení alterované ruly ovlivněno interakcí fluid nesoucích prvkové složení právě staršího Pb–Zn–Ba zrudnění, které je charakteristické pro ložisko Rožná a v minulosti bylo popsáno řadou autorů (viz Křížek a Hájek 2005; Jakubcová 2014). Tento fakt dokládají výsledky laboratorního XRF měření silně alterované/pyritizované ruly (vzorek 12), pro který jsou typické výrazně zvýšené obsahy Zn (max. 411 ppm), Pb (54–58 ppm) a S dosahující až první desítky tisíce ppm (Tab. 3 v Elektronická příloha 23). Obsahy Rb se obvykle pohybují v řádech desítek ppm (Obr. 140), anomálními koncentracemi se vyznačuje pouze vzorek kvarcitické ruly (22a), který koreluje se zvýšenou koncentrací K₂O a reflektuje tak výraznější modální zastoupení K-živce. Stanovené koncentrace Sr běžně dosahují hodnot v řádech stovek ppm (~ 100–237 ppm), s výrazným poklesem v kvarcitické rule (76 ppm) a naopak zřetelným obohacením v pyritizovaných rulách (max. 319 ppm). Překvapivě vyšších obsahů Th dosahuje kvarcitická rula (13,6 ppm), konkrétně se jedná o velkoobjemový vzorek 22a, zatímco průměrné koncentrace Th v rulách se pohybují v rozmezí 6–10 ppm, v případě druhého analyzovaného vzorku kvarcitické ruly (22b) klesají obsahy Th na nejnižší hodnoty (1,8 ppm). Analyzované koncentrace U (~ 2 hm. %) jsou srovnatelné s průměrnými až lehce nižšími obsahy U v zemské kůře, nápadně se však projevují vyšší naměřené hodnoty U (3,1–6,7 ppm) v případě intenzivně alterovaných rul postižených pyritizací. Naopak průměrné hodnoty Zr v rulách (~ 200–280 ppm) výrazně klesají u pyritizovaných vzorků (~ 140–150 ppm), společně se vzorkem kvarcitické ruly (166 ppm). Kvantitativní zastoupení Nb a Hf v rulách se neprojevuje viditelnějšími variabilními hodnotami. Mírný nárůst obsahů V (218–267 ppm) a W (2,4–4,7 ppm) lze pozorovat u alterovaných rul vyznačujících se sekundárním sulfidickým zrudněním, oproti nealterovaným rulám (V ~ 100 ppm, W ~ 1 ppm).



Obr. 140 Koncentrace stopových prvků v rulách (ACME analýzy)

Z hlediska distribuce REE se popisovaný litologický typ v podobě rul projevuje vyšší Σ REE v porovnání například s amfibolity, kdy ruly dosahují až dvojnásobně vyšších celkových

koncentrací REE, pohybujících se v prvních stovkách ppm (Tab. 2 v Elektronická příloha 23). Charakter REE paternů u většiny analyzovaných vzorků vykazuje relativně rovnoměrné zastoupení LREE a HREE (Obr. 141), výjimečně malé navýšení HREE, při normalizaci dle použitého standardu PAAS (Piper a Bau 2013). V ojedinělých případech se ruly projevují nevýraznou pozitivní Eu anomálií. Zřetelně se odlišuje vzorek kvarcitické ruly (označení 22b), který vykazuje hodnoty Σ REE nižší o jeden řád (25,4 ppm). Zároveň se vyznačuje odlišným trendem v porovnání s ostatními vzorky, kdy dochází k výraznému obohacení zejména o HREE. Srovnatelně, avšak s menší intenzitou lze sledovat podobný trend u druhého vzorku kvarcitické ruly (označení 22b), který se naopak projevuje nejvýraznější negativní Eu anomálií.



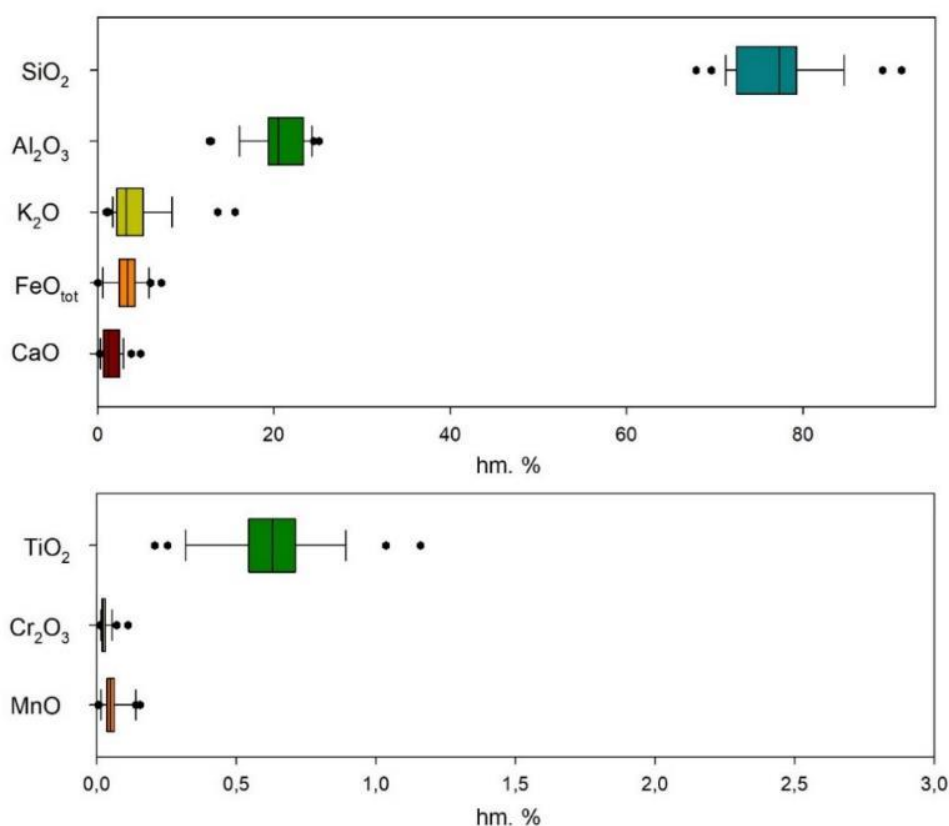
Obr. 141 Distribuce REE v rulách. Normalizace dle standardizovaného složení PAAS (Piper a Bau 2013)

2.3.4.1.2 XRF spektrometrie

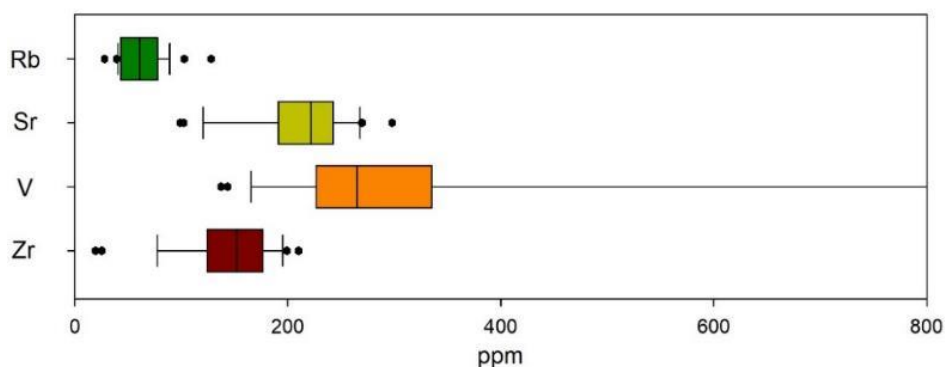
Výsledky laboratorního XRF spektrometrického měření dokládají srovnatelné naměřené koncentrace některých hlavních oxidů a detekovaných stopových prvků (Obr. 142, Obr. 143, Tab. 3 v Elektronická příloha 23). Mírně zvýšených hodnot dosahují obsahy SiO_2 (~ 72–82 hm.%) v porovnání s ACME analýzami (Obr. 139, Obr. 140, Tab. 2 v Elektronická příloha 23). Nejvyšší koncentrace SiO_2 byly detekovány v kvarcitické ruly (~ 90 hm.%) zastoupené vzorkem 22b, naopak nejnižší hodnoty byly naměřeny u vzorku migmatitizované biotitické ruly s granátem (~68 hm. %) s označením 6b. V případě velmi nízkých koncentrací MgO (<3 hm.% stanovených ACME analýzou) v rulách byly výsledné hodnoty pod mezí detekce, a to zejména v důsledku analytické citlivosti samotného XRF spektrometru, který obtížněji detekuje lehčí prvky. Koncentrace Al_2O_3 se zpravidla pohybují v rozmezí 18–24 hm. %, rozdíly v obsazích FeO_{tot} jsou nepatrné (2–5 hm. %), podobně jako u TiO_2 (~ 0,6 hm. %), CaO (~ 1–5 hm.%), MnO (0,05–0,14 hm.%) a Cr_2O_3 (0,03 hm. %). Obecně laboratorní XRF měření ukazuje velice konzistentní data bez příliš proměnlivých hodnot. Výrazněji se projevují pouze vzorky kvarcitické ruly (22b), silně alterované ruly s vysokou intenzitou pyritizace (12) a migmatitizované biotitické ruly s granátem (6b) z hlediska zastoupení hlavních oxidů.

Stopové koncentrace V dosahují zpravidla prvních stovek ppm až na výjimku v podobě intenzivně pyritizované ruly (V ~ 2500 ppm) a leukokratního granitu zastoupeného vzorkem VD 2, v rámci kterého, dosahuje V až 600 ppm. Jak bylo uvedeno výše, právě vzorek silně alterované ruly,

vykazující znaky sekundární sulfidické mineralizace, dosahuje anomálních koncentrací některých stopových prvků, a to zejména Zn (max. 411 ppm), Pb (54–58 ppm), S (max. 3,2 hm.%), Ni (80 ppm), Cu (77–97 ppm), detekován byl také ve zvýšených koncentracích Mo (max. 25 ppm), Sn (max. 32 ppm), Se (9 ppm), U (7 ppm) a P (max. 1225 ppm). Nealterované vzorky rul s proměnlivou intenzitou migmatitizace obvykle vykazují srovnatelné koncentrace vybraných stopových prvků jako např. Sr a Zr, dosahujících zpravidla řádů stovek ppm. Rb, Ni nebo Zn se pohybují v řádech desítek ppm, zatímco As se běžně pohybuje pouze v řádech jednotek ppm. Podobně jako u zastoupení hlavních oxidů se z hlediska koncentrací stopových prvků výrazněji odlišuje zmíněný vzorek pyritizované ruly společně s kvarciticou rulou a leukokratickým granitem (Tab. 3 v Elektronická příloha 23).



Obr. 142 Koncentrace hlavních oxidů stanovené XRF analýzou

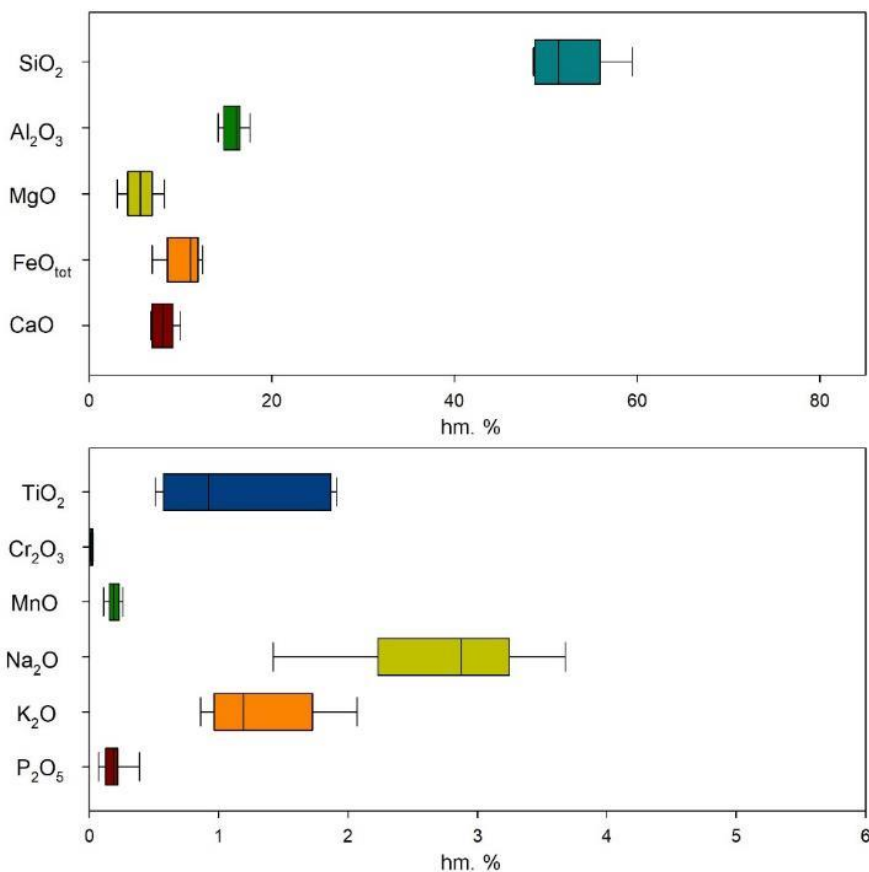


Obr. 143 Vybrané stopové prvky detekované v rulách XRF měřením

2.3.4.2 Amfibolity

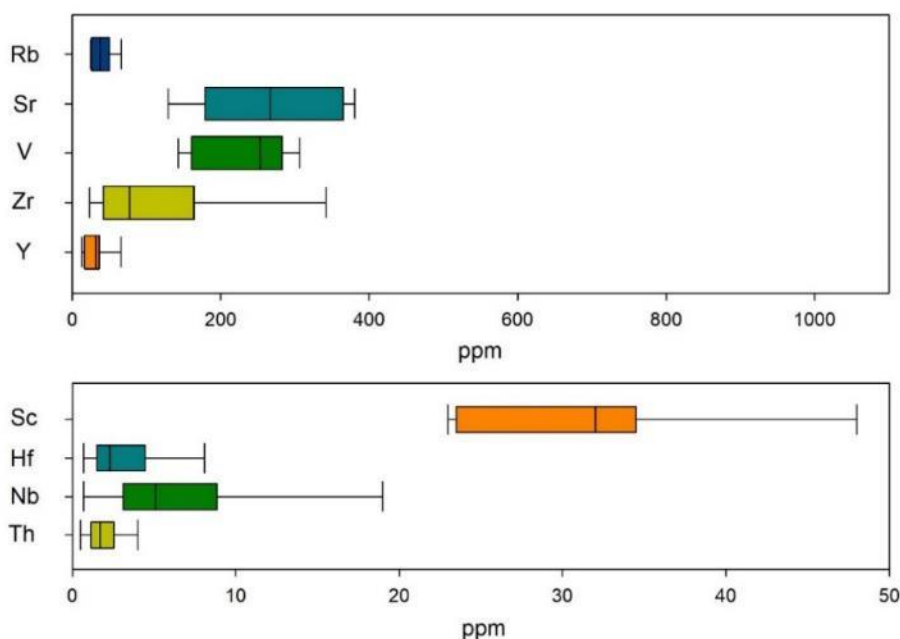
2.3.4.2.1 Analýzy ACME

Geochemické složení amfibolitů (Obr. 144, Tab. 2 v Elektronická příloha 23) ukazuje podstatně nižší celkové obsahy SiO_2 (~ 48–53 hm. %), odrážející chemismus samotného protolitu, ve srovnání s korovými metapelity v podobě rul podléhajících různému stupni migmatitizace. Zároveň, bazický charakter původní protolitické horniny amfibolitů také dokumentují vyšší koncentrace MgO (3–8 hm. %), FeO_{tot} (11 hm. %), CaO (7–10 hm. %) a TiO_2 (1–2 hm. %), společně s relativně homogenními obsahy Al_2O_3 (14–17 hm. %). Nicméně, v rámci tohoto klasifikovaného litologického typu se z geochemického hlediska zřetelně vyčleňují dva vzorky s označením BGS 24-I a 7b (Tab. 2 v Elektronická příloha 23), které pravděpodobně představují přechodní člen mezi odlišnými litologiemi v podobě rul a amfibolitů. Charakteristickým znakem tohoto přechodného typu je vyšší obsah SiO_2 (58,4–59,46 hm. %) viditelně se přibližujícím k celkovým stanoveným koncentracím SiO_2 v rulách. Současně dochází k zřetelnému poklesu MgO (3,89–5,6 hm. %), FeO_{tot} (~ 7 hm. %), CaO (~ 7 hm. %) a MnO (~ 0,1 hm. %). Jak dokládají geochemické analýzy, i přestože oba charakterizované vzorky z petrografického pohledu odpovídají biotitickému amfibolitu, z hlediska jejich celohorninového složení korespondují spíše s metapelity. Velmi nápadným rysem amfibolitů jsou značně variabilní koncentrace TiO_2 (Obr. 144), na základě kterých lze rozdělit tento vyčleněný litologický typ na TiO_2 -bohaté amfibolity (~ 2 hm. %) a naopak amfibolity s výrazně nižšími obsahy TiO_2 (< 1 hm. %). Koncentrace alkálií dosahují relativně proměnlivých hodnot, v případě Na_2O se pohybují v rozmezí 1,42–3,68 hm. %, zatímco K_2O dosahuje maximálně 2 hm. %.



Obr. 144 Geochemické složení amfibolitů (ACME)

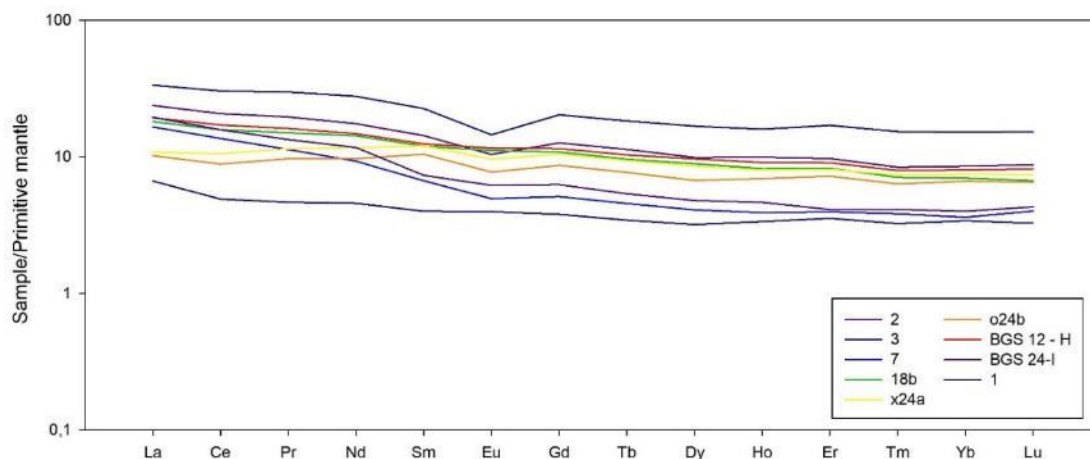
Z hlediska zastoupených stopových prvků, se amfibolity vyznačují koncentracemi Ba srovnatelnými s rulami bez alteračního postižení, jejichž hodnoty se zpravidla pohybují v řádech stovek ppm. Rovněž obsahy Rb v amfibolitech (řády desítek ppm) jsou relativně srovnatelné s rulami (Obr. 145), avšak jejich hodnoty mírně klesají v porovnání s metapelity. Na straně druhé, dochází k viditelnému nárůstu koncentrací Sr (max. 380 ppm) v amfibolitech, ukazující na zdrojový materiál plášťového charakteru s více bazickým složením. V porovnání s rulami se amfibolity vyznačují nižšími a značně proměnlivými obsahy Th (0,5–4 ppm), U (0,8–1,8 ppm) a Hf (0,7–8,1 ppm). Velmi variabilních koncentrací dosahuje zejména Zr (23,6–185,4 ppm), kdy v ojedinělých případech, konkrétně ve vzorku granátického amfibolitu (vzorek 1), se Zr přibližuje až k 341 ppm. Extrémně vysoké koncentrace Zr v tomto vzorku velmi dobře korelují se zvýšenými obsahy Y (65,5 ppm), které společně se Zr preferuje vstup do granátu a odráží tak vyšší modální zastoupení granátu v analyzovaném vzorku. Podobné chování ukazuje také Nb (19 ppm) dosahujících nejvyšších hodnot právě v granátickém amfibolitu, oproti ostatním analyzovaným vzorkům amfibolitů (Nb 0,7–11,7 ppm). Obvyklé koncentrace Y v amfibolitech se pohybují v řádech prvních desítek ppm, podobně jako Sc, naopak byly detekovány mírně vyšší obsahy V dosahujících řádů prvních stovek ppm (Tab. 2 v Elektronická příloha 23).



Obr. 145 Variace stopových prvků v amfibolitech (ACME)

Stanovené koncentrace REE dokládají spíše primitivní charakter zdrojového materiálu derivovaného z pláště vzhledem k nejnižším naměřeným obsahům REE ve srovnání s ostatními klasifikovanými litologickými typy (Tab. 2 v Elektronická příloha 23). Zpravidla se amfibolity projevují značně variabilními hodnotami Σ REE (30,15–168,6 ppm). Průběh výsledných REE paternů standardizovaných podle normativního složení primitivního pláště (McDonough a Sun 1995) ukazuje obohacení zejména o LREE (Obr. 146) s chybějící nebo nevýraznou Eu anomálií. Nejvýrazněji se vyčleňuje vzorek granátického amfibolitu z hlediska distribuce REE, což velmi dobře koreluje se zvýšenými koncentracemi některých stopových prvků (např. Y, Zr), které

společně s HREE přednostně vstupují do hojně zastoupeného granátu (vysoké obsahy Er 7,43 ppm, Tm 1,04 ppm, Yb 6,66 ppm, Lu 1,03 ppm). Naopak nejnižší celkové koncentrace vykazuje vzorek 3b (30,15 ppm), výrazně se odlišujících od ostatních analyzovaných vzorků, dosahujících dvojnásobně až trojnásobně vyšších hodnot Σ REE (Tab. 2 v Elektronická příloha 23).



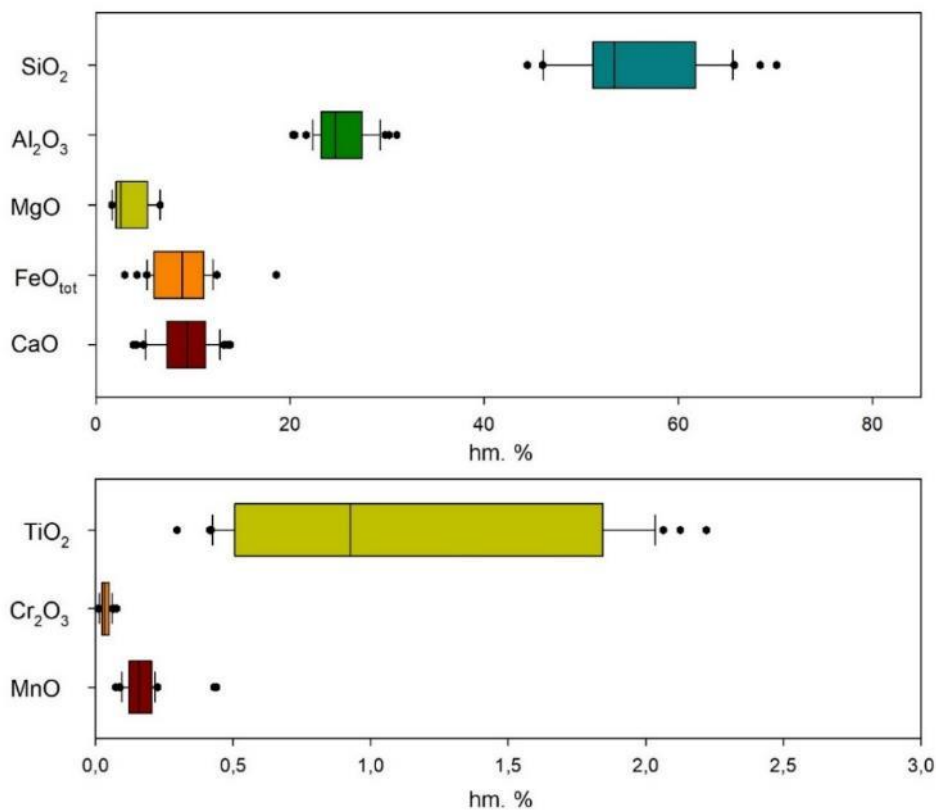
Obr. 146 Zastoupení REE v analyzovaných vzorcích amfibolitů. Normalizováno dle složení primitivního pláště (McDonough a Sun 1995)

2.3.4.2.2 XRF spektrometrie

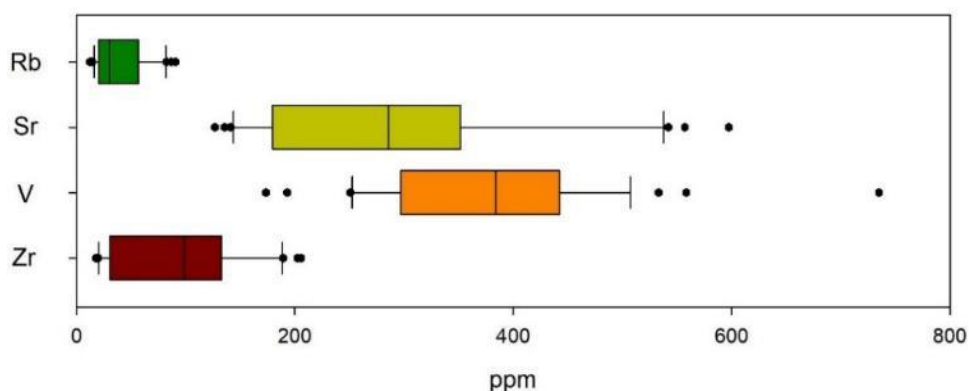
Rozsáhlejší soubor analyzovaných vzorků amfibolitů pomocí XRF spektrometru ukazuje velmi variabilní koncentrace SiO_2 pohybující se v rozmezí 44–65 hm. %. Více konzistentní hodnoty dokládají naměřené obsahy Al_2O_3 dosahující maximálně 30 hm. %, společně s Cr_2O_3 (<0,1 hm. %). Velmi nízkých a zároveň srovnatelných koncentrací dosahuje také MnO (<0,2 hm. %). Mírně variabilní se jeví koncentrace FeO_{tot} (~ 3–18 hm. %) a CaO (~ 4–14 hm. %) v jednotlivých analyzovaných vzorcích. Naopak jak prokázaly již celohorninové analýzy provedené v laboratořích ACME, v rámci tohoto klasifikovaného litologického typu lze pozorovat značné rozdíly v celkových obsazích TiO_2 (Obr. 147). Na základě stanovených koncentrací TiO_2 se vyčleňují dva hlavní typy amfibolitů zastoupené TiO_2 bohatými amfibolity, jejichž celkové obsahy se pohybují v rozmezí 1–2 hm. %, zatímco druhý vyčleněný typ se projevuje podstatně nižšími koncentracemi, které jsou zpravidla nižší než 1 hm. %. Naopak od předcházejícího litologického typu zastoupeného rulami se amfibolity vyznačují podstatně vyššími obsahy MgO , což dokládají i přes nízkou analytickou citlivost XRF spektrometru některé výsledné hodnoty pohybující se obvykle v řádech jednotek hm. %, oproti rulám jejichž obsahy MgO byly pod mezí detekce.

Ve srovnání s rulami vykazujícími proměnlivou intenzitu migmatitizace se amfibolity charakteristicky vyznačují mírně zvýšenými obsahy V (stovky ppm), Ni (desítky ppm), Cu a Zn, jejichž hodnoty běžně dosahují desítek až prvních stovek ppm. Amfibolity se také mimo jiné projevují výrazně variabilními a vyššími koncentracemi Sr (~ 140–598 ppm; Obr. 148) ve srovnání s hodnotami naměřenými na vzorcích rul (Sr ~100–298 ppm). Naopak výsledky XRF měření amfibolitů dokládají relativně proměnlivé, ale celkově nižší detekované hodnoty Rb (~ 12–90 ppm) oproti rulám, podobně jako Zr dosahující značně variabilních koncentrací (17–205 ppm). Koncentrace Pb se obvykle pohybují v řádech jednotek až prvních stovek ppm. Výsledné analýzy S ukazují značné proměnlivé hodnoty, kdy běžně bývají koncentrace S pod mezí detekce, avšak

nejnižší naměřené hodnoty začínají na prvních stovkách ppm a ve vzácných případech dosahují až vyšších tisíců ppm. Výrazná variabilita obsahů S je patrně způsobena přítomností Ni-Co sulfidické fáze a její nerovnoměrné prostorové distribuci v analyzovaných vzorcích amfibolitů. Ostatní měřené stopových prvků jako např. Cd, U nebo Se ukazují velice nízké hodnoty, případně byly pod detekčními limity (Tab. 3 v Elektronická příloha 23).



Obr. 147 Koncentrace hlavních oxidů v amfibolitech (XRF spektrometrie)



Obr. 148 Naměřené obsahy stopových prvků (XRF spektrometrie)

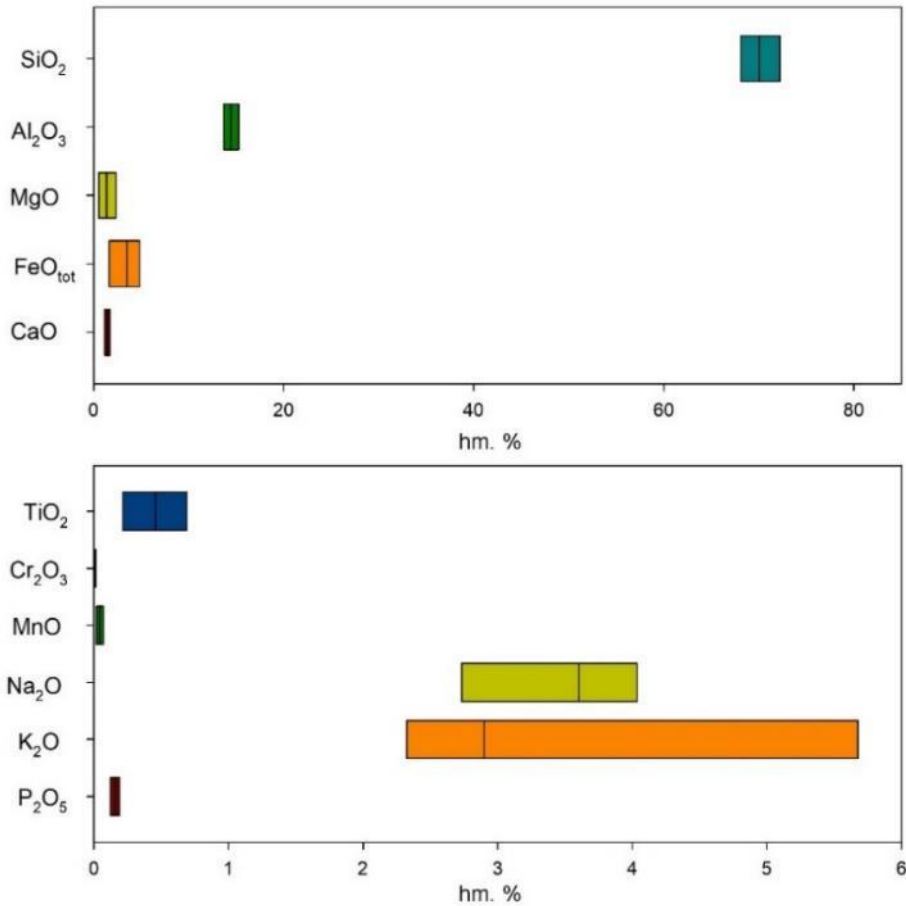
2.3.4.3 Migmatity

2.3.4.3.1 Analýzy ACME

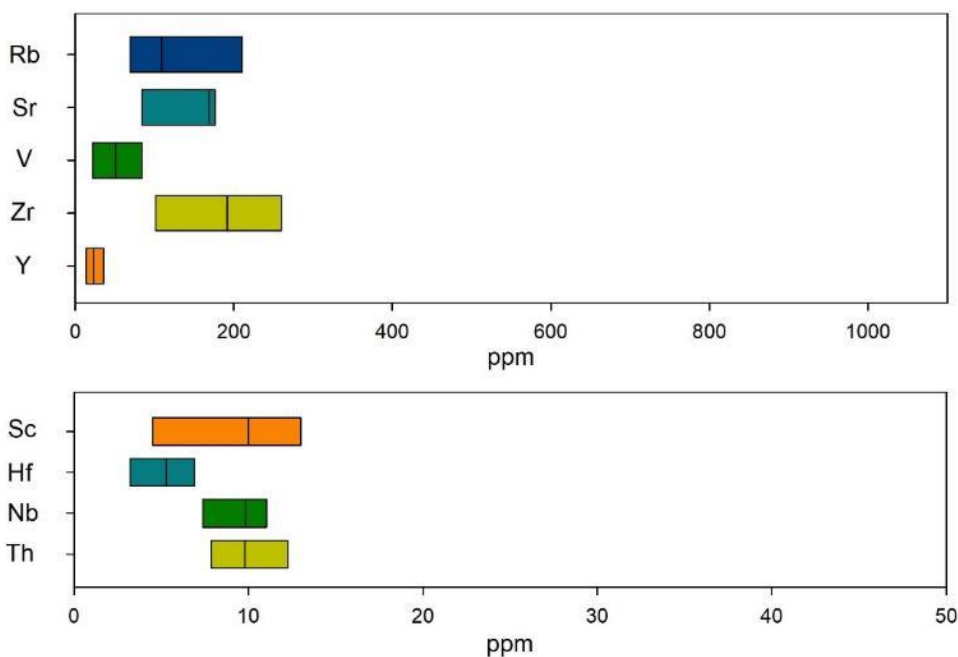
Na základě výsledků geochemických analýz lze vyčlenit dva rozdílné typy migmatitů odlišujících se v závislosti na koncentracích hlavních oxidů (Tab. 2 v Elektronická příloha 23). První klasifikovaný typ se vyznačuje relativně zvýšenými obsahy SiO_2 (70,73–72,29 hm. %), naopak mírně nižšími koncentracemi MgO (0,43–0,71 hm. %), FeO_{tot} (1,44–2,52 hm. %), TiO_2 (0,21–0,31 hm. %), CaO (1,09–1,55 hm. %), MnO (~ 0,02 hm. %) a Cr_2O_3 , jehož hodnoty ve většině případů spadají pod meze detekce (<0,002 hm. %). Zatímco druhá vyčleněná varieta migmatitů se projevuje slabě sníženými obsahy SiO_2 (65,52–69,42 hm. %) doprovázenými relativně vyššími koncentracemi MgO (1,96–2,49 hm. %), FeO_{tot} (4,49–5,83 hm. %), TiO_2 (0,61–0,82 hm. %), CaO (1,45–2,27 hm. %), MnO (~ 0,07 hm. %) a Cr_2O_3 (0,008–0,013 hm. %). První charakterizovaný typ je zastoupen velkoobjemovými vzorky migmatitů (označení 5c, 16 295 P20, 20 P6Z, 16 467), které byly odebrány na 20., 22. a 24. patře v dole Rožná. Druhá popisovaná varieta odpovídá biotitickým migmatitům (označení 20P1ZZ, 20P2ZZ) odebraným na 20. patře. Odlišné celohorninové složení dvou různých variet migmatitů patrně reflektuje podíl zastoupeného leukosomu a melanosomu analyzovaného vzorku, kdy více hrubozrnné migmatity s výraznějším zastoupením leukosomu dosahují vyšších koncentrací SiO_2 , na druhé straně vyčleněná varieta migmatitů s větším podílem melanosomu bude zákonitě obohacená o MgO , FeO , TiO_2 atd. Podobný trend ukazují také obsahy alkálií, kdy migmatity s větším zastoupením leukosomu dosahují běžně vyšších koncentrací K_2O (max. 5,87 hm. %), společně se sníženými obsahy Na_2O (min. 2,71 hm. %) vedoucími k celkově vyššímu poměru $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ (~ 2). Migmatity s nižším podílem leukosomu obvykle vykazují nižší naměřené koncentrace K_2O (max. 3,75 hm. %) a slabě zvýšené obsahy Na_2O (min. 3,48 hm. %), kdy celkový poměr $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ dosahuje dvojnásobně nižších hodnot (<1).

Oba charakterizované typy migmatitů se viditelně odlišují i z hlediska stanovených koncentrací některých stopových prvků (Tab. 2 v Elektronická příloha 23). Nejvýrazněji se kontrastní geochemické složení migmatitů projevuje v zastoupení Zr, V, Sr, a Rb, jelikož první klasifikovaná SiO_2 bohatá varieta migmatitů vykazuje dvojnásobně až trojnásobně nižší obsahy Zr (72,4–140,3 ppm), V (19–25 ppm) a Sr (81,4–84,6 ppm), zatímco koncentrace Rb (207,1–219,4 ppm) dosahují dvojnásobně vyšších hodnot, ve srovnání s druhým vyčleněným typem migmatitů s charakteristicky vyššími obsahy Zr (243,2–261,6 ppm), V (77–91 ppm), Sr (165,1–180,1 ppm) a výrazně nižším obsahem Rb (76,8–118,5 ppm). Výjimku představuje pouze vzorek s označením 20 P6Z, odebraný na 20. patře v dole Rožná, který typicky vykazuje zvýšené obsahy Sr (174,9 ppm) a naopak zřetelně nižší zastoupení Rb (45,6 ppm) v porovnání s ostatními vzorky reprezentujícími první charakterizovaný typ migmatitů. Současně lze pozorovat menší odlišnosti v zastoupení U, Hf a Co mezi oběma varietami, kdy první popisovaný typ zpravidla dosahuje průměrně nižších koncentrací Hf (2,4–4,1 ppm) a Co (2,2–3,9 ppm) a slabě zvýšených obsahů U (max. 4,8 ppm), zatímco druhý typ se vyznačuje relativně vyšším obsahem Hf (6,5–7,2 ppm) a Co (11,6–12,9 ppm), doprovázený mírně sníženými průměrnými koncentracemi U (max. 2,9 ppm). Mírně variabilních hodnot dosahují stanovené koncentrace Cs (1,6–7,7 ppm), Nb (5,8–11,7 ppm) a Y (2,8–41,8 ppm) ve všech analyzovaných vzorcích migmatitů. Jednotlivé charakterizované litologie zastoupené migmatity, rulami a amfibolity se z hlediska koncentrací stopových prvků nejvýrazněji odlišují stanovenými koncentracemi Sr, Rb, Zr a Sc, (Obr. 151), což dokládají mimo jiné i výsledky XRF spektrometrického měření (viz níže). Migmatity typicky obsahují vyšší koncentrace Rb (medián 110 ppm), naopak obsahy Sr (medián 170 ppm) a Sc (medián 10 ppm) jsou relativně nízké ve srovnání s ostatními litologiemi. Dále se migmatity

vyznačují koncentracemi Zr (medián 190 ppm) srovnatelnými s rulami (medián Zr ~ 198 ppm), pro které jsou charakteristické střední hodnoty Rb (medián 78 ppm), Sr (medián 175 ppm) a Sc (medián 15 ppm) v hledem ke zbylým litologickým typům. Zatímco amfibolity se projevují vyššími hodnotami Sr (medián 267 ppm) a Sc (medián 32 ppm), naopak se vyznačují ochuzením o Rb (medián 37 ppm) a Zr (medián 78 ppm).

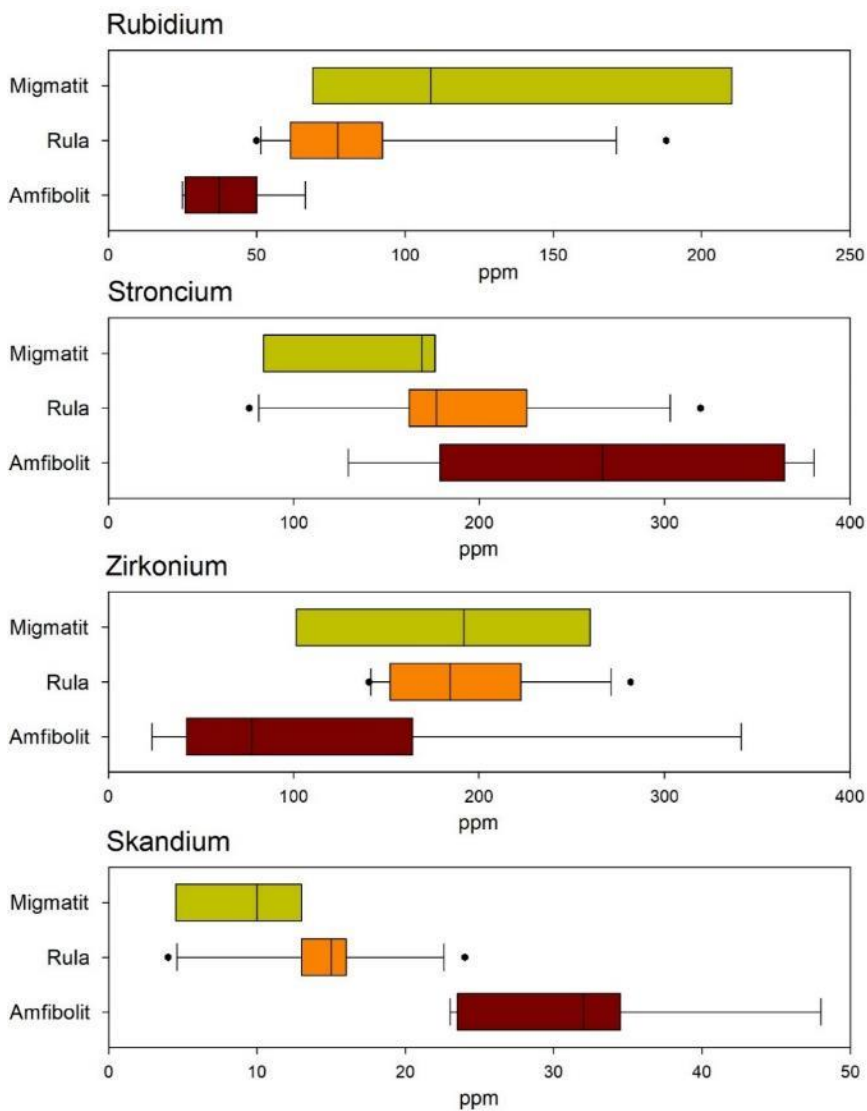


Obr. 149 Variace hlavních oxidů v migmatitech (ACME)

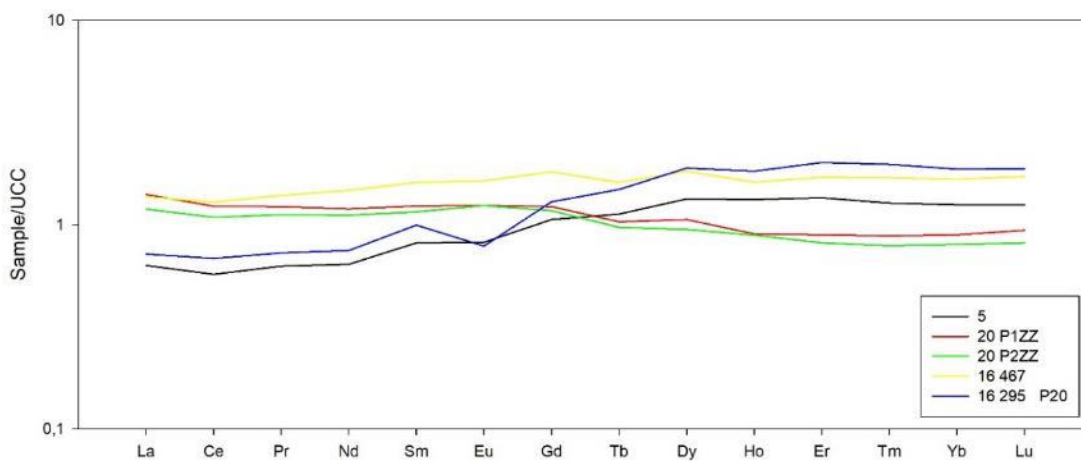


Obr. 150 Koncentrace stopových prvků v migmatitech (ACME)

Kromě rozdílného prvkového složení v podobě hlavních oxidů a uvedených stopových prvků se oba vyčleněné typy migmatitů velmi spolehlivě odlišují i z hlediska distribuce REE v těchto litologiích (Tab. 2 v Elektronická příloha 23). Migmatity s vyšším podílem leukosomu se obvykle projevují podstatně nižšími celkovými koncentracemi REE (64,48–118,85 ppm), zatímco druhý typ s méně dominantním zastoupením leukosomu běžně dosahuje vyšších hodnot Σ REE (161,55–204,42 ppm). Výrazně odlišné celkové obsahy REE jsou způsobeny převážně zastoupením LREE, což dokládají dvojnásobně vyšší koncentrace La (max. 42 ppm), Ce (max. 82 ppm), Pr (max. 9 ppm) a Nd (38 ppm) v druhé klasifikované varietě migmatitů. Standardizované REE paternity dle normy UCC (McLennan 2001) dokumentují srovnatelný charakter jako v případě rul (Obr. 152), kdy zastoupení LREE a HREE vykazuje rovnoměrný průběh bez výraznější Eu anomálie. Mírně odlišnými trendy v REE paternech se vyznačují vzorky 16 295 P20 a 5c, u kterých dochází k mírnému obohacení o HREE vzhledem k zastoupení LREE, zároveň se projevují velmi slabou Eu anomálií.



Obr. 151 Zastoupení vybraných stopových prvků zřetelně odlišujících jednotlivé charakterizované litologie (ACME analýzy)

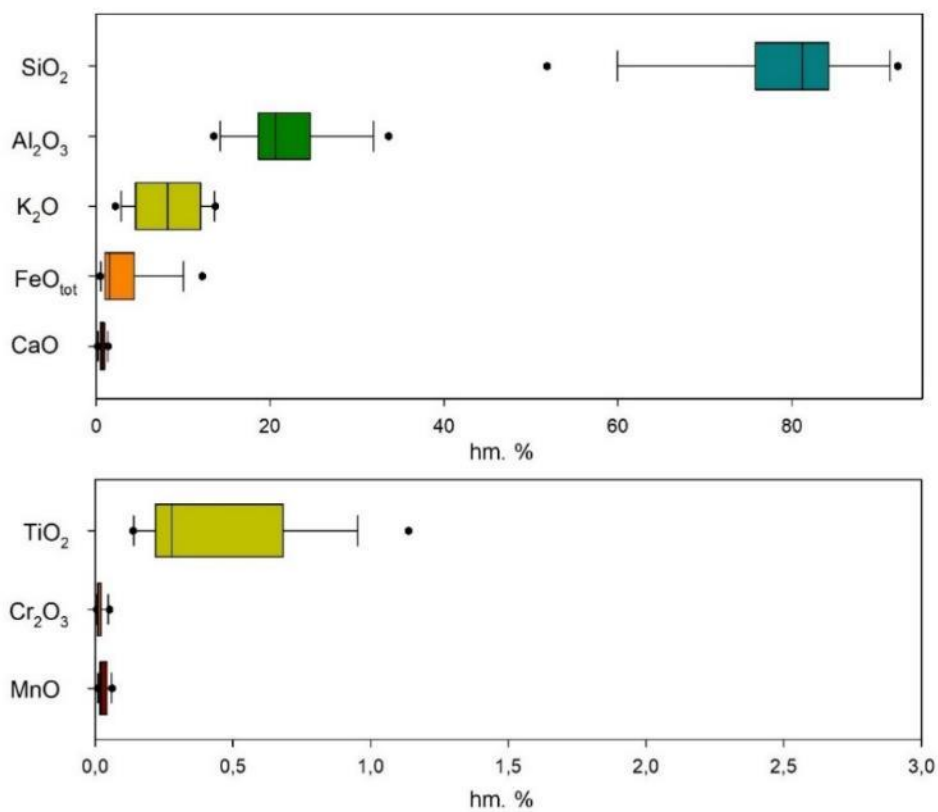


Obr. 152 Zastoupení REE v migmatitech normalizované dle standardu UCC (McLennan 2001)

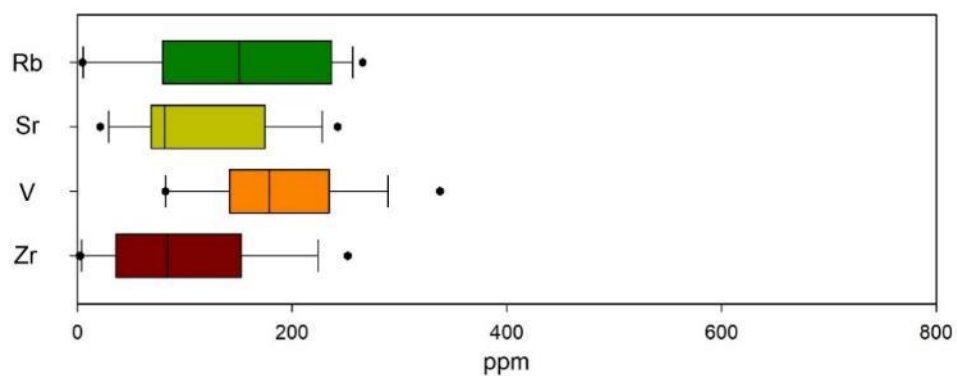
2.3.4.3.2 XRF spektrometrie

Typickým rysem výsledných XRF měření na vzorcích migmatitů je výrazný variabilita stanovených koncentrací hlavních oxidů i některých stopových prvku (Obr. 153, Tab. 3 v Elektronická příloha 23). Značnou proměnlivostí obsahů v jednotlivých vzorcích se vyznačuje SiO_2 (51,85–92,18 hm. %), Al_2O_3 (13,55–33,65 hm. %), FeO_{tot} (0,47–12,22 hm. %), nebo také K_2O (4,47–13,51 hm. %). Zaznamenaná variabilita koncentrací hlavních oxidů v rámci toho vyčleněného litologického typu je odrazem samotné textury migmatitů v závislosti na podílu v zastoupení dvou převládajících složek, a sice leukosomu a melanosomu. Jelikož bylo laboratorní XRF měření provedeno na kusových horninových vzorcích, bez předcházející homogenizace ve formě nadrcení analyzovaného preparátu, záleželo především na konkrétní části analyzovaného preparátu a převládajícím zastoupení jedné z hlavní složek migmatitů. Tento fakt je dobře pozorovatelný u výsledků ACME analýz, na základě kterých byly vyčleněny dva odlišné typy migmatitů, které se liší podílem v zastoupení leuko/melanosomu. Velmi nízké a srovnatelné obsahy hlavních oxidů byly naměřeny v případě TiO_2 (<1,2 hm. %), Cr_2O_3 (~0,02 hm. %), CaO (<1,4 hm. %) a MnO (<0,06 hm. %). Podobně jako u migmatitizovaných rul nebylo v rámci vzorků migmatitů detekováno MgO z důvodu analytické citlivosti XRF spektrometr a velmi nízkým celkovým koncentracím v tomto litologickém typu (max. 2,5 hm. % stanoveny ACME analýzou).

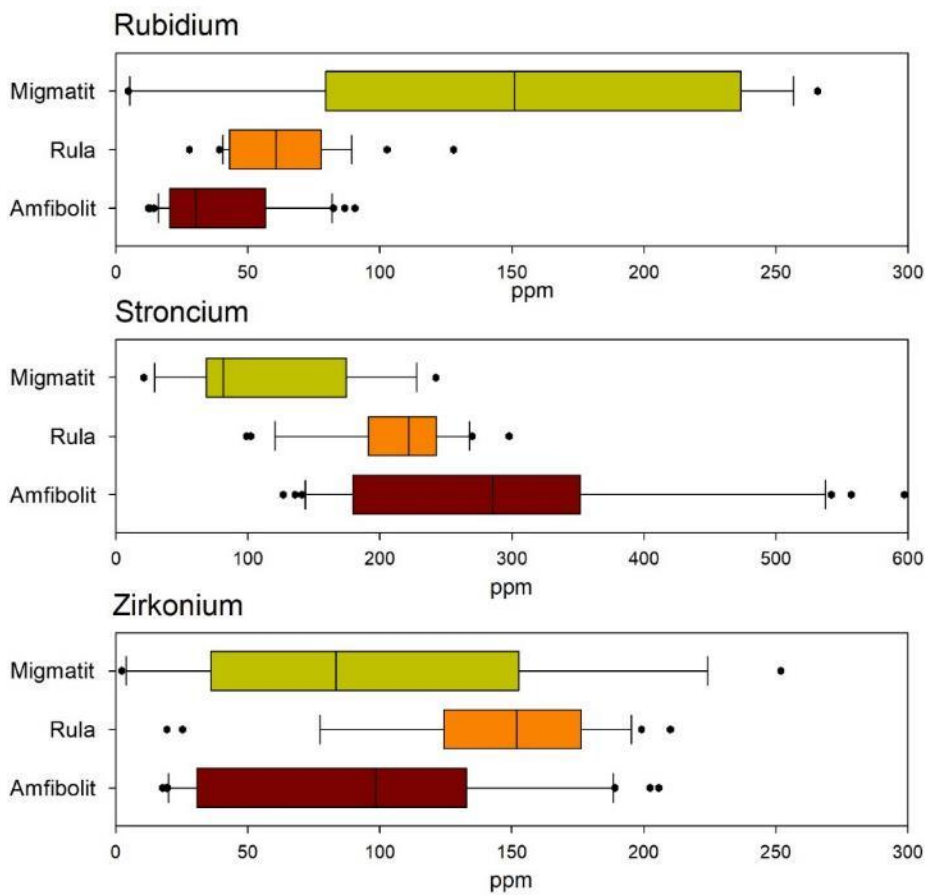
Společně s výraznou variabilitou koncentrací hlavních oxidů v migmatitech se srovnatelně projevují i stopové prvky. Tento jev lze velmi dobře pozorovat například v analyzovaných obsazích Rb, Sr a Zr (Obr. 154), kdy se koncentrace Rb pohybují v rozmezí 4–247 ppm, Sr 21–242 ppm a Zr dosahuje minimálních hodnot okolo 2 ppm a maxim přesahujících 250 ppm. V porovnání s ostatními charakterizovanými litologiemi se migmatity vyznačují nejvyššími naměřenými koncentracemi Rb. Stanovené obsahy V se zpravidla pohybují v jednotkách prvních stovek ppm, ojediněle klesají na řád desítek ppm. Zatímco stopové koncentrace Ni, Cu a Zn dosahují řádů desítek ppm, ve vzácných případech byly naměřeny pouze jednotky ppm. Relativně vyšších hodnot dosahují obsahy Pb běžně se pohybující v desítkách ppm. Ostatní stopové prvky se vyznačují nízkými koncentracemi, u většiny měření i pod mezí detekce. Jak bylo uvedeno výše, podobně jako u výsledných stopových koncentrací stanovených ACME analýzami, se hlavní litologické typy nejzřetelněji odlišují v koncentracích Sr, Rb a Zr (Obr. 155). Migmatity dosahují nejvyšších hodnot Rb (medián 150 ppm), naopak výrazně nižších obsahů Sr (medián 80 ppm) a srovnatelných koncentrací Zr (medián 80 ppm) s amfibolity, dosahujícími nejvyšších hodnot Sr (medián 280 ppm) a nízkých hodnot Rb (medián 30 ppm). Zatímco ruly dosahují průměrných hodnot Sr (medián 220 ppm) a Rb (medián 60 ppm), s relativně vyššími obsahy Zr (medián 150 ppm).



Obr. 153 Geochemické složení migmatitů (XRF)



Obr. 154 Stanovené koncentrace detekovaných stopových prvků (XRF)



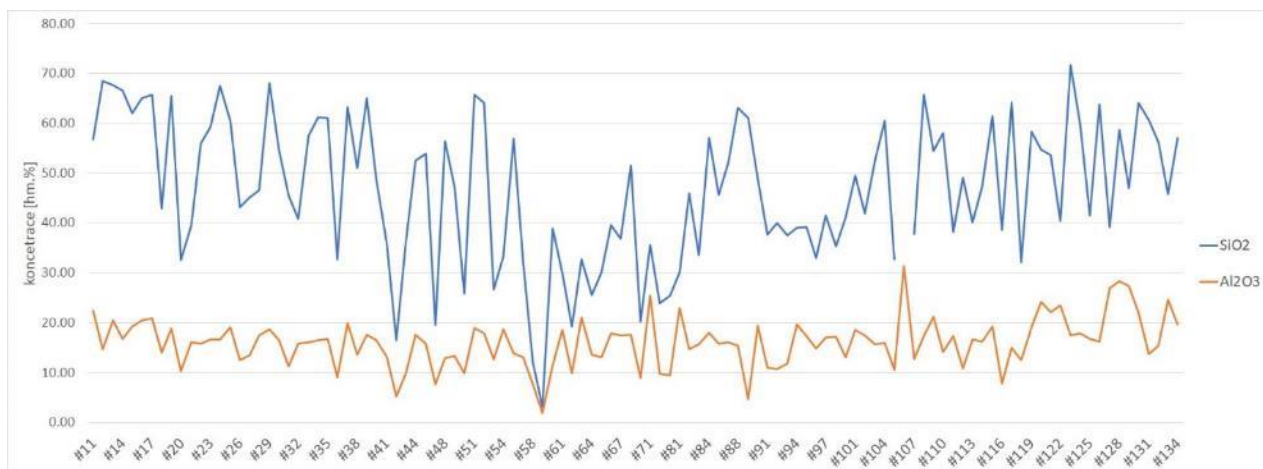
Obr. 155 Variace vybraných stopových prvků ve vyčleněných litologických typech (XRF analýzy)

2.3.4.3.3 XRF profilové měření

Profilové měření (délka profilu 80 m, 40 m z každé strany první rudní zóny na 20. patře dolu Rožná) se sestává s celkově 112 analýz ručním XRF spektrometrem. Prvních 58 (#11–71) analýz bylo měřeno v podloží zóny budované především jemnozrnnými biotitickými rulami, které byly výrazněji alterované na kontaktu s první zónou. Dalších 54 analýz (#79–134), bylo měřeno z druhé strany, v nadloží první zóny a jednalo se o střídání poloh středně migmatitizovaných biotitických rul a migmatitů. Analýzy #72–78 nejsou zobrazeny v grafech, jednalo se o orientační měření rudní zóny.

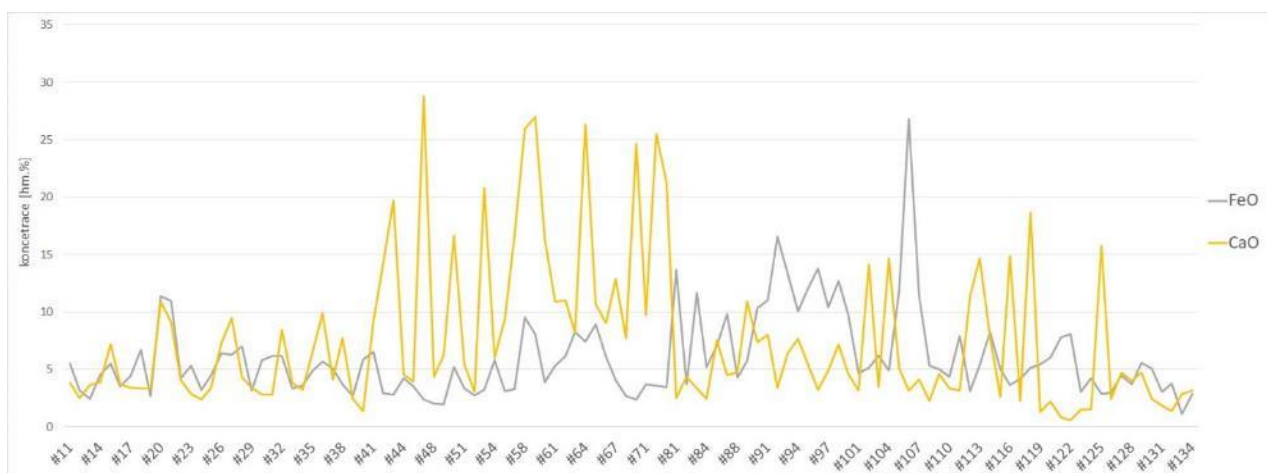
Hlavní složku analyzovaných hornin tvoří SiO_2 , jehož obsahy kolísají přibližně od 20 do 70 hm. %. V menší míře je zastoupen Al_2O_3 (průměrně hodnoty mezi 10–20 hm. %). Výrazné kolísání hodnot především SiO_2 v průběhu celého profilu (Obr. 156) nutně neodráží změnu horninového typu, jedná se spíše o ovlivnění analyzovaným místem ručního měření (možné výplně puklin) a také vyššími směrodatnými odchylkami XRF spektrometru při měření lehkých prvků jako je právě Si nebo Al.

Analýzy #58–#59 vyznačující se velmi nízkými hodnotami SiO_2 i Al_2O_3 byly měřené v karbonátové žíle, která protínala měřený profil. Alterovaná zóna lemující začátek první zóny (#60–71) se vyznačuje celkově nižšími obsahy SiO_2 . V nadloží první zóny (od analýzy #79) obsah SiO_2 opět relativně narůstá. Kolísání hodnot SiO_2 u silněji migmatitizovaných rul může být také ovlivněno tím, zda měření pokrývala spíše leukosom (vyšší obsahy SiO_2) nebo melanosom (naopak nižší koncentrace SiO_2).



Obr. 156 Obsahy SiO_2 a Al_2O_3 v měřeném profilu v nadloží a podloží první rudní zóny na 20. patře dolu Rožná

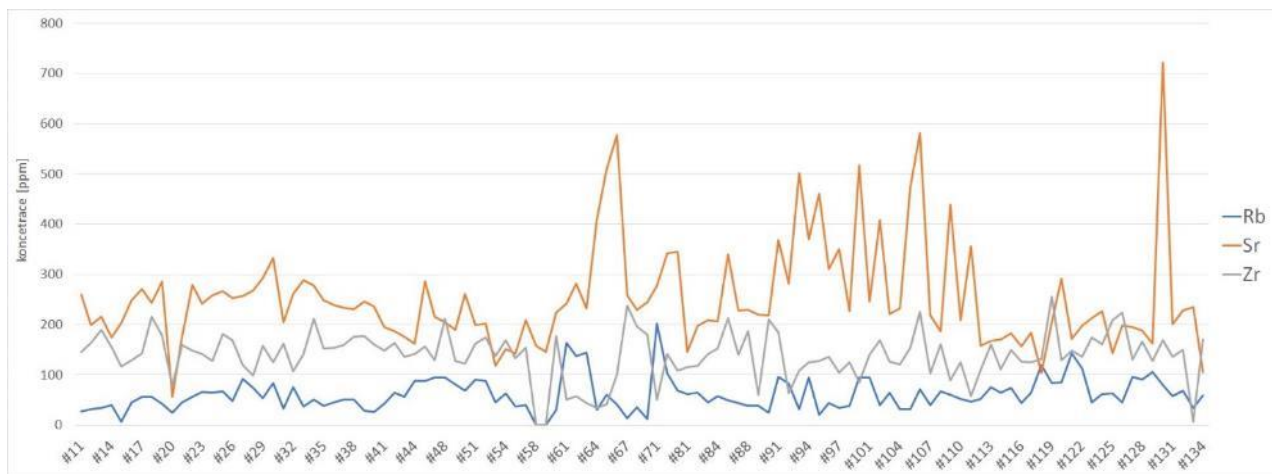
Dalšími složkami analyzovaných hornin jsou oxidy CaO (~ 2–25 hm. %) a FeO (~3–15 hm. %) (Obr. 157). Zde je výraznější kolísání zřejmé u CaO především v oblasti profilu, kde dochází ke zvýšené alteraci biotitických rul před první zónou (možná karbonatizace). Výkyvy v hodnotách CaO a FeO v nadloží první zóny (od analýzy #79) je pravděpodobně ovlivněno již vzpomínaným výskytem migmatitů a rozdílným chemickým složením leukosomu a melanosomu.



Obr. 157 Obsahy FeO a CaO v měřeném profilu v nadloží a podloží první rudní zóny na 20. patře dolu Rožná

Dalšími prvky, které byly analyzovány a odrážejí horninové složení napříč profilem jsou Rb, Sr a Zr (Obr. 158). Z těchto tří prvků dosahuje nejvyšších naměřených hodnot Sr (až k 500 ppm), pak Zr (cca 100–200 ppm) až nejméně zastoupené Rb (jen výjimečně nad 100 ppm). Obsahy Rb a Zr se jeví více konsistentní, opět jen s malými odchylkami v oblasti alterované biotitické ruly před první zónou. Tady je výrazněji anomální Sr a jeho hodnoty narůstají také v migmatitech.

V některých případech mohou být vyšší hodnoty Sr spojeny s obsahy karbonátů či plagioklasů s vyšším obsahem vápenaté složky.



Obr. 158 Obsahy Rb, Sr a Zr v měřeném profilu v nadloží a podloží první rudní zóny na 20. patře dolu Rožná

2.3.4.4 Srovnání s PVP Bukov, lokalitou Kraví hora a jinými lokalitami

Horniny studované v rámci projektu HH Rožná jsou litologicky i metamorfně totožné s horninami popisovanými z PVP Bukov (Bukovská et al. 2017). Snad jedinou výjimkou je nepřítomnost pyroxenu v amfibolitech, který byl v případě PVP Bukov zastižen v restitu migmatitizovaného amfibolitu. V námi studovaných amfibolitech nebyl pyroxen zastižen, vyskytuje se však v erlanech podobně jako na PVP Bukov.

Z mapových podkladů <https://mapy.geology.cz/geocr50/>, mapa 24–13, 1 : 50 000 Bystřice nad Pernštejnem je zřejmé, že horninové pruhy rul, amfibolitů a migmatitů z oblasti dolu Rožná a PVP Bukov pokračují na JJV do prostoru Kraví hora. Samotná lokalita Kraví Hora leží ale v granulitech. Granulit nebyl v zájmovém území projektu HH Rožná zjištěn. UGN v roce 2009 studovalo v okolí Kraví hory z lokality Na skalkách vzorek biotitického migmatitu, který svým charakterem odpovídá migmatitům popsáným v této práci.

Horniny studované v rámci projektu HH Rožná jsou do určité míry podobné horninám, v nichž je budováno finské úložiště vyhořelého jaderného paliva Olkiluoto (Kärki a Paulamäki 2006; Tuisku a Kärki 2010). Na úložišti Olkiluoto převažují různé typy biotitických a amfibolických migmatitů. Kromě nich se tam vyskytují ve větší míře než na Rožné anatektické granity a dále horniny typické pouze pro prekambrium baltického štítu jako TTG ruly. Od lokality Rožná se odlišují zejména nižším tlakovým postižením. Tlaky udávané jako maximální metamorfní podmínky na Olkiluoto se pohybují mezi 3,5–4 kbar při teplotách 660–700°C, zatímco na Rožné 5–7 kbar při srovnatelných teplotách. Relativně níže tlaké metamorfní podmínky na Olkiluoto jsou rovněž dokumentovány výskytem cordieritu a retrográdního andaluzitu (vedle hojného granátu a sillimanitu). Podstatný rozdíl je však ve stáří obou horninových komplexů. Zatímco stáří vysokoteplotní metamorfózy hornin v oblasti dolu Rožná je variské (cca 345 Ma, Bukovská et al. 2019), stáří nízkotlaké regionální metamorfózy horninového komplexu Olkiluoto je cca 1,86 Ma (Tuisku a Kärki 2010).

2.3.4.5 Geochemická stabilita hornin ložiskové oblasti Rožná

Geochemická stabilita hornin ložiskové oblasti Rožná byla posuzována pomocí geochemického modelování. Horniny jsou v kontaktu s podzemní vodou, při které dochází k jejich interakci. Pro posouzení termodynamické stability byly vybrány rozhodující minerály, které určují stabilitu hornin a zároveň jsou zdrojem složek, ze kterých mohou vznikat sekundární minerály, které dále omezují vlastní interakci, a zvyšují stabilitu hornin. Kromě toho určují uvolňující se složky také fyzikálně-chemické parametry a chemické složení podzemních vod.

Pro posouzení byly vybrány dvě typické horniny – rula a amfibolit. Pro geochemické modelování byly na základě mineralogického popisu vybrány hlavní horninotvorné minerály uvedených hornin. Nejprve jsou popsány geochemické interakce jednotlivých minerálů s čistou vodou pro vytvoření základní představy o možných interakcích a následně je pak připraven geochemický model interakce celé horniny se zastoupením hlavních minerálů, které odpovídá mineralogickému popisu.

Interakce vybraných hornin je pak následně provedena s čistou vodou, s vodou v přítomnosti rozpuštěných karbonátových látek a s podzemní vodou, které má fyzikálně-chemické parametry a složení reálné podzemní vody ložiskové oblasti.

Pro geochemické reakční modelování byl použit geochemický program The Geochemist's Workbench® Professional, Release 12.0.4, který je tvořen souborem programových modulů, které umožňují základní geochemické a hydrochemické vyhodnocení terénních údajů a analýz, rovnovážné geochemické modelování, výpočet komplexních fázových diagramů, výpočet speciace složek atd. Pro modelování byla použita termodynamická rozšířená databáze thermo.com.V8.R6+.tdat, která je založena na původní termodynamické databázi Lawrence Livermore National Laboratory thermo.com.V8.R6.230 (Johnson et al. 2000). Termodynamická databáze obsahuje 1769 vodných specií, 1122 minerálů a 93 plynů.

Geochemické modelování je omezeno dvěma skutečnostmi. Chemické složení většiny horninotvorných minerálů tvoří nepřetržitě izomorfní řady s proměnlivým zastoupením koncových členů, a tak je nutné pro modelování použít místo jednoho minerálu určitého složení kombinaci dvou a více koncových členů, jejichž poměr poskytne nejlepší přiblížení ke skutečnému chemickému složení minerálu. Druhým omezujícím faktorem je to, že ne pro všechny potřebné minerály a koncové členy izomorfních řad jsou v termodynamické databázi k dispozici termodynamické údaje, a tak je třeba vycházet z určité aproximace.

2.3.4.5.1 Minerální složení hornin

Rula

Z hlediska minerální zastoupení je hornina složena převážně z biotitu (30 %), plagioklasu (20 %), křemene (40 %), chloritu a granátu. Akcesoricky je zde zastoupen apatit, pyrit, Fe-sfalerit, chalkopyrit, zirkon, monazit, allanit a grafit.

Biotit tvoří delší lupenitá xenomorfně omezená hnědo-béžová zrna. Často obsahují pleochroické dvůrky uzavírající akcesorické minerály. Biotit je zde často nahrazován sekundárním chloritem. Plagioklas tvoří xenomorfní zrna, která jsou většinou čirá, bez zakalení. Na některých zrnech je ojediněle pozorována sericitizace a karbonatizace. Jejich agregáty jsou hypautomorfně až

xenomorfne omezené. Křemen často tvoří menší, zaoblené agregáty xenomorfního omezení. Granáty jsou nejčastěji zastoupeny ve formě almandinu a menším podílem pyropu a spessartinu.

Dominujícím sulfidem v této hornině je pyrit. Je také nejhojnějším akcesorickým minerálem. Tvoří nepravidelné agregáty velké až 0,5 mm, často vyplňuje póry. Fe-sfalerit tvoří drobná zrna okolo 10 µm. Zrna zirkonu jsou automorfního omezení o velikosti do 50 µm. Monazit je zde čerství a vytváří xenomorfně omezená zrna do 60 µm. Chalkopyrit tvoří drobné odmíšeniny v pyritu. Apatit má zde izometrická zrna do velikosti 0,3 mm. Agregáty allanitu jsou velké až 0,2 mm, jsou nositeli vzácných zemin a vytváří shluky inkluzí v plagioklasech. Grafit tvoří drobné lupínky, které mohou být i zprohýbané. Často prorůstá s biotitem dle jeho štěpnosti.

Pro geochemické modelování stability ruly bylo použito modelové minerální složení ruly uvedené v Tab. 7.

Tab. 7 Průměrné zastoupení hlavních horninotvorných minerálů v rule

minerál	obj. %
biotit	30 %
živce	20 %
křemen	40 %
chlorit	6 %
granát	3 %
pyrit	1 %
celkem	100 %

Na základě celkového zastoupení minerálu v hornině a simulaci jeho složení pomocí dostupných koncových členů bylo pro modelování stability ruly použito minerální složení se simulovaným zastoupením minerálů z termodynamické databáze, které bylo odvozeno z mikrosondových analýz. Výsledné modelové minerální složení ruly je uvedeno v Tab. 8.

Tab. 8 Zastoupení hlavních horninotvorných minerálů v rule, jejich chemické vzorce, náhrada koncovými členy a jejich zastoupení v modelové rule

v hornině	databáze	vzorec	v hornině	poměr	v modelu
biotit		$K(Mg,Fe^{2+})_3[AlSi_3O_{10}(OH,F)_2]$	30 %		
	annit	$KFe_3AlSi_3O_{10}(OH)_2$		0,5	15,00 %
	seladonit	$KMgAlSi_4O_{10}(OH)_2$		0,5	15,00 %
živce			20 %		
	albit	$NaAlSi_3O_8$		0,38	7,60 %
	anortit	$CaAl_2Si_2O_8$		0,19	3,80 %
	K-živce	$KAlSi_3O_8$		0,43	8,60 %
křemen		SiO_2	39 %		39,00 %
chlorit		$(Mg,Fe)_6(Si,Al)_4O_{10}(OH)_8$	6 %		
	chamosit-7A	$Fe_2Al_2Si_5(OH)_4$		0,7	4,20 %
	klinochlor-7A	$Mg_5Al_2Si_3O_{10}(OH)_8$		0,3	1,80 %
granát		$(Ca,Mg,Fe^{2+},Mn)_3(Al,Fe^{3+},Cr,V^{3+},Zr,Ti)_2(SiO_4)_3$	4 %		
	andradit	$Ca_3Fe_2(SiO_4)_3$		0,4	1,60 %
	grosulár	$Ca_3Al_2(SiO_4)_3$		0,6	2,40 %
pyrit		FeS_2	1 %		1,00 %
celkem			100 %		100,00 %

Amfibolit

Z hlediska minerální zastoupení je hornina složena převážně z amfibolu (60 %), plagioklasu (20–25 %), křemene (5 %), biotitu (do 2 %). Akcesoricky je zde zastoupen apatit, titanit, zirkon, ilmenit, pyrit, pyrhotin a chalkopyrit. Ojediněle byl pozorován výskyt K-živce v asociaci s křemenem a chloritem.

Amfibol tvoří xenomorfně omezená homogenní zrna s výrazným pleochroismem. Plagioklas tvoří xenomorfní zrna, která jsou čirá s výrazným zakalením, projevuje se zde sericitizace a karbonatizace. Agregáty křemene jsou xenomorfního omezení, menší kulovitá zrna bývají jako inkluze uzavřeny v amfibolech. Biotit tvoří krátce lupenitá xenomorfně omezená zrna a z větší části je přeměněn na chlorit, má nevýrazný pleochroismus.

Zrna zirkonu jsou zde ojedinělá s velikostí kolem 50 μm . Ilmenit ojediněle vyplňuje drobné trhliny v amfibolu spolu s kalcitem.

Pro geochemické modelování stability amfibolitu bylo použito modelové minerální složení amfibolitu uvedené v Tab. 9.

Tab. 9 Průměrné zastoupení hlavních horninotvorných minerálů v amfibolitu

minerál	obj. %
amfibol	65%
plagioklas	27%
křemen	5%
biotit	2%
pyrit	1%
celkem	100%

Na základě celkového zastoupení minerálu v hornině a simulaci jeho složení pomocí dostupných koncových členů bylo pro modelování stability amfibolitu použito minerální složení se simulovaným zastoupením minerálů z termodynamické databáze, které bylo odvozeno z mikrosondových analýz. Výsledné modelové minerální složení amfibolitu je uvedeno v Tab. 10.

Tab. 10 Zastoupení hlavních horninotvorných minerálů v amfibolitu, jejich chemické vzorce, náhrada koncovými členy a jejich zastoupení v modelovém amfibolitu

v hornině	databáze	vzorec	v hornině	poměr	v modelu
amfibol		$\text{Ca}_2(\text{Mg,Fe})_4\text{Al}(\text{Si}_7\text{Al})\text{O}_{22}(\text{OH,F})_2$	65 %		
	antofylit	$\text{Mg}_7\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$		0,05	3,25 %
	pargasit	$\text{NaCa}_2\text{Al}_3\text{Mg}_4\text{Si}_6\text{O}_{22}(\text{OH})_2$		0,95	61,75 %
živce			27 %		
	albit	$\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$		0,5	13,50 %
	anortit	$\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$		0,5	13,50 %
křemen	SiO_2		5,00 %		5,00 %
biotit		$\text{K}(\text{Mg,Fe}^{2+})_3[\text{AlSi}_3\text{O}_{10}(\text{OH,F})_2]$	2,00 %		
	annit	$\text{KFe}_3\text{AlSi}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$		0,5	1,00 %
	celadonit	$\text{KMgAlSi}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$		0,5	1,00 %
pyrit		FeS_2	1,0 %		1,00 %
celkem			100 %		100 %

2.3.4.5.2 Podzemní vody ložiskové oblasti Rožná

Pro fyzikálně-chemické parametry a chemické složení podzemních vod ložiskové oblasti Rožná bylo využito dat z pravidelného monitoringu, který v oblasti provádí GEOTest, a. s. V letech 2018–2019 vzorkoval podzemní vody na 12., 17., 20. a 24. patře. Základní představu o fyzikálně-chemických parametrech a chemickém složení podzemních vod ložiskové oblasti Rožná je možné získat z Piperova a Durovova diagramu na Obr. 159. Pro další posouzení byly z vyhodnocení vyloučeny analýzy podzemních vod, které vykazovaly chybu nábojové vyrovnanosti větší než 5 %.

Jak je patrné, většina podzemních vod má v anionové části zřetelnou převahu síranových ionů, jejichž původ lze připsat zvětrávání sulfidů. To je charakteristické pro podzemní vody z 12.–20. patra. Pro tyto podzemní vody je také charakteristické, že dalším hlavním anionem jsou uhličitany, zastoupení chloridů v anionové části se pohybuje do 10 %. U podzemních vod z 24. patra se situace mění, v anionech většinou převažují uhličitánové iony nad iony síranovými a výrazně roste zastoupení chloridů (20–30 ekv. %).

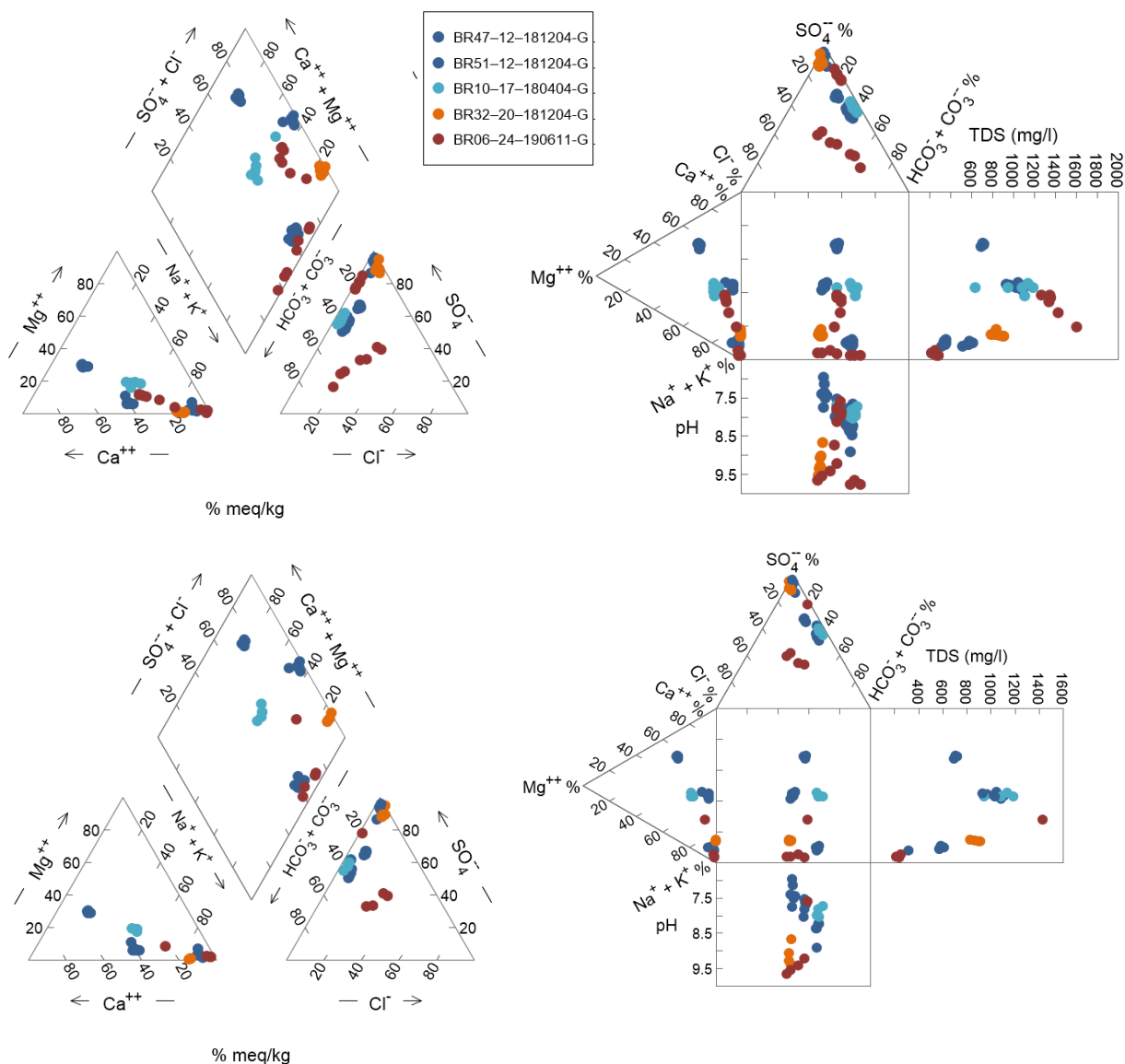
U malé skupiny podzemních vod ze 12. patra převažují v kationech vápenaté iony, doplněné iony hořečnatými s poměrně nízkým zastoupením alkalických kovů. Tyto vody odpovídají infiltračním vodám a podzemním vodám mělkého oběhu. U ostatních podzemních vod ložiskové oblasti Rožná převažují v kationech alkalické kovy s tím, že většinou směrem do hloubky se jejich zastoupení zvyšuje. To však neplatí beze zbytku, nejen na 24., ale i na 12. patře lze nalézt vody, kde jsou v kationech zastoupeny výhradně alkalické kovy.

Modelové podzemní vody

Pro posouzení stability hornin ložiskové oblasti Rožná byly vybrány tři typy podzemních vod, které jsou charakteristické pro jednotlivé skupiny podzemních vod. Jejich fyzikálně chemické parametry a chemické složení je patrné z diagramů na Obr. 160 a z Tab. 11.

Pro účely geochemického modelování bylo chemické složení podzemních vod zjednodušeno vynecháním složek, které byly zastoupeny pod mezí detekce či jsou pro interakci hornin s vodným prostředím nepodstatné. Protože byly vody vybrané pro modelování mírně přesyceny vůči některým minerálům, jako jsou například dolomit nebo illit, byly koncentrace příslušných složek ve vodě upraveny tak, aby byly vody vůči těmto minerálům právě nasycené. Srážení minerálů z přesycených vod by ovlivňovalo vlastní modelování interakce těchto vod se studovanými minerály a horninami. Výsledné složení modelových vod je uvedeno v Tab. 12.

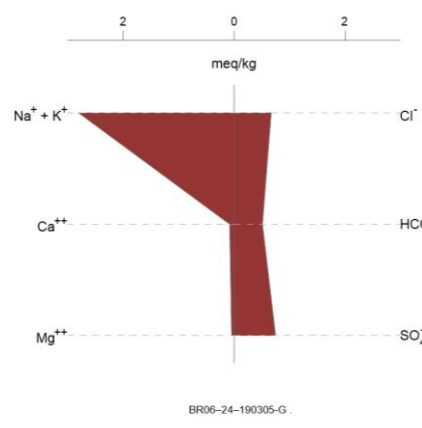
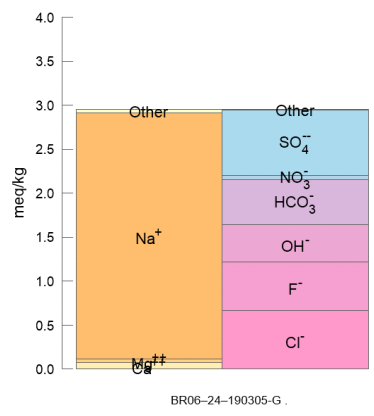
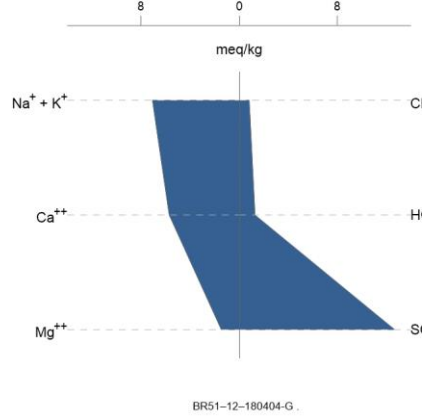
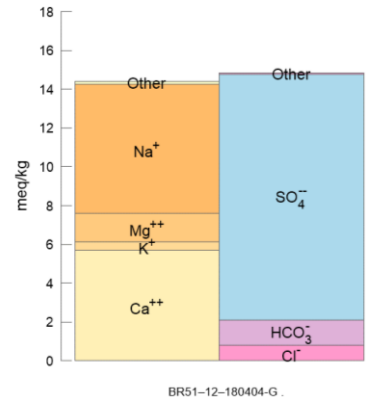
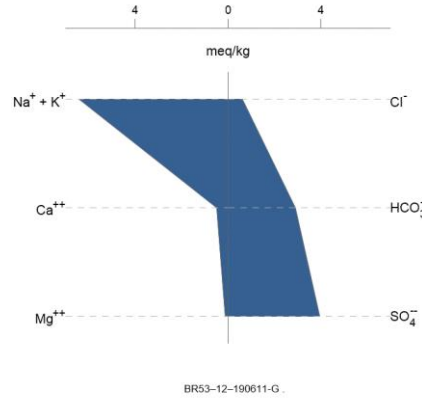
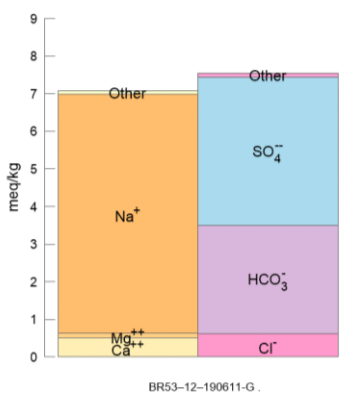
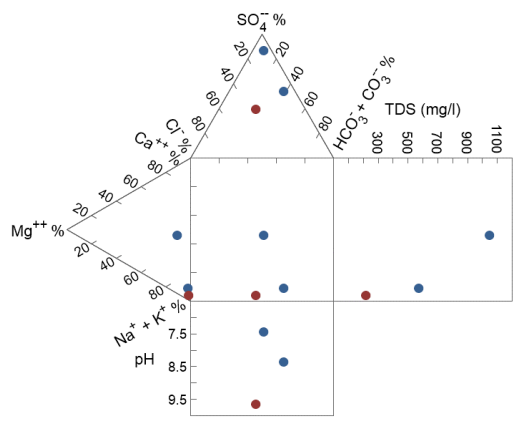
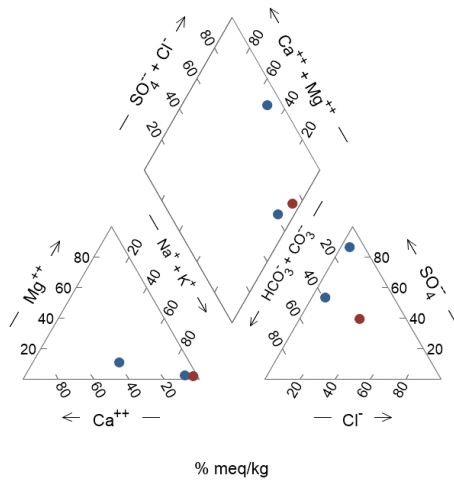
Určitým nedostatkem je, že nebyly in situ měřeny oxidačně-redukční potenciály, ale podle výsledků předchozích terénních měření ORP podzemních vod v ložiskové oblasti Rožná, ale i dalších oblastech (Oslavany, Zlaté Hory atd.) je oprávněný předpoklad, že se jedná o vody anoxické, tj. bez měřitelného obsahu kyslíku a jako takové byly použity pro geochemické modelování.



Obr. 159 Piperův (vlevo) a Durovův (vpravo) diagram pro podzemní vody ložiskové oblasti Rožná. V horním řádku jsou uvedeny všechny analýzy, v dolním jen ta, které vykazovaly chybu nábojové vyrovnanosti menší než 5 %. První symbol v legendě označuje odběrné místo, druhý patro a třetí datum odběru

Na následující straně:

Obr. 160 Piperův, Durovův diagram, sloupcové a Stiffovy diagramy pro podzemní vody ložiskové oblasti Rožná, které byly vybrány pro modelové testování stability hornin (obrázek je situovaný pod popiskem)



Tab. 11 Fyzikálně-chemické parametry a chemické složení podzemních vod ložiskové oblasti Rožná, které byly vybrány pro geochemické modelování stability hornin

Sample ID		BR53-12-190611-G	BR51-12-180404G	BR06-24-190305-G
Point		BR53	BR51	BR06
Level		12	12	24
Date		11. 06. 2019	04. 04. 2018	05. 03. 2019
pH		8,4	7,47	9,68
EC field	μS/cm	658	1235	316
Na+	mg/l	148	155	65
K+	mg/l	2,62	16,7	< 0,5
NH ₃ (aq)	mg/l (as NH ₄ ⁺)	< 0,1	0,27	< 0,1
Li+	mg/l	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Ca ⁺⁺	mg/l	10,3	116	1,6
Mg ⁺⁺	mg/l	1,5	18,2	0,5
SO ₄ ⁻⁻	mg/l	192	617	36,2
Cl ⁻	mg/l	22	29	24
NO ₃ ⁻	mg/l	< 3	< 3	< 3
F ⁻	mg/l	0,2	< 0,2	10,6
SiO ₂ (aq)	mg/l	14,1	12,1	40,5
HCO ₃ ⁻	mg/l	178	79,3	31,7
HPO ₄ ⁻⁻	mg/l (as P)	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Fe ⁺⁺	mg/l	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Mn ⁺⁺	mg/l	< 0,05	< 0,05	< 0,05
Ba ⁺⁺	μg/l	35,6	23,4	< 20
MoO ₄ ⁻	μg/l (as Mo)	< 20	32,1	< 20
Sr ⁺⁺	μg/l	258	1163	< 20
Rb ⁺	μg/l		5,67	
H ₂ AsO ₄ ⁻	μg/l (as As)	< 10	< 10	< 10
Pb ⁺⁺	μg/l	< 10	< 10	< 10
Al ⁺⁺⁺	μg/l	< 50	< 50	< 50
Zn ⁺⁺	μg/l	< 20	20,8	< 20
Source		GEOtest	GEOtest	GEOtest
H ⁺	mmol/kg	-4,41%	8,25%	-0,4231
Charge imbalance error		-3,07%	-1,54%	0,20%
Dissolved solids	mg/l	574,4	1049	220,9
Electrical conductivity	μS/cm	748,3	1386	308,8
CO ₂ (g)	log bar	-3,184	-2,647	-5,293
CO ₂ (g)	log fugacity	-3,186	-2,649	-5,295

Tab. 12 Hodnoty pH a složení modelových podzemních vod

Sample ID	Units	BR53-12-190611-G	BR51-12-180404-G	BR06-24-190305-G
pH		8,309	7,470	9,832
Al+++	mg/l	1,14E-04	1,02E-04	1,12E-06
Ca++	mg/l	9,54E+00	1,16E+02	1,60E+00
Cl-	mg/l	6,53E+00	1,35E+01	4,44E+01
Fe++	mg/l	5,00E-02	5,00E-02	1,21E-03
HCO ₃ -	mg/l	1,77E+02	7,93E+01	3,17E+01
K+	mg/l	2,61E+00	1,67E+01	2,35E-01
Mg++	mg/l	1,49E+00	1,82E+01	4,99E-02
Na+	mg/l	1,48E+02	1,55E+02	6,50E+01
SO ₄ --	mg/l	1,92E+02	6,17E+02	3,62E+01
SiO ₂ (aq)	mg/l	1,17E+01	1,14E+01	2,13E+01
Dissolved solids	mg/l	554,0	1031,0	210,1
CO ₂ (g)	log fugacity	-3,097	-2,649	-5,484

Kromě uvedených minerálů se dané ložiskové vody staly při jejich modelovém odvození nasycené vůči sideritu.

2.3.4.5.3 Geochemické modely interakcí minerálů s vodným prostředím

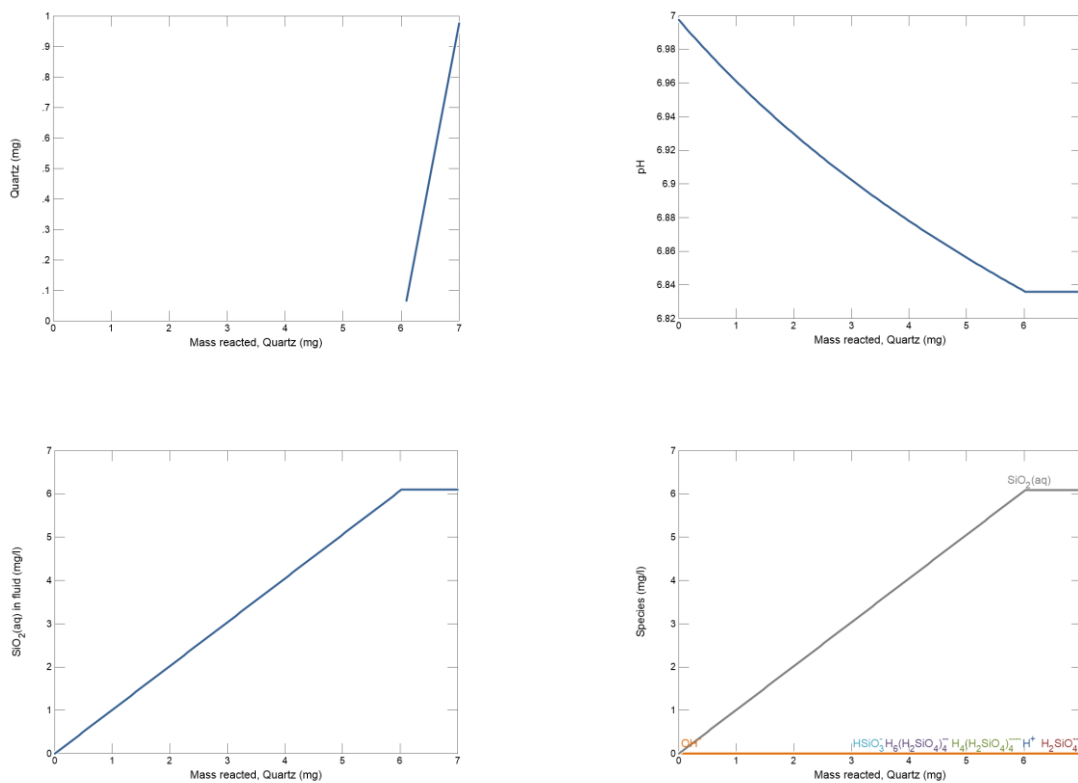
Všechny geochemické modely interakce jednotlivých minerálů s vodou jsou prezentovány jednotným způsobem. Na obrázku je uveden vývoj jednotlivých parametrů v závislosti na množství rozpouštěného minerálu, které bylo přidáno k 1 kg čisté vody. Jedná se o sekundárně minerály, pH, celkovou koncentraci rozpuštěných látek, koncentraci složek a koncentraci hlavních specií. U minerálů se složkami, které se mohou účastnit oxidačně-redukčních reakcí, je obrázek doplněn vývojem oxidačně-redukčního potenciálu. Tam, kde je to vhodné či potřebné, jsou uvedeny i Eh-pH diagramy a aktivní diagramy pro specie, které se účastní interakcí. Zároveň je v diagramech vyznačena i reakční cesta, tj. vývoj podmínek od začátku rozpouštění až do dosažení nasycení a rovnováhy mezi studovaným minerálem a vodným prostředím.

Křemen

Čistý SiO₂ je zastoupen v horninách především křemenem. Ten se sice rozpouští, ale za reálných podmínek nízkých teplot není mezi křemenem a vodou dosaženo rovnováhy. Rozpuštěný SiO₂(aq) se při přesycení vod zpětně nesráží v podobě křemene, ale v podobě chalcedonu, který často tvoří tmel sedimentárních hornin, nebo v podobě amorfních gelů SiO₂. Proto byly i tyto polymorfní modifikace SiO₂ zahrnuty do modelování. Ostatní polymorfní modifikace jako tridymit, kristobalit, coesit a další nemají pro řešení problému význam.

V 1 kg čisté vody se rozpustí 6 mg křemene (Obr. 161). V průběhu rozpouštění téměř nedochází ke změně pH, hlavní specií, která se do vody rozpouštěním za daných podmínek uvolňuje, je SiO₂(aq). Ostatní specie mají zanedbatelnou koncentraci. Při daných koncentracích

rozpuštěného $\text{SiO}_2(\text{aq})$ zůstává voda vůči dalším minerálům, které by mohly vznikat (chalcedon, amorfni $\text{SiO}_2(\text{s})$), nenasycena.

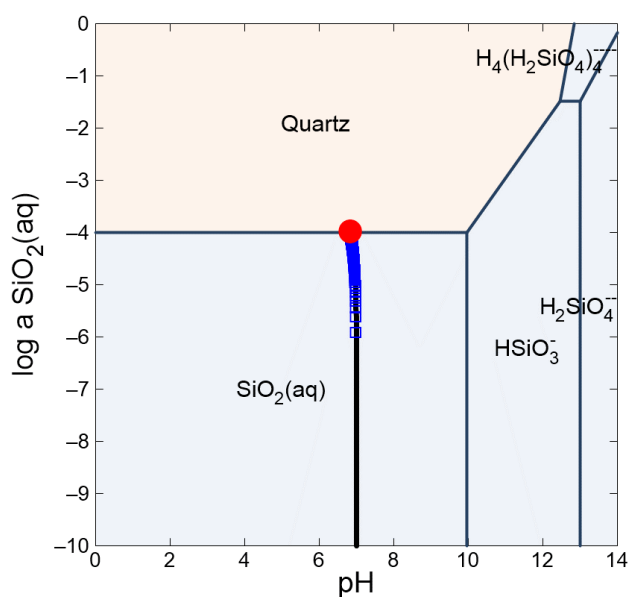


Obr. 161 Vývoj podmínek v průběhu rozpouštění křemene v čisté vodě. Postupně jsou zobrazeny: minerály v systému, vývoj pH, celková koncentrace rozpuštěných látek, koncentrace složek v roztoku a speciace složek

Vyznačení reakční cesty v log aktivitním-pH diagramu (Obr. 162) ukazuje, že vývoj parametrů směřuje přímo k nasycení roztoku vůči křemenu bez vlivu na další parametry.

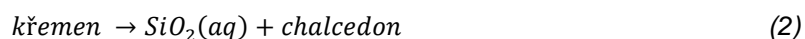
Rozpouštění křemene je možné popsat jednoduchou chemickou rovnicí (1):





Obr. 162 Log aktivita-pH diagram pro SiO_2 . Černou linií a modrými čtverečky je vyznačena reakční cesta vývoje aktivity $\text{SiO}_2(\text{aq})$ při rozpouštění křemene v čisté vodě

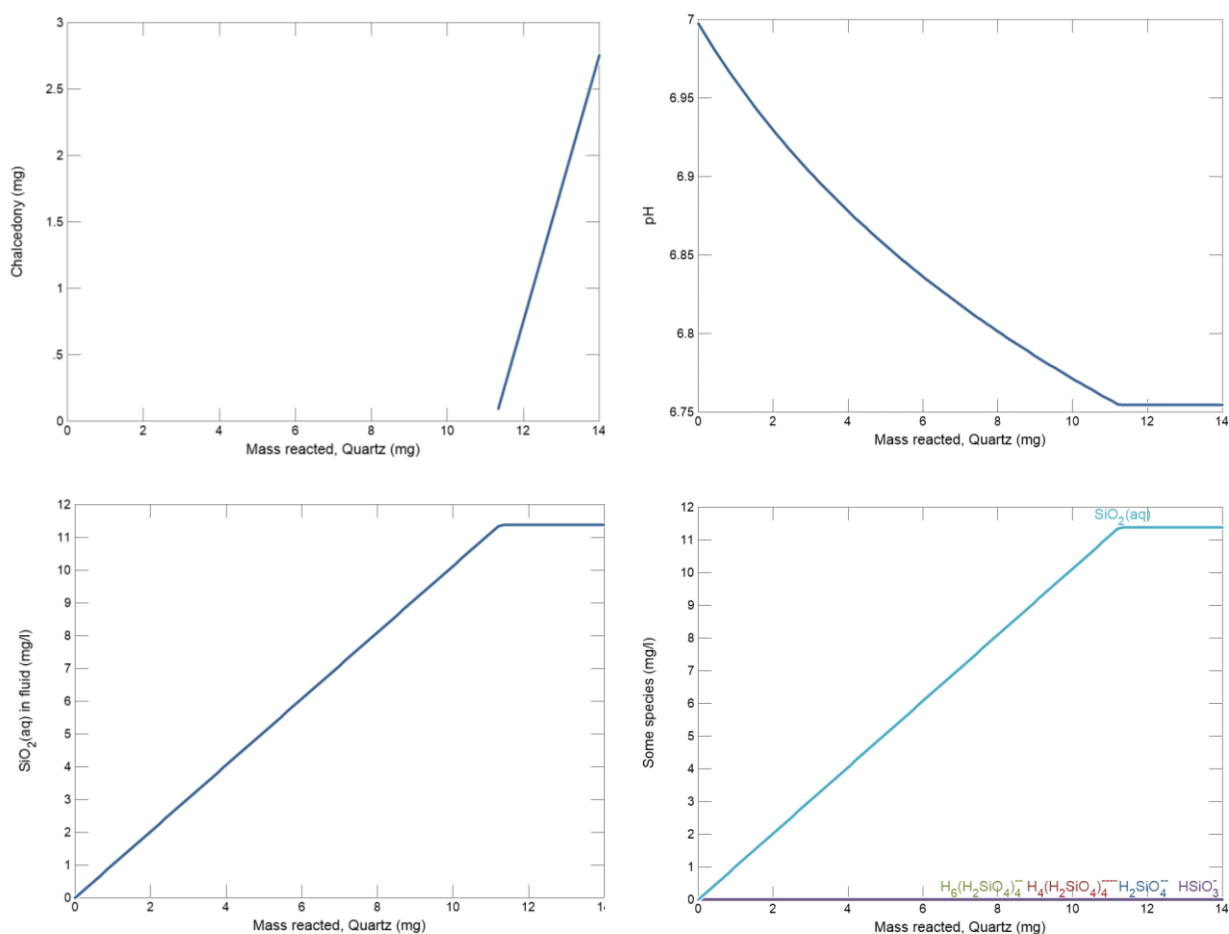
Koncentrace rozpuštěného $\text{SiO}_2(\text{aq})$ jsou však v reálném prostředí obvykle zřetelně vyšší a odpovídají rovnováze s chalcedonem. Reakci rozpouštění křemene pak lze popsat chemickou rovnicí (2):



Vývoj podmínek při rozpouštění křemene za vzniku chalcedonu je uveden na Obr. 163. Díky vyšší rozpustnosti chalcedonu je však již patrný posun pH do kyselejší oblasti o čtvrtinu jednotky škály pH. Začíná se projevovat zvyšující se koncentrace další minoritně zastoupené specie rozpuštěného SiO_2 , totiž ionu HSiO_3^- . Jeho vznik z SiO_2 uvolňovaného do vody z rozpouštějícího se chalcedonu lze popsat chemickou rovnicí (3):

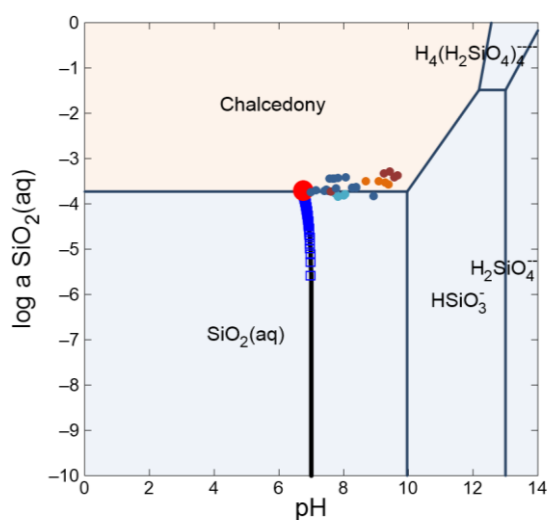


Při protolýze rozpuštěného hydratovaného oxidu křemičitého jsou uvolňovány protony, které posouvají pH do mírně kyselejší oblasti.



Obr. 163 Vývoj podmínek v průběhu rozpouštění křemene v čisté vodě za vzniku chalcedonu. Postupně jsou zobrazeny: minerály v systému, vývoj pH, celková koncentrace rozpuštěných látek, koncentrace složek v roztoku a speciace složek

Reakční cesta rozpouštění křemene za vzniku chalcedonu je vyznačena ve stabilitním diagramu na Obr. 164. Oprávněnost předpokladu, že jsou koncentrace rozpuštěného SiO₂(aq) v podzemních vodách určovány rovnováhou s chalcedonem je doložena vynesáním aktivit SiO₂(aq) v podzemních vodách ložiskové oblasti Rožná.



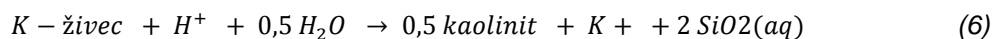
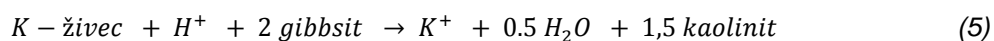
Obr. 164 Log aktivní-pH diagram pro SiO_2 . Černou linií a modrými čtverečky je vyznačena reakční cesta vývoje aktivity $\text{SiO}_2(\text{aq})$ při rozpouštění chalcedonu v čisté vodě. Červený kroužek vyznačuje konečnou rovnováhu. Malými kroužky jsou vyznačeny aktivity $\text{SiO}_2(\text{aq})$ v podzemních vodách ložiskové oblasti Rožná

K-živec

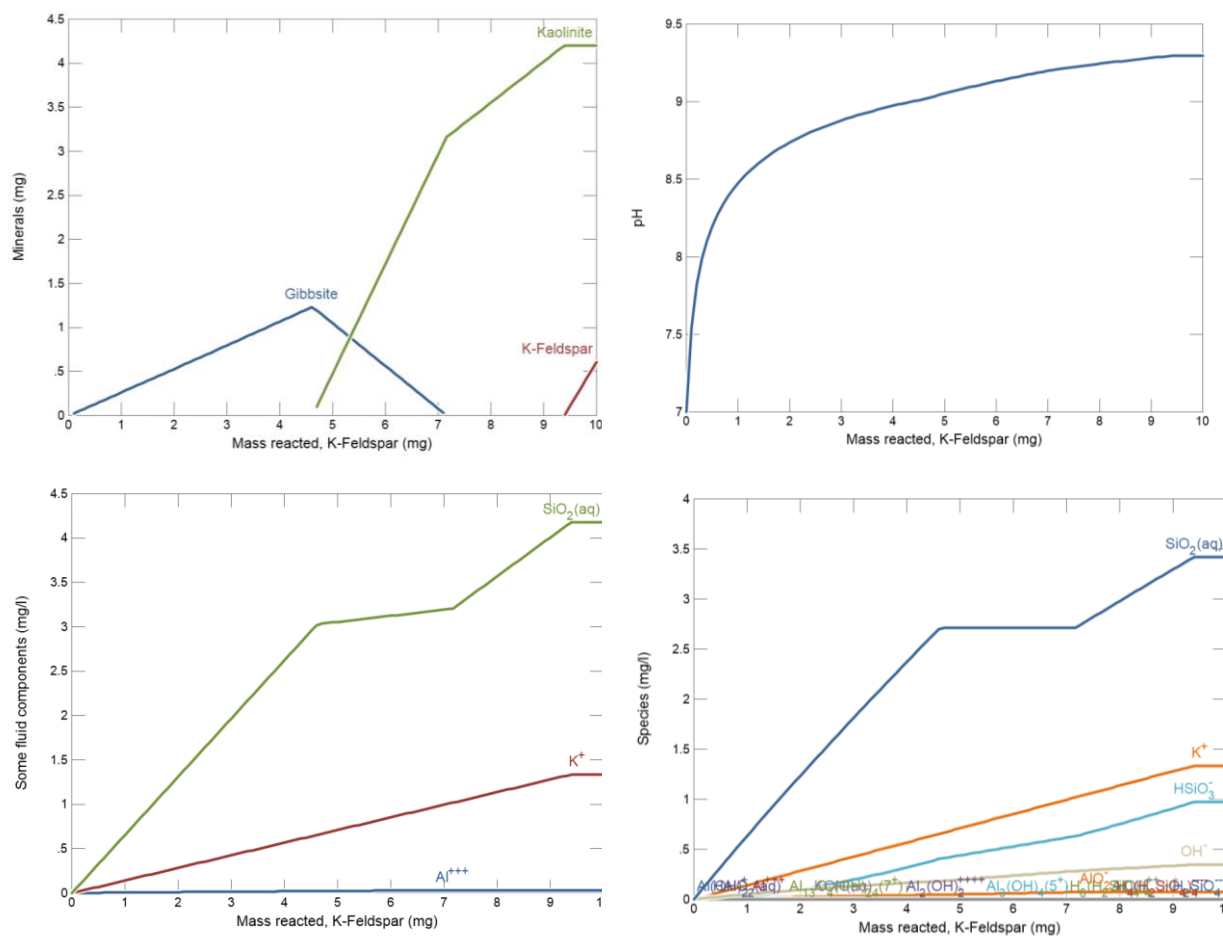
Výsledky geochemického modelování interakce draselného živce s čistou vodou jsou uvedeny na Obr. 165. Draselný živec KAlSi_3O_8 by se podle termodynamických parametrů měl v čisté vodě rozpouštět nekongruentně nejprve za vzniku gibbsitu $\text{Al}(\text{OH})_3$ podle rovnice (4):



Po nasycení roztoku vůči kaolinitu se začne souběžně srážet kaolinit (5) a zároveň se původně vysrážený gibbsit začne interakcí s rozpuštěným oxidem křemičitým přeměňovat také na kaolinit (6):

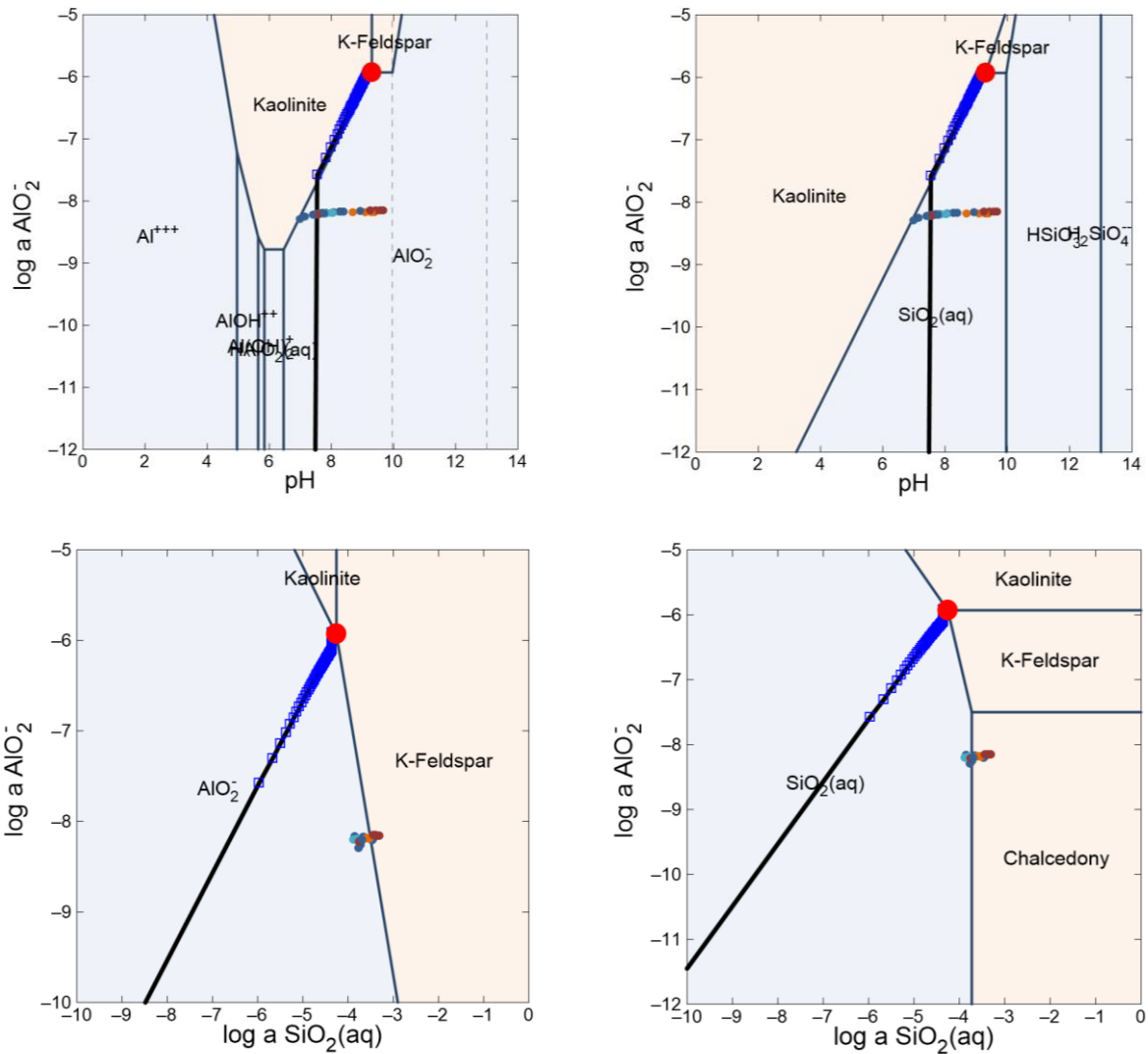


Nekongruentně se v 1 kg vody rozpustí 9,4 mg draselného živce.



Obr. 165 Vývoj podmínek v průběhu rozpouštění draselného živce v čisté vodě. Postupně jsou zobrazeny: minerály v systému, vývoj pH, celková koncentrace rozpuštěných látek a koncentrace specií

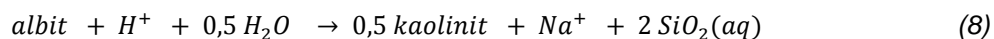
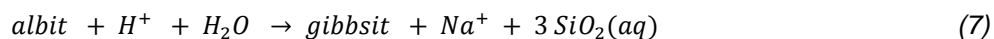
Reakční cesta při rozpouštění draselného živce v čisté vodě za vzniku kaolinitu je uvedena na stabilitních diagramech na Obr. 166. Koncentrace rozpouštěného hliníku, který je v roztoku přítomen především ve formě ionu AlO_2^- i rozpouštěného oxidu křemičitého je určována až do dosažení rovnováhy s draselným živcem rovnováhou s kaolinitem. Porovnání s aktivitami hlinitých specií v podzemních vodách ložiskové oblasti Rožná ukazuje, že bude koncentrace hliníku určována nejen kaolinitem, ale také interakcí s dalšími minerály.



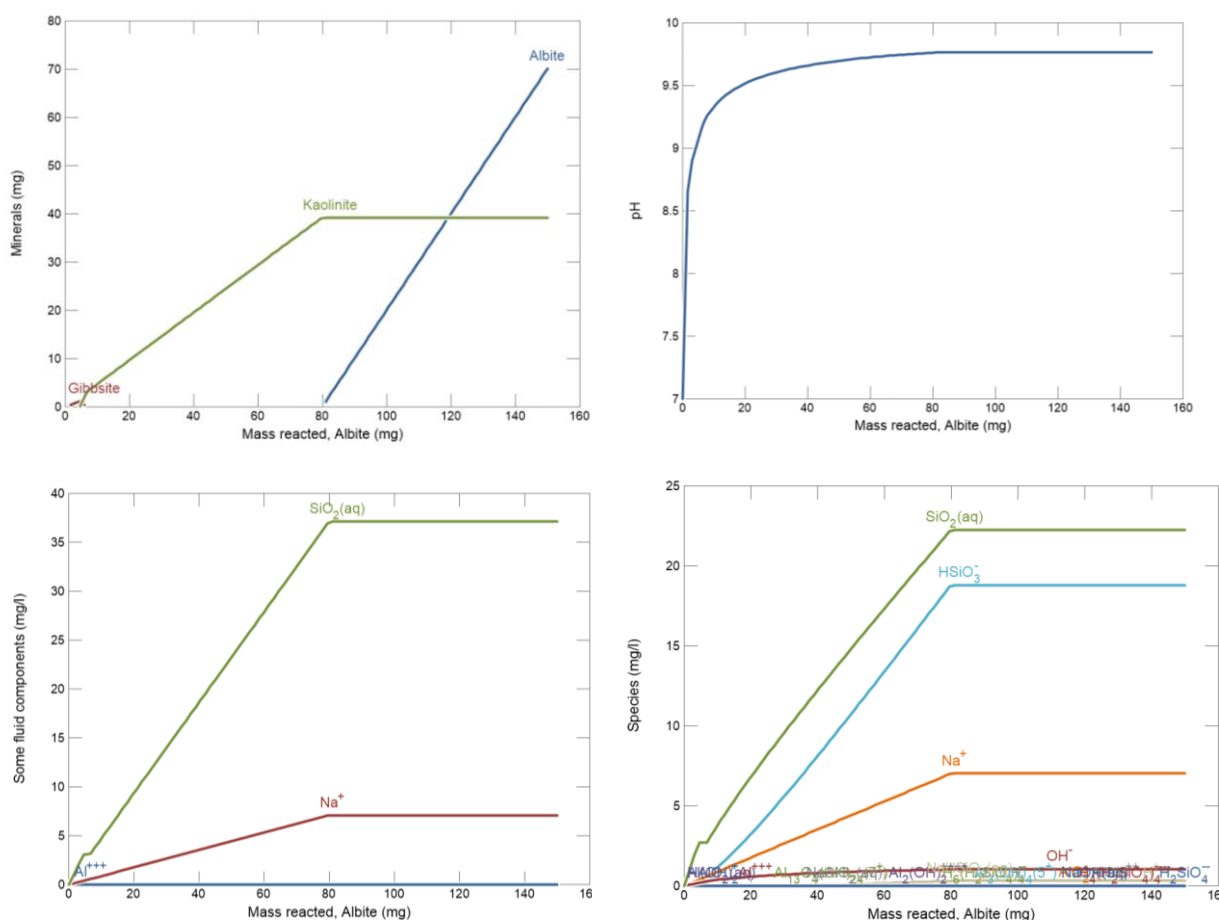
Obr. 166 Log aktivita-pH a log aktivita-log aktivita diagramy pro rozpouštění draselného živce ve vodě pro Al, SiO_2 a K. Černou linií je vyznačena reakční cesta, modrými čtverečky jednotlivé stejně velké kroky. Červený kroužek vyznačuje konečnou rovnováhu. Malými kroužky jsou vyznačeny aktivity $\text{SiO}_2(\text{aq})$ v podzemních vodách ložiskové oblasti Rožná

Albit

Rozpuštění albitu je principiálně stejné jako rozpuštění draselného živce s tím rozdílem, že se místo draselných ionů uvolňují sodné iony. Při nekongruentním rozpuštění albitu nejprve vzniká gibbsit, následně pak kaolinit. Rozpuštění albitu ve vodě lze popsat rovnicemi (7,8):

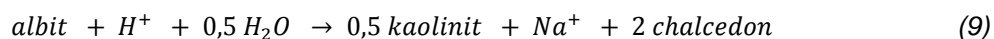


Při nekongruentním rozpuštění albitu za vzniku kaolinitu se v 1 kg vody rozpustí téměř 80 mg albitu a pH v izolovaném systému vzroste až na hodnotu 10,2.

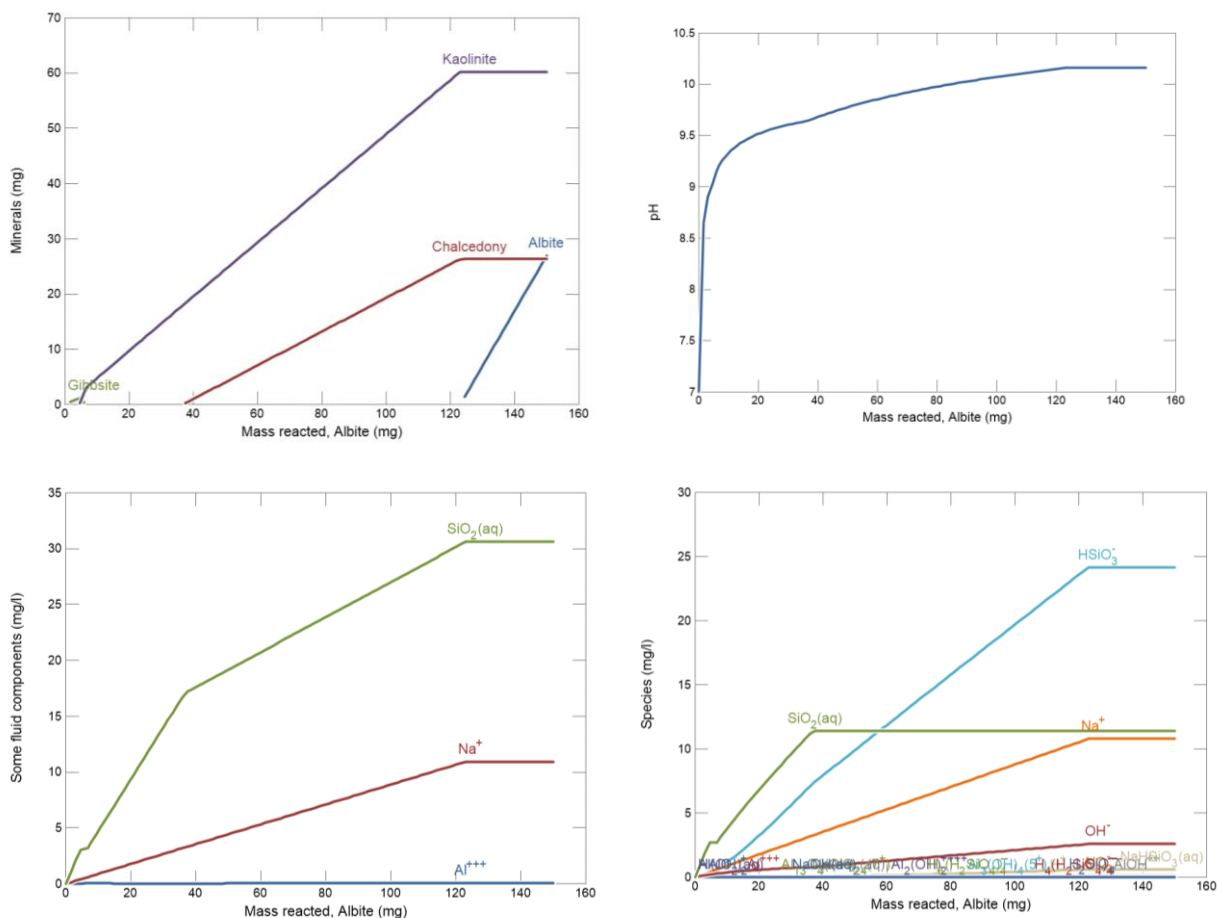


Obr. 167 Vývoj podmínek v průběhu rozpuštění albitu. Postupně jsou zobrazeny: minerály v systému, vývoj pH, celková koncentrace rozpuštěných látek a koncentrace specií v roztoku

Pokud bude umožněn vznik chalcedonu, pak se rozpustnost albitu zvýší díky dalšímu rozpuštění podle rovnice (9)



a rovnováhy je dosaženo až při rozpuštění 122 mg v 1 kg vody (Obr. 168).

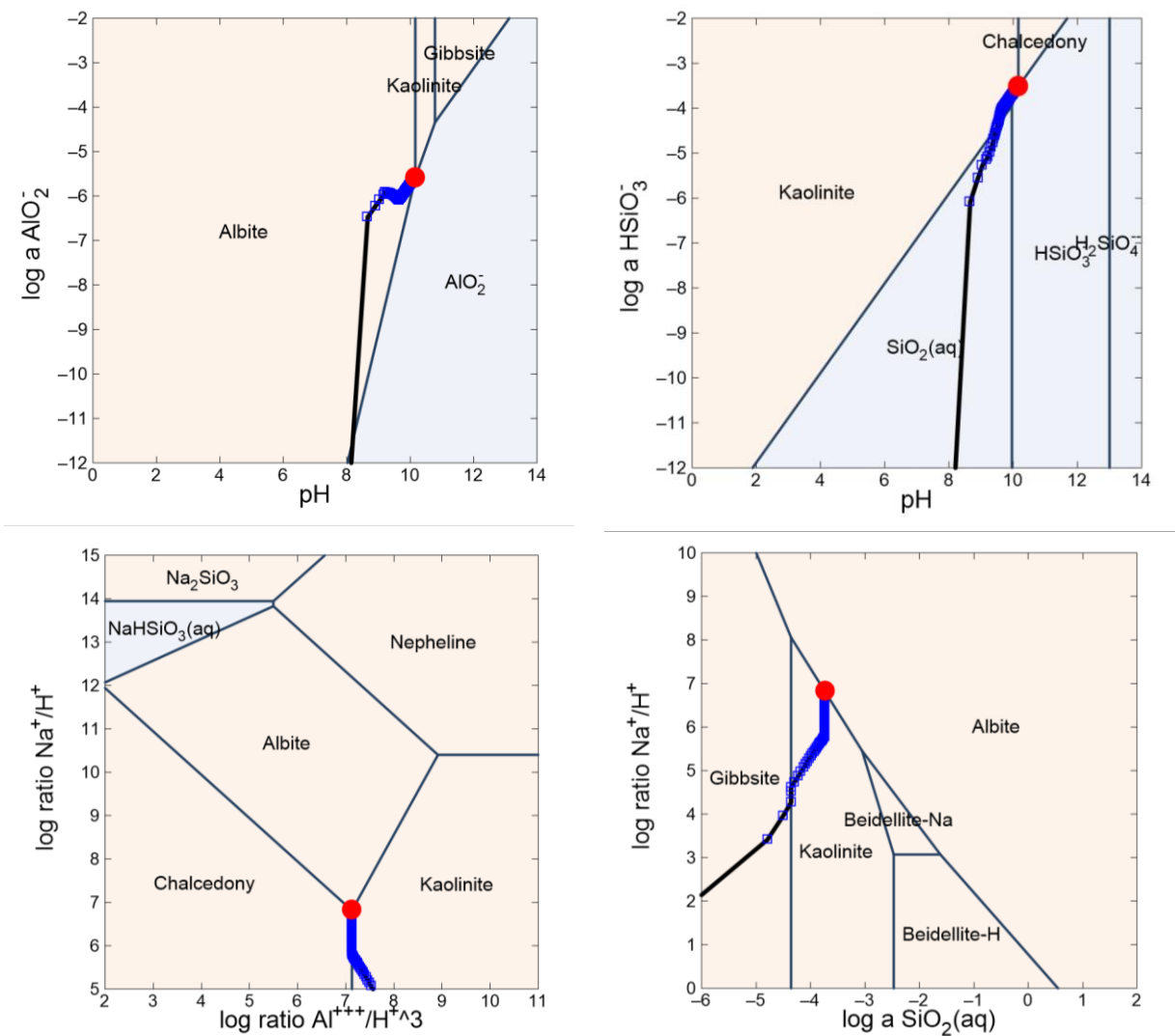


Obr. 168 Vývoj podmínek v průběhu rozpouštění albitu za vzniku kaolinitu a chalcedonu. Postupně jsou zobrazeny: minerály v systému, vývoj pH, celková koncentrace rozpuštěných látek a koncentrace specií v roztoku

Reakční cesta albitu až do dosažení rovnováhy s roztokem je vynesena na Obr. 169. Koncentrace rozpuštěných složek tedy hliníku a oxidu křemičitého jsou kontrolovány kaolinitem a chalcedonem.

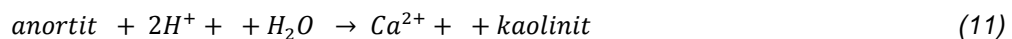
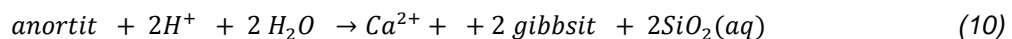
Anortit

Geochemické modelování rozpouštění anortitu ve vodě vyžadovalo pečlivé a rozsáhlé testování. Na rozdíl od alkalických živců, ze kterých se při interakcích s vodným prostředím uvolňují alkalické kovy, se při rozpouštění anortitu uvolňuje vápník. Alkalické kovy vytvářejí relativně málo početnou skupinu minerálů skupinu minerálů vznikajících v magmatických a metamorfních procesech. Silikáty a alumosilikáty, které obsahují jako jednu z hlavních složek vápník, patří naopak k nejběžnějším minerálům zemské kůry. Vznikají v magmatických a metamorfních procesech, podílejí se na metasomatických a hydrotermálních procesech. Protože se jedná o desítky minerálů, jejichž vznik je podmíněn dalšími podmínkami v prostředí, jako jsou například vysoká teplota a tlak, bylo upuštěno od kompletního modelování interakce anortitu s vodou a při geochemickém modelování byl povolen pouze vznik minerálů, které mohou vznikat v podmínkách nízkých teplot a tlaků.

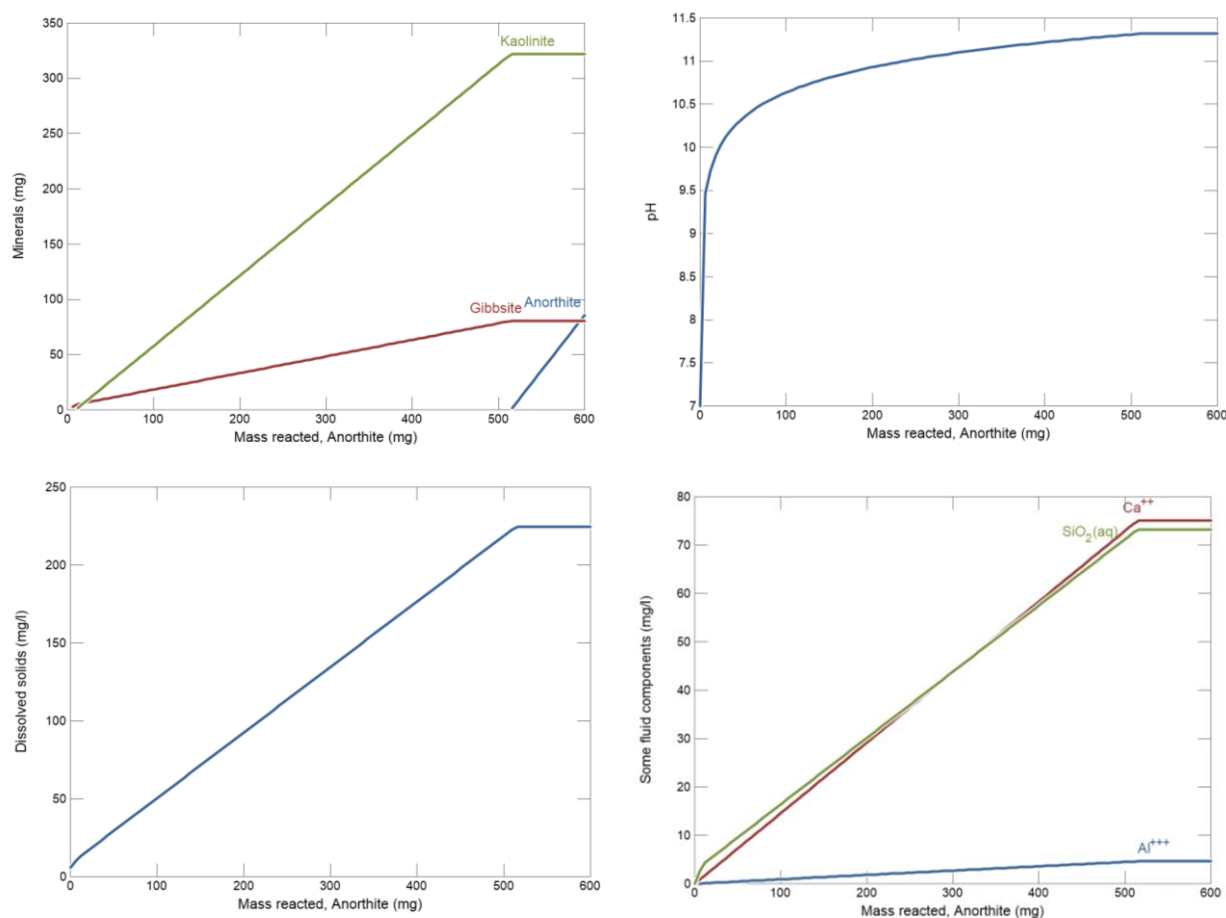


Obr. 169 Log aktivita-pH a log aktivita-log aktivita diagramy pro rozpouštění albitu ve vodě pro Al a SiO₂. Černou linií je vyznačena reakční cesta, modrými čtverečky jednotlivé stejně velké kroky. Červený kroužek vyznačuje konečnou rovnováhu

Jako první se při nekongruentním rozpouštění anortitu ve vodě objeví gibbsit, ke kterému se vzápětí přidává i srážení kaolinitu. V jednom kg vody se rozpustí a přemění o něco více než 0,5 g anortitu. Rozpouštění anortitu v čisté vodě je možné popsat následujícími chemickými rovnicemi (10,11):



Díky vysoké spotřebě protonů při reakci rozpouštění je v uzavřeném systému dosaženo extrémně vysokého pH 11,3 a relativně velmi vysokých koncentrací rozpuštěného oxidu křemičitého.

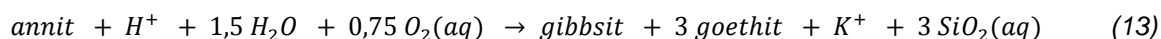
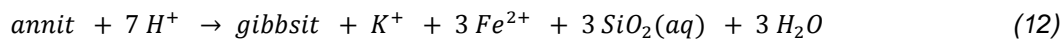


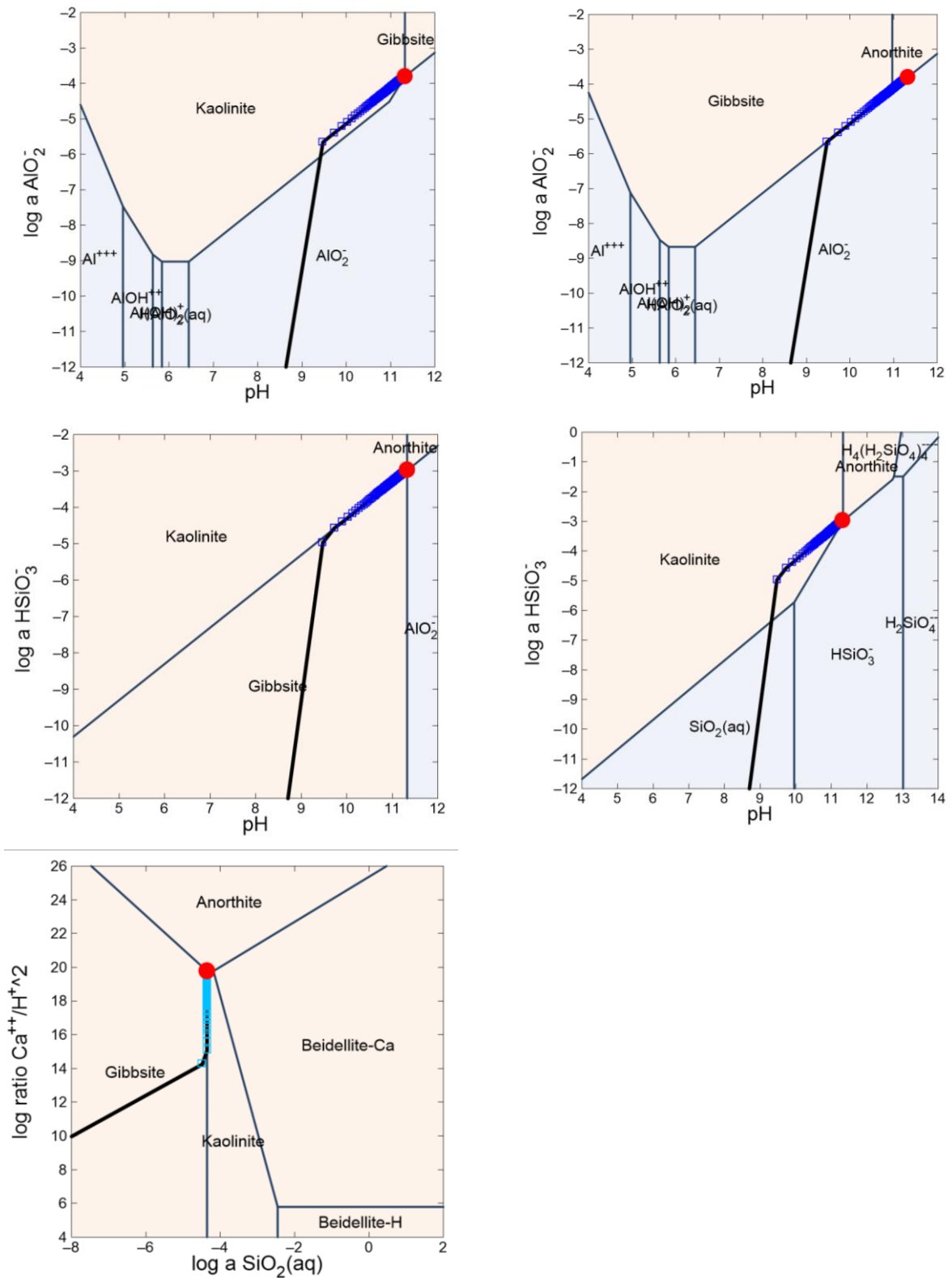
Obr. 170 Vývoj podmínek v průběhu rozpouštění anortitu v čisté vodě. Postupně jsou zobrazeny: minerály v systému, vývoj pH, celková koncentrace rozpuštěných látek a koncentrace složek v roztoku

Prakticky od počátku rozpouštění anortitu v čisté vodě jsou koncentrace rozpouštěného hliníku a oxidu křemičitého kontrolovány sekundárně vznikajícími minerály gibbsitem a kaolinitem, jak se patrně ze stabilních diagramů na Obr. 171.

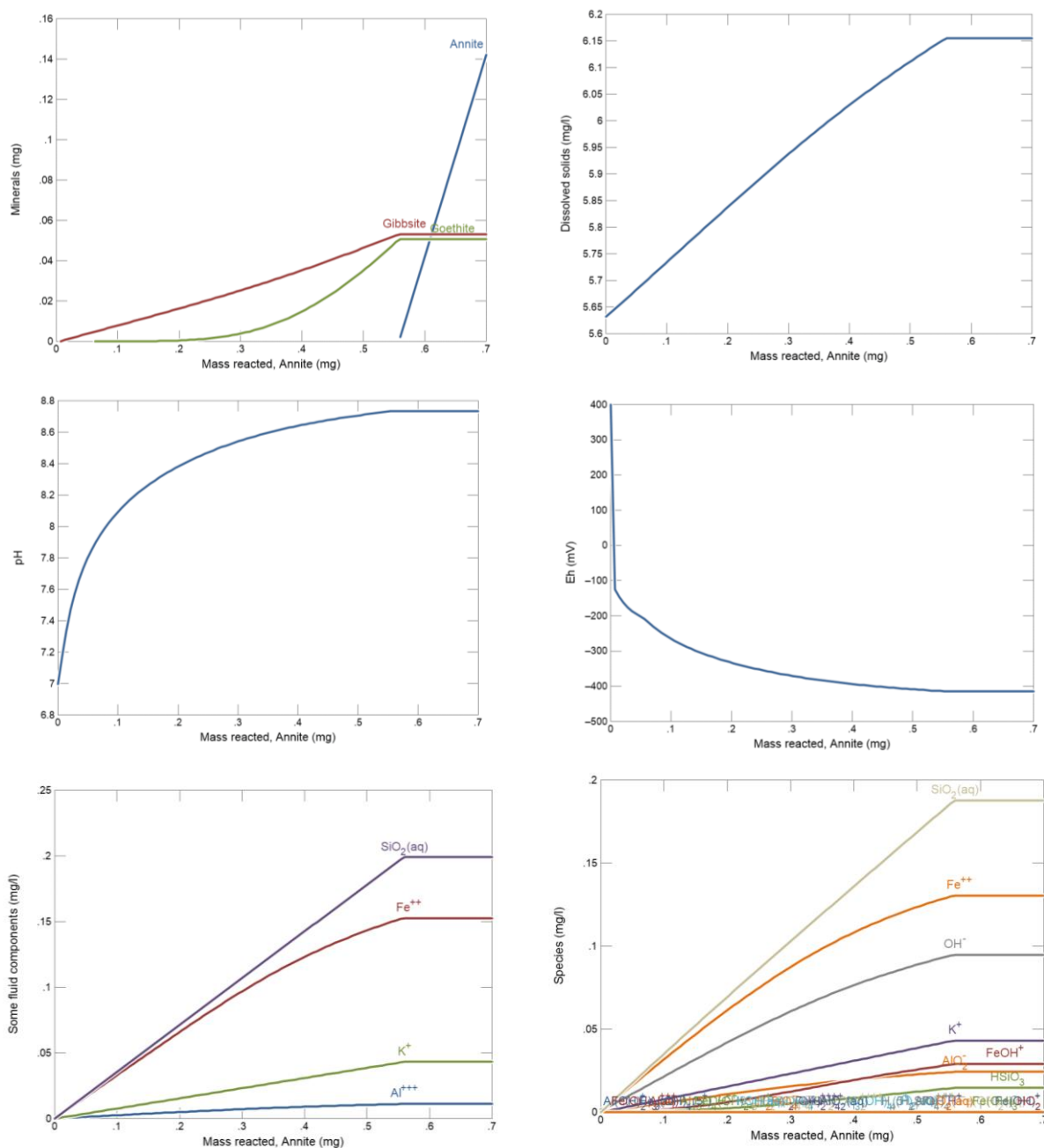
Annit

Rozpouštění annitu v čisté vodě je relativně jednoduchý proces. Složky, které obsahuje, umožňují vznik pouze několika minerálů. V uzavřeném systému se v 1 kg vody rozpustí jen 0,55 mg annitu, vzniká gibbsit a později i goethit (Obr. 172). Díky nízkému množství annitu, které se musí rozpustit do dosažení rovnováhy, je i posun pH do alkalické oblasti relativně mírný a jeho konečná hodnota je 8,7. Díky uvolňujícímu se dvojmocnému železu je však rozpouštění annitu spojeno s rychlým poklesem oxidačně-redukčního potenciálu. Rozpouštění annitu je možné popsat chemickými rovnicemi (12,13):





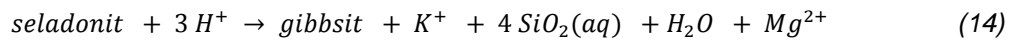
Obr. 171 Log aktivita-pH diagramy pro rozpouštění anortitu ve vodě pro Al a SiO₂. Černou linií je vyznačena reakční cesta, modrými čtverečky jednotlivé stejně velké kroky. Červený kroužek vyznačuje konečnou rovnováhu



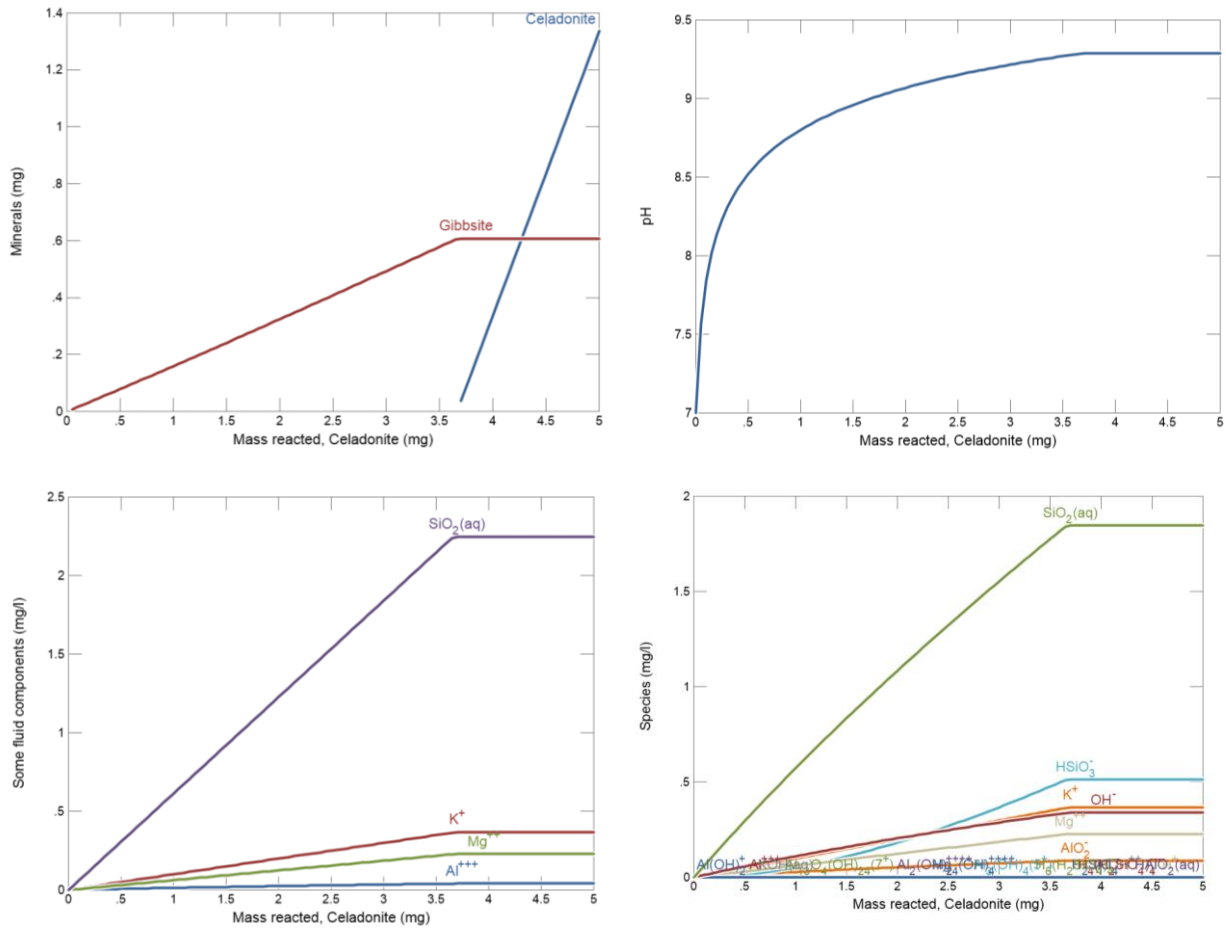
Obr. 172 Vývoj podmínek v průběhu rozpouštění annitu v čisté vodě. Postupně jsou zobrazeny: minerály v systému, celková koncentrace rozpuštěných látek, vývoj pH a oxidačně-redukčního potenciálu, koncentrace složek a specií v roztoku

Seladonit

Rozpouštění seladonitu v čisté vodě vede ke srážení gibbsitu. V uzavřeném systému se v 1 kg vody rozpustí 3,7 mg seladonitu, vzniká gibbsit (Obr. 173). Díky rozpouštění dochází k posunu pH do alkalické oblasti a konečná hodnota pH je 9,3. Rozpouštění seladonitu je možné popsat chemickou rovnicí (14):



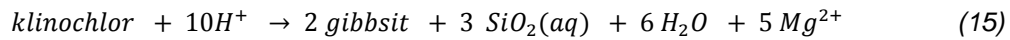
Díky srážení gibbsitu a poměrně vysokému pH není dosaženo dostatečné koncentrace hlinitých ionů pro vznik dalších jílových minerálů.



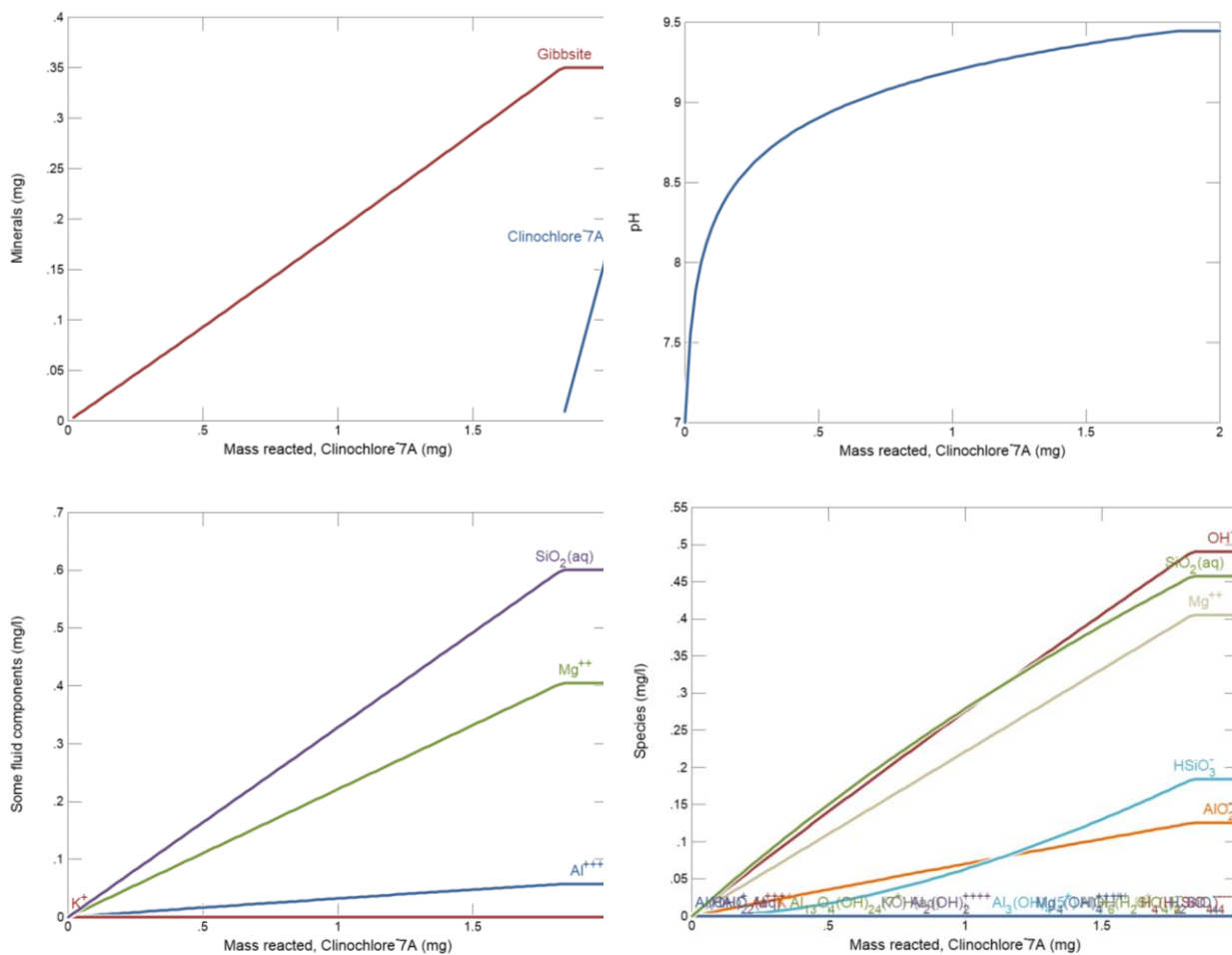
Obr. 173 Vývoj podmínek v průběhu rozpouštění seladonitu v čisté vodě. Postupně jsou zobrazeny: minerály v systému, vývoj pH a koncentrace složek a specií v roztoku

Klinochlor

Rozpouštění klinochloru v čisté vodě vede ke srážení gibbsitu. V uzavřeném systému se v 1 kg vody rozpustí 1,8 mg klinochloru, vzniká gibbsit (Obr. 174). Díky rozpouštění dochází k posunu pH do alkalické oblasti a konečná hodnota pH je 9,45. Rozpouštění klinochloru je možné popsat chemickou rovnicí (15):



Díky srážení gibbsitu a poměrně vysokému pH není dosaženo dostatečné koncentrace hlinitých ionů pro vznik dalších jílových minerálů.

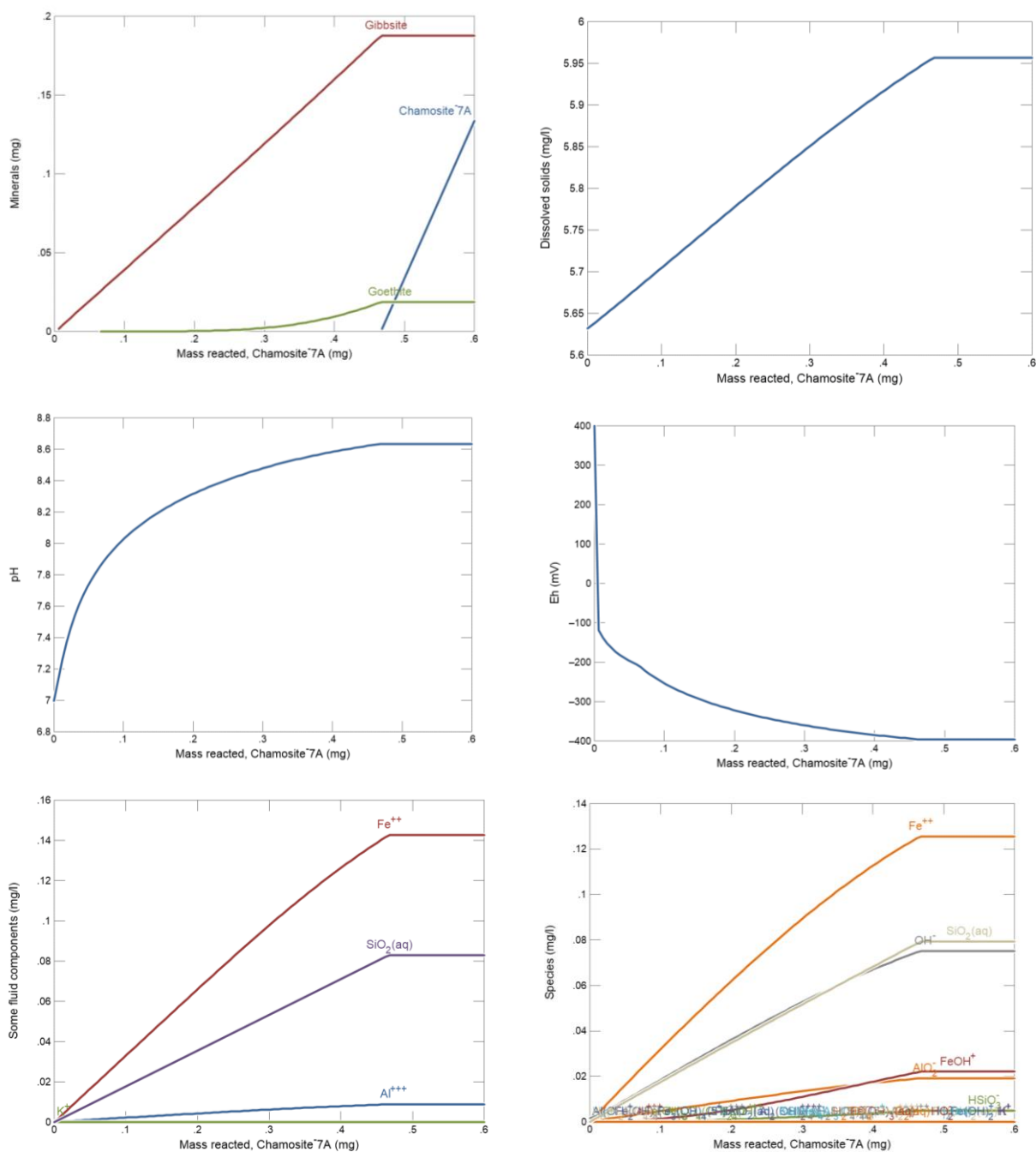


Obr. 174 Vývoj podmínek v průběhu rozpouštění klinochloru v čisté vodě. Postupně jsou zobrazeny: minerály v systému, vývoj pH a koncentrace složek a specií v roztoku

Chamosit

Rozpouštění chamositu v čisté vodě umožňuje vznik pouze dvou minerálů. V uzavřeném systému se v 1 kg vody rozpustí jen 0,47 mg chamositu, vzniká gibbsit a později i goethit (Obr. 175). Díky nízkému množství chamositu, které se musí rozpustit do dosažení nasycení, je i posun pH do alkalické oblasti relativně mírný a jeho konečná hodnota je 8,6. Díky uvolňujícímu se

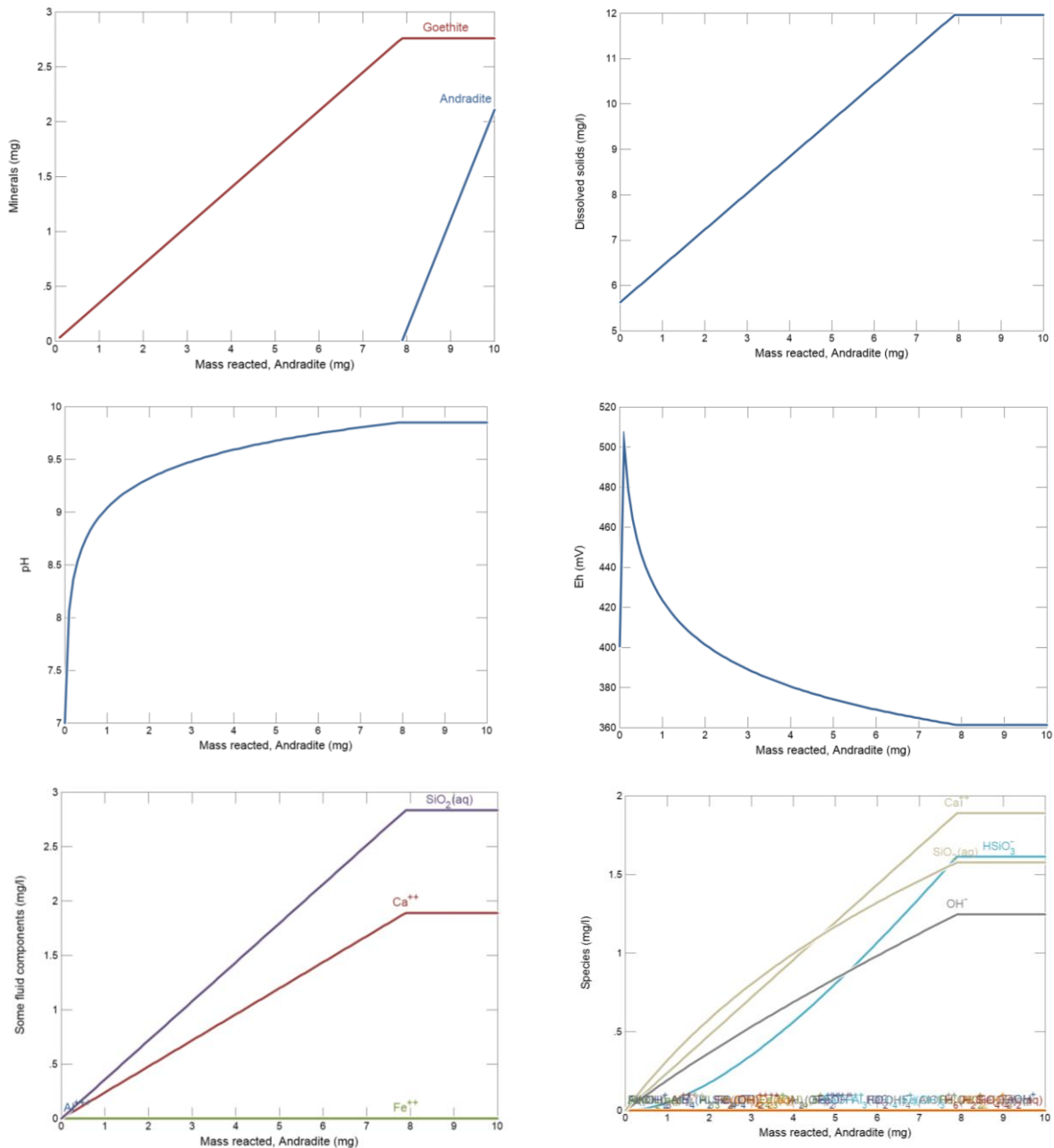
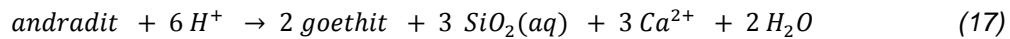
dvojmocnému železu je však rozpouštění chamositu spojeno s rychlým poklesem oxidačně-redukčního potenciálu. Rozpouštění chamositu je možné popsat chemickou rovnicí (16):



Obr. 175 Vývoj podmínek v průběhu rozpouštění chamositu v čisté vodě. Postupně jsou zobrazeny: minerály v systému, celková koncentrace rozpuštěných látek, vývoj pH a oxidačně-redukčního potenciálu, koncentrace složek a specií v roztoku

Andradit

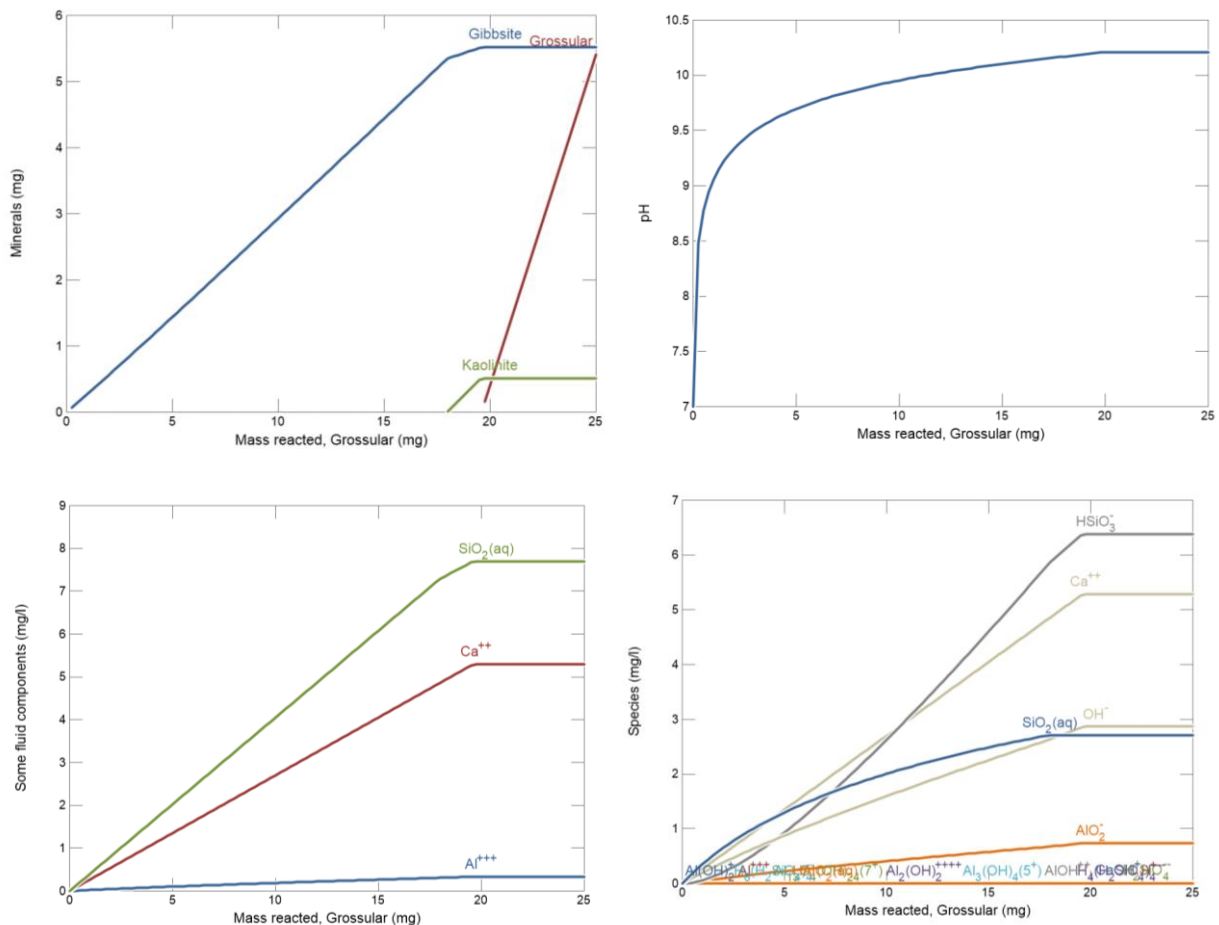
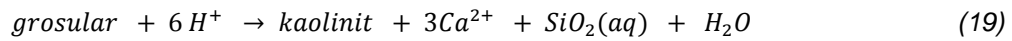
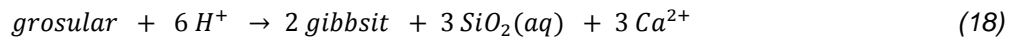
Rozpuštění andraditu v čisté vodě umožňuje pouze vznik goethitu. V uzavřeném systému se v 1 kg vody rozpustí jen 7,9 mg andraditu, vzniká pouze goethit (Obr. 176). Díky nízkému množství chamositu, které se musí rozpustit do dosažení nasycení, je i posun pH do alkalické oblasti relativně mírný a jeho konečná hodnota je 9,8. Díky uvolňujícímu se dvojmocnému železu je však rozpouštění andraditu spojeno s rychlým poklesem oxidačně-redukčního potenciálu. Rozpouštění andraditu je možné popsat chemickou rovnicí (17):



Obr. 176 Vývoj podmínek v průběhu rozpouštění andraditu v čisté vodě. Postupně jsou zobrazeny: minerály v systému, celková koncentrace rozpuštěných látek, vývoj pH a oxidačně-redukčního potenciálu, koncentrace složek a specií v roztoku

Grosulár

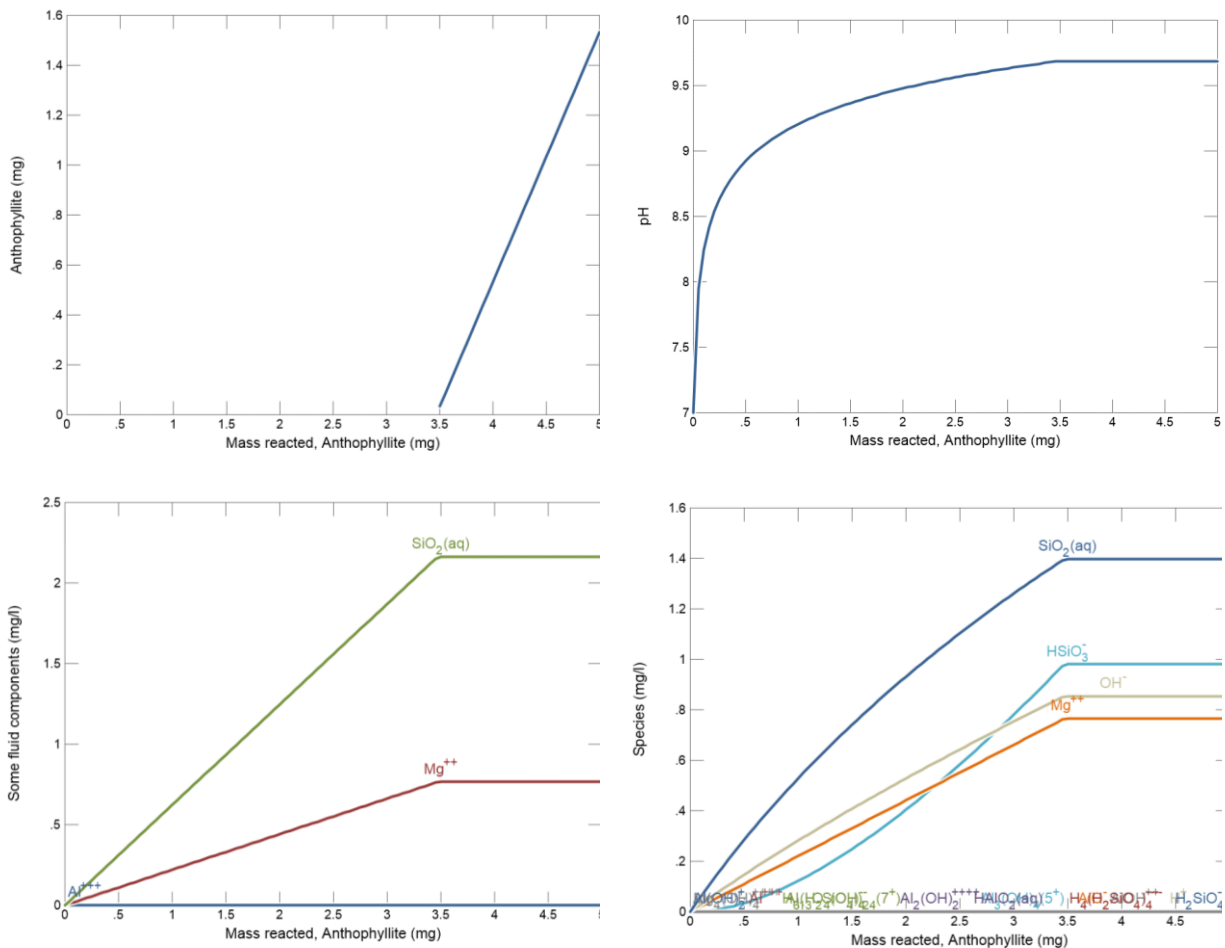
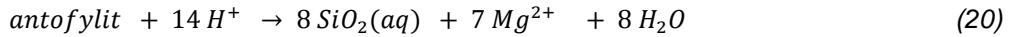
Rozpouštění grosuláru v čisté vodě vede ke srážení gibbsitu a následně i kaolinitu. V uzavřeném systému se v 1 kg vody rozpustí 19,8 mg grosuláru (Obr. 177). Díky rozpouštění dochází k posunu pH do alkalické oblasti a konečná hodnota pH je 10,2. Rozpouštění grosuláru je možné popsat chemickými rovnicemi (18,19)



Obr. 177 Vývoj podmínek v průběhu rozpouštění grosuláru v čisté vodě. Postupně jsou zobrazeny: minerály v systému, vývoj pH a koncentrace složek a specií v roztoku

Antofylit

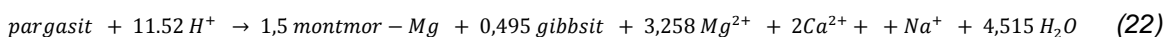
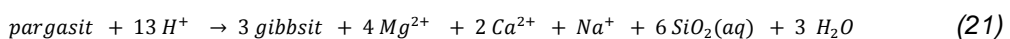
Rozpuštění grosuláru v čisté vodě je velmi jednoduchý proces. Nepřítomnost dalších složek vede k tomu, že se nemohou srážet žádné další sekundární minerály (Obr. 178). Nasycení roztoku vůči antofylitu je dosaženo po rozpuštění 3,5 mg a pH se posune na hodnotu 9,7. Rozpuštění antofylitu je možné popsat chemickou rovnicí (20):

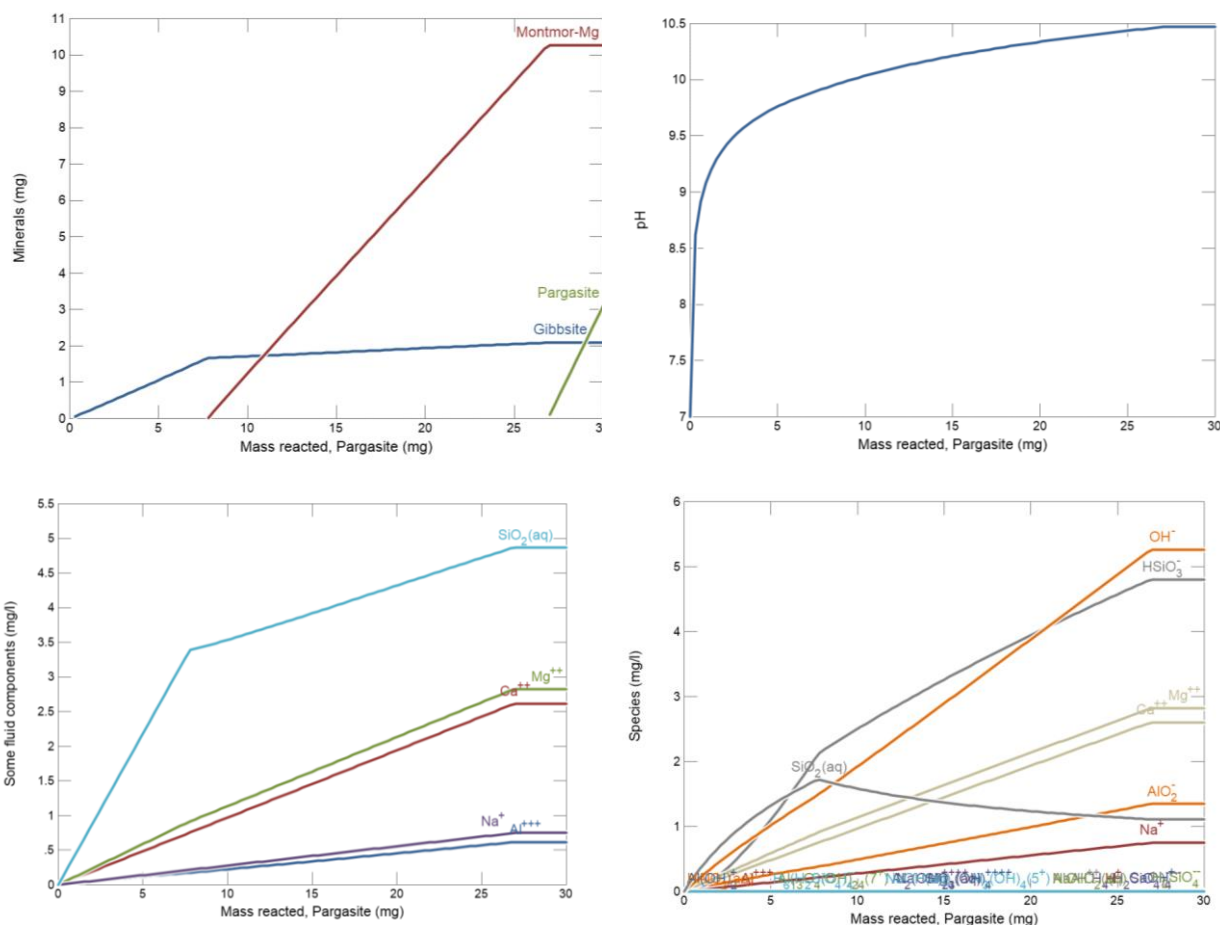


Obr. 178 Vývoj podmínek v průběhu rozpouštění antofylitu v čisté vodě. Postupně jsou zobrazeny: minerály v systému, vývoj pH a koncentrace složek a specií v roztoku

Pargasit

Při rozpouštění pargasitu v čisté vodě se nejprve sráží gibbsitu. Další rozpouštění pargasitu vede k růstu koncentrace hořčíku a rozpuštěného SiO_2 až je dosaženo nasycení vůči hořečnatému montmorillonitu. Po rozpuštění 27 mg pargasitu se roztok stává nasycením i vůči tomuto minerálu, přičemž stoupne hodnota pH až na 10,47 (Obr. 179). Rozpuštění pargasitu je možné popsat chemickými rovnicemi (21,22)

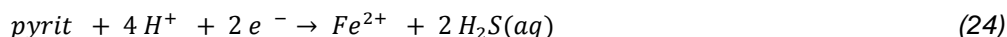
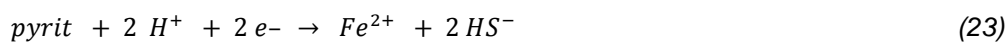




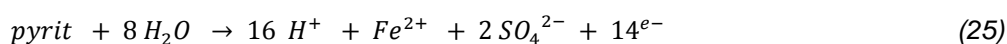
Obr. 179 Vývoj podmínek v průběhu rozpouštění pargasitu v čisté vodě. Postupně jsou zobrazeny: minerály v systému, vývoj pH a koncentrace složek a specií v roztoku

Pyrit

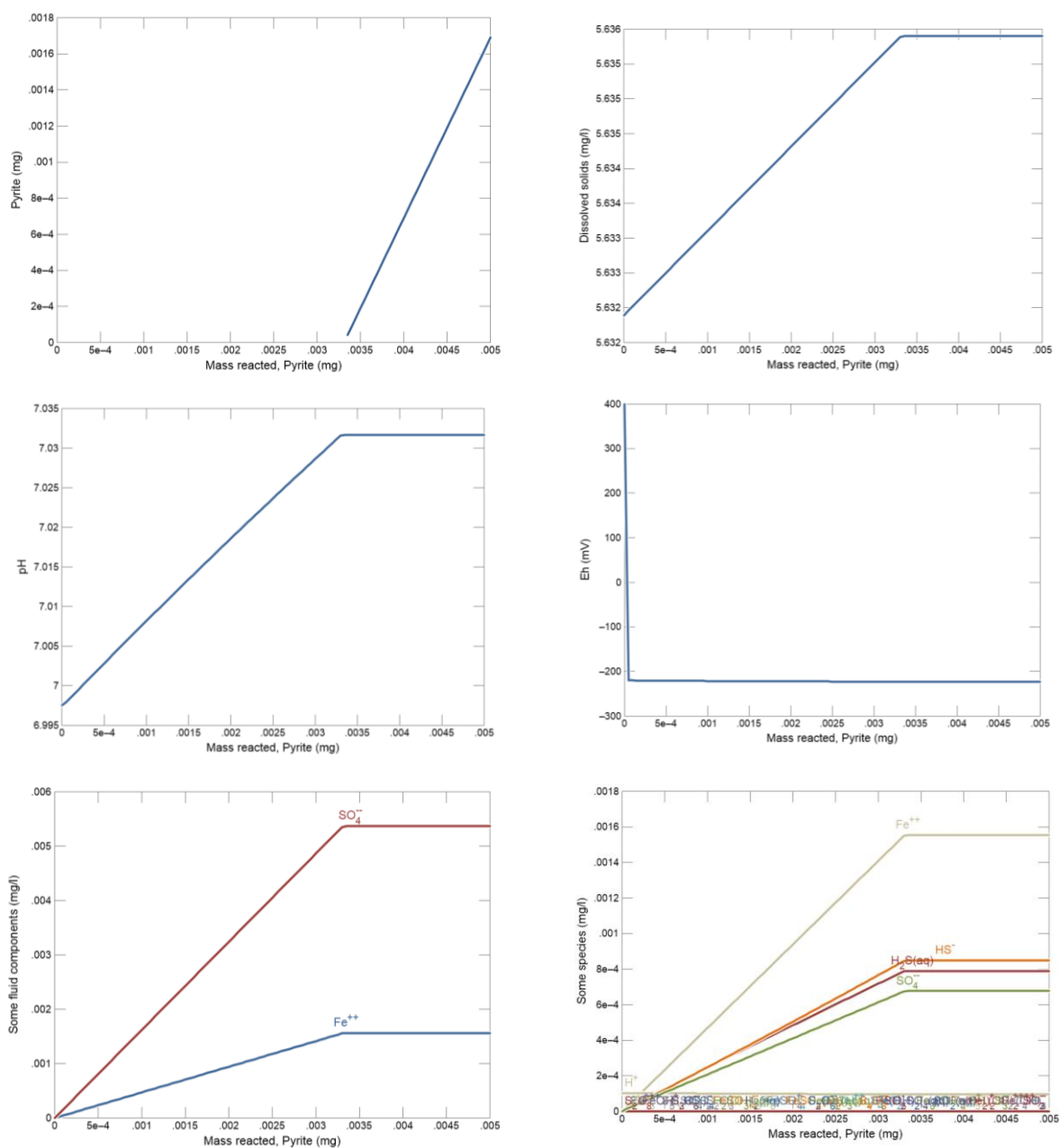
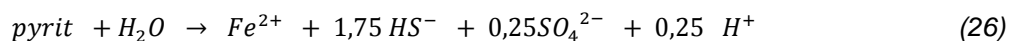
V anoxickém prostředí je pyrit stabilním minerálem a jeho rozpustnost ve vodě je velmi nízká (Obr. 180). V čisté vodě se v 1 kg rozpustí pouze 3,4 μg pyritu. Přesto hraje pyrit v horninovém prostředí velmi významnou úlohu. Společně s organickými látkami vytváří v zemské kůře silně redukční prostředí. Pokud napíšeme základní reakční schéma rozpouštění pyritu rovnicemi, které odpovídají hlavním speciím uvolňovaným do roztoku, pak by se mohlo zdát, že by spotřebou elektronů mělo naopak docházet ke zvyšování oxidačně-redukčního potenciálu (23, 24):



Podrobnější pohled na speciaci sirných látek v roztoku však ukazuje, že kromě sulfátu a ionu HS^- , jsou produkovány ve srovnatelné míře také síranové také síranové iony (25):

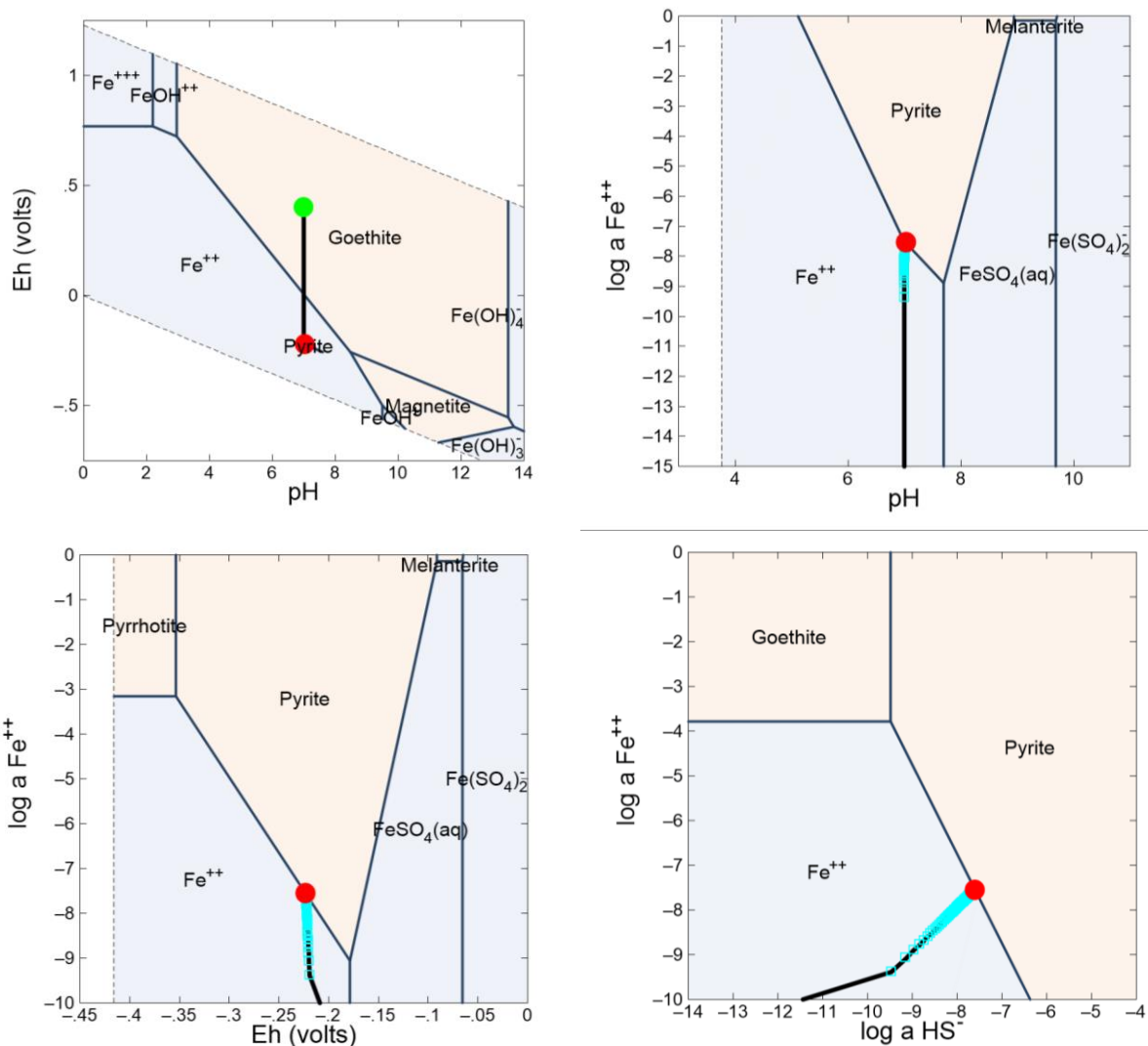


Tato reakce vyprodukuje dostatečné množství elektronů, které nejen že pokryje spotřebu elektronů pro vznik redukovaných sirných látek, ale vytvoří i silně redukční prostředí (Obr. 180). Rozpouštění pyritu v čisté vodě je pak možné popsat rovnicí (26):



Obr. 180 Vývoj podmínek v průběhu rozpouštění pyritu v čisté vodě. Postupně jsou zobrazeny: minerály v systému, celková koncentrace rozpuštěných látek, vývoj pH a oxidačně redukčního potenciálu, koncentrace složek v roztoku a koncentrace specií

Reakční cesta rozpouštění pyritu ve vodě je uvedena v Eh-pH, log aktivita-pH a log aktivita-log aktivita diagramech na Obr. 181. Díky tomu, že se rozpouští jen velmi malé množství pyritu, nemá jeho rozpouštění vliv na hodnotu pH roztoku. Naopak u oxidačně redukčního potenciálu dojde už při rozpouštění velmi malého množství pyritu k vytvoření silně redukčních podmínek, které se dalším rozpouštěním až do nasycení roztoku téměř nemění.



Obr. 181 Eh-pH, log aktivita-pH, log aktivita-Eh a log aktivita-log aktivita diagramy pro rozpouštění pyritu ve vodě pro železo. Černou linií je vyznačena reakční cesta, modrými čtverečky jednotlivé stejně velké kroky. Červený kroužek vyznačuje konečnou rovnováhu

Souhrnné zhodnocení stability horninotvorných minerálů

Rozpouštění všech silikátových minerálů v čisté vodě vede vždy k posunu hodnot pH do alkalické oblasti. U minerálů, které obsahují dvojmocné železo, dochází v anoxických podmínkách k výraznému snížení oxidačně-redukčního potenciálu. Většina silikátových minerálů je velmi málo rozpustná, jejich rozpustnost v čisté vodě se pohybuje v desetinách až v prvních miligramech na 1 kilogram vody. Výjimkou jsou albit a anortit, jejichž rozpustnost dosahuje stovek miligramů na 1 kilogram vody. Většina minerálů se rozpouští nekongruentně a produkty rozpouštění jsou variabilně gibbsit, kaolinit a chalcedon, u pargasitu také hořečnatý montmorillonit. U minerálů, které obsahují dvojmocné železo, patří mezi produkty rozpouštění také goethit. Pouze antofylit a pyrit se v anoxických podmínkách rozpouštějí kongruentně. Souhrnný přehled je uveden v Tab. 13.

Tab. 13 Souhrnný přehled rozpustnosti modelových horninotvorných minerálů obsažených v modelové ruly a modelovém amfibolitu spolu. Rozpustnost je uvedena v 1 kg čisté vody spolu s produkty rozpouštění

minerál	rozpustí se mg	produkty
annit	0,55	gibbsit, goethit
seladonit	3,7	gibbsit
albit	122	kaolinit, chalcedon
anortit	515	gibbsit, kaolinit
K-živec	9,4	kaolinit
křemen	11,3	chalcedon
chamosit-7A	0,47	gibbsit, goethit
klinochlor-7A	1,8	gibbsit
andradit	7,9	goethit
grosulár	19,8	gibbsit, kaolinit
antofylit	3,5	kongruentní rozpouštění
pargasit	27	gibbsit, Mg-montmorillonit
pyrit	0,0033	kongruentní rozpouštění

Údaje o rozpustnosti jednotlivých minerálů, získané modelováním jejich interakce s čistou vodou je však třeba brát jako orientační. Rozpustnost jednotlivých minerálů je ovlivněna rozpuštěnými karbonátovými látkami, které otupují změny hodnot pH a mění jejich rozpustnost. Dalším podstatným vlivem je přítomnost a rozpouštění dalších minerálů. Při jejich rozpouštění se uvolňují složky, které umožňují srážení dalších sekundárních minerálů. Tím se spotřebovávají složky, které původně umožnily nasycení vody vůči jednotlivým minerálům, a tak mohou podstatně zvýšit jejich rozpustnost. U některých minerálů pak z tohoto důvodu nemusí dojít vůbec k jejich nasycení. Stejným způsobem může dojít ke zvýšení rozpustnosti i v důsledku přítomnosti některých složek v podzemní vodě, která horninami proudí.

Tyto vlivy jsou zhodnoceny v následujících kapitolách s modely interakce ruly a amfibolitu s čistou a modelovou podzemní vodou.

2.3.4.5.4 Rula

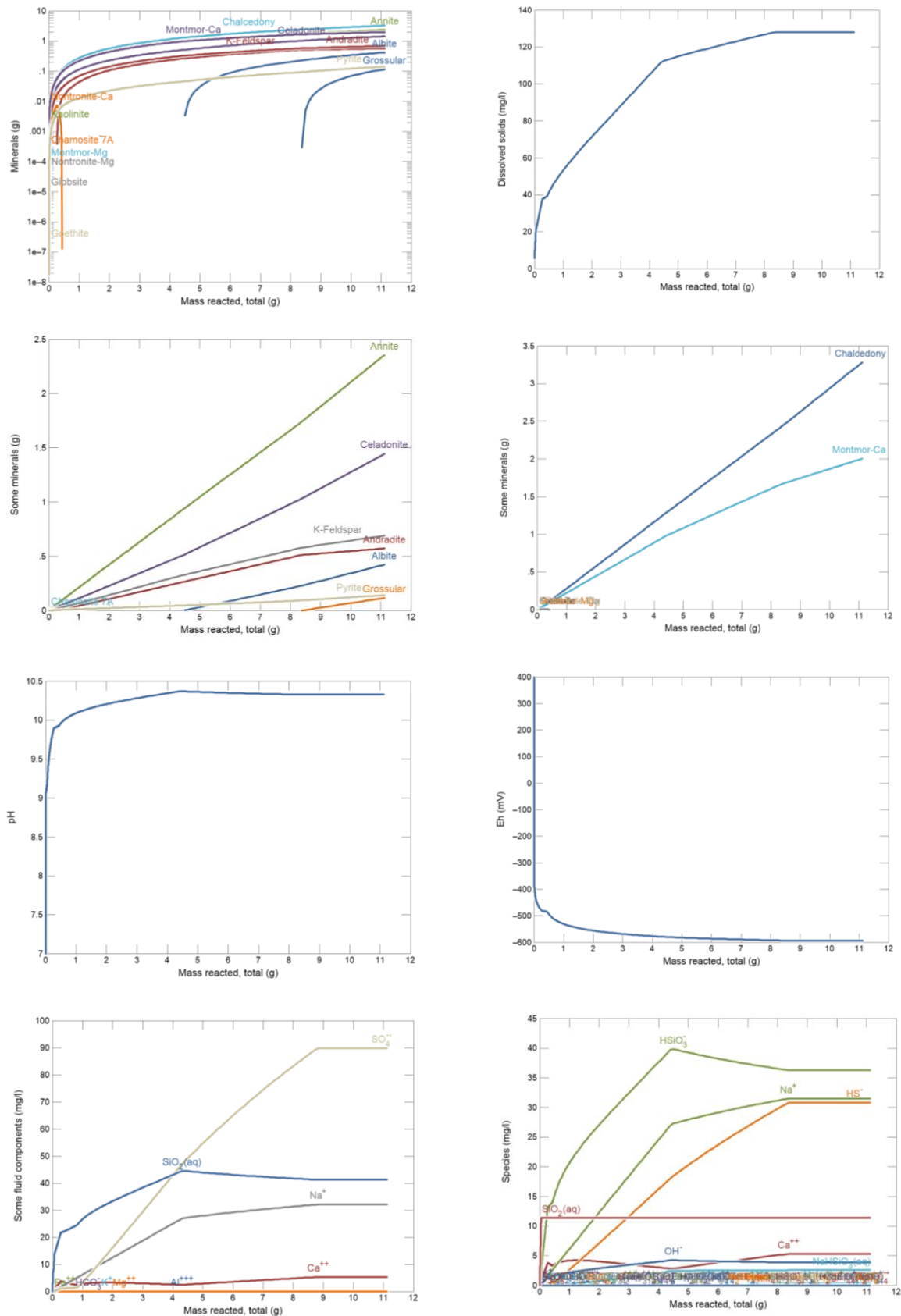
V následujících podkapitolách je uveden geochemický model interakce ruly o modelovém složení, které je uvedeno v Tab. 9 s čistou vodou, s vodou s obsahem karbonátových látek a s modelovou podzemní vodou, jejíž složení je uvedeno v Tab. 12.

Rozpouštění ruly v čisté vodě

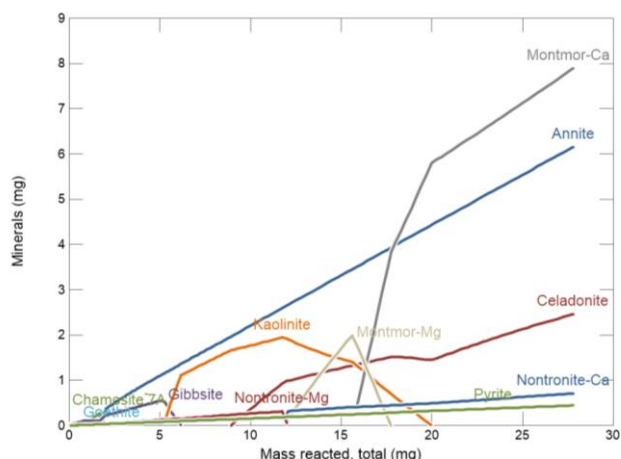
Výsledky geochemického modelování rozpouštění ruly v čisté vodě jsou uvedeny na Obr. 182. Přidávání modelové ruly k 1 kg čisté vody vede k tomu, že se roztok postupně nasatí vůči většině minerálů. Posledním minerálem, vůči kterému se voda nasatí po přidání 8,5 g ruly, je grosulár. Jako výsledný produkt přeměny pak vzniká vápenatý montmorillonit a chalcedon. Vůči dvěma minerálům, anortitu a klinochloru, se voda nikdy nenasytí a jejich přeměna pokračuje do jejich úplného spotřebování. Celková koncentrace rozpuštěných látek dosáhne hodnoty kolem 130 mg l^{-1} a bude se jednat o nízce mineralizovanou vodu. Hodnoty pH se posunou do silně alkalické oblasti 10,3 a oxidačně-redukční potenciál bude silně redukční $\sim 600 \text{ mV}$. Hlavními složkami v roztoku bude rozpuštěný SiO_2 a ionty Na^+ a HS^- .

Přes relativně jednoduchý výsledek interakce ruly s čistou vodou dochází na začátku reakce při rozpouštění desítek mg modelové ruly k poměrně složitému minerálnímu vývoji (Obr. 183). V oblasti desítek mg rozpuštěné ruly byla identifikována celá řada jílových minerálů, které se objevily už při modelování rozpouštění jednotlivých primárních minerálů ruly. Tyto jílové minerály však postupně podlehly sekundární přeměně v důsledku uvolňování složek z dalších rozpouštěných minerálů, zejména v důsledku dalšího uvolňování Ca^{2+} .

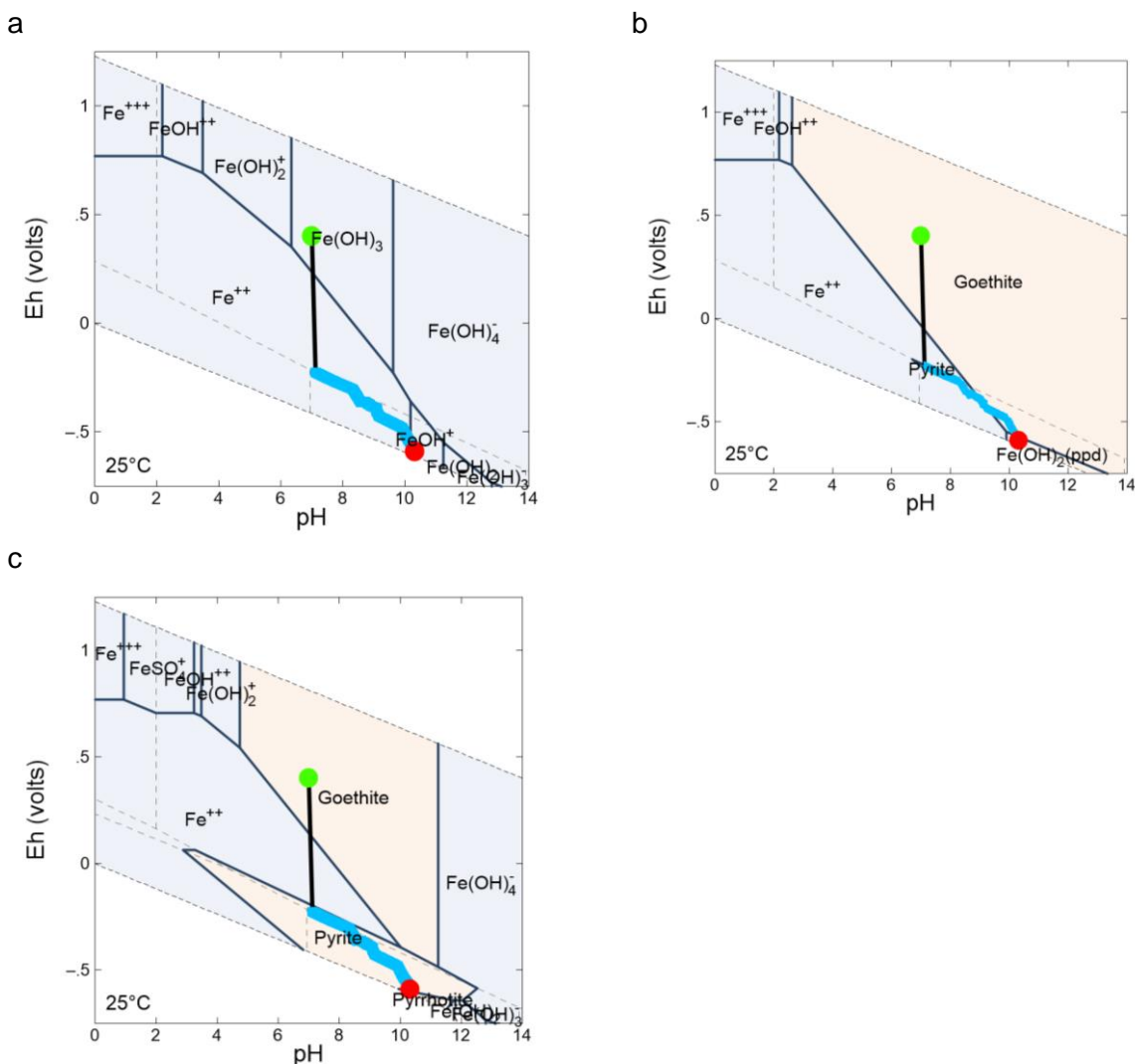
Reakční cesta vývoje podmínek v systému je dokumentována na Eh-pH diagramu na Obr. 184 pro železo. Díky přítomnosti pyritu a minerálů s dvojmocným železem klesne oxidačně-redukční potenciál hned na začátku do redukční oblasti. K jeho dalšímu snižování pak dochází především v důsledku posunu hodnot pH do alkalické oblasti, které je způsobeno především přeměnou silikátových minerálů.



Obr. 182 Vývoj podmínek v průběhu rozpouštění modelové ruly v čisté vodě. Postupně jsou uvedeny: zastoupené minerály v logaritmické škále, celková koncentrace rozpuštěných látek, zastoupené primární minerály, vznikající sekundární minerály, vývoj hodnot pH a oxidačně-redukčního potenciálu, koncentrace rozpuštěných složek a jejich speciace



Obr. 183 Vývoj minerálního složení systému v průběhu prvních fází rozpouštění modelové ruly v čisté vodě



Obr. 184 Reakční cesta vývoje podmínek při rozpouštění modelové ruly v čisté vodě pro železo. Černou linií je vyznačena reakční cesta, modrými čtverečky jednotlivé kroky. Zelený kroužek vyznačuje počáteční podmínky, červený kroužek vyznačuje konečnou rovnováhu. (a) diagram pro počáteční podmínky, (b) diagram pro podmínky po prvním přidavku ruly a (c) diagram pro konečné podmínky

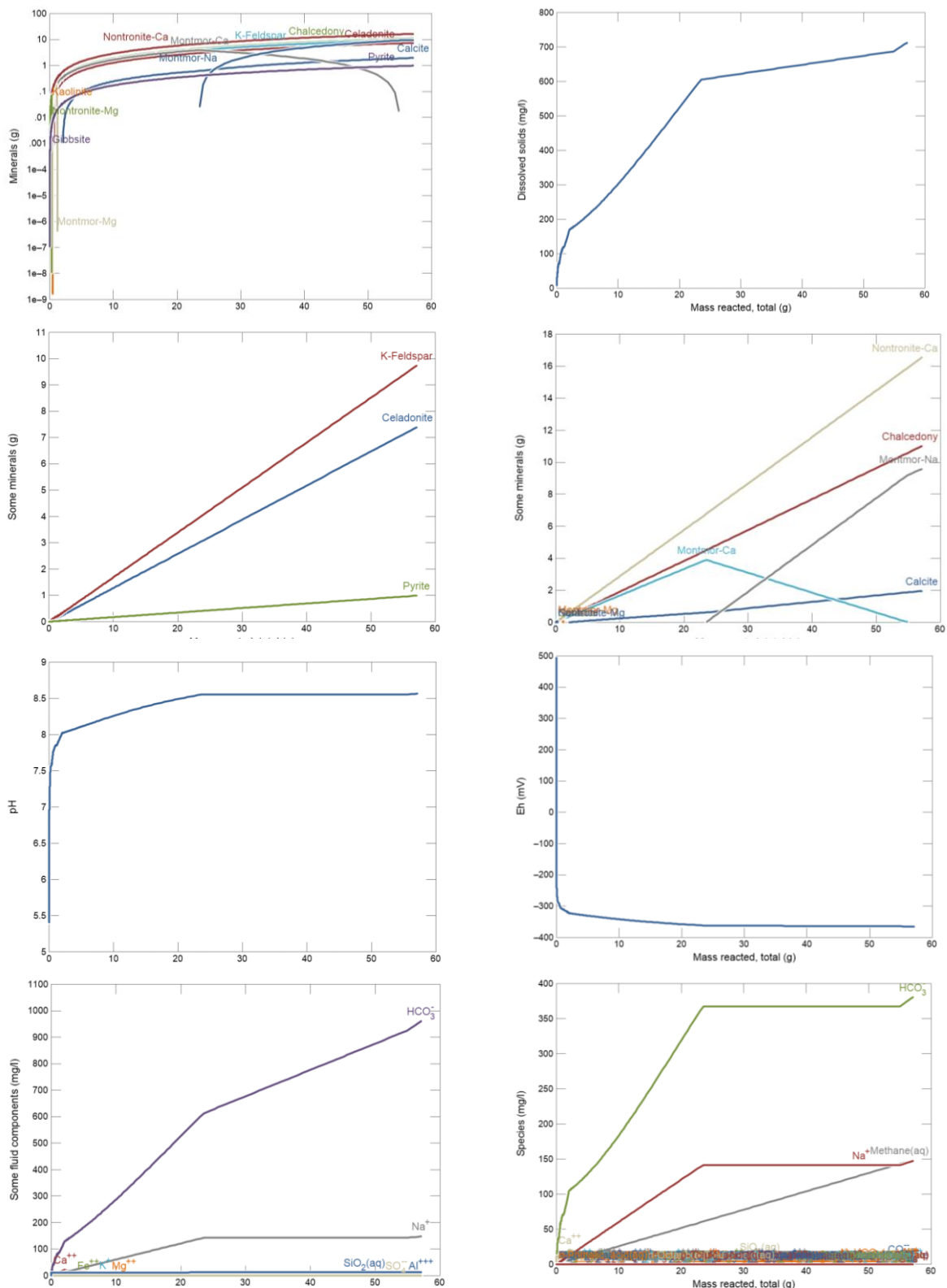
Rozpouštění ruly v přítomnosti rozpuštěných karbonátových látek

Prakticky všechny podzemní vody obsahují rozpuštěné karbonátové látky. Jejich koncentrace se pohybuje v širokých mezích. Důležitým parametrem, který určuje jejich celkovou koncentraci, je množství rozpuštěného $\text{CO}_2(\text{aq})$. Ten je v rovnováze s reálným či virtuálním plynným $\text{CO}_2(\text{g})$ a tak je možné jednoduše určovat celkovou koncentraci rozpuštěných karbonátových látek pomocí parciálního tlaku či fugacity f_{CO_2} . V podzemních vodách se fugacita pohybuje v mezích 10^{-1} – 10^{-6} .

Rozpuštěné karbonátové látky pak výrazně tlumí změny pH, které jsou výsledkem interakcí minerálů a hornin s vodou. Pro modelové sledování rozpouštění ruly v čisté vodě v přítomnosti rozpuštěných karbonátových látek byla zvolena pro fugacitu CO_2 střední hodnota $f_{\text{CO}_2} = 10^{-3}$.

Obraz rozpouštění ruly ve vodě za přítomnosti karbonátových látek se proti rozpouštění čisté vody radikálně změní. Hned na počátku rozpouštění ruly je dosaženo nasycení roztoku vůči pyritu, po rozpuštění 210 mg ruly se nasatí roztok vůči draselnému živci a po rozpuštění 630 mg vůči seladonitu. Ostatní minerály budou nadále podléhat přeměně a roztok vůči nim nikdy nedosáhne nasycení. Primární minerály se budou přeměňovat na sekundární produkty až do jejich úplného spotřebování.

Příčinou této změny proti rozpouštění ruly v čisté vodě jsou dva faktory. Přítomnost rozpuštěných karbonátových látek efektivně tlumí změny hodnot pH, v daném případě se pH zvýší jen na hodnotu 8,65 (v čisté vodě bylo dosaženo 10,3), což u alumosilikátových minerálů neumožňuje dosáhnout dostatečné koncentrace rozpuštěného hliníku, aby se mohly srážet. Druhým faktorem je srážení kalcitu, který z roztoku odčerpává vápenaté iony a tak umožňuje srážení dalších jílových minerálů, jako jsou sodný montmorillonit a nontronit.

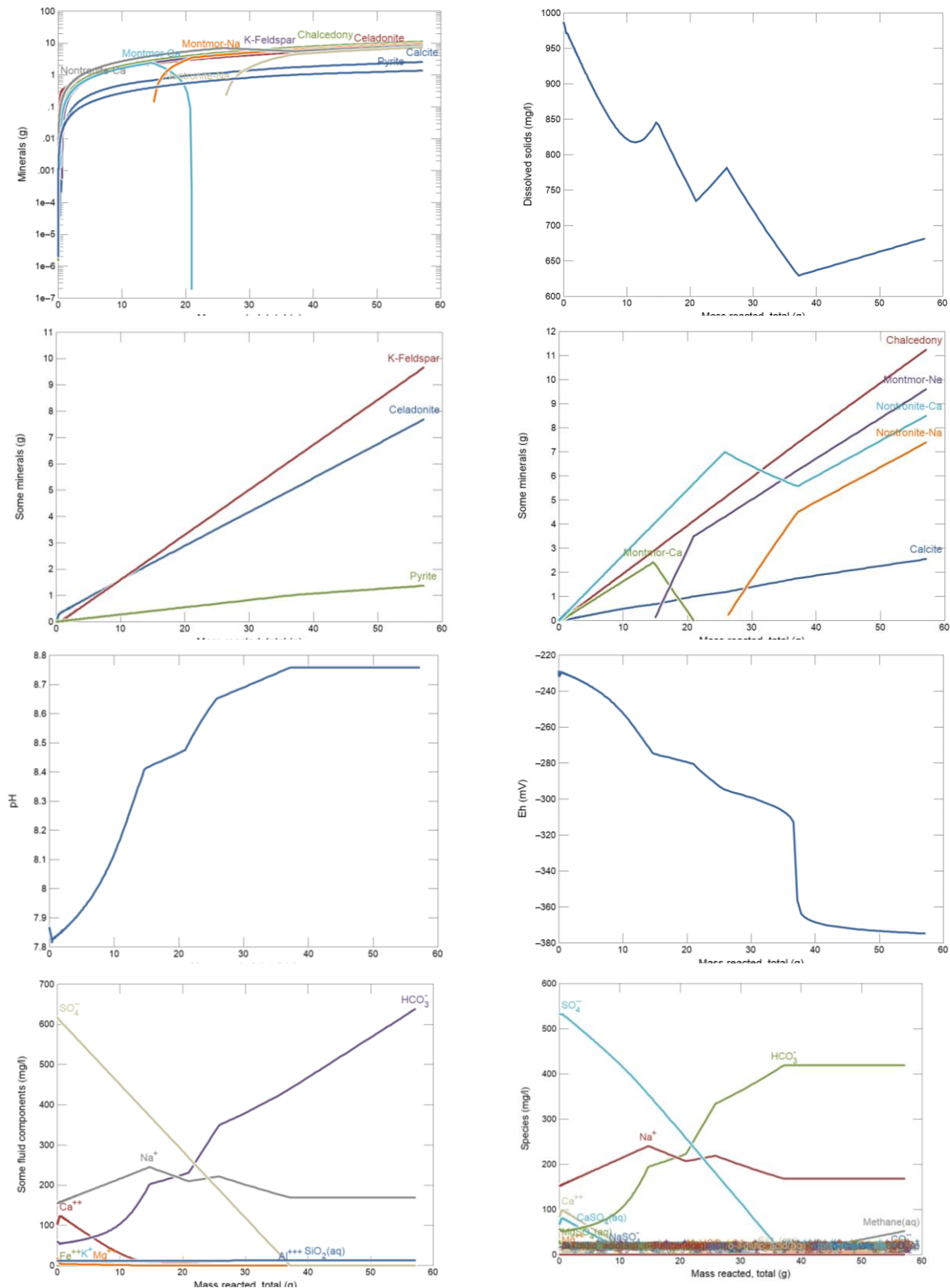


Obr. 185 Vývoj podmínek v průběhu rozpouštění modelové ruly ve vodě v přítomnosti karbonátových látek s $f_{\text{CO}_2} = 10^{-3}$. Postupně jsou uvedeny: zastoupené minerály v logaritmické škále, celková koncentrace rozpuštěných látek, zastoupené primární minerály, vznikající sekundární minerály, vývoj hodnot pH a oxidačně-redukčního potenciálu, koncentrace rozpuštěných složek a jejich speciace

Rozpouštění ruly v modelové podzemní vodě

Rozpouštění ruly může být ovlivněno také složením podzemní vody. Pro geochemické modelování byly vybrány tři modelové podzemní vody, jejichž složení bylo odvozeno od reálných podzemních vod ložiskové oblasti Rožná. Složení reálných podzemních vod je uvedeno v Tab. 11 a modelových vod v Tab. 12 Dále jsou prezentovány výsledky modelování interakce ruly s podzemní vodou BR51, u dalších dvou modelových podzemních vod se výsledky významně neliší.

Přítomnost dalších složek v modelové podzemní vodě nevede k zásadní změně mechanismu rozpouštění ruly ve srovnání s čistou vodou v přítomnosti karbonátových látek (Obr. 186). Z primárních minerálů je dosaženo nasycení opět jen vůči pyritu, draselnému živci a seladonitu. Další složky v podzemní vodě vedou k tomu, že vzniká širší paleta jílových minerálů, na počátku rozpouštění dochází k mírnému poklesu celkové koncentrace rozpuštěných látek, je dosaženo mírně vyššího pH a mírně nižšího oxidačně-redukčního potenciálu. Dalším rozpouštěním ruly a přeměnou primárních minerálů na sekundární produkty samozřejmě v dalším průběhu celková koncentrace rozpuštěných látek stále roste, pH a oxidačně redukční potenciál už zůstávají konstantní.



Obr. 186 Vývoj podmínek v průběhu rozpouštění modelové ruly v modelové podzemní vodě BR51. Postupně jsou uvedeny: zastoupené minerály v logaritmické škále, celková koncentrace rozpuštěných látek, zastoupené primární minerály, vznikající sekundární minerály, vývoj hodnot pH a oxidačně-redukčního potenciálu, koncentrace rozpuštěných složek a jejich speciace

2.3.4.5.5 Amfibolit

Geochemické modelování rozpouštění amfibolitu bylo připraveno ve stejné konfiguraci, jako bylo provedeno u ruly. Jedná se o geochemický model interakce amfibolitu o modelovém složení, které je uvedeno v Tab. 10, s čistou vodou, s vodou s obsahem karbonátových látek a s modelovou podzemní vodou, jejíž složení je uvedeno v Tab. 12.

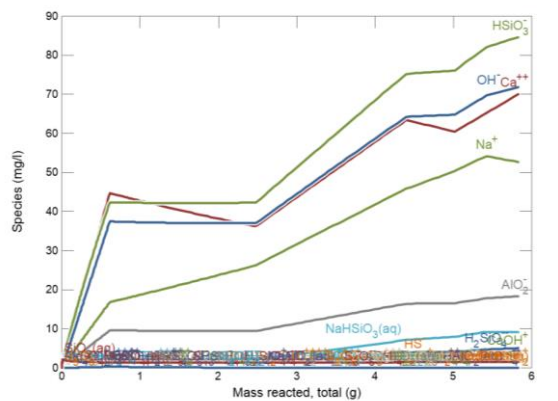
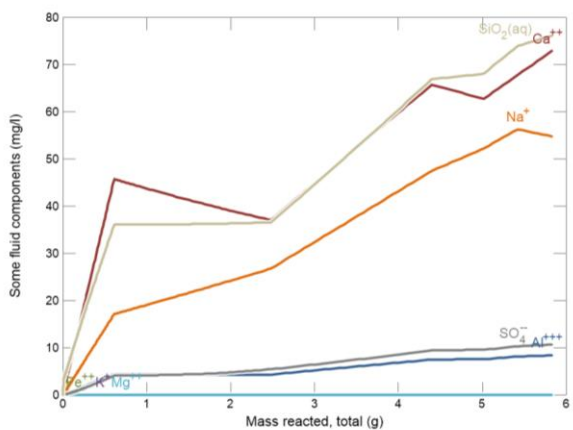
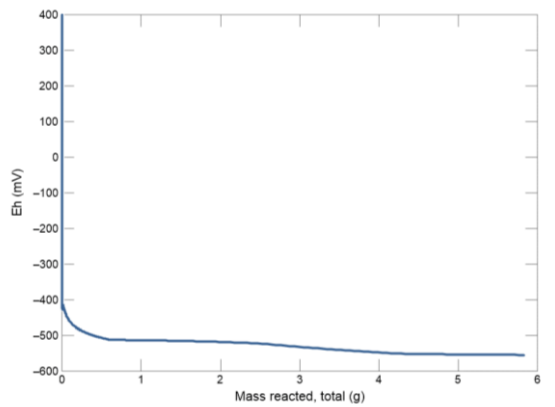
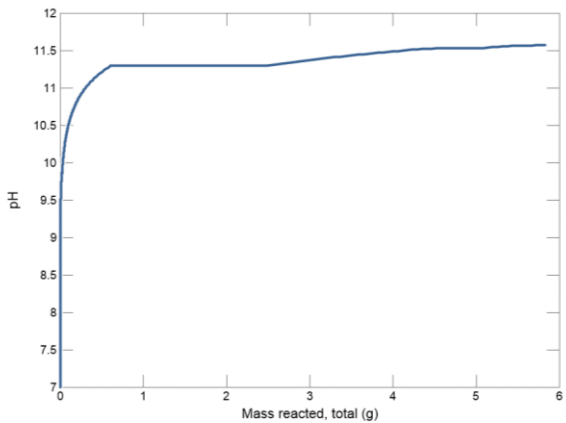
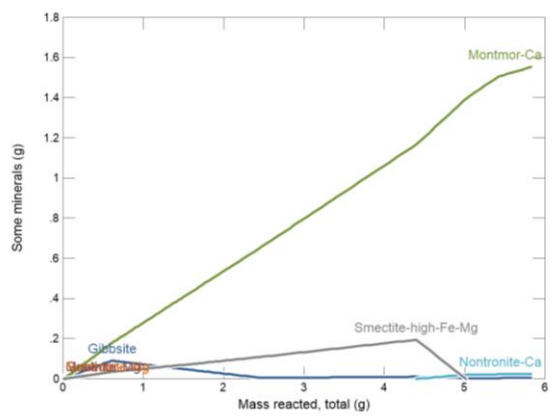
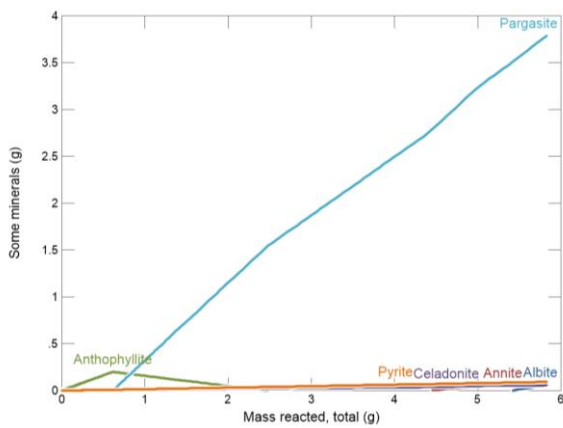
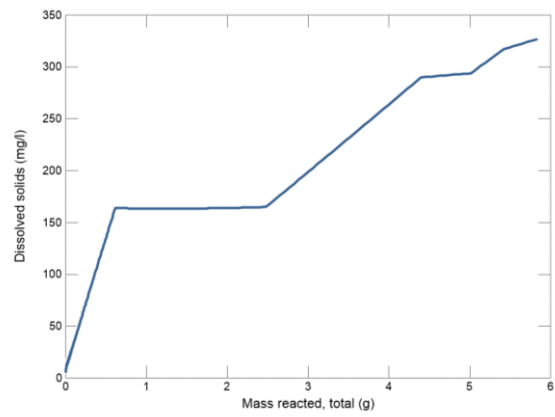
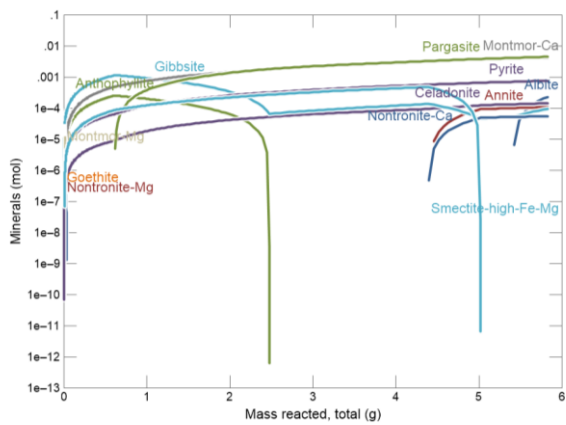
Rozpouštění amfibolitu v čisté vodě

Výsledky modelování vývoje parametrů v průběhu rozpouštění modelového amfibolitu v čisté vodě jsou uvedeny na Obr. 187. Po rozpuštění 5,5 g amfibolitu v čisté je dosaženo nasycení vody vůči většině primárních minerálů, pouze přeměna anortitu pokračuje až do jeho úplného spotřebování. U křemene není v systému na rozdíl od ruly dosaženo nasycení vůči chalcedonu. Díky vyšší koncentraci železa v amfibolitu se v produktech přeměny objevují kromě vápenatého montmorillonitu také jílové minerály obsahující železo – vápenatý nontronit a Fe-Mg smektit.

Ve srovnání s rulou je po dosažení stacionárního stavu dosaženo o jednotku vyšší pH a o 50 mV nižší oxidačně-redukční potenciál.

Na následující straně:

Obr. 187 Vývoj podmínek v průběhu rozpouštění modelového amfibolitu v čisté vodě. Postupně jsou uvedeny: zastoupené minerály v logaritmické škále, celková koncentrace rozpuštěných látek, zastoupené primární minerály, vznikající sekundární minerály, vývoj hodnot pH a oxidačně-redukčního potenciálu, koncentrace rozpuštěných složek a jejich speciace

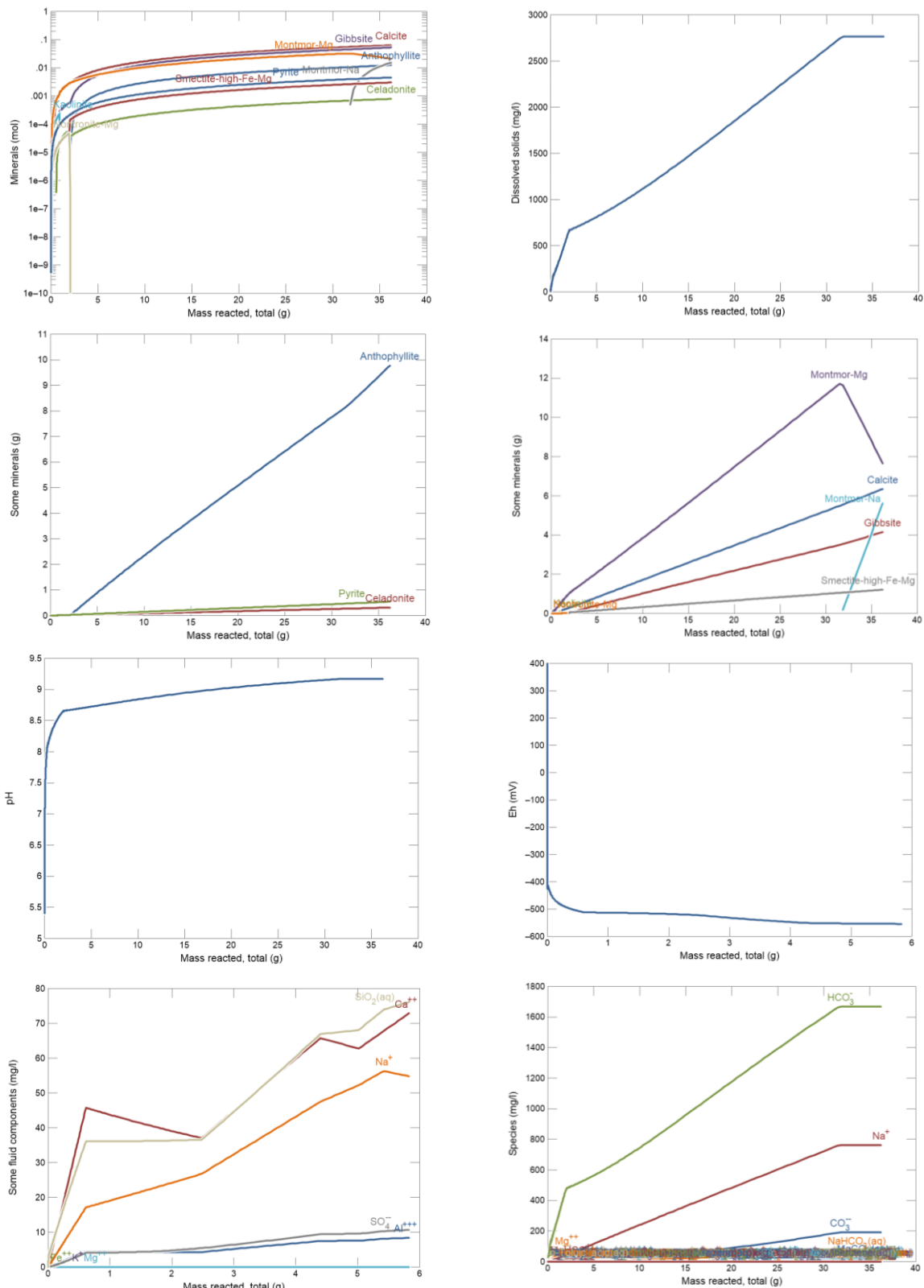


Rozpouštění amfibolitu v přítomnosti rozpuštěných karbonátových látek

Možné vlivy rozpuštěných karbonátových látek na rozpouštění hornin byl uveden u rozpouštění ruly. Geochemický model rozpouštění amfibolitu v přítomnosti karbonátových látek byl připraven ve stejné konfiguraci jako pro rulu, tedy s fugací $\text{CO}_2(g)$ rovnou 10^{-3} .

Výsledky modelování jsou uvedeny na Obr. 188. Přítomnost karbonátových látek má stejně jako u ruly radikální vliv na průběh rozpouštění amfibolitu. Změny pH v důsledku přeměny primárních aluminosilikátů jsou karbonátovými látkami významně utlumeny, pH dosáhne jen hodnoty 9,16 a pokles oxidačně-redukčního potenciálu je na hodnotu kolem ~550 mV.

Na rozdíl od rozpouštění v čisté vodě, je dosaženo nasycení vody pouze vůči pyritu, seladonitu a antofylitu, ostatní minerály se budou rozpouštět až do jejich úplného spotřebování. Hlavní složka ve vodě pak budou hydrogenuhličitanové a sodné iony.



Obr. 188 Vývoj podmínek v průběhu rozpouštění modelového amfibolitu ve vodě v přítomnosti karbonátových látek s $f_{\text{CO}_2} = 10^{-3}$. Postupně jsou uvedeny: zastoupené minerály v logaritmické škále, celková koncentrace rozpuštěných látek, zastoupené primární minerály, vznikající sekundární minerály, vývoj hodnot pH a oxidačně-redukčního potenciálu, koncentrace rozpuštěných složek a jejich speciace

Rozpouštění amfibolitu v modelové podzemní vodě

Pro sledování rozpouštění amfibolitu v modelové podzemní vodě byla vybrána stejně jako u ruly modelová podzemní voda BR51. Rozpouštění amfibolitu v modelové podzemní vodě probíhá v principu stejně jako v čisté vodě za přítomnosti rozpuštěných karbonátových látek. Rozdílem je srážení kalcitu, který spotřebovává uvolňující se vápenaté iony a proto místo Fe-Mg smektitu vznikají jílové minerály nontronity.

2.3.4.5.6 Souhrnné zhodnocení stability hornin

Hodnocení stability hornin bylo provedeno na dvou horninách, které jsou typické pro ložiskovou oblast Rožná. Z reálného minerálního a chemického složení hornin byly odvozeny modelové horniny a jejich stabilita byla posuzována v čisté vodě, ve vodě za přítomnosti rozpuštěných karbonátových látek a v modelové podzemní vodě, jejíž složení bylo odvozeno od reálné podzemní vody ložiskové oblasti Rožná.

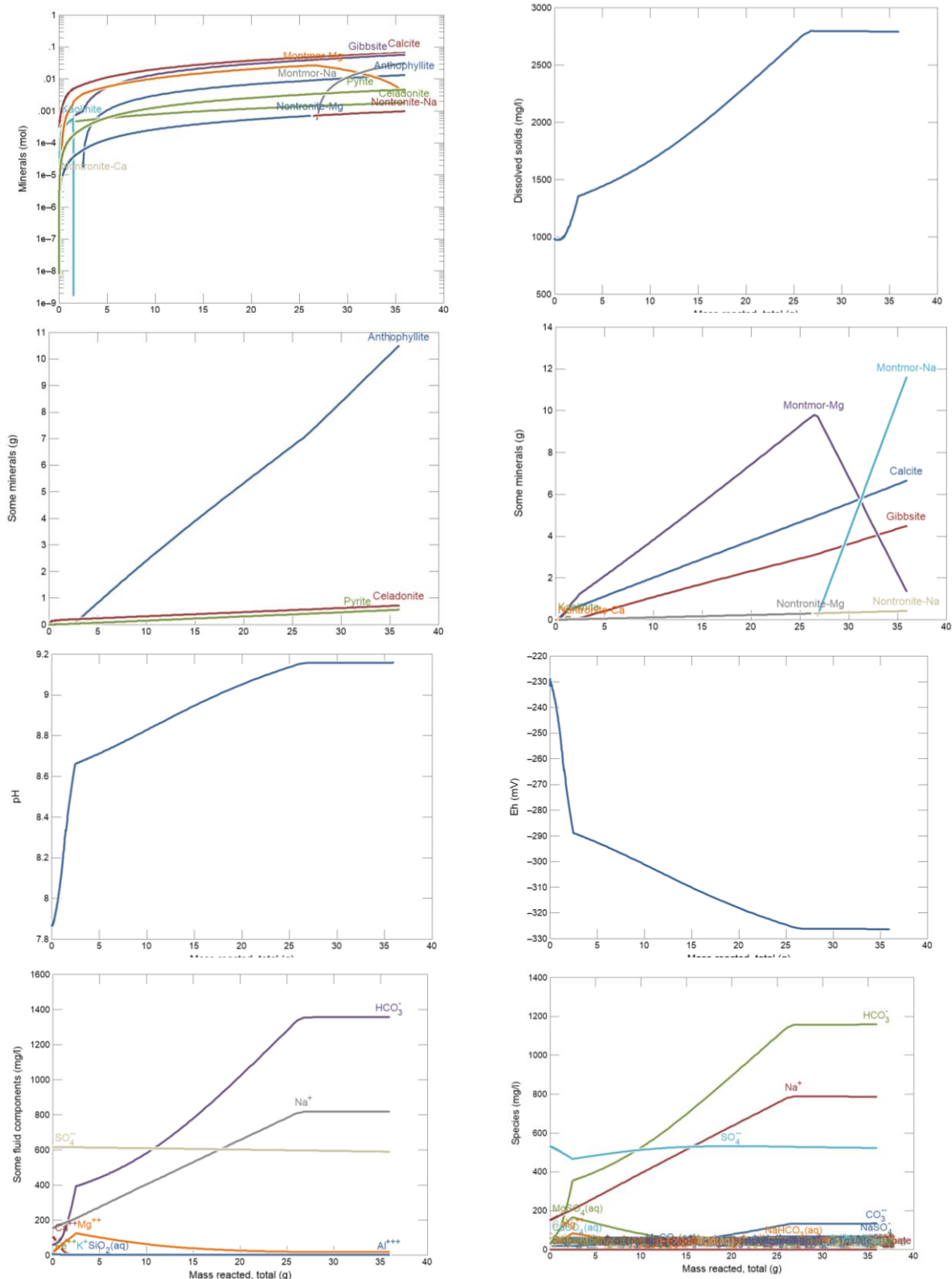
V čisté vodě jsou modelová rula a modelový amfibolit relativně nerozpustné. V 1 kg vody se rozpustí jen 8,5 g ruly a 5,5 g amfibolitu, přičemž je dosaženo stavu nasycení vůči většině horninotvorných minerálů. U ruly není dosaženo nasycení vůči anortitu a klinochloru, u amfibolitu vůči anortitu. Tyto minerály se přeměňují na sekundární produkty až do jejich úplného spotřebování.

Přítomnost rozpuštěných karbonátových látek v čisté i modelové vodě má zásadní vliv na vývoj rozpouštění ruly i amfibolitu. Především tlumení změn pH, ke kterým dochází v důsledku přeměny silikátových minerálů, zabraňuje dosažení nasycení vůči primárním minerálům a většina z primárních minerálů podlehně přeměně až do jejich úplného spotřebování. Z tohoto hlediska se mohou horniny jevit jako nestabilní.

V této souvislosti je však třeba vzít v úvahu další okolnosti. Rychlost přeměny primárních minerálů v anoxických podmínkách je velmi pomalá. Dosud provedené laboratorní experimenty a terénní měření ukazují, že k měřitelné přeměně primárních minerálů dochází v řádu statisíců až milionů let. Povrch minerálů se pokrývá sekundárními produkty, které výrazně zpomalují jejich další přeměnu.

Dalším faktorem, který výrazně zpomaluje rychlost přeměny, je nepoměr pevné a kapalné fáze. Geochemické modelování bylo provedeno s 1 kg čisté či modelové vody. Při uvažované porozitě ruly 1 % je však v 1 kg ruly jen 3,73 ml kapalné fáze (roztoku), který sice dosahuje extrémní koncentrace rozpuštěných látek 285 g l^{-1} , což ale znamená, že z 1 kg může být prouděním transportováno jen 3,32 g rozpuštěných látek, tj. 0,3 % minerálního obsahu horniny. Podobně je tomu u amfibolitu. Při uvažované porozitě amfibolitu 1 % je však v 1 kg amfibolitu jen 3,84 ml kapalné fáze (roztoku), který dosahuje extrémní koncentrace rozpuštěných látek $17,36 \text{ g l}^{-1}$, což ale znamená, že z 1 kg může být prouděním transportováno jen 0,92 g rozpuštěných látek, tj. 0,09 % minerálního obsahu horniny. Takto extrémně koncentrované roztoky v pórech hornin budou výrazně snižovat afinitu hornin k jejich rozpouštění a přeměně.

Pokud se vezmou v úvahu výše uvedené skutečnosti, pak je možné modelové horniny rulu a amfibolit považovat v řádu statisíců až milionů let za stabilní.



Obr. 189 Vývoj podmínek v průběhu rozpuštění modelového amfibolitu v modelové podzemní vodě BR51. Postupně jsou uvedeny: zastoupené minerály v logaritmické škále, celková koncentrace rozpuštěných látek, zastoupené primární minerály, vznikající sekundární minerály, vývoj hodnot pH a oxidačně-redukčního potenciálu, koncentrace rozpuštěných složek a jejich speciace

2.3.5 Stanovení FMV a geotechnických vlastností laboratorními testy

2.3.5.1 Úvod

Základní znalosti o fyzikálně-mechanických vlastnostech (FMV) hornin, tvořících zkoumaný horninový masiv jsou nezbytné pro kvalifikované posouzení jeho geotechnických a geomechanických parametrů a zároveň představují důležitý vstupní údaj pro případnou tvorbu následných geomechanických modelů. Znalosti o FMV hornin a horninového masivu jsou pak jednou ze zásadních informací také v procesu přípravy hlubinného úložiště (HÚ). Požadavek na hodnocení FMV horninového prostředí pro HÚ vyplývá z § 18, odst. 2, písm. d), l), m), n) vyhlášky SÚJB č. 378/2016 Sb. a je důležitý zejména z hlediska proveditelnosti úložiště. Upřesnění tohoto požadavku je pak obsaženo v metodickém pokynu MP.22 (SÚRAO 2017), ke kvantifikaci mezních hodnot FMV lze orientačně využít doporučení definovaných Anderssonem et al. (2000).

Laboratorní stanovení základních fyzikálních, technologických, pevnostních a přetvárných vlastností hornin z vybraných partií dolu Rožná bylo provedeno na dvou základních typech odebraných vzorků. Prvním z nich byly tzv. velkoobjemové vzorky, které byly odvrtny vrtnou korunkou o průměru 300 mm ze stěny důlního díla, zpravidla v místě jednotlivých geotechnických stanic (GS). Celkem bylo odvrtno 7 těchto velkoobjemových vzorků, konkrétně jeden na 12. patře (V-12), jeden na 18. patře (V-18), tři na 20. patře (V-20/1, V-20/2 a V-20/3) a dva na 22. patře (V-22 a V-22-R3). Z jednotlivých velkopřůměrových návrtů pak byly následně v laboratoři zhotoveny válcové zkušební vzorky o průměru 48 mm. Příprava laboratorních tělísek se prováděla ve třech základních směrech vůči texturním prvkům horniny – ve směru kolmém k metamorfní foliaci (tzv. směr K), ve směru rovnoběžném s metamorfní foliací (tzv. směr P) a ve směru kosém vůči metamorfní foliaci (tzv. směr S). Lokalizace odběrných míst velkoobjemových vzorků vyplývá z výseků situačních map jednotlivých studovaných pater dolu Rožná uvedených v kapitole 2.1.3 (Obr. 10 – Obr. 14). Zdůvodnění výběru míst pro lokalizaci geotechnických stanic a míst pro odběr velkoobjemových vzorků je uvedeno v kap. 2.1.2.

Druhou skupinu vzorků pro stanovení FMV hornin představovaly vzorky z vrtných jader vrtů, určených v rámci vybraných GS pro měření napětí horninového masivu (HM) metodou hydraulického štěpení stěn vrtu (BGS12-VD, BGS18-VD, BGS20/1-VD a BGS24-VD) a dále z pěti diagonálních vrtů určených k seismickému prozařování (BGS12-I, BGS18-I, BGS20/1-I a BGS24-I). V případě nedostatečného množství jádra byla k testování FMV využita i vrtná jádra dovrchních vrtů (BGS20/1-VU a BGS24-VU). Lokalizace geotechnických vrtů, obdobně jako velkoobjemových vzorků, je zachycena v Obr. 10 – Obr. 14.

2.3.5.2 Metodiky měření a vyhodnocování

Postupy a metodiky stanovení a vyhodnocování jednotlivých FMV vycházely z běžných technických norem (ČSN EN), souboru metod doporučených International Society for Rock Mechanics (ISRM), případně z dalších metodických předpisů a doporučení. Stanovení a popis FMV testovaných hornin byly prováděny v úzké vazbě na jejich petrografické složení, vnitřní stavbu, strukturní a texturní anizotropii v místě odběru vzorku.

Na zkušebních těliscích, připravených z velkoobjemových vzorků byly stanoveny následující FMV nebo materiálové parametry:

- měrná hmotnost (pyknometricky podle ČSN EN 1936),
- objemová hmotnost (na tělesech pravidelného tvaru podle ČSN 72 1154 a ČSN EN 1936),
- rychlost průchodu podélných ultrazvukových vln (podle ČSN EN 14579 na přístroji Maruto CH-48S a podle ISRM 1978a a Zavorala et al. 1987 na přístroji Olympus 5072PR),
- celková pórovitost (výpočtem z naměřených hodnot měrné a objemové hmotnosti),
- otevřená pórovitost (podle ČSN EN 1936),
- nasákavost do ustálení hmotnosti (podle ČSN EN 13755),
- charakterizace pórového prostoru pomocí rtuťové porozimetrie (stanoveno na rtuťovém porozimetru AUTOPORE 9500 fy. Micromeritics, USA),
- součinitel tepelné vodivosti a měrná tepelná kapacita (stanoveno na přístroji ISOMET 2114 podle manuálu výrobce),
- součinitel teplotní roztažnosti (stanoveno na termálním analyzáru SETSYS 12 fy. Setaram Instrumentation podle manuálu přístroje a podle ČSN EN 14581),
- tepelná difuzivita (výpočtem ze stanovených hodnot tepelné vodivosti a měrné tepelné kapacity),
- pevnost v prostém tlaku při standardním zatěžování (podle ČSN EN 1926 a doporučeného postupu ISRM 1979a),
- modul přetvárnosti a Poissonovo číslo horniny při zkoušce v prostém tlaku (metodikou podle Zavorala et al. 1987 a doporučeného postupu ISRM 1979b),
- modul přetvárnosti a elasticity při cyklickém zatěžování (podle interních metodických postupů Ústavu geoniky AV ČR, v. v. i., a podle Zavorala et al. 1987),
- pevnost v příčném tahu tzv. brazilskou zkouškou (postupy podle Zavorala et al. 1987 resp. doporučeného postupu ISRM 1978b),
- pevnost v tlaku za trojosého stavu napjatosti a konstrukce pevnostní obálky podle Hoek-Brownova kritéria porušení (podle interních metodických postupů Ústavu geoniky AV ČR, v. v. i., a podle Zavorala et al. 1987),
- plynopropustnost při různých plášťových tlacích (podle interního metodického postupu Ústavu geoniky AV ČR, v. v. i., na mechanickém lise ZWICK 1494, vybaveném Karmanovou triaxiální buňkou KTK 100 fy. UNIPRESS, Polsko),
- koeficient hydraulické vodivosti horniny (podle interních metodických postupů Ústavu geoniky AV ČR, v. v. i., a podle ČSN CEN ISO/TS 17892-11),
- abrazivnost horniny (metodou CERCHAR podle ASTM D7625-10),
- přirozená radioaktivita,
- elektrická vodivost,
- magnetická susceptibilita,
- parametry pórového prostoru ve výbrusech pomocí konfokální mikroskopie (metodikou podle Novákové et al. 2013).

Přirozená radioaktivita, elektrická vodivost a magnetická susceptibilita byly stanoveny kolektivem autorů RNDr. Jaromír Hanák, RNDr. Pavel Ondra a Ing. Ivan Kašparec, detailní metodiky a výsledky stanovení těchto petrofyzikálních vlastností jsou obsahem Elektronická příloha 31.

Na zkušebních těliscích, připravených z vrtného jádra geotechnických vrtů byl stanoven obdobný rozsah FMV jako na horninách z velkoobjemových vzorků s výjimkou abrazivnosti, přirozené radioaktivity, elektrické vodivosti a magnetické susceptibilita.

2.3.5.3 Výsledky stanovení FMV a GT vlastností hornin

Výsledky stanovení FMV hornin z velkoobjemových návrťů vybraných geotechnických vrtů, realizovaných v prostorech dolu Rožná v rozmezí 12. až 24. patra, jsou uvedeny v následujících – Tab. 107 a na Obr. 190 – Obr. 231. Přehled výsledků stanovení FMV je proveden po jednotlivých patrech dolů Rožná, na kterých byly vzorky odebírány. Souhrny FMV jednotlivých testovaných velkoobjemových (VO) vzorků i vrtů jsou pak také prezentovány v Elektronická příloha 24a Elektronická příloha 32.

2.3.5.3.1 Vzorky odebrané na 12. patře

Velkoobjemový vzorek V-12 (ÚGN č. 16432)

Tab. 14 Hodnoty fyzikálních, tepelných a technologických vlastností horniny VO vzorku V-12

Vlastnost	Jednotka	Počet stanovení	Průměrná hodnota	Minimální hodnota	Maximální hodnota
Měrná hmotnost	kg.m ⁻³	9	2849	2824	2878
Objemová hmotnost	kg.m ⁻³	93	2765	2676	2836
Celková pórovitost	%	9	3,23	2,26	4,20
Otevřená pórovitost	%	12	0,96	0,42	1,85
Nasákavost [%]	%	9	0,17	0,11	0,25
Rychlost šíření UV – směr K	km.s ⁻¹	22	5,23	4,89	5,55
Rychlost šíření UV – směr P	km.s ⁻¹	19	5,55	4,82	5,89
Rychlost šíření UV – směr S	km.s ⁻¹	27	5,39	4,94	5,82
Tepelná vodivost – směr K	W.m ⁻¹ .K ⁻¹	3	4,29	3,70	4,79
Tepelná vodivost – směr P	W.m ⁻¹ .K ⁻¹	3	4,44	4,16	4,65
Tepelná vodivost – směr S	W.m ⁻¹ .K ⁻¹	3	4,37	4,01	4,82
Tepelná kapacita – směr K	MJ.m ⁻³ .K ⁻¹	3	2,03	1,75	2,21
Tepelná kapacita – směr P	MJ.m ⁻³ .K ⁻¹	3	2,35	2,21	2,43
Tepelná kapacita – směr S	MJ.m ⁻³ .K ⁻¹	3	2,29	2,20	2,40
Tepelná difuzivita – směr K	mm ² .s ⁻¹	3	2,11	2,05	2,17
Tepelná difuzivita – směr P	mm ² .s ⁻¹	3	1,89	1,88	1,91

Vlastnost	Jednotka	Počet stanovení	Průměrná hodnota	Minimální hodnota	Maximální hodnota
Tepelná difuzivita – směr S	mm ² .s ⁻¹	3	1,90	1,82	2,01
Abrazivnost – směr K	-	2	3,78	3,43	4,13
Abrazivnost – směr P	-	2	3,40	2,94	3,85
Abrazivnost – směr S	-	2	3,15	2,77	3,52

Kromě stanovení celkové a otevřené pórovitosti a nasákavosti byly parametry pórovitosti horniny sledovány rovněž pomocí vysokotlaké rtuťové porozimetrie (MIP). MIP umožňuje měřit velikost a objem pórů v pevných kusových materiálech metodou vtlačování rtuti při narůstajícím tlaku. Při měření se využívá vlastností rtuti, zejména jejího povrchového napětí, přičemž při nízkých tlacích jsou zaplňovány velké (makro-) póry a při vysokých tlacích jsou zaplňovány menší (meso-, mikro-) póry. Celkový objem pórů je dán objemem vtlačené rtuti. Metoda je vhodná pro vyhodnocování meso- a makropórů a stanovení pórovitosti měřeného materiálu. Výsledky stanovení pórovitosti hornin z VO vzorku V-12 metodou MIP jsou uvedeny v Tab. 15. Velikost zkušebních tělísek činila přibližně 10 x 10 x 20 mm.

Tab. 15 Parametry pórovitosti hornin z VO vzorku V-12

Označení zkušebního tělíska	Celkový objem pórů [cm ³ .g ⁻¹]	Průměrná velikost póru (4V/A) [μm]	Pórovitost pomocí MIP [%]	
			dílčí hodnoty	průměr
16432/K7B/7	0,0027	0,0702	0,73	0,30
16432/P7B/4	0,0004	0,5283	0,12	
16432/S6A/8	0,0002	13,9196	0,06	

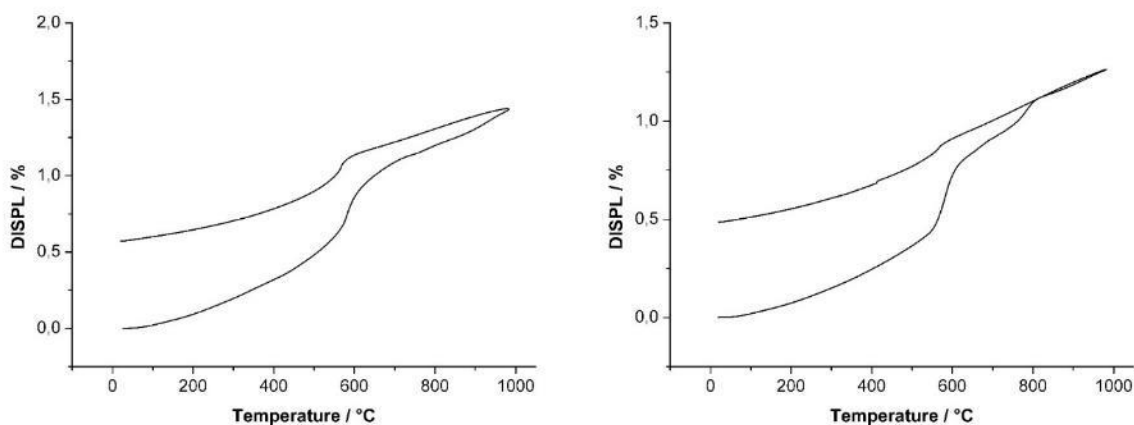
Tab. 16 uvádí výsledky měření koeficientu hydraulické vodivosti. Plášťový tlak byl v průběhu měření nastaven na hodnotu 0,55 MPa. Ve vzorku byl vytvořen hydraulický sklon na úrovni cca 1100 (výška vzorku je cca 45 mm, rozdíl tlakového sloupce vody byl nastaven na 50 m).

Tab. 16 Koeficient hydraulické vodivosti hornin z VO vzorku V-12

Označení zkušebního tělíska	Objemová hmotnost [kg.m ⁻³]	Pórovitost [obj. %]	Průměr k_{10} [m.s ⁻¹]	Směrodatná odchylka	Koeficient variability [%]
16432/K6A	2785	0,83	průtok pod mezí detekce		
16432/K6B	2741	1,19	8,8E-14	9,5E-15	10,9
16432/K7A	2768	2,18	průtok pod mezí detekce		
16432/P6A	2712	1,64	1,7E-13	2,3E-14	13,6
16432/P6B	2713	1,25	1,2E-13	2,3E-14	18,2
16432/P7A	2786	1,11	1,2E-13	2,5E-14	20,5
16432/S6B	2746	0,61	4,5E-13	2,5E-14	5,4
16432/S7A	2735	0,80	2,1E-13	5,0E-14	24,0
16432/S7B	2730	0,98	4,3E-13	1,0E-13	24,0

Výsledky studia teplotní roztažnosti hornin VO vzorku V-12 jsou prezentovány na Obr. 190, Tab. 17 pak udává vypočtené koeficienty délkové teplotní roztažnosti α do 150 °C a 1000 °C.

V Tab. 18 jsou přehlednou formou shrnuty výsledky studia základních pevnostních a přetvárných vlastností hornin VO vzorku V-12.



Obr. 190 Dilatační křivka tělíska 16432/K7B (ohřev na 1000 °C s následným ochlazením, vlevo - roztažnost sledována kolmo na foliaci, vpravo - roztažnost sledována ve směru foliace)

Tab. 17 Koeficienty teplotní tělíska vzorku 16432/K7B do 150 °C resp. 1000 °C

Označení zkušebního tělíska	Rozměry zkušebního tělíska [mm]	Teplota ohřevu [°C]	Rychlost ohřevu [°C/min]	Orientace vůči foliaci	α [K ⁻¹]
16432/K7B/10	10 x 10 x 10	1000	20	⊥	14,7·10 ⁻⁶
16432/K7B/13	10 x 10 x 10	1000	20	//	13,0·10 ⁻⁶
16432/K7B/8	10 x 10 x 10	150	1	⊥	5,8·10 ⁻⁶
16432/K7B/9	10 x 10 x 10	150	1	//	8,4·10 ⁻⁶

Tab. 18 Hodnoty pevnostních a přetvárných vlastností hornin z VO vzorku V-12

Vlastnost	Jednotka	Počet stanovení	Průměrná hodnota	Minimální hodnota	Maximální hodnota
Pevnost v prostém tlaku – <i>K</i>	MPa	5	134	93	157
Pevnost v prostém tlaku – <i>P</i>	MPa	5	119	53	193
Pevnost v prostém tlaku – <i>S</i>	MPa	5	119	104	132
Modul přetvárnosti – <i>směr K</i>	MPa	5	40434	20049	50721
Modul přetvárnosti – <i>směr P</i>	MPa	5	43896	23980	64363
Modul přetvárnosti – <i>směr S</i>	MPa	5	40394	29733	47494
Poissonovo číslo – <i>směr K</i>	-	5	0,22	0,19	0,25
Poissonovo číslo – <i>směr P</i>	-	5	0,23	0,14	0,29
Poissonovo číslo – <i>směr S</i>	-	5	0,17	0,10	0,20
Pevnost v příčném tahu – <i>tah⊥ k foliaci</i>	MPa	8	10,2	8,5	12,6
Pevnost v příčném tahu – <i>tah// s foliací</i>	MPa	8	17,0	14,5	18,5
Pevnost v příčném tahu – <i>tah45° k foliaci</i>	MPa	9	13,8	8,2	17,5

Kromě měření v jednoosém stavu napjatosti a při standardním způsobu zatěžování byly stanoveny rovněž pevnostní a přetvárné vlastnosti při cyklickém zatěžování.

V následující Tab. 19 jsou uvedeny hodnoty modulů přetvárnosti (E_{def}) vypočtené ze zatěžovací větve napěťo-přetvárného diagramu při cyklickém zatěžování horninových vzorků a moduly elasticity (pružnosti, resp. Youngovy moduly) E_{el} vypočtené z odlehčovací (vratné) větve cyklické zkoušky v jednoosém tlaku. Jednotlivé úrovně cyklického zatěžování (úroveň odlehčení zkušební tělesa) byly stanoveny na úroveň tlakového napětí cca 30 % ($E_{1\text{def}}$, $E_{1\text{el}}$) a 60 % ($E_{2\text{def}}$, $E_{2\text{el}}$) pevnosti v jednoosém tlaku.

Tab. 19 Hodnoty pevnosti v prostém tlaku σ_{Pd} , modulu přetvárnosti $E_{1\text{def}}$, $E_{2\text{def}}$ a modulu pružnosti $E_{1\text{el}}$ a $E_{2\text{el}}$ a jejich poměrů na VO vzorku V-12 v různých směrech zatěžování vůči metamorfní foliaci stanovené v režimu cyklického zatěžování

Označení zkušební tělíska	σ_{Pd} [MPa]	$E_{1\text{def}}$ [GPa]	$E_{1\text{el}}$ [GPa]	$E_{2\text{def}}$ [GPa]	$E_{2\text{el}}$ [GPa]	Poměr $E_{1\text{def}}/E_{1\text{el}}$ [-]	Poměr $E_{2\text{def}}/E_{2\text{el}}$ [-]
16432/K8	179	47	50	55	56	0,94	0,98
16432/K19	182	35	35	43	49	0,99	0,88
16432/P8	134	43	46	54	53	0,95	1,02
16432/P9	143	40	43	49	50	0,94	0,99
16432/S8	96	24	22	28	30	1,05	0,94
16432/S9	137	31	34	43	44	0,91	0,98

Pevnost hornin v trojosém stavu napjatosti byla stanovována při bočním (plášťovém, resp. laterálním) tlaku v rozmezí 5–15 MPa. Výsledky měření pro všechny testované laboratorní vzorky uvádí Tab. 20.

Na základě naměřených hodnot modulu přetvárnosti, pevnosti v prostém tlaku, příčném tahu a tlakových pevností za trojosého stavu napjatosti byly v programu RocData verze 5.005 (Rocscience Inc.) sestrojeny Mohrovy kružnice a jejich pevnostní obálka podle Hoek-Brownova kritéria porušení. V Obr. 191 je prezentováno srovnání tvaru pevnostních obálek pro VO vzorek V-12 v různých směrech zatěžování vůči metamorfní foliaci. Hodnoty materiálové konstanty m_i pro jednotlivé testované vzorky a jednotlivé směry zatěžování jsou uvedeny v Tab. 21.

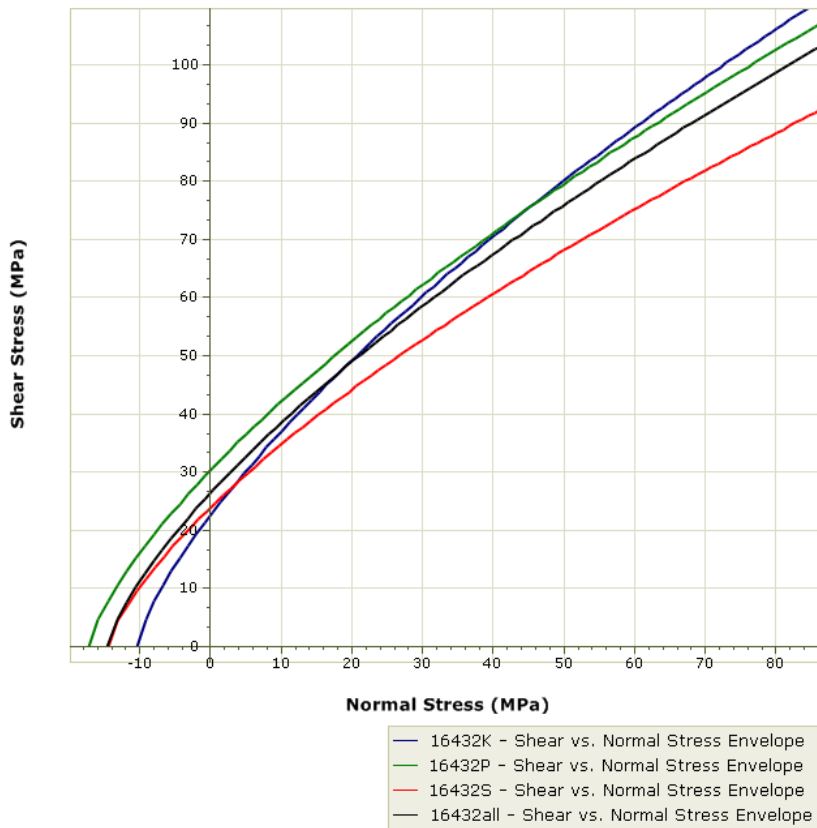
Měření koeficientu plynopropustnosti bylo provedeno na zkušebních tělesech o průměru 48 mm a délky cca 96 mm. Měření probíhalo za trojosého stavu napjatosti při hodnotách plášťového (bočního) tlaku 5, 10, 15, 20, 25 a 30 MPa. Jako měřicí médium byl použit dusík, rozdíl tlaků na vstupu a výstupu ze zkušební tělesa byl nastaven na 3 MPa u plášťového tlaku 5 MPa, u ostatních hodnot plášťových tlaků byl nastaven rozdíl 10 MPa. Naměřené výsledky hodnot koeficientu propustnosti pro jednotlivé směry K, P a S a jejich trend při zvětšujícím se plášťovém tlaku jsou zřejmé z Obr. 192 – Obr. 194.

Tab. 20 Hodnoty pevnosti hornin VO vzorku V-12 v trojosém stavu napjatosti při různém plášťovém tlaku v různých směrech zatěžování vůči metamorfní foliaci

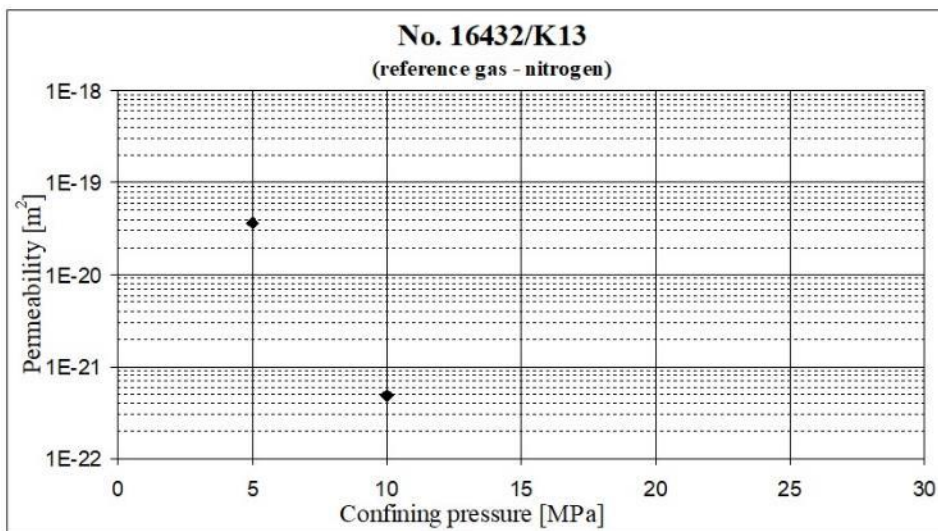
Označení zkušebního tělíška	Orientace zkušebního tělíška vůči foliaci	Plášťový tlak[MPa]	Pevnost v trojosém stavu napjatosti [MPa]
16432/K10	K	5	140
16432/K11		10	248
16432/K12		15	230
16432/P10	P	5	232
16432/P11		10	196
16432/P12		15	222
16432/S10	S	5	137
16432/S11		10	184
16432/S12		15	99

Tab. 21 Hodnoty globální pevnosti a materiálové konstanty m_i pro jednotlivé testované vzorky a jednotlivé směry zatěžování vypočtené v programu RocData (VO vzorek V-12)

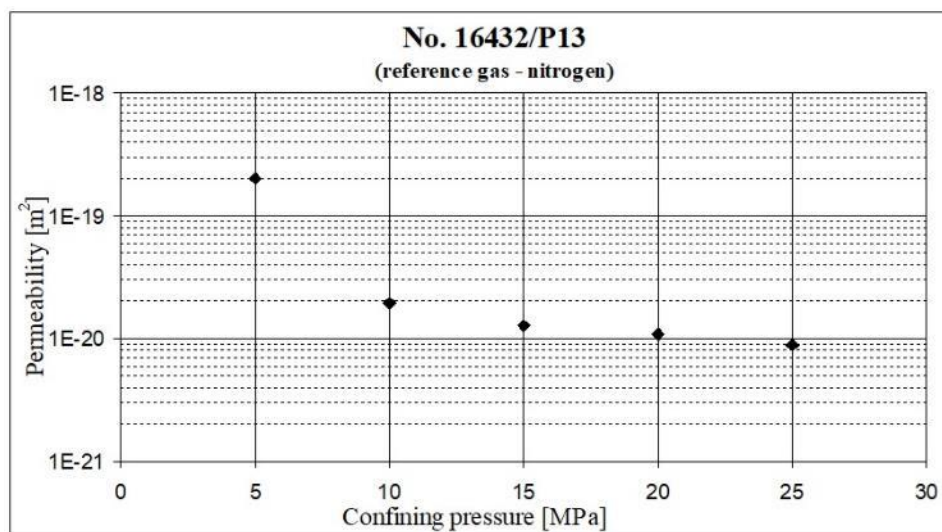
Označení vzorku / směr vůči foliaci	Globální pevnost intaktního vzorku σ_{ci} [MPa]	Materiálová konstanta m_i
16432 / směr K	140	13,4
16432 / směr P	157	9,1
16432 / směr S	118	8,1
16432 / celý vzorek	140	9,6



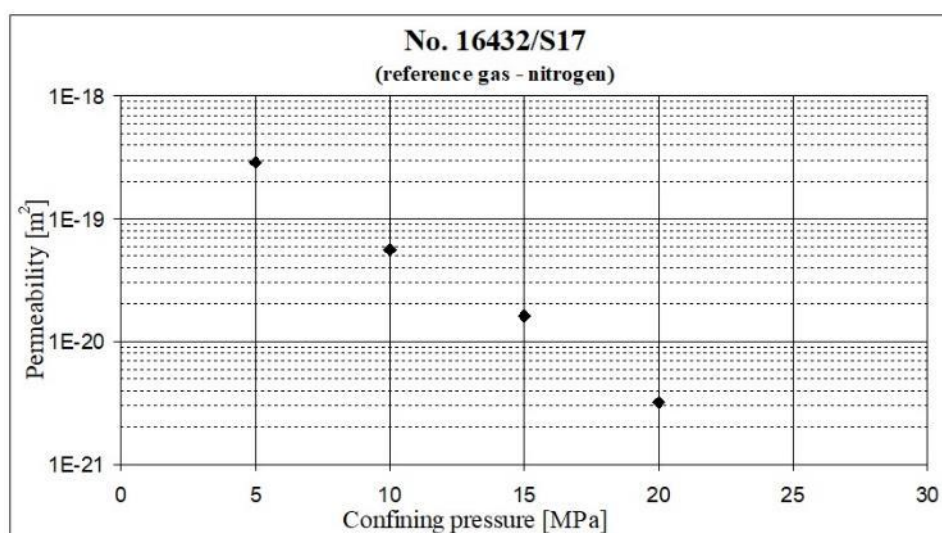
Obr. 191 Tvar pevnostních obálek zkonstruovaných podle Hoek-Brownova kritéria porušení v programu RocData pro VO vzorek V-12



Obr. 192 Plynopropustnost horniny VO vzorku V-12 (zkušební tělísko K13 navrtáno kolmo k foliaci)



Obr. 193 Plynopropustnost horniny VO vzorku V-12 (zkušební tělíčko P13 navrtáno rovnoběžně s foliací)



Obr. 194 Plynopropustnost horniny VO vzorku V-12 (zkušební tělíčko S17 navrtáno šikmo k foliaci)

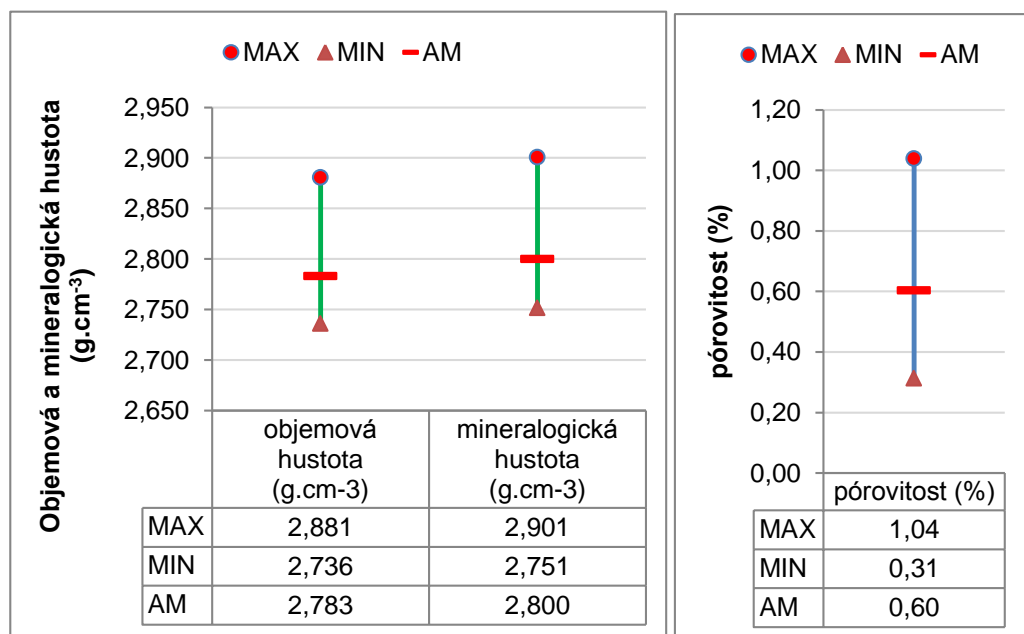
Kromě tělísek prezentovaných na Obr. 192 – Obr. 194 byla plynopropustnost stanovována rovněž u zkušební tělesa 16432/S13, byla však pod mezí detekce použitého laboratorního zařízení ($k < 1E-22 m^2$).

Stanovení hustotních parametrů (objemové hustoty, mineralogické hustoty, resp. měrné hmotnosti a pórovitosti), magnetické susceptibilitě, elektrické konduktivity a přirozené radioaktivity hornin a výpočet odvozené tepelné vodivosti jsou podrobně popsány ve zprávě Hanáka et al. (2019; Tab. 22; Elektronická příloha 31).

Tab. 22 Hustotní parametry, magnetická susceptibilita hornin z VO vzorku V-12 (KVR–kvarcit, BTT–biotitický, PYR–pyrit)

geotechnická stanice	číslo vzorku	geotechnický bod	hornina	hustotní parametry			magnetická susceptibilita
				objemová hustota	mineralogická hustota	pórovitost	
			KÓD	(g.cm ⁻³)	(g.cm ⁻³)	(%)	(10 ⁻⁶ j. SI)
V_12	16432	V12-1	KVR BTT PYR	2,748	2,759	0,42	10720,16
V_12	16432	V12-2	KVR BTT PYR	2,788	2,801	0,46	8491,77
V_12	16432	V12-3	KVR BTT PYR	2,881	2,901	0,69	2008,47
V_12	16432	S_V12-4	KVR BTT PYR	2,759	2,775	0,57	7850,12
V_12	16432	V12-5	KVR BTT PYR	2,769	2,778	0,31	4382,89
V_12	16432	V12-6	KVR BTT PYR	2,774	2,798	0,82	6646,16
V_12	16432	V12-7	KVR BTT PYR	2,757	2,785	1,01	10334,79
V_12	16432	V12-8	KVR BTT PYR	2,757	2,774	0,61	18843,10
V_12	16432	S_23B	KVR BTT PYR	2,774	2,783	0,33	8307,27
V_12	16432	K_20B	KVR BTT PYR	2,838	2,850	0,44	2284,46
V_12	16432	K_20A	KVR BTT PYR	2,815	2,845	1,04	2702,45
V_12	16432	S_23A	KVR BTT PYR	2,736	2,751	0,56	14070,27

U hornin z geotechnického bodu 16432 dle petrografického popisu (viz kapitola 2.3.1) je hornina určena jako biotitický kvarcit s pyritem – mineralogické hustoty jsou výrazně vyšší, než u ostatních hodnocených horninových vzorků a pohybují se mezi 2,800–2,901 g.cm⁻³. Vzhledem k poměrně významnému zrudnění (podle popisu výše je zde až 20 % pyritu, jehož udávaná hustota je 5,1 g.cm⁻³) jsou však přesto relativně nízké. Příčinu poměrně nízkých hustot je možno hledat v obsazích křemene (hustota 2,65 g.cm⁻³) či celkové pórovitosti, dokumentované chloritizací a sericitizací a blíže neurčených přeměnách pyritu. V grafu (Obr. 195) je zobrazena i efektivní pórovitost z tohoto odběrového bodu. Pohybuje se mezi 0,31 % až 1,04 %, horniny s pórovitostí nad 0,5 % jsou konvenčně považovány již za mírně alterované – což odpovídá výše uvedeným přeměnám (více viz Elektronická příloha 31).



Obr. 195 Statistika objemových (D_o) a mineralogických hustot (D_m) a pórovitosti (Por) u hornin z odběrového bodu 16432, AM aritmetický průměr, MIN minimum, MAX maximum – důlní dílo Rožná

Údaje o radioaktivitě na jednotlivých geotechnických stanicích nelze statisticky podrobněji zpracovat pro nedostatečný počet měření. Z každého velkoobjemového vzorku byly měřeny pouze tři vzorky, takže k vyhodnocení lze využít aritmetických průměrů. Jednotlivá měření jsou uvedena v Tab. 23, kde jsou červeně znázorněny hodnoty poměru U/eU , které jsou vyšší, než 1,3. V této tabulce jsou též uvedeny hodnoty vypočtené tepelné produkce (HUP) (více viz Hanák et al. 2019; Elektronická příloha 31).

Tab. 23 Hodnoty obsahů eTh , U , eU , K , a U/eU , včetně vypočtené tepelné produkce HPU stanovené pro vzorky z V-12

geotechnická stanice	geotechnický bod	laboratorní číslo vzorku	hornina	radioaktivita - aritmetické průměry z více měření jednoho vzorku				poměr $U(eU)$	tepelná produkce	počet měření na jednom vzorku
				Th	U	e U	K			
				KÓD	(ppm)	(ppm)	(ppm)		(%)	
V_12	16432	S_V12-4	KVR BTT PYR	5,6	3,7	5,1	1,8	0,7	1,9	2
V_12	16432	K_20B	KVR BTT PYR	1,0	0,4	0,3	2,2	1,3	0,3	2
V_12	16432	S_23A	KVR BTT PYR	7,3	2,8	5,4	2,6	0,5	2,1	2

Vysvětlivky: KVR-kvarcit, BTT-biotitický, PYR–pyrit

Geotechnický vrt BGS12-VD (ÚGN č. 16508)

Základní FMV hornin byly rovněž sledovány a hodnoceny u vzorků odebraných z vrtného jádra vybraných vrtů. Litologie všech hodnocených vrtů je uvedena v Elektronická příloha 14. Rozsah sledovaných vlastností byl obdobný jako v případě VO vzorků. Je však potřeba upozornit, že jakýkoliv vrt je zpravidla orientován v obecném směru vůči prvkům texturní anizotropie horninového masivu, a proto, až na některé výjimky jako je např. pevnost v příčném tahu, není v případě vrtů možno sledovat FMV v různých směrech (K, P a S) vůči metamorfní foliaci. V případě, že testování určité konkrétní FMV vyžadovalo použití většího počtu zkušebních tělísek (např. 5 tělísek u zkoušky pevnosti v prostém tlaku), byly tyto připraveny z pokud možno co nejkratšího úseku vrtného jádra.

Výsledky stanovení základních fyzikálních, tepelných a technologických vlastností hornin vrtu BGS12-VD jsou uvedeny v Tab. 24. Výsledky stanovení pórovitosti hornin z vrtu BGS12-VD metodou MIP uvádí Tab. 25. Tab. 26 uvádí výsledky měření koeficientu hydraulické vodivosti.

Tab. 24 Hodnoty fyzikálních, tepelných a technologických vlastností hornin z vrtu BGS12-VD

Vlastnost	Jednotka	Počet stanovení	Průměrná hodnota	Minimální hodnota	Maximální hodnota
Měrná hmotnost	kg.m ⁻³	5	2964	2901	3032
Objemová hmotnost	kg.m ⁻³	47	2851	2685	3032
Celková pórovitost	%	5	3,27	2,54	4,28
Otevřená pórovitost	%	3	0,31	0,28	0,33
Nasákavost [%]	%	3	0,05	0,05	0,05
Rychlost šíření UV	km.s ⁻¹	23	6,14	5,03	6,97
Tepelná vodivost	W.m ⁻¹ .K ⁻¹	3	2,51	2,44	2,73
Tepelná kapacita	MJ.m ⁻³ .K ⁻¹	3	2,19	2,17	2,22
Tepelná difuzivita	mm ² .s ⁻¹	3	1,14	1,08	1,23

Tab. 25 Parametry pórovitosti hornin z vrtu BGS12-VD

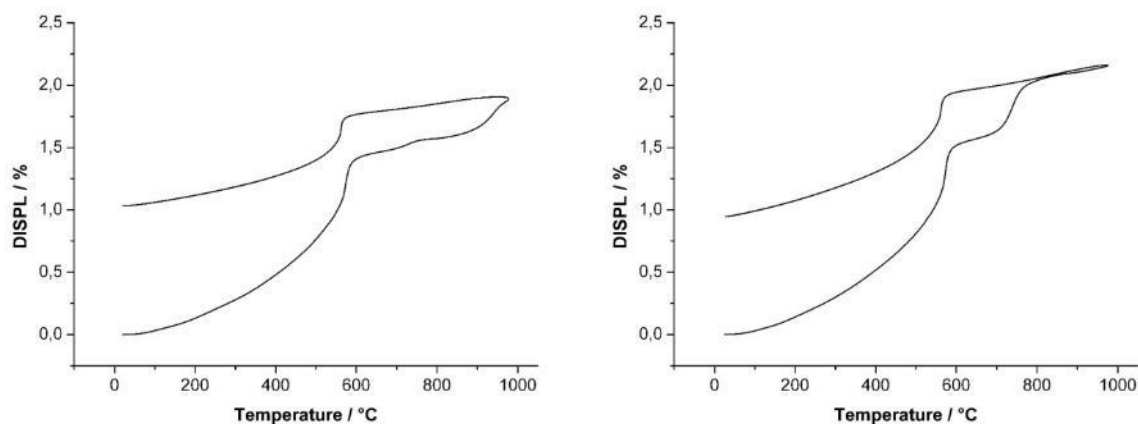
Označení zkušebního tělíska	Hlubková úroveň ve vrtu [m]	Celkový objem pórů [cm ³ .g ⁻¹]	Průměrná velikost póru (4V/A) [μm]	Pórovitost pomocí MIP [%]
16508/5,75-5,80/10	5,75–5,80	0,0041	0,0123	1,08

Tab. 26 Koeficient hydraulické vodivosti hornin z vrtu BGS12-VD

Označení zkušebního tělíska	Objemová hmotnost [kg.m ⁻³]	Pórovitost [obj. %]	Průměr k_{10} [m.s ⁻¹]	Směrodatná odchylka	Koeficient variability [%]
16 508/5,45-5,50	2757	0,30	3,6E-13	5,1E-14	14,0
16 508/5,50-5,55	2767	0,26	3,5E-13	1,0E-13	28,6
16 508/5,85-5,90	2783	0,34	8,3E-09	6,2E-10	7,4

Pozn.: Čísla za lomítkem v označení zkušebního tělíska znamenají vzdálenost od ústí vrtu.

Výsledky studia teplotní roztažnosti hornin vrtu BGS12-VD jsou prezentovány na Obr. 196, Tab. 27 pak udává vypočtené koeficienty délkové teplotní roztažnosti α do 150 °C a 1000 °C.



Obr. 196 Dilatační křivka tělíska 16508/5,75-5,80 (ohřev na 1000 °C s následným ochlazením, vlevo - roztažnost sledována kolmo na foliaci, vpravo - roztažnost sledována ve směru foliace)

V Tab. 28 jsou přehlednou formou shrnuty výsledky studia základních pevnostních a přetvárných vlastností hornin vrtu BGS12-VD.

Tab. 27 Koeficienty teplotní roztažnosti tělíska 16508/5,75-5,80 do 150 °C resp. 1000 °C

Označení zkušebního tělíska	Rozměry zkušebního tělíska [mm]	Teplota ohřevu [°C]	Rychlost ohřevu [°C/min]	Orientace vůči foliaci	α [K ⁻¹]
16508/5,75–5,80/19	10 x 10 x 10	1000	20	⊥	19,3.10 ⁻⁶
16508/5,75–5,80/17	10 x 10 x 10	1000	20	//	17,6.10 ⁻⁶
16508/5,75–5,80/16	10 x 10 x 10	150	1	⊥	6,0.10 ⁻⁶
16508/5,75–5,80/18	10 x 10 x 10	150	1	//	10,3.10 ⁻⁶

Pozn.: Obdobně, jako v případě Tab. 25 a Tab. 26, čísla za lomítkem v označení zkušebního tělíska znamenají vzdálenost od ústí vrtu. Tento styl označování bude platný pro veškerá zkušební tělíska ze všech testovaných geotechnických vrtů.

Tab. 28 Hodnoty pevnostních a přetvárných vlastností hornin z vrtu BGS12-VD

Vlastnost	Jednotka	Počet stanovení	Průměrná hodnota	Minimální hodnota	Maximální hodnota
Pevnost v prostém tlaku	MPa	5	166	147	181
Modul přetvárnosti	MPa	5	56780	44382	76592
Poissonovo číslo	-	5	0,23	0,19	0,26
Pevnost v příčném tahu – <i>tah</i> ⊥ k foliaci	MPa	5	13,2	11,2	16,7
Pevnost v příčném tahu – <i>tah</i> // s foliací	MPa	7	11,5	7,2	16,1
Pevnost v příčném tahu - <i>tah</i> 45° k foliaci	MPa	5	14,0	11,6	16,6

Tab. 29 prezentuje hodnoty modulů přetvárnosti (E_{def}) a modulů elasticity (pružnosti, resp. Youngovy moduly) E_{el} stanovené při cyklickém zatěžování vzorku v režimu jednoosého tlaku.

V Tab. 30 jsou uvedeny výsledky stanovení triaxiální pevnosti hornin vrtu BGS12-VD. Hodnoty materiálové konstanty m_i pro jednotlivé testované vzorky a jednotlivé směry zatěžování jsou prezentovány v Tab. 31. Obr. 197 uvádí pevnostní obálku horniny z vrtu BGS12-VD sestavenou podle Hoek-Brownova kritéria porušení.

Tab. 29 Hodnoty pevnosti v prostém tlaku σ_{Pd} , modulu přetvárnosti E_{1def} , E_{2def} a modulu pružnosti E_{1el} a E_{2el} a jejich poměrů na zkušebních těliscích hornin z vrtu BGS12-VD v režimu cyklického zatěžování

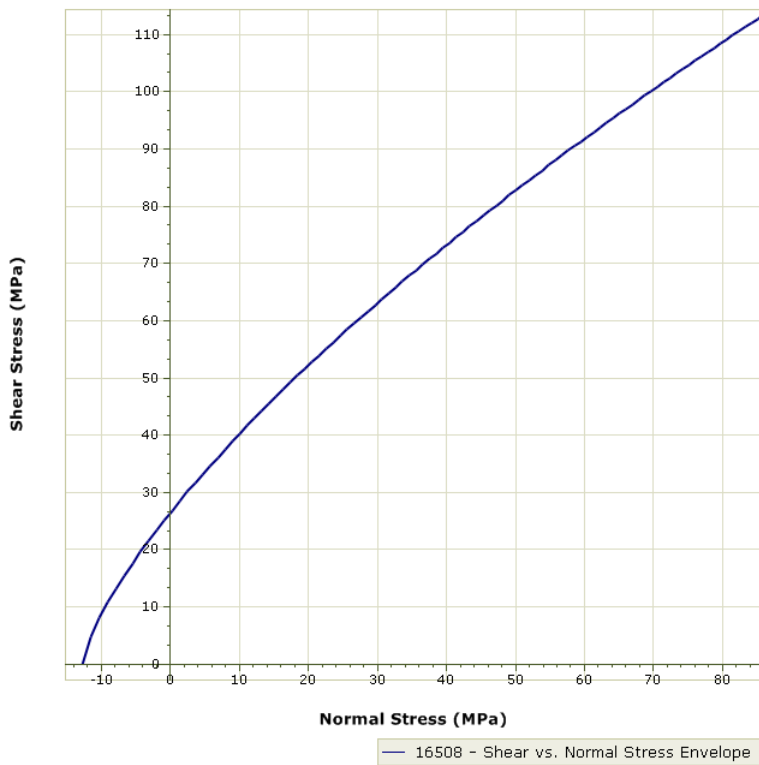
Označení zkušebního tělíska	σ_{Pd} [MPa]	E_{1def} [GPa]	E_{1el} [GPa]	E_{2def} [GPa]	E_{2el} [GPa]	Poměr E_{1def}/E_{1el} [-]	Poměr E_{2def}/E_{2el} [-]
16508/32,25-32,35	159	60	62	70	71	0,97	0,98
16508/32,40-32,50	185	56	63	70	73	0,89	0,96

Tab. 30 Hodnoty pevnosti hornin vrtu BGS12-VD v trojosém stavu napjatosti při různém plášťovém tlaku

Označení zkušebního tělíska	Orientace zkušebního tělíska vůči foliaci	Plášťový tlak [MPa]	Pevnost v trojosém stavu napjatosti [MPa]
16508/30,40-30,50	S	5	96
16508/30,50-30,60		10	158
16508/31,10-31,20		15	262

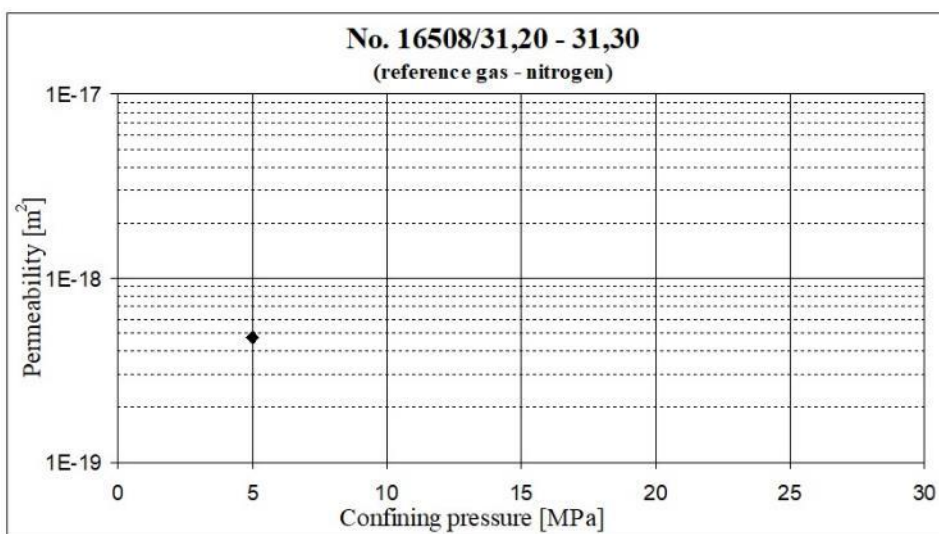
Tab. 31 Hodnoty globální pevnosti a materiálové konstanty m_i pro horniny vrtu BGS12-VD vypočtené v programu RocData

Označení vzorku	Globální pevnost intaktního vzorku σ_{ci} [MPa]	Materiálová konstanta m_i
16508	156	12,2



Obr. 197 Tvar pevnostní obálky zkonstruované podle Hoek-Brownova kritéria porušení v programu RocData pro vrt BGS12-VD

V Obr. 198 jsou znázorněny výsledky stanovení koeficientu plynopropustnosti horniny z vrtu BGS12-VD. Jak vyplývá z prezentovaného grafu, v případě zkušební tělíska 16508/31,20–31,30 bylo možno provést měření plynopropustnosti pouze při hodnotě plášťového tlaku 5 MPa. Při jeho zvýšení na úroveň 10 MPa došlo k uzavření pórové struktury horniny, což se projevilo nulovým průtokem měřicího média (dusíku) objemem horniny.



Obr. 198 Plynopropustnost horniny z vrtu BGS12-VD (hlubková úroveň 31,20-31,30 m)

Geotechnický vrt BGS12-I (ÚGN č. 16507)

Výsledky stanovení základních FMV a geotechnických vlastností hornin vrtu BGS12-I jsou uvedeny v následujících Tab. 32 – Tab. 39 a Obr. 199 až Obr. 201.

Tab. 32 Hodnoty fyzikálních, tepelných a technologických vlastností hornin z vrtu BGS12-I

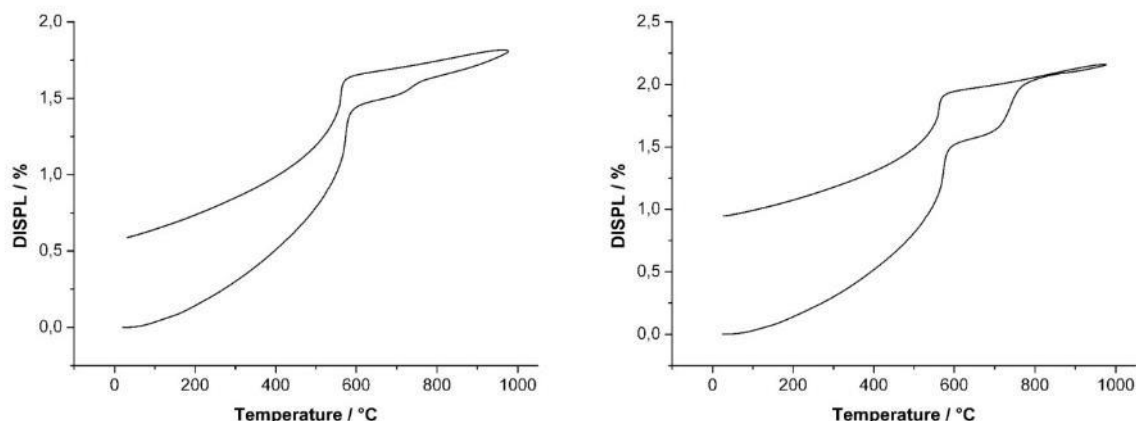
Vlastnost	Jednotka	Počet stanovení	Průměrná hodnota	Minimální hodnota	Maximální hodnota
Měrná hmotnost	kg.m ⁻³	5	2779	2742	2803
Objemová hmotnost	kg.m ⁻³	33	2765	2640	3042
Celková pórovitost	%	5	2,47	1,90	3,07
Otevřená pórovitost	%	3	0,33	0,28	0,37
Nasákavost [%]	%	3	0,10	0,09	0,12
Rychlost šíření UV	km.s ⁻¹	14	5,56	4,74	6,77
Tepelná vodivost	W.m ⁻¹ .K ⁻¹	3	3,04	2,87	3,27
Tepelná kapacita	MJ.m ⁻³ .K ⁻¹	3	2,18	2,12	2,21
Tepelná difuzivita	mm ² .s ⁻¹	3	1,40	1,35	1,48

Tab. 33 Parametry pórovitosti hornin z vrtu BGS12-I

Označení zkušebního tělíska	Hlubková úroveň ve vrtu [m]	Celkový objem pórů [cm ³ .g ⁻¹]	Průměrná velikost póru (4V/A) [μm]	Pórovitost pomocí MIP [%]
16507/2,75–2,80/1	2,75–2,80	0,0009	3,2241	0,24

Tab. 34 Koeficient hydraulické vodivosti hornin z vrtu BGS12-I

Označení zkušebního tělíska	Objemová hmotnost [kg.m ⁻³]	Pórovitost [obj. %]	Průměr k ₁₀ [m.s ⁻¹]	Směrodatná odchylka	Koeficient variability [%]
16 507/2,60–2,65	2711	0,35	2,71E-13	8,8E-15	3,2
16 507/7,10–7,15	3044	0,31	2,75E-13	8,9E-15	3,2
16 507/7,15–7,20	2892	0,42	1,09E-12	3,5E-14	3,2



Obr. 199 Dilatační křivka tělíska 16507/2,75-2,80 (ohřev na 1000 °C s následným ochlazením, vlevo - roztažnost sledována kolmo na foliaci, vpravo - roztažnost sledována ve směru foliace)

Tab. 35 Koeficienty teplotní roztažnosti tělíska 16507/2,75-2,80 do 150 °C, resp. 1000 °C

Označení zkušebního tělíska	Rozměry zkušebního tělíska [mm]	Teplota ohřevu [°C]	Rychlost ohřevu [°C/min]	Orientace vůči foliaci	α [K ⁻¹]
16507/2,75-2,80/14	10 x 10 x 10	1000	20	⊥	16,6.10 ⁻⁶
16507/2,75-2,80/17	10 x 10 x 10	1000	20	//	18,6.10 ⁻⁶
16507/2,75-2,80/18	10 x 10 x 10	150	1	⊥	8,6.10 ⁻⁶
16507/2,75-2,80/19	10 x 10 x 10	150	1	//	8,5.10 ⁻⁶

Tab. 36 Hodnoty pevnostních a přetvárných vlastností hornin z vrtu BGS12-I

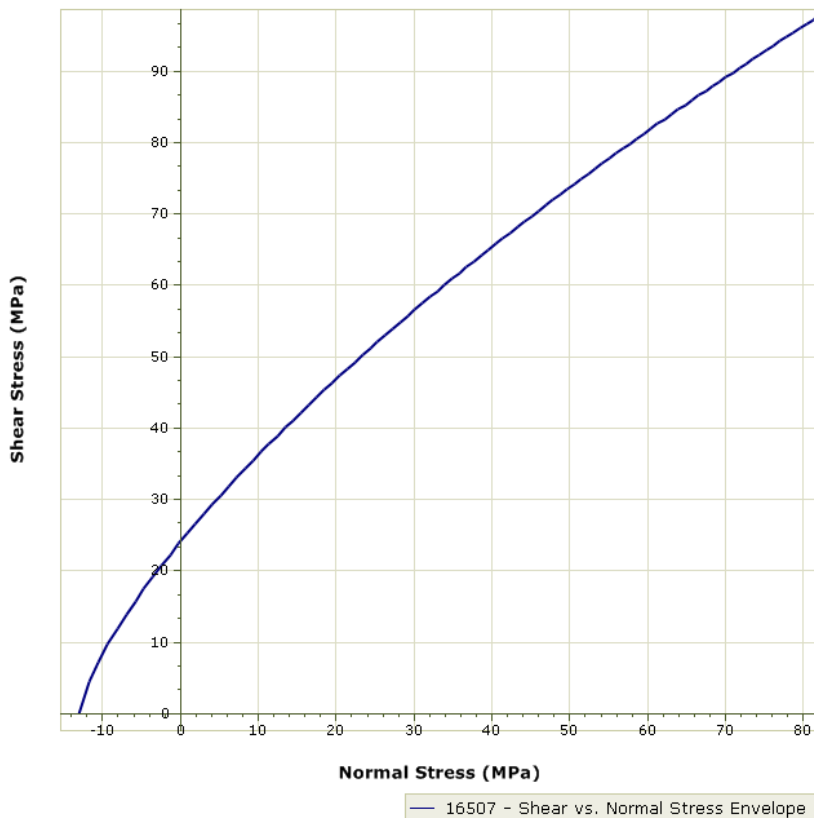
Vlastnost	Jednotka	Počet stanovení	Průměrná hodnota	Minimální hodnota	Maximální hodnota
Pevnost v prostém tlaku	MPa	5	110	30	172
Modul přetvárnosti	MPa	5	41658	19948	59317
Poissonovo číslo	-	5	0,25	0,19	0,37
Pevnost v příčném tahu –tah ⊥ k foliaci	MPa	4	11,0	9,4	13,2
Pevnost v příčném tahu –tah // s foliací	MPa	6	15,1	12,8	20,0
Pevnost v příčném tahu –tah 45° k foliaci	MPa	5	13,1	11,4	16,5

Tab. 37 Hodnoty pevnosti v prostém tlaku σ_{Pd} , modulu přetvárnosti E_{1def} , E_{2def} a modulu pružnosti E_{1el} a E_{2el} a jejich poměrů na zkušebních tělískách hornin z vrtu BGS12-I v režimu cyklického zatěžování

Označení zkušebního tělíska	σ_{Pd} [MPa]	E_{1def} [GPa]	E_{1el} [GPa]	E_{2def} [GPa]	E_{2el} [GPa]	Poměr E_{1def}/E_{1el} [-]	Poměr E_{2def}/E_{2el} [-]
16507/1,00-1,10	175	59	59	67	68	0,99	0,98
16507/1,17-1,27	161	24	27	36	38	0,90	0,94

Tab. 38 Hodnoty pevnosti hornin vrtu BGS12-I v trojosém stavu napjatosti při různém plášťovém tlaku

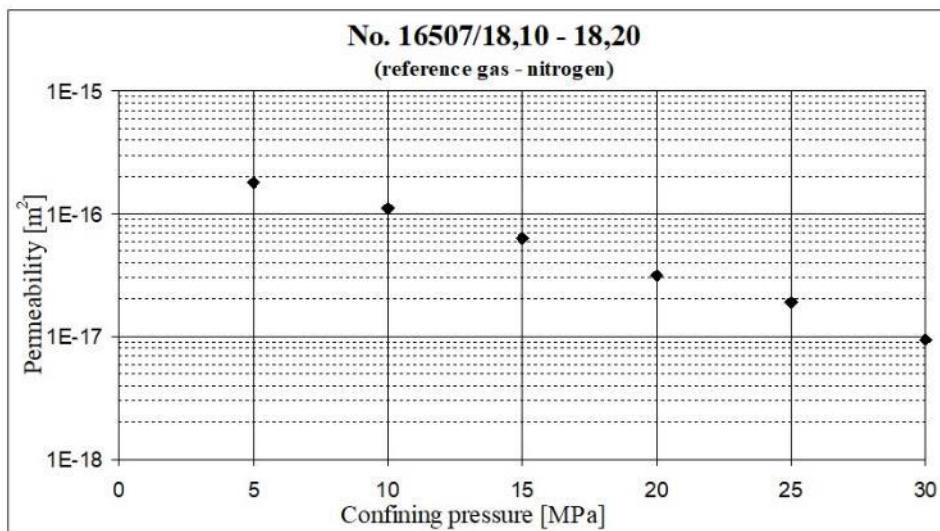
Označení zkušebního tělíska	Orientace zkušebního tělíska vůči foliaci	Plášťový tlak [MPa]	Pevnost v trojosém stavu napjatosti [MPa]
16507/15,00–15,10	S	5	133
16507/15,15–15,25		10	148
16507/15,40–15,50		15	147



Obr. 200 Tvar pevnostní obálky zkonstruované podle Hoek-Brownova kritéria porušení v programu RocData pro vrt BGS12-I

Tab. 39 Hodnoty globální pevnosti a materiálové konstanty m_i pro horniny vrtu BGS12-I vypočtené v programu RocData

Označení vzorku	Globální pevnost intaktního vzorku σ_{ci} [MPa]	Materiálová konstanta m_i
16507	130	10,0



Obr. 201 Plynopropustnost horniny z vrtu BGS12-I (hloubková úroveň 18,10–18,20 m)

2.3.5.3.2 Vzorky odebrané na 18. patře**Velkoobjemový vzorek V-18 (ÚGN č. 16273)**

Výsledky stanovení základních FMV a geotechnických vlastností hornin VO vzorku V-18 jsou uvedeny v následujících Tab. 40 – Tab. 47 a Obr. 202 až Obr. 206.

Tab. 40 Hodnoty fyzikálních, tepelných a technologických vlastností horniny VO vzorku V-18

Vlastnost	Jednotka	Počet stanovení	Průměrná hodnota	Minimální hodnota	Maximální hodnota
Měrná hmotnost	kg.m ⁻³	10	2781	2779	2783
Objemová hmotnost	kg.m ⁻³	91	2717	2615	3001
Celková pórovitost	%	10	1,85	1,40	2,30
Otevřená pórovitost	%	12	0,42	0,38	0,49
Nasákavost [%]	%	9	0,13	0,12	0,17
Rychlost šíření UV - směr K	km.s ⁻¹	19	3,88	3,32	4,77
Rychlost šíření UV - směr P	km.s ⁻¹	20	4,98	4,45	5,69
Rychlost šíření UV - směr S	km.s ⁻¹	24	4,48	3,28	5,56
Tepelná vodivost - směr K	W.m ⁻¹ .K ⁻¹	3	2,63	2,40	3,00
Tepelná vodivost – směr P	W.m ⁻¹ .K ⁻¹	3	2,86	2,62	3,06
Tepelná vodivost – směr S	W.m ⁻¹ .K ⁻¹	3	2,67	2,48	2,90
Tepelná kapacita – směr K	MJ.m ⁻³ .K ⁻¹	3	2,15	2,13	2,18
Tepelná kapacita - směr P	MJ.m ⁻³ .K ⁻¹	3	2,22	2,17	2,26
Tepelná kapacita - směr S	MJ.m ⁻³ .K ⁻¹	3	2,16	2,09	2,20
Tepelná difuzivita – směr K	mm ² .s ⁻¹	3	1,23	1,13	1,38
Tepelná difuzivita – směr P	mm ² .s ⁻¹	3	1,29	1,21	1,35
Tepelná difuzivita – směr S	mm ² .s ⁻¹	3	1,24	1,14	1,32
Abrazivnost - směr K	-	1	4,75	-	-
Abrazivnost - směr P	-	1	4,64	-	-
Abrazivnost - směr S	-	1	4,92	-	-

Výsledky stanovení pórovitosti hornin z VO vzorku V-18 metodou MIP jsou uvedeny v Tab. 41.

Tab. 41 Parametry pórovitosti hornin z VO vzorku V-18

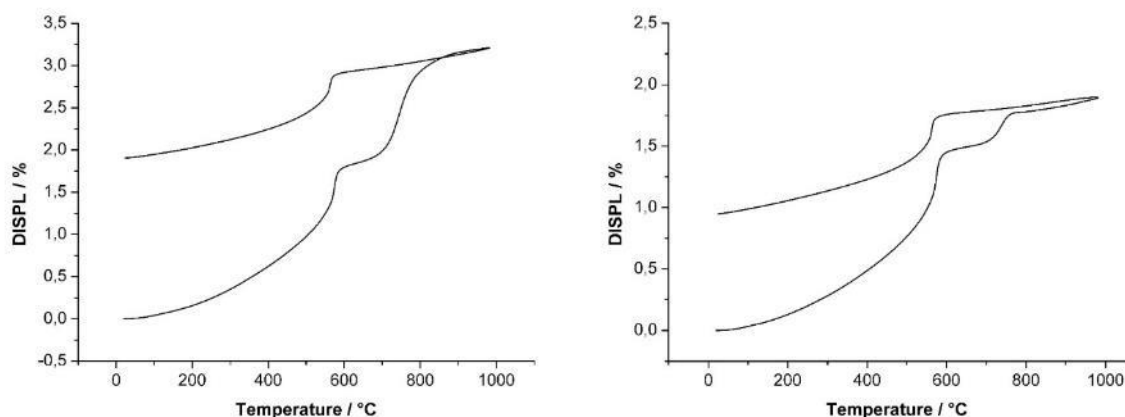
Označení zkušebního tělíska	Celkový objem pórů [cm ³ .g ⁻¹]	Průměrná velikost póru (4V/A) [μm]	Pórovitost pomocí MIP [%]	
			dílčí hodnoty	průměr
16273/K7B/8	0,0016	0,3077	0,44	0,42
16273/P6B/1	0,0015	0,1650	0,40	
16273/S7B/5	0,0016	0,2999	0,42	

Tab. 42 uvádí výsledky měření koeficientu hydraulické vodivosti hornin VO vzorku V-18.

Tab. 42 Koeficient hydraulické vodivosti hornin z VO vzorku V-18

Označení zkušebního tělíska	Objemová hmotnost [kg.m ⁻³]	Pórovitost [obj. %]	Průměr k ₁₀ [m.s ⁻¹]	Směrodatná odchylka	Koeficient variability [%]
16273/K6A	2713	0,45	1,3E-11	1,4E-12	10,4
16273/K6B	2722	0,45	2,3E-12	3,8E-13	16,4
16273/K7A	2724	0,42	4,4E-13	3,2E-14	7,2
16273/P6A	2666	0,41	6,1E-12	6,7E-14	1,1
16273/P7A	2718	0,50	8,5E-12	9,3E-14	1,1
16273/P7B	2710	0,43	5,4E-12	6,0E-14	1,1
16273/S6A	2722	0,40	8,8E-13	3,5E-14	4,0
16273/S6B	2716	0,41	1,0E-12	1,1E-13	10,6
16273/S7A	2713	0,42	2,2E-12	8,9E-14	4,0

Výsledky studia teplotní roztažnosti hornin VO vzorku V-18 jsou prezentovány na Obr. 202, Tab. 43 pak udává vypočtené koeficienty délkové teplotní roztažnosti α do 150 °C a 1000 °C.



Obr. 202 Dilatační křivka tělíska 16273/K7B (ohřev na 1000 °C s následným ochlazením, vlevo - roztažnost sledována kolmo na foliaci, vpravo - roztažnost sledována ve směru foliace)

Tab. 43 Koeficienty teplotní roztažnosti tělíska 16273/K7B do 150 °C, resp. 1000 °C

Označení zkušebního tělíska	Rozměry zkušebního tělíska [mm]	Teplota ohřevu [°C]	Rychlost ohřevu [°C/min]	Orientace vůči foliaci	α [K ⁻¹]
16273/K7B/10	10 x 10 x 10	1000	20	⊥	$33,5 \cdot 10^{-6}$
16273/K7B/16	10 x 10 x 10	1000	20	//	$20,3 \cdot 10^{-6}$
16273/K7B/11	10 x 10 x 10	150	1	⊥	$9,9 \cdot 10^{-6}$
16273/K7B/19	10 x 10 x 10	150	1	//	$8,2 \cdot 10^{-6}$

V Tab. 44 jsou přehlednou formou shrnuty výsledky studia základních pevnostních a přetvárných vlastností hornin VO vzorku V-18.

V Tab. 45 jsou uvedeny hodnoty modulů přetvárnosti (E_{def}) a modulů elasticity (pružnosti, resp. Youngovy moduly) E_{el} stanovené z cyklické zkoušky v jednoosém tlaku.

Tab. 44 Hodnoty pevnostních a přetvárných vlastností hornin z VO vzorku V-18

Vlastnost	Jednotka	Počet stanovení	Průměrná hodnota	Minimální hodnota	Maximální hodnota
Pevnost v prostém tlaku - <i>K</i>	MPa	5	113	85	136
Pevnost v prostém tlaku - <i>P</i>	MPa	5	121	111	139
Pevnost v prostém tlaku - <i>S</i>	MPa	5	120	94	159
Modul přetvárnosti - <i>směr K</i>	MPa	5	32486	23124	38396
Modul přetvárnosti - <i>směr P</i>	MPa	5	40350	37370	46410
Modul přetvárnosti - <i>směr S</i>	MPa	5	40859	30594	65196
Poissonovo číslo – <i>směr K</i>	-	5	0,13	0,11	0,16
Poissonovo číslo – <i>směr P</i>	-	5	0,16	0,14	0,17
Poissonovo číslo – <i>směr S</i>	-	5	0,18	0,11	0,32
Pevnost v příčném tahu – <i>tah ⊥ k foliaci</i>	MPa	9	5,0	2,6	5,8
Pevnost v příčném tahu – <i>tah // s foliací</i>	MPa	10	9,4	8,0	12,6
Pevnost v příčném tahu – <i>tah 45° k foliaci</i>	MPa	9	7,0	6,4	7,8

Tab. 45 Hodnoty pevnosti v prostém tlaku σ_{Pd} , modulu přetvárnosti E_{1def} , E_{2def} a modulu pružnosti E_{1el} a E_{2el} a jejich poměrů na VO vzorku V-18 v různých směrech zatěžování vůči metamorfní foliaci stanovené v režimu cyklického zatěžování

Označení zkušebního tělíska	σ_{Pd} [MPa]	E_{1def} [GPa]	E_{1el} [GPa]	E_{2def} [GPa]	E_{2el} [GPa]	Poměr E_{1def}/E_{1el} [-]	Poměr E_{2def}/E_{2el} [-]
16273/K8	106	28	32	40	41	0,87	0,96
16273/K9	125	26	31	38	40	0,84	0,96
16273/P8	105	24	30	37	40	0,79	0,93
16273/P9	129	28	37	42	44	0,77	0,95
16273/S8	83	27	38	39	44	0,73	0,90
16273/S9	135	35	42	49	51	0,82	0,96

Výsledky stanovení pevnosti hornin v trojosém stavu napjatosti pro všechny testované laboratorní vzorky uvádí Tab. 46.

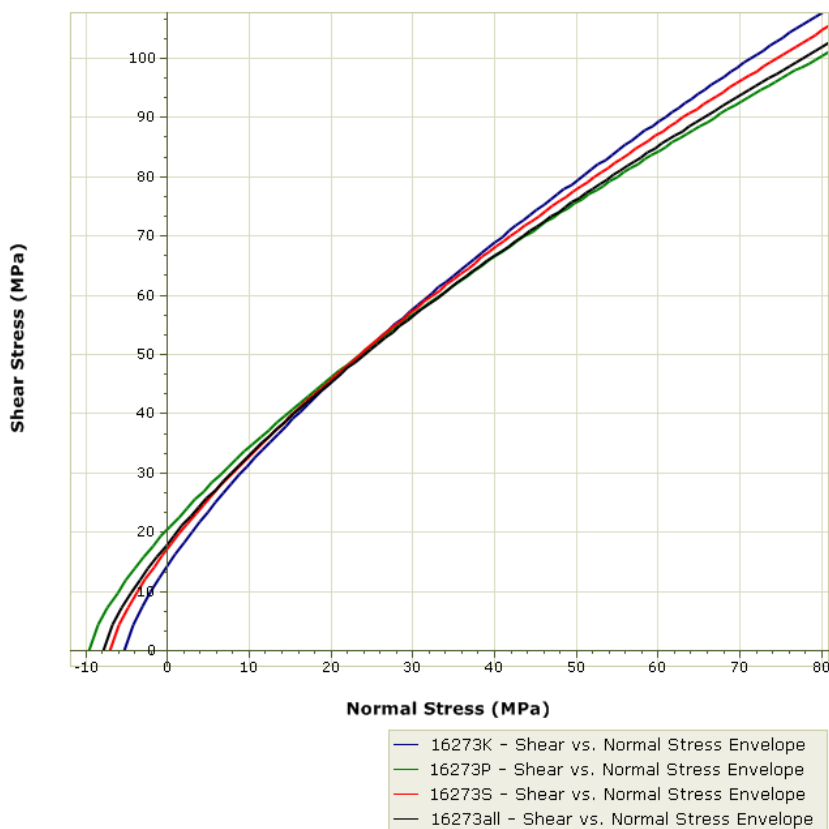
Tab. 46 Hodnoty pevnosti hornin VO vzorku V-18 v trojosém stavu napjatosti při různém plášťovém tlaku v různých směrech zatěžování vůči metamorfní foliaci

Označení zkušebního tělíska	Orientace zkušebního tělíska vůči foliaci	Plášťový tlak [MPa]	Pevnost v trojosém stavu napjatosti [MPa]
16273/K10	K	5	125
16273/K11		10	191
16273/K12		15	167
16273/P10	P	5	166
16273/P11		10	193
16273/P12		15	216
16273/S10	S	5	105
16273/S11		10	173
16273/S12		15	227

V Obr. 203 je prezentováno srovnání tvaru pevnostních obálek pro VO vzorek V-18 v různých směrech zatěžování vůči metamorfní foliaci. Hodnoty materiálové konstanty m_i pro jednotlivé testované vzorky a jednotlivé směry zatěžování jsou uvedeny v Tab. 47.

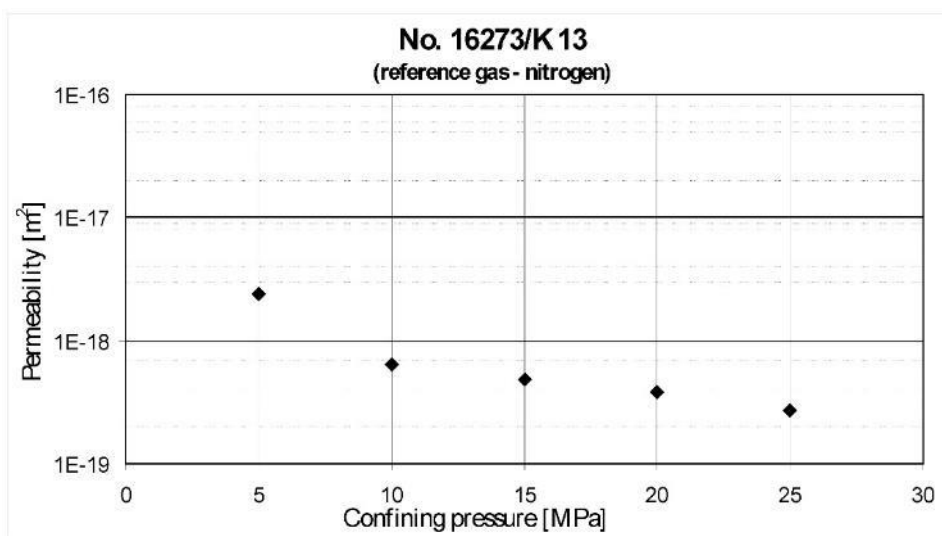
Tab. 47 Hodnoty globální pevnosti a materiálové konstanty m_i pro jednotlivé testované vzorky a jednotlivé směry zatěžování vypočtené v programu RocData (VO vzorek V-18)

Označení vzorku / směr vůči foliaci	Globální pevnost intaktního vzorku σ_{ci} [MPa]	Materiálová konstanta m_i
16273 / směr K	109	20,7
16273 / směr P	124	12,9
16273 / směr S	118	16,6
16273 / celý vzorek	118	14,9

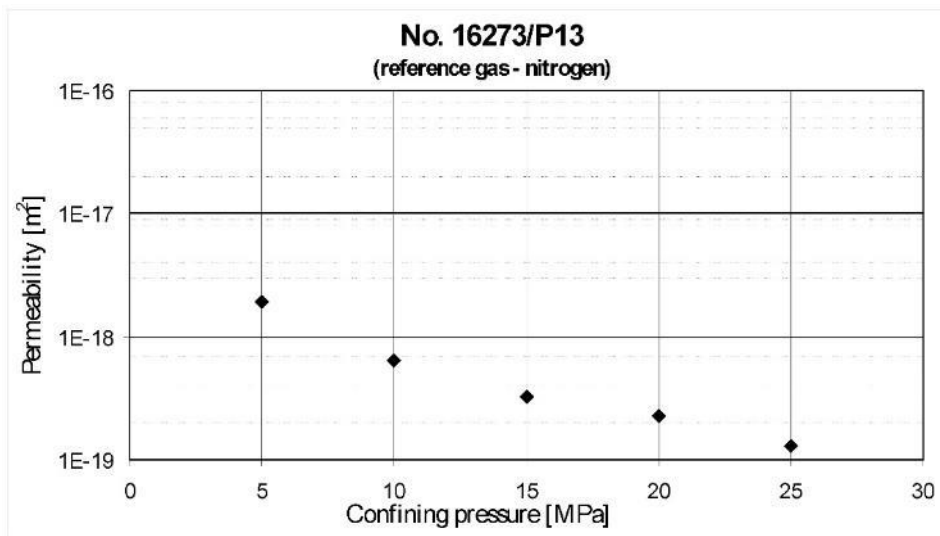


Obr. 203 Tvar pevnostních obálek zkonstruovaných podle Hoek-Brownova kritéria porušení v programu RocData pro VO vzorek V-18

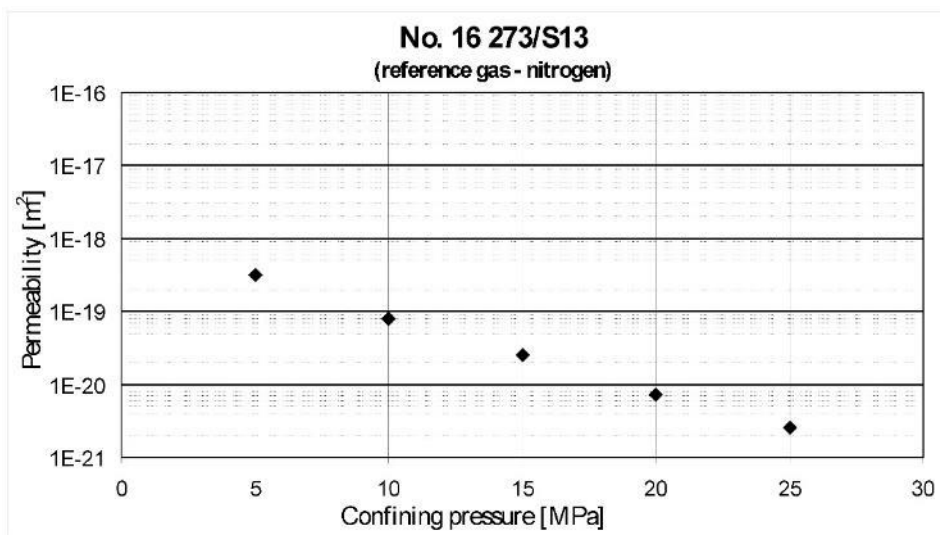
Naměřené výsledky hodnot koeficientu propustnosti pro jednotlivé směry K, P a S a jejich trend při zvětšujícím se plášťovém tlaku jsou prezentovány v Obr. 204 – Obr. 206.



Obr. 204 Plynopropustnost horniny VO vzorku V-18 (zkušební tělísko K13 navrtáno kolmo k foliaci)



Obr. 205 Plynopropustnost horniny VO vzorku V-18 (zkušební tělísko P13 navrtáno rovnoběžně s foliací)



Obr. 206 Plynopropustnost horniny VO vzorku V-18 (zkušební tělísko S13 navrtáno šikmo k foliací)

Stanovení hustotních parametrů (objemové hustoty, mineralogické hustoty a pórovitosti), magnetické susceptibility, elektrické konduktivity a přirozené radioaktivity hornin a výpočet odvozené tepelné vodivosti jsou podrobně popsány ve zprávě Hanáka et al. (2019; Tab. 48; Elektronická příloha 31).

Tab. 48 Hustotní parametry, magnetická susceptibilita hornin z VO vzorku V-18

geotechnická stanice	číslo vzorku	geotechnický bod	hornina	hustotní parametry			vypočtená tepelná vodivost	magnetická susceptibilita
				objemová hustota	mineralogická hustota	pórovitost		
			KÓD	(g.cm ⁻³)	(g.cm ⁻³)	(%)	(Wm ⁻¹ K ⁻¹)	(10 ⁻⁶ j. SI)
V_18	16273	18/1	PRR	2,736	2,745	0,30	3,1	559,1
V_18	16273	18/2	PRR GRN	2,765	2,774	0,32	2,9	579,1
V_18	16273	K_18/3	PRR MIG	2,726	2,735	0,33	3,2	309,5
V_18	16273	S_18/4	PRR MIG	2,713	2,723	0,38	3,3	475,5
V_18	16273	P_18/5	PRR MIG	2,700	2,712	0,43	3,3	355,0
V_18	16273	18/6	MGM	2,650	2,665	0,55	3,6	128,5

Vysvětlivky: PRR–pararula, MGM–migmatit, MIG–migmatitizovaný, GRN–granát, PYR–pyrit

Údaje o radioaktivitě na jednotlivých geotechnických stanicích nelze statisticky podrobněji zpracovat pro nedostatečný počet měření. Z každého velkoobjemového vzorku byly měřeny pouze tři vzorky, takže k vyhodnocení lze využít aritmetických průměrů (Tab. 49).

Tab. 49 Hodnoty obsahů eTh, U, eU, K, a U/e U, včetně vypočtené tepelné produkce HPU stanovené na jednotlivých vzorcích hornin V-18

geotechnická stanice	geotechnický bod	laboratorní číslo vzorku	hornina	radioaktivita - aritmetické průměry z více měření jednoho vzorku				poměr U(eU)	tepelná produkce	počet měření na jednom vzorku
				Th	U	e U	K			
			KÓD	(ppm)	(ppm)	(ppm)	(%)		(μW.m ⁻³)	n
V_18	16273	18/2	PRR GRN	4,2	1,1	1,2	2,3	0,9	0,7	4
V_18	16273	S_18/4	PRR MIG	8,0	1,8	1,5	1,7	1,2	1,1	4
V_18	16273	18/6	MGT	15,6	3,4	4,9	4,2	0,7	2,5	4

Vysvětlivky: PRR–pararula, MIG–migmatitizovaný, GRN–granát

Vodivosti vzorků na odběrových bodech byly měřeny při různých frekvencích (20–10 000 Hz) ve třech kolmých směrech. Souhrn stanovených hodnot pro vzorek V-18 je uveden v Tab. 50 a detaily měření v Elektronická příloha 31.

Tab. 50 Parametry elektrické konduktivity stanovené pro VO vzorek V-18

číslo vzorku	geotechnický bod	pozice měření k foliaci	hornina	elektrická konduktivita σ [$\mu\text{S}\cdot\text{m}^{-1}$] (vodivost) při frekvenci f [Hz]								
				20	50	100	200	500	1000	2000	5000	10000
16273	K_18/3	K	PRR MIG	0,843	0,968	1,101	1,248	1,530	1,828	2,255	3,122	4,147
16273	S_18/4	S	PRR MIG	0,203	0,264	0,341	0,441	0,647	0,876	1,213	1,919	2,767
16273	P_18/5	P	PRR MIG	1,218	1,516	1,777	2,119	2,756	3,414	4,375	6,265	8,566

Vysvětlivky:
 pozice čel vzorku k foliaci: P- paralelně, K-kolmo, S-šikmo
 PRR-pararula, MIG-migmatitizovaná

Geotechnický vrt BGS18-VD (ÚGN č. 16403) – výsledky stanovení ÚGN

Vrt BGS18-VD byl vybrán jako srovnávací vrt, tj. vlastnosti hornin z jeho jádra byly stanoveny souběžně jak v laboratořích ÚGN, tak SG Geotechniky. Výsledky stanovení FMV, provedené v laboratořích ÚGN uvedeny v následujících Tab. 51 – Tab. 58 a Obr. 207 až Obr. 209.

Tab. 51 Hodnoty fyzikálních, tepelných a technologických vlastností hornin z vrtu BGS18-VD - UGN

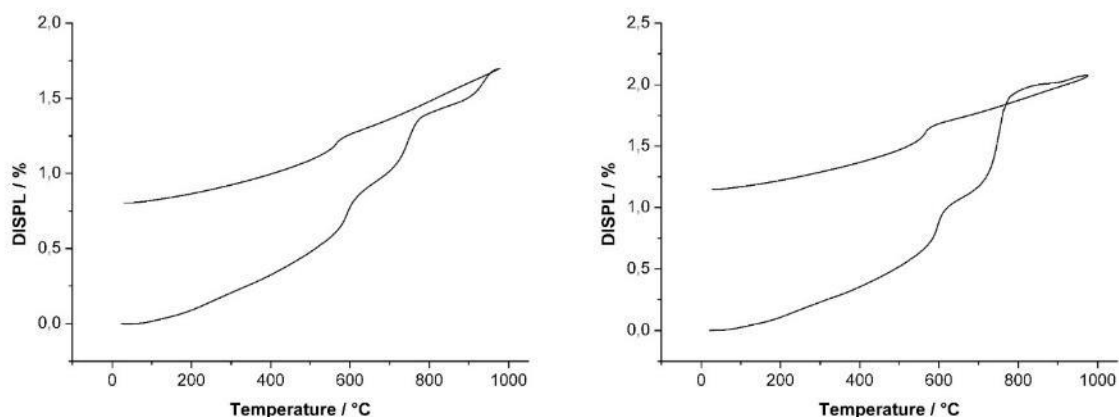
Vlastnost	Jednotka	Počet stanovení	Průměrná hodnota	Minimální hodnota	Maximální hodnota
Měrná hmotnost	kg.m ⁻³	3	2772	2760	2791
Objemová hmotnost	kg.m ⁻³	24	2764	2630	2940
Celková pórovitost	%	3	1,37	1,04	1,81
Otevřená pórovitost	%	3	1,41	0,33	3,53
Nasákavost [%]	%	7	0,13	0,05	0,21
Rychlost šíření UV	km.s ⁻¹	7	4,56	3,53	5,66
Tepelná vodivost	W.m ⁻¹ .K ⁻¹	7	2,54	2,25	3,10
Tepelná kapacita	MJ.m ⁻³ .K ⁻¹	7	2,06	1,93	2,17
Tepelná difuzivita	mm ² .s ⁻¹	7	1,23	1,08	1,43

Tab. 52 Parametry pórovitosti hornin z vrtu BGS18-VD

Označení zkušebního tělíska	Hlubková úroveň ve vrtu [m]	Celkový objem pórů [cm ³ .g ⁻¹]	Průměrná velikost póru (4V/A) [μm]	Pórovitost pomocí MIP [%]
16403/16,35–16,40/2	16,35-16,40	0,0010	0,1733	0,29

Tab. 53 Koeficient hydraulické vodivosti hornin z vrtu BGS18-VD

Označení zkušebního tělíska	Objemová hmotnost [kg.m ⁻³]	Pórovitost [obj. %]	Průměr k ₁₀ [m.s ⁻¹]	Směrodatná odchylka	Koeficient variability [%]
16403/18,15–18,20	2877	0,40	5,1E-13	7,3E-14	14,3
16403/19,30–19,40	2695	0,41	1,6E-12	4,5E-13	28,7
16403/25,40–25,50	2633	3,57	3,8E-12	7,8E-13	20,7



Obr. 207 Dilatační křivka tělíska 16403/16,35–16,40 (ohřev na 1000 °C s následným ochlazením, vlevo - roztažnost sledována kolmo na foliaci, vpravo - roztažnost sledována ve směru foliace)

Tab. 54 Koeficienty teplotní roztažnosti tělíska 16403/16,35–16,40 do 150 °C resp. 1000 °C

Označení zkušebního tělíska	Rozměry zkušebního tělíska [mm]	Teplota ohřevu [°C]	Rychlost ohřevu [°C/min]	Orientace vůči foliaci	α [K ⁻¹]
16403/16,35-16,40/17	10 x 10 x 10	1000	20	⊥	17,4.10 ⁻⁶
16403/16,35-16,40/19	10 x 10 x 10	1000	20	//	21,3.10 ⁻⁶
16403/16,35-16,40/14	10 x 10 x 10	150	1	⊥	7,4.10 ⁻⁶
16403/16,35-16,40/18	10 x 10 x 10	150	1	//	8,8.10 ⁻⁶

Tab. 55 Hodnoty pevnostních a přetvárných vlastností hornin z vrtu BGS18-VD

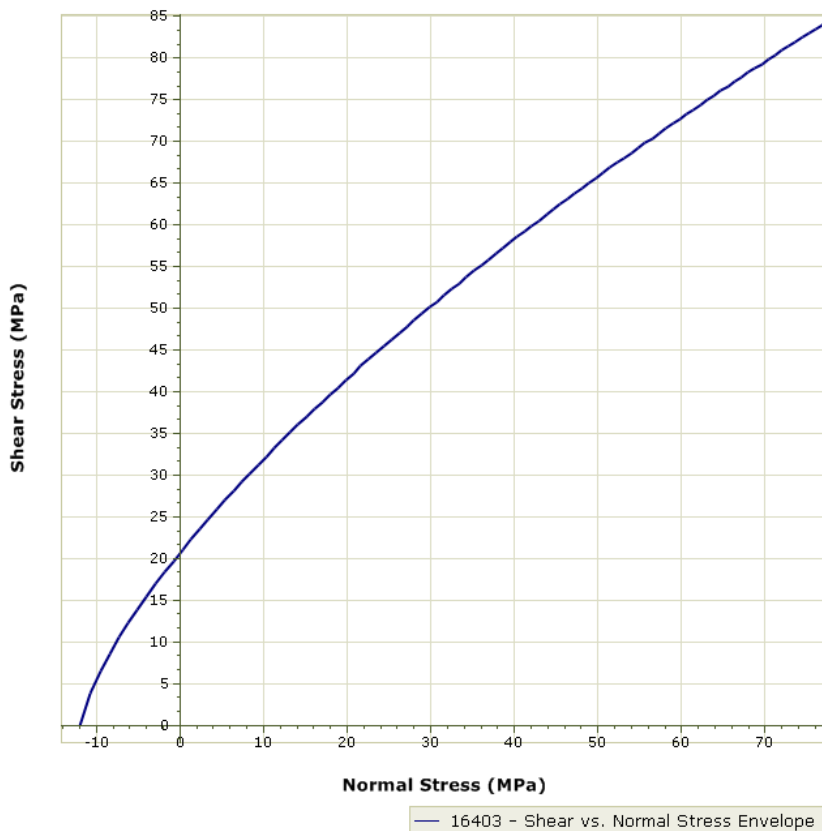
Vlastnost	Jednotka	Počet stanovení	Průměrná hodnota	Minimální hodnota	Maximální hodnota
Pevnost v prostém tlaku	MPa	3	63	42	78
Modul přetvárnosti	MPa	3	23065	16243	27780
Poissonovo číslo	-	3	0,10	0,09	0,12
Pevnost v příčném tahu –tah ⊥ k foliaci	MPa	5	11,2	9,3	13,4
Pevnost v příčném tahu –tah // s foliací	MPa	5	12,7	10,9	16,2
Pevnost v příčném tahu –tah 45° k foliaci	MPa	3	12,8	12,1	14,5

Tab. 56 Hodnoty pevnosti v prostém tlaku σ_{Pd} , modulu přetvárnosti E_{1def} , E_{2def} a modulu pružnosti E_{1el} a E_{2el} a jejich poměrů na zkušebních tělískách hornin z vrtu BGS18-VD v režimu cyklického zatěžování

Označení zkušebního tělíska	σ_{Pd} [MPa]	E_{1def} [GPa]	E_{1el} [GPa]	E_{2def} [GPa]	E_{2el} [GPa]	Poměr E_{1def}/E_{1e} [-]	Poměr E_{2def}/E_{2e} [-]
16403/21,50–21,60	78	27	33	36	39	0,79	0,93
16403/21,90–22,00	120	38	40	48	50	0,94	0,97

Tab. 57 Hodnoty pevnosti hornin vrtu BGS18-VD v trojosém stavu napjatosti při plášťovém tlaku 15 MPa

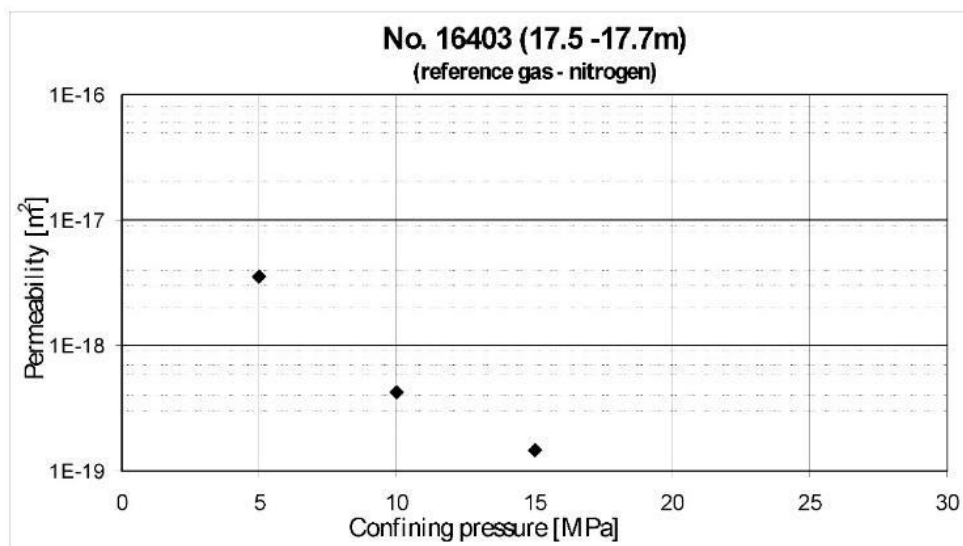
Označení zkušebního tělíska	Orientace zkušebních o tělíska vůči foliaci	Plášťový tlak [MPa]	Pevnost v trojosém stavu napjatosti [MPa]
16403/16,65–16,80	K	15	255



Obr. 208 Tvar pevnostní obálky zkonstruované podle Hoek-Brownova kritéria porušení v programu RocData pro vrt BGS18-VD

Tab. 58 Hodnoty globální pevnosti a materiálové konstanty m_i pro horniny vrtu BGS18-VD vypočtené v programu RocData

Označení vzorku	Globální pevnost intaktního vzorku σ_{ci} [MPa]	Materiálová konstanta m_i
16403	130	10,0



Obr. 209 Plynopropustnost horniny z vrtu BGS18-VD (hloubková úroveň 17,50–17,70 m)

Geotechnický vrt BGS18-VD (ÚGN č. 16403) – výsledky stanovení SGG

Výsledky stanovení FMV na materiálu ze srovnávacího vrtu BGS18-VD provedené v laboratoři SG Geotechnika a.s. jsou uvedeny v následujících tabulkách (Tab. 59, Tab. 60, Tab. 61).

Tab. 59 Hodnoty fyzikálních, tepelných a technologických vlastností hornin z vrtu BGS18-VD – SGG

Vlastnost	Jednotka	Počet stanovení	Průměrná hodnota	Minimální hodnota	Maximální hodnota
Měrná hmotnost	kg.m ⁻³	1	2768	-	-
Objemová hmotnost	kg.m ⁻³	8	2788	2702	2939
Celková pórovitost	%	*			
Otevřená pórovitost	%	1	0,17	-	-
Nasákavost	%	1	0,06	-	-
Koeficient hydraulické vodivosti	m.s ⁻¹	1	<1×10 ⁻¹⁴	-	-
Rychlost šíření UV	km.s ⁻¹	3	5,59	5,245	5,793
Tepelná vodivost	W.m ⁻¹ .K ⁻¹	18	2,88	2,80	3,02
Tepelná kapacita	MJ.m ⁻³ .K ⁻¹	18	2,06	1,92	2,19
Tepelná difuzivita	mm ² .s ⁻¹	18	1,40	1,28	1,57
Tepelná roztažnost	μm.m ⁻¹ .°C ⁻¹	1	12,2	-	-
Abrazivnost Cerchar	–	1	4,86	-	-

*Pozn. Nestanovena. Chyba stanovení měrné hmotnosti je vyšší než objemová hmotnost

Tab. 60 Parametry pórovitosti hornin z vrtu BGS18-VD podle MIP

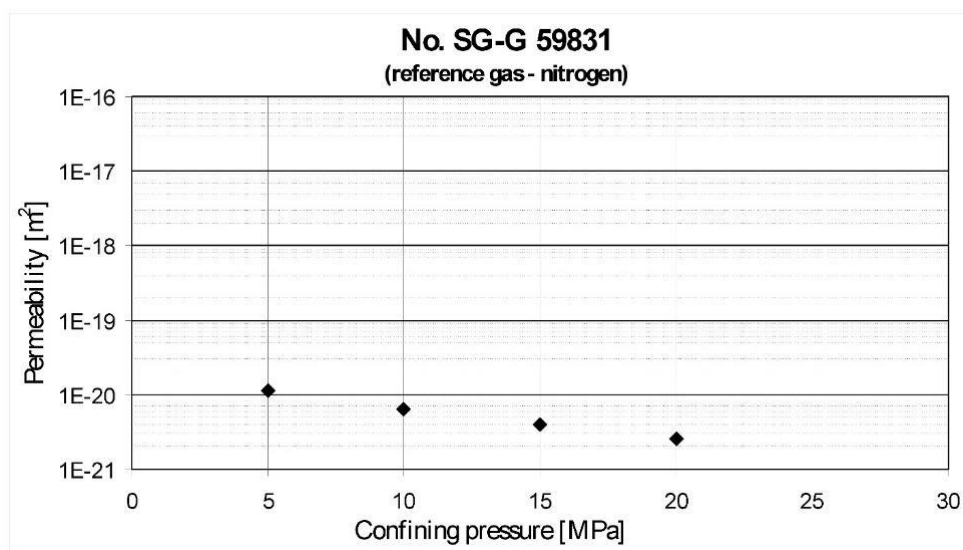
Označení zkušebního tělíska	Hloubková úroveň ve vrtu [m]	Celkový objem pórů [cm ³ .g ⁻¹]	Průměrná velikost póru [μm]	Pórovitost pomocí MIP [%]
BGS18-VD	33,4-37,0	0,0010	5,0163	0,28

Tab. 61 Hodnoty pevnostních a přetvárných vlastností hornin z vrtu BGS18-VD – SGG

Vlastnost	Jednotka	Počet stanovení	Průměrná hodnota	Minimální hodnota	Maximální hodnota
Pevnost v prostém tlaku	MPa	5	72,4	54,2	93,8
Pevnost v příčném tahu – tah \perp k foliaci	MPa	5	10,7	8,1	12,9
Modul přetvárnosti*	GPa	3	63,2	60,6	65,8
Modul pružnosti*	GPa	3	68,8	65,4	72,1
Poissonovo číslo*	-	3	0,18	0,17	0,19

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

Naměřené výsledky hodnot koeficientu propustnosti ze zkoušky plynopropustnosti pro vzorek BGS18-VD a jejich trend při zvětšujícím se plášťovém tlaku jsou zřejmé z následujícího grafu (Obr. 210).



Obr. 210 Plynopropustnost horniny z vrtu BGS18-VD

Geotechnický vrt BGS18-I

Výsledky stanovení FMV na materiálu z vrtu BGS18-I provedené v laboratoři SG Geotechnika a.s. jsou uvedeny v následujících tabulkách (Tab. 62, Tab. 63, Tab. 64).

Tab. 62 Hodnoty fyzikálních, tepelných a technologických vlastností hornin z vrtu BGS18-I

Vlastnost	Jednotka	Počet stanovení	Průměrná hodnota	Minimální hodnota	Maximální hodnota
Měrná hmotnost	kg.m ⁻³	1	2731	-	-
Objemová hmotnost	kg.m ⁻³	8	2728	2695	2782
Celková pórovitost	%	*			
Otevřená pórovitost	%	1	0,24	-	-
Nasákavost	%	1	0,05	-	-
Koeficient hydraulické vodivosti	m.s ⁻¹	1	5,4×10 ⁻¹³	-	-
Rychlost šíření UV	km.s ⁻¹	3	5,667	5,451	5,675
Tepelná vodivost	W.m ⁻¹ .K ⁻¹	6	2,57	2,49	2,65
Tepelná kapacita	MJ.m ⁻³ .K ⁻¹	6	2,18	2,16	2,20
Tepelná difuzivita	mm ² .s ⁻¹	6	1,18	1,15	1,21
Teplotní roztažnost	μm.m ⁻¹ .°C ⁻¹	1	7,8	-	-
Abrazivnost Cerchar	–	1	5,10	-	-

*Pozn. Nestanovena. Chyba stanovení měrné hmotnosti je vyšší než objemová hmotnost.

Tab. 63 Parametry pórovitosti hornin z vrtu BGS18-I podle MIP

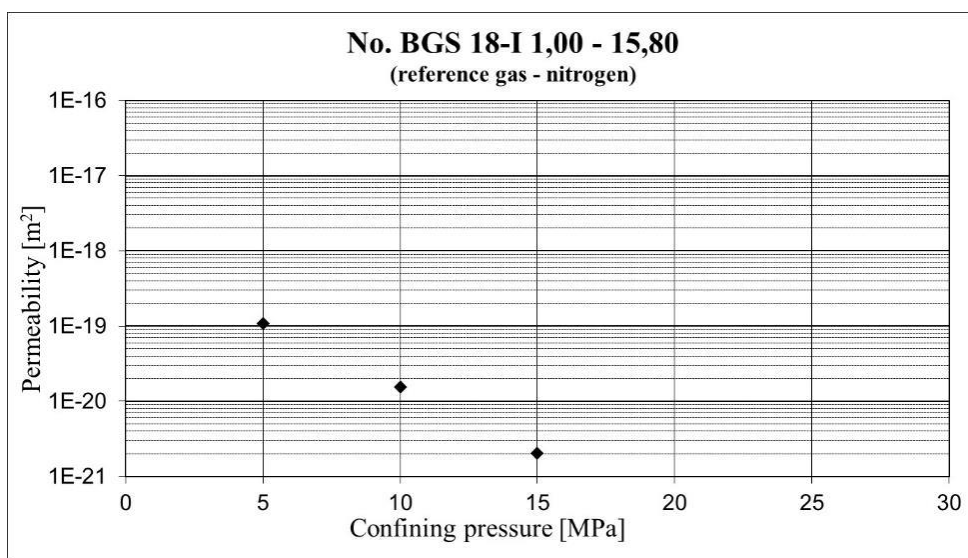
Označení zkušebního tělíska	Hlubková úroveň ve vrtu [m]	Celkový objem póru [cm ³ .g ⁻¹]	Průměrná velikost póru [μm]	Pórovitost pomocí MIP [%]
BGS18-I	1,0-15,85	0,0014	0,2971	0,37

Tab. 64 Hodnoty pevnostních a přetvárných vlastností hornin z vrtu BGS18-I

Vlastnost	Jednotka	Počet stanovení	Průměrná hodnota	Minimální hodnota	Maximální hodnota
Pevnost v prostém tlaku	MPa	5	107,4	62,6	155,8
Pevnost v příčném tahu – tah \perp k foliaci	MPa	5	9,0	4,7	12,0
Modul přetvárnosti*	GPa	3	75,4	69,7	81,1
Modul pružnosti*	GPa	3	72,9	67,6	78,1
Poissonovo číslo*	-	3	0,23	0,21	0,24

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

Naměřené výsledky hodnot koeficientu propustnosti ze zkoušky plynopropustnosti pro vzorek BGS18-I a jejich trend při zvětšujícím se plášťovém tlaku jsou zřejmé z následujícího grafu (Obr. 211).



Obr. 211 Plynopropustnost horniny z vrtu BGS18-I

2.3.5.3.3 Vzorky odebrané na 20. patře**Velkoobjemový vzorek V-20/1**

Výsledky stanovení FMV na materiálu z velkoobjemového vzorku V-20/1 provedené v laboratoři SG Geotechnika a.s. jsou uvedeny v následujících tabulkách (Tab. 65, Tab. 66, Tab. 67).

Tab. 65 Hodnoty fyzikálních, tepelných a technologických vlastností hornin ze vzorku V-20/1 (pokračování na další straně)

Vlastnost	Jednotka	Počet stanovení	Průměrná hodnota	Minimální hodnota	Maximální hodnota
Měrná hmotnost	kg.m ⁻³	3	2720	2713	2731
Objemová hmotnost	kg.m ⁻³	24	2706	2684	2722
Celková pórovitost	%	*			
Otevřená pórovitost	%	3	0,49	0,40	0,66
Nasákavost	%	3	0,18	0,15	0,25
Koeficient hydraulické vodivosti – směr P	m.s ⁻¹	1	3,0×10 ⁻¹²	-	-
Koeficient hydraulické vodivosti – směr S	m.s ⁻¹	1	1,2×10 ⁻¹¹	-	-
Koeficient hydraulické vodivosti – směr K	m.s ⁻¹	1	1,3×10 ⁻¹¹	-	-
Rychlost šíření UV – směr P	km.s ⁻¹	3	5,559	3,839	5,773
Rychlost šíření UV – směr S	km.s ⁻¹	3	5,258	3,015	5,607
Rychlost šíření UV – směr K	km.s ⁻¹	3	5,623	3,982	5,687
Tepelná vodivost – směr P	W.m ⁻¹ .K ⁻¹	6	3,15	2,94	3,36
Tepelná vodivost – směr S	W.m ⁻¹ .K ⁻¹	6	2,51	2,38	2,63
Tepelná vodivost – směr K	W.m ⁻¹ .K ⁻¹	6	2,55	2,36	2,75
Tepelná kapacita – směr P	MJ.m ⁻³ .K ⁻¹	6	2,30	2,29	2,31
Tepelná kapacita – směr S	MJ.m ⁻³ .K ⁻¹	6	2,13	2,10	2,16
Tepelná kapacita – směr K	MJ.m ⁻³ .K ⁻¹	6	2,07	2,06	2,09
Tepelná difuzivita – směr P	mm ² .s ⁻¹	6	1,37	1,28	1,47

Vlastnost	Jednotka	Počet stanovení	Průměrná hodnota	Minimální hodnota	Maximální hodnota
Tepelná difuzivita – směr S	mm ² .s ⁻¹	6	1,18	1,13	1,22
Tepelná difuzivita – směr K	mm ² .s ⁻¹	6	1,23	1,13	1,32
Teplotní roztažnost – směr P	μm.m ⁻¹ .°C ⁻¹	1	6,5	-	-
Teplotní roztažnost – směr S	μm.m ⁻¹ .°C ⁻¹	1	9,7	-	-
Teplotní roztažnost – směr K	μm.m ⁻¹ .°C ⁻¹	1	9,5	-	-
Abrazivnost Cerchar – směr	-	1	4,20	-	-
Abrazivnost Cerchar – směr	-	1	4,35	-	-
Abrazivnost Cerchar – směr	-	1	4,70	-	-

Tab. 66 Parametry pórovitosti hornin ze vzorku V-20/1 podle MIP

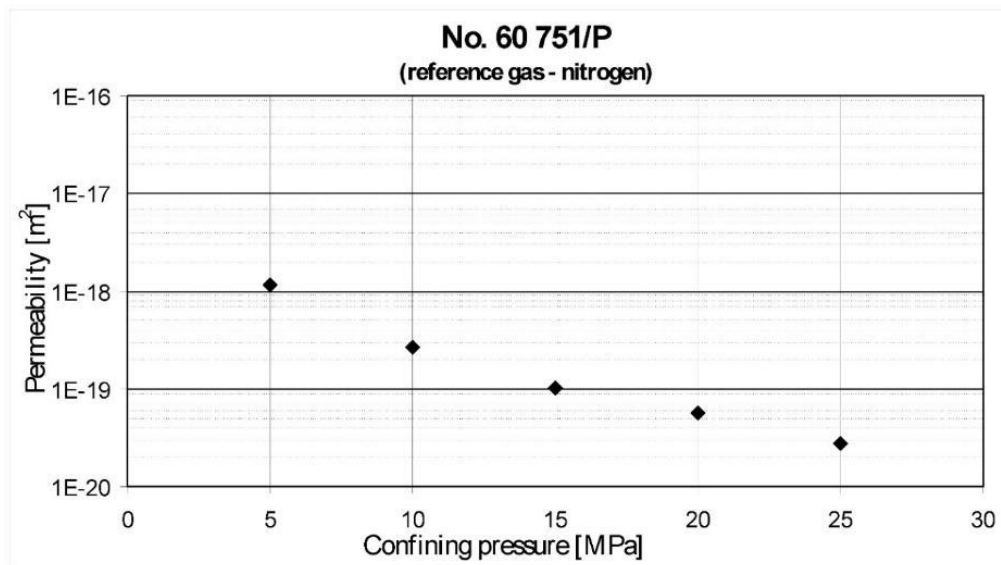
Označení zkušebního tělíska	Hloubková úroveň ve vrtu [m]	Celkový objem pórů [cm ³ .g ⁻¹]	Průměrná velikost póru [μm]	Pórovitost pomocí MIP [%]
V-20/1 P	0,0-0,1	0,0025	2,6291	0,66
V-20/1 S	0,0-0,1	0,0021	1,4577	0,57
V-20/1 K	0,0-0,1	0,0011	2,7527	0,31

Tab. 67 Hodnoty pevnostních a přetvárných vlastností hornin vzorku V-20/1

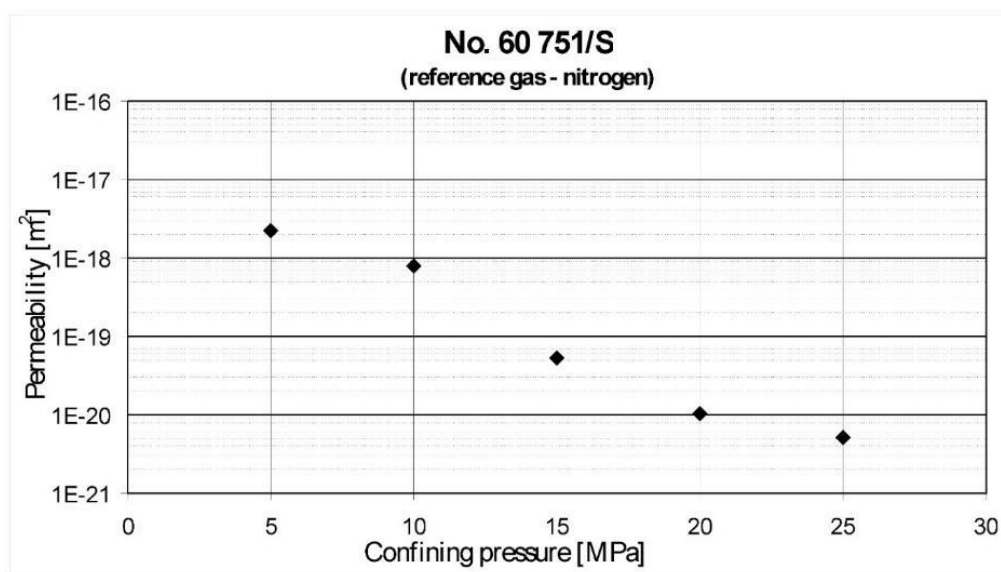
Vlastnost	Jednotka	Počet stanovení	Průměrná hodnota	Minimální hodnota	Maximální hodnota
Pevnost v prostém tlaku – směr P	MPa	5	100,2	78,5	135,4
Pevnost v prostém tlaku – směr S	MPa	5	89,0	76,9	102,5
Pevnost v prostém tlaku – směr K	MPa	5	103,4	80,0	119,9
Pevnost v příčném tahu – směr P	MPa	5	6,4	5,0	7,9
Pevnost v příčném tahu – směr S	MPa	5	6,5	4,1	8,4
Pevnost v příčném tahu – směr K	MPa	5	10,0	7,9	13,5
Modul přetvárnosti – směr P *	GPa	3	71,8	67,4	75,2
Modul přetvárnosti – směr S *	GPa	3	80,5	80,2	80,7
Modul přetvárnosti – směr K *	GPa	3	54,3	45,4	64,3
Modul pružnosti – směr P *	GPa	3	73,7	69,2	80,4
Modul pružnosti – směr S *	GPa	3	80,4	79,3	81,5
Modul pružnosti – směr K *	GPa	3	47,9	44,1	50,8
Poissonovo číslo – směr P*	-	3	0,17	0,12	0,22
Poissonovo číslo – směr S*		3	0,19	0,18	0,20
Poissonovo číslo – směr K*		3	0,13	0,10	0,15

Stanovení pevnosti hornin v trojosém stavu je součástí samostatné přílohy (Elektronická příloha 33).

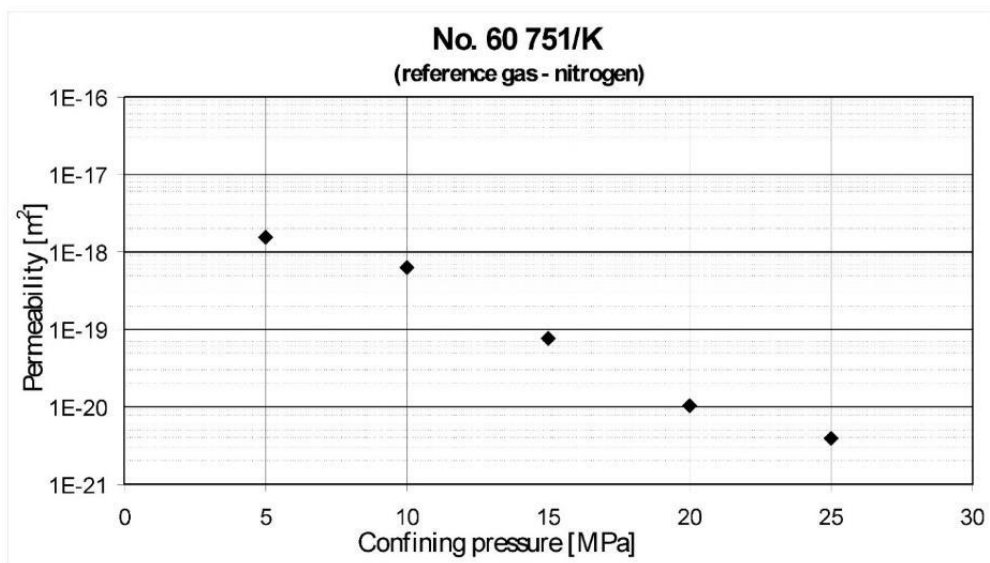
Naměřené výsledky hodnot koeficientu propustnosti ze zkoušky plynopropustnosti pro jednotlivé směry P, S a K a jejich trend při zvětšujícím se plášťovém tlaku jsou zřejmé z následujících grafů (Obr. 212, Obr. 213, Obr. 214).



Obr. 212 Plynopropustnost horniny vzorku V-20/1 směr P



Obr. 213 Plynopropustnost horniny vzorku V-20/1 směr S



Obr. 214 Plynopropustnost horniny vzorku V-20/1 směr K

Stanovení hustotních parametrů (objemové hustoty, mineralogické hustoty a pórovitosti), magnetické susceptibility, elektrické konduktivity a přirozené radioaktivity hornin a výpočet odvozené tepelné vodivosti jsou podrobně popsány ve zprávě Hanáka et al. (2019; Tab. 68; Elektronická příloha 31).

Tab. 68 Hustotní parametry, magnetická susceptibilita hornin z VO vzorku V-20/1

geotechnická stanice	geotechnický bod	laboratorní číslo vzorku	hustotní parametry				vypočtená tepelná vodivost	magnetická susceptibilita
			hornina	objemová hustota	mineralogická hustota	pórovitost		
			KÓD	(g.cm ⁻³)	(g.cm ⁻³)	(%)	(Wm ⁻¹ K ⁻¹)	(10 ⁻⁶ J. SI)
V_20/1	60751	1a	PRR MIG	2,681	2,694	0,46	3,4	205,5
V_20/1	60751	S_1	PRR MIG	2,700	2,710	0,36	3,3	197,2
V_20/1	60751	2	PRR MIG	2,710	2,721	0,39	3,3	298,3
V_20/1	60751	P_2a	PRR MIG	2,719	2,729	0,37	3,2	274,1
V_20/1	60751	K_3	PRR MIG	2,699	2,710	0,40	3,3	187,7
V_20/1	60751	3a	PRR MIG	2,710	2,718	0,28	3,3	229,7

Vysvětlivky: PRR–pararula, MGM–migmatit, KVR–kvarcit, BTT–biotitický, MIG–migmatitizovaný, GRN–granát, PYR–pyrit

Údaje o radioaktivitě na jednotlivých geotechnických stanicích nelze statisticky podrobněji zpracovat pro nedostatečný počet měření. Z každého velkoobjemového vzorku byly měřeny pouze tři vzorky, takže k vyhodnocení lze využít aritmetických průměrů (Tab. 69). V tabulce jsou červeně znázorněny hodnoty poměru U/eU, které jsou vyšší, než 1,3. V této tabulce jsou též uvedeny hodnoty vypočtené tepelné produkce (HUP).

Tab. 69 Hodnoty obsahů eTh, U, eU, K, a U/e U, včetně vypočtené tepelné produkce HPU stanovené na vzorku V-20/1; červeně znázorněny hodnoty poměru U/eU vyšší než 1,3

geotechnická stanice	geotechnický bod	laboratorní číslo vzorku	hornina	radioaktivita - aritmetické průměry z více měření jednoho vzorku				poměr U(eU)	tepelná produkce HUP	počet měření na jednom vzorku
				Th	U	e U	K			
			KÓD	(ppm)	(ppm)	(ppm)	(%)		($\mu\text{W}\cdot\text{m}^{-3}$)	n
V_20/1	60751	1a	PRR MIG	6,5	2,0	1,8	2,3	1,1	1,0	4
V_20/1	60751	2	PRR MIG	7,0	1,9	2,2	2,2	0,9	1,2	4
V_20/1	60751	3a	PRR MIG	7,8	2,5	1,9	2,9	1,3	1,2	4

Vysvětlivky: PRR–pararula, MIG–migmatitizovaný

Vodivosti vzorků na odběrových bodech byly měřeny při různých frekvencích (20–10 000 Hz) ve třech kolmých směrech. Souhrn stanovených hodnot pro vzorek V-20/1 je uveden v Tab. 70 a detaily měření v Elektronická příloha 31. Prázdné hodnoty v tabulce u nízkých frekvencí značí, že elektrické vodivosti při těchto frekvencích nebylo možné věrohodně stanovit – důvod bývá jak v minerálním složení, tak i strukturním stavbě horniny.

Tab. 70 Parametry elektrické konduktivity, stanovené na vzorcích hornin z VO vzorku V-20/1

geotechnický bod	laboratorní číslo vzorku	pozice měření k foliaci	hornina	elektrická konduktivita σ [$\mu\text{S}\cdot\text{m}^{-1}$] (vodivost) při frekvenci f [Hz]								
				20	50	100	200	500	1000	2000	5000	10000
60751	S_1	S	PRR MIG	0,210	0,311	0,385	0,503	0,732	0,994	1,377	2,185	3,164
60751	P_2a	P	PRR MIG	0,773	1,048	1,310	1,665	2,281	2,995	3,962	5,923	8,250
60751	K_3	K	PRR MIG		0,138	0,160	0,209	0,296	0,403	0,577	0,965	1,466

Vysvětlivky: pozice čel vzorku k foliaci :P- paralelně, K-kolmo, S-šikmo
PRR-pararula, MIG-migmatitizovaná

Velkoobjemový vzorek V-20/2

Výsledky stanovení FMV na materiálu z velkoobjemového vzorku V-20/2 provedené v laboratoři SG Geotechnika a.s. jsou uvedeny v následujících tabulkách (Tab. 71, Tab. 72, Tab. 73).

Tab. 71 Hodnoty fyzikálních, tepelných a technologických vlastností hornin ze vzorku V-20/2 (pokračování na další straně)

Vlastnost	Jednotka	Počet stanovení	Průměrná hodnota	Minimální hodnota	Maximální hodnota
Měrná hmotnost	kg.m ⁻³	3	2754	2709	2802
Objemová hmotnost	kg.m ⁻³	24	2710	2667	2802
Celková pórovitost	%	*			
Otevřená pórovitost	%	3	0,28	0,23	0,36
Nasákavost	%	3	0,09	0,06	0,13
Koeficient hydraulické vodivosti – směr P	m.s ⁻¹	1	<1×10 ⁻¹⁴	-	-
Koeficient hydraulické vodivosti – směr S	m.s ⁻¹	1	<1×10 ⁻¹⁴	-	-
Koeficient hydraulické vodivosti – směr K	m.s ⁻¹	1	8,1×10 ⁻¹³	-	-
Rychlost šíření UV – směr P	km.s ⁻¹	3	6,022	5,425	6,385
Rychlost šíření UV – směr S	km.s ⁻¹	3	5,695	5,482	6,038
Rychlost šíření UV – směr K	km.s ⁻¹	3	5,932	5,829	6,154
Tepelná vodivost – směr P	W.m ⁻¹ .K ⁻¹	6	2,86	2,73	2,98
Tepelná vodivost – směr S	W.m ⁻¹ .K ⁻¹	6	2,52	2,38	2,65
Tepelná vodivost – směr K	W.m ⁻¹ .K ⁻¹	6	2,69	2,27	3,09
Tepelná kapacita – směr P	MJ.m ⁻³ .K ⁻¹	6	2,24	2,20	2,28
Tepelná kapacita – směr S	MJ.m ⁻³ .K ⁻¹	6	2,08	2,03	2,12
Tepelná kapacita – směr K	MJ.m ⁻³ .K ⁻¹	6	2,06	1,98	2,14

Vlastnost	Jednotka	Počet stanovení	Průměrná hodnota	Minimální hodnota	Maximální hodnota
Tepelná difuzivita – směr P	mm ² .s ⁻¹	6	1,27	1,23	1,31
Tepelná difuzivita – směr S	mm ² .s ⁻¹	6	1,21	1,17	1,25
Tepelná difuzivita – směr K	mm ² .s ⁻¹	6	1,30	1,15	1,46
Teplotní roztažnost – směr P	μm.m ⁻¹ .°C ⁻¹	1	8,7	-	-
Teplotní roztažnost – směr S	μm.m ⁻¹ .°C ⁻¹	1	5,6	-	-
Teplotní roztažnost – směr K	μm.m ⁻¹ .°C ⁻¹	1	6,4	-	-
Abrazivnost Cerchar – směr P	-	1	4,58	-	-
Abrazivnost Cerchar – směr S	-	1	4,48	-	-
Abrazivnost Cerchar – směr K	-	1	4,66	-	-

Tab. 72 Parametry pórovitosti hornin ze vzorku V-20/2 podle MIP

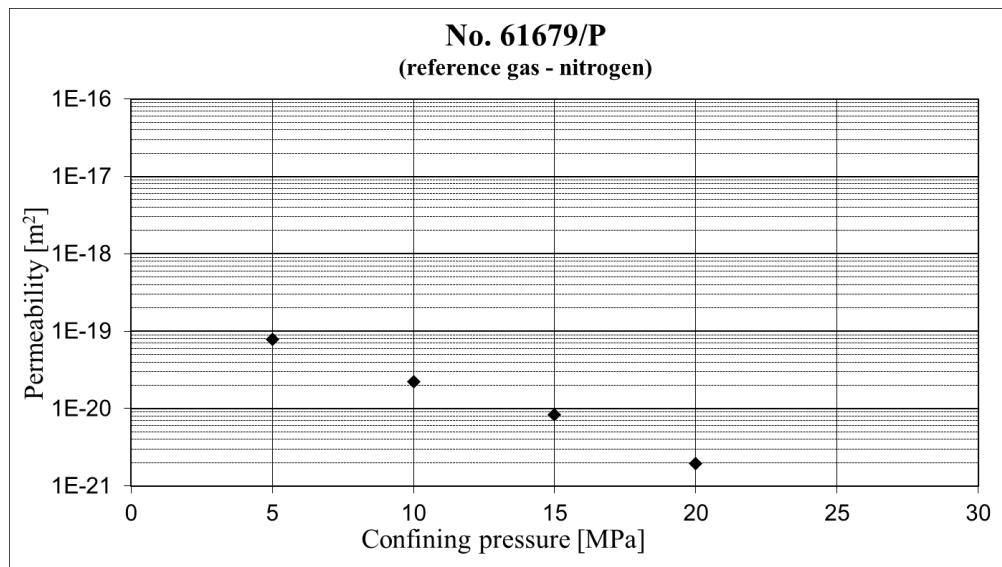
Označení zkušebního tělíska	Hloubková úroveň ve vrtu [m]	Celkový objem pórů [cm ³ .g ⁻¹]	Průměrná velikost póru [μm]	Pórovitost pomocí MIP [%]
V-20/2 P	0,0-0,1	0,0021	1,4139	0,57
V-20/2S	0,0-0,1	0,0009	4,4573	0,26
V-20/2K	0,0-0,1	0,0007	3,2964	0,19

Tab. 73 Hodnoty pevnostních a přetvárných vlastností hornin vzorku V-20/2

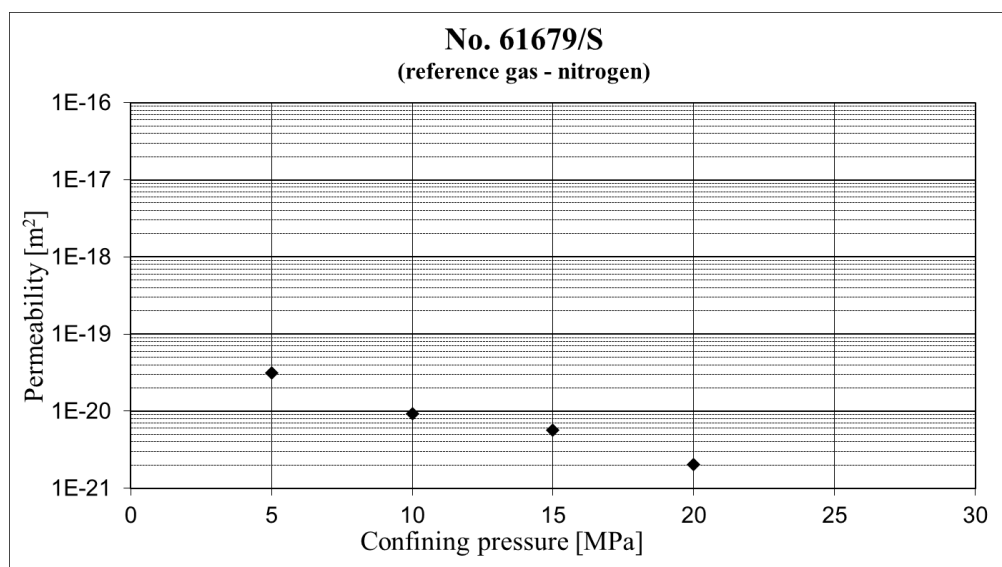
Vlastnost	Jednotka	Počet stanovení	Průměrná hodnota	Minimální hodnota	Maximální hodnota
Pevnost v prostém tlaku – směr P	MPa	5	114,6	79,9	138,7
Pevnost v prostém tlaku – směr S	MPa	5	86,6	67,9	106,3
Pevnost v prostém tlaku – směr K	MPa	5	97,6	81,6	120,3
Pevnost v příčném tahu – směr P	MPa	5	7,7	5,0	9,2
Pevnost v příčném tahu – směr S	MPa	5	10,5	7,9	13,3
Pevnost v příčném tahu – směr K	MPa	5	7,9	6,2	9,4
Modul přetvárnosti – směr P *	GPa	2	88,0	79,5	96,4
Modul přetvárnosti – směr S *	GPa	2	69,9	68,3	71,5
Modul přetvárnosti – směr K *	GPa	1	69,1	-	-
Modul pružnosti – směr P *	GPa	2	88,2	82,1	94,2
Modul pružnosti – směr S *	GPa	2	69,3	62,6	75,9
Modul pružnosti – směr K *	GPa	1	68,6	-	-
Poissonovo číslo – směr P*	-	2	0,23	0,22	0,23
Poissonovo číslo – směr S*		2	0,23	0,22	0,24
Poissonovo číslo – směr K*		1	0,25	-	-

Stanovení pevnosti hornin v trojosém stavu je součástí samostatné přílohy (Elektronická příloha 33).

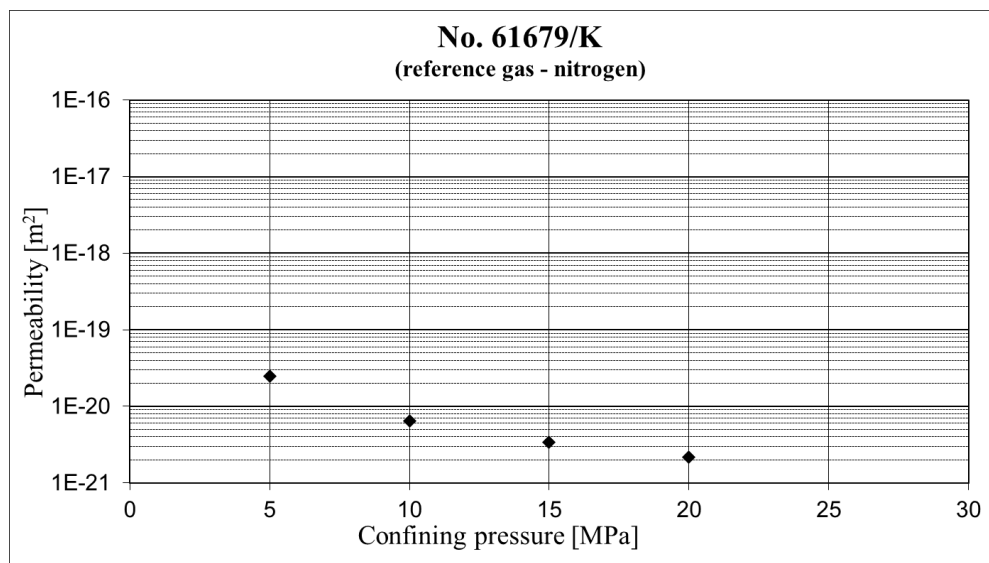
Naměřené výsledky hodnot koeficientu propustnosti ze zkoušky plynopropustnosti pro jednotlivé směry P, S a K a jejich trend při zvětšujícím se plášťovém tlaku jsou zřejmé z následujících grafů (Obr. 215, Obr. 216, Obr. 217).



Obr. 215 Plynopropustnost horniny vzorku V-20/2 směr P



Obr. 216 Plynopropustnost horniny vzorku V-20/2 směr S



Obr. 217 Plynopropustnost horniny vzorku V-20/2 směr K

Stanovení hustotních parametrů (objemové hustoty, mineralogické hustoty a pórovitosti), magnetické susceptibility, elektrické konduktivity a přirozené radioaktivity hornin a výpočet odvozené tepelné vodivosti jsou podrobně popsány ve zprávě Hanáka et al. (2019; Tab. 74; Elektronická příloha 31).

Tab. 74 Hustotní parametry, magnetická susceptibilita hornin z VO vzorku V-20/2

geotechnická stanice	geotechnický bod	laboratorní číslo vzorku	hustotní parametry			vypočtená tepelná vodivost	magnetická susceptibilita	
			hornina	objemová hustota	mineralogická hustota			pórovitost
			KÓD	(g.cm ⁻³)	(g.cm ⁻³)	(%)	(Wm ⁻¹ K ⁻¹)	(10 ⁻⁶ J. SI)
V_20/2	61679	K_1	PRR MIG	2,720	2,732	0,42	3,2	670,72
V_20/2	61679	K_2	PRR MIG	2,697	2,703	0,24	3,4	407,32
V_20/2	61679	S_1	PRR MIG	2,698	2,702	0,15	3,4	883,24
V_20/2	61679	S_2	PRR MIG	2,750	2,756	0,23	3,0	1740,02
V_20/2	61679	P_1	PRR MIG	2,717	2,722	0,17	3,3	1056,96
V_20/2	61679	P_2	PRR MIG	2,715	2,721	0,20	3,3	962,77

Vysvětlivky: PRR–pararula, MGM–migmatit, KVR–kvarcit, BTT–biotitický, MIG–migmatitizovaný, GRN–granát, PYR–pyrit

Údaje o radioaktivitě na jednotlivých geotechnických stanicích nelze statisticky podrobněji zpracovat pro nedostatečný počet měření. Z každého velkoobjemového vzorku byly měřeny pouze tři vzorky, takže k vyhodnocení lze využít aritmetických průměrů (Tab. 75). V tabulce jsou červeně znázorněny hodnoty poměru U/eU, které jsou vyšší, než 1,3. V této tabulce jsou též uvedeny hodnoty vypočtené tepelné produkce (HUP).

Tab. 75 Hodnoty obsahů eTh, U, eU, K, a U/e U, včetně vypočtené tepelné produkce HPU stanovené na vzorku V-20/2

geotechnická stanice	geotechnický bod	laboratorní číslo vzorku	hornina	radioaktivita - aritmetické průměry z více měření jednoho vzorku				poměr U(eU)	tepelná produkce HUP	počet měření na jednom vzorku
				Th	U	e U	K			
				KÓD	(ppm)	(ppm)	(%)			
V_20/2	61679	K_2	PRR MIG	7,7	1,9	1,3	1,2	1,5	1,0	2
V_20/2	61679	S_1	PRR MIG	7,4	2,3	1,8	1,3	1,3	1,1	2
V_20/2	61679	P_2	PRR MIG	7,5	2,0	1,7	1,7	1,2	1,1	2

Vysvětlivky: PRR–pararula, MIG–migmatitizovaný

Vodivosti vzorků na odběrových bodech byly měřeny při různých frekvencích (20–10 000 Hz) ve třech kolmých směrech. Souhrn stanovených hodnot pro vzorek V-20/2 je uveden v Tab. 76 a detaily měření v Elektronická příloha 31.

Tab. 76 Parametry elektrické konduktivity, stanovené na vzorcích hornin z VO vzorku V-20/2

geotechnický bod	laboratorní číslo vzorku	pozice měření k foliaci	hornina	elektrická konduktivita $\sigma[\mu\text{S}\cdot\text{m}^{-1}]$ (vodivost) při frekvenci $f[\text{Hz}]$									
				20	50	100	200	500	1000	2000	5000	10000	
61679	K_2	K	PRR MIG	0,535	0,620	0,759	0,917	1,237	1,611	2,173	3,366	4,876	
61679	S_1	S	PRR MIG	0,356	0,436	0,568	0,711	0,992	1,312	1,787	2,802	7,170	
61679	P_2	P	PRR MIG	0,833	1,052	1,312	1,633	2,253	2,955	3,976	6,111	8,830	

Vysvětlivky:
 pozice čel vzorku k foliaci :P- paralelně, K-kolmo, S-šikmo
 PRR-pararula, MIG-migmatitizovaná

Velkoobjemový vzorek V-20/3

Výsledky stanovení FMV na materiálu z velkoobjemového vzorku V-20/3 provedené v laboratoři SG Geotechnika a.s. jsou uvedeny v následujících tabulkách (Tab. 77, Tab. 78, Tab. 79).

Tab. 77 Hodnoty fyzikálních, tepelných a technologických vlastností hornin ze vzorku V-20/3 (pokračování na další straně)

Vlastnost	Jednotka	Počet stanovení	Průměrná hodnota	Minimální hodnota	Maximální hodnota
Měrná hmotnost	kg.m ⁻³	3	2719	2712	2727
Objemová hmotnost	kg.m ⁻³	24	2708	2683	2734
Celková pórovitost	%	*			
Otevřená pórovitost	%	3	0,36	0,28	0,47
Nasákavost	%	3	0,14	0,11	0,18
Koeficient hydraulické vodivosti – směr P	m.s ⁻¹	1	8,8×10 ⁻¹²	-	-
Koeficient hydraulické vodivosti – směr S	m.s ⁻¹	1	3,4×10 ⁻¹³	-	-
Koeficient hydraulické vodivosti – směr K	m.s ⁻¹	1	1,4×10 ⁻¹¹	-	-
Rychlost šíření UV – směr P	km.s ⁻¹	3	4,924	4,181	5,630
Rychlost šíření UV – směr S	km.s ⁻¹	3	5,079	4,030	5,781
Rychlost šíření UV – směr K	km.s ⁻¹	3	5,135	4,135	5,448
Tepelná vodivost – směr P	W.m ⁻¹ .K ⁻¹	6	2,74	2,72	2,75
Tepelná vodivost – směr S	W.m ⁻¹ .K ⁻¹	6	2,73	2,70	2,75
Tepelná vodivost – směr K	W.m ⁻¹ .K ⁻¹	6	2,44	2,22	2,66
Tepelná kapacita – směr P	MJ.m ⁻³ .K ⁻¹	6	2,17	2,13	2,20
Tepelná kapacita – směr S	MJ.m ⁻³ .K ⁻¹	6	2,17	2,11	2,23
Tepelná kapacita – směr K	MJ.m ⁻³ .K ⁻¹	6	2,04	1,97	2,10
Tepelná difuzivita – směr P	mm ² .s ⁻¹	6	1,26	1,25	1,28
Tepelná difuzivita – směr S	mm ² .s ⁻¹	6	1,26	1,22	1,31

Vlastnost	Jednotka	Počet stanovení	Průměrná hodnota	Minimální hodnota	Maximální hodnota
Tepelná difuzivita – směr K	mm ² .s ⁻¹	6	1,20	1,11	1,27
Teplotní roztažnost – směr P	μm.m ⁻¹ .°C ⁻¹	1	9,8	-	-
Teplotní roztažnost – směr S	μm.m ⁻¹ .°C ⁻¹	1	12,5	-	-
Teplotní roztažnost – směr K	μm.m ⁻¹ .°C ⁻¹	1	10,2	-	-
Abrazivnost Cerchar – směr P	–	1	4,40	-	-
Abrazivnost Cerchar – směr S	–	1	4,46	-	-
Abrazivnost Cerchar – směr K	–	1	4,72	-	-

Tab. 78 Parametry pórovitosti hornin ze vzorku V-20/3 podle MIP

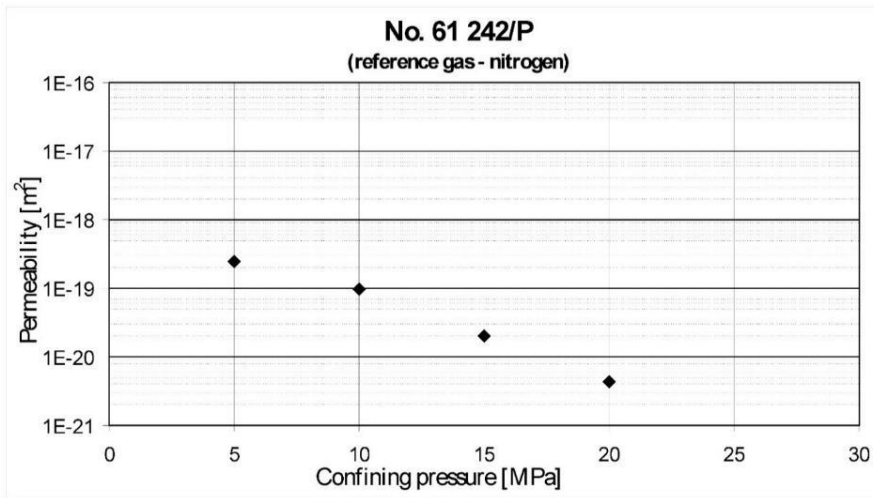
Označení zkušebního tělíska	Hloubková úroveň ve vrtu [m]	Celkový objem pórů [cm ³ .g ⁻¹]	Průměrná velikost póru [μm]	Pórovitost pomocí MIP [%]
V-20/3 P	0,0-0,1	0,0014	0,4338	0,39
V-20/3S	0,0-0,1	0,0020	8,3034	0,54
V-20/3K	0,0-0,1	0,0018	0,5010	0,49

Stanovení pevnosti hornin v trojosém stavu je součástí samostatné přílohy (Elektronická příloha 33).

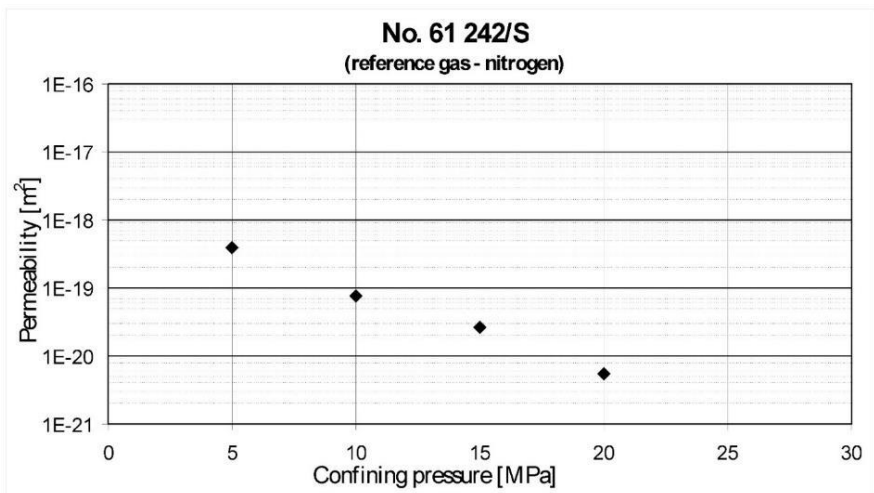
Naměřené výsledky hodnot koeficientu propustnosti ze zkoušky plynopropustnosti pro jednotlivé směry P, S a K a jejich trend při zvětšujícím se plášťovém tlaku jsou zřejmé z následujících grafů (Obr. 218, Obr. 219, Obr. 220).

Tab. 79 Hodnoty pevnostních a přetvárných vlastností hornin vzorku V-20/3

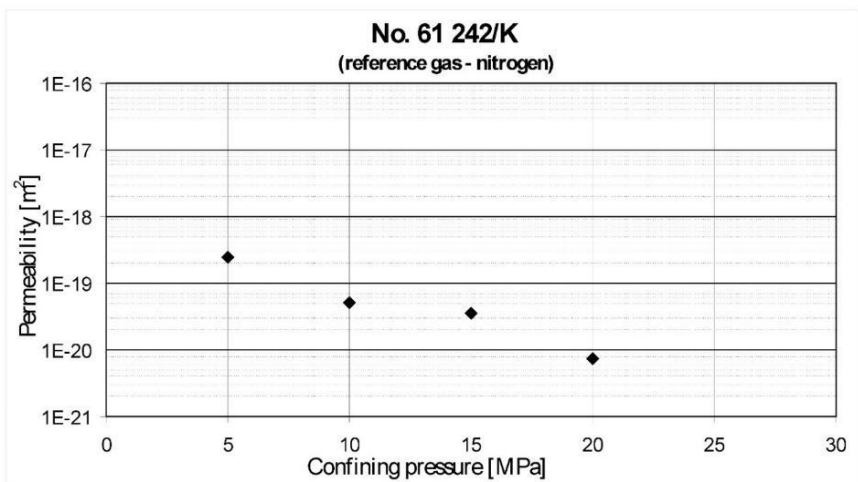
Vlastnost	Jednotka	Počet stanovení	Průměrná hodnota	Minimální hodnota	Maximální hodnota
Pevnost v prostém tlaku – směr P	MPa	5	134,3	96,9	162,5
Pevnost v prostém tlaku – směr S	MPa	5	97,0	79,5	117,0
Pevnost v prostém tlaku – směr K	MPa	5	77,5	52,1	89,9
Pevnost v příčném tahu – směr P	MPa	5	6,4	5,5	8,0
Pevnost v příčném tahu – směr S	MPa	5	6,8	5,4	9,3
Pevnost v příčném tahu – směr K	MPa	5	9,1	7,9	11,1
Modul přetvárnosti – směr P *	GPa	3	73,7	64,9	80,6
Modul přetvárnosti – směr S *	GPa	3	57,5	49,0	64,2
Modul přetvárnosti – směr K *	GPa	3	57,4	53,4	61,6
Modul pružnosti – směr P *	GPa	3	76,9	71,0	82,3
Modul pružnosti – směr S *	GPa	3	57,4	43,5	65,2
Modul pružnosti – směr K *	GPa	3	54,3	46,7	59,3
Poissonovo číslo – směr P*	-	3	0,18	0,17	0,19
Poissonovo číslo – směr S*		3	0,14	0,11	0,17
Poissonovo číslo – směr K*		3	0,15	0,12	0,16



Obr. 218 Plynopropustnost horniny vzorku V-20/3 směr P



Obr. 219 Plynopropustnost horniny vzorku V-20/3 směr S



Obr. 220 Plynopropustnost horniny vzorku V-20/3 směr K

Stanovení hustotních parametrů (objemové hustoty, mineralogické hustoty a pórovitosti), magnetické susceptibility, elektrické konduktivity a přirozené radioaktivity hornin a výpočet odvozené tepelné vodivosti jsou podrobně popsány ve zprávě Hanáka et al. (2019; Tab. 80; Elektronická příloha 31).

Tab. 80 Hustotní parametry, magnetická susceptibilita hornin z VO vzorku V-20/3

geotechnická stanice	geotechnický bod	laboratorní číslo vzorku	hustotní parametry				vypočtená tepelná vodivost	magnetická susceptibilita
			hornina	objemová hustota	mineralogická hustota	pórovitost		
			KÓD	(g.cm ⁻³)	(g.cm ⁻³)	(%)	(Wm ⁻¹ K ⁻¹)	(10 ⁻⁶ j. SI)
V_20/3	61242	P1	PRR MIG	2,699	2,705	0,22	3,4	234,5
V_20/3	61242	1a	PRR MIG	2,714	2,724	0,38	3,3	333,4
V_20/3	61242	K2	PRR MIG	2,713	2,719	0,22	3,3	383,7
V_20/3	61242	2a	PRR MIG	2,720	2,726	0,23	3,2	570,5
V_20/3	61242	S3	PRR MIG	2,709	2,723	0,49	3,3	269,7
V_20/3	61242	3a	PRR MIG	2,725	2,734	0,31	3,2	425,9

Vysvětlivky: PRR–pararula, MGM–migmatit, KVR–kvarcit, BTT–biotitický, MIG–migmatitizovaný, GRN–granát, PYR–pyrit

Údaje o radioaktivitě na jednotlivých geotechnických stanicích nelze statisticky podrobněji zpracovat pro nedostatečný počet měření. Z každého velkoobjemového vzorku byly měřeny pouze tři vzorky, takže k vyhodnocení lze využít aritmetických průměrů (Tab. 81). V tabulce jsou červeně znázorněny hodnoty poměru U/eU, které jsou vyšší, než 1,3. V této tabulce jsou též uvedeny hodnoty vypočtené tepelné produkce (HUP).

Tab. 81 Hodnoty obsahů eTh, U, eU, K, a U/e U, včetně vypočtené tepelné produkce HPU stanovené na vzorku V-20/3

geotechnická stanice	geotechnický bod	laboratorní číslo vzorku	radioaktivita - aritmetické průměry z více měření jednoho vzorku				poměr U(eU)	tepelná produkce	počet měření na jednom vzorku
			hornina	Th	U	e U			
			KÓD	(ppm)	(ppm)	(ppm)	(%)	(μW.m ⁻³)	n

geotechnická stanice	geotechnický bod	laboratorní číslo vzorku	hornina	radioaktivita - aritmetické průměry z více měření jednoho vzorku				poměr U(eU)	tepelná produkce	počet měření na jednom vzorku
				Th	U	e U	K			
V_20/3	61242	1a	PRR MIG	9,5	2,0	1,7	2,6	1,2	1,2	4
V_20/3	61242	2a	PRR MIG	9,1	2,3	1,8	2,2	1,3	1,2	4
V_20/3	61242	3a	PRR MIG	9,2	2,4	2,2	2,5	1,1	1,4	4

Vysvětlivky: PRR–pararula, MGM–migmatit, KVR–kvarcit, BTT–biotitický, MIG–migmatitizovaný, GRN–granát, PYR–pyrit

Vodivosti vzorků na odběrových bodech byly měřeny při různých frekvencích (20–10 000 Hz) ve třech kolmých směrech. Souhrn stanovených hodnot pro vzorek V-20/3 je uveden v Tab. 82 a detaily měření v Elektronická příloha 31. Prázdné hodnoty v tabulce u nízkých frekvencí značí, že elektrické vodivosti při těchto frekvencích nebylo možné věrohodně stanovit – důvod bývá jak v minerálním složení, tak i strukturním stavbě horniny.

Tab. 82 Parametry elektrické konduktivity, stanovené na vzorcích hornin z VO vzorku V-20/3

geotechnický bod	laboratorní číslo vzorku	pozice měření k foliaci	hornina	elektrická konduktivita σ [$\mu\text{S}\cdot\text{m}^{-1}$] (vodivost) při frekvenci f [Hz]								
				20	50	100	200	500	1000	2000	5000	10000
61242	P1	P	PRR MIG	0,459	0,705	0,987	1,360	2,077	2,871	3,980	6,207	8,831
61242	K2	K	PRR MIG				0,090	0,151	0,228	0,360	0,663	1,066
61242	S3	S	PRR MIG				0,117	0,195	0,298	0,469	0,852	1,366

Vysvětlivky: pozice čel vzorku k foliaci : P- paralelně, K-kolmo, S-šikmo, PRR-pararula, MIG-migmatitizovaná

Geotechnický vrt BGS20/1-VD

Výsledky stanovení FMV na materiálu z vrtu BGS20/1-VD provedené v laboratoři SG Geotechnika a.s. jsou uvedeny v následujících tabulkách (Tab. 83, Tab. 84, Tab. 85).

Tab. 83 Hodnoty fyzikálních, tepelných a technologických vlastností hornin z vrtu BGS20/1-VD

Vlastnost	Jednotka	Počet stanovení	Průměrná hodnota	Minimální hodnota	Maximální hodnota
Měrná hmotnost	kg.m ⁻³	1	2721	-	-
Objemová hmotnost	kg.m ⁻³	8	2814	2689	2961
Celková pórovitost	%	*			
Otevřená pórovitost	%	1	0,21	-	-
Nasákavost	%	1	0,05	-	-
Koeficient hydraulické vodivosti	m.s ⁻¹	1	3,4×10 ⁻¹³	-	-
Rychlost šíření UV	km.s ⁻¹	3	6,817	6,411	7,269
Tepelná vodivost	W.m ⁻¹ .K ⁻¹	6	2,34	2,33	2,36
Tepelná kapacita	MJ.m ⁻³ .K ⁻¹	6	1,98	1,89	2,08
Tepelná difuzivita	mm ² .s ⁻¹	6	1,18	1,12	1,24
Teplotní roztažnost	μm.m ⁻¹ .°C ⁻¹	1	9,8	-	-
Abrazivnost Cerchar	-	1	4,25	-	-

*Pozn. Nestanovena. Chyba stanovení měrné hmotnosti je vyšší než objemová hmotnost

Tab. 84 Parametry pórovitosti hornin z vrtu BGS20/1-VD podle MIP

Označení zkušebního tělíska	Hloubková úroveň ve vrtu [m]	Celkový objem pórů [cm ³ .g ⁻¹]	Průměrná velikost póru [μm]	Pórovitost pomocí MIP [%]
BGS20/1-VD	13,5-40,25	0,0007	5,8861	0,20

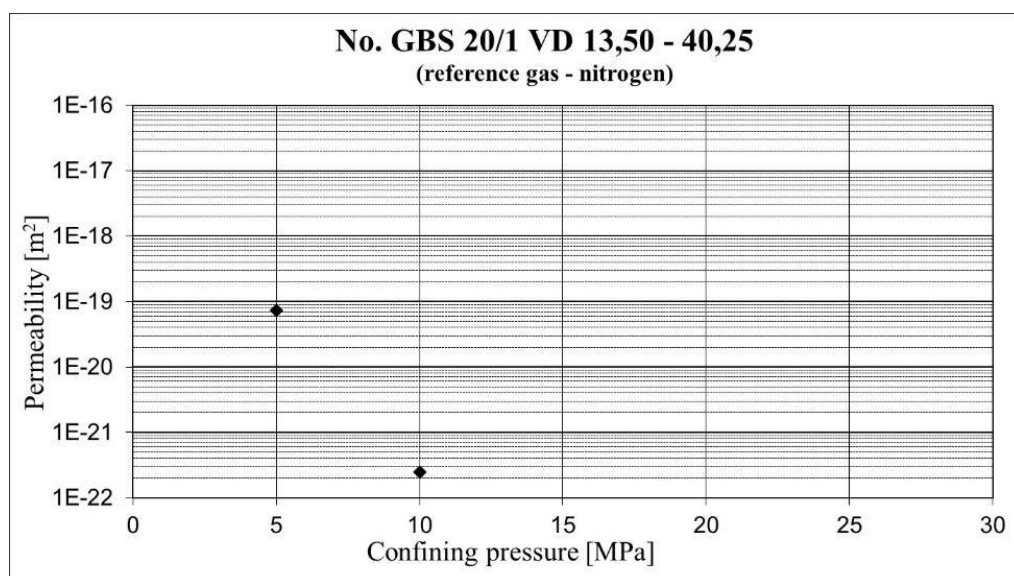
Tab. 85 Hodnoty pevnostních a přetvárných vlastností hornin z vrtu BGS20/1-VD

Vlastnost	Jednotka	Počet stanovení	Průměrná hodnota	Minimální hodnota	Maximální hodnota
Pevnost v prostém tlaku	MPa	5	127,0	63,5	198,1
Pevnost v příčném tahu – tah _⊥ k foliaci	MPa	5	9,9	7,7	11,8

Vlastnost	Jednotka	Počet stanovení	Průměrná hodnota	Minimální hodnota	Maximální hodnota
Modul přetvárnosti*	GPa	2	62,0	40,7	83,2
Modul pružnosti*	GPa	2	67,0	42,1	91,9
Poissonovo číslo*	-	2	0,18	0,09	0,27

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

Naměřené výsledky hodnot koeficientu propustnosti ze zkoušky plynopropustnosti pro vzorek BGS20/1-VD a jejich trend při zvětšujícím se plášťovém tlaku jsou zřejmé z následujícího grafu (Obr. 221).



Obr. 221 Plynopropustnost horniny vzorku BGS20/1-VD

Geotechnické vrtý BGS20/1-I a BGS 20/1-VU

Výsledky stanovení FMV na materiálu z vrtů BGS20/1-I a BGS20/1-VU provedené v laboratoři SG Geotechnika a.s. jsou uvedeny v následujících tabulkách (Tab. 86, Tab. 87, Tab. 88).

Tab. 86 Hodnoty fyzikálních, tepelných a technologických vlastností hornin z vrtů BGS20/1-I a BGS20/1-VU

Vlastnost	Jednotka	Počet stanovení	Průměrná hodnota	Minimální hodnota	Maximální hodnota
Měrná hmotnost	kg.m ⁻³	1	2724	-	-
Objemová hmotnost	kg.m ⁻³	8	2878	2765	2940
Celková pórovitost	%	*			
Otevřená pórovitost	%	1	0,41	-	-
Nasákavost	%	1	0,14	-	-
Koeficient hydraulické vodivosti	m.s ⁻¹	1	4,3×10 ⁻¹³	-	-
Rychlost šíření UV	km.s ⁻¹	3	5,173	5,125	5,654
Tepelná vodivost	W.m ⁻¹ .K ⁻¹	6	2,83	2,82	2,85
Tepelná kapacita	MJ.m ⁻³ .K ⁻¹	6	2,13	2,07	2,20
Tepelná difuzivita	mm ² .s ⁻¹	6	1,33	1,29	1,36
Teplotní roztažnost	μm.m ⁻¹ .°C ⁻¹	1	10,7	-	-
Abrazivnost Cerchar	–	1	4,09	-	-

*Pozn. Nestanovena. Chyba stanovení měrné hmotnosti je vyšší než objemová hmotnost

Tab. 87 Parametry pórovitosti hornin z vrtů BGS20/1-I a BGS20/1-VU podle MIP

Označení zkušebního tělíska	Hlubková úroveň ve vrtu [m]	Celkový objem pórů [cm ³ .g ⁻¹]	Průměrná velikost póru [μm]	Pórovitost pomocí MIP [%]
BGS20/1-I + VU	2,4-12,75	0,0008	5,1543	0,23

Tab. 88 Hodnoty pevnostních a přetvárných vlastností hornin z vrtů BGS20/1-I a BGS20/1-VU

Vlastnost	Jednotka	Počet stanovení	Průměrná hodnota	Minimální hodnota	Maximální hodnota
Pevnost v prostém tlaku	MPa	3	78,5	47,8	108,3
Pevnost v příčném tahu – tah \perp k foliaci	MPa	3	8,8	5,2	13,8
Modul přetvárnosti*	GPa	*			
Modul pružnosti*	GPa	*			
Poissonovo číslo*	-	*			

*Pozn. Nestanoveno z důvodu nedostatku vhodného horninového materiálu. Poznámka platí i pro stanovení plynopropustnosti.

2.3.5.3.4 Vzorky odebrané na 22. patře

Velkoobjemový vzorek V-22

Tab. 89 Hodnoty fyzikálních, tepelných a technologických vlastností hornin z VO vzorku V-22

Vlastnost	Jednotka	Počet stanovení	Průměrná hodnota	Minimální hodnota	Maximální hodnota
Měrná hmotnost	kg.m ⁻³	9	2686	2676	2695
Objemová hmotnost	kg.m ⁻³	80	2635	2529	2660
Celková pórovitost	%	9	1,42	1,30	1,67
Otevřená pórovitost	%	12	0,53	0,37	0,87
Nasákavost [%]	%	9	0,11	0,10	0,13
Rychlost šíření UV - směr K	km.s ⁻¹	21	4,40	3,74	4,69
Rychlost šíření UV - směr P	km.s ⁻¹	20	5,24	5,01	5,47
Rychlost šíření UV - směr S	km.s ⁻¹	20	4,79	3,19	5,34
Tepelná vodivost - směr K	W.m ⁻¹ .K ⁻¹	3	3,14	2,88	3,34
Tepelná vodivost – směr P	W.m ⁻¹ .K ⁻¹	3	3,27	3,01	3,54
Tepelná vodivost – směr S	W.m ⁻¹ .K ⁻¹	3	3,05	2,83	3,21
Tepelná kapacita – směr K	MJ.m ⁻³ .K ⁻¹	3	2,16	2,03	2,24
Tepelná kapacita - směr P	MJ.m ⁻³ .K ⁻¹	3	2,00	1,82	2,12
Tepelná kapacita - směr S	MJ.m ⁻³ .K ⁻¹	3	2,11	2,03	2,19
Tepelná difuzivita – směr K	mm ² .s ⁻¹	3	1,45	1,42	1,52
Tepelná difuzivita – směr P	mm ² .s ⁻¹	3	1,64	1,59	1,67
Tepelná difuzivita – směr S	mm ² .s ⁻¹	3	1,44	1,39	1,47
Abrazivnost - směr K	-	1	4,47	-	-
Abrazivnost - směr P	-	1	4,30	-	-
Abrazivnost - směr S	-	1	4,29	-	-

Výsledky stanovení pórovitosti hornin z VO vzorku V-22 metodou MIP jsou uvedeny v Tab. 90.

Tab. 90 Parametry pórovitosti hornin z VO vzorku V-22

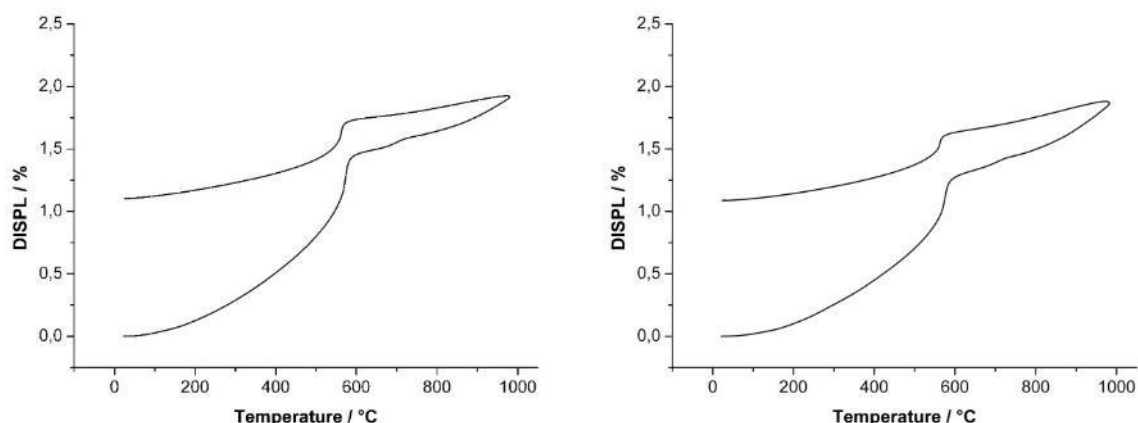
Označení zkušebního tělíska	Celkový objem pórů [cm ³ .g ⁻¹]	Průměrná velikost póru (4V/A) [μm]	Pórovitost pomocí MIP [%]	
			dílčí hodnoty	průměr
16295/K7B/2	0,0015	0,1753	0,39	0,48
16295/P6A/3	0,0020	0,0629	0,52	
16295/S6A/6	0,0021	0,4717	0,53	

Tab. 91 uvádí výsledky měření koeficientu hydraulické vodivosti hornin VO vzorku V-22.

Tab. 91 Koeficient hydraulické vodivosti hornin z VO vzorku V-22

Označení zkušebního tělíska	Objemová hmotnost [kg.m ⁻³]	Pórovitost [obj. %]	Průměr k ₁₀ [m.s ⁻¹]	Směrodatná odchylka	Koeficient variability [%]
16295/K6A	2623	0,57	5,7E-13	6,2E-14	10,9
16295/K6B	2639	0,51	2,7E-13	1,8E-14	6,9
16295/K7A	2649	0,53	4,2E-13	1,2E-13	29,5
16295/P6B	2643	0,48	9,3E-13	1,2E-13	12,4
16295/P7A	2637	0,52	1,3E-12	1,6E-13	11,7
16295/P7B	2637	0,51	5,2E-12	1,3E-13	2,6
16295/S6B	2612	0,95	9,6E-12	2,4E-12	25,1
16295/S7A	2649	0,57	1,7E-12	1,1E-13	6,3
16295/S7B	2624	0,57	5,1E-13	3,6E-14	6,9

Výsledky studia teplotní roztažnosti hornin VO vzorku V-22 jsou prezentovány na Obr. 222, Tab. 92 pak udává vypočtené koeficienty délkové teplotní roztažnosti α do 150 °C a 1000 °C.



Obr. 222 Dilatační křivka tělíska 16295/K7B (ohřev na 1000 °C s následným ochlazením, vlevo - roztažnost sledována kolmo na foliaci, vpravo - roztažnost sledována ve směru foliace)

Tab. 92 Koeficienty teplotní roztažnosti tělíska 16295/K7B do 150 °C, resp. 1000 °C

Označení zkušebního tělíska	Rozměry zkušebního tělíska [mm]	Teplota ohřevu [°C]	Rychlost ohřevu [°C/min]	Orientace vůči foliaci	α [K ⁻¹]
16295/K7B/13	10 x 10 x 10	1000	20	⊥	21,0.10 ⁻⁶
16295/K7B/20	10 x 10 x 10	1000	20	//	19,9.10 ⁻⁶
16295/K7B/15	10 x 10 x 10	150	1	⊥	7,1.10 ⁻⁶
16295/K7B/18	10 x 10 x 10	150	1	//	8,9.10 ⁻⁶

V Tab. 93 jsou přehlednou formou shrnuty výsledky studia základních pevnostních a přetvárných vlastností hornin VO vzorku V-22.

Tab. 93 Hodnoty pevnostních a přetvárných vlastností hornin z VO vzorku V-22

Vlastnost	Jednotka	Počet stanovení	Průměrná hodnota	Minimální hodnota	Maximální hodnota
Pevnost v prostém tlaku - <i>K</i>	MPa	5	160	138	176
Pevnost v prostém tlaku - <i>P</i>	MPa	5	111	80	134
Pevnost v prostém tlaku - <i>S</i>	MPa	5	82	41	114
Modul přetvárnosti - <i>směr K</i>	MPa	5	41082	38129	47003

Vlastnost	Jednotka	Počet stanovení	Průměrná hodnota	Minimální hodnota	Maximální hodnota
Modul přetvárnosti - směr <i>P</i>	MPa	5	44442	36441	53660
Modul přetvárnosti - směr <i>S</i>	MPa	5	31754	22152	44145
Poissonovo číslo – směr <i>K</i>	-	5	0,19	0,16	0,23
Poissonovo číslo – směr <i>P</i>	-	5	0,17	0,13	0,21
Poissonovo číslo – směr <i>S</i>	-	5	0,10	0,07	0,12
Pevnost v příčném tahu – tah \perp k foliaci	MPa	7	6,2	5,2	7,1
Pevnost v příčném tahu – tah // s foliaci	MPa	6	11,1	9,2	14,0
Pevnost v příčném tahu – tah 45° k foliaci	MPa	6	8,1	7,6	8,5

V Tab. 94 jsou uvedeny hodnoty modulů přetvárnosti (E_{def}) a modulů elasticity (pružnosti, resp. Youngovy moduly) E_{el} stanovené z cyklické zkoušky v jednoosém tlaku.

Tab. 94 Hodnoty pevnosti v prostém tlaku σ_{Pd} , modulu přetvárnosti E_{1def} , E_{2def} a modulu pružnosti E_{1el} a E_{2el} a jejich poměrů na VO vzorku V-22 stanovené v režimu cyklického zatěžování

Označení zkušebního tělíska	σ_{Pd} [MPa]	E_{1def} [GPa]	E_{1el} [GPa]	E_{2def} [GPa]	E_{2el} [GPa]	Poměr E_{1def}/E_{1el} [-]	Poměr E_{2def}/E_{2el} [-]
16295/K8	157	35	34	43	44	1,05	0,97
16295/K9	157	34	40	48	48	0,85	0,99
16295/P8	152	40	44	50	51	0,91	0,98
16295/P9	136	37	41	48	49	0,91	0,97
16295/S15	42	31	35	37	39	0,89	0,95
16295/S19	57	28	32	37	38	0,89	0,97

Výsledky stanovení pevnosti hornin v trojosém stavu napjatosti pro všechny testované laboratorní vzorky uvádí Tab. 95. V Obr. 223 je prezentováno srovnání tvaru pevnostních obálek pro VO vzorek V-22 v různých směrech zatěžování vůči metamorfní foliaci. Hodnoty materiálové

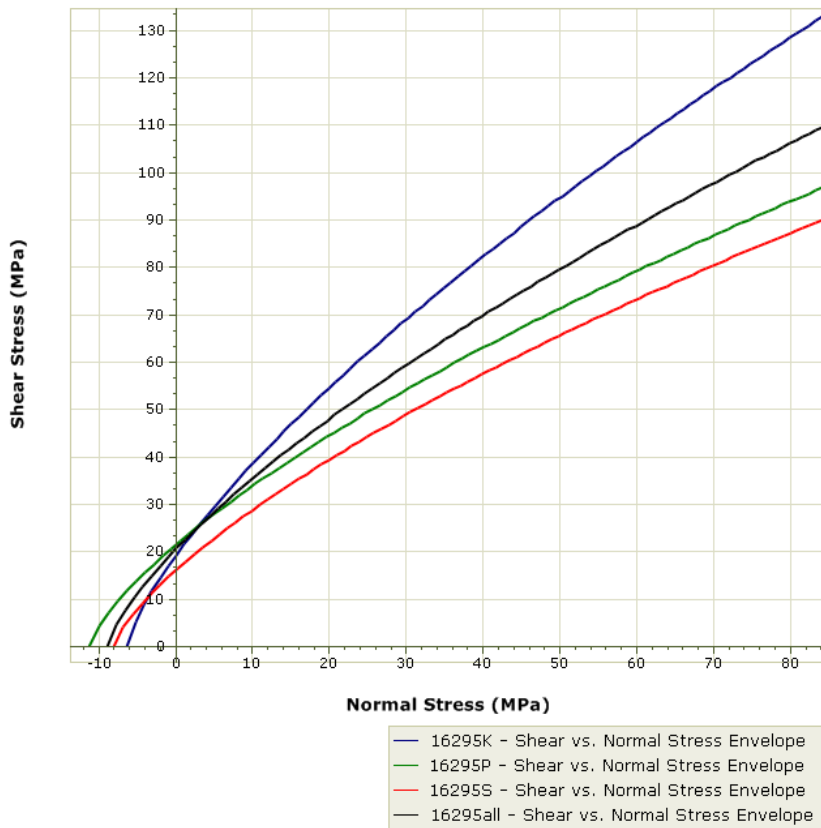
konstanty m_i pro jednotlivé testované vzorky a jednotlivé směry zatěžování jsou uvedeny v Tab. 96.

Tab. 95 Hodnoty pevnosti hornin VO vzorku V-22 v trojosém stavu napjatosti při různém plášťovém tlaku v různých směrech zatěžování vůči metamorfní foliaci

Označení zkušebního tělíska	Orientace zkušebního tělíska vůči foliaci	Plášťový tlak [MPa]	Pevnost v trojosém stavu napjatosti [MPa]
16295/K10	K	5	195
16295/K11		10	262
16295/K12		15	315
16295/P10	P	5	148
16295/P11		10	171
16295/P12		15	227
16295/S10	S	5	147
16295/S11		10	131
16295/S12		15	187

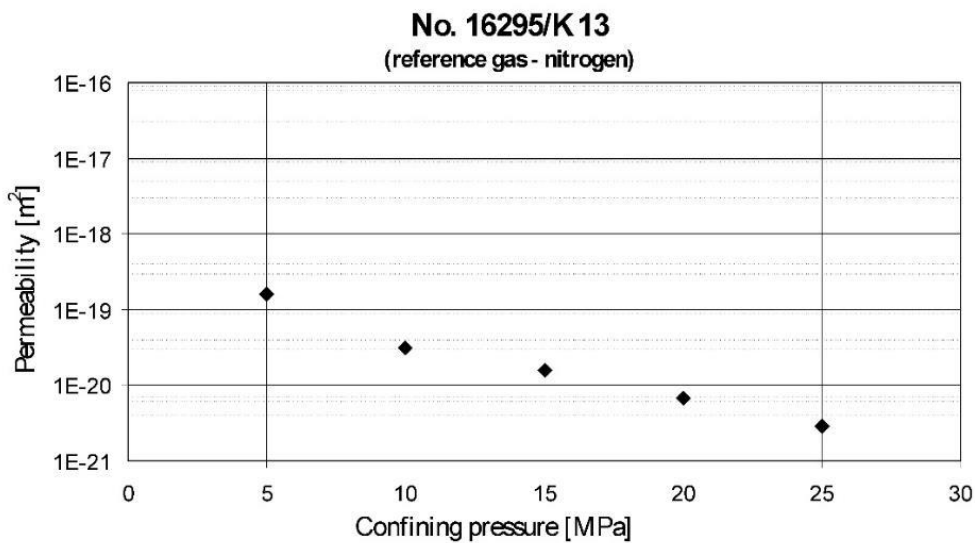
Tab. 96 Hodnoty globální pevnosti a materiálové konstanty m_i pro jednotlivé testované vzorky a jednotlivé směry zatěžování vypočtené v programu RocData (VO vzorek V-22)

Označení vzorku / směr vůči foliaci	Globální pevnost intaktního vzorku σ_{ci} [MPa]	Materiálová konstanta m_i
16295 / směr K	159	25,0
16295 / směr P	119	10,5
16295 / směr S	93	11,5
16295 / celý vzorek	132	14,8

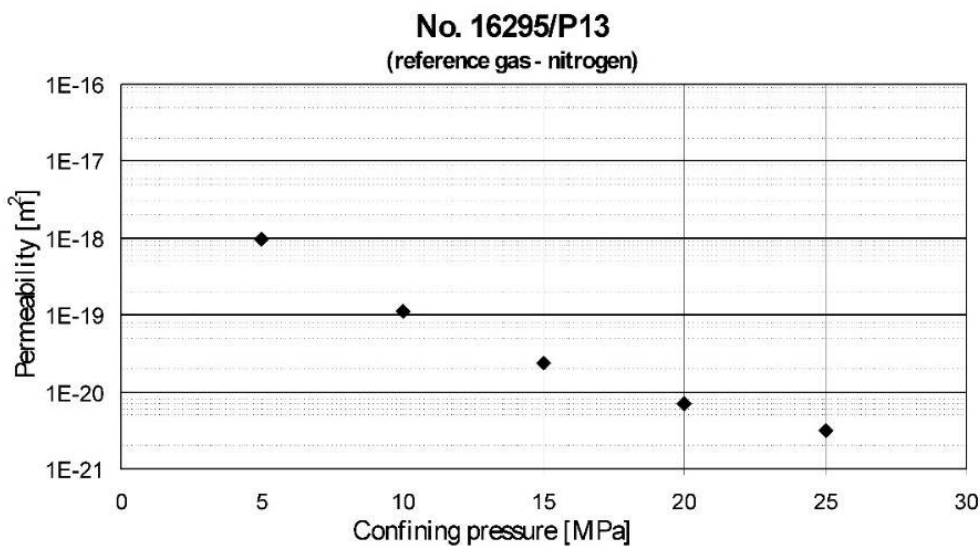


Obr. 223 Tvar pevnostních obálek zkonstruovaných podle Hoek-Brownova kritéria porušení v programu RocData pro VO vzorek V-22

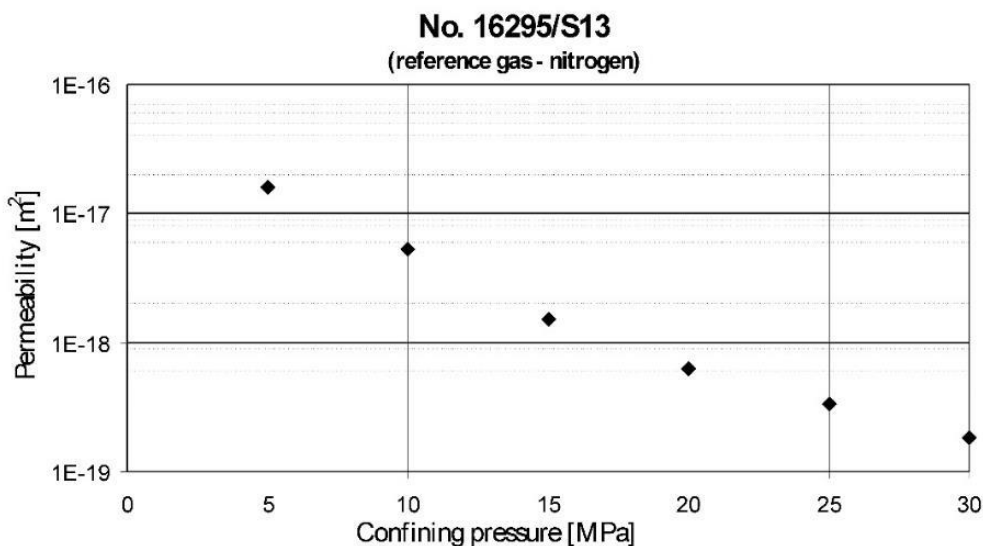
Naměřené výsledky hodnot koeficientu propustnosti pro jednotlivé směry K, P a S a jejich trend při zvětšujícím se plášťovém tlaku jsou prezentovány v Obr. 224 – Obr. 226.



Obr. 224 Plynopropustnost horniny VO vzorku V-22 (zkušební tělíčko K13 navrtáno kolmo k foliaci)



Obr. 225 Plynopropustnost horniny VO vzorku V-22 (zkušební tělísko P13 navrtáno rovnoběžně s foliací)



Obr. 226 Plynopropustnost horniny VO vzorku V-22 (zkušební tělísko S13 navrtáno šikmo k foliací)

Stanovení hustotních parametrů (objemové hustoty, mineralogické hustoty a pórovitosti), magnetické susceptibility, elektrické konduktivity a přirozené radioaktivity hornin a výpočet odvozené tepelné vodivosti jsou podrobně popsány ve zprávě Hanáka et al. (2019; Tab. 97; Elektronická příloha 31).

Údaje o radioaktivitě na jednotlivých geotechnických stanicích nelze statisticky podrobněji zpracovat pro nedostatečný počet měření. Z každého velkoobjemového vzorku byly měřeny pouze tři vzorky, takže k vyhodnocení lze využít aritmetických průměrů (Tab. 98).

Tab. 97 Hustotní parametry, magnetická susceptibilita hornin z VO vzorku V-22

geotechnická stanice	geotechnický bod	laboratorní číslo vzorku	hustotní parametry				vypočtená tepelná vodivost	magnetická susceptibilita
			hornina	objemová hustota	mineralogická hustota	pórovitost		
			KÓD	(g.cm ⁻³)	(g.cm ⁻³)	(%)	(Wm ⁻¹ K ⁻¹)	(10 ⁻⁶ j. SI)
V_22	16295	22/1	MGT	2,641	2,652	0,40	3,7	138,6
V_22	16295	22/2	MGT	2,655	2,664	0,34	3,6	149,4
V_22	16295	22/3	MGT	2,644	2,654	0,37	3,7	136,7
V_22	16295	P_22/4	MGT	2,652	2,662	0,40	3,7	159,9
V_22	16295	K_22/5	MGT	2,655	2,664	0,35	3,6	177,7
V_22	16295	22/6	MGT	2,636	2,646	0,40	3,8	100,2
V_22	16295	22/7	MGT	2,663	2,672	0,33	3,6	207,5
V_22	16295	22/8	MGT	2,654	2,664	0,37	3,6	173,1
V_22	16295	S_22/9	MGT	2,646	2,657	0,41	3,7	144,4
V_22	16295	22/10	MGT	2,652	2,660	0,33	3,7	163,1
V_22	16295	22/11	MGT	2,654	2,664	0,38	3,6	175,6
V_22	16295	22/12	MGT	2,633	2,655	0,80	3,7	138,0
V_22	16295	22/13	MGT	2,656	2,668	0,44	3,6	174,1
V_22	16295	22/14	MGT	2,649	2,659	0,40	3,7	164,5
V_22	16295	22/15	MGT	2,658	2,669	0,41	3,6	190,1

Vysvětlivky: MGM–migmatit

Tab. 98 Hodnoty obsahů eTh , U , eU , K , a U/eU , včetně vypočtené tepelné produkce HPU stanovené na VO vzorku V-22

geotechnický bod	číslo vzorku	laboratorní číslo vzorku	hornina	radioaktivita - aritmetické průměry z více měření jednoho vzorku				poměr $U(eU)$	tepelná produkce HUP	počet měření na jednom vzorku
				Th	U	eU	K			
			KÓD	(ppm)	(ppm)	(ppm)	(%)		($\mu W \cdot m^{-3}$)	n
V_22	16295	P_22/4	MGT	13,7	3,9	4,1	4,4	1,0	2,1	4
V_22	16295	22/6	MGT	12,4	3,7	4,2	5,1	0,9	2,1	4
V_22	16295	22/7	MGT	16,2	4,9	4,3	4,2	1,1	2,4	4

Vysvětlivky: MGM–migmatit

Vodivosti vzorků na odběrových bodech byly měřeny při různých frekvencích (20–10 000 Hz) ve třech kolmých směrech. Souhrn stanovených hodnot pro vzorek V-22 je uveden v Tab. 99 a detaily měření v Elektronická příloha 31.

Tento vzorek (V-22) vykazuje nejvyšší hodnoty ze všech měřených vzorků. Horniny tohoto bodu jsou klasifikovány jako pararuly významně migmatitizované až migmatity. Očekávaný by byl ovšem trend opačný, kdy horniny s převahou taveniny budou mít vodivost nižší, než např. pararuly. Tato vyšší vodivost však byla stanovena ve směru paralelně s foliací a může tím být také výrazně ovlivněna. Vzorky z tohoto odběrového bodu jsou hrubozrnnější než ostatní, a vodivost může být výrazně ovlivněna mezizrnnými prostory a habitem a směrem biotitových zrn.

Tab. 99 Parametry elektrické konduktivity, stanovené na vzorcích hornin z VO vzorku V-22

geotechnický bod	laboratorní číslo vzorku	police měření k foliaci	hornina	elektrická konduktivita σ [$\mu S \cdot m^{-1}$] (vodivost) při frekvenci f [Hz]								
				20	50	100	200	500	1000	2000	5000	10000
16295	P_22/4	P	MGT	3,738	4,161	4,887	5,665	6,936	8,181	9,660	12,222	14,886
16295	K_22/5	K	MGT	0,555	0,703	0,805	0,947	1,198	1,465	1,844	2,598	3,483
16295	S_22/9	S	MGT	0,468	0,600	0,721	0,862	1,125	1,397	1,781	2,557	3,303

Vysvětlivky: police čel vzorku k foliaci :P- paralelně, K-kolmo, S-šikmo, MGT-migmatit

Velkoobjemový vzorek V-22-R3

Tab. 100 Hodnoty fyzikálních, tepelných a technologických vlastností hornin z VO vzorku V-22-R3

Vlastnost	Jednotka	Počet stanovení	Průměrná hodnota	Minimální hodnota	Maximální hodnota
Měrná hmotnost	kg.m ⁻³	9	2767	2761	2774
Objemová hmotnost	kg.m ⁻³	86	2742	2695	2757
Celková pórovitost	%	9	0,67	0,58	0,76
Otevřená pórovitost	%	12	0,39	0,33	0,54
Nasákavost [%]	%	9	0,10	0,09	0,13
Rychlost šíření UV - směr K	km.s ⁻¹	22	3,50	3,14	3,74
Rychlost šíření UV - směr P	km.s ⁻¹	19	5,49	5,12	5,73
Rychlost šíření UV - směr S	km.s ⁻¹	23	4,48	3,85	5,27
Tepelná vodivost - směr K	W.m ⁻¹ .K ⁻¹	3	2,47	2,30	2,63
Tepelná vodivost – směr P	W.m ⁻¹ .K ⁻¹	3	3,00	2,98	3,02
Tepelná vodivost – směr S	W.m ⁻¹ .K ⁻¹	3	2,69	2,54	2,98
Tepelná kapacita – směr K	MJ.m ⁻³ .K ⁻¹	3	2,08	2,03	2,15
Tepelná kapacita - směr P	MJ.m ⁻³ .K ⁻¹	3	2,25	2,20	2,28
Tepelná kapacita - směr S	MJ.m ⁻³ .K ⁻¹	3	1,99	1,82	2,22
Tepelná difuzivita – směr K	mm ² .s ⁻¹	3	1,18	1,13	1,22
Tepelná difuzivita – směr P	mm ² .s ⁻¹	3	1,34	1,32	1,36
Tepelná difuzivita – směr S	mm ² .s ⁻¹	3	1,35	1,31	1,40
Abrazivnost - směr K	-	1	4,55	-	-
Abrazivnost - směr P	-	1	4,46	-	-
Abrazivnost - směr S	-	1	4,29	-	-

Výsledky stanovení pórovitosti hornin z VO vzorku V-22-R3 metodou MIP jsou uvedeny v Tab. 101.

Tab. 101 Parametry pórovitosti hornin z VO vzorku V-22-R3

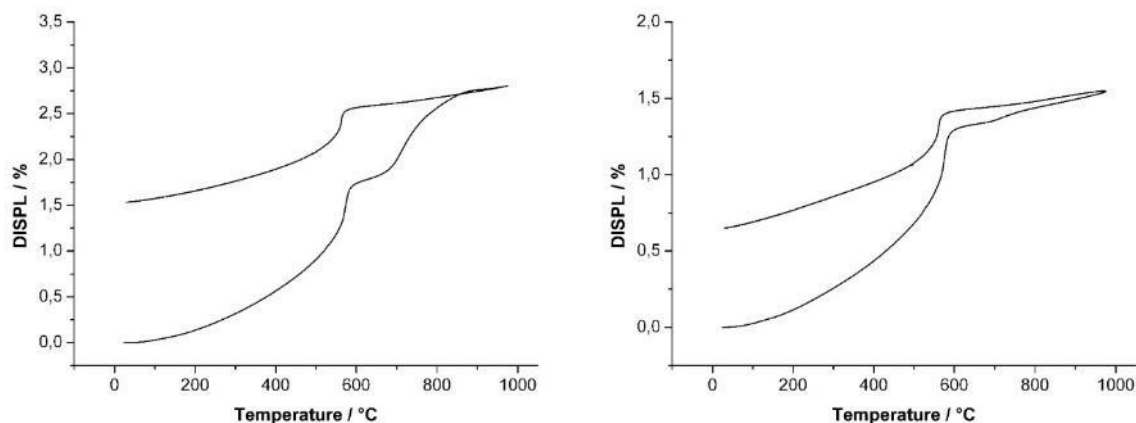
Označení zkušebního tělíska	Celkový objem pórů [cm ³ .g ⁻¹]	Průměrná velikost póru (4V/A) [μm]	Pórovitost pomocí MIP [%]	
			dílčí hodnoty	průměr
16467/K6A/1	0,0041	0,0456	1,11	0,54
16467/P7B/4	0,0008	0,1366	0,23	
16467/S7B/9	0,0010	0,3353	0,28	

Tab. 102 uvádí výsledky měření koeficientu hydraulické vodivosti hornin VO vzorku V-22-R3.

Tab. 102 Koeficient hydraulické vodivosti hornin z VO vzorku V-22-R3

Označení zkušebního tělíska	Objemová hmotnost [kg.m ⁻³]	Pórovitost [obj. %]	Průměr k ₁₀ [m.s ⁻¹]	Směrodatná odchylka	Koeficient variability [%]
16467/K6B	2731	0,49	9,9E-14	2,6E-15	2,7
16467/K7A	2722	0,36	4,0E-13	3,4E-15	0,9
16467/K7B	2738	0,38	2,0E-13	1,7E-15	0,9
16467/P6A	2730	0,38	1,4E-13	3,9E-16	0,3
16467/P6B	2730	0,37	4,1E-13	1,2E-15	0,3
16467/P7A	2748	0,39	8,0E-13	3,3E-14	4,2
16467/S6A	2716	0,36	průtok pod mezí detekce		
16467/S6B	2746	0,37	7,2E-14	2,2E-16	0,3
16467/S7A	2729	0,38	4,3E-13	1,2E-15	0,3

Výsledky studia teplotní roztažnosti hornin VO vzorku V-22-R3 jsou prezentovány na Obr. 227, Tab. 103 pak udává vypočtené koeficienty délkové teplotní roztažnosti α do 150 °C a 1000 °C.



Obr. 227 Dilatační křivka tělíska 16467/P7B (ohřev na 1000 °C s následným ochlazením, vlevo - roztažnost sledována kolmo na foliaci, vpravo - roztažnost sledována ve směru foliace)

Tab. 103 Koeficienty teplotní roztažnosti tělíska 16467/P7B do 150 °C, resp. 1000 °C

Označení zkušebního tělíska	Rozměry zkušebního tělíska [mm]	Teplota ohřevu [°C]	Rychlost ohřevu [°C/min]	Orientace vůči foliaci	α [K ⁻¹]
16467/P7B/17	10 x 10 x 10	1000	20	⊥	28,7.10 ⁻⁶
16467/P7B/15	10 x 10 x 10	1000	20	//	15,8.10 ⁻⁶
16467/P7B/19	10 x 10 x 10	150	1	⊥	9,3.10 ⁻⁶
16467/P7B/18	10 x 10 x 10	150	1	//	8,7.10 ⁻⁶

V Tab. 104 jsou přehlednou formou shrnuty výsledky studia základních pevnostních a přetvárných vlastností hornin VO vzorku V-22-R3.

V Tab. 105 jsou uvedeny hodnoty modulů přetvárnosti (E_{def}) a modulů elasticity (pružnosti, resp. Youngovy moduly) E_{el} stanovené z cyklické zkoušky v jednoosém tlaku.

Tab. 104 Hodnoty pevnostních a přetvárných vlastností hornin z VO vzorku V-22-R3

Vlastnost	Jednotka	Počet stanovení	Průměrná hodnota	Minimální hodnota	Maximální hodnota
Pevnost v prostém tlaku - <i>K</i>	MPa	5	165	154	174
Pevnost v prostém tlaku - <i>P</i>	MPa	5	126	84	141
Pevnost v prostém tlaku - <i>S</i>	MPa	5	74	58	91
Modul přetvárnosti - <i>směr K</i>	MPa	5	41015	37414	43540
Modul přetvárnosti - <i>směr P</i>	MPa	5	53856	47225	59760
Modul přetvárnosti - <i>směr S</i>	MPa	5	29487	23341	34793
Poissonovo číslo – <i>směr K</i>	-	5	0,17	0,13	0,22
Poissonovo číslo – <i>směr P</i>	-	5	0,16	0,13	0,17
Poissonovo číslo – <i>směr S</i>	-	5	0,12	0,08	0,17
Pevnost v příčném tahu – <i>tah ⊥ k foliaci</i>	MPa	7	7,8	5,3	10,9
Pevnost v příčném tahu – <i>tah // s foliací</i>	MPa	8	12,7	11,3	17,8
Pevnost v příčném tahu – <i>tah 45° k foliaci</i>	MPa	7	10,4	6,5	13,9

Tab. 105 Hodnoty pevnosti v prostém tlaku σ_{Pd} , modulu přetvárnosti E_{1def} , E_{2def} a modulu pružnosti E_{1el} a E_{2el} a jejich poměrů na VO vzorku V-22-R3 stanovené v režimu cyklického zatěžování

Označení zkušebního tělíska	σ_{Pd} [MPa]	E_{1def} [GPa]	E_{1el} [GPa]	E_{2def} [GPa]	E_{2el} [GPa]	Poměr E_{1def}/E_{1el} [-]	Poměr E_{2def}/E_{2el} [-]
16467/K8	202	29	34	42	43	0,87	0,97
16467/K9	182	30	32	41	42	0,93	0,97
16467/P8	133	46	49	58	58	0,95	0,99
16437/P9	147	44	48	56	59	0,92	0,96
16467/S8	81	26	31	36	38	0,85	0,96
16467/S9	73	22	27	32	34	0,83	0,93

Výsledky stanovení pevnosti hornin v trojosém stavu napjatosti pro všechny testované laboratorní vzorky uvádí Tab. 106. Hodnoty materiálové konstanty m_i pro jednotlivé testované vzorky a jednotlivé směry zatěžování jsou uvedeny v Tab. 107.

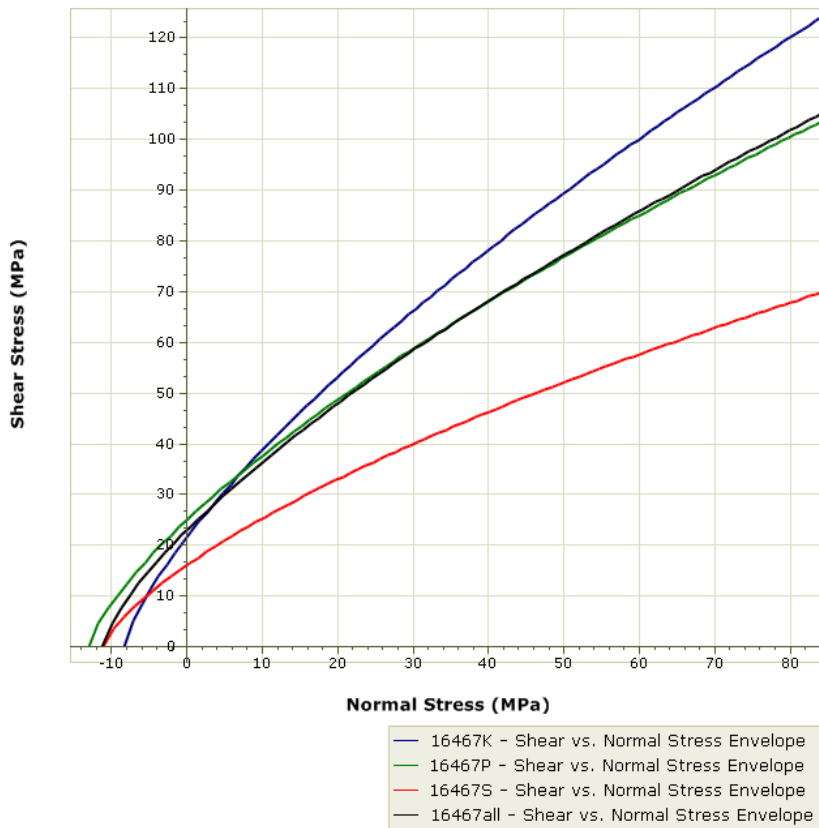
Tab. 106 Hodnoty pevnosti hornin VO vzorku V-22-R3 v trojosém stavu napjatosti při různém plášťovém tlaku v různých směrech zatěžování vůči metamorfní foliaci

Označení zkušebního tělíska	Orientace zkušebního tělíska vůči foliaci	Plášťový tlak [MPa]	Pevnost v trojosém stavu napjatosti [MPa]
16467/K10	K	5	163
16467/K11		10	242
16467/K12		15	242
16467/P10	P	5	174
16467/P11		10	221
16467/P12		15	246
16467/S10	S	5	79
16467/S11		10	91
16467/S12		15	118

Tab. 107 Hodnoty globální pevnosti a materiálové konstanty m_i pro jednotlivé testované vzorky a jednotlivé směry zatěžování vypočtené v programu RocData (VO vzorek V-22-R3)

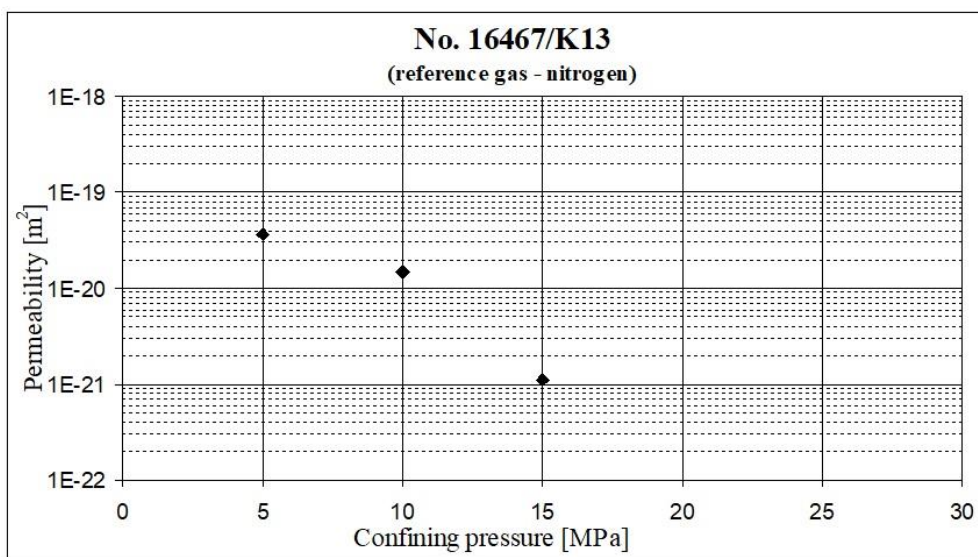
Označení vzorku / směr vůči foliaci	Globální pevnost intaktního vzorku σ_{ci} [MPa]	Materiálová konstanta m_i
16467 / směr K	157	19,0
16467 / směr P	139	10,6
16467 / směr S	72	6,5
16467 / celý vzorek	135	12,0

V Obr. 228 je prezentováno srovnání tvaru pevnostních obálek pro VO vzorek V-22-R3 v různých směrech zatěžování vůči metamorfní foliaci.

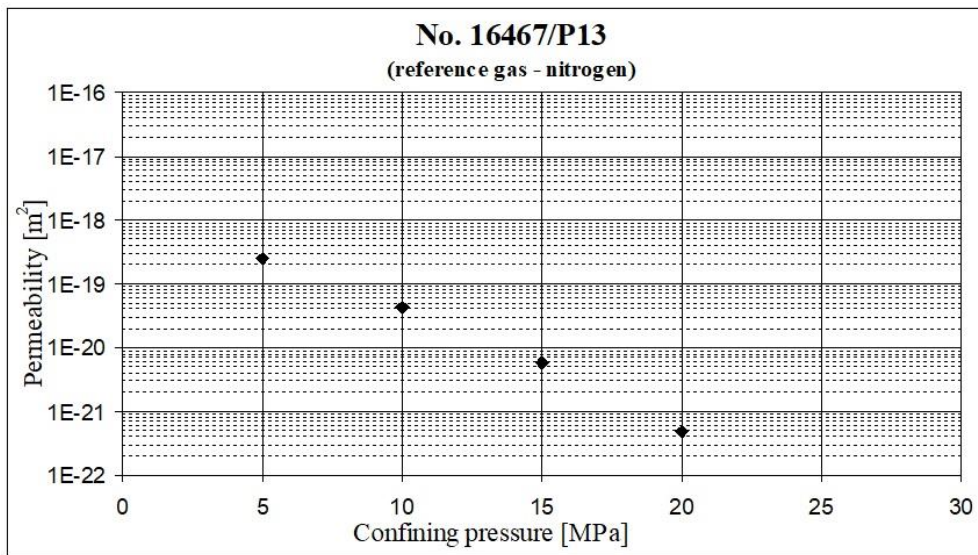


Obr. 228 Tvar pevnostních obálek zkonstruovaných podle Hoek-Brownova kritéria porušení v programu RocData pro VO vzorek V-22-R3

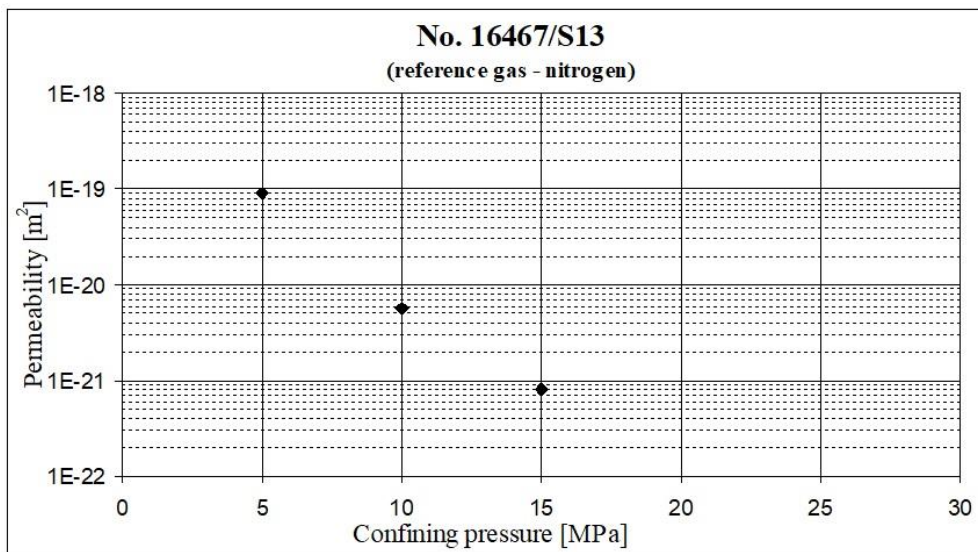
Naměřené výsledky hodnot koeficientu propustnosti pro jednotlivé směry K, P a S a jejich trend při zvětšujícím se plášťovém tlaku jsou prezentovány v Obr. 229 – Obr. 231.



Obr. 229 Plynopropustnost horniny VO vzorku V-22-R3 (zkušební tělísko K13 navrtáno kolmo k foliaci)



Obr. 230 Plynopropustnost horniny VO vzorku V-22-R3 (zkušební tělíčko P13 navrtáno rovnoběžně s folií)



Obr. 231 Plynopropustnost horniny VO vzorku V-22-R3 (zkušební tělíčko S13 navrtáno šikmo k folií)

Stanovení hustotních parametrů (objemové hustoty, mineralogické hustoty a pórovitosti), magnetické susceptibility, elektrické konduktivity a přirozené radioaktivity hornin a výpočet odvozené tepelné vodivosti jsou podrobně popsány ve zprávě Hanáka et al. (2019; Tab. 108; Elektronická příloha 31).

Tab. 108 Hustotní parametry, magnetická susceptibilita hornin z VO vzorku V-22-R3

geotechnická stanice	číslo vzorku	laboratorní číslo vzorku	hustotní parametry				vypočtená tepelná vodivost	magnetická susceptibilita
			hornina	objemová hustota	mineralogická hustota	pórovitost		
			KÓD	(g.cm ⁻³)	(g.cm ⁻³)	(%)	(Wm ⁻¹ K ⁻¹)	(10 ⁻⁶ j. SI)
22.P.R3	16467	S_21A	PRR MIG	2,740	2,749	0,31	3,1	302,97
22.P.R3	16467	K_21B	PRR MIG	2,738	2,749	0,41	3,1	482,30
22.P.R3	16467	K_21A	PRR MIG	2,727	2,735	0,27	3,2	371,37
22.P.R3	16467	P_18B	PRR MIG	2,747	2,755	0,28	3,1	334,42
22.P.R3	16467	S_21B	PRR MIG	2,738	2,746	0,32	3,1	292,95
22.P.R3	16467	P_18A	PRR MIG	2,745	2,753	0,29	3,1	327,16

Vysvětlivky: PRR–pararula, MIG–migmatitizovaný

Údaje o radioaktivitě na jednotlivých geotechnických stanicích nelze statisticky podrobněji zpracovat pro nedostatečný počet měření. Z každého velkoobjemového vzorku byly měřeny pouze tři vzorky, takže k vyhodnocení lze využít aritmetických průměrů (Tab. 109). V tabulce jsou červeně znázorněny hodnoty poměru U/eU, které jsou vyšší, než 1,3. V této tabulce jsou též uvedeny hodnoty vypočtené tepelné produkce (HUP).

Tab. 109 Hodnoty obsahů eTh, U, eU, K, a U/e U, včetně vypočtené tepelné produkce HPU stanovené na vzorku V-22-R3

geotechnická stanice	geotechnický bod	laboratorní číslo vzorku	radioaktivita - aritmetické průměry z více měření jednoho vzorku				poměr U(eU)	tepelná produkce	počet měření na jednom vzorku	
			hornina	Th	U	e U				K
			KÓD	(ppm)	(ppm)	(ppm)	(%)	(μW.m ⁻³)	n	
22.P.R3	16467	S_21A	PRR MIG	14,2	3,4	2,6	2,4	1,3	1,8	2
22.P.R3	16467	K_21B	PRR MIG	13,7	3,6	2,4	2,9	1,5	1,7	2
22.P.R3	16467	P_18A	PRR MIG	13,7	3,3	2,4	2,2	1,4	1,7	2

Vysvětlivky: PRR–pararula, MIG–migmatitizovaný

Vodivosti vzorků na odběrových bodech byly měřeny při různých frekvencích (20–10 000 Hz) ve třech kolmých směrech. Souhrn stanovených hodnot pro vzorek V-22-R3 je uveden v Tab. 110 a detaily měření v Elektronická příloha 31. Prázdné hodnoty v tabulce u nízkých frekvencí značí, že elektrické vodivosti při těchto frekvencích nebylo možné věrohodně stanovit – důvod bývá jak v minerálním složení, tak i strukturní stavbě horniny.

Tab. 110 Parametry elektrické konduktivity, stanovené na vzorcích hornin z VO vzorku V-22-R3

geotechnický bod	laboratorní číslo vzorku	pozice měření k foliaci	hornina	elektrická konduktivita σ [$\mu\text{S}\cdot\text{m}^{-1}$] (vodivost) při frekvenci f [Hz]									
				20	50	100	200	500	1000	2000	5000	10000	
16467	S_21A	S	PRR MIG	0,475	0,537	0,669	0,802	1,065	1,370	1,825	2,803	4,033	
16467	K_21B	K	PRR MIG			0,166	0,196	0,261	0,336	0,455	0,721	1,062	
16467	P_18A	P	PRR MIG	0,335	0,421	0,520	0,647	0,906	1,218	1,703	2,774	4,123	

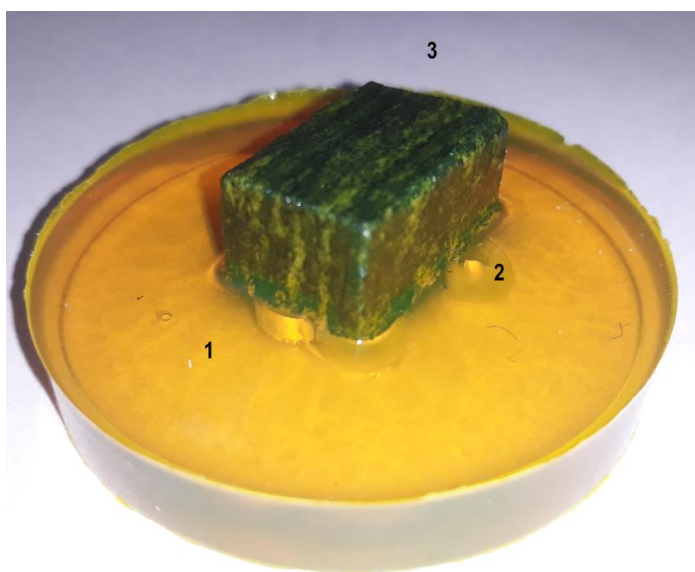
Vysvětlivky: pozice čel vzorku k foliaci :P- paralelně, K-kolmo, S-šikmo, PRR-pararula, MIG-migmatitizovaná

Konfokální mikroskopie

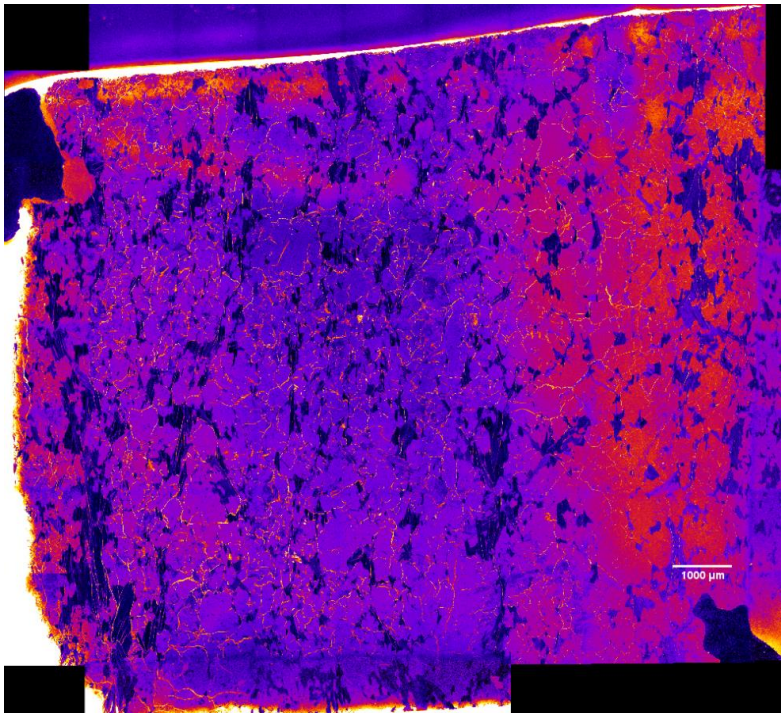
Pro studium pórového prostoru (také na CT viz dále) byla vybrána hornina s reprezentativní litologií pro lokalitu Rožná, tj. biotitický migmatit z velkoobjemového vzorku V-22-R3, ze kterého byly zhotoveny tři leštěné výbrusy probarvené fluorescenční pryskyřicí (Obr. 232) a ty byly snímány konfokálním mikroskopem Leica SP8 na PřF UK v Praze. Celé výbrusy byly nasnímány v jedné rovině olejovým objektivem Plan-Apochromat 63x/1,4 NA s velikostí pixelu 138,6087 nm. Výsledný obraz byl seskládán ze zorných obrazových polí pokrývajících plochu cca 6 x 6 mm. Fluorescenční kanál byl snímán při excitaci 488 nm argonovým laserem s detekcí 500-560 nm. Kanál průchozího světla byl snímán přes polarizační filtr pro DIC (Nomarského diferenciální interferenční kontrast).

Snímání i skládání zorných polí s překryvem 10 %, resp. 15 %, obstaral software firmy Leica LAS-X na pracovní stanici s OS Microsoft Windows 10 64-bit. Další úpravy (skládání a případné převzorkování obrazu) proběhly v open-source software FIJI (Schindelin et al. 2012).

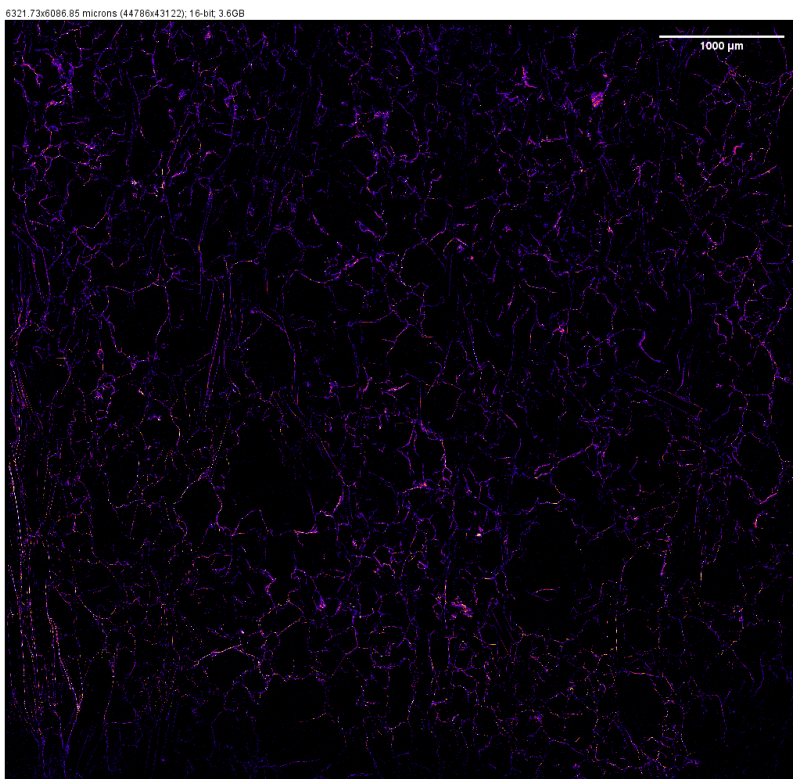
Výsledky konfokální mikroskopie (Obr. 233 – Obr. 248) ukazují několik důležitých fenoménů souvisejících s porozitou těchto vzorků. Jedná se zejména o přítomnost intergranulárních a intragranulárních mikrofraktur, tedy trhlin mikronového měřítka, které vznikají podél hranic zrn, resp. prochází jednotlivými zrny. Intergranulární fraktury (např. Obr. 235, Obr. 236, Obr. 243) způsobují zejména v polohách s větší přítomností zrn biotitu, případně dalších fylosilikátů, zvýšenou porozitu podél ploch foliace (např. Obr. 235, foliace paralelně s vertikální hranou fotky), která je obvykle biotity v takovýchto horninách definována, což zároveň ovlivňuje menší pevnost těchto hornin v daném směru. Intragranulární fraktury prochází do jednotlivých zrn (např. Obr. 238, Obr. 241, Obr. 246), případně přes celá zrna (pak jsou označovány jako transgranulární). Takováto porozita není obvykle přednostně orientována a je jí vzorek postižen poměrně homogenně, ačkoli u některých vhodně orientovaných fází může docházet přednostně k frakturaci podél jednotlivých krystalografických ploch, což závisí také na velikosti zrna (Passchier a Trouw 2005).



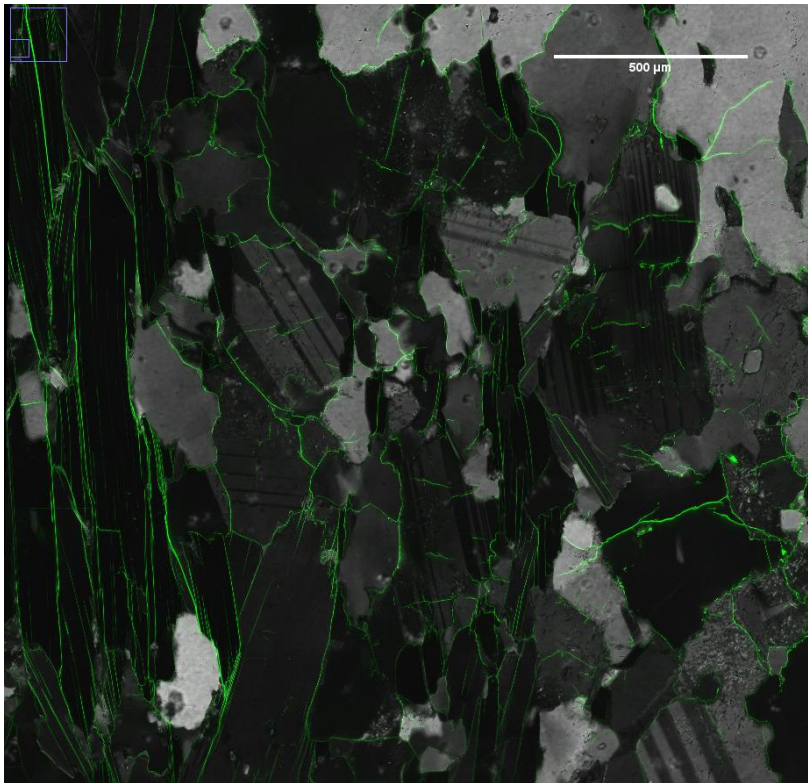
Obr. 232 Vzorek V-22-R3 před výrobou výbrusů orientovaných kolmo na foliaci (1) a (3) a v ploše foliace (2) horniny



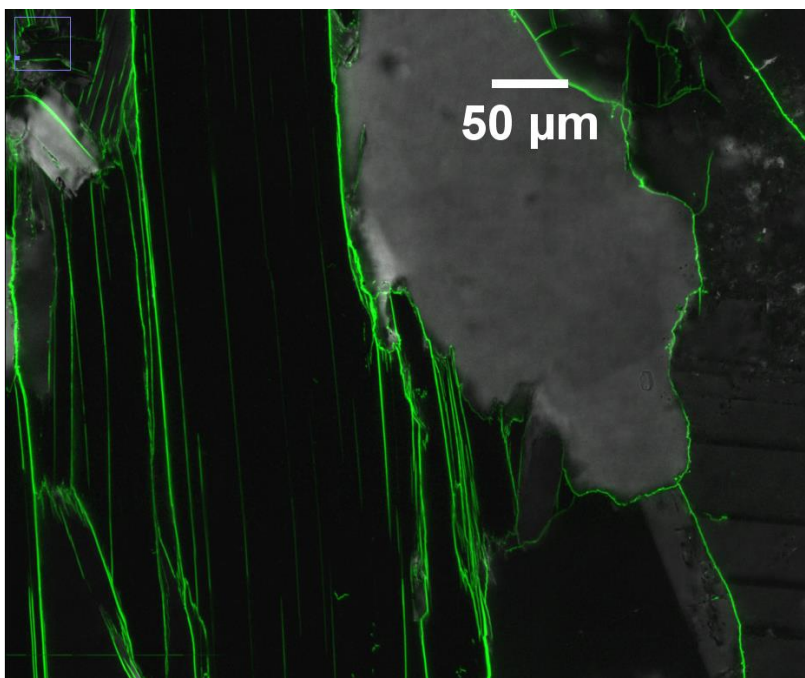
Obr. 233 Výbrus 1: celkový přehled výbrusu, žlutočervená barva znázorňuje fluorescenční pryskyřici; čára vpravo dole odpovídá 1 000 μm



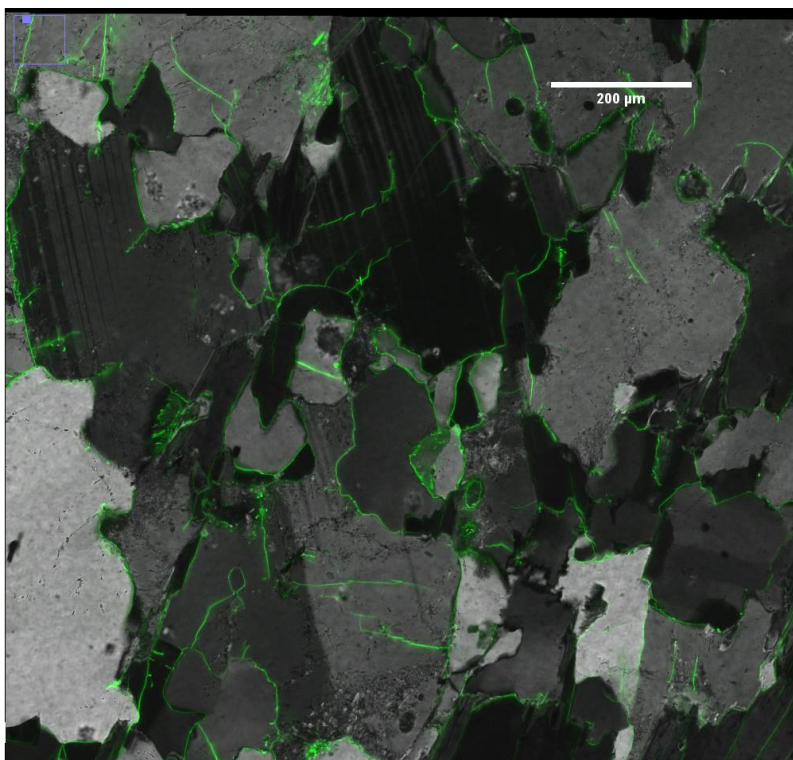
Obr. 234 Výbrus 1; celkový přehled detailně skenované plochy 6 × 6 mm, čára vpravo nahoře odpovídá 1 000 μm



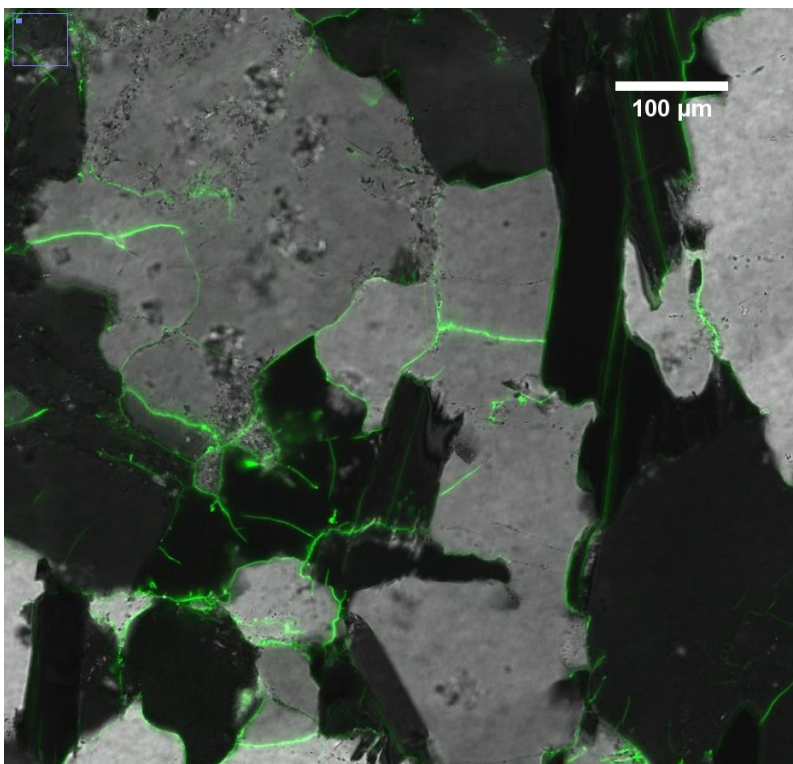
Obr. 235 Výbrus 1: mikropuklinová síť; intergranulární fraktury podél bází zrn biotitů vlevo; v pravé části jsou patrné intragranulární mikrofraktury skrz zrna křemene a živce; čára vpravo nahoře odpovídá 500 μm



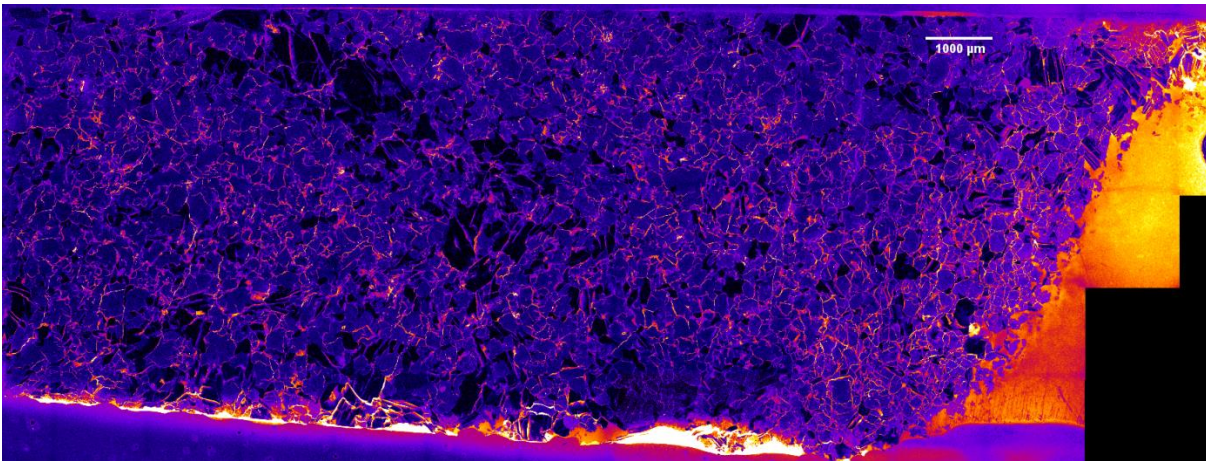
Obr. 236 Výbrus A; puklinová síť; mikrofraktury podél bazálních ploch zrna biotitu (resp. foliace) vlevo, vpravo intergranulární mikrofraktury podél hranic zrn živce a křemene; čára vpravo nahoře = 50 μm



Obr. 237 Výbrus 1; mikropuklinová síť; inter a intragranulární fraktury; čára vpravo nahoře =200 μ m

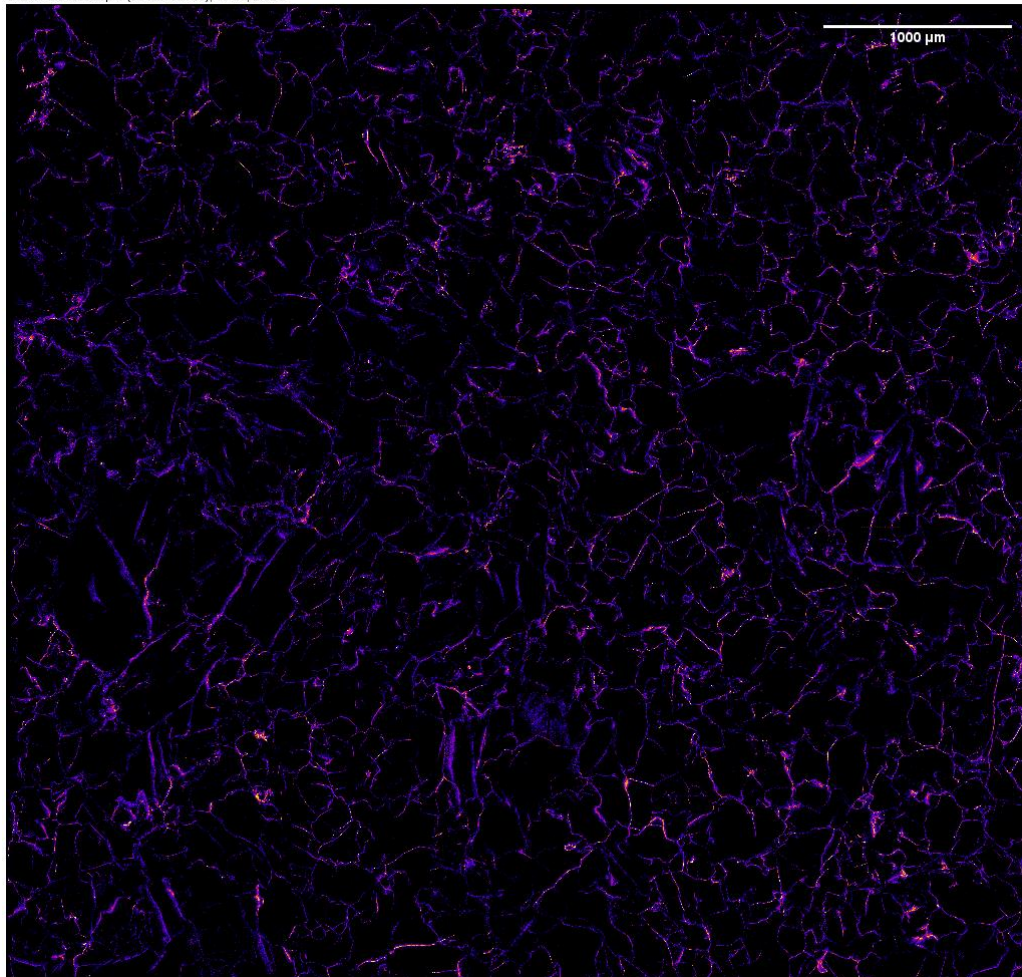


Obr. 238 Výbrus 1:mikropuklinová síť; inter a intragranulární fraktury; čára vpravo nahoře =100 μ m

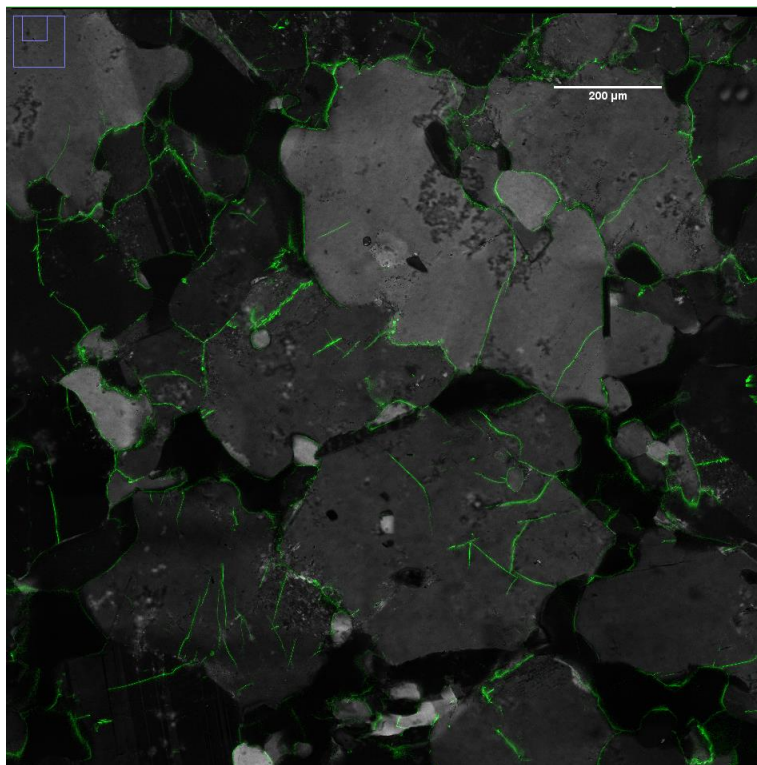


Obr. 239 Výbrus 2: celkový přehled, žlutočervená barva znázorňuje fluorescenční pryskyřici; čára vpravo nahoře = 1 000 μm

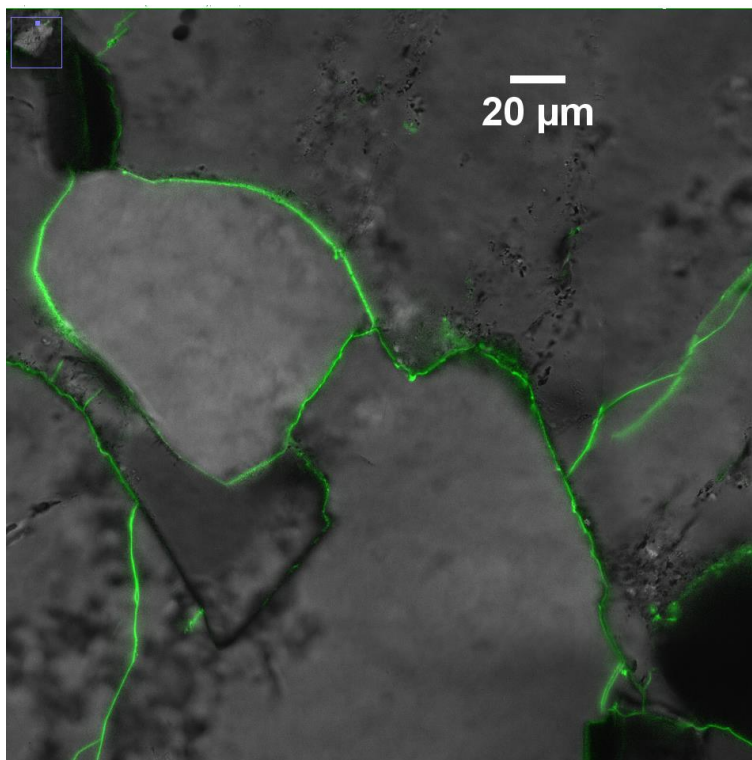
5421.14x5189.65 μm (38406x36766); 16-bit; 2.6GB



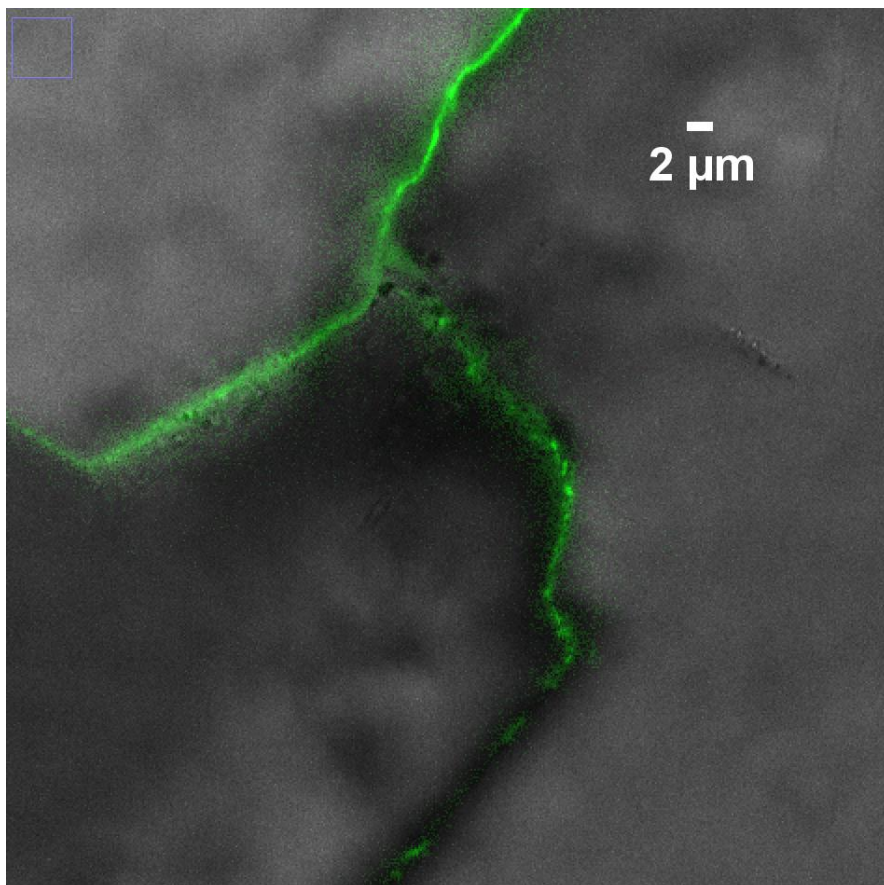
Obr. 240 Výbrus 2: celkový přehled detailně skenované plochy 5 × 5 mm; čára vpravo nahoře = 1 000 μm



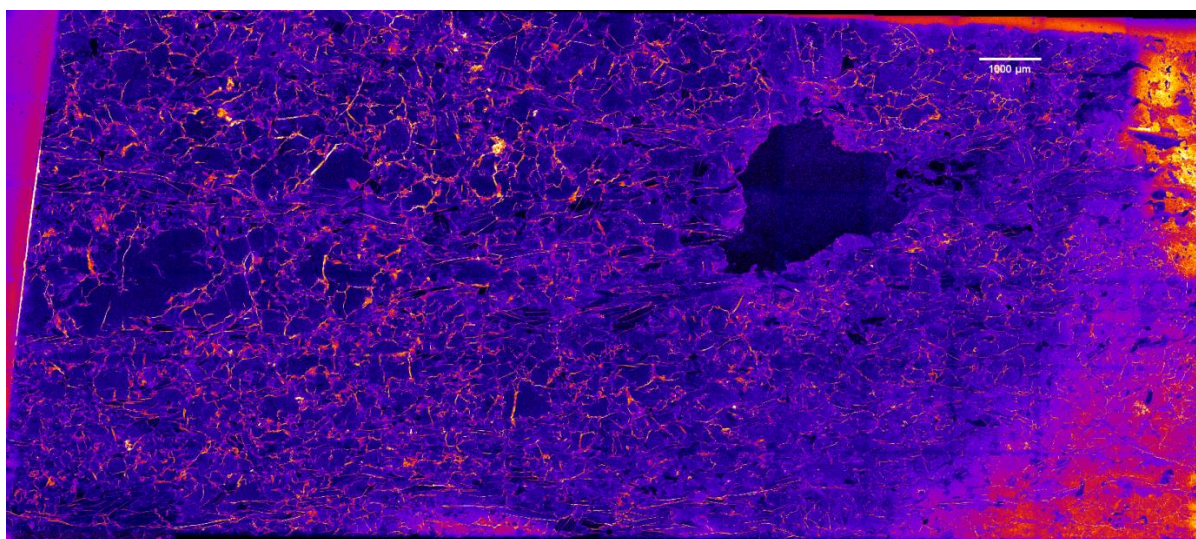
Obr. 241 Výbrus 2:mikropuklinová síť; inter a intragranulární fraktury; čára vpravo nahoře =200 μm



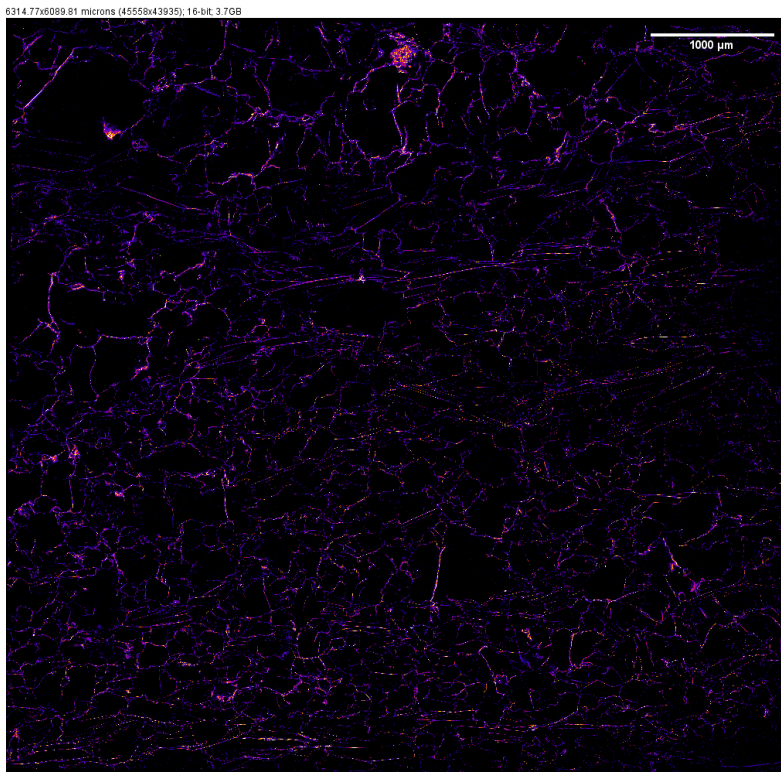
Obr. 242 Výbrus 2:mikropuklinová síť; inter a intragranulární fraktury v křemenu a živci a po jejich hranicích – detail; čára vpravo nahoře =20 μm



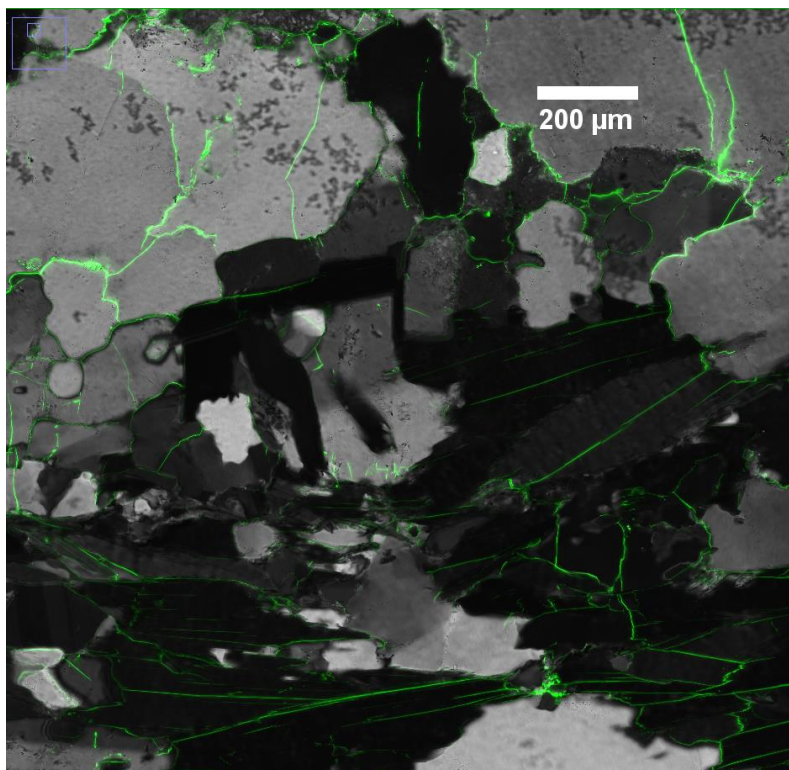
Obr. 243 Výbrus 2: mikropuklinová síť; intergranulární fraktury podél hranic křemenných zrn – detail; čára vpravo nahoře =2μm



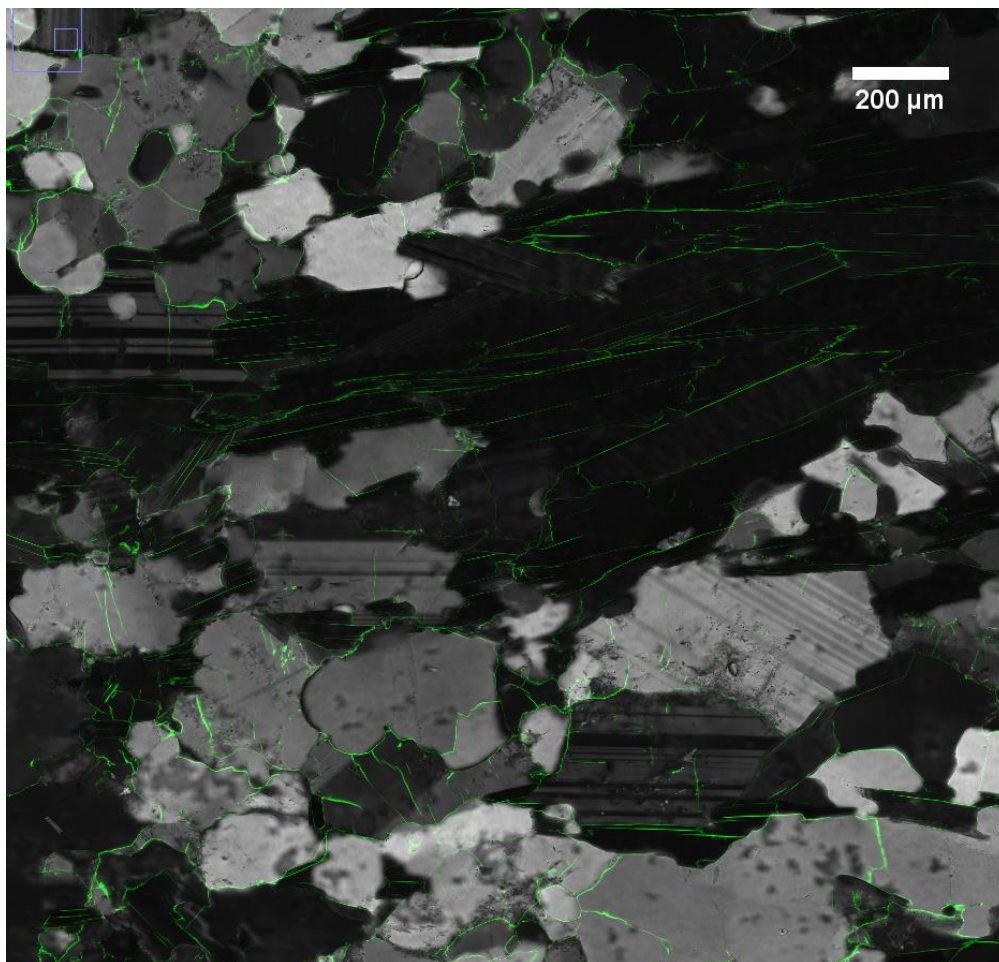
Obr. 244 Výbrus 3: celkový přehled, žlutočervená barva znázorňuje fluorescenční pryskyřici; tmavé místo reprezentuje díru ve výbrusu způsobenou při výrobě výbrusu; čára vpravo nahoře =1 000 μm



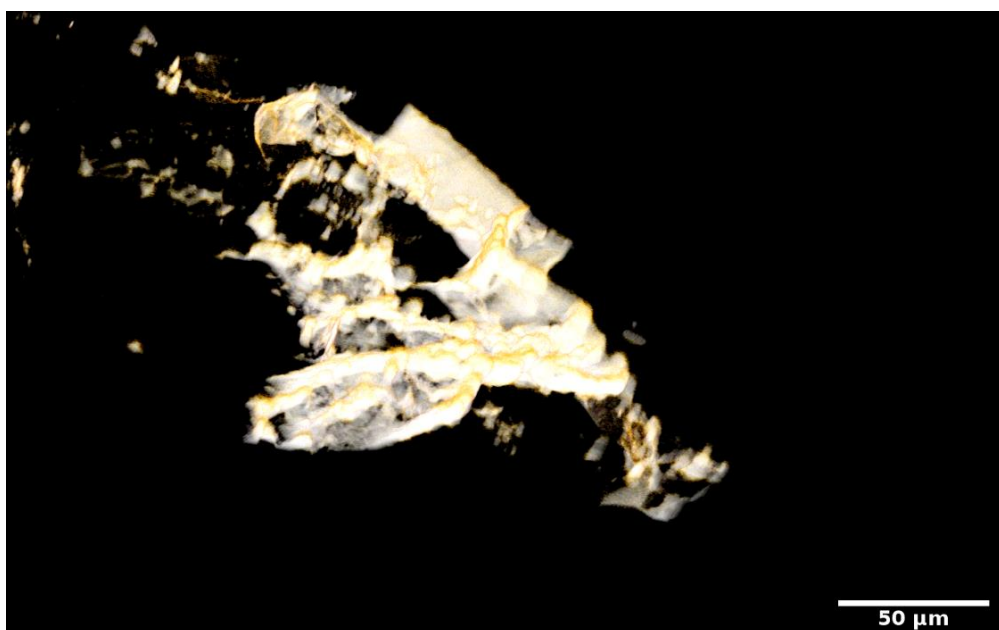
Obr. 245 Výbrus 3: celkový přehled detailně skenované plochy 6 × 6 mm; čára vpravo nahoře =1 000 μm



Obr. 246 Výbrus 3:mikropuklinová síť; propojení podél foliace (paralelně se spodní hranou fotografie); čára vpravo nahoře =200 μm



Obr. 247 Výbrus 3: mikropuklinová síť; čára vpravo nahoře = 200 μm



Obr. 248 Výbrus 3: 3D rekonstrukce mikropuklinové sítě; čára vpravo dole = 50 μm

2.3.5.3.5 Vzorky odebrané na 24. patře**Geotechnický vrt BGS24-VD**

Výsledky stanovení FMV na materiálu z vrtu BGS24-VD provedené v laboratoři SG Geotechnika a.s. jsou uvedeny v následujících tabulkách (Tab. 111, Tab. 112, Tab. 113).

Tab. 111 Hodnoty fyzikálních, tepelných a technologických vlastností hornin z vrtu BGS24-VD

Vlastnost	Jednotka	Počet stanovení	Průměrná hodnota	Minimální hodnota	Maximální hodnota
Měrná hmotnost	kg.m ⁻³	1	2924	-	-
Objemová hmotnost	kg.m ⁻³	8	2947	2874	3040
Celková pórovitost	%	*			
Otevřená pórovitost	%	1	0,09	-	-
Nasákavost	%	1	0,02	-	-
Koeficient hydraulické vodivosti	m.s ⁻¹	1	<1×10 ⁻¹⁴	-	-
Rychlost šíření UV	km.s ⁻¹	3	7,348	7,067	7,348
Tepelná vodivost	W.m ⁻¹ .K ⁻¹	6	3,08	3,02	3,13
Tepelná kapacita	MJ.m ⁻³ .K ⁻¹	6	2,34	2,33	2,36
Tepelná difuzivita	mm ² .s ⁻¹	6	1,31	1,29	1,34
Teplotní roztažnost	μm.m ⁻¹ .°C ⁻¹	1	6,9	-	-
Abrazivnost Cerchar	–	1	3,45	-	-

*Pozn. Nestanovena. Chyba stanovení měrné hmotnosti je vyšší než objemová hmotnost

Tab. 112 Parametry pórovitosti hornin z vrtu BGS24-VD podle MIP

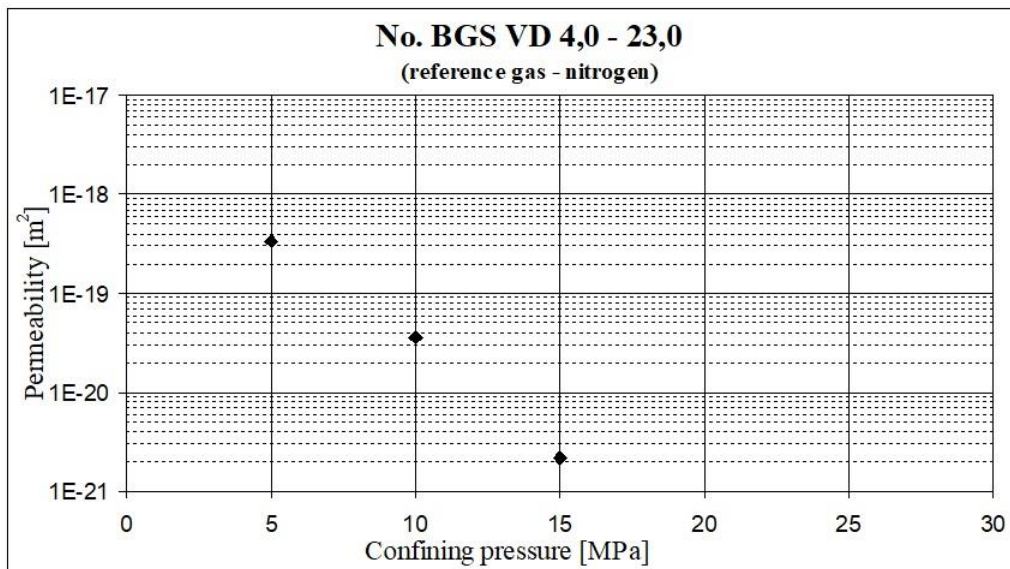
Označení zkušebního tělíska	Hloubková úroveň ve vrtu [m]	Celkový objem pórů [cm ³ .g ⁻¹]	Průměrná velikost póru [μm]	Pórovitost pomocí MIP [%]
BGS24-VD	4,0-23,0	0,0015	2,7927	0,43

Tab. 113 Hodnoty pevnostních a přetvárných vlastností hornin z vrtu BGS24-VD

Vlastnost	Jednotka	Počet stanovení	Průměrná hodnota	Minimální hodnota	Maximální hodnota
Pevnost v prostém tlaku	MPa	5	171,0	128,1	212,8
Pevnost v příčném tahu – tah ⊥ k foliaci	MPa	5	10,8	8,8	13,0
Modul přetvárnosti*	GPa	1	84,0	-	-
Modul pružnosti*	GPa	1	82,5	-	-
Poissonovo číslo*	-	1	0,25	-	-

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

Naměřené výsledky hodnot koeficientu propustnosti ze zkoušky plynopropustnosti pro vzorek BGS24-VD a jejich trend při zvětšujícím se plášťovém tlaku jsou zřejmé z následujícího grafu (Obr. 249).



Obr. 249 Plynopropustnost horniny vzorku BGS24-VD

Geotechnický vrt BGS24-VU

Výsledky stanovení FMV na materiálu z vrtu BGS24-VU provedené v laboratoři SG Geotechnika a.s. jsou uvedeny v následujících tabulkách (Tab. 114, Tab. 115, Tab. 116).

Tab. 114 Hodnoty fyzikálních, tepelných a technologických vlastností hornin z vrtu BGS24-VU

Vlastnost	Jednotka	Počet stanovení	Průměrná hodnota	Minimální hodnota	Maximální hodnota
Měrná hmotnost	kg.m ⁻³	1	2940	-	-
Objemová hmotnost	kg.m ⁻³	8	2888	2809	3010
Celková pórovitost	%	*			
Otevřená pórovitost	%	1	0,34	-	-
Nasákavost	%	1	0,10	-	-
Koeficient hydraulické vodivosti	m.s ⁻¹	1	7,3×10 ⁻¹³	-	-
Rychlost šíření UV	km.s ⁻¹	3	6,565	5,450	6,696
Tepelná vodivost	W.m ⁻¹ .K ⁻¹	6	2,13	1,98	2,27
Tepelná kapacita	MJ.m ⁻³ .K ⁻¹	6	2,07	2,03	2,12
Tepelná difuzivita	mm ² .s ⁻¹	6	1,02	0,97	1,07
Teplotní roztažnost	μm.m ⁻¹ .°C ⁻¹	1	8,5	-	-
Abrazivnost Cerchar	–	1	4,46	-	-

*Pozn. Nestanovena. Chyba stanovení měrné hmotnosti je vyšší než objemová hmotnost.

Tab. 115 Parametry pórovitosti hornin z vrtu BGS24-VU podle MIP

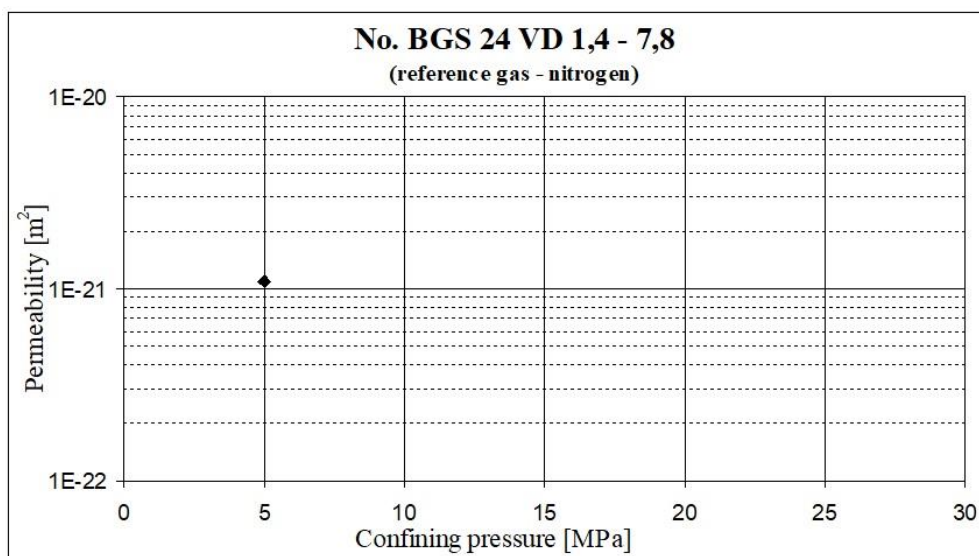
Označení zkušebního tělíska	Hloubková úroveň ve vrtu [m]	Celkový objem pórů [cm ³ .g ⁻¹]	Průměrná velikost póru [μm]	Pórovitost pomocí MIP [%]
BGS24-VU	1,4-7,8	0,0007	16,6704	0,19

Tab. 116 Hodnoty pevnostních a přetvárných vlastností hornin z vrtu BGS24-VU

Vlastnost	Jednotka	Počet stanovení	Průměrná hodnota	Minimální hodnota	Maximální hodnota
Pevnost v prostém tlaku	MPa	5	159,0	115,6	224,4
Pevnost v příčném tahu – tah ⊥ k foliaci	MPa	5	10,1	8,7	11,5
Modul přetvárnosti*	GPa	2	82,1	81,6	82,6
Modul pružnosti*	GPa	2	83,9	82,6	85,1
Poissonovo číslo*	-	2	0,25	0,24	0,26

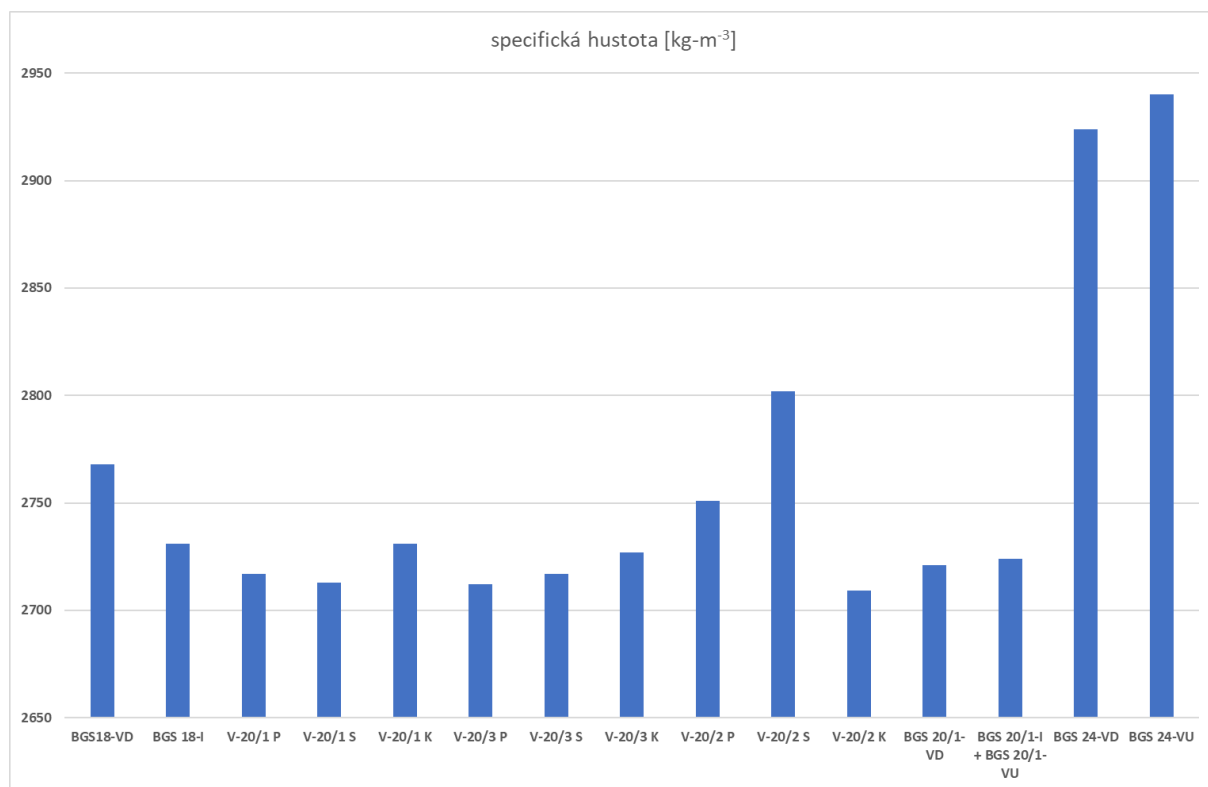
*Pozn. Vyhodnoceno v oboru napětí 20–40 % UCS.

Naměřené výsledky hodnot koeficientu propustnosti ze zkoušky plynopropustnosti pro vzorek BGS24-VU je zachycen na následujícím grafu (Obr. 250).

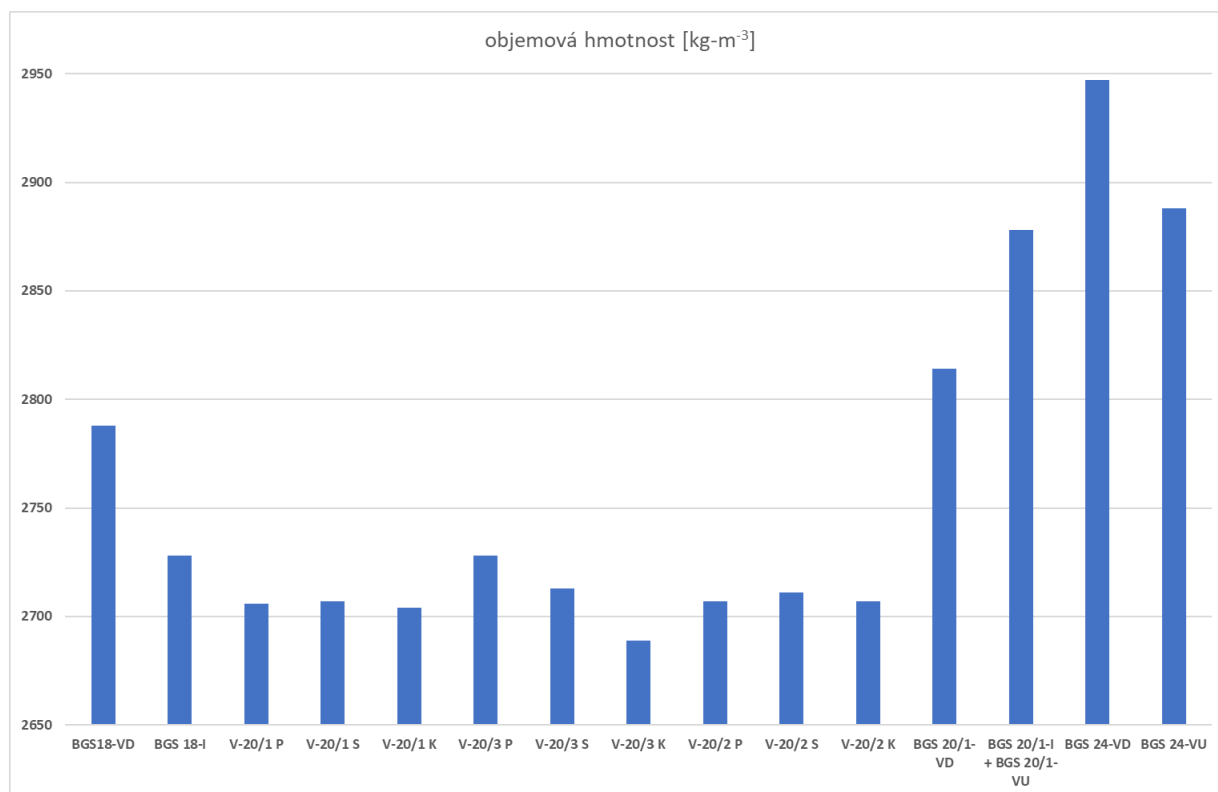


Obr. 250 Plynopropustnost horniny vzorku BGS24-VU

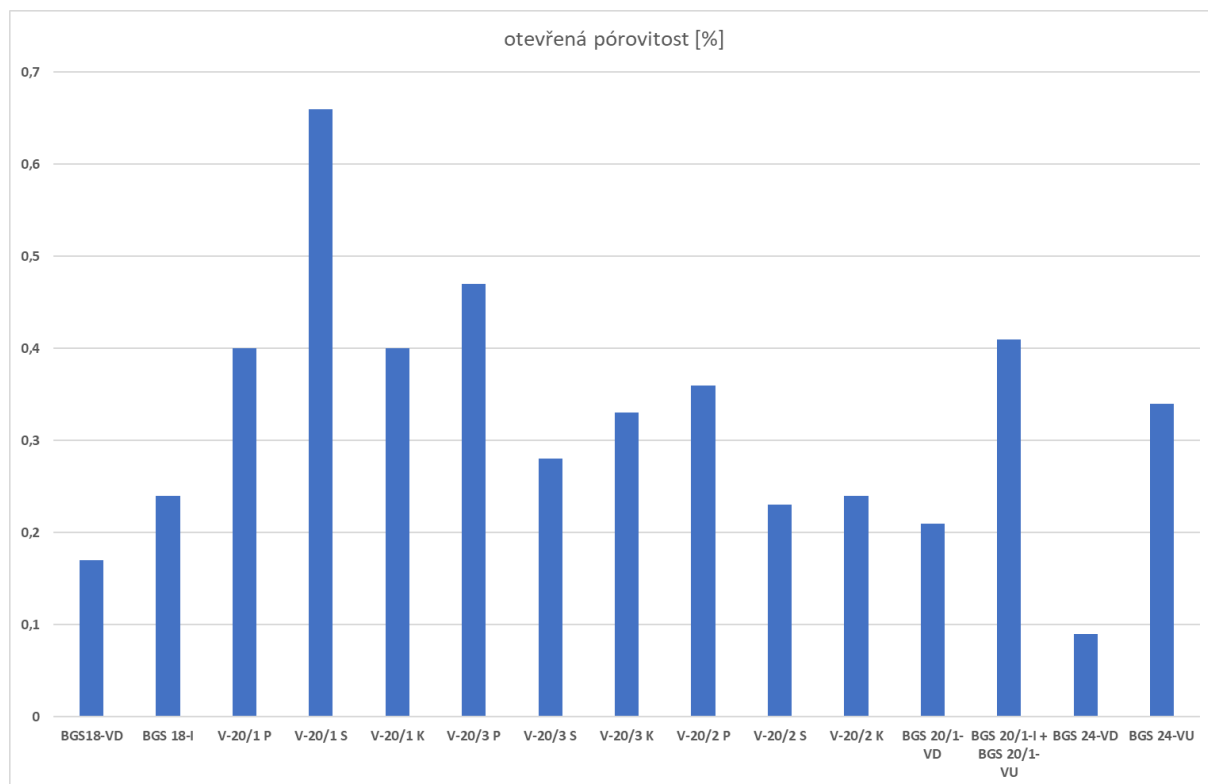
2.3.5.3.6 Grafické vyhodnocení laboratorních výsledků SG Geotechnika



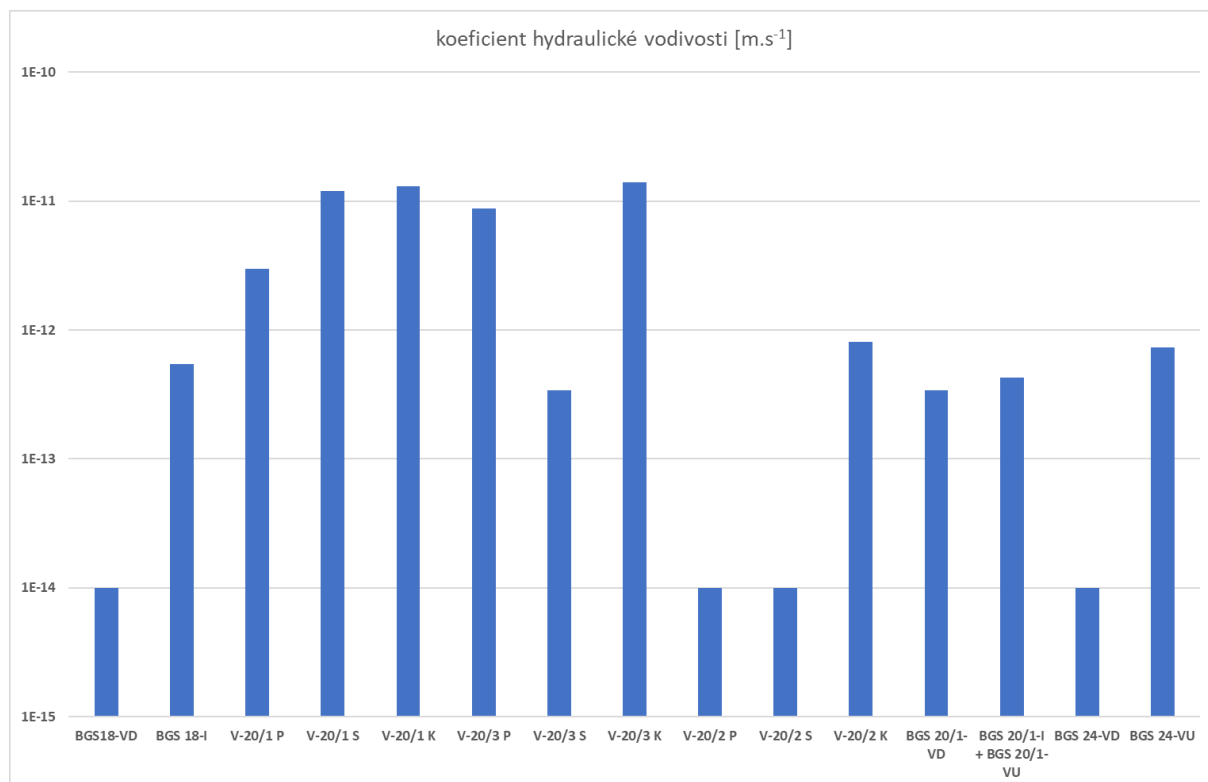
Obr. 251 Specifická hustota v závislosti na hloubce



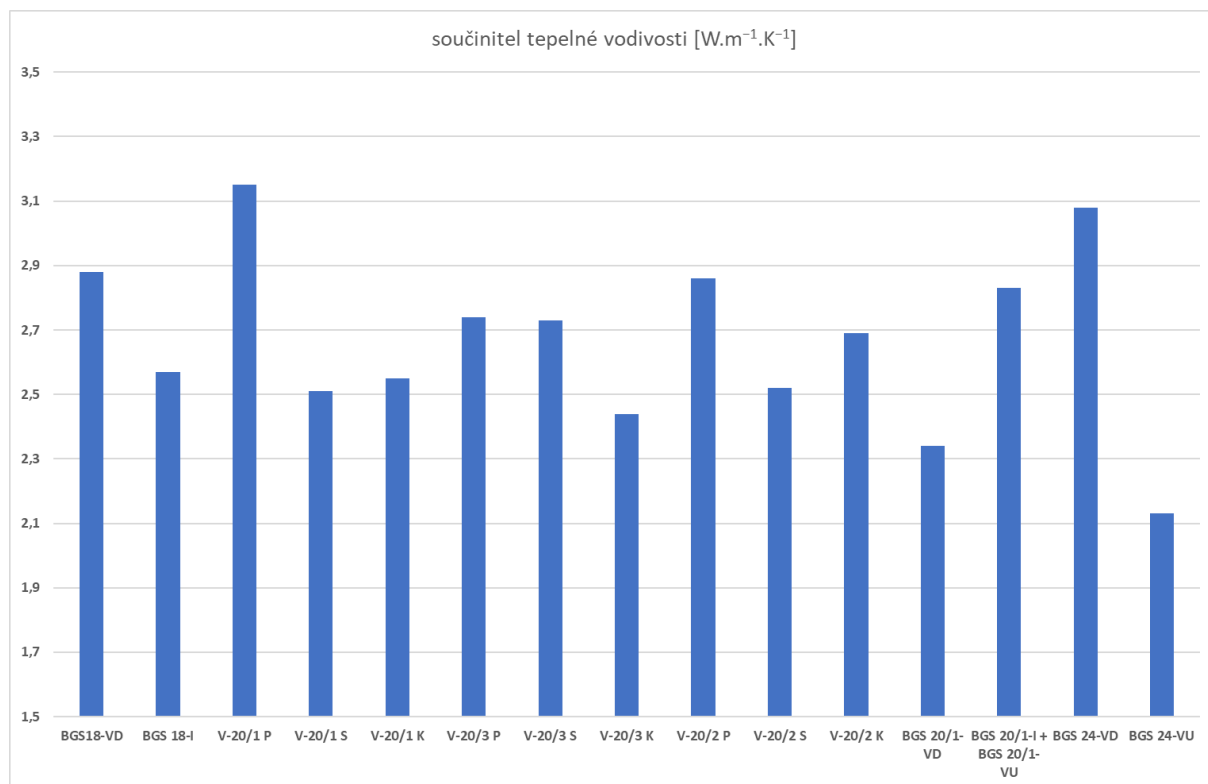
Obr. 252 Objemová hmotnost v závislosti na hloubce



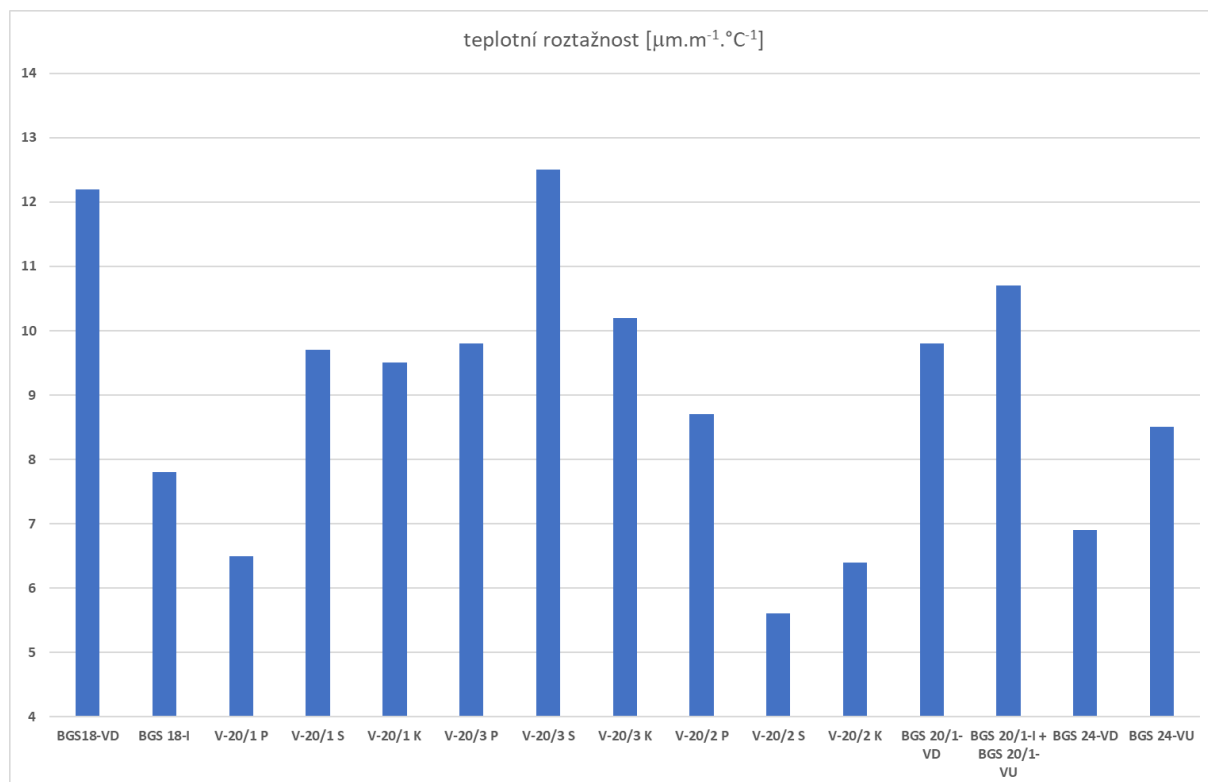
Obr. 253 Otevřená pórovitost v závislosti na hloubce



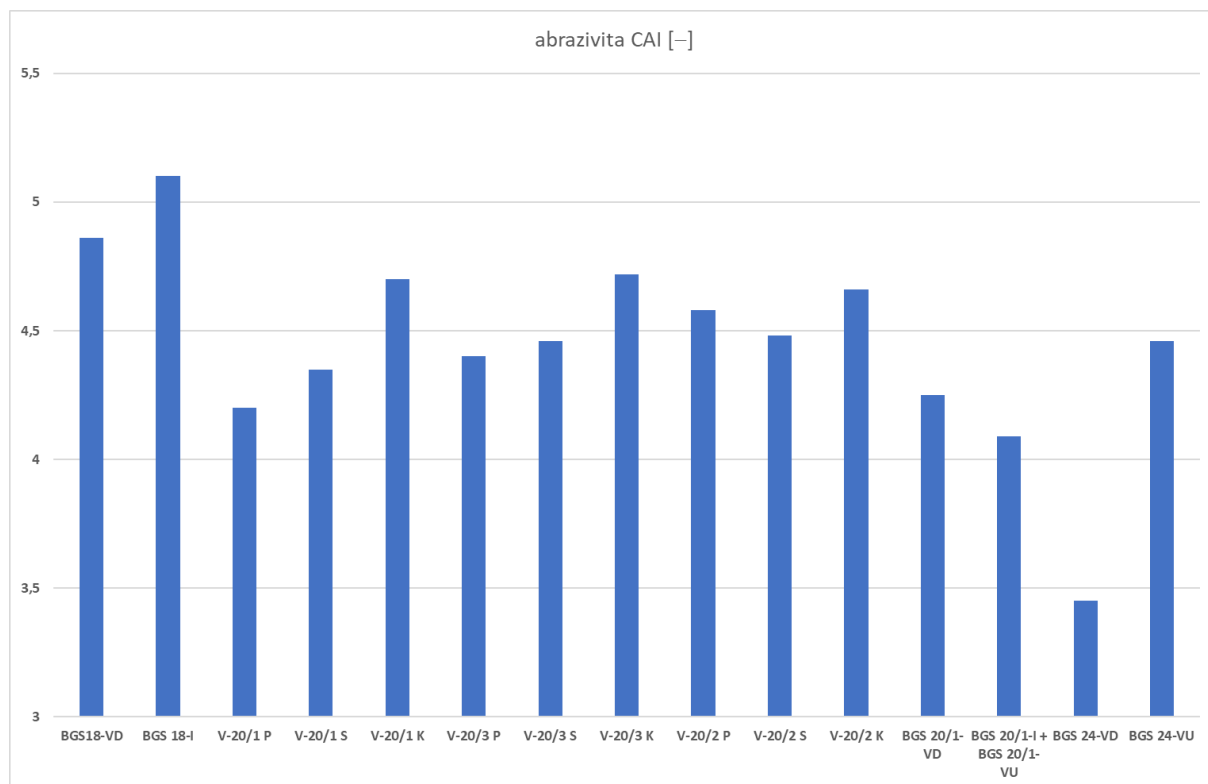
Obr. 254 Koeficient hydraulické vodivosti v závislosti na hloubce



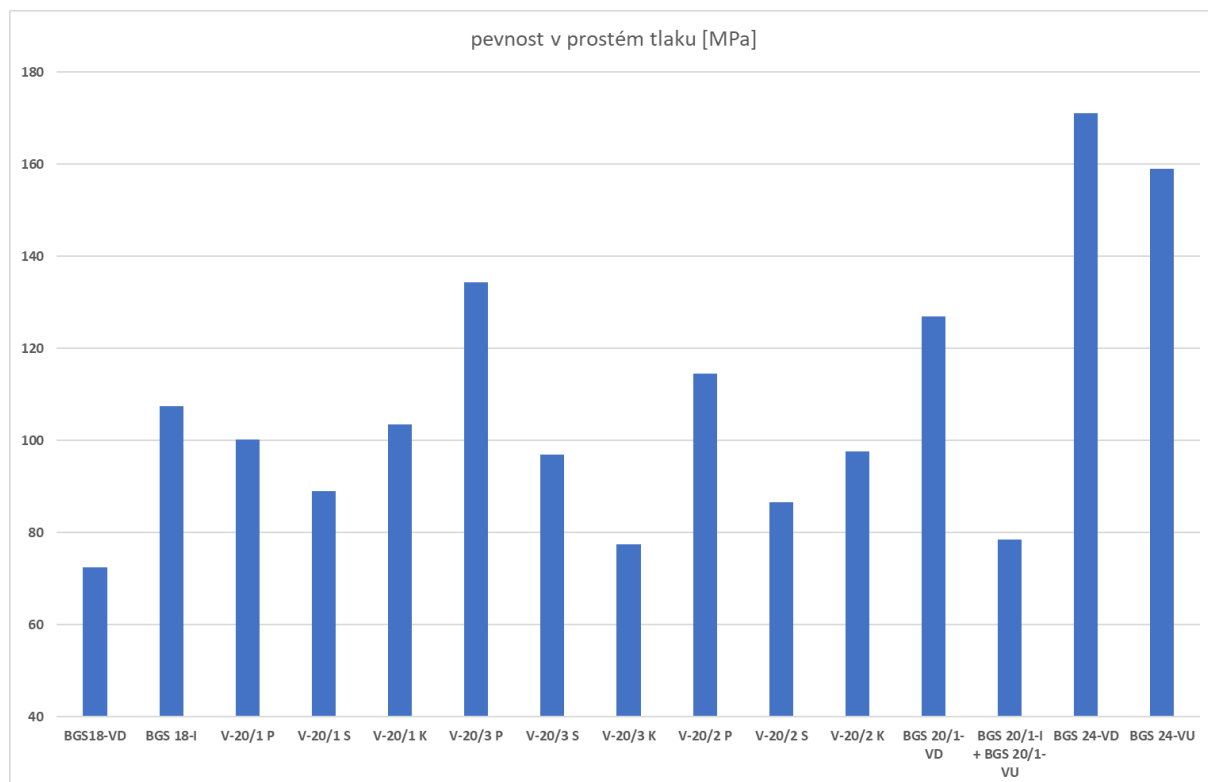
Obr. 255 Součinitel tepelné vodivosti v závislosti na hloubce



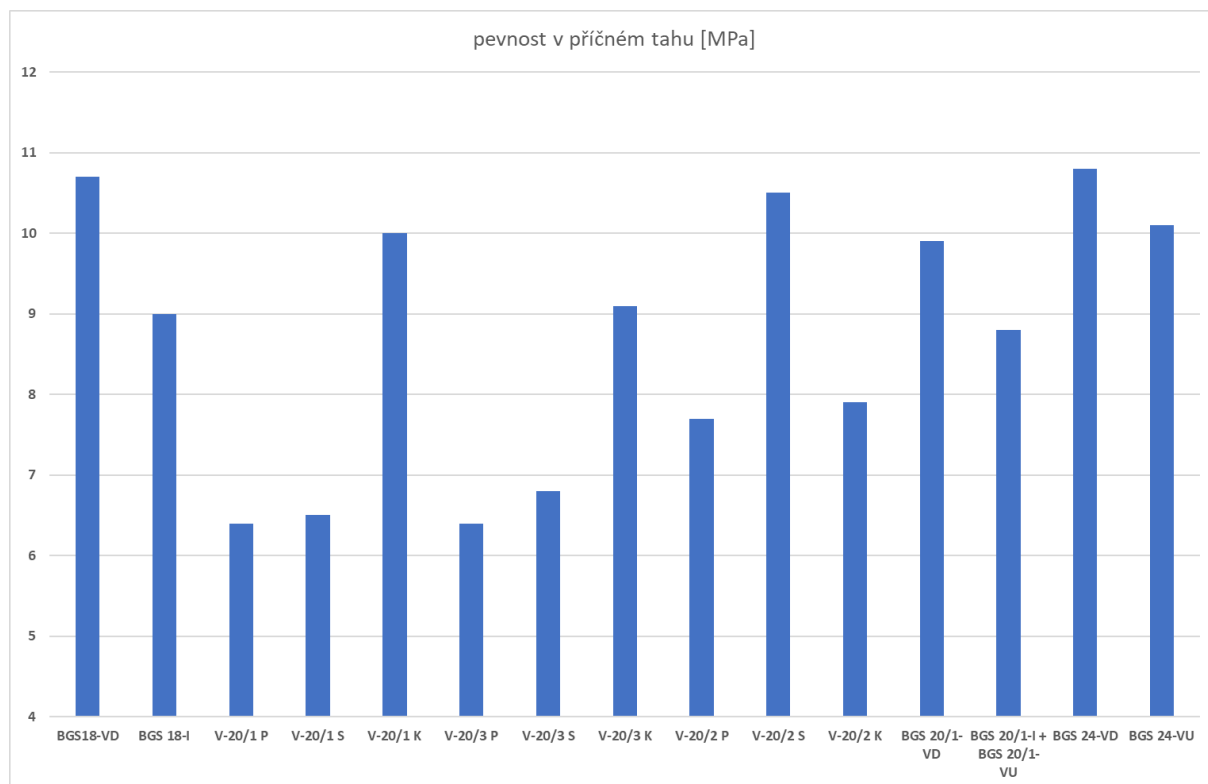
Obr. 256 Teplotní roztažnost v závislosti na hloubce



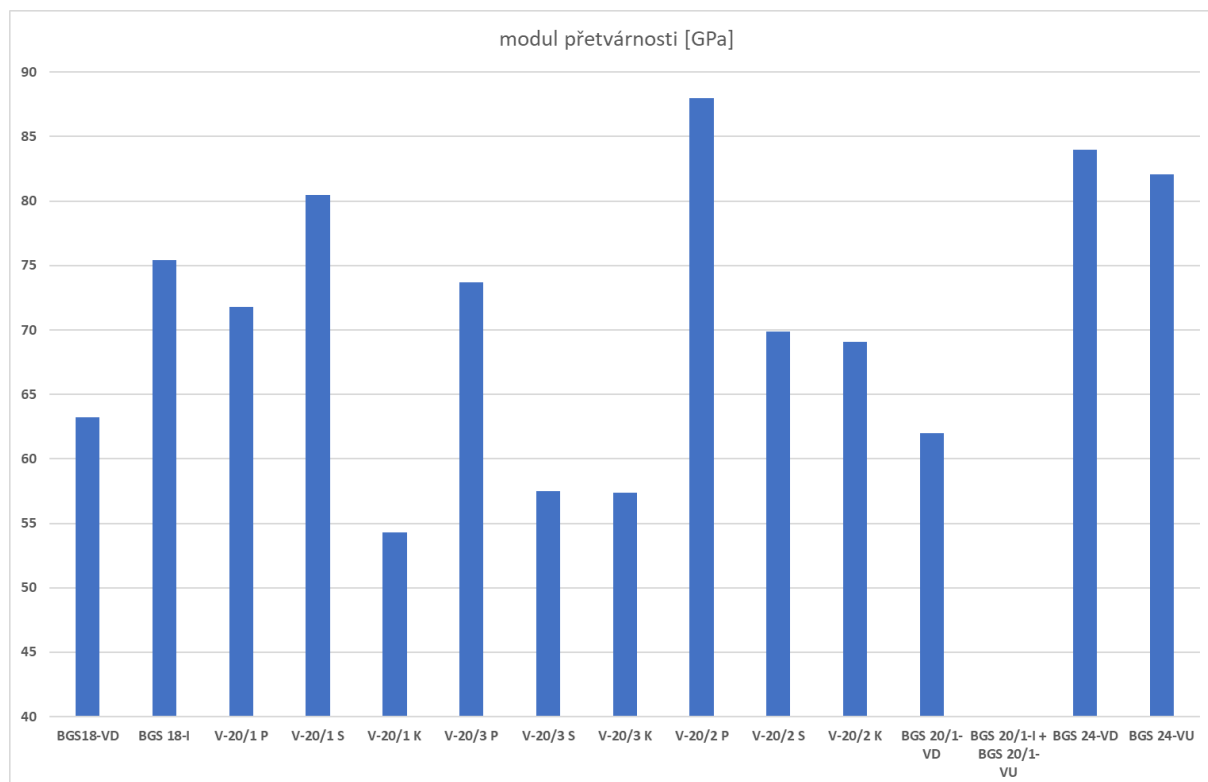
Obr. 257 Abrazivita v závislosti na hloubce



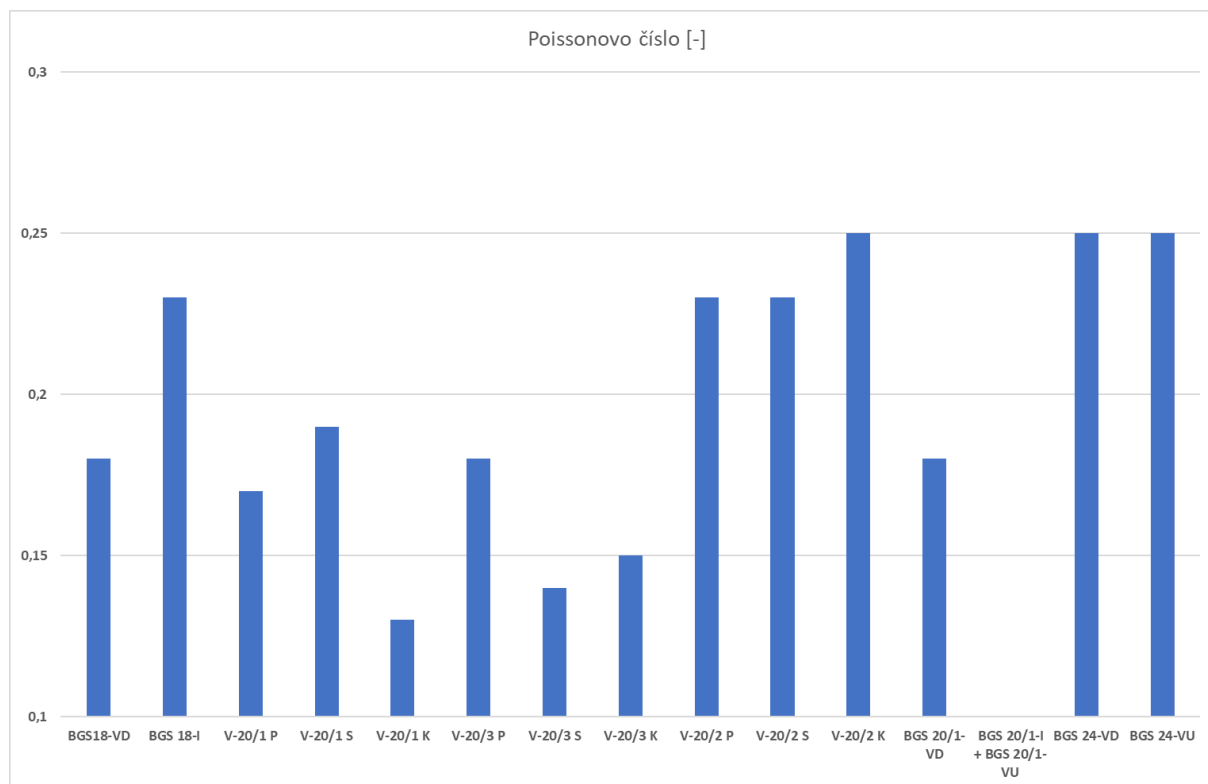
Obr. 258 Pevnost v prostém tlaku v závislosti na hloubce



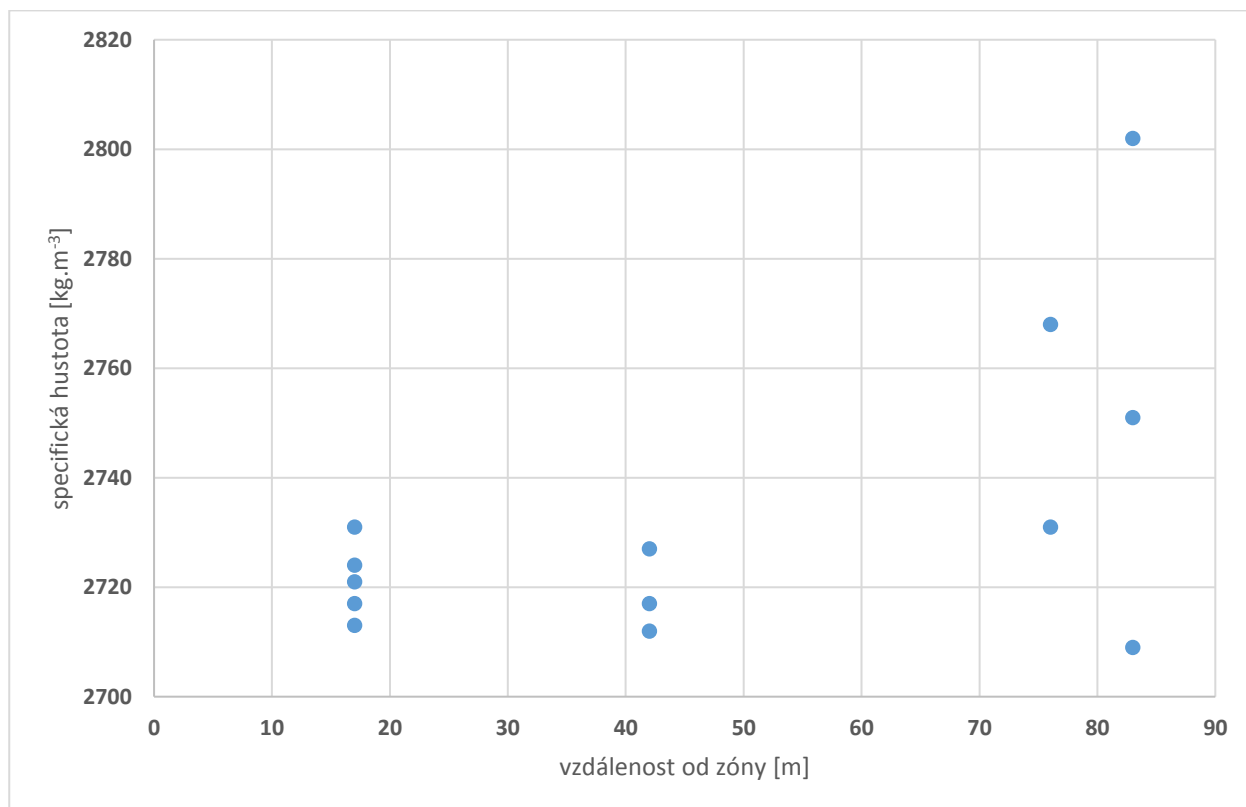
Obr. 259 Pevnost v příčném tahu v závislosti na hloubce



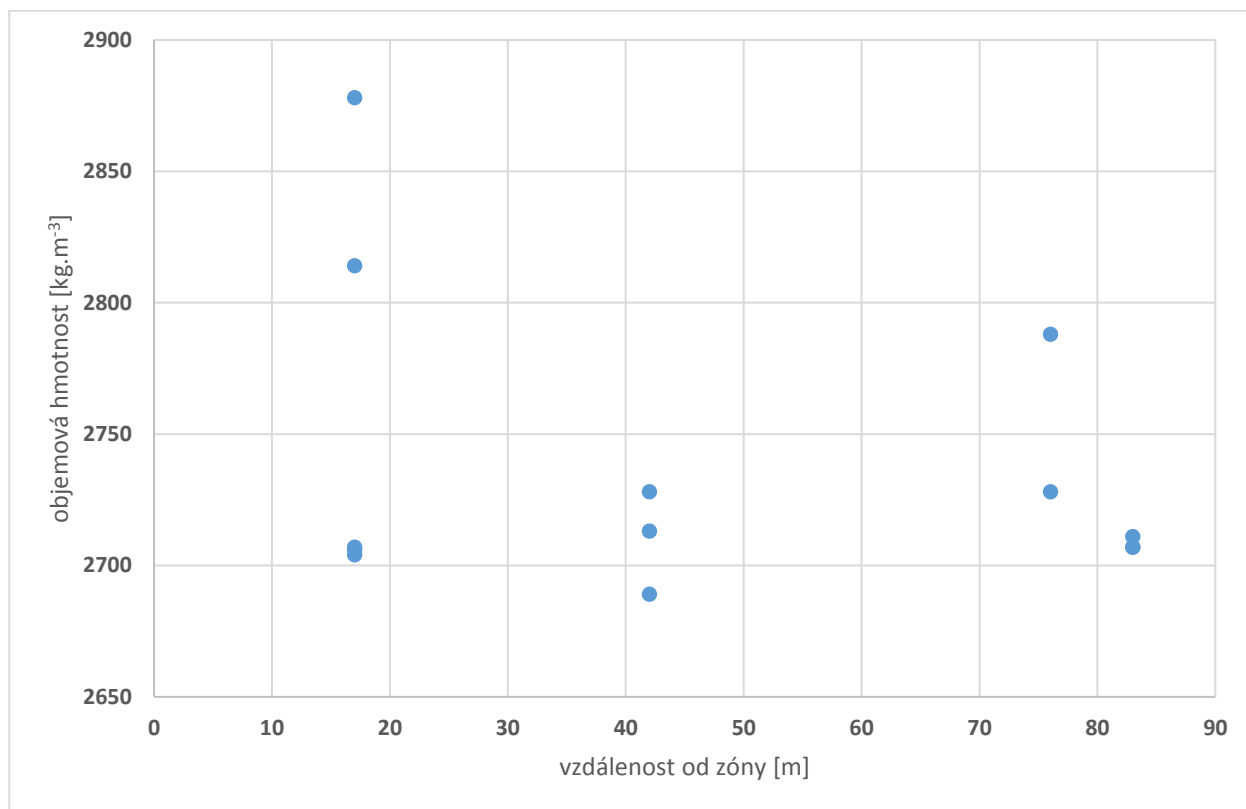
Obr. 260 Modul přetvárnosti v závislosti na hloubce



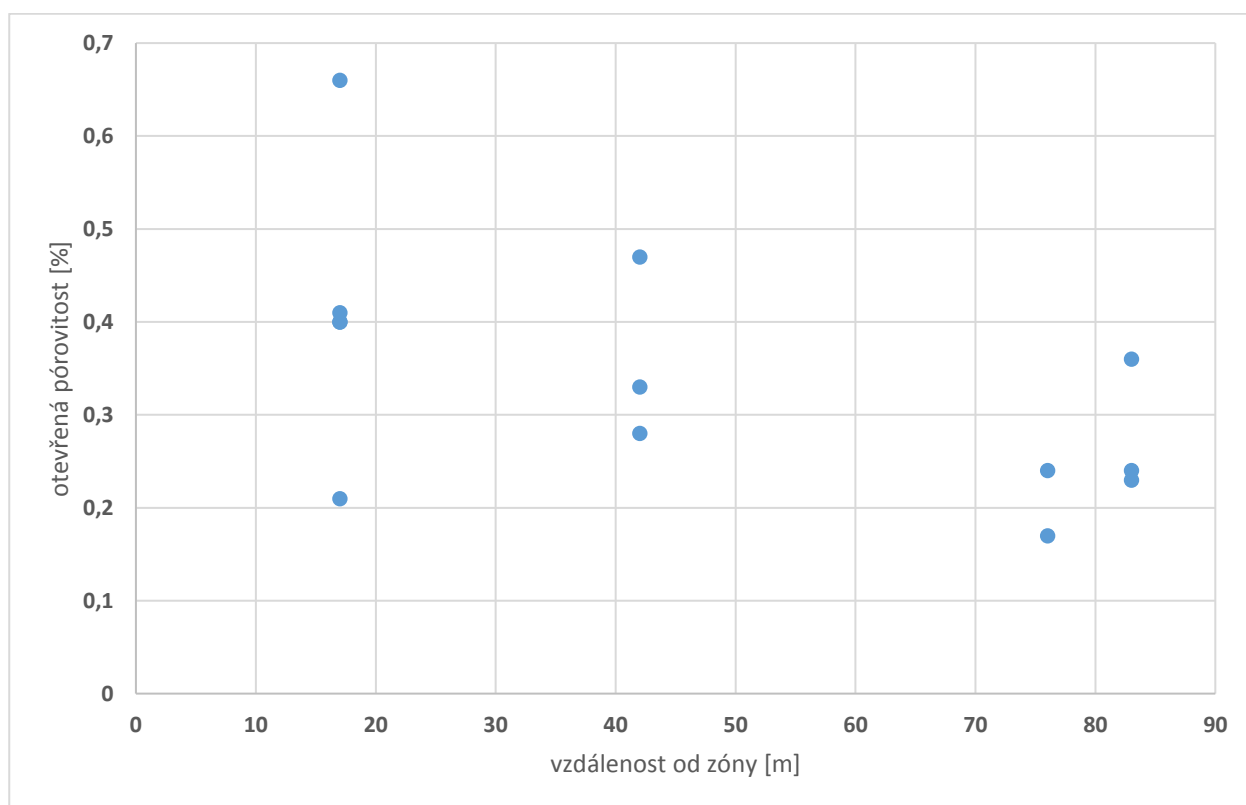
Obr. 261 Poissonovo číslo v závislosti na hloubce



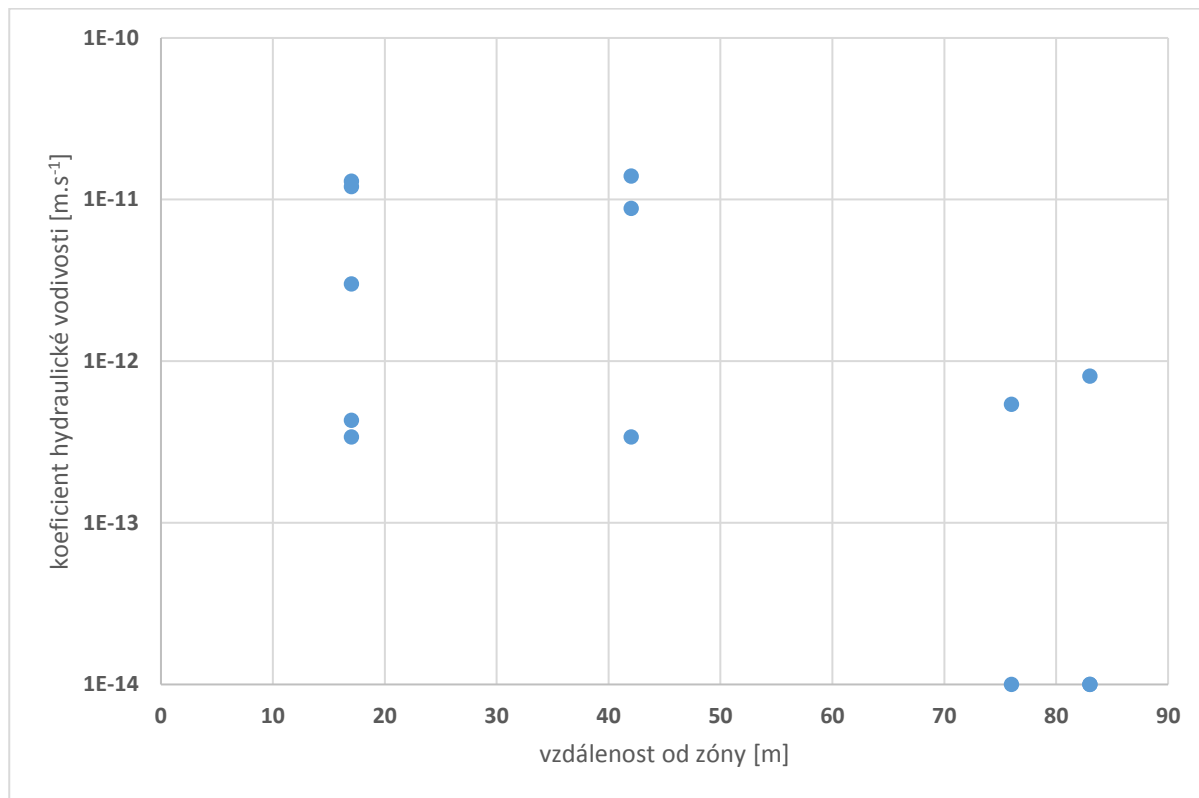
Obr. 262 Specifická hustota v závislosti na vzdálenosti od první zóny



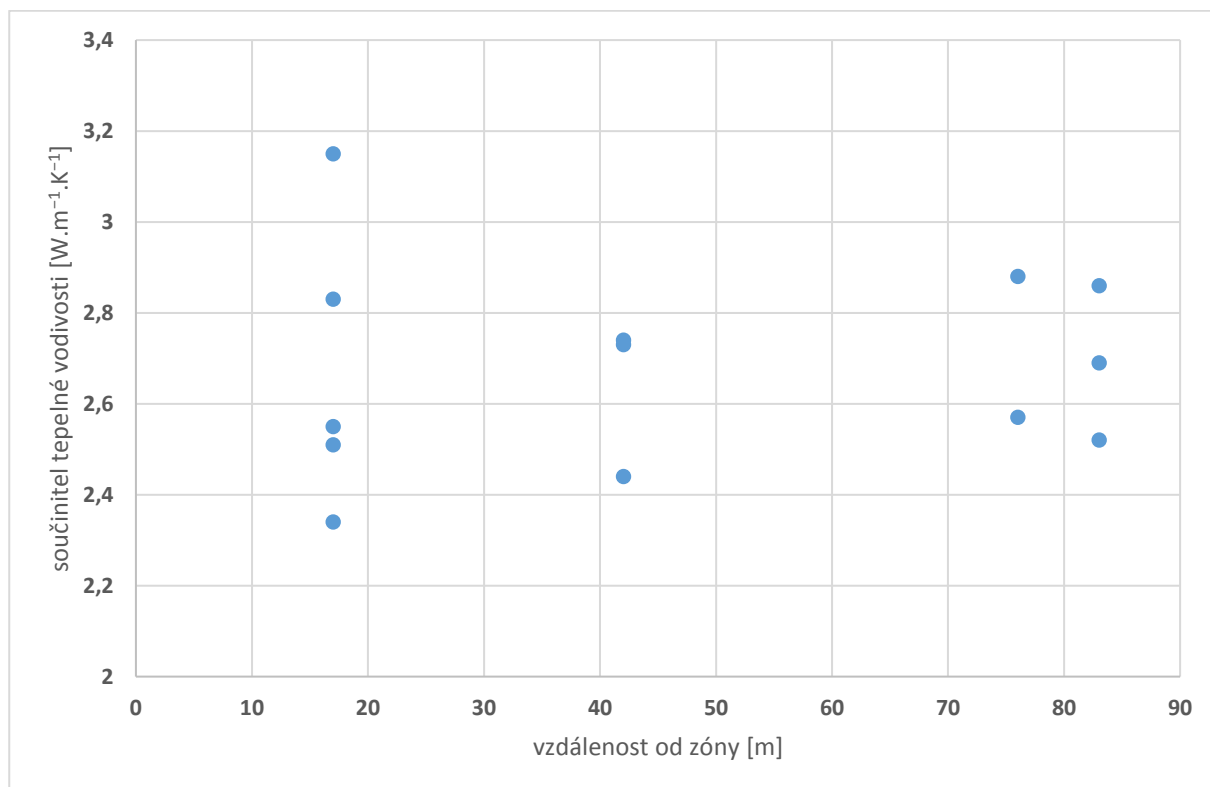
Obr. 263 Objemová hmotnost v závislosti na vzdálenosti od první zóny



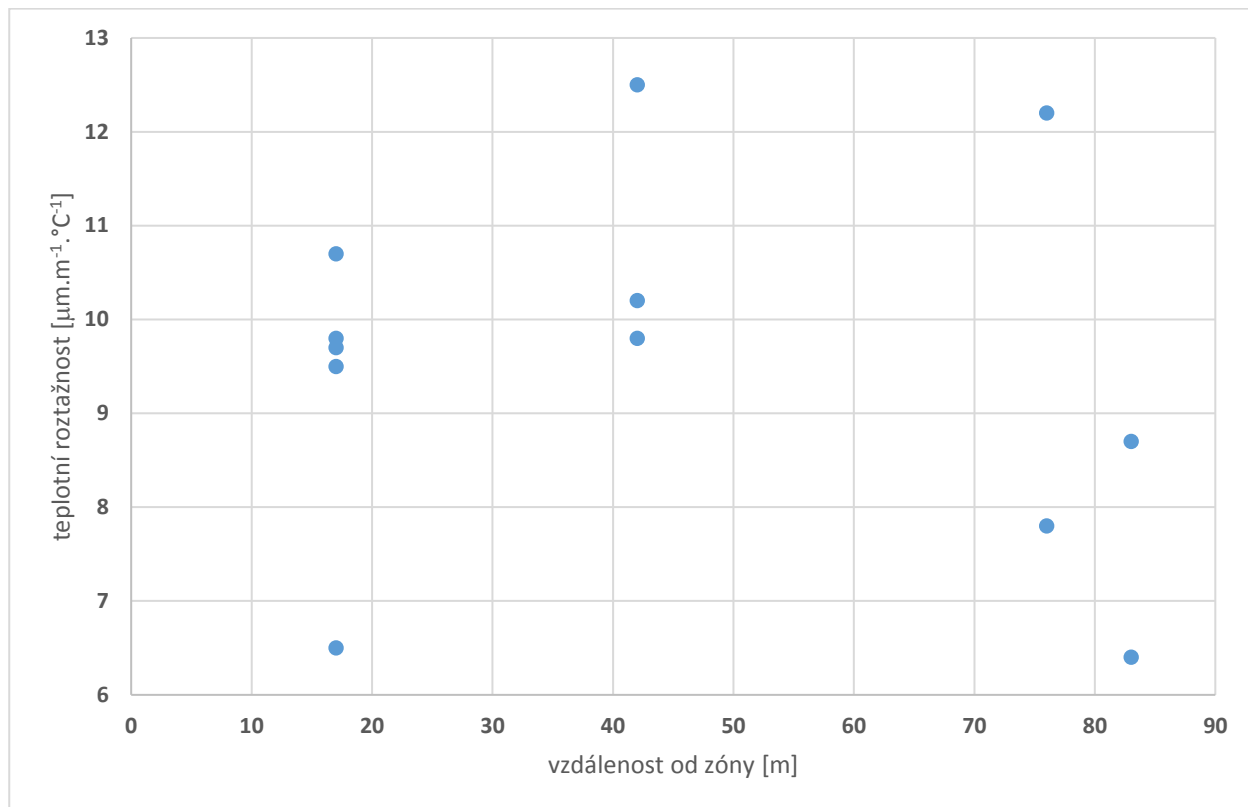
Obr. 264 Otevřená pórovitost v závislosti na vzdálenosti od první zóny na daném patře



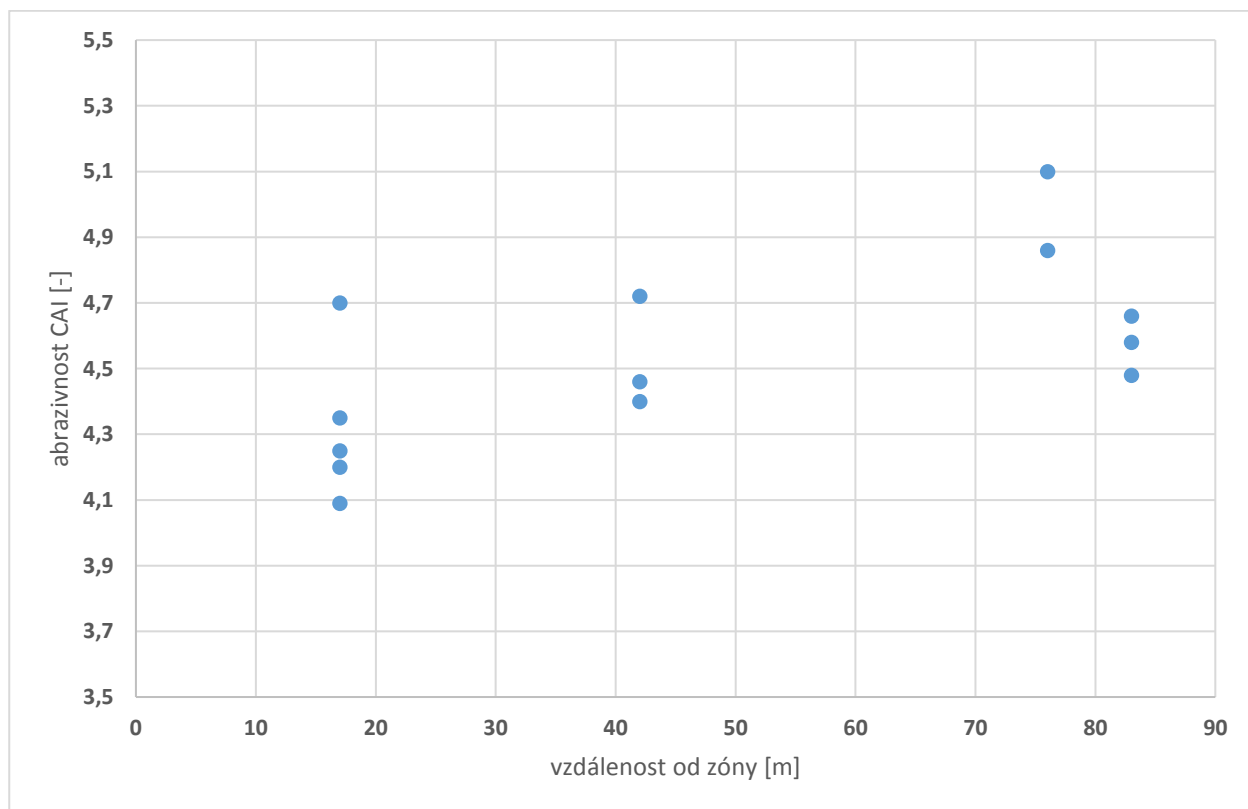
Obr. 265 Koefficient hydraulické vodivosti v závislosti na vzdálenosti od první zóny na daném patře



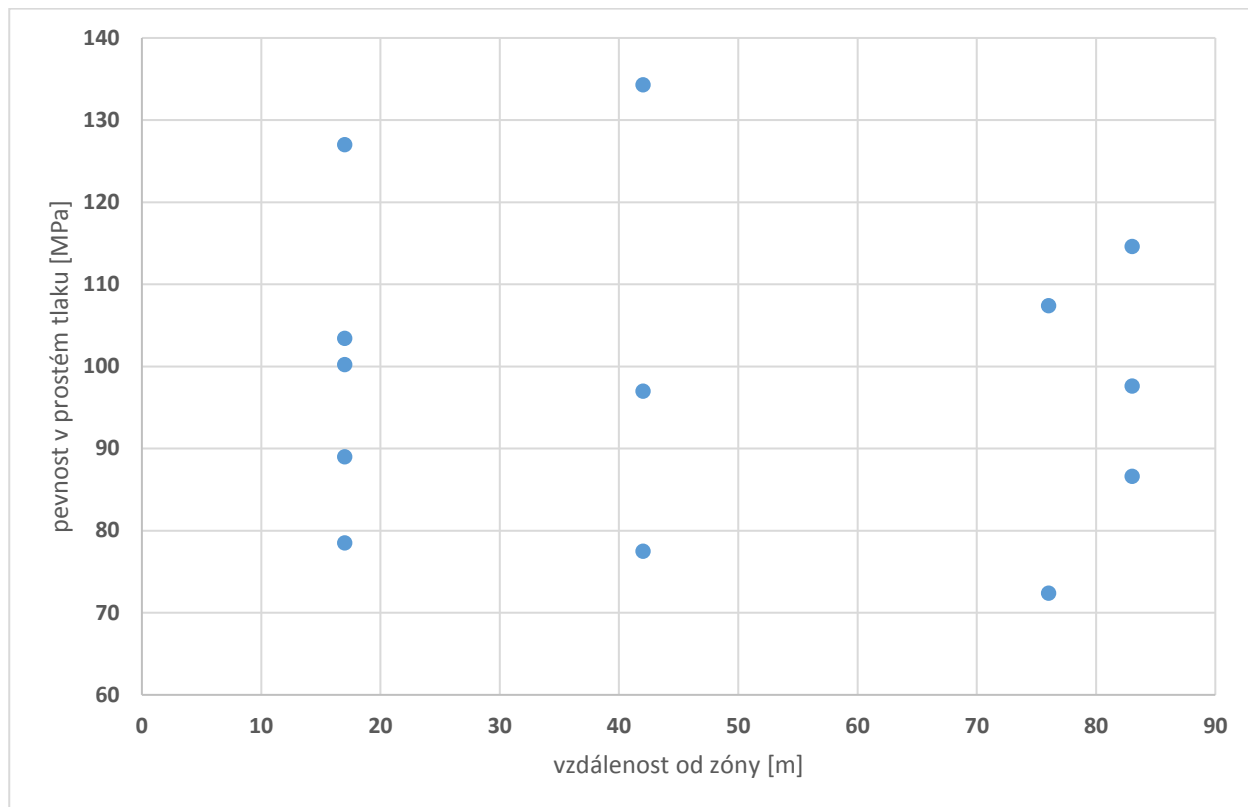
Obr. 266 Součinitel tepelné vodivosti v závislosti na vzdálenosti od první zóny na daném patře



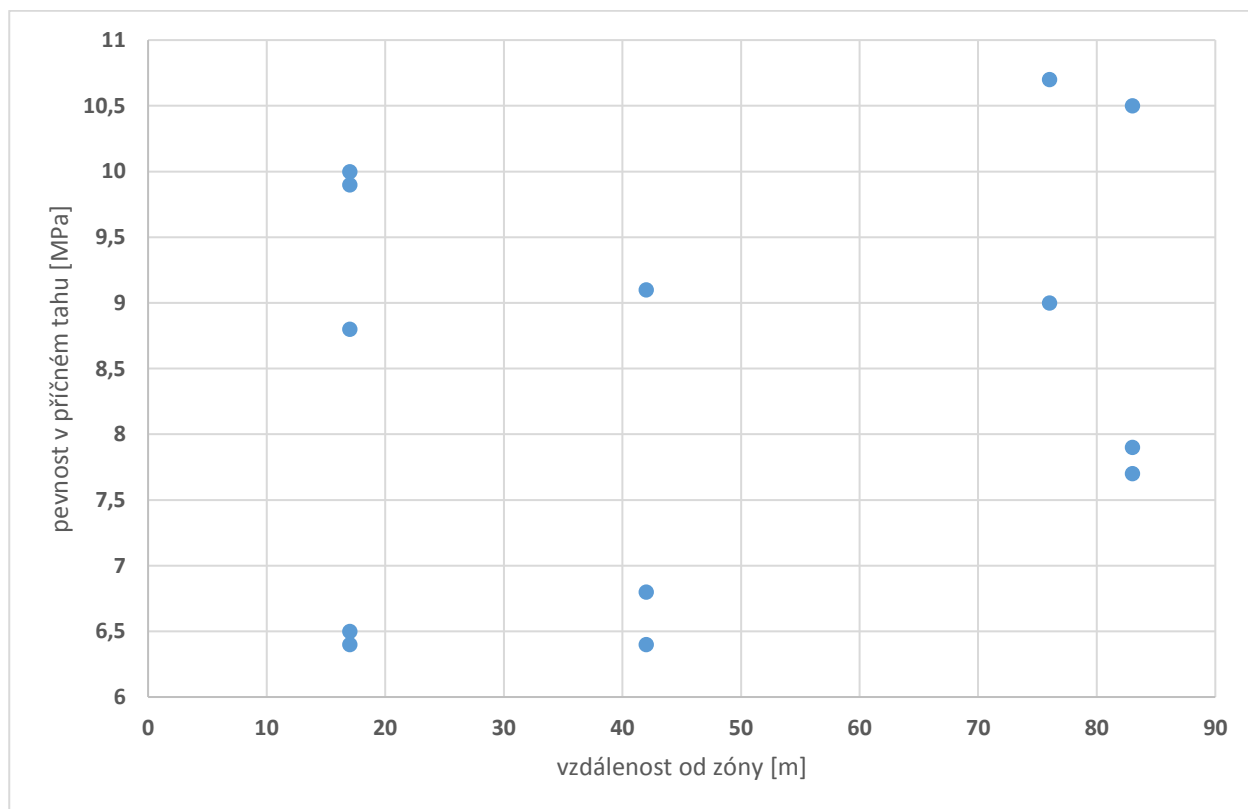
Obr. 267 Teplotní roztažnost v závislosti na vzdálenosti od první zóny na daném patře



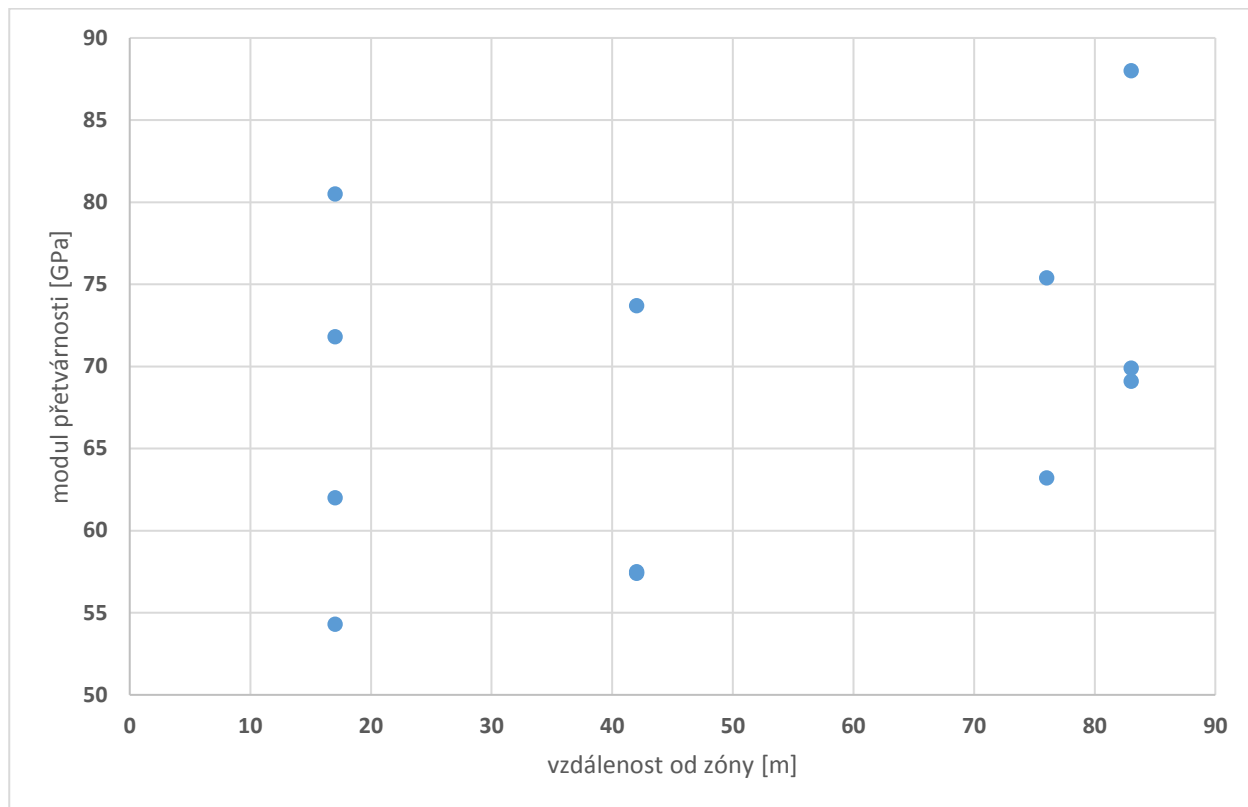
Obr. 268 Abrazivita v závislosti na vzdálenosti od první zóny na daném patře



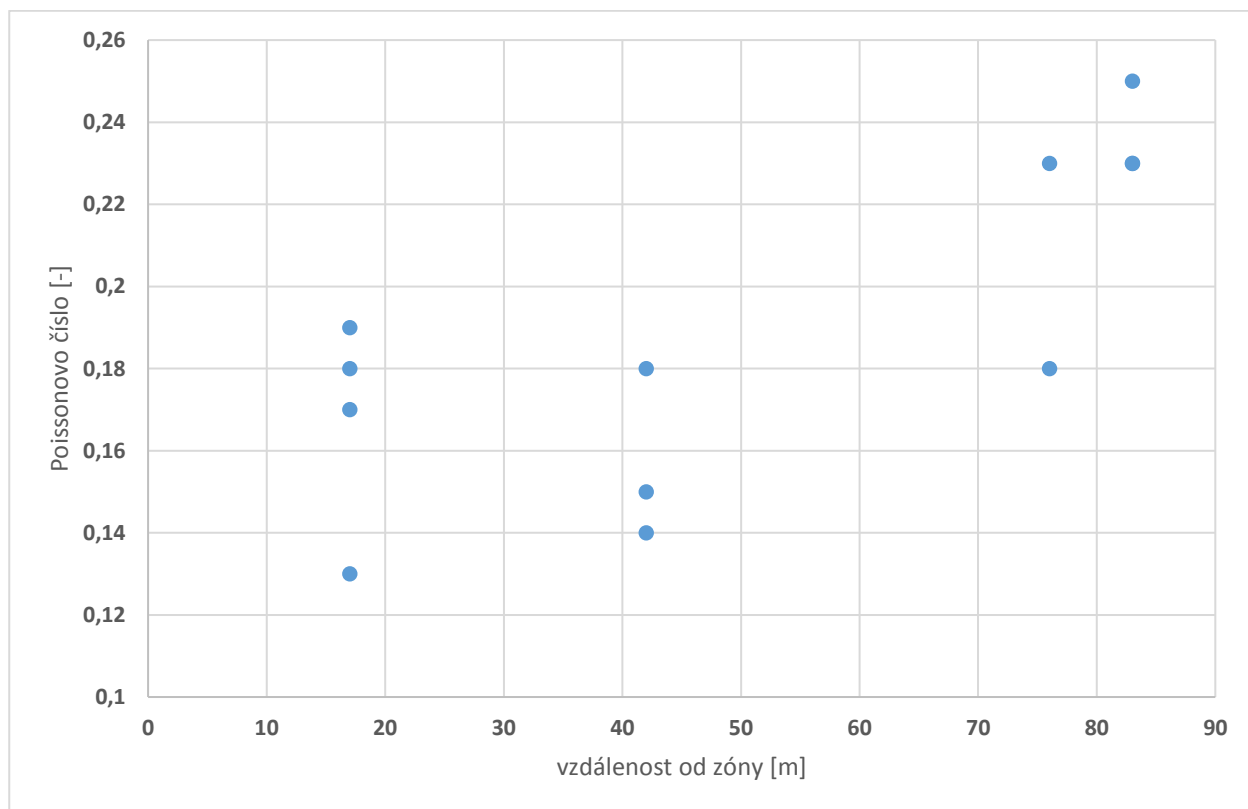
Obr. 269 Pevnost v prostém tlaku v závislosti na vzdálenosti od první zóny na daném patře



Obr. 270 Pevnost v příčném tahu v závislosti na vzdálenosti od první zóny na daném patře



Obr. 271 Modul přetvárnosti v závislosti na vzdálenosti od první zóny na daném patře



Obr. 272 Poissonovo číslo v závislosti na vzdálenosti od první zóny na daném patře

2.3.6 Transportní charakteristiky hornin

Studium je zaměřené na srovnání transportních charakteristik hornin zvolené reprezentativní litologie v různých hloubkových úrovních. Další oblastí je studium vlivu EDZ na transportní parametry. Studium transportních parametrů je orientované především na difúzní experimenty s ^3H jako konzervativním nesorbujícím se stopovačem a radionuklidy v aniontové formě (^{125}I , popř. ^{36}Cl). Sorpční experimenty byly stanoveny z jednotlivých hloubkových úrovní (12., 18., 20., 22., 24. patra) a z odvodňovací štoly blízké povrchu pro vybrané prvky (^{137}Cs , ^{85}Sr , Se, U). Pro studium parametrů a možného srovnání s výsledky FMV a dalších parametrů jsou využívány vzorky z velkoformátových vrtů o průměru 48 mm a odebrané v různých směrech k usměrnění (tj. metamorfní foliaci; kolmo a paralelně s usměrněním). Původně bylo plánováno stanovení sorpčních parametrů ze 3 hloubkových úrovní, s ohledem na nemožnost odběru vzorků EDZ byly navýšeny vzorky studia sorpčních parametrů na všechna patra.

Ze 12. a 24. patra byly odebrány vzorky horniny na studium složení pórové vody, současně byly realizovány odběry vody v In-situ podmínkách a měření VTZ ve vybraných intervalech za účelem otestování instrumentace VTZ pro nízké propustnosti a ověření neporušenosti horninové matrice (viz kapitola 2.3.7.6).

2.3.6.1 Horninové vzorky

Pro studium sorpčních a difúzních parametrů horninového prostředí byly vybrány vzorky z velkoobjemových vrtů. Pro sorpční experimenty byly využity části velkoobjemových vrtů o hmotnosti kolem 2 000–3 500 g. Jelikož na 24. patře nebyl realizován VO vrt pro sorpční experimenty byly vytvořeny vzorky z vrtu BGS24-H. Vzorky s označením BGS24-1 (vzorky z hloubek 0,20–0,39 a 0,59–0,77 m) a BGS24-2 (4,0–4,39 m).

Pro studium pórové vody byly odebrány a podrobně charakterizovány vzorky hornin z vrtu BGS12-H a BGS24-I. Příprava vzorků je popsána v kapitole 2.3.7.2.

Vzorky byly nadrceny na čelistovém drtiči BB 200 (Retsch). Sítování bylo následně provedeno na analytickém síťovacím stroji AS 300 (Retsch), kdy bylo u některých frakcí nutné přemletí vzorku na požadované množství dané frakce. Mletí vzorku bylo prováděno na planetárním kulovém mlýnu PM 200 (Retsch). Pro sorpční experimenty byly připraveny zrnitostní frakce A – E uvedené v Tab. 117, použity byly frakce C a D.

Tab. 117 Velikostní frakce horniny pro mineralogickou analýzu a sorpční experimenty

Označení frakce	Velikost frakce (mm)
A	< 0,063
B	0,125–0,063
C	0,63–0,125
D	0,8–0,63
E	> 0,8

2.3.6.1.1 Mineralogické složení hornin

Metodika

Vzorky z jednotlivých frakcí byly namlety na analytickou jemnost a následně analyzovány RTG difrakcí na práškovém RTG difraktometru Bruker D8 Advance v Bragg-Brentanově uspořádání na pracovišti ČGS (Dr. František Laufek).

Použito bylo CuK α záření 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 s 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 a 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. %.

Výsledky a vyhodnocení

Výsledky semikvantitativních analýz vybraných frakcí C (0,63–0,125 mm), D (0,8–0,63 mm) a WR (whole rock) hornin jsou uvedeny v Tab. 118. Vybrané frakce (C, D) byly následně použity pro sorpční experimenty.

Tab. 118 Mineralogické složení použitých horninových vzorků (hm. %), frakce C: 0,63–0,125 mm, frakce D: 0,8–0,63 mm, wr: celková hornina

Horninový vzorek	Frakce	Křemen	Plagioklas	K-živec	Chlorit	Biotit, annit	Pyrit	Pyrrhotin	Kalcit	Granát	Pravděpodobně přítomné minerály
OS_1025	C	34	35	5		26					a
	D	37	39	6		18					a
	wr	33,5	35,5	6		25					a
V12	C	42,5	33	11	1	5	5,5	2			
	D	41,5	27,5	11,5	2	11	5	1,5			
	wr	42,5	32	11,5	1	6	4,5	2,5			
V18	C	31,5	36,5	1	1,5	29,5			0,5		
	D	34,5	44	1	1	19,5			0,5		
	wr	32,5	40,5	1	1,5	24,5					
V20	C	28,5	40	3		28			0,5		
	D	30	47	3,5		19			0,5		
	wr	32	48,5	4		15			0,5		
V22	C	38	25,5	24,5	0,5	11,5					
	D	37	29,5	27	0,5	6					
	wr	38	29	26	0,5	6,5					
BGS24-1	C	35	39	2	4,5	15,5			0,2	3,8	
	D	37,5	45	2,5	3	9			0,5	2,5	
	wr	44,5	38	2,5	3,5	8				3,5	
BGS24-2	C	35,5	37,5	1,5	2,5	22			1		
	D	38,5	46,5	1	2	11,5			0,5		
	wr	34,5	46,5	1	2,5	15			0,5		

wr - whole rock, a) chlorit

Mineralogické složení vzorků na studium pórové vody z vrtu BGS12-H a BGS24-I je uvedeno v Tab. 119.

Tab. 119 Mineralogické složení vzorků na studium pórové vody z vrtu BGS12-H a BGS24-I (wr – celková hornina)

Vzorek	Plagioklas ¹	K-živec ²	Křemen	Chlorit	Amfibol	Kalcit	Slída ³	Granát
BGS 12-H wr	37,5	2	18,5	3	25	1	10,5	2,5
BGS 24-I wr	39	1	18	3	31,5	0,5	7	

¹Bliží se Ca-bohatému albitu.

²Odpovídá spíše mikroklinu

³Odpovídá trioktaedrické slídě (biotitu)

2.3.6.1.2 Porozita ε a hustota ρ hornin

Pórovitost (v %) je vyjádřena poměrem objemu pórů, který z celkového objemu látky (V_S) připadá na objem pórů (V_P), viz rovnice:

$$\varepsilon = \frac{V_P}{V_S} \cdot 100 \quad (27)$$

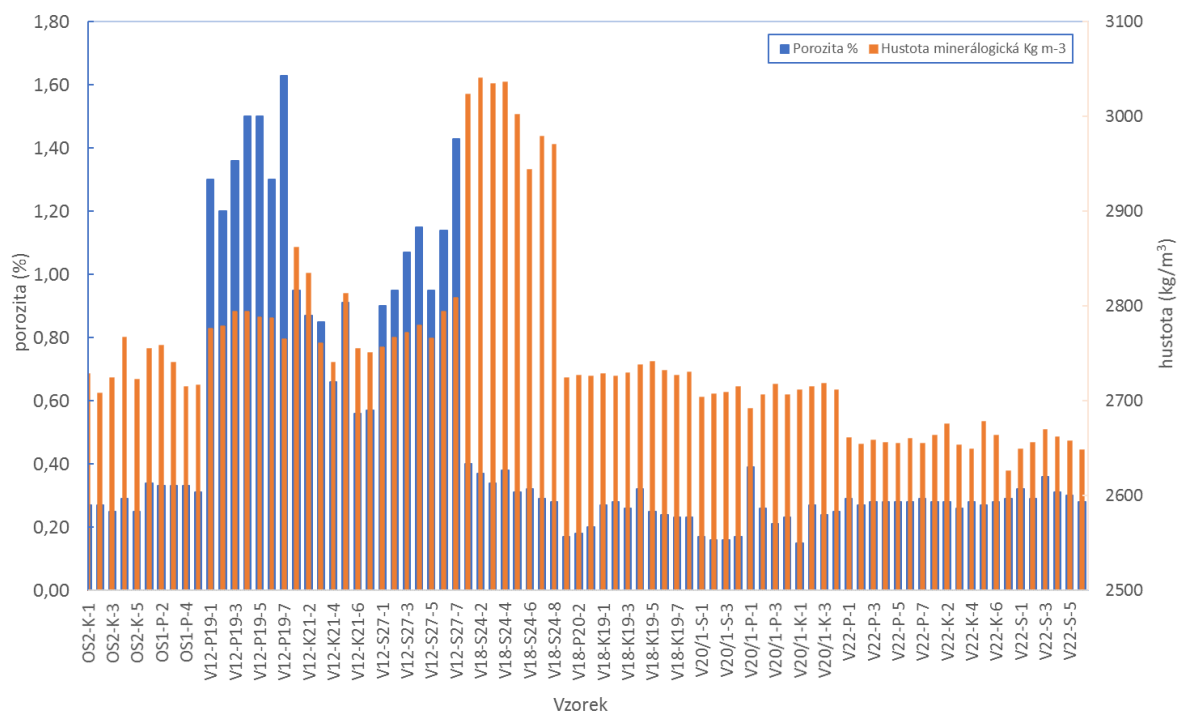
Stanovení celkové pórovitosti jednotlivých vzorků je nezbytné pro vyhodnocení efektivních difúzních koeficientů. Pórovitost hornin je možno studovat celou řadou metod. Jednou z nich je metodika stanovení pórovitosti metodou nasycení vodou a osychání. Tato metoda, popsána v pracovním postupu PP 2402.03, vychází z metodiky Melnyk a Skeet (1986). Jedná se o poměrně jednoduchou metodu, kterou lze snadno aplikovat v laboratoři s běžným vybavením a která poskytuje informace o pórovitosti vzorků. Tuto metodiku je možno využít jako srovnávací postup ke klasickému postupu měření metodou rtuťové porozimetrie. Metodika stanovení je podrobně popsána např. v Havlová et al. (2018).

Převzaté vzorky vrtných jader byly odebrány z velkoobjemových horninových vzorků a naformátovány na 10 mm segmenty, na kterých bylo provedeno měření porozity a hustoty hornin. Hodnoty byly stanoveny na připravených vzorcích disků o průměru 48–50 mm a výšce 10 mm. Následně byly vybrané vzorky předány na difúzní experimenty.

Žádný ze zpracovávaných vzorků nedosahoval vysoké pórovitosti (nad 3 %), proto by metodika Melnyka a Skeeta (1986) měla být vhodná pro všechny typy vzorků – dle zkušeností je vhodná právě pro vzorky do pórovitosti cca 3 %. Vzorky byly syceny syntetickou granitickou vodou (SGW2).

Hodnoty pórovitosti naměřené na vzorcích z velkoobjemových vzorků se pohybovaly v rozmezí hodnot 0,15–1,63 % (průměr 0,43 %, n = 75). Nejvyšší pórovitosti byly naměřeny na vzorcích z velkoobjemového vrtu na 12. patře (V12), kdy byla naměřena porozita mezi 0,56–1,63 % (medián 1,08 %). Naopak nejnižší hodnoty kolem 0,17–0,28 % byly zjištěny na vzorcích z 18. patra (V18). Výsledky naměřených pórovitostí jsou uvedeny v a Obr. 273. Pórovitosti tak

odpovídají čerstvým horninám, hodnoty u granitoidů se pohybují kolem 0,5 % a níže. Všechny výsledky jsou uvedeny v tabulce Elektronická příloha 35.



Obr. 273 Hodnoty porozity a hustot na difuzních vzorcích (disky 10 mm) z velkoobjemových vrtů (V12, V18, V20, V22 a odvodňovací štoly OS)

2.3.6.1.3 Analýzy vzorků horniny pro studium pórové vody

Pro studium pórové vody byly odebrány a podrobně charakterizovány vzorky hornin z vrtu BGS12-H a BGS24-I. Odběr a příprava vzorků je popsána v kapitole 2.3.7.2. Do difuzních cel byly připraveny vzorky o délce cca 200 mm. Na odebraných částech jádra byla stanovena porozita, objemová hmotnost, měrná hmotnost, silikátové analýzy a proveden petrologický popis hornin.

Po naformátování odebraných částí jader byly vzorky ihned váženy a stanovena hmotnostní vlhkost (%) jednotlivých segmentů jader. Vlhkost se pohybovala mezi 0,08–0,31 % (mean $0,14 \pm 0,5$ %, $n = 18$).

Petrografické vyhodnocení vzorků hornin z vrtu BGS12-H a BGS24-I

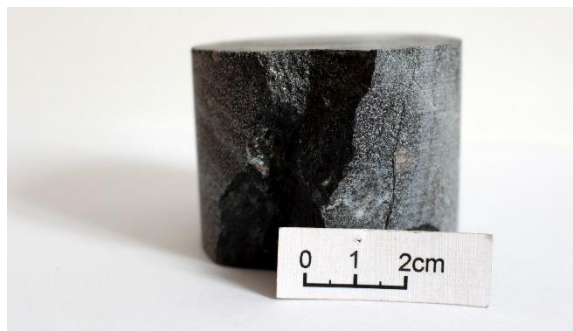
Vzorky byly rozřezány, aby bylo možno provést studium jejich staveb a makroskopický popis. Ze vzorků byly zhotoveny leštěné výbrusy a část hornin byla podrcena pro celohorninovou analýzu, která byla včetně popisu provedena na MU Brno (Michaela Bošková, prof. Jaromír Leichmann).

Vzorek BGS12-H

Barva horniny je velmi tmavá, černo-šedá. Stavba horniny je výrazně až slabě plošně-paralelní s porfyroblastickou strukturou a lepidogranoblastickou strukturou matrix (Obr. 274 a Obr. 275).



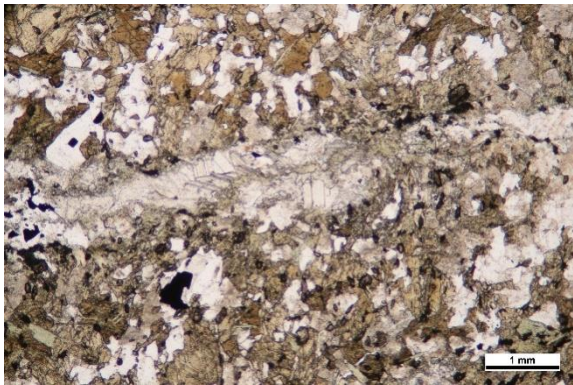
Obr. 274 Amfibol-biotitická rula s granátem (BGS12-H)



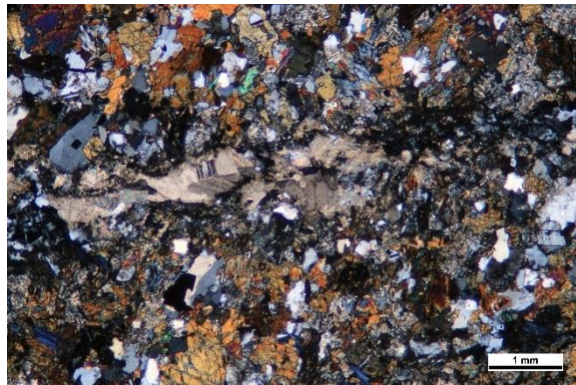
Obr. 275 Amfibol-biotitická rula s granátem (BGS12-H)

Z hlediska minerálního zastoupení je hornina složena převážně z biotitu, plagioklasu a křemene. Výrazněji je zastoupen i granát, chlorit, titanit a v menší míře i amfibol. Akcesoricky se zde vyskytují opakní minerály a apatit. Biotit tvoří lupenité agregáty xenomorfního omezení a je výrazně pleochroický (v odstínech hnědé až béžové). Biotit je částečně zatlačován chloritem (Obr. 278). Vzácně jsou zde pozorovány pleochroické dvůrky uzavírající v sobě zřejmě zirkon a monazit. Chlorit zde vzniká sekundárně jako projev alterace biotitu. Je nápadný svými anomálními levandulově modrými interferenčními barvami, které jsou typické právě pro sekundární chlority. Zrna plagioklasu jsou xenomorfně omezená a čirá, místy částečně zakalená až zcela rozložená, jedná se zřejmě o sericitizaci a karbonatizaci (Obr. 279). Zrna křemene jsou xenomorfního omezení. Menší zrna bývají často nepravidelně zaoblena. Zrna amfibolu jsou zbarvena v odstínech zelené barvy, xenomorfně omezená a vykazují intenzivní pleochroismus. Granáty jsou zde xenomorfně omezeny. Větší zrna dosahují velikosti až 0,7 cm. Mají tzv. porfyroblastickou strukturu, uzavírají v sobě malá zrna biotitu, plagioklasu a křemene. Granáty zde pravděpodobně vznikají na úkor okolního biotitu, plagioklasu a amfibolu v rámci retrogradní metamorfózy (Obr. 280, Obr. 281, Obr. 282, Obr. 283). Zrna titanitu jsou hypautomorfně až xenomorfně omezena a zastoupena až do 5%. Titanit je zde také sekundární a souvisí pravděpodobně s rozpadem biotitu, plagioklasu a amfibolu.

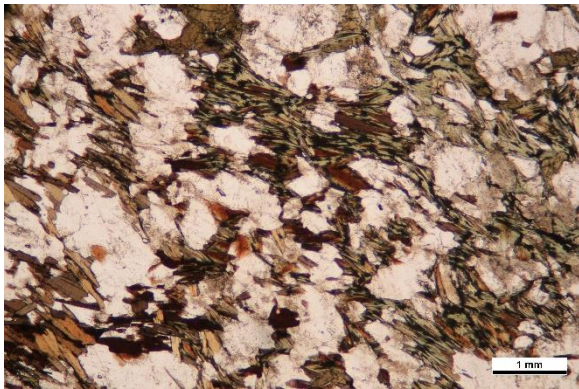
Alterace horniny není penetrativní, je lokalizovaná na drobné zóny soustředěné do proužků o mocnosti do 5 mm, kudy mohla migrovat fluida. Praskliny jsou lemované karbonátem a minerální výplň je jemnozrnná, pravděpodobně došlo k podrcení. Okolí prasklin je hrubozrnnější a dochází k alteraci (pozorována chloritizace). Dle pozorování je pravděpodobné, že se jedná o křehkou poruchu, která umožnila průnik fluid do horniny (Obr. 276, Obr. 277).



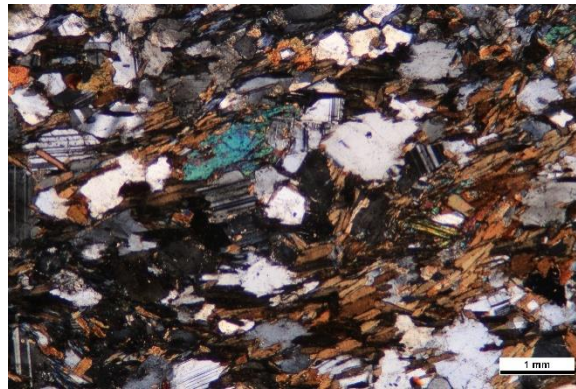
Obr. 276 Karbonátová žilka



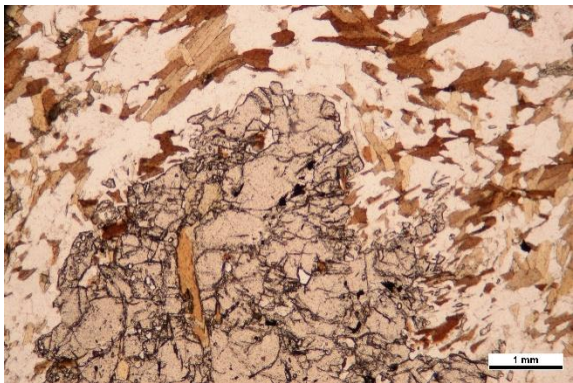
Obr. 277 Karbonátová žilka (XPL)



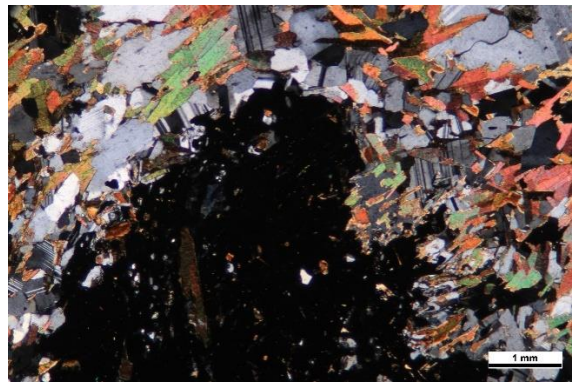
Obr. 278 Chloritizace biotitu



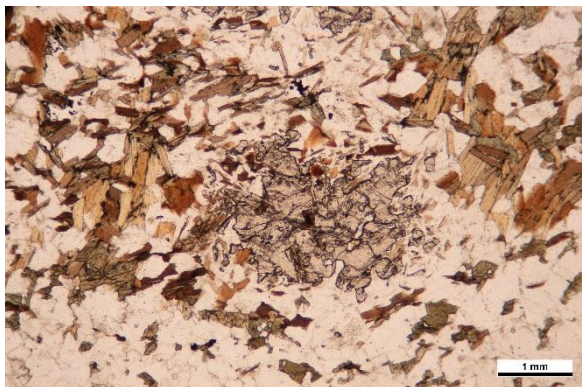
Obr. 279 Plagioklas, biotit, chlorit, křemen (XPL)



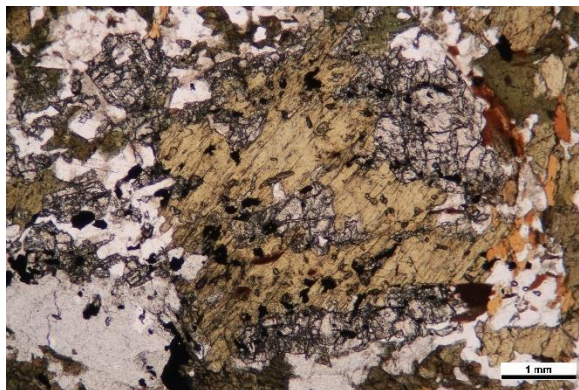
Obr. 280 Cedníkovitá struktura granátu



Obr. 281 Cedníkovitá struktura granátu (XPL)



Obr. 282 Granát, biotit, plagioklas, amfibol, křemen, opakní minerály



Obr. 283 Granát, biotit, plagioklas, amfibol, křemen, opakní minerály

Z celohorninové analýzy vzorku BGS12-H vyšlo, že hornina obsahuje pouze necelých 50 % SiO_2 . Rovněž vysoké obsahy MgO , FeO a CaO korespondují s mafickým charakterem horniny. Vysoké obsahy Al_2O_3 a poměrně vysoký K_2O odpovídají vysokému obsahu biotitu v hornině. Vyšší obsahy síry jsou v souladu s pozorovaným výskytem sulfidů v hornině. Zvýšené obsahy CO_2 ukazují na možnou karbonatizaci žilců. Celohorninová analýza ukázala vyšší obsahy síry, které ukazují na panující redukční podmínky a vznik sulfidů v hornině. Zvýšené obsahy CO_2 ukazují na možnou karbonatizaci žilců.

Z poskytnutých vzorků bylo určeno, že vzorek BGS12-H je amfibol-biotitickou rulou s granátem. Z minerálního hlediska je hornina složena primárně z biotitu, plagioklasu a křemene, dále je zde zastoupen granát, chlorit, titanit a v menší míře i amfibol. Akcesoricky se zde vyskytují opakní minerály a apatit.

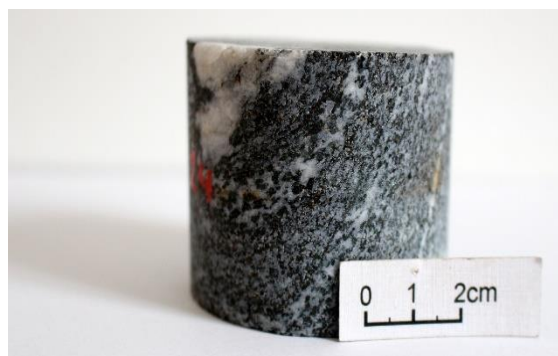
Nově vznikající granáty zde tvoří porfyroblasty velké až 0,7 cm. Na vzorku je patrná lokální alterace v podobě chloritizace biotitu a počínající sericitizace a karbonatizace plagioklasu. Alterace je pravděpodobně spojena s křehkými tektonickými poruchami, které umožnily průnik fluid do horniny. Křemen zde zůstává stabilní.

Vzorek BGS24-I

Barva horniny je tmavošedá, místy s několika mm mocnými šedobílými pásky tvořenými především světlými minerály (Obr. 284, Obr. 285). Jednotlivá minerální zrna vykazují intenzivní lesk na plochách štěpnosti. Stavba horniny je plošně paralelní s granoblastickou strukturou.



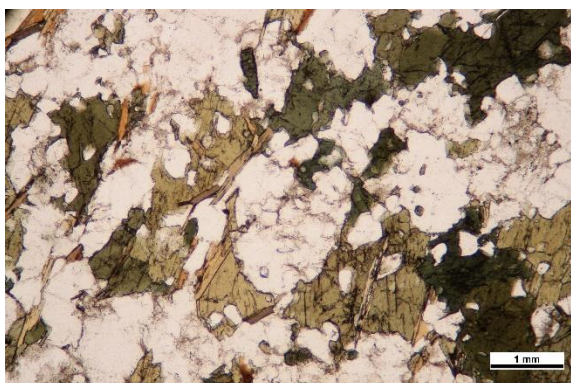
Obr. 284 Částečně alterovaný biotitický amfibolit (BGS24-I)



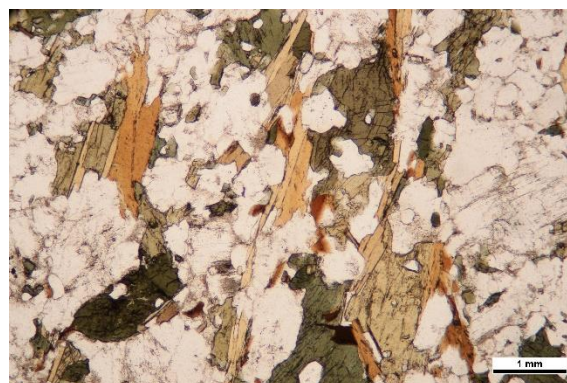
Obr. 285 Částečně alterovaný biotitický amfibolit (BGS24-I)

Z hlediska minerální zastoupení je hornina složena převážně z amfibolu, plagioklasu, biotitu a křemene. Z akcesorických minerálů je zde nejhojněji zastoupen apatit. Biotit a amfibol vzácně uzavírají malá zrna pravděpodobně zirkonu a monazitu, kolem kterých se tvoří pleochroické dvůrky (Obr. 290).

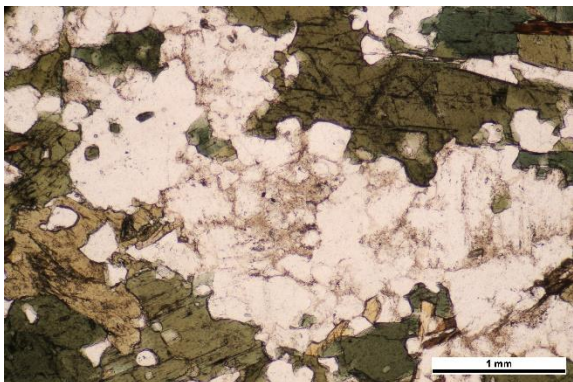
Nejhojněji je zde zastoupen z tmavých minerálů amfibol a ze světlých minerálů plagioklas a křemen. Zrna amfibolu jsou silně pleochroická v zelených odstínech a xenomorfně omezená (Obr. 286). Rovněž biotit je intenzivně pleochroický v žlutohnědých odstínech. Agregáty biotitu jsou ve tvaru krátce lupenitých zrn v odstínech béžové až hnědé barvy (Obr. 287). Plagioklasy jsou čiré či částečně zakalené. Některá zrna plagioklasu jsou částečně alterovaná, projevuje se zde sericitizace a karbonatizace (Obr. 288, Obr. 289). Alterace jsou viditelné často dle dvojčatných ploch. Zrna křemene jsou xenomorfního omezení. Menší zrna bývají často nepravidelně zaoblena.



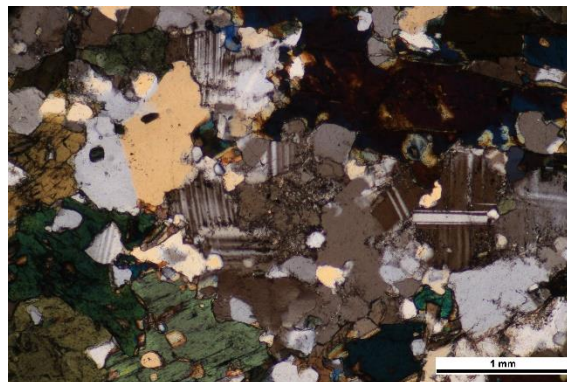
Obr. 286 Amfibol, plagioklas, biotit, křemen



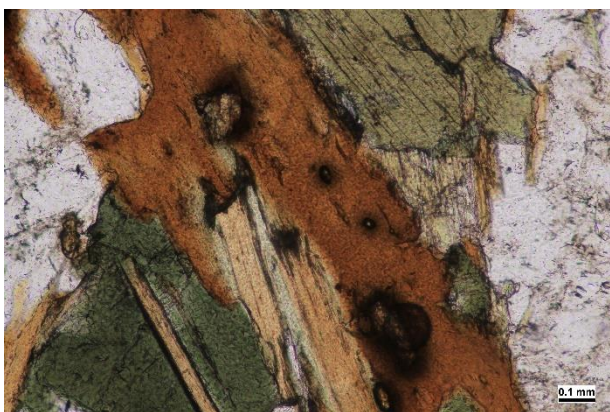
Obr. 287 Amfibol, plagioklas, biotit, křemen



Obr. 288 Alterace plagioklasu



Obr. 289 Alterace plagioklasu (XPL)



Obr. 290 Pleochroické dvůrky s akcesorickými minerály

Z celohorninové analýzy BGS24-I bylo stanoveno, že obsahy SiO_2 (60 %) jsou výrazně vyšší než u předcházejícího vzorku. Vyšší obsah SiO_2 je kompenzován relativně nižšími obsahy MgO , FeO , Al_2O_3 a K_2O . Chemické složení tak opět velmi dobře odráží minerální složení horniny s převahou amfibolu nad biotitem a vyšším zastoupením plagioklasů a křemene. Zvýšené obsahy CO_2 můžou opět ukazovat na slabou karbonizaci žilců. Zvýšené obsahy CO_2 můžou opět ukazovat na slabou karbonizaci žilců stejně jako u vzorku BGS12-H.

Tab. 120 Celohorninová analýza vzorku BGS12-H a BGS24- (%)

	BGS 12-H	Amfibol-biotitická rula s granátem	BGS 24-I	Biotitický amfibolit (částečně alterovaný)
-H ₂ O	0,12	0,13	0,06	0,07
+H ₂ O	1,78	1,78	0,78	0,78
SiO ₂	49,83	49,85	59,72	59,85
TiO ₂	0,94	0,98	0,6	0,6
Al ₂ O ₃	18,08	18,24	16,05	16,05
Fe ₂ O ₃	1,38	1,36	1,54	1,45
FeO	8,6	8,6	4,87	4,87
MnO	0,19	0,19	0,1	0,1
CaO	6,07	6,23	6,36	6,45
MgO	6,28	6,41	4,38	4,42
K ₂ O	2,6	2,6	0,98	0,97
Na ₂ O	3,11	3,07	3,94	3,87
S	0,21	0,21	0,11	0,11
CO ₂	0,54	0,54	0,44	0,44
P ₂ O ₅	0,11	0,1	0,11	0,09
suma	99,85	100,28	100,05	100,12

Vzorek BGS24-I byl určen jako biotitický amfibolit. Z minerálního hlediska je hornina složena primárně z amfibolu, plagioklasu, biotitu a křemene. Akcesoricky se zde vyskytuje apatit a pravděpodobně zirkon a monazit.

Hornina není výrazně postižena alteracemi, což potvrzuje výrazný pleochroismus biotitu a amfibolu. Ovšem na zrnech plagioklasu byla pozorována počínající sericitizace a karbonatizace.

2.3.6.2 Sorpce radionuklidů na horniny

2.3.6.2.1 Metodika

Statický sorpční experiment sleduje interakce známého množství pevné fáze (sorbentu) m (g) a známého objemu kapalné fáze V (l) o dané koncentraci c_0 (mol $^{-1}$) nebo objemové aktivitě A_0 (Bq l^{-1} ; cpm atd.) studovaného radionuklidu (28) a (29).

$$R_d = \frac{(c_0 - c) V}{c m} \quad (28)$$

$$\eta_{sorpce} = \frac{(c_0 - c)}{c_0} \cdot 100, \quad (29)$$

kde c_0 je počáteční koncentrace sledované látky (mol l^{-1}), c je koncentrace sledované látky ve vodné fázi (mol l^{-1}), V je objem kapalné fáze (l), m je hmotnost pevné fáze (g).

Tyto experimenty byly provedeny na horninových materiálech o dvou zrnitostních frakcích (C: 0,63–0,125 mm, D: 0,8–0,63 mm). Pro experimenty byl zvolen poměr pevné fáze m (g) a kapalné fáze V (l) v poměru 1 : 10, kdy navážka pevné fáze byla 0,5 g. Sorpční experiment trval šest na sobě nezávislých časových intervalů (0,04, 0,31, 1, 2, 4 a 7 dnů). Po celou dobu experimentu byly vzorky kontinuálně míchány na třepačce.

Pro práci bylo použito několik specií, kdy byl sledován úbytek koncentrace (aktivity) v závislosti na čase.

- ^{137}Cs ; CsCl ($c = 2 \cdot 10^{-5}$ mol l^{-1}) značený $^{137}\text{CsCl}$ v 0,1 mol l^{-1} HCl ($A_0 \sim 800$ Bq ml^{-1})
- ^{85}Sr ; SrCl $_2$ ($c = 2 \cdot 10^{-5}$ mol l^{-1}) značený $^{85}\text{SrCl}_2$ v 0,5 mol l^{-1} HCl ($A_0 \sim 800$ Bq ml^{-1})
- SeO $_3^{2-}$ ve formě Na $_2$ SeO $_3$ ($c = 2 \cdot 10^{-5}$ mol l^{-1})
- UO $_2^{2+}$ ve formě UO $_2$ (NO $_3$) $_2$ ($c = 2,6 \cdot 10^{-4}$ mol l^{-1})

Cesium patří mezi kritické radionuklidy vyskytující se pouze ve formě Cs(I), který nevytváří komplexy v roztoku. Cesium se kvůli své velikosti a nízkému náboji nesorbuje na hydroxylové skupiny daných minerálů. Naopak se velmi ochotně váže pomocí kationtové výměny a povrchové komplexace na slídové minerály (Söderlund et al. 2014).

Stroncium je slabě se sorbující kritický radionuklid. Vyskytuje se ve formě Sr(II), kdy při pH > 9 nebo v přítomnosti karbonátů tvoří karbonátové komplexy a hydroxokomplexy. Stroncium se na horninový materiál sorbuje mechanismem iontové výměny, při které je sorpce kontrolována zejména hodnotami kationtové výměnné kapacity (CEC) a pH (Carbol a Engkvist 1997).

Selen patří mezi redox-senzitivní aniontové kritické radionuklidy vyznačující se komplikovanou chemií. Objevuje se v několika formách v závislosti na podmínkách. 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 dominuje ve formě selenidu (HSe $^{2-}$). Aby mohlo docházet k sorpci na horniny, byl v této práci použit selen ve formě SeO $_3^{2-}$, jelikož SeO $_4^{2-}$ se chová jako nesorbující se radionuklid v přítomnosti krystalických hornin (Havlová et al. 2013).

Uran se řadí mezi redox-senzitivní kritické radionuklidy, v geosféře se vyskytuje ve dvou oxidačních stupních U(IV) a U(VI). Sorpce uranylu je významně ovlivněna okolním pH, kdy při nízkém pH jsou uranylové ionty (UO_2^{2+}) sorbovány kationovou výměnou. Jakmile pH roste, dochází k poklesu sorpce uranylu důsledkem tvorby nesorbujících se U(VI)-karbonátových komplexů (Hakanen et al. 2014).

2.3.6.3 Popis pevné a kapalně fáze

2.3.6.3.1 Popis pevné fáze

Sorpce radionuklidů byla sledována na vybraných horninových vzorcích z lokality Rožná. Seznam použitých hornin včetně jejich charakterizace je uveden v Tab. 118.

Každý horninový vzorek byl nadrcen a vybrány dvě zrnitostní frakce (C: 0,63–0,125 mm, D: 0,8–0,63 mm), které byly následně analyzovány rentgenovou difrakcí na práškovém difraktometru. Mineralogické složení jednotlivých použitých frakcí je uvedeno v Tab. 118.

Obě frakce byly následně promyty syntetickou granitickou vodou SGW2 (Červinka a Gondolli 2016), vysušeny na vzduchu a následně použity pro sorpční experimenty. Navážka horninového materiálu byla 0,5 g.

2.3.6.3.2 Kapalná fáze - vlastnosti použitých roztoků

Pro experimentální práci byla použita syntetická granitická voda, která nese označení SGW2 (Červinka a Gondolli 2016). Její složení je uvedeno v Tab. 121.

Tab. 121 Chemické složení a pH syntetické granitické vody SGW2 (Červinka a Gondolli 2016)

Specie	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

2.3.6.3.3 Výsledky a vyhodnocení

Cesium

Výsledné hodnoty R_d cesia na studovaných horninových vzorcích jsou uvedeny na Obr. 291, v Tab. 122 a Tab. 123. Experimentálně získané hodnoty R_d se pohybovaly v rozmezí 8-90 ml g⁻¹ na frakci C. Na frakci D bylo dosaženo vyšších hodnot R_d a to v rozsahu 16–134 ml g⁻¹.

U obou frakcí došlo k nízkým sorpcím na horninových vzorcích V22 (22. patro) a V24 (24. patro). Tyto dva vzorky se od sebe výrazně lišily v obsahu plagioklasu (V22 ~ 30 hm. %, V24 ~ 45 hm. %) a K-živce (V22 ~ 30 hm. %, V24 ~ 3 hm. %). V obou případech vzorky obsahovaly nižší množství biotitu (V22-C 11,5 hm. %, V22-D 6 hm. %; V24-C 15,5 hm. %, V24-D 9 hm. %). Nejvyšší hodnoty R_d bylo dosaženo u vzorku V18 (18. patro). Tento vzorek obsahoval největší množství biotitu ze všech použitých vzorků (V18-C 30 hm. %, V18-D 20 hm. %).

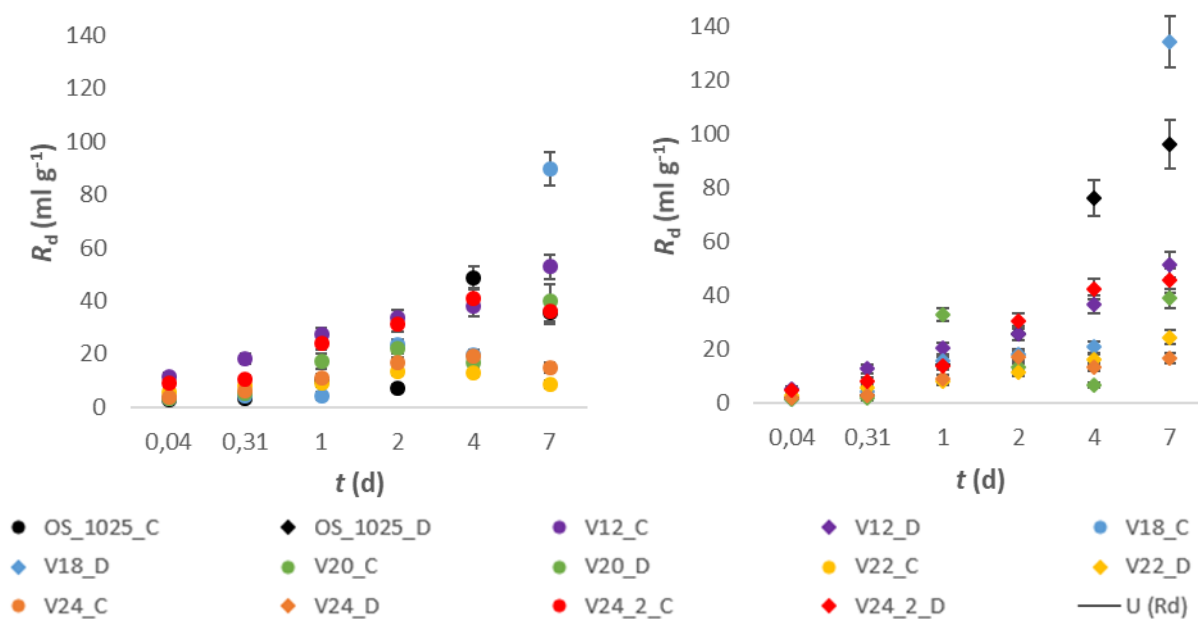
U sorpčních experimentů na vybraných materiálech (OS_1025, V18 a V22) byla pozorována výrazně vyšší sorpce na frakci s větší zrnitostí, která nesla označení frakce D. Příčina vyšších sorpcí není zcela jasná, jelikož se obě frakce C a D od sebe výrazně nelišily mineralogickým složením (viz Tab. 118). Nepředpokládá se tak možnost nabohacení některým minerálem jedné frakce vlivem drcení a síťování, které by mohlo vést k vyššímu záchytu cesia.

Tab. 122 Hodnoty R_d cesia včetně jejich rozšířených standardních nejistot na frakcích C horninových vzorků, $c(\text{Cs}) = 2 \cdot 10^{-5} \text{ mol l}^{-1}$, frakce C: 0,63–0,125 mm

Horninový vzorek	Doba sorpce (dny)					
	0,04	0,31	1	2	4	7
OS_1025-C	2,6 ± 0,9	3,1 ± 1,0	9,7 ± 1,4	7,0 ± 1,5	48,7 ± 4,4	35,6 ± 4,2
V12-C	11,5 ± 1,5	18,1 ± 2,0	27,2 ± 2,7	33,4 ± 3,2	37,8 ± 3,5	52,7 ± 4,7
V18-C	3,2 ± 1,0	4,1 ± 1,0	4,1 ± 1,3	23,5 ± 2,1	19,7 ± 2,0	89,5 ± 6,3
V20-C	3,1 ± 1,0	5,2 ± 1,1	17,4 ± 2,9	22,2 ± 2,1	16,6 ± 1,6	40,1 ± 6,2
V22-C	5,7 ± 1,1	8,1 ± 1,3	8,9 ± 1,3	13,4 ± 1,5	12,9 ± 1,6	8,6 ± 1,5
V24-C	3,6 ± 1,0	5,9 ± 1,1	11,0 ± 1,5	16,8 ± 1,8	19,3 ± 1,9	14,7 ± 1,8
V24 (2)-C	9,1 ± 1,3	10,3 ± 1,4	23,8 ± 2,5	31,2 ± 3,0	40,9 ± 3,9	35,8 ± 3,5

Tab. 123 Hodnoty R_d cesia včetně jejich rozšířených standardních nejistot na frakcích D horninových vzorků, $c(\text{Cs}) = 2 \cdot 10^{-5} \text{ mol l}^{-1}$, frakce D: 0,8–0,63 mm

Horninový vzorek	Doba sorpce (dny)					
	0,04	0,31	1	2	4	7
OS_1025-D	1,6 ± 0,9	2,9 ± 1,0	14,3 ± 1,5	25,7 ± 2,2	76,2 ± 6,6	96,3 ± 9,1
V12-D	5,2 ± 1,1	12,7 ± 1,6	20,2 ± 2,2	25,7 ± 2,6	36,6 ± 3,4	51,4 ± 4,6
V18-D	1,4 ± 0,9	4,3 ± 1,0	15,5 ± 1,6	18,1 ± 1,8	20,7 ± 2,0	134,3 ± 9,6
V20-D	1,2 ± 0,9	1,6 ± 0,9	32,8 ± 2,6	13,3 ± 1,4	6,5 ± 1,1	38,8 ± 3,6
V22-D	2,7 ± 0,9	5,8 ± 1,1	7,8 ± 1,3	11,4 ± 1,4	16,1 ± 2,0	24,3 ± 2,6
V24-D	1,9 ± 0,9	3,0 ± 1,0	8,9 ± 1,3	17,0 ± 1,9	13,2 ± 1,5	16,8 ± 1,9
V24 (2)-D	4,7 ± 1,1	8,0 ± 1,3	13,8 ± 1,7	30,3 ± 2,9	42,2 ± 3,9	45,6 ± 4,5



Obr. 291 Hodnoty R_d cesia včetně jejich rozšířených standardních nejistot na horninových vzorcích, vlevo: frakce C (0,63–0,125 mm), vpravo: frakce D (0,8–0,63 mm), $c(\text{Cs}) = 2 \cdot 10^{-5} \text{ mol l}^{-1}$

Stroncium

Výsledné hodnoty R_d stroncia na studovaných vzorcích jsou uvedeny na Obr. 292, Tab. 124 a Tab. 125. Experimentálně získané hodnoty R_d jsou o řád nižší než v případě cesia. Ve většině případů došlo u studovaných materiálů k nepatrně vyšší sorpci na frakci C, kdy se R_d pohybovalo v rozsahu 2–6 ml g⁻¹. U frakce D byly hodnoty R_d v rozsahu 1–5 ml g⁻¹. Jelikož rozdíl mezi sorpcí na jednotlivých frakcích nebyl nijak výrazný a převážně odpovídal rozšířené standardní nejistotě stanovení R_d , nelze tak adekvátně usuzovat vliv velikosti částic na průběh sorpce.

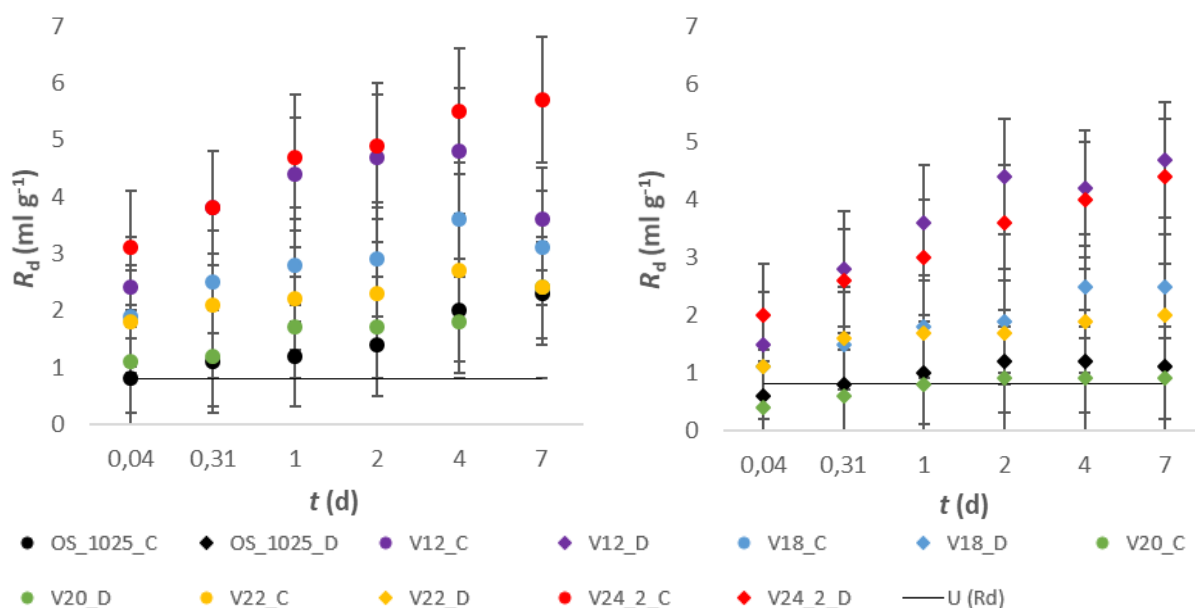
Nejvyšší sorpce bylo dosaženo na vzorku V24 (2) frakce C, kdy R_d dosahovalo hodnoty 5,7 ml g⁻¹. Tento vzorek se vyznačuje vyšším obsahem biotitu (22 hm. %) a nejvyšším výskytem stopového množství kalcitu (1 hm. %).

Tab. 124 Hodnoty R_d stroncia včetně jejich rozšířených standardních nejistot na frakcích C horninových vzorků, $c(\text{Sr}) = 2 \cdot 10^{-5} \text{ mol l}^{-1}$, frakce C: 0,63–0,125 mm

Horninový vzorek	Doba sorpce (dny)					
	0,04	0,31	1	2	4	7
OS_1025-C	0,8 ± 0,9	1,1 ± 0,9	1,2 ± 0,9	1,4 ± 0,9	2,0 ± 0,9	2,3 ± 0,9
V12-C	2,4 ± 0,9	3,8 ± 1,0	4,4 ± 1,0	4,7 ± 1,1	4,8 ± 1,1	3,6 ± 0,9
V18-C	1,9 ± 0,9	2,5 ± 0,9	2,8 ± 1,0	2,9 ± 1,0	3,6 ± 1,0	3,1 ± 1,0
V20-C	1,1 ± 0,9	1,2 ± 0,9	1,7 ± 0,9	1,7 ± 0,9	1,8 ± 0,9	2,4 ± 0,9
V22-C	1,8 ± 0,9	2,1 ± 0,9	2,2 ± 0,9	2,3 ± 0,9	2,7 ± 0,9	2,4 ± 0,9
V24 (2)-C	3,1 ± 1,0	3,8 ± 1,0	4,7 ± 1,1	4,9 ± 1,1	5,5 ± 1,1	5,7 ± 1,1

Tab. 125 Hodnoty R_d stroncia včetně jejich rozšířených standardních nejistot na frakcích D horninových vzorků, $c(\text{Sr}) = 2 \cdot 10^{-5} \text{ mol l}^{-1}$, frakce D: 0,8–0,63 mm

Horninový vzorek	Doba sorpce (dny)					
	0,04	0,31	1	2	4	7
OS_1025-D	< 0,8	0,8 ± 0,9	1,0 ± 0,9	1,2 ± 0,9	1,2 ± 0,9	1,1 ± 0,9
V12-D	1,5 ± 0,9	2,8 ± 1,0	3,6 ± 1,0	4,4 ± 1,0	4,2 ± 1,0	4,7 ± 1,0
V18-D	1,1 ± 0,9	1,5 ± 0,9	1,8 ± 0,9	1,9 ± 0,9	2,5 ± 0,9	2,5 ± 0,9
V20-D	< 0,8	< 0,8	0,8 ± 0,9	0,9 ± 0,9	0,9 ± 0,9	0,9 ± 0,9
V22-D	1,1 ± 0,9	1,6 ± 0,9	1,7 ± 0,9	1,7 ± 0,9	1,9 ± 0,9	2,0 ± 0,9
V24 (2)-D	2,0 ± 0,9	2,6 ± 0,9	3,0 ± 1,0	3,6 ± 1,0	4,0 ± 1,0	4,4 ± 1,0



Obr. 292 Hodnoty R_d stroncia včetně jejich rozšířených standardních nejistot na horninových vzorcích, vlevo: frakce C (0,63–0,125 mm), vpravo: frakce D (0,8–0,63 mm), $c(\text{Sr}) = 2 \cdot 10^{-5} \text{ mol l}^{-1}$

Selen

Hodnoty rozdělovacího distribučního koeficientu R_d získané studiem vybraných horninových vzorků se v případě frakce C pohybovaly v rozmezí 1–8 ml g⁻¹ (Tab. 126) a u frakce D 1–12 ml g⁻¹ (Tab. 127). V převážné většině případů se výrazně neprojevil vliv rozličné zrnitosti obou frakcí na průběh sorpce. Nejvyšší sorpce na obou frakcích bylo dosaženo u horninového vzorku V12 z 12. patra, kdy u frakce C bylo stanoveno R_d 7,8 ml g⁻¹ a u frakce D 12,1 ml g⁻¹. Jedná se o výrazně vyšší hodnoty R_d než v případě sorpcí na dalších zkoumaných horninových vzorcích ($R_d < 1,5 \text{ ml g}^{-1}$). Vzorek V12 jako jediný obsahoval pyrit (~ 5,5 hm. %) a pyrhotin (~ 2 hm. %), dále měl jedno z nejnižších zastoupení biotitu mezi zkoumanými vzorky (< 11 hm. %). Zvýšená hodnota R_d je pravděpodobně způsobena výskytem pyritu a pyrhotinu ve vzorku, kdy zřejmě došlo k redukci SeO_3^{2-} na Se^0 a $\text{Se}^{-\text{II}}$ vlivem přítomnosti sulfidů železa.

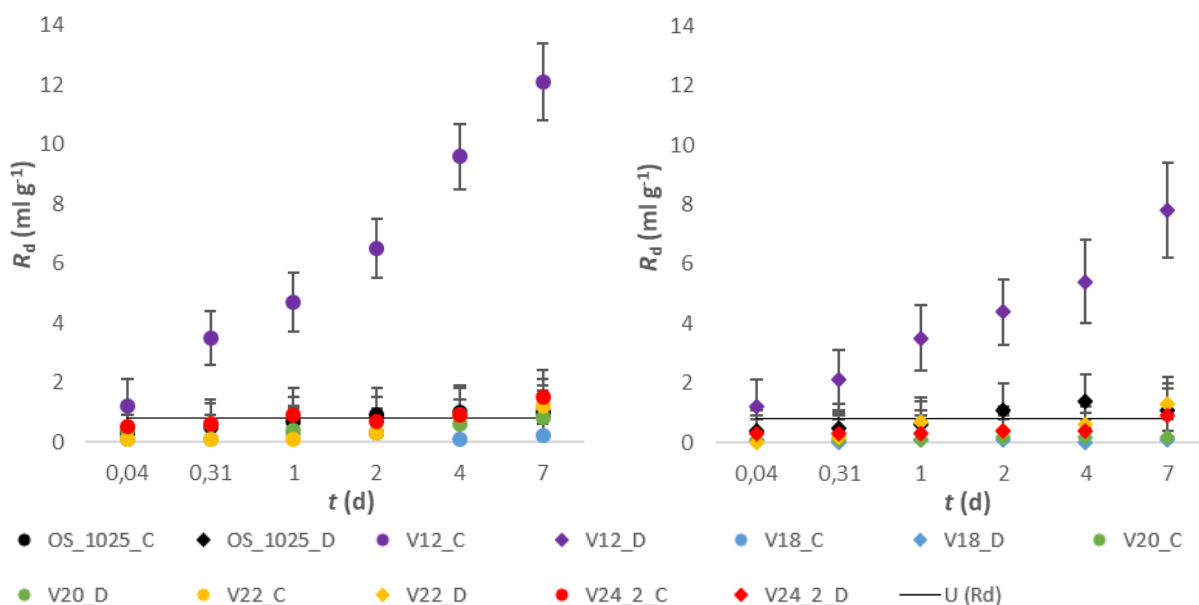
V řadě případů docházelo k neprokazatelné sorpci, jelikož se hodnota R_d pohybovala pod nejistotou měření ($R_d \sim 0 \text{ ml g}^{-1}$ je $U_{R_d} < 0,8 \text{ ml g}^{-1}$). Jelikož nelze průkazně prokázat sorpci na daný materiál, nejsou tyto výsledky rozdělovacího distribučního koeficientu R_d uvedeny v Tab. 126 a Tab. 127.

Tab. 126 Hodnoty R_d Se(IV) včetně jejich rozšířených standardních nejistot na frakcích C horninových vzorků, $c(\text{Se}) = 2 \cdot 10^{-5} \text{ mol l}^{-1}$, frakce C: 0,63–0,125 mm

Horninový vzorek	Doba sorpce (dny)					
	0,04	0,31	1	2	4	7
OS_1025-C	< 0,8	< 0,8	< 0,8	$0,9 \pm 0,9$	$1,0 \pm 0,9$	$1,0 \pm 0,9$
V12-C	$1,2 \pm 0,9$	$2,1 \pm 0,9$	$3,5 \pm 1,0$	$4,4 \pm 1,0$	$5,4 \pm 1,1$	$7,8 \pm 1,3$
V18-C	< 0,8	< 0,8	< 0,8	< 0,8	< 0,8	< 0,8
V20-C	< 0,8	< 0,8	< 0,8	< 0,8	< 0,8	$0,8 \pm 0,9$
V22-C	< 0,8	< 0,8	< 0,8	< 0,8	$0,9 \pm 0,9$	$1,2 \pm 0,9$
V24-C	< 0,8	< 0,8	$0,9 \pm 0,9$	< 0,8	$0,9 \pm 0,9$	$1,5 \pm 0,9$

Tab. 127 Hodnoty R_d Se(IV) včetně jejich rozšířených standardních nejistot na frakcích D horninových vzorků, $c(\text{Se}) = 2 \cdot 10^{-5} \text{ mol l}^{-1}$, frakce D: 0,8–0,63 mm

Horninový vzorek	Doba sorpce (dny)					
	0,04	0,31	1	2	4	7
OS_1025-D	< 0,8	< 0,8	< 0,8	$1,1 \pm 0,9$	$1,4 \pm 0,9$	$1,1 \pm 0,9$
V12-D	$1,5 \pm 0,9$	$3,5 \pm 1,0$	$4,7 \pm 1,1$	$6,5 \pm 1,1$	$9,8 \pm 1,4$	$12,1 \pm 1,6$
V18-D	< 0,8	< 0,8	< 0,8	< 0,8	< 0,8	< 0,8
V20-D	< 0,8	< 0,8	< 0,8	< 0,8	< 0,8	< 0,8
V22-D	< 0,8	< 0,8	< 0,8	< 0,8	< 0,8	$1,3 \pm 0,9$
V24-D	< 0,8	< 0,8	< 0,8	< 0,8	< 0,8	$0,9 \pm 0,9$

Obr. 293 Hodnoty R_d seleničitanu na horninových vzorcích z potenciálních lokalit, vlevo: frakce C (0,63–0,125 mm), vpravo: frakce D (0,8–0,63 mm), $c(\text{Se}) = 2 \cdot 10^{-5} \text{ mol l}^{-1}$

Uran

Výsledné hodnoty R_d uranu na studovaných vzorcích jsou uvedeny na Obr. 294, Tab. 128 a Tab. 129. Z Obr. 294 je patrné, že sorpce uranu na zkoumané horniny byla minimální bez ohledu na rozdíly v mineralogickém složení jednotlivých hornin. Z tohoto důvodu nejsou v Tab. 128 a Tab. 129 uvedeny výsledky rozdělovacího distribučního koeficientu R_d , jelikož jeho hodnota byla nižší jak nejistota měření (pro $R_d \sim 0 \text{ ml g}^{-1}$ je $U_{R_d} < 1,6 \text{ ml g}^{-1}$) a není tak možné dostatečně prokázat sorpci na daný materiál.

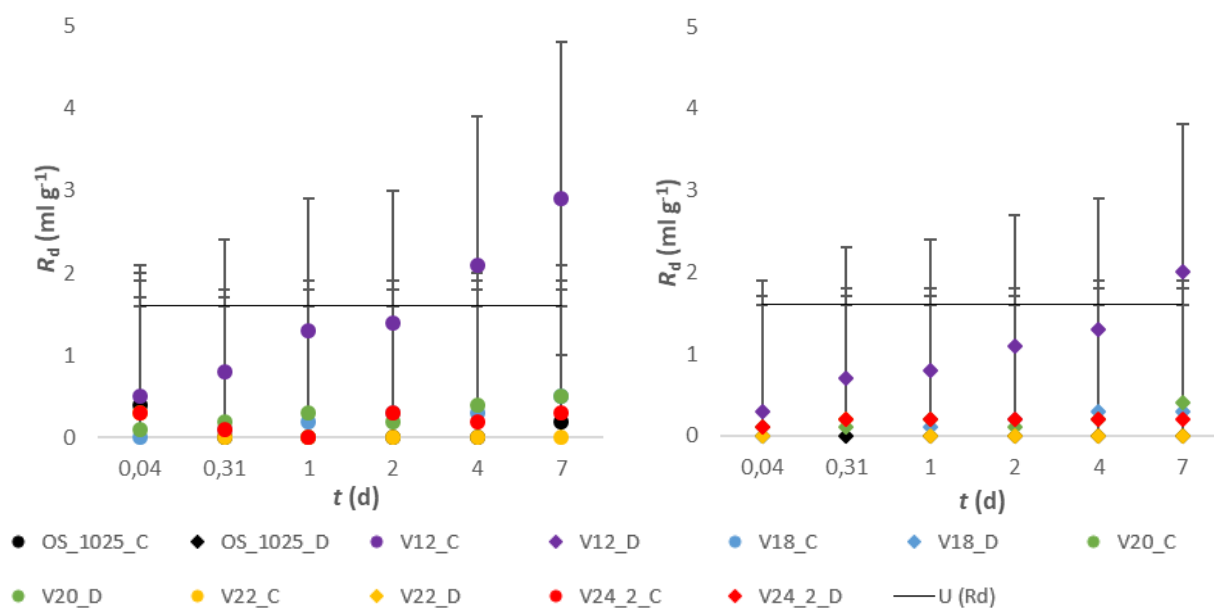
Pouze v jednom případě byla zaznamenána zvýšená hodnota R_d v porovnání s ostatními získanými výsledky. Stejně jako v případě sorpce seleničnanu, byla pozorována vyšší hodnota R_d ($R_d < 3 \text{ ml g}^{-1}$) na vzorku V12 z 12. patra, který se od ostatních lišil obsahem sulfidů, pyritu ($\sim 5,5 \text{ hm. \%}$), pyrotinu ($\sim 2 \text{ hm. \%}$) a nižším obsahem biotitu ($< 11 \text{ hm. \%}$).

Tab. 128 Hodnoty R_d U(VI) včetně jejich rozšířených standardních nejistot na frakcích C horninových vzorků, $c(U) = 2,6 \cdot 10^{-4} \text{ mol l}^{-1}$, frakce C: 0,63–0,125 mm

Horninový vzorek	Doba sorpce (dny)					
	0,04	0,31	1	2	4	7
OS_1025-C	<1,6	<1,6	<1,6	<1,6	<1,6	<1,6
V12-C	<1,6	<1,6	<1,6	<1,6	$2,0 \pm 1,8$	$2,9 \pm 1,9$
V18-C	<1,6	<1,6	<1,6	<1,6	<1,6	<1,6
V20-C	<1,6	<1,6	<1,6	<1,6	<1,6	<1,6
V22-C	<1,6	<1,6	<1,6	<1,6	<1,6	<1,6
V24-C	<1,6	<1,6	<1,6	<1,6	<1,6	<1,6

Tab. 129 Hodnoty R_d U(VI) včetně jejich rozšířených standardních nejistot na frakcích D horninových vzorků, $c(U) = 2,6 \cdot 10^{-4} \text{ mol l}^{-1}$, frakce D: 0,8–0,63 mm

Horninový vzorek	Doba sorpce (dny)					
	0,04	0,31	1	2	4	7
OS_1025-D	<1,6	<1,6	<1,6	<1,6	<1,6	<1,6
V12-D	<1,6	<1,6	<1,6	<1,6	<1,6	$2,0 \pm 1,8$
V18-D	<1,6	<1,6	<1,6	<1,6	<1,6	<1,6
V20-D	<1,6	<1,6	<1,6	<1,6	<1,6	<1,6
V22-D	<1,6	<1,6	<1,6	<1,6	<1,6	<1,6
V24-D	<1,6	<1,6	<1,6	<1,6	<1,6	<1,6



Obr. 294 Hodnoty R_d uranu na horninových vzorcích z potenciálních lokalit, vlevo: frakce C (0,63–0,125 mm), vpravo: frakce D (0,8–0,63 mm), $c(U) = 2,6 \cdot 10^{-4} \text{ mol l}^{-1}$

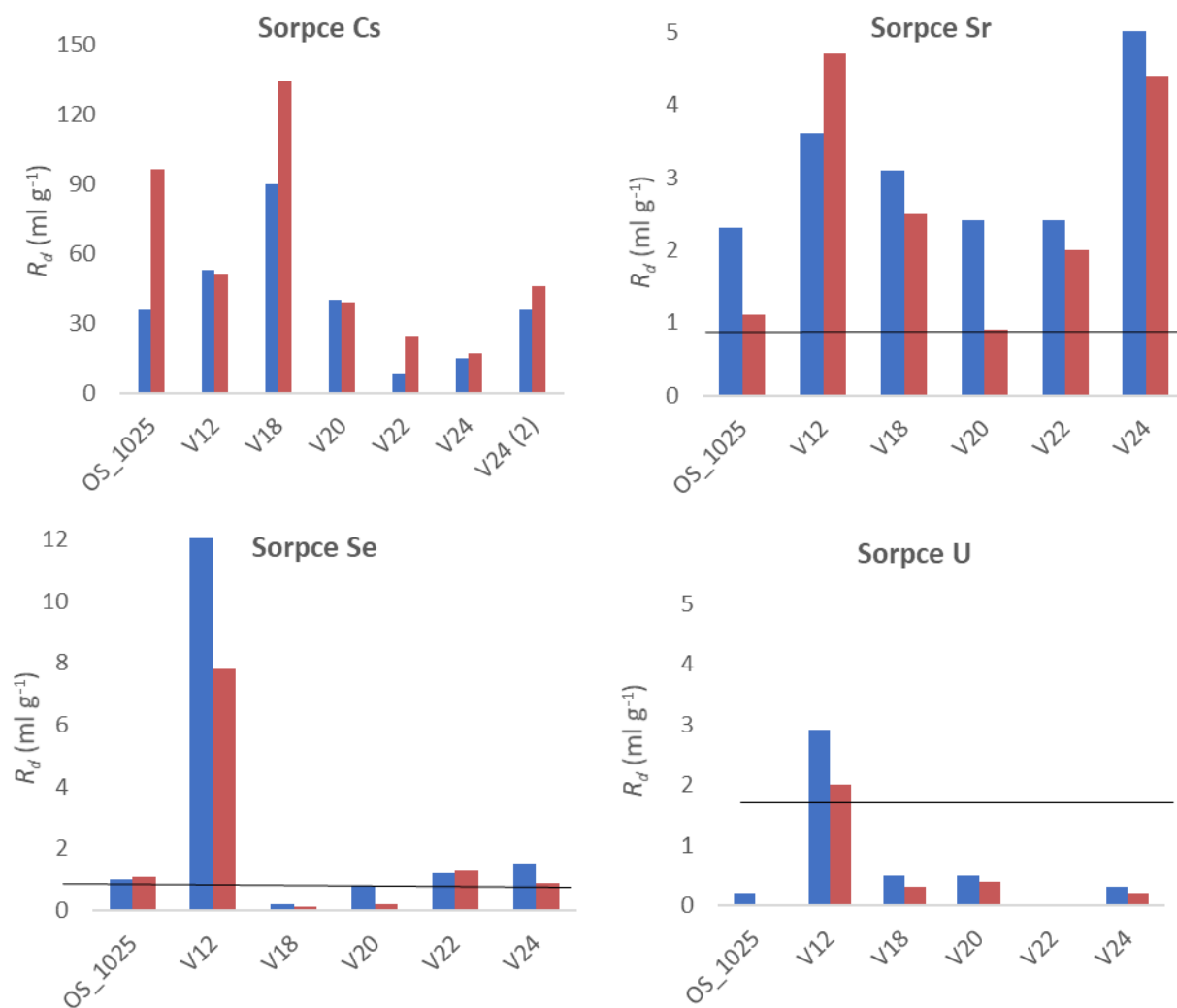
2.3.6.3.4 Shrnutí výsledků

V Tab. 130 jsou shrnuty výsledky sorpčních experimentů na vybraných horninových materiálech o dvou frakcích z lokality Rožná. Práce byla zaměřena na studium sorpce Cs(I), Sr(II), Se(IV) a U(VI). Z odlišnosti výsledků rozdělovacího distribučního koeficientu R_d mezi jednotlivými speciemi lze usoudit, že se sorpce mezi jednotlivými radionuklidy výrazně liší. Na horninový materiál se silně sorbuje cesium. Sorpce stroncia naopak vykazuje mírný sorbujičící charakter. Seleničitan a uran U(VI) lze zařadit mezi nesorbující se radionuklidy, jelikož až na výjimky (horninový vzorek V12) nedocházelo k výrazné sorpci na materiál.

Významný vliv na chování radionuklidů a míry jejich sorpce má mineralogické složení horninových vzorků. Radionuklidy zastupující kationty, jako Cs(I) a Sr(II), se sorbují na vrstevnaté minerály (např. slídy). Radionuklidy v aniontové formě, např. selen a uran, se převážně nesorbují. Pokud se v hornině vyskytují Fe-minerály a komplexy vybraných kationtů, dochází k sorpci i těchto aniontů.

Tab. 130 Výsledné hodnoty R_d vybraných radionuklidů na frakcích C a D horninových vzorků z potenciálních lokalit, poměr fází 1:10, 7 dní, frakce C: 0,63–0,125 mm, frakce D: 0,8–0,63 mm

Vzorek	Cs		Sr		Se		U	
	Frakce C	Frakce D	Frakce C	Frakce D	Frakce C	Frakce D	Frakce C	Frakce D
OS_1025	35,6 ± 4,2	96,3 ± 9,1	2,3 ± 0,9	1,1 ± 0,9	1,0 ± 0,9	1,1 ± 0,9	<1,6	<1,6
V12	52,7 ± 4,7	51,4 ± 4,6	3,6 ± 0,9	4,7 ± 1,0	7,8 ± 1,3	12,1 ± 1,6	2,9 ± 1,9	2,0 ± 1,8
V18	89,5 ± 6,3	134,3 ±	3,1 ± 1,0	2,5 ± 0,9	< 0,8	< 0,8	<1,6	<1,6
V20	40,1 ± 6,2	38,8 ± 3,6	2,4 ± 0,9	0,9 ± 0,9	0,8 ± 0,9	< 0,8	<1,6	<1,6
V22	8,6 ± 1,5	24,3 ± 2,6	2,4 ± 0,9	2,0 ± 0,9	1,2 ± 0,9	1,3 ± 0,9	<1,6	<1,6
V24 (1)	14,7 ± 1,8	16,8 ± 1,9	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
V24 (2)	35,8 ± 3,5	45,6 ± 4,5	5,7 ± 1,1	4,4 ± 1,0	1,5 ± 0,9	0,9 ± 0,9	<1,6	<1,6



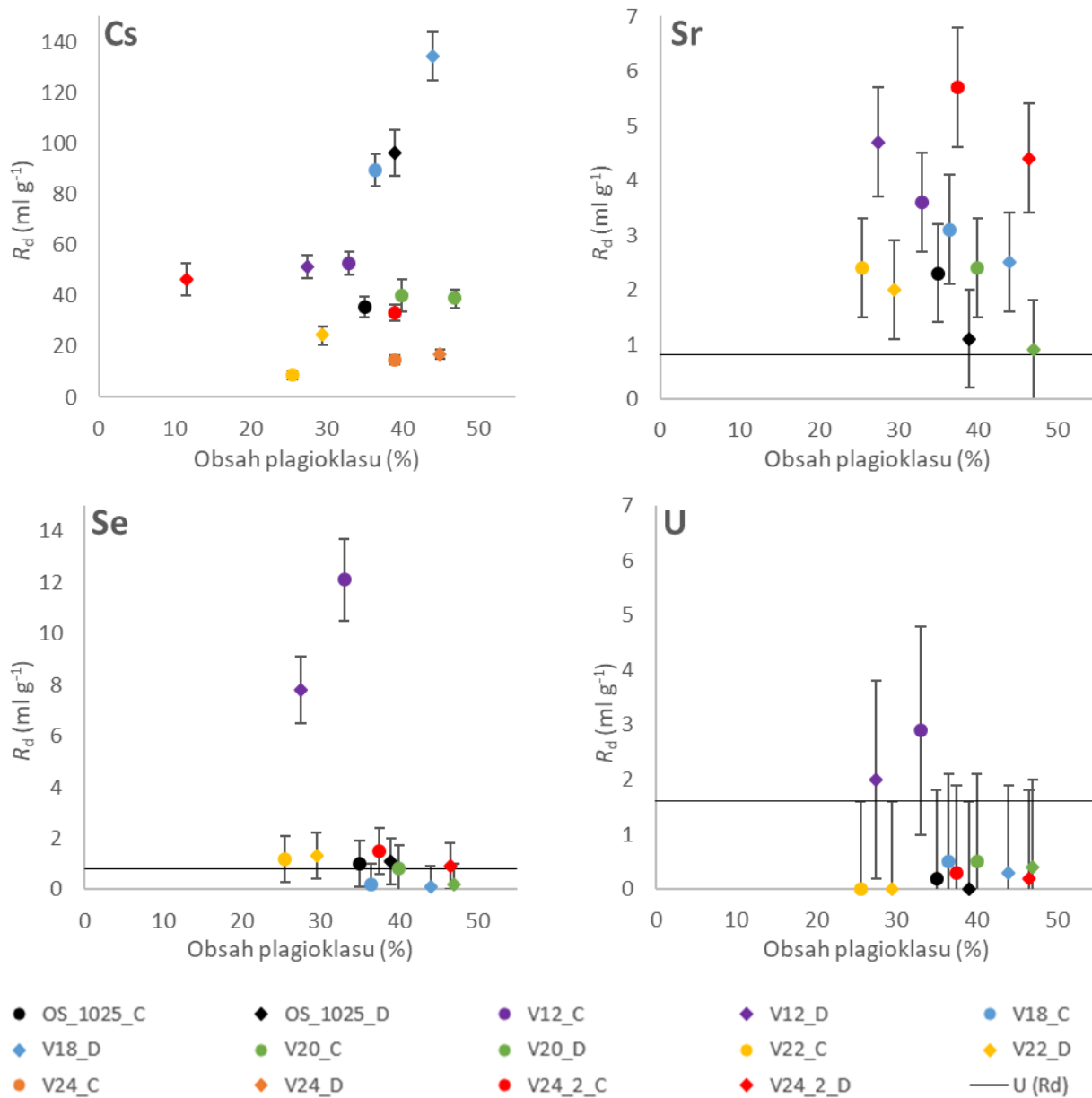
Obr. 295 Sorpce vybraných radionuklidů na horninové vzorky, ■ frakce C: 0,63–0,125 mm, ■ frakce D: 0,8–0,63 mm

Na základě předešlých znalostí se mezi potenciální sorbenty vybraných radionuklidů řadí fylosilikáty (slídy) a inosilikáty (amfiboly; viz Tab. 131). Odborná literatura také zmiňuje významný vliv plagioklasu na průběh sorpce radionuklidů (Muuri et al. 2016; Ebong a Evans 2011; Stumpf et al. 2006; Ticknor et al. 1989; Andersson a Allard 1983). Plagioklas se řadí mezi tektosilikáty, které mají ve své krystalografické struktuře tetraedry (SiO_4)⁴⁻, u kterých může docházet ke vzniku záporného náboje možnou izomorfní substitucí křemíku Si(IV) za hliník Al(III). Tento záporný náboj je následně kompenzován přítomnými kationty. To vede k předpokladu záchytu kladně nabitých radionuklidů na záporně nabitý povrch plagioklasu vlivem elektrostatických sil (Muuri et al. 2016).

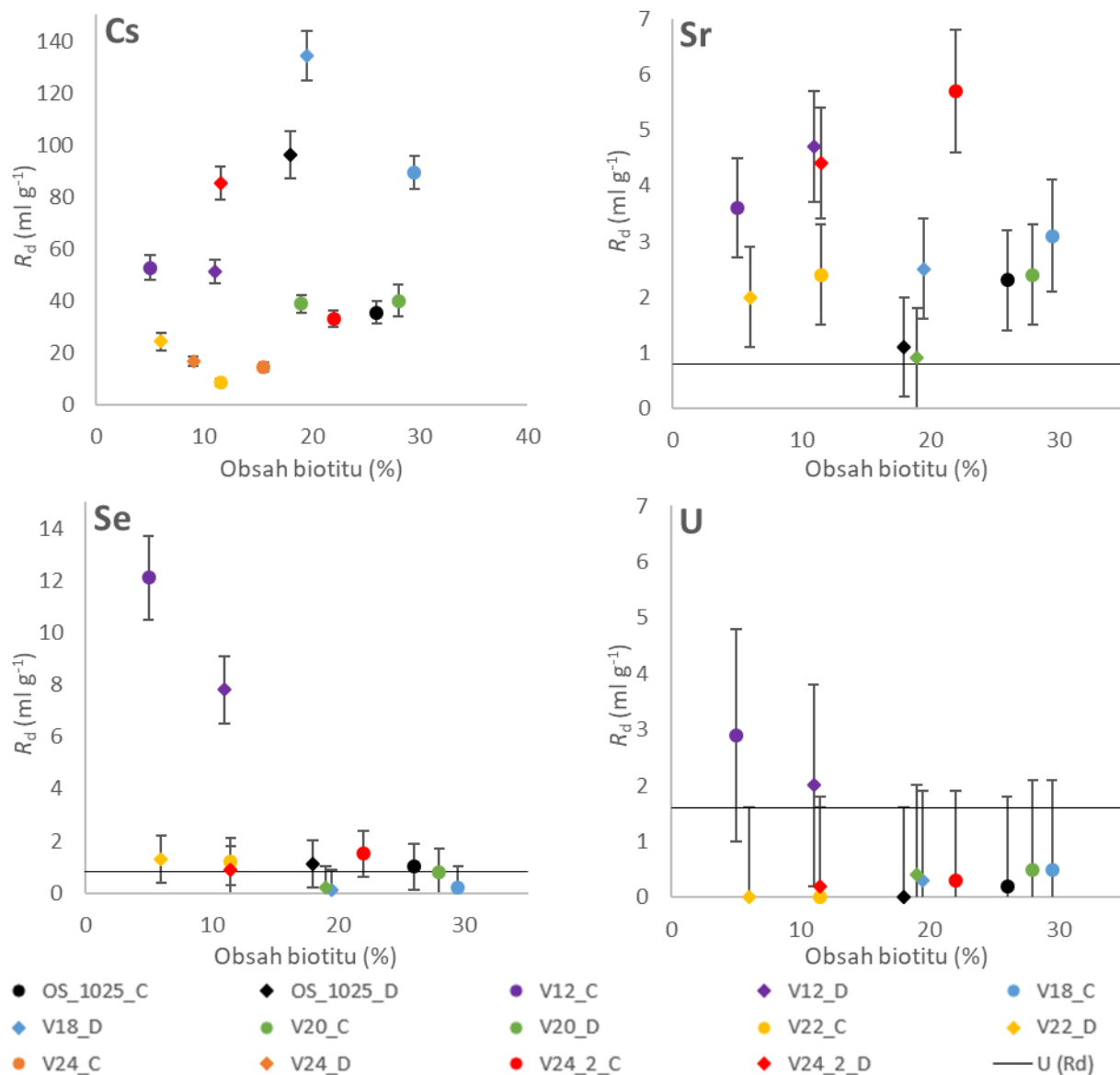
Vliv plagioklasu na průběh sorpce vybraných radionuklidů lze vidět na Obr. 296. V případě kationtových radionuklidů (cesium a stroncium) je možné sledovat nárůst hodnot R_d s rostoucím obsahem plagioklasu ve vzorcích. Je patrný minimální vliv plagioklasu na záchyt selenu a uranylu (Ticknor et al. 1989), které jsou v experimentálním roztoku záporně nabité.

Tab. 131 Porovnání relativní sorpčních kapacit minerálů obsažených v granitických horninách (Ticknor et al. 1989)

Radionuklid	Relativní sorpční kapacita
¹³⁷ Cs	Hornblend ~ biotit ~ kaolinit ~ laumontit >> aktinolit ~ epidot ~ plagioklas ~ křemen
⁷⁵ Se	Chlorit ~ serpentín > ortopyroxen > olivín >> plagioklas
⁸⁵ Sr	Hornblend ~ biotit = kaolinit ~ laumontit ~ epidote > aktinolit >> plagioklas ~ křemen



Obr. 296 Závislost hodnot R_d radionuklidů na obsahu plagioklasu v horninových vzorcích u studovaných radionuklidů: graf Cs – frakce C a D; graf Sr – frakce C; graf Se – frakce C; graf U – frakce C. Frakce C: 0,63–0,125 mm, frakce D: 0,8–0,63 mm



Obr. 297 Závislost hodnot R_d radionuklidů na obsahu biotitu v horninových vzorcích u studovaných radionuklidů: graf Cs – frakce C a D; graf Sr – frakce C; graf Se – frakce C; graf U – frakce C. Frakce C: 0,63–0,125 mm, frakce D: 0,8–0,63 mm

2.3.6.4 Difúzní experimenty tritia (HTO), chloridu (^{36}Cl) a jodidu (^{125}I) na patrových horizontech

Metodika

Stanovení difúzního koeficientu pro nesorbující se či slabě se sorbující stopovače (^3H ve formě tritiované vody, ^{36}Cl ve formě chloridu, ^{125}I ve formě jodidu) za rovnovážného stavu systému se obvykle uskutečňuje v tzv. průnikových difúzních experimentech (*through diffusion*, tzn. vstupní rezervoár – vzorek horniny – výstupní rezervoár). K popisu difundující látky (stopovač, kontaminant) skrze pórový materiál se užívá Fickových zákonů, které jsou zmíněny dále v této sekci. Geometrické vlastnosti transportních pórů, retardační procesy kontaminantů v pórovém prostředí a typické uspořádání difúzních cel pro průnikové experimenty bylo komentováno v dřívějších zprávách SÚRAO, viz Bukovská a Verner eds. (2017), Havlová et al. (2018), nebo ve zprávách SKB, např. Skagius a Neretnieks (1986).

Metodika difúzních experimentů v ÚJV Řež, a. s., vychází z pracovního postupu PP 213.04. Difúzní cely používané v odd. Chemie palivového cyklu, byly inspirovány designem Helsinské univerzity. Difúzní cely je vyrobena z polymetylmakrylátu (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 vstupním rezervoáru, druhá strana vzorku s nezačleněným roztokem ve výstupním rezervoáru (obvykle syntetická podzemní voda o daném složení). Pro tento typ cely má vzorek krystalické horniny tvar disku o průměru 42–50 mm a tloušťce 8–10 mm. Objem vstupních rezervoárů je 160–165 ml. Z důvodů nízkých difuzivit horninových vzorků mají výstupní rezervoáry nižší objem (55–59 ml).

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 vstupního rezervoáru, který je cca třikrát větší než rezervoár výstupní, a celkově malému množství prodifundovaného stopovače, není ve většině případů pokles aktivity ve vstupním rezervoáru zaznamenatelný a lze ho tedy pro analytické řešení difúzních rovnic (včetně *time-lag* metody) považovat za konstantní zdroj, viz níže. Ve výstupním rezervoáru je v průběhu experimentu sledován nárůst koncentrace stopovače. V pravidelných intervalech (7–21 dnů) jsou z obou nádrží odebírány vzorky roztoku a měřeny dle typu stopovače. Na základě nárůstu aktivity stopovače ve výstupním rezervoáru je následně vyhodnocena průniková křivka a vypočítán difúzní koeficient.

Vyhodnocení

Vyhodnocení výsledků bylo provedeno fitováním celkové prodifundované aktivity (resp. látkového množství) v závislosti na čase t (s) pomocí analytického řešení 2. Fickova zákona:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{D_e}{\alpha} \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \right), \quad (30)$$

kde C (mol m^{-3} nebo Bq m^{-3}) je koncentrace nebo objemová aktivita v pórové vodě, D_e ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$) je efektivní difúzní koeficient a α je kapacitní faktor horniny, definovaný jako:

$$\alpha = \varepsilon + \rho_d \cdot K_d, \quad (31)$$

s porozitou ε (–), objemovou hmotností ρ_d (kg m^{-3}) a rovnovážným distribučním koeficientem K_d ($\text{m}^3 \text{kg}^{-1}$).

Pro nesorbující specii je kapacitní faktor roven transportní porozitě. Počáteční a okrajové podmínky jsou dány následovně:

- $C(x, t) = 0$ $t = 0;$ $x \neq 0,$
- $C(x, t) = C_0$ $x = 0;$ $t \geq 0,$
- $C(L, t) = 0$ $x = L;$ $t > 0,$

kde L (m) je tloušťka vzorku a C_0 (mol m^{-3} nebo Bq m^{-3}) je (počáteční) koncentrace (nebo aktivitní koncentrace) ve vstupním rezervoáru.

Analytické řešení průnikového difúzního experimentu je dáno řešením rovnice (30) s počátečními a okrajovými podmínkami danými výše a za předpokladu, že tok stopovače J ($\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ nebo $\text{Bq m}^{-2} \text{s}^{-1}$) ve výstupním rezervoáru na konci vzorku ($x = L$) je dán vztahem:

$$J(L, t) = -D_e \cdot \left. \frac{\partial C}{\partial x} \right|_{x=L}. \quad (32)$$

Výpočet efektivního difúzního koeficientu a porozity je pak dán analytickým řešením (Crank 1975; Jakob 2004):

$$Q(t) = S \cdot L \cdot C_0 \cdot \left[\frac{D_e \cdot t}{L^2} - \frac{\alpha}{6} - \frac{2\alpha}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{n^2} \cdot \exp\left(-\frac{D_e \cdot n^2 \cdot \pi^2 \cdot t}{L^2 \cdot \alpha}\right) \right], \quad (33)$$

kde $Q(t)$ (mol nebo Bq) je prodifundované látkové množství (nebo aktivita) v čase t skrz vzorek o tloušťce L a ploše S , C_0 je vstupní koncentrace (nebo objemová aktivita sledované látky, která je během experimentu udržována konstantní).

Pakliže difúzní tok dojde do ustáleného stavu ($t \rightarrow \infty$), potom je řešení rovnice redukováno do tvaru:

$$\frac{Q(t)}{S \cdot C_0} = \frac{D_e \cdot t}{L} - \frac{\alpha \cdot L}{6} \quad (34)$$

kde lze difúzní koeficient D_e určit ze směrnice závislosti $Q(t)/(S \cdot C_0)$ na čase a z úseku kapacitní faktor α . Tento způsob vyhodnocení se nazývá metoda *time-lag*. Podrobnější popis vyhodnocování průnikových difúzních experimentů a limity vyhodnocovacích metod je možné najít v Červinka et al. (2015) nebo Van Loon et al. (2003).

Tyto metody vyhodnocení dat se běžně používají i v případech, kdy nejsou striktně dodrženy výše zmíněné okrajové podmínky. Obecně jsou pro použití těchto metod přijímány podmínky, kdy vstupní koncentrace C_0 by neměla klesnout pod hodnotu 95 % z počáteční koncentrace C_0 ($t=0$, $x=0$) a do cílového rezervoáru by nemělo prodifundovat více než 5 % z počáteční zdrojové koncentrace García-Gutiérrez et al. (2004). Tyto podmínky byly téměř u všech prováděných experimentů splněny (maximální pokles na zdroji byl 7 % oproti počáteční koncentraci). Občasné nesystematické odchylky naměřených hodnot lze přisuzovat nepřesnostem ve stanovení aktivity v roztocích.

Hledání optimálních hodnot D_e a α bylo provedeno fitováním experimentálních dat na model analytického řešení (33) metodou nejmenších čtverců. Pro zjednodušení fitování byla porozita ε nastavena na konstantní hodnotu podél difúzní dráhy, jak byla stanovena metodou postupného osychání (viz kapitola 2.3.6.1.2) a jediným neznámým (fitovaným) parametrem tak zůstává efektivní difúzní koeficient D_e . Dalšími jednoduchými úpravami (viz níže) jsme schopni dopočítat ostatní parametry (geometrický faktor G (-), formační faktor hornin F_f (-)) při znalosti tabulkových hodnot referenčních difuzivit D_w ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$) pro nekonečné zředění ($D_w = 2,44 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ pro HTO, $D_w = 2,30 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ pro jodid a $D_w = 2,03 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ pro chlorid).

$$D_e = \varepsilon \cdot D_p = \varepsilon \cdot D_w \cdot G = F_f \cdot D_w \quad (35)$$

Vlastnosti použitých vzorků

Difúzní experimenty byly provedeny na vzorcích z dolu Rožná z 12. (vzorky V12_K a V12_P a vzorky na studium EDZ BGS12_0,53/0,70/1,66/3,12/6,05 – viz sekce 2.4.7.6.1), 18. (vzorky V18_K19 a V18_P20), 20. (V20/1_K a V20/1_P), 22. (V22_K a V22_P), 24. patra (EDZ vzorky BGS24_1,12/1,90/2,68 – viz sekce 2.4.7.6.1) a z odvodňovací štoly (OS1_P, OS2_K). Souhrnný seznam použitých vzorků, včetně jejich rozměrů, je shrnut v Tab. 132 (pro vzorky EDZ Tab. 189) a vychází ze seznamu použitých vzorků viz Elektronická příloha 35 a Elektronická příloha 36. U vzorků BGS24_1,90_3 a 4, jež nebyly využity pro difúzní experimenty, byly pozorovány velké praskliny, proto nelze vyloučit na užitých sousedních vzorcích BGS24_1,90_1 a 2 výskyt mikroprasklin.

Tab. 132 Seznam užitých vzorků s rozměry pro difúzní experimenty

Označení vzorku	V12_K21_4	V12_K21_7	V12_P19_2	V12_P19_3	V18_P20_2	V18_P20_4	V18_K19_3	V18_K19_4
Tloušťka L (mm)	10,6	11,2	10,9	10,9	9,9	10,3	10,0	10,1
Průměr d (mm)	48,4	48,4	48,4	48,4	48,6	48,6	48,3	48,3
Označení vzorku	V18_K19_5	V18_K19_7	V20/1_K1	V20/1_K2	V20/1_P2	V20/1_P3	V22_K3	V22_K4
Tloušťka L (mm)	10,3	10,4	10,0	9,8	9,8	10,0	10,4	10,3
Průměr d (mm)	48,3	48,3	48,9	48,9	48,9	49,1	49,1	49,1
Označení vzorku	V22_P5	V22_P6	OS1_P_2	OS1_P_4	OS2_K_3	OS2_K_4		
Tloušťka L (mm)	10,5	10,4	10,4	10,4	10,0	9,9		
Průměr d (mm)	49,2	49,2	50,4	50,4	50,4	50,4		

Pro všechny difúzní experimenty byla použita syntetická granitická voda SGW2 (Červinka a Gondolli 2016). Průměrné chemické složení syntetické granitické vody SGW2 je uvedeno v kapitole 2.3.6.3.2.

Vlastnosti použitých roztoků

Za účelem sledování transportního chování vzorků byly pro difúzní experimenty na horninových vzorcích z lokalit použity dva typy zdrojových roztoků v syntetické granitické vodě SGW2 označených stopovači:

- 1) Směs stopovačů ^3H a ^{36}Cl , kdy přibližná aktivita stopovače ^3H ($T_{1/2} = 12,32$ let) byla 4 kBq ml^{-1} a stopovače ^{36}Cl ($T_{1/2} = 301\,300$ let) přibližně $2,5 \text{ kBq ml}^{-1}$ s nosičovým preparátem ve formě NaCl (o koncentraci přibližně $0,016 \text{ mol l}^{-1}$), s detekcí β^- přeměn kapalinovým scintilačním počítačem na přístroji Hidex 300 SL (Hidex Oy).
- 2) Nejprve roztok se samotným stopovačem ^3H , následně byl zdrojový roztok nahrazen roztokem se stopovačem ^{125}I ve formě NaI ($T_{1/2} = 59,4$ dne) o přibližné aktivitě $1,1\text{--}2,0 \text{ kBq ml}^{-1}$ s detekcí emitovaných fotonů pocházejících z elektronového záchytu na detektoru NaI aktivovaným thaliem na přístroji 2480 WIZARD 2“ (PerkinElmer). Do roztoku SGW2 byl přidán nosič CaI_2 o koncentraci $5 \cdot 10^{-6} \text{ mol l}^{-1}$ (výsledná koncentrace jodidu byla $10^{-5} \text{ mol l}^{-1}$) a roztok $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ pro eliminaci oxidace jodidu.

Výsledky a vyhodnocení

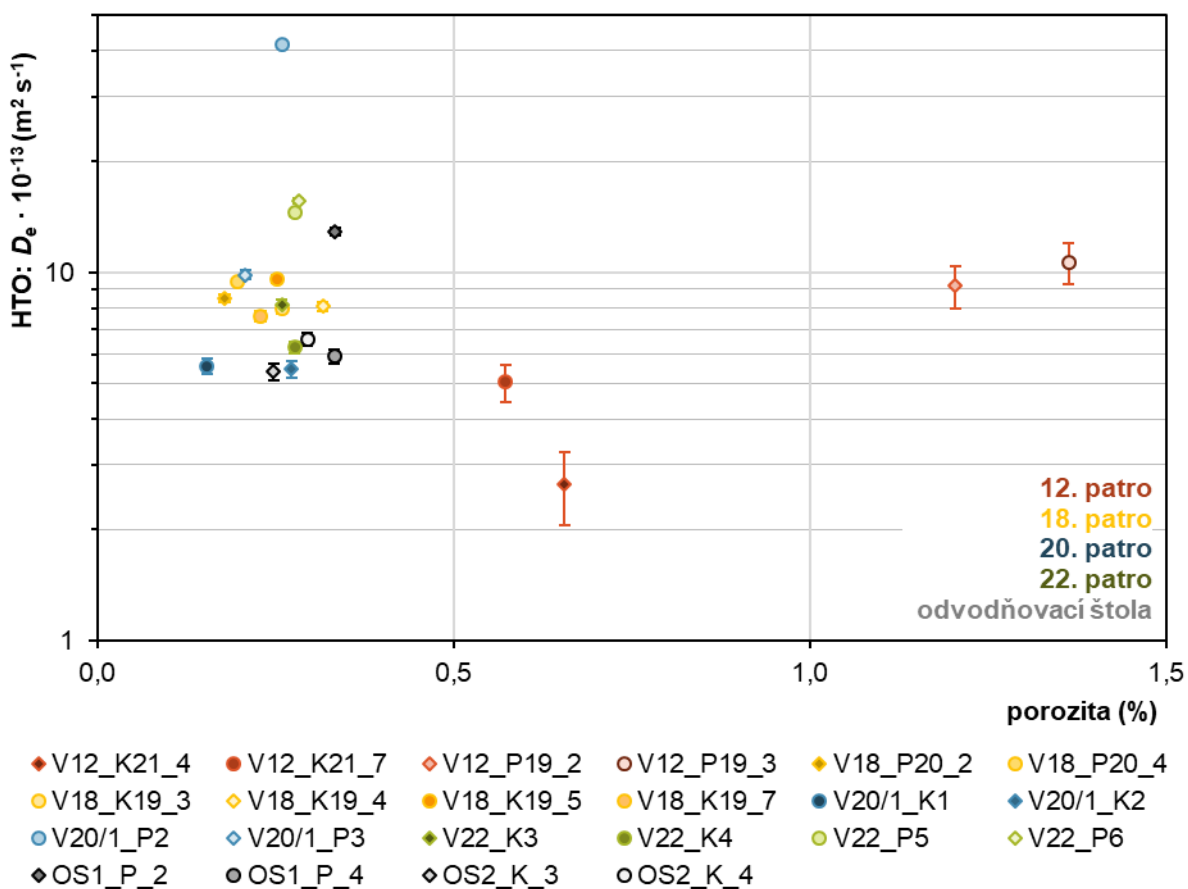
Hodnoty efektivních difúzních koeficientů pro vzorky jsou uvedeny podle patrových horizontů s příslušnou nejistotou na hladině významnosti 0,05 (tj. $1,96 \sigma$). Na tomto místě je třeba podotknout, že měřený signál objemové aktivity ve výstupních rezervoárech se u některých difúzních experimentů i po delší době trvání experimentu pohyboval pouze lehce nad hodnotami limitu detekce s přijatelně dosažitelnou nejistotou měření (tj. tří až čtyřnásobek měřeného pozadí). Proto je lepší uvažovat veškeré výsledky efektivních difúzních koeficientů nižších než $2 \cdot 10^{-13} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ za pouhý odhad, resp. jako nižší nebo rovny $2 \cdot 10^{-13} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$. V případě některých experimentů s jodidem dokonce docházelo k paradoxní situaci, kdy po 60 dnech (tj. uplynutí jednoho poločasu radioaktivní přeměny jodidu ^{125}I) více stopovače podleho radioaktivní přeměně, než prošlo nově skrz a vedení takového experimentu nadále nedávalo smysl i z důvodu nízkého měřeného signálu. Velmi nízké hodnoty D_e u jodidu mohou být tak více zkreslené. Souhrnné výsledky včetně vyhodnocení jsou součástí Elektronická příloha 37.

Tab. 133 Vyhodnocení efektivních difúzních koeficientů pro vzorky z patrových horizontů (OS, V12, V18, V20, V22) – pokračování na další straně

Označení vzorku	ε	$D_e (^3\text{H})$	$D_e (^{36}\text{Cl})$	$D_e (^{125}\text{I})$	Poměr D_e aniont/ ^3H	Vyhodnocení
	%	$\cdot 10^{-13} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$	$\cdot 10^{-13} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$	$\cdot 10^{-13} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$		
V12_K21_4	0,66	$2,7 \pm 0,6$	$0,6 \pm 0,4$	-	$0,24 \pm 0,16$	analytické řeš.
		$3,0 \pm 0,2$	$0,4 \pm 0,1$	-	$0,14 \pm 0,02$	<i>time-lag</i>
V12_K21_7	0,57	$5,0 \pm 0,6$	-	$1,6 \pm 0,6$	$0,31 \pm 0,13$	analytické řeš.
		$4,3 \pm 0,6$	-	$1,6 \pm 0,2$	$0,37 \pm 0,07$	<i>time-lag</i>
V12_P19_2	1,20	$9,2 \pm 1,2$	$4,4 \pm 1,2$	-	$0,48 \pm 0,15$	analytické řeš.
		$9,6 \pm 0,6$	$3,4 \pm 0,3$	-	$0,35 \pm 0,04$	<i>time-lag</i>
V12_P19_3	1,36	$11,7 \pm 1,3$	-	$3,1 \pm 1,2$	$0,29 \pm 0,12$	analytické řeš.
		$9,8 \pm 2,3$	-	$2,4 \pm 0,5$	$0,24 \pm 0,07$	<i>time-lag</i>
V18_P20_2	0,18	$8,5 \pm 0,2$	-	$6,1 \pm 0,3$	$0,72 \pm 0,04$	analytické řeš.
		$7,7 \pm 1,1$	-	$6,6 \pm 0,3$	$0,86 \pm 0,13$	<i>time-lag</i>
V18_P20_4	0,20	$9,4 \pm 0,2$	-	$6,5 \pm 0,3$	$0,69 \pm 0,04$	analytické řeš.
		$9,1 \pm 0,7$	-	$6,6 \pm 0,3$	$0,72 \pm 0,06$	<i>time-lag</i>
V18_K19_3	0,26	$8,0 \pm 0,2$	$5,6 \pm 0,2$	-	$0,71 \pm 0,03$	analytické řeš.
		$8,0 \pm 0,9$	$5,4 \pm 0,4$	-	$0,67 \pm 0,09$	<i>time-lag</i>
V18_K19_4	0,32	$8,1 \pm 0,2$	-	$5,2 \pm 0,3$	$0,65 \pm 0,04$	analytické řeš.
		$7,1 \pm 1,2$	-	$3,5 \pm 0,2$	$0,50 \pm 0,09$	<i>time-lag</i>
V18_K19_5	0,25	$9,6 \pm 0,2$	-	$5,3 \pm 0,3$	$0,55 \pm 0,04$	analytické řeš.
		$9,1 \pm 1,0$	-	$4,5 \pm 0,5$	$0,50 \pm 0,07$	<i>time-lag</i>
V18_K19_7	0,23	$7,6 \pm 0,2$	$4,8 \pm 0,2$	-	$0,63 \pm 0,04$	analytické řeš.
		$7,6 \pm 0,9$	$4,8 \pm 0,5$	-	$0,63 \pm 0,10$	<i>time-lag</i>
V20/1_K1	0,15	$5,6 \pm 0,3$	-	$1,6 \pm 0,2$	$0,28 \pm 0,05$	analytické řeš.
		$5,0 \pm 0,3$	-	$1,7 \pm 0,1$	$0,34 \pm 0,03$	<i>time-lag</i>
V20/1_K2	0,27	$5,5 \pm 0,3$	$2,9 \pm 0,3$	-	$0,53 \pm 0,06$	analytické řeš.
		$5,5 \pm 0,2$	$2,7 \pm 0,2$	-	$0,49 \pm 0,04$	<i>time-lag</i>
V20/1_P2	0,26	$41,8 \pm 0,6$	-	$23,5 \pm 0,5$	$0,53 \pm 0,01$	analytické řeš.
		$38,4 \pm 2,2$	-	$22,6 \pm 0,7$	$0,59 \pm 0,04$	<i>time-lag</i>
		$9,9 \pm 0,3$	$5,8 \pm 0,3$	-	$0,59 \pm 0,03$	analytické řeš.

Označení vzorku	ε	D_e (^3H)	D_e (^{36}Cl)	D_e (^{125}I)	Poměr D_e	Vyhodnocení
	%	$\cdot 10^{-13} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$	$\cdot 10^{-13} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$	$\cdot 10^{-13} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$	aniont/ ^3H	
V20/1_P3	0,21	10,6 ± 2,4	5,6 ± 0,7	-	0,53 ± 0,13	<i>time-lag</i>
V22_K3	0,26	8,1 ± 0,3	4,5 ± 0,3	-	0,55 ± 0,04	analytické řeš.
		7,7 ± 0,4	4,5 ± 0,1	-	0,58 ± 0,03	<i>time-lag</i>
V22_K4	0,28	6,3 ± 0,2	-	3,1 ± 0,3	0,50 ± 0,05	analytické řeš.
		6,0 ± 0,6	-	3,1 ± 0,3	0,51 ± 0,07	<i>time-lag</i>
V22_P5	0,28	14,5 ± 0,3	-	8,4 ± 0,3	0,58 ± 0,03	analytické řeš.
		13,1 ± 0,9	-	8,1 ± 0,4	0,62 ± 0,05	<i>time-lag</i>
V22_P6	0,28	15,6 ± 0,3	10,0 ± 0,3	-	0,64 ± 0,02	analytické řeš.
		14,1 ± 0,3	9,2 ± 0,3	-	0,65 ± 0,02	<i>time-lag</i>
OS1_P_2	0,33	12,9 ± 0,3	9,8 ± 0,3	-	0,76 ± 0,03	analytické řeš.
		10,9 ± 2,4	8,4 ± 0,3	-	0,77 ± 0,07	<i>time-lag</i>
OS1_P_4	0,33	5,9 ± 0,3	-	2,7 ± 0,3	0,46 ± 0,05	analytické řeš.
		4,8 ± 0,5	-	2,7 ± 0,1	0,56 ± 0,06	<i>time-lag</i>
OS2_K_3	0,25	5,4 ± 0,3	3,1 ± 0,3	-	0,57 ± 0,06	analytické řeš.
		6,0 ± 0,9	3,0 ± 0,3	-	0,50 ± 0,09	<i>time-lag</i>
OS2_K_4	0,30	6,6 ± 0,3	-	4,0 ± 0,3	0,61 ± 0,05	analytické řeš.
		6,0 ± 0,4	-	4,0 ± 0,1	0,66 ± 0,05	<i>time-lag</i>

Z výsledků studovaných vzorků z 18. až 22. patra a odvodňovací štoly v Obr. 298 je zřejmé, že z celkové porozity a efektivního difúzního koeficientu tritia D_e (HTO)($\text{m}^2 \text{ s}^{-1}$) nelze vyvozovat jednoduché závěry, tj. že s rostoucí porozitou (konkrétně z 0,15 na 0,33 %) roste lineárně efektivní difúzní koeficient. Z toho vyplývá, že na velikost D_e má velký vliv geometrické uspořádání a tvar pórů, jenž jsou skryty ve formě geometrického faktoru G (-) podle rovnice (35). Charakterizací difúzní trasy pomocí pouhých formačních faktorů F_1 (-) z rovnice (35) by v tomto případě vedla k redukci těchto poznatků o jednotlivých patrových horizontech, a proto již dále nebudou zmíněny.



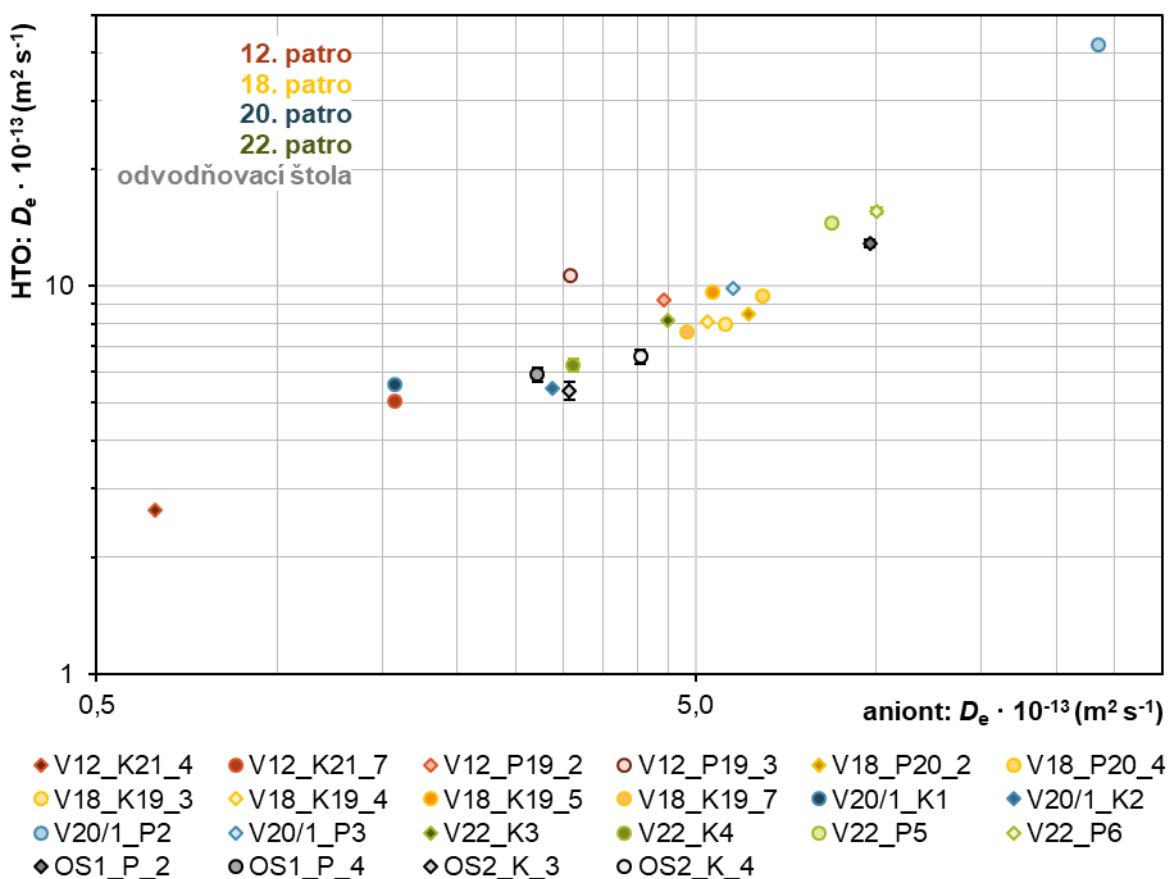
Obr. 298 Hodnoty efektivních difúzních koeficientů (analytické řešení) tritia (3H) v závislosti na porozitě vzorku (stanovené metodou osychání) pro patrové horizonty dolu Rožná a PVP Bukov

Význam geometrického faktoru G se může i výrazně projevit ve směru foliace vzorků při jejich přípravě formou převrtání, paralelně s foliací (viz vzorky „P“) a kolmé k foliaci (viz vzorky „K“). Tyto rozdíly ve směru foliace jsou nejvíce zřejmé na vzorcích z 22. patra, kde při stejné porozitě je D_e u vzorků s paralelně s foliací (V22_P5 a V22_P6) dvakrát tak velké oproti kolmé foliaci (V22_K3 a V22_K4). Vzorek V20/1_P2 z 20 patra je svými výsledky paralelních experimentů, i přes stejné porozity vzorků v patře značně nekonzistentní, jak v případě difúze tritia, tak i difúze jodidu, a proto do tohoto srovnání nebyl uvažován. S výjimkou posledního jmenovaného lze však konstatovat, že v difúzních koeficientech není velký rozdíl a všechny jsou nižší než $2 \cdot 10^{-12} m^2 s^{-1}$.

V případě 12. patra (amfibolity) jsou hodnoty D_e (HTO) podobné s ostatními patry i přes násobně vyšší porozity vzorků (kolmo k foliace až 0,66 %, paralelně s foliaci až 1,36 %). Z toho lze vyvozovat, že amfibolitické horniny mají svou strukturu difúzních pórů více tortuóznější (menší parametry G) než horniny magmatické (zbylé vzorky výše) a pórový difúzní koeficient je tak nižší, viz rovnice (35).

Porovnáním hodnot efektivních difúzních koeficientů HTO a aniontu (chlorid $^{36}Cl^-$ nebo jodid $^{125}I^-$) v Tab. 133 a Obr. 299 je patrná nižší difuzivita aniontů oproti tritiu, což je možné přisuzovat aniontové exkluzi v důsledku odpuzivých elektrostatických sil mezi záporně nabitým aniontovým stopovačem a povrchem transportních pórů horninového vzorku. Přítomností pukliny se tento efekt může zmenšovat a hodnoty poměru D_e (aniont/ 3H) mohou být v extrémním případě větší

než 1, což v žádném z případů nenastalo, nicméně efekt aniontové exkluze byl u některých vzorků výrazně potlačen (např. 18. patro). Porovnáním více amfibolických hornin (12. patro) a běžných migmatitů (18. patro a níže), je vidět významný rozdíl ve velikosti poměru D_e (aniont/ ^3H), což lze vysvětlit jednak typem horniny, ale i výrazně odlišným geometrickým uspořádáním, jak bylo řečeno v případě HTO popsaném výše.



Obr. 299 Hodnoty efektivních difúzních koeficientů (analytické řešení) aniontu (chlorid ^{36}Cl , jodid ^{125}I) vs. tritia (^3H)

2.3.7 Chemické složení pórové vody krystalických hornin

Proudění podzemní vody v krystalických horninách se odehrává především v puklinové síti, případně na zlomových pásmech. Tyto puklinové sítě mívají často odlišné mineralogické složení od zbytku okolní méně propustné horniny. S tím souvisí i odlišné chemické složení podzemní vody hlavních přítoků na zlomových pásmech od pórové vody nacházející se v neporušené hornině. Kromě jiného mineralogického prostředí hraje roli také pomalý pohyb podzemní vody v neporušené hornině, kde se mohou vytvářet geochemické rovnováhy. Zachovat se zde mohou i původní roztoky z předchozích geologických pochodů (např. hydrotermální roztoky, fosilní mořské vody), které se v místech zlomových pásem a okolí již dávno nevyskytují. Z fyzikálního pohledu není pro advektivní tok znalost chemického složení pórové vody tolik důležitá, nicméně pro pomalejší migrační procesy, jako je například difúze, je toto složení pórové vody velmi důležité (především iontová síla roztoku a obsah rozpuštěných látek). Otázka, zda může difúze v horninové matici působit jako retardační faktor pro transport radionuklidů, závisí na přítomnosti vzájemně propojeného systému pórů, který obsahuje roztok, tj. pórovou vodu, kde může dojít k transportu rozpuštěných látek. Kromě toho bude tato voda pórů v průběhu času interagovat s materiály bariéry úložiště (např. bentonit, kontejner), což potenciálně povede ke zhoršení jejich fyzikálních vlastností. Z hlediska posouzení bezpečnosti je proto důležité znát složení pórové vody a její vývoj v nedávné geologické době během posledních tisíců až stovek tisíc let v souladu s očekávanou životností úložiště (Waber et al. 2008).

Kromě oběhu podzemní vody v puklinách mohou být v pórovém prostoru přítomny různé typy fluid. **Celková pórovitost** (total porosity) ε_T - odpovídá objemu horniny, který není vyplněn minerálními zrny. Bývá často definovaná vztahem: $\varepsilon_T = \varepsilon_F + \varepsilon_D + \varepsilon_R$, kde ε_F značí efektivní pórovitost (dominantním typem transportu fluid je zde proudění – definice efektivní pórovitosti předpokládá dostatečný hydraulický gradient, bez jehož existence by efektivní pórovitost spadala do definice difuzivní pórovitosti). ε_D představuje difuzivní pórovitost (převládajícím typem transportu je difúze ve vodou vyplněných pórech) a ε_R představuje reziduální pórovitost (nespojité póry, v nichž žádný transport neprobíhá), v níž se mohou v uzavřených inkluzích vyskytovat i roztoky.

Většinu roztoků obsaženého v pórovém prostoru, tzv. pórová fluida horninové matrice, nelze odebrat pomocí konvenčních technik odběru vzorků podzemní vody. Vzhledem k výše uvedené rozdílné dostupnosti celkového prostoru pórů je pórová voda složena z různých typů roztoků. Patří mezi ně: a) voda v mikrofrakturách, kde není prakticky žádný tok, b) voda v pórovém prostoru horniny, která je přístupná pouze difúzí, c) voda uložená v izolovaných pórech a d) tekutina uzavřená v inkluzích. Pojem pórová voda, jak se zde používá, odkazuje k vodě v propojeném systému pórů, která je dostupná pro transport s dominující difúzní složkou (Waber et al. 2008).

Jen málo je známo o složení pórových vod ve spojené pórovitosti z nízko propustných částí masivu ($T < 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$) podloží. Za stagnujících hydraulických podmínek se předpokládá, že pórové vody v krystalickém horninovém složení mají složení velmi salinní, což bylo potvrzeno například studiemi na poloostrovu Kola v Rusku (NEDRA 1992), v Kanadě a USA (Gascoyne et al. 1996; Grimaud et al. 1990; Couture et al. 1983), a v Německu (Moller et al. 1997). Důležité v tomto aspektu je to, že dochází ke kontinuální výměně mezi pórovou vodou a formační podzemní vodou cirkulující v puklinách. Většina inkluzí minerálních fluid obsahuje zbytky magmatických, metamorfovaných a/nebo hydrotermálních tekutin a jejich složení je často velmi slané, což může mít vliv na složení pórové vody (např. při podrcení horniny). Za předpokladu, že

se taková tekutina uvolní ze svého hostitelského minerálu do propojené porozity, vytvoří se mezi pórovou vodou a vodou v puklinách s advektivním prouděním chemický gradient. Chemický gradient se pak může stát hlavní hnací silou při nízkých Pecletových číslech, tj. dominantní transportním procesem se stane difúze. Taková interakce bude probíhat v obou směrech, dokud bude existovat chemický gradient mezi pórovou vodou a vodou v puklině (Waber et al. 2008).

Je důležité si také připomenout, že složení roztoku v těchto horninách bude dáno i interakcemi mezi minerály horniny a roztokem v pórovém prostoru. Můžeme předpokládat, že některé minerály jsou reaktivnější (zejm. sekundární minerály, jako jsou kaolinit, chlorit) než horninotvorné minerály typu křemen nebo živce. Složení vody v takových pórech, kde nedochází k advektivnímu proudění, by pak mělo odrážet i prostorovou variabilitu minerálního složení (Bath 2011).

Většinu minerálů nelze považovat za „inertní“, protože v jejich struktuře může docházet k izomorfním substitucím, které vedou k částečně negativnímu náboji. Voda v blízkosti částečně negativního povrchu již není vodou volnou. Je nabohacená o kationty, které kompenzují negativní náboj a ochuzená o anionty. To ukazují například difúzní experimenty na horninových materiálech – difúze aniontů je výrazně pomalejší než difúze vody. Pro tento jev se našel termín „aniontová exkluze“. Difúze kationtů horninovými materiály byla zatím studována na pár vzorcích aarského granitu (projekt Long term diffusion Phase I, a III). V těchto experimentech byla při velmi nízké iontové síle podzemní vody pozorována difúze sodíku větší než difúze vody (tento jev bývá označován jako „povrchová difúze“) (Havlová et al. 2018).

Odběr pórové vody běžnými technikami je ale z důvodu velice nízkých hydraulických vodivostí ($T < 10^{-10} \text{m}^2 \text{s}^{-1}$) nerealizovatelný. Nicméně jsou vyvíjeny a testovány inovativní metodiky chemické a izotopové charakterizace pórové vody. Pro získání pórové vody jsou aplikovány dva základní přístupy. Prvním řešením je přímý odběr pórové vody z vrtů, které jsou opatřeny speciálními pakry. Tento postup je ovšem časově velice náročný, a proto se častěji využívají tzv. nepřímé metody charakterizace pórové vody (Waber a Smellie 2008; Smellie et al. 2003).

2.3.7.1 Metody stanovení pórové vody

Jedním z příkladů přímého in-situ vzorkování pórové vody je dlouhodobý experiment uskutečněný v podzemní laboratoři v Äspö (Waber a Smellie, 2008). Ve speciálně zkonstruovaném vrtu umístěném v hloubce 420 m byla po dobu cca 7,5 let odebírána pórová voda ze čtyř hlubkových úrovní. Ve vzorkovaných intervalech byl uměle snížen mrtvý objem instalací výplňového válce z PEAK materiálu. Pakr současně umožňoval kontinuální měření tlakových podmínek. Samotné vrtné práce probíhaly v redukčních podmínkách, aby se zabránilo mikrobiální aktivitě, tak byla veškerá instrumentace spolu s vrtem sterilizována (Smellie et al. 2003).

Z důvodu omezeného množství odebírané pórové vody v in-situ podmínkách není možné provádět úplnou chemickou analýzu a je tedy nutné vybrat prioritní ukazatele. Smellie et al. (2003) ve své práci uvádí seznam ukazatelů, na které se výzkum zaměřil: pH, alkalinita, hlavní kationty (Na, K, Mg, Ca, Fe_{tot} , Si, Li, Sr, Mn, Rb, Y, Cs, Ba, La, Ce, Nd, Th, U) a anionty (F, Cl, Br, SO_4),

Další možností, jak odebrat pórovou vodu z horninové matrice, je její **extrakce z vrtného jádra** v laboratorních podmínkách. Eichinger et al. (2008) ve své práci popisují metodiku odběru vrtného jádra a jeho následnou přípravu pro laboratorní experimenty. Důležitým předpokladem ke správné charakterizaci pórové vody je uchování odebraného horninového vzorku

v saturovaném stavu. K zabránění evaporace vody z povrchu vzorku bylo použito vakuové balení do plastových pytlů ve dvou vrstvách a nakonec překrytí hliníkovou fólií.

Metoda vyluhovací představuje nepřímý destruktivní způsob charakterizace pórové vody. K tomuto účelu je nezbytné horninový materiál nadrtit a rozsítovat na požadované frakce. Během sušícího procesu dochází k vysrážení vysoce rozpustných solí, které byly původně rozpuštěny v pórové vodě. Na výsledné mineralizaci výluhu se však podílí i látky obsažené v minerálních inkluzích a taktéž interakce hornina/voda v průběhu experimentu. V krystalických málo porézních horninách je efekt fluidních inkluzí natolik výrazný, že ani koncentrace konzervativních látek (Cl, Br) obsažených ve výluhu neodpovídá jejich zastoupení v pórové vodě. Nicméně využitelnost této metody v kombinaci s difúzními experimenty popisuje Waber a Smellie (2008).

Nepřímá metoda stanovení chemického a izotopového složení pórové vody pomocí difúzních experimentů v reakčních celách je detailně popsána v literatuře (Smellie et al. 2003; Waber a Smellie 2008; Eichinger et al. 2008). **Difúzní experimenty** se dle Smellie et al. (2003) jeví jako nejslibnější metoda pro stanovení chemických a izotopových konzervativních parametrů i v případě krystalických hornin s nízkým obsahem volné pórové vody. Zastoupení reaktivních složek může být stanoveno pomocí geochemického modelování v případě, že v systému dojde k ustavení rovnovážných podmínek. Na příkladu vývoje koncentrace Cl⁻ v čase je možné demonstrovat dosažení rovnovážného stavu po uplynutí 70 dní od začátku experimentu. Pro následné srovnávání chemického složení s in-situ pórovou vodou z vrtu je nezbytné, aby odebraný horninový vzorek z vrtu pocházel ze stejného hloubkového intervalu, ve kterém byl umístěn sběrný segment. Smellie et al. (2003) uvádí, že k výrazným odchylkám v chemickém složení pórové vody dochází i v případě, kdy jsou odběrová místa v rámci stejného vrtu navzájem vzdálena pouhých pár metrů. A jak sám autor dokládá, tak jejich horninové vzorky pro nepřímé metody charakterizace pórové vody pocházejí dokonce z jiného vrtu. Možnou nevýhodou této metody je tak její relativní časová náročnost.

Dalším příkladem nepřímé metody je **vysokotlaká extrakce pórové vody z horninových vzorků**. Její využití je diskutováno v publikaci Smellie et al. (2003). Hlavním limitujícím faktorem použití této metody v případě krystalických hornin, je jejich nízká porozita v porovnání se sedimenty a tudíž vysoké nároky na objem vstupního horninového materiálu.

Nicméně obecně lze říci, že pro stanovení složení pórové vody v matici krystalických hornin existuje více méně jedna metodika, která vychází ze Smellie et al. (2003) a opakuje ji Waber a Smellie (2008) a Eichinger et al. (2006 a 2008). Tato metodika (3 případy stanovení podzemní vody) nebyla vícekrát opakována a její správnost není jednoznačně prokazatelná (B. Gylling, SKB, osobní komunikace). Výsledkem ani není celkové složení podzemní vody, ale obvykle stanovení koncentrace Cl jako markeru procesů, které v pórovém prostoru probíhají. Pro definování vlivu složení pórové vody na procesy transportu je nutné posuzovat komplexní složení roztoku, včetně kompetitivních kationtů K⁺, Na⁺ a Ca²⁺.

V rámci výzkumu chemického složení pórové vody byly provedeny následující experimenty:

- stanovení chemického složení pórové vody v laboratoři z neporušených vrtných jader;
- stanovení chemického složení pórové vody získané in-situ pomocí instalace pakru do neporušeného vrtu;
- testování vysokotlaké extrakce.

2.3.7.2 Stanovení chemického složení pórové vody v laboratoři z neporušených vrtných jader

S ohledem na očekávané rozdíly v hydrochemickém složení byl odběr vzorků horniny pro studium pórové vody uskutečněn z 12. a 24. patra dolu Rožná. Vzorky byly odebrány při realizaci monitorovacích vrtů v geotechnických stanicích v součinnosti se společností DIAMO s. p., tak aby nebyl narušován harmonogram vrtných prací.

Pro chlazení vrtné korunky se standardně využívá voda z centrálního rozvodu vody. Při odběrech technické vody však byly zjištěny vysoké obsahy Fe částic a organických látek. Aby bylo zamezeno kontaminaci vrtných jader potažmo obsažené vody v hornině, bylo pro vrtání jader a odběr vzorků využito vody z vrtu S1 (PVP Bukov). Použití vody z blízkého okolí realizovaných vrtů na 12. a 24. patře nebylo možné, vzhledem k nízkým výtokům v okolních vrtech, kdy nebylo možné odchytnout dostatečné množství vody potřebné pro chlazení vrtné korunky a odběr vzorků (cca 1 m³ na 1 metr vrtu).

Podzemní voda pro vrtné práce byla odebrána z vrtu S1 (PVP Bukov; 8. 1. 2019 a 11. 2. 2019) před zahájením vrtných prací na 12. a 24. patře. Podzemní voda byla napuštěna do PE plachty instalované v důlním vozíku (Obr. 300) a převezena k místu vrtání. Odebráno bylo cca 1 m³ vody a proveden hydrochemický rozbor odebrané podzemní vody z vrtu S1 (28. 11. 2018 a 9. 1. 2019).

Dne 9. 1. 2019 byl proveden odběr horninového vzorku z jádra BGS12-H. Odběr vzorku horniny z 24. patra byl uskutečněn z vrtu BGS24-I (12. 2. 2019). Před samotným vrtáním proběhlo důkladné pročištění vrtného soutyčí, následně bylo vytřeno etanolem a propláchnuto čistou podzemní vodou z vrtu S1 (PVP Bukov; Obr. 301). Před odběrem vzorků hornin bylo odvrtno cca 40 cm jádra pro očištění a oplach soupravy, následně byl zahájen odběr odvrtných jader.



Obr. 300 Odběr vody z vrtu S1 do PE plachty pro vrtné práce (chlazení vrtné korunky)

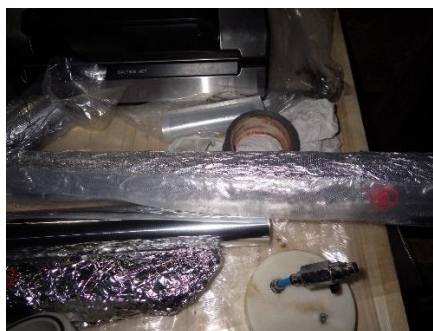


Obr. 301 Pročištění vrtného soutyčí před odběrem vzorků (etanol)

Okamžitě po odvrtní bylo horninové jádro nafoceno, očištěno deionizovanou vodou (DW) a otřeno navlhčenou buničinou. Vzorek byl zavakuován do dvou PE obalů, zabalen do Al folie a umístěn do transportního obalu. Vzorky byly odvezeny do laboratoře a chlazeny při 4 °C (Obr. 302 – Obr. 304).



Obr. 302 Vakuace odvrtných vzorků horninového jádra



Obr. 303 Dvojitá vakuace vzorku s Al přebalem



Obr. 304 Transportní přebal na odebrané vzorky hornin (in-situ)

2.3.7.2.1 Out-diffusion

Vzorky byly co nejdříve po přivezení do laboratoře naformátovány a umístěny do difuzních cel. Formátování bylo prováděno na diamantové pile, při malých otáčkách s minimalizovaným chlazením pomocí deionizované vody (chlazení kotouče pomocí stříčky). Ihned po nařezání byly vzorky otřeny navlhčenou buničinou a zváženy pro stanovení vlhkosti a umístěny do difuzních cel (Obr. 305). Difúzní cely byly vybaveny odběrovými průchodkami pro odběry vzorků okolního roztoku bez nutnosti otevírání cely. Objem cely byl minimalizován s ohledem na očekávané minimální změny v koncentracích roztoku s ohledem na potřebné množství roztoku pro analýzy (90–100 ml). Prostor pod vzorkem byl volný s instalovaným magnetickým míchadlem. Před každým odběrem byl vzorek důkladně promíchán min. 6 hodin na magnetické míchače (Obr. 306).



Obr. 305 Vzorky horniny (BGS12-H) nasazené v difuzních celách



Obr. 306 Difuzní cely 1-4, míchání roztoku před odběrem vzorků

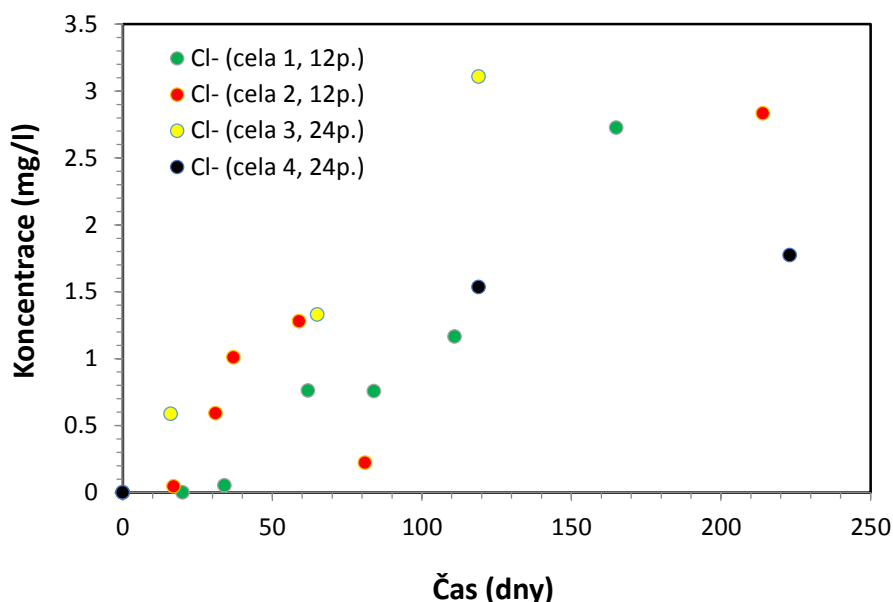
Technika out-difúze (out-diffusion, OUT) neboli vydifundování, je běžnou difúzní technikou, která bývá aplikována po předešlé fázi experimentu, tj. dosažení ustáleného stavu v průnikových difúzních experimentech (through-diffusion, TD). Cílem těchto experimentů bývá ověření stanovení difúzních parametrů – efektivního difúzního koeficientu D_e a kapacitního faktoru α – z průnikové fáze experimentu a případné odhalení ireverzibility sorpce studované specie (porovnáním α z TD a OUT fáze), např. (Glaus et al. 2011; Savoye et al. 2012).

Pro získání relevantních dat z experimentu bylo třeba uvažovat tyto předpoklady:

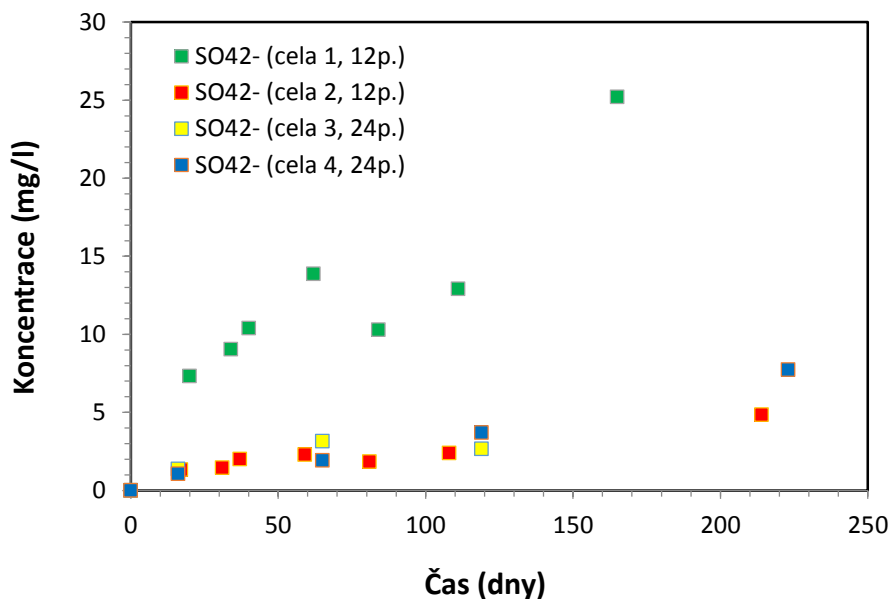
- pórová voda obsažená v pórovém prostoru odvrtného jádra nebude porušena vlastním vrtáním (výplachovou vodou);
- bude docházet k difúzi specií pouze směrem z vrtného jádra do ultra čisté destilované vody a nebude docházet k rozpouštění minerálů.

Při zanedbání ploch podstav, které jsou plochou výrazně menší než plášť pomyslného válce (jádra), můžeme uvažovat o radiální difúzi specií směrem ven z vrtného jádra do okolního rezervoáru (out diffusion). V tomto případě je vhodné vést experiment do ustáleného stavu, což může být vzhledem k průměru jádra i několik měsíců. V okolním rezervoáru byly pravidelně sledovány koncentrace několika specií, zejména chloridů jako zástupce konzervativních aniontů, síranů, fluoridů, dusitanů a dusičnanů. Na konci experimentu byly analyzovány všechny hlavní anionty a velmi podrobně kationty pomocí AAS a ICP–OES. Všechny výsledky jsou uvedeny v přehledových tabulkách Elektronická příloha 38.

Bylo sledováno složení vody, ve které byl ponořen vzorek o délce cca 20 cm a průměru 6 cm. Za dobu cca 220 dní nedošlo k ustálení koncentrací sledovaných aniontů v čase (Obr. 307 a Obr. 308).



Obr. 307 Vývoj koncentrací chloridů při difúzi z vrtného jádra (out diffusion) pro vzorky odebrané z 12. a 24. patra



Obr. 308 Vývoj koncentrací síranů při difúzi z vrtného jádra (out diffusion) pro vzorky odebrané z 12. a 24. patra. Cela 1 vykazovala zvýšené koncentrace síranů, což může značit rozpouštění minerálů obsahujících sírany/sulfidy

Obecně bylo chování specií v jednotlivých celách obdobné, pouze v případě síranů vykazovala cela 1 zvýšené koncentrace oproti ostatním, což může značit rozpouštění minerálů obsahujících sírany/sulfidy, které byly zjištěny ve studované hornině. V ÚJV v současnosti nejsou k dispozici modelové přístupy na vyhodnocování experimentů out-difúze nebo radiální difúze, které by umožnily tyto experimenty vyhodnotit.

Navrhujeme postup na základě 1. Fickova zákona ($J = -D \frac{\partial c}{\partial x}$), který může být velmi zevrubným odhadem koncentrace chloridu v pórové vodě studovaných vzorků. Z naměřených dat byl vypočten difúzní tok J ($\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$), kdy za plochu byl brán povrch válcového vzorku. Tok J pro chloridy se ustálil v intervalu $(1-3) \cdot 10^{-11}$ $\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$. Na horninových vzorcích byly stanoveny efektivní difúzní koeficienty chloridu v rozmezí $(1-50) \cdot 10^{-14}$ m^2/s . Z 1. Fickova zákona pak lze dopočítat koncentrační gradient. Za délku L byla zvolena vzdálenost 3 cm. Ačkoliv vzdálenost, kterou musel urazit chlorid při vydifundování je v rozmezí 0–10 cm (stěna válce – polovina výšky válce).

Přestože nebylo dosaženo ustáleného stavu, byl proveden jednoduchý přepočít, který vycházel z tohoto předpokladu. V rámci difúze se totiž vyrovnají koncentrace specií v pórové vodě odvrtného jádra (v systému propojených pórů) a v ultra čisté destilované vodě obklopujícího rezervoáru. Na základě toho je možné spočítat koncentrace daných specií v původní pórové vodě:

$$C_{PW} = \frac{(M_{\text{REZERVOAR}} + M_{PW}) \cdot C_{\text{FINAL}}}{M_{PW}} \quad (36)$$

Kde C_{PW} je koncentrace dané specie v pórové vodě, $M_{REZERVOAR}$ je objem rezervoáru, M_{PW} je objem propojených pórů v hornině (vypočten z porozity) a C_{FINAL} je koncentrace dané specie na konci experimentu (rovnovážný stav).

Pravidelné odběry vzorků pro analýzu specií jsou zanedbány. Výpočet byl proveden pro chloridy (jako konzervativní stopovač) a sírany (viz Tab. 134), kde byla difúze podrobněji sledována. Pro ostatní specie byl stejný výpočet proveden z koncentrací analyzovaných na konci experimentu (rozebírání cel). Nicméně tyto vypočtené koncentrace se ukázaly jako velmi vysoké. To spíše vede k závěru, že je to důsledek dalších procesů, jako je rozpouštění minerálních fází, než že by se jednalo o skutečné koncentrace specií v pórové vodě. Bohužel není možné procesy difúze a např. rozpouštění jednoduše od sebe oddělit.

Tab. 134 Přepočet koncentrací chloridů a síranů z difúzního experimentu na koncentrace v pórové vodě na konci experimentu

Cela	Patro	Koncentrace Cl ⁻ (mg·l ⁻¹)	Koncentrace SO ₄ ²⁻ (mg·l ⁻¹)
1	12.	116	111
2	12.	92	135
3	24.	462	292
4	24.	168	692

Testování odběru pórové vody vysokotlakou extrakcí

Pro studium pórové vody sedimentárních hornin se využívá metody vysokotlaké extrakce (Smellie et al. 2003). Proto tato možnost byla testována i na vysokotlakém propustoměru ÚJV na vzorku z vrtu BGS12-H. Do propustoměru byl instalovaný připravený vzorek o délce 60 mm (průměr 60 mm), který byl po dobu 20 dní podtlakově saturován v syntetické granitické vodě SGW2. Následně byl vzorek nainstalován do vysokotlakého propustoměru a aplikován pozadový tlak 10 MPa a na podestu vzorku byl aplikován tlak N₂ (30 bar) s plánovaným odběrem do hadičky/potažmo stříkačky. Po 12 hodinách byl experiment ukončen. S ohledem na nízkou porozitu (~ 0,3 %) nebyl na výstupu zjištěn průnik pórové vody do vysokotlaké hadičky. Z testu bylo dle předpokladu potvrzeno omezení této metody pro nízkoporézní vzorky krystalinických hornin.



Obr. 309 Instalace horninového vzorku do propustoměru pro testování vysokotlaké extrakce



Obr. 310 Vysokotlaký propustoměr s odběrem vody

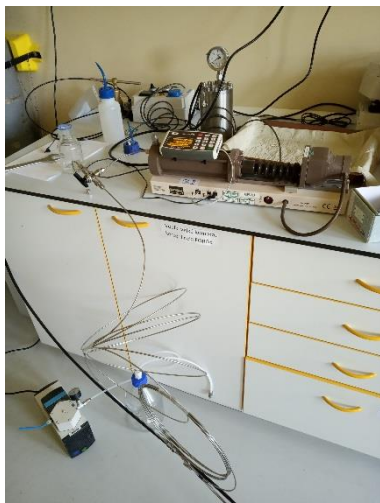
2.3.7.3 Stanovení chemického složení pórové vody získané in-situ pomocí instalace pakru do neporušeného vrtu

Získání pórové vody in-situ bývá často časově náročné a někdy i technicky nemožné. Vzhledem k nízké porositě horninových vzorků je obsah vody obsažený ve studovaných vzorcích velmi nízký. Proto bylo vyvinuto a testováno odběrové zařízení, které umožní in-situ odběry v přírodních podmínkách horninového prostředí.

Vypovídající hodnota chemického složení pórové vody získané in-situ je však velmi vysoká a to díky minimálnímu ovlivnění původních podmínek horninového prostředí. V případě, že je vybrán úsek ve vrtu bez zjevných přítoků ve vzdálenějších partiích vodivých zón, je pravděpodobné, že získáme velmi věrohodné chemické složení pórové vody horninového prostředí.

Pro odběr pórové vody v in-situ podmínkách byl vyroben dvojitý pakr s odběrovým intervalem (20 cm, +20 cm), se dvěma odběrovými vstupy pro možné odsávání popř. tlakování intervalu (PEEK; Obr. 313). Konstrukce odběrového systému byla navržena s ohledem na minimalizaci mrtvého objemu s možností použití do tlaku 50 bar. Odvod roztoků z/do intervalu je řešen pomocí vysokotlakých nerezových kapilár, které minimalizují mrtvý objem a umožní provádět tlakové zkoušky do vysokých tlaků s minimalizací objemových změn systému. Odběr vzorků je prováděn pomocí vakuového čerpadla a řízen trojcestnými ventily.

Před samotným použitím byla funkčnost a těsnost odběrového systému testována v laboratoři. Současně byla provedena úprava systému pro plánované tlakové zkoušky pro velmi nízké propustnosti (Obr. 311 a Obr. 312).



Obr. 311 Úprava odběrového systému pro vodní tlakové zkoušky (VTZ) pro velmi nízké propustnosti

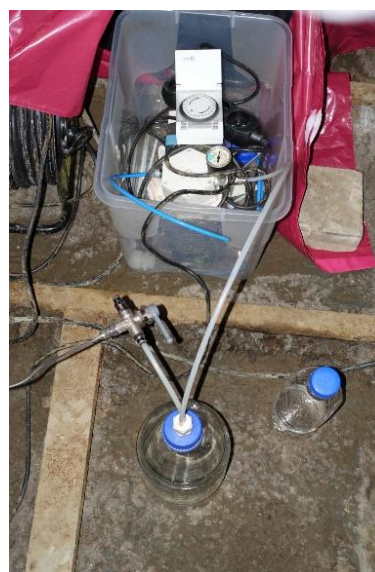


Obr. 312 Testování odběrového systému a těsnosti v laboratorních podmínkách

Při odběrech pórové vody v in-situ podmínkách byla pozornost zaměřena na neporušené části horninového masívu v blízkosti odebraných vzorků pro laboratorní experiment. Na základě předvýběru (dle hmotné dokumentace) byly vytipovány vhodné intervaly a do těchto částí nainstalován pakr. Po nainstalování bylo zahájeno podtlakové čerpání a sledován pokles tlaku při vypnutí čerpadla. V případě poklesu tlaku byl pakr posunut a zopakováno čerpání. Po nalezení nepropustného intervalu bylo zahájeno čerpání do podtlaku až -0,9 Bar. Podtlak byl vytvářen pravidelně každých 30 min po dobu 15 min, aby nedocházelo k přehřátí pumpy. Následně byly v intervalu provedeny vodní tlakové zkoušky.



Obr. 313 Pakr s odběrovým intervalem pro odběr pórové vody



Obr. 314 Odběrový systém pro odběr pórové vody

Odběry vody 12. patro

Odběr vzorků pórové vody na 12. patře byl realizován ve dnech 13.–14. 8. 2019 z vrtu BGS12-H. V průběhu testů byla studována oblast 6 až 8,5 m. Po provedených testech byl vybrán nepropustný interval 7,3–7,7 m a zahájeno podtlakování intervalu, které bylo prováděno po dobu více jak 20 hodin. Následně bylo odebráno kolem 27 ml roztoku. Při testování byly odebrány i vzorky vody z vybraných intervalů a současně odebrán vzorek roztoku z intervalu nad pakrem (> 8,4 m). V intervalech 7,20–7,40 m a 7,80–8,20 m byly provedeny vodní tlakové zkoušky. Výsledky VTZ jsou uvedeny v kapitole 2.3.7.6.3.

Po provedení odběru vody byl pakr vytažen a bylo zjištěno poškození těsnících gumových segmentů, proto byly testy ukončeny a pakr zaslán výrobcí k opravě. Na základě získaných měření byl pakr následně upraven a doplněn o výstup ve spodní části pakru pro možné měření tlaků za pakrem a odběru vody.

Odběry vody 24. patro

Před odběrem vzorků pórové vody ve vrtu BGS24-I bylo sledováno, že oba vrty BGS24-I a BGS24-H byly bez patrných známek vlhkosti a tím bez reálné možnosti odběru pórové vody. Proto byl pro odběr vybrán svislý dovrchní vrt BGS24-VU, u kterého byla sledována vlhkost na stěnách vrtů. Odběr pórové vody byl realizován od 6. do 13. 11. 2019. V období 7.–13. 11. bylo ve studovaném intervalu 5,8–6,2 m odebráno 77 ml roztoku. Následně byly provedeny vodní tlakové zkoušky. Výsledky VTZ jsou uvedeny v kapitole 2.3.7.6.3.

2.3.7.4 Modelování ekvibrace horniny s podzemní vodou

Míra reakcí voda – hornina silně závisí na přiblížení se rovnováze („chemická afinita“). Rovnovážné rychlosti rozpouštění minerálů pro hlinitokřemičitany, které jsou obvykle daleko od rovnováhy, jsou obecně závislé na reakčním povrchu minerálu a koncentraci $[H^+]$, tj. pH. Reakční kinetika ve stavu blízkému rovnováze je mnohem hůře kvantifikována a reakční mechanismy v tomto stavu jsou podstatně složitější a závislé na místních fyzikálních, geochemických a mineralogických vlastnostech systému včetně precipitace sekundárních minerálů a na heterogenitách všech těchto faktorů (Bath 2011).

První krok k sestavení geochemického modelu roztoku v rovnováze s minerálním složením hornin v PVP Bukov byl učiněn ve zprávě Červinka et al. (2018). V principu se jednalo o ekvibraci (tj. zrovnovážení) čisté vody se studovanou minerální sestavou odpovídající buď hostitelské hornině nebo puklinové výplni. Takto získané rovnovážné složení bylo porovnáno se složením referenčních podzemních vod SG2 a SGW3 (Červinka et al. 2016) viz Tab. 135. Složení těchto vod odpovídá i složení podzemních vod v Tab. 137.

Tato modelovací úloha byla realizována s reprezentativním složením horniny v PVP Bukov. Výsledná složení rovnovážných vod a jejich srovnání se složením reprezentativních vod SGW2 a SGW3 je ilustrováno na Obr. 315. V tomto případě jde však o sledování vody, obíhající v puklinovém systému, tj. tam, kde advektivní složka převládá.

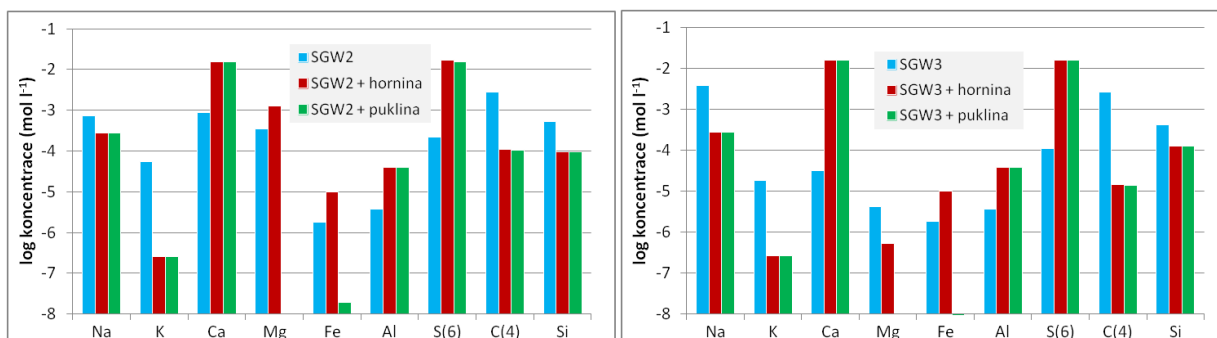
Z grafů na Obr. 315 lze vyčíst, že alespoň řádové shody mezi danou reprezentativní vodou a vypočítanou rovnovážnou vodou horniny nebo puklinové výplně je dosaženo pouze v případě

koncentrací Si, Na a Mg (SGW2 i SGW3). U ostatních složek jsou koncentrace v nižší míře shody. Jelikož je soubor minerálů horninového prostředí a puklinových výplní velmi podobný, jsou i výsledná složení rovnovážných vod (např. „SGW2 + hornina“ a „SGW2 + puklina“, viz Obr. 315) odlišná jen velmi málo.

Tab. 135 Chemické složení reprezentativních podzemních vod použité v geochemickém modelování (Červinka a Gondolli 2016)

Voda	pH	Koncentrace (mg l ⁻¹)										Typ	log P _{CO2}
		Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	SiO ₂ (aq)	Al ³⁺	Fe ²⁺		
SGW2	8,2	16,5	2,1	34,6	8,3	3,3	21,0	168,7	31,2	1,7	1,2	Ca-HCO ₃	-3,00
SGW3	9,4	89,4	0,7	1,3	0,1	18,7	10,5	163,5	25,1	1,7 ^a	0,2	Na-HCO ₃	-3,50

^aZ důvodu absence koncentrace Al v modelové vodě SGW3 nastaveno na stejnou hodnotu jako u SGW2, koncentrace Al³⁺ a Fe²⁺ vycházejí z reálných analýz. Nábojová rovnováha byla dorovnána sírany v případě SGW2 a sodíkem v případě SGW3.



Obr. 315 Grafické srovnání výchozích vod SGW2 (vlevo) a SGW3 (vpravo) s výslednými vodami plynoucími z ekvilibrace čisté vody s minerálními sestavami horninového prostředí a puklinové výplně (Červinka et al. 2018)

V tomto případě jde však o sledování vody obíhající v puklinovém systému, tj. tam, kde advektivní složka hraje majoritní význam a kde bude mít význam i mísení s vodami jiných oběhů a především interakce s minerály puklinových výplní. Výchozí minerální složení bylo i z tohoto důvodu odlišné a obsahovalo i puklinové minerály (Červinka et al. 2017). Tento model ekvilibrace minerálů s destilovanou vodou neodrážel zvýšenou koncentraci Na⁺, která je typická pro vývoj složení podzemní vody v prostoru bývalého dolu Rožínka, kde je umístěno i PVP Bukov (Bukovská a Verner eds. 2017), viz dále.

V případě odhadu složení pórové vody na základě odběrů ze vzorků ze 12. a 24. patra byla pro modelování v programu PHREEQC použito jako výchozí mineralogické složení vzorků, uvedených v Tab. 136. Tyto vzorky pocházely z partií, ze kterých byly odebrány vzorky pro laboratorní experimenty.

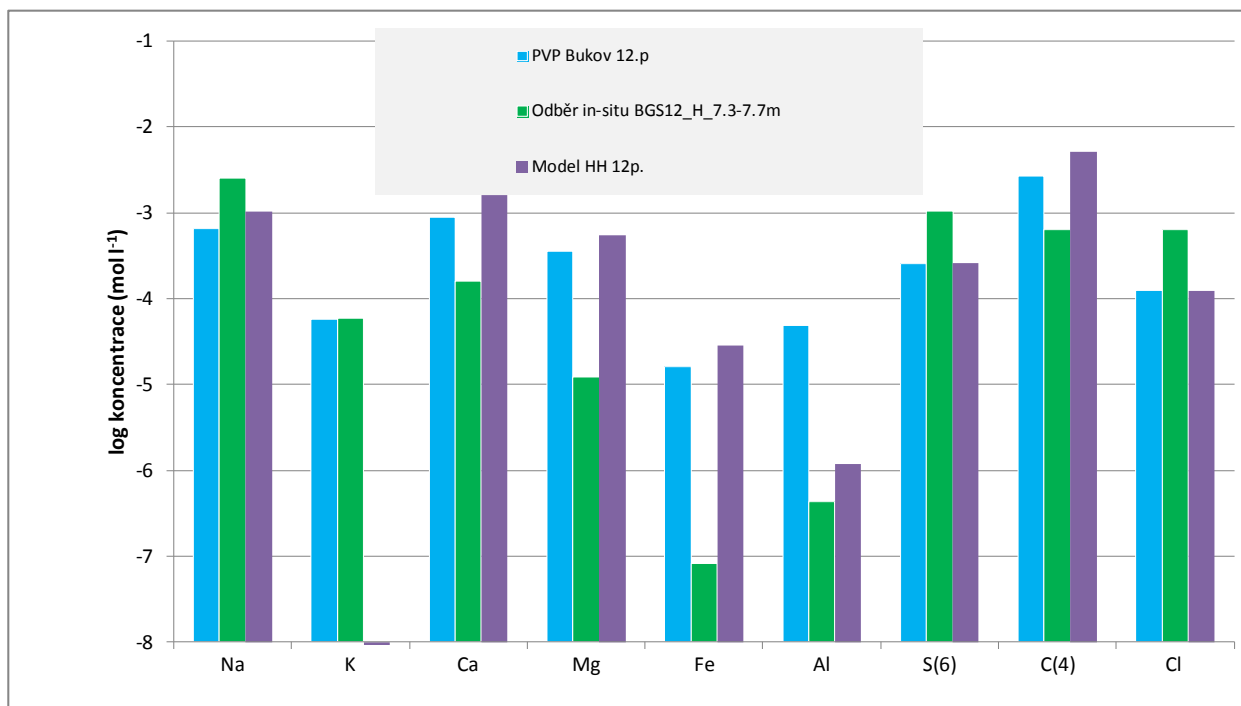
Tab. 136 XRD analýza vzorků hornin ze zájmových intervalů pro odběr podzemní vody

Hornina	Minerál	Zastoupení	Poznámky
BGS 12-H WR 12. patro	amfibol	25	
	plagioklas	37,5	blíží se Ca bohatému albitu
	draselný živec	2	odpovídá spíše mikroklínu
	křemen	18,5	
	biotit	10,5	
	chlorit	3	
	kalcit	1	
	granát	2,5	
BGS 24-I WR 24. patro	amfibol	31,5	
	plagioklas	39	blíží se Ca bohatému albitu
	draselný živec	1	odpovídá spíše mikroklínu
	křemen	18	
	biotit	7	
	chlorit	3	
	kalcit	0,5	

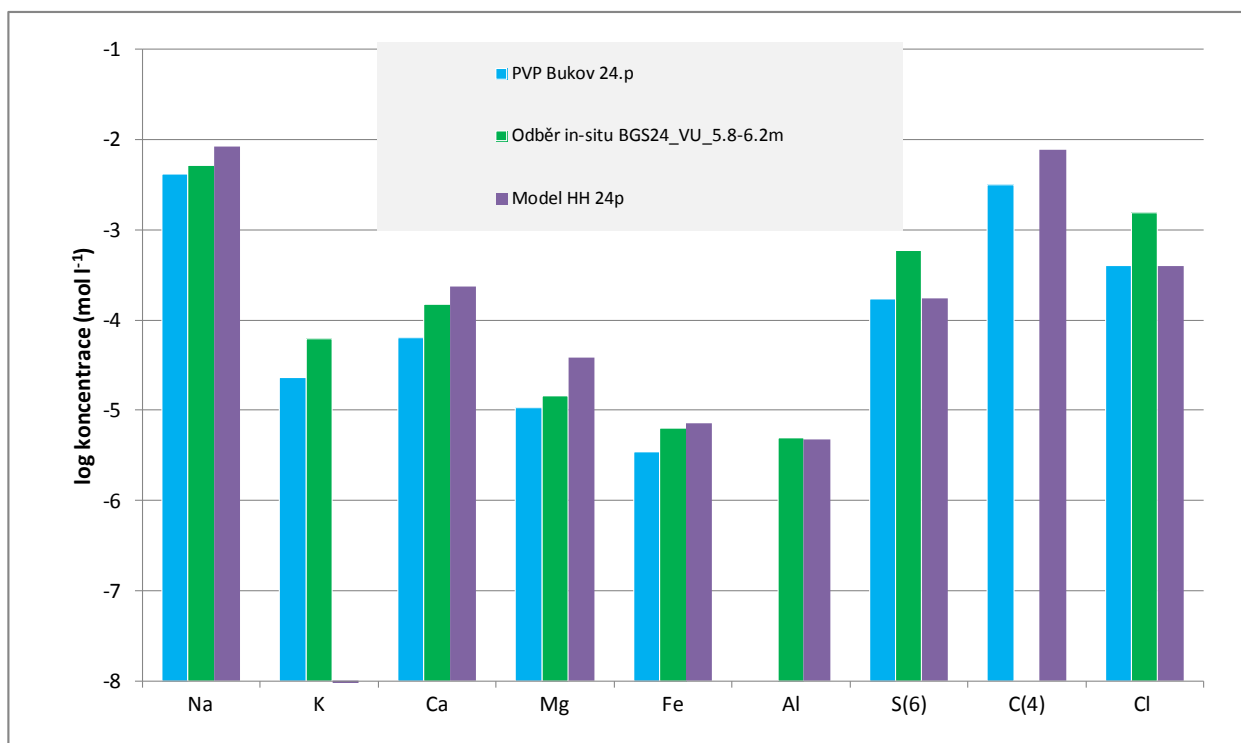
Jako základní koncept byl zvolen předpoklad, že podzemní voda proniká z pukliny do pórového prostoru matrice, kde nedochází k advektivnímu proudění, a setrvává dostatečně dlouho, aby bylo dosaženo rovnováhy s horninou a jejími hlavními a minoritními složkami (Tab. 136). Jako výchozí byl použit model ve zprávě Bath (2011), který vycházel z předpokladu, že reaktivita horninových složek je různá a působí i iontová výměna. Hlavní reakce, které ovlivňují chemické složení pórové vody, jsou rozpouštění biotitu (K, Mg, Fe, F), plagioklasu (Ca, Na), K-živce (K, Na), kalcitu (Ca), pyritu (Fe, SO₄), případně fluoritu (F, Ca) a magnetitu (Fe).

Model byl vytvořen v programu PHREEQC a představoval třístupňovou ekvilibraci podzemní vody typické pro 12. patro a 24. patro (Tab. 137) s minerály obsaženými v horninových vzorcích v Tab. 136 za předpokladu, že v prvním kroku reagují minerály s reaktivním povrchem (chlorit, kalcit). V druhém kroku se přidává biotit a ve třetím ostatní horninotvorné aluminosilikáty. Reakce sekundárních minerálů (kaolinit, chlorit, kalcit) je reverzibilní (mohou se rozpouštět i srážet). Horninotvorné aluminosilikáty se pouze rozpouštějí. Minerálů je v modelu nadbytek tak, aby nedošlo k jejich kompletnímu rozpuštění.

Výsledné porovnání modelových výsledků se složením reprezentativních vod pro 12., resp. 24. patro s in situ odběry vody z horninového masivu (viz Tab. 137) jsou uvedeny na Obr. 316, resp. Obr. 317.



Obr. 316 Grafické srovnání výchozích vod reprezentujících složení podzemní vody na 12. patře se složením vody odebrané in situ z masivu a výslednými vodami plynoucími z ekvibrace podzemní vody s minerálními sestavami horninového prostředí (Model HH)



Obr. 317 Grafické srovnání výchozích vod reprezentujících složení podzemní vody na 24. patře se složením vody odebrané in situ z masivu a výslednými vodami plynoucími z ekvibrace podzemní vody s minerálními sestavami horninového prostředí (Model HH)

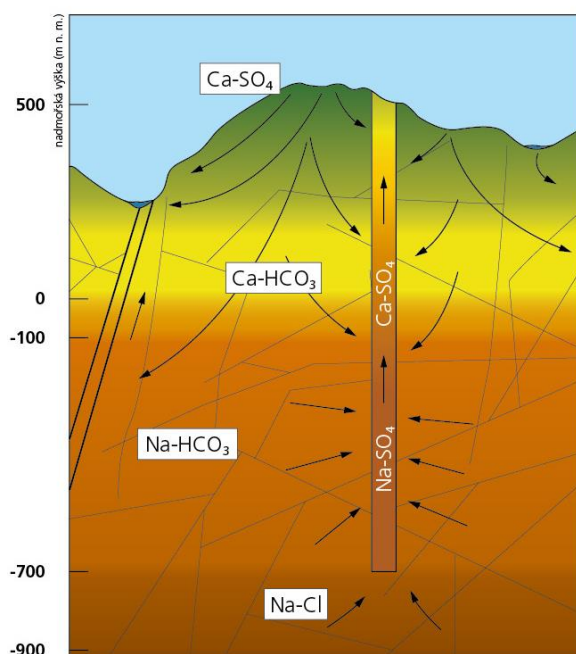
Výsledné složení roztoků in-situ bude výrazně ovlivněno heterogenitou horninového složení na lokaci odběru, což je u Rožné jednou z nejproblematictějších věcí. Proměnlivost složení hornin je značná, a to i na malé vzdálenosti, což může ovlivnit i složení roztoku v hornině.

Jak je patrné z grafu na Obr. 316 a Obr. 317 in-situ odebraný roztok pórové vody je vůči reprezentativní podzemní vodě a modelovému složení podzemní vody v obou horizontech nabohacen zejména o Cl a SO_4^{2-} . Přítomnost síry je dána přítomností sulfidů (pyrit) v hornině a jejich interakcí s podzemní vodou. V tomto případě však XRD analýza neidentifikovala žádné krystalické fáze obsahující S a v modelovém složení je tedy její složení blízké složení odpovídající podzemní vody. V reálu je však přítomnost malého množství v hornině možná a může se odrážet na výsledném složení roztoku.

Obsah Cl^- v in-situ odebraném roztoku pro obě hloubkové úrovně však není možno vysvětlit ani původem v podzemní vodě ani interakcí s minerály v hornině (viz výsledek modelu v Phreeqc – Obr. 316 a Obr. 317), kde se nevyskytují minerály, které by při své interakci přispívaly k nárůstu koncentrace Cl^- v porovnání se složení odpovídající podzemní vody.

Geochemický model poměrně uspokojivě vysvětluje koncentraci Ca a Mg, není však schopen vyřešit přítomnost K v podzemní vodě i v in-situ odebraném roztoku.

Koncentrace Na^+ je v případě in-situ odběru nabohacena v porovnání se složením odpovídající podzemní vody pouze v případě odběrů na 12. patře. Nárůst koncentrace Na^+ ve 24. patře má souvislost se zonálností podzemních vod na PVP Bukov/důl Rožná, která byla definovaná v práci Bukovská a Verner eds. (2017) – Obr. 318.



Obr. 318 Ideové schéma vývoje chemického složení a proudění podzemních vod s hloubkou v horninovém prostředí krystalinika při ovlivnění důlním dílem (Bukovská a Verner et al. 2018)

V antropogenně neporušeném horninovém prostředí PVP Bukov se od zemského povrchu do hloubek vyšších než 1 km vyskytují tyto typy podzemních vod: (Bukovská a Verner eds. 2017):

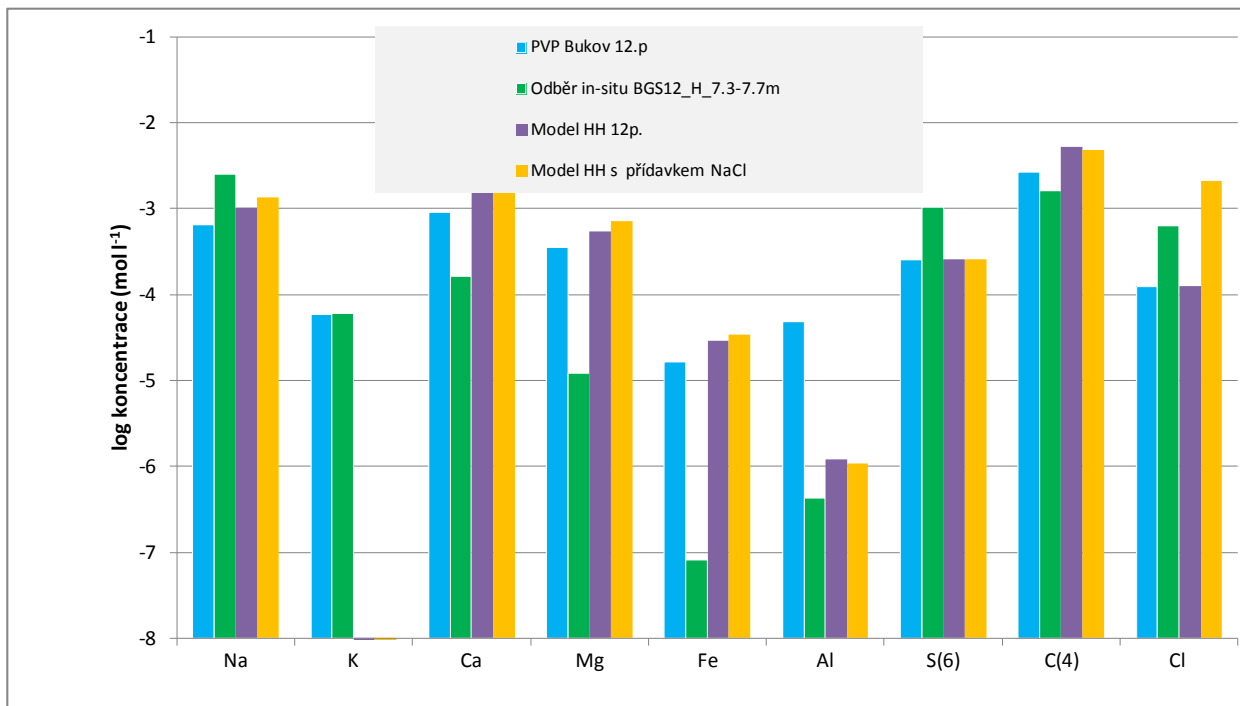
1. Vody typu **Ca-SO₄** se vyskytují v oxidační zóně krystalinika, v hloubkách maximálně prvních desítek metrů, v závislosti na míře porušení horninového prostředí.
2. Vody typu **Ca-HCO₃** jsou typické pro redukční zónu krystalinika, podle poměrného zastoupení kationtů opět typ s převahou Ca (Ca 55 meq%, Mg 30 meq% a Na 15 meq%), mezi anionty převažuje HCO₃ (nad 70 meq%). 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.
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.
4. Vody typu **Na-Cl** byly zastiženy pouze na 24. patře dolu, v jeho severní části (jáma R-3). Je tedy možné předpokládat, že v hloubkách vyšších než cca 1200 m se budou vyskytovat hlubinné vody typu Na-Cl.

Tento trend je patrný i u složení roztoků z in-situ odběru, u nichž majoritními speciemi jsou Na⁺, a HCO₃⁻. Koncentrace SO₄²⁻ je však vyšší ve vzorku odebraném in-situ pro 12. patro, což spíše svědčí o antropogenním ovlivnění (Bukovská a Verner eds. 2017).

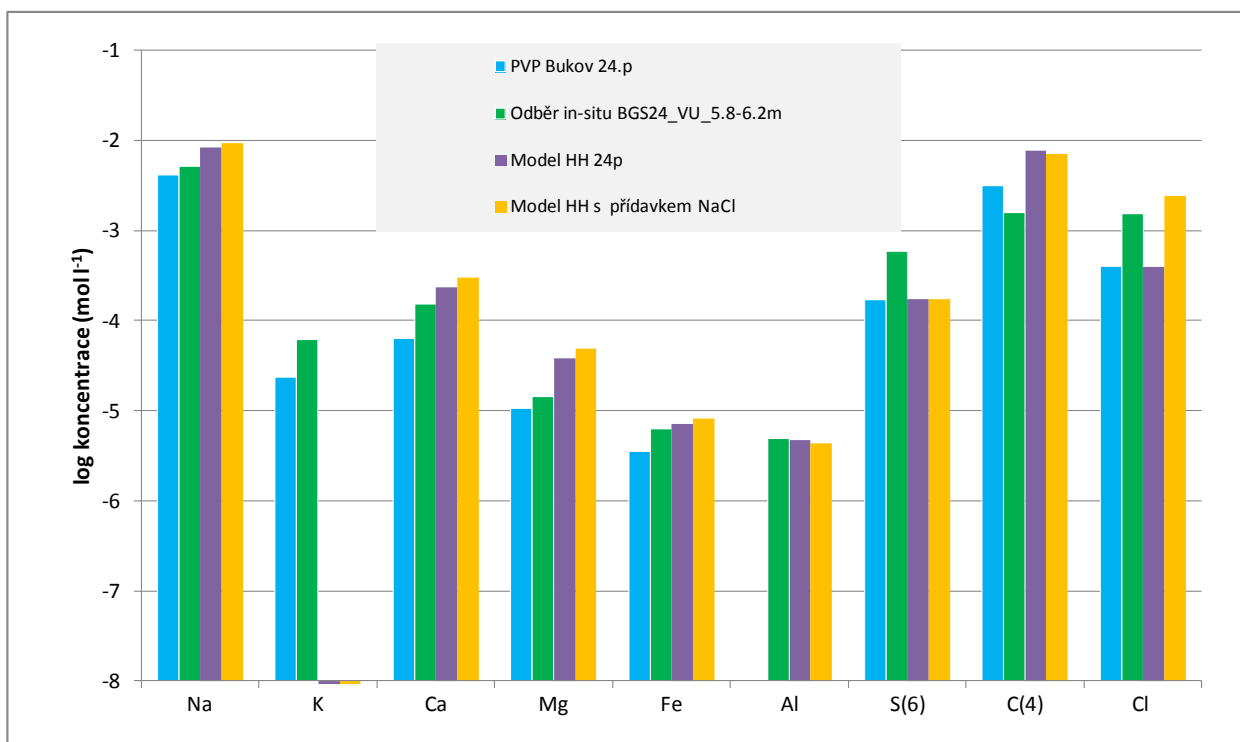
Zdroj Cl, který se v granitických horninách běžně vyskytuje v hlubších partiích (Rukavičková, osobní sdělení), není zatím zcela prokazatelně objasněn. Jednak může jít o komunikaci se salinními vodami fosilního původu, jednak může docházet i k interakcím s fluidními inkluzemi obsaženými v minerálech v hornině (Waber a Smellie 2008). Pačes (1983) např. udává koncentraci Na⁺ 1 786 mg l⁻¹ a Cl 6 458 mg l⁻¹ pro granodiorit v Boru u Tachova.

Waber a Smellie (2008) poukázali na to, že na výsledné mineralizaci výluhu se mohou podílet i látky obsažené v minerálních inkluzích a taktéž interakce hornina/voda v průběhu experimentu. V krystalických málo porézních horninách je efekt fluidních inkluzí natolik výrazný, že ani koncentrace konzervativních látek (Cl, Br) obsažených ve výluhu neodpovídá jejich zastoupení v pórové vodě. Na druhé straně Dobeš identifikoval v práci Bukovská a Verner ed (2017) přítomnost fluidních inkluzí v horninách PVP Bukov, kde NaCl tvořilo až 20 hm. % . Tyto roztoky, ač uzavřené v minerálních zrnech, by mohly být zdrojem nadbytku Cl, které není možno dosáhnout pouhou ekvilibrací minerální součástí horniny s podzemní vodou.

Tento fakt se odrazil v druhém kroku geochemického modelu, kdy byla interakce s fluidními inkluzemi simulována přidávkem malého množství 0,001 mol. NaCl ve dvou krocích ekvibrace minerální sestavy a podzemní vody. Výsledek modelu s přidávkem NaCl je pro 12. patro zobrazen na Obr. 319 a pro 24. patro na Obr. 320.



Obr. 319 Grafické srovnání výchozích vod reprezentujících složení podzemní vody na 12. patře se složením vody odebrané in situ z masivu a s výslednými vodami plynoucími z ekvibrace podzemní vody s minerálními sestavami horninového prostředí (Model HH). Model HH s přidavkem NaCl reprezentuje reakci ekvilibrovaného roztoku s fluidními inkluzemi



Obr. 320 Grafické srovnání výchozích vod, reprezentujících složení podzemní vody na 24. patře se složením vody, odebrané in situ z masivu a výslednými vodami plynoucími z ekvibrace podzemní vody s minerálními sestavami horninového prostředí (Model HH). Model HH s přidavkem NaCl reprezentuje reakci ekvilibrovaného roztoku s fluidními inkluzemi

Výsledek této simulace jasně ukazuje, že i přídavek malého množství NaCl z dalšího zdroje (fluidní inkluze, uzavřená fluida v hornině, vysrážené) vyrovnává nadbytek Cl⁻ identifikovaný v roztocích odebraných in-situ na obou hloubkových úrovních a napovídá o externím původu Cl, který nepochází z rozpouštění horninotvorných minerálů.

2.3.7.5 Srovnání chemického složení pórové vody

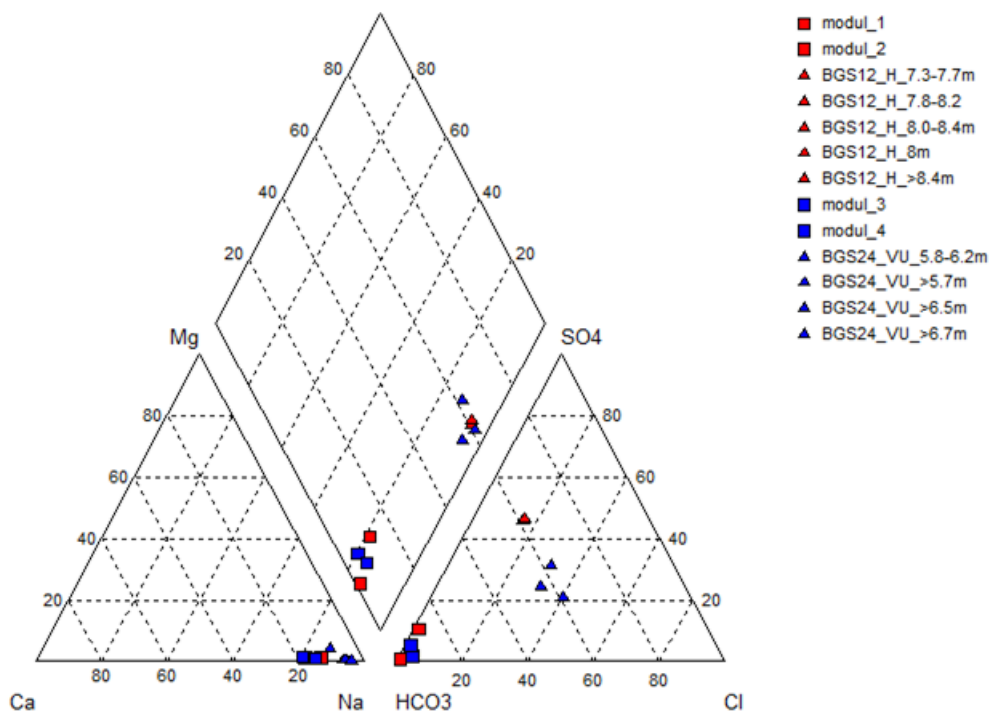
Pro finální zhodnocení bylo porovnáno chemické složení podzemních vod z PVP Bukov a dolu Rožná (Červinka et al. 2018) s experimentálními výsledky out-diffusion experimentů s jádry ze 12. a 24. patra dolu Rožná a dále s výsledky in-situ odběrů podzemních vod opět z 12. a 24. patra dolu Rožná (Tab. 137, Obr. 322, Obr. 323). Celkový přehled výsledků a naměřených hodnot odebraných při laboratorních experimentech a odebraných vzorků podzemní vody z 12. a 24. patra jsou uvedeny v Elektronická příloha 38 a vyneseny v Obr. 321. Podzemní voda z PVP Bukov (cca 600 m pod povrchem) reprezentuje hlubší oběh v puklinovém prostředí krystalinických hornin Českého masivu, typ Ca-HCO₃. Podzemní vody z hlubších pater dolu Rožná reprezentují svým složením velmi pomalý oběh hlubokých podzemních vod v puklinovém prostředí krystalinických hornin Českého masivu, typ Na-HCO₃.

Z hlediska koncentrace kationtů jasně dominuje sodík, v případě 12. p. se objevuje v laboratorním experimentu i vápník, který však není potvrzen z in-situ odběrů. Jako dominantní anionty lze určit uhličitany, sírany a chloridy. Vysoký obsah síranů, který se objevil v analýze podzemní vody z in-situ odběru ze 12. p., může být znakem oxidace minerálů obsahujících síru (např. sulfidy – FeS₂), případně vliv antropogenního ovlivnění. Tento jev se obecně projevuje s otevřením důlních děl a byl pozorován i na PVP Bukov (Bukovská a Verner eds. 2017). V případě laboratorního experimentu (12. p.) se ještě objevují fluoridy, což může být důsledek rozpouštění nějakého fluoridového minerálu, popř. z apatitu a slíd. Zvýšené koncentrace fluoridů byly potvrzeny na obou celách, takže se pravděpodobně nejedná o experimentální chybu.

Na následujícím Piperově diagramu (Obr. 321) je dobře vidět porovnání základního chemického složení pórových vod z laboratorních a in-situ experimentů. Dominantním kationtem je sodík pro všechny získané pórové vody, odlišnost se pak projevuje u aniontů. Pórové vody získané z laboratorních experimentů vykazují jako dominantní anionty uhličitany oproti pórovým vodám z in-situ experimentů, kde uhličitany doplňují chloridy a sírany. Je zajímavé, že podzemní vody ovlivněné hornickou činností jsou často nabohaceny sírany (což se projevuje i na dole Rožná; Bukovská a Verner et al. 2018). Je pak otázkou, zda sírany v pórových vodách z in-situ experimentů jsou reliktem hornické činnosti (případně jsou spojené s oxidací sulfidických minerálů) nebo přirozeným stavem, tedy součástí neovlivněné pórové vody. Vzhledem k tomu, že v hornině nebyly identifikovány žádné sulfidy (viz Tab. 136), nebyly zahrnuty ani do modelu vzniku pórové vody a v modelovém složení se výrazně neprojevují. Patrná přítomnost pyritu a pyrhotinu v jiných vzorcích hornin z PVP Bukov (Tab. 119) však možnost příspěvku sulfidů v hornině spíše podporuje. Operuje s nimi i model z práce Červinka et al. (2017) – viz Obr. 316 a Obr. 317.

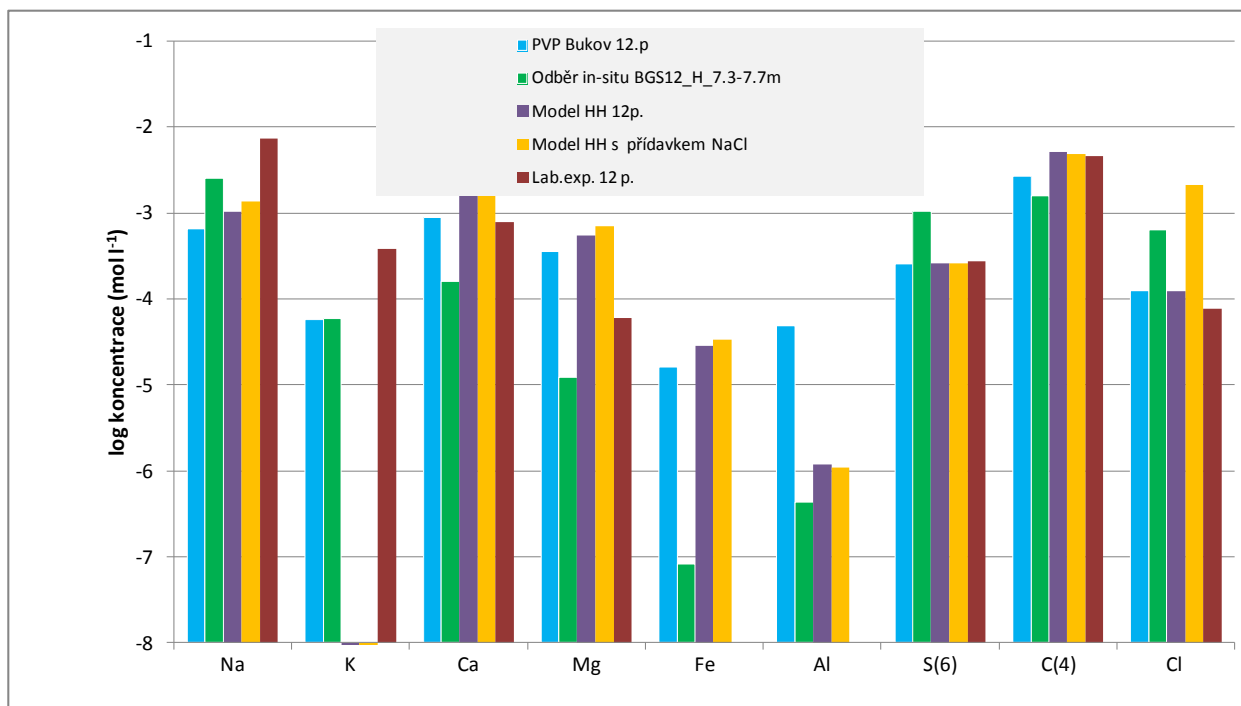
Tab. 137 Srovnání chemického složení podzemních vod z PVP Bukov, dolu Rožná (17.–24. p.), lab. experimentů (12. p., cela 2; 24. p., cela 3) a in-situ odběrů (BGS12_H_8.4m, 12. p.; BGS24_VU, 24. p.)

Chemické složení podzemní vody		PVP Bukov (průměr 18 analýz)	Důl Rožná (průměr 18 analýz, 17.-24. p.)	Lab. experiment (12. p., cela 1)	Lab. experiment (12.p., cela 2)	Lab. experiment (24.p., cela 3)	Lab. experiment (24.p., cela 4)	BGS12_H (12. p.) in situ odběr vody z horninového masivu	BGS24_VU (24. p.) in situ odběr vody z horninového masivu
Na ⁺	mg/l	15,1	96,3	169,0	206,4	59,8	52,2	87,4	119,4
K ⁺	mg/l	2,3	0,9	14,7	13,9	4,7	2,4	1,0	2,4
Mg ²⁺	mg/l	8,6	0,3	1,5	1,4	0,6	0,3	0,3	0,4
Ca ²⁺	mg/l	35,9	2,6	31,1	26,4	11,6	7,7	4,9	6,1
Al	mg/l	1,3	-	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,1
Fe	mg/l	0,9	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	-	0,4
SiO ₂	mg/l	31,3	18,8	-	-	-	-	-	-
HCO ₃ ⁻	mg/l	161,4	191,4	281,0	458,3	208,0	166,4	102,0	129,8
SO ₄ ²⁻	mg/l	24,6	16,6	26,5	2,9	3,1	7,2	98,2	56,6
Cl ⁻	mg/l	4,4	14,1	2,8	2,0	4,9	1,8	24,3	54,6
F ⁻	mg/l	0,3	8,9	66,2	65,7	-	-	0,3	4,2
pH	-	8,2	9,0	8,4	7,6	7,8	8,2	8,8	8,1
Kondukt.	μS/cm	292,7	424,4	785,0	1045,0	569,0	312,0	476,0	594,0
TYP		Ca-HCO ₃	Na-HCO ₃	Na-HCO ₃ -F	Na-HCO ₃ -F	Na-HCO ₃	Na-HCO ₃	Na-SO ₄ -HCO ₃	Na-HCO ₃ -Cl-SO ₄

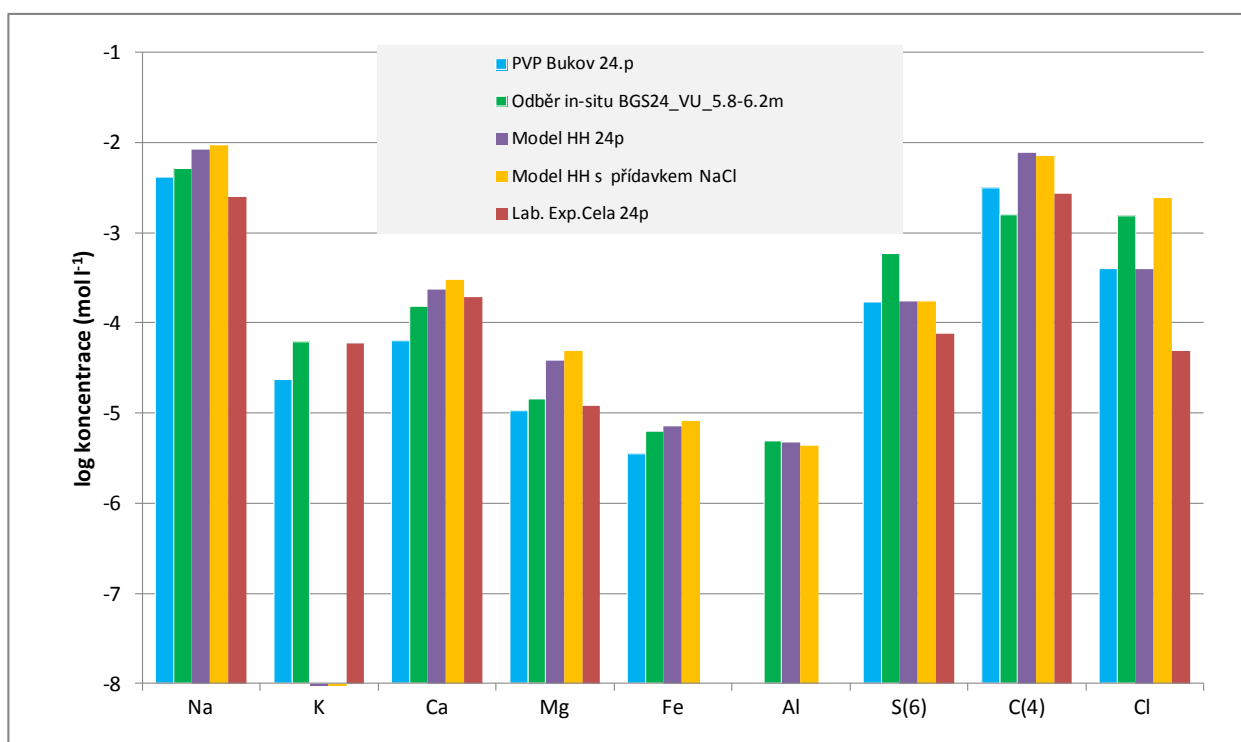


Obr. 321 Piperův diagram zobrazující složení pórových vod laboratorních experimentů (modul 1 a 2, 12. p.; modul 3 a 4, 24. p.) a in-situ odběrů (BGS12_H, 12. p.; BGS24_VU, 24. p.; číslo značí hloubku odběru)

Z výsledku odběrů in-situ a modelování vyplývá (Obr. 322 a Obr. 323), že stanovení složení pórové vody krystalinických hornin je velmi problematické, neboť v cca 20 cm vrtného jádra je při pórovitosti pod 0,5 % kolem 1,5 ml podzemní vody. Její složení bude významně ovlivněno ekvilibrací pronikajícího roztoku s hlavními i minoritními složkami hornin, vliv však mohou mít i další faktory, jako např. přítomnost fluidních inkluzí, reziduálních vod hlubokého oběhu či akcesorických minerálů pod mezí detekce. Lze předpokládat, že se složení podzemní vody bude pohybovat směrem k typu vod Na-HCO₃-Cl s narůstající chloridovou složkou.



Obr. 322 Grafická reprezentace srovnání výsledků out-diffusion experimentu s vodami reprezentujícími složení podzemní vody na 12. patře se složením vody odebrané in situ z masivu a s modelovou reprezentací ekvibrace vody s minerálními fázemi (Model HH). Model HH s přísávkem NaCl reprezentuje reakci ekvilibrovaného roztoku s fluidními inkluzemi



Obr. 323 Grafická reprezentace srovnání výsledků out-diffusion experimentu s vodami reprezentujícími složení podzemní vody na 24. patře se složením vody odebrané in situ z masivu a s modelovou reprezentací ekvibrace vody s minerálními fázemi (Model HH). Model HH s přísávkem NaCl reprezentuje reakci ekvilibrovaného roztoku s fluidními inkluzemi

Výsledky lze shrnout následovně:

- Z vyhodnocení dostupných analýz vyplývá, že laboratorní experimenty (out-diffusion) nejsou porovnatelné s odběry in-situ, přestože se jednalo o totožné prostředí (jádro vs. vrt).
- Pórové vody získané z laboratorních experimentů vykazují jako dominantní anionty uhličitany oproti pórovým vodám z in-situ experimentů, kde uhličitany doplňují chloridy a sírany. Obsah chloridů není zatím zcela prokazatelně objasněn. Mezi hlavní zdroje můžeme řadit biotit/chloritizaci, salinní fosilní vody či fluidní inkluze.
- Složení získaných pórových vod neporušených hornin z in-situ odběrů se výrazně neliší od složení podzemních vod získaných na poruchových zónách.
- Důvěryhodné složení pórových vod neporušených hornin by pak mělo být odvozené od reprezentativního počtu analýz.
- Složení pórové vody by bylo vhodné studovat pro různé typy horniny a hloubky. V případě dalšího studia doporučujeme odběr většího počtu vzorků pórové vody, především však během delšího časového období (např. několik měsíců – let). Další studium složení pórové vody by bylo vhodné pro získání reprezentativních geochemických dat využitelných pro modelování bezpečnosti HÚ.

2.3.7.6 Vodní tlakové zkoušky

Pro měření hydraulické vodivosti ve vybraných intervalech horninové matrice ve studovaných vrtech BGS24-I, VU a BGS12-H byly provedeny vodní tlakové zkoušky pro ověření neporušenosti horninové matrice a stanovení koeficientu filtrace.



Obr. 324 Modifikované zařízení na vodní tlakové zkoušky

2.3.7.6.1 Metodika vyhodnocení VTZ

Pro VTZ byla použita metoda dle Moye (1967), kdy se z rozměrů vrtu, délky posuzovaného intervalu, ustáleného průtoku vtlačované vody a použitého tlakového gradientu stanovuje koeficient filtrace dle následujícího vzorce (Moye 1967) (37):

(37)

$$k = \frac{Q \left(1 + \ln\left(\frac{l}{d}\right)\right)}{l \cdot h \cdot 2\pi}$$

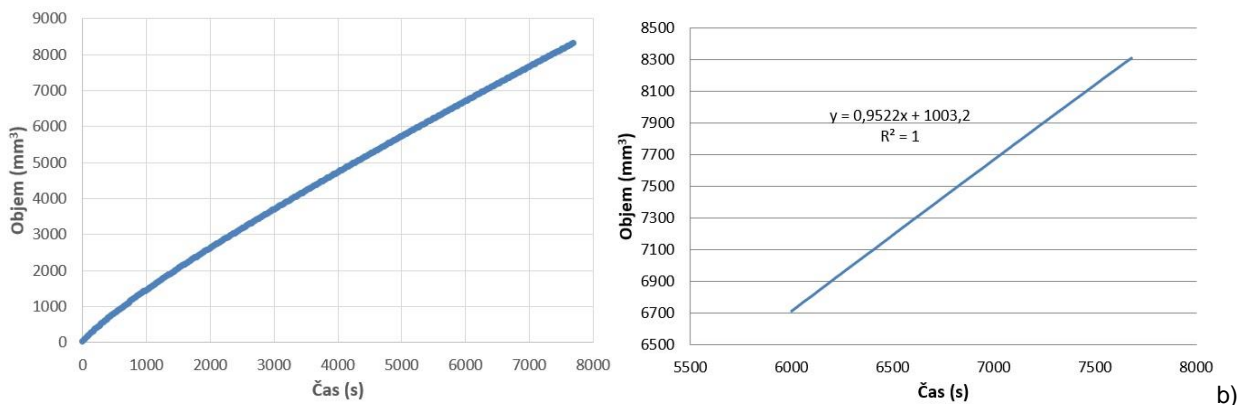
kde	k ...	koeficient filtrace ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$),
	Q ...	ustálený průtok vtlačované vody ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$),
	l ...	délka posuzovaného intervalu (m),
	d ...	průměr vrtu (m),
	h ...	tlakový gradient převedený na výšku vodního sloupce (m).

2.3.7.6.2 Postup při provádění VTZ

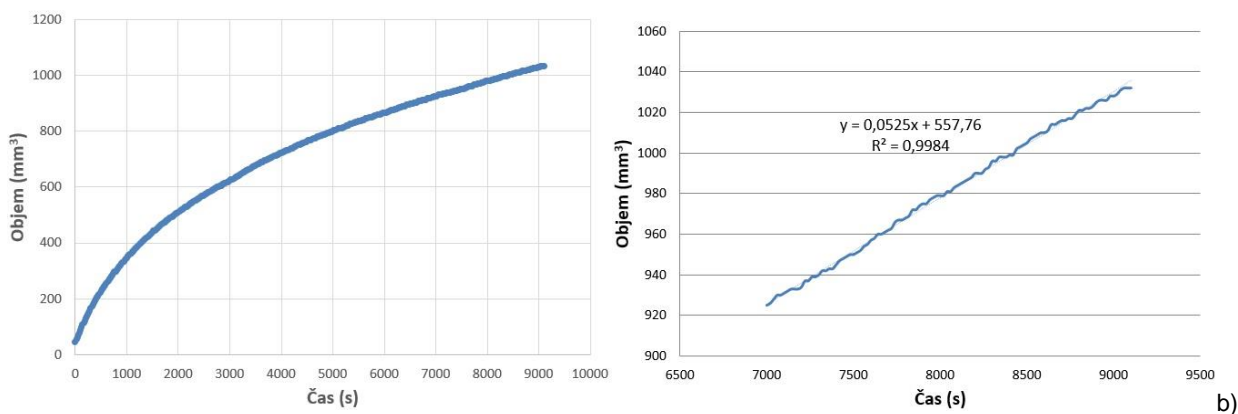
Do zvoleného vrtu byl vložen pakr se středem vyvinutým v ÚJV a byl zaveden do vybraného intervalu. Pomocí tlakové lahve se stlačeným vzduchem byl pakr utěsněn. Po utěsnění bylo zahájeno vtlačování vody do intervalu nerezovými kapilárami vedoucími do středu pakru. Pro nastavení, udržování a monitoring konstantního tlaku vody bylo použito laboratorní čerpadlo GDS ELDP. U všech posuzovaných intervalů byl použit tlakový gradient 1 MPa, pouze u intervalu BGS24_I_6,8 byl zpočátku aplikován zkušební tlak 800 kPa, který ale musel být v průběhu VTZ zvýšen na 1 MPa, protože původní tlak nebyl pro VTZ dostatečný. Nárůst vtlačeného objemu vody v čase byl sledován pomocí softwaru GDSLAB (GDS Instruments Ltd., Spojené království). Celkové grafy vývoje objemu vtlačované vody v čase u jednotlivých posuzovaných intervalů jsou zobrazeny níže (Obr. 325 až Obr. 329). VTZ byla ukončena poté, co byl po dostatečně dlouhou dobu pozorován ustálený průtok vody (tj. graf po dostatečně dlouhou dobu vykazoval lineární trend). Ustálený průtok vody byl poté vypočítán z lineární části grafů pomocí vztahu (12):

$$Q = \frac{V}{t} \quad (38)$$

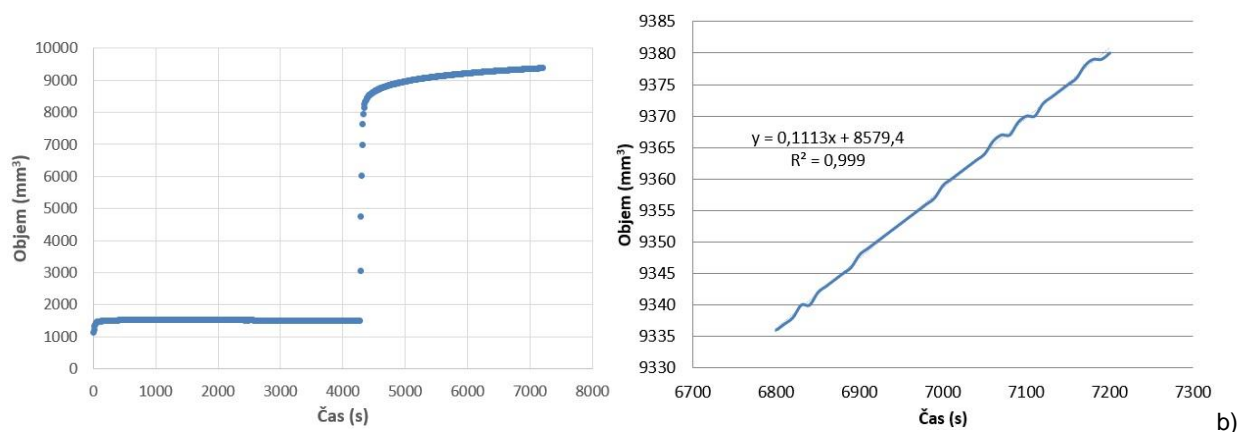
kde	Q ...	ustálený průtok vtlačované vody ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$),
	V ...	objem vody vtlačený do intervalu při ustáleném průtoku (m^3),
	t ...	doba trvání ustáleného průtoku vody (s).



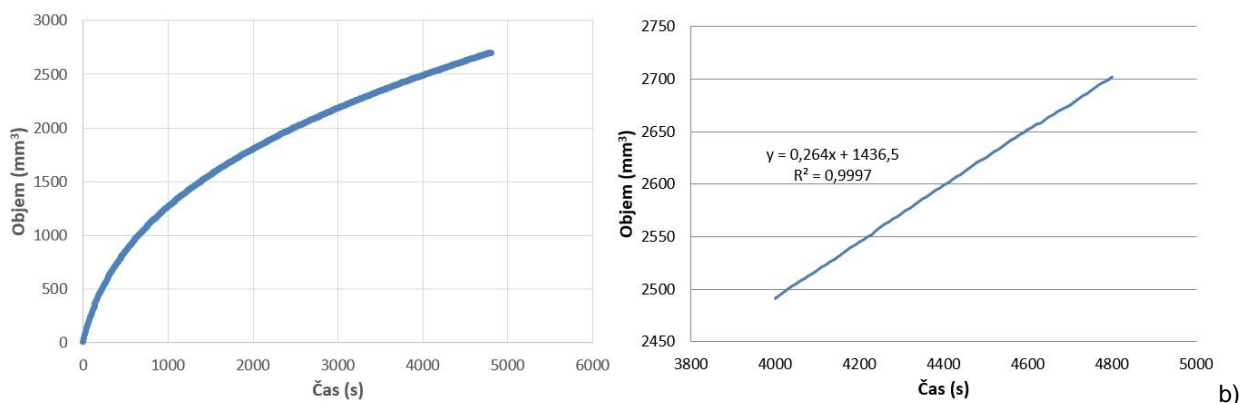
Obr. 325 Celkový vývoj objemu vtačované vody v čase, vrt BGS12_7,44, b) Vývoj objemu vtačované vody v čase – lineární část



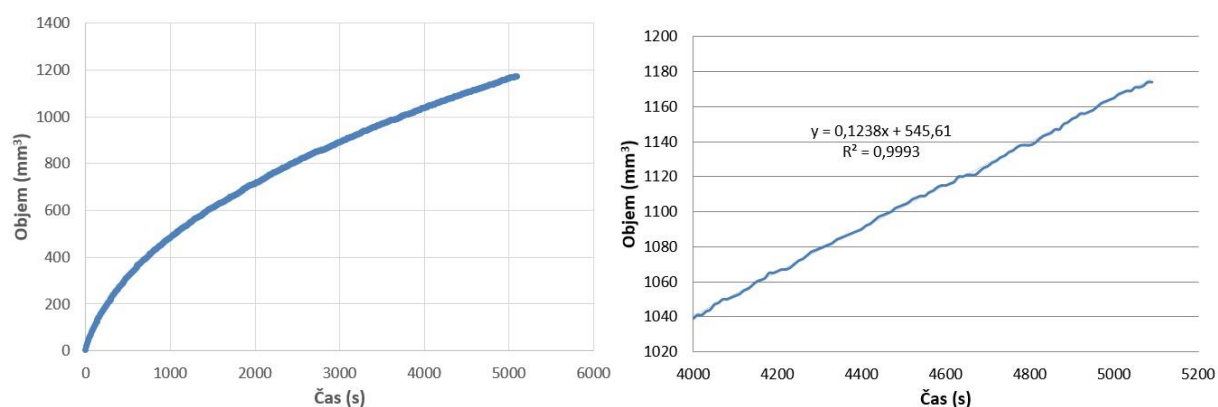
Obr. 326 Celkový vývoj objemu vtačované vody v čase, vrt BGS12_8,00, b) Vývoj objemu vtačované vody v čase – lineární část



Obr. 327 Celkový vývoj objemu vtačované vody v čase, vrt BGS24_I_6,80, b) vývoj objemu vtačované vody v čase – lineární část



Obr. 328 Celkový vývoj objemu vtačované vody v čase, vrt BGS24_VU_5,20, b) vývoj objemu vtačované vody v čase – lineární část



Obr. 329 Celkový vývoj objemu vtačované vody v čase, vrt BGS24_VU_6,00, b) vývoj objemu vtačované vody v čase – lineární část

2.3.7.6.3 Výsledky VTZ

Koeficienty filtrace dle Moye (1967) jednotlivých posuzovaných intervalů jsou shrnuty v tabulce níže (Tab. 138).

Tab. 138 Koeficienty filtrace dle Moye (1967) posuzovaných intervalů

Vrt	Koeficient filtrace dle Moye k ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
BGS12_H_7,44	$9,9\cdot 10^{-12}$
BGS12_H_8,00	$5,5\cdot 10^{-13}$
BGS24_I_6,80	$1,2\cdot 10^{-12}$
BGS24_VU_5,20	$2,7\cdot 10^{-12}$
BGS24_VU_6	$1,3\cdot 10^{-12}$

Byla otestována a ověřena navržená aparatura pro VTZ nízko propustných částí neporušené horninové matrice. Pro další měření by bylo vhodné pro takto málo propustné horniny provádět měření tlaku v intervalu před měřením a současně prodloužit časy měření ve studovaném intervalu.

2.4 Výzkumné práce in-situ

2.4.1 Stanovení FMV a geotechnických vlastností in-situ

Geomechanické a geotechnické parametry hornin a horninového masivu (HM) byly realizovány na stanovených pěti geotechnických stanicích lokalizovaných na 12., 18., 20. a 24. patře. Geotechnické stanice (GS) byly umístěny v různých vzdálenostech od zájmové tektonické struktury R1 (první zóna) pro potřebu parametrického sledování geotechnických vlastností HM in situ. Geomechanické a geotechnické vlastnosti HM stanovené v podmínkách in-situ byly realizovány v následujícím rozsahu:

- stanovení kvality hornin vrtného jádra pomocí parametru RQD,
- stanovení porušení horninového masivu z analýz záznamů stěn vrtů,
- strukturní mapování stěn chodeb v okolí GS,
- měření odrazivosti povrchu horniny Schmidovým kladívkem,
- měření modulu přetvárnosti horninového masivu in-situ metodou Goodman Jack,
- přímým měřením napětí horninového masivu metodou hydraulického štěpení stěn vrtu (hydrofracturing).

Znalosti o vlastnostech horninového masivu in situ jsou pak jednou ze zásadních informací také v procesu přípravy hlubinného úložiště (HÚ). Požadavek na hodnocení FMV horninového prostředí pro HÚ vyplývá z § 18, odst. 2, písm. l) vyhlášky SÚJB č. 378/2016 Sb. a je důležitý zejména z hlediska proveditelnosti úložiště. Upřesnění tohoto požadavku je pak obsaženo v metodickém pokynu MP.22 (SÚRAO 2017), ke kvantifikaci mezních hodnot FMV lze orientačně využít doporučení definovaných Anderssonem et al. (2000).

2.4.1.1 Stanovení kvality hornin vrtného jádra pomocí parametru RQD

Index RQD (Rock Quality Designation) je parametr používaný již více než 50 let jako jeden z možných ukazatelů kvality horninového masivu. Umožňuje velmi jednoduchý popis stavu vrtného jádra pomocí měření procentuálního podílu “dobrých” hornin ve zvoleném délkovém úseku jádra (Deere 1989). Konkrétně je RQD definováno jako procentuální podíl součtů délek neporušených kusů vrtného jádra rovných nebo delších než 0,1 m k celkové (zvolené) délce návrtu (Deere et al. 1967).

Ačkoliv bylo RQD původně vyvinuto pro aplikace ve stavitelství, a to zejména pro popis stavu horninového masivu při výstavbě tunelů, velmi rychle bylo jeho používání převzato do oblastí hornictví, mechaniky hornin, inženýrské geologie a geotechniky (např. Merritt 1972; Hoek a Brown 1980). Zřejmě největší výhodou použití RQD je jeho jednoduchost, je totiž velmi snadno měřitelné a jeho stanovení nevyžaduje žádné speciální vybavení. Do výpočtu parametru RQD jsou zahrnovány pouze intaktní kusy vrtného jádra o délce 10 cm nebo větší. Úseky bez výnosu jádra, silně zvětralé a rozpadlé fragmenty jádra a rozpukané úseky nejsou při výpočtu RQD brány v úvahu. Jeho kalkulace je prováděna přímo v terénu geologem, popisujícím vrtné jádro. V současnosti je RQD standardně používáno jako jeden ze základních vstupních parametrů v některých systémech pro klasifikaci kvality horninového masivu jako jsou např. RMR, Q nebo GSI (Barton et al. 1974; Bieniawski 1976, 1989; Hoek 1994; Hoek et al. 1995). V poslední době však někteří autoři, například s odkazem na skutečnost, že RQD je v řadě zemí světa používáno

v rozporu s původní definicí a filozofií (Pells et al. 2017), jej považují za překonanou historickou záležitost a doporučují jeho nahrazení v systémech RMR, Q a GSI jinými parametry jako je např. četnost diskontinuit.

Podle výše uvedené metodiky byl parametr RQD stanoven na vrtném jádře celkem 24 geotechnických vrtů, a to zvláště pro každý metr délky vrtného jádra každého z vrtů. Celková délka analyzovaného vrtného jádra těchto 24 geotechnických vrtů dosahovala přibližně 550 metrů. Výsledky stanovení parametru RQD u jednotlivých vrtů jsou přehlednou formou uvedeny v Tab. 139. Z hodnot RQD pro jednotlivé metrové úseky byly sestaveny histogramy kvality hornin jádra a RQD profily pro jednotlivé analyzované vrty, které jsou prezentovány v elektronické příloze (Elektronická příloha 27). Lokalizace geotechnických vrtů, na jejichž vrtném jádře byl stanovován parametr RQD vyplývá z výseků situačních map jednotlivých studovaných pater dolu Rožná I uvedených v kap. 1.2.

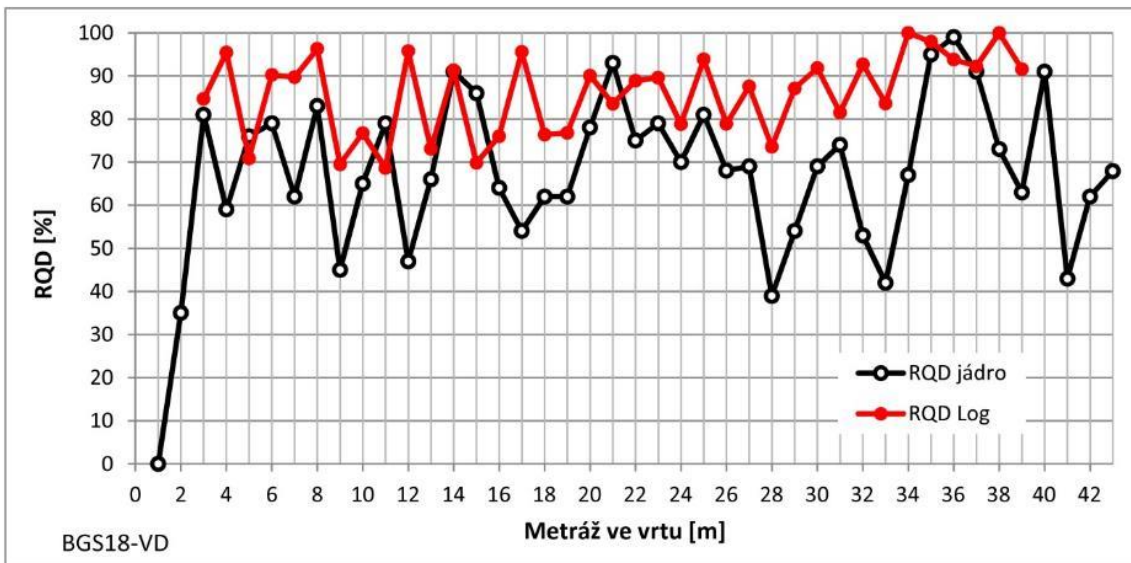
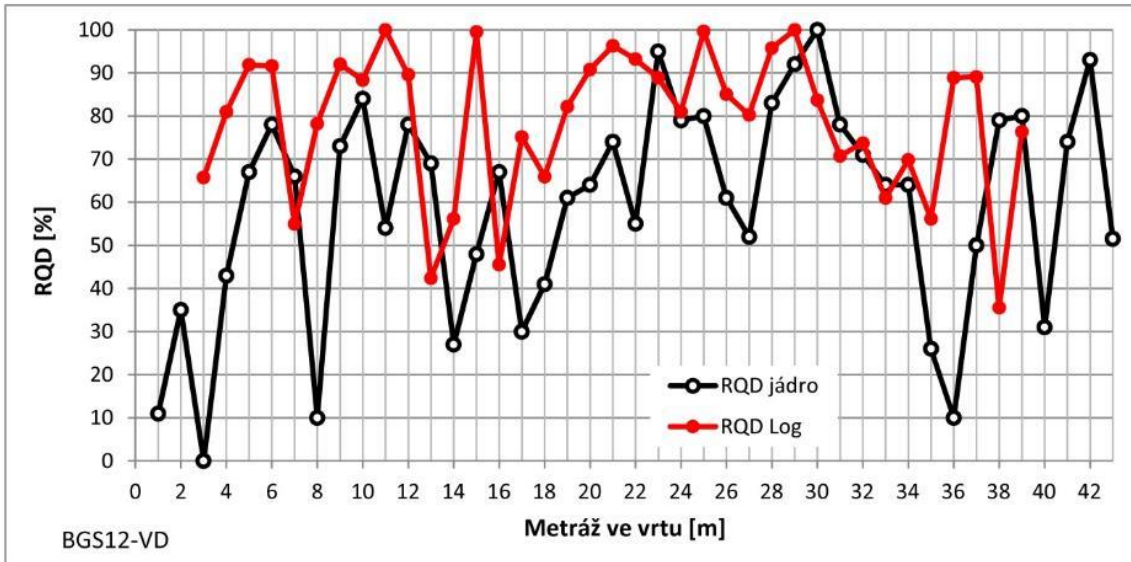
Tab. 139 Procentuální rozdělení kvality hornin vrtného jádra analyzovaných geotechnických vrtů do jednotlivých tříd kvality podle indexu RQD

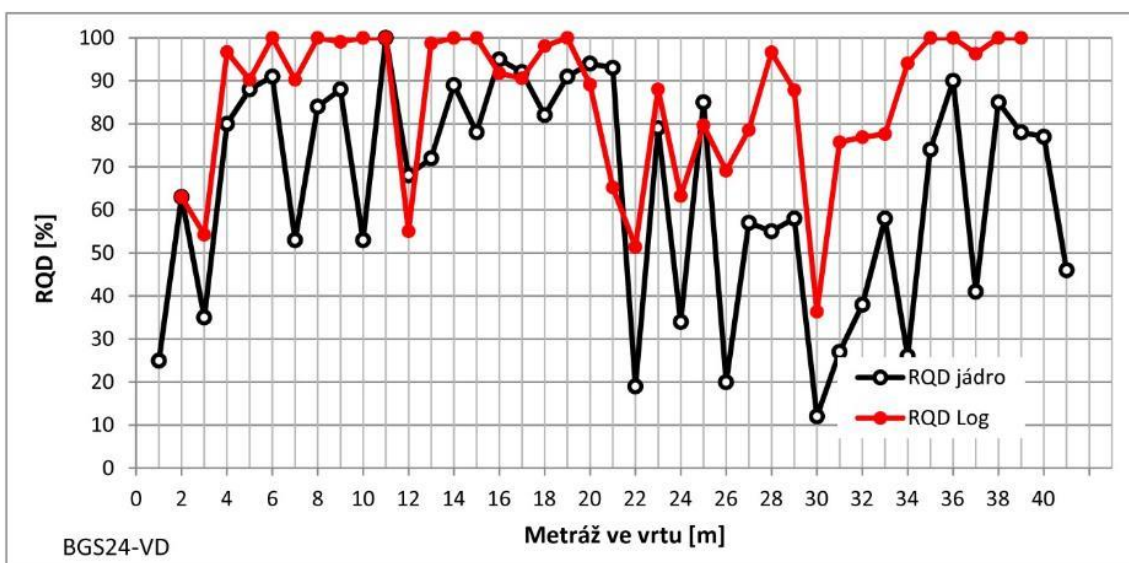
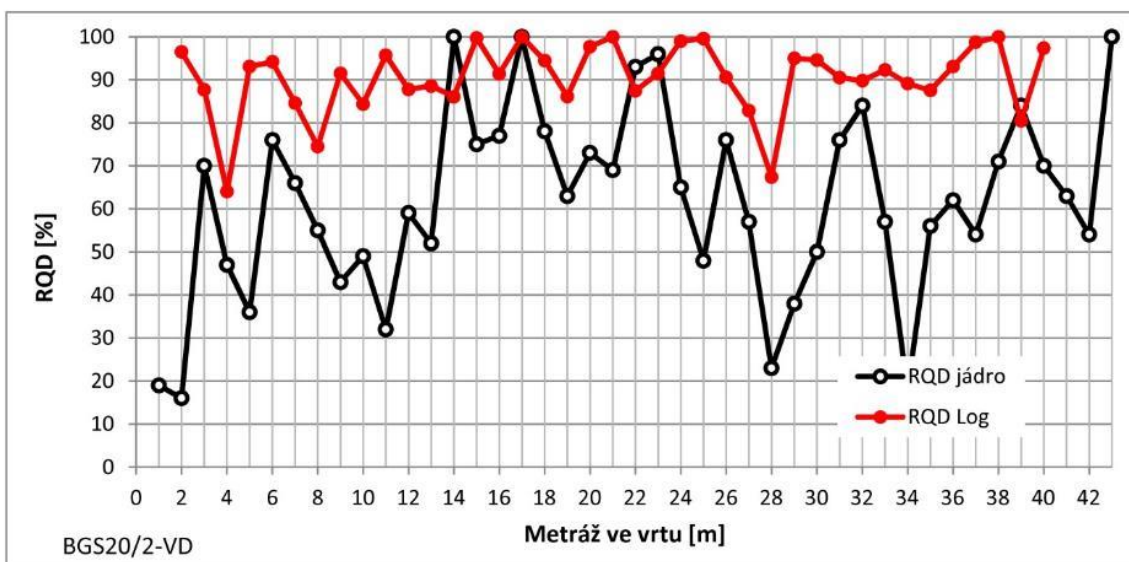
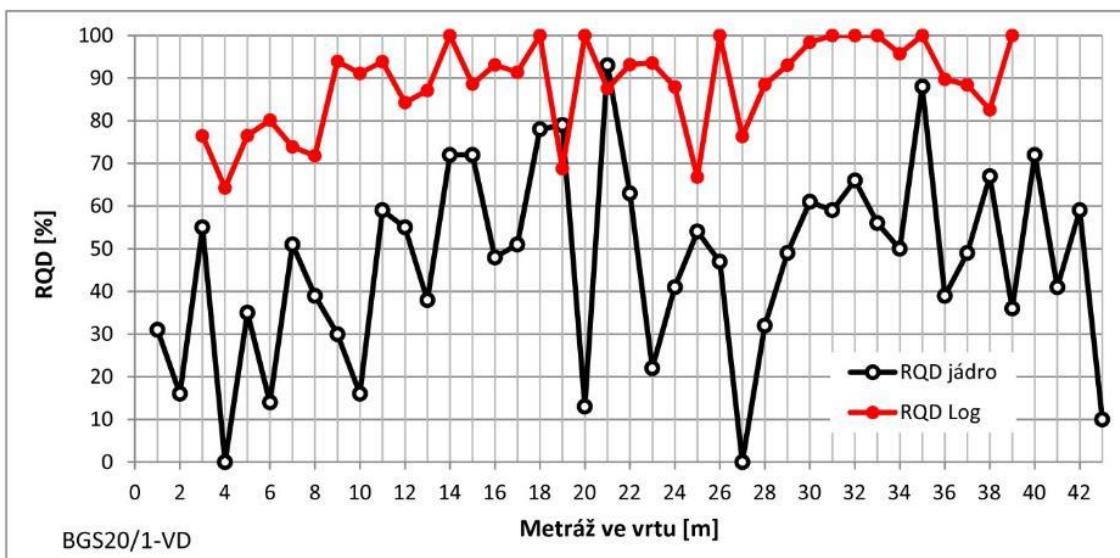
Vrt	Velmi nízká kvalita [%]	Nízká kvalita [%]	Střední kvalita [%]	Dobrá kvalita [%]	Výborná kvalita [%]	Průměrná hodnota RQD pro celý vrt [%]
BGS12-H	3	13	23	32	29	76
BGS12-I	0	10	45	45	0	73
BGS12-VD	9	21	40	21	9	59
BGS12-VU	13	6	44	31	6	61
BGS18-H	6	25	31	19	19	65
BGS18-I	6	25	32	31	6	61
BGS18-VD	2	14	49	21	14	67
BGS18-VU	12	19	13	44	12	63
BGS20/1-H	13	44	30	13	0	48
BGS20/1-I	75	13	12	0	0	19
BGS20/1-VD	19	35	37	7	2	44
BGS20/1-VU	67	22	0	11	0	27
BGS20/2-H	6	25	34	19	16	63

Vrt	Velmi nízká kvalita [%]	Nízká kvalita [%]	Střední kvalita [%]	Dobrá kvalita [%]	Výborná kvalita [%]	Průměrná hodnota RQD pro celý vrt [%]
BGS20/2-I	13	6	68	13	0	59
BGS20/2-VD	9	19	44	16	12	62
BGS20/2-VU	6	38	31	25	0	54
EDZ20-HA	37	44	13	6	0	32
EDZ20-HB	18	24	35	17	6	52
EDZ20-HC	6	13	50	19	12	65
EDZ20-HD	0	6	38	50	6	76
BGS24-H	6	25	44	6	19	63
BGS24-I	0	13	31	37	19	74
BGS24-VD	10	17	24	32	17	65
BGS24-VU	6	13	25	56	0	71

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

Přes své nesporné výhody je RQD omezeno celou řadou limitujících skutečností. Zásadními faktory ovlivňujícími výpočet RQD jsou především celková (zvolená) délka vrtného jádra, orientace vrtu vůči generálním strukturním prvkům horninového masívu, průměr vrtu a použitá technologie vrtání (Priest a Hudson 1976; Jauch 2000; Choi a Park 2004; Li et al. 2009). Měření a výpočet RQD může být ovlivněn také subjektivním přístupem geologa provádějícího popis vrtu. Dodržení správné metodiky měření je problematické zejména v případě dlouhých kusů jádra, podélně porušených trhlinami, které neprotínají středovou linii – osu jádra (Jauch 2000). Jedním ze základních úskalí a velmi významným zdrojem možných chyb při stanovování RQD na vrtném jádře je rozlišení trhlin představujících přirozené plochy diskontinuity v horninovém masívu od porušení, které bylo vytvořeno během procesu vrtání a následné manipulace s vrtným jádrem. Porušenost samotného vrtného jádra je tedy značně ovlivněna technologií vrtání. Z provedených analýz orientovaných skenů stěn vrtů zaznamenaných pomocí karotážních sond OPTV (Optical TeleViewer) a HiRAT (High Resolution Acoustic Televiewer) vyplývá, že RQD stanovené na vrtném jádře je u většiny vrtů výrazně nižší než RQD určené pomocí struktur nespojitosti interpretovaných na stěnách vrtů (Obr. 330). Tato zjištění jsou plně v souladu s poznatky z jiných partií dolu Rožná (Vavro et al. 2015).





Obr. 330 Srovnání RQD indexu stanovených na vrtném jádře s RQD indexy stanovenými ze skenů stěn úpadních vrtů pomocí sond OPTV a HiRAT

2.4.1.2 Stanovení porušenosti horninového masivu z analýz záznamů stěn vrtů

Studium porušenosti horninového masivu bylo realizováno na základě záznamu stěn jádrových vrtů o průměru 76 mm, které byly součástí pěti geotechnických stanic lokalizovaných na 12., 18., 20. a 24. patře a ve vrtech určených ke studiu EDZ na 20. patře. V celkem devatenácti vrtech byla provedena videoinspekce pomocí inspekčního kamerového systému PipeCam 40 Expert fy. CEL-TEC. V horizontálních vrtech geotechnických stanic (BGS12-H, BGS18-H, BGS20/1-H, BGS20/2-H, BGS24-H) a ve vrtech určených ke studiu EDZ (EDZ-HB, EDZ-HC, EDZ-HD) byl proveden orientovaný záznam stěn pomocí optického televizoru (OPTV - Optical TeleViewer). V úpadně vedených vrtech (BGS12-VD, BGS18-VD, BGS20/1-VD, BGS20/2-VD, BGS24-VD) byl optický záznam doplněn akustickým televizorem HiRAT (High Resolution Acoustic Televiewer). Sondy HiRAT a OPTV jsou součástí karotážní aparatury fy. Robertson Geologging. Aparatura má elektrický vrátek se čtyřžilovým karotážním kabelem, který přenáší data zaznamenaná sondami prostřednictvím dataloggeru do počítače (Obr. 331). Zaznamenaná data byla následně zpracována a analyzována v programu WellCad (ALT Luxemburg). Výčet všech provedených prací a jejich objemů udává Tab. 140.



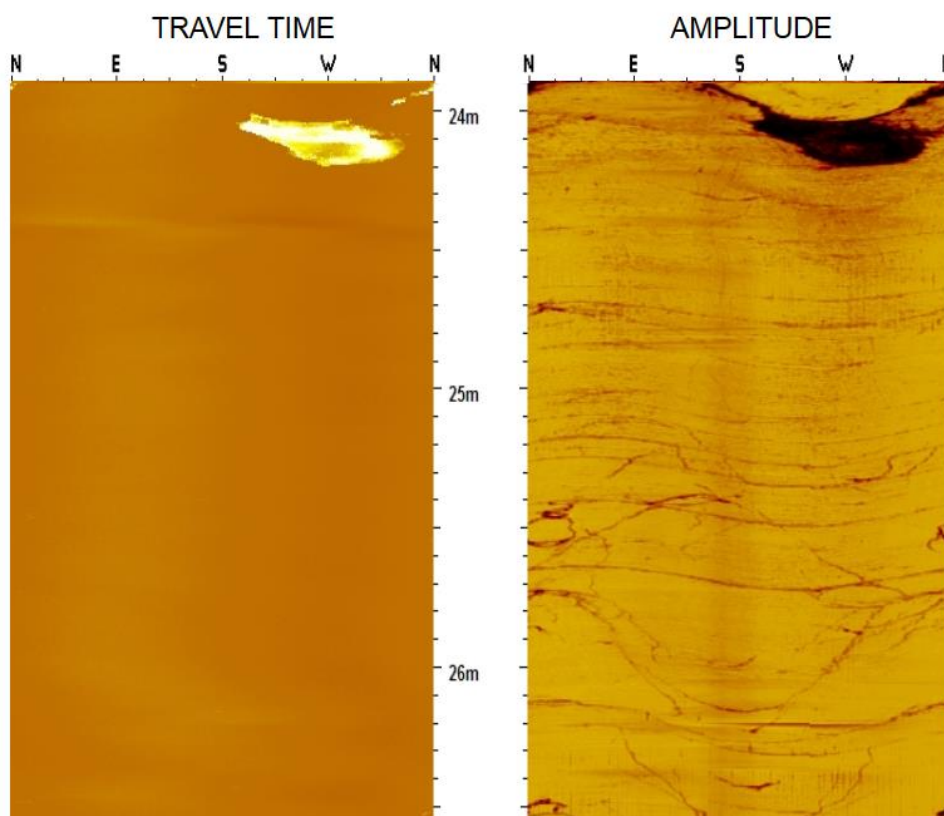
Obr. 331 Karotážní aparatura umístěná u úpadního vrtu BGS18-VD

Tab. 140 Přehled provedených geotechnických měření in-situ v geotechnických vrtech

Geotechnická stanice	Označení vrtu	Délka vrtu [m]	Video-inspekce	Akustická kamera (HiRAT)	Optická kamera (OPTV)	Měření napětí metodou hydrofrack
GS12	BGS12-VU	15,0	x	-	-	-
	BGS12-I	19,1	x	-	-	-
	BGS12-H	30,0	x	-	x	-
	BGS12-VD	40,2	-	x	x	x
GS18	BGS18-VU	14,8	x	-	-	-
	BGS18-I	15,8	x	-	-	-
	BGS18-H	15,5	x	-	x	-
	BGS18-VD	40,2	-	x	x	x
GS20/1	BGS20/1-VU	14,3	x	-	-	-
	BGS20/1-I	15,3	x	-	-	-
	BGS20/1-H	15,4	x	-	x	-
	BGS20/1-VD	39,1	-	x	x	x
GS20/2	BGS20/2-VU	15,1	x	-	-	-
	BGS20/2-I	14,9	x	-	-	-
	BGS20/2-H	30,5	x	-	x	-
	BGS20/2-VD	40,2	-	x	x	x
GS24	BGS24-VU	15,2	x	-	-	-
	BGS24-I	15,3	x	-	-	-
	BGS24-H	15,4	x	-	x	-
	BGS24-VD	39,1	-	x	x	x
EDZ 20. patro	EDZ20-HA	15,5	x	-	nestabilní podmínky	-
	EDZ20-HB	15,4	x	-	x	-
	EDZ20-HC	15,4	x	-	x	-
	EDZ20-HD	15,5	x	-	x	-
Celkem	24 vrtů	522,2 m	323,4 m	198,8 m	351,9 m	198,8 m

2.4.1.2.1 Stanovení porušenosti horninového masivu z analýz záznamů optického a akustického televizoru

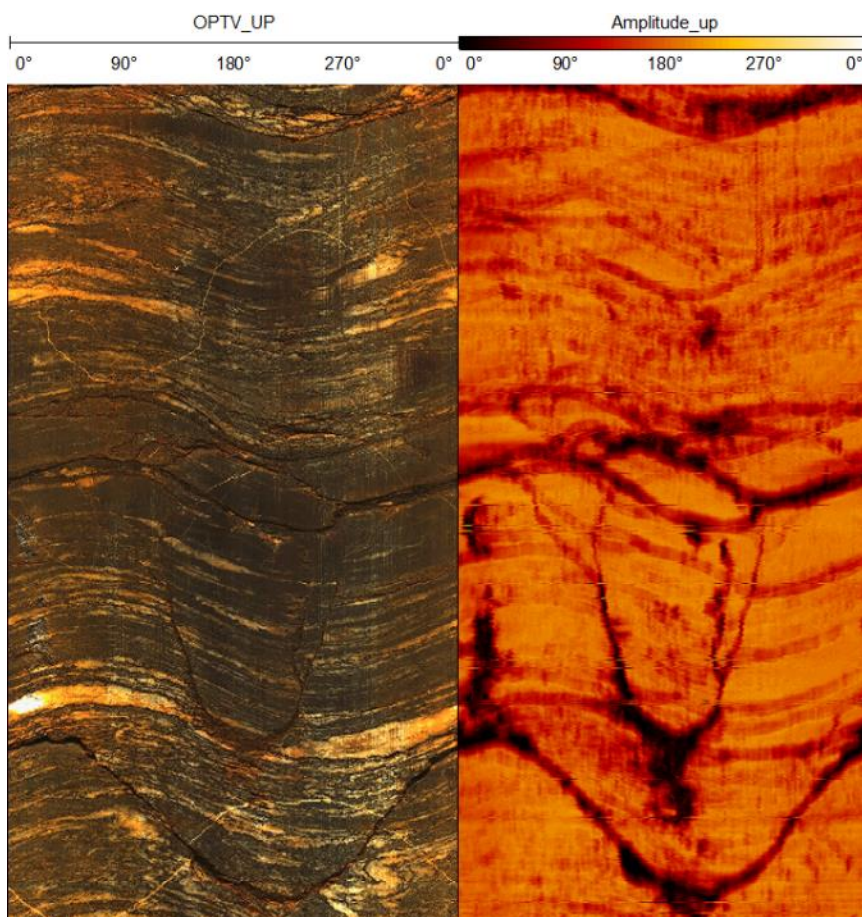
Metoda akustické karotáže (HiRAT) představuje jednu z doporučených metod ISRM pro oblast geofyzikálních karotážních metod prováděných ve vrtech (ISRM 1981). Jejím výsledkem je získání orientovaného virtuálního obrazu stěn vrtu (Obr. 332) z dat ultrazvukové sondy. Kromě toho ovšem tato metoda umožňuje vyhodnotit také tvar průřezu vrtu, litologické členění a určit prostorovou orientaci primárních i sekundárních strukturních prvků, protínajících profil vrtu. Informace o prostorové orientaci (směru, směru úklonu, velikosti úklonu a hloubce uložení) geologických struktur jsou jednou z nesporných výhod akustické karotáže, umožňující navíc provedení následného statistického vyhodnocení. Tato metoda je založena na sledování parametrů impulsního ultrazvukového signálu (0,5–1,5 MHz), generovaných piezoelektrickým vysílačem a odrážených od stěn vrtu. Metoda vyžaduje úpadní vrtvy vyplněné vodou nebo jiným médiem se známou hodnotou rychlosti šíření zvuku, přičemž výhodou je možnost jejího použití i v zakaleném vodním sloupci. Skenování stěn úpadních vrtů (BGS12-VD, BGS18-VD, BGS20/1-VD, BGS20/2-VD, BGS24-VD) bylo prováděno rotační hlavou v krocích po 1 stupni s frekvencí 20,66 otáček za sekundu. Svislý posun sondy ve vrtu byl nastaven na $0,5 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, což představuje jednu otočku hlavy (360 záměrů) na posun sondy o 0,4 mm.



Obr. 332 Záznam z akustického televizoru HiRAT – dva orientované obrazy stěn části vrtu BS18-VD (čas a amplituda odraženého signálu)

Stejně jako ultrazvuková karotáž, ovšem s použitím viditelné části spektra, optická videokarotáž (OPTV) poskytuje kontinuální, orientovaný, digitální 360° obraz stěn vrtu s vysokým stupněm rozlišení (Obr. 333). Metoda je tedy založena na rekonstrukci orientovaného obrazu stěn vrtu ze snímků optické kamery. Na základě takto získaných dat jsou pak vytvořeny rozbalené,

prostorově orientované virtuální obrazy stěn vrtu. Rozlišovací schopnost zařízení se odvíjí od rychlosti posuvu sondy ve vrtu. Obdobně jako v případě metody HiRAT, také OPTV umožňuje získat informace o směru úklonu a velikosti úklonu foliačních ploch, ploch zlomů a puklin, stejně tak údaje o frekvenci a stavu (otevřená, zavřená, míra otevření, vyplněná vyhojená apod.) trhlin. Nespornou výhodou, zejména pro světle zbarvené horniny, je skutečná barva optického obrazu. V tmavých horninách naopak mohou nastat problémy s odlišením tmavě zbarvených zón porušení od ostatních strukturních prvků, především foliace (Williams a Johnson 2004). OPTV proto vyžaduje vrty s opticky čistým prostředím mezi kamerou a stěnou vrtu, tj. vyplněné čistou vodou nebo vzduchem, naopak neprůhledný vodní sloupec, rozptýlená suspence vrtného kalu, chemické sraženiny nebo povlak na stěnách vrtu silně ovlivňují kvalitu OPTV obrazu. Z výše uvedených důvodů je proto vhodné záznamy akustického a optického televizoru při následném vyhodnocení vzájemně kombinovat a korelovat.



Obr. 333 Rozbalený obraz stěn vrtu získaný pomocí OPTV (vlevo) doplněný o obraz získaný z akustického televizoru HiRAT - vybraná část vrtu BGS20/2-VD

V souladu s „Dictionary of geological terms“ (1962) jsou všechny diskontinuity vzniklé působením mechanického namáhání v horninovém masivu označovány jako dislokace (fracture). V tomto pojetí dislokace zahrnují pukliny, trhliny a zlomy. Dislokace jsou trojrozměrné plochy nespojitosti, které lze charakterizovat jejich délkou, průběžností, tloušťkou (mocností), povrchem, alterací a jejich výplní. Vzhledem k povaze záznamů poskytnutých sondami OPTV a HiRAT bylo na identifikovatelných dislokacích hodnocena zejména jejich mocnost a případné sekundární

vyplnění. Díky orientovanému záznamu byla u interpretovaných dislokací navíc určena jejich hloubka a prostorová orientace (úklon a směr úklonu).

Na základě vzájemné vzdálenosti stěn lze diskontinuity dle Beniaowského (1984) rozdělit do následujících tříd:

- velmi sevřené (very tight) <0,1 mm,
- sevřené (tight) 0,1–0,5 mm,
- středně otevřené (moderately open) 0,5–2,5 mm,
- otevřené (open) 2,5–10 mm,
- velmi otevřené (very open) 10–25 mm.

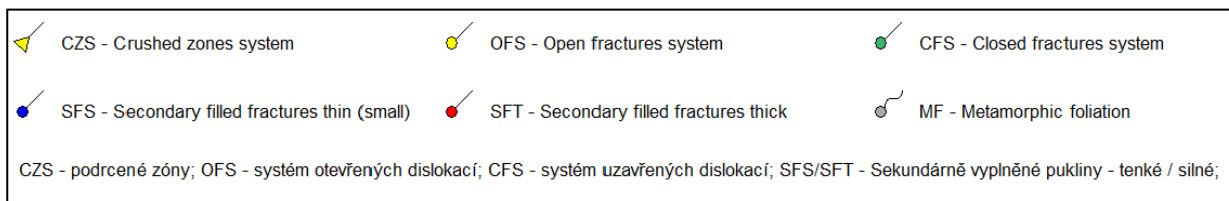
Pro účely interpretace záznamů pořízených sondami HiRAT a OPTV byla v rámci zjednodušení přijata klasifikace interpretovaných ploch nespojitosti na otevřené (>0,5 mm) a uzavřené (<0,5 mm).

Veškerý materiál vyskytující se mezi stěnami puklin je definován jako jejich výplň. Na základě přítomnosti či nepřítomnosti výplně bylo v rámci metamorfovaných hornin na dole Rožná použito rozdělení na sekundárně vyplněné pukliny „tenké“ (thin) a „silné“ (thick). Pukliny a zlomy vyplněné drceným horninovým materiálem byly interpretovány jako drcené zóny.

Na základě výše uvedeného bylo v logovaných záznamech interpretováno následujících šest typů systémů diskontinuit:

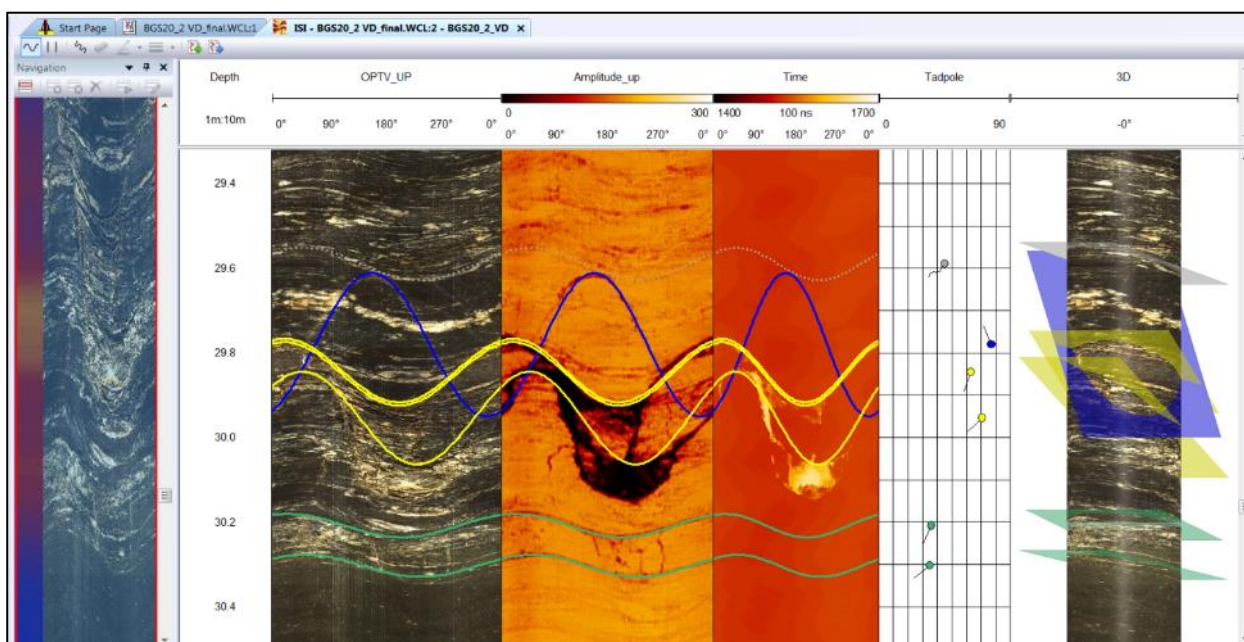
- Podrcené zóny označené jako CZS (Crushed Zones System).
- Systém otevřených dislokací označené jako OFS (Open Fractures System).
- Systém uzavřených dislokací označené jako CFS (Close Fractures System).
- Sekundárně vyplněné pukliny – tenké označené jako SFS (Secondary Filled Fractures Thin-Small).
- Sekundárně vyplněné pukliny – silné označené jako SFT (Secondary Filled Fractures Thick).
- Metamorfní foliace označené jako MF (Metamorphic Foliation).

Barevné rozlišení jednotlivých typů interpretovaných struktur včetně použitých značek je zřejmý z Obr. 334.



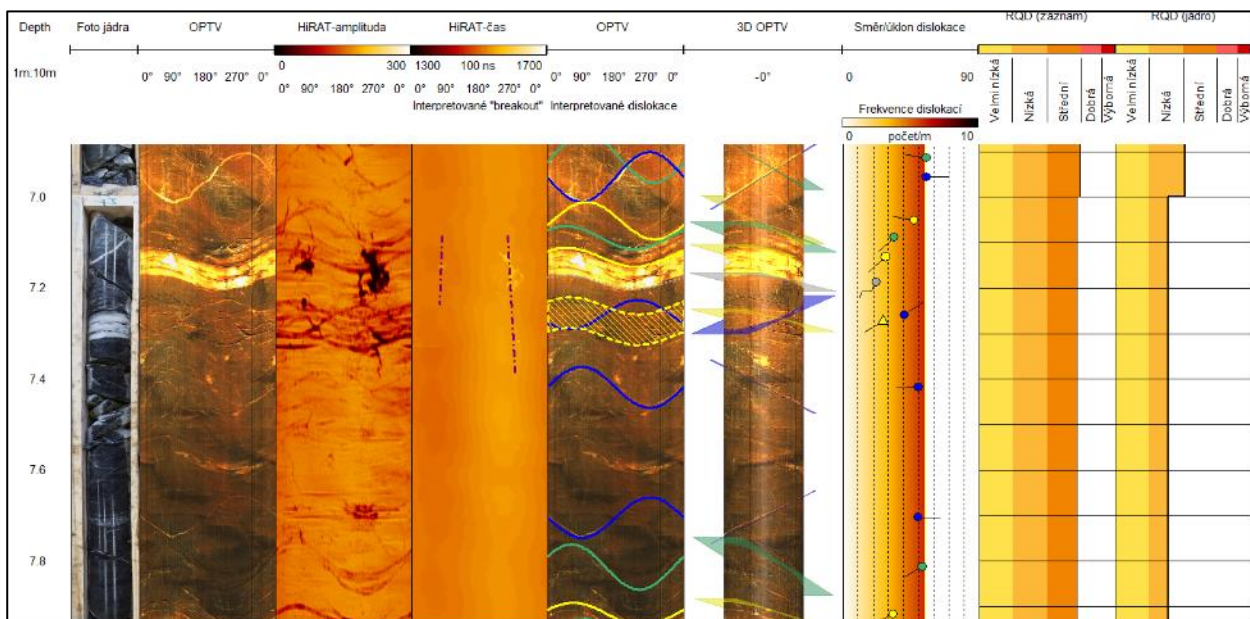
Obr. 334 Použitá klasifikace interpretovaných struktur v logovaných záznamech ze sond HiRAT a OPTV

Naměřené orientované záznamy ze sond HiRAT a OPTV (zdrojová data viz Elektronická příloha 156) jsou zpracovány v softwaru WellCAD pro zpracování karotážních dat (ALT – Luxemburg). Vyhodnocení puklin a ploch nespojitosti, včetně určení jejich sklonu, směru a hloubky jsou zpracována ve speciálním modulu programu WellCAD (Obr. 335). V případě záznamu z akustického televizoru HiRAT jsou změřeny dva orientované záznamy. První záznam představuje čas, za který odražená vlna překoná vzdálenost mezi sondou a stěnou vrtu. Na základě tohoto záznamu lze interpretovat ve vrtu například nadvýlomy, otevřené trhliny, tzv. „breakouty“, to znamená jevy, které způsobují změnu tvaru vrtu po obvodě jeho stěn. Druhý záznam představuje informaci o amplitudě odražené vlny. Nespojitosti struktury, popř. litologické jednotky s různou odrazivostí, se projeví změnou hodnoty této amplitudy. Rovinné struktury tak mají v orientovaném obrazu amplitudy odražené vlny tvar sinusoid. Charakter a pozice těchto sinusoid pak umožňuje provést popis rovinných ploch nespojitostí (hloubka, sklon, orientace, rozevření). Orientovaný optický záznam ze sondy OPTV vhodně doplňuje záznam z akustického televizoru a umožňuje snadněji interpretovat nasnímané diskontinuity. Podobně i zde se rovinné struktury zobrazují v orientovaném obrazu jako sinusoidy. V horizontálních vrtech z důvodu nepřítomnosti vhodného přenosového média (voda) byl použit pro orientovaný záznam pouze optický televizor OPTV.



Obr. 335 Příklad vyhodnocení původu a prostorové distribuce diskontinuit na základě orientovaných obrazů ze sond HiRAT a OPTV (vybraná část vrtu BGS20/2-VD)

Interpretovaná data ze všech skenovaných vrtů jsou shrnuta do jednotného formuláře (profilu vrtu) vytvořeného v softwarovém prostředí WellCAD (viz Elektronická příloha 25). Součástí formuláře (Obr. 336) jsou orientované záznamy pořízené sondou OPTV, dva orientované záznamy (amplituda a čas) pořízené sondou HiRAT, grafické znázornění interpretovaných struktur zobrazené ve 2D a 3D pohledu, směr a úklon interpretovaných struktur v grafu (tzv. Tadpole diagram) a foto jádra za účelem vzájemné korelace struktur. Na základě interpretovaných struktur byly konstruovány grafy RQD. Do výpočtu byly zahrnuty potenciální plochy nespojitosti interpretované jako systém otevřených dislokací (OFS), podrcené zóny (CZS) a systém uzavřených dislokací (CFS). Pro názornost jsou indexy RQD ze záznamů v uvedeném formuláři srovnány s RQD indexy stanovených na vrtném jádře. Vzájemné srovnání RQD indexů ze záznamů a vrtného jádra jsou součástí kapitoly 2.4.1.1 a 2.4.7. Z interpretovaných ploch nespojitosti (OFS+CZS+SFS) jsou kalkulovány jejich četnost na jeden metr záznamu. Hodnoty RQD indexů, stejně tak jako četnost dislokací interpretovaných struktur jsou významným podkladem k dalším analýzám, souvisejícím s charakterizací EDZ a interpretací výsledků s ohledem na vliv první zóny. V rámci vyhodnocení byly také identifikovány zóny porušení vlivem působení horizontálního napětí tzv. „breakout“. Tyto jsou významným podkladem pro verifikaci výsledků interpretovaných napěťových polí stanovených jinými metodami, např. metodou hydraulického štěpení nebo metodou odlehčeného vrtného jádra, tzv. overcoring (viz kap. 2.4.4 Napěťový stav horninového masivu).



Obr. 336 Formulář zpracovaných a vyhodnocených dat ze záznamů sond OPTV a HiRAT (vybraná část vrtu BGS20/1-VD)

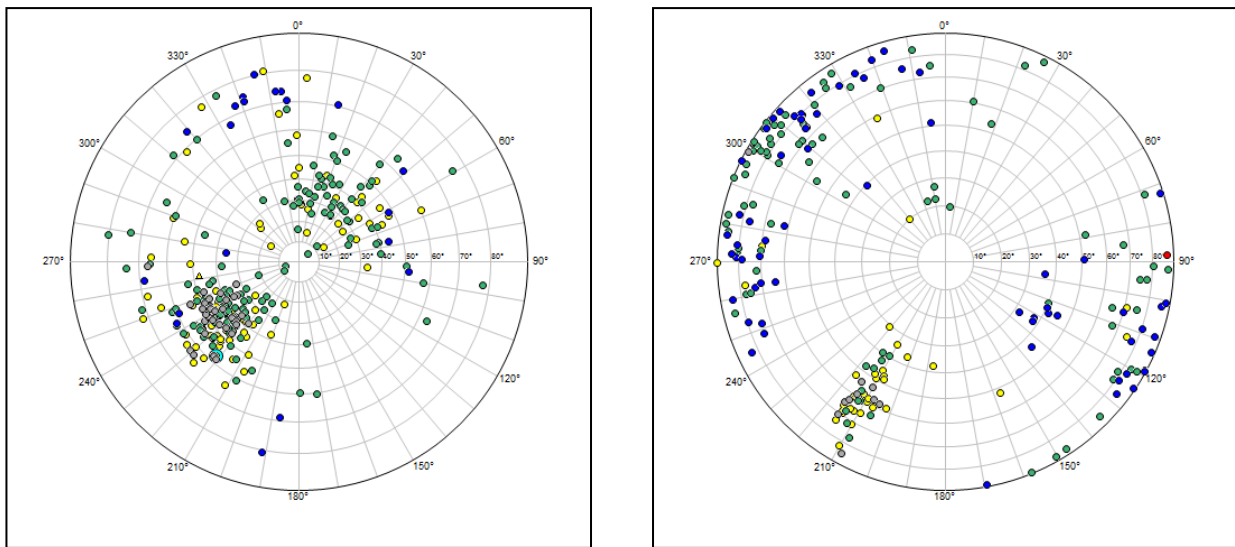
Součástí vyhodnocení je tabulka ve formátu *.xls se seznamem interpretovaných strukturálních prvků identifikovatelných ze záznamů OPTV a HiRAT (viz Elektronická příloha 29). Je zde uvedena jejich poloha – hloubka (Depth), azimut úklonu (Azimuth), úklon (Dip), případně také mocností porušených pásem (Aperture) a kódové označení (viz Tab. 141).

Tab. 141 Seznam interpretovaných strukturních prvků – vybraná část vrtu BGS20/1-VD

Depth	Azimuth	Dip	Aperture	Joints (code)
[m]	[deg]	[deg]	[mm]	
1,39	51	30	0	SFS
1,45	53	12	0	CFS
1,53	99	11	0	CFS
1,65	248	41	0	MF
1,67	63	58	0	SFS
1,74	282	63	4	OFS
1,75	109	54	0	SFS
1,92	323	74	0	OFS
2,24	78	36	0	SFS
2,36	262	66	0	OFS
2,41	272	19	0	OFS
2,44	253	35	0	CFS
2,47	81	37	0	SFS
2,48	262	14	0	CFS
2,50	278	48	0	CFS
2,53	251	35	0	CFS
2,89	241	42	0	MF
2,93	237	42	0	OFS
2,96	236	46	0	CFS
3,00	69	33	0	SFS

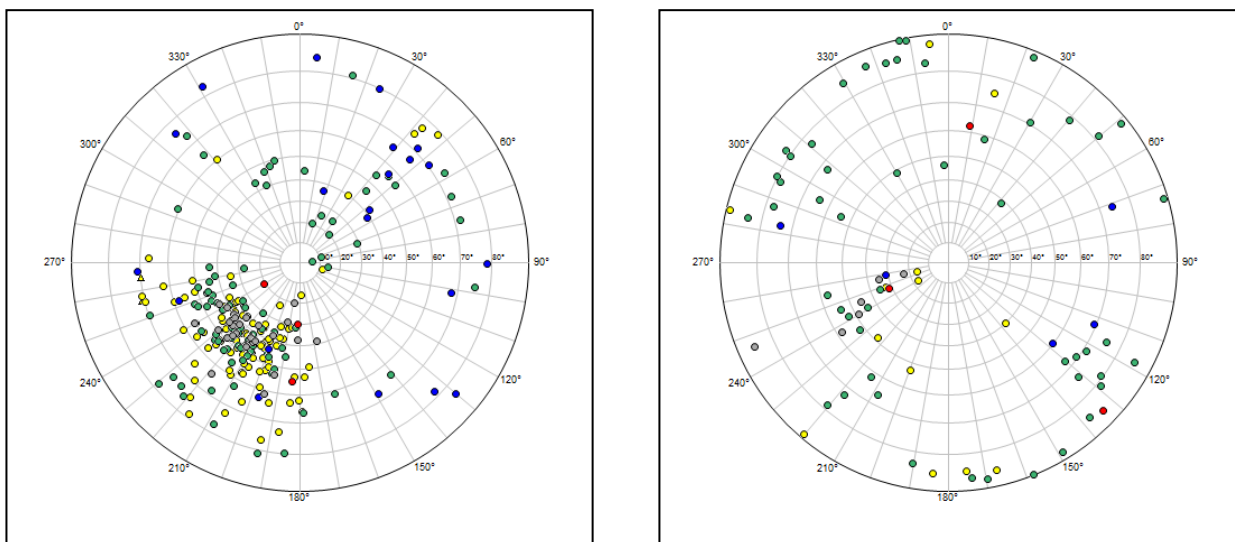
Za účelem strukturně-geologického zhodnocení HM zastiženého předmětnými vrtů jsou ve speciálním modulu softwaru WellCAD sestaveny stereogramy (projekce spádových přímků na dolní hemisféru) interpretovaných struktur (Obr. 337 až Obr. 341). Póly jednotlivých

interpretovaných struktur jsou barevně rozlišeny v souladu s použitou klasifikací struktur (Obr. 334).



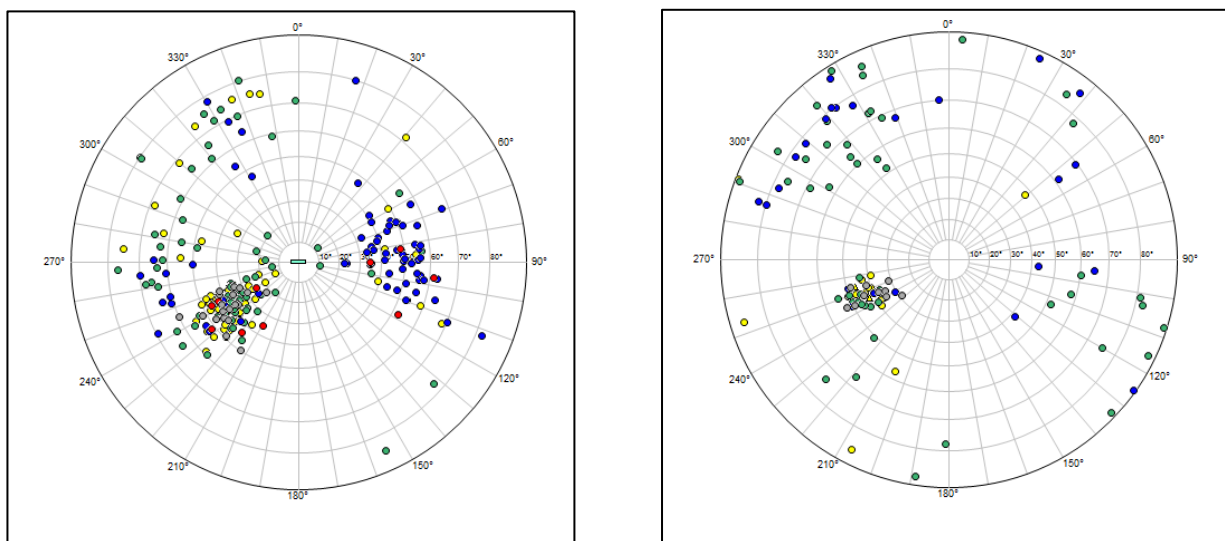
Obr. 337 Stereogramy interpretovaných struktur na GS12 – vrty BGS12-VD a BGS12-H

Generelně byly ve skenovaných vrtech geotechnické stanice GS12 zachyceny čtyři puklinové systémy. Nejvýraznější puklinový systém je prostorově shodný s metamorfní foliací s generálním směrem úklonu k JZ a úklony 30° až 70° . Většina otevřených (OFS) a uzavřených (CFS) puklinových systémů je tak metamorfní foliací predisponována. Druhý systém otevřených a uzavřených puklin se směrem k SV byl zachycen především ve svislém vrtu BGS12-VD. Další dva systémy se směry úklonu k SZ a VJV jsou tvořeny sekundárně vyplněnými puklinami (SFS). Vzhledem k strmějšímu úklonu (70° - 90°) byly tyto struktury zachyceny především v horizontálním vrtu BGS12-H. I na tyto sekundárně vyplněné struktury je predispozičně vázaná řada především uzavřených puklin (CFS). V horizontálním vrtu BGS12-H byla zachycena pouze jedna výrazná otevřená struktura (OFS) v hloubce 22,7 m o mocnosti 59 mm (Elektronická příloha 29) a ve vertikálním vrtu BGS12-VD podcřená zóna v hloubce 13,0 m o mocnosti 21 cm.



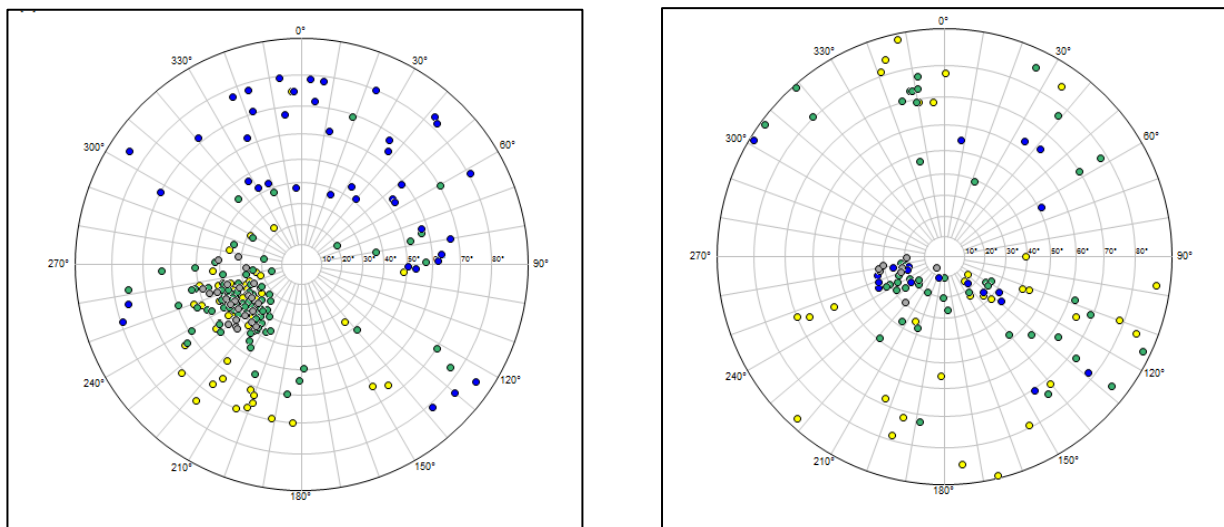
Obr. 338 Stereogramy interpretovaných struktur na GS 18 – vrty BGS18-VD a BGS18-H

Generelně byly ve skenovaných vrtech geotechnické stanice GS18 zachyceny dva výraznější puklinové systémy. I zde je nejvýraznější puklinový systém vázán na metamorfní foliaci s generálním směrem úklonu k JZ a úklony od 20° do 60°. Většina otevřených (OFS) a uzavřených (CFS) puklinových systémů je tak metamorfní foliací predisponována. Druhý, méně výrazný systém s generálním směrem úklonu k SV je tvořen zejména sekundárně vyplněnými puklinami (SFT) a uzavřenými puklinami (CFS). Ostatní interpretované struktury jsou prostorově nerovnoměrně distribuovány. Ve vertikálním vrtu BGS18-VD byly zachyceny čtyři podrcené zóny v hloubkách 6,4 m, 22,5 m, 23,9 m a 27,9 o mocnostech 6 až 25 mm (viz Elektronická příloha 29). V horizontálním vrtu BGS18-H nebyla zachycena žádná výraznější struktura.



Obr. 339 Stereogramy interpretovaných struktur na GS 20/1 – vrty BGS20/1-VD a BGS20/1-H

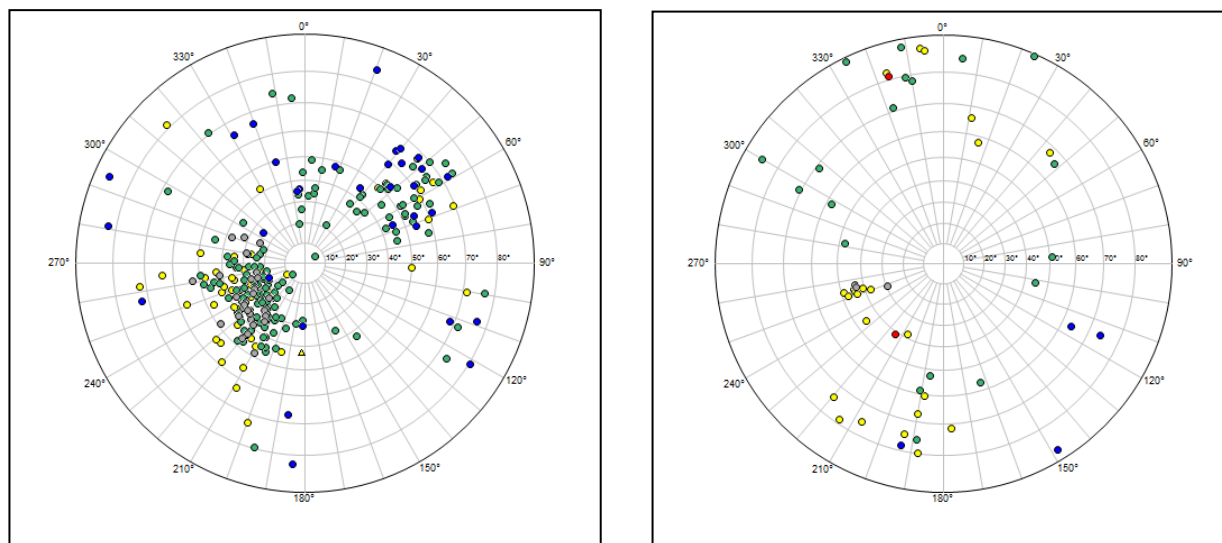
Generelně byly ve skenovaných vrtech geotechnické stanice GS20/1 zachyceny tři puklinové systémy. Tak jako na ostatních GS je i zde nejvýraznější puklinový systém prostorově shodný s metamorfní foliací s generálním směrem úklonu k ZJZ a úklony 20° až 50°. Většina otevřených (OFS) a uzavřených (CFS) puklinových systémů je tak metamorfní foliací predisponována. Další dva systémy s generálními směry úklonu k SZ a V jsou tvořeny sekundárně vyplněnými puklinami (SFS), případně mocnějšími sekundárně vyplněnými puklinami SFT. I na tyto sekundárně vyplněné struktury je predispozičně vázána řada uzavřených puklin (CFS), případně i otevřených struktur (OFS). Ve vertikálním vrtu BGS20/1-VD byly zachyceny dvě výraznější (mocnost cca 60 mm) podrcené zóny (CSZ) v hloubkách 4,3 m a 7,3 m a řada méně výrazných otevřených puklin (OFS) s mocností od 4 do 10 mm (např. hl. 1,74 m, 3,9 m, 18,6 m, 26,3 m – viz Elektronická příloha 29). V horizontálním vrtu BGS20/1-H byly identifikovány tři výraznější podrcené zóny v hloubkách 1,0 m, 6,1 m a 11,3 m s mocnostmi 13 až 30 mm.



Obr. 340 Stereogramy interpretovaných struktur na GS20/2 – vrtu BGS20/2-VD a BGS20/2-H

Generelně byly ve skenovaných vrtech geotechnické stanice GS 20/2 zachyceny dva puklinové systémy. Nejvýraznější puklinový systém je opět prostorově shodný s metamorfní foliací s generálním směrem úklonu k ZJZ a úklony 25° až 50° . Většina otevřených (OFS) a uzavřených (CFS) puklinových systémů je tak metamorfní foliací predisponována. Druhý systém se směrem úklonu k SZ až SV je tvořen sekundárně vyplněnými puklinami (SFS) případně mocnějšími sekundárně vyplněnými puklinami SFT. I na tyto sekundárně vyplněné struktury je predispozičně vázaná řada uzavřených puklin (CFS) případně i otevřených struktur (OFS). Ostatní interpretované struktury jsou prostorově nerovnoměrně distribuovány. Ve vertikálním vrtu BGS20/2-VD byla zachycena řada méně výrazných otevřených puklin (OFS) s mocností od 4 do 20 mm (např. hloubky 15,3 m, 22,1 m, 27,6 m – viz Elektronická příloha 29). V horizontálním vrtu BGS20/2-H nebyla zaznamenána žádná výraznější otevřená struktura či podcčená zóna.

Na obou GS umístěných na 20. patře bylo ve vertikálních vrtech interpretováno několik zón porušení vlivem působení horizontálního napětí tzv. „breakout“. Ve vrtu BGS20/1-VD jsou interpretovány celkem čtyři „breakout“ a ve vrtu BGS20/2-VD jeden. Parametry jednotlivých „breakout“ uvádí Tab. 142. Tyto jsou významným podkladem pro verifikaci výsledků interpretovaných napěťových polí stanovených jinými metodami, např. metoda hydraulického štěpení a overcoringu (viz kap. 2.4.4 Napěťový stav horninového masivu).



Obr. 341 Stereogramy interpretovaných struktur na GS24 – vrty BGS24-VD a BGS24-H

Generelně byly ve skenovaných vrtech geotechnické stanice GS24 zachyceny dva puklinové systémy. Podobně jako na ostatních GS je nejvýraznější puklinový systém prostorově shodný s metamorfní foliací s generálním směrem úklonu k JZ a úklony 25° až 50°. Většina otevřených (OFS) a uzavřených (CFS) puklinových systémů je tak metamorfní foliací predisponována. Druhý systém se směrem úklonu k JV je tvořen sekundárně vyplněnými puklinami (SFS). I na tyto sekundárně vyplněné struktury je predispozičně vázaná řada uzavřených puklin (CFS) případně i otevřených struktur (OFS). Ostatní interpretované struktury jsou prostorově nerovnoměrně distribuovány. Ve vertikálním vrtu BGS24-VD byla zachycena pouze jedna výraznější struktura v hloubce 29,2 m, která je prezentována podrcenou zónou o mocnosti 50 mm (viz Elektronická příloha 29). V horizontálním vrtu BGS24-H nebyla zachycena žádná výraznější otevřená struktura či podrcená zóna. Ve vertikálním vrtu BGS24-VD je interpretována jedna zóna porušení vlivem působení horizontálního napětí tzv. „breakout“ (viz Tab. 142).

Tab. 142 Interpretované zóny porušení vlivem působení horizontálního napětí tzv. „breakout“

Geotechnická stanice	Vrt č.	Hloubka [m]	Azimut 1 [°]	Azimut 2 [°]	Azimut S _H [°]
GS20/1	BGS20/1-VD	7,2	87	267	177
GS20/1	BGS20/1-VD	15,7	85	265	175
GS20/1	BGS20/1-VD	20,9	60	240	150
GS20/1	BGS20/1-VD	36,5	80	260	170
GS20/2	BGS20/2-VD	32,4	80	260	170
GS24	BGS224-VD	33,2	108	288	198

2.4.1.2.2 Stanovení porušenosti horninového masivu z analýz videoinspekci

Videoinspekce vrtů, stejně jako OPTV, umožňuje 360° zobrazení reálného obrazu stěn analyzovaného vrtu. Ovšem výsledný obraz není orientován vůči světovým stranám a proto, na rozdíl od OPTV, neumožňuje provést strukturní analýzu ve vrtu. Naopak nespornou výhodou je skutečnost, že prostá videoinspekce může být prováděna i v dovrchně vedených vrtech, ale poskytuje pouze generální informaci o stavu vrtu.

Jak již bylo uvedeno, byla prostá videoinspekce provedena v celkem devatenácti vrtech (Tab. 140). V úpadních vrtech byla videoinspekce nahrazena orientovaným záznamem sond OPTV a HiRAT. Celková metráž všech vrtů, prohlédnutá a analyzovaná pomocí videokamery činila přibližně 323 m. Použitý inspekční kamerový systém PipeCam 40 Expert byl tvořen analogovou videokamerou s manuálním posunem, umožňující postupnou registraci staničení vrtu do obrazu videozáznamu. Kamera disponuje systémem čelního pohledu a stejným systémem osvětlení pro registraci odraženého světla s hloubkou zaostření cca 25 cm.

Postup realizace a vyhodnocení videoinspekci byl následující:

- Nejdříve byla videokamera zasunuta společně se zaváděcími tyčemi a měřicím pásmem na čelbu vrtu (primární kontrola stavu vrtu);
- dále byla kamera pomocí zaváděcích tyčí pomalu vysouvána z vrtu směrem k jeho ústí s krokem vysunutí 0,25 m, vzdálenost vysunutí 0,25 m byla kontrolována na ústí vrtu pomocí měřicího pásma;
- při zastavení kamery v požadovaných krocích byla pomocí titulkovacího hardwaru vložena informace o jejím staničení (pozici) ve vrtu;
- záznam videoinspekce byl po celou dobu nahráván do paměti zařízení;
- předposledním krokem videoinspekce vrtu bylo zpracování záznamů do elektronické přílohy (Elektronická příloha 28), tato elektronická příloha obsahuje snímky čtvrtmetrových úseků jednotlivých vrtů po skupinách příslušející jednotlivým geotechnickým stanicím, včetně skupiny obsahující vrty EDZ20 HA až HD;
- posledním krokem vyhodnocení bylo vytvoření excelovských tabulek, které popisují čtvrtmetrové úseky vrtů podle následujícího klíče, který je popsán níže v této kapitole. Následně byly informace ze všech vrtů sumárně shrnuty do Tab. 143 až Tab. 148.

V jednotlivých 0,25 m úsecích ve vrtech byla na základě analýzy uložených snímků v elektronické příloze (viz Elektronická příloha 28) hodnocena kvalita stěn, počet vyplněných puklin (respektive míra četnosti puklin v hodnoceném úseku). Dále byly hodnoceny stejným způsobem pukliny otevřené, popř. vydrolené s výtluky (pravděpodobně s měkkou výplní puklin), a počet otevřených puklin v teoretické oblasti EDZ uvažovaných do vzdálenosti 6 metrů od ústí vrtu, jako podmnožina počtu otevřených puklin připadajícímu šestimetrovému úseku.

Subjektivní hodnocení záznamu videoinspekci všech geotechnických vrtů bylo provedeno podle následujícího klíče:

1. Kvalita stěn ve vrtu:
 - a. stěny vrtu hladké, neporušené, zachován kruhový profil vrtu - zkratka v excelovské tabulce „**SHN**“ (příklad viz Obr. 342);
 - b. stěny vrtu víceméně hladké, porušené systémem puklin s výtluky, kruhový profil zachován – zkratka v excelovské tabulce „**SHP**“ (příklad viz Obr. 343);
 - c. stěny vrtu výrazně porušené vlivem kvality horniny (litologie), nepravidelný nekruhový profil s nadvýlomy, většinou nelze identifikovat pukliny v hornině,

změněný, nepravidelný - zkratka v excelovské tabulce „**SPKH**“ (příklad viz Obr. 344).

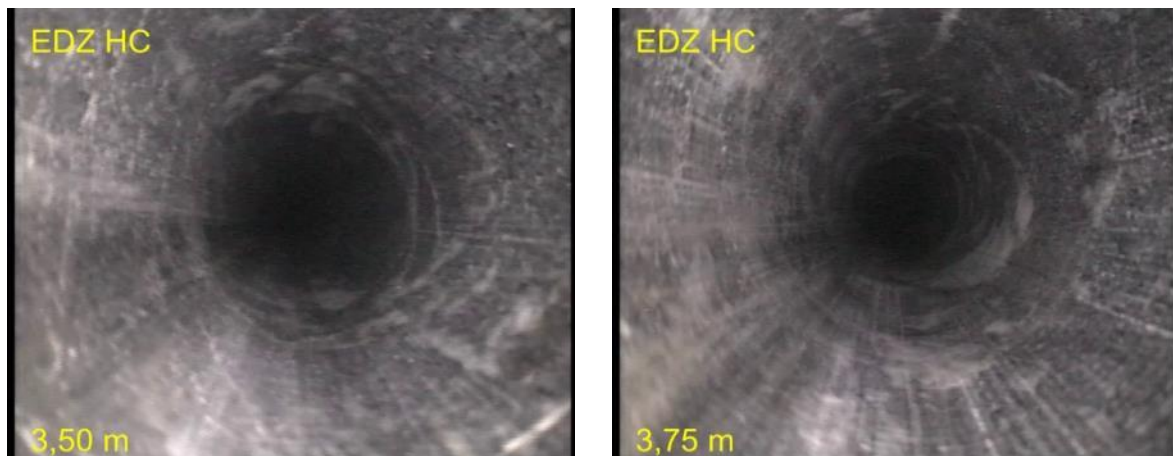
2. Pukliny vyplněné, pravděpodobně uzavřené:

- a. pukliny vyplněné (vyhojené) s přibližnou identifikací jejich počtu v hodnoceném 0,25 m dlouhém úseku – zkratka v excelovské tabulce „**PVJn**“, kde n reprezentuje přibližnou míru výskytu puklin v úseku pro n=1 až 4, 1 znamená nejnižší míru postižení puklinami, 4 znamená vyšší míru postižení úseku puklinami (příklad viz Obr. 345);
- b. systém vyhojených puklin (nelze stanovit jejich kvalifikovaný odhad jejich počtu) - zkratka v excelovské tabulce „**PVS**“, vysoká míra postižení hodnoceného úseku puklinami (příklad viz Obr. 346).

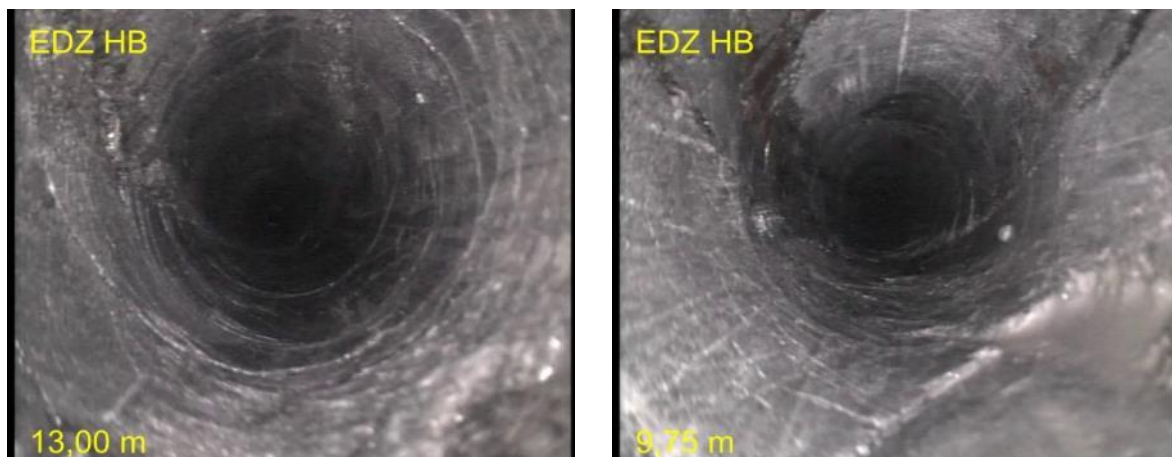
3. Pukliny otevřené, popřípadě vydrolené s výtlučky:

- a. pukliny otevřené s přibližnou identifikací jejich počtu v hodnoceném 0,25 m dlouhém úseku – zkratka v excelovské tabulce „**POJn**“, kde n reprezentuje přibližnou míru výskytu puklin v úseku pro n=1 až 4, 1 znamená nejnižší míru postižení puklinami, 4 znamená vyšší míru postižení úseku puklinami (příklad viz Obr. 347);
- b. systém otevřených puklin (nelze stanovit jejich kvalifikovaný počet) – zkratka v excelovské tabulce „**POS**“, vysoká míra postižení hodnoceného úseku puklinami (příklad viz Obr. 348).

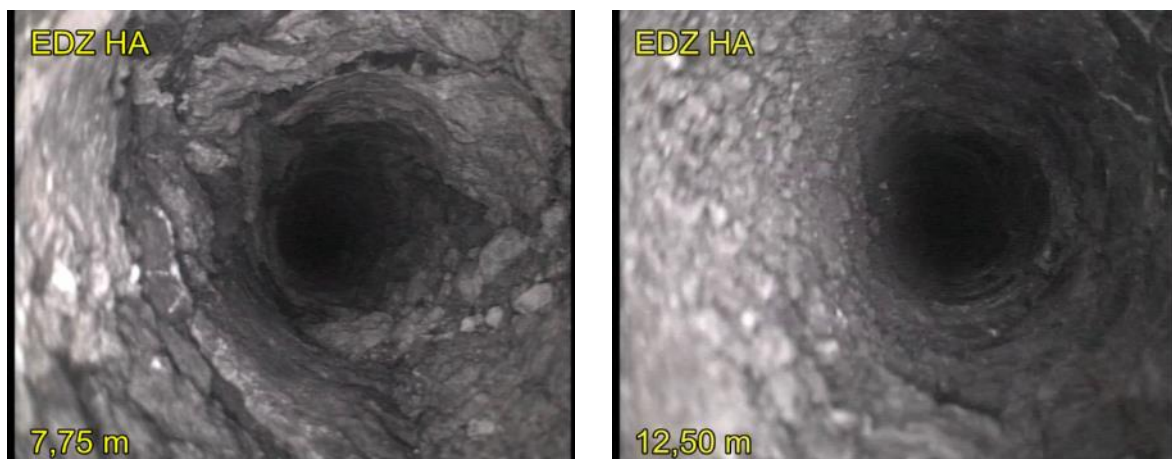
Zachycené snímky z videokamery reprezentující výše uvedené a hodnocené kategorie jsou názorně uvedeny na obrázcích Obr. 342 – Obr. 348.



Obr. 342 Příklad hodnoceného úseku pomocí videoinspekce připadající kategorii „SHN“

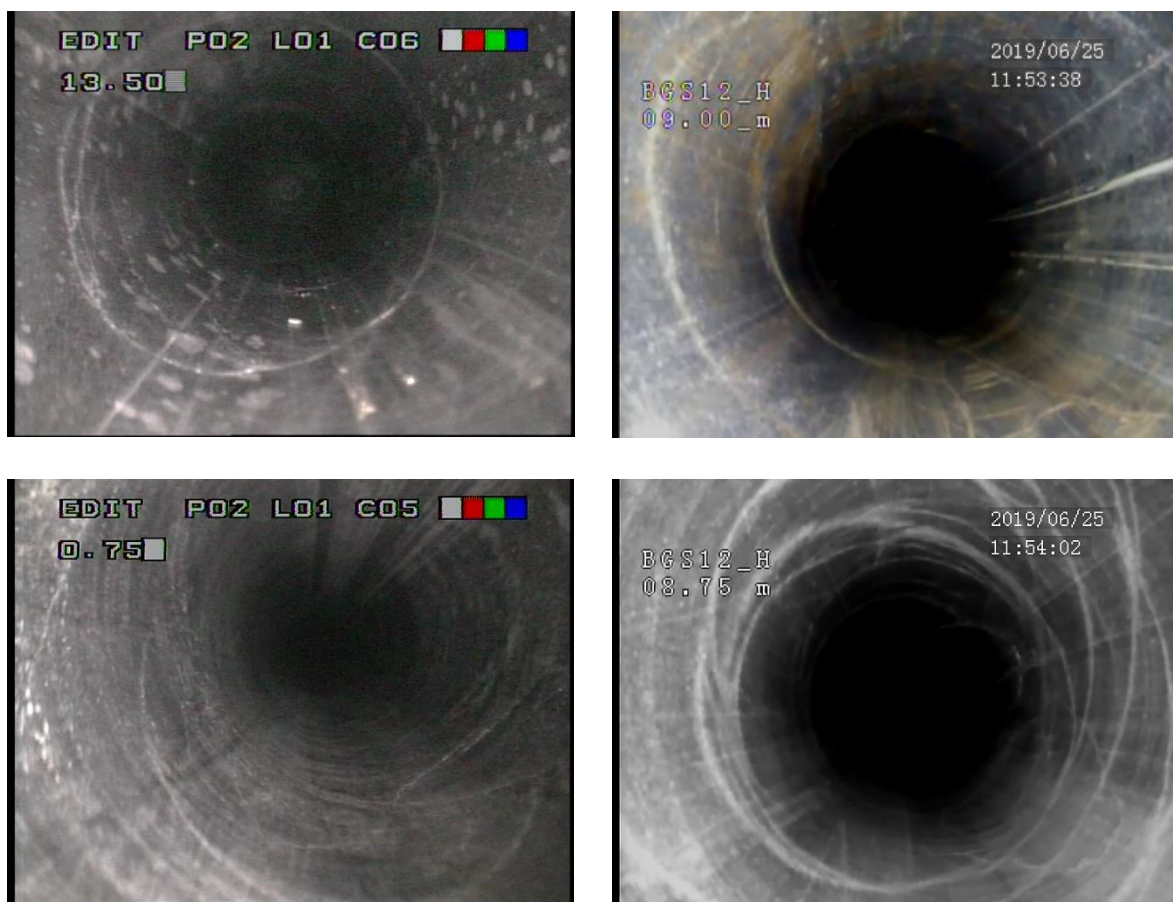


Obr. 343 Příklad hodnoceného úseku pomocí videoinspekce připadající kategorii „SHP“

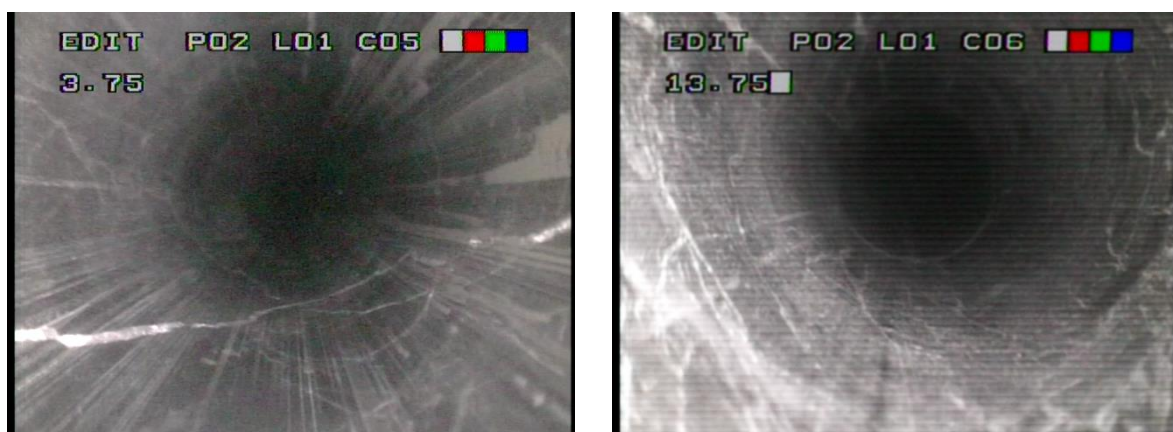


Obr. 344 Příklad hodnoceného úseku pomocí videoinspekce připadající kategorii „SPKH“

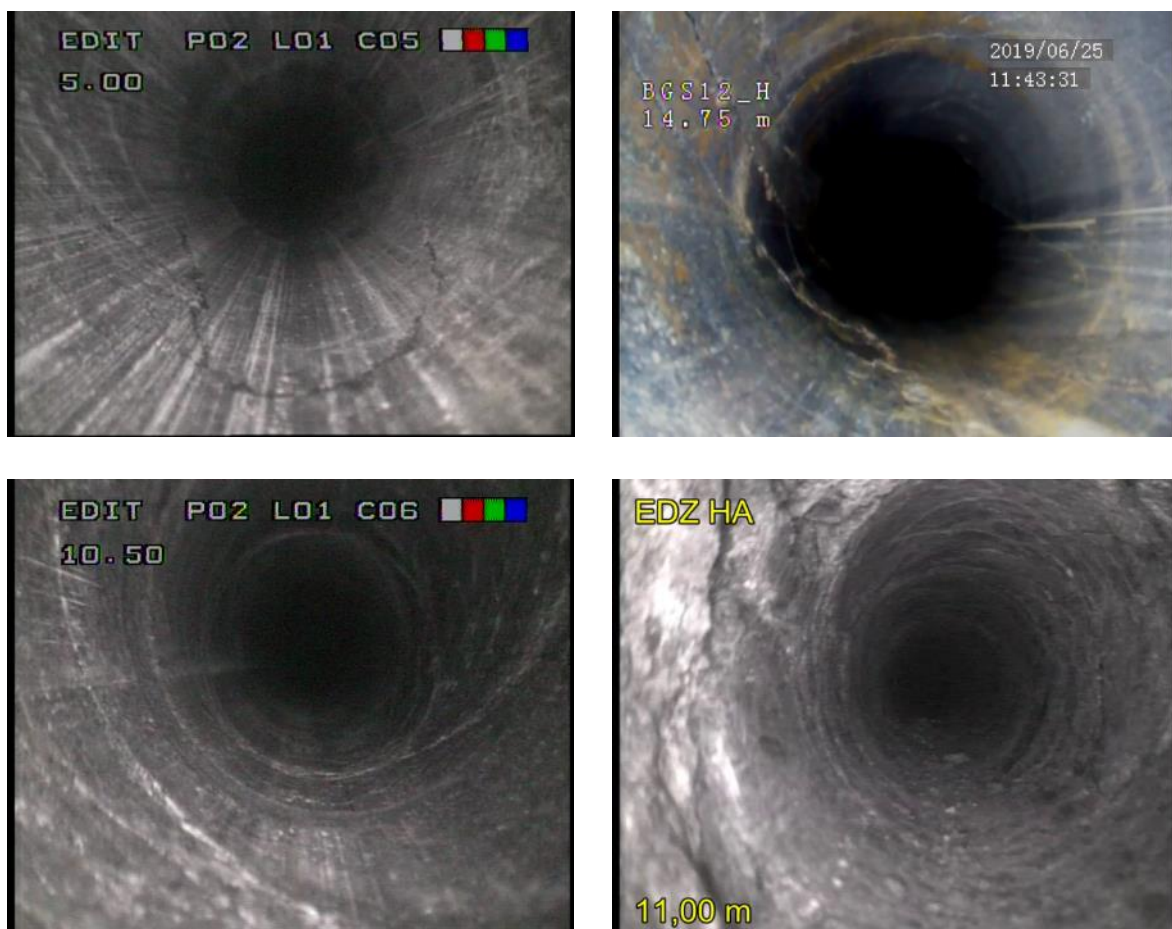
Souhrnné hodnoty výsledků procentuálního zastoupení jednotlivých hodnocených kategorií v geotechnických vrtech, souvisejících se strukturně geologickými podmínkami a kvalitou hornin v HM na předmětných geotechnických stanicích jsou uvedeny v následujících tabulkách Tab. 143 až Tab. 148. Je nutné si uvědomit, že se jedná pouze o subjektivní hodnocení kvality horninového masivu, které ovšem může poskytnout vypovídající informaci o jeho stavu v oblasti jednotlivých geotechnických stanic na základě relativně velkého množství hodnocených 0,25 m úseků, především, co se týká kvality stěn hodnocených vrtů.



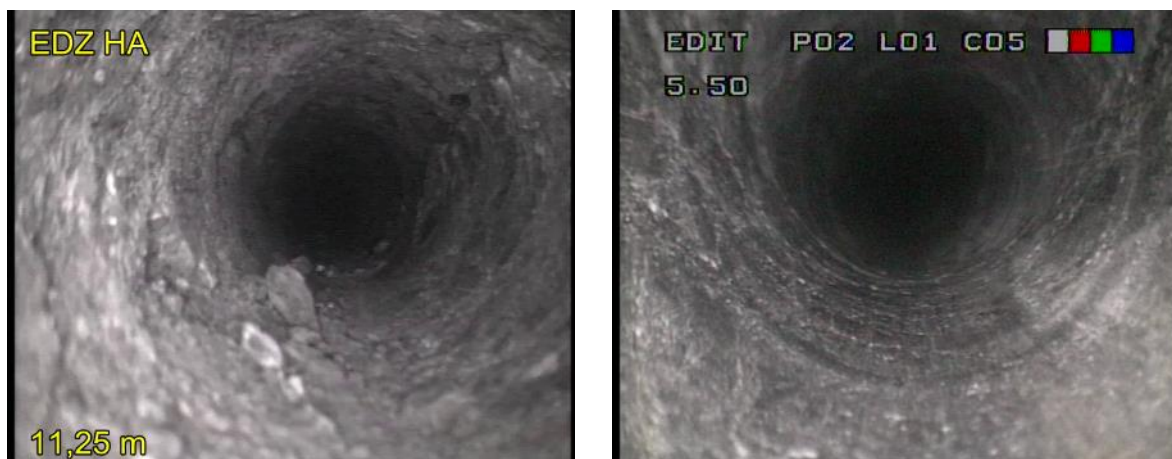
Obr. 345 Příklad hodnoceného úseku pomocí videoinspekce připadající kategorii „PVJ1-4“



Obr. 346 Příklad hodnoceného úseku pomocí videoinspekce připadající kategorii „PVS“



Obr. 347 Příklad hodnoceného úseku pomocí videoinspekce připadající kategorii „POJ1-4“



Obr. 348 Příklad hodnoceného úseku pomocí videoinspekce připadající kategorii „POS“

Tab. 143 Procentuální zastoupení hodnocených kategorií ve vrtech – GS12 (*... u EDZ hodnota reprezentuje počet otevřených puklin)

BGS 12_								
H (30 m)			I (19 m)			VU (15 m)		
SHN	PVJ1	POJ1	SHN	PVJ1	POJ1	SHN	PVJ1	POJ1
98,3	23,3	5,0	80,3	17,1	26,3	65,0	16,7	20,0
SHP	PVJ2	POJ2	SHP	PVJ2	POJ2	SHP	PVJ2	POJ2
1,7	22,5	2,5	19,7	22,4	9,2	35,0	16,7	25,0
SPKH	PVJ3	POJ3	SPKH	PVJ3	POJ3	SPKH	PVJ3	POJ3
0,0	8,3	0,8	0,0	26,3	3,9	0,0	8,3	20,0
	PVJ4	POJ4		PVJ4	POJ4		PVJ4	POJ4
	3,3	0,0		14,5	0,0		3,3	0,0
	PVS	POS		PVS	POS		PVS	POS
	10,0	0,0		5,3	1,3		10,0	0,0
		EDZ*			EDZ*			EDZ*
		4			5+1xPOS			28

Tab. 144 Procentuální zastoupení hodnocených kategorií ve vrtech – GS18 (*... u EDZ hodnota reprezentuje počet otevřených puklin)

BGS 18_								
H (15,5 m)			I (15,75 m)			VU (15,0 m)		
SHN	PVJ1	POJ1	SHN	PVJ1	POJ1	SHN	PVJ1	POJ1
90,3	24,2	4,8	93,7	20,6	19,0	91,7	26,7	20,0
SHP	PVJ2	POJ2	SHP	PVJ2	POJ2	SHP	PVJ2	POJ2
9,7	16,1	6,5	6,3	11,1	6,3	8,3	16,7	3,3
SPKH	PVJ3	POJ3	SPKH	PVJ3	POJ3	SPKH	PVJ3	POJ3
0,0	6,5	0,0	0,0	14,3	1,6	0,0	1,7	3,3
	PVJ4	POJ4		PVJ4	POJ4		PVJ4	POJ4
	4,8	0,0		3,2	0,0		0,0	0,0
	PVS	POS		PVS	POS		PVS	POS
	4,8	0,0		1,6	1,6		1,7	0,0
		EDZ*			EDZ*			EDZ*
		4			8+1xPOS			12

Tab. 145 Procentuální zastoupení hodnocených kategorií ve vrtech – GS20/1 (*... u EDZ hodnota reprezentuje počet otevřených puklin)

BGS 20/1_								
H (15,5 m)			I (15,25 m)			VU (14,25)		
SHN	PVJ1	POJ1	SHN	PVJ1	POJ1	SHN	PVJ1	POJ1
90,3	16,1	12,9	60,7	13,1	27,9	82,5	31,6	31,6
SHP	PVJ2	POJ2	SHP	PVJ2	POJ2	SHP	PVJ2	POJ2
9,7	19,4	8,1	39,3	24,6	23,0	15,8	17,5	5,3
SPKH	PVJ3	POJ3	SPKH	PVJ3	POJ3	SPKH	PVJ3	POJ3
0,0	12,9	0,0	0,0	13,1	6,6	1,8	8,8	0,0
	PVJ4	POJ4		PVJ4	POJ4		PVJ4	POJ4
	11,3	0,0		6,6	0,0		10,5	0,0
	PVS	POS		PVS	POS		PVS	POS
	0,0	0,0		0,0	0,0		0,0	0,0
		EDZ			EDZ			EDZ
		10			12			15

Tab. 146 Procentuální zastoupení hodnocených kategorií ve vrtech – GS20/2 (*... u EDZ hodnota reprezentuje počet otevřených puklin)

BGS 20/2_								
H (15,25 m)			I (15,0 m)			VU (15,0)		
SHN	PVJ1	POJ1	SHN	PVJ1	POJ1	SHN	PVJ1	POJ1
100,0	13,1	3,3	96,7	20,0	10,0	95,0	26,7	8,3
SHP	PVJ2	POJ2	SHP	PVJ2	POJ2	SHP	PVJ2	POJ2
0,0	27,9	1,6	3,3	20,0	1,7	5,0	11,7	5,0
SPKH	PVJ3	POJ3	SPKH	PVJ3	POJ3	SPKH	PVJ3	POJ3
0,0	13,1	0,0	0,0	5,0	1,7	0,0	11,7	1,7
	PVJ4	POJ4		PVJ4	POJ4		PVJ4	POJ4
	1,6	0,0		0,0	0,0		3,3	0,0
	PVS	POS		PVS	POS		PVS	POS
	6,6	0,0		0,0	0,0		0,0	0,0
		EDZ			EDZ			EDZ
		1			2+1xPOS			2+1xPOS

Tab. 147 Procentuální zastoupení hodnocených kategorií ve vrtech – GS20/2 (*... u EDZ hodnota reprezentuje počet otevřených puklin)

EDZ_											
HA (15,5 m)			HB (15,25 m)			HC (15,75 m)			HD (15,75 m)		
SHN	PVJ1	POJ1	SHN	PVJ1	POJ1	SHN	PVJ1	POJ1	SHN	PVJ1	POJ1
8,1	3,2	3,2	88,5	21,3	24,6	96,8	23,8	9,5	96,8	22,6	3,2
SHP	PVJ2	POJ2	SHP	PVJ2	POJ2	SHP	PVJ2	POJ2	SHP	PVJ2	POJ2
25,8	0,0	4,8	9,8	32,8	8,2	3,2	19,0	0,0	3,2	14,5	1,6
SPKH	PVJ3	POJ3	SPKH	PVJ3	POJ3	SPKH	PVJ3	POJ3	SPKH	PVJ3	POJ3
66,1	3,2	3,2	1,6	9,8	1,6	0,0	14,3	1,6	0,0	6,5	1,6
	PVJ4	POJ4		PVJ4	POJ4		PVJ4	POJ4		PVJ4	POJ4
	1,6	3,2		1,6	0,0		9,5	0,0		0,0	0,0
	PVS	POS		PVS	POS		PVS	POS		PVS	POS
	3,2	1,6		6,6	0,0		4,8	0,0		0,0	0,0
		EDZ			EDZ			EDZ			EDZ
		N/A			8			5			5

Tab. 148 Procentuální zastoupení hodnocených kategorií ve vrtech – GS24 (*... u EDZ hodnota reprezentuje počet otevřených puklin)

BGS 24_								
H (15,5 m)			I (15,25 m)			VU (15,5)		
SHN	PVJ1	POJ1	SHN	PVJ1	POJ1	SHN	PVJ1	POJ1
90,3	12,9	17,7	98,4	21,3	6,6	93,5	29,0	6,5
SHP	PVJ2	POJ2	SHP	PVJ2	POJ2	SHP	PVJ2	POJ2
9,7	27,4	8,1	1,6	37,7	0,0	6,5	25,8	4,8
SPKH	PVJ3	POJ3	SPKH	PVJ3	POJ3	SPKH	PVJ3	POJ3
0,0	3,2	3,2	0,0	11,5	0,0	0,0	6,5	3,2
	PVJ4	POJ4		PVJ4	POJ4		PVJ4	POJ4
	1,6	0,0		11,5	0,0		1,6	0,0
	PVS	POS		PVS	POS		PVS	POS
	0,0	0,0		3,3	1,6		1,6	1,6
		EDZ			EDZ			EDZ
		1			2+1xPOS			2+1xPOS

2.4.2 Odrazivost povrchu hornin

2.4.2.1 Strukturní mapování stěn chodeb v okolí GS

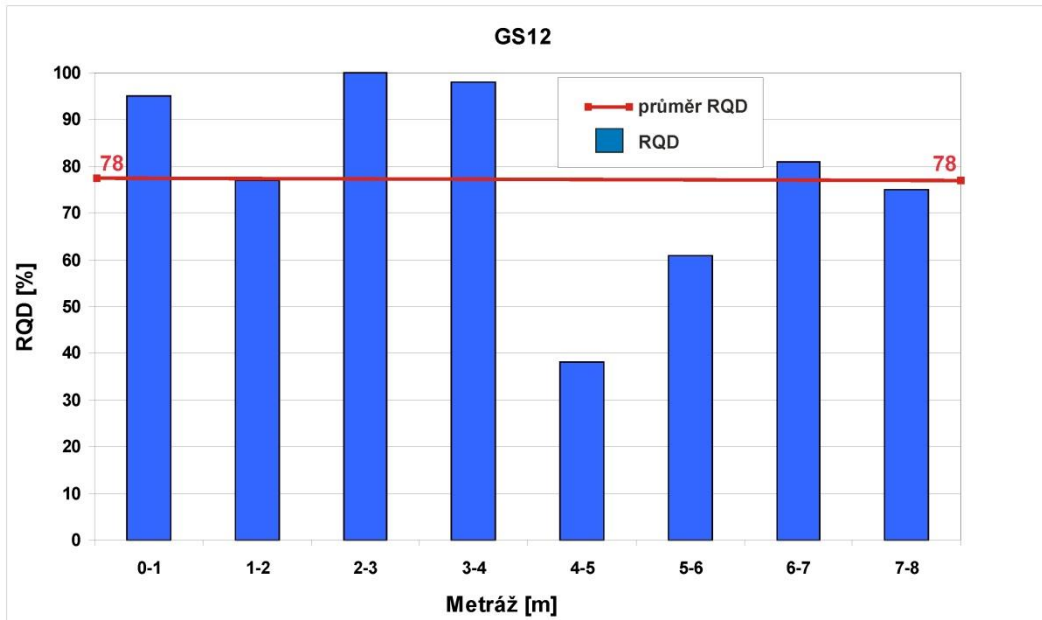
Jako podpůrná resp. srovnávací metoda pro měření odrazivosti povrchu hornin Schmidovým kladívkem, bylo v okolí jednotlivých GS a dále pak ve zhruba 100 metrů dlouhém profilu mezi GS20/1 a GS20/2 realizováno strukturně geologické mapování. Toto mapování bylo provedeno v souladu s doporučenou metodikou ISRM (ISRM 1978c) na přístupném (odkrytém) a umytém boku důlního díla rozděleného do metrových úseků. Ve výšce cca 1,3 m nad úrovní počvy chodby bylo rozvinuto měřicí pásmo a v této linii byl horninový masiv hodnocen jako simulovaný návrt vrtného jádra. Geologickým kompasem byl měřen směr úklonu a velikost úklonu jak duktilních (metamorfní foliace), tak zejména křehkých (pukliny, zlomy) strukturních prvků, které protínaly linii nataženého měřicího pásma. Zároveň byly dokumentovány velikostní a kvalitativní parametry diskontinuit – průběžnost, drsnost povrchu, vyhojení, zvětrání případně výplně a otevřenost (Tab. 149).

Tab. 149 Kritéria použitá pro popis kvalitativních parametrů křehkých diskontinuit

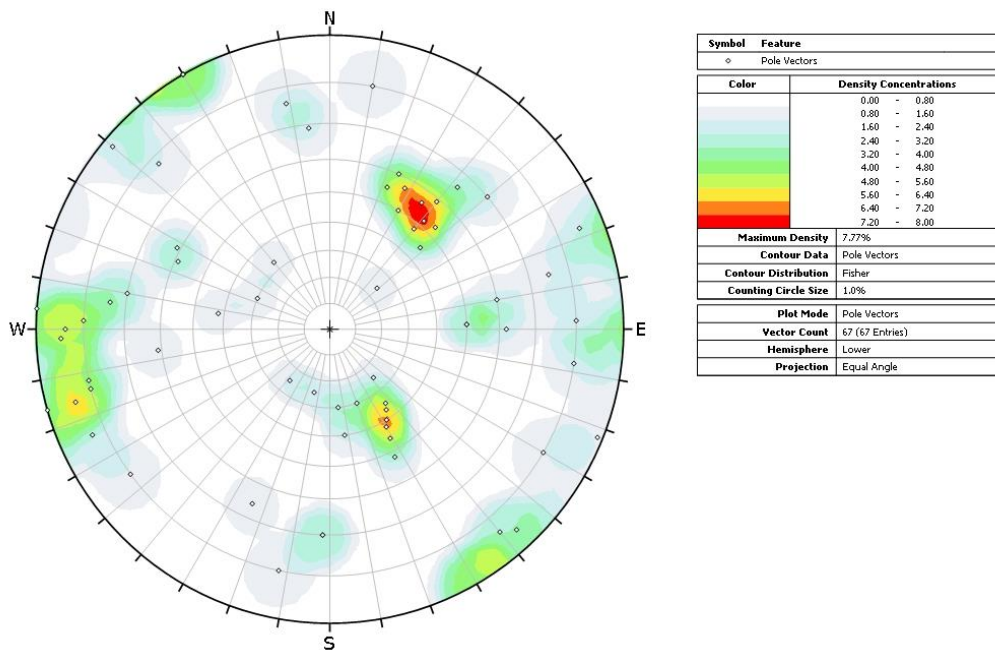
Průběžnost	krátká (<1 m)		dlouhá (1–3 m)		velmi dlouhá (3–10 m)	
Drsnost	velmi drsná	drsná	jemně drsná	hladká	tektonické zrcadlo	
Tvar (zvlnění)	zvlněná			rovná		
Výplň	bez výplně (sevřená trhлина)	měkká výplň (např. kalcit) (<5 mm)	měkká výplň (např. kalcit) (>5 mm)	tvrdá výplň (např. křemen) (<5 mm)	tvrdá výplň (např. křemen) (>5 mm)	
Zvětrání výplně	nezvětralá	lehce zvětralá	středně zvětralá	velmi zvětralá	extrémně zvětralá (rozložená)	
Rozevření	velmi sevřená (< 0,1 mm)	sevřená (0,1–1 mm)	otevřená (1–5 mm)	široce otevřená (> 5 mm)		

Výsledky strukturně geologického mapování byly zpracovány ve formě RQD profilů obdobným způsobem, jako je tomu u analýzy vrtného jádra. RQD profily zmapovaných úseků jsou uvedeny na Obr. 349, Obr. 351, Obr. 352, Obr. 354, Obr. 355 a Obr. 357. Četnosti puklin na metr zmapovaného boku důlního díla jsou uvedeny v následující kapitole v grafech společně s hodnotami odrazivosti naměřenými pomocí Schmidova kladívka na identických profilech (Obr. 360 až Obr. 365). Orientace zmapovaných puklin je názorně vynesena ve stereogramech pomocí jejich pólů plochojevnou projekcí na dolní hemisféru (Obr. 350, Obr. 353, Obr. 356, Obr. 358 a Obr. 359). Metamorfní foliace jsou vyneseny z měření pouze na 20. patře, v okolí GS20/1 a GS20/2 a z profilu mezi těmito geotechnickými stanicemi. Na ostatních patřech nebylo možno,

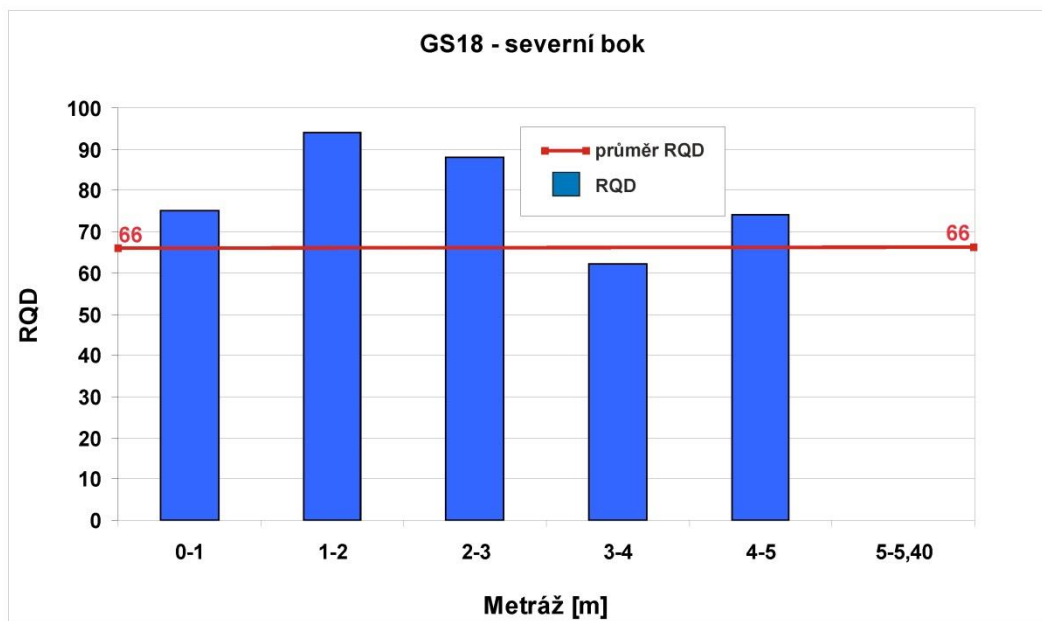
vzhledem k malé délce mapovaných úseků, naměřit statisticky věrohodné množství foliačních dat.



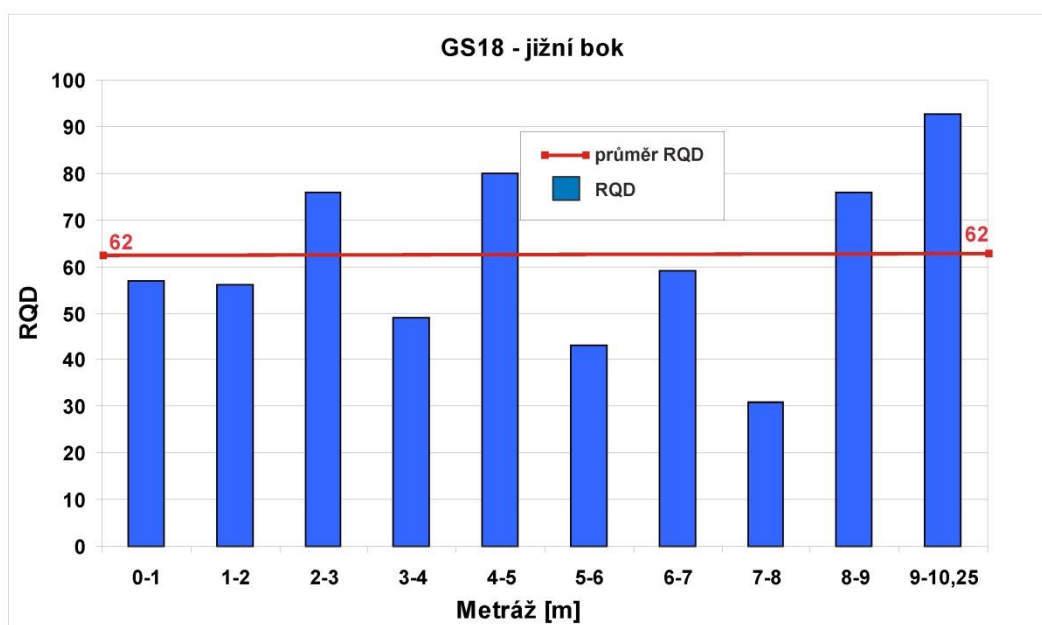
Obr. 349 Hodnoty RQD ze strukturálně geologického mapování na profilu u GS12



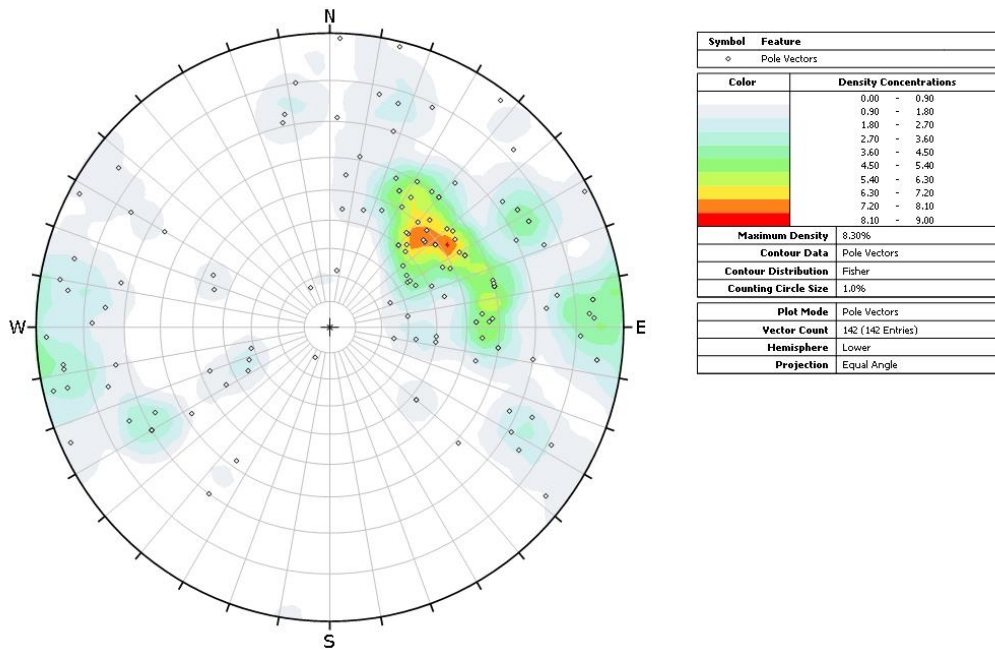
Obr. 350 Konturový diagram pólů puklin na profilu u GS12



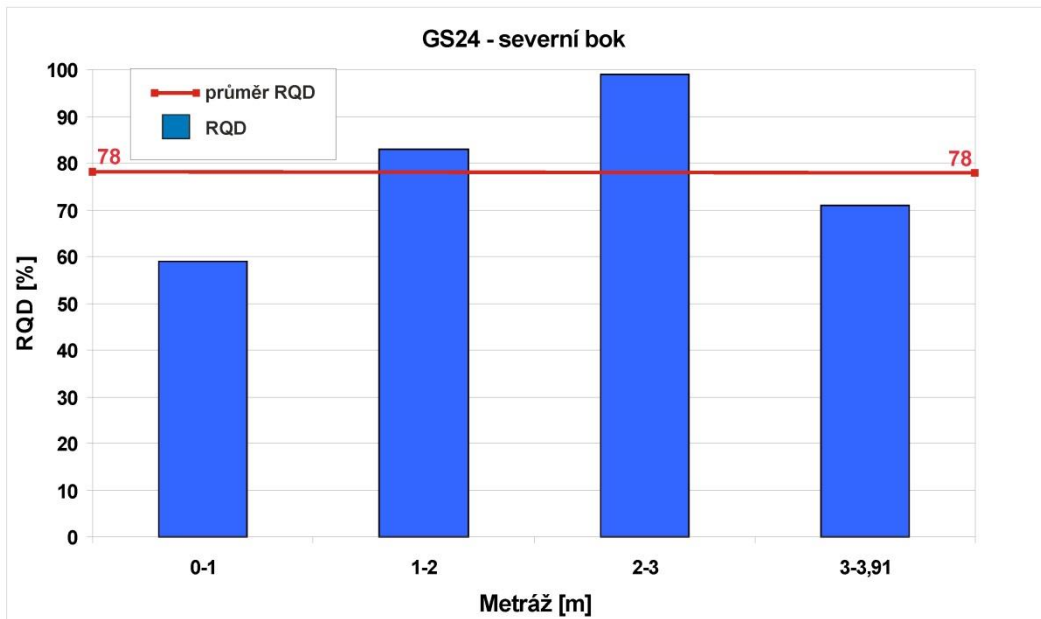
Obr. 351 Hodnoty RQD ze strukturálně geologického mapování na profilu u GS18 – severní bok



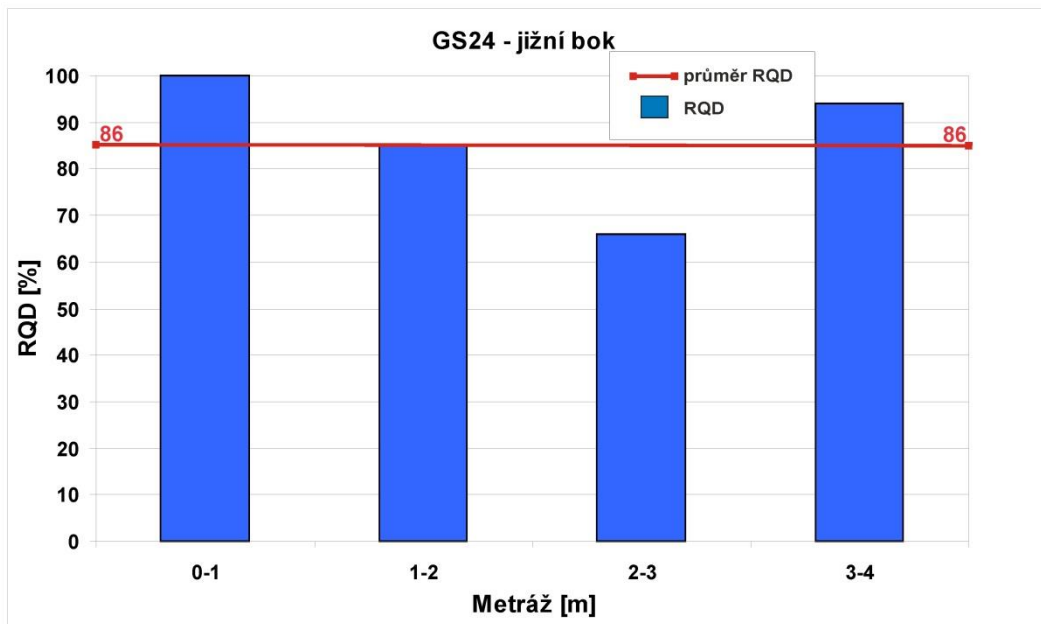
Obr. 352 Hodnoty RQD ze strukturálně geologického mapování na profilu u GS18 – jižní bok



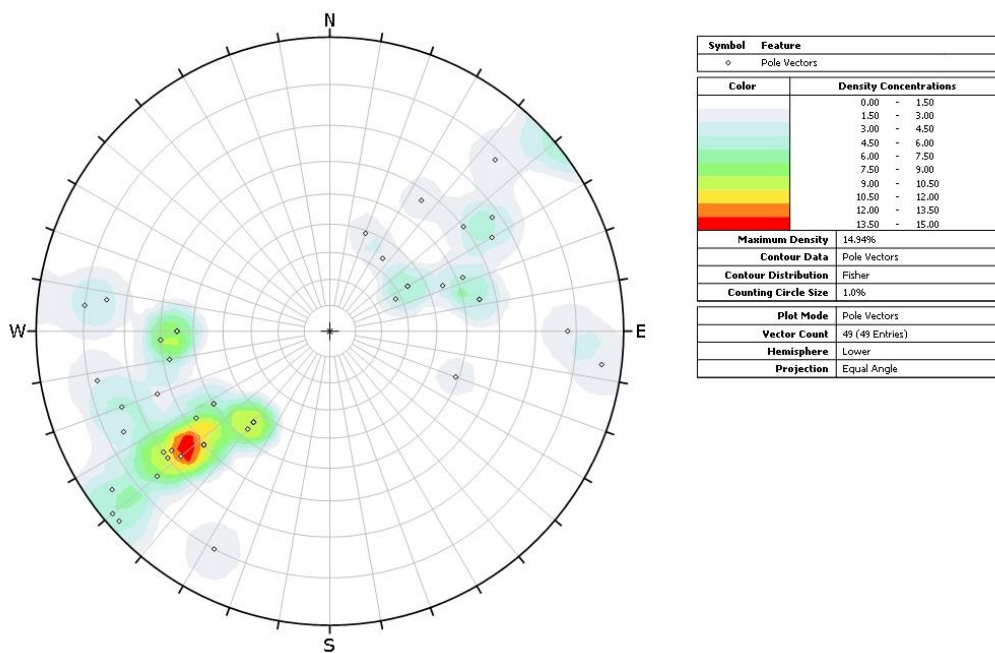
Obr. 353 Konturový diagram pólů puklin na profilech u GS18 (severní i jižní bok)



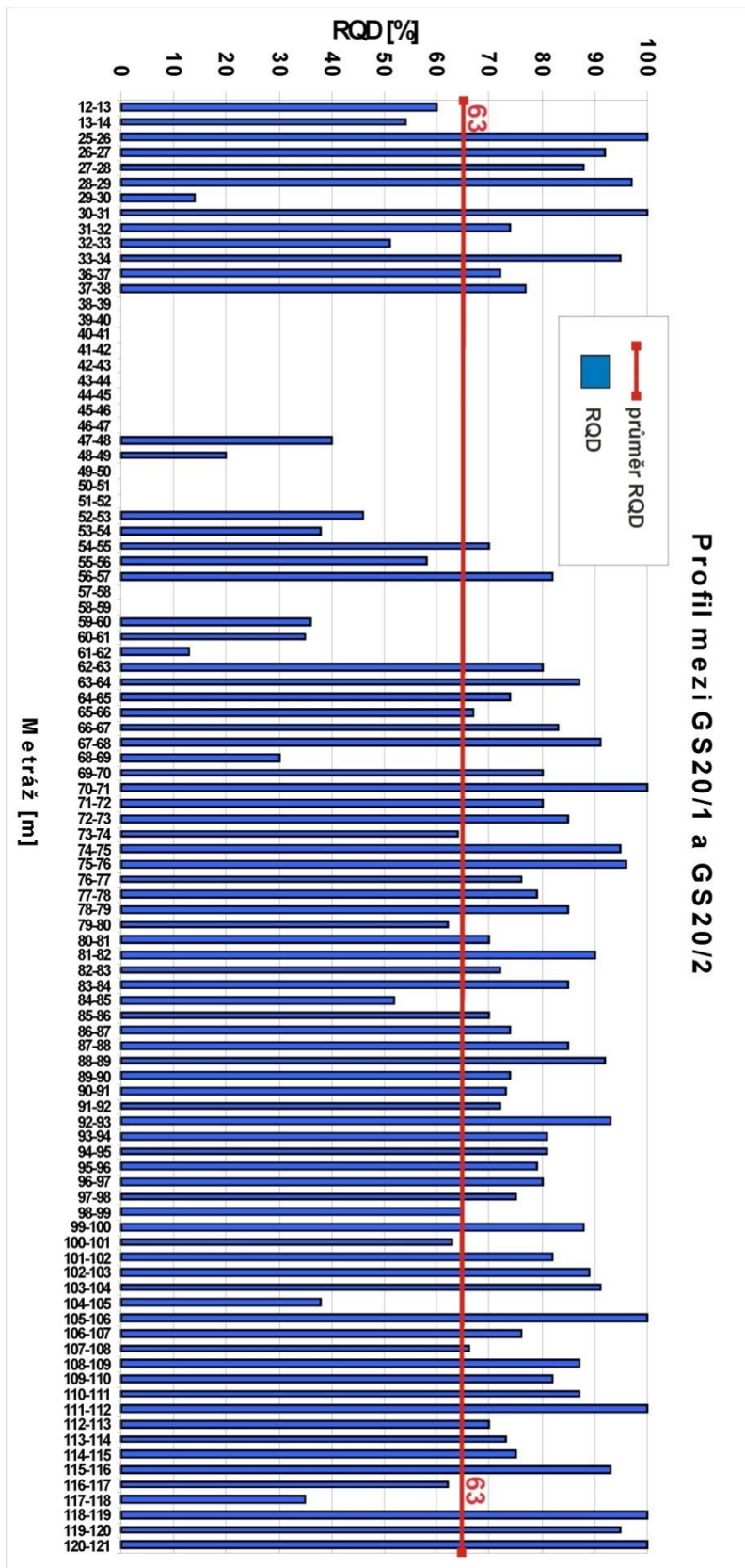
Obr. 354 Hodnoty RQD ze strukturálně geologického mapování na profilu u GS24 – severní bok

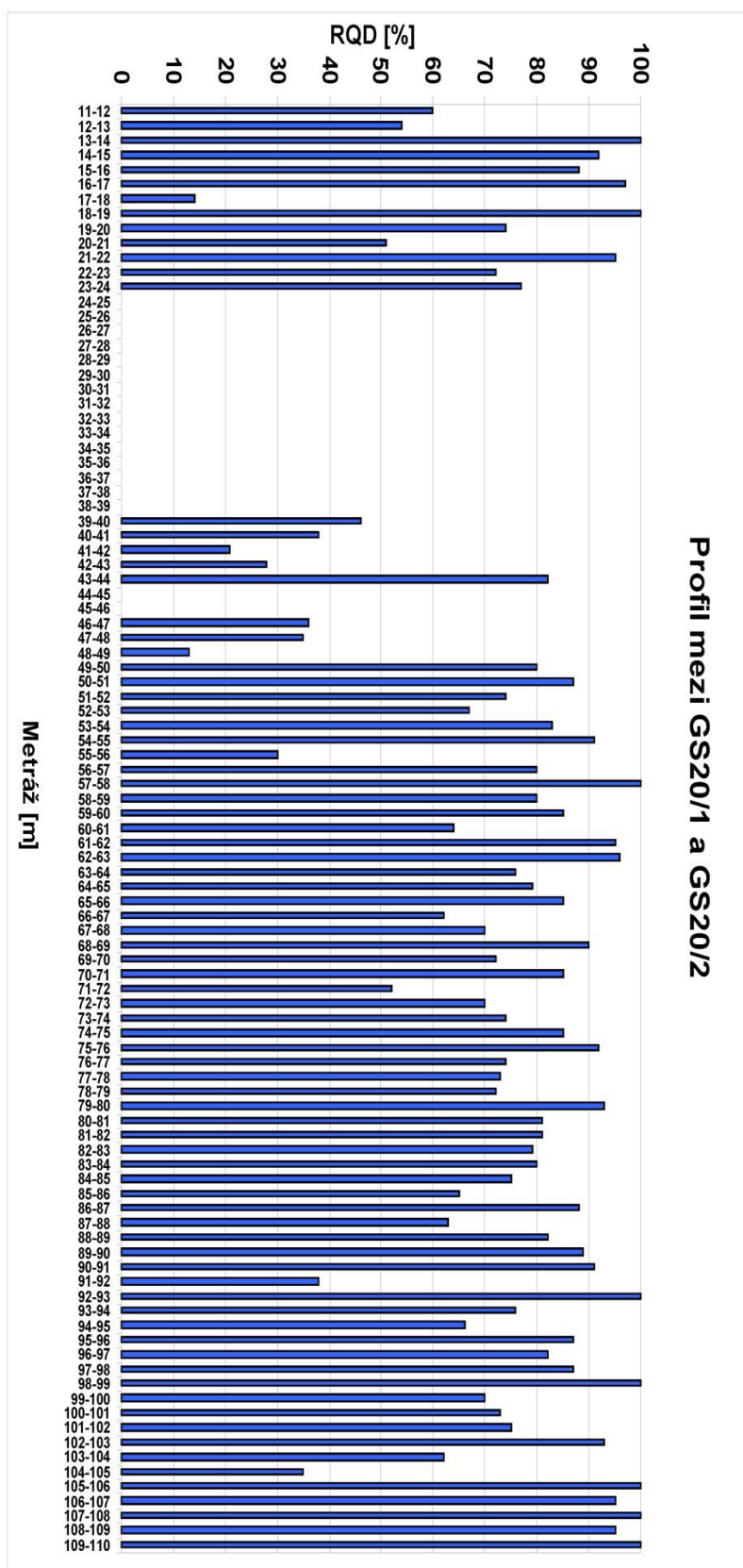


Obr. 355 Hodnoty RQD ze strukturně geologického mapování na profilu u GS24 – jižní bok

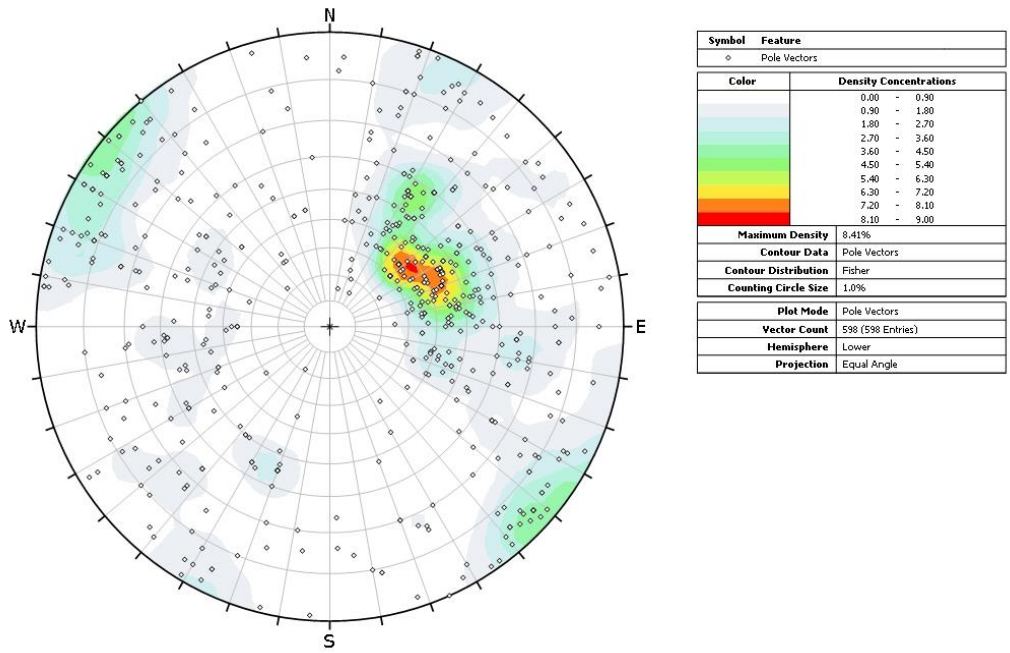


Obr. 356 Konturový diagram pólů puklin na profilech u GS24 (severní i jižní bok)

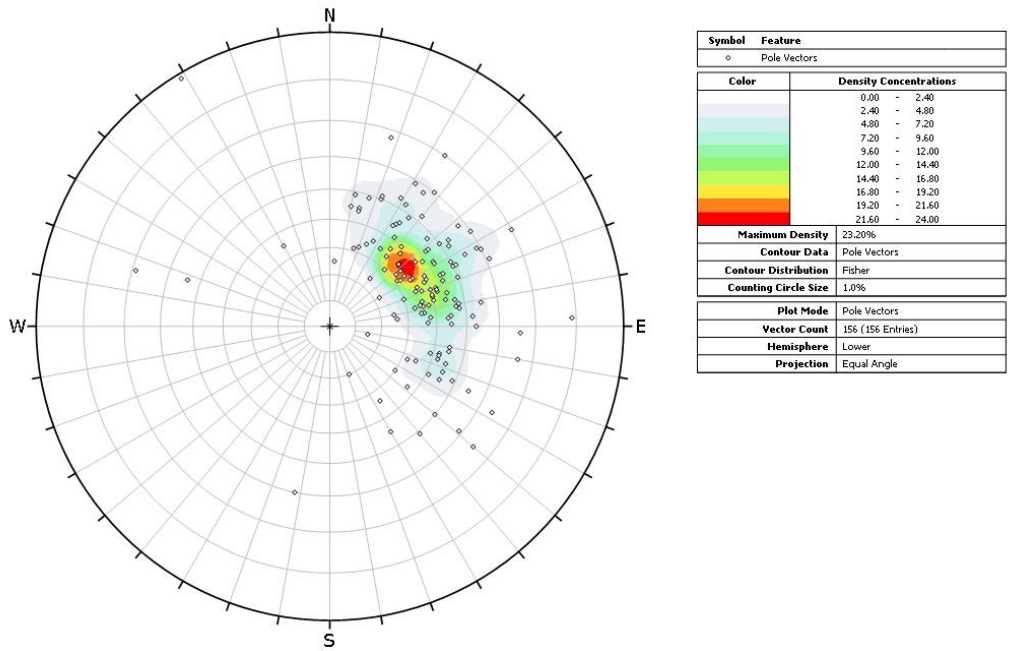




Obr. 357 Hodnoty RQD ze strukturálně geologického mapování v okolí GS20/1 a GS20/2 a na profilu mezi těmito stanicemi



Obr. 358 Konturový diagram pólů puklin v okolí GS20/1 a GS20/2 a na profilu mezi těmito stanicemi



Obr. 359 Konturový diagram pólů foliaci v okolí GS20/1 a GS20/2 a na profilu mezi těmito stanicemi

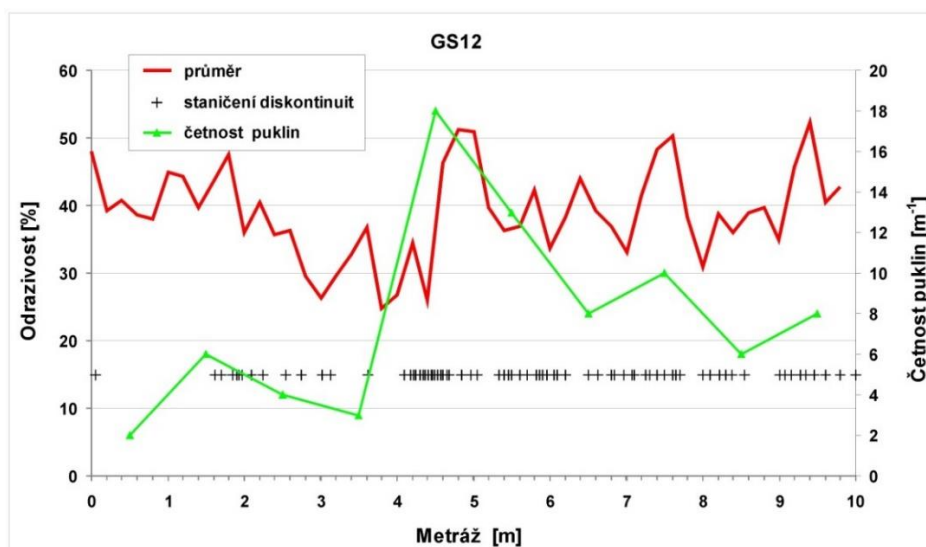
2.4.2.2 Odrazivost povrchu pomocí Schmidtova kladívka

Schmidtovo kladívko bylo vyvinuto v roce 1948 (Katz et al. 2000) pro nedestruktivní testování tvrdosti a pevnosti betonů a později se začalo rovněž používat v oblasti horninového inženýrství k odhadu pevnosti hornin pomocí korelačních vztahů pro různé typy hornin. Hodnoty odrazu kladívka se považují za konzistentní a reprodukovatelné. Jednou z hlavních motivací pro použití této metody, kromě rychlosti a jednoduchosti, bylo v oblasti horninového inženýrství rovněž snížení nákladů na vlastní odběr vzorků a jejich laboratorní testování (Cargill a Shakoor 1990; Katz et al. 2000).

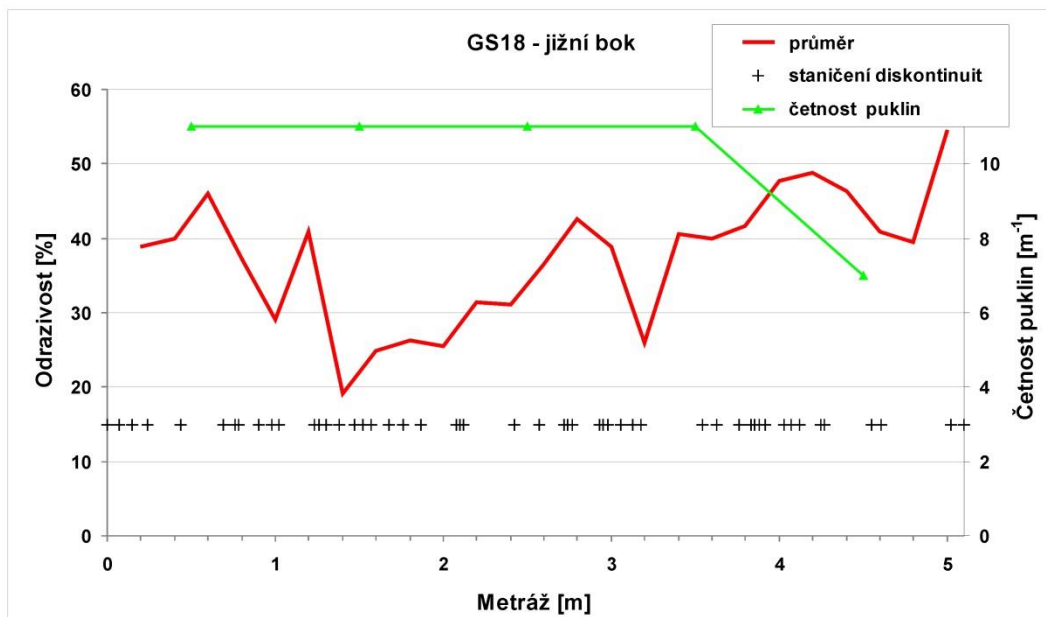
V našem případě u použití Schmidtova kladívka nešlo o testování pevnosti hornin, ale jeho použití směřovalo k získání dalšího parametru, který by vypovídal o geotechnickém stavu horninového masivu. Všeobecně je známo, že míra odrazivosti bude záviset nejen na objemové hmotnosti, ale i na míře porušení, respektive množství výskytu a orientaci puklin HM v boku důlního díla v oblasti měření Schmidtovým kladívkem. Vztah výšky odrazu Schmidtova kladívka k rychlosti podélných (P-wave) ultrazvukových vln, respektive k počtu puklin, uvádí např. Kahraman (2001).

Měření bylo prováděno horizontálně orientovaným Schmidtovým kladívkem na identických profilech, na kterých probíhalo strukturně geologické mapování. Jednotlivé metrové úseky byly dále rozděleny na 5 dílčích úseků o délce 0,2 m. V těchto úsecích bylo provedeno cca 8–10 měření odrazivosti na záměrné linii a ve vertikální vzdálenosti cca 0,4 m od této měřicí linie strukturního mapování. Je nutné zmínit, že naměřené hodnoty jsou vysoce citlivé na výběr místa měření (vzdálenost měření od nejbližší pukliny, výskyt měkkých minerálů apod.), správné přiložení kladívka na horninu a subjektivní přístup osoby, která s kladívkem měří. I přes tyto negativní okolnosti mohou mít tato měření pomocný informativní charakter pro posouzení analyzovaného horninového masivu z pohledu jeho kvality, popřípadě i zařídění do kvazihomogenních celků.

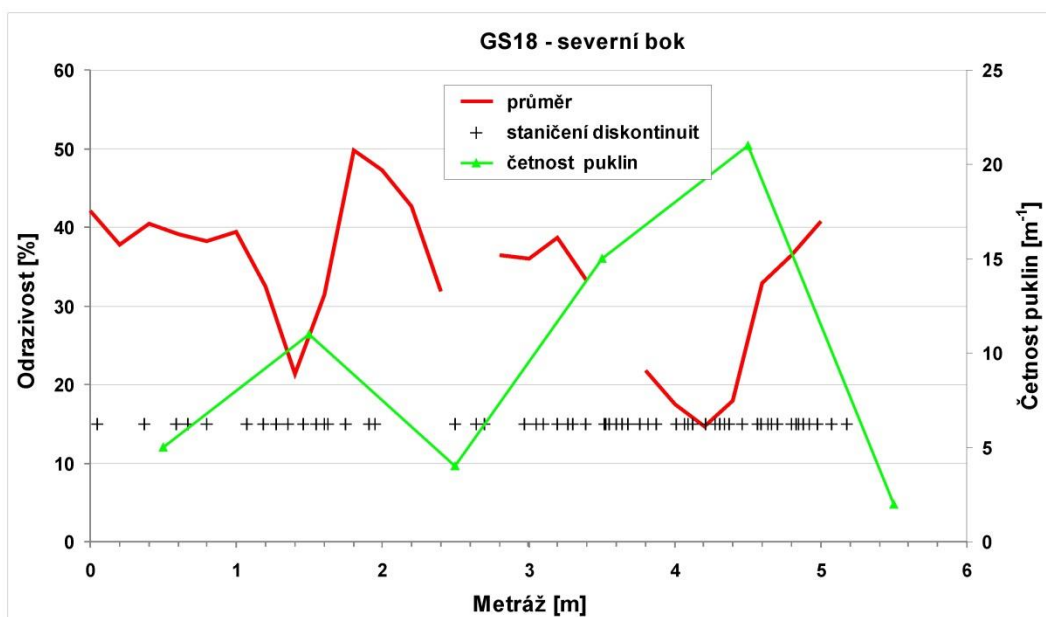
Z těchto osmi až deseti měření byla vypočtena průměrná hodnota odrazivosti pro každou dvacetimetřovou oblast měření. Průměrná hodnota odrazivosti byla následně vynesena do společného grafu spolu s hodnotou četnosti puklin a jejich pozicí v měřicím profilu (Obr. 360 až Obr. 365).



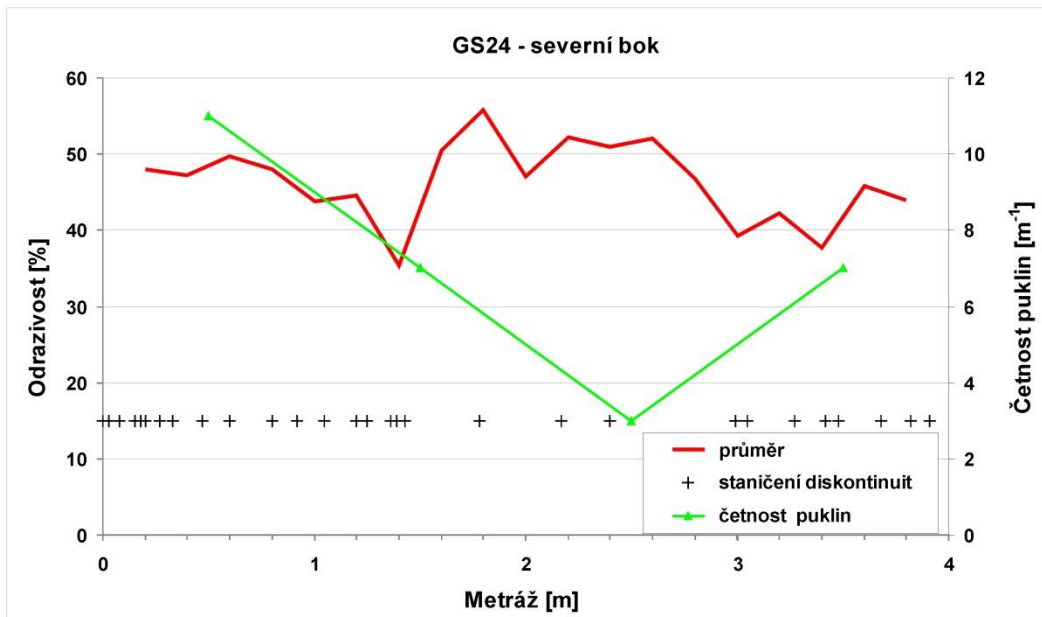
Obr. 360 Grafické znázornění průběhu hodnot odrazivosti, četnosti puklin, včetně pozice puklin na záměrné linii u GS12



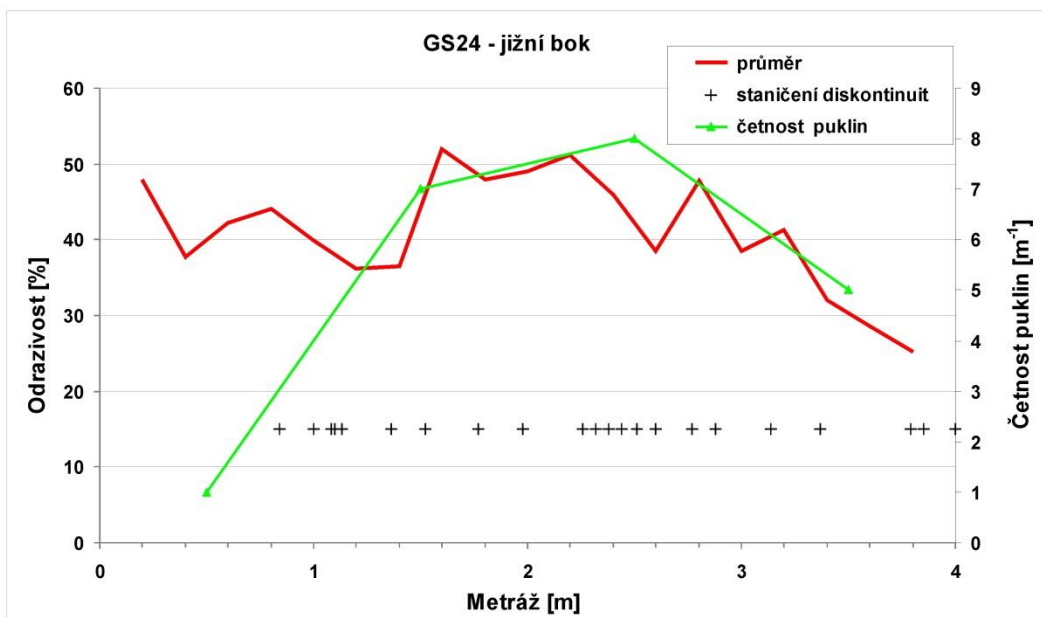
Obr. 361 Grafické znázornění průběhu hodnot odrazivosti, četnosti puklin, včetně pozice puklin na záměrné linii u GS18 na jižním boku důlního díla



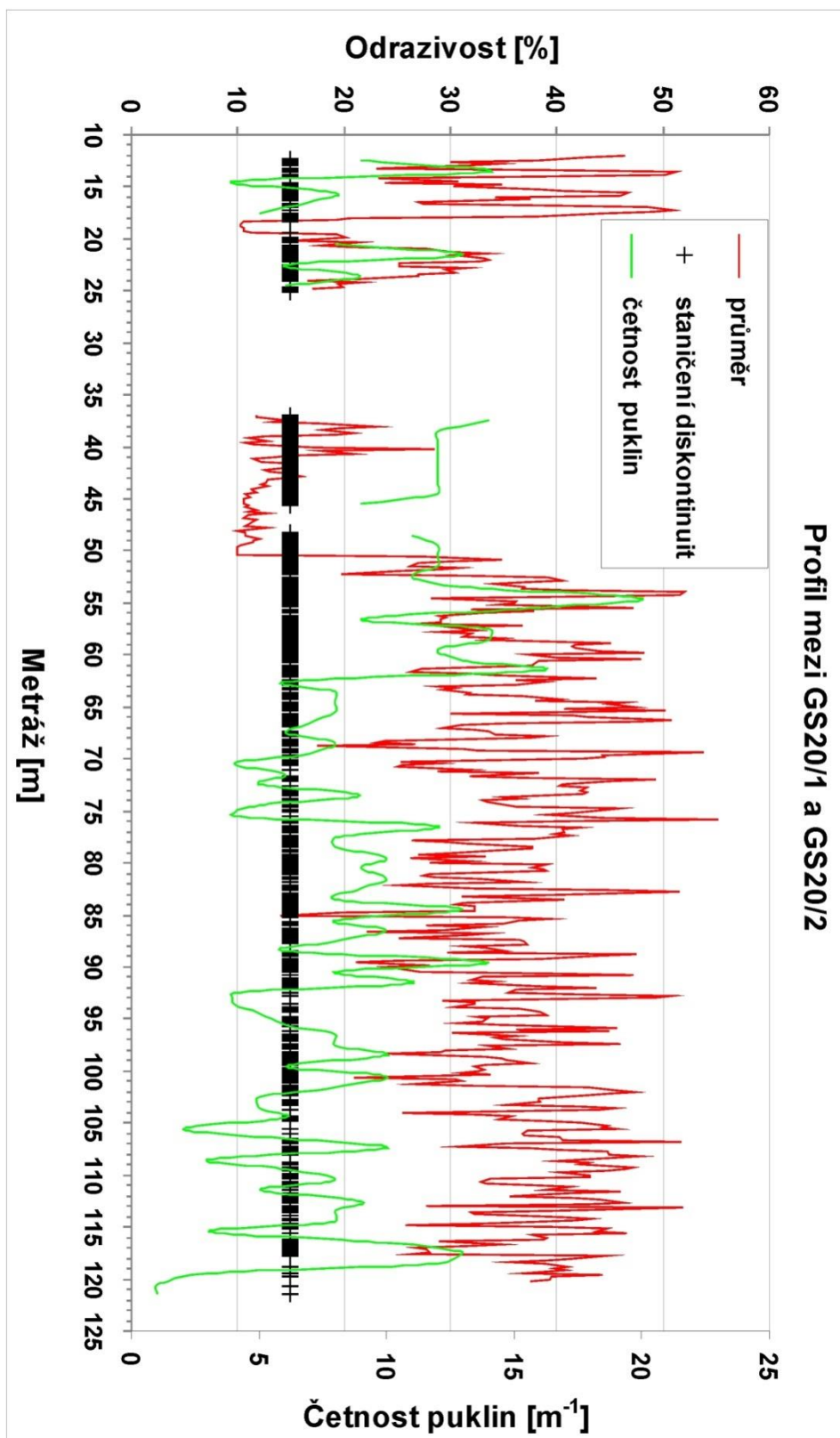
Obr. 362 Grafické znázornění průběhu hodnot odrazivosti, četnosti puklin, včetně pozice puklin na záměrné linii u GS18 na severním boku důlního díla



Obr. 363 Grafické znázornění průběhu hodnot odrazivosti, četnosti puklin, včetně pozice puklin na záměrné linii u GS24 na severním boku důlního díla



Obr. 364 Grafické znázornění průběhu hodnot odrazivosti, četnosti puklin, včetně pozice puklin na záměrné linii u GS24 na jižním boku důlního díla



Obr. 365 Grafické znázornění průběhu hodnot odrazivosti, četnosti puklin, včetně pozice puklin na záměrné linii mezi GS20/1 a GS20/2

2.4.3 Přetvárné vlastnosti horninového masivu in-situ

2.4.3.1 Testované vrty

Za účelem splnění cílů projektu byly v dole Rožná pomocí lisu Goodman Jack testovány vrty BGS 12-H, BGS 12-VU, vrty BGS 18-H, BGS 18-VU, BGS 20/1-H, BGS 20/1-VU, BGS 20/2-H, BGS 20/2-VU, BGS 24-H a BGS 24-VU.

2.4.3.2 Popis zařízení

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

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

2.4.3.3 Metodika zkoušek

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

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

Zkoušky jsou standardním způsobem prováděny s dvěma zatěžovacími cykly, přičemž maximální zatížení v prvním cyklu činí obvykle polovinu maximálního zatížení cyklu druhého. V našem případě bylo zvoleno stupňovité zatěžování s krokem 2 MPa až do 10 MPa, odlehčení se stejným krokem na hodnotu 2 MPa a poté zatěžování v druhém cyklu se stejným krokem až na maximální hodnotu 20 MPa. Následné odlehčování je rovněž prováděno s krokem 2 MPa. Doba trvání každého zatěžovacího stupně činí přibližně 1 min, v pevných skalních horninách dochází k velmi rychlému ustalování deformací.

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

hodnot činí cca $-5,50$ mm až $+5,50$ mm. Zobrazené hodnotě $0,00$ mm odpovídá průměr vrtu $75,9$ mm.

2.4.3.4 Metodika vyhodnocení

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

Základním vzorcem pro výpočet modulu přetvárnosti (pružnosti) je následující vzorec uvedený v manuálu výrobce k aparatuře Goodman Jack (13):

$$E = 0,86 \times D \times K \times \frac{\Delta p}{\Delta d} \quad (39);$$

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

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

- Pro výpočet horní hranice E_{true} , což je hledaná hodnota modulu pružnosti in-situ platí $E_{true}=E_{core} \times 0,4$, kde E_{core} je deformační modul stanovený na vrtném jádru.
- Průměr vrtu by měl být přesně $76,2$ mm. Pokud jsou např. očekávány moduly okolo $34,5$ GPa, nesmí být průměr menší než $0,36$ mm a větší než $0,56$ mm. Důvodem je dosažení plného kontaktu mezi čelistmi lisu a stěny vrtu.
- Pro výpočet dat se používá vzorec (14):

$$E_{calc} = 0,86 \times 0,93 \times D \times T^* \times \frac{\Delta p}{\Delta d} \quad (40);$$

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

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

2.4.3.5 Výsledky terénních zkoušek

Výsledky stanovení deformačních modulů jsou přehledně zaznamenány v následující tabulce (Tab. 150), kde $E_{def, calc}$ odpovídá deformačnímu modulu z druhé zatěžovací větve zkoušky, tj. z 10 na 20 MPa v [GPa] vypočtenému podle rovnice (2), $E_{p, calc}$ odpovídá deformačnímu modulu z druhé odlehčovací větve zkoušky, tj. z 20 na 2 MPa v [GPa] vypočtenému podle rovnice (2), $E_{def, true}$ odpovídá deformačnímu modulu z druhé zatěžovací větve zkoušky, tj. z 10 na 20 MPa v [GPa] získanému z nomogramu uvedeném v ASTM (2016) a $E_{p, true}$ odpovídá deformačnímu modulu z druhé odlehčovací větve zkoušky, tj. z 20 na 2 MPa v [GPa] získanému z nomogramu uvedeném v ASTM (2016). Druhý zatěžovací stupeň byl vybrán proto, že v tomto oboru napětí má křivka napětí – přetvoření lineární průběh a neobsahuje parazitní vlivy jako dosednutí čelistí na horninu. Pro výpočet deformačních modulů byla použita hodnota $\nu=0,2$ Poissonova čísla získaného průměrem z laboratorních zkoušek, které jsou obsahem kapitoly 2.3.5.

Tab. 150 Vyhodnocení in situ deformačních modulů

Vrt	Hloubka	$E_{def, calc}$ [GPa]	$E_{p, calc}$ [GPa]	$E_{def, true}$ [GPa]	$E_{p, true}$ [GPa]
BGS 12-H	3,0	8,7	9,1	13,1	13,8
	6,0	12,8	13,0	26,2	26,9
	9,0	11,9	12,0	22,8	22,8
	12,0	11,9	13,1	22,8	26,9
	15,0	9,8	9,7	16,5	16,5
BGS 12-VU	2,0	8,8	7,9	13,1	11,0
	4,0	10,5	10,8	17,9	18,6
	6,0	11,1	11,6	19,3	22,1
	8,0	23,8	29,9	*	*
	10,0	8,7	7,9	13,1	11,0
	12,0	10,4	12,5	17,9	24,1
BGS 18-H	3,0	11,1	13,0	19,3	26,9
	6,0	11,9	13,6	22,8	29,0
	9,0	9,8	10,4	16,5	17,9
	12,0	33,2	24,9	*	*
	15,0	10,4	11,9	17,9	22,8
BGS 18-VU	1,7	11,9	15,0	22,8	35,2
	3,7	12,8	12,0	26,2	22,8
	5,7	10,4	11,5	17,9	22,1

Vrt	Hloubka	$E_{\text{def, calc}}$ [GPa]	$E_{\text{p, calc}}$ [GPa]	$E_{\text{def, true}}$ [GPa]	$E_{\text{p, true}}$ [GPa]
	7,7	9,3	10,0	14,5	17,2
	9,7	12,8	13,6	26,2	29,0
	11,7	9,3	10,0	14,5	17,2
	13,7	12,8	12,5	26,2	24,1
BGS 20/1-H	3,0	18,6	20,0	55,8	68,9
	6,0	7,0	6,1	9,0	7,6
	9,0	11,9	14,3	22,8	32,4
	12,0	13,9	21,4	31,0	84,1
	15,0	16,7	21,4	44,8	84,1
BGS 20/1-VU	3,7	6,4	8,3	8,3	12,4
	5,7	9,2	8,1	14,5	11,7
	7,7	18,5	13,1	**	**
	9,7	6,4	6,1	8,3	8,3
	11,7	5,5	6,5	7,6	8,3
	13,7	7,9	9,4	11,7	15,9
BGS 20/2-H	3,0	16,7	17,7	44,8	51,0
	6,0	6,0	5,5	7,6	6,2
	9,0	12,9	13,1	26,2	26,9
	12,0	13,9	13,1	31,0	26,9
	15,0	15,1	16,7	36,5	44,8
BGS 20/2-VU	3,7	11,9	11,5	22,8	22,1
	5,7	10,4	8,8	17,9	14,5
	7,7	13,9	14,3	31,0	32,4
	9,7	9,2	6,4	**	**
	11,7	11,9	13,1	22,8	26,9
	13,7	4,6	4,7	5,5	5,5
BGS 24-H	3,0	7,3	7,5	9,7	10,3
	6,0	7,6	9,7	11,0	16,5
	9,0	8,3	9,4	12,4	15,9

Vrt	Hloubka	$E_{def, calc}$ [GPa]	$E_{p, calc}$ [GPa]	$E_{def, true}$ [GPa]	$E_{p, true}$ [GPa]
	12,0	12,8	17,7	26,2	51,0
	14,4	2,8	15,0	**	**
BGS 24-VU	1,9	11,9	11,6	22,8	22,1
	3,9	6,7	5,5	8,3	6,2
	5,9	12,8	12,5	26,2	24,1
	7,9	10,4	10,0	17,9	17,2
	9,9	16,7	15,8	44,8	40,0
	11,9	10,4	10,0	17,9	17,2
	13,9	8,8	11,1	13,1	19,3

Pozn.: *příliš vysoké hodnoty E_{calc} nelze odečíst z nomogramu

**nereálné hodnoty díky diskontinuitám situovaným ve vrtech v testovaných etážích

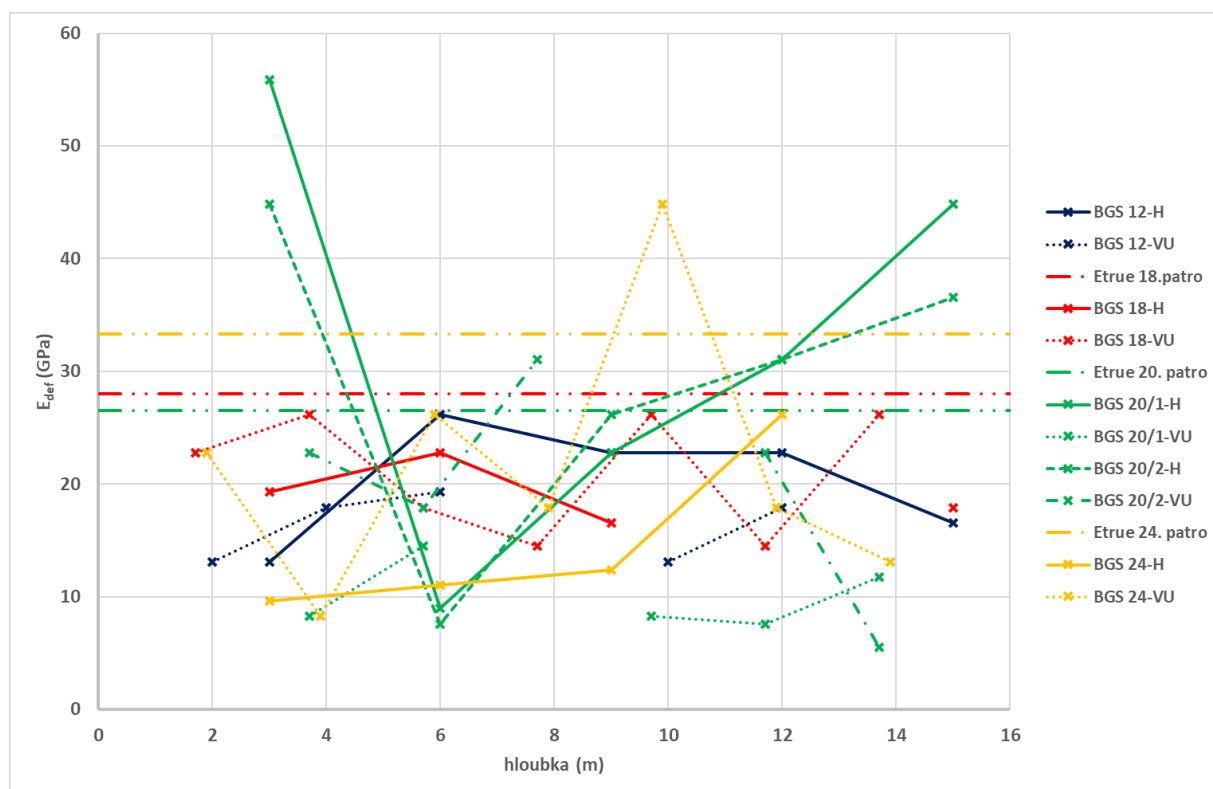
Grafické zobrazení vypočtených hodnot $E_{def, true}$ a $E_{p, true}$ je zachyceno na následujících obrázcích Obr. 366 a Obr. 367. Vodorovné čáry v těchto grafech označené jako $E_{true 18. patro}$, $E_{true 20. patro}$ a $E_{true 24. patro}$ jsou horní limity pro deformační moduly. Tyto hodnoty Tab. 151 byly získány redukcí průměrných hodnot z laboratorních zkoušek E_{core} postupem uvedeným v kapitole 2.4.3.4. Průměrné hodnoty vzniklé vynecháním hodnot deformačních modulů, které se pohybují nad touto teoretickou úrovní, jsou obsahem následující tabulky Tab. 152. Z grafů Obr. 366 a Obr. 367 vyplývá, že v testovaných etážích nebyla zjištěna žádná korelace měřených hodnot s hloubkou nebo se směrem zatěžování (vrty označené H vs. VU, vzájemně otočené o 90°). Rozdíl hodnot mezi zatěžováním ($E_{def, true}$) a odlehčováním ($E_{p, true}$) může indikovat poškození stěn vrtu nebo neelastické chování horniny. Proto se doporučuje použít k dalším úvahám hodnoty ze zatěžování (ASTM 2016).

Tab. 151 Horní limity E_{true} pro stanovení deformačních modulů

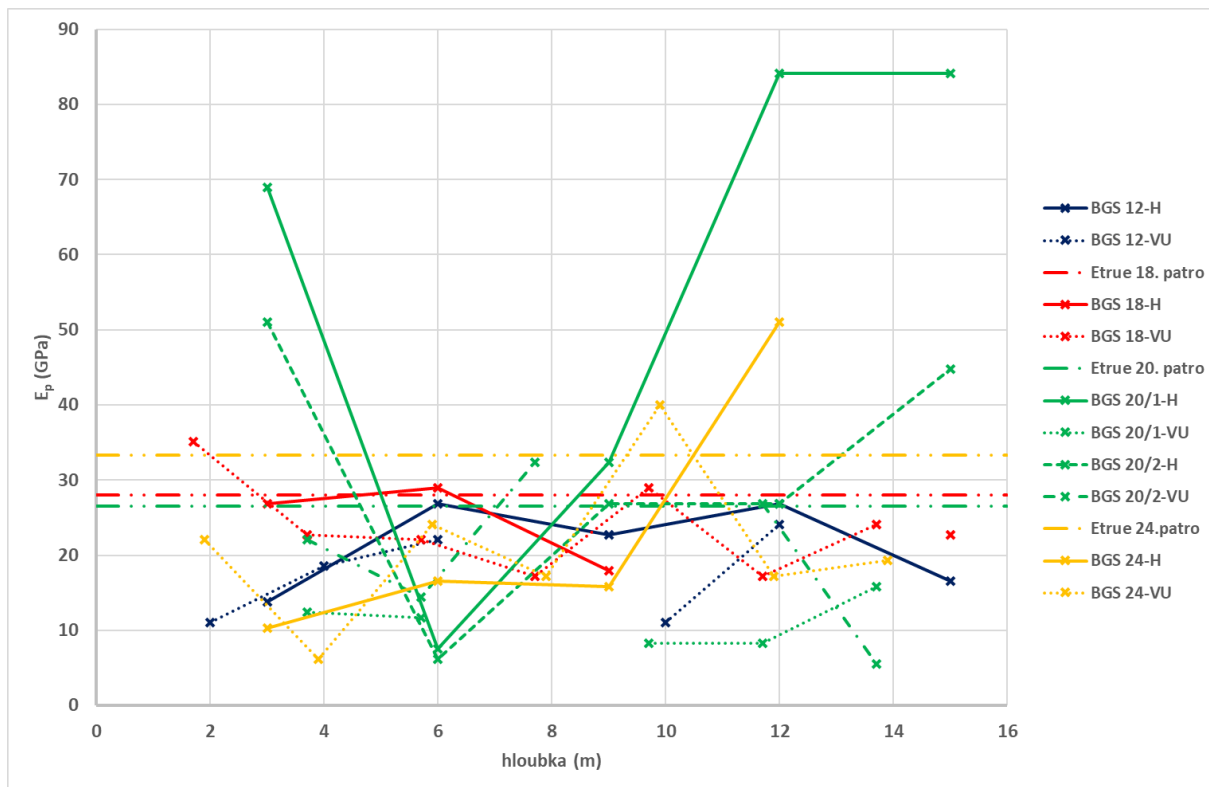
Patro	$E_{def, core}$ [GPa]	$E_{p, core}$ [GPa]	$E_{def, true, theoretical}$ [GPa]	$E_{p, true, theoretical}$ [GPa]	$E_{true, theoretical}$ [GPa] (průměr)
18.	69,3	70,8	27,7	28,3	28,0
20.	66,5	66,0	26,6	26,4	26,5
24.	82,7	83,4	33,1	33,4	33,3

Tab. 152 Průměrné deformační moduly E_{true}

Patro	$E_{def, true}$ [GPa]	$E_{p, true}$ [GPa]
12.	18,3	19,4
18.	20,4	22,9
20.	15,4	16,1
24.	16,5	16,5



Obr. 366 Průběh deformačních modulů z druhé zatěžovací větve s hloubkou

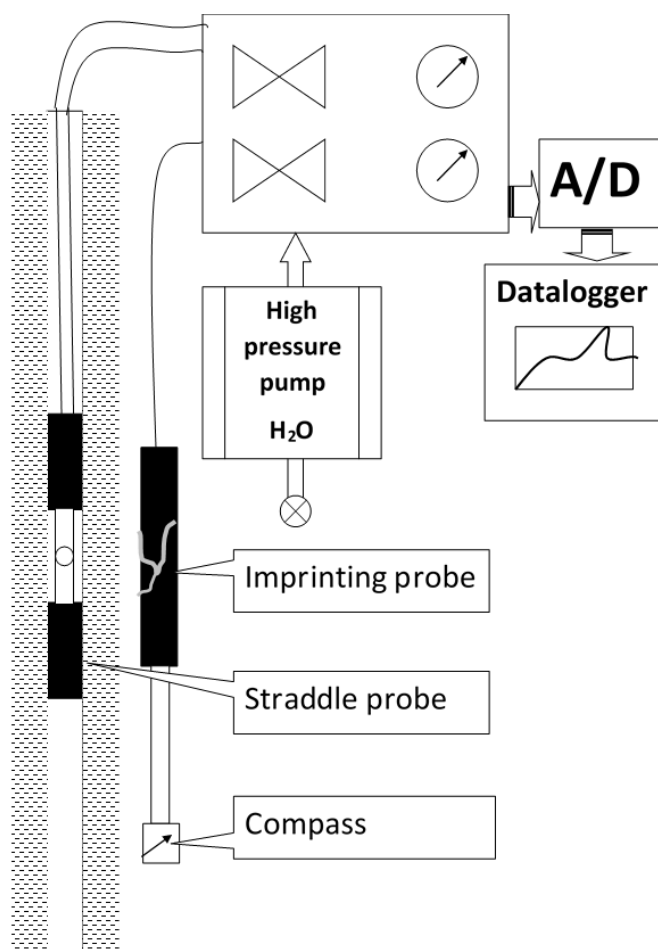


Obr. 367 Průběh deformačních modulů z druhé odlehčovací větve s hloubkou

2.4.4 Napěťový stav horninového masivu

2.4.4.1 Principy metody hydraulického štěpení stěn vrtu - hydrofracturing

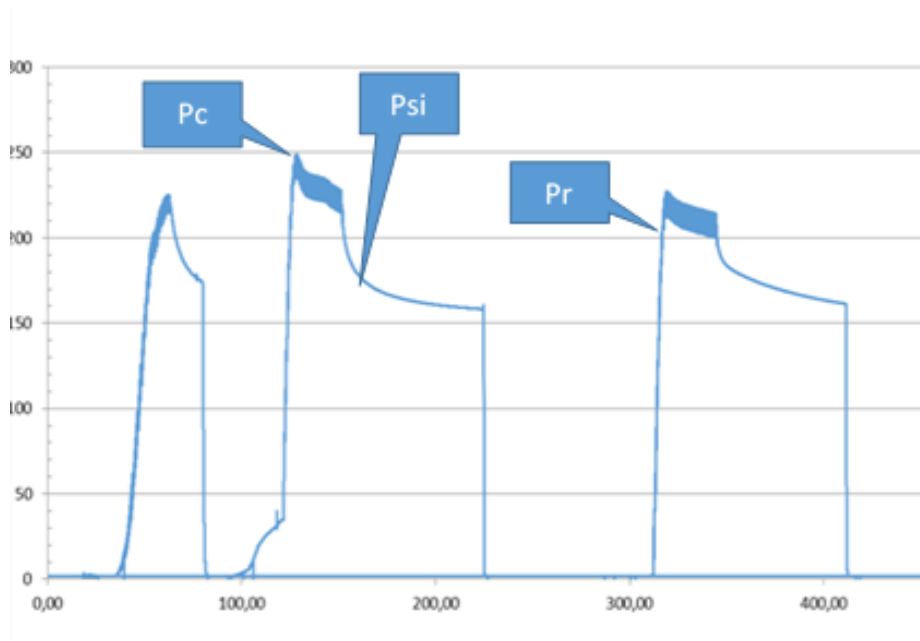
Pro měření napětí byla dle zadání vybrána metoda hydraulického štěpení stěn vrtu – „hydrofracturing“. Tato metoda umožňuje přímé měření napětí v oblastech dostupných pouze vrtu. Dosah do masivu je závislý jen na manipulačních délkách spojovacího materiálu a charakteristikách vysokotlakého čerpadla. Podmínkou pro nasazení metody je však dostatečně nepropustné prostředí schopné křehkého lomu pro vytvoření jednotlivé trhliny. Pro měření je potřebné jak speciální zařízení (sestavující se z vysokotlakého čerpadla, speciální trhací sondy, obtiskové sondy, orientačního zařízení do vrtu, hydraulických trubek a manipulačního vrátku), tak SW pro vyhodnocování jednotlivých měření. Schéma potřebného měřicího zařízení je znázorněno na Obr. 368. Experimentální měření je vztaženo k větší části masivu nacházející se v okolí vrtu. Vzhledem k délkám sondy zabezpečující rozvoj trhliny v masivu se jedná o oblast s lineárními rozměry řádu decimetrů až prvních metrů. Metoda je aplikována v kompaktních horninách ve vybraných místech tak, aby izolovala pro měření vždy pouze jedinou buď přirozenou, nebo uměle vytvořenou trhlínu.



Obr. 368 Schéma experimentálního měření metodou hydraulického štěpení stěn vrtu

Měření napětí v horninovém masivu je tímto způsobem založeno na předpokladu, že v jistý okamžik experimentu se dostává do rovnováhy tlak média v měřicím vrtu P_{si} (P) otevírající trhlinu a napětí v hornině snaží se trhlinu uzavřít. Tento tlak pak odpovídá napětí působícímu po normále k vytvořené rovině trhliny. Kromě toho lze ze zápisu průběhu tlaku na čase odečíst další charakteristické hodnoty, tj. tlak způsobující vznik trhliny P_c a tlak nezbytný pro znovuotevření uzavřené trhliny P_r (viz Obr. 369). Základní fáze metody lze charakterizovat takto:

- výběr místa a vytvoření izolované trhliny, resp. izolace přírodní trhliny od okolí na základě např. videoinspekce vrtu,
- zjištění normálové složky napětí na vytvořené trhlíně,
- zjištění orientace trhliny v prostoru pomocí speciální obtiskové sondy.



Obr. 369 Záznam průběhu experimentálního měření tlaku pracovního média při měření napětí metodou hydrofracturing

Výsledkem měření v úpadním vertikálním vrtu je stanovení velikosti jak hlavního minimálního horizontálního napětí (S_H), tak jeho kolmé složky - hlavního maximálního horizontálního napětí (S_H). Registrace orientace měřicího zařízení ve vrtu umožňuje přiřadit těmto složkám i orientaci vzhledem k světovým stranám. Ta je určena z kombinace orientace otisku trhliny vztažené k souřadnému systému otiskové sondy a zjištěného pootočení sondy vzhledem k magnetickému severu. Názorné schéma experimentálního zařízení pro aplikaci metody hydraulického štěpení stěny vrtu pro účely stanovení hlavní maximální (S_H) a minimální (S_H) složky horizontálního napětí je zřejmý z Obr. 368. Orientace trhliny, její azimut, je vyhodnocován z měření pozice obtisknuté trhliny na otiskové sondě (tzv. imprinting probe) a hodnoty pootočení sondy získané z měření pomocí speciálního kompasu. Kompas je pevně a orientovaně připevněn k této speciální sondě. Metodika vyhodnocení vychází z předpokladu, že jedna hlavní složka napěťového pole je orientována paralelně s osou testovaného vrtu a ostatní dvě pak leží v rovině k ní kolmé. Zároveň se předpokládá, že vznikající trhlina se vytváří ve směru kolmém na nejmenší složku napěťového pole (při kladné konvenci komprese) po prvotním překonání tahové pevnosti horniny.

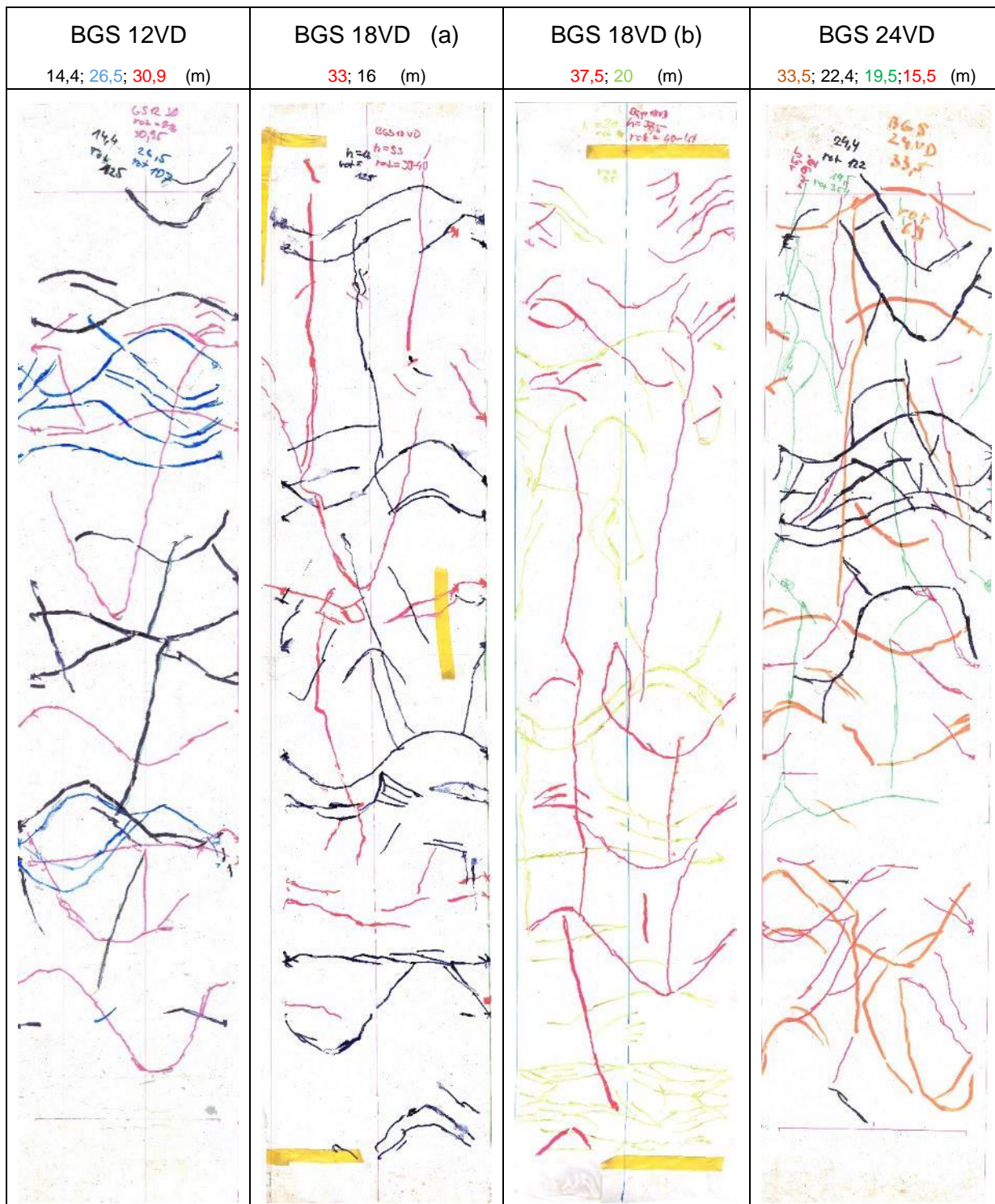
2.4.4.2 Realizace měření na jednotlivých GS

Hlavním smyslem napěťových měření v tomto projektu bylo ověřit velikosti a vývoj napěťového pole před plánovaným uzavřením lokality, zejména chování preferovaných směrů hlavních horizontálních složek ve vztahu k hloubce pod povrchem. Zkoumaný masiv metamorfovaných hornin se nachází v těsné blízkosti jedné z navrhovaných lokalit pro vybudování podzemního úložiště vyhořelého jaderného paliva, takže získaná data by mohla pomoci jako jeden z parametrů při hodnocení vhodnosti této lokality.

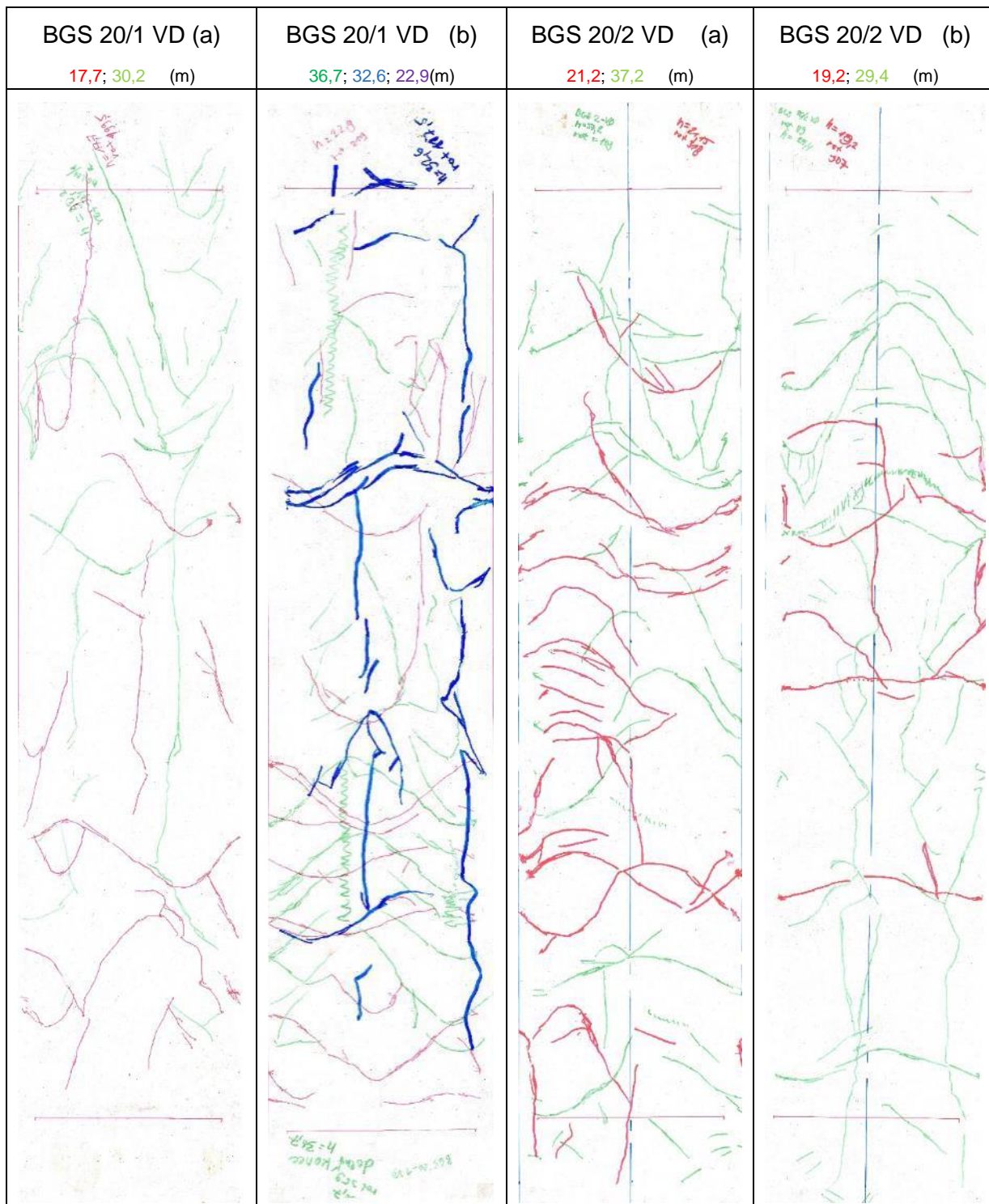
Měření byla podle plánu realizována ve svislých úpadních vrtech v geotechnických stanicích vybudovaných na 12., 18., 20. a 24. patře dolu Rožná v okolí jámy R-7S. Měření byla provedena v celkem 5 úpadních vrtech (po jedné stanici na 12., 18. a 24. patře a ve dvou stanicích na 20. patře). Byla použita upravená aparatura fy Messy.

Měření v jednotlivých vrtech byla prováděna na základě předchozí rekognoskace stěn vrtu pomocí optické (OPTV (OBI)) a akustické karotážní sondy (HiRAT (ABI)). Na základě získaného obrazu stěn vrtu bylo vybráno v každém vrtu několik hloubkových úrovní pro měření (zpravidla 4 až 5 pozic). Vzhledem k rozměrům a geometrii chodby, pro minimalizaci jejího vlivu na měření, byly relevantní úrovně vybrány převážně hlouběji než 14 m.

Ačkoliv vybrané úrovně pro aplikaci metody hydraulického štěpení byly vybírány poměrně pečlivě z hlediska vizuální kompaktnosti (neporušenosti) stěny vrtu, většina otisků z aplikačních míst je v důsledku strukturní a foliační stavby horninového masivu natolik komplikovaná, že po experimentu neumožňuje identifikovat jednotlivou konkrétní aktivovanou trhlinu, ke které jsou naměřené hodnoty tlakových poměrů při experimentu vztaženy. Překreslené záznamy strukturních stop z pláště otiskové sondy po aplikaci trhací fáze v jednotlivých vybraných hloubkových úrovních v jednotlivých vybraných hloubkových úrovních na jednotlivých GS12, GS18, GS20/1, GS20/2 a GS24 jsou dokumentovány na Obr. 370 a Obr. 371.



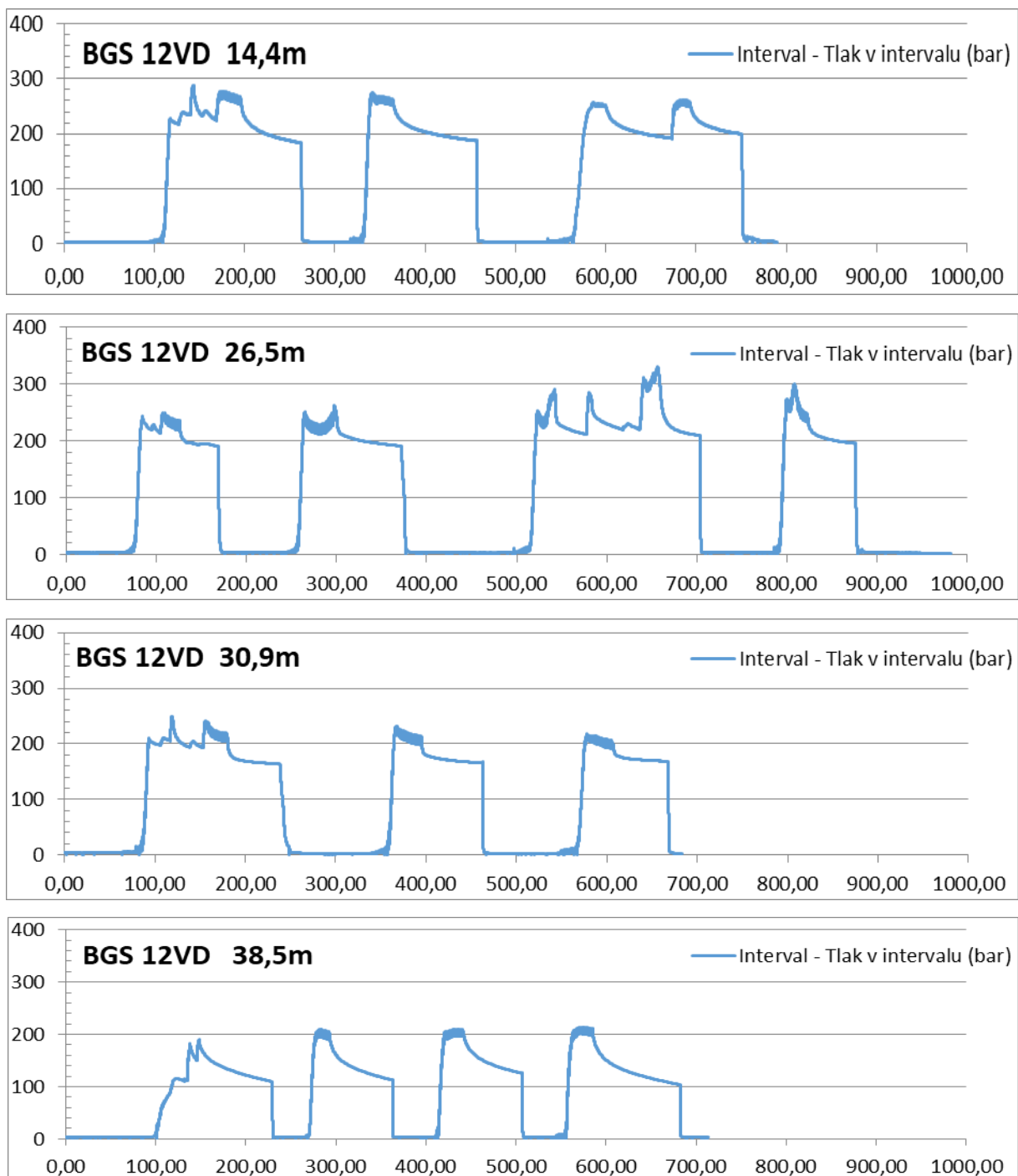
Obr. 370 Zaznamenané obrazy stop trhlin na otiskové sondě v úpadních vrtech stanic GS12, GS18 a GS24 (barevná čísla v hlavičce každého sloupce identifikují hloubkovou úroveň měření od ústí v daném vrtu, barva otisků je ztotožněna s hloubkovou identifikací)



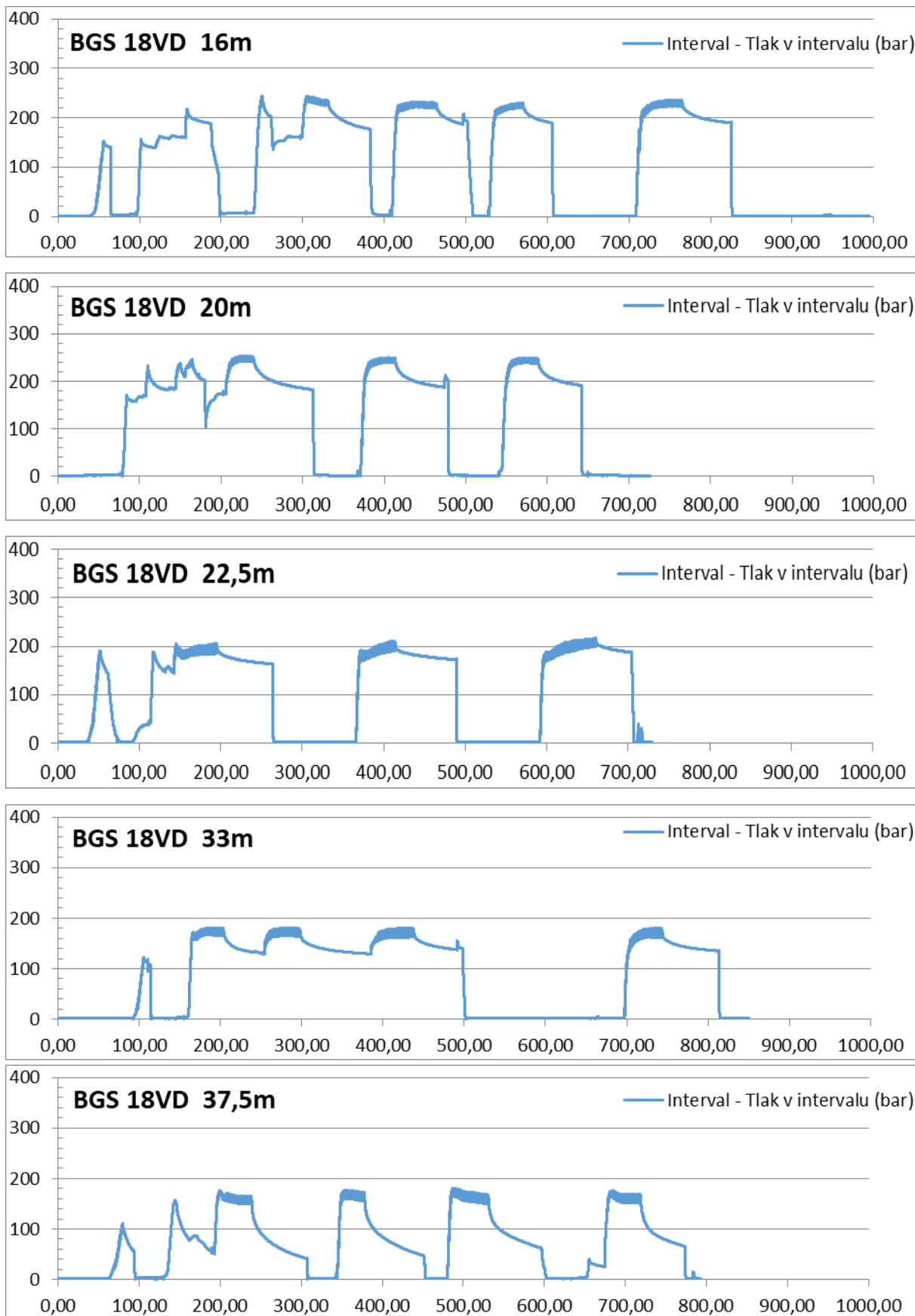
Obr. 371 Zaznamenané obrazy stopy trhlin na otiskové sondě v úpadních vrtech stanic GS20/1 a GS20/2 (barevná čísla v hlavičce každého sloupce identifikují hloubkovou úroveň měření od ústí v daném vrtu, barva otisků je ztotožněna s hloubkovou identifikací)

Je zřejmé, že v prostoru testovaného intervalu stvolu vrtu se vždy nacházelo tlakem média více potenciálně aktivovatelných diskontinuit. Jedná se především o projev predisponovaných ploch porušení jak foliačních, tak i dřívějších diskontinuit se sníženou tahovou pevností. To neumožňovalo jednoznačně přiřadit naměřená data konkrétní prostorové orientaci vybrané

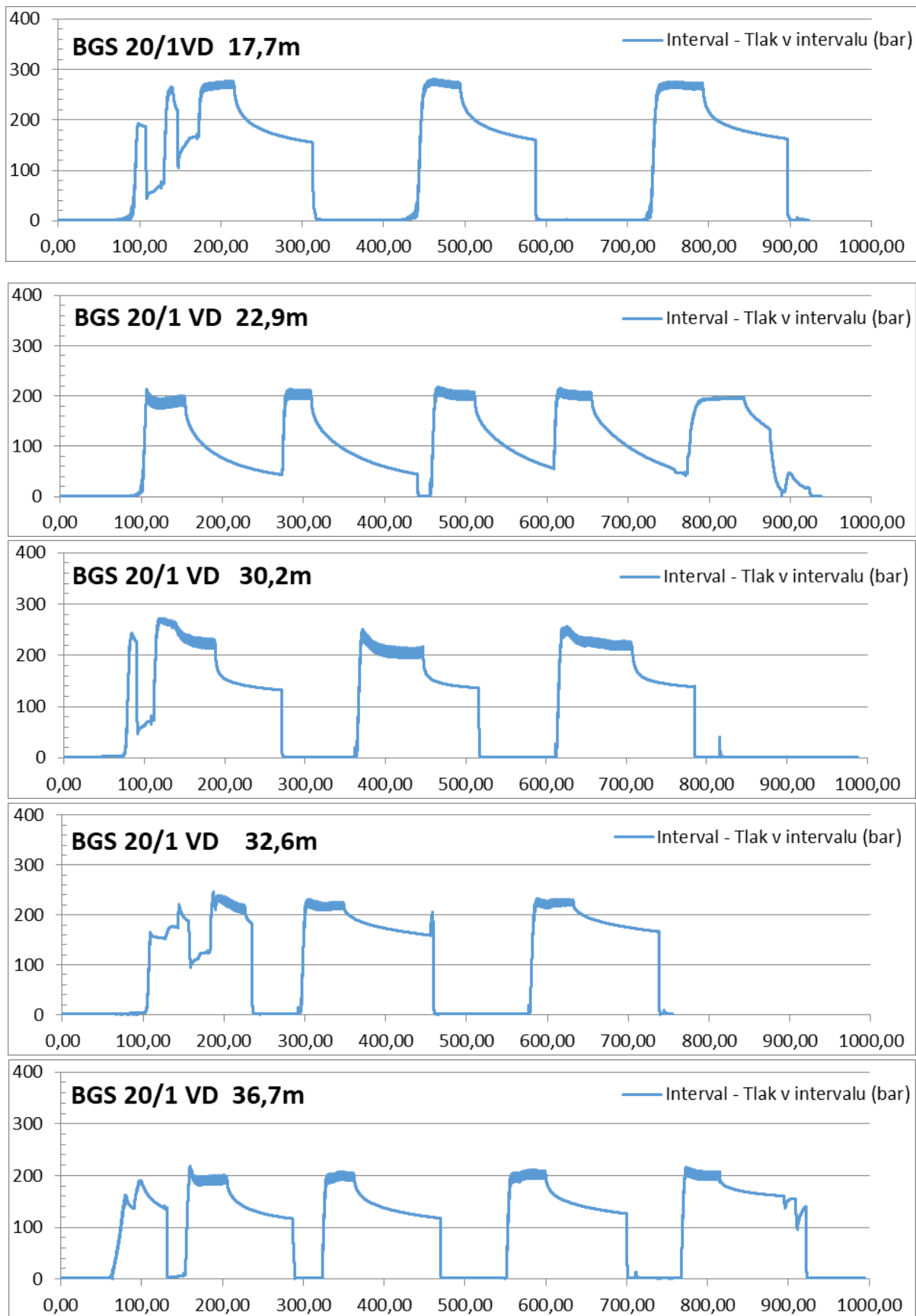
trhliny. Výskyt predisponovaných oslabených ploch v hornině také neumožňuje s jistotou předpokládat, že případná vnikající trhlina je kolmá ke směru nejmenší hlavní složky napěťového pole. Těmto podmínkám nasvědčují i mnohé záznamy průběhu tlakového zatížení médiem při experimentu (Obr. 372 až Obr. 376) demonstrující z hlediska předpokladů metodiky vyhodnocení nestandardní funkční průběh $p(t)$. Lze tedy předpokládat, že v průběhu testu docházelo ke kombinovanému zatěžování různých diskontinuit. To se výrazně projevovalo ve tvaru odezvy $p(t)$ v různých fázích experimentu.



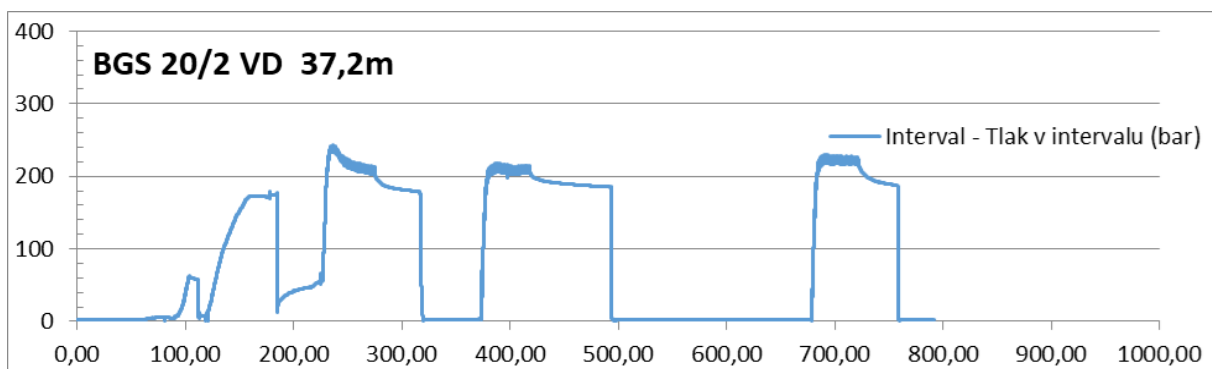
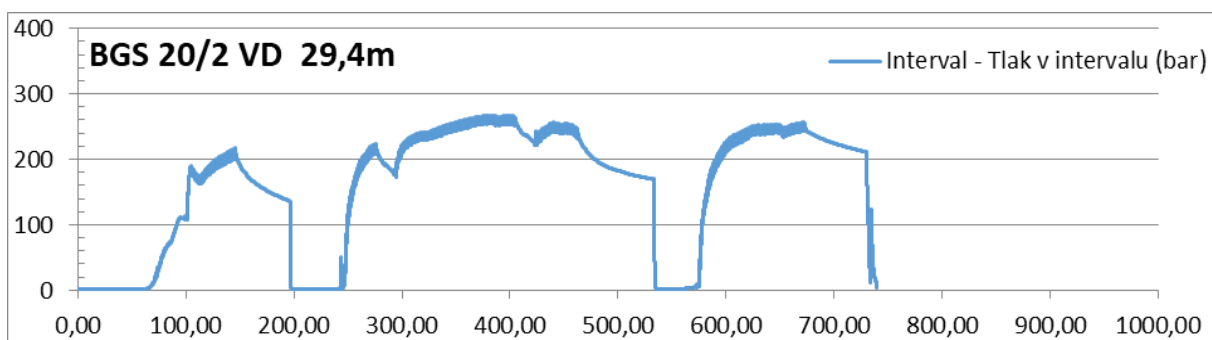
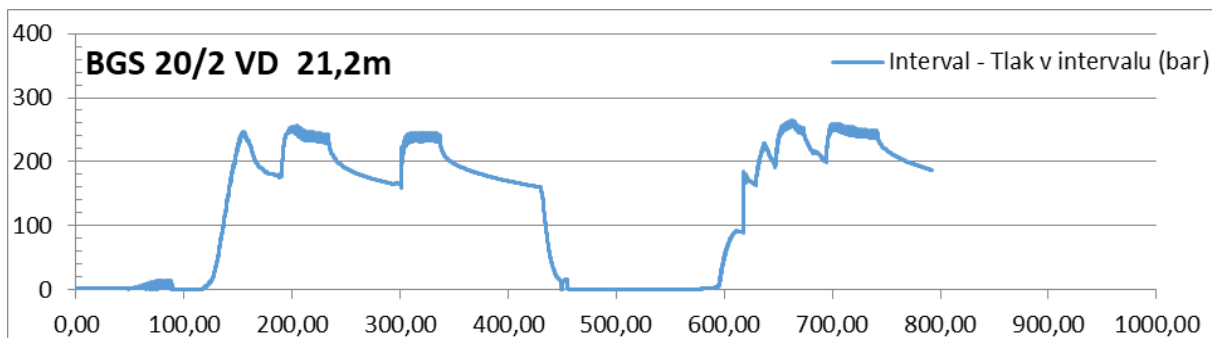
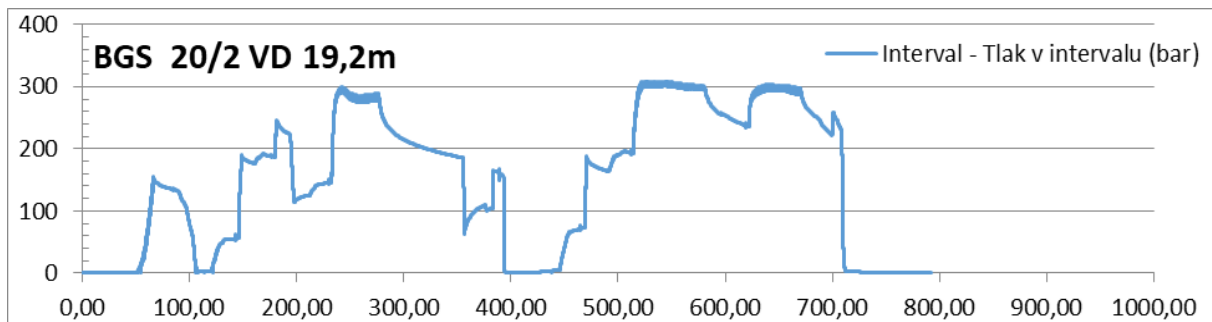
Obr. 372 Záznamy průběhu tlaku zkušebního média během zatěžovací fáze experimentu „hydrofracturing“ ve vrtu BGS12-VD



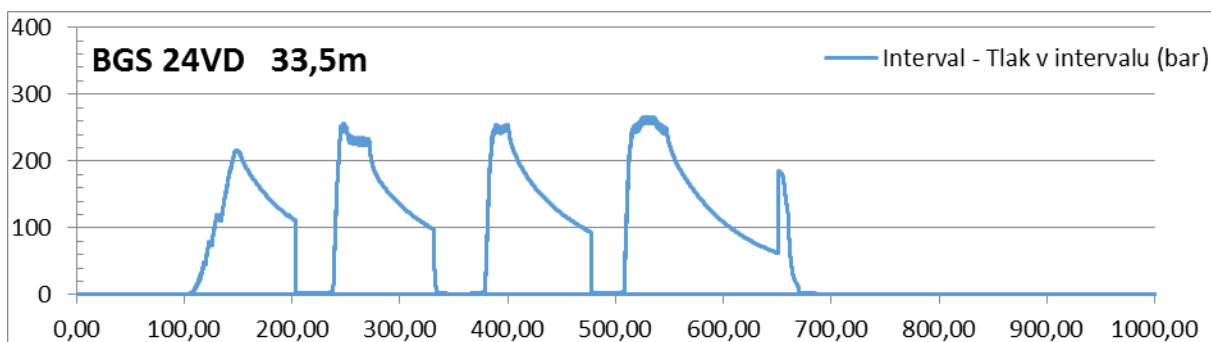
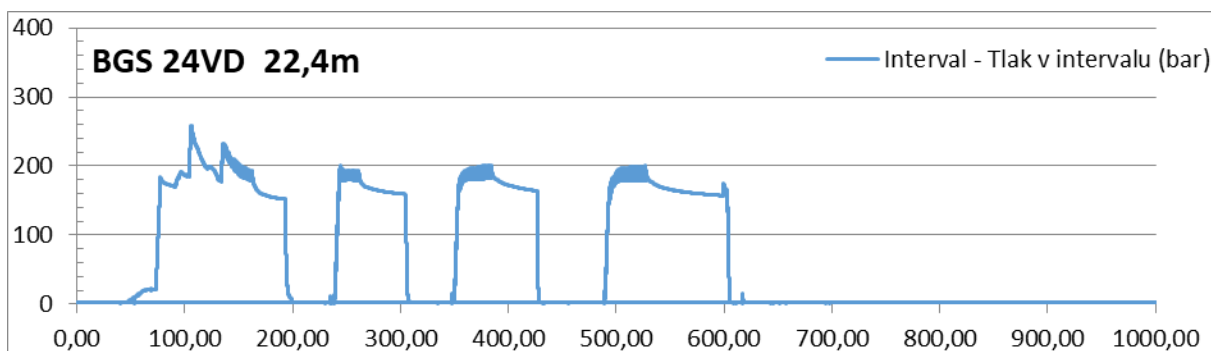
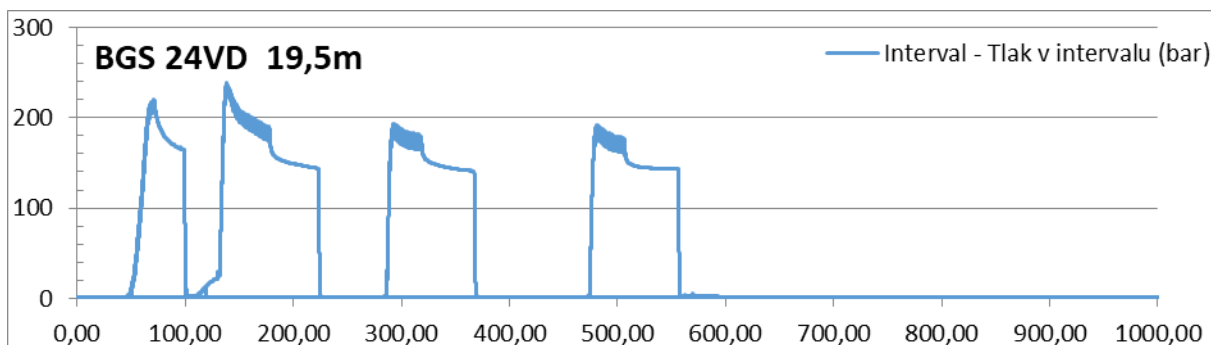
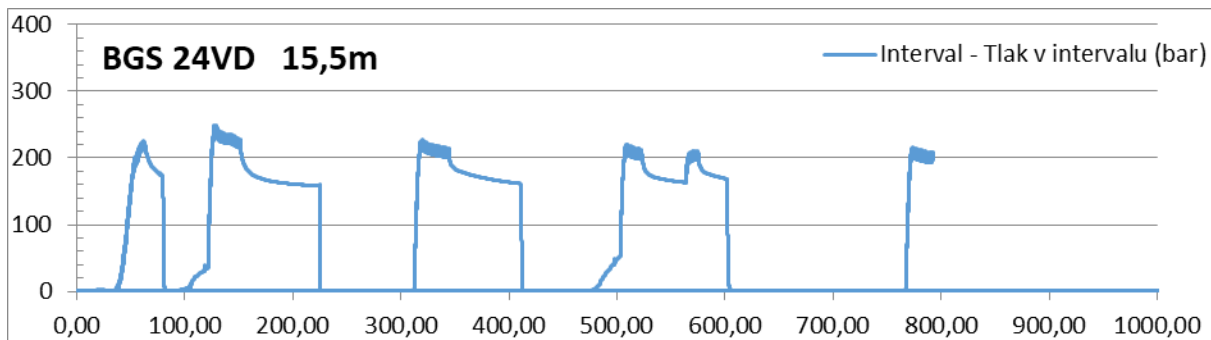
Obr. 373 Záznamy průběhu tlaku zkušebního média během zatěžovací fáze experimentu „hydrofracturing“ ve vrtu BGS18-VD



Obr. 374 Záznamy průběhu tlaku zkušebního média během zatěžovací fáze experimentu „hydrofracturing“ ve vrtu BGS20/1-VD



Obr. 375 Záznamy průběhu tlaku zkušebního média během zatěžovací fáze experimentu „hydrofracturing“ ve vrtu BGS20/2-VD



Obr. 376 Záznamy průběhu tlaku zkušebního média během zatěžovací fáze experimentu „hydrofracturing“ ve vrtu BGS24-VD

Vzhledem k těmto strukturně geologickým podmínkám jsme se rozhodli vyhodnotit měření několika způsoby.

První nejjednodušší metodika vychází z předpokládané distribuce napětí kolem kruhového otvoru. Předpokládáme, že jedno z hlavních napětí je paralelní k ose vrtu a dosahuje hodnot geostatického zatížení v dané hloubce, zároveň je masiv homogenní a izotropní, takže zátěžová

trhlina vzniká zákonitě ve směru kolmém na nejmenší složku napětového pole. Za tohoto předpokladu je možné vyhodnocovat horizontální hlavní složky napětového pole velmi jednoduše:

$$Sh = Psi \quad (41)$$

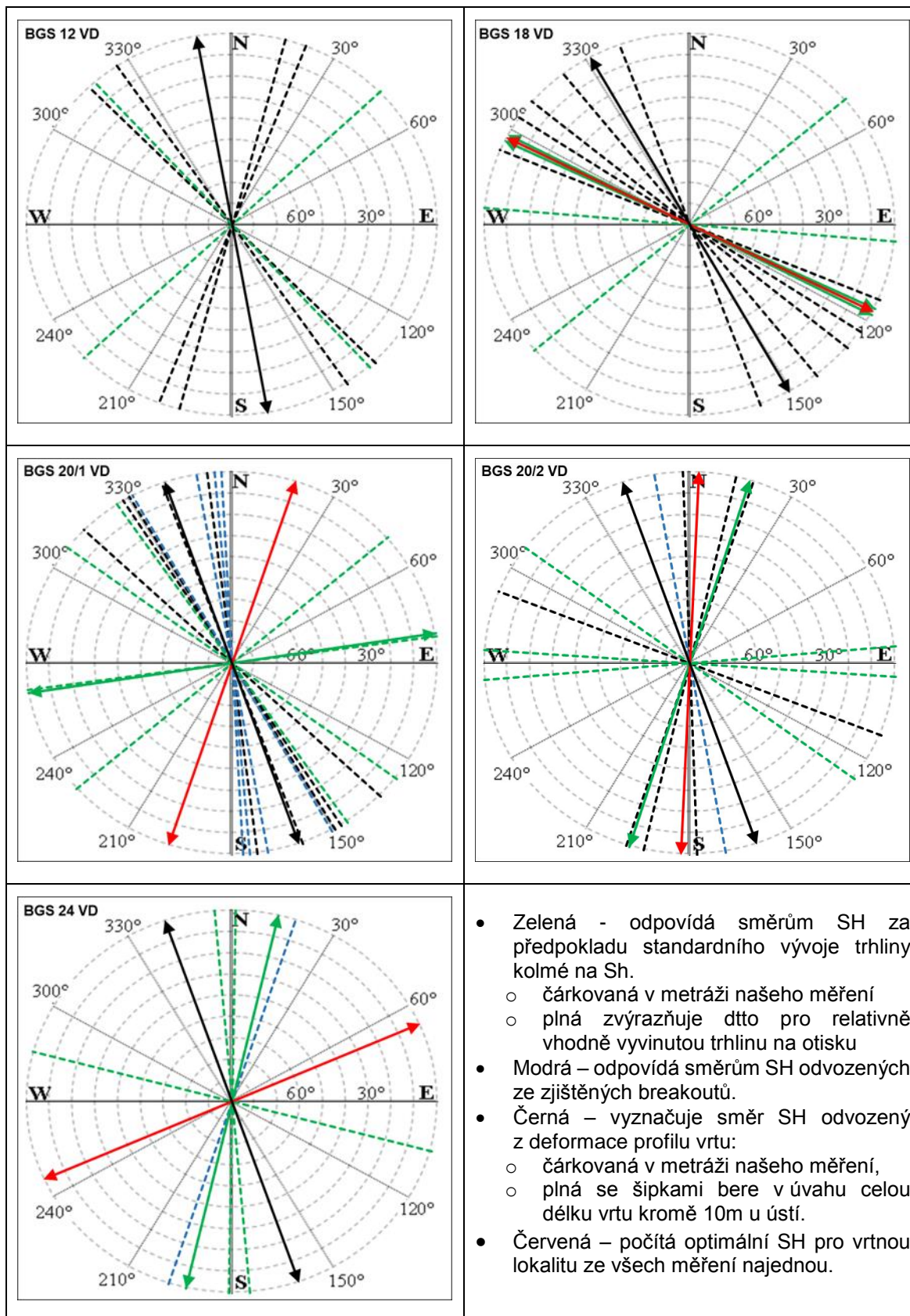
$$SH = 3 \cdot Psi - Pr \quad (Sv = \rho \cdot g \cdot h) \quad (42),$$

kde (viz Obr. 368) Psi - zavírací tlak na trhlině; Pr – tlak znovu otevírající trhlinu; SH, Sh, Sv – větší a menší hlavní složky horizontálního napětí a vertikální složka.

V Tab. 153 jsou uvedeny jednotlivé získané vstupní parametry včetně dílčích výsledků této interpretace. Výsledky byly částečně ošetřeny na vliv malého odklonu testované trhliny od vertikály. V Obr. 377, který porovnává vypočtené směry SH různými metodami, jsou tyto výsledky prezentovány čárkovanými zelenými úsečkami, zelené úsečky se šipkami pak prezentují směr odvozený z orientace trhliny, jež je subjektivně nejbližší očekávanému průběhu stopy trhliny na otiskové sondě.

Tab. 153 Výsledky měření metodou hydraulického štěpení stěn vrtu a jejich interpretace do napětového pole (červené popisy – interpretace napětového pole optimalizací řešení ze všech použitelných měření ve vrtu; bílé pole – nezávislé stanovení složek napětového pole z každého záměru samostatně, zelené popisy – dle otisků subjektivně nejpravděpodobnější aktivovaná trhlina)

Vrt BGS xx VD	Hloubka ve vrtu (m)	Rot sondy (°)	Pr (MPa)	Psi (MPa)	Sh (MPa)	SH (MPa)	Orientace spádnice trhliny (°) (dip/azimut)	
12	38,5		19	15			n/a	Není otisk
12	30,95	216	22	18	17	28	75/136	
12	26,5	107	26	21			n/a	Není výběr
12	14,4	125	25	22	21	37	74/48	
					Sh = n/a	SH = n/a	ϕ (SH) = n/a	
18	37,5	41	15,5	10	9	11	76/28	
18	33	40	15	15	15	26	82/26	
18	22,5		17	19			n/a	Není otisk
18	20	95	20,5	21	19	38	75/185	
18	16	125	21	20	19	37	77/229	
					Sh = 11	SH = 62	ϕ (SH)=117	?
20/1	36,7	359	16	15	14	27	80/319	
20/1	32,6	117	21	19	19	35	84/351	
20/1	30,2	74	23,5	15,5	13	15	71/236	
20/1	22,9	219	19,5	14	11	13	78/172	
20/1	17,7	200	25,5	19,5	19	31	81/217	
					Sh = 12,5	SH = 18	ϕ (SH) = 18	
20/2	19,2	307	28	21,5	23	41	22/217	
20/2	29,4	89	16	n/a			80/287	Není Psi
20/2	37,2	103	21	19,5	18	33	71/175	
20/2	21,2	318	25	23	15	20	66/4	
					Sh = 0	SH= 20	ϕ (SH) = 2,5	?
24	33,5	69	24,5	17	17	26	77/271	
24	22,4	122	16	17	10	19	62/195	
24	19,5	354	17,5	15,5	14	26	79/283	
24	15,5	92	20	17,5	16	28	80/265	
					Sh = 9,5	SH = 18	ϕ (SH) = 65	



Obr. 377 Grafické znázornění směru většího hlavního horizontálního napětí získaného různými metodami zpracování dat

Druhou metodou je metoda vyhodnocení napětí pouze z hodnot Psi v případě ukloněných trhlin. Výpočet hledá optimální řešení napěťového pole tak, aby co nejlépe vyhověl všem naměřeným výsledkům v dané testovací oblasti. Metoda vychází ze vzorce:

$$S_n = \Psi = S_v \cdot \cos^2(\alpha) + \frac{1}{2} \cdot \sin^2(\alpha) [S_H + S_h - (S_H - S_h) \cdot \cos(2 \cdot (\phi - \tau))], \quad (43)$$

kde S_n – normálové zatížení trhliny médiem, α - úklon trhliny, $\phi - \tau$ je úhlový rozdíl mezi směrem S_H a směrem trhliny. Tab. 153 tam, kde to bylo možné, prezentuje pro každý soubor měření daného vrtu napěťové pole získané tímto způsobem. V Obr. 377, porovnávacím vypočtené směry S_H různými metodami, je tento výsledek prezentován červenou úsečkou se šipkami.

Zřejmě v důsledku vysokého stupně komplikované strukturní geologické stavby masivu, i jen v rámci malého testovaného objemu v okolí vrtu, jsou výsledky velmi nestabilní a použití tohoto způsobu celkového stanovení napěťového pole a zejména jeho směru se v těchto podmínkách jeví málo účinné.

Jednou z možností určení směru je využít deformační projevy napěťového pole na stěnách a profilu vrtu. Při inspekci jednotlivých vrtů se podařilo v některých případech zaznamenat výskyt breakoutů na stěně vrtu (viz Elektronická příloha 25). Tyto jsou vytvářeny přetížením horniny a projevují se ve směru nejmenšího zatížení. Parametry a umístění je dokumentováno v Tab. 154 a v Obr. 377 jsou modrými přerušovanými úsečkami deklarovány z breakoutů odvozené směry S_H .

Tab. 154 Seznam nalezených „breakoutů“ v testovaných vrtech včetně jejich orientace v prostoru

Geotechnická stanice	Vrt č.	Hloubka (m)	Azimut 1 (°)	Azimut 2 (°)	Azimut SH (°)
GS20/1	BGS20/1-VD	7,2	87	267	177
GS20/1	BGS20/1-VD	15,7	85	265	175
GS20/1	BGS20/1-VD	20,9	60	240	150
GS20/1	BGS20/1-VD	36,5	80	260	170
GS20/2	BGS20/2-VD	32,4	80	260	170
GS24	BGS24-VD	33,2	108	288	198

Kromě těchto postupů jsme v každém vrtu prováděli ultrazvukovou karotáž zařízením akustické kamery - televieweru (HiRAT). To umožnilo následně vyhodnotit deformaci profilu vrtu – ovalizaci po celé jeho délce. Toto vyhodnocení je prezentováno v Tab. 155 až Tab. 157. Deklarovaný úhel představuje otočení delší poloosy oválu vzhledem k severu, následně orientace menší poloosy oválu pak představuje směr S_H . V Obr. 377 je černou úsečkou prezentován tento potenciální směr S_H vztahený k celkové střední ovalizaci vrtu. Černé čárkované úsečky pak demonstrují

stejnou veličinu pouze ohraničenou na metrový interval odpovídající hloubkové úrovni každého provedeného měření hydroštěpením.

Tab. 155 Ovalizace vrtů BGS12-VD a BGS18-VD po metrových úsecích a jejich celková střední ovalizace (a/b – tvarová anizotropie; ϕ_t – úhel mezi severem a delší poloosou (a) oválu (pokračování na další straně))

BGS12-VD			BGS18-VD		
Hloubka	a/b	ϕ_t	Hloubka	a/b	ϕ_t
38,000–37,000	1,0002	111	39,500–38,500	1,0001	44
37,000–36,000	1,0001	82	38,500–37,500	1,0001	8
36,000–35,000	1,0001	77	37,500–36,500	1,0001	39
35,000–34,000	1,0001	120	36,500–35,500	1,0001	162
34,000–33,000	1,0005	126	35,500–34,500	1,0001	70
33,000–32,000	1,0002	34	34,500–33,500	1	147
32,000–31,000	1,0001	23	33,500–32,500	1	158
31,000–30,000	1	136	32,500–31,500	1	75
30,000–29,000	1,0001	12	31,500–30,500	1,0001	64
29,000–28,000	1,0001	159	30,500–29,500	1,0001	117
28,000–27,000	1	60	29,500–28,500	1,0001	78
27,000–26,000	1,0002	105	28,500–27,500	1,0002	49
26,000–25,000	1,0002	80	27,500–26,500	1	122
25,000–24,000	1,0001	106	26,500–25,500	1,0002	60
24,000–23,000	1,0001	137	25,500–24,500	1	83
23,000–22,000	1,0001	108	25,000–24,000	1,0016	61
22,000–21,000	1,0001	89	24,000–23,000	1,0001	26
21,000–20,000	1,0001	40	23,000–22,000	1,0001	34
20,000–19,000	1,0005	34	22,000–21,000	1,0002	49
19,000–18,000	1	27	21,000–20,000	1,0001	52
18,000–17,000	1,0003	11	20,000–19,000	1,0001	53
17,000–16,000	1,0001	74	19,000–18,000	1,0001	37
16,000–15,000	1,0004	63	18,000–17,000	1,0001	34
15,000–14,000	1,0001	56	17,000–16,000	1,0001	34

BGS12-VD			BGS18-VD		
14,000–13,000	1,0004	52	16,000–15,000	1,0002	46
13,000–12,000	1,0005	47	15,000–14,000	1,0003	32
12,000–11,000	1	133	14,000–13,000	1,0001	41
11,000–10,000	1,0001	131	13,000–12,000	1,0001	45
10,000– 9,000	1,0001	112	12,000–11,000	1,0002	45
9,000– 8,000	1,0002	92	11,000–10,000	1,0002	22
8,000– 7,000	1,0001	125	10,000– 9,000	1,0001	8
7,000– 6,000	1,0001	153	9,000– 8,000	1,0002	16
6,000– 5,000	1,0002	99	8,000– 7,000	1,0003	31
5,000– 4,000	1,0002	96	7,000– 6,000	1,0002	163
4,000– 3,000	1,0003	76	6,000– 5,000	1,0001	145
3,000– 2,000	1,0018	178	5,000– 4,000	1,0002	144
			4,000– 3,000	1,0001	167
			3,000– 2,000	1,0002	147
			2,000– 1,000	1,0013	166
	1,000168966	80,86207		1,00015806	61,12903

Tab. 156 Ovalizace vrtů BGS20/1-VD a BGS20/2-VD po metrových úsecích a jejich celková střední ovalizace (a/b – tvarová anizotropie; ϕ_t – úhel mezi severem a delší poloosou (a) oválu (pokračování na další straně))

BGS20/1-VD			BGS20/2-VD		
Hloubka	a/b	ϕ_t	Hloubka	a/b	ϕ_t
39,000–38,000	1,0001	59	40,000–39,000	1,0001	96
38,000–37,000	1,0004	53	39,000–38,000	1,0003	86
37,000–36,000	1,0006	70	38,000–37,000	1,0001	88
36,000–35,000	1,0002	86	37,000–36,000	1,0001	103
35,000–34,000	1,0007	75	36,000–35,000	1,0002	113

BGS20/1-VD			BGS20/2-VD		
34,000–33,000	1,0002	179	35,000–34,000	1,0001	121
33,000–32,000	1,0001	83	34,000–33,000	1,0001	118
32,000–31,000	1,0001	65	33,000–32,000	1,0001	108
31,000–30,000	1,0001	44	32,000–31,000	1,0005	89
30,000–29,000	1,0003	156	31,000–30,000	1,0004	34
29,000–28,000	1,0003	61	30,000–29,000	1,0003	103
28,000–27,000	1,0004	54	29,000–28,000	1,0003	45
27,000–26,000	1,0005	41	28,000–27,000	1,0003	56
26,000–25,000	1,0008	61	27,000–26,000	1,0003	41
25,000–24,000	1,0001	71	26,000–25,000	1,0002	37
24,000–23,000	1,0002	66	25,000–24,000	1,0001	42
23,000–22,000	1,0002	58	24,000–23,000	1,0002	49
22,000–21,000	1,0004	58	23,000–22,000	1	87
21,000–20,000	1,0008	59	22,000–21,000	1	108
20,000–19,000	1,0003	45	21,000–20,000	1,0001	35
19,000–18,000	1,0002	52	20,000–19,000	1,0002	22
18,000–17,000	1,0003	60	19,000–18,000	1,0003	29
17,000–16,000	1,0003	54	18,000–17,000	1,0002	55
16,000–15,000	1,0007	73	17,000–16,000	1,0001	22
15,000–14,000	1,0005	96	16,000–15,000	1,0002	34
14,000–13,000	1,0004	61	15,000–14,000	1,0002	76
13,000–12,000	1,0002	70	14,000–13,000	1,0001	48
12,000–11,000	1,0004	83	13,000–12,000	1,0001	88
11,000–10,000	1,0002	67	12,000–11,000	1,0001	76
10,000– 9,000	1,0006	81	11,000–10,000	1,0002	61
9,000– 8,000	1,0009	65	10,000– 9,000	1	143
8,000– 7,000	1,0008	65	9,000– 8,000	1,0005	56
7,000– 6,000	1,0004	70	8,000– 7,000	1,0003	40
6,000– 5,000	1,0009	56	7,000– 6,000	1,0002	51

BGS20/1-VD			BGS20/2-VD		
5,000– 4,000	1,0006	56	6,000– 5,000	1,0001	32
4,000– 3,000	1,0008	59	5,000– 4,000	1,0002	47
3,000– 2,000	1,0004	70	4,000– 3,000	1,0002	58
2,000– 1,000	1,0001	83	3,000– 2,000	1,0006	21
			2,000– 1,000	1,0004	21
	1,000353333	71,36667			
				1,00017742	71,3871

Tab. 157 Ovalizace vrtů BGS24-VD po metrových úsecích a jejich celková střední ovalizace (a/b – tvarová anizotropie; ϕ_t – úhel mezi severem a delší poloosou (a) oválu (pokračování na další straně)

BGS24-VD		
Hloubka	a/b	ϕ_t
39,000–38,000	1,0001	69
38,000–37,000	1,0001	85
37,000–36,000	1,0001	93
36,000–35,000	1,0003	129
35,000–34,000	1,0002	96
34,000–33,000	1,0001	109
33,000–32,000	1,0001	95
32,000–31,000	1,0001	74
31,000–30,000	1	153
30,000–29,000	1,0001	21
29,000–28,000	1,0001	55
28,000–27,000	1,0001	42
27,000–26,000	1,0001	39
26,000–25,000	1,0001	34
25,000–24,000	1	16
24,000–23,000	1,0002	49
23,000–22,000	1,0002	48

BGS24-VD		
22,000–21,000	1,0001	74
21,000–20,000	1,0002	81
20,000–19,000	1,0004	61
19,000–18,000	1,0002	65
18,000–17,000	1,0004	69
17,000–16,000	1,0004	71
16,000–15,000	1,0002	75
15,000–14,000	1,0003	73
14,000–13,000	1,0005	76
13,000–12,000	1,0004	74
12,000–11,000	1,0003	68
11,000–10,000	1,0002	91
10,000– 9,000	1,0005	56
9,000– 8,000	1,0006	39
8,000– 7,000	1	83
7,000– 6,000	1,0001	65
6,000– 5,000	1,0001	155
5,000– 4,000	1,0004	85
4,000– 3,000	1,0007	85
3,000– 2,000	1,0012	69
2,000– 1,000	1,0013	30
	1,000203333	71,36667

Použitím hodnot z ovalizace pro určení jednoznačného směru a naměřených Psi jsme předpokládali, že jsme schopni odhadnout pravděpodobnou distribuci napěťového pole. Tento postup je zdokumentován v Tab. 158.

Porovnáním údajů v Tab. 154 a v Tab. 158 však musíme konstatovat, že tento postup nepřinesl dobré výsledky. Dle Tab. 148 by ve vrtech BGS 20/1 VD, BGS 20/2 VD a BGS 24 VD mělo

převládat téměř izotropní horizontální napěťové pole. To je v přímém rozporu s existencí breakoutů v těchto vrtech, které obecně vznikají při vysoké anizotropii a intenzitě napěťového pole.

Tab. 158 Kombinované výsledky (xx – čísla patra)

Vrt BGS xx VD	Převzatý úhel SH z ovalizace (°)	SH (MPa)	Sh (MPa)
BGS 12 VD	170	40	15
BGS 18 VD	151	23	7
BGS 20/1 VD	161	16	16
BGS 20/2 VD	161	20	20
BGS 24 VD	161	15	15

V lokalitě Rožná byla v rámci jiných aktivit prováděna napěťová měření i v jiných částech dolu.

Další měření, využitelná pro tento projekt pocházejí z roku 1996, kdy jsme poprvé prováděli hydraulické štěpení na této lokalitě pro potřeby DIAMO (Staš et al. 1997). Výsledky sloužily jako kalibrační vstupy pro komplexní numerický geomechanický a napěťový model lokality Rožná.

Ve vertikálním vrtu v podloží první zóny v úrovni 22. patra byly metodou hydroštěpení změřeny hodnoty SH= 55–65 MPa s orientací 115–124° a Sh = 12–22 MPa. Ve vrtu do podloží čtvrté zóny byly ustanoveny hodnoty ve dvou úrovních do 26 m (SH= 31–37 MPa , Sh = 17–21 MPa) a ve spodní části do 32 m (SH = 47–57 MPa, Sh = 24–30 MPa). Bohužel v tomto vrtu se nepodařilo zjistit parametry aktivovaných trhlin.

Dalším doplňujícím měřením z této doby je měření ve vrtu v podloží první zóny na úrovni 18. patra s ustanovenými hodnotami SH = 42–65 MPa s orientací 152–157° a Sh= 21–26 MPa.

Výsledky jsou konzistentní s výsledky dřívějších měření v jiných částech lokality (Staš et al. 2018). Např. dřívější měření na úrovni 22. patra poskytlo velikostně i směrově podobný výsledek s hodnotami SH = 24 MPa, Sh = 19 MPa, orientace větší komponenty hlavního horizontálního napětí SH byla 175°.

Měření metodou CCBO na 12. patře v okolí PVP Bukov (Souček et al. 2018) v rámci jiného projektu potvrzuje zjištěnou vysokou variabilitu složek napěťového pole i v poměrně malé oblasti (viz Obr. 378), kde je patrná vysoká směrová nestálost. Pro porovnání bylo v rámci zmíněného projektu (Souček et al. 2018) prováděno i několik měření metodou hydroštěpení stěn vrtu ve vrtech S-8 a S-18 (viz Tab. 159 a Tab. 160).

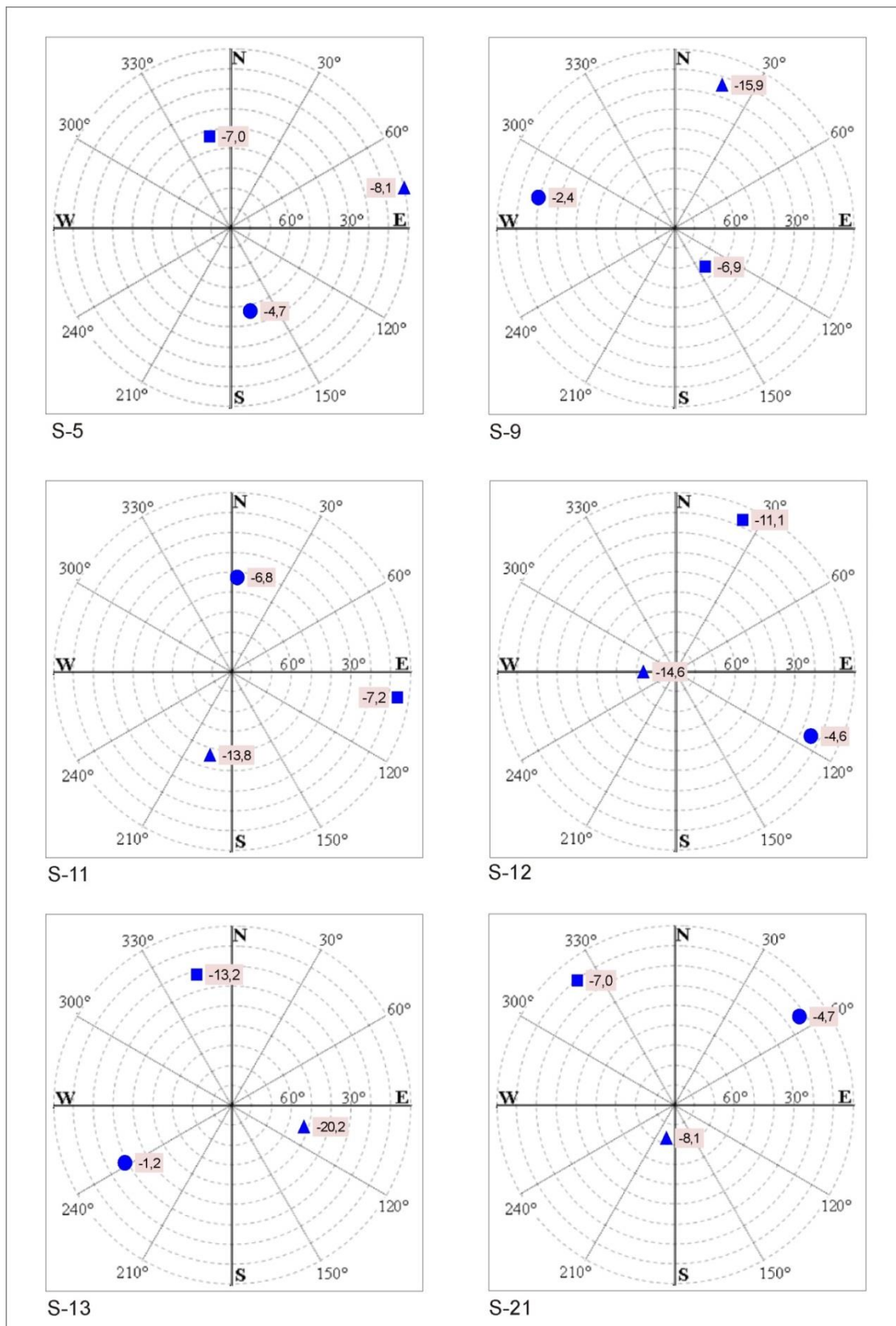
Tab. 159 Výsledky měření metodou hydroštěpení stěn vrtu ve vrtu S-8 (GS1) (převzato ze Souček et al. 2018)

Hloubka měření ve vrtu [m]	Pc [MPa]	Pr [MPa]	Psi [MPa]	Rot otisku [°]	S _h [MPa]	S _H [MPa]	Azimut S _H [°]
14,7	--	20	17	--/Hirat	-17	-31	180
17,7	--	19	16	--	-16	-30	--
21	19,5	13,5	10	263	-10	-16,5	23
24,2	19	14	10,5	--	-10,5	-17,5	
28,1	--	14	13,5	9	-13,5	-27	21
30,8	--	16	12,5	261	-12,5	-21,5	178
33,8	22,5	15,5	13,5	--	-13,5	-25,5	--

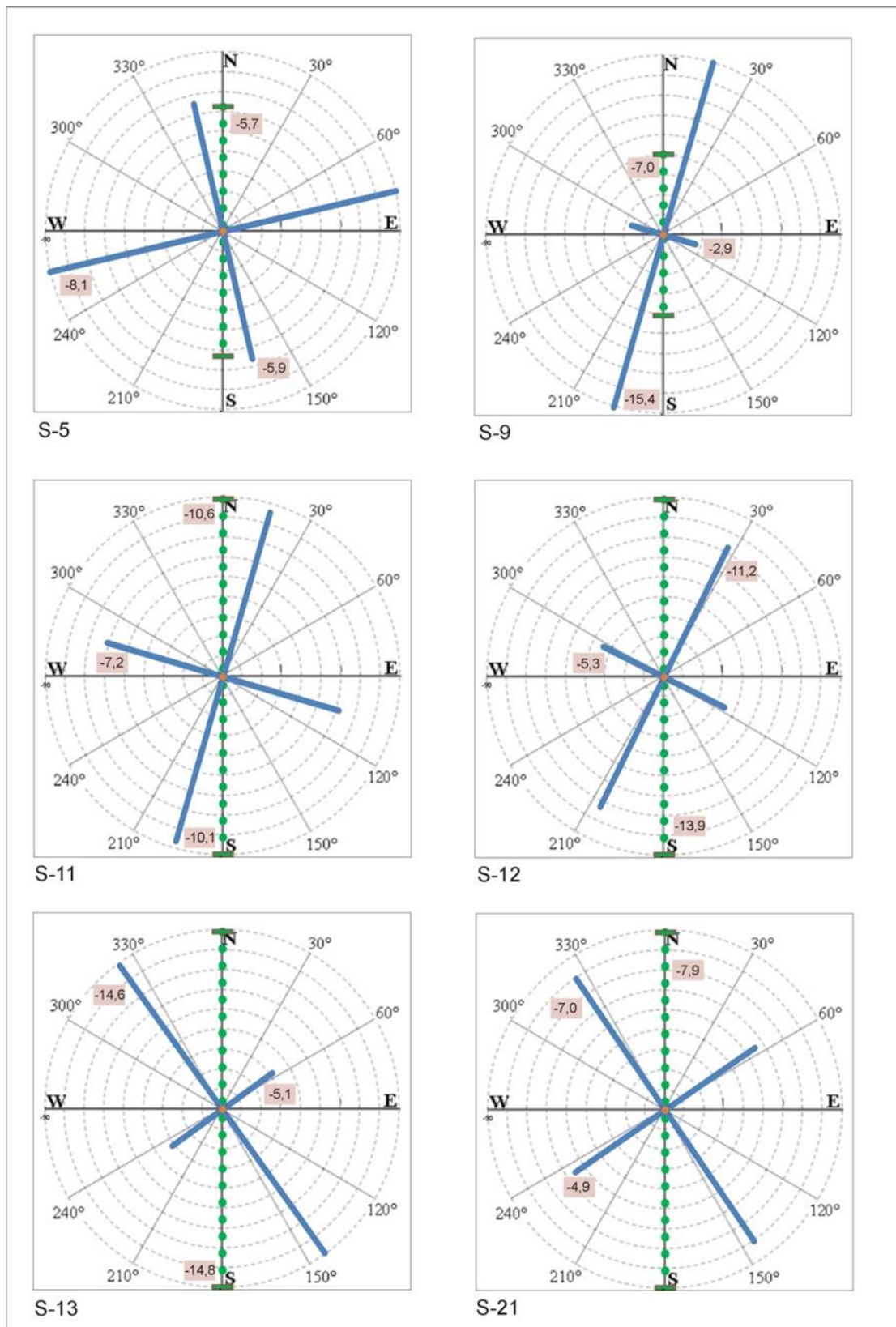
Tab. 160 Výsledky měření metodou hydroštěpení stěn vrtu S-18 (GS-2) (převzato ze Souček et al. 2018)

Hloubka měření ve vrtu [m]	Pc [MPa]	Pr [MPa]	Psi [MPa]	Rot otisku [°]	S _h [MPa]	S _H [MPa]	Azimut S _H [°]
20	--	20,3	15,3	Téměř kolmá trhлина na osu vrtu => vertikální složka napětí HM = 15,3 MPa			
24,6	--	18,4	15,9	52	-15,9	-29,3	30
26,8	--	19,0	19,5	--	-19,5	-39,5	--
30,4	Nevyhodnoceno-nebyl zaznamenán otisk trhliny, a nestandardní tlakový průběh, nelze vyhodnotit tlaky						
33,4	--	18	16,5	292	-16,5	-31,5	28
41,3	--	23,7	20,7	--/ HiRAT	-12,5	-38	45
45,4	Nevyhodnoceno-nebyl zaznamenán otisk trhliny, a nestandardní tlakový průběh, nelze vyhodnotit tlaky						

Na tomto místě je třeba znova připomenout vysokou variabilitu výsledků, např. měření CCBO ve vrtu S-21 v rámci budování PVP Bukov (viz Obr. 378 a Obr. 379). Měřicí místo bylo teoreticky dostatečně vzdáleno od podzemní stavby, takže byl předpoklad velmi malého ovlivnění napěťového pole. Výsledek ukázal v tomto místě jednak, že ani jedna z hlavních komponent není směrově sblížena s vertikálou, magnituda těchto složek nedosahovala předpokládaných hodnot pro tuto hloubku, po přepočtení větší hlavní horizontální složka napětí vykazovala předpokládaný směr SZ–JV, vertikální komponenta vykazovala však jen cca 0,5 hodnoty předpokládané pro tuto hloubku. Podobně napětí měřené ve vrtu S-13 sice ukázalo na směr horizontálních složek SZ–JV, avšak také ani jedna z hlavních komponent nebyla sblížena s vertikálou. Měření ve vrtu S-11 probíhalo také v místě dostatečně odlehlem od důlního díla. Zde však větší horizontální komponenta směřovala SSV–JJZ podobně jako napětí odvozené z konvergenčních měření na chodbách v procesu ražení PVP Bukov a měření hydroštěpením ve vrtech S-8 a S-18 (Souček et al. 2018).

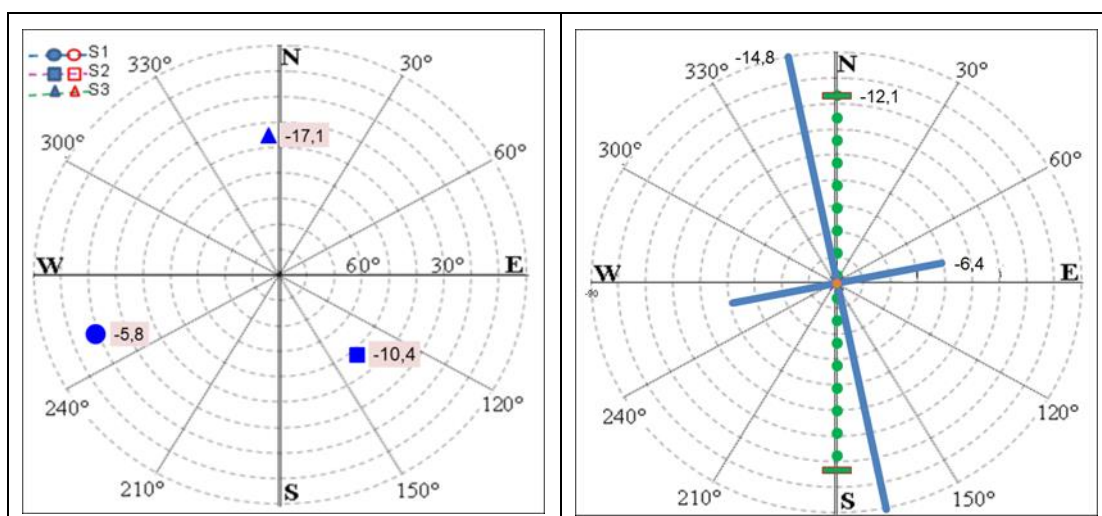


Obr. 378 Směry a velikosti hlavních složek tenzoru plného napětí získaného měřením metodou CCBO (čísla u složek dokumentují zjištěnou velikost; přijatá konvence: komprese (-), tah (+)); (převzato ze Staš et al. 2018)



Obr. 379 Směry a poměry hlavních napětí HM ve vertikální a horizontální rovině stanovených z tenzoru plného napětí získaného měřením metodou CCBO (zelená – vertikální složka, modrá – horizontální složky; čísla u složek dokumentují zjištěnou velikost; přijatá konvence: komprese (-), tah (+)); (převzato ze Staš et al. 2018)

V rámci probíhajícího projektu Geostab byla prováděna měření na 20. patře také v horizontálním vrtu BGS 20/2–H. V tomto vrtu byly postupně provedeny 4 experimenty CCBO. Tři aplikace CCBO byly realizovány v těsné blízkosti stěny překopu (do 4 m) a jsou tedy výrazně tímto umístěním ovlivněny. Z hlediska potřeb tohoto projektu je relevantní pouze měření v hloubce 15 m (viz Obr. 380). Přijmeme-li toto měření jako nezkraslené, je z obrázku patrné, že žádná z hlavních komponent napěťového pole není v této lokalitě vertikální, jak by předpokládalo vyhodnocení měření metodou hydraulického porušování stěn vrtu. To bylo v této lokalitě prováděno ve vrtu BGS20/2-VD v rámci aktuálního zadání. Vypočtená orientace většího horizontálního napětí sleduje převládající směr SSZ–JJV.



Obr. 380 Výsledek aplikace CCBO ve vrtu BGS20/2-H v 15 m od ústí vrtu

Závěrem lze konstatovat, že na základě aktuálních i dřívějších měření mimo tento projekt je masiv z hlediska demonstrace tvaru a velikosti napěťového pole poměrně značně komplikovaný. Lokální variabilita interpretovaných výsledků se projevuje zejména ve směrovosti, což lze přisuzovat objektivně částečnému působení blízkých lokálních strukturních nehomogenit, subjektivně nemožnosti v některých případech identifikovat jednoznačně aktivovanou diskontinuitu v rámci aplikace metody hydroštěpení. Velikosti složek napěťového pole však odpovídají předpokládaným hodnotám (i z předchozích období). Při globálním hodnocení celé skupiny aktuálních i již dřívějších provedených napěťových měření je patrná směrovost většího horizontálního napětí ve směru SZ–JV až S–J, avšak nejsou výjimečné ani směry SSV–JJZ (viz např. S-18, Tab. 160). Z hlediska magnitud horizontálních hlavních složek napětí dosahuje větší složka hodnot jedno až trojnásobku předpokládaného vertikálního napětí pro danou hloubku a anizotropie horizontálních napěťových složek většinou dosahovala poměru 1,5–2:1 v některých případech až 3:1. Velmi často není ani jedna z hlavních složek napětí paralelní předpokládané vertikální orientaci.

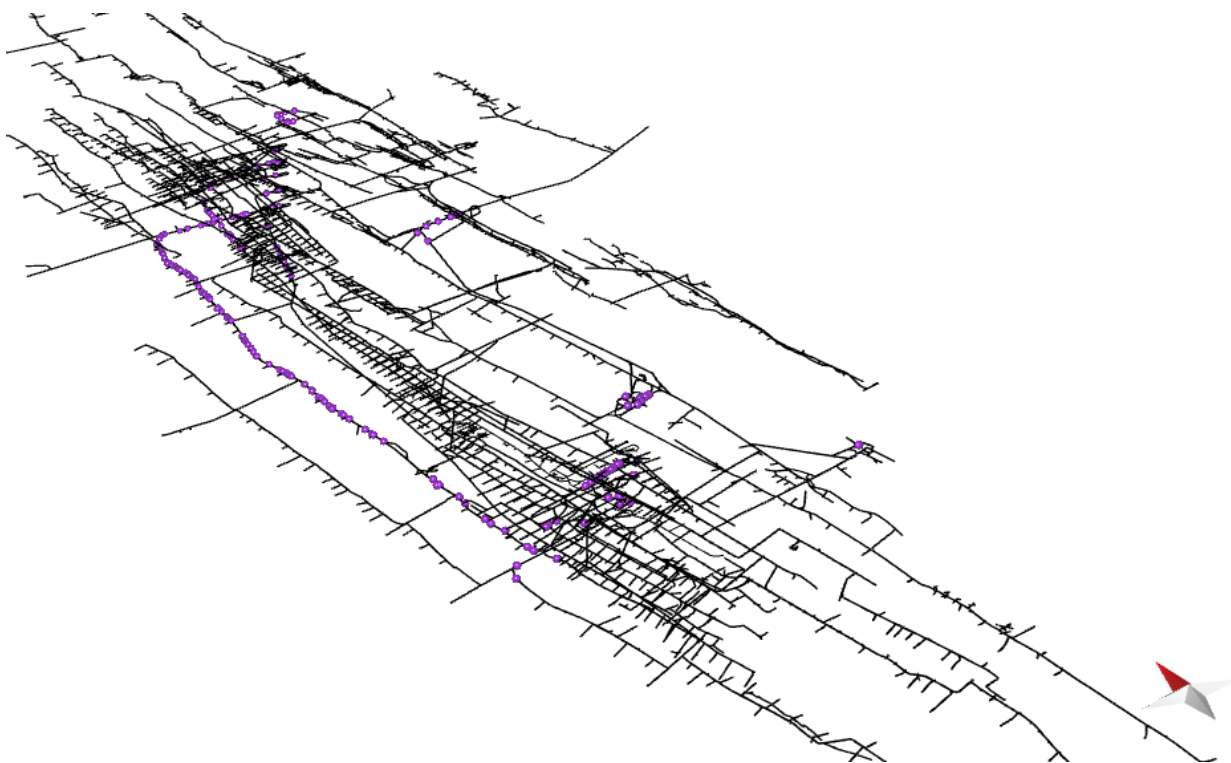
V každém případě je třeba k těmto výsledkům přistupovat velice obezřetně, jelikož ani jedna z použitých metod nesplňuje všechny předpokládané podmínky pro regulérní aplikaci, což při mechanické interpretaci může vést ke zcela nesprávným závěrům zejména ve vztahu k následným technologickým pracím respektive projektovým záměrům.

2.4.5 Popis strukturních elementů kritických pro hodnocení bezpečnosti HÚ

2.4.5.1 Strukturní dokumentace

Cíle a metodika strukturní dokumentace a typy strukturních prvků

V rámci projektu byla za účely zjištění obecných strukturních poměrů v horninovém masívu, stanovení vlivu první zóny na horninové prostředí, určení prostorové variability křehkých poruch, tvorby fotogrammetrických 3D modelů, tvorby DFN modelů a lokalizaci potenciačního homogenního bloku provedena detailní strukturní dokumentace dostupných částí dolu Rožná (Obr. 381). Sběr strukturních dat byl proveden na celkem 188 úsecích na 12., 18., 19., 20., 21., 22., 23., a 24. patře. Datový soubor získaný z dostupných částí dolu čítá celkem 1715 jednotlivých měření strukturních prvků. Veškerá primární strukturní data jsou shrnuta v tabulce v Elektronická příloha 40. Z důvodů porovnatelnosti strukturního záznamu v různých částech dolu byla terénní dokumentace prováděna jednotnou metodikou. Měření jednotlivých struktur probíhala obvykle zhruba v úrovni jednoho metru od počvy a bylo zaměřeno především na stanovení charakteru, intenzity a četnosti křehkých struktur mesoskopického měřítka. Doplňkově byly dokumentovány také duktilní stavby (metamorfní foliace a lineace), litologické kontakty a žilná tělesa. Pokud to bylo možné pozorovat prostým okem, byly zaznamenány také mineralogické a petrografické charakteristiky, související alterace a mocnost dokumentovaných poruch.



Obr. 381 Lokalizace dostupných úseků (fialové body) na kterých byla provedena strukturní dokumentace v rámci 3D zobrazení rozfárání ložiska Rožná

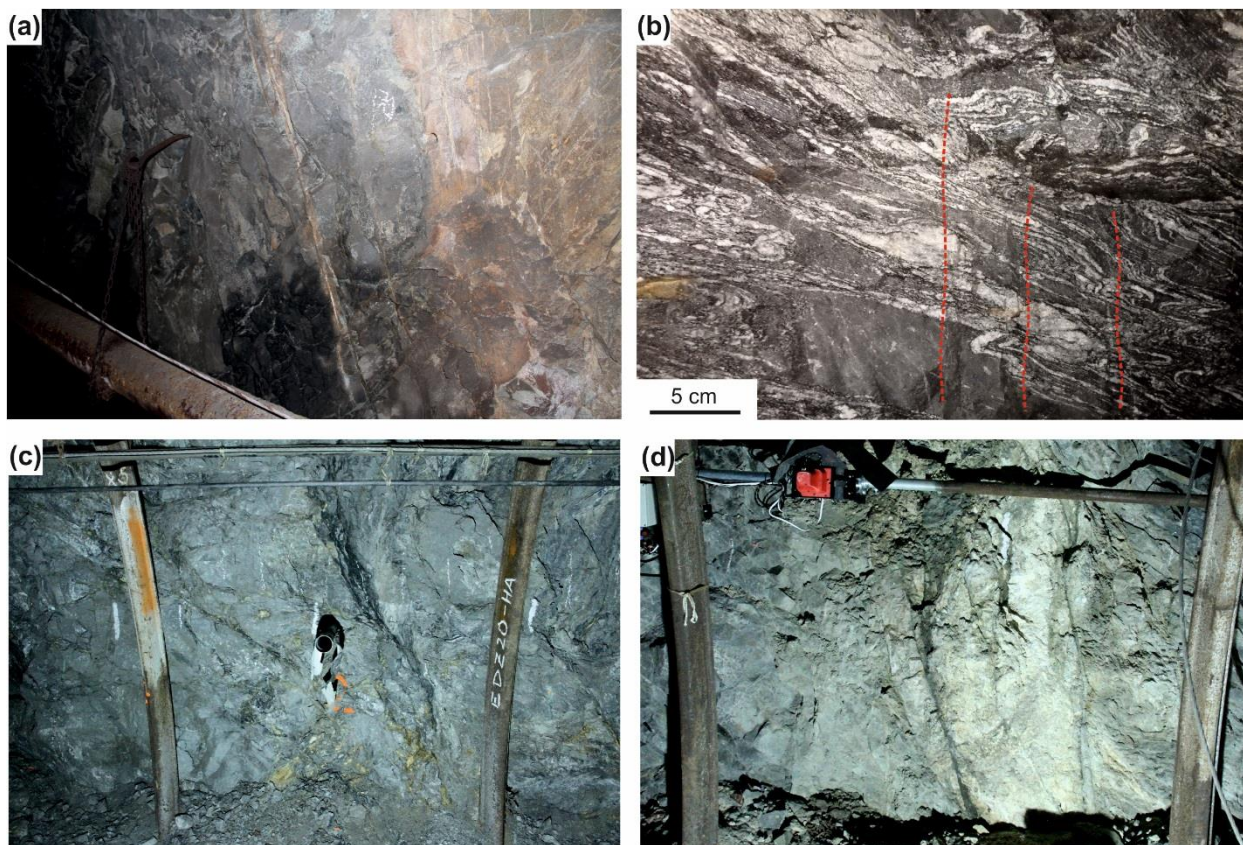
Na studovaných úsecích byly dokumentovány následující strukturní prvky: 1) metamorfní stavby (Obr. 382a); 2) tenké až vlasové extenzní pukliny (mocnost menší než 2 mm; Obr. 383b); 3) extenzní pukliny s vyšší až výraznou mocností (2 mm až desítky cm; Obr. 382d); 4) zlomy, zlomové a kataklastické zóny (Obr. 382b, c, Obr. 383c, d). Informace o jednotlivých strukturních

prvcích se skládají kromě orientace puklin, zlomů, metamorfních staveb, minerálních a horninových žil, také z charakteristiky obsahující údaje o rozměrech, petrografii a případných výplních dokumentovaných poruch. Indukované fraktury vzniklé v souvislosti s destruktivními účinky ražby, nesystematické a nepravidelné pukliny a struktury malého měřítky (cca do 0,5 m délky) nebyly do datového souboru zahrnuty.

Lokalizace jednotlivých strukturních prvků je zajištěna metrží v rámci jednotlivých chodeb. Terénní dokumentace a data byla zpracována a uložena do tabulkové databáze strukturních měření a posléze počítačově zpracována a vizualizována v programu Spheristat 2. Pro účely analýzy orientace, četnosti, a hustoty puklinové sítě byly použity strukturní stereogramy s konturami hustot výskytů puklin ve Schmidově plochojevné projekci na spodní polokouli a růžicové frekvenční diagramy průběhu puklin s intervalem 10° .



Obr. 382 (a) Zvrásněná metamorfní foliace v migmatitizované amfibolické rule (22. patro, R-3); (b) okraj první poruchové zóny (18. patro, R-3); (c) grafitická a karbonátová výplň v první zóně (18. patro, R-7S); (d) set subvertikálních poruch (21. patro, R-7S)

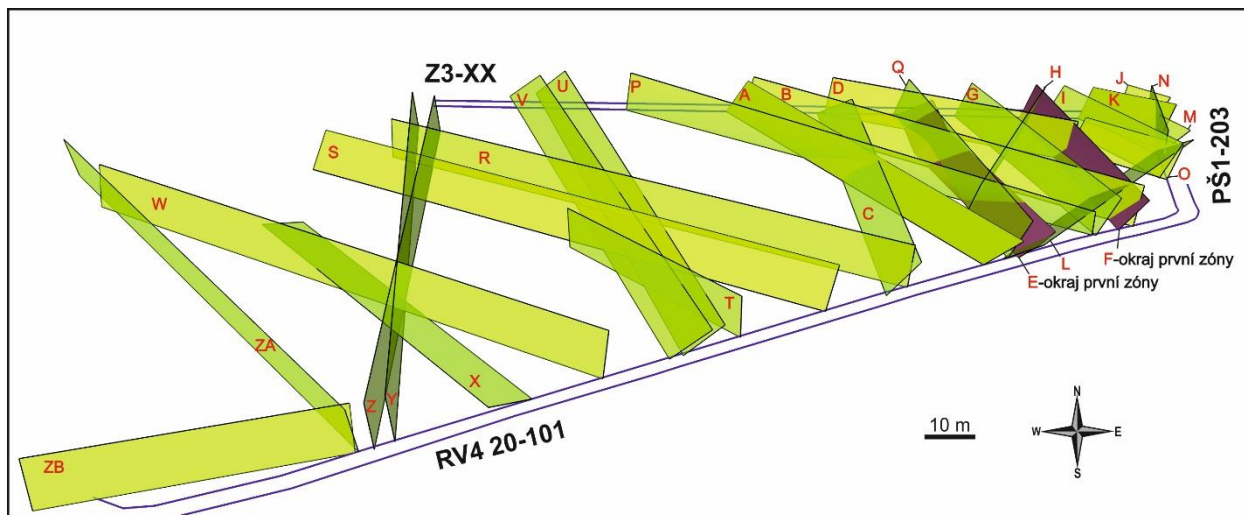


Obr. 383 (a) Střížná porucha vyplněná kalcitem, chloritem a jílem (18. patro, R-3); (b) vlasové uzavřené extenzní poruchy s kalcitovou výplní; (c, d) zlomové struktury s jílovo-chloritovo-kataklastickou výplní (20. patro, chodba Z3-XX)

Zlomové struktury bloku na 20. patře

Pro možnost posouzení porušení okolí první zóny a pro možnost interpretace dat získávaných v prostoru horninového bloku na 20. patře byly v detailním měřítku dokumentovány stěny chodeb omezující tento blok (Z3-XX, PŠ1-203, RV4₂₀-101). Strukturální data křehkých struktur přímo měřená i nepřímo získaná z 3D fotogrammetrických modelů posloužila v kombinaci s informacemi z vrtů (kapitola 2.1.4) k tvorbě 3D modelu tohoto bloku (Elektronická příloha 45, Elektronická příloha 46) zaměřeného na zlomové struktury (Obr. 384). Výsledná představa o prostorovém uspořádání zlomových poruch v tomto bloku byla dále využita pro korelace s výsledky seismické refrakční tomografie (2.4.5.2) a umožnila získat koherentní představu o homogenitě tohoto bloku.

Z datového souboru (Elektronická příloha 40, Elektronická příloha 41) z jednotlivých chodeb (Z3-XX, PŠ1-203 a RV4₂₀-101) byly vybrány výraznější struktury o mocnosti větší než cca 30 mm a minerální výplní typickou pro zlomové poruchy (kataklaзит, jílové minerály, grafit atd.; Obr. 383d). Jedná se o poruchy, na kterých zjevně došlo k pohybu. Podle orientace, mocnosti a typu výplně byly jednotlivé střížné struktury následně korelovány s potenciaálně shodnými strukturami na protějších chodbách.

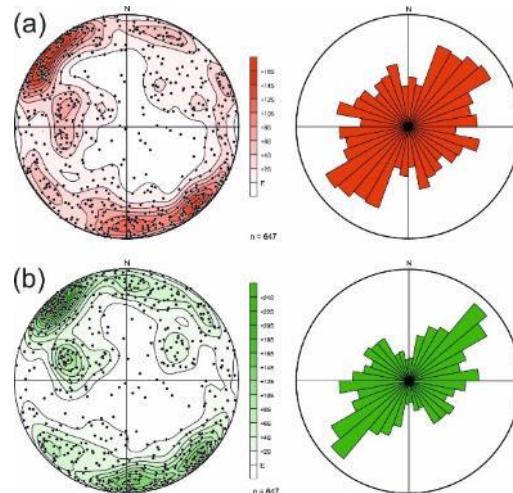


Obr. 384 3D vizualizace interpretovaných zlomů protínajících studovaný horninový blok na 20. patře

V rámci studovaného bloku bylo zjištěno celkem 24 zlomových struktur (Obr. 384). Detekované poruchy mají nejčastěji SSZ–JJV a SZ–JV průběh, dva mají SV–JZ průběh a jedna zóna S–J průběh. Zlomy S–J průběhu (struktury E, F, Q a G) definují okraj první zóny nebo jsou v jejím blízkém okolí a mají podobnou orientaci. Zlomy v tomto bloku mají nejčastěji subvertikální orientaci nebo zapadají pod středními úhly k ZJZ (struktury U, V a A), k SV (zlom X) nebo k SZ (zlom L). Z výsledné 3D analýzy zlomové sítě je vidět, že studovaný horninový blok na 20. patře je relativně značně porušen množstvím výraznějších sřížných struktur nebo zlomů zejména v prostoru a blízkém okolí první zóny.

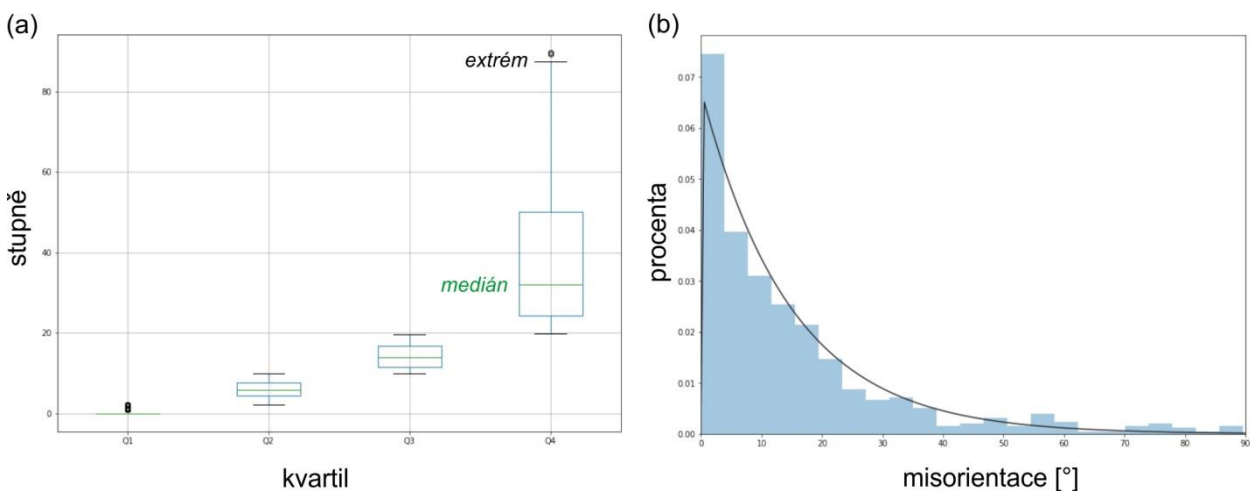
Porovnání dat měřených v podzemí a z fotogrammetrických modelů

Pro metodiku prací v prostředí silně ovlivněném kovovými materiály, které mají negativní vliv na použití geologických kompasů, byly v detailním měřítku dokumentovány stěny chodeb omezující studovaný blok na 20. patře a data byla porovnáována s odvozenými daty z fotogrammetrických modelů. Na dvou těchto chodbách (Z3-XX, RV4₂₀-201) byly také vytvořeny 3D fotogrammetrické modely stěn, na kterých byly bezkontaktně zjištěny orientace přítomných křehkých struktur pomocí software MOVE, který umožňuje měření směru sklonu a sklonu ploch z triangulovaných sítí (meshů). Tento přístup generování strukturálních dat byl zvolen z důvodů eliminace vlivu kovových konstrukcí přítomných v podzemních prostorech na přesnost ručního kompasového měření, časových a dalších logistických omezení pro přímou terénní dokumentaci v podzemí. Popis metodiky tvorby fotogrammetrických modelů je popsán v kapitole 2.5.1. Vznikly tak dva datové soubory puklin a zlomů, obsahující orientace naprosto identických ploch získané rozdílnou metodou. Tyto dva datové soubory byly za účelem ověření validity metody nepřímého bezkontaktního měření strukturálních prvků vzájemně porovnány.



Obr. 385 Strukturální diagramy pólů a růžicové diagramy průběhů puklin z chodeb Z3-XX a RV4₂₀-201 (20. patro); (a) strukturální data získaná manuálním měřením v podzemí; (b) data identických struktur získaná z fotogrammetrických modelů

Oba datové soubory mají velice podobné základní rysy v orientaci studovaných struktur (Obr. 385). Z hlediska geometrie všech získaných ploch lze pozorovat několik hlavních skupin. Nejhojnější jsou sub-vertikální plochy generálně s průběhem \sim SV–JZ. Dalšími výraznými skupinami jsou sub-vertikální plochy průběhu \sim V–Z a \sim SZ–JV. Relativně méně časté jsou struktury zapadající pod středními úhly k VJV až VSV a \sim JZ. Nevýrazné rozdíly je možné pozorovat v četnosti některých orientačních maxim. Plochy zapadající pod středními úhly k \sim JZ mají v nepřímo získaných datech více uniformní orientaci (Obr. 385b) než v přímo měřených (Obr. 385a). Plochy zapadající pod středními úhly k \sim VSV jsou v nepřímých datech méně početné (Obr. 385b) a dané maximum je lépe definované než v o něco více rozptýlených přímo měřených datech (Obr. 385a).

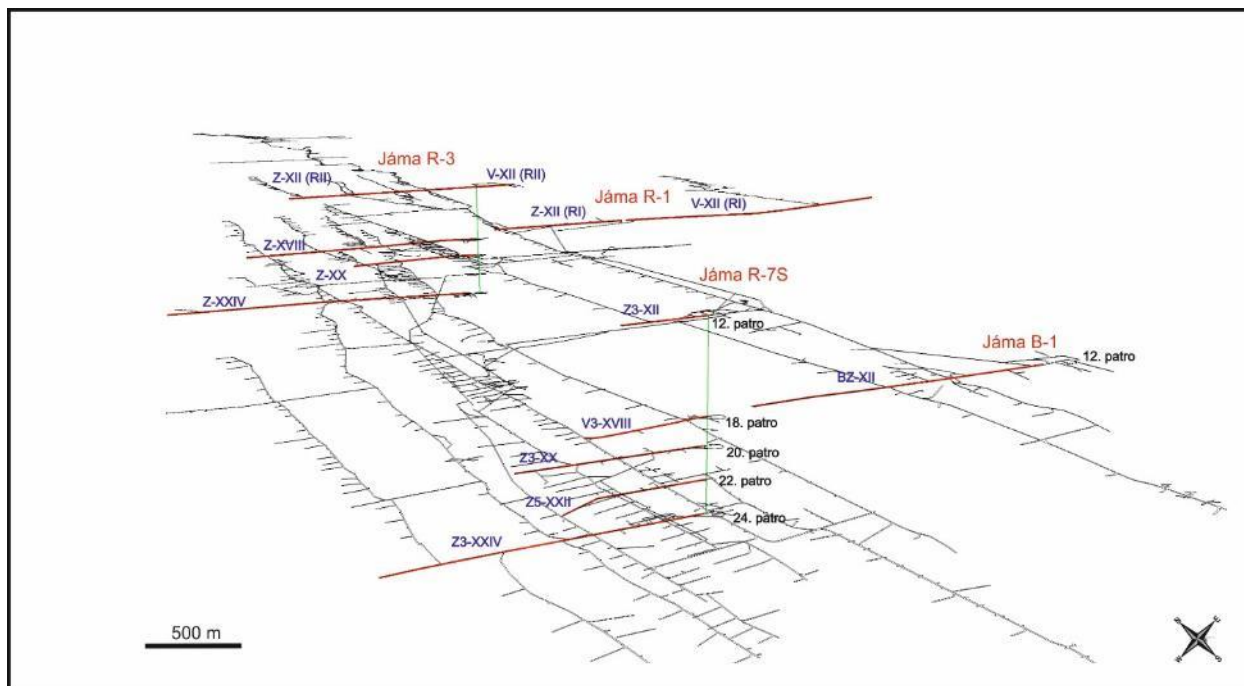


Obr. 386 (a) Rozdělení misorientací pro jednotlivé kvartily; (b) fit exponenciálního zastoupení misorientovaných dat

Nepřímá data jsou celkově méně rozptýlená a lépe seskupená do jednotlivých maxim (Obr. 385b) a ve výsledku tvoří o něco reprezentativnější datový soubor odpovídající rozdělení všech dokumentovaných poruch do lépe definovaných rozdílných populací (dle jejich orientace). Celkově lze konstatovat, že porovnávané datové soubory vykazují vynikající shodu v cca 50 % případech. Zjištěné odchylky v orientaci jsou do cca 10°, což zhruba odpovídá reálné přesnosti manuálního přímého kompasového měření. Do 20° odchylky se vejde cca dalších 25 % dat ve třetím kvartilu. Nízké shody dosahuje porovnání v cca 25 % případech ve čtvrtém kvartilu (Obr. 386). Misorientace dat odpovídá zhruba exponenciálnímu rozdělení, s převážnou většinou dat do 20° misorientace (Obr. 386). Ověřovacím pokusem, kdy byla testována data s přesně určitelným směrem sklonu na základě orientace chodby podzemního díla a umístění mezi kovovými výstužemi byly výsledky jednoznačnější pro měření na usazeném 3D modelu. Chybovost kompasového měření směru sklonu zde dosahovala více než 30°, přičemž sklon měřený sklonoměrem geologického kompasu, který není ovlivněn kovovými prvky v okolí, byl shodný. Bohužel zjištěné problémy kompasového měření nejsou systematické, vzhledem k rozdílné míře ovlivnění kompasu kovovými prvky v dole a nedají se tak jednotně upravit prostým odečtením či přičtením stupňové odchylky. S ohledem na nepřesnosti způsobené přítomností kovových předmětů, ovlivňujících lokálně magnetické pole, lze konstatovat, že strukturní data získaná nepřímou metodou z fotogrammetrických modelů jsou přesnější než přímo měřená. Takto získaná data jsou tedy dostatečně reprezentativní a použitelná pro strukturní charakterizaci horninového prostředí, DFN modely, stanovení vlivu poruchových zón a lokalizaci HHB.

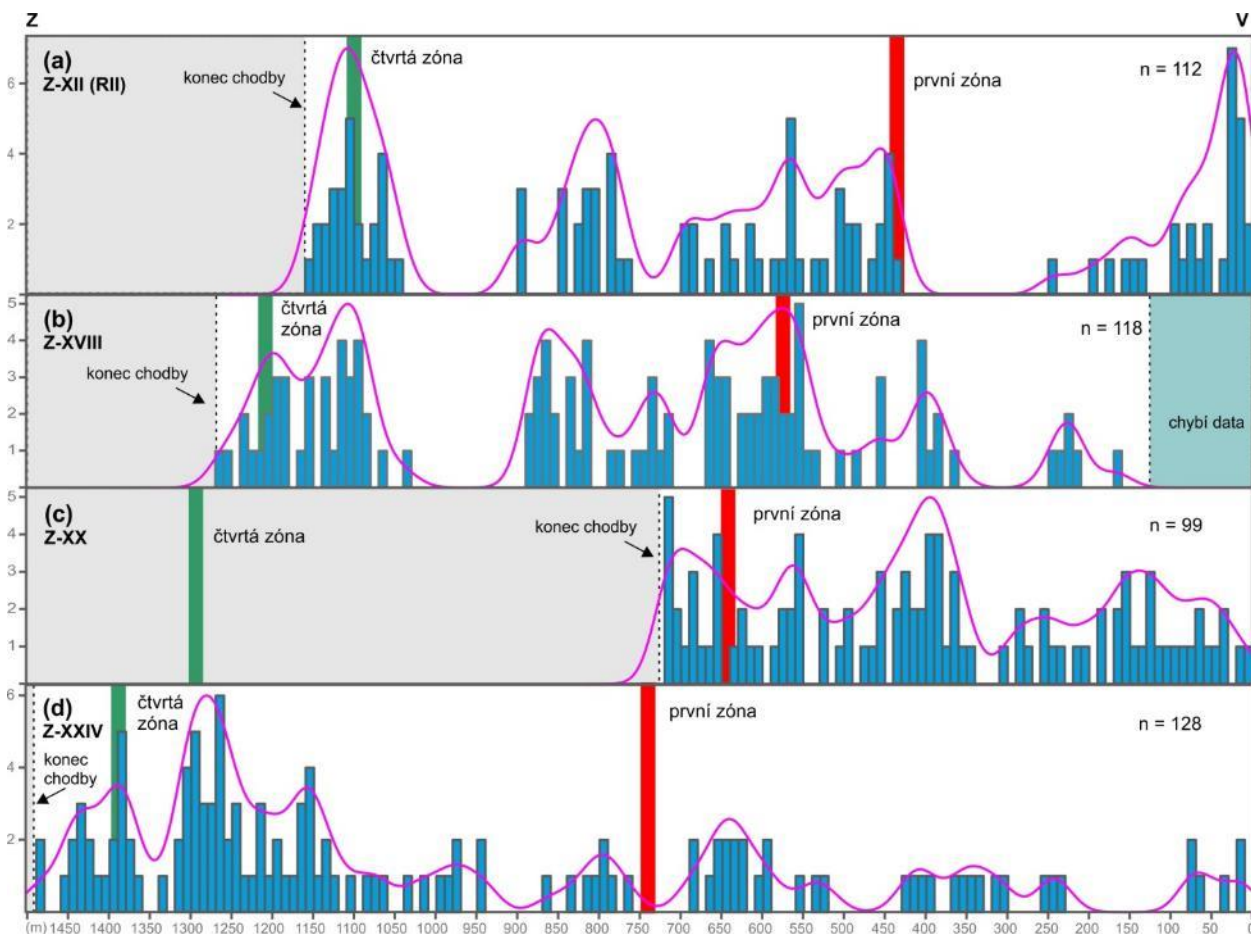
Využití archivních dat pro hodnocení porušení masivu vlivem první zóny

Z důvodu nepřístupnosti velkého množství chodeb v rámci celého dolu byly, kromě nově pořízených strukturních dat, za účelem zhodnocení vlivu první zóny využity archivní geologické mapy v měřítku 1 : 200 000 (archiv DIAMO s.p.). Z této primární důlní dokumentace byly převzaty všechny zakreslené poruchy. Vzájemné porovnání výskytu křehkých struktur je mezi jednotlivými chodbami problematické, protože jednotlivé chodby byly dokumentovány mnoha geology a odlišnou metodikou v různých obdobích existence důlního systému. Nicméně tyto archivní data představují jediný možný datový soubor použitelný pro zhodnocení distribuce křehkých poruch v současnosti nepřístupných chodeb a zapažených úseků v rámci celého prostoru dolu Rožná. Tyto převzaté poruchy byly za účelem zobrazení prostorové distribuce a četnosti následně statisticky vyhodnoceny a vizualizovány vzhledem k průběhu první a čtvrté zóny. Četnosti převzatých křehkých struktur vzhledem k průběhu chodeb byly zpracovány na třinácti chodbách v.–z. průběhu na 12., 18., 20., 22. a 24. patře (Obr. 387). Histogramy četností křehkých struktur jsou pro všechny tyto chodby, včetně průběhů první a čtvrté zóny, zobrazeny ve 3D pdf (Elektronická příloha 43). Histogramy četností křehkých struktur chodeb, protínající první a/nebo čtvrtou zónu, jsou zobrazeny ve dvou vertikálních sekcích a jedné horizontální sekci na Obr. 388, Obr. 389, Obr. 390.



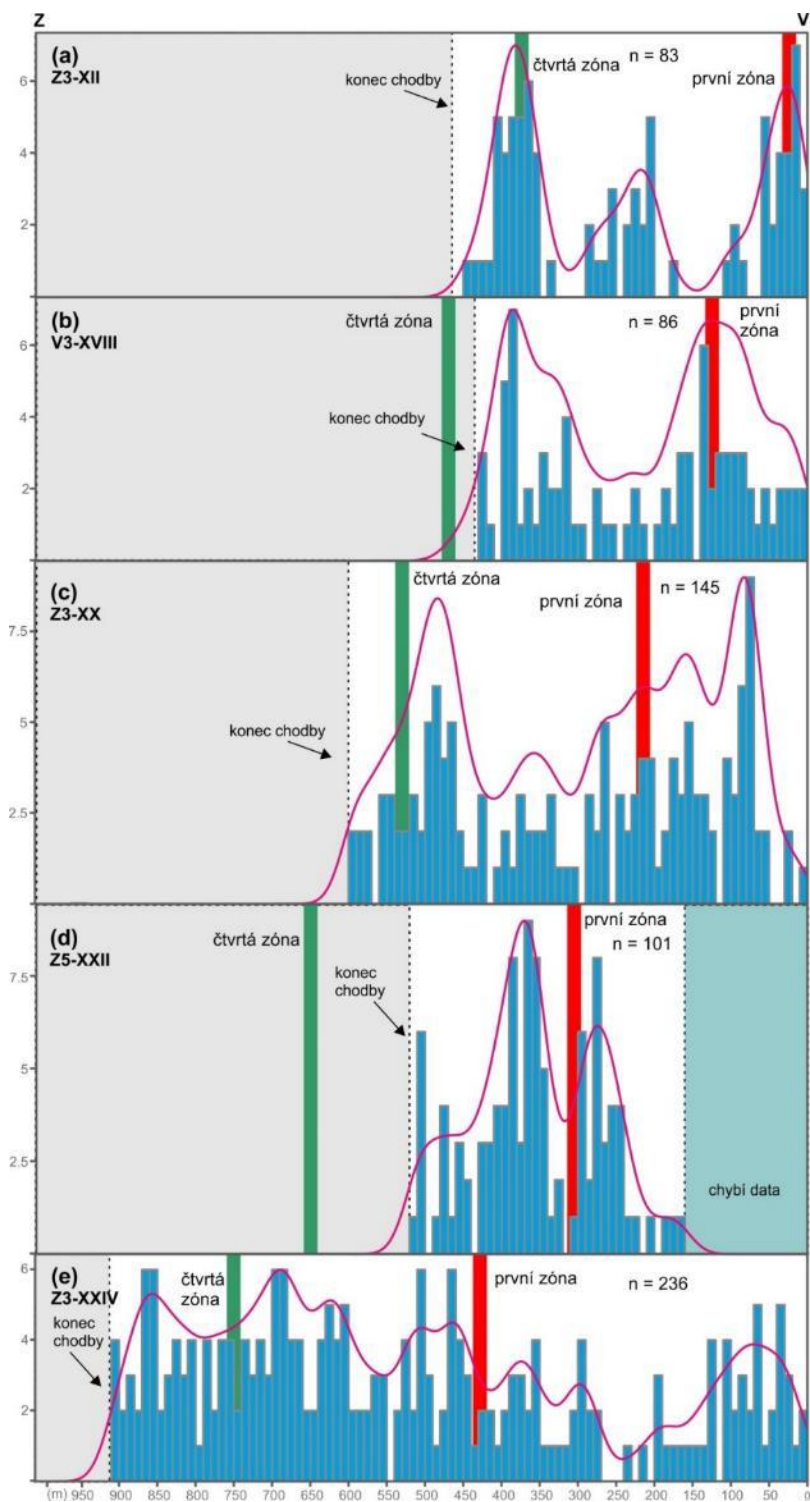
Obr. 387 Lokalizace úseků, pro které byly zpracovány poruchy z archivních geologických map měřítka 1 : 200 000

Chodba Z-XII (RII) na 12. patře vykazuje nerovnoměrnou distribuci dokumentovaných poruch s lokálními maximy na cca 20, 430, 570, 1130 m a výraznou absenci poruch v intervalech cca 250–410m a 870–1030m od jámy R-3 (Obr. 388a). První zóna se na této chodbě projevuje zvýšeným výskytem poruch na cca 430 m a čtvrtá zóna na cca 1130m, nicméně ani jedna zóna prostorově nekoresponduje s největším maximem na cca 20m. Histogram chodby Z-XVIII na 18. patře (Obr. 388b) má, kromě prvních 130 metrů pro které nebyly dostupné zdrojové mapy, v základních rysech podobné charakteristiky jako chodba Z-XII (R1). První zóna se na této chodbě projevuje zvýšeným výskytem poruch na cca 560m a čtvrtá zóna prostorově odpovídá největšímu výskytu poruch na cca 1210m (Obr. 388c). Chodba Z-XX na 20. patře má relativně uniformní distribuci dokumentovaných poruch s lokálními maximy na cca 160, 400, 560, 660 a 720 m od jámy R-3. Tuto chodbu protíná pouze první zóna projevující se nevýrazným maximem na cca 660m. Na chodbě Z-XXIV lze pozorovat značně nerovnoměrné rozložení poruch (Obr. 388d). Na intervalu od cca 0–1120m od jámy R-3 bylo dokumentováno relativně malé množství poruch (cca 1–2 na metr), s absencí poruch v intervalech cca 75–230m a 430–520m a 870–940 m. Oproti tomu, na intervalu cca 1120–1500m bylo zastiženo větší množství struktur. Na tomto úseku se nacházejí výrazná maxima na cca 1160, 1270 a 1370m. První zóna protíná chodbu Z-XXIV na cca 740m kde nejsou v mapě zaznamenány žádné struktury. Čtvrtá zóna prostorově dobře koreluje s četnostním maximem na cca 1380m.



Obr. 388 Histogramy četnosti a Kernelova hustotní distribuce křehkých poruch na chodbách západně od jámy R-3. Data byla převzata z archivních geologických map měřítka 1 : 200 000. Šířka intervalu 10 m. Lokalizace první a čtvrté zóny je převzata z konceptuálního 3D ložiskového modelu (kapitola 2.4.6.2, Elektronická příloha 137, Elektronická příloha 138)

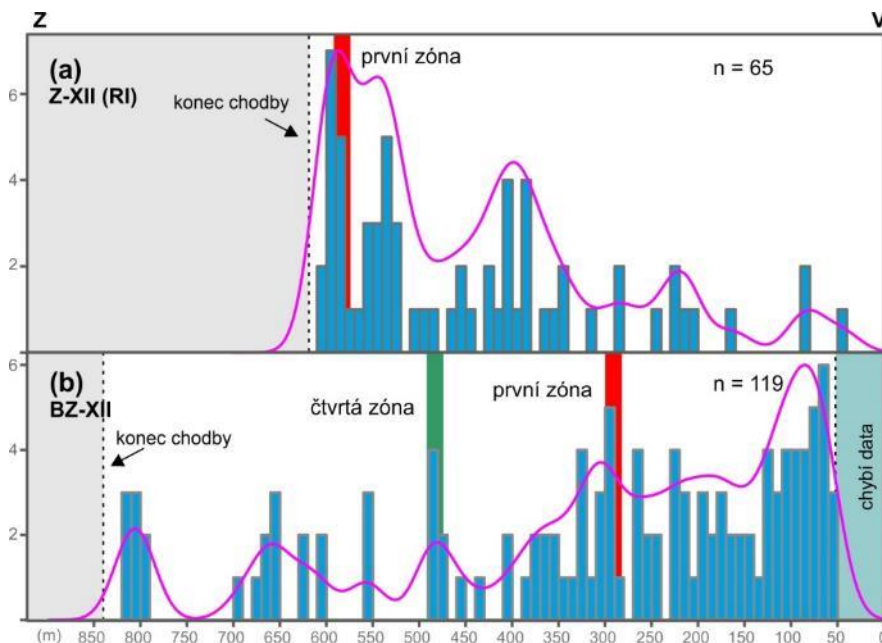
Dokumentované poruchy se na chodbě Z3-XII ve větší míře vyskytují v intervalech cca 0–50, 170–210 a 310–360 m od jámy R-7S (Obr. 389a). První zóna a čtvrtá zóna velice dobře korelují s hlavními maximy lokalizovanými na cca 40 m a 350 m. Na chodbě V3-XVIII jsou zaznamenána dvě výrazná maxima na cca 120 a 370 m a jedno menší maximum na cca 250 m. První zóna se zde vyskytuje na cca 120 m a odpovídá jednomu z vrcholů histogramu (Obr. 389b). Čtvrtá zóna chodbu V3-XVIII neprotíná. Chodba Z3-XX je charakteristická zvýšeným výskytem poruch na cca 70, 165, 260 a 480 m od jámy R-7S (Obr. 389c). První zóna se zde vyskytuje na cca 220 m a projevuje se pouze mírně zvýšeným výskytem křehkých struktur. Čtvrtá zóna protíná tuto chodbu na cca 550 m, kde bylo dokumentováno průměrné množství poruch. Na chodbě Z5-XXII se nacházejí tři výrazná četnostní maxima na cca 290, 365 a 500 m od jámy R-7S (Obr. 389d). První zóna je zde lokalizována na cca 300 m a prostorově odpovídá lokálnímu maximu v její těsné blízkosti. Čtvrtá zóna chodbu Z5-XXII neprotíná. Chodba Z3-XXIV má relativně homogenní distribuci dokumentovaných poruch s několika nevýraznými vrcholy a lokální absencí poruch v intervalu cca 240–275 m (Obr. 389e). První zóna se nachází na cca 440 m a čtvrtá na cca 750 m, ani jedna se neprojevuje výraznějším výskytem poruch.



Obr. 389 Histogramy četnosti a Kernelova hustotní distribuce (červená křivka) křehkých poruch na chodbách západně od jámy R-7S. Data byla převzata z archivních geologických map měřítka 1 : 200 000. Šířka intervalu 10 m. Lokalizace první (červeně) a čtvrté (zeleně) zóny je převzata z konceptuálního 3D ložiskového modelu (kapitola 2.4.6.2, Elektronická příloha 137, Elektronická příloha 138)

Na východní polovině chodby Z-XII (RI) je v důlních mapách zakresleno relativně malé množství poruch. V její západní části vykazují hustotní distribuce struktur dvě menší maxima na cca 390

a 480 m od jámy R-1. Dominantní vrchol četnosti poruch je na cca 580 m a odpovídá pozici první zóny (Obr. 390a). Dokumentované poruchy na chodbě BZ-XII vykazují nerovnoměrné rozložení s několika lokálními maximy na cca 70, 280 a 480 m od jámy B-1 (Obr. 390b). Výrazné absence poruch se vyskytují v intervalech cca 490–550 m a 700–790 m. První zóna se projevuje zvýšeným počtem struktur na cca 280 m a čtvrtá zóna na cca 480 m.

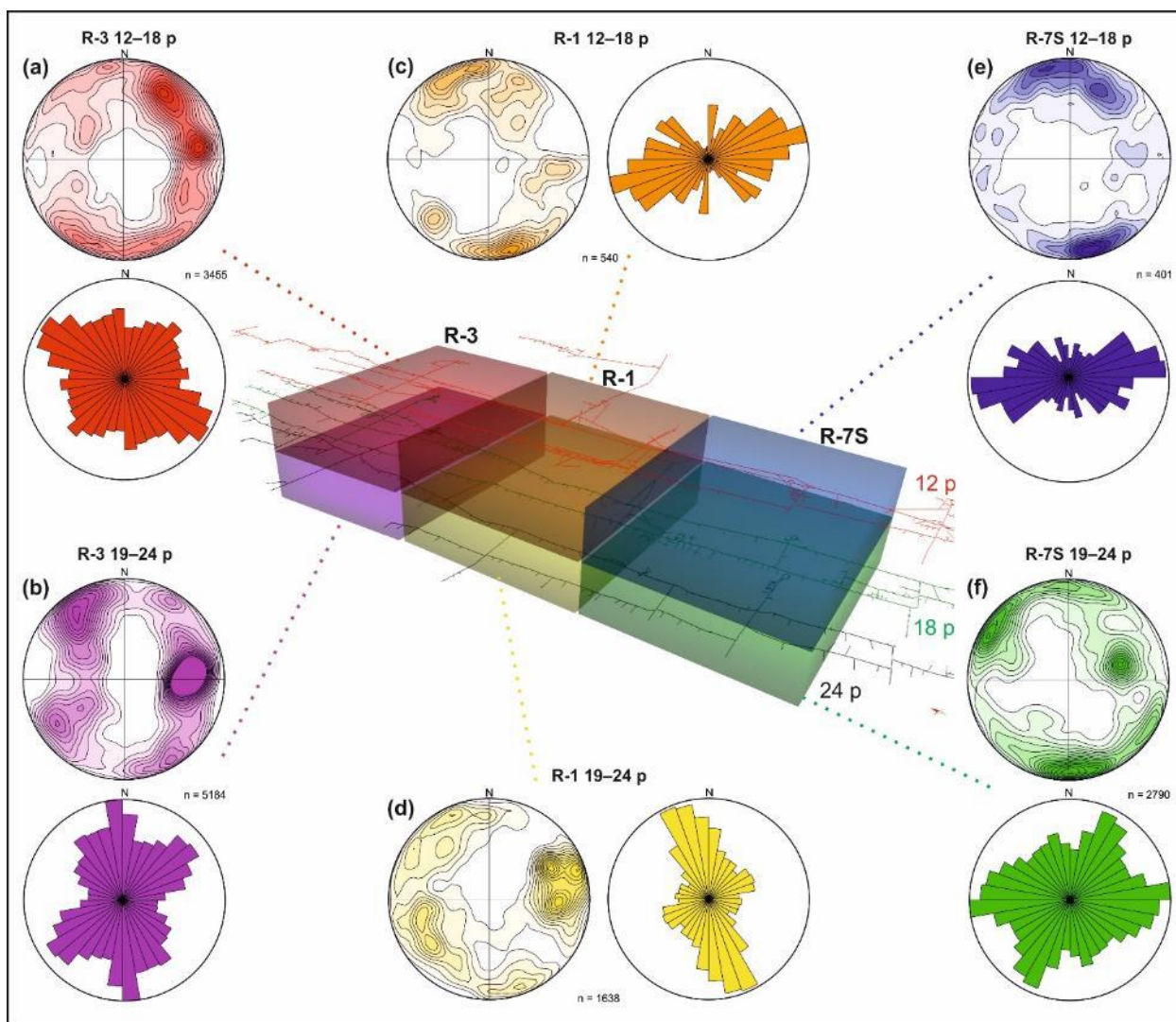


Obr. 390 Histogramy četnosti a Kernelova hustotní distribuce křehkých poruch na dvou chodbách na 12. patře. Data byla převzata z archivních geologických map měřítka 1 : 200 000. Šířka intervalu 10 m. Lokalizace první a čtvrté zóny je převzata z konceptuálního 3D ložiskového modelu (kapitola 2.4.6.2, Elektronická příloha 137, Elektronická příloha 138)

Statistické zpracování křehkých struktur zaznamenaných v archivních důlních mapách umožnilo z celkového pohledu v rámci popisovaných chodeb získat hrubou představu o jejich intenzitě, distribuci a prostorových vztazích k první a čtvrté zóně. Obě poruchové zóny se ve většině případů projevují výrazně zvýšeným výskytem vymapovaných struktur. Zvýšené množství poruch se projevuje v rozsahu 40–120 m. Nicméně na chodbách Z3-XX, Z3-XXIV a Z-XX se v místech těchto zón neprojevil nadprůměrný výskyt křehkých struktur (Obr. 388c, Obr. 389c, Obr. 389e). Navíc na chodbě Z-XXIV nejsou v místech první zóny v mapě zaznamenány žádné poruchy (Obr. 388d). Tyto rozdíly mohou být způsobeny v prostorovém kolísání mocnosti a intenzity doprovodného porušení poruchových zón. Naopak v některých případech jsou velice pravděpodobně primární křehké poruchy asociované s tvorbou zlomových zón a jejich aktivitou z velké míry setřené sekundárními procesy. Vlivem intenzivní pozdější alterace (grafitizace, illitizace, kaolinizace apod.) tak nebylo možné během primární geologické dokumentace identifikovat konkrétní struktury.

Popis strukturních dat studované oblasti

Za účelem pochopení strukturního záznamu celé studované části dolu Rožná (12.–24. patro) byla vyhodnocena všechna strukturní data nepřímo získaná z fotogrammetrických modelů dostupných částí chodeb. Tento datový soubor obsahuje křehké struktury většího měřítka (delší než 40 cm), které v 3D fotogrammetrických modelech tvoří výraznější morfologický prvek. Tenké a uzavřené extenzní pukliny (Obr. 383b) vyvinuté nerovnoměrně v různých částech studované oblasti nejsou do tohoto datového setu zahrnuty. Celý datový soubor byl prostorově rozdělen na šest domén (Obr. 391) odpovídajících jednak dvěma hloubkovým úrovním (12.–18. patro, 19.–24. patro) a také třem částím v s.–j. směru (zhruba v okolí jam R-3, R-1 a R-7S). Toto rozdělení umožnilo vzájemně porovnat strukturní poměry v těchto doménách a zjistit případnou závislost změn orientace křehkých struktur v závislosti na hloubce, resp. v s.–j. směru.



Obr. 391 Strukturní diagramy ukazující prostorové změny orientace křehkých struktur v rámci celé studované části dolu Rožná

Porovnání orientací poruch v těchto šesti doménách ukazuje, že jejich orientace je v rámci celé studované oblasti značně heterogenní. V celé oblasti lze v různé intenzitě pozorovat prostorově závislé trendy ve změnách orientace křehkých poruch. Ve vyšší hloubkové úrovni 12.–18. patra

a v centrální (Obr. 391c) a jižní části (Obr. 391e) výrazně převažují subvertikální struktury směru S–J až ZSZ–VJV, zatímco v odpovídajících hlubších částech výrazně přibývá poruch směru SSZ–JJV (Obr. 391d) a SSV–JJZ (Obr. 391f). V severní části dominují ve vyšších patrech struktury SZ–JV směru (Obr. 391a), zatímco s hloubkou se poruchový systém razantně změní a je tvořen dvěma sety poruch směru S–J a SV–JZ (Obr. 391b). Celkově lze konstatovat, že poruchový systém celé studované oblasti je charakterizován různě intenzivními a velmi heterogenními změnami orientace křehkých struktur jak v závislosti na hloubce tak i ve směru S–J.

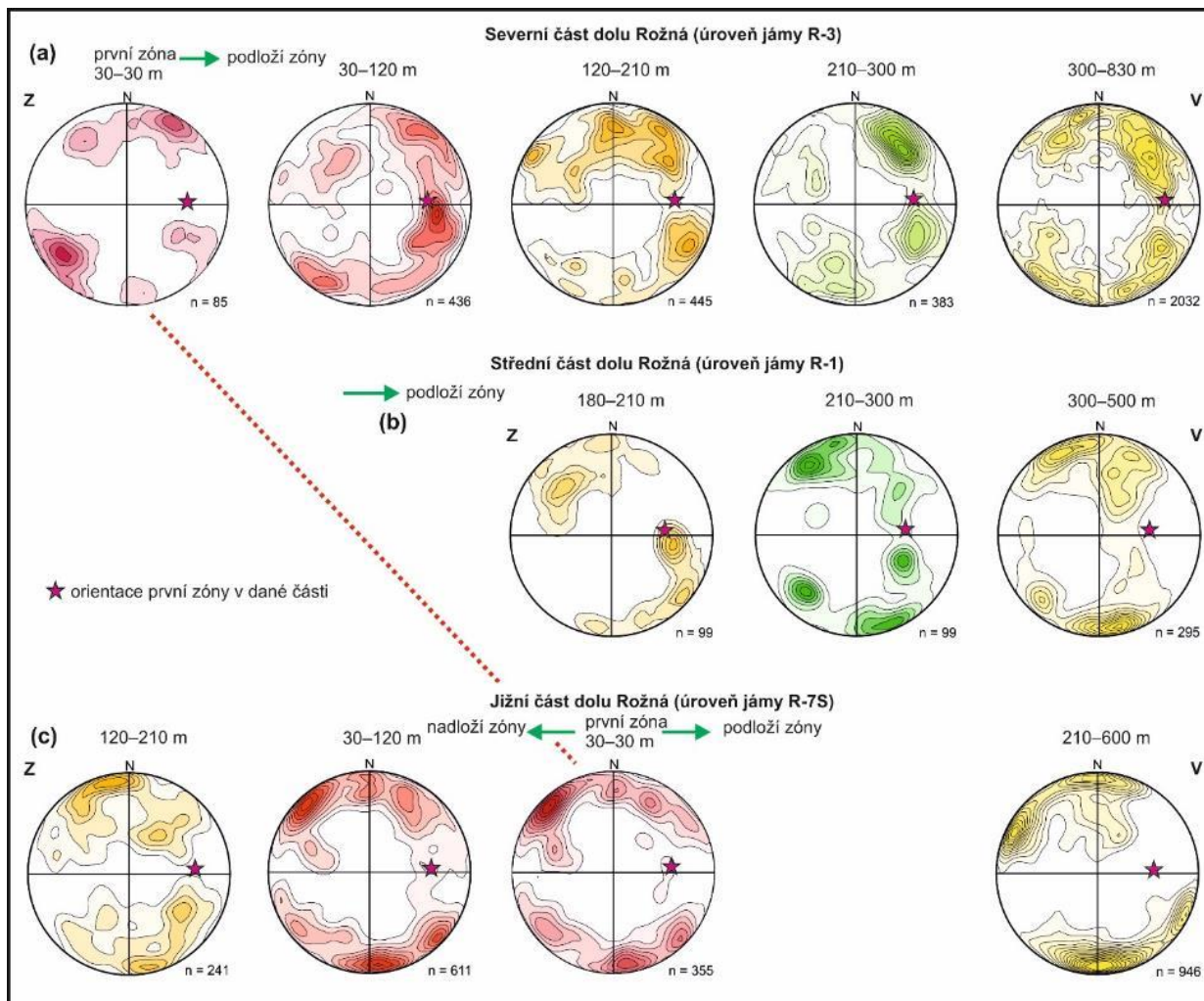
Změny strukturního záznamu v závislosti na vzdálenosti od první zóny

Za účelem zhodnocení vlivu první zóny na horninové prostředí a zejména na geometrii puklinového systému byly sledovány také změny strukturního záznamu v závislosti na laterální vzdálenosti od zóny. Strukturní data nepřímo získaná z fotogrammetrických modelů byla vytříděna na základě jejich pozice vůči první zóně. Pro toto zhodnocení byla využita data z chodeb v.–z. průběhu (kolmo na průběh první zóny) a rozděleny ve směru S–J do tří částí (Obr. 392). První část zahrnuje data zhruba na úrovni jámy R-3, druhá část na úrovni jámy R-1 a třetí část na úrovni jámy R-7S. Data byla dále v každé části prostorově rozdělena do úseku 60 m přímo okolo zóny (30 m v podloží a 30 m v nadloží středu zóny) a do několika dalších úseků se vzrůstající vzdáleností od první zóny.

V severní části dolu (Obr. 392a) lze pozorovat plynulou změnu orientací poruch ve směru od první zóny do podloží (k východu). V 60 m úseku okolo zóny (± 30 m) jsou nejčastěji přítomné strmé poruchy průběhu ~SZ–JV a směrem do podloží zóny se výrazně zvyšuje počet poruch průběhu ~S–J zapadajících pod středními úhly a také subvertikálních struktur průběhu ~SV–JZ.

Ve střední části (Obr. 392b) jsou dostupná data v úseku cca 210–500 m od první zóny (v podloží). V tomto úseku jsou v části blíže k zóně nejhojnější struktury paralelní s orientací zóny (průběhu ~S–J zapadající pod středními úhly) a také poruchy průběhu ~SV–JZ. Směrem do podloží přibývají jednak subvertikální poruchy průběhu ~V–Z a také ~SZ–JV. Poruchy odpovídající samotné zóně ve střední části dolu směrem do podloží postupně mizí.

V jižní části (Obr. 392c) mají dokumentované poruchy okolo zóny až do vzdálenosti 120 m do nadloží shodné orientace. V tomto úseku jsou nejčastější strmé struktury průběhu ~SV–JZ a ~V–Z. Méně časté jsou zde poruchy s průběhem ~SZ–JV. Dále do nadloží (až do 210 m západně od zóny) výrazně ubývají struktury průběhu ~SV–JZ a ve větší míře se zde vyskytují struktury zapadající pod středními úhly k ~JZ. Poruchy paralelní s první zónou se v jižní části dolu vyskytují velice zřídka. Nicméně lze pozorovat, že jich mírně přibývá směrem do nadloží zóny.

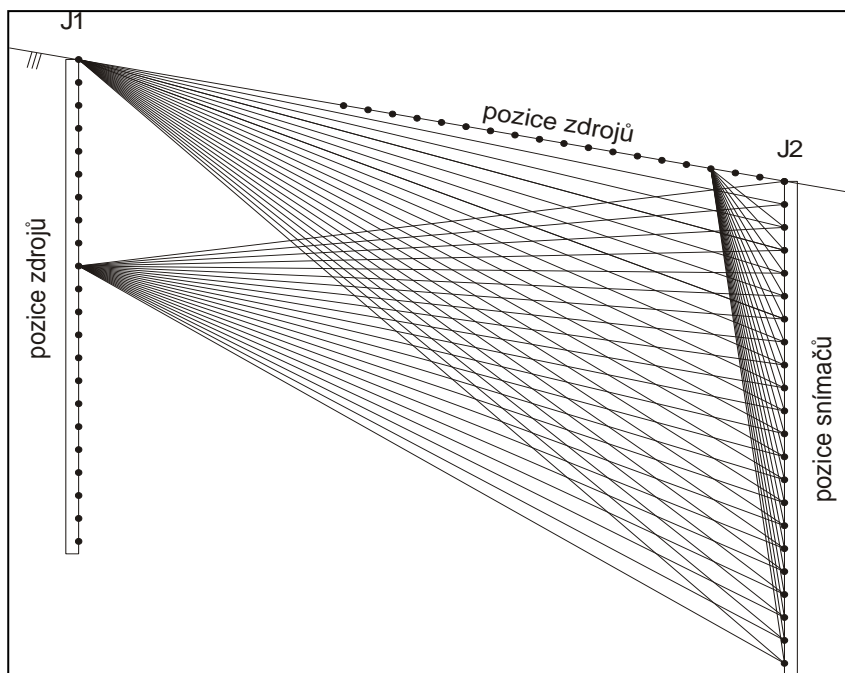


Obr. 392 Orientace poruch z fotogrammetrických modelů v závislosti na vzdálenosti od první zóny

2.4.5.2 Seismická tomografie

Jako podklad pro sestavení strukturální charakteristiky horninového prostředí a posouzení rozsahu porušení horniny (včetně zhodnocení EDZ) v okolí zlomové struktury byla realizována seismická tomografická měření. Získaný model sledovaného prostředí je zobrazen v podobě rychlostního řezu. Distribuce rychlostí šíření seismických vln zobrazená v rychlostních řezech charakterizuje především geomechanický stav horninového prostředí, tj. míru zvětrání, rozpukání, resp. degradace v místě poruchových zón. Poruchová zóna se v řezu představuje lokálním snížením rychlosti šíření seismických vln a deformací rychlostního pole kontrastu s relativně monotónním rychlostním polem v neporušených částech horninového bloku. Tomografická měření byla provedena tak, aby bylo možné sestavit dvojici rychlostních řezů v širším okolí významné zlomové struktury označované jako první zóna.

Měření metodou seismické tomografie bylo prováděno v několika konfiguracích: mezi dvěma vrtly, mezi vrtem a stěnou chodby nebo mezi chodbami. Použitá modifikace metody sleduje rozložení rychlostí šíření seismických vln v horninovém prostředí v prostoru řezu vymezeném liniemi seismických zdrojů a snímačů.



Obr. 393 Příklad uspořádání seismického tomografického měření v systému vrt – vrt (mezi vrtly J1 a J2) a vrt – povrch (mezi vrtem J2 a povrchem)

Ve variantě seismického prosvěcování mezi vrtly je jeden z použité dvojice měřících vrtů osazen hydrofony s krokem 1m nebo seismickou sondou se snímači s krokem 0,5 m, druhý vrt je osazen zdrojem spouštěným s krokem 0,5–1m (viz Obr. 393). Posuzovaná rovina řezu prochází mezi oběma vrtly. Takový způsob měření byl použit při tomografických měřeních mezi horizontálními vrtly na 20. patře, stejně také na všech geotechnických stanicích mezi jednotlivými vrtly (detailně viz kapitola EDZ).

Další konfigurací pro seismickou tomografii je měření mezi vrtem a stěnou chodby (obecně povrchem). Ve vrtu je umístěn seismický snímač a buzení energie probíhá na stěně nebo je použita obrácená konfigurace – zdroj ve vrtu a snímač na stěně. Takto bylo měřeno zejména v rámci prací na 20. patře s využitím horizontálních vrtů EDZ20-H(A-D) a vrtů BGS20-1-H, BGS20-2-H, využity byly také vrtly úpadní BGS20-1-V(U) a BGS20-2-V(U) pro práce na tomografickém řezu mezi 20. patrem a 21. patrem. Obdobně bylo měřeno také v prostoru jednotlivých geotechnických stanic, kde bylo využito zpřístupněných úseků líce výrubu pro instalaci snímačů.

Poslední využitá modifikace seismických tomografických měření představuje systém měření mezi důlními chodbami, kdy je rovina průzkumného řezu orientována horizontálně nebo vertikálně.

První případ reprezentují tomografická měření v prostoru 20. patra dolu provedená v prostoru vymezeném chodbami Z3-XX, PŠ1-203 a RV4₂₀-101. Druhou modifikací je vertikální řez mezi chodbami ZZXX na 20. patře a ZZ-XXI na 21. patře.

Základní kroky zpracování naměřených dat jsou tyto:

- prvotní editace, odstranění chyb;
- přiřazení prostorových souřadnic jednotlivým seismickým trasám;
- úprava signálu, filtrace, vyrovnání amplitud;
- vyčíslení časů příchodu seismické vlny od zdroje ke snímači (první nasazení).

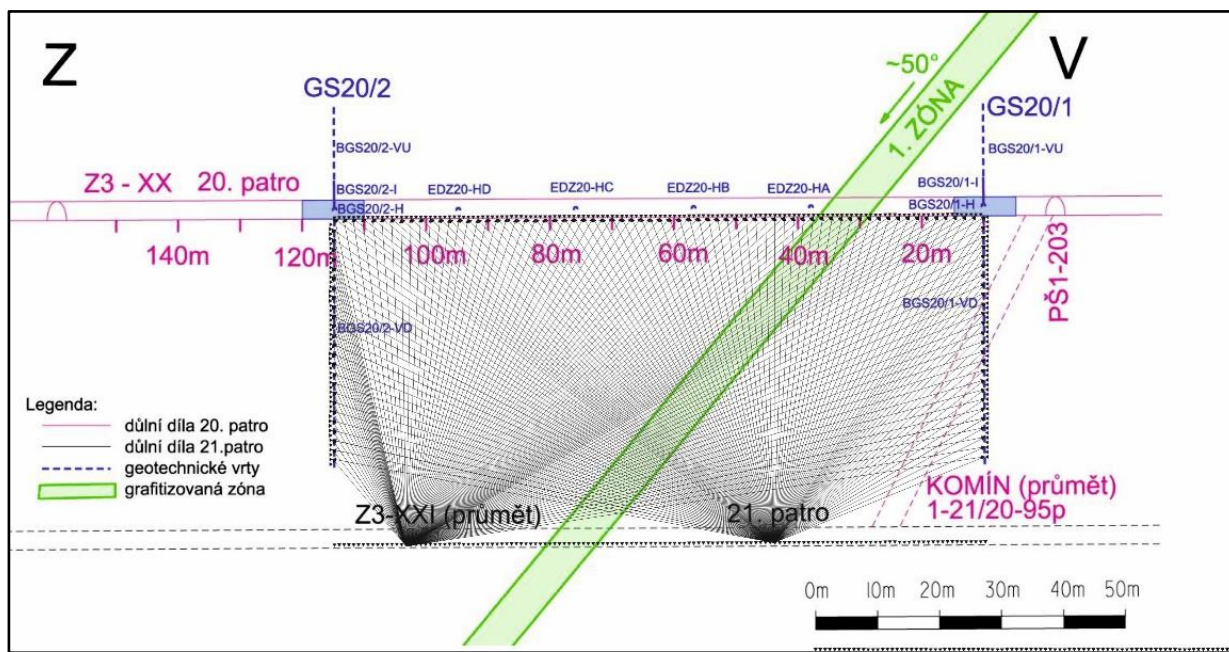
Prvotní vyhodnocovanou veličinou je čas příchodu procházející podélné či příčné vlny na dráze od zdroje k přijímači, které jsou umístěny ve známých pozicích ve vrtu nebo na povrchu. Tento údaj je sledován jako čas prvního nasazení v seismických záznamech. Kombinací různých pozic zdrojů seismické energie a snímačů rychlosti kmitání je získán soubor závislostí času šíření na geometrii měření, který představuje vstupní hodnoty do inverzního nelineárního iteračního procesu. Výpočtem časů šíření pro počáteční rychlostní model zemního/horninového prostředí (definovaný v uzlových bodech výpočetní sítě) je získán soubor syntetických časů pro použitou konfiguraci měření. Rozdíly měřených a modelových časů šíření jsou pak metodami matematické inverze převáděny na difference rychlostního modelu a opravený rychlostní model pak vstupuje do dalšího iteračního kroku jako podklad pro výpočet nových časů. Při konvergenci procesu je získán rychlostní model s odezvou, která se neliší od měřených časů o hodnotu větší, než je nejistota měření. Tomografický výpočet rychlostního pole šíření seismických vln prostředím byl proveden programovým systémem ReflexW (SandmeierGeophysical Research, Německo) v pravidelné pravoúhlé výpočetní síti s krokem 0,5 x 0,5m. Jako nultý vstupní model pro iterační inverzní proces je možné použít prostředí s konstantní rychlostí v celé ploše nebo prostředí s gradientem rychlostí v okrajové části, případně je možné do vstupního modelu zahrnout laterální změny seismické rychlosti. Seismické paprsky, představující trajektorie šíření vysokofrekvenční složky seismického signálu, jsou v programu počítány jako dvojrozměrné zakřivené trajektorie ve 2D rovině sledovaného řezu. Ta může být vymezena jako svislá rovina procházející body zhlaví použité dvojice vrtů nebo vrtem a linií zdrojů či snímačů na povrchu či na stěně, případně pozicemi zdrojů a snímačů na stěnách štol. V případě zakřivených průběhů vrtaných sond jsou měřené časy šíření opraveny podle skutečné prostorové pozice zdrojů a přijímačů a výsledný předkládaný řez tak lze považovat za průmět obecné plochy měření do proložené roviny.

Detailní lokalizace provedených tomografických měření a použité přístrojové vybavení je uvedeno v následujících kapitolách věnovaných konkrétním pozicím.

2.4.5.2.1 Seismická tomografie mezi 20. a 21. patrem v linii chodeb Z3-XX a Z3-XXI

Vertikální tomografický řez provedený v prostoru mezi 20. a 21. patrem je vymezený štolou Z3-XX a Z3-XXI v úseku mezi geotechnickými stanicemi GS20/2 a GS20/1, resp. průměty jejich pozic na 21. patro. Snímače a zdroje byly osazeny v počvě obou uvedených štol, pro umístění snímačů byly také využity svislé vrty BGS20-1-V(D) a BGS20-2-V(D). Krok snímačů v obou štolách i ve

vrtech byl 1 m, zdroje seismické energie byly voleny s krokem 2 m. Pro vzájemnou komunikaci mezi zdrojem vlnění na 21. patře a měřicí aparaturou na 20. patře byl využit komín 1-21/20-95p, kterým byly vedeny signální a komunikační vodiče. Schematicky je lokalizace řezu uvedena na Obr. 394, pozice geotechnických stanic na 20. patře je také patrná z Obr. 10.



Obr. 394 Schematické znázornění prostoru pokrytého vertikálním seismickým tomografickým řezem mezi 20. a 21. patrem

Použito bylo následující technické vybavení:

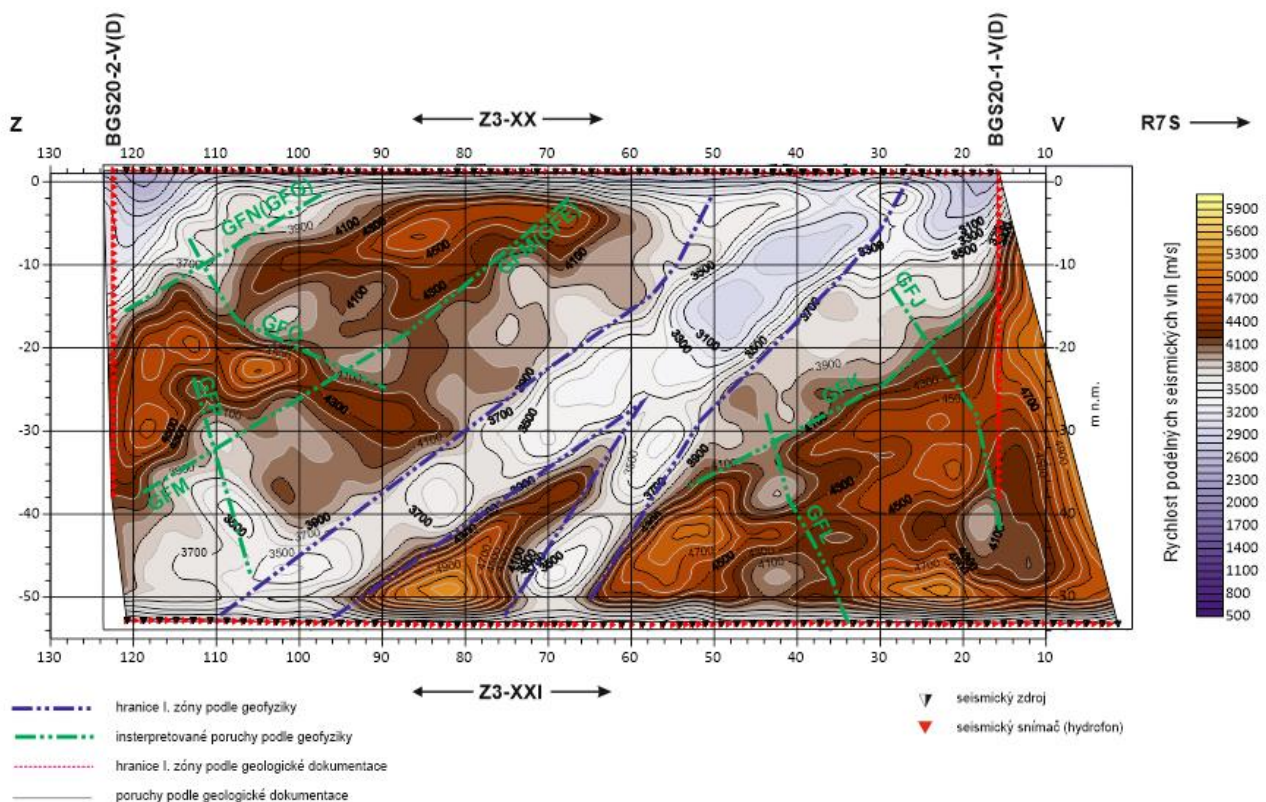
- seismograf Terraloc PRO – 48 kanálů, registrace signálů snímačů na podlaze štol (výrobce ABEM, Švédsko);
- seismograf Terraloc MK6 – 24 kanálů, registrace signálu hydrofony ve vrtech;
- snímače rychlosti kmitání (geofony) osazené elementy SM-11 (Sensor) o vlastní frekvenci 30 Hz (počva štol);
- řetězec hydrofonů BHC4 s 24 snímači osazenými elementy AQ2000 s frekvenčním rozsahem 1–10 000 Hz (výrobce Geotomographie GmbH, Německo);
- jako seismický zdroj na podlaze štol byly použity údery 3 kg úderníku do ocelové podložky.

Výsledný rychlostní řez je prezentován v Elektronická příloha 47, informativně pak také na Obr. 395. Rozložení rychlostí šíření podélných vln poměrně dobře vymezuje průběh hlavní poruchy (první zóny). Pro tuto poruchu lze přiřadit hodnoty rychlostí pod 3 900 m/s. V obrázku je pozice první zóny naznačena modrou čerchovanou linií. Na úrovni 20. patra není ohraničení poruchy až tak jednoznačné, ovšem v hloubce již kolem 5 m je zřejmá přítomnost oblasti snížených rychlostí, která poruchu dobře lokalizuje. Směrem k úrovni 21. patra (do hloubky) porucha upadá k západu (v průmětu do roviny řezu), v úrovni 21. patra je oblast snížené rychlosti přerušena ve staničení

75–95 m blokem pevnějších hornin s vyššími rychlostmi šíření podélných vln. Vymezení první zóny tak lze sledovat na 21. patře ve dvou intervalech: 66–76 m a 96–110 m.

Další, spíše lokální poruchy či diskontinuity, jsou interpretovány na základě rychlostního pole v získaném řezu. Pro přehlednost jsou označeny jako GF (J-P). Souhlasně s průběhem první zóny jsou vymezeny struktury s označením GFK (staničení 15–50 m), GFM (staničení 68–120 m) a GFN (na metrážích 97–120 m). Porucha GFM je patrně projevem struktury označené GFE interpretované v horizontálním řezu na úrovni 20. patra (viz další podkapitola). Stejně tak porucha GFN zřejmě souvisí se strukturou s označením GFG. Jako subvertikální nebo velmi strmé struktury lze označit indikace označení GFJ (staničení 16–28 m), GFL (staničení 34–44 m) a GFP (staničení 105–113 m). V západní části řezu (v nadloží první zóny) je také vyznačena porucha nebo struktura GFO (staničení 90–114 m), která se jeví jako méně strmá než např. GFP.

Hodnoty seismických rychlostí ve vertikálním řezu v prostoru mezi 20. a 21. patrem jsou v porovnání s horizontálním řezem na úrovni 20. patra cca o 10 % nižší. V případě vertikálního řezu jsou většinou využity takové kombinace zdroje a přijímače, kdy se signál mezi nimi pohybuje v trajektorii kolmé nebo šikmé k hlavním strukturám či k foliaci přítomných hornin. Navíc část trajektorií, které jsou (nebo je to předpokládáno) více méně paralelní s hlavními směry foliací, prochází první zónou a jejich rychlosti jsou proto nižší.

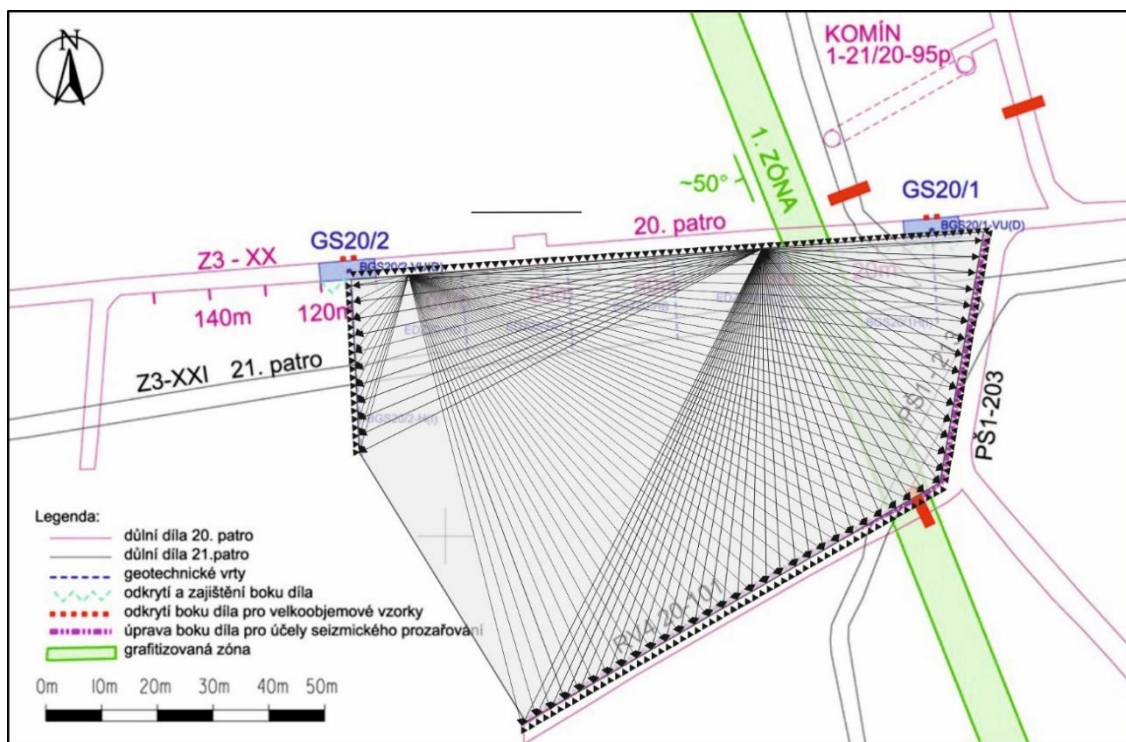


Obr. 395 Seismický tomografický řez mezi 20. a 21. patrem (viz Elektronická příloha 47)

2.4.5.2.2 Seismická tomografie na úrovni 20. patra

Horizontální řez na úrovni 20. patra je vymezený štolou Z3-XX (v úseku mezi štolou PŠ1-203 a geotechnickou stanicí GS20/2) na severu, štolou PŠ1-203, štolou RV4₂₀-101 na jihu a vrtem BGS20/2-H na východě. Schematicky je lokalizace tohoto horizontálního řezu prezentována na Obr. 396, pozice průzkumných prací v širších souvislostech je zřejmá z Obr. 10.

Snímače a zdroje seismického signálu byly osazeny na odkrytou jižní stěnu štol Z3-XX (krok 0,5–1 m), na severní stěnu štol PŠ1-203 a RV4₂₀-101 (ve zpřístupněných „oknech“ s krokem cca 1,5 m). V horizontálních vrtech BGS20/1-H, BGS20/2-H a geotechnických vrtech EDZ20-HA až EDZ20-HD byly použity trojosé snímače s krokem 0,5 m. Pozice zdrojů a snímačů na stěnách byly geodeticky zaměřeny. Měřeno tak bylo v různých kombinacích zdroj/snímač (stěna/stěna, vrt/stěna, vrt/vrt).



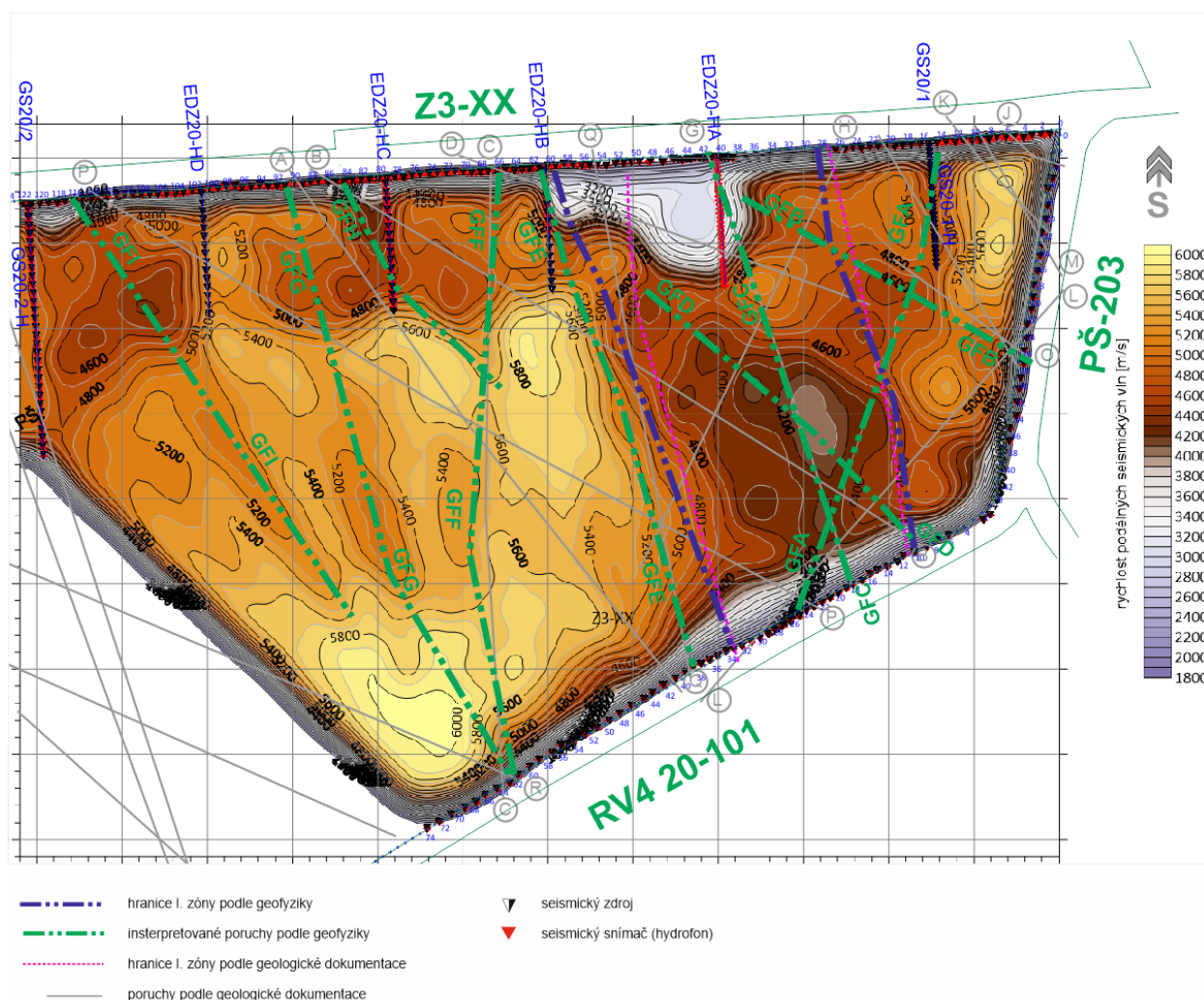
Obr. 396 Lokalizace horizontálního seismického tomografického řezu v prostoru 20. patra

Pro měření bylo použito následující technické vybavení:

- seismograf Terraloc PRO – 48 kanálů, registrace signálů snímačů na podlaze štol (výrobce ABEM, Švédsko);
- seismograf Terraloc MK6 – 24 kanálů, registrace signálu snímač ve vrtech (sonda SSI-4);
- snímače rychlosti kmitání (geofony) osazené elementy SM-11 (Sensor, Holandsko) o vlastní frekvenci 30 Hz (stěny štol);
- vrtná sonda vlastní konstrukce SSI-4 (INSET) osazená čtyřmi trojosými snímači rychlosti kmitání s měřicími elementy OMNI2400 (15 Hz) s krokem 0,5m;

- vrtná sonda vlastní konstrukce SSI-8 (INSET) osazená osmi trojosými snímači rychlosti kmitání s měřicími elementy OMNI-2400 s krokem 0,5m;
- elektrodynamický vrtný seismický zdroj BIS-SH s pulsním generátorem IPG (Geotomographie GmbH, Německo);
- jako seismický zdroj na stěnách a počvě byly použity úder 2 kg úderníku do ocelové podložky.

Výsledný rychlostní řez zobrazuje Elektronická příloha 48 a Obr. 397. Pro výpočet rychlostního pole byly využity všechny získané kombinace zdroj/přijímač. Zejména při jižní stěně chodby Z3-XX je díky využití všech šesti horizontálních vrtů vysoké pokrytí řezu sledovanými paprsky. Do řezu jsou přeneseny také některé geologické informace získané strukturální dokumentací odkrytých stěn na 20. patře (viz kapitola 2.4.5.1). Jedná se o vymezení první zóny, projevy poruch na stěnách a jejich lokalizace a korelace mezi chodbami.



Obr. 397 Horizontální seismický tomografický řez v prostoru 20. patra (Elektronická příloha 48)

Interpretace provedená podle rychlostního modelu zahrnuje zejména lokalizaci první zóny jako nejvýznamnější struktury v rámci řezu. Východní hranice zóny na úrovni chodby Z3-XX není

podle výsledků seismických měření příliš ostře vykreslena, to je z velké části způsobeno jednak zakrytou částí stěny v úseku staničení 26–36 m (nebyla osazena snímači či zdroji), a také chybějící informací mezi vrty BGS20/1-H a EDZ20-HA (ve vrtu EDZ20-HA nebylo možné kvůli pracovnímu pažení použít vrtný zdroj, důsledkem zapažení byl také výrazně zvýšený útlum při registraci vrtnou sondou). Poměrně dobře je vymezena první zóna v jižní polovině řezu v úrovni štoly RV4₂₀-101. Její okraj je interpretován podobně jako ve výsledcích geologických prací, a to na pracovní metráž štoly 10 m. Západní omezení struktury je v severní polovině řezu posunuto oproti geologické interpretaci více na západ až ke staničení 60 m, tj. k vrtu EDZ20-HB. Důvodem je oblast výrazně snížených rychlostí v prostoru mezi vrty EDZ20-HA a EDZ20-HB, konkrétně ve staničení 40,5–60 m. Geologické omezení je lokalizováno na metráž 51 m. V jižní polovině sledovaného bloku je západní hranice první zóny ostrá, interpretována je v soulasu s geologickými poznatky na pracovní metráži 33 m.

Získaná plošná distribuce rychlostí umožňuje také kromě první zóny vymezit přítomnost dalších struktur. Často se jedná o struktury více či méně paralelní s první zónou. Pro přehlednost jsou označeny názvem GF a pořadím A až I. Některé z interpretovaných struktur více či méně korelují s geologickými poznatky, jiné jsou v tomto smyslu unikátní a s žádnou geologickou linií je nelze ztotožnit (více dále v textu). Některé ze struktur interpretovaných podle geofyziky vymezují hranice mezi rychlostně odlišnými horninami (např. hranice širších porušených oblastí, zde zejména první zóny): to jsou linie GFA, GFE, GFF. Jiné geofyzikální indikace ukazují na lokální rychlostní minima v prostředí horninového masivu, tyto anomálie jsou patrně odezvou (tektonických) poruch, kolem kterých dochází k intenzivnějšímu porušení (rozpukání) horniny. Jedná se zejména o linie GFB, GFG, GFI. Linie GFA ve směru SSV–JJZ je interpretována přibližně od vrtu BGS20/1-H na staničení 25 m štoly RV4₂₀-101, v blízkosti této chodby prochází zónou. Struktura GFB je patrná v rychlostním poli od chodby PŠ-203 na metráži 26,5 m a vede v sz. směru do prostoru první zóny. Lze ji ztotožnit s geologickou linií O. Poruchová struktura GFC vede přibližně středem poruchy, od vrtu EDZ20-HA na severu ke staničení 18 ve štolu RV4₂₀-101 na jihu. Je prakticky totožná s geologickou linií G. Porucha s označením GFD je v rychlostním řezu omezena na prostor první zóny, částečně je možné hledat paralelu v geologické struktuře B, alespoň v její jižní části. Interpretovaná linie GFE je v jižní části prakticky totožná s geologickou strukturou Q, v severní části se odklání od geologické linie více k západu. GFE je paralelní se západní hranicí první zóny vymezenou podle geofyziky. Geofyzikální linie GFF odpovídá geologické struktuře s označením C, vede téměř v severojižním směru mezi štolami Z3-XX a RV4₂₀-101. Linie GFH vede od okraje štoly Z3-XX zhruba v jihovýchodním směru, přibližně v pozici geologické struktury A. Linie GFH je ukončena v masivu na struktuře GFF. Geofyzikální linie s označením GFG je vedena od stěny chodby Z3-XX v úrovni pracovního staničení 92 m ve směru k JJV, štolu RV4₂₀-101 prochází v úrovni pracovního staničení 62 m (podobně jako geologické struktury C, R). Struktura s označením GFI je zhruba paralelní s předchozí linií GFG, interpretovaná je od pracovní metráže 116 m štoly Z3-XX, sleduje lokální minimum v rychlostním poli ve směru k JJV, ukončena je v masivu před jižním okrajem sledovaného bloku na okraji prostředí s vysokými rychlostmi.

Uvedená interpretace je odvozená ze získaného rychlostního obrazu, který je ovlivněn zejména geomechanickým stavem přítomných hornin (zejména jejich rozpukáním), ten ovlivňuje hodnoty rychlostí více než jejich litologická příslušnost (snad kromě silně alterovaných grafitizovaných zón). Významný je také vliv rychlostní anizotropie, která je v daném prostředí komplexu metamorfovaných hornin značná. Představu o změnách rychlostí v závislosti na orientaci

trajektorie vůči foliaci podává kapitola 2.3.4. Rozdíly v hodnotách rychlostí ve směrech kolmo a paralelně k foliaci jsou nezdědky kolem 30 %. Toto se samozřejmě projevuje také v předkládaném rychlostním řezu. Folie ve sledovaném bloku mají směry generálně blízké severojižnímu, v tomto směru budou seismické rychlosti vyšší. To platí pro některé severojižní trajektorie mezi chodbami Z3-XX na severu a RV4₂₀-101 na jihu. Naopak paprsky vedené zhruba paralelně se štolou Z3-XX, které jsou ve vstupních datech poměrně hojně využity (měření mezi vrty EDZ20-H a mezi vrty a stěnou), budou mít rychlosti spíše nižší. Severní okraj rychlostního řezu se proto projevuje nižšími hodnotami rychlostí než jeho jižní část, kde nejsou žádné vrty. Při výpočtu rychlostního modelu jsou mírně upřednostněny paprsky s krátkou dráhou se zdrojem a přijímačem v blízkosti dotčené buňky výpočtového pole. Použitý výpočetní aparát neumožňuje pracovat s tenzorem rychlosti. Nejistoty ve výpočtu absolutních hodnot rychlostí jsou větší v částech s menším pokrytím seismickými paprsky, a to je zejména v jz. části bloku mezi dnem vrtu BGS20-2-H a jz. částí štoly RV4 20-101. Relativní obraz rychlostního pole je ovšem zatížen menší nejistotou, proto je pozice interpretovaných linií relevantní.

2.4.5.3 Seismické reflexní měření

K posouzení hlubších struktur v geologickém řezu je užívána reflexní seismika, resp. seismická měření se zobrazením registrované vlnové odezvy. Seismická měření v reflexní variantě charakterizují sledované prostředí pomocí detekce průběhu subhorizontálních odrazných rozhraní, změnou intenzity a frekvence přijímaných vln a výskytem vln difragovaných na poruchových zónách. Taková rozhraní oddělují prostředí s dostatečným kontrastem seismické impedance, tj. součinu rychlosti šíření seismických vln a hustoty (v nepříznivém případě nemusí změna rychlosti šíření představovat reflexní horizont).

V daném případě jsou očekávaným odrazným rozhraním hranice mezi bloky s výrazně odlišnými geomechanickými parametry (různá intenzita rozpukání), ohraničení rozsáhlejších poruchových struktur (první zóny). Intenzita odraženého signálu je závislá na rychlostním kontrastu, kvalitě a množství přechodů mezi jednotlivými horninovými typy uvnitř jednotlivých bloků. Porušení korelace vůdčích reflexních horizontů, resp. celkovou změnou vlnového obrazu, jsou v řezech identifikovány poruchové zóny.

Na rozdíl od refrakční modifikace je v reflexním seismickém měření výrazně nižší poměr délky rozložení snímačů na povrchu a zájmové hloubky. Konfigurace měření je pokud možno volena tak, aby v seismických záznamech byly odražené vlny přicházející ze zájmových hloubek registrovány v (časové) oblasti bez seismického šumu. Tím jsou především povrchové vlny a vlna zvuková.

Reflexní průzkum byl proveden v modifikaci CDP, kdy je ke zvýšení poměru signálu a šumu využito sumování přepočtených záznamů se společným středovým bodem. Tím je bod ležící v polovině linie spojující zdroj a snímač. Řazením sumovaných záznamů je vytvářen časový řez. Konfigurace měření byla volena tak, aby bylo dosaženo minimálně 12-násobného překrytí.

Průzkumné práce byly provedeny v prostoru 20. a 21. patra dolu. Měření byly získány:

- vertikální řez měřený z úrovně počvy 20. patra ve štole Z3-XX vymezený geotechnickými stanicemi GS20/1 a GS20/2, prostorová lokalizace je shodná s tomografickým řezem mezi 20. a 21. patrem, jak ji schematicky ukazuje Obr. 394;

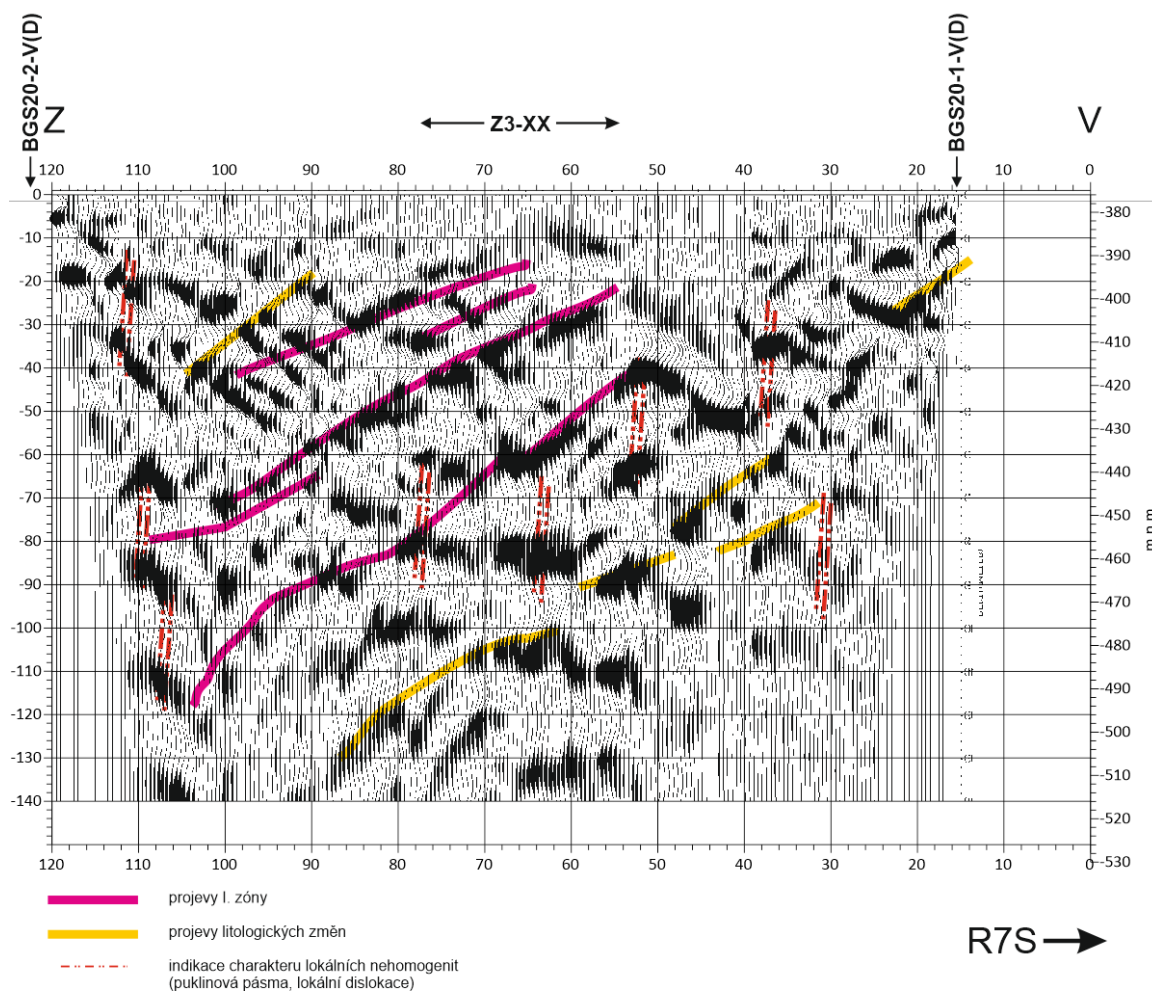
- vertikální řez měřený z úrovně počvy 21. patra ve štolě Z3-XXI vymezený zhruba průměty vrtů BGS20-1-V(U) a BGS20-2-V(U);
- horizontální řez na úrovni 20. patra vedený do odkrytého jižního boku štoly Z3-XX (v úseku mezi geotechnickými stanicemi GS20/2 a GS20/1).

Pro měření všech profilů byla použita tato přístrojová výbava a parametry měření:

- seismograf Terraloc PRO – 48 kanálů (ABEM, Švédsko);
- snímače rychlosti kmitání (geofony) osazené elementy SM-11 (Sensor, Holandsko) o vlastní frekvenci 30 Hz, osazené do stěny nebo počvy štol s krokem 1 m;
- jako seismický zdroj na podlaze štol byly použity údery 3 kg úderníku do ocelové podložky, vzdálenost mezi jednotlivými body zdrojů byla 2 m.

Data reflexního průzkumu byla zpracována softwarovým balíkem ReflexW (SandmeierGeophysical Research, Německo). Sled pracovních kroků byl volen s ohledem na povahu a kvalitu konkrétních záznamů na jednotlivých profilech:

- prvotní editace pro odstranění chybných záznamů;
- zesílení (okno 50 ms);
- dekonvoluce pro odstranění násobných odrazů a zúžení signálu;
- odstranění přímé a čelné vlny;
- potlačení seismického šumu v podobě povrchových vln – částečné eliminace nízkofrekvenčního šumu v podobě povrchových vln je dosaženo frekvenční filtrací při měření a digitální filtrací při zpracování. Obdobný účel má spektrální vyrovnaní (spectral whitening) v intervalu frekvencí 30–150Hz. V některých případech bylo nutné vyříznutí dílčích úseků záznamů;
- odstranění zvukové vlny vyříznutím předmětné části záznamů;
- statické korekce pro odstranění vlivu reliéfu (rozdílná výšková úroveň vysílače a přijímače) nebyly prováděny;
- rychlostní analýza pro korektní provedení následné sumace a převod časového měřítka na hloubkové. Ve většině případů byly využity rychlostní modely získané při tomografickém měření (tomografie mezi chodbami Z3-XX, PŠ1-203 a RV4₂₀-101, tomografie mezi 20. a 21. patrem v linii chodeb Z3-XX a Z3-XXI);
- dynamická (NMO) korekce a sumace tras pro SSB;
- normalizace amplitud.



Obr. 398 Seismický reflexní řez pořízený z úrovně 20. patra (Elektronická příloha 49)

Výsledky reflexní seismiky jsou předkládány ve formě hlubkových řezů pořízených na základě rychlostní analýzy. V některých případech je z důvodů lepší čitelnosti řezů použit časový řez s nelineárním hlubkovým měřítkem.

Seismický reflexní řez získaný měřením na počvě chodby Z3-XX na 20. patře dolu je součástí Elektronická příloha 49 a také je prezentován na Obr. 398 v textu. V řezu jsou patrné výrazné linie upadající k západu, které jsou zvýrazněné červenou plnou čarou. Jedná se o projevy první zóny, protíná linii profilu ve staničení cca 25–41 m. Reflexy jsou v řezu patrné od staničení 55 m dále, kdy je zóna již v dostatečné hloubce pod povrchem chodby (kolem 15–20 m). V menších časech (hloubkách) je obtížné odraženou vlnu odlišit od vlny čelné a povrchové. Dále jsou zřejmá šikmo ukloněná rozhraní upadající k západu v podobném sklonu jako první zóna, tato jsou interpretována jako litologická rozhraní v podloží poruchové struktury, na kterých se stýkají materiály natolik odlišných vlastností (z hlediska vlnového odporu), že dochází k seismickým odrazům (vyznačeny žlutou plnou čarou). Zejména v hlubších partiích řezu (více než 60 m) jsou ovšem tato rozhraní neostrá a málo spojitá. Zvýšená odrazivost může být způsobena také přítomností puklinové zóny při litologickém rozhraní. Indikace možných lokálních nehomogenit jsou zakresleny červenou čerchovanou čarou. Jedná se o projevy s charakterem difrakčních odrazů, ke kterým dochází např. při přítomnosti nespojitosti na odrazném rozhraní nebo při

výskytu prostorově omezených objektů s výrazně odlišným vlnovým odporem (rozpuštěné oblasti, grafitizované nebo alterované vložky a podobně). Z těchto nehomogenit jsou nejvýraznější projevy v blízkém okolí první zóny v jejím podloží (staničení 52, 64 a 76 m v hloubkách 40 m, 80 a 80 m).

Obdobný je také charakter na seismickém reflexním řezu pořízeném měření na počvě chodby Z3-XXI 21. patra v prostoru vymezeném zhruba průměty svislých vrtů BGS20-1-V(U) a BGS20-2-V(U). Popisovaný řez je součástí Elektronická příloha 50. Reflexní projevy první zóny jsou omezeny na západní okraj měřené linie, interpretována je odezva od této struktury ve staničení 95–110 m, dále tato struktura pokračuje mimo dosah profilu. Projevy možných litologických změn, které se projevují k západu ukloněnými reflexy, jsou interpretovány na několika pozicích řezu. Výrazné jsou především reflexy ve staničení 0–30 m s přiřazenou hloubkou mezi 20–80 m. Odrazy ve střední části řezu jsou obtížněji sledovatelné a poměrně málo spojitě. Indikace diskontinuit, na které ukazují projevy s difrakčním charakterem, jsou patrné v několika pozicích především hloubkových úrovních 10–40 m pod povrchem. Nejvýraznější jsou odrazy ve staničení 6–8 m (hloubka kolem 20 m) a 104–106 m (hloubka 25 m).

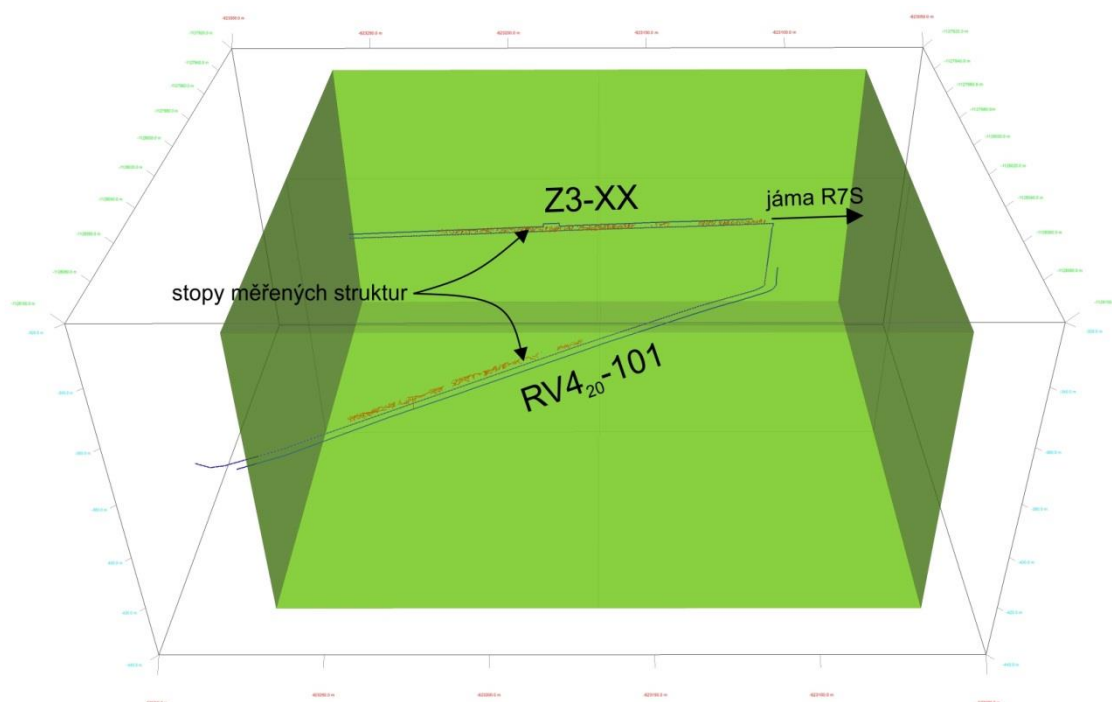
Reflexní zpracování bylo také provedeno pro horizontální profil vedený v odkryté jižní stěně překopu Z3-XX v rozmezí mezi odbočkou chodby PŠ1-203 a stanicí GS20/2 (staničení 0–120 m, Elektronická příloha 51). Pozice hlavní poruchy (první zóny) i ostatních struktur je k profilu téměř kolmá, „boční odrazy od takových rozhraní se projevují jako šikmo ukloněné linie patrné na poměrně velké vzdálenosti.

2.4.5.4 DFN model

Sběr dat a tvorba DFN modelu byla realizována v kvazihomogenním bloku lokalizovaném na 20. patře dolu Rožná vymezeném chodbami Z3-XX a RV4₂₀-101. Model byl realizován v bloku horniny o objemu 3 326 646 m³, jehož rozsah odpovídá výše zmíněným chodbám vždy s minimálním laterálním rozsahem 30 m od měřených strukturních dat. Vertikální rozsah bloku je 100 m se středem na úrovni počvy 20. patra (Obr. 399). Jako zdrojová data pro optimalizaci a výpočet parametrů DFN sítě bylo využito 6 úseků těchto chodeb, na kterých byly zpracovány fotogrammetricky 3D modely metodou Structure from Motion v programu Agisoft Metashape v.1.5.2 (Elektronická příloha 120). Tyto modely reprezentují vždy jednu stěnu dokumentované chodby. V případě Z3-XX se jedná o stěnu jižní a v případě RV4₂₀-101 stěnu severovýchodní. Výše zmíněných 6 úseků vzniklo v místech, kde byly odstraněny zátahy, případně se jednalo o odkrytý horninový masiv. Metráže jednotlivých úseků byly počítány pro chodby Z3-XX a RV4₂₀-101 od jejich křížení s chodbou PŠ1-20-203. Podrobné charakteristiky jednotlivých úseků jsou uvedeny v Tab. 161. Parametr P21 popisuje souhrnnou délku stop puklin na jednotku plochy. V tomto případě se jedná o proložené roviny jednotlivými úseky, na které byly stopy puklin kolmo projektovány.

Tab. 161 Charakteristika a lokalizace úseků využitých pro tvorbu DFN modelu v kvazihomogenním bloku na 20. patře

Chodba	Název úseku pro výpočet	Délka úseku [m]	Metráž od-do [m]	Obsah plochy proložené úsekem [m ²]	Počet dokumentovaných struktur	P21 [m/m ²]
Z3-XX	Z3XXP1	25	3–28	54,9	101	1,43
Z3-XX	Z3XXP2	7	39–46	13,9	26	1,22
Z3-XX	Z3XXP3	73	51–123	152	288	1,57
RV4 ₂₀ -101	RV4XXP1	10	67–77	22,6	42	1,5
RV4 ₂₀ -101	RV4XXP2	30	83–113	91,7	95	1,38
RV4 ₂₀ -101	RV4XXP3	31	116–147	86,2	75	1,5



Obr. 399 Rozsah DFN modelu kvazihomogenního bloku na 20. patře

DFN model byl vytvořen v prostředí programu DFraM, který byl vyvinut na základě požadavku SÚRAO ve spolupráci ČGS a FSv ČVUT a jehož specifikace, kódování a možné výstupy jsou uvedeny ve zprávě Kabele et al. (2018). Tento software byl testován na strukturních datech získaných z podzemí již během jeho vývoje a dále např. v projektu Transport 8 (Gvoždík et al. 2020) realizovaném v rámci Výzkumné podpory pro bezpečnostní hodnocení HÚ, kde je výsledný model puklinové sítě používán pro navazující hydraulické simulace proudění podzemní vody a transportu radionuklidů v horninovém prostředí.

Pro správné vytvoření DFN modelu je třeba reprezentativního vzorku dat, který je úměrný velikosti modelovaného celku. Pro účel vytvoření DFN sítě ve výše zmíněném kvazihomogenním bloku je třeba několika stovek jednotlivých měření (Elektronická příloha 117). Není tak např. možné vytvářet statisticky reprezentativní DFN modely v měřítku jednotlivých úseků (jednotky až první desítky metrů), které často obsahují pouze několik desítek relevantních struktur. Rovněž je nutné mít dataset složený z porovnatelných pozorování, jelikož některé parametry jsou pak klíčové pro validaci vypočteného datasetu, zejména délka dokumentované stopy. Z tohoto důvodu nemohly být do modelu začleněny pukliny získané z vrtných prací, není totiž známa jejich délka v relevantním pozorovacím okně (výška a šířka chodby), protože získané informace jsou omezeny pouze na velikost vrtného jádra.

Vypočtený DFN model kvazihomogenního bloku (Elektronická příloha 118) slouží zejména k prostorové vizualizaci hustoty puklinové sítě. Parametr P30 slouží jako indikátor hustoty sítě v reprezentativním objemu horniny. Tento parametr vyjadřuje četnost výskytu puklin v jednotce objemu, v tomto případě v 1 m^3 . Sečteme-li parametry P30 napříč všemi populacemi dostaneme hodnotu 1,853, která říká, že každým metrem krychlovým modelovaného bloku procházejí téměř 2 pukliny. Tato hustota není vzhledem k charakteru a míře postižení horninového masivu na lokalitě Rožná a v přilehlém okolí překvapivá, uvážíme-li i hodnoty parametru P21 uvedené v Tab. 161, kde je průměrná hodnota napříč úseky 1,43 m délky puklin na 1 m^2 plochy.

Na základě strukturní dokumentace (Elektronická příloha 119) bylo v dokumentovaném bloku vyčleněno celkem 5 populací puklin (Obr. 400). Tři populace puklin upadají strmě k S a J, SV a JZ a SZ a JV, zbývající dvě populace pak upadají pod středními úhly k JV a JZ. Dominantními sety jsou zejména populace 1 a 4. Jak je patrné z Obr. 400, tak shoda mezi měřenými daty a simulací je velmi dobrá. Problematický je pouze set populace 5, který neobsahuje příliš velké množství struktur, ale jejich vlastnosti, zejména výrazná výplň a délka, byly natolik důležité, že by bylo chybou je do modelu nezahrnout. Dokumentované pukliny jsou buď extenzní či střížné, často reaktivované převážně s kalcitovou, chloritovou, či kalcit-chloritovou výplní. Lokálně se na plochách puklin vyskytuje sulfidická mineralizace.

2.4.5.4.1 Výpočet DFN a její parametry

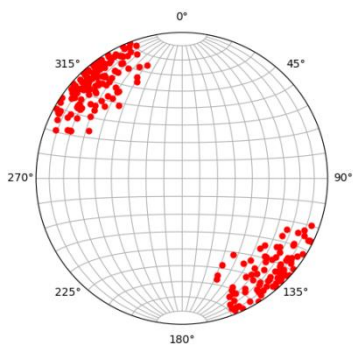
Vypočtené parametry DFN sítě jsou shrnuty v Tab. 161. Písmenem P jsou označeny jednotlivé populace, které byly ze strukturního datasetu identifikované a jsou popsány výše. N označuje množství struktur, které se v dané populaci vyskytují. Kolonky Strike, Dip, Azimuth a jednotkový vektor (Unit mean vector) určují směrové charakteristiky dané populace v prostoru. Písmeno K označuje hodnotu Fisherovy distribuce, resp. disperzi dat jejich průměrné hodnoty. X min označuje výchozí velikost poloměru kružnice opsané čtverci definujícím jednotlivé pukliny a byla zvolena deterministicky. Parametr α určuje sklon křivky četnosti velikostí jednotlivých puklin v mocninném rozdělení. P30 je vypočtenou hodnotou množství struktur nacházejících se v 1 m^3 horniny. JSD (Jensen-Shannon Divergence) pak porovnává podobnost mezi originálními (měřenými) daty a daty vypočtenými z modelu na základě simulace délek stop puklin. Dosahuje hodnot od 0 (populace jsou totožné) po 1 (bez shody). Z hodnot JSD je patrné že rozdíly mezi měřenými a vypočtenými daty jsou v jednotkách procent.

Tab. 162 Vypočtené parametry pro jednotlivé populace puklin

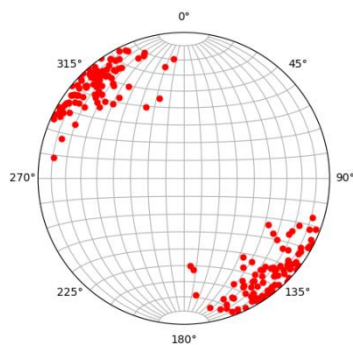
P	N	Strike[°]	Azimuth [°]	Dip[°]	Unit mean vector			κ	x_min [m]	α	P30 [m ³]	JSD
1	210	230	320	90	0,6378	-0,7702	-0,0080	19,31	0,3	3,50	0,89	0,086
2	116	268	358	90	0,0428	-0,9990	-0,0009	28,15	0,3	3,50	0,56	0,034
3	43	21	111	46	-0,6715	0,2540	-0,6960	64,77	0,3	3,09	0,08	0,089
4	129	128	218	90	0,6135	0,7896	-0,0019	12,54	0,3	3,15	0,32	0,096
5	6	140	230	33	0,4226	0,3540	-0,8342	79,62	0,3	2,63	0,003	0,012

Z vypočtených parametrů bylo realizováno několik verzí DFN sítě, kdy byly využity jak program DFraM, který síť generuje ve formátu *.vtk, tak software MOVE, resp. modul Fracture Modelling. Modul Fracture Modelling neobsahuje možnosti výpočtu či optimalizace strukturních dat, lze mu pouze zadat vstupní hodnoty a parametry pro tvorbu sítě. Optimalizované parametry vypočtené programem DFraM (Tab. 161) lze v plném rozsahu v modulu Fracture Modelling využít a vytvořit síť kompatibilní se sítí tvořenou DFraM (porovnání stereogramů na Obr. 400 a Obr. 401). Vizualizovaná síť pro jednotlivé populace je pak znázorněna na Obr. 402 až Obr. 406.

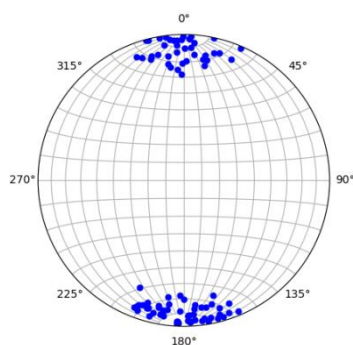
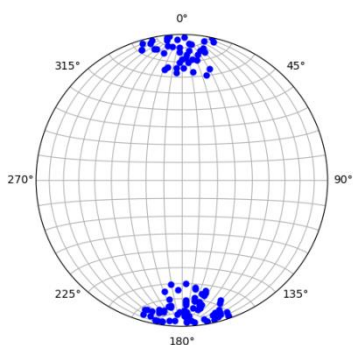
Terénní měření



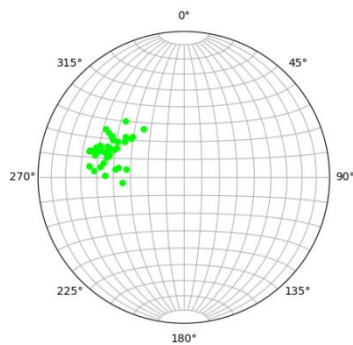
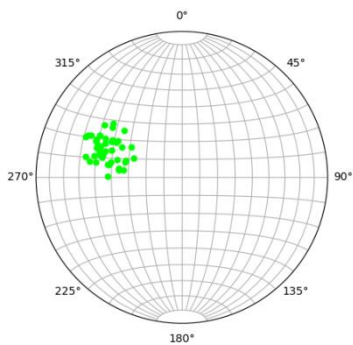
Simulace v DFraM



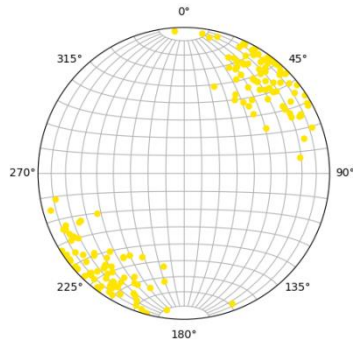
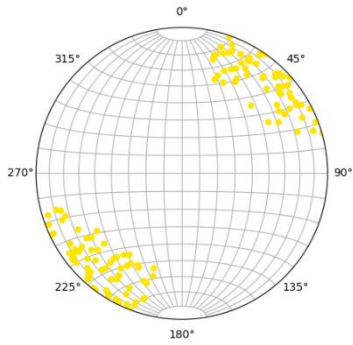
populace 1



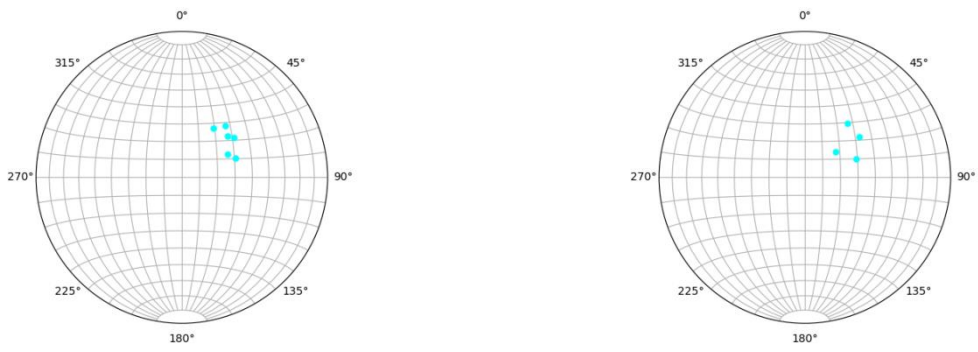
populace 2



populace 3



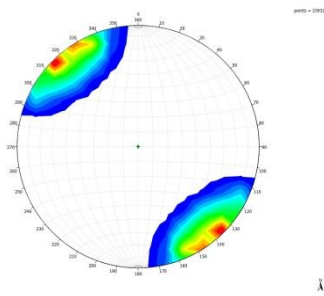
populace 4



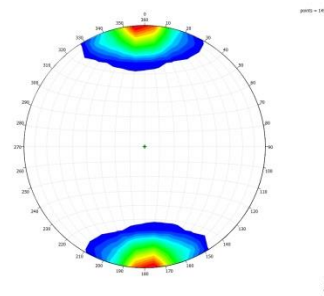
populace 5

Obr. 400 Srovnání stereogramů pólů ploch jednotlivých populací puklin; populace jsou řazeny sestupně od 1 do 5

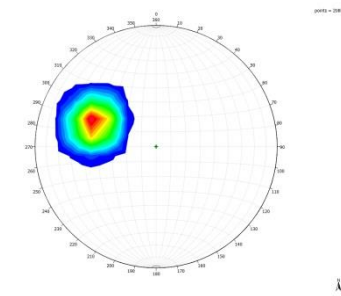
populace 1; N = 23932



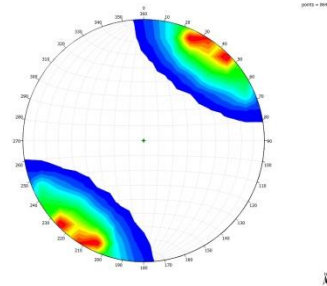
populace 2; N = 14976



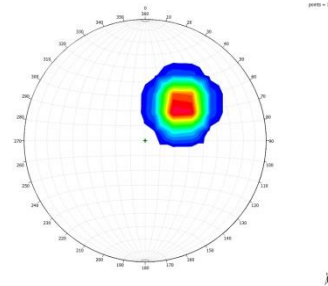
populace 3; N = 2080



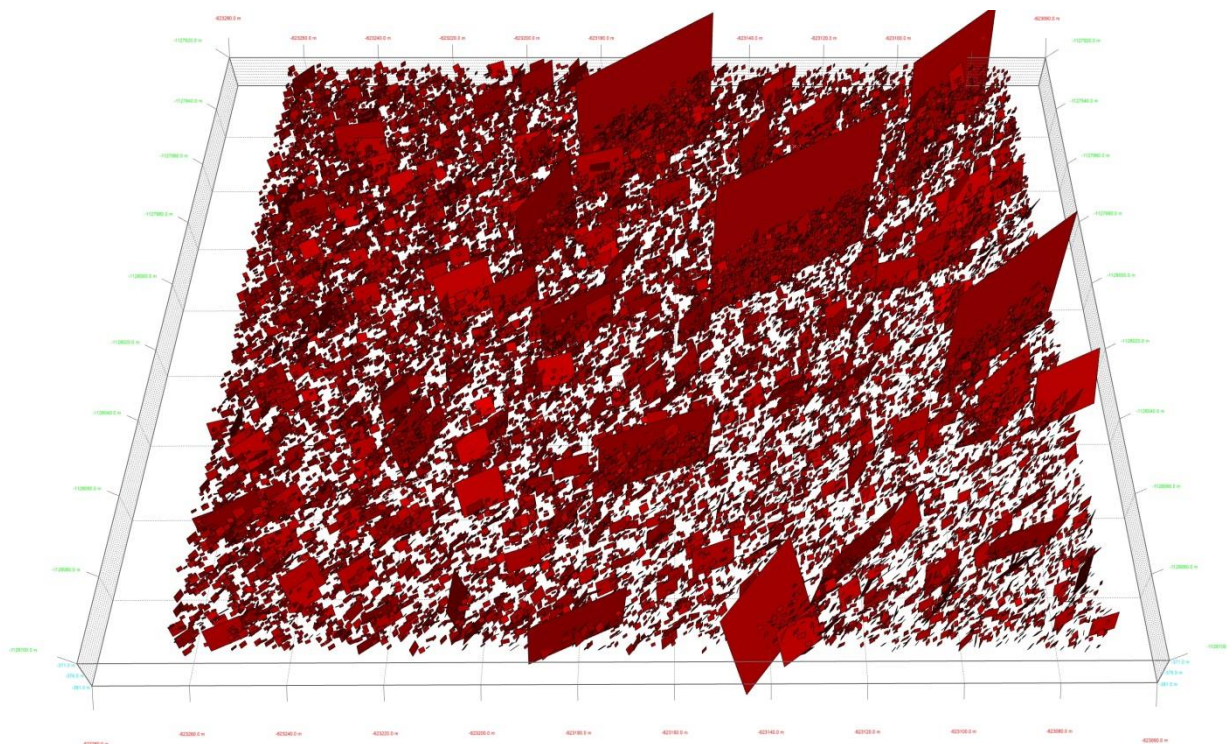
populace 4; N = 8645



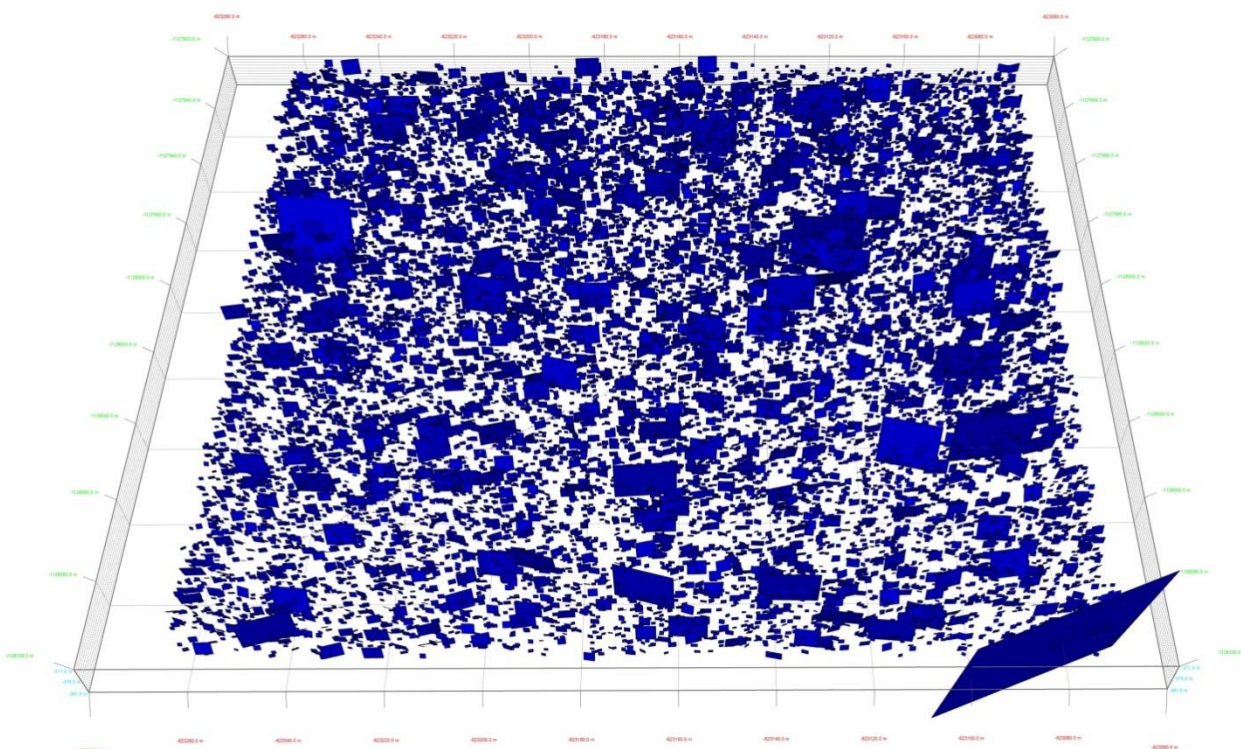
populace 5; N = 78



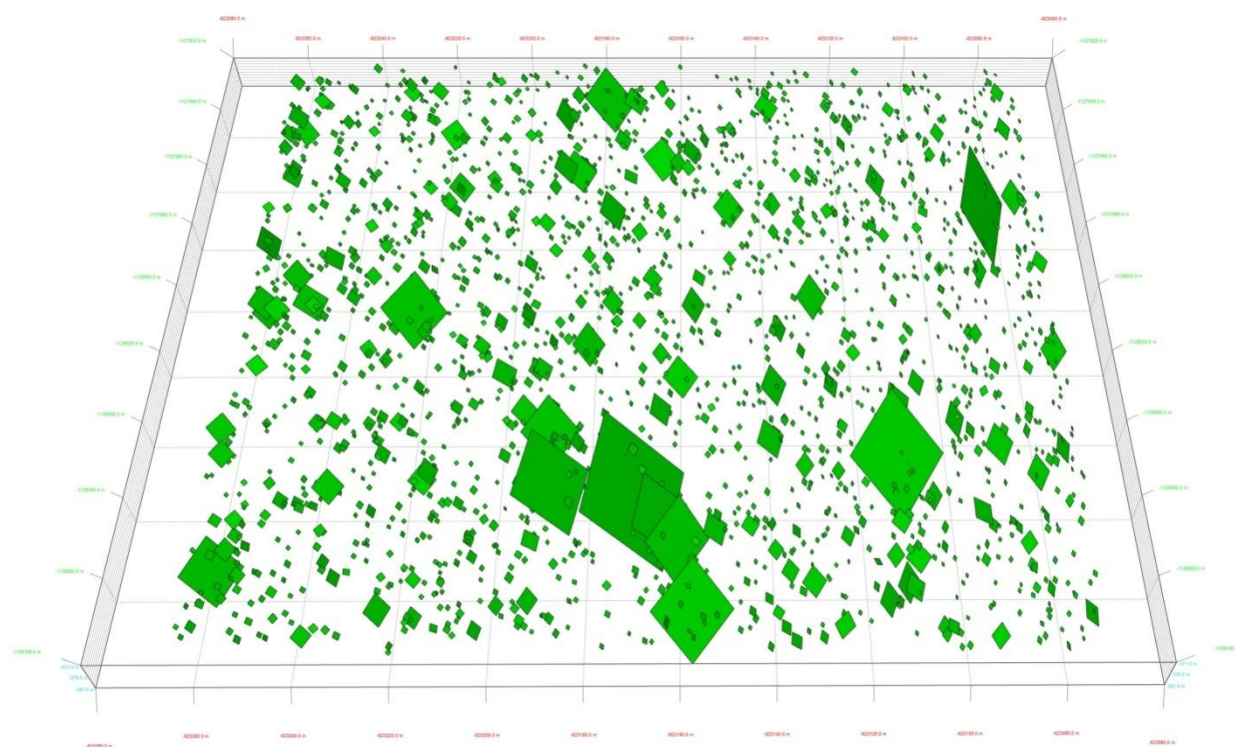
Obr. 401 Konturový diagram pólů ploch puklin z modelové sítě vytvořené v modulu Fracture Modelling programu MOVE na základě optimalizovaných dat z DFraM



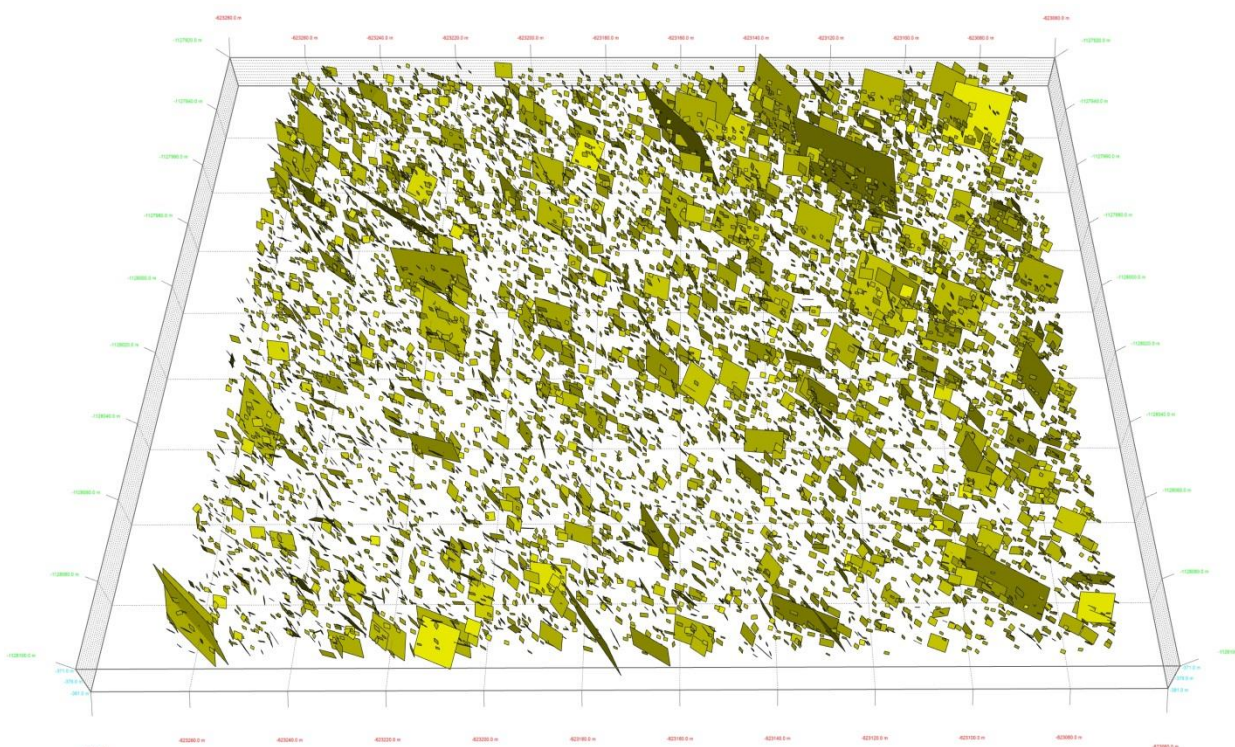
Obr. 402 Struktury populace 1 vygenerované v modulu Fracture Modelling v programu MOVE



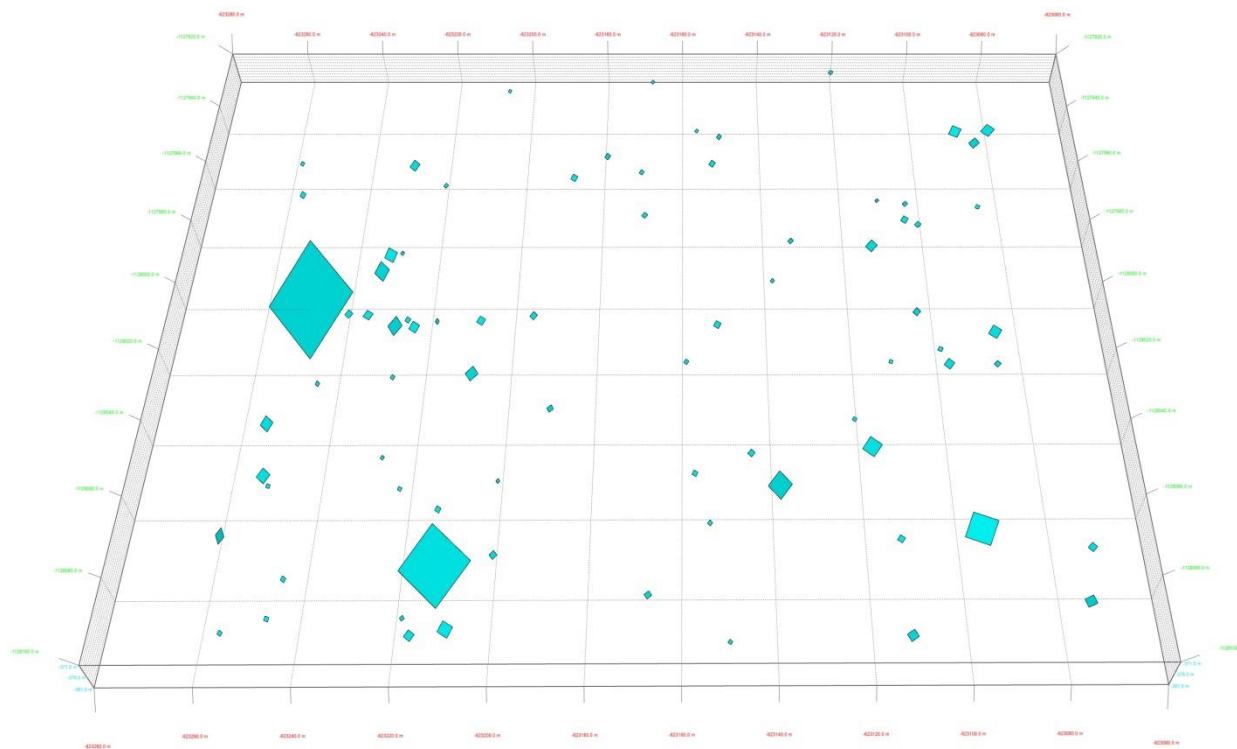
Obr. 403 Struktury populace 2 vygenerované v modulu Fracture Modelling v programu MOVE



Obr. 404 Struktury populace 3 vygenerované v modulu Fracture Modelling v programu MOVE



Obr. 405 Struktury populace 4 vygenerované v modulu Fracture Modelling v programu MOVE



Obr. 406 Struktury populace 5 vygenerované v modulu Fracture Modelling v programu MOVE

2.4.5.4.2 Validace vypočtených dat

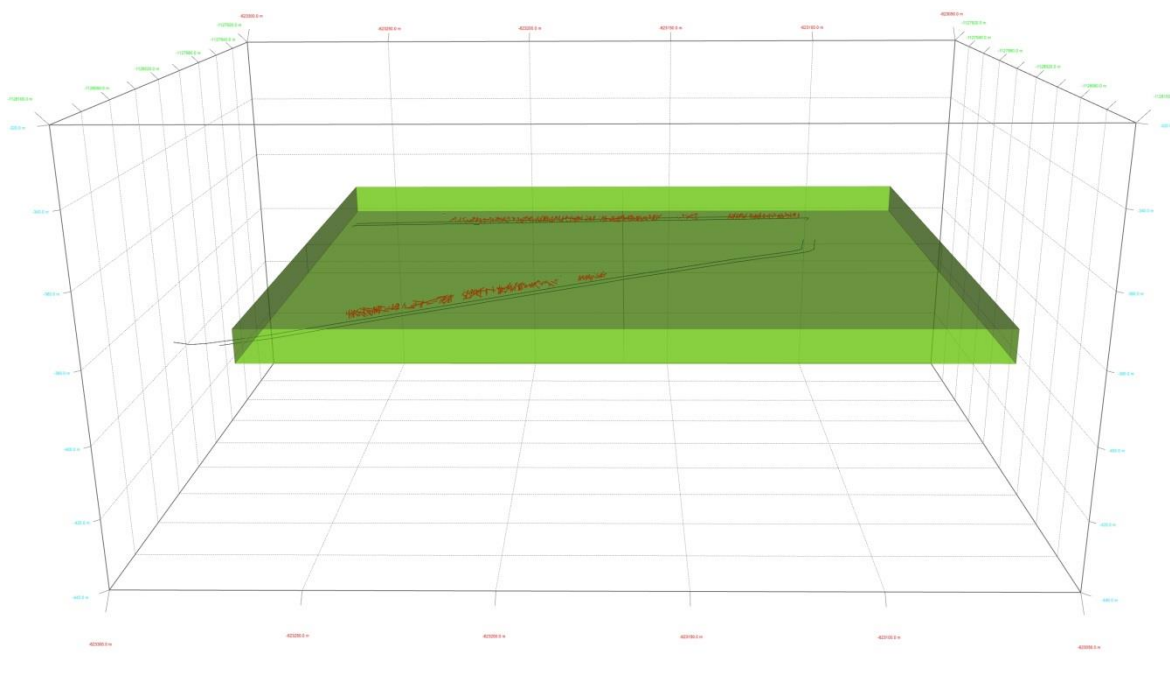
Validace vypočteného DFN modelu proběhla na základě realizace DFN sítě ve formátu *.vtk v modelovém území zmenšeném tak, aby zahrnovalo všechny měřené úseky (Obr. 407). Tímto je dosaženo rychlejší validace při zachování parametrů sítě vypočtené v původním území DFN modelu kvazihomogenního bloku.

Byla porovnána intenzita struktur (parametr P21), tedy souhrnná délka stop puklin na jednotku plochy u dat získaných měřeními a ohraničených plochou představující velikost a hranice měřeného úseku a z vygenerované DFN sítě projektované na tytéž plochy. Na Obr. 408 je patrná dobrá shoda mezi modelovanými a měřenými daty, přičemž u modelových dat je intenzita mírně nadhodnocena, což je způsobeno obecně variabilnější délkou struktur generovaných modelem, jelikož nastavení velikostí generovaných struktur je velmi citlivé. V tomto případě se do modelu promítl předpoklad maximálního poloměru opsané kružnice dané struktury, která byla nastavena na 25 m. V modelu se tedy vyskytují struktury až do velikosti 50 m, které sice nebyly pozorovány na velmi úzkých pozorovacích oknech na stěnách chodeb, ale nelze vyloučit jejich existenci v kvazihomogenním bloku. Maximální velikost byla nastavena na základě modelu význačných struktur v kvazihomogenním bloku, které v mnoha případech tuto velikost i převyšují.

Další byl hodnocen parametr P20 neboli hustota struktur. Tento parametr nezohledňuje délky struktur, ale pouze detekuje počet struktur nacházejících se v metru čtverečním pozorovaného úseku. Jak je patrné z Obr. 409 v tomto parametru bylo dosaženo téměř absolutní shody mezi modelovanými a měřenými strukturami. Množství modelovaných struktur tedy odpovídá reálným pozorováním.

Na Obr. 410 je vidět porovnání průměrných délek stop pro jednotlivé populace. Zde je rovněž patrný trend podobný parametru P30, kdy délky stop modelovaných struktur větší než měřených

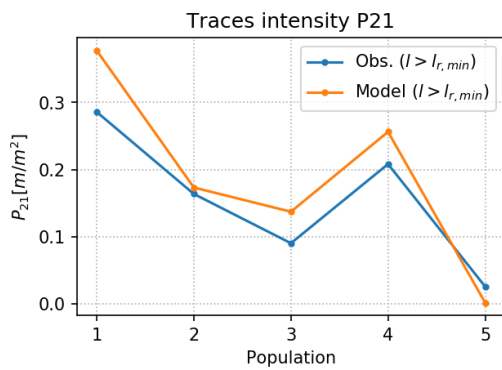
dat. Zde se rovněž projevuje větší rozpětí velikostí modelovaných struktur, které vede k tomu, že stopy struktur generovaných modelem jsou delší. Míra nadhodnocení je u puklin populací 1 až 4 velmi podobná, lze tedy předpokládat, že pokud by byly generovány struktury s menším poloměrem opsané kružnice, tato hodnota by se více přiblížila pozorováním. Výrazná odchylka u populace č. 5 je způsobena velmi malou četností těchto struktur na pozorovaných úsecích, jak je patrné z Tab. 162 a Obr. 400.



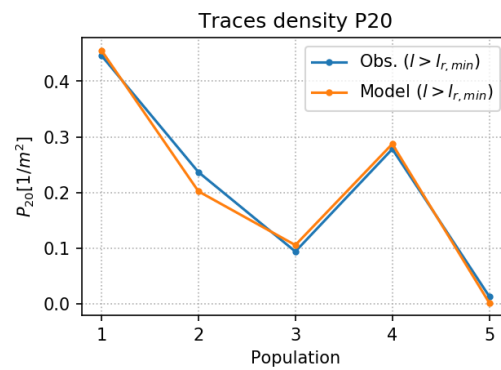
Obr. 407 Území, ve kterém byla generována DFN síť pro účely validace vypočtených dat

V případě počtu stop náležících jednotlivým populacím, které byly v pozorovacích oknech zachyceny (Obr. 411), je vidět stejný trend jako u parametru P20. Množství struktur jednotlivých populací vypočtených modelem je shodné s počtem těchto struktur přímo měřených v pozorovacích oknech.

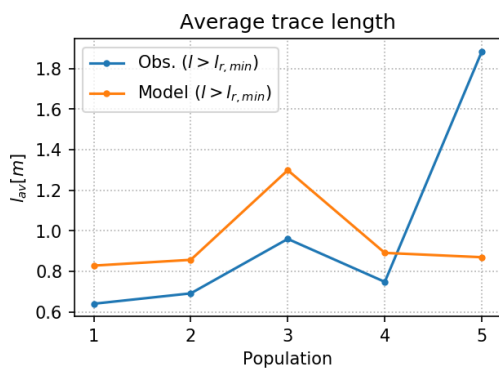
Obr. 412 shrnuje celkový trend kumulativní četnosti stop, jejichž délka je větší nebo rovna minimální zadané (pozorované) hodnotě, v tomto případě tedy 0,19 m. Do tohoto grafu se promítají všechna pozorovací okna, resp. měřené úseky a zároveň všechny populace. Z trendu křivek je zřejmá velmi dobrá shoda mezi pozorováním a modelem a lze tedy tuto vypočtenou síť považovat za reprezentativní matematický model DFN sítě v kvazihomogenním bloku horniny. Mírný posun křivky modelovaných struktur lze opět přisoudit vlivu parametru P21 a obecně vyšší četnosti struktur většího rozsahu v DFN modelu.



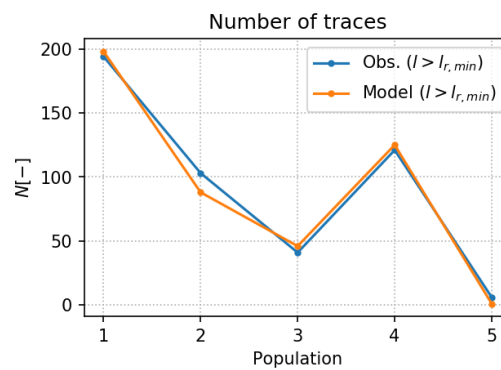
Obr. 408 Porovnání parametru P_{21} jednotlivých populací pro data naměřená (Obs.) a vypočtená (Model); započítány jsou pouze struktury delší než 0,19 m



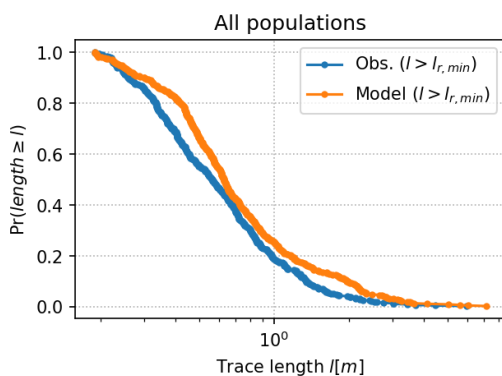
Obr. 409 Porovnání parametru P_{20} jednotlivých populací pro data naměřená (Obs.) a vypočtená (Model); započítány jsou pouze struktury delší než 0,19 m



Obr. 410 Porovnání průměrných délek stop v pozorovacích oknech (úsecích) jednotlivých populací pro data naměřená (Obs.) a vypočtená (Model); započítány jsou pouze struktury delší než 0,19 m

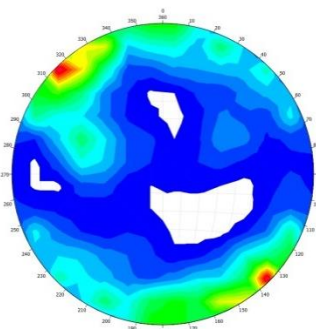


Obr. 411 Porovnání počtu stop v pozorovacích oknech (úsecích) jednotlivých populací pro data naměřená (Obs.) a vypočtená (Model); započítány jsou pouze struktury delší než 0,19 m

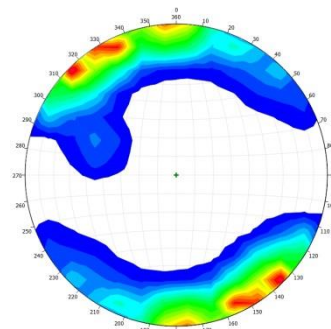


Obr. 412 Celkové srovnání kumulativní četnosti délek stop v pozorovacích oknech (úsecích) pro celý dataset měření (Obs.) a vypočteného modelu (Model)

Validace modelovaných dat byla rovněž provedena v software MOVE, který ovšem neposkytuje tak obsáhlé analýzy a simulace průřezu struktur do simulovaných výchozů jako validační skripty poskytnuté FSv ČVUT k programu DFraM. V prostředí MOVE bylo provedeno porovnání stereogramů pólů ploch z generovaných sítí pomocí modulu Fracture modelling se vstupními parametry získanými optimalizací strukturních měření pomocí DFraM (Obr. 414) a datasetem terénních měření (Obr. 413). Shoda je v tomto případě rovněž velmi dobrá. Byly vygenerovány pukliny odpovídající disperzi, četnosti i prostorové orientaci všech pěti populací (Obr. 400). Lze si všimnout absence struktur populace 5. Ta je způsobena výrazně menším množstvím těchto struktur (necelých 10 000 v objemu modelu) oproti ostatním populacím (stovky tisíc).

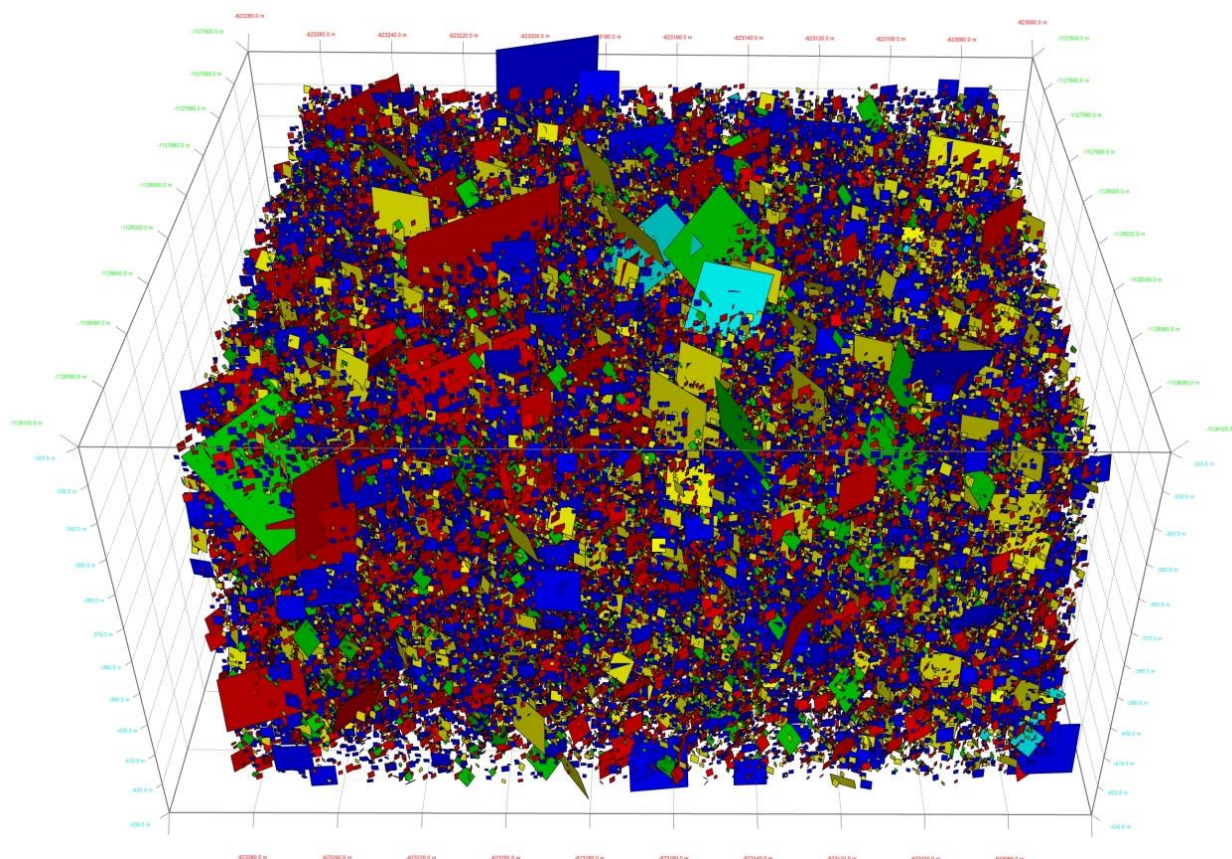


Obr. 413 Konturový diagram pólů ploch puklin měřených na všech úsecích 20. patra v území studovaného bloku; počet struktur = 650

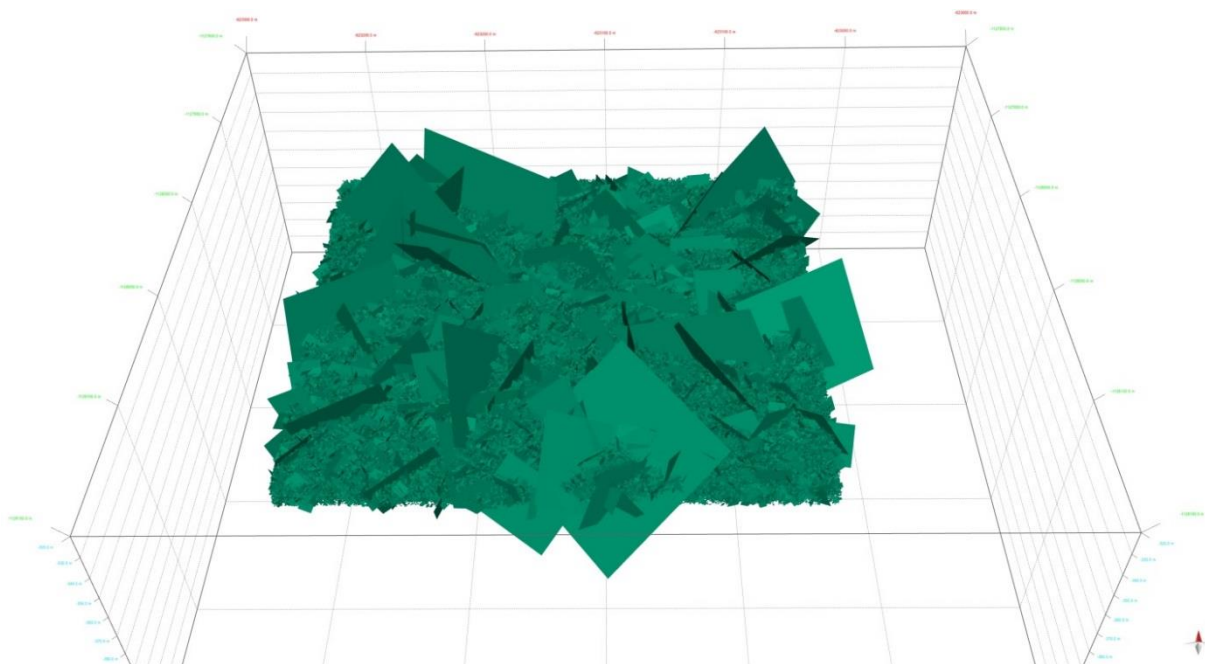


Obr. 414 Konturový diagram pólů ploch struktur z modelu vytvořeného v MOVE v území studovaného bloku; počet struktur = 490 982

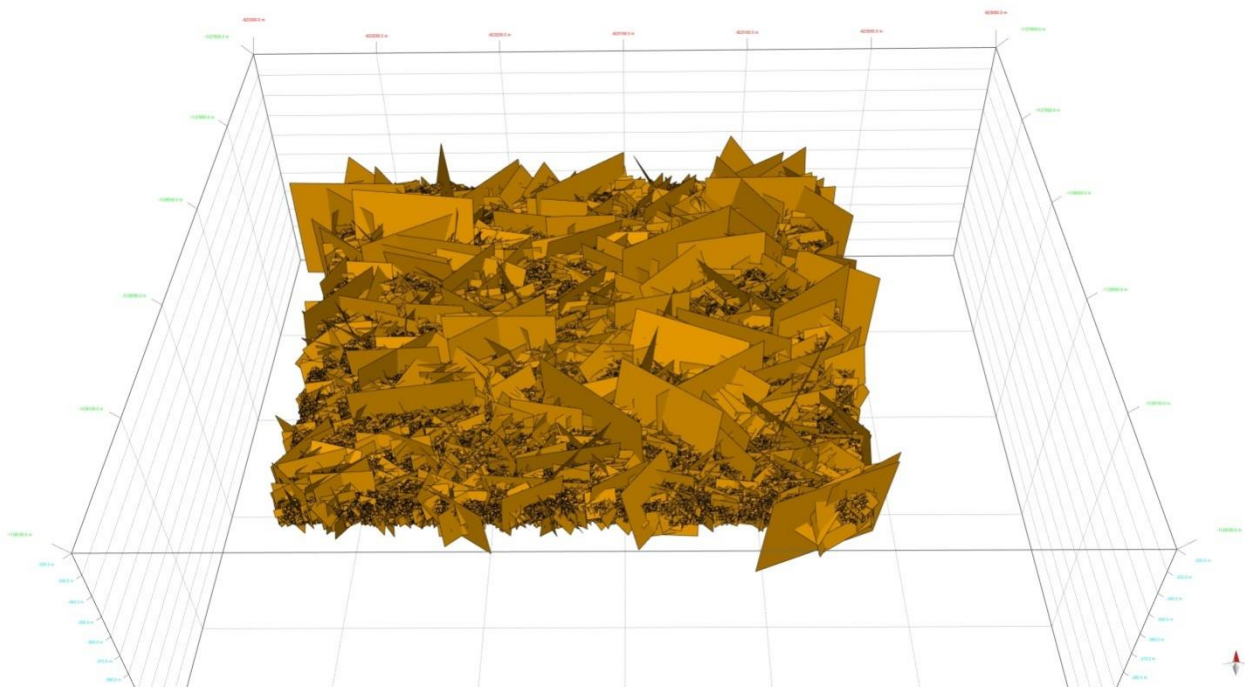
Výsledky optimalizace a výpočtu statistických parametrů puklinové sítě v kvazihomogenním bloku na 20. patře lze shrnout jako odpovídající měřeným datům a jejich hodnoty uvedené v Tab. 162 lze využít pro realizaci DFN sítě ať již ve formátu *.vtk pomocí software DFraM, který je vhodný a otestovaný pro import do software pro hydraulické modelování, či ve formě Fracture network polygonů generovaných softwarem MOVE (Obr. 415). Porovnáme-li vypočtené modely z programu DFraM (Obr. 416) a Fracture Modelling modulu programu MOVE (Obr. 417) je vidět, že ve stejném objemu sítě generují shodné množství polygonů. Rozdíl je v jejich natočení, kdy MOVE genericky všechny hrany polygonů vytváří rovnoběžně s bounding boxem (Obr. 407), zatímco DFraM polygony náhodně rotuje podél horizontální osy. Modely z obou programů lze dále kombinovat s 3D modely geologického prostředí, kde lze v případě potřeby velmi rychle generovat sítě pro účely vizualizace, exportu ve formě DXF nebo triangulovaného meshe, např. pro geomechanické modelování. Pokud budeme předpokládat, že parametry vypočtené sítě jsou shodné pro větší území než je modelovaný kvazihomogenní blok, lze takovou síť v tomto území v prostředí MOVE vytvořit. Je nutné brát v potaz, že rozšíření datasetu měřených dat pro výpočet puklinové sítě do řádově většího objemu s sebou nese riziko ztráty kvality výsledného výpočtu včetně časově náročné přípravy a optimalizace těchto dat. Pro případné hydraulické výpočty je třeba vygenerovanou puklinovou síť upravit tak, aby byly zachovány konektivní struktury, což je předmětem řešení projektu Transport 8 (Gvoždík et al. 2020), kde je výsledná konektivní síť výrazně subtilnější a obsahuje řádově menší množství struktur.



Obr. 415 Modelovaná síť v objemu studovaného bloku na 20. patře v modulu Fracture Modelling programu MOVE s vyfiltrovanými cca 30 % generovaných struktur



Obr. 416 Modelovaná síť v objemu určeném pro validaci dat vygenerovaná programem DFraM; síť obsahuje 552 357 jednotlivých puklin



Obr. 417 Modelovaná síť v objemu určeném pro validaci dat vygenerovaná v modulu Fracture Modelling programu MOVE; síť obsahuje 552 356 jednotlivých puklin

2.4.5.4.3 Zhodnocení výsledků DFN modelu ve vztahu k první zóně

Následující obrázky (Obr. 418 – Obr. 422) ukazují vztah jednotlivých struktur pro dílčí populace modelovaných puklin a velkých poruch dokumentovaných v rámci prací v podzemí (viz kapitola 2.4.5.1; Obr. 384) s barevným vyznačením rozsahu první zóny ve studovaném horninovém bloku na 20. patře. Dále jsou na obrázcích vizualizovány průběhy jednotlivých chodeb, které tento blok ohraničují (tj. Z3-XX ze severu, RV4₂₀-101 z jihovýchodu a PŠ1-203 z východu).

Populace 1 je v celé modelované puklinové síti zastoupena 41,7 %. Z Obr. 418 je zřejmé, že pukliny této populace jsou subparalelní s orientací chodeb Z3-XX a RV4₂₀-101, ze kterých pochází většina dokumentovaných strukturních dat získaných v podzemí. Tyto struktury se neprojeví v dokumentaci tak často, jako struktury, které budou k průběhům těchto chodeb orientovány šikmo nebo kolmo. Proto mohou být v dokumentaci lehce podceněny. Bohužel také chodba PŠ1-203, na které by byly tyto poruchy lépe vidět, nebyla pro dokumentaci zcela odkryta a její průběh je ve srovnání s dalšími chodbami velmi krátký. Obecně lze konstatovat, že tyto struktury kinematicky nesouvisí s vývojem první zóny a jedná se tedy o struktury starší, či pravděpodobněji mladší.

Populace 2 je v celé modelované puklinové síti zastoupena 23,0 %. Z Obr. 419 je zřejmý vysoký úhlový vztah k rekonstruovaným poruchám ze strukturní dokumentace. U těchto puklin se nepředpokládá kinematický vztah k zóně.

Populace 3 je v celé modelované puklinové síti zastoupena 8,5 % (Obr. 420). Z Obr. 400 je zřejmé, že tyto struktury jsou svou orientací nejbližší možným extenzním puklinám, které by teoreticky mohly souviset s vývojem první zóny.

Populace 4 je v celé modelované puklinové síti zastoupena 25,6 %. Z Obr. 421 je zřejmé, že tyto struktury jsou subparalelní k větším poruchám rekonstruovaných ze strukturních dokumentací bloku na 20. patře. Ačkoli tyto struktury zřejmě nijak nesouvisí s vývojem první zóny, bude jejich původ zřejmě souviset s těmito většími poruchami, což vysvětluje také jejich větší zastoupení v modelu.

Populace 5 je v celé modelované puklinové síti zastoupena pouhými 1,2 %. Z Obr. 422 je patrné, že tyto struktury jsou paralelní či velmi blízké orientaci a průběhu první zóny. Tyto struktury mohou souviset s vývojem první zóny, obecně by se dalo očekávat větší zastoupení takto orientovaných puklin, které vznikají současně s vývojem první zóny. Malý počet těchto puklin a menší význam této populace lze interpretovat jako výsledek lokalizace deformace přímo v první zóně, která je mechanicky významně oslabena v porovnání s okolním horninovým masivem. Zároveň je tato zóna poměrně široká a o komplikované lokalizaci a reaktivacích této struktury svědčí množství pozorovaných striací na dílčích plochách v zóně.

Porovnání s lokalitou Kraví hora a PVP Bukov

V minulých letech byly realizovány 2 větší projekty týkající se oblasti dolu Rožná resp. PVP Bukov a lokality Kraví Hora. Jednalo se o projekty „Mathematical modeling of brittle fractures in rock mass by means of the DFN method“ (Kabele et al. 2018) a Transport radionuklidů z hlubinného úložiště/testování koncepčních a výpočetních modelů, zkráceně Transport 8 (Gvoždík et al. 2020).

V prvním zmíněném projektu byl vyvinut program DFraM a byly vytvořeny iniciální DFN modely pro 7 lokalit na kterých probíhá výzkum pro HÚ, včetně lokality Kraví hora a PVP Bukov. Vypočtené parametry DFN sítě a jejich implikace byly revalidovány v roce 2019 během práce na projektu „Aktualizace bezpečnostního hodnocení lokalit z hlediska dlouhodobé bezpečnosti“ (zadáno v r. 2019), kdy byly revalidovány vypočtené modely z Kabeleho et al. 2018 a pro porovnání lokalit byl stanoven jako hlavní parametr P21 z přímo měřených terénních dat oproti parametru P30, který byl zatížen chybovostí v kvantitativním vyhodnocení vzhledem k vysokému počtu „uměle vytvořených“ struktur drobného měřítka a z hlediska přímého porovnání je i parametr P21 lépe hodnotitelným. Během aktualizace dat byl ovšem přepočten i parametr P30, resp. byly odstraněny drobné relikty a v modelu byly ponechány pouze struktury s poloměrem nad 25 cm a v druhé variantě nad 50 cm. Pro účely tohoto projektu bude porovnáván P30 se strukturami s poloměrem 25 cm, které jsou svou velikostí bližší hranici 30 cm stanovenou v tomto projektu.

V projektu Transport 8 (Gvoždík et al. 2020) byla na nově pořízených datech z pěti míst s významnými přítoky na PVP Bukov upravena metodika výpočtu DFN sítě programem DFraM pro účely navazujícího HG modelování a byly vylepšeny některé výpočetní algoritmy programu s ohledem na navazující HG modely.

Pro tento projekt byla využita poslední plně funkční verze programu DFraM, tedy verze využívaná rovněž v projektu Transport 8. v Tab. 163 je porovnání datasetů a vypočtených parametrů z výše zmíněných projektů.

Tab. 163 Porovnávání datasetů a vypočtených parametrů pro DFN z různých projektů

Projekt / parametr	Hluboké horizonty (kvazihomogenní blok na 20. p.)	Transport 8 (PVP Bukov)	Matematické modelování DFN (Kraví hora)
Počet populací	5	9	7
Počet měřených struktur	504	400	187
P21 z terénních pozorování [m/m ²]	1,43	2,42	0,83
P30 z DFN modelu[n/m ³]	1,85	2,05	0,32

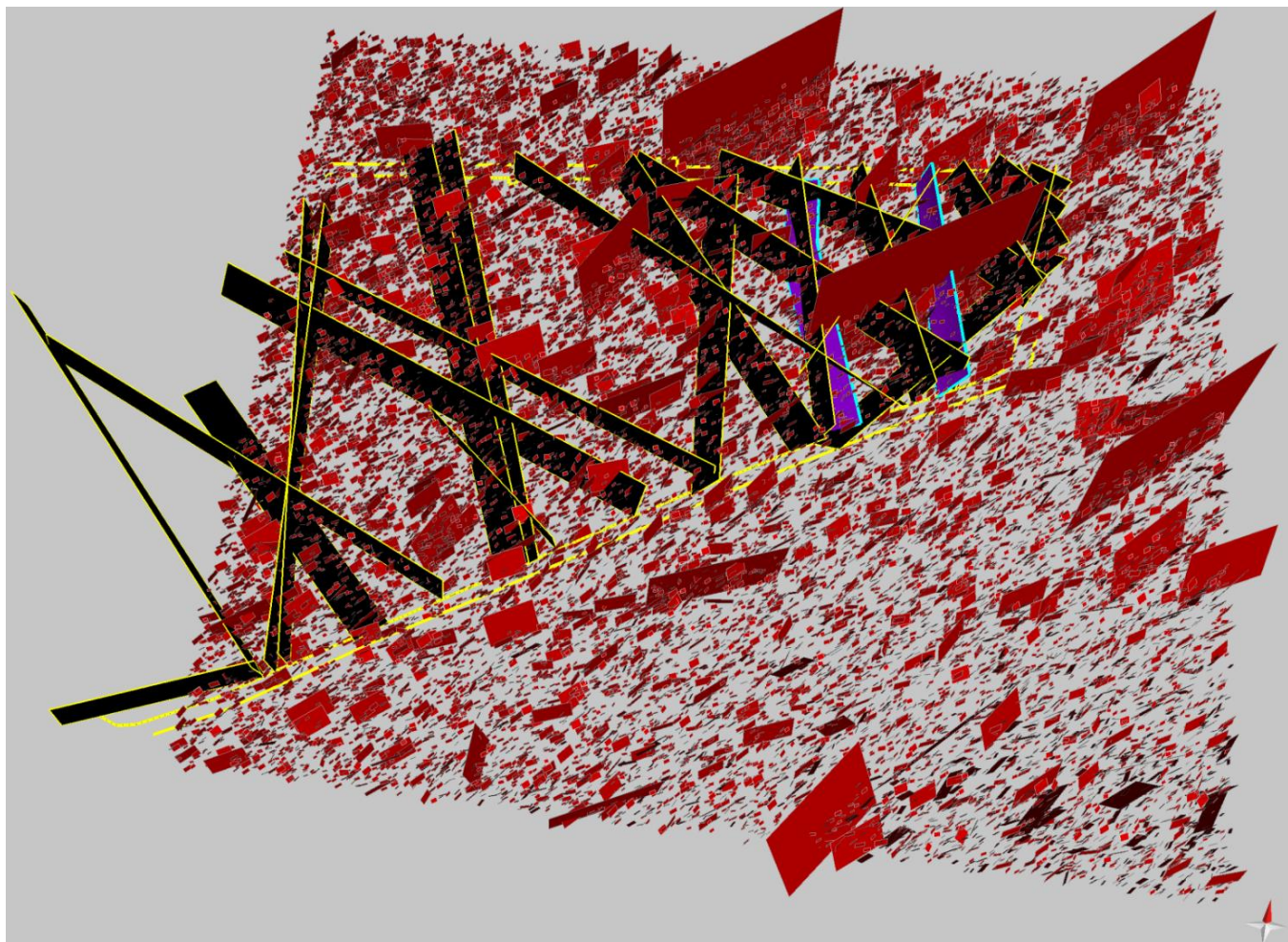
Jak je patrné z Tab. 163, tak je značný rozdíl mezi daty získanými z měření povrchových výchozů a daty získanými v podzemí na významně delším odhaleném úseku horninového masivu, než poskytují jednotlivé povrchové výchozy. Tuto disproporci ilustruje i množství terénních měření na jednotlivých výchozech (povrch) a pozorovacích oknech (podzemí). V implikacích projektu Transport 8 (Gvoždík et al. 2020) je zmíněna právě nutnost pořízení co největšího množství terénních dat, které zpřesňují statistický základ výpočtu DFN. Jednotlivé výchozy roztroušené na velké ploše v litologicky nehomogenním prostředí nebudou v případě modelů o velikosti desítek km³ tak kvalitní jako modely lokální do 1 km³ s dobře zdokumentovaným blízkým okolím. Tento argument se odráží zejména v parametru P30, jehož hodnota je u dat z PVP Bukov

a kvazihomogenního bloku na 20. p., které byly modelované v obdobně velkém objemu, téměř shodná oproti významně nižší hodnotě u lokality Kraví hora modelované v násobně větším objemu s menším množstvím dat.

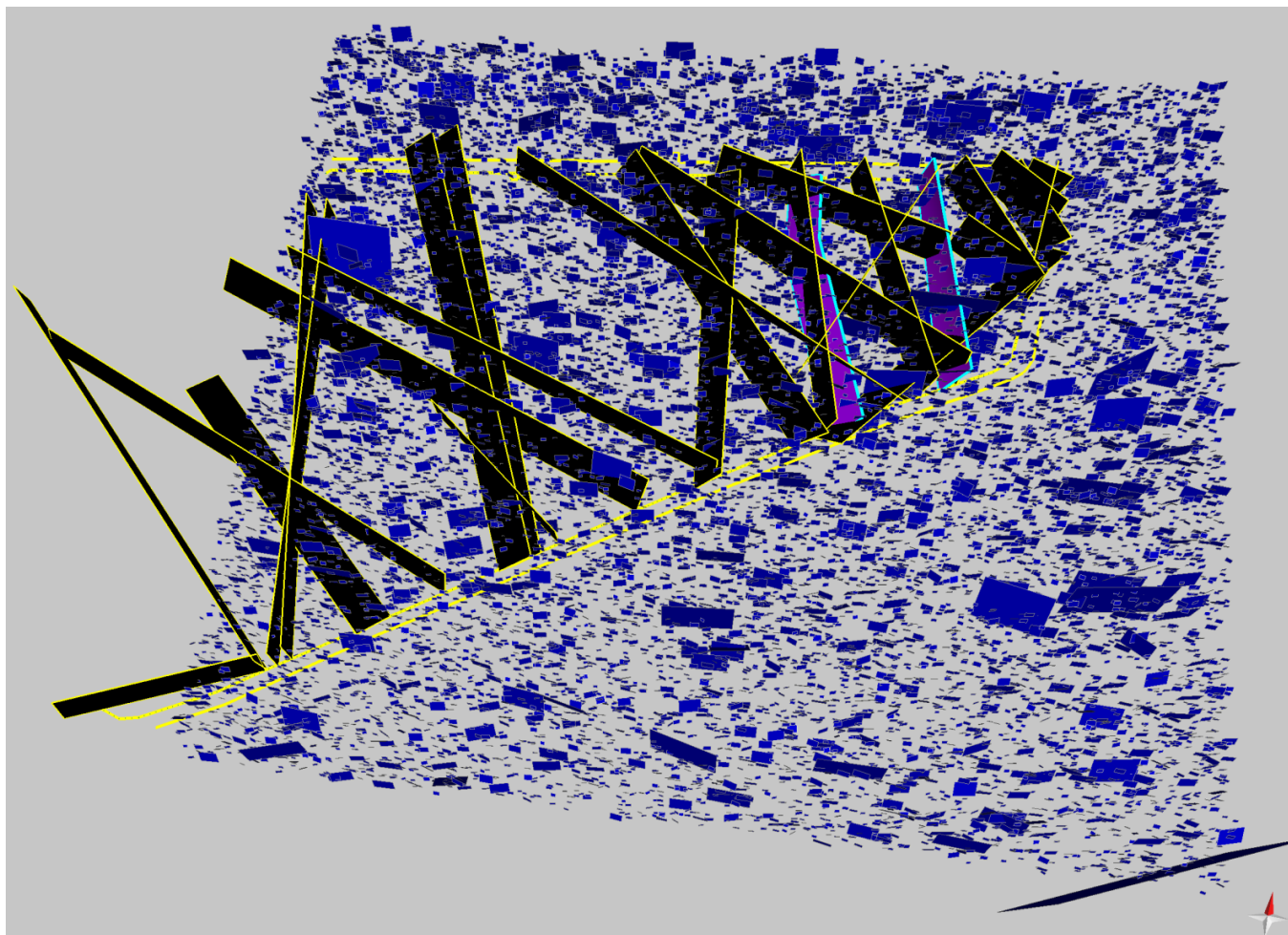
Parametr P21 nabývá vyšších hodnot v rámci dat z PVP Bukov, zatímco data z povrchu a kvazihomogenního bloku jsou si bližší. Jak bylo vysvětleno v úvodu této kapitoly, Parametr P21, získaný z terénních měření, lépe vystihuje míru porušení HM pro případnou korelaci, čemuž odpovídá i snížení rozdílů mezi parametry P21 na rozdíl od P30. Vyšší hodnoty parametru P21 u projektu Transport 8 (Gvoždík et al. 2020) jsou dány zejména typovými daty z PVP Bukov, kdy byly systematicky vybírány více porušené zóny masivu s na sebe vázanými přítoky podzemních vod (generálně menší zlomy lokálního charakteru a puklinové zóny). Rovněž charakter a distribuce křehkých poruch není v dole Rožná rovnoměrné a jednotlivé domény dolu se od sebe budou lišit.

V projektu Transport 8 rovněž autor uvádí potřebu redukce množství populací struktur. Tento argument byl v tomto projektu již brán v potaz a dataset byl oproti projektu Transport 8 (9 populací; Gvoždík et al. 2020) zmenšen téměř o polovinu (5 populací). Nejen že tak dochází ke zrychlení výpočtu, ale rovněž jsou i jednotlivé populace četnější a lépe statisticky uchopitelné.

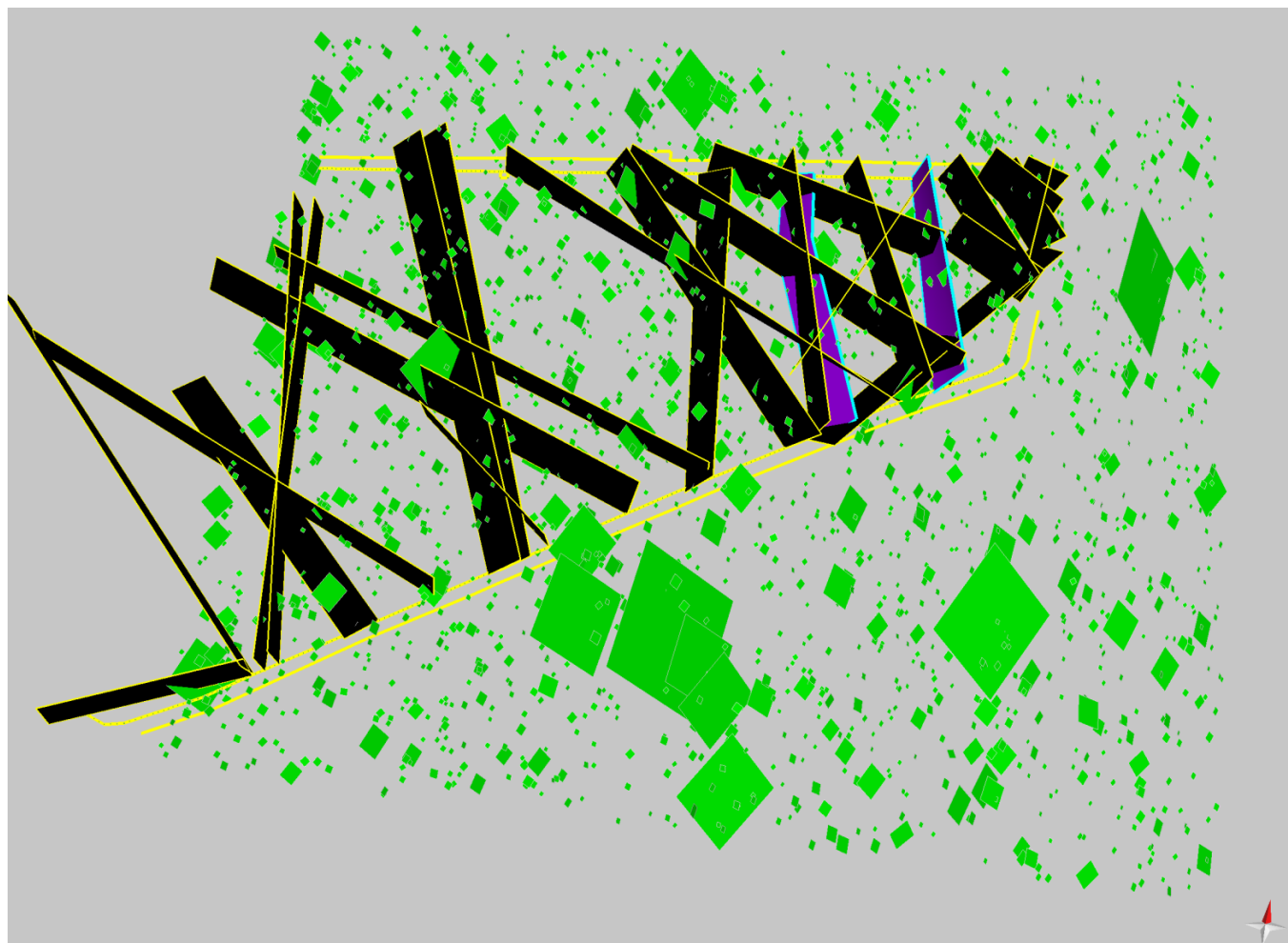
Postup tvorby DFN v tomto projektu tedy reflektuje vývoj v metodice tvorby DFN modelů v různých měřítcích a současný stav poznání této problematiky v projektech souvisejících s HÚ.



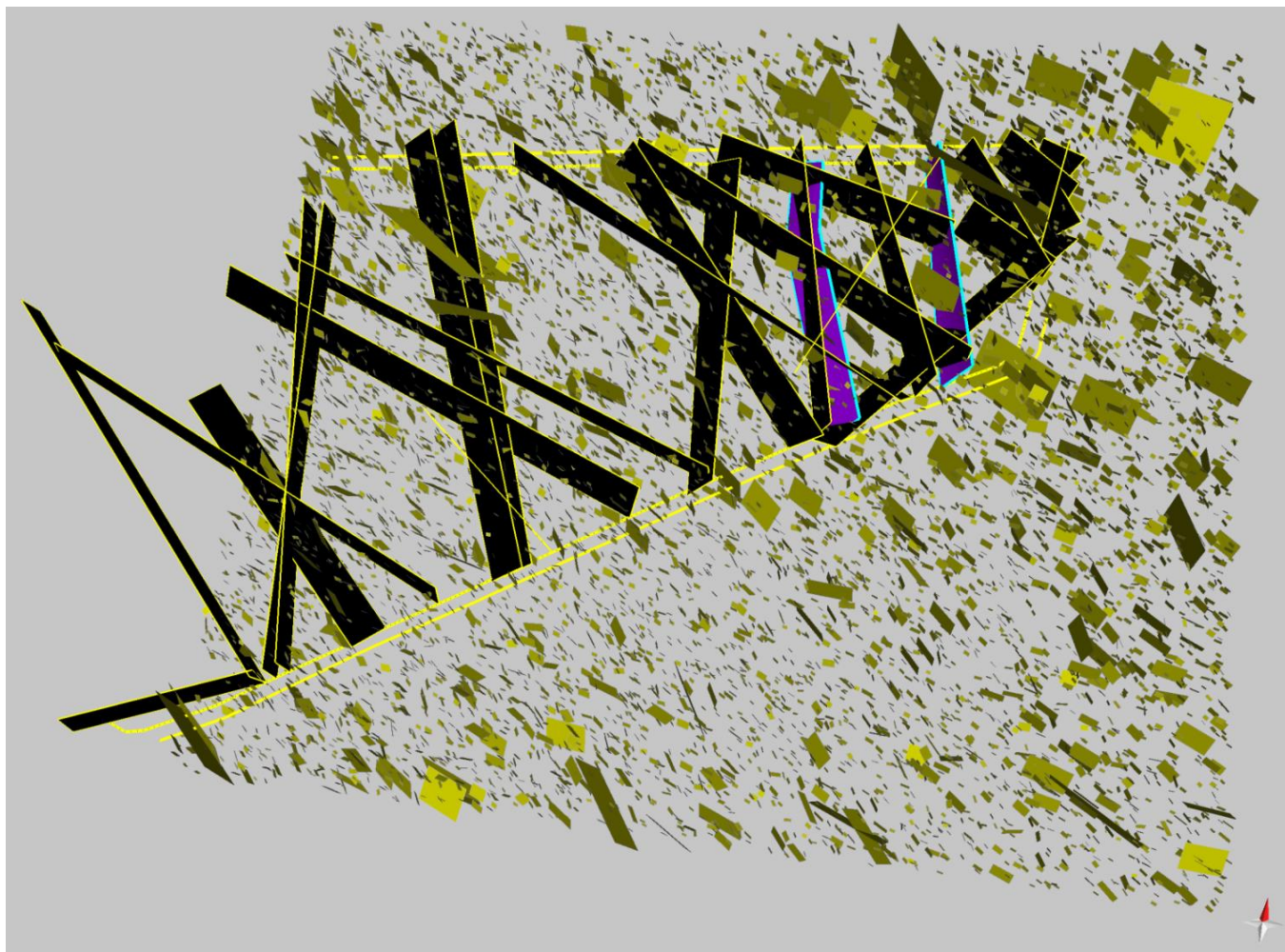
Obr. 418 Vizualizace puklinové sítě populace 1 v úzkém modelu bloku na 20. patře (rozsah viz Obr. 407) a vyprojektovaných rekonstruovaných struktur získaných ze strukturální dokumentace bloku (žlutě vyznačeny průběhy chodeb ohraničující studovaný blok; černě výrazné poruchy dokumentované v podzemí, fialově rozsah první zóny)



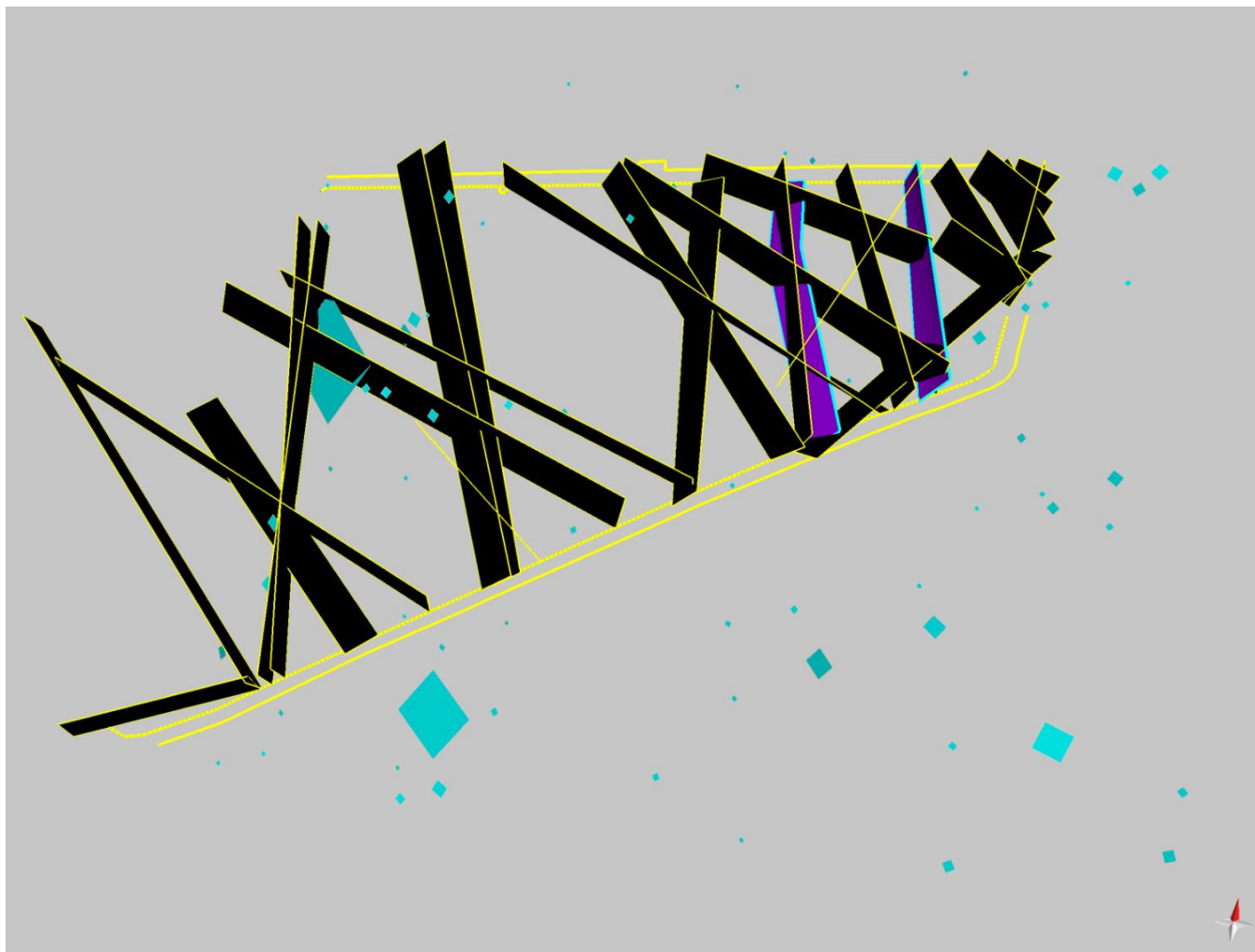
Obr. 419 Vizualizace puklinové sítě populace 2 v úzkém modelu bloku na 20. patře (rozsah viz Obr. 407) a vyprojektovaných rekonstruovaných struktur získaných ze strukturální dokumentace bloku (žlutě vyznačeny průběhy chodeb ohraničující studovaný blok; černě výrazné poruchy dokumentované v podzemí, fialově rozsah první zóny)



Obr. 420 Vizualizace puklinové sítě populace 3 v úzkém modelu bloku na 20. patře (rozsah viz Obr. 407) a vyprojektovaných rekonstruovaných struktur získaných ze strukturální dokumentace bloku (žlutě vyznačeny průběhy chodeb ohraničující studovaný blok; černě výrazné poruchy dokumentované v podzemí, fialově rozsah první zóny)



Obr. 421 Vizualizace puklinové sítě populace 4 v úzkém modelu bloku na 20. patře (rozsah viz Obr. 407) a vyprojektovaných rekonstruovaných struktur získaných ze strukturální dokumentace bloku (žlutě vyznačeny průběhy chodeb ohraničující studovaný blok; černě výrazné poruchy dokumentované v podzemí, fialově rozsah první zóny)



Obr. 422 Vizualizace puklinové sítě populace 5 v úzkém modelu bloku na 20. patře (rozsah viz Obr. 407) a vyprojektovaných rekonstruovaných struktur získaných ze strukturní dokumentace bloku (žlutě vyznačeny průběhy chodeb ohraničující studovaný blok; černě výrazné poruchy dokumentované v podzemí, fialově rozsah první zóny)

2.4.6 Revalidace zbytkového ložiskového potenciálu

2.4.6.1 Zhodnocení ložiskového potenciálu

2.4.6.1.1 Přehled provedených prací a použité metody

V souladu s projektem úkolu byly vzorky pro zhodnocení ložiskového potenciálu odebrány na čtyřech horizontálních litologických profilech. Profily byly odebrány z grafitizovaných zón na 21. patře (dokumentační bod 296GCJ0019, RZ-PŠ1-69) a na 18. patře (dokumentační bod 296GCJ0464, Z-XVIII, severní bok 296GCJ0464, Z-XV-III, severní blok). Navíc byly odebrány vzorky z grafitizované polohy nalezené při hloubení odvodňovací štol (dokumentační bod 296GCJ0466, 3. patro, OŠ R33. patro, OŠ R3, dokumentační bod 296GCJ0466). Vzorky z baryt-karbonát-polymetalické mineralizace byly získány z profilu odebraného na 24. patře (dokumentační bod 296GCJ0018, PŠ1-242) a na 20. patře (dokumentační bod 296GCJ0467, RV4₂₀-101). Na všech uvedených profilech bylo odebráno 92 vzorků (plánováno bylo 60 vzorků). Vzhledem k nepřístupnosti některých částí dolu nebylo možno realizovat odběry jiných typů mineralizace a vzhledem k absenci mineralizace na vrtech provedených v rámci stávajícího projektu nebyla zastížena uranová mineralizace, byly odebrané profily doplněny o vzorky z litotéky České geologické služby. Jednalo se o vzorky silně mineralizovaných grafitických zón (30 vzorků), vzorky zrudnění v metasomatitech (22 vzorků), vzorky ze zrudněných karbonátových žil (18 vzorků), vzorky stratiformních baryt-polymetalických poloh (7 vzorků) a o vzorky žilné baryt-polymetalické mineralizace (9 vzorků).

Všechny odebrané vzorky byly v laboratořích ČGS homogenizovány na čelistovém drtiči a planetárním mlýnku na zrnitost < 0,63 mm a byly analyzovány přenosným rentgen-fluorescenčním přístrojem Delta Premium 50 kV (Olympus Innov-X Systems, USA). Byly stanoveny obsahy Mg, Al, Si, P, S, Cl, K, Ca, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, As, Se, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Mo, Ag, Cd, Sn, Sb, Ba, La, Ce, Pr, Nd, Hf, Ta, W, Hg, Tl, W, Hg, Tl, Pb, Bi, Th a U. Na dole Rožná bylo provedeno 184 analýz. Přístroj byl kalibrován s pomocí interních i externích standardů a kontrolní vzorky byly zaslány k chemickým analýzám do Centrálních laboratoří ČGS v Praze.

Mimo uvedených chemických prvků bylo v laboratořích ČGS provedeno stanovení obsahů celkového uhlíku (C_{tot}), grafitového uhlíku (C_{graf}), karbonátového uhlíku (C_{karb}) a celkové síry (S_{tot}). Oproti plánovaným 20 vzorkům bylo analyzováno 54 vzorků. Na stejných vzorcích byly stanoveny i hodnoty pH.

Izotopické složení grafitického uhlíku bylo stanoveno u deseti vzorků z nealterovaných i alterovaných hornin. Spálení vzorků bylo provedeno na přístroji FICIONS Instrument při teplotě 1 046 °C. Hmotová spektra získaného CO₂ byla měřena na spektrometru Delta Advantage Isotope Ratio MS (Thermo Fisher Scientific, USA) a výsledky byly vyjádřeny v δ -notaci relativně ke standardu PDB.

Mineralogické složení vybraných minerálů (uraninit, coffinit, sulfidy a karbonáty) bylo studováno práškovou difrakční rentgenografií (PRTG). Práškové difrakční záznamy vzorků byly pořízeny na difraktometru Bruker D8 Advance v Bragg-Brentanově uspořádání. Použito bylo CuK α záření, Sollerovy clony (2.5°) v primárním a difraktovaném svazku a detektor Lynx Exe XE. Vzorky byly jemně rozetřeny na tzv. bezdifrakční křemíkové podložce; nebyla prováděna pulverizace

v achátových miskách. RTG záznamy byly pořízeny s automatickou divergenční clonkou (ADS, 10 mm) a to v rozsahu 4–80°, s krokem 0,015° a 0,5 sec načítacím časem na krok. Záznamy byly kvalitativně vyhodnoceny pomocí software Diffrac EVA 2015 a databáze PDF 2 (2002).

Pro studium petrografického charakteru a minerálního složení bylo ze vzorků odebraných na jednotlivých profilech zhotoveno 107 leštěných výbrusů a 6 leštěných nábrusů. Všechny vzorky byly studovány polarizačním mikroskopem, 33 vzorků bylo měřeno na přístroji TESCAN VEGA3XMU s energiově disperzním RTG-spektrometrem Bruker QUANTAX200 (Geologický ústav AV). Vyhodnocení spekter bylo provedeno v programu Bruker Esprit 1.9. Použité budící napětí bylo 15 kV. Fotografie byly pořízeny BSE detektorem v různém zvětšení.

Pro stanovení stopových prvků, zejména Nb, Ta, Sc, Hf, vzácných zemin (REE) a Y bylo 6 vzorků analyzováno elektronovou mikrosondou CAMECA SX100 ve vlnově disperzním módu za použití urychlovacího napětí 15 kV, proudu 40 nA a při průměru svazku 2 μm. Analýzy byly provedeny na sdruženém pracovišti Masarykovy univerzity a ČGS v Brně.

Plošná distribuce stopových prvků v jednotlivých minerálech byla studována na přístroji TESCAN MIRA 3, vybaveným EDS detektorem OXFORDS INSTRUMENTS XMA 20 v Centrálních laboratořích ČGS v Praze. Analýzy byly provedeny při urychlovacím napětí 15 kV a proudu 3 nA.

Podle realizačního projektu prací (Švagera et al. 2018) měla být možnost pokračování ložiskových struktur jižně od jámy Bukov ověřena geochemicky, metodou půdní metalometrie. Vzhledem k tomu, že byla v roce 2018 v této oblasti na vybraných strukturách dokončena geochemická prospekce společnosti Geomin, s.r.o. (Žáček et al. 2018) bylo na základě jednání mezi ČGS, SÚRAO a GEAM dohodnuto, že budou přenosným fluorescenčním spektrometrem reanalyzovány vzorky odebrané společností Geomin s.r.o. Toto řešení ušetřilo značné finanční prostředky na technické práce. Navíc nebylo nutné vést složitá jednání s majiteli dotčených pozemků. Na profilech vytyčených na lokalitách Habří, Bukov, Věžná a Střítež a ovzorkovaných společností Geomin s. r. o. bylo provedeno 321 analýz rentgen-fluorescenčním spektrometrem Delta Premium 50kV v laboratořích ČGS (dokumentační body 296GCJ0092 až 296GCJ0412).

Aby bylo možné interpretovat výsledky regionální půdní metalometrie jižně od jámy Bukov, bylo třeba dosažené výsledky srovnat s výsledky půdní metalometrie na známé radiometrické anomálii přímo na ložisku Rožná. K tomuto účelu byla vzorkována rýha vyhloubená společností GEAM v areálu bývalé jámy R2 (dokumentační body 296GCJ0413 až GCJ0463). Rýha ve směru SZ–JV a délce 27 metrů byla vzorkována ve dvou hlubkových úrovních (240 a 330 cm). Celkem bylo spektrometrem Delta Premium 50kV analyzováno 51 vzorků.

Koncentrace doprovodných prvků uranové mineralizace se zaměřením na obsahy Sc, Nb, Ta, vzácných zemin (REE) a Y byly na šesti vzorcích průměrné uranové rudy stanoveny hmotovou spektroskopií (ICP-MS). Distribuce uvedených prvků v jednotlivých minerálech byly studovány na přístroji TESCAN a na mikrosondě CAMECA SX100. Celkem bylo provedeno 163 analýz ze vzorků odebraných na profilech i z archivních vzorků.

Aby byla možnost posoudit zbytkový potenciál odpadů po těžbě (tj. zejména obsahů Sc, Nb, Ta a REE + Y) a úpravě uranových rud, bylo sondovací tyčiči odebráno 14 vzorků rmutu o hmotnosti 350 g z obvodu odkaliště K-1 (dokumentační bod 296GCJ0465, vzorky 001 až 014). Vzorky byly homogenizovány v laboratoři, orientačně analyzovány přenosným rentgen-fluorescenčním spektrometrem a posléze analyzovány v laboratoři ČGS metodou ICP-MS.

Statistické zpracování geochemických dat v jednotlivých souborech bylo provedeno programem Statistika verze 10.0 MR1 (StatSoft, Inc. Tulsa, U.S.A). Distribuce proměnných v jednotlivých souborech byla hodnocena pomocí histogramů, krabicových diagramů a p-p diagramů. Vzhledem k tomu, že distribuce většiny proměnných neodpovídala normálnímu statistickému rozdělení, byly soubory popisovány pomocí neparametrických statistických metod (minimální a maximální hodnoty souborů, kvantily, medián, odlehlé hodnoty a šikmost distribuce dat). Vzájemné vztahy mezi proměnnými byly studovány vícerozměrnými průzkumnými metodami (faktorová analýza, analýza hlavních komponent). Při statistickém zpracování dat byly hodnoty nižší nežli mez detekce pro jednotlivé sledované prvky nahrazeny polovinou nejnižší detekované koncentrace. V případě, že bylo v jednotlivých souborech více nežli 30 % dat pod mezí detekce, nebyly tyto soubory do statistického zpracování zahrnuty.

Lokalizace analyzovaných vzorků i výsledky jednotlivých analýz jsou uvedeny v elektronických přílohách. Hlavní výsledky prací, jejich interpretace a význam pro revalidace zbytkového ložiskového potenciálu ložiska Rožná jsou shrnuty v následujícím textu.

2.4.6.1.2 Hlavní typy uranové mineralizace na ložisku Rožná a jejich vývoj s hloubkou

Pro revalidaci zbytkového ložiskového potenciálu ložiska Rožná, zejména na hlubokých horizontech a pod úrovni 24. patra má značný význam horizontální zonálnost různých typů uranové mineralizace. V zásadě lze rozlišit tři rozdílné mineralizační styly, které zahrnují:

- (1) Uranové rudy vázané na karbonátové žíly
- (2) Uranové rudy rozptýlené v grafitizovaných a silně alterovaných zónách R1 až R4 a ve strukturách, které jsou s nimi subparalelní
- (3) Uranové rudy rozptýlené v silně albitizovaných horninách mimo zóny, které jsou na ložisku označovány jako „eysity“ nebo sodné metasomatity

Ačkoliv se jednotlivé styly uranové mineralizace zčásti překrývají, jsou uranové rudy vázané na karbonátové žíly nejlépe vyvinuty ve svrchních horizontech ložiska do úrovně 15. patra. Tyto žíly, ve kterých výrazně převládá uraninit nad coffinitem jsou doprovázeny velmi omezenou okoložilnou alterací, jejíž mocnost nepřesahuje 1–2 cm. Jedná se o slabou chloritizaci a prokřemenění okolních hornin. Pod 15. patrem převládají rozptýlené rudy vázané na grafitizované zóny. Rudy jsou tvořené převážně asociací uraninit - coffinit, přičemž převládá coffinit. Alterace jsou zastoupeny chloritizací, albitizací, hematitizací a silnou argilitizací okolních hornin. Uranové rudy rozptýlené v silně albitizovaných a často porézních horninách (v lokální terminologii označovány jako eysity) jsou vázány na nejhlubší partie ložiska (pod 20. patrem). Jsou typické silnou albitizací původních plagioklasů a vyluhováním křemene. Mineralizace je vázána převážně na biotit nebo chlorit, argilitizace u tohoto typu rud chybí. Jednotlivé styly uranové mineralizace a s nimi spojené alterace jsou blíže specifikovány v následujícím přehledu.

1. Uranové rudy vázané na karbonátové žíly

Tento typ rud se vyskytoval zejména ve svrchních horizontech ložiska, které jsou v současné době nepřístupné. Ke studiu byly proto použity archivní vzorky zapůjčené prof. Leichmannem (MU Brno). Jedná se o žíly o mocnosti do jednoho metru, které vznikly zaplněním otevřených prostor ve smykových zónách nebo podél ploch zlomových linií. Nejcharakterističtějšími jsou

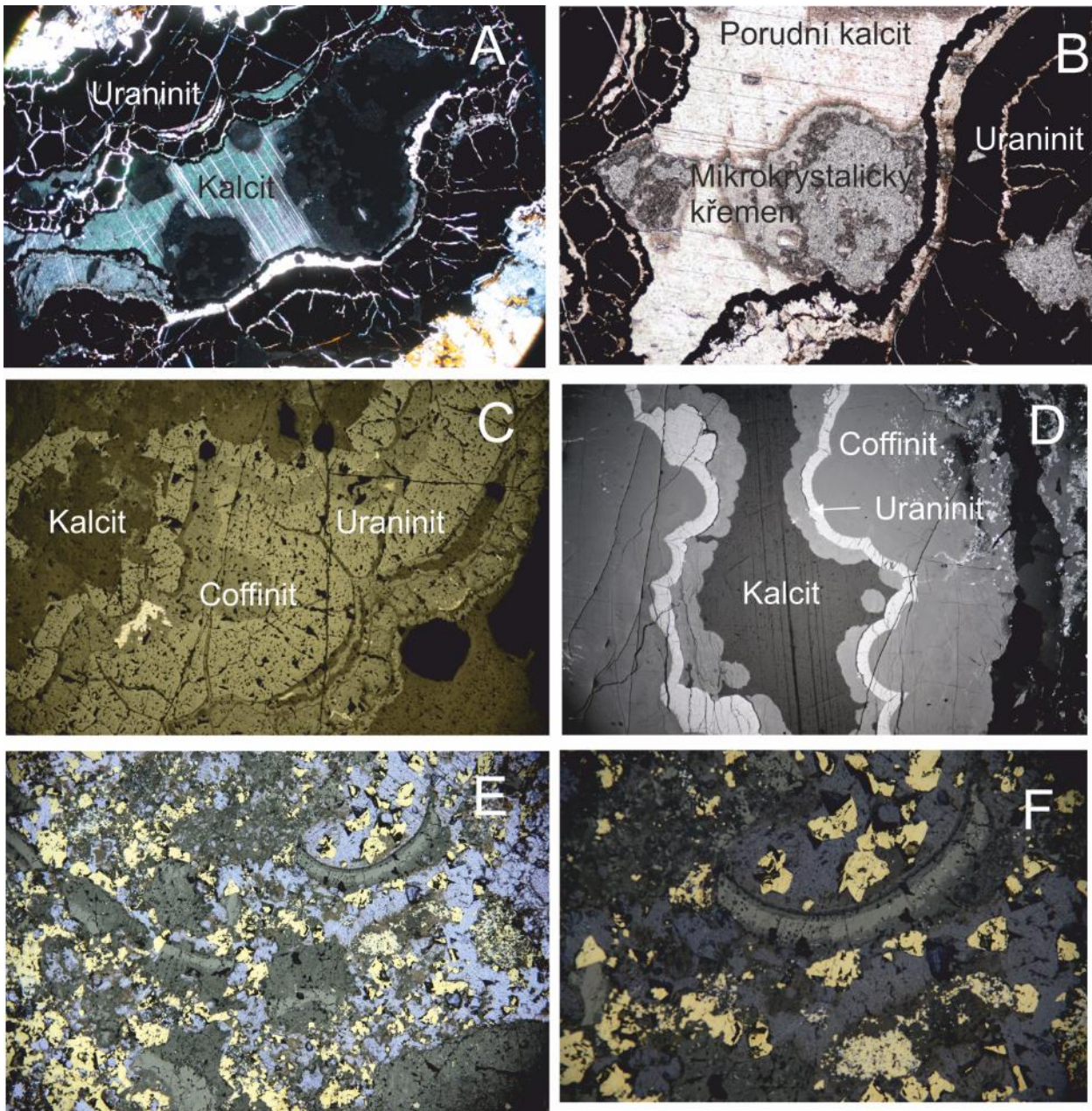
páskové, a krustifikační textury (Obr. 423a, b, c, d). S hloubkou, zejména mezi 12. a 15. patrem ložiska dominují textury brekciovité, které indikují mnohonásobné otvírání a vyplňování žilných struktur (Obr. 423e, f). Žilná výplň je tvořena zejména kalcitem, který tvoří až 85 % žiloviny, velmi často je přítomen chlorit. Zastoupení křemene je velmi nízké. Jedná se o mikrokrystalické agregáty, které tvoří součást výplně dutin, společně s kalcitem a pyritem (Obr. 423b). Bylo vyčleněno až 7 generací kalcitu (Katargin et al. 1966; Bojcov 1974). Základním uranovým minerálem těchto žil je uraninit. Agregáty uraninitu narůstají buď na plochách kalcitu 3. generace nebo přímo na stěny puklin. Charakteristickou formou jsou složité sférolity s výraznou rytmicko-zonální stavbou (Obr. 424). Výsledky rentgen-strukturních analýz ukazují na minerál s dobře uspořádanou mřížkou (Obr. 425). Coffinit je zastoupen velmi málo a je většinou metamiktní, jak tomu nasvědčuje difuzní charakter jeho PXRD spekter (Obr. 425). Coffinit vytváří polohy, které lemují sférolity uraninitu nebo tvoří krátké sloupcovité krystalky, kolem sférolitů chloritů nebo podél okrajů dutin. (Obr. 424e) Z ostatních rudních minerálů se často vyskytuje akcesorický ullmanit (Obr. 424d), galenit a sfalerit.

Se žilným typem uranové mineralizace se zejména na jižním a severním okraji rudního pole (úsek Bukov, Habří a Rozsochy) často vyskytují selenidy. Kalcit-uraninit-selenidové žíly jsou rozšířeny převážně na křídlech ložiska. Žíly vyplňují krátké pukliny na svrchních patrech v podloží zóny R1 (úseky Bukov, Habří) a jejich mocnost nepřesahuje 0,8 m. Selenidy byly rovněž nalezeny v severním křídle ložiska na úseku Rozsochy. Selenidy se vyskytují spolu s uranovou mineralizací, ale mohou se vyskytovat i samostatně. V uranonosných kalcitových žilách s projevy selenidové mineralizace jsou velké sférolity uraninitu zatlačovány selenidy a jsou tedy poněkud mladší. Byly popsány dvě posloupnosti ukládání selenidů: na úsecích kde převládá umangit se jedná o posloupnost umangit – berzelianit – crookesit – eskebornit – clausthalit. V berzelianitových čočkách je posloupnost umangit-berzelianit-betaeukairit-Hg selenidy (Kvaček et al. 1973; Kvaček 1979). Vzácně se spolu se selenidy vyskytují i zrna barytu (Obr. 424f). Vzhledem k omezenému množství archivních vzorků byl tento typ mineralizace studován pouze na jediném vzorku. Mikrosondou byl potvrzen výskyt berzelianitu (Cu_2Se), eskebornitu (CuFeSe_2), klockmannitu (CuSe) a selenidu Hg, tiemannitu (HgSe ; Obr. 424f).

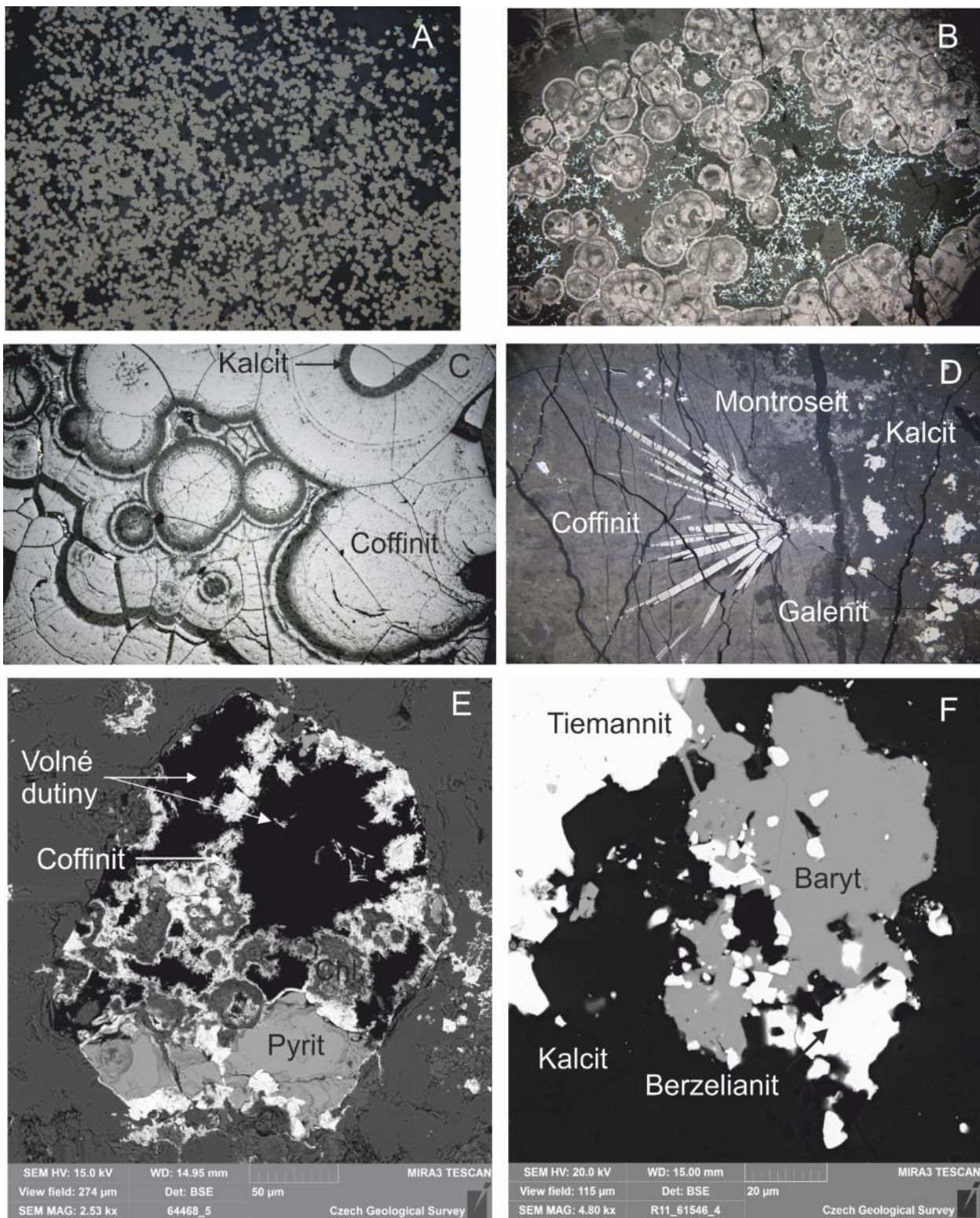
2. Uranové rudy rozptýlené v grafitizovaných a silně alterovaných zónách R1 až R4 a ve strukturách, které jsou s nimi subparalelní

S hloubkou množství uranonosných karbonátových žil postupně klesá a od 15. patra na ložisku dominuje vtroušená mineralizace vázaná na grafitizované a pyritizované zóny. Tyto zóny se postupně vyvíjely z hluboce založených zón duktilní deformace spjaté s metamorfními procesy (Kříbek a Hájek 2005) a postupně byly několikrát reaktivovány v procesech křehké deformace (Vilhelm et al. 1984). Jednotlivé grafitizované zóny postupně přecházejí do okolních silně alterovaných, často silicifikovaných a hematizovaných hornin (Obr. 426A, B, C). Jindy jsou zóny od okolních hornin odděleny ostře, bez okolní obálky alterací (Obr. 426D), v důsledku mladších (mesozoických?) tektonických pohybů. Mocnost alterací v okolí zón je poměrně malá a nepřesahuje několik metrů. Alteracemi je většinou více postiženo strukturní podloží grafitizovaných a pyritizovaných poloh. Okraje zón jsou často lemovány pouranovými karbonátovými žilami (Obr. 426C). Procesy křehké deformace se projevují kataklázou a pulverizací horninové výplně za vzniku mikrokrystalických domén, které uzavírají rotované klasty původních hornin, vznikem mozaikových staveb křemene (Obr. 427A, B, C, D) a postupnou sericitizací a argilitizací živců. V pokročilém stádiu argilitizace jsou živce zcela nahrazeny jílovými

minerály. Biotit je postupně přeměněn na hydromuskovit a chlorit. Drobné karbonátové prožilky jsou často lemovány novotvořeným chloritem (Obr. 426E, F).

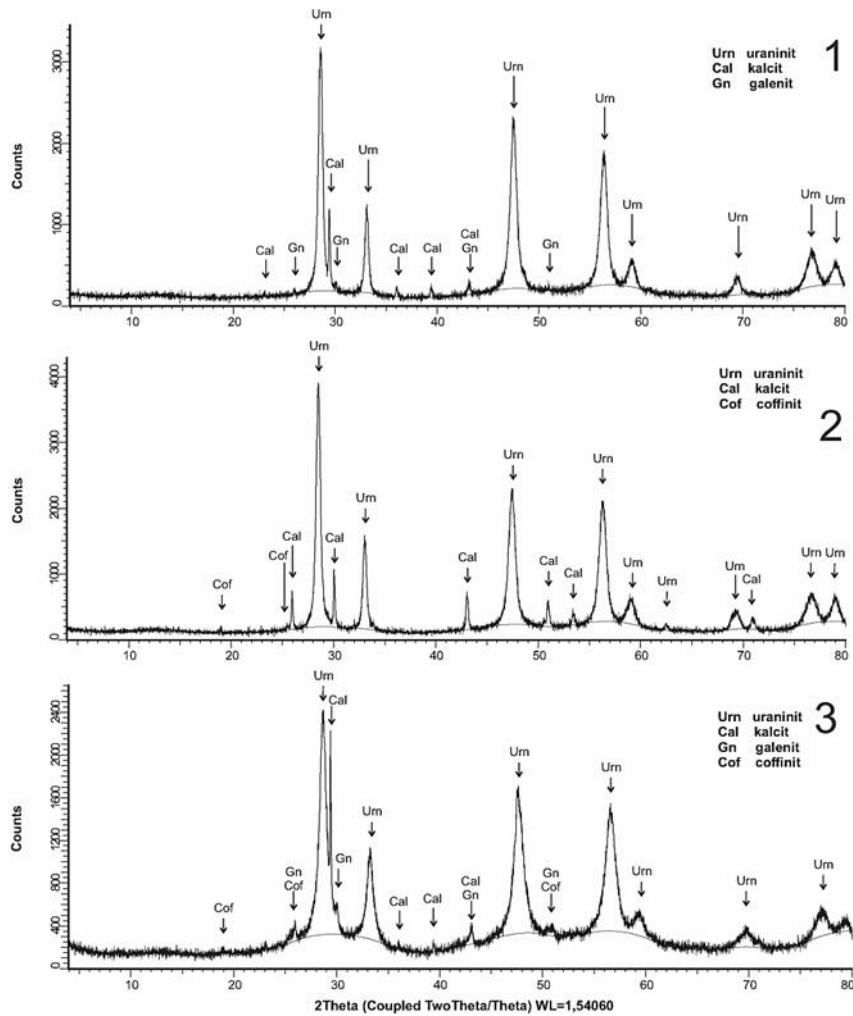


Obr. 423 Textury uranových rud vázaných na karbonátové žíly ve svrchních horizontech ložiska Rožná. A: Krustifikační textura ve které uraninit lemuje volné prostory zčásti vyplněné porudním kalcitem. Archivní vzorek DRJ3C, Důl Rožná, šachta Jasan, 10. patro. Zvětšení 40x, procházející světlo. B: Uraninit, zčásti nahrazený coffinitem lemuje dutiny vyplněné kalcitem a mikrokrytalickým křemenem (původně chalcedonem?). Archivní vzorek DRJ3C, ložisko Rožná, šachta Jasan. Zvětšení 200x, procházející světlo. C: Lemy zčásti coffinitizovaného uranitu v kalcitové žilovině. Archivní vzorek DRJA, ložisko Rožná, důl Jasan, zvětšení 40x, odražené světlo. D: Lemy uraninitu a coffinitu lemuji dutiny, vyplněné porudním kalcitem. Archivní vzorek JV1A, šachta Jasan, Ložisko Rožná, zvětšení 40x, odražené světlo. E: Brekciovitá textura tvořená úlomky karbonátů s ledvinovitými agregáty zčásti kofinitizovaného uraninitu v křemen-karbonátové matrix s četnými zrny pyritu. Archivní vzorek DR1AD, Důl R1, 15. patro zvětšení 100x, procházející i odražené světlo. F: Detail předcházejícího vzorku, zvětšení 200 x, procházející i odražené světlo

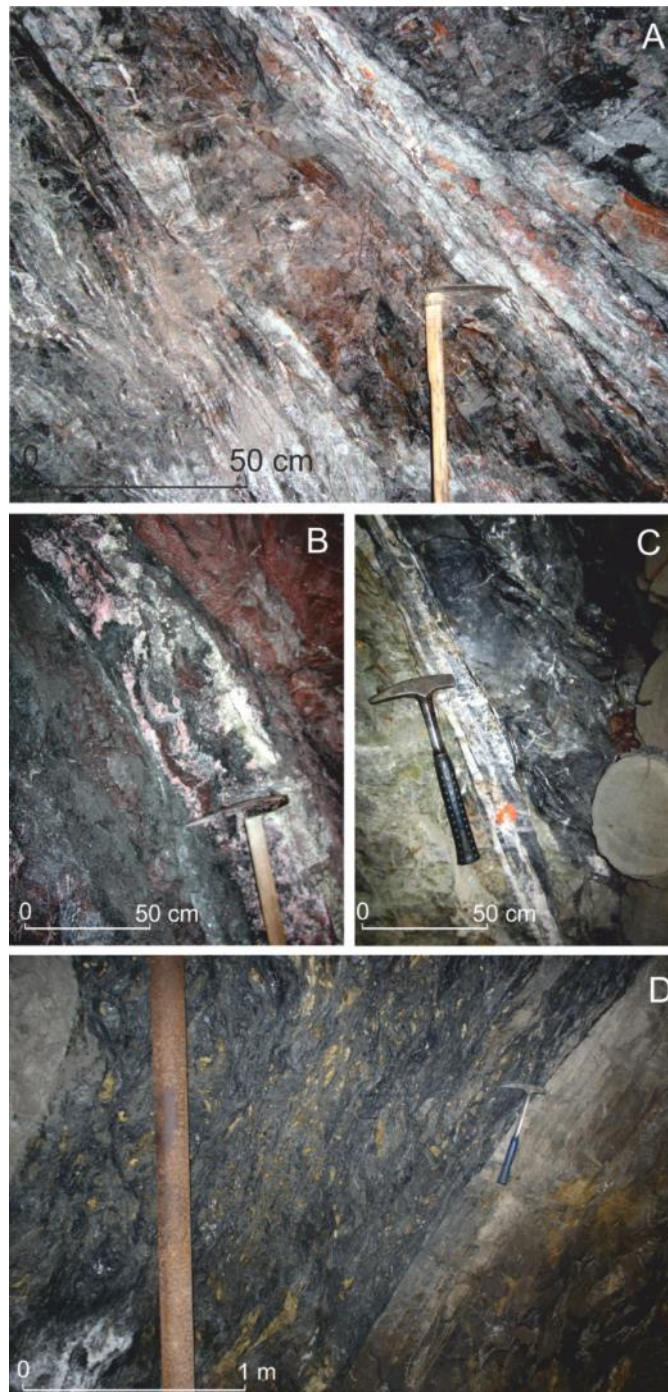


Obr. 424 Uranové zrudnění karbonátových žil. A: Mikrosférolity uraninitu rozptýlené v karbonátové matrix. Archivní vzorek DRJ3C, důl Rožná 1, 10. patro. Odražené světlo, zvětšení 400x. B: Složité sférolity uraninitu s výraznou rytmicko-zonální stavbou v karbonátové matrix, která obsahuje drobné impregnace galenitu (světlé body). Archivní vzorek HB2B, úsek Habří, 5. patro. Odražené světlo, zvětšení 400x. C: Koalescence sférolitů uraninitu. Jednotlivé globulární útvary uraninitu jsou odděleny šedými vrstvičkami karbonátů. Archivní vzorek 1B-A, úsek Bukov, 10. patro. Odražené světlo, zvětšení 40x. D: Jehlicovité krystaly montroseitu uzavírané v coffinitu. Okolí tvoří kalcitová žilovina s akumulací

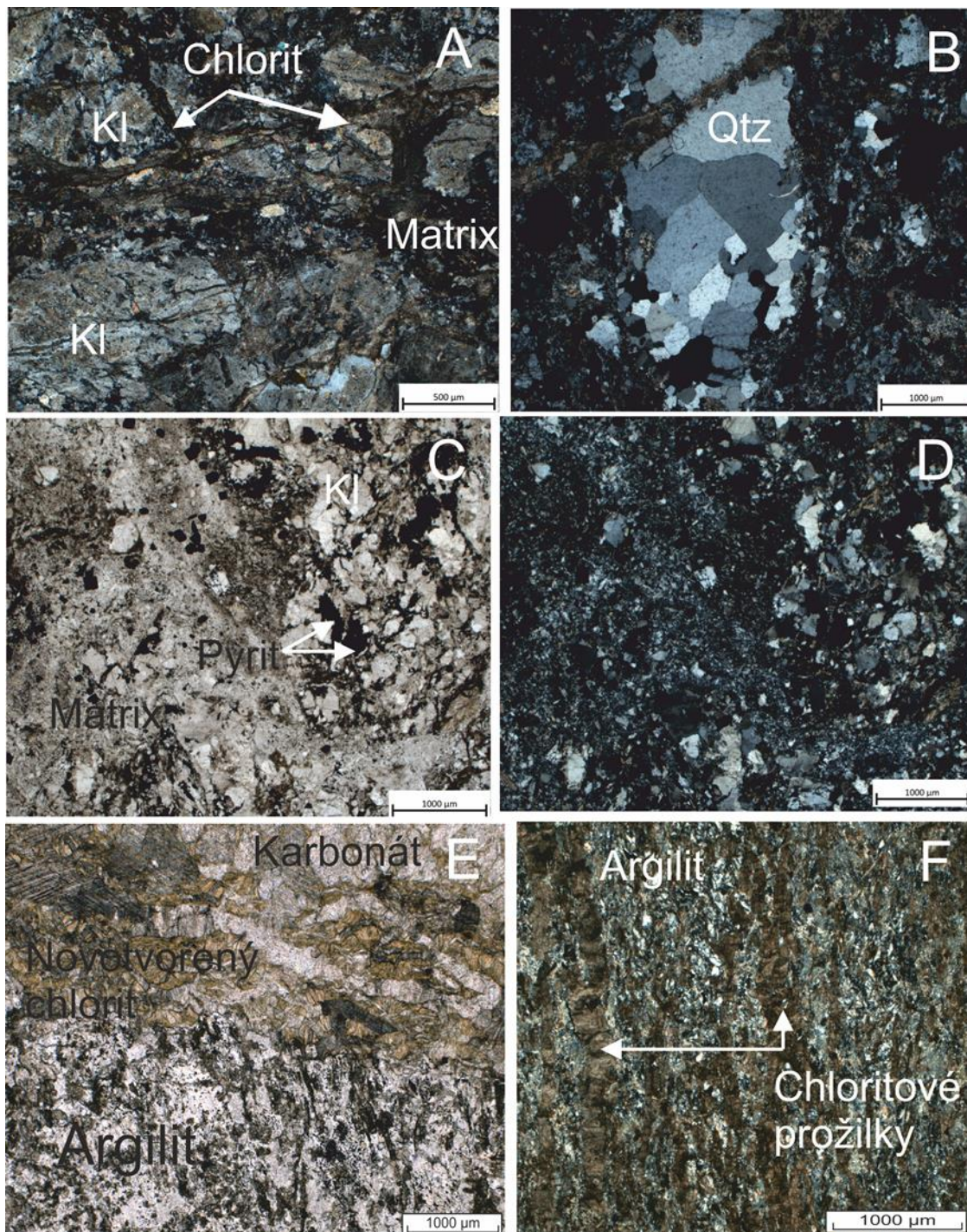
galenitu. Archivní vzorek JV1C, ložisko Rožná, 10. patro. Odražené světlo, zvětšení 200x.
 E: Mineralizovaný klast uzavřený v žilné brekcii karbonátové žíly. Agregáty novotvořeného chloritu jsou lemovány paprscitými agregáty coffinitu. Archivní vzorek DR1AD, Důl R1, TESCAN, odražené elektrony.
 F: nepravidelně omezená zrna selenidů (tiemannitu, a berzelianitu) v asociaci s barytem na ložisku Rožná, úsek Bukov, dokumentační bod 296GCJ0017. TESCAN, odražené elektrony



Obr. 425 Rentgen-difrakční spektrum (1) uraninitu ve směsi s galenitem a kalcitem, (2) uraninitu ve směsi s kalcitem a coffinitem (3) uraninitu ve směsi s kalcitem, galenitem a coffinitem. Důl Rožná, 16. patro, 1Z-16155, dokumentační bod 296GCJ0070



Obr. 426 A: Heterogenní charakter grafitizované zóny zastižené při ražení odvodňovací štoly. Na 3. patře ložiska Rožná, OŠ R3 1 807 m, dokumentační bod 296GCJ0466. Zóna je tvořena polohami bohatými grafitem (tmavé polohy), silně hematitizovanými horninami (hnědočervené polohy) a prožilky karbonátů (světlé polohy). B: Silně grafitizovaná zóna (tmavě šedá) s prožilky karbonátů. Okolí zóny je tvořeno silně hematitizovanými pararulami (červeně). 18. patro, RZPŠ118-59, dokumentační bod 296GCJ0026. C: Okraj grafitizované zóny lemovaný žilou porudního kalcitu (světle šedý). 20. patro, RV420 – 101, dokumentační bod 296GCJ0467_001. D: Silně grafitizovaná zóna (kataklazit) s úlomky okolních hornin ostře oddělená mladšími tektonickými pohyby od prakticky nealterovaných okolních hornin. Jasan, první zóna, 18. patro, Z-XVIII, dokumentační bod 296GCJ0464_001

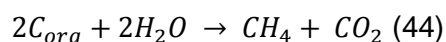


Obr. 427 Alterace vázané na grafitizované a pyritizované zóny kataklazitů. A: Rané stádium alterace. Málo alterované klasty ruly (KI) uložené v matrix kataklazitu, která je tvořena drobnozrnnou mozaikou zrn křemene a žilců. Matrix je pronikána drobnými chloritovými žilkami. B: Rotované zrna křemene v jemnozrnné matrix. Tektonické namáhání se projevuje rekrytalizací zrna za vzniku domén s odlišnou optickou orientací (subgrains). C: Jemnozrnné domény kataklazitu tvořené převážně křemenem se zbytky rotovaných a alterovaných klastů původních hornin. D: stejný obrázek, procházející světlo, zkřížené nikoly. E: Pokročilé stádium alterace. Původní hornina je zcela argilitizována a je prostoupěna žilkami kalcitu, lemovanými novotvořeným chloritem. F: Úplná argilitizace a chloritizace horniny v okolí kataklastické zóny. Všechny obrázky v procházejícím světle. PŠ1-242, dokumentační bod 296GCJ0018

Tab. 164 Izotopické složení grafitu v nealterovaných pararulách na ložisku Rožná a v grafitizované zóně. Důl Jasan, první zóna, 18. patro, Z-XVIII, severní bok. Dokumentační bod 296GCJ0464

Vzorek	Popis	$\delta^{13}\text{C}$ (‰) PDB	$\delta^{13}\text{C}$ (‰) PDB opakované měření
1 KRG	Nealterovaná rula	-21,2	-21,2
2 KRG	Nealterovaná rula	-25,0	-
3 KRG	Nealterovaná rula	-24,1	-
4 KRG	Nealterovaná rula	-21,0	-21,1
5 KRG	Nealterovaná rula	-23,0	-
6 KRG	Grafitizovaná zóna	-25,1	-
7 KRG	Grafitizovaná zóna	-21,1	-
8 KRG	Grafitizovaná zóna	-25,0	-25,0
9 KRG	Grafitizovaná zóna	-24,2	-24,3
10 KRG	Grafitizovaná zóna	-28,0	-
11 KRG	Grafitizovaná zóna	-27,9	-
12 KRG	Grafitizovaná zóna	-26,9	-
13 KRG	Grafitizovaná zóna	-27,5	-
14 KRG	Grafitizovaná zóna	-26,5	-
15 KRG	Grafitizovaná zóna	-28,3	-

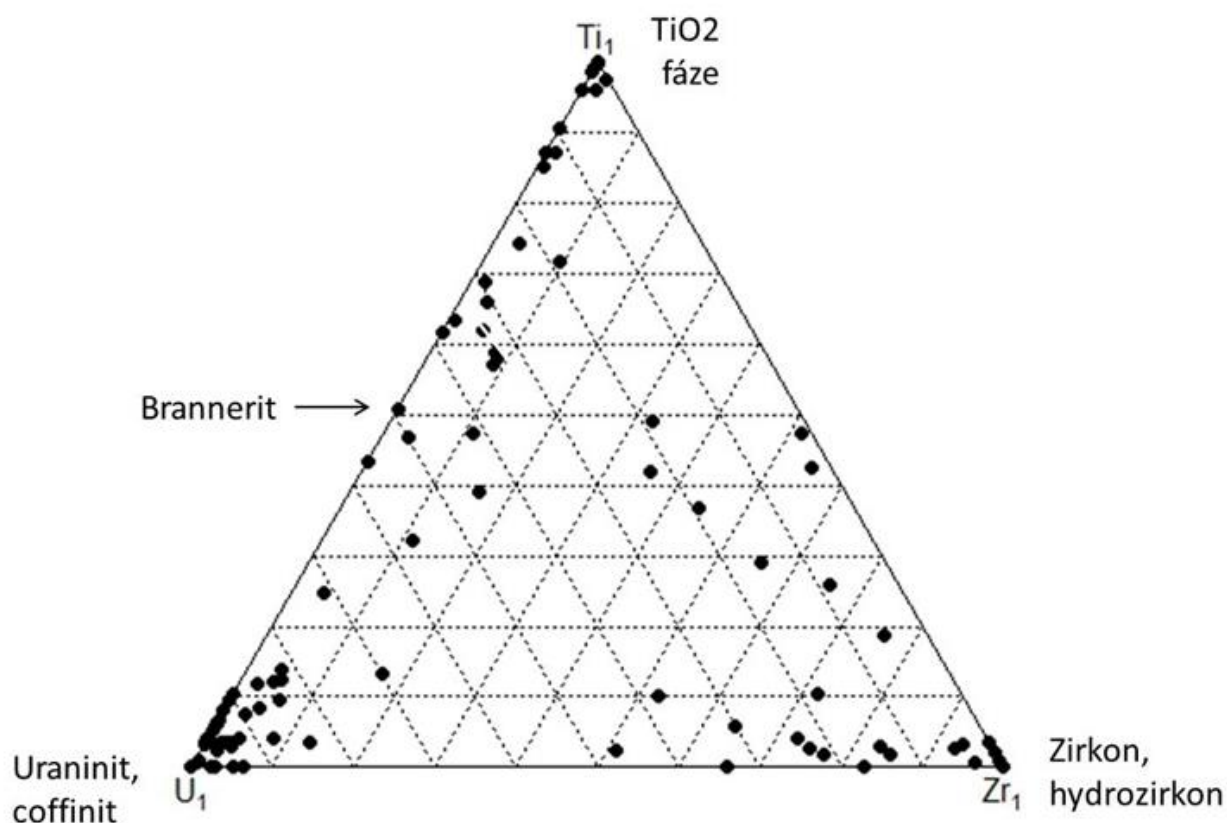
Typickým znakem zón kataklazitů je jejich silná grafitizace a pyritizace (Obr. 429). Množství grafitu v okolních horninách je velmi nízké a nepřesahuje desetiny váhových procent. Naopak, obsahy grafitu na zónách dosahují až 2 %. Organický původ grafitu dokládá v okolních horninách zón i ve vlastních zónách jeho izotopické složení, které se pohybuje v intervalu typickém pro grafit, který vzniká z organického protolitu (Kříbek 1997; Tab. 164). Grafit velmi často srůstá s biotitem nebo chloritizovaným biotitem, což dokládá jeho metamorfní původ (Obr. 429a, b). Vznik grafitu na zónách lze vysvětlit postupnou transformací organické hmoty původních sedimentů na směs plynů podle reakce:



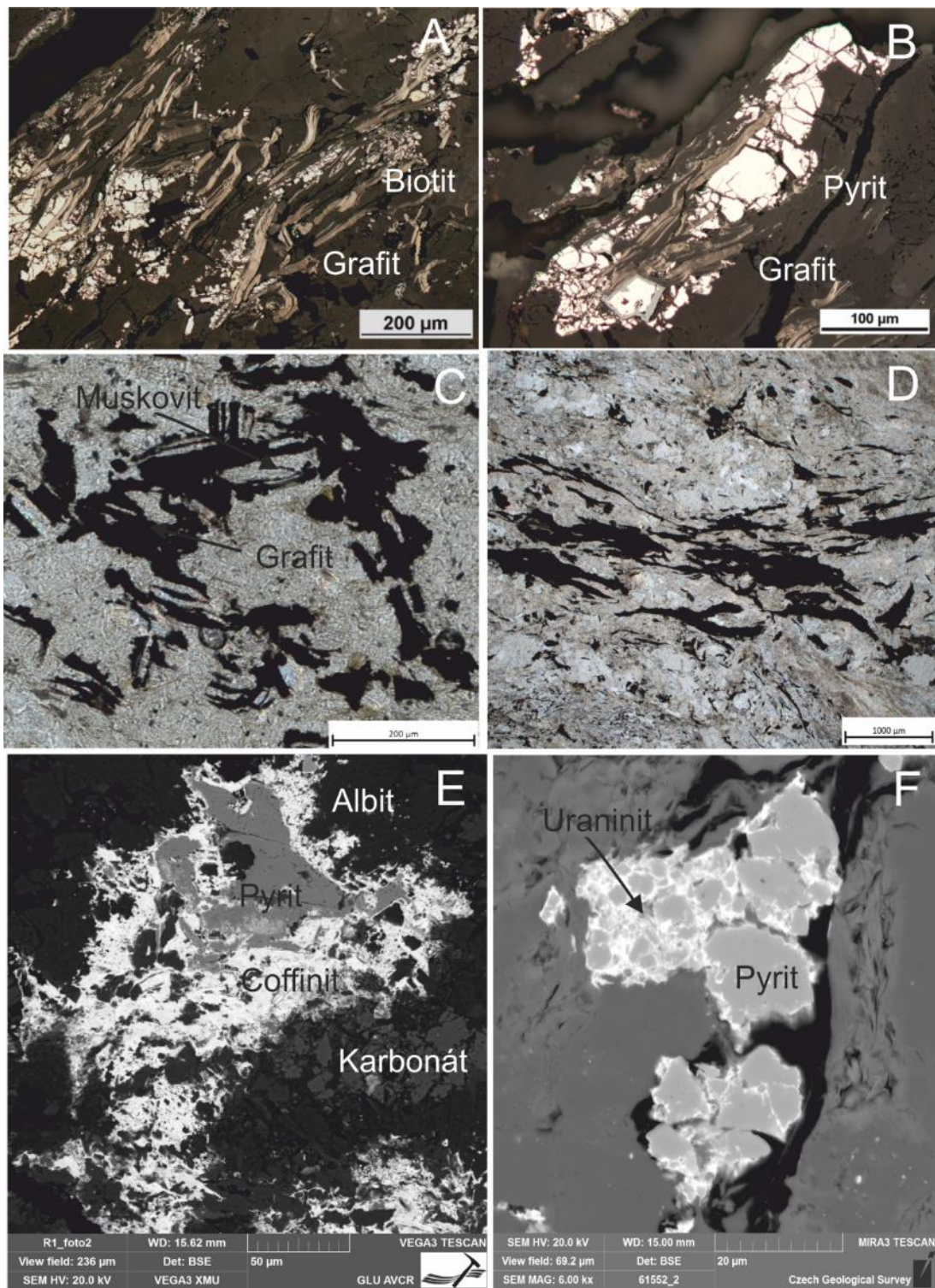
Při poklesu parciálního tlaku H_2O , tj. při hydrataci bezvodých minerálů horninové asociace došlo k opačnému procesu, tedy k vysrážení grafitu z plynné směsi (Kříbek et al. 2008, 2015). To dokládá i srůstání grafitu s muskovitem, který je jedním z minerálů retrográdní fáze metamorfózy (Obr. 429c). Remobilizace grafitu v procesech kataklázy vedla ke vzniku silně

grafitových poloh o mocnosti až několik milimetrů (Obr. 429d). Přítomnost grafitu umožnila vytvoření redukčního prostředí, redukci sulfátů na sulfidy a vysrážení pyritu, který zpravidla lemuje lamely nebo akumulace grafitu (Obr. 429a, b). V průběhu hydrotermálních procesů se pyrit stal redukčním činidlem, které zásadním způsobem ovlivnilo změnu valence U^{VI} na U^{IV} a vedl k vysrážení uranové mineralizace. To dokládá koroze pyritu na zónách a jeho postupné nahrazování minerály uranu (Obr. 429e, f).

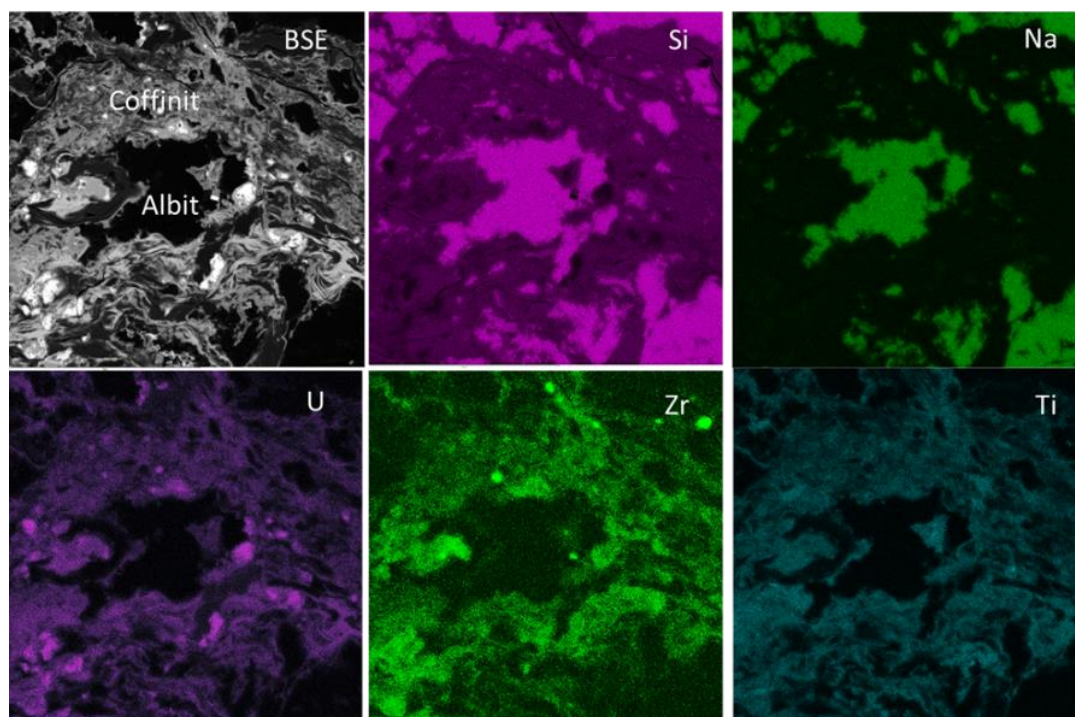
Zrudnění na zónách je tvořeno převážně rozptýleným coffinitem, který obsahuje relikty coffinitizovaného uraninitu, nebo směsí uraninitu a coffinitu s minerály titanu (anatasu) a hydrozirkonu. Agregáty coffinitu velmi často obsahují velké množství lištovitých zrn markazitu. Coffinit se nachází v různém stupni metamiktní přeměny. V zrnech, která jsou silně metamiktní, silně kolísá obsah Zr a Ti; v zrnech, která jsou méně metamiktní, silně kolísá obsah křemíku. Tato zrna většinou obsahují i zvýšená množství Ca. Metamiktní zrna jsou izotropní, jsou pro ně charakteristické bělavé vnitřní reflexy. V zrnech, kde jsou příznaky metamiktního stavu slabé, lze pozorovat slabou anizotropii. Přítomnost branneritu, uváděná staršími autory na ložisku Rožná nebyla potvrzena. Míšení coffinitu s minerálními fázemi Ti a Zr se projevuje značným rozptylem poměru U, Zr a Ti v analyzovaných zrnech (Obr. 428). To potvrzuje, že se nejedná o stechiometricky definované minerální fáze, nýbrž o směsi minerálů. Přítomnost Zr-Ti-U minerálních směsí byla potvrzena mapováním jejich plošné distribuce (Obr. 430). Z obrázku vyplývá velmi dobrá korelace mezi distribucí uranu (vázaného na coffinit), a distribucí Ti a Zr. Titan je zřejmě vázán na anatas nebo na reliktní titanit, Zr na zrna klastického zirkonu nebo na jeho alterační produkty (amorní hydrozirkonové gely).



Obr. 428 Poměr U, Zr a Ti ve směsích, které tvoří převážnou část mineralizace na hlubokých horizontech ložiska Rožná. V procentech, přepočítáno z váh. % prvků, $\Sigma U+Zr+Ti = 100$



Obr. 429 A: Lišty grafitu epitakticky narůstající na lištách biotitu (metamorfní grafit). Dokumentační bod 296GCJ0049 Odražené světlo. B: Lišty grafitu velmi často obrůstají poněkud mladší zrna pyritu. Dokumentační bod 296GCJ0049 odražené světlo C: Lišty grafitu srůstající s lištami muskovitu (hydrotermální grafit). Procházející světlo, bez nikolů. Dokumentační bod 296GCJ0052 D: Plasticky deformovaná zrna grafitu v hydrotermálně alterované (argilitizované) výplni zóny. E: Relikty korodovaného pyritu zatlačované coffinitem. BSE. F: Relikty pyritových zrn zatlačované uraninitem. BSE



Obr. 430 Distribuce Si, Na, U, Zr a Ti v coffinitu. Distribuce uranu, zirkonu a titanu velmi dobře koreluje. Poměry tří uvedených prvků ve směsích však velmi kolísají. Nejedná se tedy o stechiometricky definovanou homogenní minerální fázi (viz Obr. 428)

Geochemie grafitizovaných a pyritizovaných zón kataklazitů byla studována na dvou profilech:

Profil 1, 21. patro ložiska Rožná (RZ-PŠ1-69, dokumentační body 296GCJ0043 až 296GCJ0058

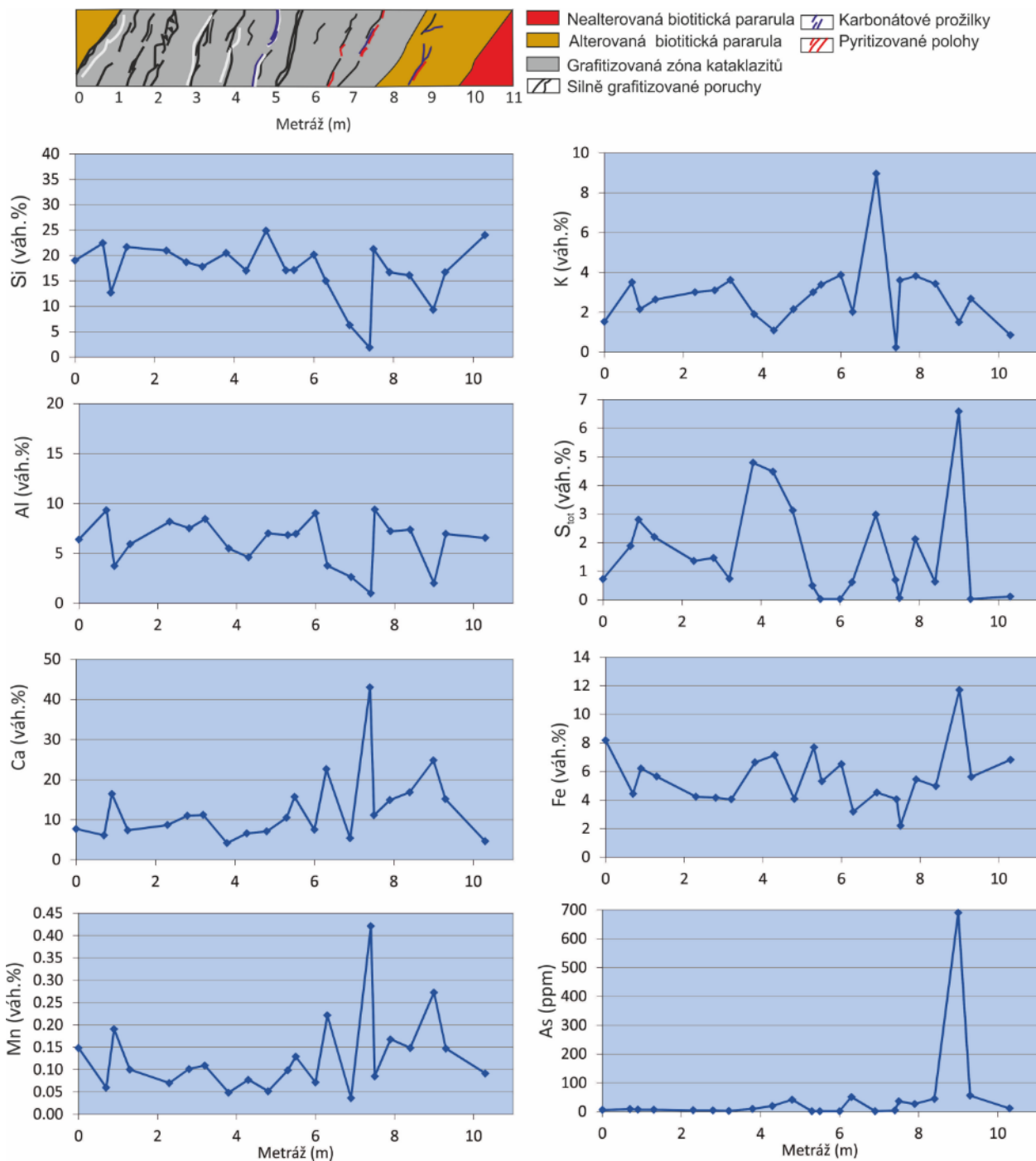
Strukturní podloží tohoto profilu je tvořeno argilitizovanými a chloritizovanými rulami o mocnosti až 3 m, které postupně přecházejí do nealterovaných biotit-granátických pararul. Koncentrace jednotlivých prvků na studovaném profilu je uvedena v Tab. 165 a v Elektronická příloha 123. Z tabulky vyplývá, že se obsahy karbonátového uhlíku (C_{karb}) pohybují mezi 0,01 až 10 váh. %, obsahy grafitu (C_{graf}) mezi 0,5 až 2,6 váh. %. Extrémně vysokých hodnot dosahují koncentrace Ti (max. 18 622 ppm, As (max. 830 ppm), Zr (max. 18 292 ppm), Ba (max. 4 387 ppm), Bi (max. 5 408 ppm) a U (max. 14 355 ppm). Koncentrace vybraných prvků je graficky znázorněna na Obr. 431 a Obr. 432. Z Obr. 431 vyplývá, že se obsahy Si a Al snižují s růstem obsahu Ca a Mn (růst obsahů karbonátů v žilovině) a s růstem obsahů K (silná argilitizace, přítomnost sericitu nebo illitu). Distribuce hodnot S_{tot} , Fe a As velmi dobře koreluje, jedná se tedy o variace v obsahu pyritu na zóně. Naopak, obsahy Cu a Zn s obsahy Fe nekorelují, jedná se pravděpodobně o projevy pouranové polymetalické mineralizace (Obr. 432). S obsahy U velmi dobře korelují obsahy Bi, Pb, Zr a Y (Obr. 432). Jedná se tedy o prvkovou asociaci, která je charakteristická pro uranovou mineralizaci. Podrobněji jsou vzájemné vztahy mezi prvky znázorněny pomocí analýzy hlavních komponent a faktorové analýzy na Obr. 433A, B. Z výsledků analýzy hlavních faktorů (Obr. 433A), které ovlivňují distribuci proměnných, vysvětluje kombinace Faktoru 1 a Faktoru 2 dohromady 51 % variace mezi nimi. Váha obou faktorů je přibližně stejná. Faktor 1 lze interpretovat jako podíl nezrudnělých částí profilu (hodnoty faktoru > 0,0) a zrudnělých částí profilu (hodnoty faktoru < 0,0).

Faktor 2 lze vysvětlit jako podíl mezi karbonátovou složkou horniny (hodnoty faktoru < 0,0) a aluminosilikátovou složkou horniny (hodnoty faktoru > 0,0).

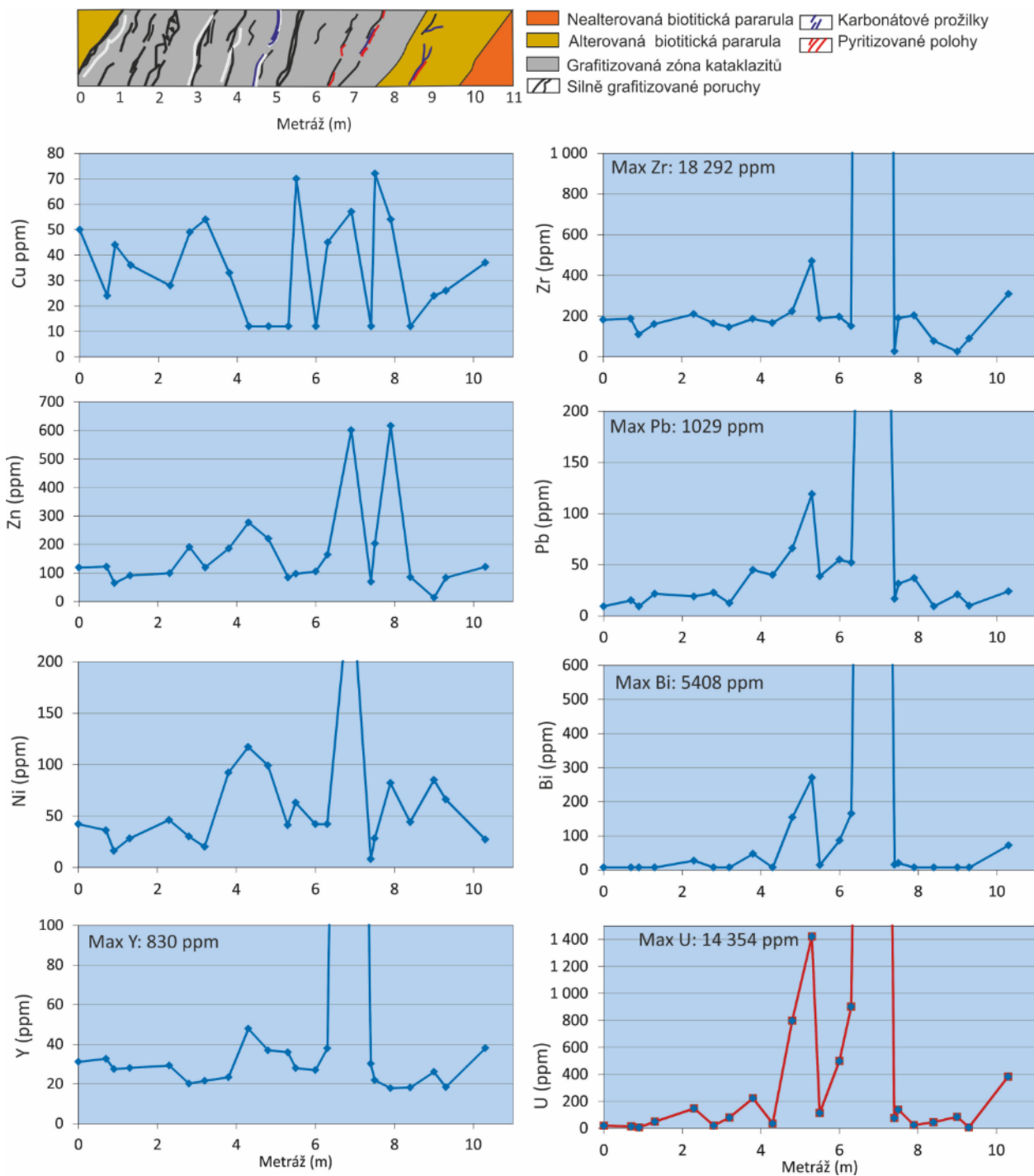
Z obrázku zřetelně vyplývá grupování U s Ni, Y, Zr, Pb a Bi (prvková asociace uranové mineralizace), což odpovídá grafickému zobrazení distribuce dat na Obr. 433A. Grupování dalších proměnných odpovídá množství karbonátů (C_{karb} , Ca, Mn) a aluminosilikátů (Al, Si, Rb). Variabilita v grupování dalších prvků je obtížně interpretovatelná. Výsledky faktorové analýzy, tj. vyjádření faktorových zátěží (Obr. 433B) v principu odpovídá výsledkům analýzy hlavních komponent. Faktor 1 faktorové analýzy sdružuje zejména U, Bi, Pb, Zr, Y, Zn, Ni a K a lze jej interpretovat jako projev uranové mineralizace vázané na silně argilitizované horniny zóny. Faktor 2 sdružuje zejména Si a V a lze jej interpretovat jako podíl křemene a těžkých minerálů v hornině. Faktor 3, ve kterém nejvyšší hodnoty kladných faktorových zátěží vykazují Fe, S a As, ukazuje na množství pyritu v hornině.

Tab. 165 Základní statistické charakteristiky souboru vzorků, odebraných z grafitizované a pyritizované zóny na 21. patře ložiska Rožná (dokumentační bod 296GCJ0019). Koncentrace Al, Si, S_{tot} , K, Ca, Fe, C_{karb} a C_{graf} ve váhových %, ostatní prvky v ppm. Počet vzorků: 22

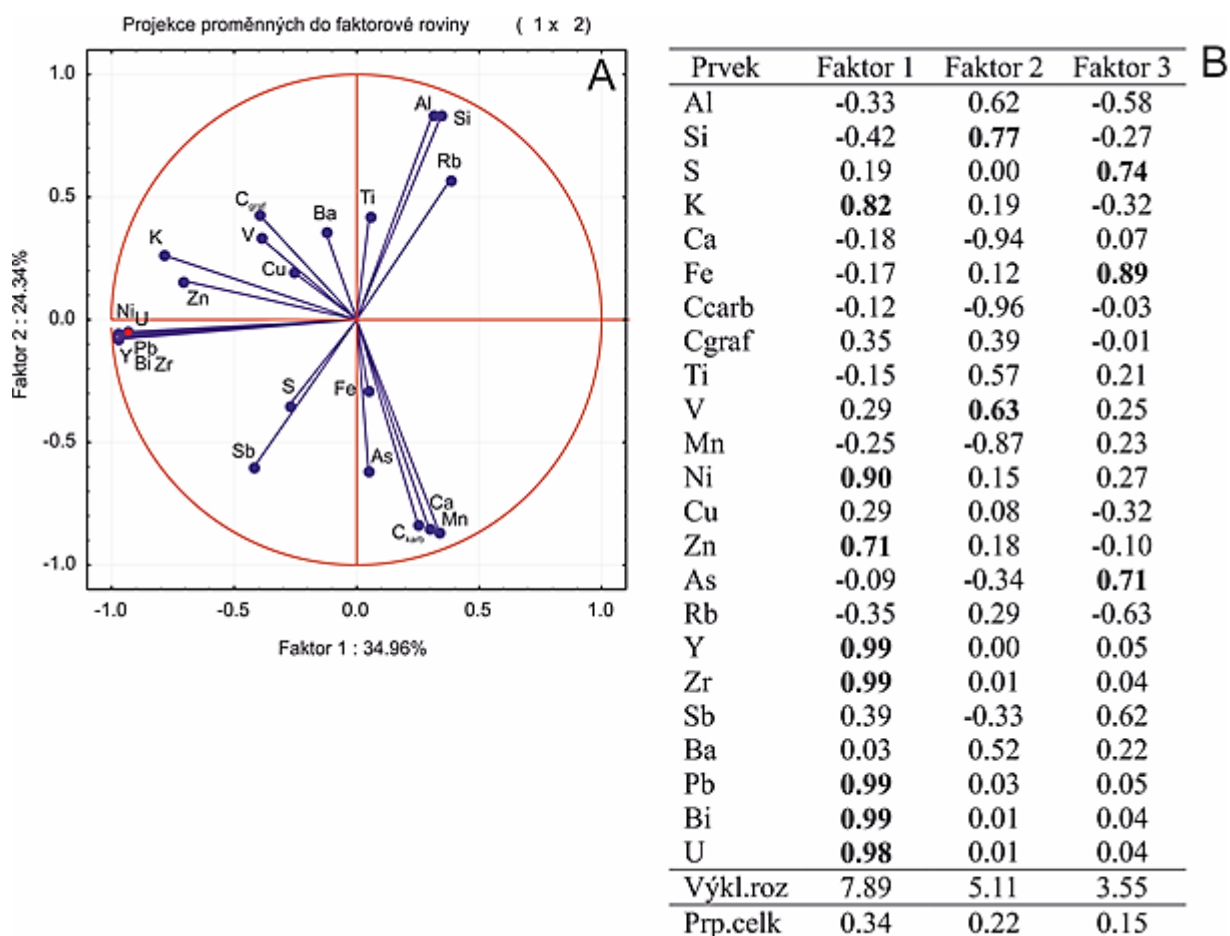
	Al	Si	S	K	Ca	Fe	C_{karb}	C_{graf}
Max.	9,4	24,9	6,6	9,0	43,0	11,7	10,0	2,6
Kvantil 0,75	7,5	20,8	2,6	3,5	15,6	6,6	3,2	1,4
Median	6,9	17,5	1,0	2,8	10,7	5,4	2,0	0,9
Kvantil 0,25	4,8	16,2	0,5	1,9	7,2	4,2	1,3	0,1
Min.	1,0	1,8	0,0	0,2	4,1	2,2	0,01	0,0
Šikmost	-0,74	-1,27	1,29	2,07	2,17	1,22	1,87	0,50
	Ti	V	Mn	Ni	Cu	Zn	As	Rb
Max.	18 622	750	4 214	285	72,0	616	690	160
Kvantil 0,75	5 238	261	1 485	78,0	49,8	190	33,6	128
Median	4 092	158	1 007	42,0	34,5	119	7,9	90,3
Kvantil 0,25	3 623	115	729	28,5	15,0	86,5	4,2	44,2
Min.	249	22,0	365	8,0	12,0	13,0	1,4	2,5
Šikmost	2,19	1,74	2,00	2,99	0,31	2,30	4,58	-0,38
	Y	Zr	Sb	Ba	Pb	Bi	U	
Max.	830	18 292	83	4 387	1 029	5 408	14 355	
Kvantil 0,75	35	202	14,5	1 301	43,75	65,8	343	
Median	28	185	6	570	23,4	10,5	82,5	
Kvantil 0,25	22	147	6	443	15,6	7	27	
Min.	18	26	6	107	9,3	7	7	
Šikmost	2,30	1,74	0,60	3,20	-0,22	2,12	2,65	



Obr. 431 Schematická litologie profilu 1 (grafitizovaná a pyritizovaná zóna) a distribuce Si, Al, Mn, K, S_{tot}, Fe a As na uvedeném profilu. 21. patro, dokumentační bod 296GCJ0019



Obr. 432 Schematická litologie profilu 1 (graftizovaná a pyritizovaná zóna) a distribuce Cu, Zn, Ni, Y, Zr, Pb, Bi a U na uvedeném profilu. 21. patro, dokumentační bod 296GCJ0019



Obr. 433 Výsledky analýzy hlavních komponent na profilu 1, 21. patro, dokumentační bod 296GCJ0019 (A) a výsledky faktorové analýzy na stejném profilu. Faktorová analýza uvádí faktorová skóre jednotlivých komponent systému podle jednotlivých faktorů (B). Tučně jsou vyznačeny kladné hodnoty faktorových skóre kde $p > 0,7$

Mimo obsahů stopových prvků byly na profilu 1 studovány hodnoty pH_{KCl} vodního výluhu a koncentrace S_{tot} a C_{karb} s cílem posoudit vliv zvětrávání zón na vznik kyselých důlních vod. Na základě koncentrací sulfidů (S_{tot}) a karbonátů (C_{karb}) byl vyčíslen čistý neutralizační potenciál (NNP) u jednotlivých vzorků, který vyjadřuje schopnost horninového prostředí neutralizovat kyselou vodu, které vznikají při zvětrávání pyritu (Čížek et al. 2011):

Čistý neutralizační potenciál $\text{NNP} = \text{NP} - \text{AP}$, (45),

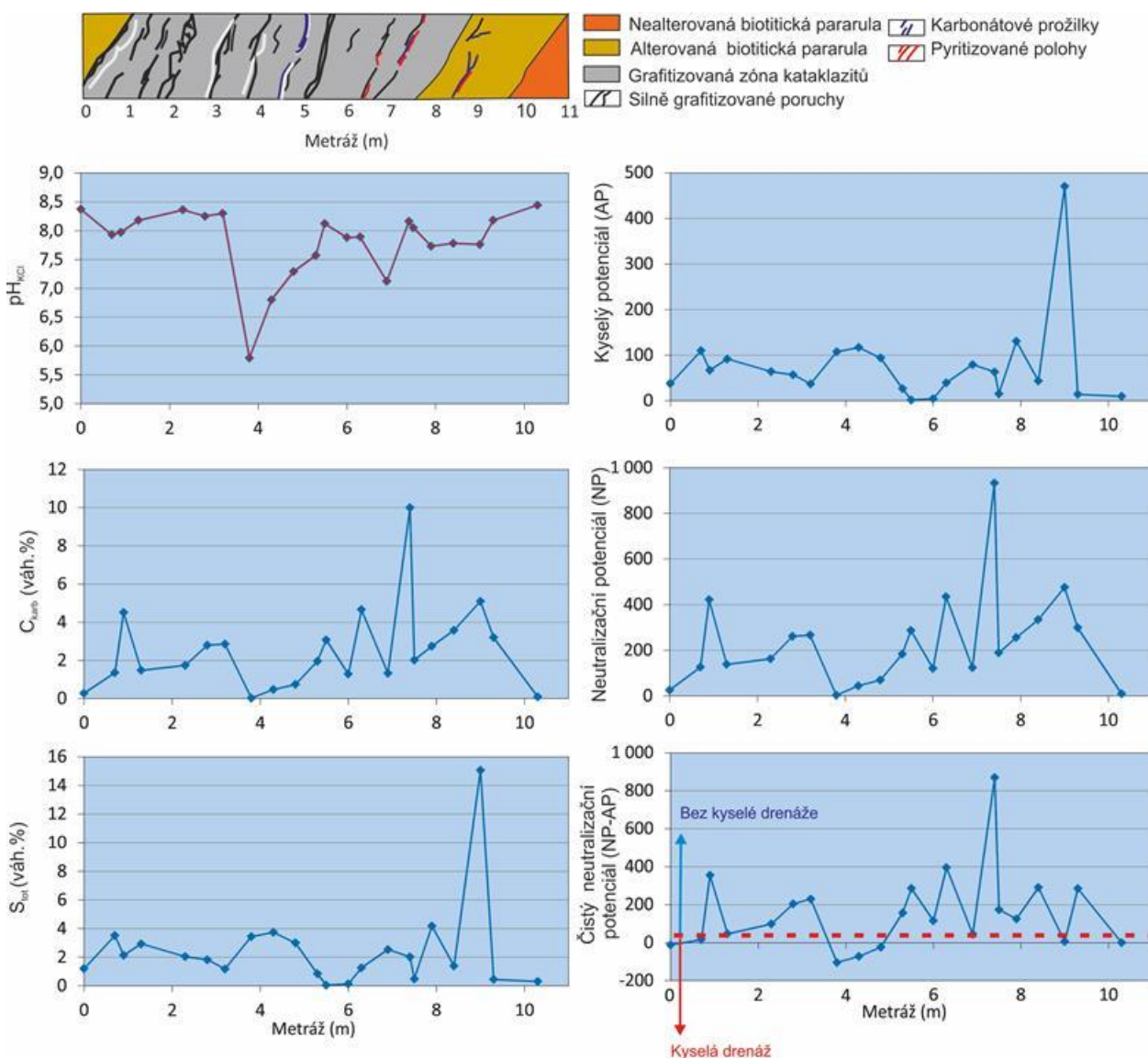
kde neutralizační potenciál $\text{NP} = \text{CaCO}_3$ (váh. %) $\times 10$ (46)

a kyselý potenciál $\text{AP} = S_{\text{tot}}$ (váh. %) $\times 31,25$ (47).

Výsledky stanovení pH vodního výluhu, kyselého potenciálu jednotlivých vzorků, neutralizačního potenciálu a čistého neutralizačního potenciálu jsou graficky vyneseny na Obr. 434. Z obrázku vyplývá, že se hodnoty pH vodního výluhu vzorků pohybují v rozmezí 5,5 až 8,5. Hodnoty kyselého potenciálu jsou velmi variabilní a pohybují se mezi 0 až 500, stejně jako hodnoty neutralizačního potenciálu (0–100). To naznačuje velmi proměnlivý podíl pyritu a karbonátů v jednotlivých analyzovaných vzorcích. Tomu odpovídají i variace v hodnotách čistého

neutralizačního potenciálu (-50 až 800). Hodnoty čistého neutralizačního potenciálu < 20 naznačují možnost vzniku kyselé drenáže, hodnoty > 20 indikují dostatek karbonátu, které vznik kyselé drenáže limitují (Čížek. et al. 2011).

Průměrné hodnoty AP, NP a NNP na celém profilu uvedené v Tab. 166 naznačují, že při zvětvávání grafitizovaných a pyritizovaných zón ke vzniku kyselé drenáže docházet nebude.



Obr. 434 Litologický profil grafitizovanou a pyritizovanou zónou 1 a hodnoty pH_{KCl} , C_{karb} , S_{tot} , kyselého potenciálu (AP), neutralizačního potenciálu (NP) a čistého neutralizačního potenciálu (NP-AP). Hodnoty čistého neutralizačního potenciálu u jednotlivých vzorků se pohybují v oblasti > 20 , a tedy ke vzniku kyselé drenáže by při zvětvávání nemělo docházet. Profil 1, 21. patro, dokumentační bod 296GCJ0019

Tab. 166 Průměrné hodnoty (a směrodatné odchylky průměrných hodnot) kyselého potenciálu, neutralizačního potenciálu a čistého neutralizačního potenciálu na profilu 1

	Průměrná hodnota	2SD
Kyselý potenciál (AP)	76,3	187
Neutralizační potenciál (NP)	233	234
Čistý neutralizační potenciál (NNP)	158	414

Profil 2, 18. patro jámy Jasan, první zóna, Z-XVIII, severní bok

Druhý sledovaný profil grafitizovanou a pyritizovanou zónou byl studován na 18. patře jámy Jasan (první zóna, Z-XVIII, severní bok, dokumentační bod 296GCJ0464). Základní statistické charakteristiky prvkových souborů na tomto profilu jsou uvedeny v Tab. 167 a data v Elektronická příloha 124. Ve srovnání s profilem předcházejícím je mineralizace této zóny daleko nižší a koncentrace U dosahují pouze 256 ppm. Nižší jsou i koncentrace ostatních prvků, které U doprovázejí.

Distribuce vybraných prvků na tomto profilu je graficky vyjádřena na Obr. 435. Z obrázku vyplývá, že je zóna ve vztahu k okolním horninám ochuzena Si, Al a K, což odpovídá vysokým obsahům grafitu (až 3,3 váh. % C_{graf}) a karbonátů (až 2,28 váh. % C_{karb}). Zajímavé je výrazné ochuzení hornin zóny draslíkem, což může indikovat náhradu plagioklasů albitem, tj. „sodná metasomatóza“, která je typická pro nejhlubší horizonty ložiska Rožná. Uranová mineralizace na tomto profilu je doprovázená zvýšenými obsahy Y, Mo a Pb, tedy prvky typickými pro uranovou mineralizaci. Vztahy mezi proměnnými byly analyzovány metodou hlavních komponent a faktorovou analýzou (Obr. 436). Výsledky analýzy hlavních komponent (Obr. 436A) ukazují, že nevýznamnější faktory 1 a 2 vysvětlují 57,1% variability dat. Faktor 1 lze interpretovat jako poměr nemineralizovaných hornin (hodnoty faktoru > 0,0) a mineralizovaných hornin (hodnoty faktoru < 0,0). Faktor 2 lze interpretovat jako podíl prvků vázaných na karbonáty bohatou výplň zóny (hodnota faktoru < 0,0) a na silně grafitizované horniny zóny (hodnota faktoru > 0,0). V případě U je faktorová zátěž v rámci prvního i druhého faktoru velmi nízká (pohybuje se v blízkosti středu grafu) na rozdíl od dalších prvků „uranové“ prvkové asociace (Y, Mo a Pb ke které přistupuje Ni). To lze vysvětlit nízkými obsahy uranu a nevýraznou korelací mezi U a uvedenými prvky. V případě faktorové analýzy (Obr. 436B) byly z analyzovaného souboru vyloučeny vzorky odebrané mimo zónu. Faktor 1, s vysokými kladnými faktorovými zátěžemi S_{tot} , Ni, Zn, As, Y, Mo, Pb U a C_{graf} , lze interpretovat jako projev uranové mineralizace vázané na silně grafitické polohy studovaného profilu. Faktor 2, s vysokými kladnými zátěžemi S_{tot} , Mn, Fe, As a C_{karb} , lze interpretovat jako záznam prvkové asociace vázané na karbonátové prožilky v grafitizované a pyritizované zóně. Faktorová zátěž U je v tomto případě nízká, což znamená, že uran není vázán na karbonáty. Faktor 3 sdružuje prvky, které tvoří alumosilikátovou složku zóny včetně jílových minerálů a oxidů titanu (rutil, anatas).

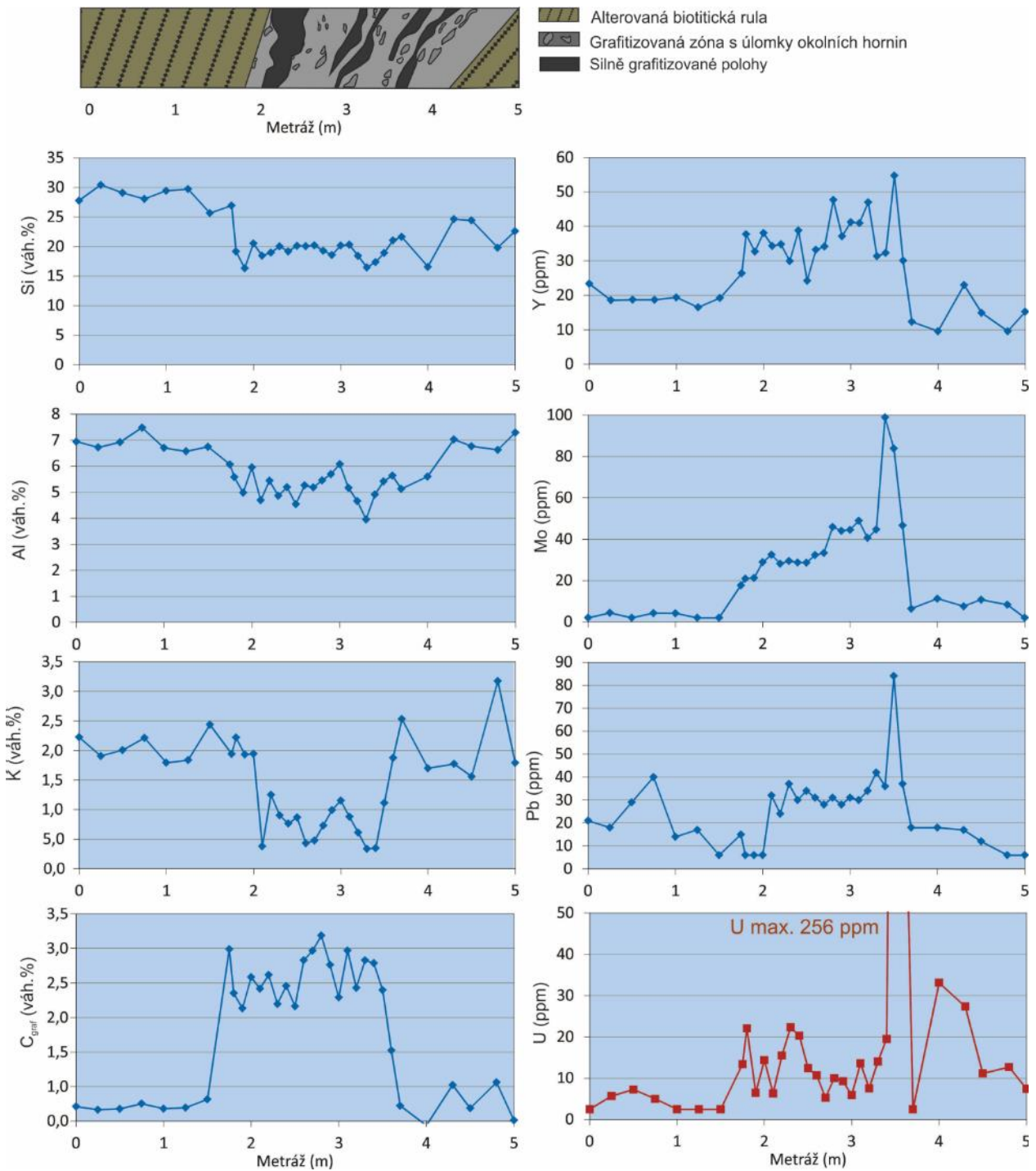
Tab. 167 Základní statistické charakteristiky souboru vzorků, odebraných z grafitizované a pyritizované zóny 2 na 18. patře jámy Jasan (první zóna, Z-XVIII, severní bok, dokumentační bod 296GCJ0464). Koncentrace Mg, Al, Si, K, S_{tot}, C_{karb} a C_{grafitický} ve váhových %, ostatní prvky v ppm. Min: minimální hodnota, Max: maximální hodnota. Počet vzorků: 31

	Mg	Al	Si	K	Ca	Fe	S _{tot}	C _{karb}
Min.	0,46	3,95	16,32	0,33	2,01	3,55	0,04	0,01
Percentil 25	0,46	5,16	18,95	0,87	3,48	4,45	0,19	0,36
Medián	1,57	5,60	20,18	1,70	5,53	5,03	0,61	0,60
Percentil 75	1,92	6,70	24,64	1,94	8,08	5,62	0,85	1,21
Max.	3,55	7,48	30,42	3,17	12,68	7,23	1,52	2,28
Šikmost	0,13	0,79	0,32	0,34	1,31	-0,02	0,10	-0,22
	C _{graf}	Ti	V	Mn	Ni	Zn	As	Rb
Min.	0,10	800	90	546	12	22	3,5	17,8
Percentil 25	0,22	800	142	667	30	118	22,9	40,3
Medián	1,70	2 617	204	802	56	238	55,3	73,5
Percentil 75	2,12	4 348	257	929	92	311	78,6	90,0
Max.	2,69	10 798	526	1 292	105	815	168	144
Šikmost	0,88	1,08	0,70	0,30	1,61	0,69	0,22	0,55
	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Ba	Pb	U
Min.	127	9,54	139	4,0	2,0	449	6,0	2,5
Percentil 25	186	18,7	177	9,9	6,39	686	15	5,96
Medián	204	30,1	194	11,7	28,2	1 115	28,0	10,7
Percentil 75	258	37,1	220	13,2	40,6	1 513	32	15,5
Max.	346	54,7	312	22,1	98,9	3 480	84	256
Šikmost	0,18	1,02	0,42	1,30	1,17	1,57	4,73	0,62

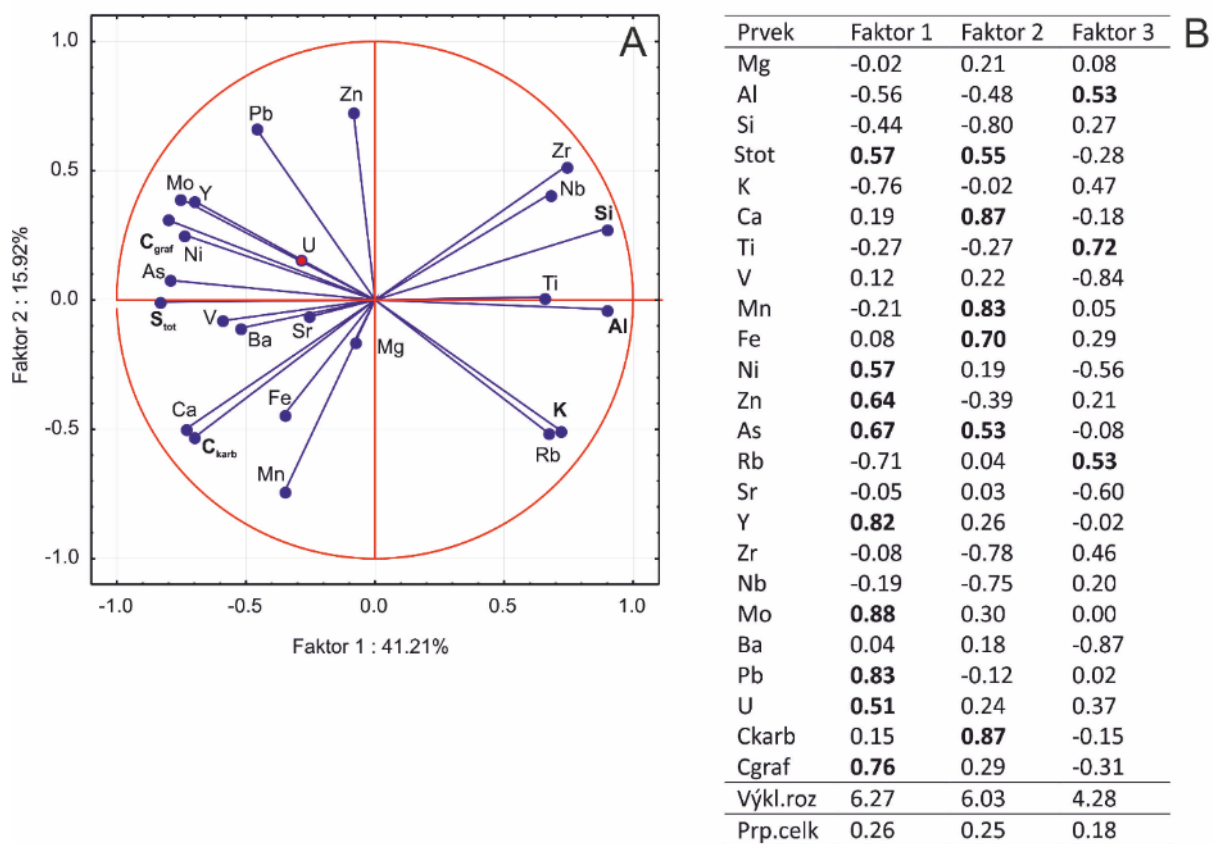
Mimo obsahů stopových prvků byly na stejném profilu studovány hodnoty pH_{KCl} vodního výluhu, S_{tot} a C_{karb}, s cílem posoudit vliv zvětrávání zón na vznik kyselých důlních vod. Distribuce dat je uvedena na Obr. 437. Na stejném obrázku jsou vyneseny hodnoty kyselého potenciálu (AP), neutralizačního potenciálu (NP) a čistého neutralizačního potenciálu (NNP). Hodnoty čistého neutralizačního potenciálu jsou většinou vyšší nežli 20, což naznačuje, že ke vzniku kyselé důlní drenáže nebude docházet. To potvrzuje průměrná hodnota čistého neutralizačního potenciálu celého profilu, která činí 26 (Tab. 168).

Tab. 168 Průměrné hodnoty (a hodnoty směrodatné odchylky) kyselého potenciálu, neutralizačního potenciálu a čistého neutralizačního potenciálu na profilu 2 odebraného na jámě Jasan (R-3)

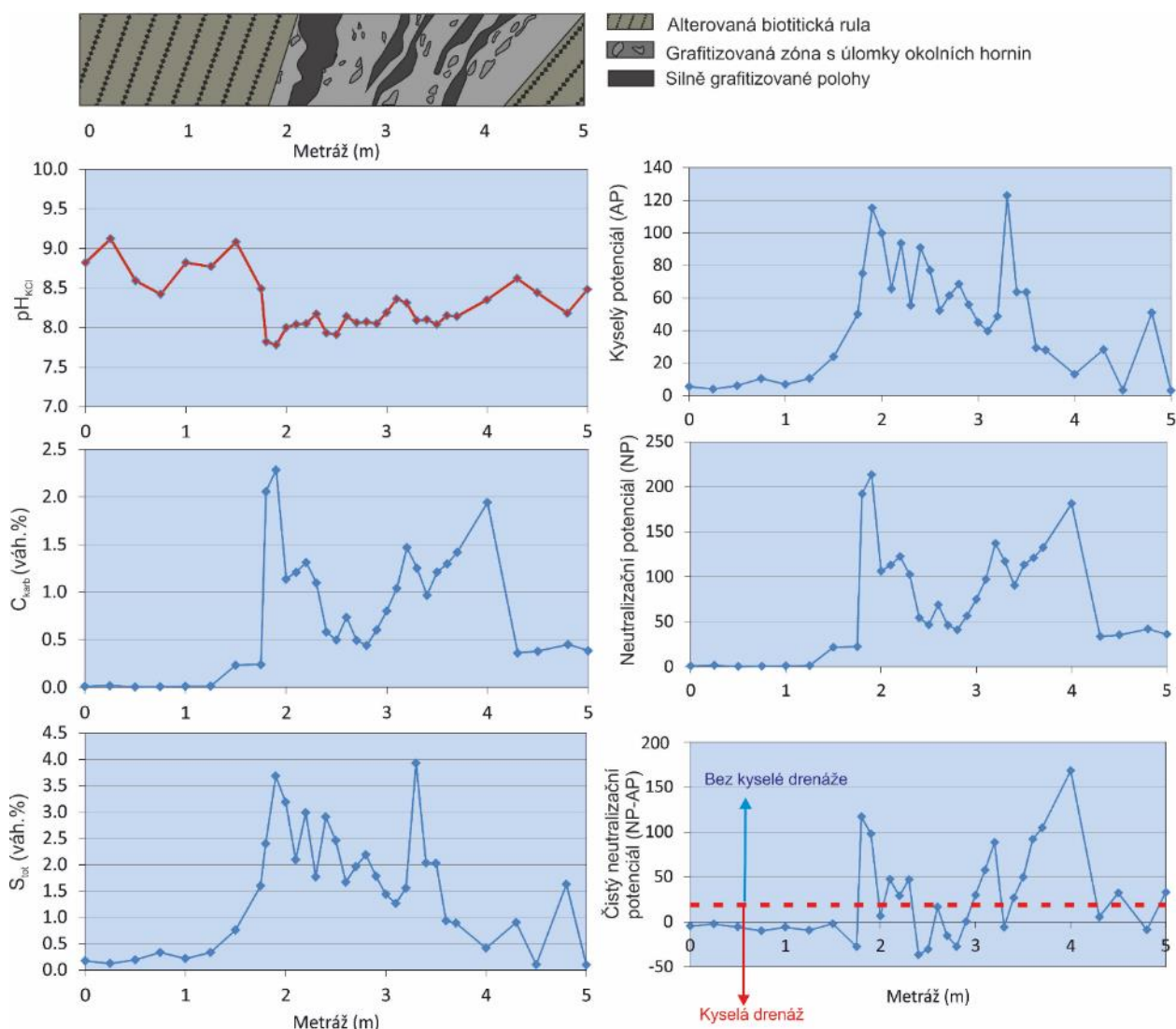
	Průměr	2SD
Kyselý potenciál (AP)	47,4	66,8
Neutralizační potenciál (NP)	73,4	115,7
Čistý neutralizační potenciál (NNP)	26,0	95,9



Obr. 435 Schematická litologie profilu 2 (grafitizovaná a pyritizovaná zóna) a distribuce Si, Al, K, C_{graf}, Y, Mo, Pb a U na uvedeném profilu. první zóna, Z-XVIII, severní bok, dokumentační bod 296GCJ04641



Obr. 436 Výsledky faktorové analýzy na profilu 2. Hodnoty kladných faktorových zátěží při $p > 0,5$ jsou označeny tučně



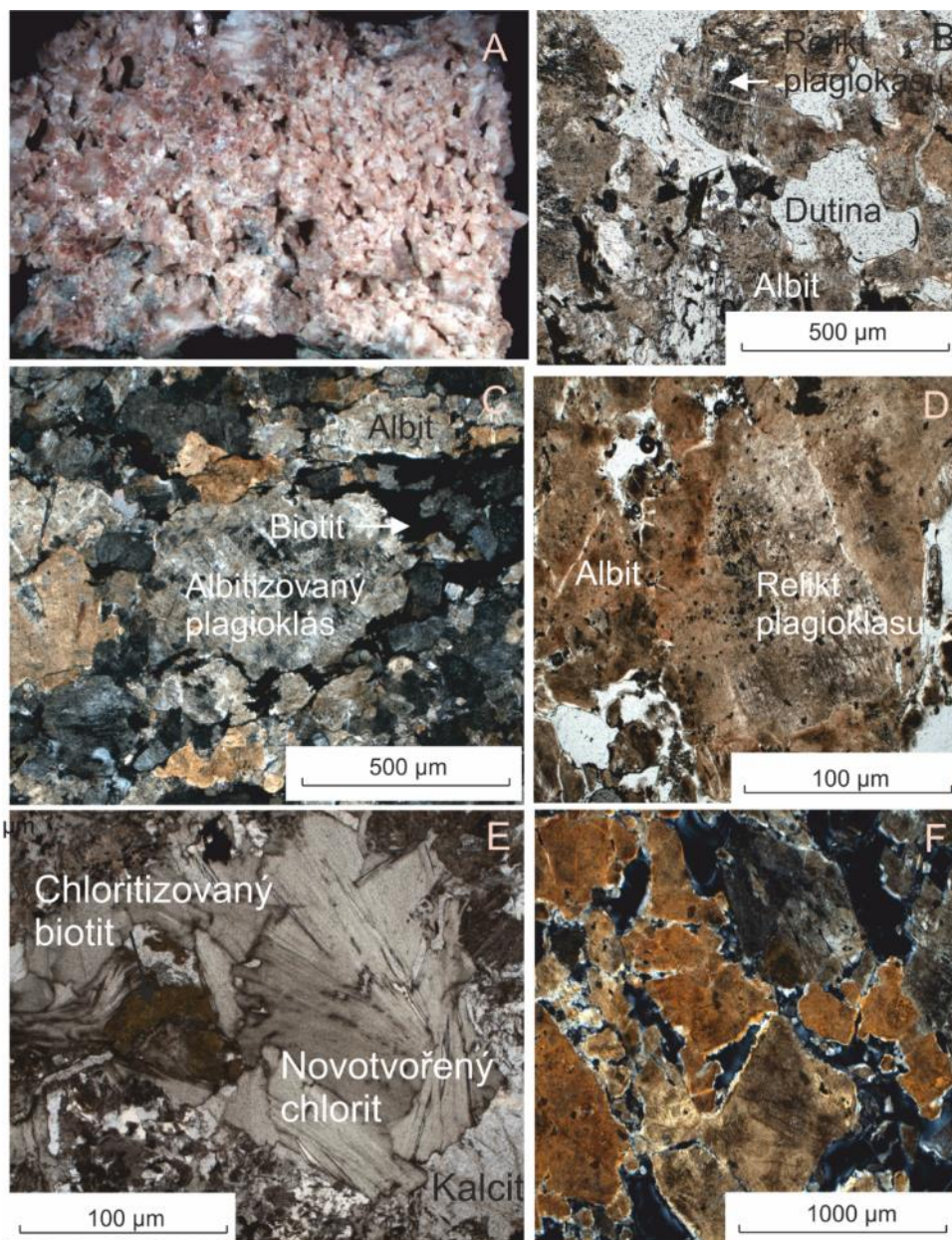
Obr. 437 Litologický profil zónou grafítizovaných a pyritizovaných kataklazitů na profilu odebraném na jámě Jasan, hodnoty pH_{KCl} vodního výluhu, koncentrace C_{karb} , S_{tot} a hodnoty kyselého potenciálu, neutralizačního potenciálu a čistého neutralizačního potenciálu. Hodnoty čistého neutralizačního potenciálu jsou většinou vyšší nežli 20, což naznačuje, že při zvětrávání zóny nebude vznikat kyselá důlní drenáž. První zóna, Z-XVIII, severní bok, dokumentační bod 296GCJ0464

3. Uranové rudy rozptýlené v silně albitizovaných horninách mimo zóny, které jsou na ložisku označovány jako „eysity“ nebo sodné metasomatity

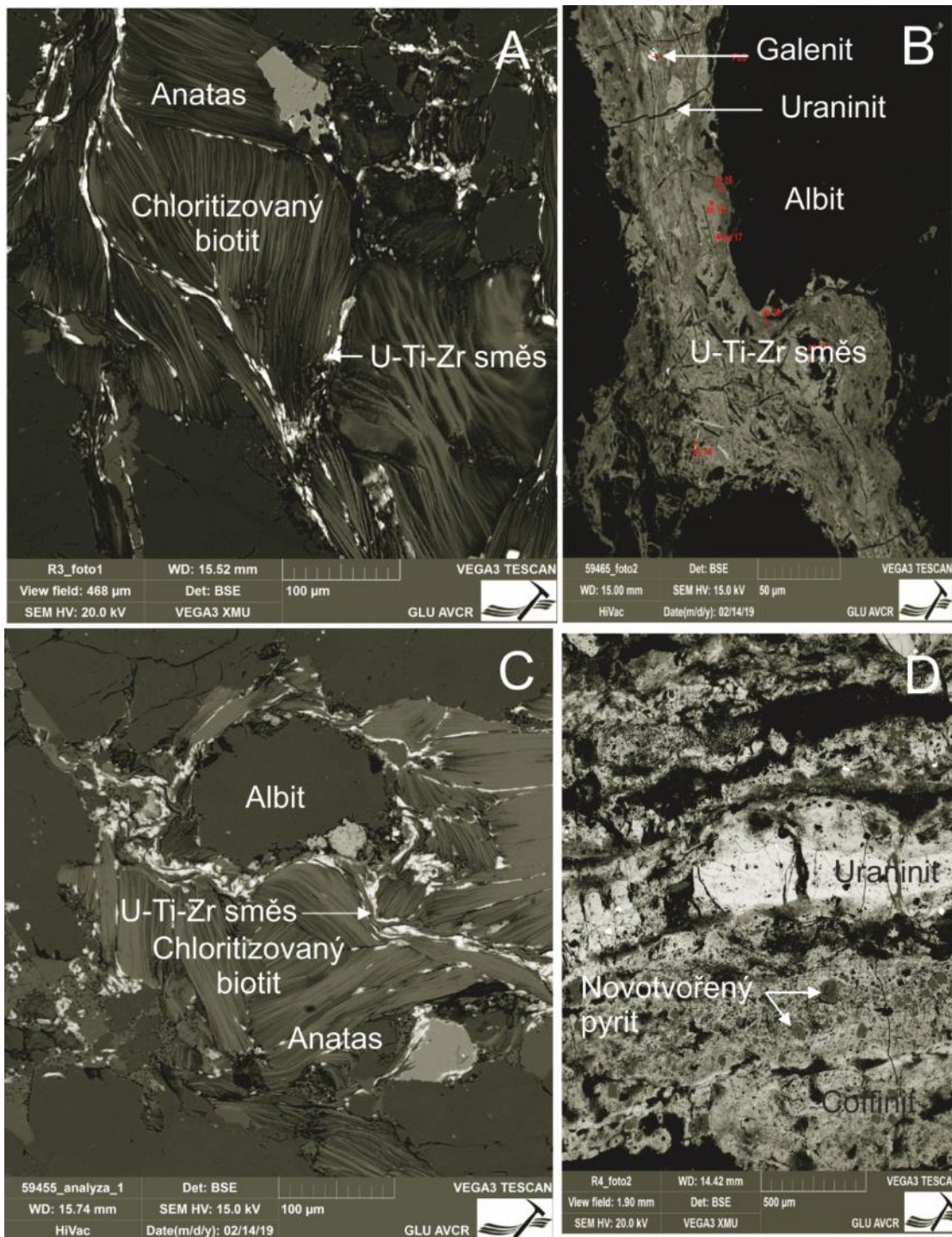
Tyto rudy se vyskytují na nejhlubších patrech ložiska Rožná (zejména mezi 20. a 24. patrem; Bojcov 1975), a je velmi pravděpodobné, že se jejich množství bude zvyšovat pod 24. patrem. Na rozdíl od uranových rud vázaných na grafítizované a pyritizované zóny hornin obsahují metasomatity velmi málo karbonátů a jílových minerálů. Sodné metasomatity (albitity) se běžně vyskytují na francouzských uranových ložiscích (Kříbek et al. 2009, souborně v Cuney a Kyser 2015) a jsou tam označovány jako „episyenity“, vzhledem k nízkým obsahům Si a vysokým obsahům Na. Předpokládá se, že tyto horniny vznikaly před uranovou mineralizací působením Na-bohatých formačních vod na horniny granitoidního charakteru (Cathelineau 1986). Na ložisku

Rožná tyto horniny nevznikají alterací granitoidů, ale alterací biotitických pararul a pararul v různých stádiích migmatitizace a pozvolně tyto horniny nahrazují.

Sodné metasomatity na ložisku Rožná jsou buď sterilní, nebo nesou uranovou mineralizaci. Mineralizované metasomatity se vyskytují v blízkosti štěpení nebo vyznívání grafitizovaných a pyritizovaných zón kataklazitů nebo v jejich blízkosti a jejich mocnost dosahuje i několik desítek metrů. Metasomatóza se projevuje především albitizací plagioklasu. Původní živce pozbývají dvojčatění a jejich barva se vlivem pigmentací oxidů železa mění na hnědočervenou (Obr. 438C, D). Vznikající albit je často sericitizován. Mimo albitu se vyskytují i drobná, průhledná zrna adularu. Biotit je nahrazován hydrobiotitem a později chloritem. Ve vnitřní zóně metasomatitů probíhá i vyluhování křemene, přičemž vznikají velmi silně porézní horniny (Obr. 438A, B). V případě mineralizace jsou tyto póry vyplňovány vějířovitými agregáty novotvořeného chloritu, objevuje se i kalcit (Obr. 438E). Uranová mineralizace v metasomatitech (pokud je přítomna) je vázána převážně na štěpné plochy biotitu, popřípadě hydrobiotitu či chloritizovaného biotitu (Obr. 439A, C). Na rozdíl od mineralizace na grafitizovaných zónách, metasomatity neobsahují pyrit ani větší množství jílových minerálů. Pyrit, pokud je přítomen, je velmi často uzavírán přímo v coffinitu (Obr. 439D). Nejedná se tedy o nahrazování pyritu coffinitem jako na zónách, ale o vznik malého množství novotvořeného pyritu při redukci hydrotermálních roztoků. Redukce uranonosných hydrotermálních roztoků tedy nebyla způsobena oxidací pyritu, ale redukcí dvojmocným železem aluminosilikátů. To se projevuje vazbou uranové mineralizace na štěpné plochy biotitu nebo chloritizovaného biotitu (Obr. 439A, B, C). Vilhelm et al. (1984) prokázali pomocí Mössbauerovy spektrometrie, že zatímco v nepřeměněných biotitech je 89 % železa přítomno jako Fe^{2+} a pouze 11 % jako Fe^{3+} , v hydrobiotitech a chloritech, na které je vázáno uranové zrudnění, činí množství Fe^{2+} pouze 54–56 %, a množství Fe^{3+} se zvyšuje na 44–46 %. V metasomatitech převládá coffinit se zachovalými relikty uraninitu a zejména směsi uranových minerálů, oxidů Zr a Ti (Obr. 439B). Mimo to se v alterovaných horninách vyskytují i novotvořená zrna anatasu a hydrozirkonu. Hydrozirkon se vyskytuje buď v nepravidelných agregátech, nebo narůstá kolem zrn klastických zirkonů. Mineralizované i nemineralizované metasomatity jsou velmi často postiženy nejmladšími procesy křehké deformace, kdy vznikají jejich brekcie (Obr. 438F). Základní statistické charakteristiky souboru sodných metasomatitů jsou uvedeny v tabulce (Tab. 169), data jsou uvedena v Elektronická příloha 125. Obsahy Si jsou převážně velmi nízké (medián: 19 váh. %), obsahy U (15,7 až 35,6 ppm), a prvků, které se vyskytují ve směsi s uranovými minerály (Ti: 0,57 až 0,84 váh. %, Zr: 2,9 až 39,4 ppm) výrazně kolísají, v závislosti na stupni metasomatózy a intenzitě mineralizace.



Obr. 438 A: Makrofotografie typického sodného metasomatitu. Vzorek je tvořen převážně albitem, který zatlačuje původní plagioklasy. Jejich načervenalý vzhled je způsoben jemně rozptýleným hematitem. Vysoká porozita vzorků je způsobena zejména rozpouštěním křemene. Šířka fotografie: 28 mm. D.B. 296GCJ0057. B: Mikrofotografie typického sodného metasomatitu. Zbytky původních lamelovaných plagioklasů (šedá barva) jsou zatlačovány červenavým albitem. Hornina obsahuje zbytky silně chloritizovaného biotitu. Bez nikolu, D.B. 296GCJ0052. C: Počáteční stádium albitizace. Relikty původních lamelovaných plagioklasů jsou korodovány a nahrazovány růžovým albitem. Biotit (černě) je zachován, hornina však ještě není porézní. D: Pokročilé stádium metasomatické přeměny. Růžový albit z větší části nahrazuje původní plagioklasy, křemen je však zcela rozpuštěn za vzniku zejících dutin, E: Novotvořené vějířovité chlority a kalcit, které jsou typické pro zrudnělé metasomatity. V hornině se vedle novotvořeného chloritu vyskytují zbytky silně chloritizovaného biotitu. F: Brekcie původního metasomatitu, která vzniká v mladších pochodech křehké deformace. D.B. 296GCJ0049



Obr. 439 Uranové zrudnění v sodných metasomatitech. A: směs uranových minerálů (převážně coffinit, minerálů Ti (anatas) a Zr (hydrozirkon) na plochách štěpnosti chloritizovaného biotitu v metasomatitu B: Poloha U-Zr-Ti směsi s jehlicovými krystaly markazitu (bílé lamely), se zbytky coffinitizovaného uraninitu a se zrna galenitu mezi zrna albitu v metasomatitu. C: U-Ti-Zr směsi na štěpných plochách chloritizovaného biotitu. D: poloha coffinitu se zrna novotvořeného pyritu a reliktů původního uraninitu v metasomatitech. SEM, BSE, D.B. 296GCJ0058

Tab. 169 Základní statistické charakteristiky souboru vzorků, odebraných ze sodných metasomatitů (archivní vzorky). Koncentrace Al, Si, K, Ca, Fe a Ti ve váhových procentech, koncentrace ostatních prvků v ppm. Min: minimální hodnota, Max: maximální hodnota. Počet vzorků: 17

	Al	Si	K	Ca	Fe	Ti
Max.	9,68	35,57	2,58	15,59	6,69	0,84
Percentil 75	7,79	23,76	1,85	10,35	5,45	0,75
Median	6,87	18,98	1,35	5,36	2,46	0,27
Percentil 25	6,20	16,20	0,80	1,41	1,45	0,15
Min.	5,84	15,70	0,37	0,22	1,31	0,08
Šikmost	-1,83	0,01	0,14	0,46	0,45	0,57
	V	Mn	Zn	Rb	Sr	Y
Max.	9,68	35,6	2,58	15,6	6,69	0,84
Percentil 75	7,76	22,4	2,08	8,89	6,10	0,77
Median	7,19	18,9	1,32	5,18	2,89	0,39
Percentil 25	5,93	15,8	0,48	0,71	1,35	0,16
Min.	39,4	114	18,8	6,10	121	10,7
Šikmost	-1,80	0,14	0,16	0,77	0,19	0,07
	Zr	Ba	Pb	Bi	U	
Max.	39,4	114	18,8	15,6	121	
Percentil 75	7,78	23,4	2,02	8,19	5,93	
Median	6,87	18,9	1,07	5,09	2,20	
Percentil 25	5,86	15,7	0,39	0,53	1,32	
Min.	78,0	203	10,5	11,0	18,0	
Šikmost	2,97	2,91	3,55	0,89	3,71	

2.4.6.1.3 Doprovodné prvky uranové mineralizace

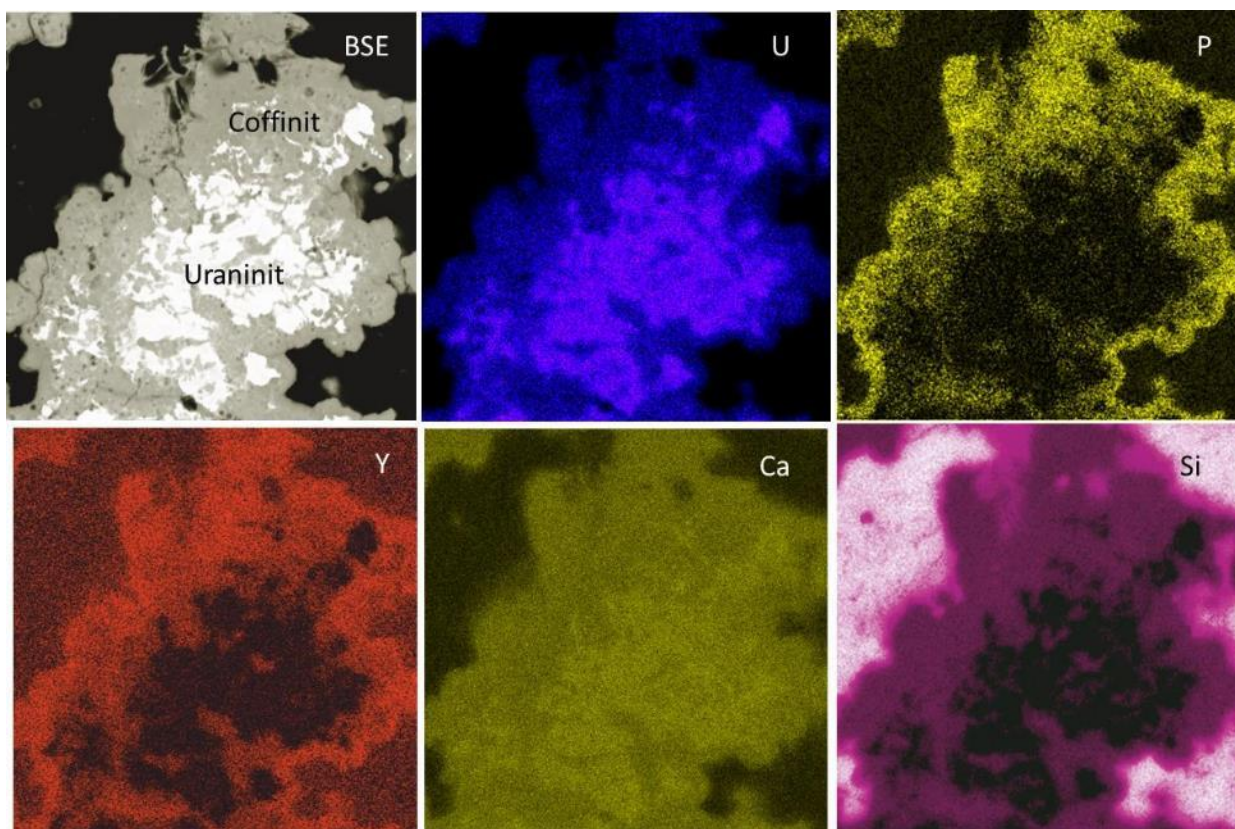
Součástí projektu bylo i zhodnocení koncentrací tzv. kritických prvků (Nb, Ta Sc, REE a Y) které doprovázejí uranovou mineralizaci, tj. obsahy uvedených prvků ve vzorcích typické uranové rudy jsou uvedeny v Tab. 170. Koncentrace Nb se pohybují mezi 9–10 ppm, koncentrace Sc mezi 14–20 ppm. Ve srovnání s uvedenými prvky jsou koncentrace Ta velmi nízké (0,6–0,7 ppm). Ze vzácných zemin (REE) převládá Ce (45–78 ppm), La (22–36 ppm) a Nd (20–35 ppm). Koncentrace ostatních vzácných zemin jsou nízké a nepřevyšují 7 ppm. Průměrný obsah REE v surovině činí 163 ppm (medián). Mimo REE obsahuje surovina i zvýšené obsahy Y (18–31 ppm). Možnost získávání uvedených „kritických“ prvků v procesech úpravy suroviny je do značné míry závislá na jejich vazbě v surovině. Proto byla sledována i jejich vazba na jednotlivé minerální fáze uranové rudy.

Tab. 170 Základní statistické charakteristiky koncentrací Nb, Ta, Sc, vzácných zemin a Y v průměrných vzorcích uranové rudy na ložisku Rožná. Koncentrace v ppm, 6 vzorků

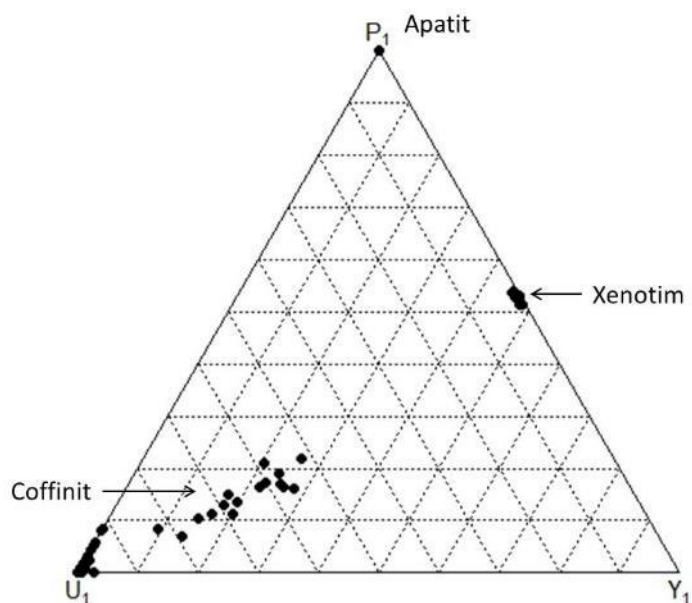
	Nb	Ta	Sc	Gd	Tb	Dy
Max.	10,0	0,7	19,7	7,1	1,0	5,6
Kvantil 0,75	9,77	0,7	17,6	6,15	0,85	4,85
Median	9,63	0,7	15,1	5,3	0,7	4,5
Kvantil 0,25	9,38	0,7	14,5	4,05	0,6	3,35
Min.	8,71	0,6	14,3	3,70	0,5	3,2
	La	Ce	Pr	Y	Ho	Er
Max.	35,6	78,4	10,7	30,5	1,31	2,91
Kvantil 0,75	29,9	65,3	8,41	28,8	1,05	2,85
Median	24,7	55,1	7,20	27,9	0,9	2,7
Kvantil 0,25	24,2	49,7	6,25	18,1	0,71	1,92
Min.	21,9	45,8	6,11	17,6	0,61	1,82
	Nd	Sm	Eu	Tm	Yb	Lu
Max.	35,3	7	1,8	0,5	2,7	0,4
Kvantil 0,75	29,4	6,1	1,7	0,4	2,5	0,4
Median	24,6	5,20	1,6	0,4	2,30	0,3
Kvantil 0,25	21,9	4,25	1,2	0,3	1,65	0,3
Min.	20	4	1,1	0,3	1,5	0,3

Bylo zjištěno, že obsahy Nb jsou vázány především na anatas (0,05–0,06 váh. %) a na směsi U-Ti-Zr s převahou Ti (0,004–0,02 váh. %). Vyšší koncentrace Ta nebyly při studiu jednotlivých minerálů mikrosondou detekovány. Obsahy Sc ve směsi minerálů U-Ti-Zr se pohybovaly od 0,003 do 0,15 váh. %, v anatasu od 0,08 do 0,15 váh. % a v hydrozirkonu od 0,09–0,15 váh. %. Přehledně jsou obsahy uvedených prvků v jednotlivých minerálních fázích a v jejich směsích uvedeny v Elektronická příloha 126.

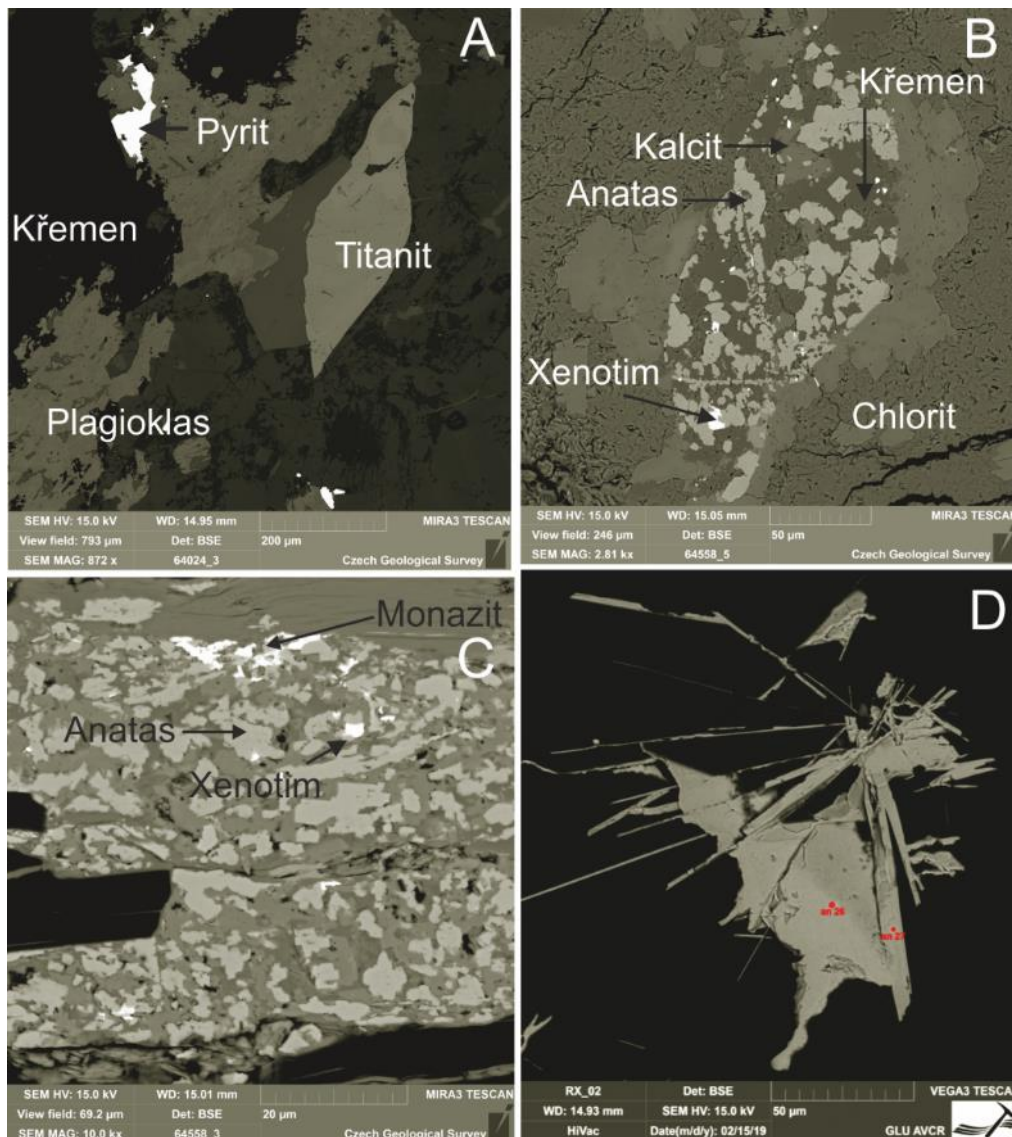
Podobně jako ve vzorcích uranových rud, dominovaly v coffinitu a ve směsích U-Zr-Ti minerálů ze vzácných zemin La, Ce, Nd a Y. Plošná distribuce Y ukazuje (Obr. 440), že vysoké obsahy tohoto prvku v minerálech uranu (coffinit, uraninit) je zřejmě způsobena přítomností xenotimu (YPO_4). Nejedná se o apatit, protože distribuce Ca a Y v minerálních směsích nekoreluje (Obr. 440) Míšení xenotimu a uranových minerálů ve směsích potvrzuje i trojúhelníkový diagram P-U-Y (Obr. 441). Co se týče vzácných zemin, zvýšené obsahy La a Ce v uranové mineralizaci jsou zřejmě způsobeny přítomností monazitu-(Ce) ($Ce,La,Nd,Th(PO_4)$) a synchysitu-(Ce) ($Ca(Ce,La)CO_3)_2F$). Přítomnost obou minerálů byla v uranových rudách potvrzena mikrosondou, PXRD analýzami i Ramanovou spektroskopií. Zdrojem vzácných zemin v hydrotermálních procesech byl zřejmě rozpad titanitu na anatas, kalcit, křemen a minerály vzácných zemin (fosfáty a karbonáty; Obr. 442).



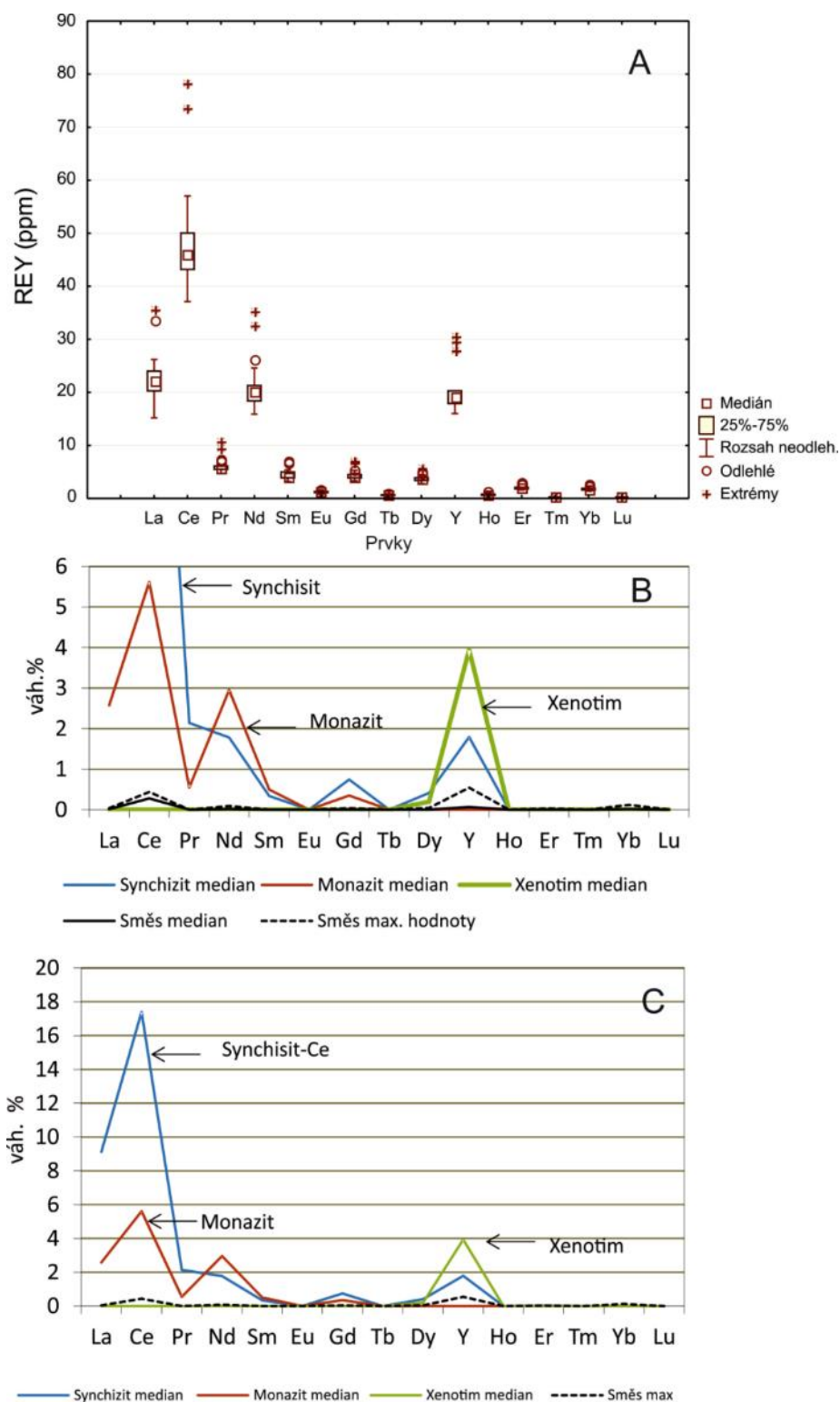
Obr. 440 Plošná distribuce U, P, Y, Ca a Si v uraninitu (bílý) a coffinitu (světle šedý). Distribuce Y velmi dobře koreluje s distribucí U a P v coffinitu. Naopak, plošná distribuce Ca a P nekoreluje. Nejedná se tedy o apatit, ale o směs coffinitu a xenotimu. D.B. 296GCJ0019_017



Obr. 441 Trojúhelníkový diagram P-U-Y. Váhová procenta jednotlivých prvků, přepočteno na 100 %. Z obrázku vyplývají nízké koncentrace P a Y v čistém uraninitu (vrchol U) a naopak míšení coffinitové a xenotimové složky v minerálních směsích



Obr. 442 Zdrojem vzácných zemin na ložisku Rožná byl zřejmě hydrotermální rozklad velmi rozšířeného titanitu (CaTiSiO_6), který obsahuje zvýšené obsahy vzácných zemin, U a Th. Zrna titanitu v nealterovaných horninách (A) se v hydrotermálním procesu rozpadají na kalcit, křemen a minerály vzácných zemin (B, C). V přítomnosti P vznikají fosfáty vzácných zemin (monazit, xenotim), při zvýšených koncentracích karbonátových iontů vzniká synchysit ($\text{Ca}(\text{Ce},\text{La})(\text{CO}_3)\text{F}$), (D). Obsahy vzácných zemin v uranových rudách, tj. relativně vysoké obsahy La, Ce, Nd a Y (Obr. 443A), tak korespondují s vysokými obsahy stejných prvků v monazitu, xenotimu a synchysitu (Obr. 443B, C). Dokumentační body 296GCJ0019 a 296GCJ0467



Obr. 443 Distribuce vzácných zemin v průměrné uranové rudě (v ppm; A) a v minerálech vzácných zemin na ložisku Rožná ve srovnání s průměrnou rudou (váh. %; B). C: Stejný obrázek jako B, jiná škála na ose y. Koncentrace REE a Y v průměrné uranové rudě na ložisku Rožná jsou uvedena v Elektronická příloha 127

2.4.6.1.4 Doprovodné polymetalické a barytové mineralizace na ložisku Rožná

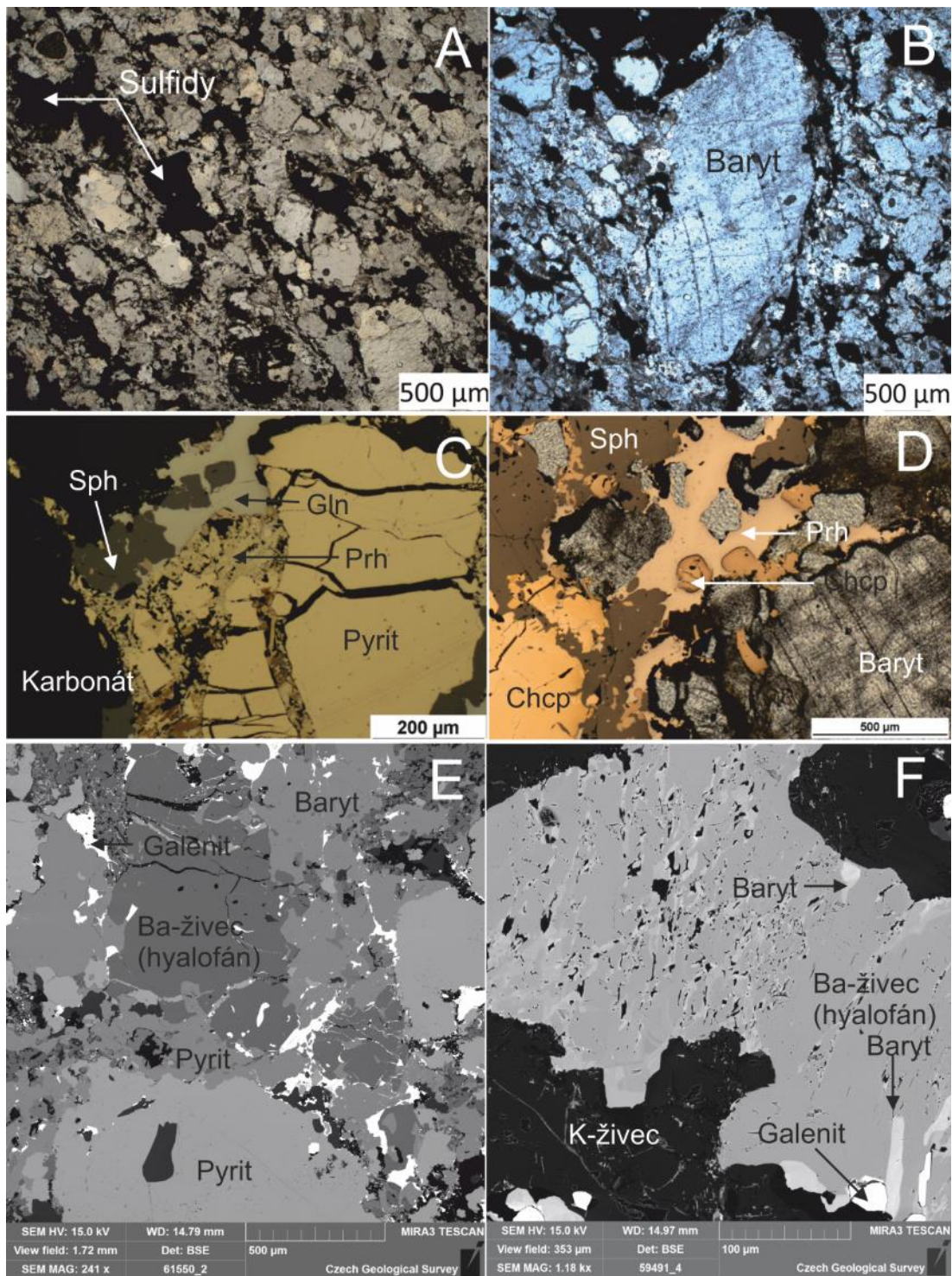
Mimo uranové mineralizace se na ložisku Rožná vyskytují různé typy polymetalických a barytových mineralizací, které jsou charakterizovány v následujícím přehledu:

1. Skarnové typy mineralizace

Jedná se o stratiformní tělesa hořečnatých skarnů, které vznikly podél kontaktů pruhů dolomitů a rul v průběhu metamorfních procesů. Jejich pravá mocnost nepřesahuje 1 m. Formování skarnů probíhalo v několika stádiích. V prvním z nich vznikly hořečnaté skarny s typomorfními minerály – forsteritem, spinelem, klinopyroxenem, plagioklasem titanitem a s akcesorickým apatitem a zirkonem. V následující etapě byl spinel nahrazován flogopitem, forsterit serpentinem, plagioklas skapolitem a pyroxen amfibolem. Ve třetím, sulfidickém stádiu došlo k sulfidaci skarnů za vzniku masivního pyrhotinu, sfaleritu, galenitu, chalkopyritu, arsenopyritu a pyritu (Bojcov 1974). Masivní pyrhotinové akumulace se sfaleritem a chalkopyritem jeví polygonální strukturu typickou pro metamorfní sulfidy. Pyrhotin se vyskytuje ve své hexagonální modifikaci a v procesech retrográdní metamorfózy dochází k jeho transformaci na směs monoklinického pyrhotinu a pyritu (Doležalová 2003). Množství S_{tot} ve vzorcích analyzovaných v rámci této práce (dokumentační body 296GCJ0061, -0062 a -0063) se pohybuje mezi 4,9 a 32 váh. %. Koncentrace Cu dosahují až 2 488 ppm, Zn až 121 ppm Pb až 505 ppm a Sn až 94 ppm) jsou tedy velmi nízké (viz Elektronická příloha 128).

2. Stratiformní baryt-hyalofan sulfidická mineralizace

Tento typ mineralizace byl na ložisku popsán Vencelidesem, (1991) a Kříbkem a Uhlíkem (1993) a je tvořen až několika metry mocnými polohami barytových hornin se sulfidy, baryt-sulfidickými mylonity a různými typy erlanových rud s barytem a sulfidy (Obr. 444). Pyrit, pyrhotin, galenit a sfalerit převládají, vyskytuje se i markazit. Chalkopyrit je zastoupen daleko méně. Křemen-karbonátové žilky ve stratiformních polohách barytu často obsahují zrna galenitu a sfaleritu a dobře omezená zrna pyritu. Drobná zrna pyrargyritu a Ag-tetraedritu zřejmě vznikají odmišlením stříbra v procesech regionální metamorfózy. Geochemické složení masivních baryt-sulfidických rud bylo v rámci této práce sledováno pouze na několika vzorcích (296GCJ0016, 296GCJ0021 a 296 GCJ0023) Koncentrace síry se pohybovaly mezi 8–10 váh. %, Fe mezi 0,9–4 váh. %, Ba mezi 34–48 váh. % a Zn mezi 3–9,2 váh. %. Tyto rudy dále obsahovaly zvýšená množství Ni (233–293 ppm), As (326–585 ppm), Sn (372–389 ppm) a stopová množství Ag (42–74 ppm) a Mo (11 ppm; Elektronická příloha 129). Kříbek a Uhlík (1993) uvádějí pro tento typ rud v průměru 60 % $BaSO_4$, 3,2 % Zn, 1,8 % Pb a 105 ppm Ag. Baryt-sulfidické rudy jsou obvykle vázány na několik metrů mocné polohy mramorů a erlanů, které obsahují 0,14–0,4 váh. % Ba, 15–201 ppm Pb a 45–528 ppm Zn (dokumentační body 296GCJ0020, 296GCJ0022 a 296GCJ0025).



Obr. 444 A: Mylonitizovaná okrajová část stratiformní baryt-sulfidické mineralizace tvořená zrny barytu, karbonátů a sulfidů. Procházející světlo, bez nikolu, D.B. 296GCJ0020. B: Detail mylonitizované polohy s korodovaným zrnem barytu. Bez nikolu, D.B. 296GCJ0021. C: Zrno klasticky porušeného pyritu, rekrystalizovaný galenit (Gln), sfalerit (Sph) a novotvořený pyrhotin (Prh). Procházející i odražené světlo. D.B. 296GCJ0025 D: Granoblastická textura rudy, tvořená barytem, sfaleritem (Sph), chalkopyritem (Chcp) a pyrhotinem (Prh). Procházející i odražené světlo. D.B. 296GCJ0025. E: Zrna barnatého živce (hyalofanu), barytu, galenitu, pyritu a sfaleritu. D.B. 296GCJ0024. SEM, BSE. F: Zatlačování barnatého živce barytem, SEM, BSE. Dokumentační bod 296GCJ0024

3. Předuranová křemen-karbonát-sulfidická mineralizace žilného typu

Tato mineralizace je starší nežli uranová mineralizace a tvoří jednak samostatné žíly o mocnosti do 1 m a o směru 10–30° s úklonem 60–80° k SZ i JV v podloží zóny R1. Formování této mineralizace proběhlo ve dvou stádiích. V poněkud starším, křemen-sulfidickém stádiu je mineralizace tvořena převážně polygonálními zrny křemene a pyritu, xenomorfními zrny monoklinického pyrotinu a idiomorfními zrny pyritu, které obsahují drobné inkluze chalkopyritu a arsenopyritu. Poněkud mladší karbonát-sulfidická mineralizace je tvořena sideritem, karbonáty ankerit-dolomitového chemismu, galenitem a hnědým sfaleritem, méně jsou zastoupeny chalkopyrit, pyrit, tetraedrit, boulangerit a bournonit, freibergit, stefanit a akantit (Vencelides (1991). Galenit je silně semiplasticky deformován, jeho agregáty mají až stébelnatý vzhled. Energiově disperzní analýzou byly dále identifikovány boulangerit, proustit-pyrargyrit, stefanit a tetraedrit-freibergit (Kvaček et al. 1973; Bajuškin et al. 1981; Vilhelm et al. 1984).

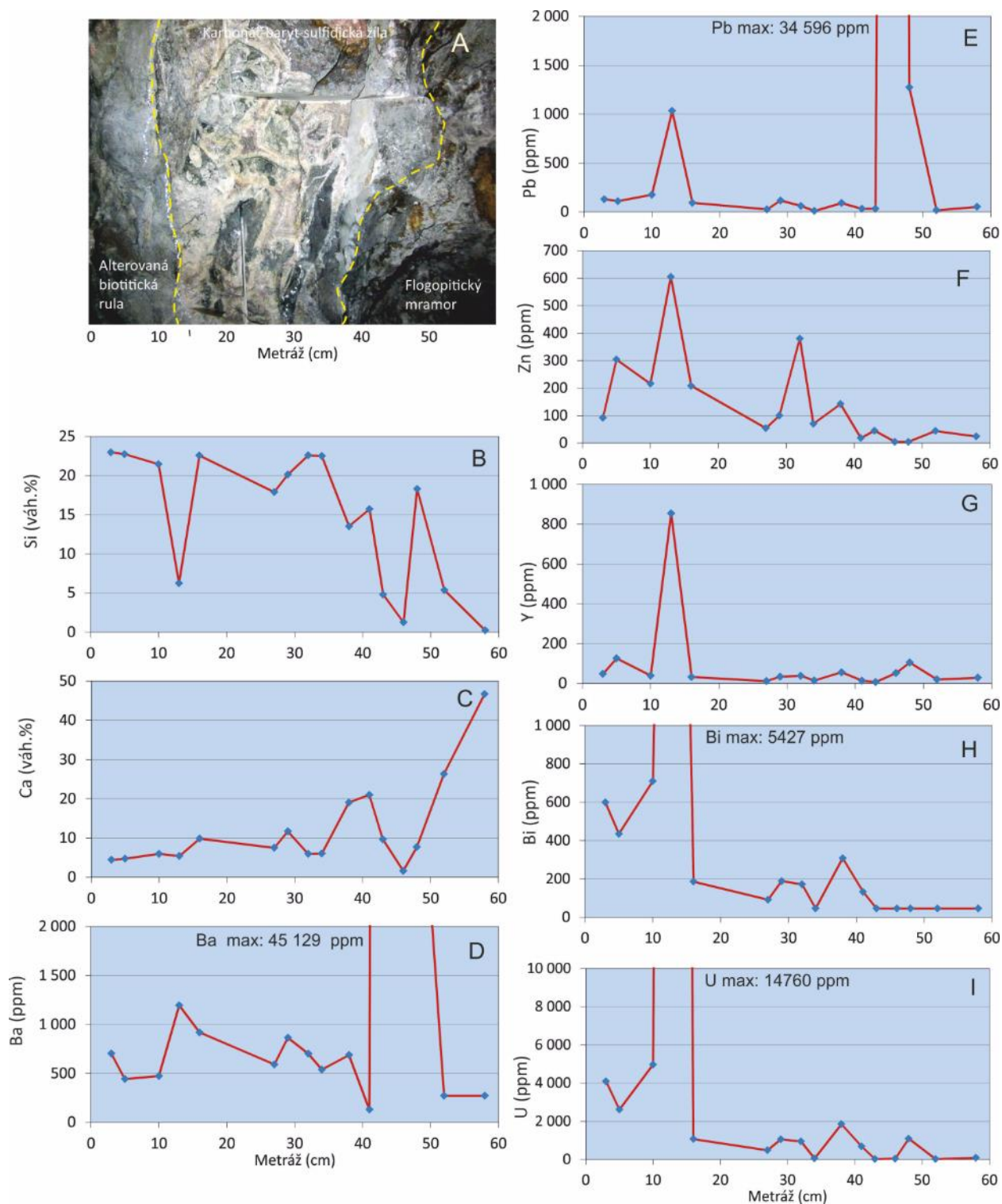
4. Pouranová křemen-karbonát-baryt-sulfidická mineralizace žilného typu

Tuto mineralizaci tvoří křemen-kalcit-sulfidické žíly o mocnosti do jednoho metru, které se vyskytují buď samostatně, nebo tmelí brekcie tvořené úlomky předuranové siderit-karbonátové mineralizace. V místech, kde tato mineralizace protíná starší uranovou mineralizaci, se v žilovině objevují zrna coffinitu nebo uraninitu. Okraje žil jsou většinou tvořeny jemnými, paprscitými agregáty křemene, které jsou velmi často lemovány světlehnědým až žlutohnědým sfaleritem. Běžně se vyskytují hřebenovité křemeny (Křibek a Hájek 2005).

Projevy pouranové křemen-karbonát-baryt-sulfidické mineralizace byly studovány na dvou profilech. **První profil** byl studován na 24. patře ložiska Rožná (PŠ1-242, dokumentační bod 296GCJ0018, profil se vzorky 296GCJ0018_001 až 296GCJ0018_019). Základní statistické údaje o koncentracích vybraných prvků jsou uvedeny v Tab. 171 a v Elektronická příloha 130. Vyplývá z ní, že mimo vysokých koncentrací Ba (baryt), Pb a Zn (sulfidy) jsou horniny charakteristické i vysokými obsahy U, Pb, Hf a Zr. Tedy prvky, které doprovázejí uranovou mineralizaci. Jedná se zřejmě o jejich remobilizaci do karbonát-barytové žíly v mladších (mezozoických) tektonických procesech. Distribuce vybraných prvků v této žíle je uvedena na Obr. 445. Levý okraj studované žilné struktury je tvořen alterovanými biotitickými pararulami, její pravý okraj flogopitickým mramorem (Obr. 445A). Tomu odpovídají i vysoké obsahy Ca a nízké obsahy Si v mramoru ve srovnání s pararulou, Distribuce dalších prvků ve vlastní žíle se výrazně liší: nejvyšší koncentrace Ba (až 4,5 váh. %) a Pb (až 3,4 váh. %) se nachází na pravé straně žíly a odpovídá asociaci baryt-galenit, která je typická pro pouranovou mineralizaci. Naopak, nejvyšší obsahy U (až 1,4 váh. %), Bi (až 0,54 váh. %) a Y (až 840 ppm) jsou vázány na levou stranu žíly. Rozdílnou distribuci uvedených prvků interpretujeme jako překrývání dvou typů mineralizace: starší uranové a mladší baryt-polymetalické, ke kterému došlo na stejné struktuře. Projekce jednotlivých prvků do faktorové roviny 1 a 2 ukazuje, že se vzorky odebrané z hornin tvořící okraje žíly (vzorky 1, 2, 3 a 17, tj. vzorky pararuly a mramoru) výrazně liší od ostatních vzorků, které byly odebrány přímo ze žilné struktury (Obr. 446A) a které tvoří homogenní skupinu. Výsledky analýzy hlavních faktorů 1 a 2, které určují grupování jednotlivých prvků v žíle (Obr. 446B) a které vysvětlují 67,2% variability souboru jasně vymezují dvě prvkové asociace: starší uranovou (skupina U, Y, Bi, Zr, Zn a K) a mladší baryt-polymetalickou (Ba, Cr, V, Ti, Pb, As a S_{tot}).

Tab. 171 Základní statistické parametry distribuce vybraných prvků na pouranové křemen-baryt-karbonát-sulfidické žíle. Obsahy Al až Ti ve váh. %, ostatní prvky v ppm. Počet vzorků: 19. 24. patro ložiska Rožná (PŠ1-242, dokumentační bod 296GCJ0018, profil se vzorky 296GCJ0018_001 až 296GCJ0018_019)

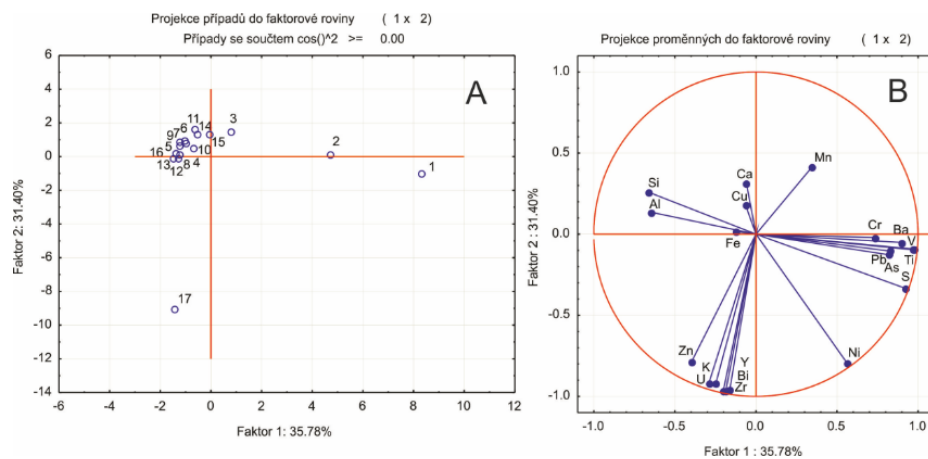
	Al	Si	S _{tot}	K	Ca	Fe	Ti
Max.	9,34	22,8	10,8	8,92	46,7	8,04	11,3
Kvantil 0,75	8,16	21,7	0,34	0,87	13,5	5,17	0,45
Median	6,72	16,8	0,02	0,60	7,59	4,14	0,34
Kvantil 0,25	1,46	5,23	0,02	0,35	5,82	2,01	0,11
Min.	0,11	0,21	0,01	0,05	1,62	1,12	0,01
Šikmost	-0,42	-0,43	2,95	3,60	2,15	0,48	2,70
	V	Mn	Zn	As	Rb	Sr	Y
Max.	2 1305	4 185	92 710	585	100	1 685	854
Kvantil 0,75	156	2120	238	5,00	22,3	480	53,0
Median	111	1417	85,0	2,50	14,0	242	33,3
Kvantil 0,25	67,5	695	39,0	2,50	6,10	137	14,1
Min.	8,50	376	9,10	2,50	6,10	82,	6,60
Šikmost	2,68	1,10	4,00	3,99	2,34	1,96	3,83
	Zr	Nb	Ba	Ce	Hf	Pb	U
Max.	19 066	6,30	45 128	179	810	34 596	14 760
Kvantil 0,75	509	2,60	1056	66,0	18,8	131	1285
Median	314	2,60	687	33,0	14,7	76,2	818
Kvantil 0,25	34,5	2,60	458	33,0	9,50	30,5	57,6
Min.	15,6	2,60	131	33,0	4,60	10,5	24,0
Šikmost	3,94	1,97	2,49	2,82	3,29	3,99	3,28



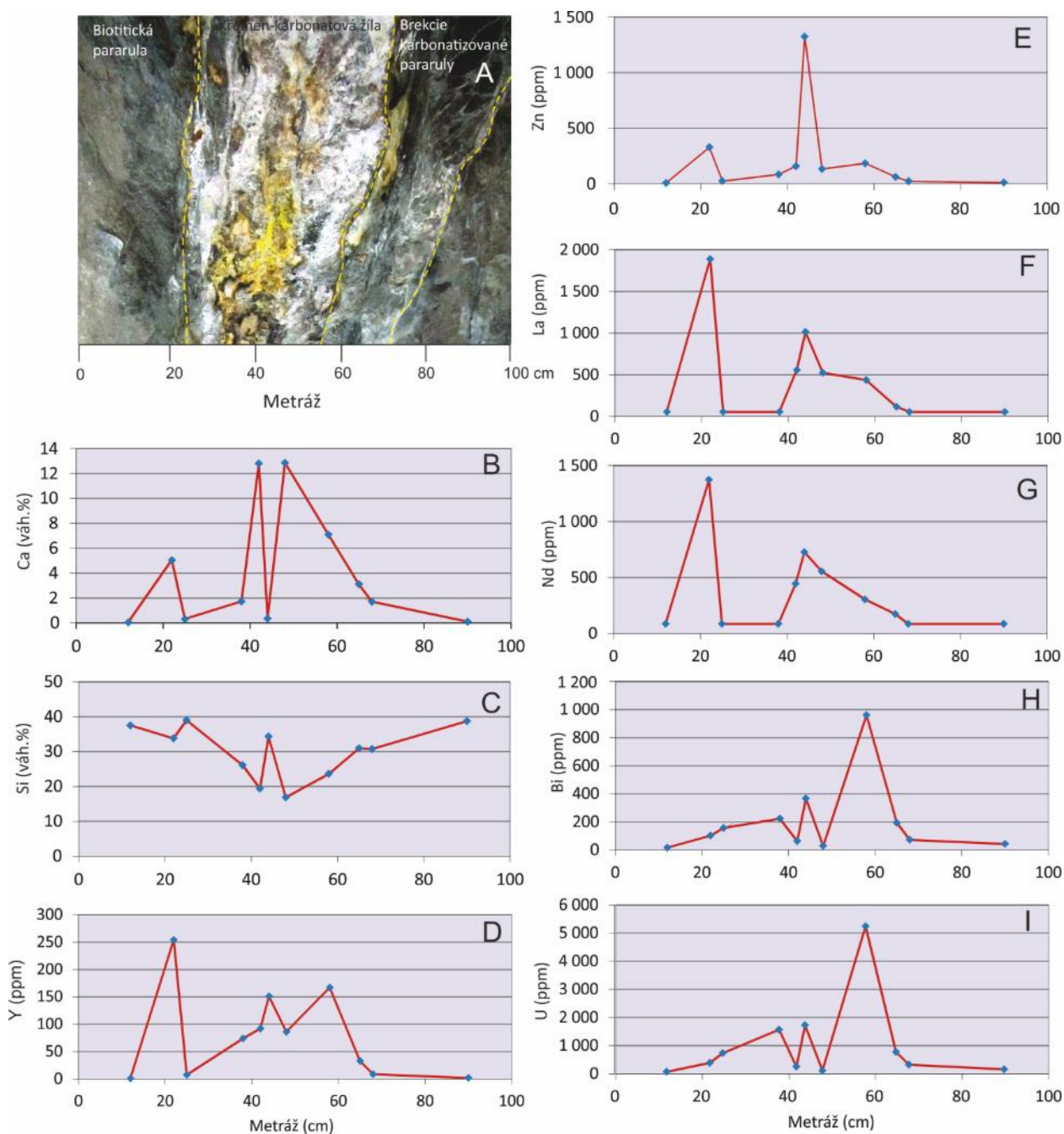
Obr. 445 A: Makrofotografie křemen-baryt karbonátové žíly a distribuce obsahů Si (B), Ca (C), Ba (D), Pb (E) Zn (F) Y (G), Bi (H) a U (I). 24. patro ložiska Rožná (PŠ1-242, dokumentační bod 296GCJ0018)

Tab. 172 Základní statistické údaje o distribuci vybraných prvků v pouranové karbonát-křemenné žíle na 20. patře ložiska Rožná, dokumentační bod 296GCJ0018. Koncentrace Si, Ca, K, Fe, S ve váhových procentech, koncentrace ostatních prvků v ppm. Počet vzorků: 10

	Si	Ca	K	Fe	S _{tot}	Ti	V
Max.	39,0	12,9	2,8	5,6	5,1	4 442	519
Kvantil 75	35,9	6,1	0,4	0,1	0,7	532	304
Medián	30,9	1,7	0,2	0,1	0,1	294	146
Kvantil 25	24,9	0,3	0,2	0,0	0,0	116,5	22,4
Min.	16,8	0,1	0,1	0,0	0,0	56,00	4,8
Šikmost	-0,54	1,16	3,06	3,28	1,94	3,12	0,80
	Mn	Zn	Sr	Y	Zr	Sb	La
Max.	1 722	1 324	69	254	189	1 360	1 888
Kvantil 75	477	170	12,3	122	19,4	20,0	541
Medián	233	84,0	5,8	74	5,9	11,0	117
Kvantil 25	64,5	23,2	1,8	8,0	2,5	9,0	56
Min.	10,0	6,3	1,20	0,9	2,3	4,5	56,0
Šikmost	1,61	2,95	2,90	1,0	2,09	3,31	1,90
	Ce	Nd	Pb	Bi	U		
Max.	3 106	1 372	2 727	960	5 232		
Kvantil 75	930	500	402	209	1 168		
Medián	244	174	174	102	386		
Kvantil 25	30,0	86,0	16,9	53,0	204		
Min.	30,0	86,0	4,2	16,0	67,0		
Šikmost	1,81	1.81	5.53	2.56	2.02		



Obr. 446 Projekce geochemických dat do faktorové roviny (1 x 2) a výsledky analýzy hlavních komponent (faktory 1 a 2)



Obr. 447 Makrofotografie křemen-karbonátové žíly studované na 20. patře ložiska Rožná (A) a distribuce obsahů Ca (B), Si (C), Y (D), Zn (E), La (F) Nd (G), Bi (H) a U (I)

Druhý profil pouranové žilné mineralizace byl studován na 20. patře ložiska Rožná (karbonát-křemenná žíla, RV420–101, dokumentační bod 296GCJ0467, profil se vzorky 296GCJ0467_001 až 296GCJ0467_010). Tato žíla je tvořena několika generacemi karbonátu a křemene, které jsou navzájem odděleny až několik milimetrů mocnými polohami bohatých pyritem. Na povrchu žíly byly pozorovány povlaky sekundárních uranových minerálů. Základní statistické údaje o koncentraci vybraných prvků jsou uvedeny v Tab. 172 a v Elektronická příloha 131. Distribuce vybraných prvků na této struktuře je uveden na Obr. 447. Rozdílné obsahy Ca a Si na této struktuře odpovídají variacím v zastoupení křemene a karbonátů. Mimo slabé sulfidické

mineralizace (sfalerit) obsahují karbonáty a křemen žilné výplně poměrně vysoké obsahy La, Nd a Y, což odpovídá výskytu hojného synchysitu a zvýšené obsahy U a Bi které indikují přítomnost remobilizované uranové mineralizace.

2.4.6.1.5 Revalidace zbytkového ložiskového potenciálu ložiska Rožná

Současný stav zbytkových zásob uranu a doprovodných mineralizací na ložisku Rožná

V současné době činí bilanční prozkoumané (volné) zásoby všech uvedených typů uranových rud 98 tis. t suroviny. Bilanční vyhledané (volné) zásoby činí 66 tis. t suroviny při průměrném obsahu 0,187 váh. % U. Nebilanční zásoby činí 265 tis. t (stav v roce 2018; Starý a Novák 2019). Evidované zásoby jsou pro obnovení těžby nedostatečné.

Ostatní rudy, které se vyskytují na ložisku Rožná, tj. skarnová polymetalická mineralizace, předuranová a pouranová žilná polymetalická mineralizace a selenidová mineralizace nemají z ekonomického hlediska žádný význam. Na ložisku se však vyskytuje poměrně značné množství stratiformních baryt-sulfidických rud, jejichž vyhledané volné zásoby činí 120 tis. t při průměrných obsazích 60 % BaSO₄, 3,2 % Zn, 1,8 % Pb a 105 ppm Ag. Prognózní zdroje této suroviny činí 2 mil. t (Kříbek a Uhlík 1993). Dobývání těchto rud by však bylo možné pouze v případě těžby uranu (tj. jako vedlejší produkt těžby uranových rud) a za předpokladu vyřešení technologie jejich úpravy.

Stav prozkoumanosti zásob pod 24. patrem ložiska

Stanovení prognózních zdrojů pod tímto patrem je velmi obtížné. Geologické práce na ověření uranového zrudnění pod úrovní 22. patra byly provedeny v letech 2008 a 2009. Z průzkumných prací vyplynulo, že uranové zrudnění má omezené rozšíření a je určováno strukturním plánem ložiska. Bylo provedeno 31 vrtů pod 22. patrem (Hájek a Zábojník 2009). Výsledky z průzkumu a těžby mezi patry 22 a 24 dokládají, že se zmenšila mocnost a velikost dobývaných rudních těles, ale zvýšila se kontrastnost zrudnění. Zrudnění na systému 1 (první zóna) je tvořeno disperzním zrudněním s mocnostmi až 4 m, ale s obsahy většinou pod 0,04 %. Dosavadním vrtným průzkumem ukončeným v roce 2009 pod 24. patrem bylo potvrzeno zrudnění jak na zóně 1, tak i na subparalelních strukturách 17 a 18. Na systému 4 nebyla v úrovni 24. patra uranová mineralizace zjištěna.

Uranová mineralizace je pod 24. patrem lokalizována hlavně v doprovodných, zejména smykových zónách a žilách SSZ–JJV a SZ–JV směru. Mocnost zrudnění a obsah uranu zjištěné v pozitivních vrtech pod úrovní 24. patra odpovídá výsledkům, dosaženým hornickým průzkumem na 24. patře. Rozsah vrtných prací neumožnil získání poznatků, které by zvyšovaly pravděpodobnost pozitivního vývoje uranového zrudnění mimo již známé oblasti. Ověření těchto předběžných výsledků by si vyžadovalo značných prostředků.

Podle současné ekonomické studie prováděné na ložisku Rožná (ústní sdělení, P. Navrátil, GEAM 2019) by činily celkové náklady na průzkum pod 24. patrem (bez otvírky dalších pater, pouze zpřístupnění oblasti odkud by se prováděly vrtné práce a realizace těchto vrtů pod úroveň 24. patra) cca 530 000 tis. Kč. Otevření dalších pater by si rovněž vyžádalo další značně vyšší finanční prostředky (doprůzkum, rozfárání, prohloubení jámy nebo nová slepá jáma). Enormně by tak vzrostly náklady na dobývání a na dopravu suroviny na povrch.

Strukturní, mineralogické a technologické faktory

Provedené modelování ložiskových těles na ložisku (viz další část této studie) ukázalo na dvě velmi důležité okolnosti. Jednotlivá ložisková tělesa jsou v centrální části ložiska uložena horizontálně, na jižním okraji se mírně uklánějí k jihu, na severním okraji k severu. Rozhodně se nejedná o rudní sloupy vertikálního charakteru, které by mohly pokračovat pod 24. patro ložiska. Z ložiskového modelu je rovněž patrné, že se plošně rozsáhlá tělesa ve svrchní a střední části ložiska do hloubky rozpadají na celou řadu menších těles s velmi variabilními koncentracemi uranu (viz následující kapitola této práce). Tento trend rozpadu rudních těles bude zřejmě pokračovat i pod 24. patrem ložiska.

Ve svrchních horizontech ložiska byly bohaté rudy vázány především na karbonátové žíly na četných zpeřených strukturách. Ve spodních horizontech se strukturní plán ložiska zjednodušuje, zpeřené struktury, na které byla vázána značná část zrudnění, jsou méně časté a hlavní podíl mineralizace je vázán především na grafitizované a pyritizované zóny a na tělesa metasomatitů. Karbonátové žíly prakticky chybí. Mineralizace na hlubokých zónách ložiska není tvořena pouze uranitem a coffinitem, ale vzrůstá množství složitých směsí tvořených minerály uranu, hydrozirkonem a anatasem. Poměrně velká část mineralizace je vázána na štěpné plochy biotitu, chloritizovaného biotitu a chloritu, a ruda je proto hůře upravitelná (tzv. refraktorní uranové rudy). Lze předpokládat, že se množství těchto směsí a mineralizace, která je vázána na štěpné plochy biotitu a chloritu bude s hloubkou postupně zvyšovat, což by znamenalo snížení účinnosti alkalického loužení suroviny.

Ekonomické faktory

Od roku 2012 cena uranu na světových trzích výrazně klesá (Tab. 173). To je způsobeno především přehodnocením úlohy jaderných elektráren při výrobě elektřiny v řadě států, zejména po nehodě ve Fukušimě v Japonsku. To se projevilo zejména plánovaným odstavením jaderných elektráren v Belgii a Německu a výrazným zpomalením rozvoje jaderné energetiky v Itálii. Toto zpomalení rozvoje jaderné energetiky se týká i řady dalších států (Argentina, Arménie, Brazílie, Korea, Ukrajina, Spojené království a USA; Uranium, 2018). Rovněž v Číně došlo k poklesu rozvoje výroby elektrické energie z jádra (2,3 GWe z nových zdrojů v roce 2016, pouze 0,6 GWe z nových zdrojů v roce 2017). Z důvodu nízké ceny uranu došlo k poklesu nebo k zastavení těžby na řadě významných světových ložiscích (ložisko McArthur River a Key Lake v Kanadě, k omezení těžby na celé řadě ložisek v Kazachstánu, k významnému poklesu těžby na uranových ložiscích v Nigeru a k zastavení těžby na ložiscích Lange Heinrich a Rössing v Namibii (Uranium 2018). Rovněž byla uzavřena řada závodů podzemního loužení uranových rud ve Spojených státech (ESA 2018). Vývoj cen uranu na světových trzích v budoucnosti lze predikovat pouze obtížně, rozhodně však v nejbližších letech nelze očekávat skokové zvýšení ceny uranu tak, jak tomu bylo v letech 2011 a 2012.

Vzhledem k uvedeným skutečnostem považujeme stav zbytkových surovinových zdrojů na ložisku Rožná za nedostatečný a možnost obnovení těžby na ložisku Rožná za nereálnou.

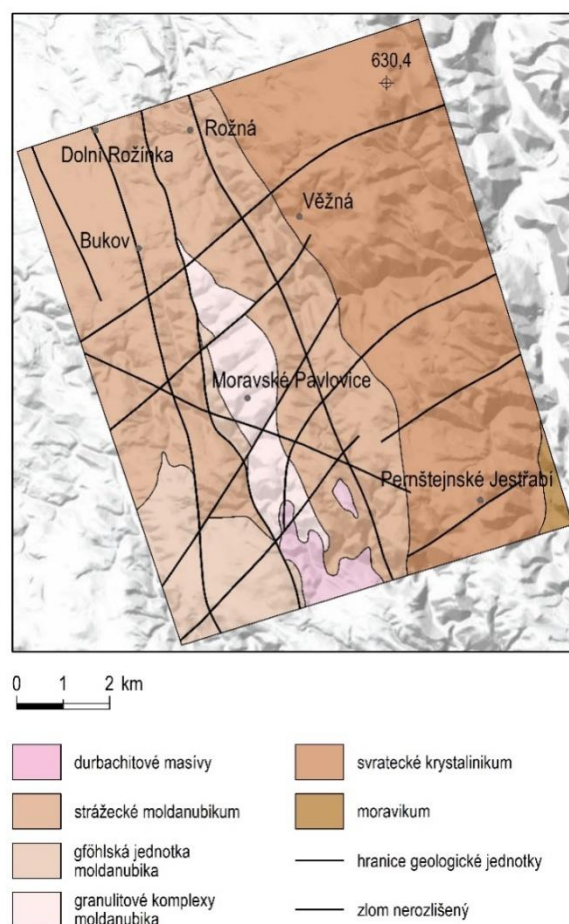
Tab. 173 Průměrné roční ceny za přírodní uran (EUR/kg U) podle ESA, 2017

Rok	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Dlouhodobé kontrakty	55,70	61,68	83,45	90,03	85,19	78,31	94,30	86,62	55,16
Okamžité nákupy	77,96	79,48	107,43	97,80	78,24	74,65	88,73	88,56	23,97

2.4.6.1.6 Posouzení možného pokračování ložiskových struktur ložiska Rožná jižně od jámy B-1

V rámci stávajícího projektu byly studovány i koncentrace hlavních i stopových prvků na půdně-metalometrických profilech vytyčených společností Geomin s.r.o. jižně od ložiska Rožná.

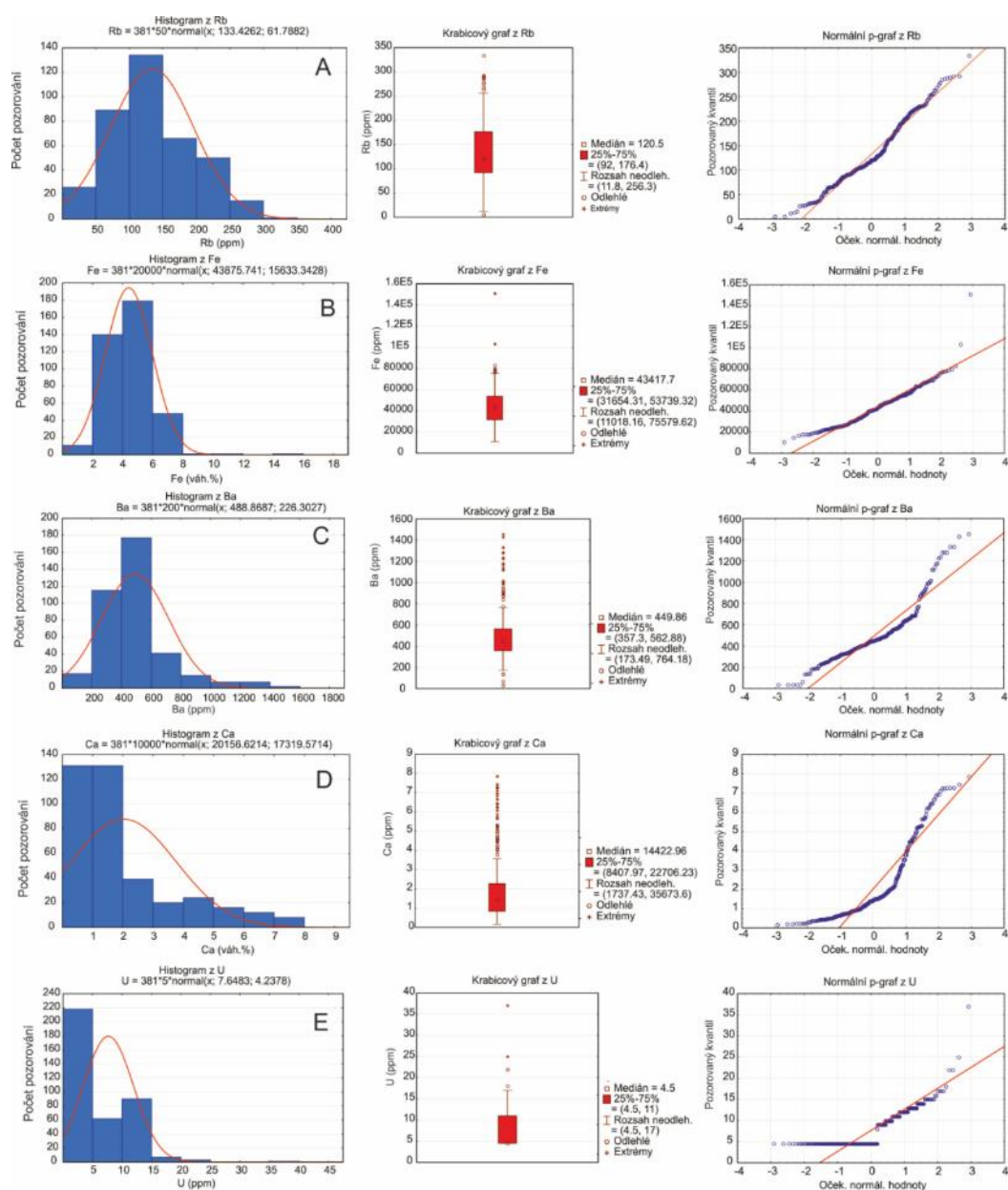
Cílem projektu bylo ověření možného pokračování ložiskových struktur směrem k jihu a ověření použití terénního RFA spektrometru přístroje Delta Premium 50kV pro rychlou analýzu hlavních a stopových prvků v půdním pokryvu. Tímto přístrojem bylo analyzováno 321 vzorků, které byly odebrány mělkými vrty společnosti GEOMIN s.r.o. Vzorky byly odebrány z profilů na lokalitách Habří, Bukov, Věžná a Střítež (dokumentační body 296GCJ0092 až 296GCJ0412). Schematicky je geologická stavba a zlomové linie ve studované oblasti je znázorněna níže (Obr. 448).



Obr. 448 Schematické geologické mapy oblasti průzkumných prací, provedených společností GEOMIN Jihlava s.r.o. Bližší lokalizace jednotlivých profilů jsou uvedeny v následujícím textu. Převzato z publikace Franěk et al. (2018)

Statistické zhodnocení půdně-metalometrických analýz

Soubory jednotlivých proměnných byly zkoumány s pomocí histogramů, krabicových diagramů a pravděpodobnostních (p-p) diagramů. Příklady základního statistického zhodnocení jsou uvedeny v Obr. 449, základní statistická data souborů jsou uvedeny v Tab. 174, všechna data v Elektronická příloha 132. Na jednotlivých profilech byly na základě statistického zhodnocení vyznačeny hodnoty percentilu 75 a nejnižší hodnoty odlehlých dat (tj. spodní hranice anomálních hodnot).



Obr. 449 Příklady základního statistického hodnocení vybraných prvkových souborů: A: Rb; B:Fe; C: Ba; D:Ca; E: U. Distribuce dat pro Rb a Fe se blíží jejich normálního rozložení. Distribuce dat pro Ba a Ca se blíží lognormálnímu rozdělení, nebo se jedná o dvě rozdílné populace. Distribuce dat pro U nelze statisticky dobře zhodnotit, protože téměř 35 % stanovení leželo pod mezí detekce tohoto prvku a byly proto nahrazeny polovinou nejnižší detekované hodnoty (3,5 ppm)

Výsledky půdní metalometrie jižně od ložiska Rožná

Koncentrace vybraných prvků na vybraných profilech jsou znázorněny na následujících obrázcích (Obr. 450, Obr. 451, Obr. 452, Obr. 453, Obr. 454, Obr. 455, Obr. 456 a Obr. 457).

Profil Bukov 005 (Obr. 450 a Obr. 451) byl založen na zlomové linii SZ–JV směru. Litologicky je tento profil situován zčásti na amfibolitech, zčásti na migmatizovaných biotitických pararulách. Litologii podložních hornin odpovídá i koncentrace prvků v půdním pokryvu. Vysoké hodnoty Mg, Ti, Sr a Ca jsou typické pro amfibolity, vysoké hodnoty K, Zr a Rb pro pararuly. V amfibolitech je Mg vázán na amfibol, Ti na titanit či ilmenit, Sr a Ca na bazické plagioklasy. V pararulách jsou K a Rb pravděpodobně vázány na biotit nebo K-živec a Zr na zirkon (klastický nebo metamorfní).

Na tomto a dalších profilech je zřejmé, že výsledky půdní metalometrie poměrně dobře odrážejí geochemii podložních hornin. To potvrzují i výsledky analýz stopových prvků: Amfibolity se projevují zvýšenými obsahy Zn, Cu, V, Ni a zejména Cr, pararuly zvýšenými obsahy Nb a Th. Koncentrace uranu je v obou typech hornin stejná a nepřesahuje 15 ppm.

Profil Habří 003 (Obr. 452 a Obr. 453): Tento profil byl společností Geomin s.r.o. založen na zlomové linii směru S–J. Litologicky tvoří horninové podloží profilu biotitická pararula a erlanový stromatit (páskovaný erlan). Erlan se projevuje anomálně vysokými obsahy Mn, Ca a Sr které jsou vázány buď na karbonáty nebo na další minerály erlanu (forsterit, klinopyroxen, skapolit?). Biotitické pararuly se od erlanu liší vyššími obsahy K a Rb (biotit), a zirkonu. Co se týče stopových prvků, půda na erlanech má poněkud vyšší obsahy Nb a Zn, půdy na pararule mají vyšší obsahy Th, Cu, Cr, V a Ni.

Profil Střítež 012 (Obr. 454 a Obr. 455). Tento profil byl společností GEOMIN s.r.o. založen na zlomové linii sv.–jz. směru (tento směr odpovídá příčným dislokacím na ložisku Rožná). Litologicky je podloží tohoto půdního profilu tvořeno litologicky i geochemicky velmi kontrastními horninami: felsickým granulitem a serpentinitem. Tomu odpovídá i kontrastní geochemická stopa v půdách. Půdy na granulitech se projevují extrémně vysokými obsahy Mg a Cr, půdy na pararulách mají vyšší obsahy většiny ostatních sledovaných prvků (Al, K, Rb, Zr, Y a Hf). Je tedy zřejmé, že půdní geochemie může velmi dobře upřesňovat rozdílné horninové typy při mapování i při nedostatku výchozů. Obsahy U v obou typech půd jsou přibližně stejné a nepřesahují 15 ppm.

Profil Věžná 010 (Obr. 456 a Obr. 457). Profil byl založen na zlomové linii směru SV–JZ. Litologicky je horninové podloží tvořené granulitem, biotitickou pararulou a zejména amfibolitem. Na rozdíl od předcházejících profilů, kde výsledky půdní metalometrie korespondují s litologickým charakterem podloží, se amfibolit projevuje ve srovnání s okolními horninami pouze poněkud vyššími obsahy Ti, Fe a V a nižšími obsahy Th. To zcela odpovídá geochemickému charakteru této horniny. Naopak, s litologií podloží nekorespondují velmi variabilní a často vysoké obsahy Ca a Mn, které zřejmě indikují přítomnost karbonátů. Mimoto byly v amfibolitech nalezeny extrémně vysoké obsahy S_{tot} (až 8 váh. %) a Ba (až 1 400 ppm). Tak vysoké hodnoty obou prvků zřejmě indikují přítomnost barytu, který je na rozdíl od pyritu ve zvětrávacím profilu stabilní. Baryt

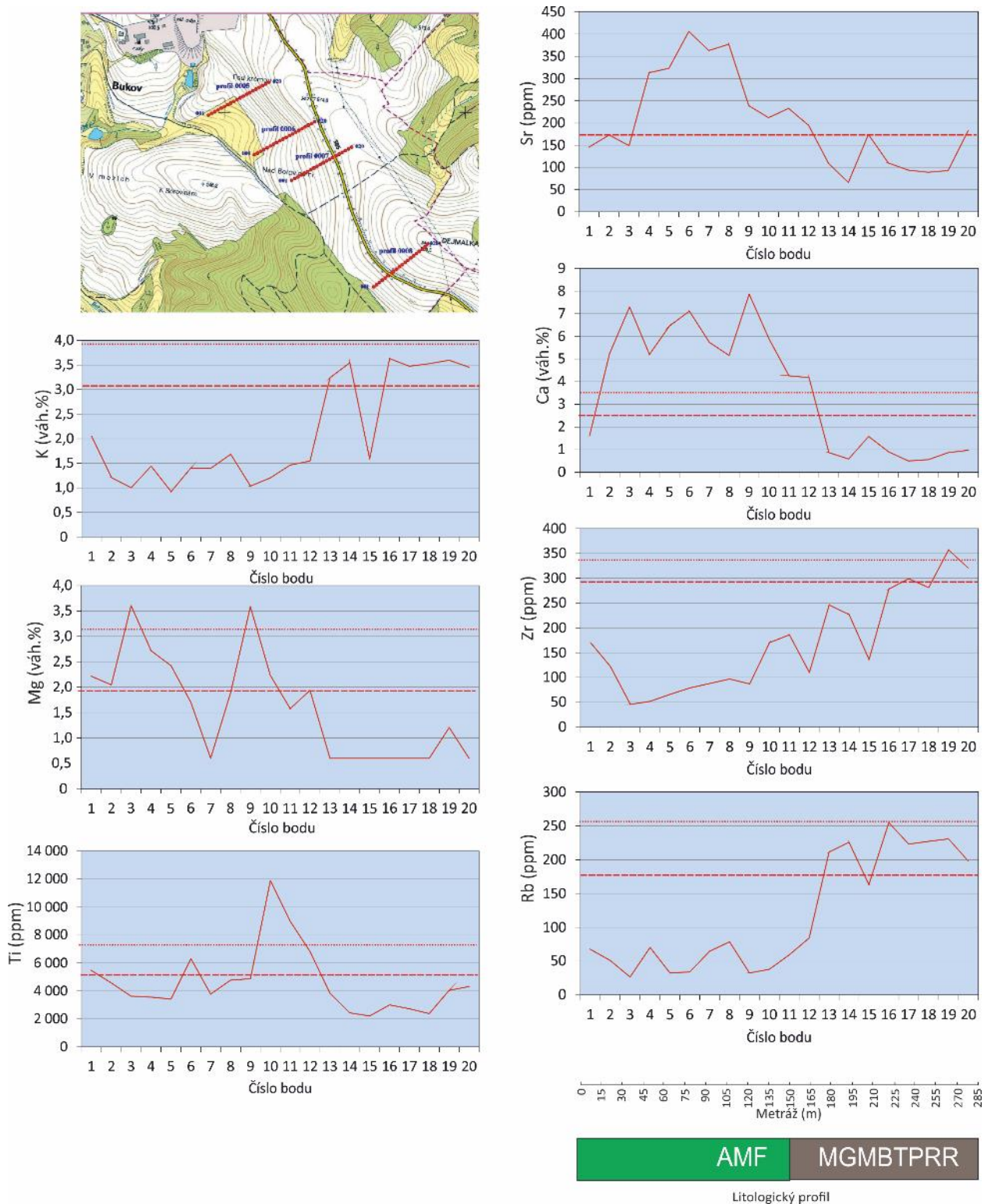
je na tomto profilu doprovázen i extrémně vysokými koncentracemi Mo (až 25 ppm), jehož koncentrace se na ostatních studovaných profilech pohybovaly pod mezí detekce použitého analytického přístroje. Variabilní a u některých vzorků velmi vysoké jsou i obsahy Cu (až 120 ppm) a Zn (až 250 ppm). Jedná se tedy s největší pravděpodobností o projevy baryt-polymetalické mineralizace, která se vyskytuje i v rudním poli ložiska Rožná. Genetický typ této mineralizace nelze na základě výsledků půdní metalometrie určit. Je možné, že se jedná buď o projev žilného typu zrudnění, nebo o projev stratiformní baryt-polymetalické mineralizace, jejíž mocnost na ložisku Rožná dosahuje až dvaceti metrů. Výskyt mineralizace na profilu Věžná by bylo velmi dobré ověřit podrobnějším průzkumem.

Tab. 174 Základní statistické charakteristiky jednotlivých prvkových souborů. Koncentrace Mg, Al, Si, K, Ca, Fe, Ti a S ve váhových %, koncentrace ostatních prvků v ppm. Max: maximální koncentrace prvků, Min: minimální koncentrace prvku. Neodlehle max.: Horní hranice neodlehých hodnot, Neodlehle min.: Spodní hranice neodlehých hodnot. Počet vzorků: 321. Dokumentační body 296GCJ0092 až 296GCJ0412

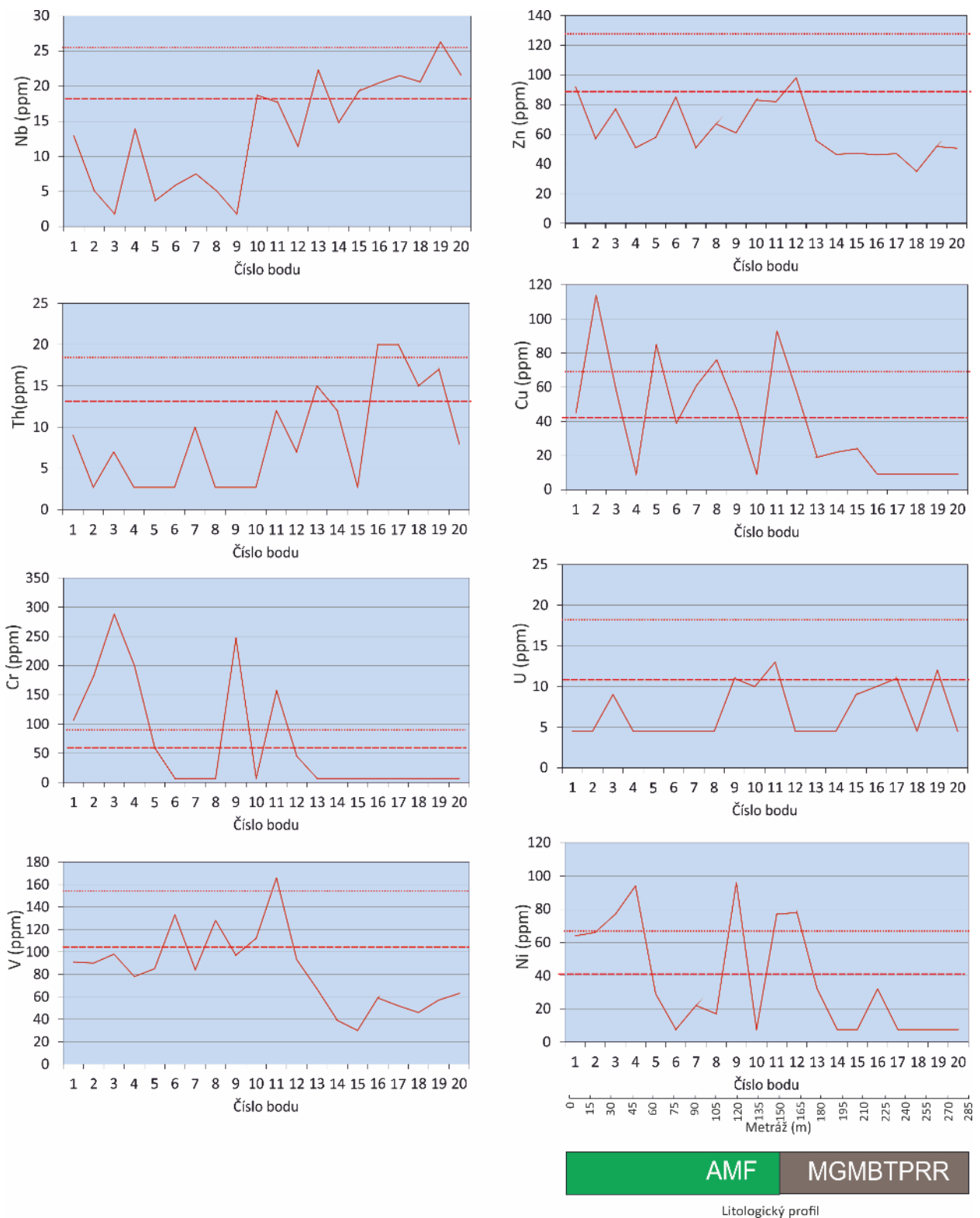
	Mg	Al	Si	K	Ca	Fe	Ti	S
Max.	14,5	11,31	32,8	4,50	7,86	15,1	2,21	0,78
Neodlehle max.	3,21	9,08	32,3	3,93	3,57	7,56	0,74	0,03
Kvantil 75	1,91	8,23	28,8	3,03	2,27	5,37	0,53	0,03
Median	0,60	7,78	26,9	2,59	1,44	4,34	0,43	0,03
Kvantil 25	0,60	7,33	25,04	2,09	0,84	3,17	0,30	0,03
Neodlehle min.	0,60	6,45	21,4	1,15	0,17	1,10	0,09	0,03
Min.	0,60	1,83	18,36	0,09	0,17	1,10	0,09	0,03
Šikmost	4,69	-1,63	-0,62	-0,57	1,53	1,12	2,56	9,10
	V	Cr	Mn	Ni	Cu	Zn	As	Rb
Max.	312	6 065	2 791	2 500	118	255	54,8	334
Neodlehle max.	157	97,0	933	66,0	42,0	126	10,6	256
Kvantil 75	109	52,0	587	40,0	42,0	89,0	7,10	176
Median	84,0	20,0	417	27,0	28,0	72,0	4,70	121
Kvantil 25	56,0	7,0	239	13,0	9,00	50,7	3,50	92,0
Neodlehle min.	4,0	7,0	125	7,50	9,00	15,2	1,20	11,8
Min.	4,0	7,0	12,5	7,50	9,00	15,2	1,20	5,9
Šikmost	1,47	11,90	2,51	8,24	1,39	1,72	4,41	0,51
	Sr	Y	Zr	Nb	Sn	Ba	Hf	Pb
Max	443	59,0	580	44,0	26,0	1 458	23,1	97,0
Neodlehle max.	252	45,0	338	25,4	23,0	764	20,1	25,3
Kvantil 75	172	35,0	259	18,5	14,0	563	17,1	18,5
Median	125	29,0	220	14,5	11,0	450	15,6	14,1

Kvantil 25	90	24,2	173	11,5	5,0	357	14,0	10,7
Neodlehle min.	12,7	13,4	87,0	4,5	5,0	173	11,0	3,7
Min.	12,7	4,9	10,3	1,8	5,0	34,0	3,0	1,8
Šikmost	1,44	0,50	0,63	0,72	0,70	1,60	-0,53	4,33
	Th	U						
Max.	45,0	37,0						
Neodlehle max.	18,0	17,0						
Kvantil 75	13,0	11,0						
Median	10,0	4,5						
Kvantil 25	8,0	4,5						
Neodlehle min.	5,4	4,5						
Min.	2,7	4,5						
Šikmost	1,69	1,68						

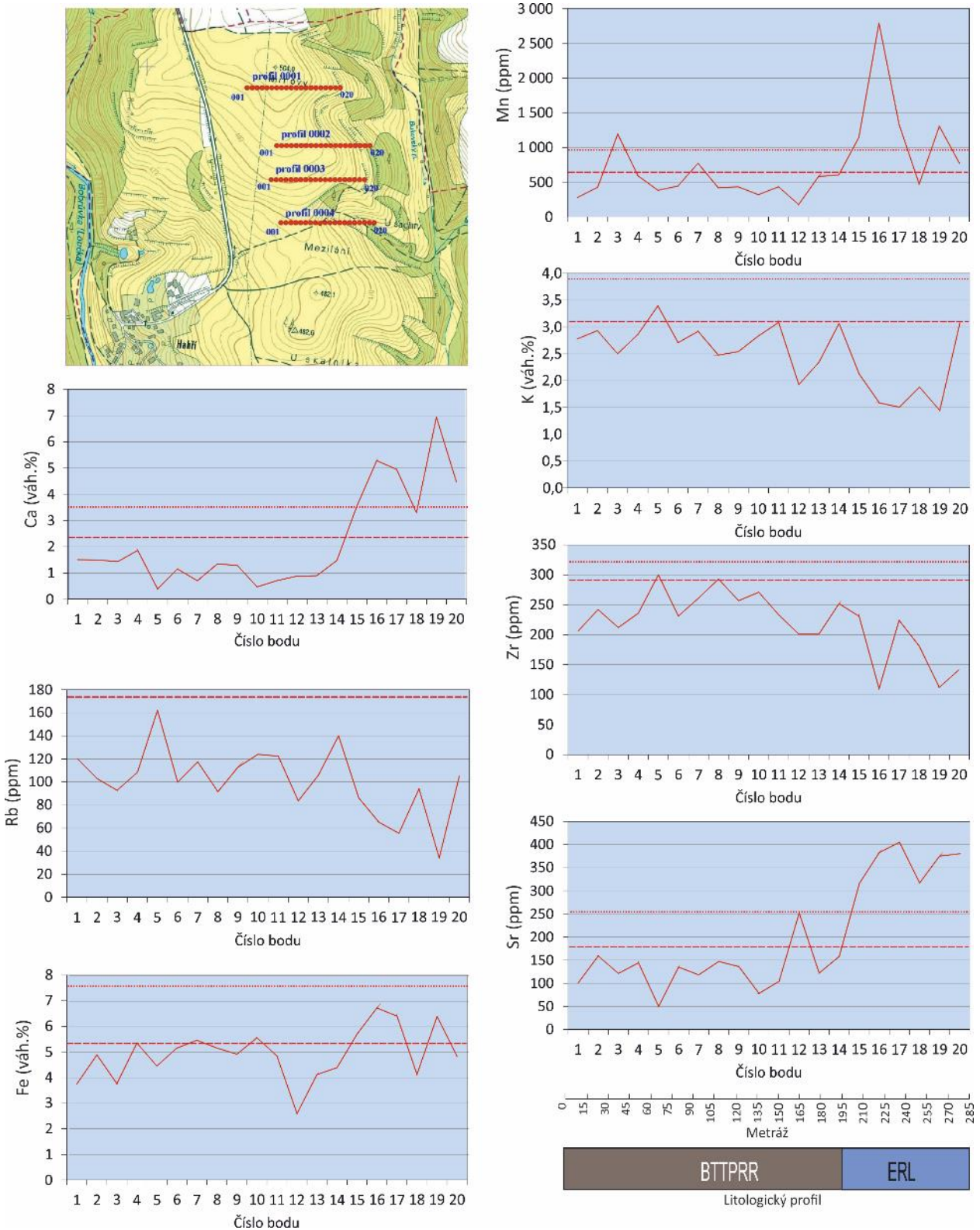
Vztahy mezi jednotlivými skupinami proměnných byly hodnoceny pomocí analýzy hlavních komponent (Obr. 458 A). Z analýzy vyplývá, že hlavní komponenty (Faktory 1 a 2) vysvětlují dohromady pouze 48,8 % rozptylu dat. To je zřejmě způsobeno velmi rozdílným litologickým podložím jednotlivých studovaných profilů. Navíc, anomální hodnoty některých prvků, zjištěných na profilu Věžná, vztahy mezi jednotlivými komponentami systému deformují. Nicméně, faktor 1 lze interpretovat jako projev hornin bohatých Si, K, Rb (pararul), což se projevuje vysokými faktorovými hodnotami ($> 0,5$) uvedených prvků a nízkými faktorovými hodnotami ($< -0,5$) ostatních prvků. Faktor 2 zřejmě indikuje množství karbonátové složky v půdním profilu (faktorové hodnoty Ca a Mn $> 0,5$). Příklady korelací mezi některými stopovými prvky jsou uvedeny na Obr. 457 B, C, D, E. Z jednotlivých diagramů vyplývá, že některé závislosti lze velmi dobře vysvětlit (například vztah mezi Ca a Mn), vztahy mezi jinými proměnnými (Ti-Zn, V-Zn, Nb-Zr) jsou obtížně interpretovatelné. To zřejmě odráží vysokou heterogenitu studovaného souboru.



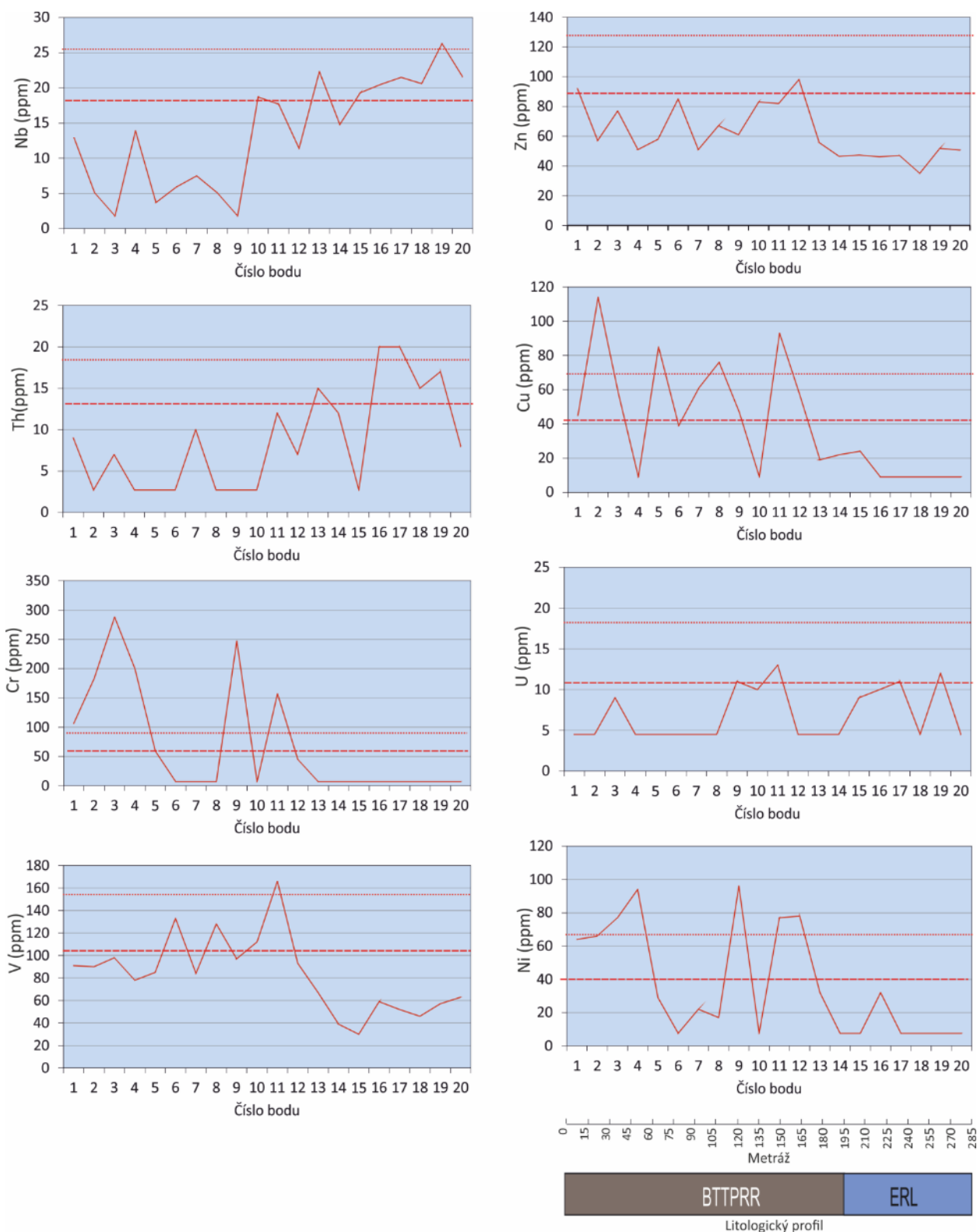
Obr. 450 Distribuce vybraných chemických prvků na profilu Bukov 005. Vysvětlivky: čárkovaně: hodnota kvantilu 0,75, tečkovaně: horní hranice neodlehých hodnot (tj. spodní hranice anomálních hodnot) Litologický profil: AMF: amfibolit, MGMBTPRR: migmatizovaná biotitická pararula



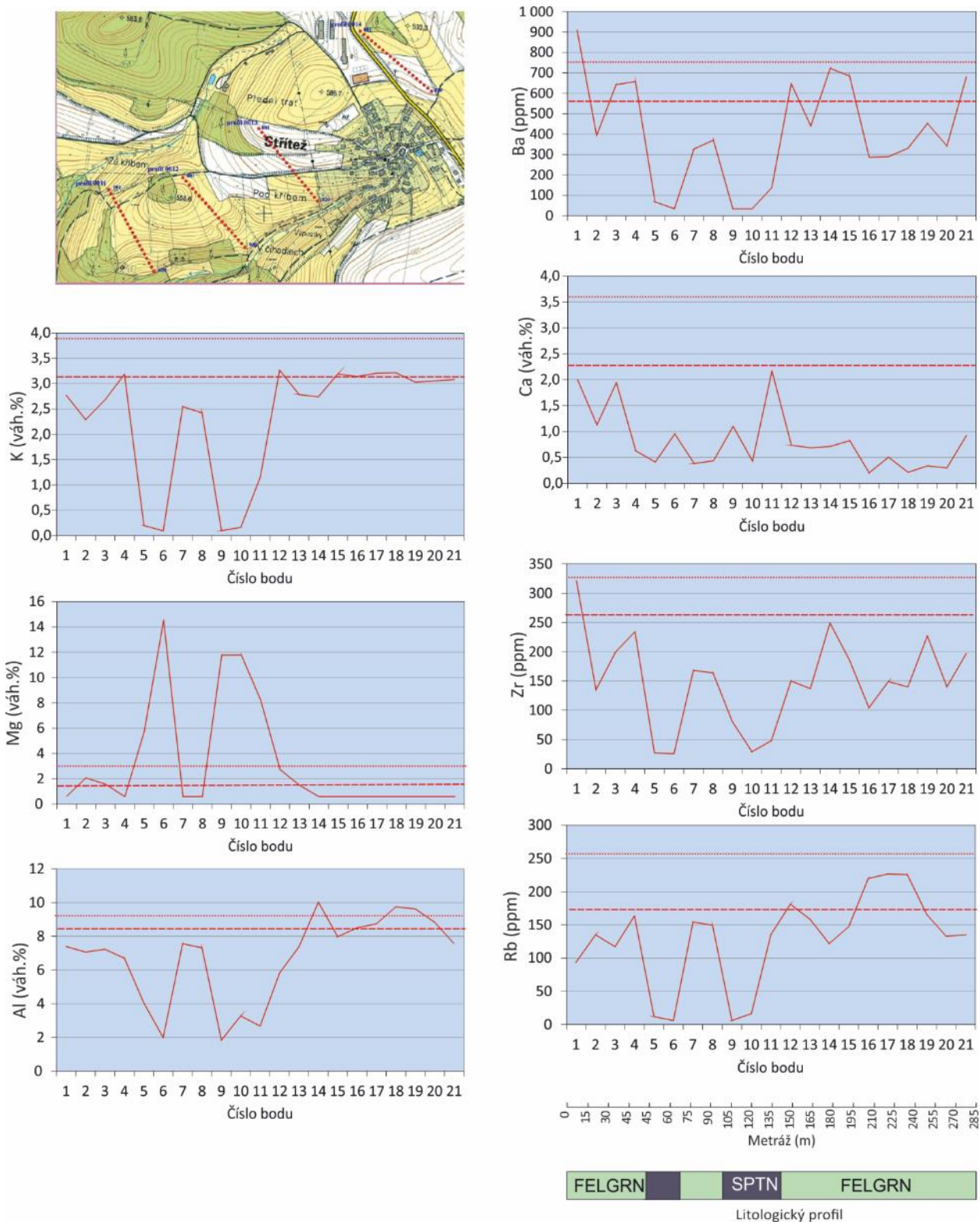
Obr. 451 Distribuce vybraných chemických prvků na profilu Bukov 005. Vysvětlivky: čárkovaně: hodnota kvantilu 0,75, tečkovaně: horní hranice neodlehých hodnot (tj. spodní hranice anomálních hodnot) Litologický profil: AMF: amfibolit, MGMBTPRR: migmatizovaná biotitická pararula



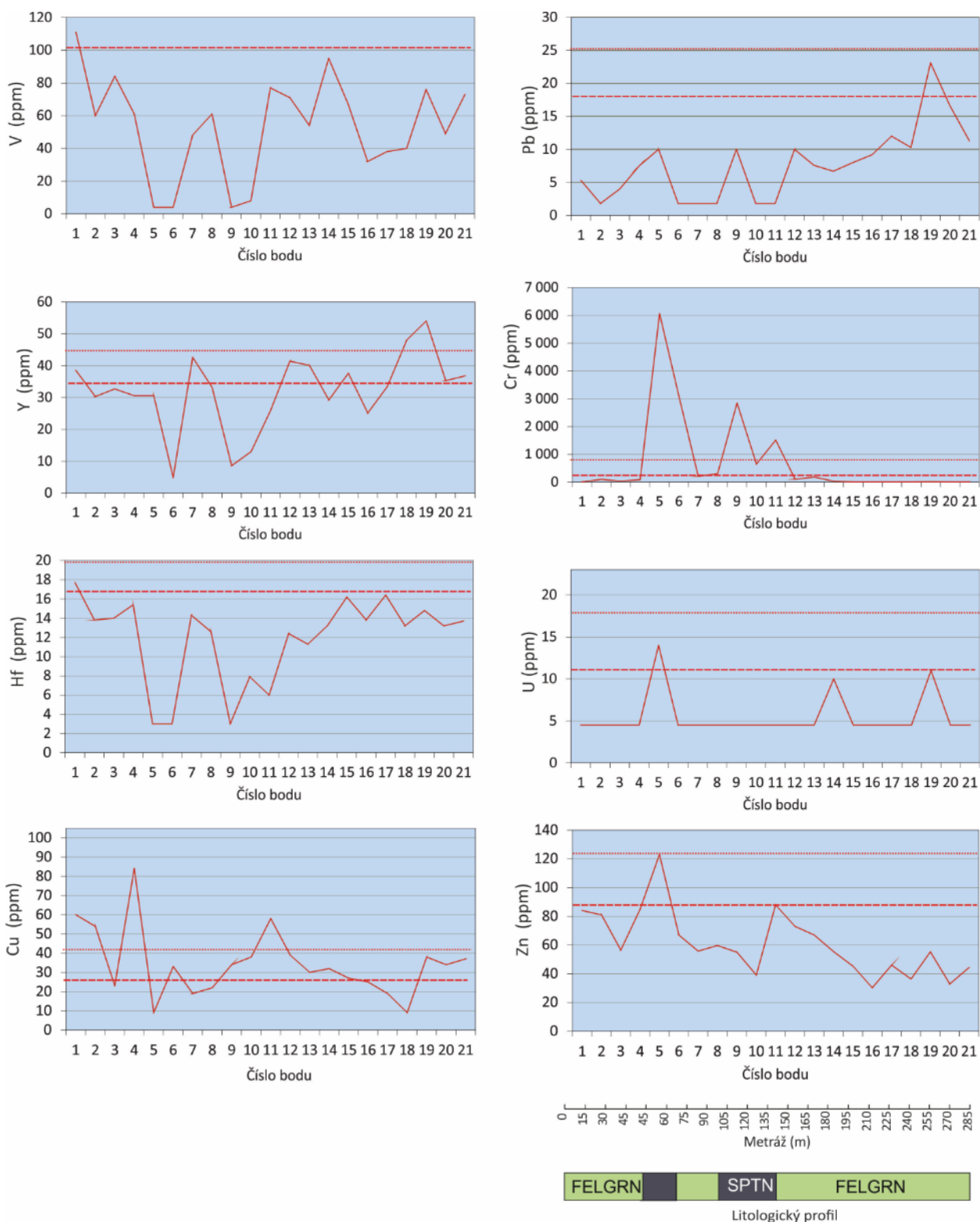
Obr. 452 Distribuce vybraných chemických prvků na profilu Habří 003. Vysvětlivky: čárkovaně: hodnota kvantilu 0,75, tečkovaně: horní hranice neodlehých hodnot (tj. spodní hranice anomálních hodnot). Litologický profil: BTPRR: biotitická pararula, ERL: erlanový stromatit



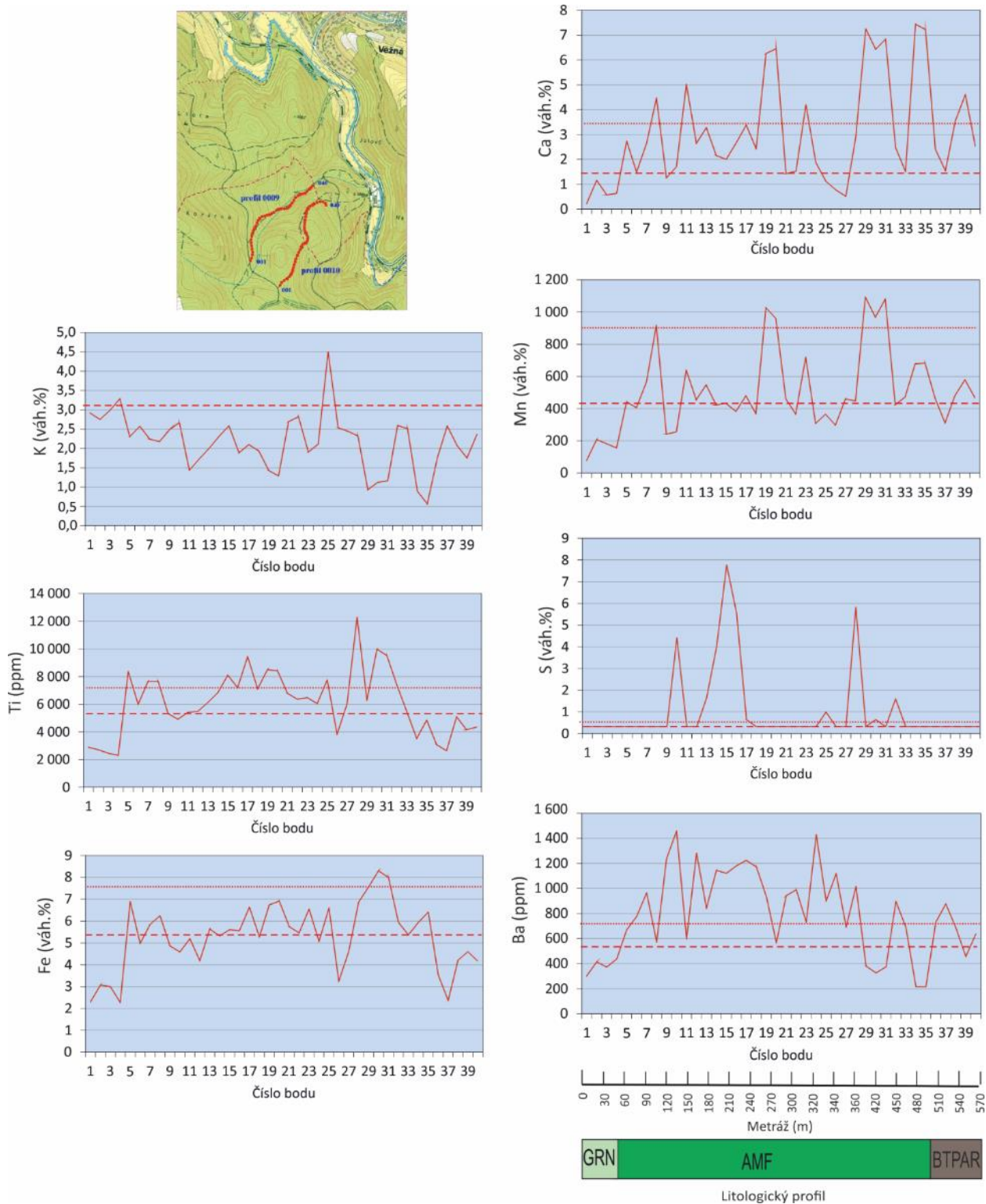
Obr. 453 Distribuce vybraných chemických prvků na profilu Habří 003. Vysvětlivky: čárkovaně: hodnota kvantilu 0,75, tečkovaně: horní hranice neodlehých hodnot (tj. spodní hranice anomálních hodnot). Litologický profil: BTTPRR: biotitická pararula, ERL: erlanový stromatit



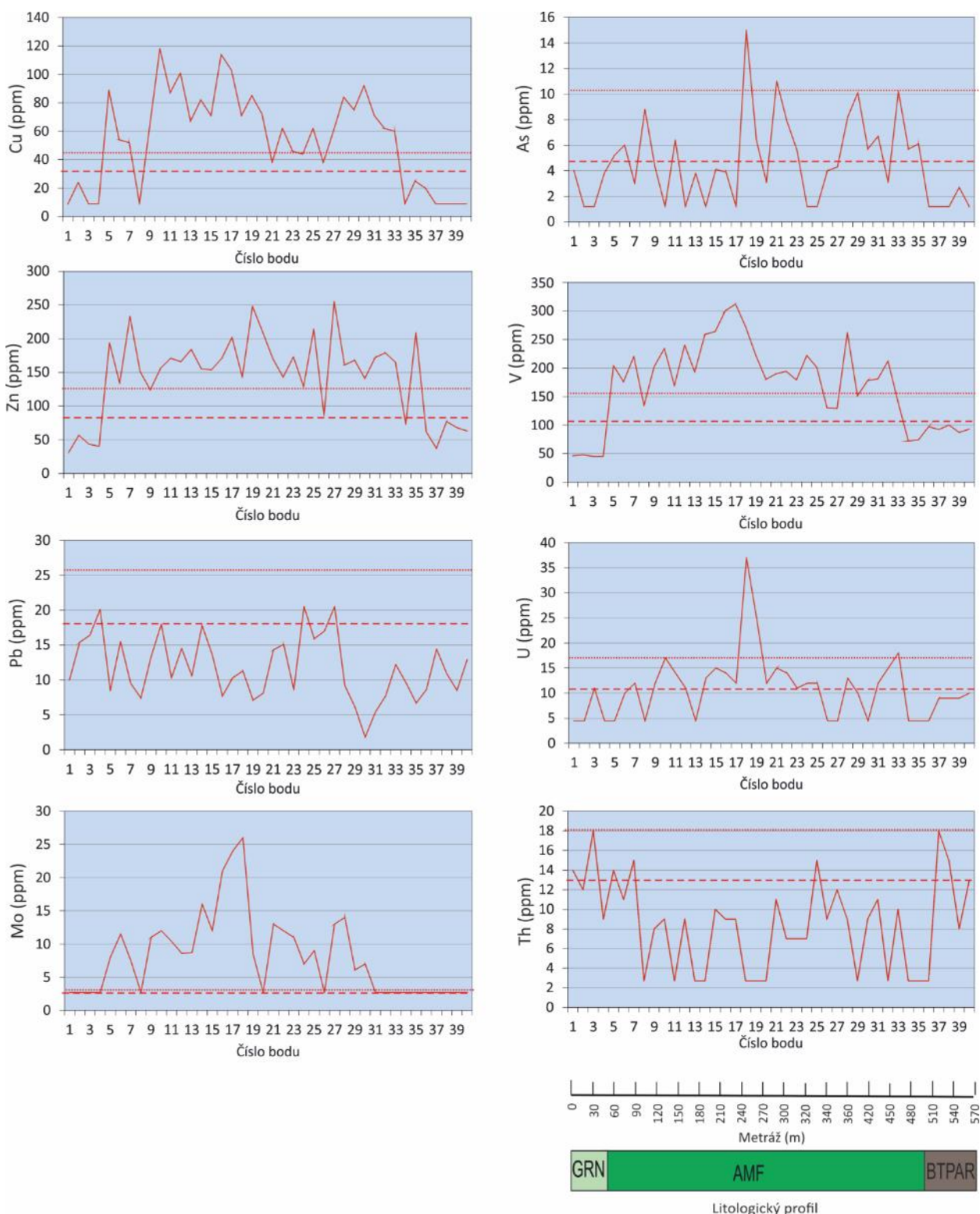
Obr. 454 Distribuce vybraných chemických prvků na profilu Střítež 012. Vysvětlivky: čárkovaně: hodnota kvantilu 0,75, tečkovaně: horní hranice neodlehých hodnot (tj. spodní hranice anomálních hodnot). Litologický profil: FELGRN: felsický granulit, SPTH: serpentinit



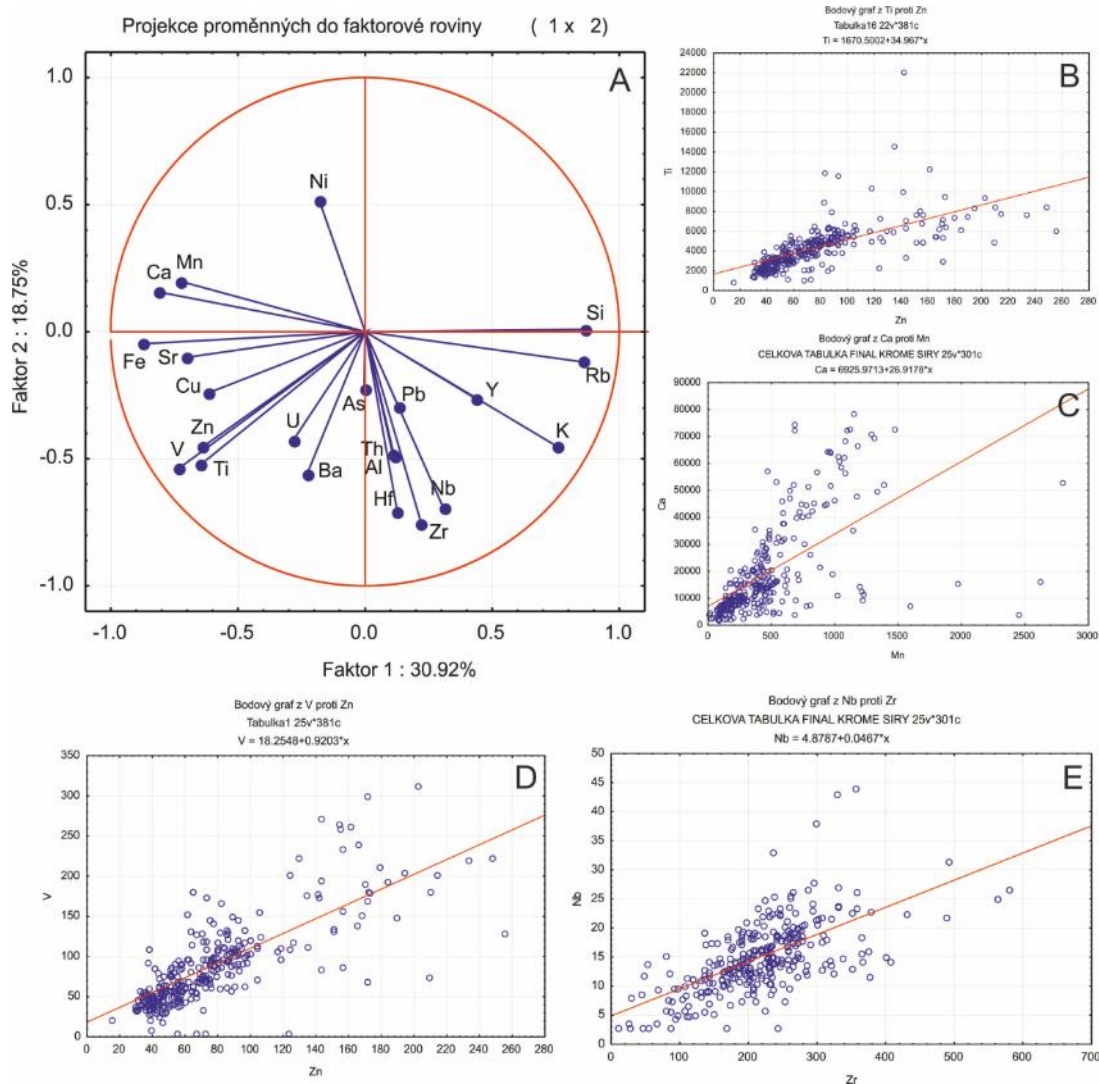
Obr. 455 Distribuce vybraných chemických prvků na profilu Střítež 012. Vysvětlivky: čárkovaně: hodnota kvantilu 0,75, tečkovaně: horní hranice neodlehých hodnot (tj. spodní hranice anomálních hodnot). Litologický profil: FELGRN: felsitický granulit, SPTH: serpentinít



Obr. 456 Distribuce vybraných chemických prvků na profilu Věžná 010. Vysvětlivky: čárkovaně: hodnota kvantilu 0,75, tečkovaně: horní hranice neodlehých hodnot (tj. spodní hranice anomálních hodnot). Litologický profil: GRN: granulit, AMF: amfibolit, BTPAR: biotitická pararula



Obr. 457 Distribuce vybraných chemických prvků na profilu Věžná 010. Vysvětlivky: čárkovaně: hodnota kvantilu 0,75, tečkovaně: horní hranice neodlehých hodnot (tj. spodní hranice anomálních hodnot). Litologický profil: GRN: granulit, AMF: amfibolit, BTPAR: biotitická pararula



Obr. 458 A: Výsledky analýzy hlavních faktorů na vzorcích odebraných jižně od Jámy Bukov. B: Korelace mezi Zn a Ti, C: korelace mezi Ca a Mn, D: Korelace mezi Zn a V, E: Korelace mezi Zr a Nb

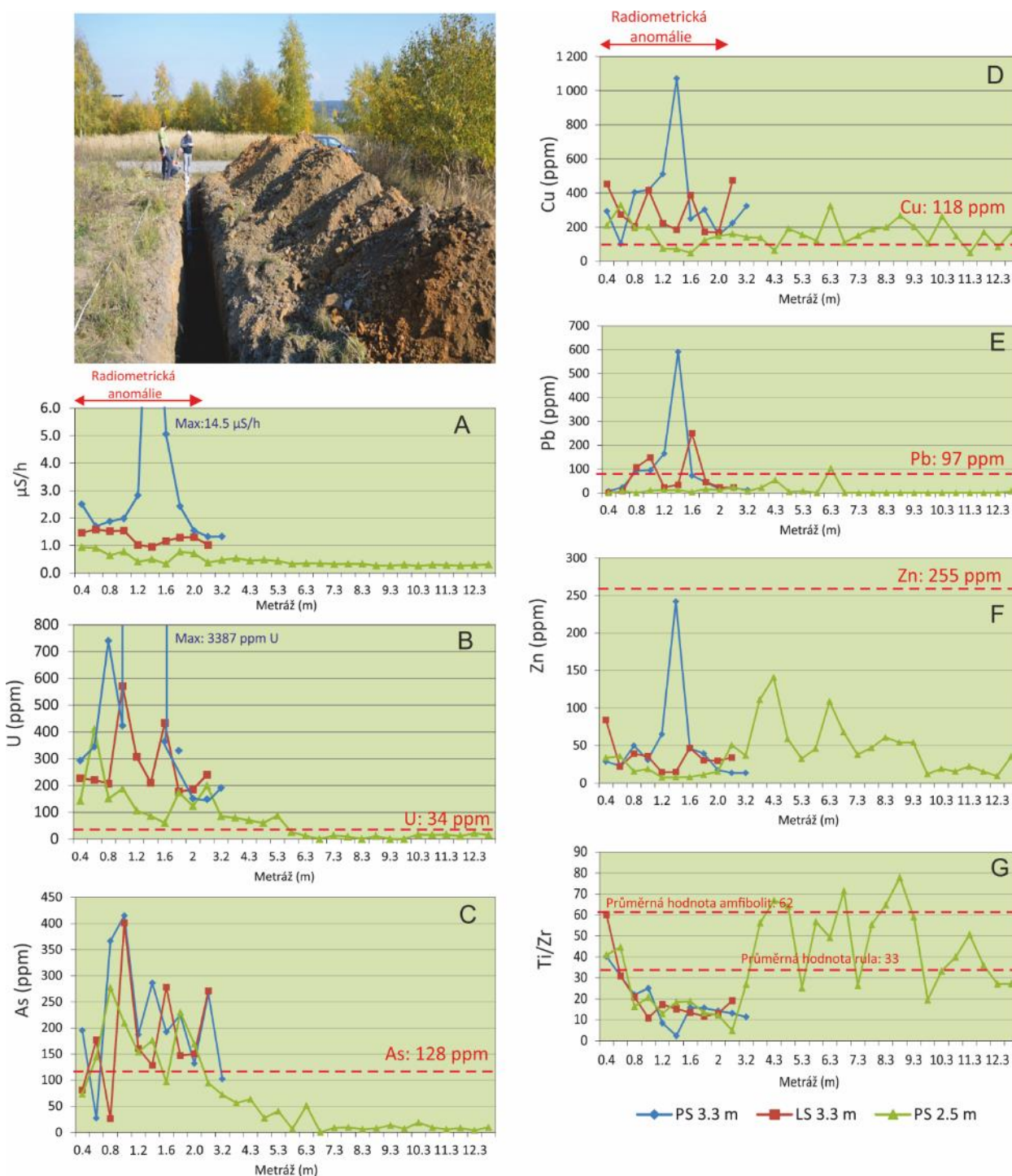
Půdní metalometrie na rýze, vyhloubené na radiometrické anomálii v prostoru bývalé šachty R2

Aby bylo možno posoudit význam nalezených anomálií v prostoru jižně od jámy Bukov 1 a tedy možnost pokračování ložiska Rožná jižním směrem, byly dosažené výsledky půdní metalometrie srovnány s výsledky geochemického studia v rýze, která byla lokalizována přímo na významné radiometrické anomálii v prostoru ložiska. V rýze o celkové délce 12,8 m bylo odebráno 51 vzorků, z levé i pravé strany rýhy, v hloubce 2,4 a 3,3 m. Výsledky geochemických analýz na této rýze jsou uvedeny v Tab. 175, na Obr. 459a v Elektronická příloha 133. Litologicky je profil tvořen střídáním poloh velmi zvětralých amfibolitů a jemnozrnných biotitických pararul. Na vzorcích bylo provedeno i stanovení radiačního příkonu. Výsledky ukázaly na vysoké hodnoty radiačního příkonu (14,6 $\mu\text{Sv/h}$) ve východní části rýhy. Tuto polohu radiometrické anomálie kopírují i vysoké koncentrace uranu, které dosahují až 3 387 ppm. Výsledky geochemických analýz na obou stranách rýhy se poměrně výrazně liší. Zatímco hodnoty radiačního příkonu a koncentrace uranu na pravé straně rýhy (PS) v hloubce 3,3 metrů jsou velmi vysoké, stejné hodnoty na levé straně

rýhy (LS) v hloubce 3,3 m jsou daleko nižší. Kromě uranu byly na radiometrické anomálii zachyceny i vysoké koncentrace Bi, které dosahují až 2 661 ppm, Pb (až 1 600 ppm) a As (až 420 ppm; Tab. 175). Na Obr. 458 jsou čárkovanou linií vyneseny i maximální hodnoty vybraných prvků, nalezené na profilech studovaných jižně od jámy Bukov 1 (viz předcházející část textu). Je zřejmé, že ve srovnání s koncentracemi U, As, Cu a Pb stanovených na radiometrické anomálii přímo na ložisku Rožná jsou jejich koncentrace na profilech jižně od jámy Bukov (tj. jižně od ložiska Rožná) minimální. To naznačuje, že uranová mineralizace jižně od jámy Bukov nepokračuje. Výjimku tvoří koncentrace Zn, které jsou jižně od jámy Bukov vyšší, což odpovídá nálezu baryt-polymetalické mineralizace na profilu Věžná 10 (Obr. 455 a Obr. 456). Na Obr. 459G jsou rovněž uvedeny hodnoty poměru Ti/Zr v rýze a průměrné hodnoty tohoto poměru v půdách založených na biotitických pararulách a na amfibolitech na profilech jižně od ložiska Rožná. Hodnoty tohoto poměru v rýze, hloubené přímo na ložisku Rožná potvrzují, že lze půdní metalometrii použít k rozlišení obou typů hornin přesto, že byly postiženy silným zvětráváním.

Tab. 175 Základní statistické hodnoty vybraných prvkových souborů analyzovaných v rýze na radiometrické anomálii na bývalém dole Rožná 1. Dávkový příkon v $\mu\text{Sm/h}$, obsahy Al, Si, K, Ca, Fe a Ti ve váh. %, ostatní prvky v ppm. Max: Maximální hodnota, min: minimální hodnota. Počet vzorků: 51

	Dávk. příkon	Al	Si	K	Ca	Fe	Ti
Max.	14,6	11,3	40,8	2,47	7,11	10,8	1,71
Kvantil 0,75	1,09	7,14	33,3	0,59	1,46	8,19	0,85
Median	0,50	5,73	28,9	0,34	0,71	6,95	0,36
Kvantil 0,25	0,33	3,23	22,9	0,21	0,22	4,48	0,20
Min.	0,26	1,01	17,1	0,05	0,01	2,59	0,03
Šikmost	5,41	0,00	-0,06	2,54	1,91	-0,02	0,87
	V	Cr	Ni	Cu	Zn	As	Rb
Max.	394	722	139	1 071	242	415	71,3
Kvantil 0,75	149	224	51,5	288	49,3	191	17,45
Median	116	149	35,5	193	33,2	99,2	12,3
Kvantil 0,25	86,3	109	24,3	142	15,7	20,6	7,3
Min.	37,0	23,0	8,0	48,0	7,7	3,0	1,2
Šikmost	2,08	2,38	1,62	2,8	3,07	0,82	2,05
	Sr	Y	Zr	Ba	Pb	Bi	U
Max.	337	216	1 948	1 071	591	2 691	42 520
Kvantil 0,75	124	39,4	213	205	31,5	37,8	237
Median	94,5	26,1	157	158	11,7	2,1	150
Kvantil 0,25	36,4	21,6	80,0	61,4	4,3	2,1	23,0
Min.	9,5	8,2	18,5	50,0	4,0	2,1	3,5
Šikmost	1,14	3,66	5,38	3,93	4,60	6,66	7,00



Obr. 459 Dokumentace rýhy na radiometrické anomálii v prostoru bývalého dolu Rožná 1 a distribuce hodnot dávkového příkonu (A), koncentrace uranu (B), arzenu (C), mědi (D), olova (E), zinku (F) a poměru Ti/Zr (G) v rýze. Čárkovanou linií jsou znázorněny maximální koncentrace uvedených prvků na v profilech analyzovaných jižně od jámy Bukov 1. U diagramu Ti/Zr jsou uvedeny průměrné hodnoty stejného poměru pro amfibolit a biotitickou pararulu. Vysvětlivky: PS 3,3: pravá strana rýhy, hloubka 3,3 m, LS: levá strana rýhy, hloubka 3,3 m, PS 2,5: pravá strana rýhy, hloubka 2,4 m. Dokumentační body 296GCJ0413 až 296GCJ0463

Výsledky stanovení dávkového příkonu a koncentrací analyzovaných prvků byly hodnoceny pomocí faktorové analýzy (Tab. 176). První faktor lze interpretovat jako projev uranové mineralizace (vysoké faktorové zátěže dávkového příkonu, Cu, Zn, As, Ba, Pb, Bi a U). Jedná se zřejmě o projev uranové mineralizace (U, Bi, Pb), po případě o projev uranové mineralizace a mladší („naložené“) mineralizace polymetalické.

Tab. 176 Faktorové zátěže proměnných, sledovaných v rýze hloubené na radiometrické anomálii v prostoru bývalého dolu Rožná 1. Varimax prostý, Extrakce hlavních komponent, tučně jsou označeny zátěže s $p > 0,70$)

Proměnná	Faktor 1	Faktor 2
Dávka	0,94	-0,03
Al	0,03	0,86
Si	-0,30	-0,86
K	0,51	0,66
Ca	-0,08	0,50
Ti	-0,01	0,90
V	0,69	0,57
Cr	-0,06	0,14
Fe	0,29	0,64
Ni	0,46	0,63
Cu	0,81	0,15
Zn	0,77	0,51
As	0,79	-0,10
Rb	-0,14	0,73
Sr	-0,01	0,61
Y	0,62	0,07
Zr	0,68	0,23
Ba	0,84	0,36
Pb	0,91	0,03
Bi	0,98	-0,03
U	0,98	-0,03
Výkl,roz	8,06	5,52
Prp,celk	0,38	0,26

2.4.6.1.7 Zhodnocení zbytkového surovinového potenciálu odkaliště K1 na úpravně v Dolní Rožince

Nad rámec projektu bylo provedeno zhodnocení surovinového potenciálu na odkališti, které bylo zaměřeno především na obsahy „kritických surovin“ (Nb, Ta REE a Y) ale i na další prvky rmutu, uloženého v odkališti K1 na úpravně v Dolní Rožince. Celkové množství rmutu na tomto odkališti činí 14,6 tisíc tun.

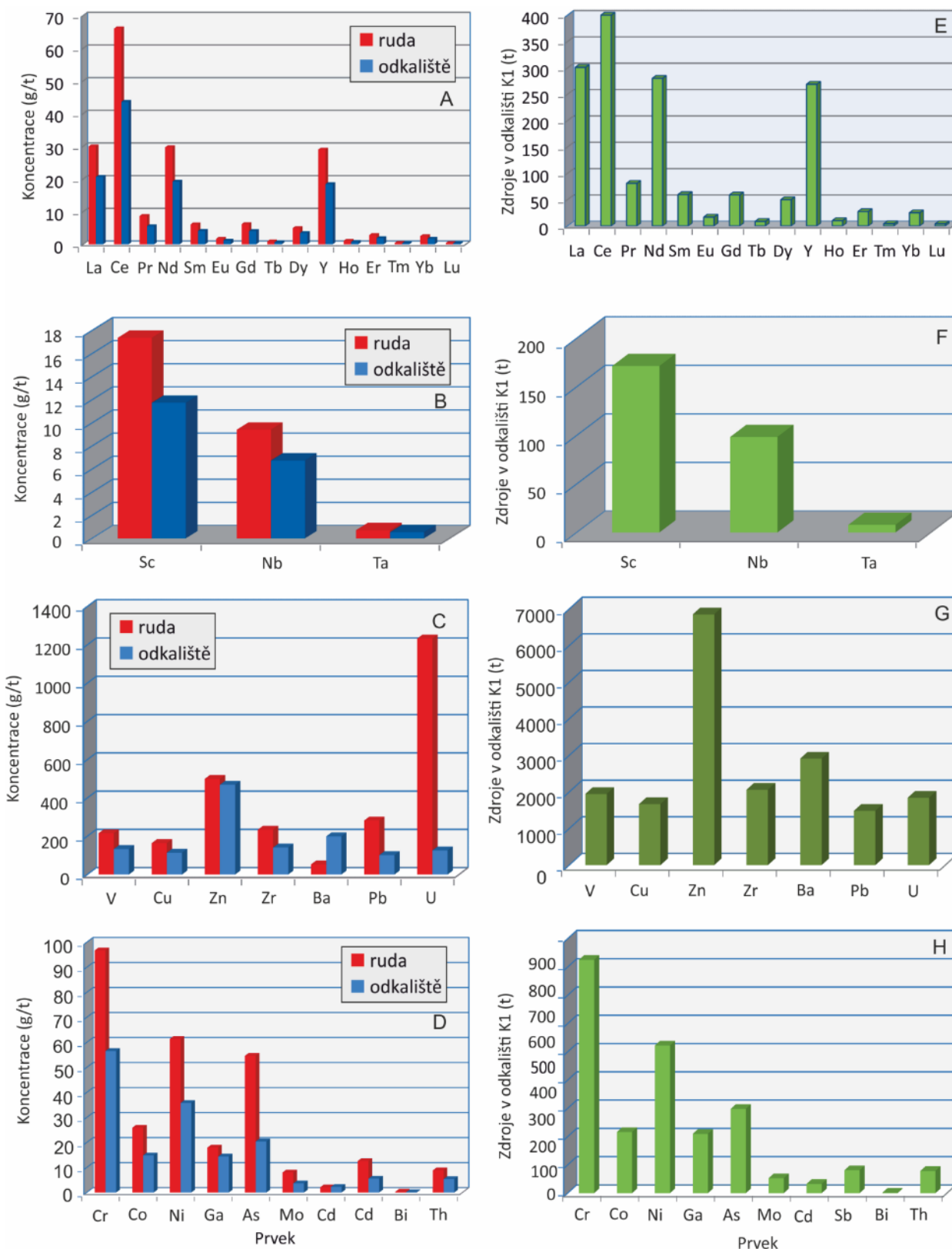
Sondovací tyč bylo odebráno 14 vzorků rmutu z obvodu odkaliště K-1 o hmotnosti 350 g. Vzorky byly homogenizovány, orientačně analyzovány přenosným rentgen-fluorescenčním spektrometrem a posléze analyzovány v laboratoři ČGS metodou ICP-MS. Výsledky analýz jsou uvedeny v Elektronická příloha 135.

Tab. 177 Množství uvedených prvků ve rmutech uložených na odkališti K-1 na úpravně v Dolní Rožince. Počet vzorků: 14, dokumentační body 296GCJ0465_001 až 296GCJ0465_014

Prvek	t	Prvek	t	Prvek	t
Mo	53	Ti	5	La	301
Cu	1 668	W	18	Ce	636
Pb	1 485	Zr	2 060	Pr	81
Zn	6 853	Be	28	Nd	280
Ni	522	Sc	171	Sm	60
Co	216	Hf	20	Eu	17
Mn	13 039	Li	355	Gd	59
As	298	Ta	8	Tb	9
U	1 841	Nb	98	Dy	50
Th	79	Cs	43	Y	269
Cd	33	Ga	2 010	Ho	10,1
Sb	81,2	In	0,7	Er	27
Bi	2	Re	0,3	Tm	4
V	1 945	Se	13	Yb	25
Cr	825	Te	4	Lu	4
Ba	2 911	Tl	61	SumaREE+Y	1 832

Koncentrace studovaných prvků v odkališti jsou velmi nízké (Obr. 460A–D). Ze vzácných zemin jsou nejvyšší průměrné obsahy Ce (43 g/t), La (20 g/t) a Nd (18 g/t). Zvýšené jsou i obsahy Y (18 g/t). Koncentrace ostatních vzácných zemin jsou však velmi nízké. Distribuce vzácných zemin v odkališti velmi dobře koreluje s jejich distribucí v průměrné uranové rudě. Průměrné koncentrace Nb (8 g/t) jsou vyšší nežli koncentrace Ta (< 1 g/t), což odpovídá zvýšeným koncentracím Nb v minerálech titanu (titanit a anatas). Vazba tantalu na jednotlivé minerály uranové mineralizace na ložisku nebyla objasněna, vzhledem k jeho velmi nízkým koncentracím

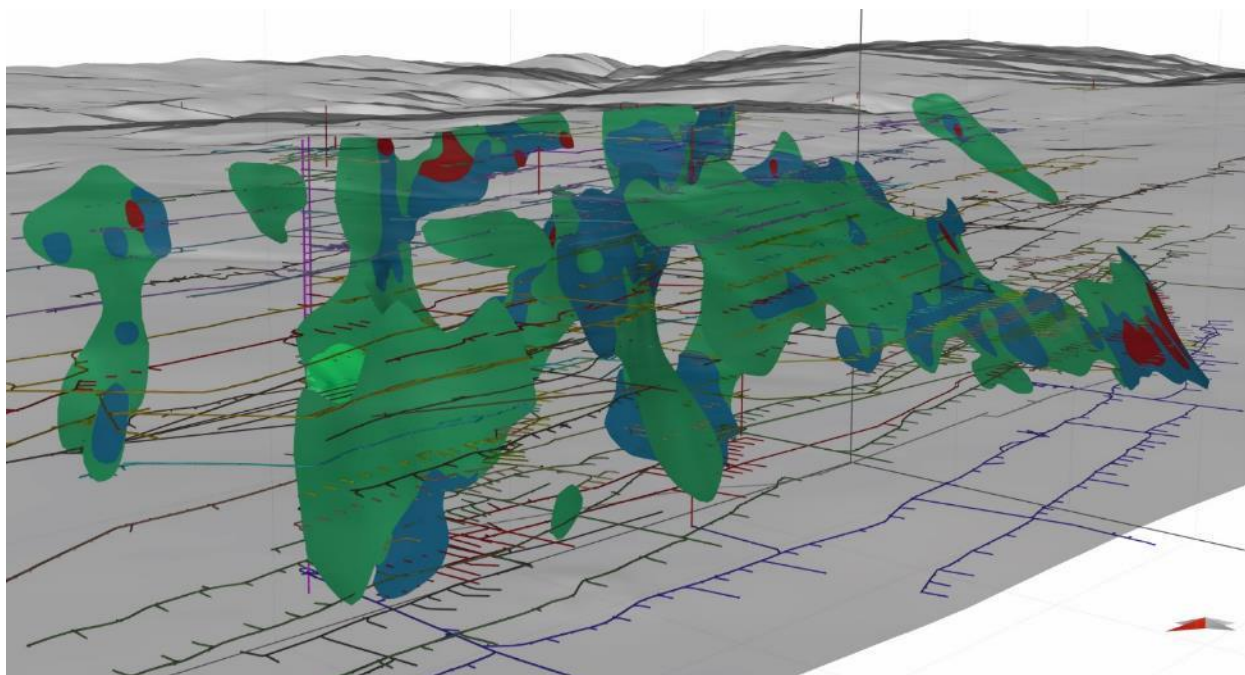
ve studovaných minerálech. Průměrný obsah uranu ve rmutech (89 g/t) je daleko nižší nežli obsah stejného prvku v průměrné rudě (Elektronická příloha 127), což svědčí o vysoké efektivitě alkalického loužení rudy. Uran na odkališti je zřejmě vázán na štěpné plochy biotitu nebo na směsi uranových minerálů s oxidy titanu a zirkonu. V obou případech jde o obtížně luhovatelný („refraktorní“) uran. Z ostatních stopových prvků byly největší koncentrace zjištěny u Zn (průměr: 420 g/t), Cr (55 g/t), Ni (33 g/t) a As (19 g/t). Jedná se o prvky vázané na sulfidy, které by bylo možno získávat pouze za použití kyselého loužení. Nicméně, provedený výpočet možných zdrojů však ukázal, že i přes nízké koncentrace studovaných prvků obsahuje odkaliště K-1 tisíce tun Cu, Pb, Zn, Mn, U, V, Ba, Zr, stovky tun Ni, Co, Cr, Sc, Li, Ga, La, Ce, Nd, Y a desítky tun: Mo, Th, Cd, Sb, W, Be, Hf, Nb, Cs, Se, Tl, Pr, Sm, Eu, Gd, Dy, Ho, Er a Yb. Celkové množství vzácných zemin činí 1,8 tisíc tun (Tab. 177; Obr. 460e–h). Přesto se domníváme, že za současných podmínek je koncentrace diskutovaných doprovodných prvků uranové mineralizace v materiálech odkaliště příliš nízká pro jejich ekonomické získávání. Docházíme tak ke stejnému závěru jako studie Rambouska et al. (2016).



Obr. 460 Koncentrace REY, Sc, Nb Ta a dalších stopových prvků v průměrné uranové rudě a ve rmutech z odkaliště (A-D) a celkové množství uvedených prvků (v tunách) v odkališti K-1, Dolní Rožínka (E-H)

2.4.6.2 Konceptuální 3D ložiskový model

Konceptuální 3D ložiskový model je úzce spjat s 3D geologickým modelem celého ložiska. Zobrazuje zjednodušenou situaci uranového zrudnění na ložisku Rožná. Ložisková tělesa uranového zrudnění jsou znázorněna na zónách SY1, SY2, SY3, SY4, SY7 a SY11 ve třech kategoriích kovnatosti (Obr. 461). Model umožňuje zvláště zobrazovat jednotlivé zóny bez uranového zrudnění, samostatně jednotlivá tělesa podle kategorie kovnatostí, rudní tělesa jednotlivých zón a kombinace všech zmíněných variant zobrazení. Celý model byl vytvářen v sw prostředí MOVE. Výsledný model ve formátu *.movd - projekt v programu MOVE (Elektronická příloha 137) byl exportován do 3D pdf (Elektronická příloha 138), kde je možné provádět variantní zobrazení 3D konceptuálního ložiskového modelu.



Obr. 461 Konceptuální 3D ložiskový model zobrazující rudní tělesa uranového zrudnění roztříděných do tříd podle kovnatosti. Pro lepší orientaci jsou zobrazena důlní díla a terén

Vstupními daty byly vyprojektované zóny SY1, SY2, SY3, SY4, SY7 a SY11 v 3D geologickém modelu zasahující z povrchu až do hloubky 50 m pod úroveň 24. patra. Dalším vstupním datovým souborem byly naskenované vertikální projekce rudních těles (Obr. 462) a prostorově usazené projekční linie zájmových zón, které byly převzaty z 3D geologického modelu.

Naskenované vertikální projekce měřítka M 1:5 000 dodali pracovníci DIAMO a.s.. Vertikální projekce zachycují vybraná vertikální a horizontální díla, řez terénem v projekční linii, místa křížení zón s tektonickými poruchami, bilanční bloky uranu a interpretace rudních těles rozčleněné podle kovnatosti do tří tříd. Rozsah třídy v % vyjadřuje množství uranu v bilanční rubanině. Interpretaci provedli zaměstnanci DIAMO a.s.

Ložisko Rožná je velmi komplikované svojí strukturní stavbou. Vyskytuje se tu hydrotermální zrudnění vázané na zájmové zóny, které společně s příčnými strukturami vytvářejí složitý systém. Navíc se zde vyskytuje metasomatické zrudnění, které je místy v širším okolí jednotlivých zón. Na ložisku bylo vyčleněno celkem 2630 bloků zásob, které se vyskytují nejen na hlavních

zájmových zónách, ale i na odžilcích těchto zón, nebo v místech metasomatického zrudnění. Bohužel, dnes již není možné určit, který blok byl vyčleněn v metasomatickém či hydrotermálním zrudnění.

Všechny bloky zásob likvidované na ložisku byly identifikovány v prostoru a přiřčeny k jednotlivým rudním systémům. Celý prostor ložiska byl v rámci každého systému rozčleněn ve směru zobrazovací linie do čtverců o rozměrech 50 × 60 m (což je běžný rozměr dobývacích bloků). Do každého jednotlivého čtverce dané zóny byly přiřčeny všechny likvidované bloky, překrývající se ve směru kolmém k zobrazovací projekční ploše rudního systému. Došlo tak ke sloučení bloků vyskytujících se na zájmové zóně s bloky na odžilcích a s bloky vyskytujících se na příčných zónách nebo v metasomatickém zrudnění.

Součtem množství likvidované bilanční rubaniny a likvidovaného kovu překrývajících se bloků byla pro každý čtverec vyjádřena kovnatost (%) podle vzorce (22):

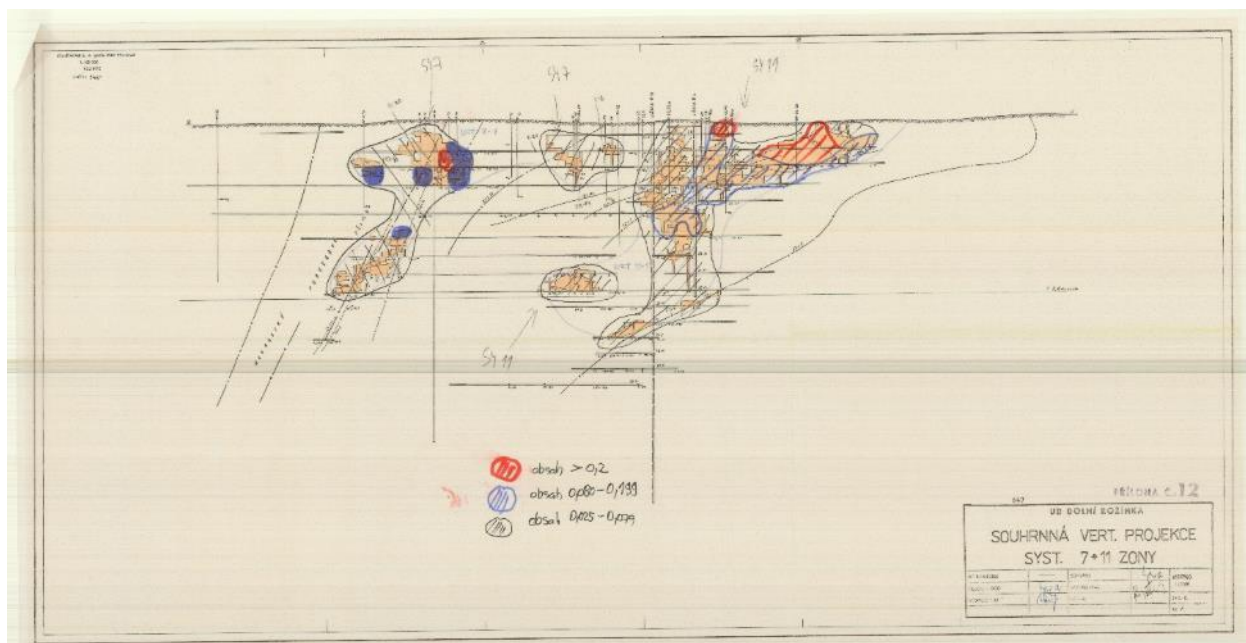
$$\frac{(U/T)}{100} = \text{kovnatost} [\%] \quad (48)$$

kde U je součet likvidovaného kovu v kilogramech a T je součet likvidované bilanční rubaniny v tunách.

Takto získané hodnoty kovnatosti byly rozděleny do skupin (Obr. 461):

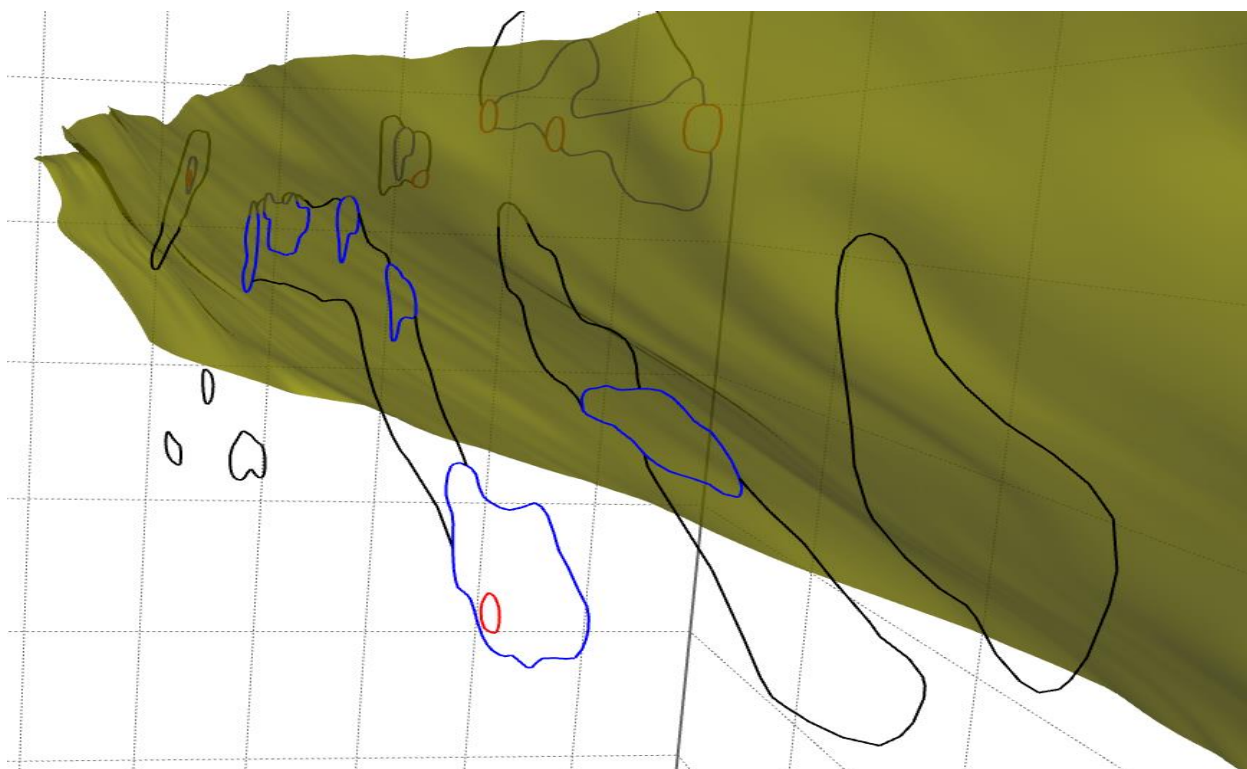
- od 0,025 do 0,079 % - běžná kovnatost (zelená rudní tělesa);
- od 0,08 do 0,199 % - středně silná až silná kovnatost (modrá rudní tělesa);
- nad 0,2 % - extrémně silná kovnatost (červená rudní tělesa).

Hranice skupin byly voleny tak, aby zároveň charakterizovaly rozmístění uranu na jednotlivých systémech a zároveň byla zachována celková přehlednost a srozumitelnost výsledného modelu.



Obr. 462 Příklad naskenované vertikální projekce rudních těles zón SY 7 a SY 11

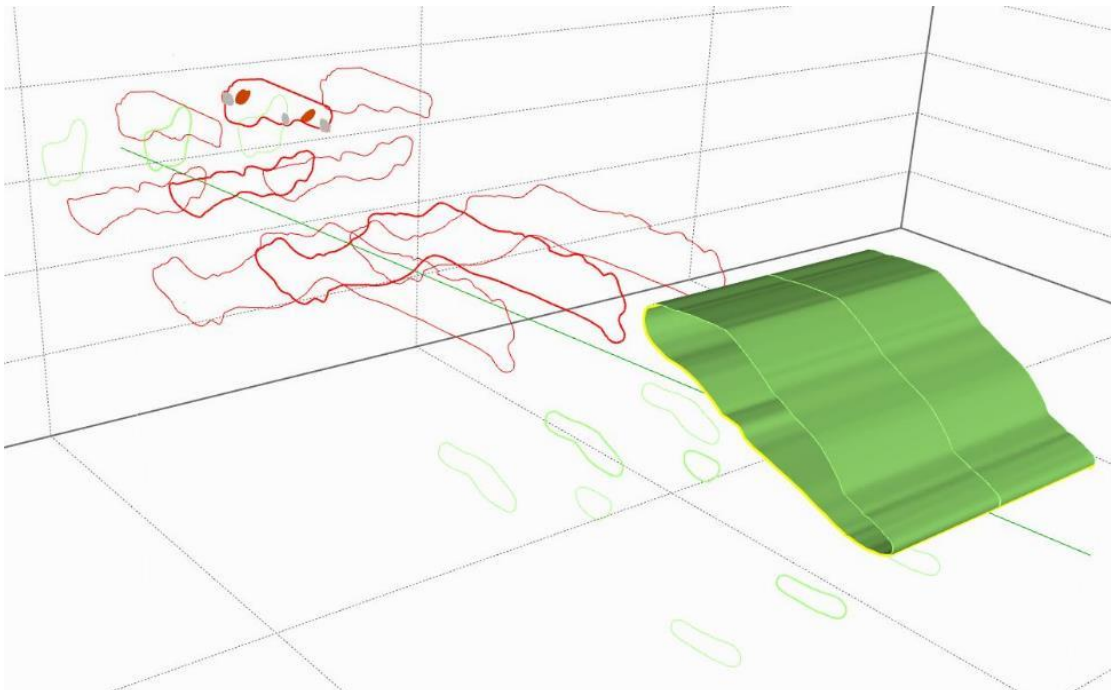
Interpretované vertikální projekce byly prostorově usazeny v sw prostředí MOVE. V prvním kroku byla vyprojektována vertikální sekce, podle prostorově usazené projekční linie dané zóny. Do této sekce byla importována naskenovaná vertikální projekce. Do dané sekce byly zobrazeny i koncové body vybraných důlních děl a to jak vertikálních, tak i horizontálních. Tyto koncové body byly použity jako referenční body, podle kterých byla upravena pozice i velikost naskenované vertikální projekce. Některé naskenované vertikální projekce obsahovaly i hloubkové měřítko, které bylo využito k upřesnění její výškové pozice. Tímto způsobem bylo prostorově usazeno pět vertikálních projekcí. Rudní tělesa zóny SY7 a SY11 byla zachycena na jedné vertikální projekci. Podle připojených vertikálních projekcí v jednotlivých sekcích byly digitalizovány hranice jednotlivých ložiskových těles rozříděných podle kovnatosti do tří tříd. Vytvořené a prostorově usazené hraniční linie jednotlivých rudních těles byly zobrazeny společně s danou zónou, ke které tělesa náleží (Obr. 463 Příklad prostorového zobrazení digitalizovaných hraničních linií rudních těles a zóny SY 1. Zájmové zóny byly přejaty z 3D geologického modelu, jako plochy v podobě mesh.



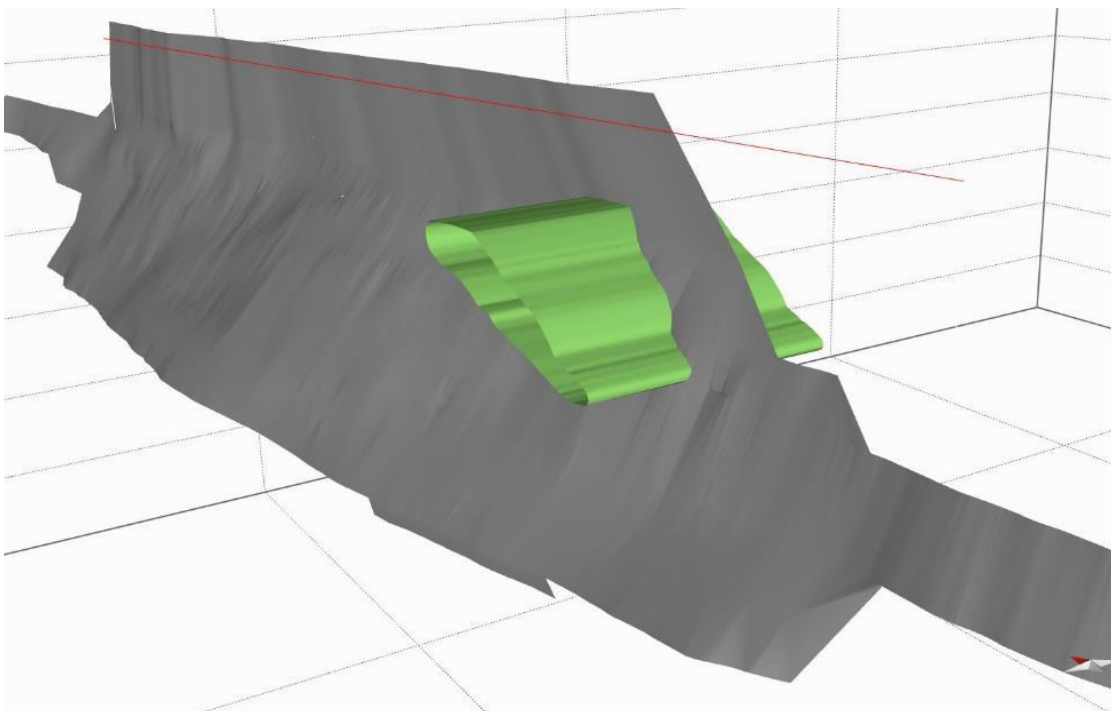
Obr. 463 Příklad prostorového zobrazení digitalizovaných hraničních linií rudních těles a zóny SY 1

Tvorba rudních těles probíhala následovně: Každé digitalizované rudní těleso v podobě linií bylo posunuto před a za plochu patřící zóny. Z těchto dvou liniových těles byl vytvořen obalový mesh - obalové těleso (Obr. 464), kterým byla následně proříznuta zóna (Obr. 465). Tímto postupem vznikla prostorově členitá plocha rudního tělesa. Tento postup se opakoval pro všechna rudní tělesa. Vzniklá tělesa byla rozřazena podle míry kovnatosti a také podle příslušnosti k dané zóně (Obr. 466). Celkem bylo takto vymodelováno 81 těles (16 těles I. třídy kovnatosti, 29 těles II. třídy kovnatosti a 36 těles III. třídy kovnatosti) na zónách SY1, SY2, SY3, SY4, SY7 a SY11. Všechna

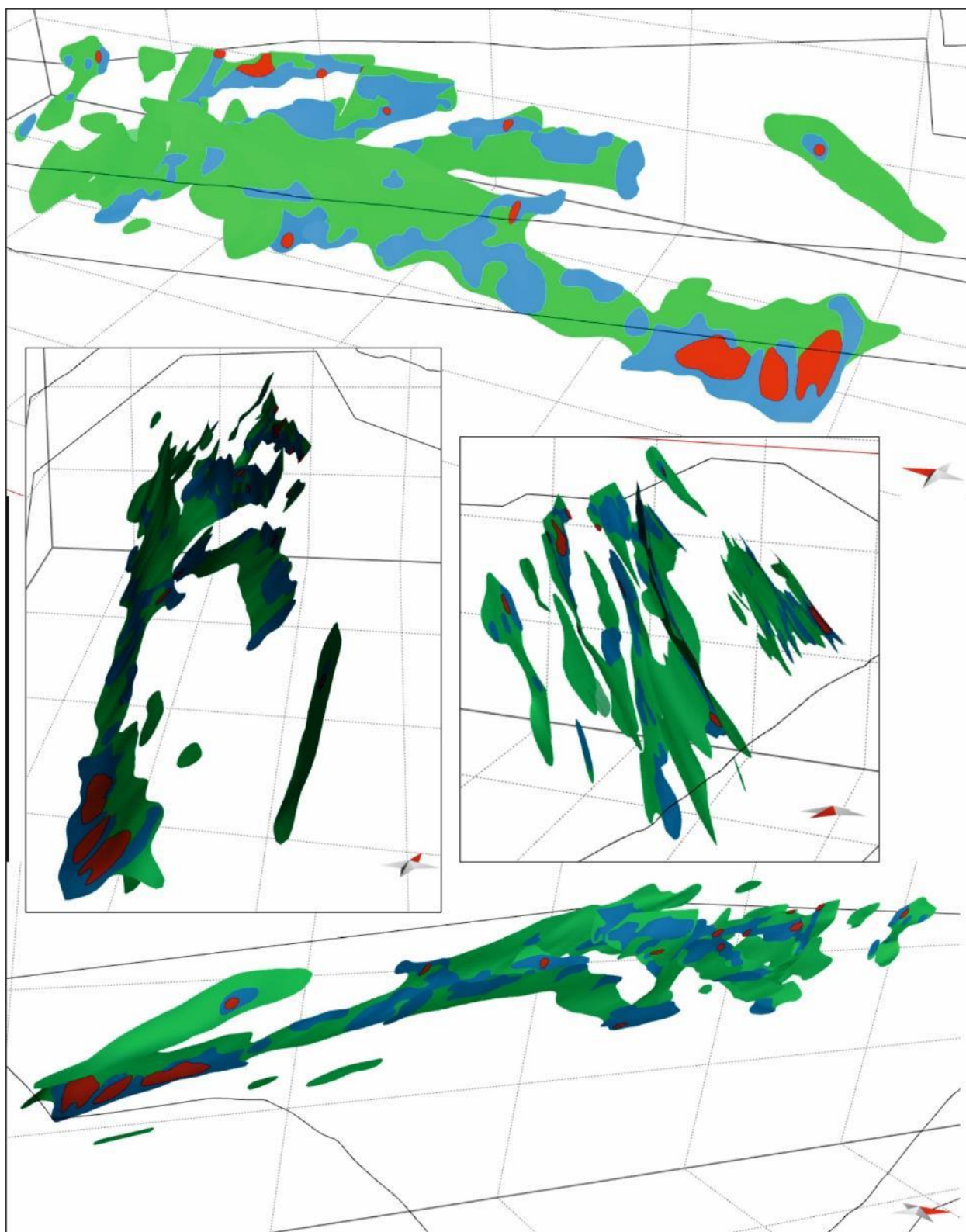
tělesa byla modelována jako zvlněné plochy, protože mocnost reálných těles vůči jejich rozsahu je zanedbatelná. Ve zvoleném měřítku modelu není malá mocnost těles ani přibližně zobrazitelná.



Obr. 464 Příklad obalového meshe jednoho rudního tělesa



Obr. 465 Obalové těleso prořezávající zónu SY 1



Obr. 466 Různé náhledy na ložiskový model zobrazující rudní tělesa rozřazená podle kovnatosti

Vytvořená rudní tělesa v některých případech nepřecházejí plynule z nejnižší kovnatosti do nejvyšší. Místa extrémně silná kovnatost přímo hraničí s běžnou kovnatostí nebo i s nebilančním prostorem. Tento jev je způsoben několika faktory:

1. Křížení struktur

Extrémně nabohacené partie se vyskytují v blízkém okolí křížení s příčnými strukturami, kde průměrně kovnatá struktura v rámci metrových vzdáleností přejde do extrémně nabohacené.

2. Prudké snížení kovnatosti

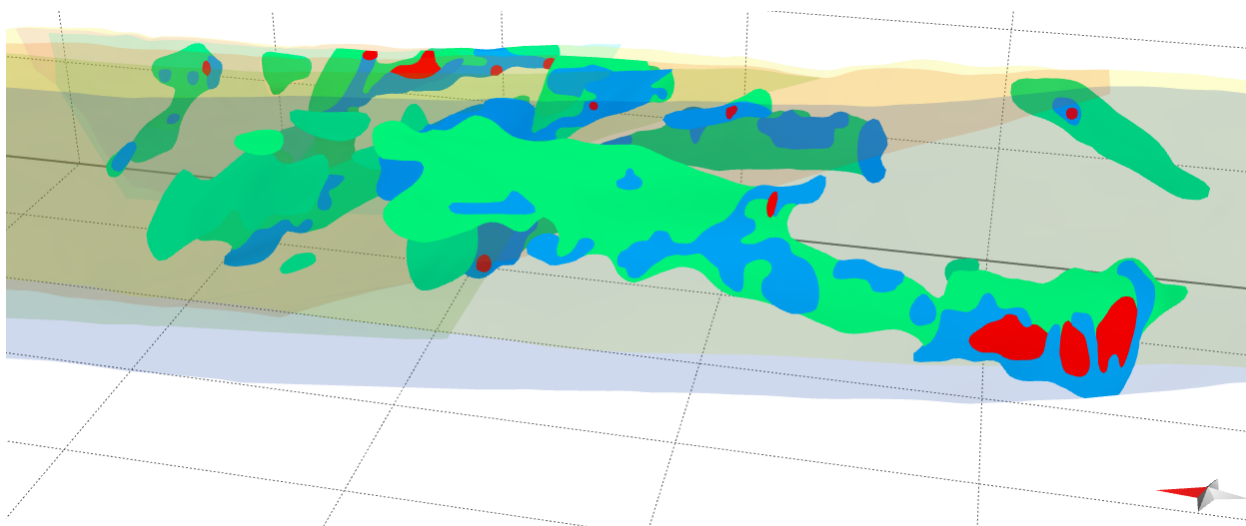
V okrajových částech zón dochází k velmi rychlému snížení kovnatosti až k úplnému vyznění v řádech prvních metrů. Takto prudká změna kovnatosti není ve zvoleném měřítku modelu ani přibližně zobrazitelná.

3. Hranice izolinií uvnitř bloku

Poměrně úzké hranice více izolinií probíhají uvnitř zvolených čtverců. Často hranice bilančnosti a tím i konec dobývání bloku probíhá uvnitř jeho hranic. Tato hranice navíc není stejná u všech vzájemně se překrývajících bloků v rámci jednoho čtverce. Pro přesnější vyjádření takovýchto oblastí by bylo nutné pracovat v měřítku nejméně 1 : 1 000 a rozčlenit oblast do jednotlivých lávek (obdélník 60 × 3 m). Pro takto zvolenou metodiku by bylo nutno každou jednotlivou lávku přepočítat z údajů v knihách vzorkování, což by bylo z časového hlediska zcela neefektivní (bylo by nutno zpětně spočítat stovky tisíc údajů). Výsledné izolinie by byly navíc svým průběhem tak blízko sebe, že by nebyly ve výsledném modelu postřehnutelné.

4. Selektivní dobývání méně kovnatých odžilků

Pokud byly paralelně s více nabohacenou strukturou dobývány nadložní či podložní odžilky s nízkou kovnatostí, došlo v celkovém součtu příslušného čtverce ke snížení kovnatosti. V případech, kdy k dobývání odžilků v některém ze čtverců nedošlo, celková kovnatost nebyla snížena a dva sousední čtverce mohly mít natolik odlišnou výslednou kovnatost, že došlo k vymizení některých izolinií na tomto kontaktu.



Obr. 467 Vytvořená rudní tělesa zobrazená na jednotlivých zónách

Výsledky modelování ukázaly (Obr. 467), že jsou jednotlivá rudní tělesa ve střední části ložiska uložena ploše, v jižní části ložiska se sklánějí pod úhlem 30–40° k jihu a v severní části ložiska pod stejným úhlem k severu. Pozice jednotlivých rudních těles je zřejmě určována celou řadou strukturálních i geochemických faktorů. Bohatá rudní tělesa se nacházejí zejména v místech změny úklonu jednotlivých zón (tj. v tlakových stínech), v místech štěpení hlavních zón na dílčí struktury

(odžilký) nebo naopak v místech jejich vykliňování. Ke zvýšení kovnatosti rovněž velmi často dochází na křížení podélných a příčných tektonických struktur. Tělesa rozptýlených rud v silně albitizovaných horninách (v „metasomatitech“) jsou vázána na místa vyznívání jednotlivých zón křehké deformace nebo se vyskytují samostatně, v jejich blízkosti.

Z geochemických faktorů, které kontrolují vznik zrudnění, jsou nejdůležitější změny v chemickém složení hydrotermálního systému. Ve svrchních horizontech ložiska se zřejmě výrazně uplatňuje snížení hydrostatického tlaku a degazace systému varem, což vede ke snížení parciálního tlaku CO_2 , k rozpadu hydrouhličitanových komplexů uranu a k vysrážení uraninitu nebo coffinitu. Výrazné oscilace v hydrostatickém tlaku dokumentují rudní brekcie, které jsou typické v intervalu 12-15. patra ložiska. Na hlubokých horizontech ložiska Rožná, kdy se hydrostatický tlak blížil tlaku litostatickému, byla zřejmě nejdůležitějším faktorem, který určoval vysrážení rud, redukce roztoků U^{VI} na U^{IV} . Redukčním činidlem bylo převážně dvojmocné železo sulfidů (zejména pyritu), jak tomu nasvědčuje zatlačování pyritu a jeho koroze uranovými minerály (viz předcházející kapitola této zprávy). V tělesech albitizovaných hornin (v metasomatitech) hrálo úlohu redukčního činidla dvojmocné železo biotitu. Znamená to, že byl vznik uranové mineralizace kontrolován intenzitou pyritizace jednotlivých zón křehké deformace, nebo v případě metasomatitů výskytem jemnozrnných rul bohatých biotitem, které snadno podléhaly hydrotermálním přeměnám, ve kterých byl biotit alterován na hydrobiotit nebo chlorit za současného vzniku hematitu. Tomu nasvědčuje načervenalá barva tohoto typu rud.

Prostorová pozice rudních těles na jednotlivých zónách napovídá, že se tato tělesa postupně do hloubky rozpadají a jejich velikost se zmenšuje. Převážně velmi ploché uložení jednotlivých rudních těles naznačuje, že se nejedná o rudní sloupy, jejichž pokračování by bylo možno očekávat pod úrovní 24. patra ložiska. Prognóza výskytu ekonomicky významných akumulací uranu pod touto hloubkovou úrovní je tedy nepříznivá.

2.4.7 Charakterizace EDZ

2.4.7.1 Karotážní práce

Po odvrtání geotechnických vrtů byly na vrtech provedeny karotážní práce realizované firmou AQUATEST, a.s. Tyto práce byly provedeny ve dvou etapách – pro vrty na 18. a 20. patře uvedené v Technické zprávě za rok 2018 (Elektronická příloha 3 v Bukovská ed. 2018) a pro vrty na 12. a 24. patře uvedené v Technické zprávě za rok 2019 (Elektronická příloha 136).

Karotážní měření se uskutečnilo přenosnou modernizovanou aparaturou K-300/Matrix se čtyřžilovým kabelem s elektrickým pohonem vrátku (Obr. 468). Data byla zaznamenávána do počítače v digitální formě. Televizní prohlídky vrtů byly provedeny přenosnou aparaturou GeoVISION. Televizní kamera byla do dovrchních vrtů zasouvána pomocí speciální duralových tlačných tyčí s trapézovými závity.



Obr. 468 Karotážní měření - aparatura

Na 18. a 20. patře bylo v celkem šestnácti vrtech provedeno měření televizní kamerou. TV kamera byla změřena ve třech svislých vrtech (-90°) o hloubkách 40,9–42,2 m, v šesti vrtech dovrchních pod úhlem $+5^\circ$ o hloubkách 15,2–15,9 m, v jednom vrtu dovrchním pod úhlem $+5^\circ$ o hloubce 30,7 m, ve třech vrtech dovrchních pod úhlem $+45^\circ$ o hloubkách 15,2–16,2 m a ve třech vrtech

dovrchních pod úhlem $+90^\circ$. Karotážní měření bylo provedeno ve třech vrtech svislých (-90°) o hloubkách 40,9–42,2 m.

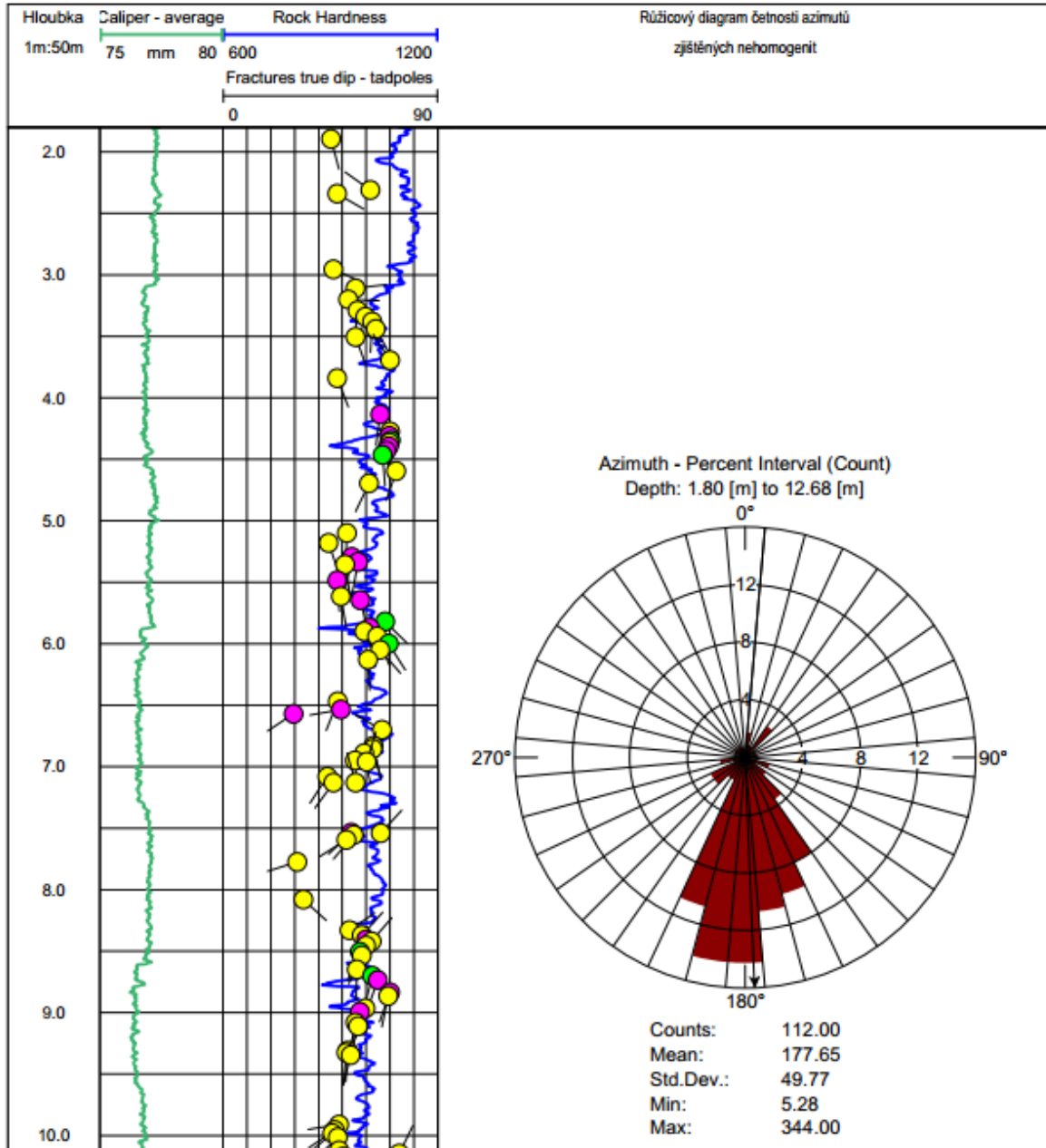
Na 12. a 24. byly televizní prohlídky i karotážní měření provedeny ve dvou svislých vrtech o hloubkách 40 m. První se nacházel na 12. patře dolu v místě geotechnické stanice 12 s označením BGS12-VD, druhý byl umístěn na 24. patře dolu v místě geotechnické stanice 24 s označením BGS24-VD. Průměr všech vrtů byl 76 mm, vrty byly v době měření nezapažené.

V rámci měření byl využit tento komplex karotážních metod:

- gama karotáž (radioaktivita běžných hornin závisí na obsahu draslíku, jmenovitě jeho izotopu ^{40}K . (Draslík je ve zvýšené míře obsažen v některých minerálech) – ověření a upřesnění litologie vrtů,
- elektrokarotáž - k ověření a upřesnění litologického profilu a míry tektonického porušení horniny (byly změřeny jak odporová karotáž, tak i indukční karotáž),
- gama gama karotáž v hustotní modifikaci (hustotní karotáž) – především ke zjištění úseků tektonicky porušené horniny a k detekci otevřených puklin,
- magnetická karotáž – měření magnetické susceptibility: rozčlenění profilu vrtu podle magnetických vlastností hornin a výplní puklin,
- spojitá inklinometrie – zjišťování prostorového průběhu vrtu (velikosti úklonu a jeho azimutu),
- kavernometrie – ověření skutečného průměru, detekce otevřených puklin, nerovností stěny vrtu
- termometrie – identifikace přítoků, zjištění teplotního pole v horninovém masívu
- rezistivimetrie – zjišťování případné zonality vody ve vrtu (z různých přítoků),
- metoda ředění označené kapaliny – pro objasnění proudění podzemní vody, zjištění propustných puklin,
- metoda čerpání označené kapaliny – pro ocenění dílčích vydatností jednotlivých puklin,
- vlnová akustická karotáž – registrace úplného vlnového obrazu: podélné a příčné seismické vlny,
- akustický televizor (akustický skener) – detekce puklin a jiných diskontinuit a jejich prostorové orientace, detekce vykavernovaných úseků a jejich směr, sestavení orientovaného vrtného jádra, křivka „tvrdosti“ (hardness) hornin.

Na základě těchto měření byly sestaveny litologické profily vrtů, vyhodnocen stupeň porušení, stanovena přirozená radioaktivita hornin, vypočtena měrná objemová hmotnost hornin, a geomechanické vlastnosti hornin, vyhodnoceny pukliny a plochy nespojitosti (ukázka na Obr. 469), včetně určení sklonu a směru a vyhodnoceny hydrogeologické parametry.

Růžicový diagram četností azimutů zjištěných ploch diskontinuit ve vrtu BGS18-VD (Rožná Bukov) Příloha č. 6_4/1.interval



Obr. 469 Příklad interpretace zastižených poruch a diskontinuit ve vrtu BGS18-VD

2.4.7.2 Rozsah a charakter EDZ stanovený na stěnách chodeb

2.4.7.2.1 Seismická refrakční tomografie na stěnách 20. p,

Podél zpřístupněného líce výrubu štoly Z3-XX v úseku mezi stanicemi GS20/1 a GS20/2 bylo provedeno měření metodou profilové refrakční tomografie s krokem snímačů 0,5–1 m a krokem zdrojů 1–2 m. Soubor dat byl doplněn o záznamy pořízené se zdroji umístěnými v horizontálních vrtech EDZ20-HA až EDZ20-HD a v horizontálních vrtech na stanicích GS20/1 a GS20/2, kdy bylo registrovány pomocí snímačů na stěně štoly. Další soubor dat byl získán realizací tomografického měření v systému vrt/vrt. To bylo provedeno s využitím některých dvojic horizontálních vrtů do stěny štoly. Jednalo se o kombinace EDZ20-HB/EDZ20-HC, EDZ20-HC/EDZ20-HD a EDZ20-HD/BGS20/1-H. Získaná data byla zpracována v prvním kroku jako povrchová refrakční tomografie (použity byly jen zdroje a snímače na povrchu stěny štoly), v další fázi byl proveden výpočet pro společný datový soubor. Refrakční tomografie pouze v „povrchové“ variantě byla také realizována na severní stěně štoly RV4₂₀-101 v úseku délky 75 m s počátkem v úrovni křížení se štolou PŠ-203.

Průzkumné práce byly provedeny s použitím následujícího vybavení.

- seismograf Terraloc PRO – 48 kanálů, registrace signálů snímačů na podlaze štol (výrobce ABEM, Švédsko);
- snímače rychlosti kmitání (geofony) osazené elementy SM-11 (Sensor, Holandsko) o vlastní frekvenci 30Hz, (stěny štol);
- vrtná sonda vlastní konstrukce SSI-8 osazená osmi trojosými snímači rychlosti kmitání s měřicími elementy OMNI-2400 s krokem 0,5 m;
- elektrodynamický vrtný seismický zdroj BIS-SH s pulsním generátorem IPG (Geotomographie GmbH, Německo);
- jako seismický zdroj na stěnách použity údery 2 kg úderníku do ocelové podložky.

Ve vrtu EDZ20-HA nebylo možné použít vrtný seismický zdroj z důvodu jeho vypažení, byla proto změřena ekvivalentní varianta se snímačem ve vrtu a se zdroji na stěnách štoly Z3-XX.

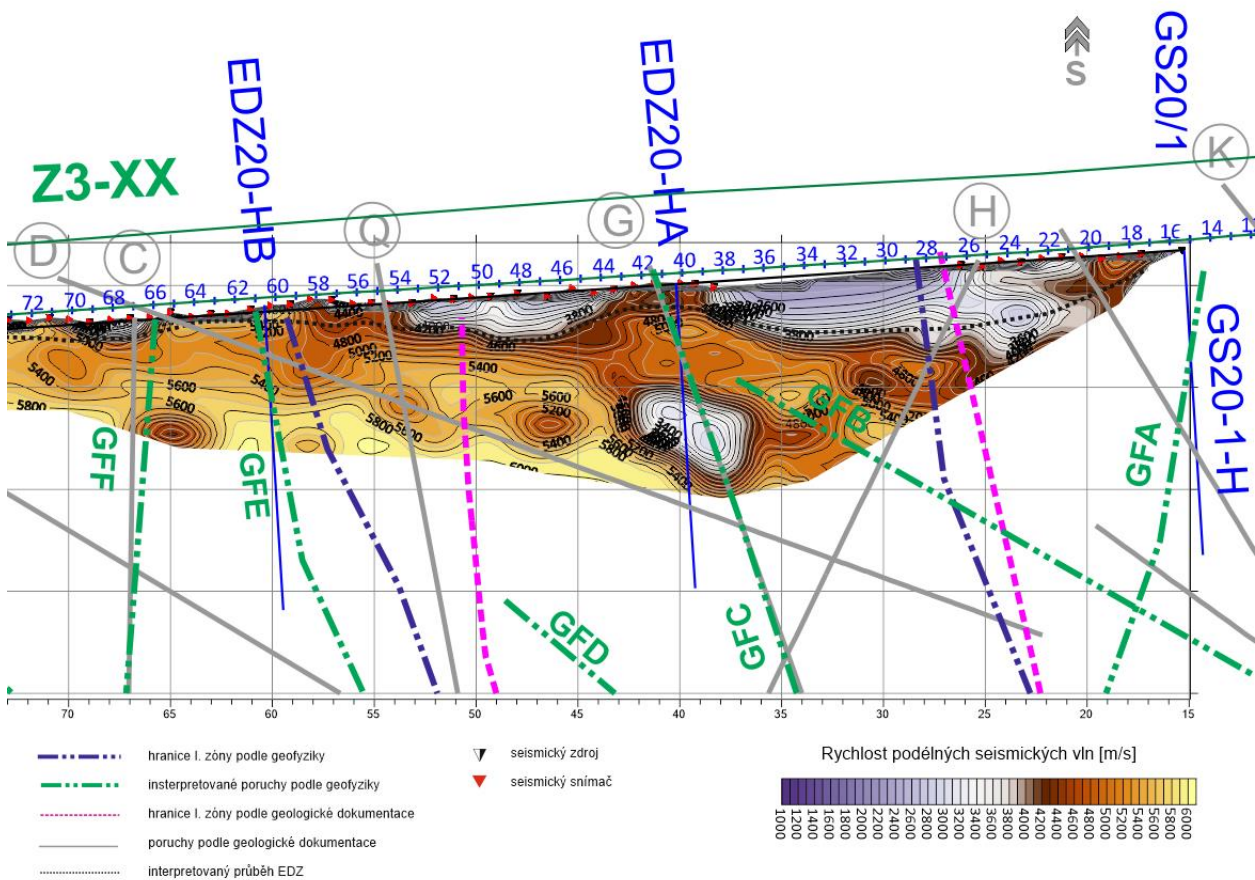
Metoda povrchové refrakční tomografie sleduje rozložení rychlostí šíření seismických vln pomocí analýzy časů šíření tzv. čelné vlny. Tato je v jisté vzdálenosti od zdroje seismické energie registrována jako čas prvního nasazení a je tak umožněno její přesné vyčíslení. Kombinací různých pozic zdrojů seismické energie a snímačů rychlosti kmitání je získán soubor závislostí času šíření na vzdálenosti od zdroje. Metodami matematické inverze je hledán model prostředí (tedy rozložení rychlostí šíření v geologickém řezu), jehož teoretická odezva nejlépe vystihuje měřená data.

Seismická refrakční tomografie na stěně štoly Z3-XX

Na odkryté severní stěně štoly Z3-XX na 20. patře bylo provedeno seismické měření metodou refrakční tomografie rozšířené o využití horizontálních vrtů vedených z chodby zhruba jižním směrem. V této variantě se významně zvýší hloubkový dosah metody v okolí použitých vrtů. Při seismické refrakční tomografii aplikované pouze v „povrchové“ variantě (v tomto případě

snímače i zdroje energie na povrchu stěny štoly) je hloubkový dosah ovlivněn zejména gradientem seismických rychlostí a také délkou měřicího profilu. Pokud je dosaženo hloubky, od které již velikost rychlostí narůstá pozvolna, hloubkový dosah měření lze zvýšit již jen značným prodloužením vzdálenosti mezi zdrojem a přijímačem. To ovšem způsobuje zhoršení kvality signálu, v nehomogenním porušeném prostředí čitelnost signálu rychle degraduje. Odkrytí stěny v omezeném úseku je také nepříznivý faktor. Využití horizontálních vrtů je tak optimální možností jak hloubkový dosah navýšit.

Celkový rychlostní řez pro refrakční tomografii na severní stěně zpracovanou obvyklým „povrchovým“ způsobem ukazuje Elektronická příloha 52 a jeho část také Obr. 470. Rychlostní řez má ve východní polovině výrazně vyšší hloubkový dosah, což je způsobeno nižšími rychlostmi při okraji stěny, v místě první zóny (staničení 27–51 m) rychlosti klesají k hodnotám kolem 1 000 m/s, v jejím okolí je také patrné snížení hodnot rychlostí. Naproti tomu v západní části řezu od úrovně vrtu EDZ20-HB (metráž 60,5 m) jsou již rychlosti výrazně vyšší, při okraji stěny výrazně nad 3 000 m/s, a rychle dosahují hodnot nad 5 000 m/s (již v hloubkách kolem 1 m, někdy i v menších). V prostoru první zóny jsou patrné nízké rychlosti pod 3 000 m/s, které odpovídají silně rozpukaným (porušeným) horninám (zejména v úsecích pracovního staničení 24–39 m a 43–55 m).



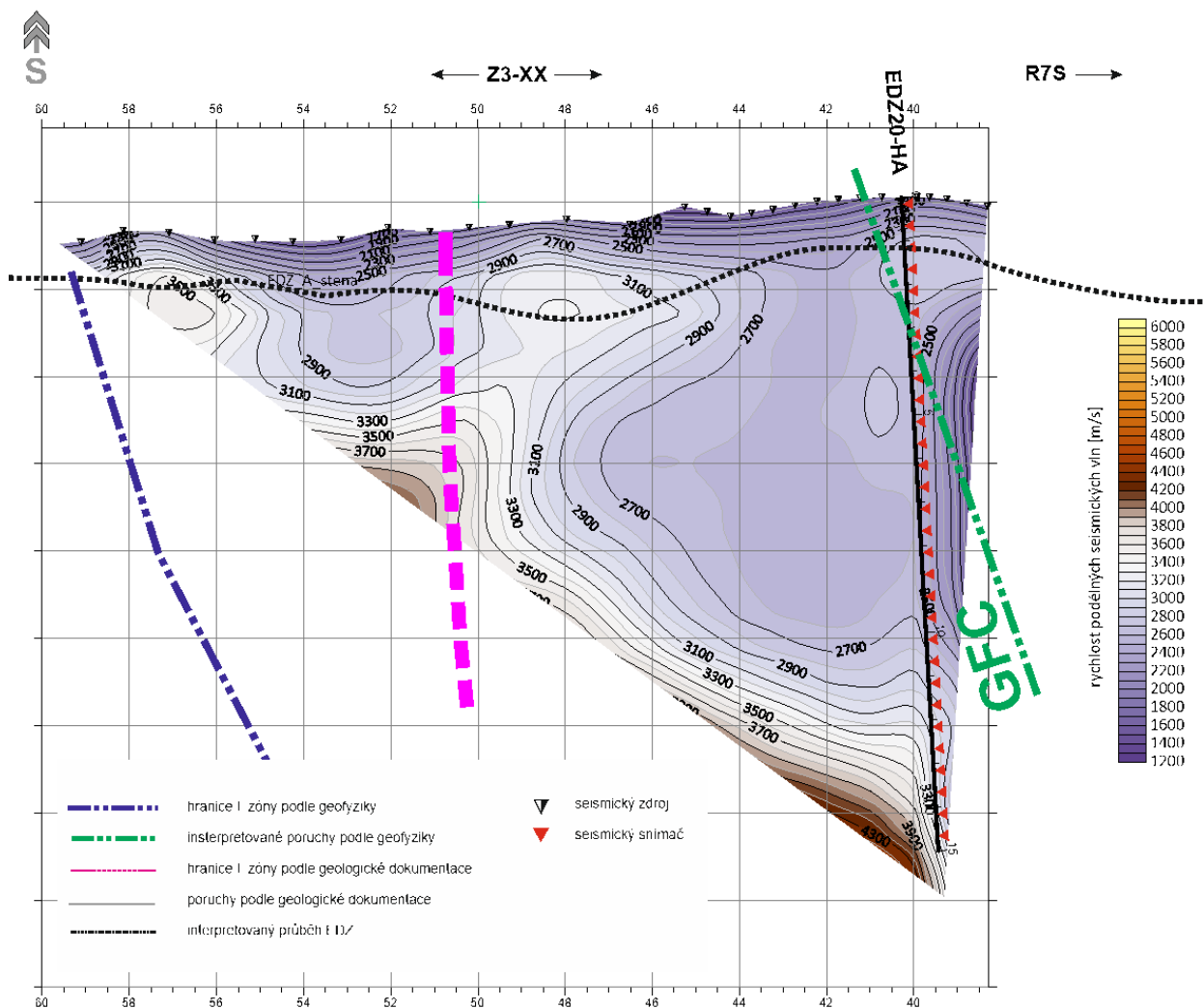
Obr. 470 Seismická refrakční tomografie na stěně štoly Z3-XX (20. patro), výřez refrakčního řezu v úseku staničení 15–75 m (celý řez uvádí Elektronická příloha 52)

Podle rychlostního řezu byl proveden odhad dosahu EDZ do horninového prostředí uvnitř stěny štoly. Dosah EDZ je interpretován jako zvýšený v místech se zjištěnými relativně nízkými rychlostmi při povrchu stěny štoly. Těmi jsou jednak úseky uvnitř první zóny v rozmezí staničení 24–51 m a v jejím blízkém okolí, v prostředí západně od zóny jsou lokálně interpretovány úseky s vyšším dosahem EDZ v intervalech 65–71 m, 96–100 m, 114–122 m. Interpretaci je vhodné chápat spíše jako kvalitativní s relativním stanovením dosahu EDZ podle charakteru rychlostního pole.

Dalším krokem bylo společné zpracování „povrchové“ refrakční tomografie, měření mezi horizontálními vrty a povrchem stěny štoly Z3-XX. Do tomografického výpočtu vstupuje samozřejmě mnohem více informací z prostředí více vzdáleného od líce stěny štoly. Hloubkový dosah je vymezen použitou hloubkou horizontálních vrtů. Získané profilové řezy jsou uvedeny v příslušných elektronických přílohách, popis výsledků následuje v dalším textu.

Tomografický řez mezi vrtem BGS20/1-H a stěnou štoly Z3-XX

Získaný rychlostní řez je zobrazen v Elektronická příloha 58. V okolí vrtu BGS20/1–H je patrná oblast nízkých rychlostí, která zasahuje do masivu stěny do vzdálenosti kolem 4 m. Pokles rychlostí může souviset s přítomností interpretované poruchy podle geofyziky s označením GFA (linie je určena v horizontálním rychlostním řezu na 20. patře, více v kapitole 2.4.5.2.2). Příloha také zobrazuje interpretovaný odhad dosahu zóny EDZ ve stěně štoly.



Obr. 471 Seismický tomografický řez mezi vrtem EDZ20-HA a stěnou štoly Z3-XX (Elektronická příloha 59)

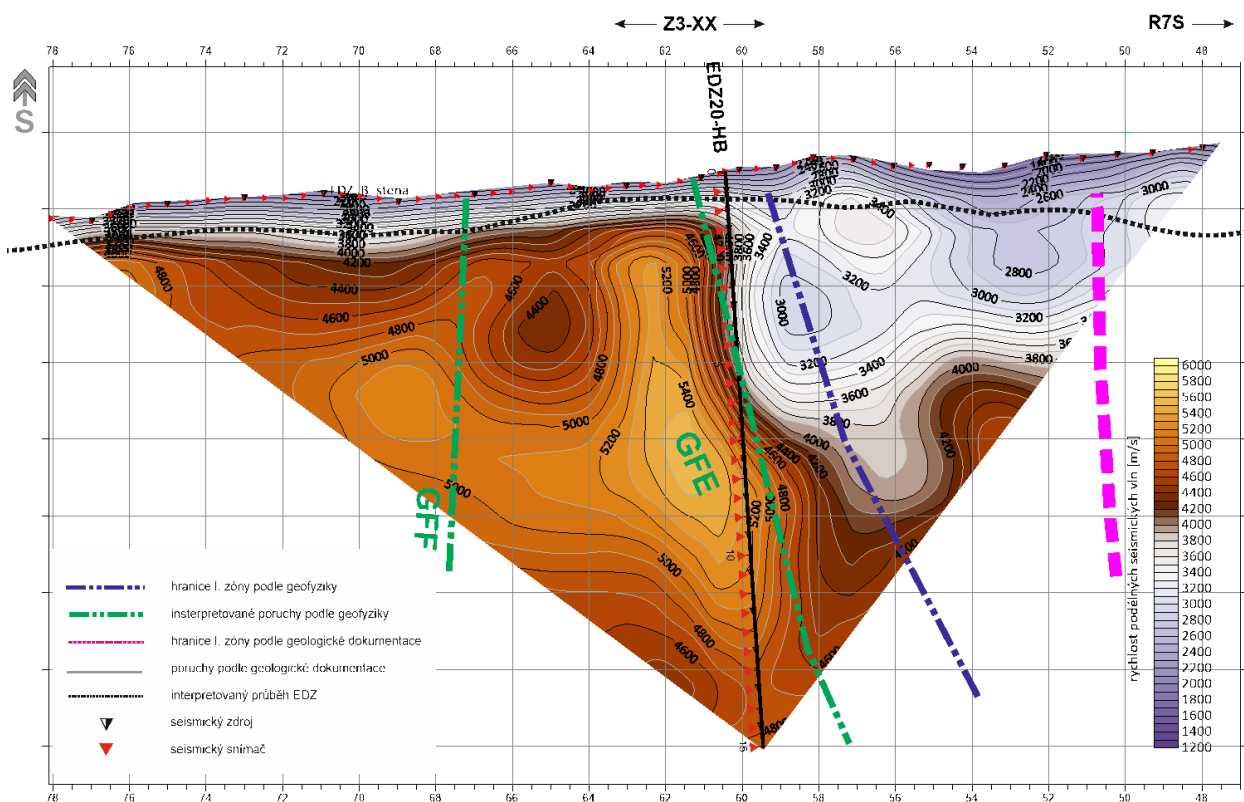
Tomografický řez mezi vrtem EDZ20-HA a stěnou štoly Z3-XX

Měření mezi vrtem EDZ20-HA a stěnou štoly bylo realizováno v části mezi metrážemi 39–60 m, tedy ve stěně západně od vrtu. Část stěny východně od vrtu EDZ20-HA nebyla odstrojena. Měření proběhlo s použitím snímačů ve vrtu, buzení energie bylo provedeno na stěně. Vypočtený rychlostní řez je prezentován v Elektronická příloha 59 a je také zobrazen na Obr. 471.

Rychlostní pole je charakterizováno nízkými rychlostmi, větší část řezu spadá do prostředí uvnitř první zóny. V okolí vrtu se rychlosti pohybují v mezích 2 500 m/s, v blízkosti stěny výrubu klesají pod 2 000 m/s. Západní okraj první zóny, který je podle geologie vymezený na staničení 51 m, se v rychlostním řezu projevuje jen slabě. Spíše se jedná o projev poruchy vymezené geologií o několik metrů více k západu (označena jako Q). Z hlediska seismických rychlostí pokračuje porušená oblast k západu a v tomto řezu není ohraničena. Provedené vymezení dosahu EDZ je v silně porušeném prostředí uvnitř první zóny nejednoznačné.

Tomografický řez mezi vrtem EDZ20-HB a stěnou štoly Z3-XX

Průběh seismických rychlostí v okolí vrtu EDZ20-HB v rozmezí pracovního staničení 48–78 m je obsahem Elektronická příloha 60. Výrazná rychlostní změna je patrná na tomografickém řezu v okolí vrtu EDZ20-HB (ústí vrtu odpovídá staničení 60,5 m). Směrem k východu (k vrtu EDZ20-HA) jsou rychlosti nízké, v intervalu 3 000–3 700 m/s, směrem k západu (k vrtu EDZ20-HC) jsou hodnoty rychlostí poměrně vysoké, pohybují se v hodnotách výrazně nad 5 000 m/s. Podle dokumentace prochází vrt většinou prostředím amfibolitů, pouze u dna vrtu jsou popisovány lokálně migmatity. Rychlostní řez ukazuje na významné porušení hornin východně od vrtu EDZ20-HB, které je patrné prakticky od staničení ústí vrtu v intervalu staničení 48–60 m. Západní okraj poruchy je geologicky vymezen na metrži 51 m, ovšem rozsah výrazně oslabené a porušené horniny je omezen podle rychlostního řezu prakticky až vrtem EDZ20-HB. Omezení první zóny podle rychlostního pole je tak interpretováno ve staničení 59–60 m (průnik hranice se stěnou štoly). Struktura s označením GFE se v tomto řezu jeví spíše jako západní okraj jakési přechodové oblasti na okraji první zóny.



Obr. 472 Seismický tomografický řez mezi vrtem EDZ20-HB a stěnou štoly Z3-XX (Elektronická příloha 60)

Spojením dílčích řezů získaných mezi vrtem EDZ20-HA a stěnou, resp. mezi vrtem EDZ20-HB a stěnou vznikl částečný řez mezi vrty EDZ20-HA a EDZ20-HB (Elektronická příloha 54).

Tomografický řez mezi vrtem EDZ20-HC a stěnou štoly Z3-XX, tomografie mezi vrty EDZ20-HB a EDZ20-HC

Úsek stěny štoly mezi staničením 62–79 m popisují tomografické řezy získané mezi vrty EDZ20-HB a EDZ20-HC (Elektronická příloha 55) a mezi vrtem EDZ20-HC a stěnou štoly Z3-XX (Elektronická příloha 61). Rychlostní obraz je v této části již klidnější, vliv první zóny je patrný jen ve východním okraji řezu v okolí struktury GFE. Geofyzikální struktura GFF by v tomto detailním zobrazení mohla být posunuta cca o 2 m k východu. Oblast relativně vyšších rychlostí západně od vrtu EDZ20-HB je možné vysvětlit interpretovat jako lokální blok málo rozpukaných amfibolitů (tento horninový typ je ve vrtu dokumentován). Dosah EDZ do masivu je interpretován do 1 m, nepatrné zvýšení je vykresleno v úseku metrů 66–74 m.

Tomografický řez mezi vrtem EDZ20-HD a stěnou štoly Z3-XX, tomografie mezi vrty EDZ20-HC a EDZ20-HD

Úsek stěny štoly Z3-XX v rozmezí staničení 79–101 m popisují tomografické řezy získané mezi vrty EDZ20-HC a EDZ20-HD (uvedený v Elektronická příloha 56) a řez mezi stěnou a vrtem EDZ20-HC, který obsahuje Elektronická příloha 62. Výraznější snížení seismických rychlostí je patrné v blízkosti vrtu EDZ20-HC ve staničení 80–83 m s dosahem několik metrů do masivu bloku. Může se jednat o projev blízké geologické struktury označené jako B, okrajem této oblasti prochází interpretovaná porucha GFH, tak jak byly vymezena v rychlostním řezu pro celý horizontální blok na 20. patře. Geofyzikální struktura GFG prochází širší oblastí snížených rychlostí od metrů 91 m na stěně štoly, spolu s geologickou linií A vymezuje oblast snížených rychlostí vzdálenou od stěny štoly 10–15 m. Zde lze očekávat intenzivně rozpukané biotitické ruly, které jsou dokumentovány ve vrtu EDZ20-HC ve staničení 12,0–16,0 m a projevují se nízkými hodnotami RQD. Naopak východně od vrtu EDZ20-HD jsou rychlosti relativně vysoké (až 5 700 m/s), což odpovídá popsané litologii vrtu s minimem popsaných poruch či puklinových oblastí.

Tomografický řez mezi vrtem BGS20/2-H a stěnou štoly Z3-XX, tomografie mezi vrty EDZ20-HD BGS20/2-H

Tato část sledovaného bloku odpovídá úseku staničení 101–122 m, příslušné řezy jsou uvedeny v Elektronická příloha 57 (řez mezi vrty EDZ20-HD a BGS20/2-H) a v Elektronická příloha 63 (řez mezi vrtem BGS20/2-H a stěnou). V návaznosti na předchozí úsek jsou západně od vrtu EDZ20-HD patrné vyšší hodnoty seismických rychlostí (nad 5 000 m/s), které se ovšem směrem k vrtu BGS20/2-H rychle snižují, zejména v jižní části řezu více vzdálené od líce výrubu štoly Z3-XX. V rozmezí staničení 117–120 m je patrná při líci stěny štoly oblast snížených rychlostí protažená k jihu směrem do masivu podél vrtu BGS20/2-H, která dosahuje do úrovně 12 m hloubky vrtu. V tomto úseku vrtu je dokumentováno nízké RQD, často pod hodnotou 50 %. Obojí ukazuje na přítomnost intenzivně rozpukaných hornin, v tomto případě převážně biotitických rul. Geofyzikální struktura s označením GFI vedené od stěny štoly ve směru jihovýchodním prochází zhruba středem širší oblasti nízkých rychlostí západně od vrtu EDZ20-HD, lokalizované v úrovni odpovídající hloubce vrtu 10–15 m.

Povrchová refrakční tomografie na stěně štoly RV4 20-101

V této části bylo provedeno měření metodou povrchové refrakční tomografie podobně jako na stěně štoly Z3-XX. Měřeno bylo s krokem snímačů 1 m a s krokem zdrojových bodů 2 m. Pokryta byla severní stěna štoly v úseku pracovního staničení 2–72 m. Získaný rychlostní řez je součástí Elektronická příloha 53. Podobně jako v případě štoly Z3-XX jsou v prostoru hlavní poruchy zjištěny nižší rychlosti v okolí stěny štoly. V tomto úseku je také interpretován větší dosah zóny EDZ do masivu, maximální dosah je v prostoru poruchy kolem 4 m (v úseku pracovního staničení 6–36 m), mimo oblast zóny je to pak 0,5–1,0 m. Lokální zvýšení dosahu EDZ je také patrné v úseku staničení 48–54 m, kde je v rychlostním řezu patrné snížení rychlostí v oblasti při stěně štoly.

2.4.7.2.2 Měření georadarem na jižní stěně štoly Z3-XX

Odkrytá stěna štoly Z3-XX byla v rámci průzkumných prací v celém přístupném úseku zkoumána georadarovým měřením. Georadarová metoda je založena na principu vysílání vysokofrekvenčního elektromagnetického vlnění do země a sledování časového průběhu procházejících a odražených vln v radarových řezech, které vznikají postupným posunem systému vysílací a přijímací antény po jednotlivých profilech. V radarových řezech je patrný průběh jednotlivých rozhraní, lokálních nehomogenit a případných diskontinuit v řezu. Vlnový obraz je ovlivněn lokálními nehomogenitami především s odlišnou vodivostí a dalšími elektromagnetickými vlastnostmi (volné nebo zvodnělé dutiny, otevřené pukliny, grafitizované pukliny, puklinové zóny intenzivně porušené, kovové objekty, zvodnělý nebo silně jílovitý materiál apod.). Nehomogenity uvedeného charakteru se projevují v radarových časových řezech charakteristickými změnami v registrovaném signálu.



Obr. 473 Provádění georadarového měření na stěně štoly Z3-XX

Vrtná georadarová měření byla realizována pomocí následujícího vybavení:

- georadarová aparatura SIR 200 (GSSI, USA);
- stíněná anténa 400 MHz (GSSI, USA).

Hloubkový dosah georadarového měření pro tento systém činí v daném prostředí kolem 3–5 m. Systém je vhodný zejména pro vyhledání objektů velikosti kolem od 0,2 m včetně puklin a porušených či oslabených zón. S ohledem na členitý reliéf obnaženého výrubu štoly bylo měření provedeno v diskretním módu, tj. s ručním spuštěním měření na každém měřicím bodě. Měření bylo realizováno s rozestupem 0,125 m, tedy 8 bodů na 1 m délky.

Zpracování získaných dat bylo provedeno v programovém prostředí ReflexW (SandmeierGeophysical Research, Německo). Použity byly obvyklé postupy sestávající s odstranění nízkofrekvenčního šumu, frekvenční filtrace, úpravy zesílení a 2D vyhlazení signálu. Pro přepočítání na hloubkové měřítko byla použita střední rychlost šíření elektromagnetických vln 0,120 m/ns.

Získaný radarový řez je součástí Elektronická příloha 64. V radarovém obrazu jsou patrné četné indikace v hloubkovém intervalu 0–1,5 m, které většinou odpovídají lokálním povrchovým

nehomogenitám na stěně chodby. Hojnější jsou tyto indikace v prostředí I. zóny (35–51 m) a v úseku západně od jejího okraje (51–68 m). V hlubších partiích řezu je anomálií výrazně méně.

2.4.7.3 Rozsah a charakter EDZ stanovený v průzkumných vrtech – geofyzikální práce

2.4.7.3.1 Měření georadarem ve vrtech na geotechnických stanicích

Všechny průzkumné vrty, provedené na jednotlivých geotechnických stanicích, byly proměřeny pomocí vrtného georadaru. Tato metoda používá stejný princip jako běžné povrchové měření (více v kapitole 2.4.7.2.2), odlišná je konstrukce ovšem anténního systému. Měření bylo provedeno s tímto přístrojovým vybavením:

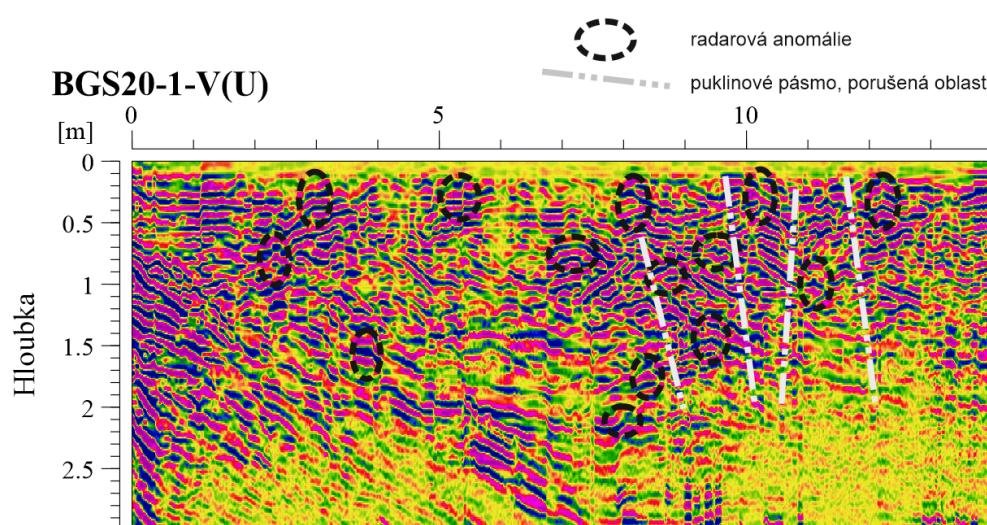
- georadarová aparatura SIR 200 (GSSI, USA);
- anténní sonda TubeWave 100 s vlastní frekvencí 492 MHz (RadarTeam, Švédsko).

Dosah všesměrných georadarových měření pro tento systém činí v daném prostředí kolem 3–5 m. Systém je vhodný zejména pro základní rajonizaci hornin v širším okolí vrtu s detekcí objektů velikosti kolem 0,2–0,5 m včetně puklin a porušených či oslabených zón. Krok měření pro tato měření byl zvolen 1 cm, spouštění systému bylo řízeno měřícím kolečkem na stativu. Zpracování radarových dat bylo rovněž obstaráno pomocí programu ReflexW (SandmeierGeophysical Research, Německo). Aplikovány byly běžné 1D a 2D filtrace pro normalizaci, zesílení a filtraci signálu. Výsledné radarové řezy mají hloubkové měřítko přepočtené z časového na základě rychlosti šíření seismických vln 0,120 m/ns.

Geotechnická stanice GS20/1

Na geotechnické stanici GS20/1 byly proměřeny všechny vrty. Časové řezy zobrazuje Elektronická příloha 66. Ve vrtu BGS20-1-V(U) je patrná řada indikací nehomogenit způsobených četnými puklinami na stěnách vrtu nebo v jeho blízkosti. Nejintenzivnější porušení je podle georadaru v rozmezí staničení 8–12 m.

Vrt BGS20-1-I ukazuje nejvýraznější nehomogenity v rozmezí metráží 4,5–6 m a 7–8,5 m, četnost indikací je nižší než u vrtu BGS20-1-U. Horizontální vrt GS20-1-H ukázal přítomnost výrazných poruch na metrážích 5–6 m a také v okolí staničení 1 m. Radarový řez pro vrt BGS20-1-D je odlišný od předchozích, vrt byl vyplněný vodou. V řezu jsou detekovány anomální indikace zejména ve staničeních 3,5–5,5 m, 9–11 m (ve vzdálenosti 1,5 m od osy vrtu), 12–13,5 m.



Obr. 474 Radarový řez získaný měřením ve vrtu GS20/1-VU

Geotechnická stanice GS/2

Příslušné radarové řezy z měření ve vrtech na geotechnické stanici GS20/1 přináší Elektronická příloha 67. Indikace výraznějších puklin ve vrtu BGS20-2-U jsou patrné ve staničeních 2,8–3,2 m, 5,5–6,0 m a 7,0–8,0 m. Obdobné anomálie jsou ve vrtu BGS20-2-I interpretovány na staničeních 2,0 m, 3–4 m, 10,5–11,5 m. Měření v horizontálním vrtu BGS20-2-H ukázalo na přítomnost intenzivnějších nehomogenit v metrážích 1,5–2,5 m, 9,0–9,5 m. Svislý vrt BGS-2-U byl při měření zaplněn vodou, anomálie ukazující na nehomogenity v okolí vrtu jsou interpretovány v úsecích staničení 10,5–12,0 m, 16,5–17,5 m a 20–20,5 m.

Geotechnická stanice GS12

Výsledky měření ve vrtech geotechnické stanice GS12 uvádí Elektronická příloha 68. Nejvýraznější anomálie ve vrtu BGS12-U jsou zachyceny v rozmezí staničení 1,5–2,5 m, 6,5–9,0 m. Zhodnocení radarového obrazu ve vrtu BGS12-I ukazuje na intenzivní nehomogenity v okolí metráží 2,0–3,0 m, 12,0–13,0 a 16,0–17,0 m. Poměrně intenzivní radarové odezvy jsou zachyceny v řezu pro vrt BGS12-H, zde jsou interpretovány oslabené oblasti v několika úsecích, a to 3,05–5,0 m, 7,0–9,0 m, 13,5–15,0 m a 16,5–19,0 m. Několik výraznějších indikací je zachyceno také v prostředí okolí vrtu BGS12-D, kde se jedná zejména o úseky 1,0–2,0 m, 4,0–5,5 m, 10,0–11,5 m, 14,0–15,0 m.

Geotechnická stanice GS18

Profilové radarové řezy z měření ve vrtech na této geotechnické stanici ukazuje Elektronická příloha 69. Významnější anomální oblasti ve vrtu BGS18-U jsou interpretovány ve staničeních 3,0–3,5 m a 12,0–13,5 m. Také ve vrtu BGS18-I jsou patrné známka výrazněji oslabeného prostředí v těsném okolí vrtu. Jedná se o anomálie na staničení 3,5–4,5 m, 5,0–6,5 m a 12,0–

13,0 m. V prostředí horizontálního vrtu BGS18-H jsou indikace oslabení interpretovány ve staničeních 1,5–2,0 m, 4,0–6,0 m, 10,0–12,5 m. Nejvýraznější indikace z vrtu BGS18-D jsou popsány ve staničeních 7,0–8,0 m, 9,0 m a 17,0–19,5 m.

Geotechnická stanice GS24

Příslušné radarové řezy se zakreslenou interpretací jsou obsahem Elektronická příloha 70. Znamky porušení a rozpukání jsou ve vrtu patrné na staničeních 5,0–6,5 m, 7,5–8,5 m, 9,0–9,5 m a 10,5–11,0 m. Ve vrtu BGS24-I se jedná o intervaly metrů 2,5–4,0 m a 5,0–6,0 m. Horizontální vrt BGS24-H vykazuje indikace porušení ve staničeních 8,0–8,5 m, 9,5–11,0 m, 12,0–13,5 m. V případě vrtu BGS24-D jsou nejvýraznější radarové anomálie interpretovány v úsecích staničení 2,0–2,5 m, 6,0–7,5 m, 12,0–13,0 m a prakticky v celém úseku 15,5–20,0 m (indikace vzdálené od osy vrtu cca 1,5 m).

Měření georadarem v horizontálních vrtech na 20. patře (EDZ20-HA-D)

V horizontálních vrtech provedených do stěny štoly Z3-XX na 20. patře bylo provedeno georadarové měření obdobně jako ve vrtech na geotechnických stanicích. Výsledky jsou rovněž zpracovány do formy časových řezů, spolu se zakreslenou interpretací je prezentuje Elektronická příloha 65.

Měření ve vrtu EDZ20-HA ukázalo na několik indikací oslabení horniny v blízkém okolí vrtu a na přítomnost puklinových zón. Jedná se o úseky staničení 1,5–2,5 m, 4,5–5,5 m, 6,5–7,0 m, 7,5–9,0 m, 10,0–12,0 a 13,0–14,0 m. Indikace podobného charakteru ve vrtu EDZ20-HB jsou méně časté, popsány jsou na metrů 3,5–5,0 m, 7,5–9,0 m, 9,5–10,5 m a 11,5–12,5 m. Ve vrtu EDZ20-HC jsou interpretované indikace zachyceny ve vzdálenosti kolem 1,0 m od osy vrtu, jedná se o anomální oblasti ve staničeních 2,5–4,5 m, 6,5–7,5 m, 13,0–14,0 m. Ve vrtu EDZ20-HD jsou vymezeny anomální úseky ve staničeních 5,0–7,5 m, 9,5–10,5 m a 12,5–13,5 m.

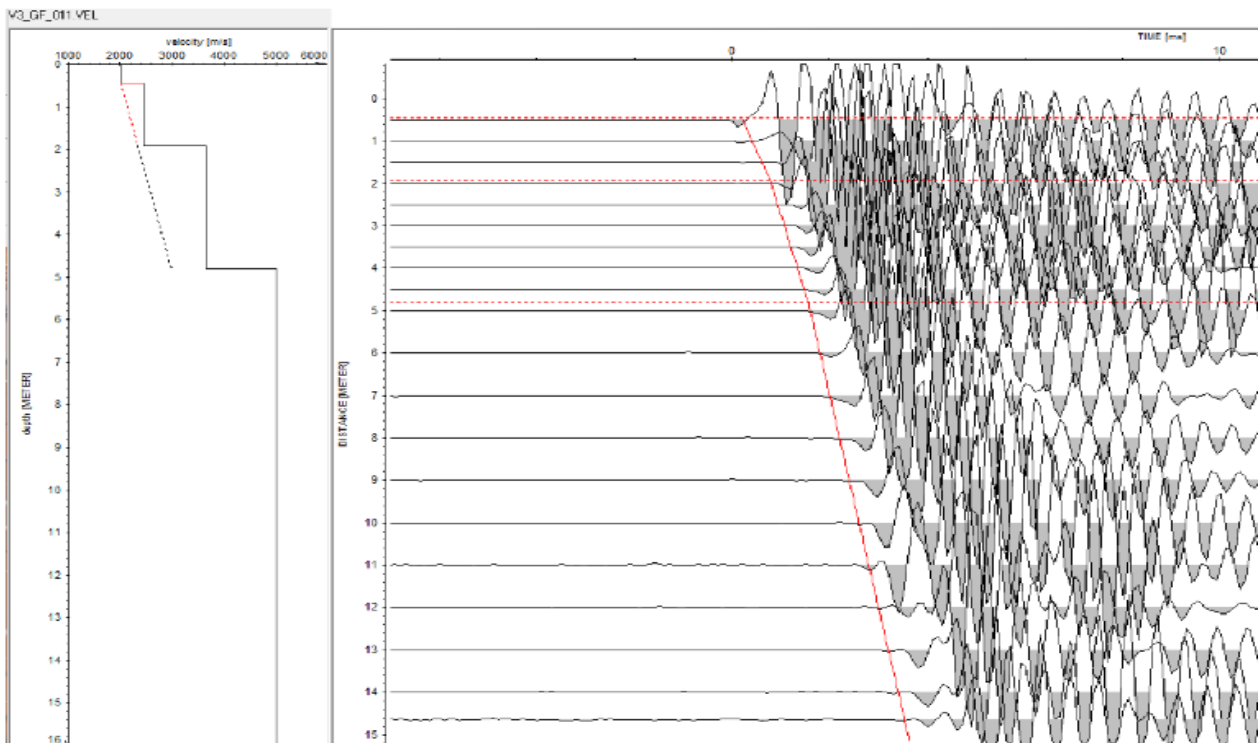
2.4.7.3.2 Seismokarotáž

Tomografická měření byla doplněna o seismokarotáž, kdy je sledován čas průchodu seismického signálu mezi zdrojem umístěným v blízkosti ústí vrtu na povrchu nebo na stěně štoly a snímači umístěnými ve vrtu zpravidla po celé jeho délce. Výsledkem zpracování je rychlostní vrstevní model, který ukazuje rozložení jednotlivých rychlostních bloků popsaných vertikální mocností a rychlostí šíření seismických vln. Z případných změn lze usuzovat na litologické změny či na přítomnost poruchových zón ve vrtu. Měření seismokarotáže proběhlo na všech průzkumných vrtech na geotechnických stanicích a v horizontálních vrtech na 20. patře vedených do severní stěny štoly Z3-XX.

Modely, sestavené na základě pořízených záznamů, mohou posloužit na základě stanovení seismických rychlostí pro rychlý základní popis geomechanického stavu horninového prostředí v závislosti na vzdálenosti od stěny štoly. Výsledky nejsou ovšem tak detailní a komplexní jako v případě seismické tomografie mezi vrty.

Zjištěné skutečnosti popisuje následující Tab. 178, která uvádí také příslušné elektronické přílohy s grafickými výstupy modelování. Charakter prostředí horniny v blízkosti stěny štoly je popsán pomocí parametrů rychlostního modelu (rychlost, mocnost). V tabulce jsou uvedeny hodnoty pro první dvě vrstvy, které zpravidla odpovídají nejvíce porušené oblasti při líci výrubu a je možné jimi zprostředkovaně odhadnout mocnost EDZ. Pro lepší představu o charakteru horninového prostředí a o změnách jeho vlastností směrem dále od stěny štoly je uvedena také rychlost další modelové vrstvy.

BGS20-1-H



Obr. 475 Výsledky měření seismokarotáže ve BGS20-1-H na GS20/1

Tab. 178 Přehled vyhodnocení měření seismokarotáže na horizontálních vrtech 20. patra a na vrtech na geotechnických stanicích

Označení vrtu	Mocnost 1. vrstvy [m]	Rychlost v 1. vrstvě [m/s]	Mocnost 2. vrstvy [m]	Rychlost v 2. vrstvě [m/s]	Rychlost v 3. vrstvě [m/s]	Příloha
EDZ20-HA	0,7	800	0,7	1400	3200	Elektronická příloha 71
EDZ20-HB	1,7	3400	1,1	4400	4850	Elektronická příloha 71
EDZ20-HC	0,6	2800	1,7	3600	4950	Elektronická příloha 72
EDZ20-HD	1,2	2000	1,2	3200	5000	Elektronická příloha 72
BGS20-1-V(U)	1	2200	2,7	3100	3550	Elektronická příloha 73
BGS20-1-I	1	2600	2,7	3300	4300	Elektronická příloha 73
BGS20-1-H	0,4	2000	1,6	2400	3600	Elektronická příloha 74
BGS20-1-V(D)	1	1600	2,3	2800	5000	Elektronická příloha 74
BGS20-2-V(U)	1,0	1600	2,3	2800	4100	Elektronická příloha 75
BGS20-2-I	1,3	2700	3,4	3600	4700	Elektronická příloha 75
BGS20-2-H	0,7	3600	3,0	4700	4900	Elektronická příloha 76
BGS20-2-V(D)	0,6	1300	1,4	2200	2700	Elektronická příloha 76
BGS12-V(U)	0,3	2000	1,0	2300	4300	Elektronická příloha 77
BGS12-I	0,2	1400	0,6	2400	3400	Elektronická příloha 77
BGS12-H	0,3	2800	1,2	3600	4600	Elektronická příloha 78
BGS12-V(D)	0,5	1800	0,9	1900	2400	Elektronická příloha 78
BGS18-V(U)	0,4	600	0,8	1700	4600	Elektronická příloha 79
BGS18-I	0,8	1450	0,2	1900	3500	Elektronická příloha 79
BGS18-H	0,8	2050	0,8	4300	4850	Elektronická příloha 80
BGS18-V(D)	1,0	2700	0,4	3300	4250	Elektronická příloha 80
BGS24-V(U)	0,9	2600	1,1	4100	5000	Elektronická příloha 81
BGS24-I	0,9	3700	1,1	4600	5050	Elektronická příloha 81
BGS24-H	0,9	4300	1,1	4950	5300	Elektronická příloha 82
BGS24-V(D)	3,9	4800	7,2	5400	5900	Elektronická příloha 82

2.4.7.4 Rozsah a charakter EDZ stanovený v průzkumných vrtech – geotechnické parametry

Na vrtném jádře pěti subhorizontálních vrtů lokalizovaných na každé z pěti GS (BGS12-H, BGS18-H, BGS20/1-H, BGS20/2-H a BGS24-H) a dále na jádře dvou subhorizontálních vrtů, umístěných mezi stanicemi GS20/1 a GS20/2 (EDZ20-HA a EDZ20-HC) byly sledovány změny hodnot vybraných FMV hornin v závislosti na vzdálenosti od líce výrubu důlního díla. Posouzení změn v horninách, resp. HM, bylo realizováno pomocí stanovení následujících FMV:

- měrná a objemová hmotnost,
- rychlost průchodu podélných ultrazvukových vln,
- celková pórovitost,
- otevřená pórovitost,
- nasákavost do ustálení hmotnosti,
- koeficient hydraulické vodivosti horniny,
- plynopropustnost horniny,
- charakterizace pórového prostoru pomocí RTG CT a rtuťové porozimetrie.

Metodiky stanovení těchto vybraných FMV byly totožné s postupy uvedenými v kapitole 2.3.5.2a použitými pro stanovení FMV VO vzorků a vybraných geotechnických vrtů. Otevřená pórovitost byla stanovena nad rámec spektra FMV, definovaných v realizačním projektu (Švagera a Bukovská eds. 2018).

S přihlédnutím k výsledkům geofyzikálních měření EDZ na PVP Bukov (Bláha et al. 2017, Staš a Bláha eds. 2018) bylo definováno 7 jednotných hloubkových úrovní pro odběr FMV vzorků v každém ze sedmi výše uvedených vrtů, sloužících pro monitoring EDZ: odběrná úroveň 1 - 0,00–0,30m, odběrná úroveň 2 - 0,60–0,90m, odběrná úroveň 3 - 1,20–1,50m, odběrná úroveň 4 - 1,80–2,10 m, odběrná úroveň 5 - 2,70–3,30m, odběrná úroveň 6 - 3,90–4,50m a odběrná úroveň 7 - 5,70–6,90m. Je však potřeba upozornit na skutečnost, že u některých vrtů nebylo technicky možné odebrat vzorky horniny přesně v těchto metrážích, a proto se skutečná místa odběrů (Tab. 179) mohou mírně odlišovat od těchto obecně definovaných odběrných úrovní. Dále je třeba zdůraznit, že u některých vrtů nebylo možno, a to zejména v úseku do 1–1,5 m od líce výrubu, odebrat natolik souvislý kus vrtného jádra, který by dovoľoval přípravu pravidelných zkušebních tělísek o průměru 48 mm a výšce 96 mm. V těchto případech bylo nutno stanovovat FMV na nepravidelných vzorcích (Tab. 179). Tato skutečnost ovšem značně ovlivnila spektrum stanovovaných FMV v některých testovaných úrovních některých vrtů, protože na nepravidelných vzorcích není možno stanovit např. koeficient hydraulické vodivosti nebo plynopropustnost.

2.4.7.4.1 Výzkum změn FMV v závislosti na vzdálenosti od líce výrubu důlního díla

Tab. 179 Vzdálenost jednotlivých odběrných úrovně od líce výrubu pro jednotlivé EDZ vrtů [m]

Úroveň	1	2	3	4	5	6	7
Vrt							
BGS12-H	0,13– 0,44	0,52– 0,71	1,03– 1,24	1,55– 1,85	2,83– 3,27	4,51– 4,64	6,39– 6,49
BGS18-H	0,00– 0,60	0,60– 0,90	1,07– 1,37	1,67– 2,00	2,87– 3,24	4,00– 4,53	6,11– 7,00
BGS20/1-H	0,05– 0,20	0,45– 0,70	1,30– 1,60	1,80– 2,20	2,83– 3,15	4,05– 4,35	6,00– 6,30
EDZ20-HA	0,15– 0,45	0,55– 0,85	1,05– 1,44	1,67– 1,95	2,85– 3,15	4,00– 4,37	6,15– 6,50
EDZ20-HC	0,17– 0,33	0,65– 0,85	1,05– 1,30	1,65– 1,90	2,80– 3,25	4,00– 4,40	6,50– 6,85
BGS20/2-H	0,10– 0,35	0,50– 0,80	1,05– 1,35	1,75– 2,00	2,80– 3,35	4,45– 4,75	5,85– 6,20
BGS24-H	0,10– 0,52	0,52– 0,92	1,12– 1,38	1,66– 2,00	2,68– 3,12	4,00– 4,39	6,10– 6,60

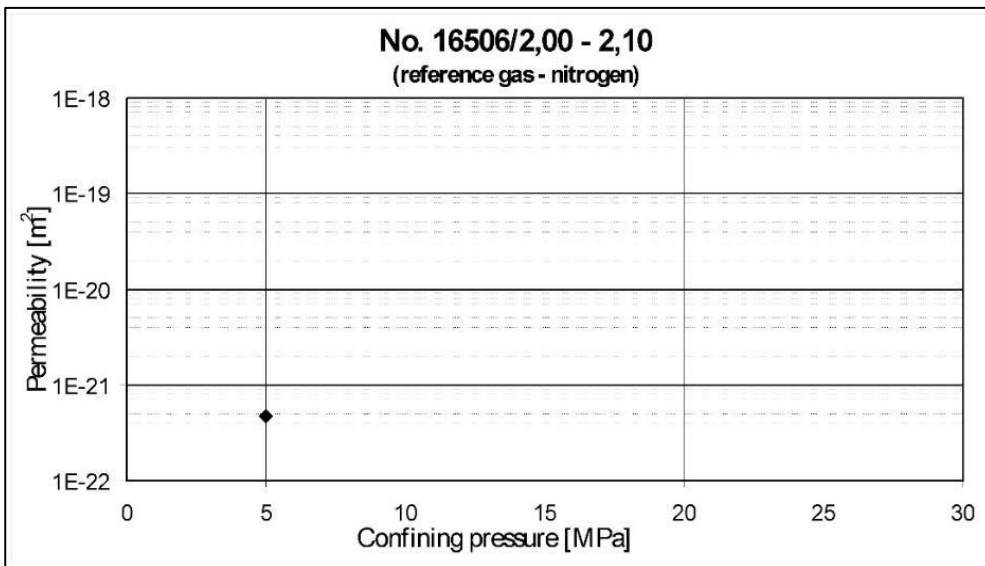
Pozn.: **zeleně** jsou označeny odběrné úrovně, ze kterých bylo možno připravit pravidelná zkušební tělíska, **žlutě** pak úrovně, v rámci nichž bylo nutno stanovení FMV provést na nepravidelných vzorcích

V Tab. 180 a na Obr. 476 – Obr. 483 jsou uvedeny výsledky studia FMV v jednotlivých testovaných vzdálenostech od líce výrubu pro vrt GS12-H. U tohoto vrtu je třeba upozornit na fakt, že na rozdíl od ostatních horizontálních vrtů na jiných geotechnických stanicích nebyl vrtán kolmo na bok důlního díla, ale svíral s bokem úhel přibližně 31°. Metráže jádra ve vrtu BGS12-H proto neodpovídají přímo vzdálenosti od líce výrubu. Pro výpočet vzdálenosti od líce výrubu je nutno metráž jádra ve vrtu násobit koeficientem 0,515 ($\sin 31^\circ$), tj. např. metráž 2,00–2,10 m od ústí vrtu odpovídá vzdálenost 1,03–1,08 m od líce výrubu (viz Obr. 476).

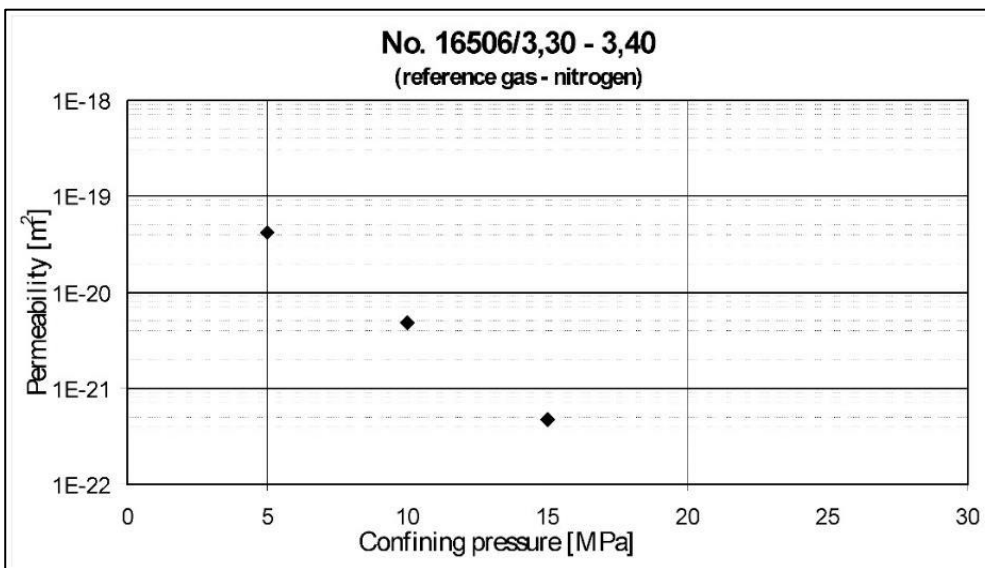
Tab. 180 Hodnoty sledovaných FMV v jednotlivých odběrných úrovních vrtu BGS12-H (ÚGN č. 16506)

Parametr	Měrná hmotnost [kg.m ⁻³]	Objemová hmotnost [kg.m ⁻³]	Celková pórovitost [%]	Otevřená pórovitost [%]	Nasákavost [%]	Koeficient hydraulické vodivosti [m.s ⁻¹]
Úroveň						
1	2807	2665	5,06	nest.	0,07	nest.
2	3014	2794	7,30	nest.	0,07	nest.
3	3026	2978	1,59	nest.	0,04	nest.
	3010	2961	1,63	0,16	0,04	bez průtoku
4	3037	2994	1,42	0,21	0,04	bez průtoku
	3054	2992	2,03	nest.	0,05	nest.
	3017	2971	1,53	nest.	0,05	nest.
5	2759	2707	1,89	nest.	0,09	nest.
	2762	2713	1,77	0,38	0,11	1,3E-12
6	2757	2678	2,87	0,25	0,08	3,5E-13
	2749	2676	2,66	nest.	0,07	nest.
7	2794	2730	2,29	0,29	0,08	3,5E-13

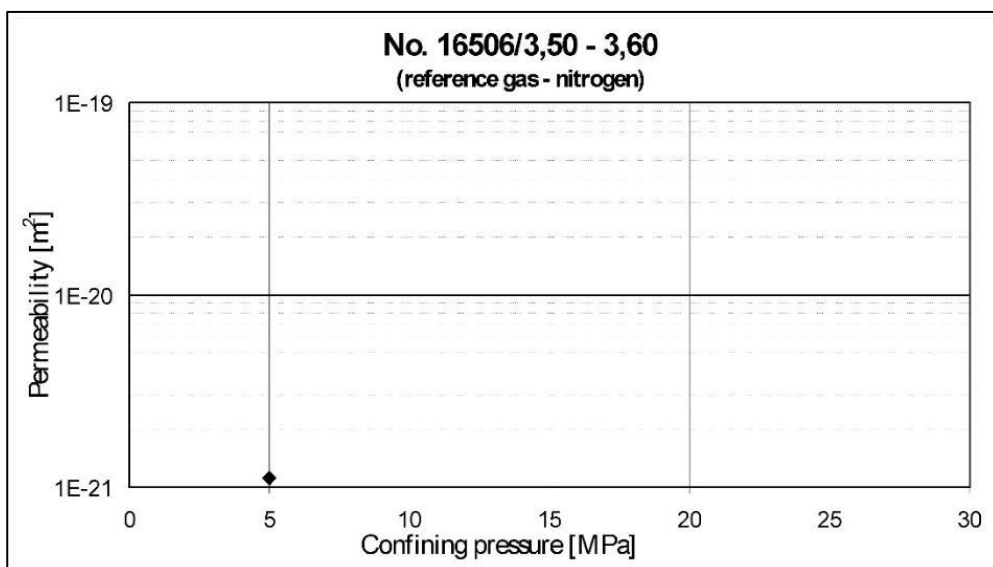
Pozn.: bez průtoku = průtok pod mezí detekce, nest. = stanovení nebylo provedeno (uvedené vysvětlivky platí i pro Tab. 181 – Tab. 186)



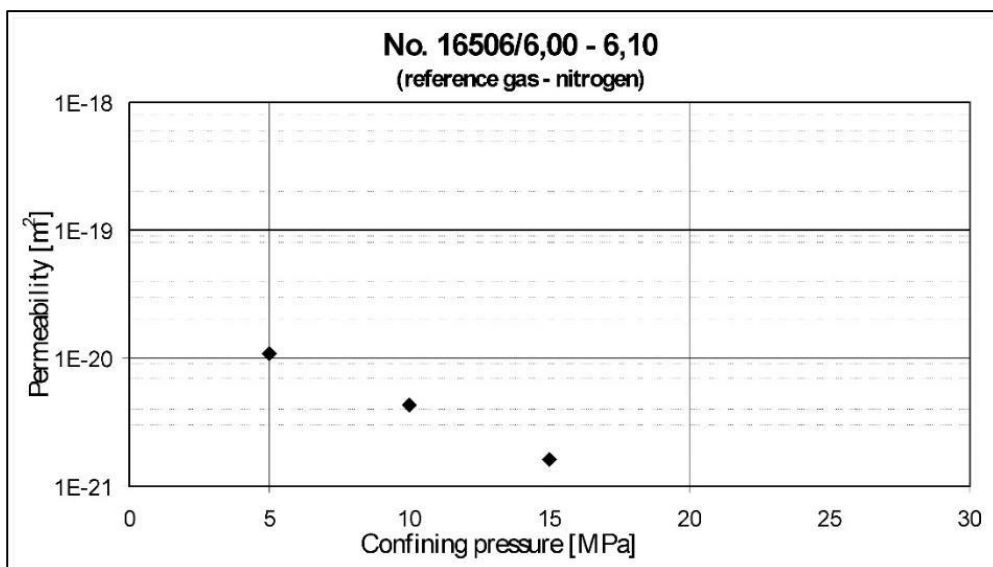
Obr. 476 Plynopropustnost tělíška 16506/2,00-2,10, tj. 1,03–1,08 m od líce výrubu (BGS12-H, úroveň 3)



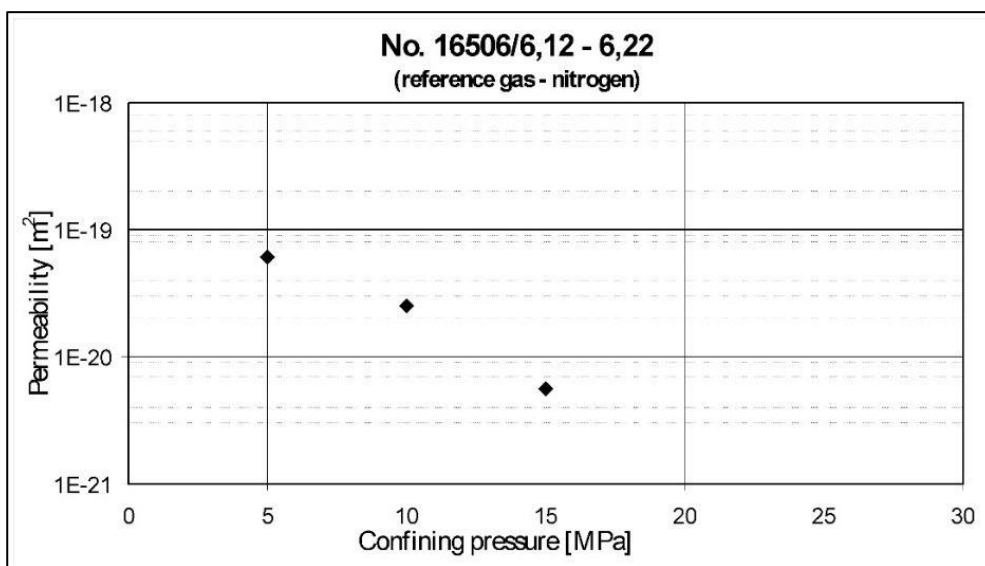
Obr. 477 Plynopropustnost tělíška 16506/3,30-3,40, tj. 1,70–1,75 m od líce výrubu (BGS12-H, úroveň 4)



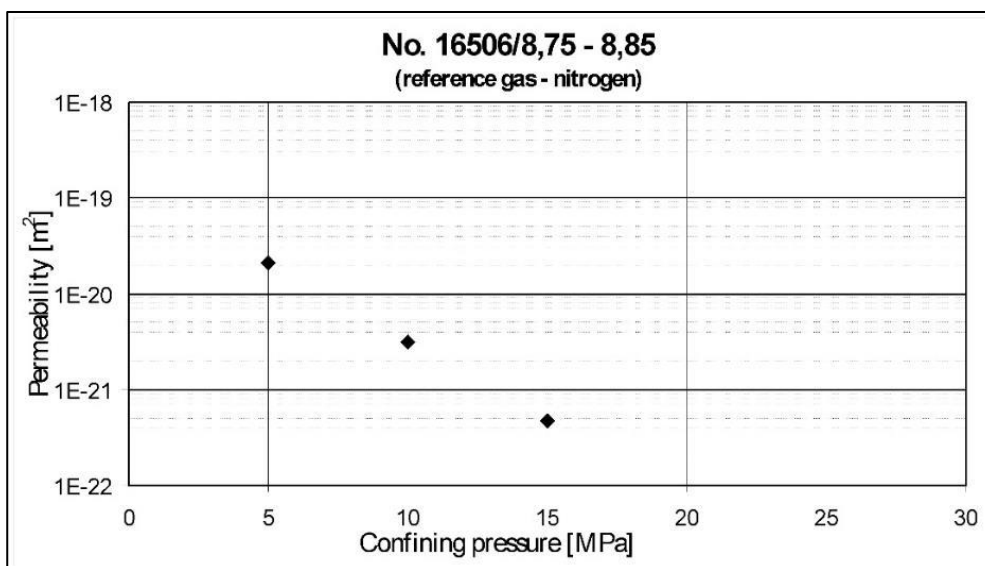
Obr. 478 Plynopropustnost tělíška 16506/3,50-3,60, tj. 1,80–1,85 m od líce výrubu (BGS12-H, úroveň 4)



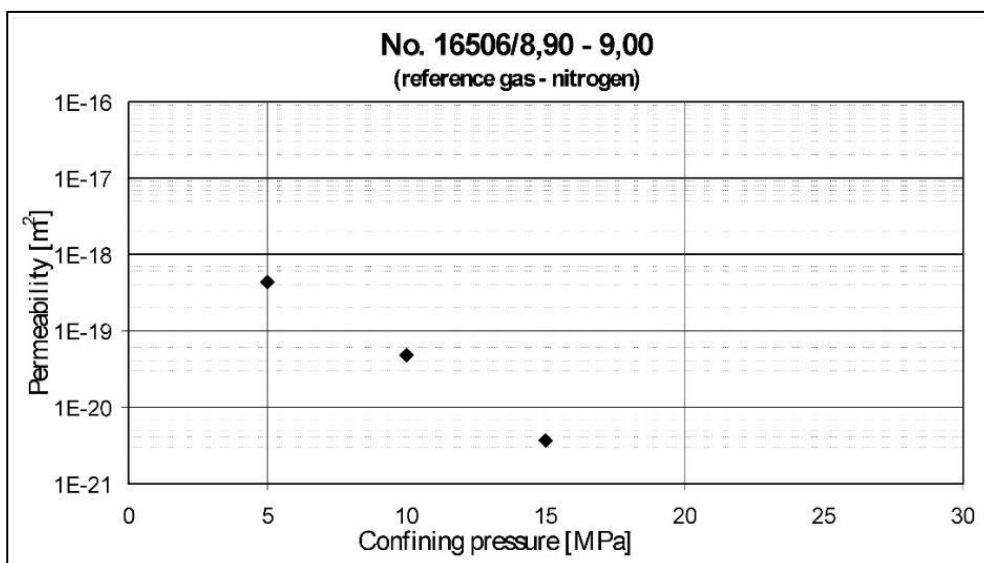
Obr. 479 Plynopropustnost tělíška 16506/6,00-6,10, tj. 3,09–3,14 m od líce výrubu (BGS12-H, úroveň 5)



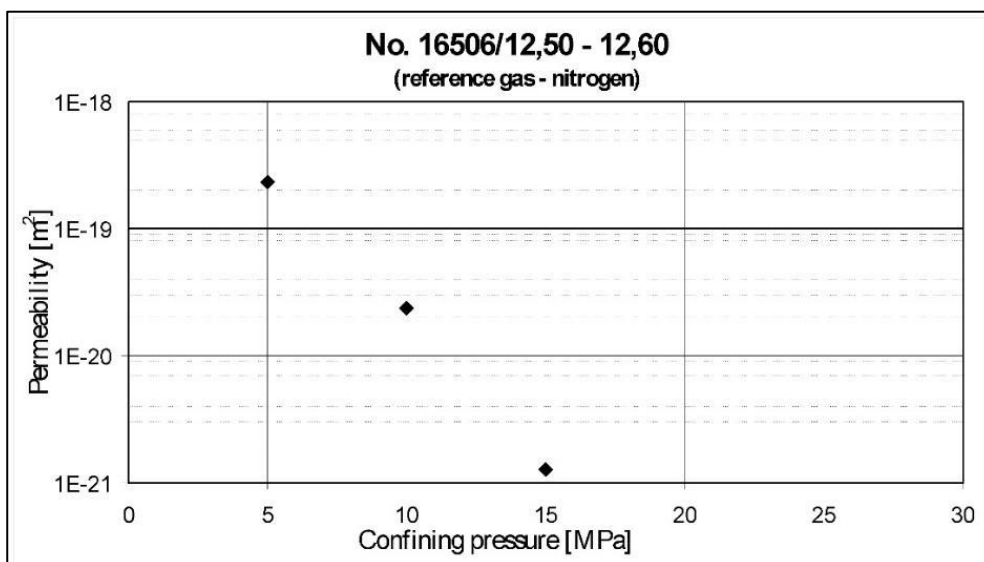
Obr. 480 Plynopropustnost tělíska 16506/6,12-6,22, tj. 3,15–3,20 m od líce výrubu (BGS12-H, úroveň 5)



Obr. 481 Plynopropustnost tělíska 16506/8,75-8,85, tj. 4,51–4,56 m od líce výrubu (BGS12-H, úroveň 6)



Obr. 482 Plynopropustnost tělíska 16506/8,90-9,00, tj. 4,59–4,64 m od líce výrubu (BGS12-H, úroveň 6)



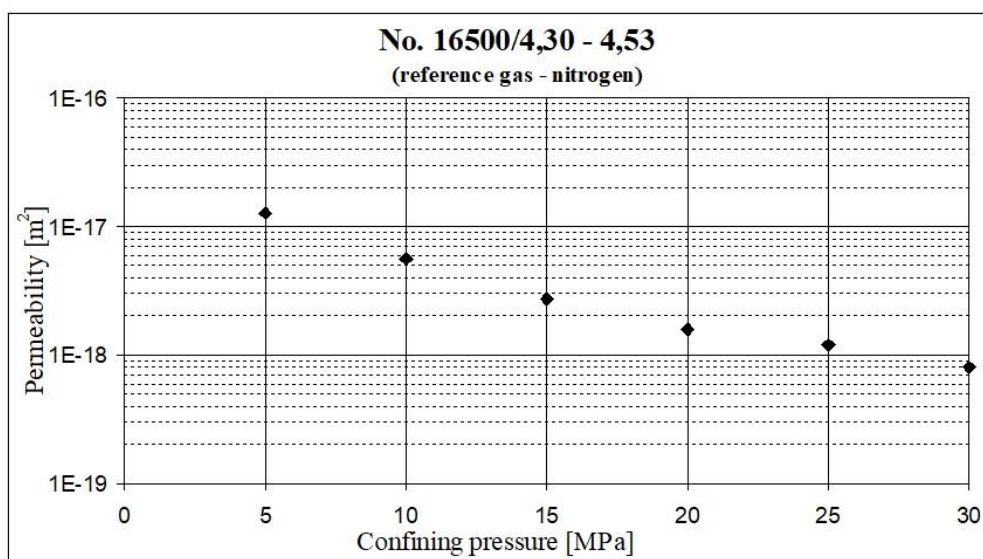
Obr. 483 Plynopropustnost tělíska 16506/12,50-12,60, tj. 6,44–6,49 m od líce výrubu (BGS12-H, úroveň 7)

Kromě tělísek prezentovaných na Obr. 476 – Obr. 483 byla plynopropustnost stanovována také v metrážích 2,20-2,30 m a 3,00-3,10 m, byla však pod mezí detekce použitého laboratorního zařízení ($k < 1E-22 \text{ m}^2$).

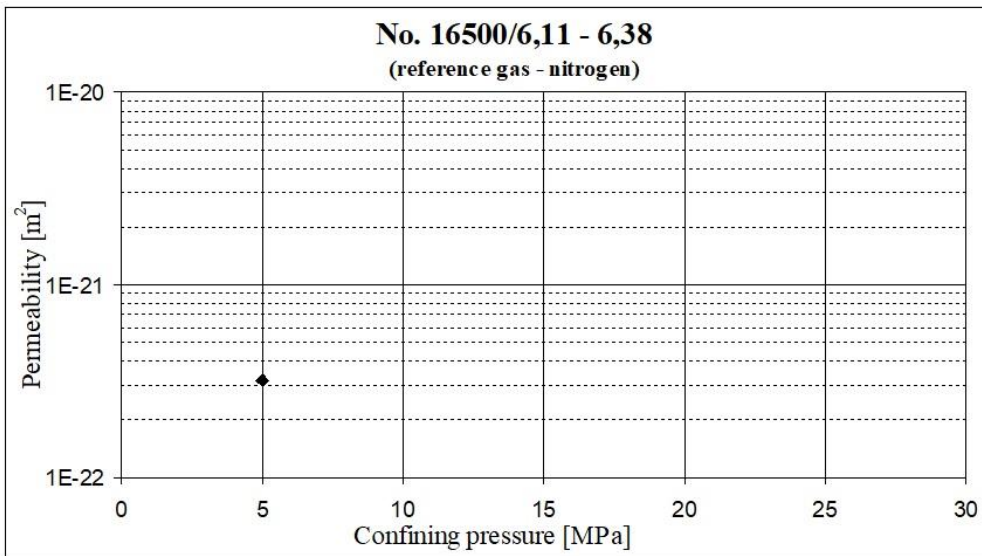
Tab. 181 a Obr. 484 – Obr. 490 shrnují výsledky studia FMV v jednotlivých úrovních vrtu BGS18-H.

Tab. 181 Hodnoty sledovaných FMV v jednotlivých odběrných úrovních vrtu BGS18-H (ÚGN č. 16500)

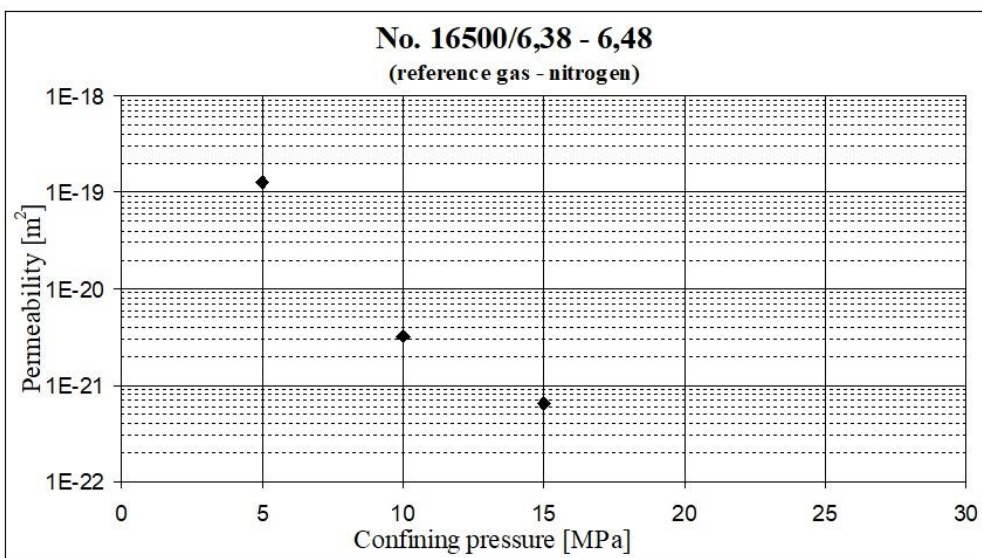
Parametr	Měrná hmotnost [kg.m ⁻³]	Objemová hmotnost [kg.m ⁻³]	Celková pórovitost [%]	Otevřená pórovitost [%]	Nasákavost [%]	Koeficient hydraulické vodivosti [m.s ⁻¹]
Úroveň						
1	3002	2933	2,30	0,21	0,10	bez průtoku
2	2985	2825	5,36	nest.	0,07	nest.
3	2953	2886	2,27	nest.	0,04	nest.
4	2783	2656	4,56	nest.	0,06	nest.
5	3027	2853	5,75	nest.	0,08	nest.
6	2795	2687	3,86	0,45	0,12	3,4E-11
7	3035	3002	1,09	nest.	0,05	nest.
	2991	2909	2,74	nest.	0,08	nest.
	3053	2998	1,80	nest.	0,06	nest.
	2890	2834	1,94	nest.	0,09	nest.
	2851	2805	1,61	nest.	0,08	nest.
	2860	2738	4,27	0,22	0,09	3,5E-13



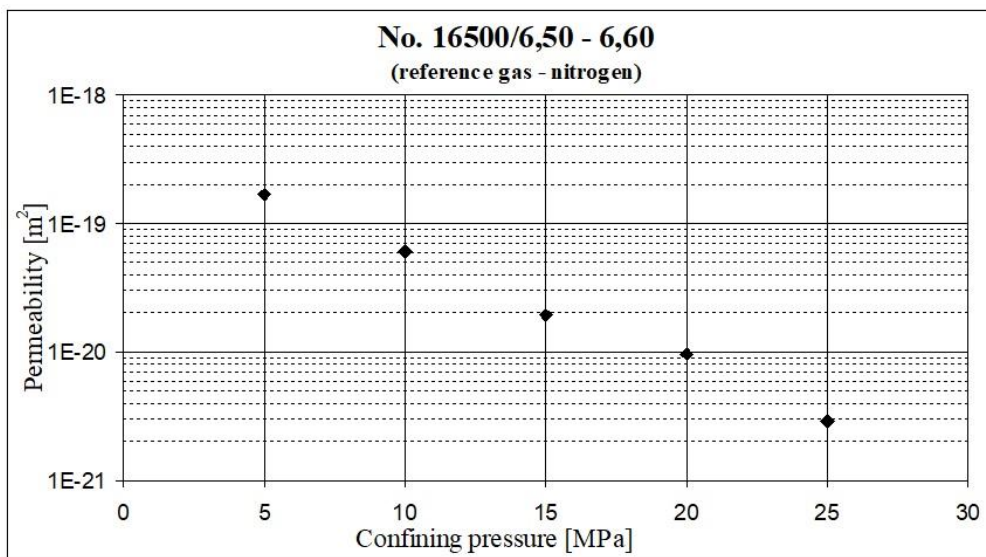
Obr. 484 Plynopropustnost tělíska ze staničení 4,30–4,53 m od líce výrubu (BGS18-H, odběrná úroveň 6)



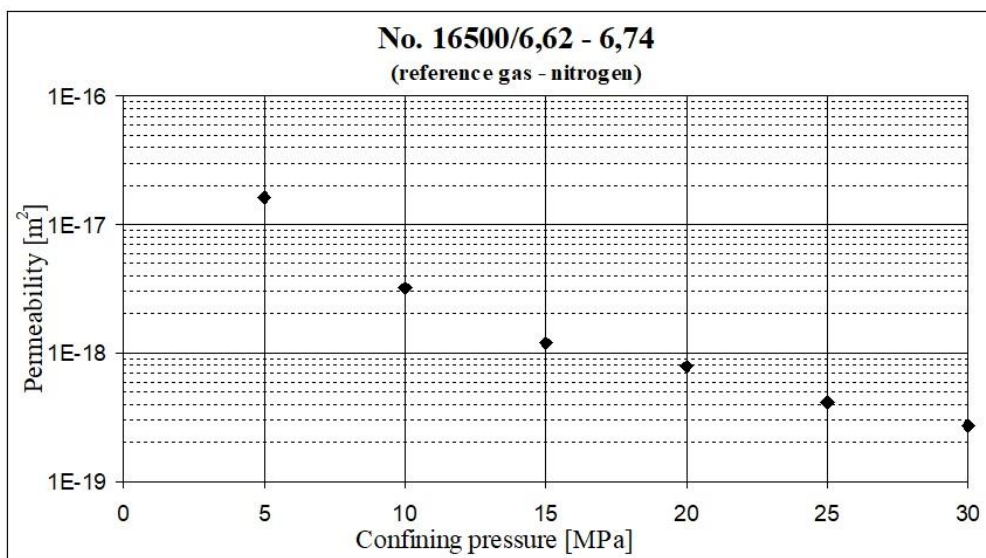
Obr. 485 Plynopropustnost tělíska ze staničení 6,11–6,38 m od líce výrubu (BGS18-H, odběrná úroveň 7)



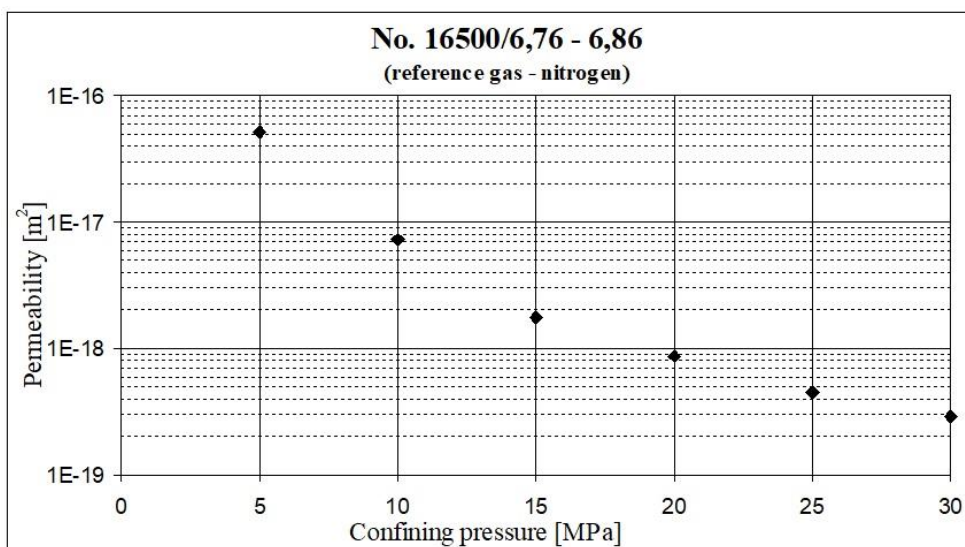
Obr. 486 Plynopropustnost tělíska ze staničení 6,38–6,48 m od líce výrubu (BGS18-H, odběrná úroveň 7)



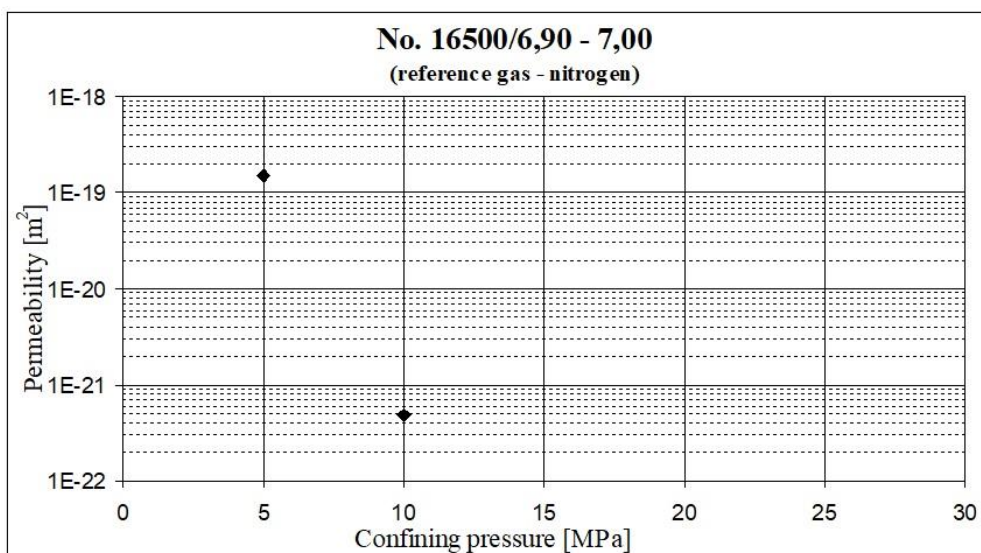
Obr. 487 Plynopropustnost tělíska ze staničení 6,50–6,60 m od líce výrubu (BGS18-H, odběrná úroveň 7)



Obr. 488 Plynopropustnost tělíska ze staničení 6,62–6,78 m od líce výrubu (BGS18-H, odběrná úroveň 7)



Obr. 489 Plynopropustnost tělíska ze staničení 6,76–6,86 m od líce výrubu (BGS18-H, odběrná úroveň 7)



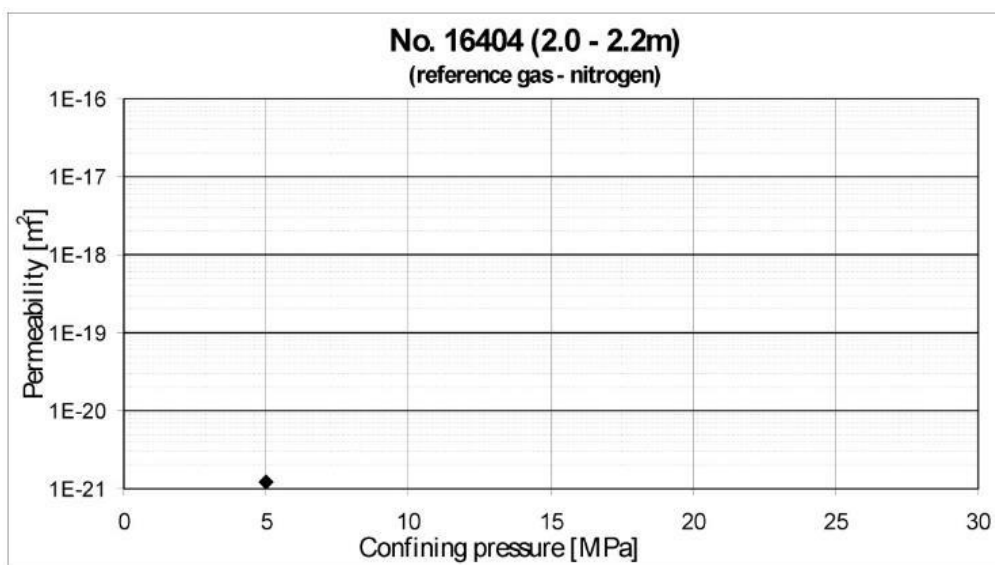
Obr. 490 Plynopropustnost tělíska ze staničení 6,90–7,00 m od líce výrubu (BGS18-H, odběrná úroveň 7)

Kromě tělísek z odběrných úrovní 6 a 7, prezentovaných na Obr. 484 – Obr. 490, byla plynopropustnost stanovována také v rámci odběrné úrovně 1, konkrétně na tělísku 16500/0,50–0,60, byla však pod mezí detekce použitého laboratorního zařízení ($k < 1\text{E-}22 \text{ m}^2$).

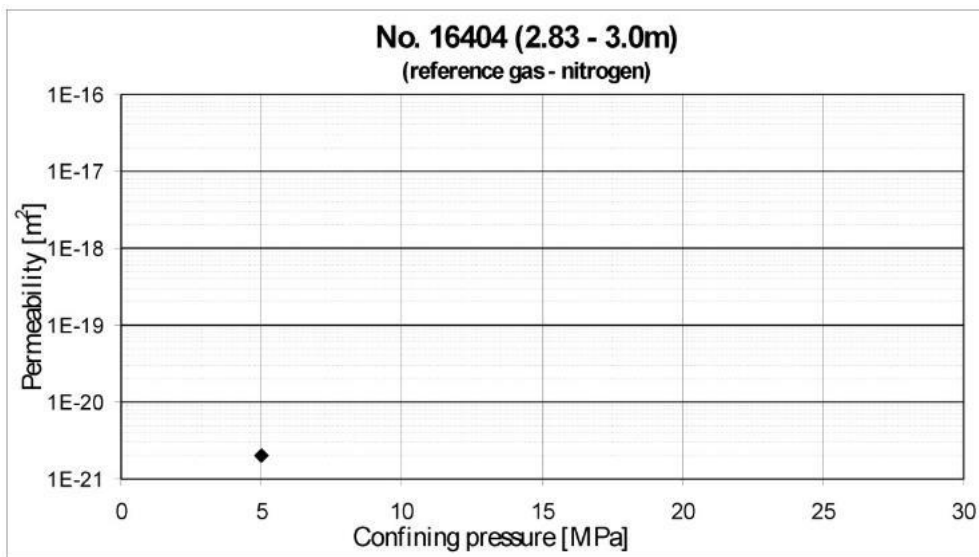
V Tab. 182 a na Obr. 491 – Obr. 493 jsou uvedeny výsledky studia FMV v jednotlivých testovaných vzdálenostech od líce výrubu pro vrt GS20/1-H.

Tab. 182 Hodnoty sledovaných FMV v jednotlivých odběrných úrovních vrtu BGS20/1-H (ÚGN č. 16404)

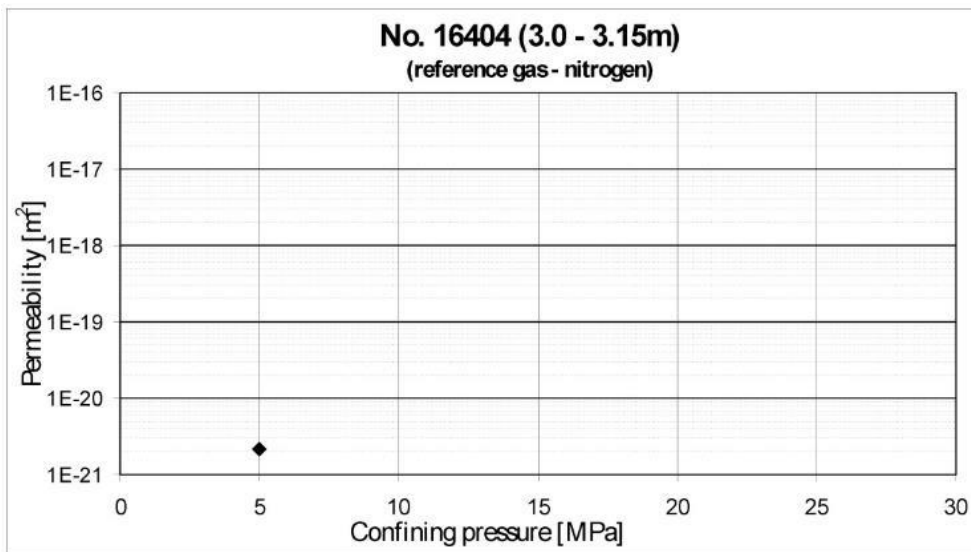
Parametr	Měrná hmotnost [kg.m ⁻³]	Objemová hmotnost [kg.m ⁻³]	Celková pórovitost [%]	Otevřená pórovitost [%]	Nasákavost [%]	Koeficient hydraulické vodivosti [m.s ⁻¹]
Úroveň						
1	2740	2458	10,29	nest.	0,24	nest.
2	2722	2576	5,36	nest.	0,06	nest.
3	2773	2570	7,32	nest.	0,10	nest.
4	2813	2775	1,35	0,30	0,06	4,4E-13
	2815	2768	1,67	0,24	0,05	3,1E-13
5	2768	2712	2,02	0,40	0,09	3,0E-13
	2796	2695	3,61	nest.	0,06	nest.
6	2817	2678	4,93	nest.	0,09	nest.
7	2838	2770	2,40	0,30	0,06	3,1E-13



Obr. 491 Plynopropustnost tělíska ze staničení 2,00–2,20m od líce výrubu (BGS20/1-H, odběrná úroveň 4)



Obr. 492 Plynopropustnost tělíska ze staničení 2,83–3,00 m od líce výrubu (BGS20/1-H, odběrná úroveň 5)



Obr. 493 Plynopropustnost tělíska ze staničení 3,00–3,15 m od líce výrubu (BGS20/1-H, odběrná úroveň 5)

Kromě tělísek prezentovaných na Obr. 491 – Obr. 493 byla plynopropustnost stanovována také na těliscích 16404/1,80-2,00 (úroveň 4) a 16404/6,00-6,20 (úroveň 7), hodnota však byla pod mezí detekce použitého laboratorního zařízení ($k < 1E-22 \text{ m}^2$).

Tab. 183 shrnuje výsledky studia FMV hornin v jednotlivých odběrných úrovních vrtu EDZ20-HA.

Tab. 183 Hodnoty sledovaných FMV v jednotlivých odběrných úrovních vrtu EDZ20-HA (ÚGN č. 16501)

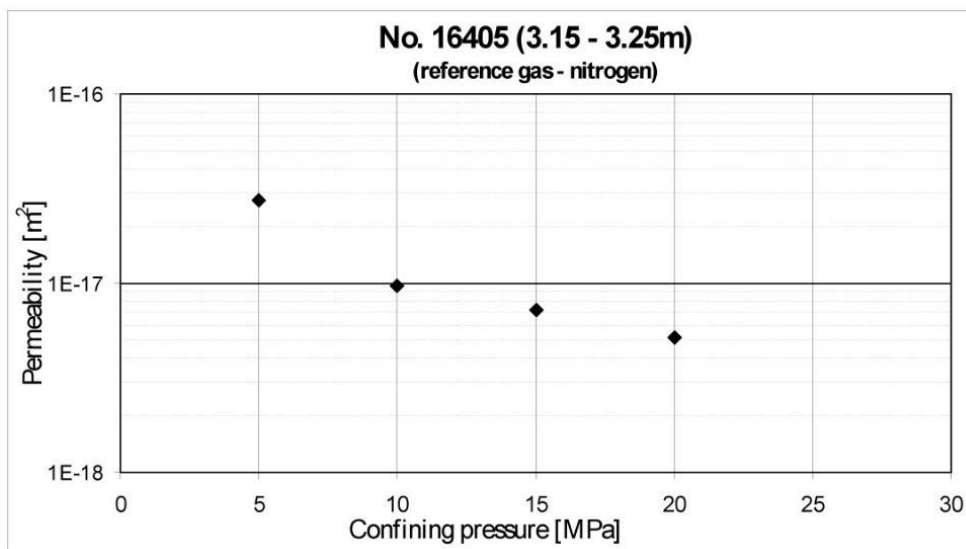
Parametr	Měrná hmotnost [kg.m ⁻³]	Objemová hmotnost [kg.m ⁻³]	Celková pórovitost [%]	Otevřená pórovitost [%]	Nasákavost [%]	Koeficient hydraulické vodivosti [m.s ⁻¹]
Úroveň						
1	2826	2253	20,28	nest.	nest.	nest.
2	2774	2460	11,32	nest.	nest.	nest.
3	2737	2331	14,83	nest.	2,13	nest.
4	2828	2545	10,01	nest.	nest.	nest.
5	2795	2503	10,45	nest.	nest.	nest.
6	2804	2678	4,94	nest.	0,68	nest.
7	2833	2626	7,31	nest.	0,46	nest.

Ve vrtu EDZ20-HA, jakožto v jediném ze všech sedmi posuzovaných geotechnických vrtů, byla kvalita jádra natolik špatná, že ani z jedné odběrné úrovně nemohl být odebrán takový kus horniny, který by umožňoval zhotovení pravidelného zkušebního tělíska. FMV hornin jádra vrtu EDZ20-HA proto musely být stanovovány na nepravidelných vzorcích, tudíž nebylo možno provést měření koeficientu hydraulické vodivosti a stanovení plynopropustnosti. Navíc, nasákavost mohla být stanovena pouze v rámci 3, 6 a 7 odběrné úrovně, díky silnému stupni tektonického porušení a grafitizaci horniny se totiž zkušební vzorky z úrovní 1, 2, 4 a 5 po namočení do vody rozpadly.

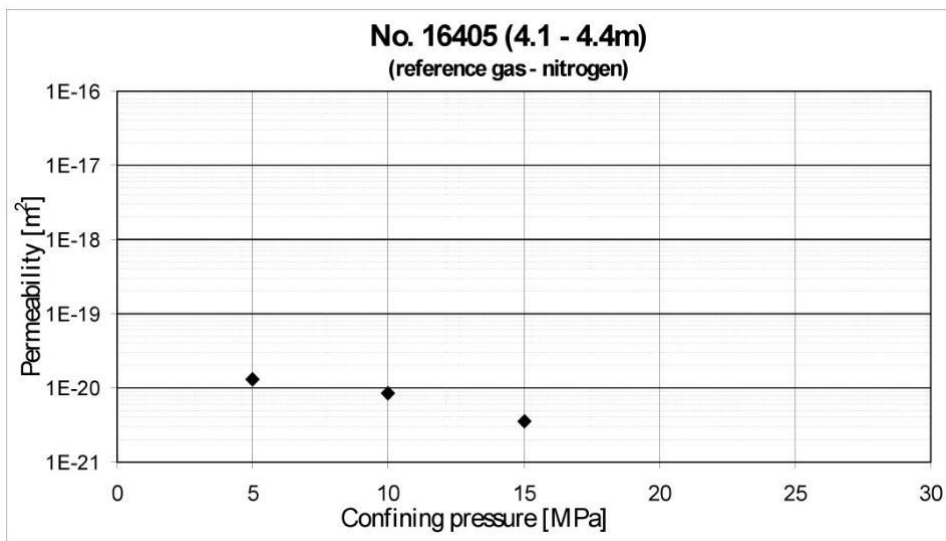
V Tab. 184 a na Obr. 494 – Obr. 497 jsou uvedeny výsledky studia FMV v jednotlivých testovaných vzdálenostech od líce výrubu pro vrt EDZ20-HC.

Tab. 184 Hodnoty sledovaných FMV v jednotlivých odběrných úrovních vrtu EDZ20-HC (ÚGN č. 16405)

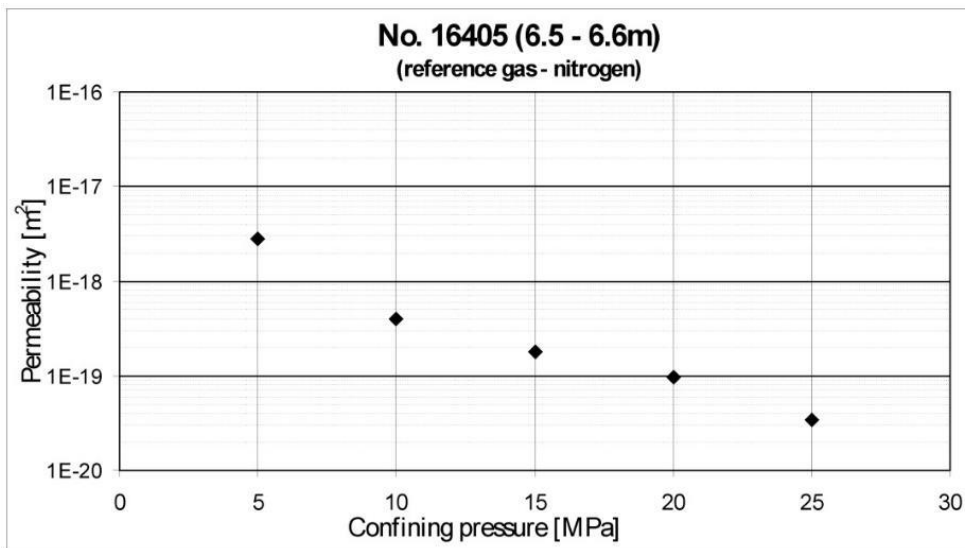
Parametr	Měrná hmotnost [kg.m ⁻³]	Objemová hmotnost [kg.m ⁻³]	Celková pórovitost [%]	Otevřená pórovitost [%]	Nasákavost [%]	Koeficient hydraulické vodivosti [m.s ⁻¹]
Úroveň						
1	2799	2524	9,83	nest.	0,35	nest.
2	2759	2523	8,55	nest.	0,27	nest.
3	2771	2434	12,16	nest.	0,32	nest.
4	2768	2496	9,83	nest.	0,20	nest.
5	2747	2706	1,49	0,54	0,15	2,7E-10
6	2756	2732	0,87	0,32	0,08	5,6E-13
7	2828	2719	3,85	nest.	0,12	nest.
	2734	2713	0,77	0,45	0,12	1,3E-11



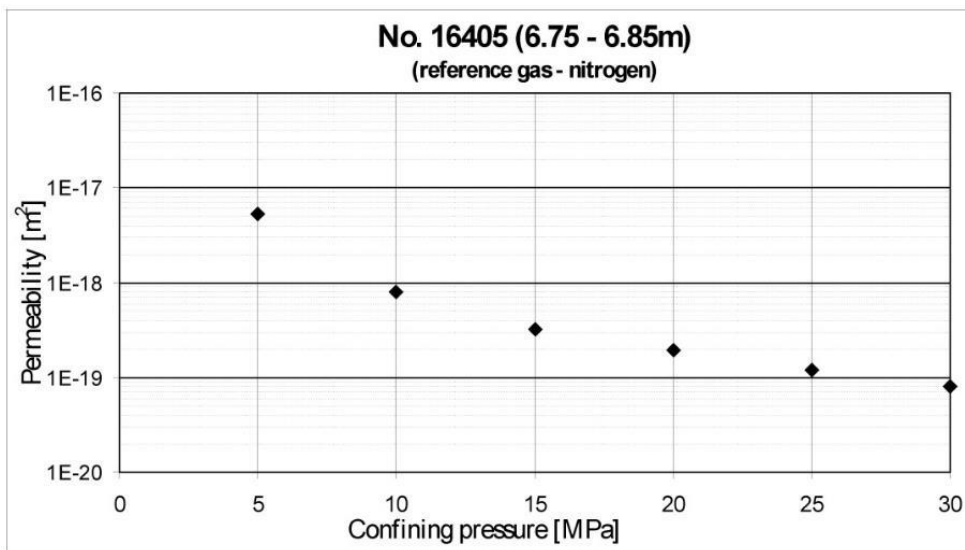
Obr. 494 Plynopropustnost tělíska ze staničení 3,15–3,25 m od líce výrubu (EDZ20-HC, odběrná úroveň 5)



Obr. 495 Plynopropustnost tělíska ze staničení 4,10–4,40 m od líce výrubu (EDZ20-HC, odběrná úroveň 6)



Obr. 496 Plynopropustnost tělíska ze staničení 6,50–6,60 m od líce výrubu (EDZ20-HC, odběrná úroveň 7)

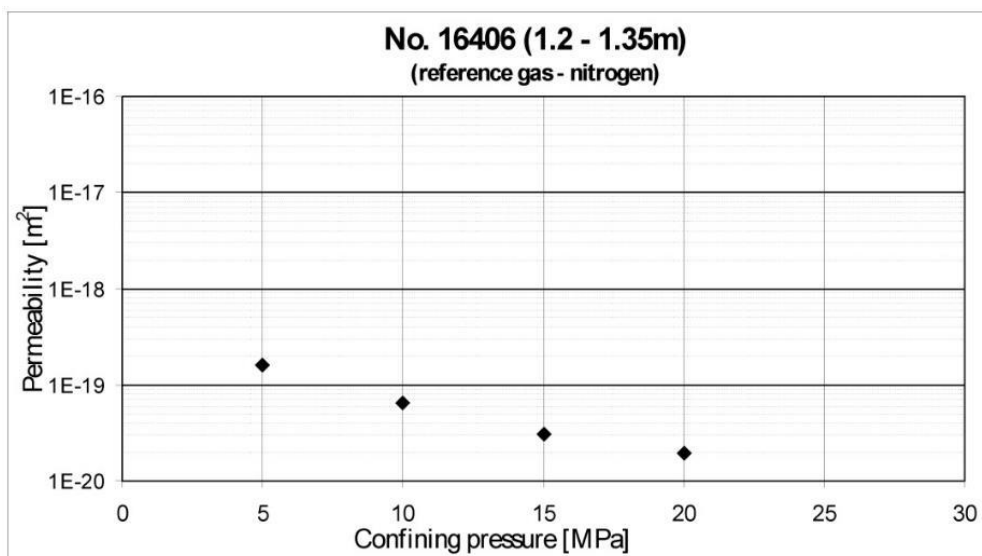


Obr. 497 Plynopropustnost tělíska ze staničení 6,75–6,85 m od líce výrubu (EDZ20-HC, odběrná úroveň 7)

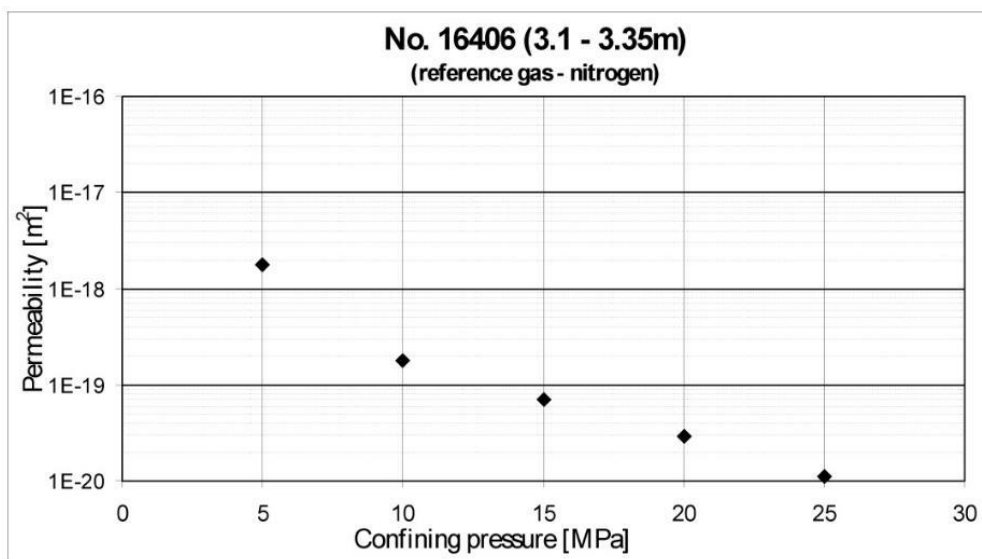
Tab. 185 a Obr. 498 – Obr. 500 shrnují výsledky studia FMV v jednotlivých úrovních vrtu BGS20/2-H.

Tab. 185 Hodnoty sledovaných FMV v jednotlivých odběrných úrovních vrtu BGS20/2-H (ÚGN č. 16406)

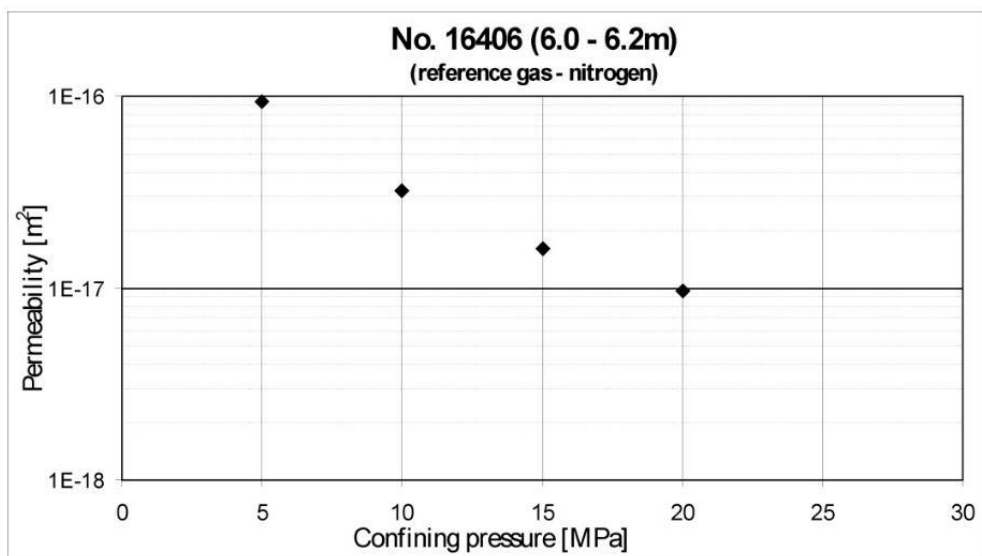
Paramet r	Měrná hmotnost [kg.m ⁻³]	Objemová hmotnost [kg.m ⁻³]	Celková pórovitost [%]	Otevřená pórovitost [%]	Nasákavos t [%]	Koeficient hydraulické vodivosti [m.s ⁻¹]
Úroveň						
1	2750	2580	6,18	nest.	0,22	nest.
2	2774	2509	9,55	nest.	0,20	nest.
3	2759	2701	2,10	0,55	0,13	2,3E-9
4	2799	2627	6,15	nest.	0,12	nest.
5	2738	2687	1,86	0,57	0,13	4,6E-12
6	2820	2700	4,26	nest.	0,22	nest.
7	2751	2700	1,85	0,50	0,14	1,1E-10



Obr. 498 Plynopropustnost tělíska ze staničení 1,20–1,35 m od líce výrubu (BGS20/2-H, odběrná úroveň 3)



Obr. 499 Plynopropustnost tělíska ze staničení 3,10–3,35 m od líce výrubu (BGS20/2-H, odběrná úroveň 5)



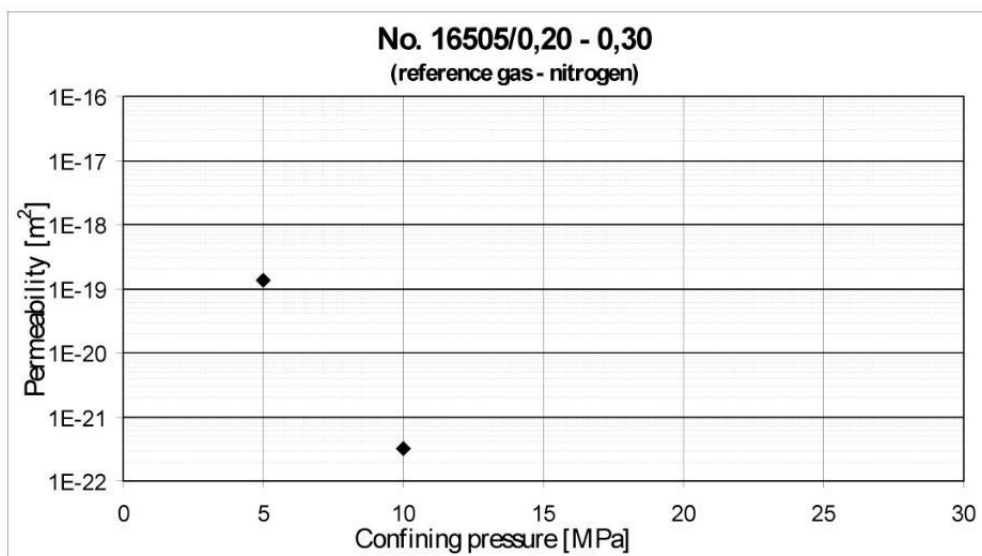
Obr. 500 Plynopropustnost tělíška ze staničení 6,00–6,20 m od líce výrubu (BGS20/2-H, odběrná úroveň 7)

Kromě tělíšek z odběrných úrovní 3, 5 a 7, prezentovaných na Obr. 498 – Obr. 500, byla plynopropustnost stanovována také v rámci odběrné úrovně 6, konkrétně na tělísku 16406/4,57–4,75. Zkušební tělíško však při manipulaci prasklo podél plochy metamorfni foliace a plynopropustnost tak nemohla být změřena. Ze stejného důvodu pak nemohly být následně stanoveny ani otevřená pórovitost, ani hydraulická vodivost.

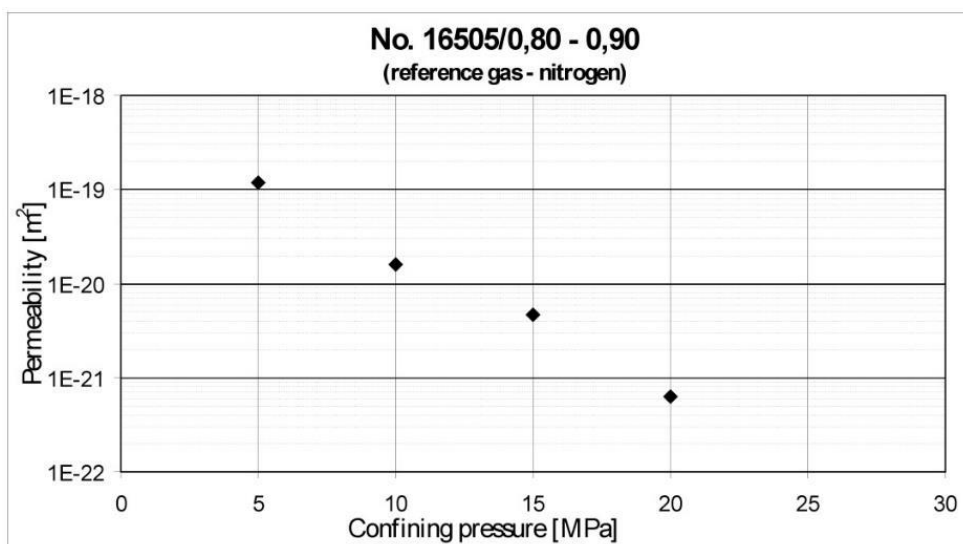
V Tab. 186 a na Obr. 501 – Obr. 505 jsou uvedeny výsledky studia FMV v jednotlivých testovaných vzdálenostech od líce výrubu pro vrt BGS24-H.

Tab. 186 Hodnoty sledovaných FMV v jednotlivých odběrných úrovních vrtu BGS24-H (ÚGN č. 16505)

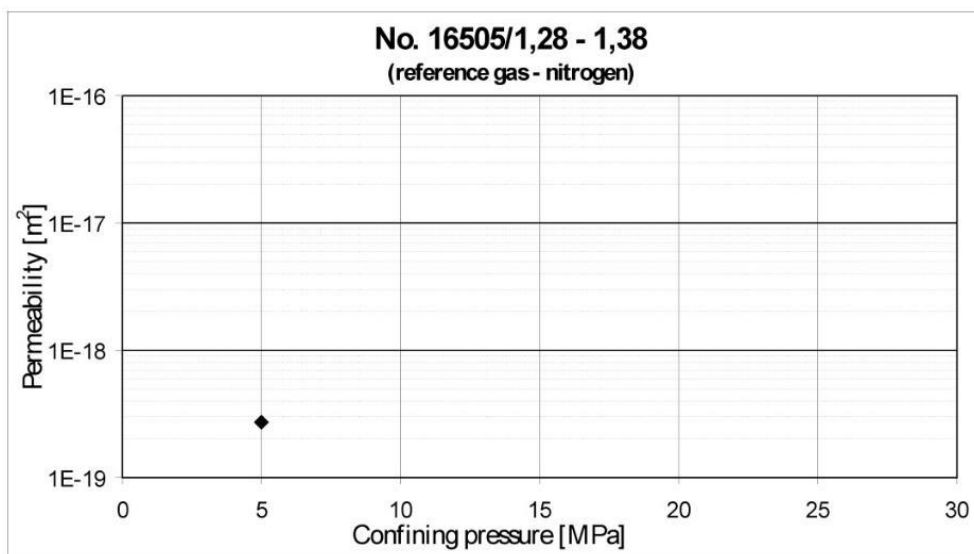
Parametr	Měrná hmotnost [kg.m ⁻³]	Objemová hmotnost [kg.m ⁻³]	Celková pórovitost [%]	Otevřená pórovitost [%]	Nasákavost [%]	Koeficient hydraulické vodivosti [m.s ⁻¹]
Úroveň						
1	2795	2718	2,76	0,34	0,09	bez průtoku
2	2840	2758	2,89	0,22	0,07	bez průtoku
3	2804	2733	2,53	0,27	0,06	9,1E-13
4	2815	2756	2,10	nest.	0,14	nest.
5	2771	2712	2,13	0,23	0,07	bez průtoku
6	2805	2769	1,28	0,24	0,06	1,4E-13
7	2787	2661	4,52	nest.	0,07	nest.



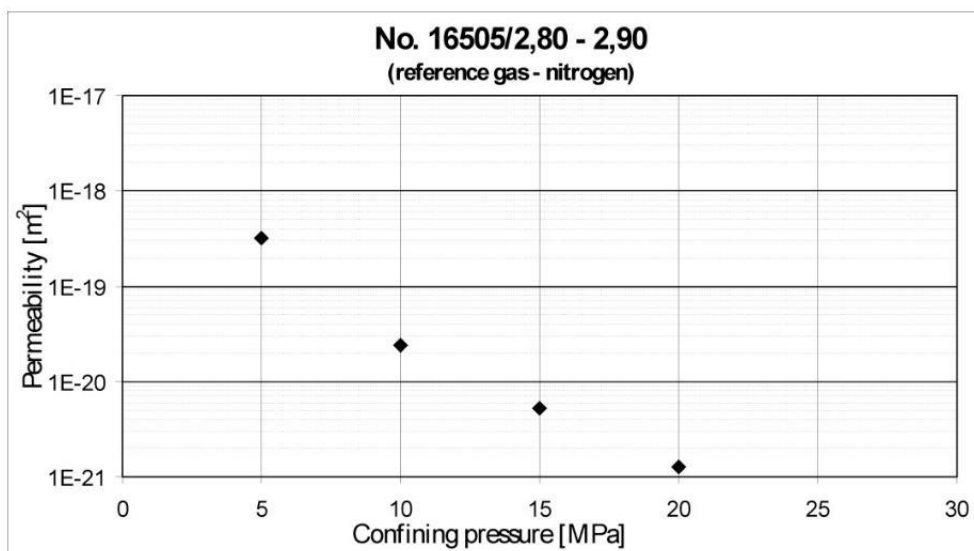
Obr. 501 Plynopropustnost tělíka ze staničení 0,20–0,30 m od líce výrubu (BGS24-H, odběrná úroveň 1)



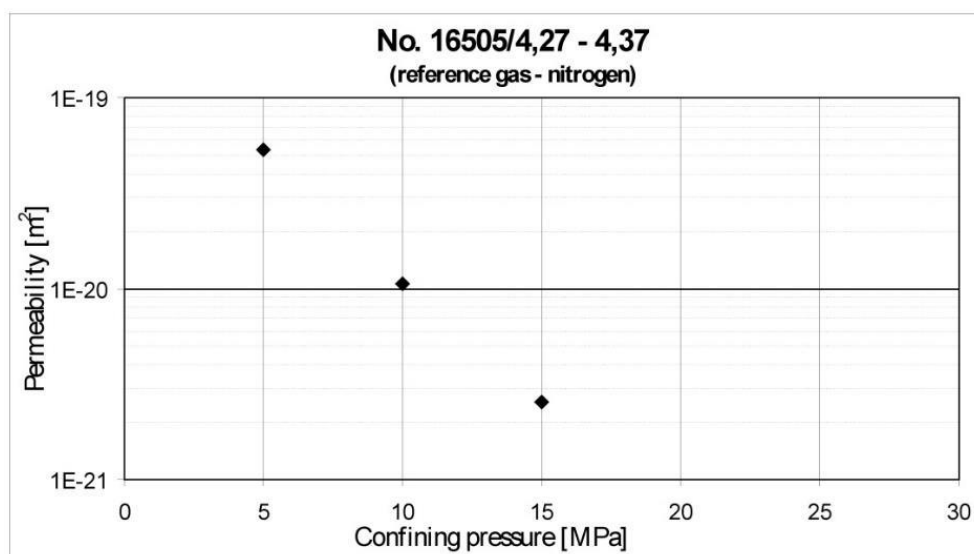
Obr. 502 Plynopropustnost tělíka ze staničení 0,80–0,90 m od líce výrubu (BGS24-H, odběrná úroveň 2)



Obr. 503 Plynopropustnost tělíska ze staničení 1,28–1,38 m od líce výrubu (BGS24-H, odběrná úroveň 3)



Obr. 504 Plynopropustnost tělíska ze staničení 2,80–2,90 m od líce výrubu (BGS24-H, odběrná úroveň 5)



Obr. 505 Plynopropustnost tělíska ze staničení 4,27–4,37 m od líce výrubu (BGS24-H, odběrná úroveň 6)

Kromě tělísek z odběrných úrovní 1, 2, 3, 5 a 6, prezentovaných na Obr. 501 – Obr. 505, byla plynopropustnost stanovována také v rámci odběrné úrovně 4, konkrétně na tělísku 16405/1,80–1,90. Zkušební tělísko však při manipulaci prasklo podél plochy metamorfni foliace a plynopropustnost tak nemohla být změřena. Ze stejného důvodu pak nemohly být následně stanoveny ani otevřená pórovitost, ani hydraulická vodivost.

Jak vyplývá z hodnot a údajů, prezentovaných v Tab. 180 až Tab. 186 a na Obr. 476 – Obr. 505, jedinou sledovanou FMV, která mohla být objektivně stanovena ve všech sedmi odběrných úrovních v každém ze sedmi testovaných geotechnických vrtů, je celková pórovitost. Tab. 187 prezentuje celkové shrnutí výsledků stanovení celkové pórovitosti hornin ve všech sledovaných subhorizontálních vrtech v závislosti na vzdálenosti od líce výrubu.

Tab. 187 Průměrné hodnoty celkové pórovitosti pro jednotlivé odběrné úrovně sledovaných EDZ vrtů

Úroveň	1	2	3	4	5	6	7
Vrt							
BGS12-H	5,06	7,30	1,61	1,66	1,83	2,77	2,29
BGS18-H	2,30	5,36	2,27	4,56	5,75	3,86	2,24
BGS20/1-H	10,29	5,36	7,32	1,51	2,82	4,93	2,40
EDZ20-HA	20,28	11,32	14,83	10,01	10,45	4,94	7,31
EDZ20-HC	9,83	8,55	12,16	9,83	1,49	0,87	2,31
BGS20/2-H	6,18	9,55	2,10	6,15	1,86	4,26	1,85
BGS24-H	2,76	2,89	2,53	2,10	2,13	1,28	4,52

2.4.7.4.2 Charakterizace pórového prostoru pomocí RTG CT a MIP v EDZ vrtech

Z identických úrovní v jednotlivých geotechnických vrtech, viz Tab. 1, bylo připraveno 49 krychlových zkušebních tělísek s délkou hrany cca 10 mm. V každém vrtu, jak již bylo uvedeno výše, bylo studováno 7 tělísek z různých hloubkových úrovní (viz Tab. 1). Reprezentativní zkušební tělísko pro jednotlivou hloubkovou úroveň bylo vybráno ze sady připravených tělísek připadající dané hloubkové úrovni na základě stanovené průměrné hodnoty objemové hmotnosti vycházející z měření objemové hmotnosti v této sadě. U těchto zkušebních tělísek pak byl analyzován efektivní pórový prostor pomocí kombinace dvou laboratorních metod.

Jedná se o rentgenovou počítačovou mikro-tomografii (RTG μ -CT) a vysokotlakou rtuťovou porozimetrii (MIP). Kombinace obou analýz spočívala nejprve v pořízení referenčních CT skenů jednotlivých zkušebních tělísek, dále pak byla na těchto těliscích realizována vlastní vysokotlaká rtuťová porozimetrie a po porozimetrii bylo provedeno opětovné nasnímání CT objemů těchto zkušebních těles. Důvodem kombinace obou metod byla skutečnost, že samostatně použitá RTG μ -CT nezachytí (nezobrazí) vlastní pórový prostor v zájmových horninách, a to z důvodu jeho velice malého objemu (cca 0,3–3%). Rtuť při MIP je vtlačena do horniny pod tlakem, kde vyplní její efektivní póry, ve kterých zůstane zachycena i po skončení vlastní zkoušky, čímž se změní hustotní pole ve zkušebním tělese. Proto následné CT skeny mohou zobrazit pórový prostor v hornině, ne jako póry vyznačující se nejnižší hustotou, ale jako inkluze, které mají vysokou objemovou hmotnost vlivem přítomnosti rtuti v pórech. Objemová hmotnost rtuti reprezentuje hodnotu cca 13,5 g.cm⁻³, což je asi 5x více než mají analyzované horniny (cca 2,7 g.cm⁻³). Kombinace obou metod nám umožňuje stanovit jak hodnotu efektivní pórovitosti, tak velikost pórů a především i jejich prostorovou distribuci v hornině pomocí zrekonstruovaných tomografických řezů.

Pro měření otevřené pórovitosti hornin byl použit rtuťový porozimetr AUTOPORE 9500 (Micromeritics, USA). Analýza byla provedena na Katedře chemie Fakulty materiálově technologické VŠB-TUO. Pro analýzu byly dodány zkušební tělíška o objemu 1 cm³ (10x10x10 mm).

Pro studium distribuce a vizualizace pórového prostoru byla využita metoda nedestruktivní rentgenové počítačové mikro-tomografie (RTG μ -CT). Nastavení RTG CT tomografu bylo provedeno v souladu s metodikou zpracovanou na ÚGN (Souček a Staš 2014). Pro účely této analýzy byl využíván automatizovaný RTG CT systém s rotačním systémem skenování, který je vybaven mikrofokálním zdrojem rentgenového záření vyzařujícím kónický svazek paprsků. Systém umožňuje jeho manuální nastavování a snímání radiografických projekcí pro účely optimalizace kvality rekonstruovaného CT objemu. Typ a základní technická specifikace použitého tomografického systému jsou následující:

- **RTG μ -CT zařízení XTH 225 ST** fy. Nikon Metrology NV (viz Obr. 506):

maximální urychlovací napětí a výkon RTG zdroje (reflexní mód)	225kV/225W
maximální urychlovací napětí a výkon RTG zdroje (transmisní mód)	180kV/20W
minimální velikost RTG ohniska (reflexní/transmisní mód)	<3 μ m/<1 μ m
maximální hmotnost, průměr a výška skenovaných objektů	50 kg/cca 0,3 m/0,3 m
maximální prozářitelná tloušťka analyzovaných materiálů	237 kg/m ²
snímač RTG záření (16 bitová hloubka rozlišení)	
plošný detektor (100 μ m na pixel, maximální počet pixelů – 4000 x 4000).	

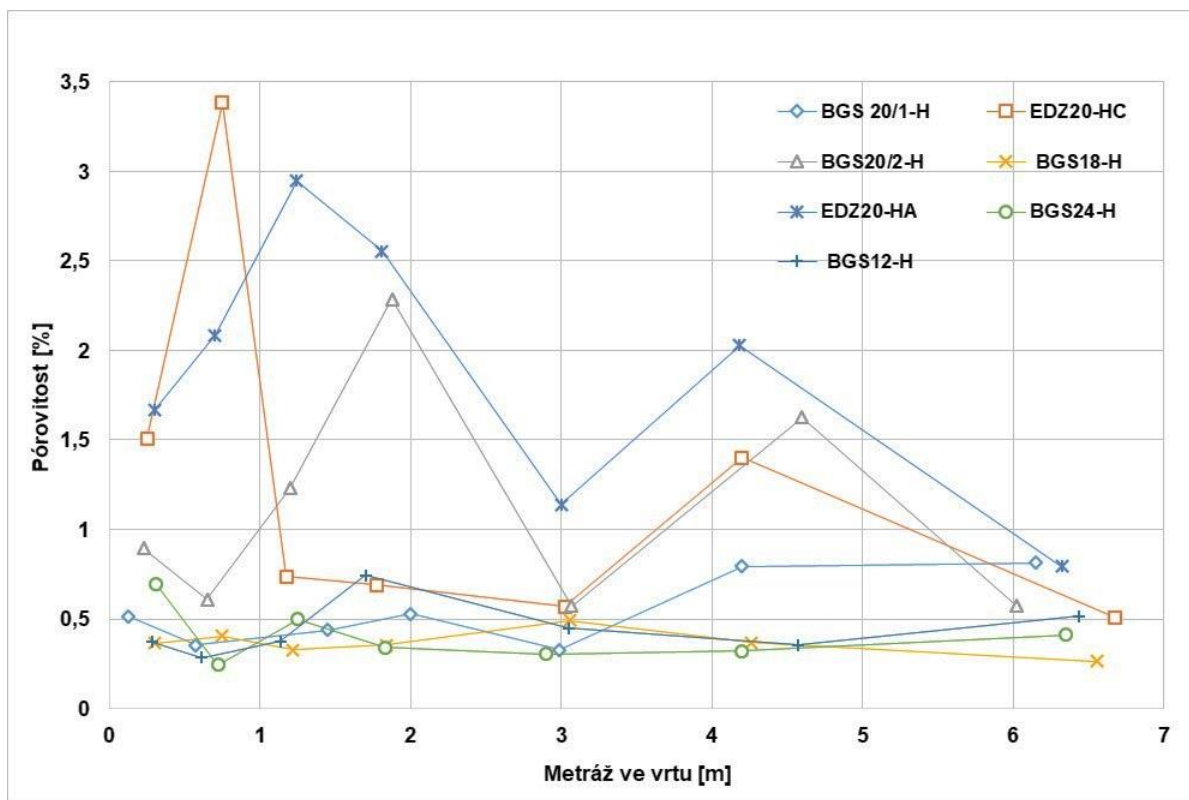
- Software **Inspect X** pro natavení RTG CT zařízení a software pro rekonstrukci tomografických objemů společnosti Nikon Metrology NV (CT Pro 3D, CT Pro 2D), které jsou dále využívány pro materiálové analýzy, např. pomocí softwaru společnosti Volume Graphic (VGStudio MAX s přídatnými moduly pro vlastní analýzu obrazu).



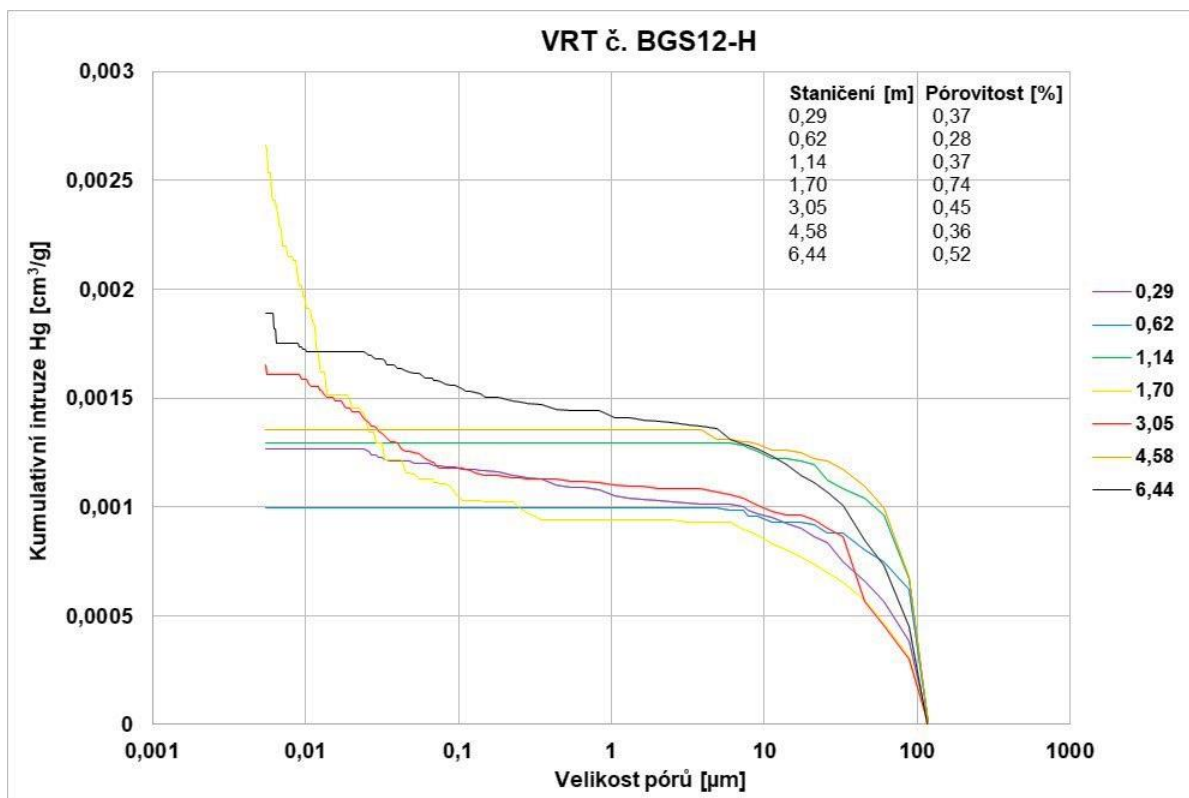
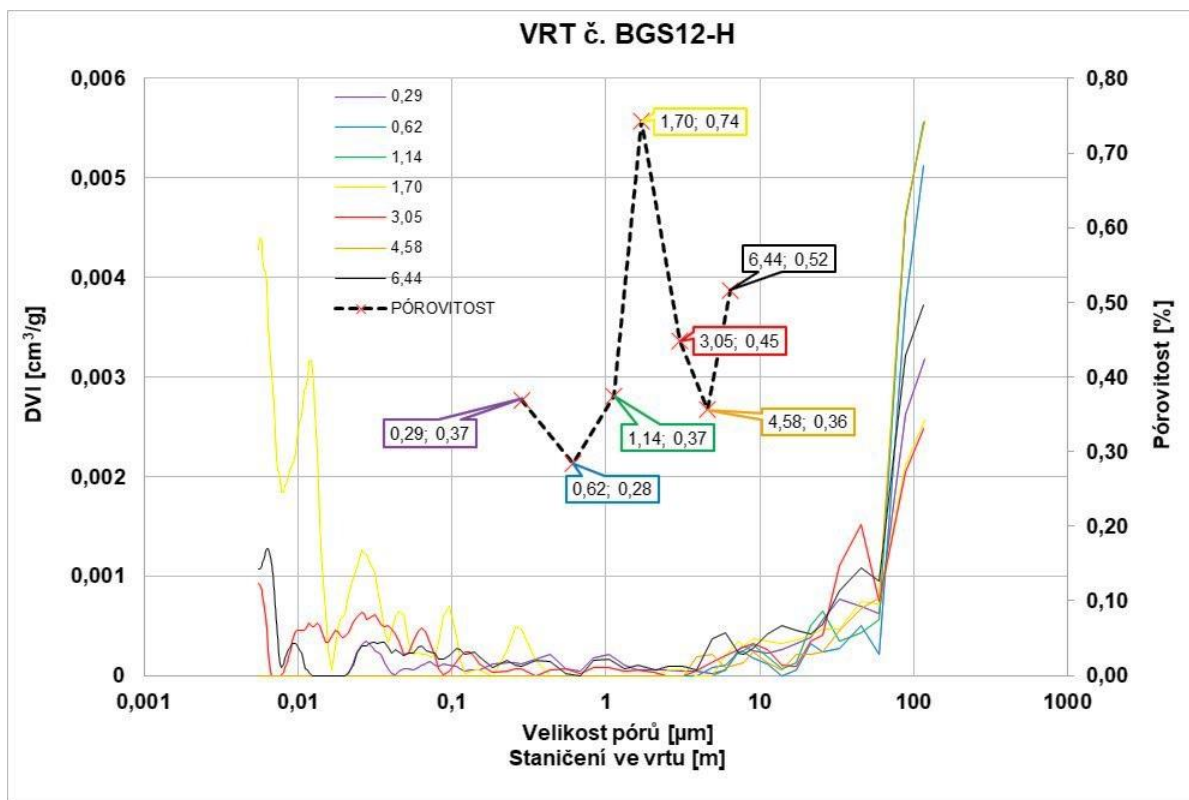
Obr. 506 RTG CT tomograf XT H 225 ST a transmisní mikrofokální zdroj RTG záření 225 kV

Na základě výsledků parametrických RTG μ -CT skenů a optimalizace nastavení rentgenového tomografu bylo používáno urychlovací napětí na úrovni hodnoty 170 kV s celkovým výkonem RTG transmisního zdroje cca 6 W. Toto nastavení RTG zdroje, při takto malém výkonu, zajišťuje ostrou kresbu tomografických řezů vzhledem k uspokojivé prozářitelnosti analyzovaných zkušebních těles (velikost RTG ohniska cca do 3 μ m). Z tohoto důvodu byly používány dlouhé expoziční časy na získání jednoho radiografického snímku, tj. 2000 ms s dvojnásobným průměrováním na jednu radiografickou projekci. Počet radiografických projekcí byl stanoven na 3142, doba jednoho tomografického skenu se tak pohybovala na úrovni cca 5 hod. Velikost voxelu v tomografickém objemu, respektive pixelu v tomografických řezech, při použitém nastavení tomografu činilo cca 7–8 μ m.

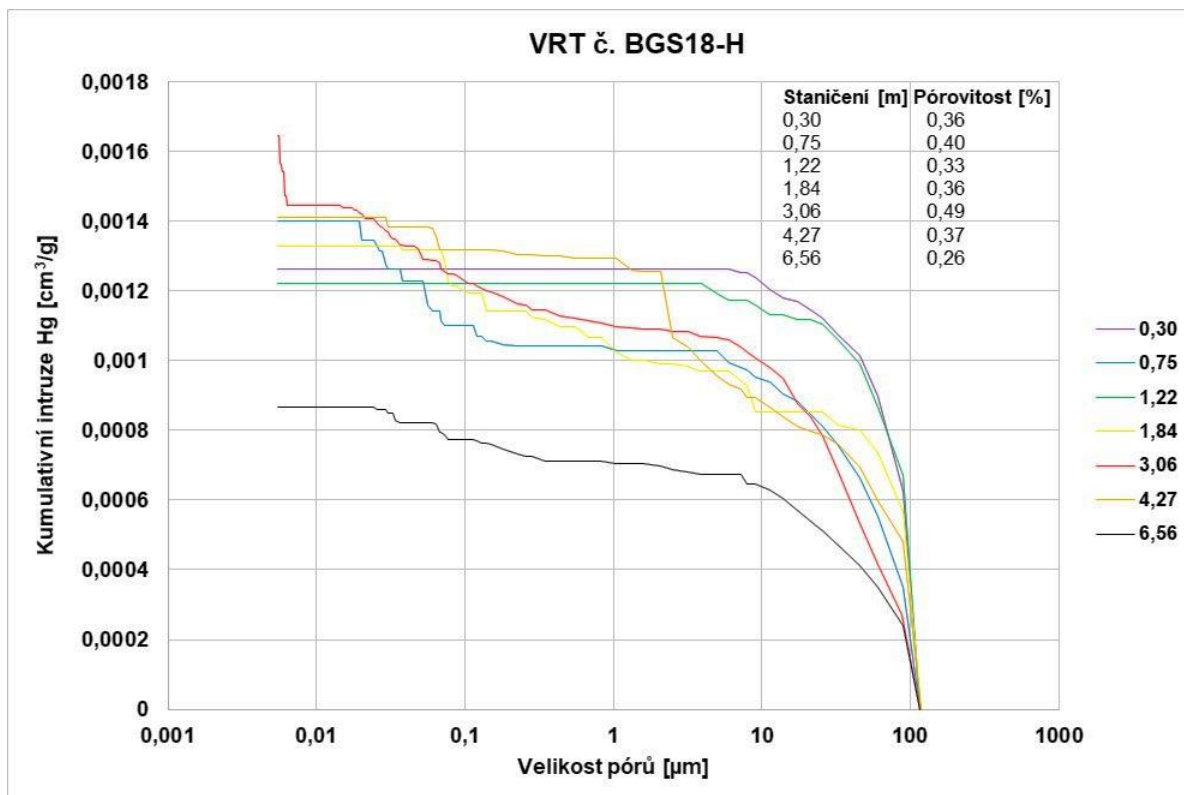
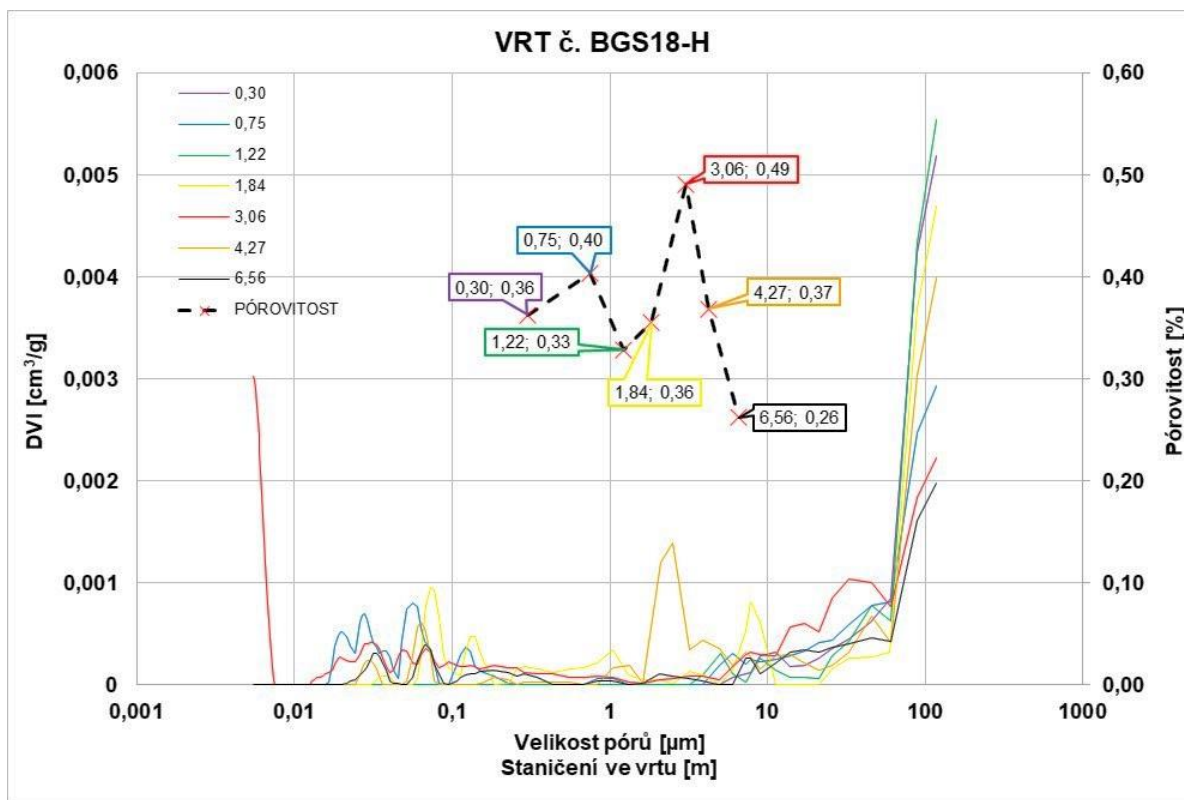
Výsledky vysokotlaké rtuťové porozimetrie byly zpracovány graficky do níže uvedených grafů. Obr. 507 znázorňuje rozdělení hodnot pórovitosti v jednotlivých geotechnických vrtech v jejich odběrných úrovních (Tab. 179). Na Obr. 508 až Obr. 514 jsou pak znázorněny distribuční křivky rozdělení objemu pórů podle jejich průměru a kumulativní intruze rtuti u sedmi odběrných úrovní v geotechnických vrtech BGS12-H, BGS18-H, BGS20/1-H, BGS20/2-H, EDZ20-HA, EDZ20-HC a BGS24-H.



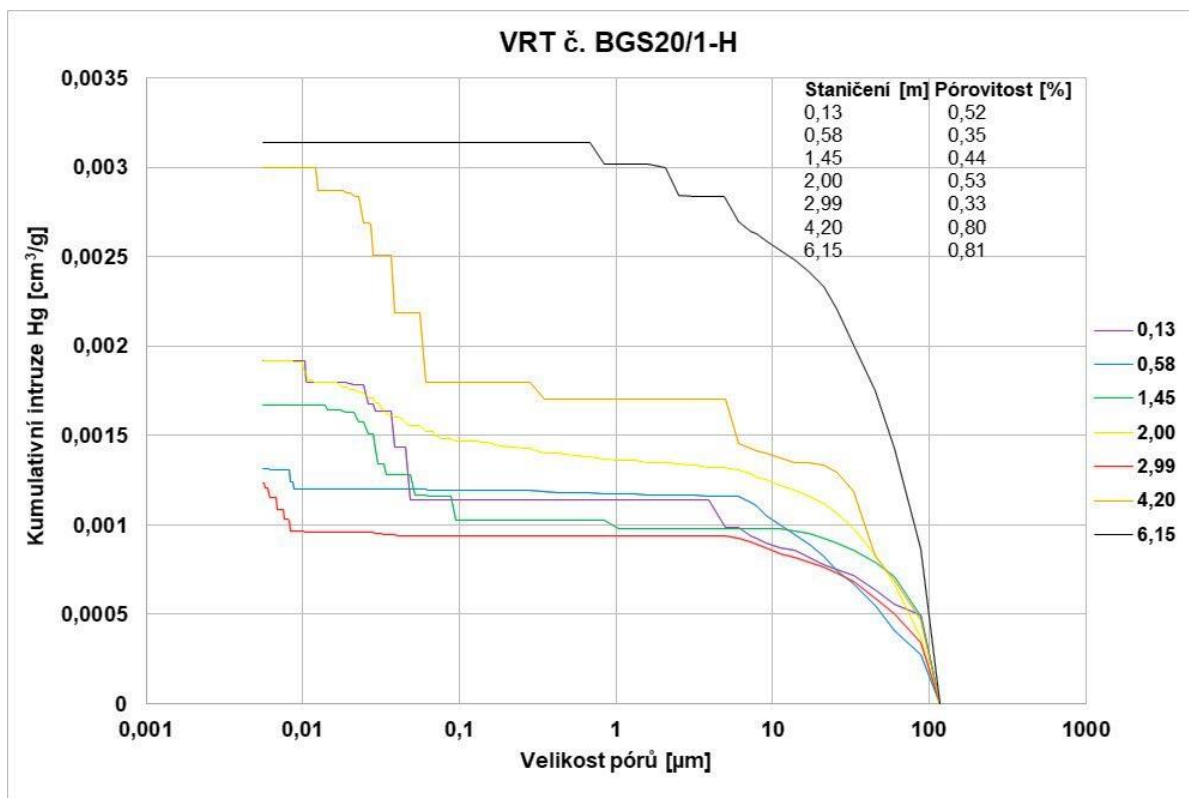
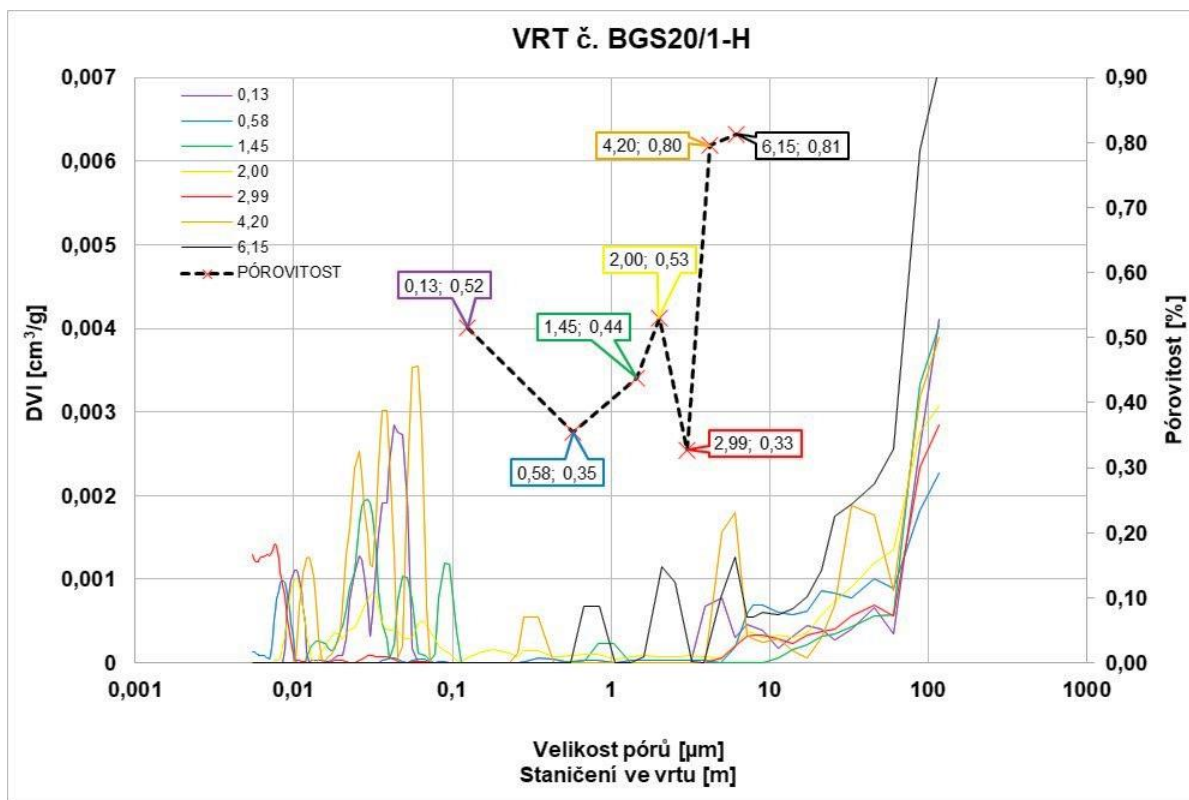
Obr. 507 Rozdělení hodnot pórovitosti v jednotlivých geotechnických vrtech v jednotlivých odběrných úrovních 1–7 (srovnej s Tab. 179)



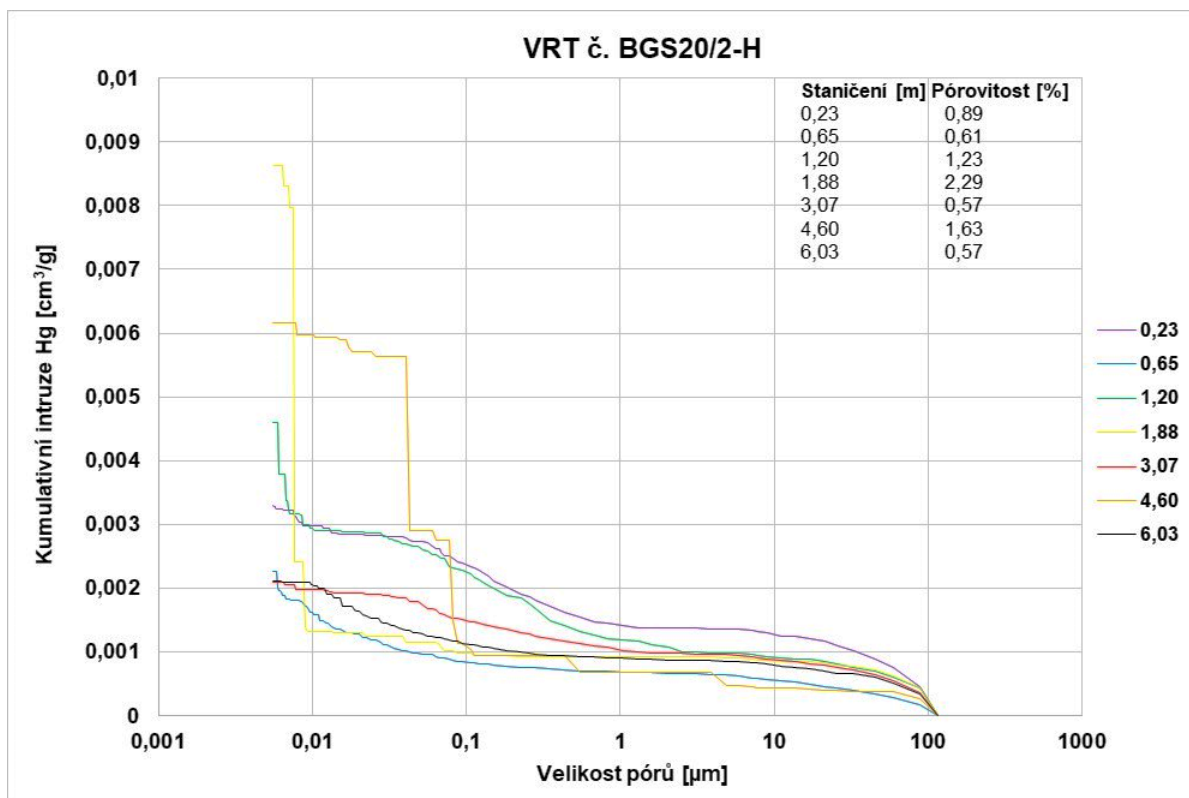
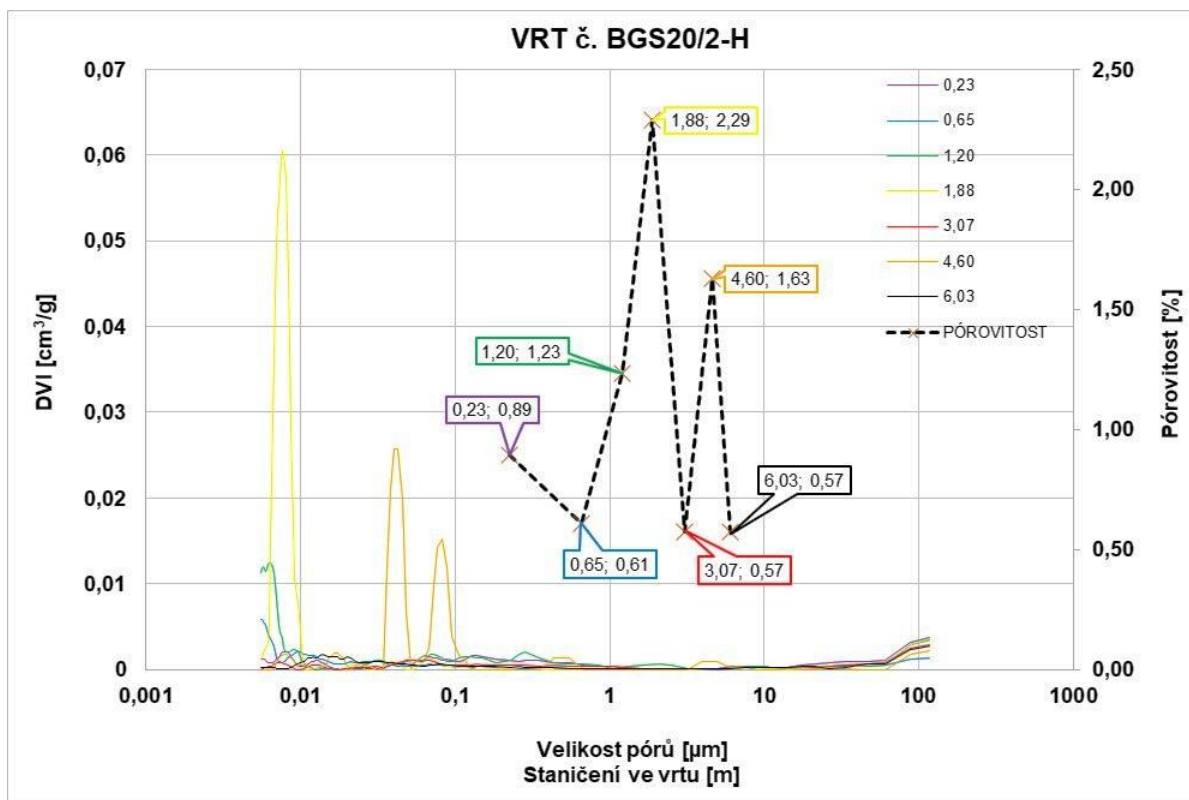
Obr. 508 Distribuční křivka rozdělení objemu pórů podle jejich průměru včetně zobrazení hodnot pórovitostí v jednotlivých odběrných úrovních (nahore) a kumulativní křivky intruze rtuti v jednotlivých úrovních ve vrtu (dole) – vrt BGS12-H



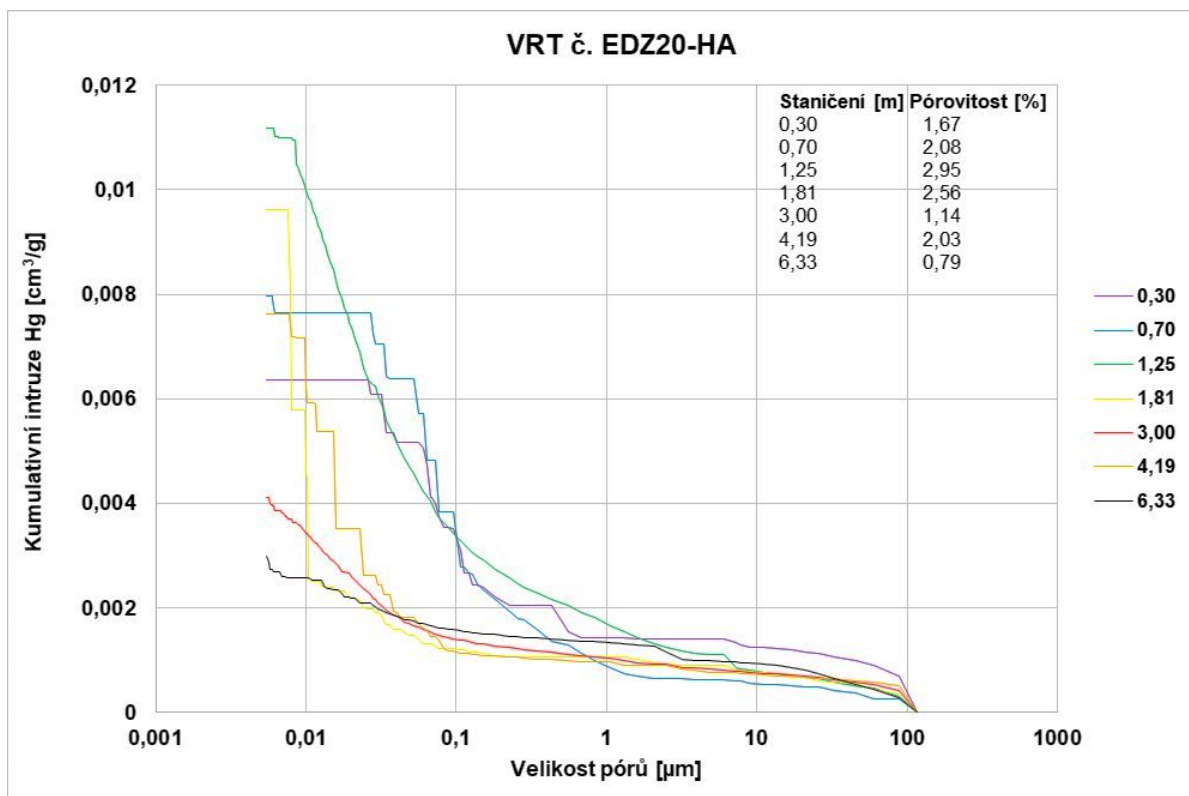
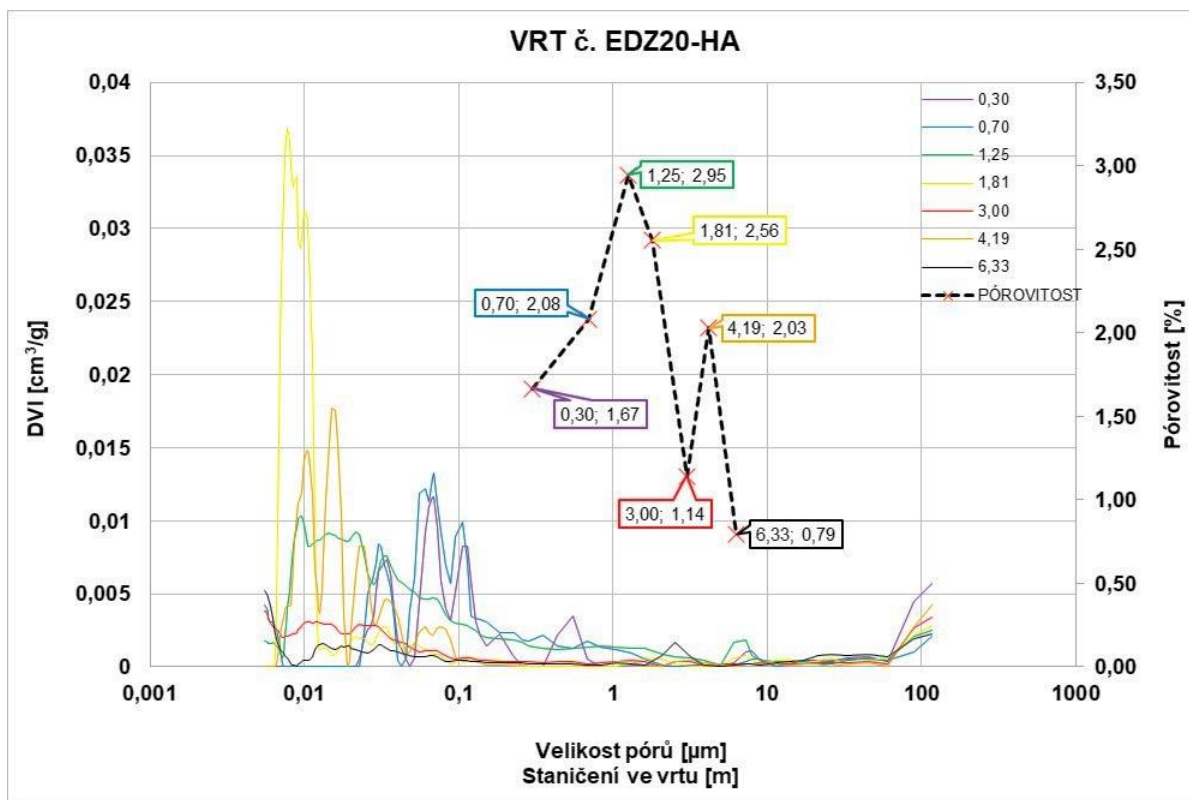
Obr. 509 Distribuční křivka rozdělení objemu pórů podle jejich průměru včetně zobrazení hodnot pórovitosti v jednotlivých odběrných úrovních (nahore) a kumulativní křivky intruze rtuti v jednotlivých úrovních ve vrtu (dole) – vrt BGS18-H



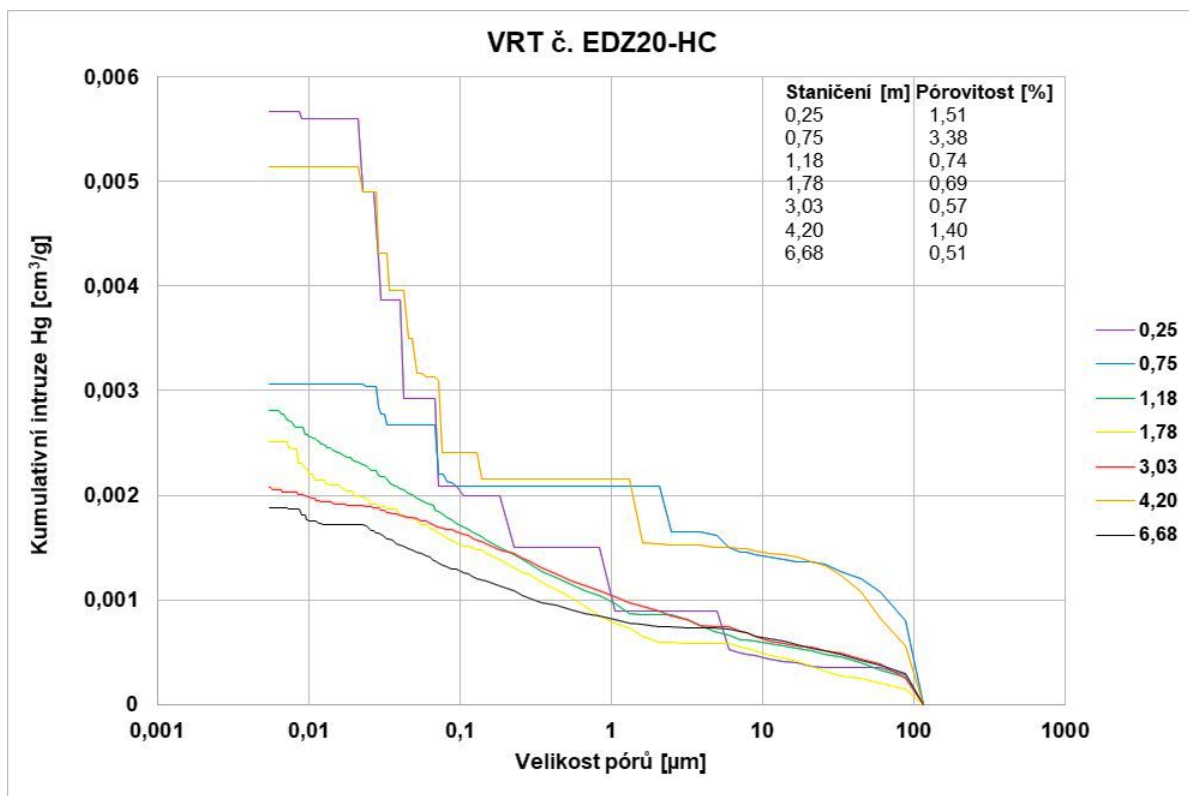
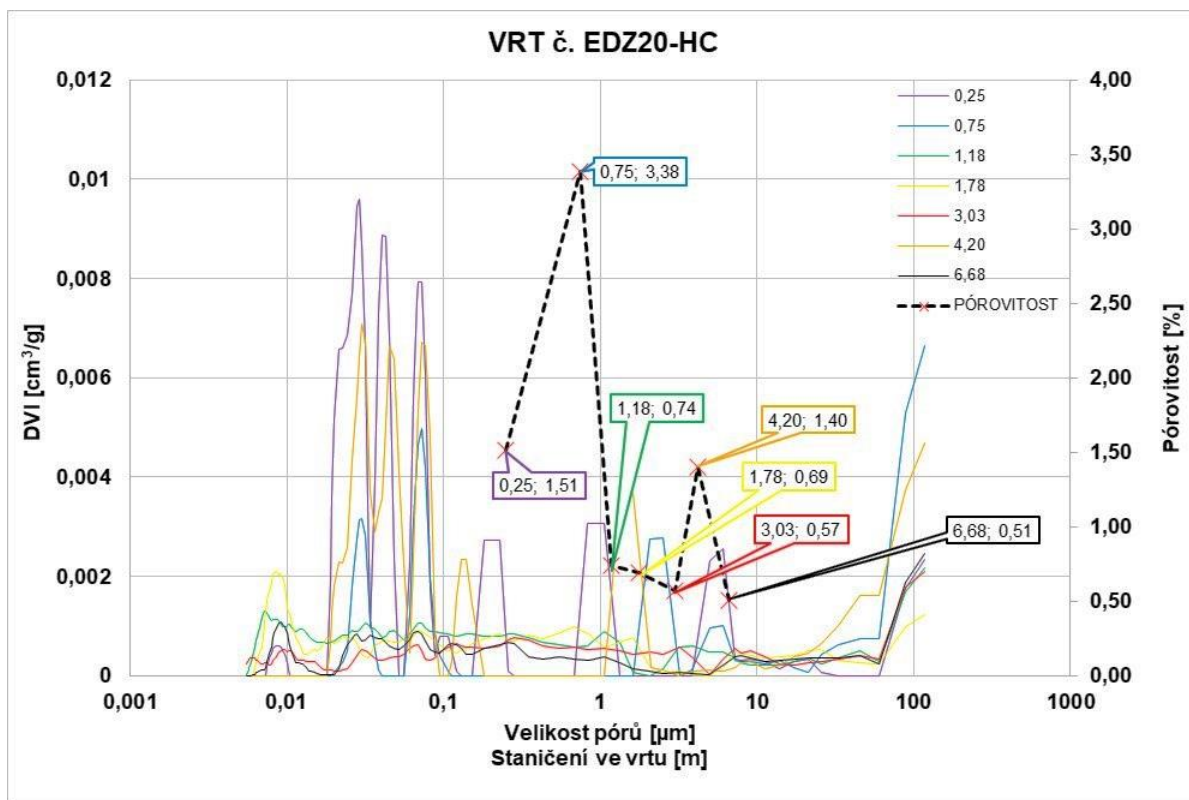
Obr. 510 Distribuční křivka rozdělení objemu pórů podle jejich průměru včetně zobrazení hodnot pórovitosti v jednotlivých odběrných úrovních (nahore) a kumulativní křivky intruze rtuti v jednotlivých úrovních ve vrtu (dole) – vrt BGS20/1-H



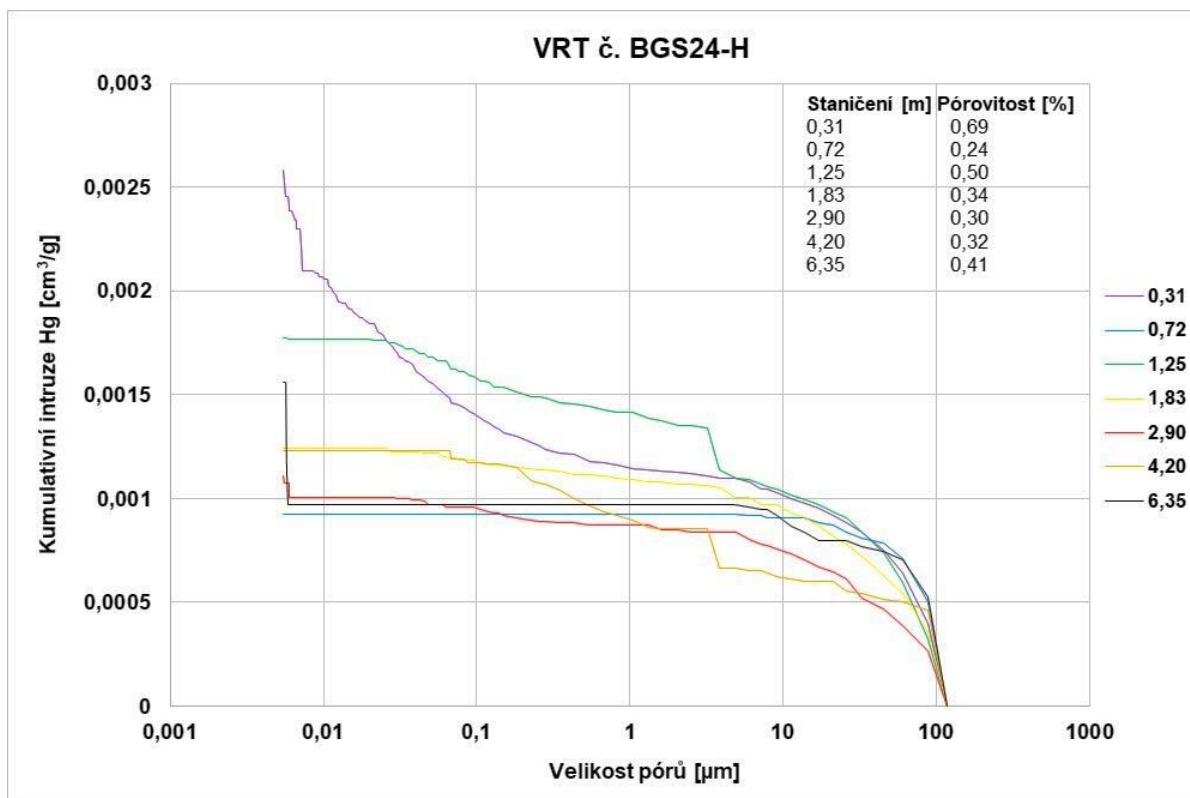
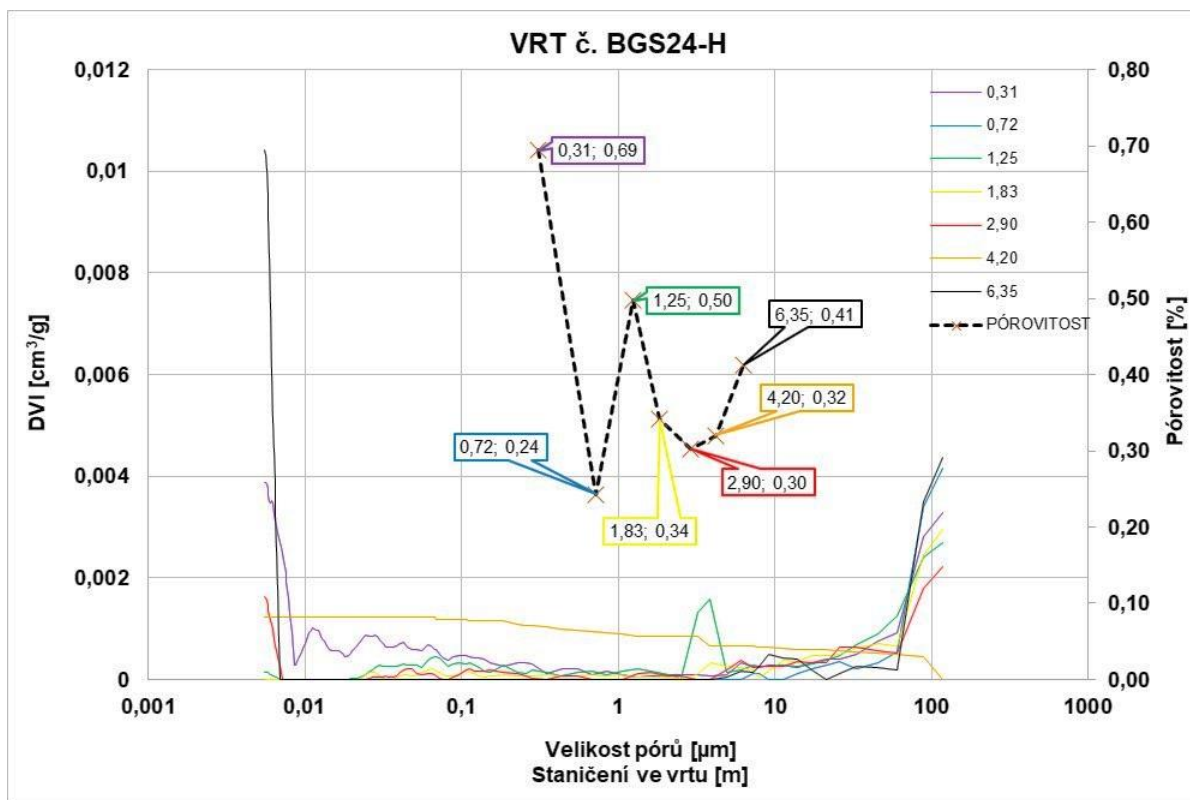
Obr. 511 Distribuční křivka rozdělení objemu pórů podle jejich průměru včetně zobrazení hodnot pórovitostí v jednotlivých odběrných úrovních (nahore) a kumulativní křivky intruze rtuti v jednotlivých úrovních ve vrtu (dole) – vrt BGS20/2-H



Obr. 512 Distribuční křivka rozdělení objemu pórů podle jejich průměru včetně zobrazení hodnot pórovitostí v jednotlivých odběrných úrovních (nahore) a kumulativní křivky intruze rtuti v jednotlivých úrovních ve vrtu (dole) – vrt EDZ20-HA



Obr. 513 Distribuční křivka rozdělení objemu pórů podle jejich průměru včetně zobrazení hodnot pórovitostí v jednotlivých odběrných úrovních (nahore) a kumulativní křivky intruze rtuti v jednotlivých úrovních ve vrtu (dole) – vrt EDZ20-HC



Obr. 514 Distribuční křivka rozdělení objemu pórů podle jejich průměru včetně zobrazení hodnot pórovitostí v jednotlivých odběrných úrovních (nahore) a kumulativní křivky intruze rtuti v jednotlivých úrovních ve vrtu (dole) – vrt BGS24-H

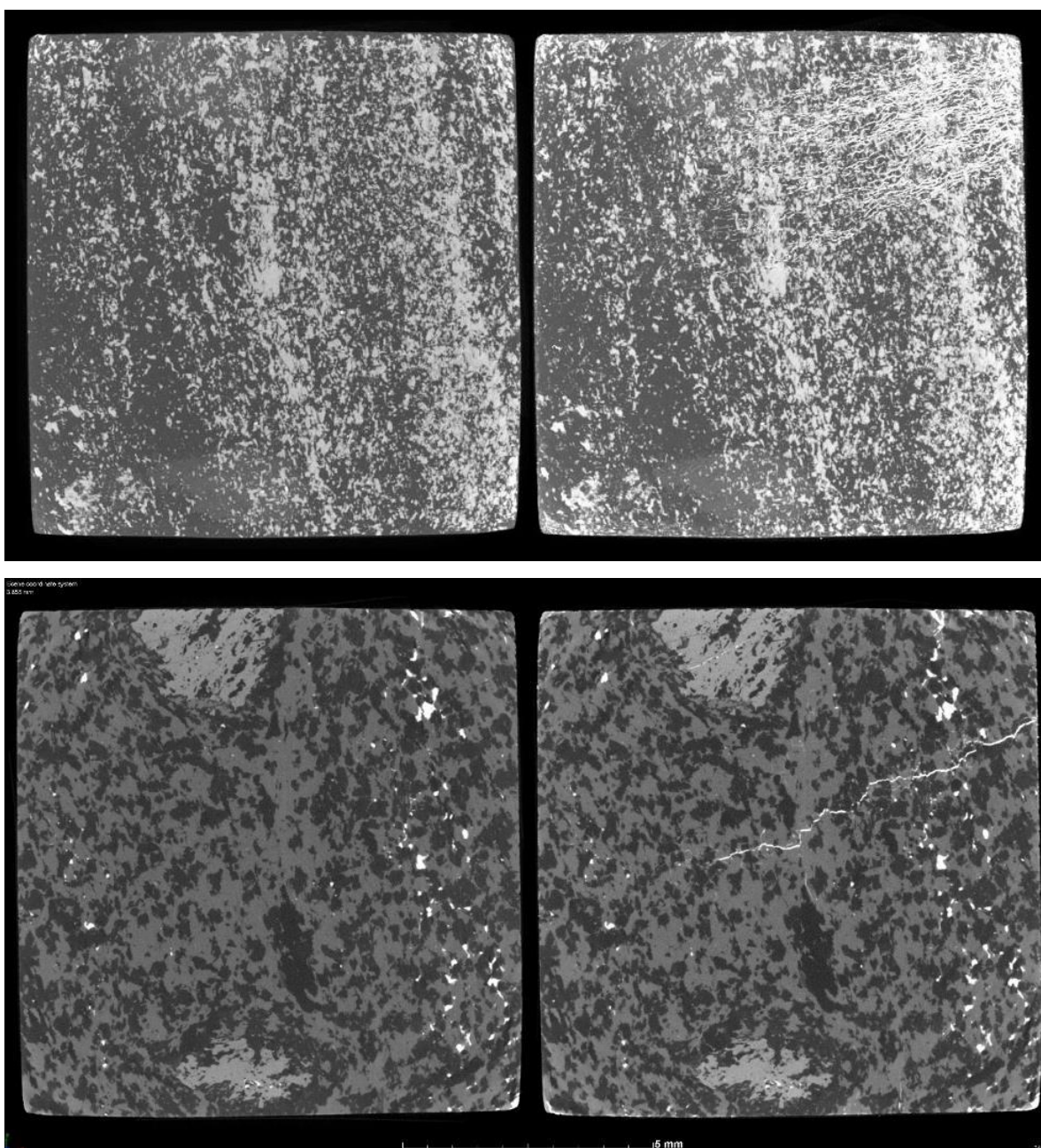
Na základě pořízených CT objemů jednotlivých zkušebních tělísek byla připravena elektronická příloha (viz Elektronická příloha 30), která zobrazuje tři série ortogonálních tomografických řezů u každého ze 49 zkušebních tělísek před a po provedené vysokotlaké rtuťové porozimetrii (MIP). Každá z těchto sérií obsahuje 10 řezů se vzájemnou roztečí cca 1 mm. Ve vnitřním souřadnicovém systému „xyz“ softwaru VGStudio MAX jsou dvourozměrné ortogonální tomografické řezy vedeny rovnoběžně se stěnami krychlových těles a jsou označovány jako „XY“, „XZ“ a „YZ“. Tyto tomografické řezy zobrazují informaci odpovídající velikosti jednoho voxelu (tj. cca 7–8 μm) ve směru osy kolmé k zobrazovanému řezu, to znamená „Z“, „Y“ a „X“. Tyto tomografické řezy jsou uloženy v elektronické příloze ve složce označené příslušným patrem a označením vrtu, například „12 patro BGS 12-H“ a dále ve vnořených složkách označených „Vysl_16506_1_5“/“STACK_XY_16506_1_5“, kde 16506 = interní číslo vzorku ÚGN, 1 = hloubková úroveň ve vrtu a 5 = pořadové číslo vzorku v sadě zkušebních tělísek připravených z dané hloubkové úrovně. Navíc byly pro každé zkušební těleso před a po MIP připraveny sumární ortogonální projekce stejně orientovaných tomografických řezů, jako v předešlém případě, promítnuté do jednoho obrázku. Do obrázků sumárních projekcí je projektováno 50 CT řezů s průměrnou roztečí cca 200 μm napříč zkušebním tělískem ve směru kolmé osy k zobrazované rovině CT řezu, tj. „Z“, „Y“ a „X“. Tyto sumární projekce jsou opět uvedeny v elektronické příloze ÚGN (Elektronická příloha 30) označeny „XY projekce_A.jpg“, „XZ projekce_A.jpg“ a „YZ projekce_A.jpg“ kde symbol „A“ reprezentuje interní číslo dle knihy vzorků ÚGN.

V následujícím textu uvádíme stručný popis distribuce rtuti, reprezentující habitus pórového prostoru, v jednotlivých zkušebních tělískách připravených z jednotlivých hloubkových úrovní geotechnických vrtů určených pro charakterizaci EDZ. Rtuť je zobrazována v tomografických řezech nejsvětlejšími odstíny šedi, tj. bílou barvou, tak jako uzavřeniny těžkých minerálů (např. zirkonu nebo monazitu), které mají vyšší objemovou hustotu než ostatní minerální fáze horniny, které jsou zobrazovány odstíny šedi. Testované horniny povětšinou odpovídají migmatitizovaným biotitickým rulám a mají tak poměrně jednoduché mineralogické složení. Tmavší odstíny šedi v CT řezech proto odpovídají křemeni a živcům jako základním světlým minerálům s tím, že díky podobné hustotě (křemen 2650 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$, ortoklas 2550–2630 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$, kyselý plagioklas 2600–2660 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$) jsou vzájemně od sebe velmi obtížně odlišitelné. Světlejší odstíny šedi pak odpovídají biotitu (2800–3400 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$) jako základní tmavé složce horniny. Praskliny, rozpoznatelné póry a oblasti s výrazně sníženou objemovou hmotností přísluší odstínům na straně škalý úrovně šedi barvě černé. Stručný popis pórového prostoru je doprovázen vyobrazením dvojicemi charakteristických CT řezů před a po MIP. Jsou to obrázky CT řezů reprezentující obrazovou informaci odpovídající velikosti jednoho voxelu ve směru osy kolmé k zobrazovanému řezu (např. Obr. 515 dole) a sumární ortogonální projekci tomografických řezů, identického ortogonálního zobrazení, projektované do jednoho obrázku (např. Obr. 515 nahoře). Celé sady CT řezů všech zkušebních tělísek jsou součástí již výše zmíněné elektronické přílohy. Popisy pórového prostoru a obrázky CT řezů jsou řazeny sestupně (se vzrůstající hloubkou) po jednotlivých patrech.

Popisy pórového prostoru pro analyzovaná tělíska z 12. patra z vrtu BGS12-H jsou následující (interní číslo zkušebních tělísek ÚGN 16506):

1. hloubková úroveň (pórovitost 0,37 %, úroveň ve vrtu 0,29 m)

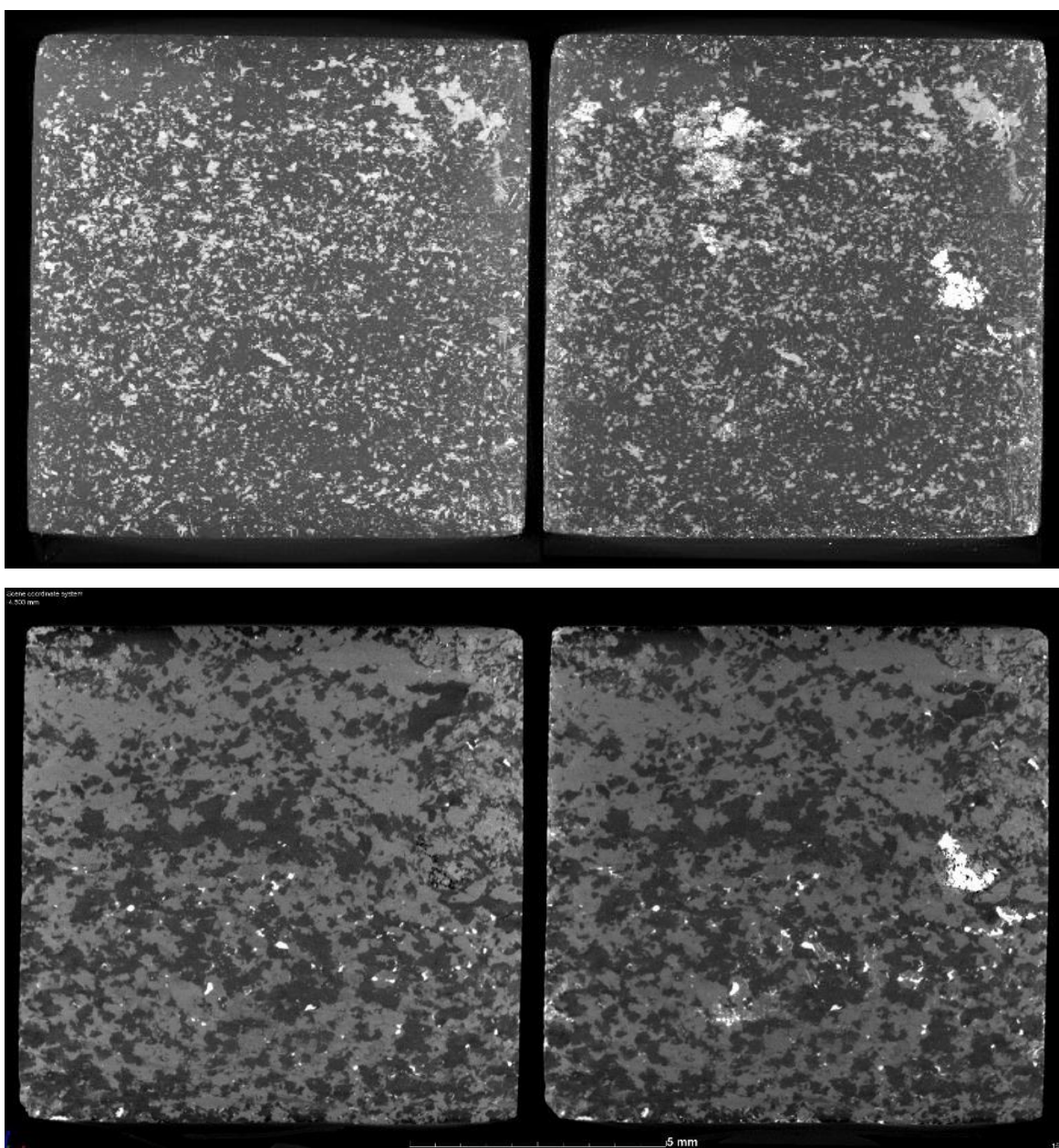
Ze srovnání CT řezů před a po MIP vyplývá, že pórový prostor je reprezentován jednou subplanární strukturou (puklinou) ve vzorku, prostupující víceméně celým objemem zkušebního tělíka. Ojedinele lze nalézt drobné trhlínky v zrnech s tmavší úrovní šedi (pravděpodobně křemen nebo živec), viz CT řez označený „YZ_16506_509“ uvedený v Elektronická příloha 30, další viditelné změny nebyly pozorovány (viz Obr. 515). Jsou zastoupeny póry o velikosti v oblasti od cca 100 μm do 10 μm , dále pak je zřejmý mírný nárůst objemu pórů v oblasti od cca 0,1 μm do 0,03 μm (viz Obr. 508).



Obr. 515 Názorné CT řezy pro 1. hloubkovou úroveň - vrt BGS12-H, sumární ortogonální projekce CT řezů (nahore), samostatný CT řez (dole)

2. hloubková úroveň (pórovitost 0,28 %, úroveň ve vrtu 0,62 m)

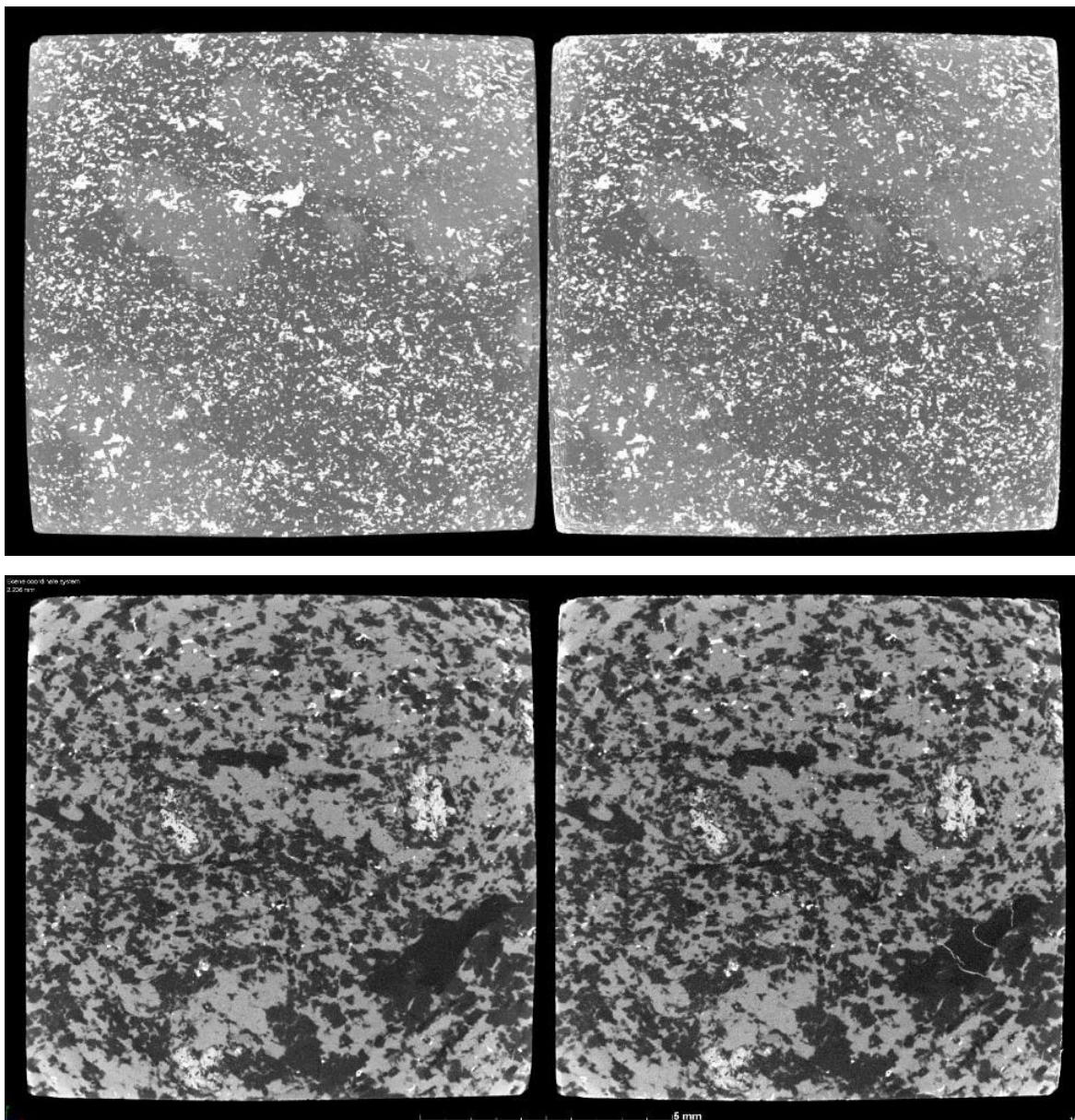
Ze srovnání CT řezů před a po MIP vyplývá, že pórový prostor je reprezentován lokálními shluky pórů jak při okrajích zkušebního tělíska, tak uvnitř. V těchto oblastech jsou na referenčních CT řezech viditelné větší shluky pórů o velikosti cca 100 μm . Ojedinele lze nalézt drobné trhlínky jak v zrnech zobrazovaných tmavší i světlejší úrovní šedi., další viditelné změny nebyly pozorovány (viz Obr. 516). Jsou zastoupeny především póry o velikosti v oblasti od cca 100 μm do 10 μm . (viz Obr. 508).



Obr. 516 Názorné CT řezy pro 2. hloubkovou úroveň - vrt BGS12-H, sumární ortogonální projekce CT řezů (nahore), samostatný CT řez (dole)

3. hloubková úroveň (pórovitost 0,37%, úroveň ve vrtu 1,14 m)

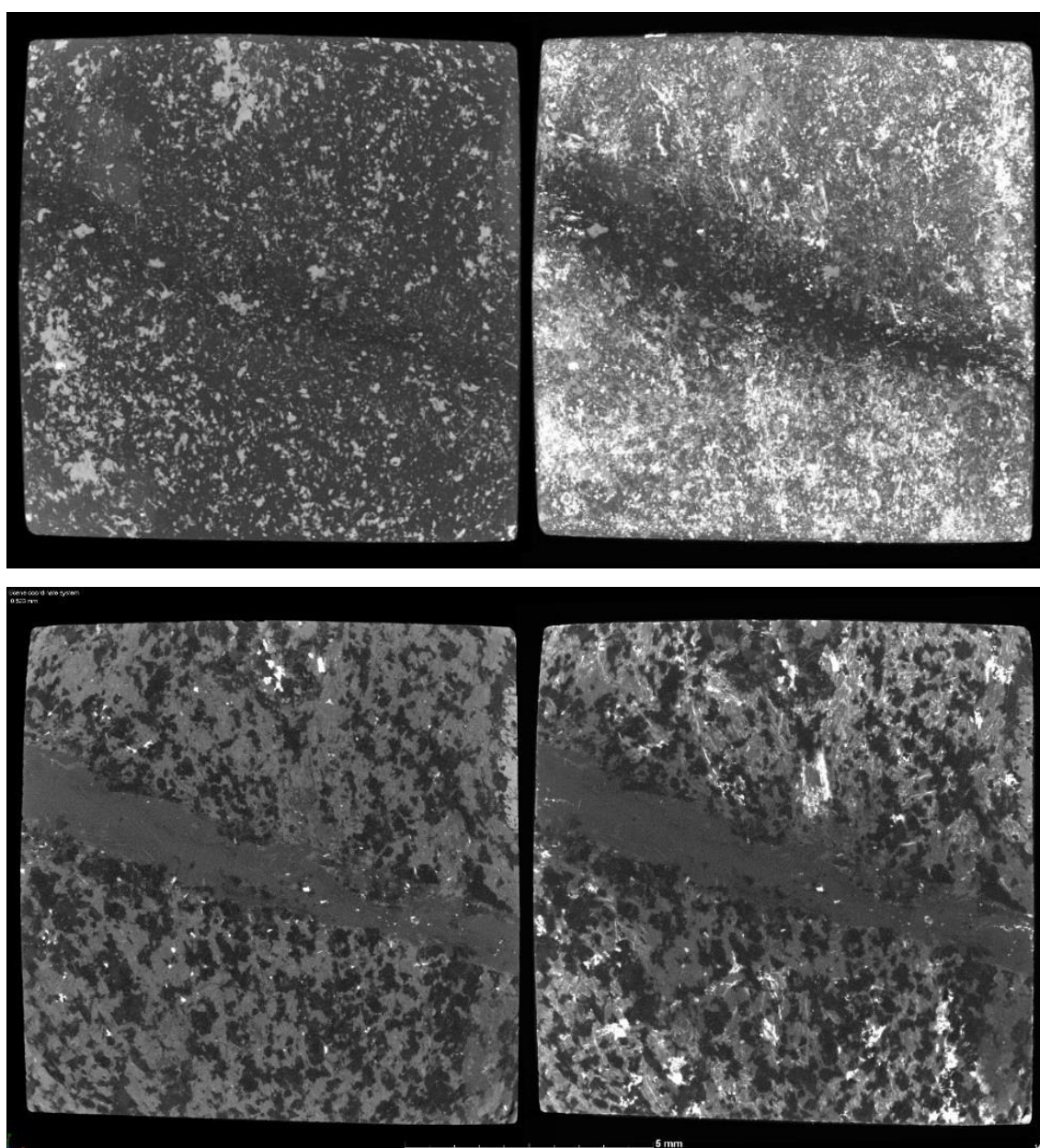
Ze srovnání CT řezů před a po MIP vyplývá, že pozorovatelné rozdíly v obrazech v CT řezech jsou minimální. Ojedinelé lze nalézt drobné trhlinky v zrnech s tmavší úrovní šedi a změny na okrajích tělíska, což mohou být trhlinky a póry vytvořené v procesu jejich řezání. Jiné viditelné změny nebyly pozorovány (viz Obr. 517). Jsou zastoupeny především póry o velikosti v oblasti od cca 100 μm do 10 μm . (viz Obr. 508).



Obr. 517 Názorné CT řezy pro 3. hloubkovou úroveň - vrt BGS12-H, sumární ortogonální projekce CT řezů (nahore), samostatný CT řez (dole)

4. hloubková úroveň (pórovitost 0,74%, úroveň ve vrtu 1,70 m)

Ze srovnání CT řezů před a po MIP vyplývá, že rozdíly v obrazech CT řezů jsou výrazné, čemuž odpovídá i nejvyšší hodnota naměřené pórovitosti ve vrtu BGS12-H.Z CT řezů je zřejmé, že pórový prostor je lokalizován především do oblasti zrn horniny se světlejší úrovní šedi. Ve zkušebním tělese byla lokalizována subplanární struktura mocná cca 0,75 mm orientovaná ve směru osy „Z“, která rovněž obsahuje rtuť, signalizující pravděpodobně sekundární trhlinky sledující její orientaci hlavně při okrajích tělíska (možný vliv řezání).

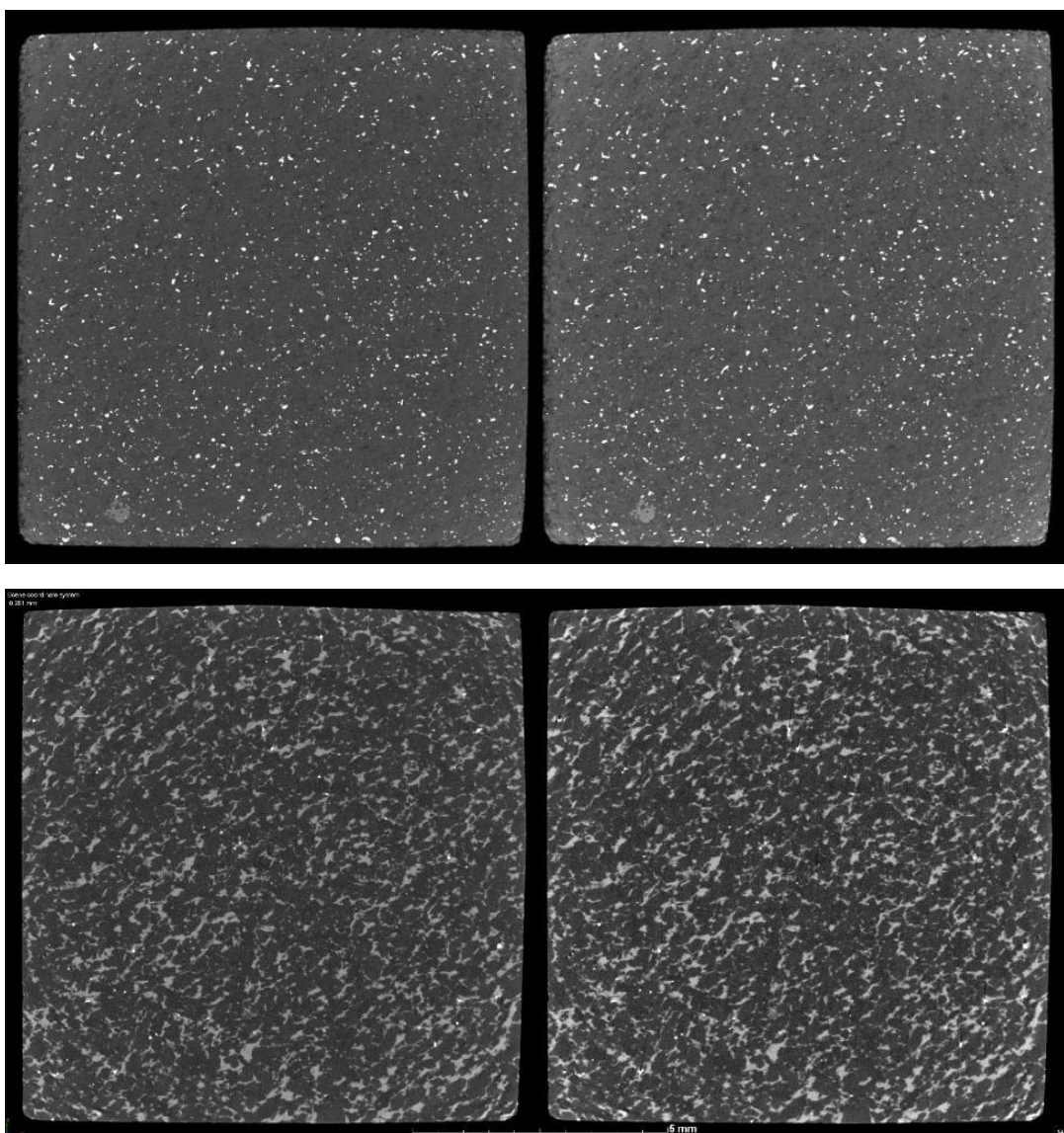


Obr. 518 Názorné CT řezy pro 4. hloubkovou úroveň - vrt BGS12-H, sumární ortogonální projekce CT řezů (nahore), samostatný CT řez (dole)

Ve střední části zkušebního tělesa reprezentuje tato struktura spíše oblast zkušebního tělíska bez viditelných pórů (viz Obr. 518). Jsou zastoupeny póry o velikosti v oblasti od cca 100 μm do 9 μm , pík reprezentující póry okolo 0,2 až 0,3 μm a pak je zřejmý narůst objemu pórů v oblasti od cca 0,1 μm do 0,008 μm (viz Obr. 508).

5. hloubková úroveň (pórovitost 0,45 %, úroveň ve vrtu 3,05 m)

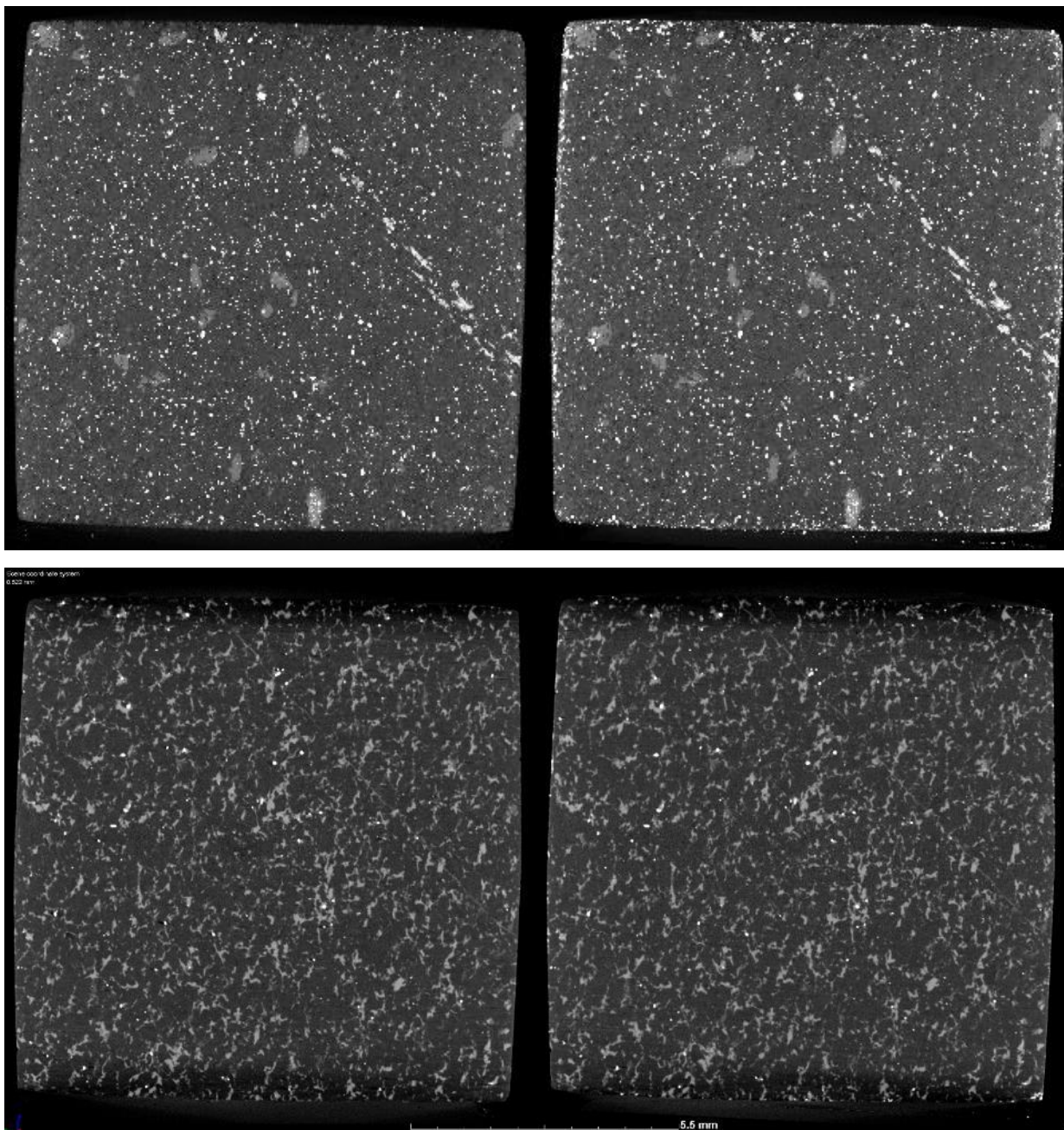
Ze srovnání CT řezů před a po MIP vyplývá, že rozdíly v obrazech CT řezů nejsou rozeznatelné a nelze tedy usuzovat na typ a distribuci póru ve zkušebním tělísku (viz Obr. 519). Jsou zastoupeny především póry o velikosti v oblasti od cca 100 μm do 10 μm a dále od cca 0,2 μm do 0,008 μm . (viz Obr. 508).



Obr. 519 Názorné CT řezy pro 5. hloubkovou úroveň - vrt BGS12-H, sumární ortogonální projekce CT řezů (nahore), samostatný CT řez (dole)

6. hloubková úroveň (pórovitost 0,36%, úroveň ve vrtu 4,58 m)

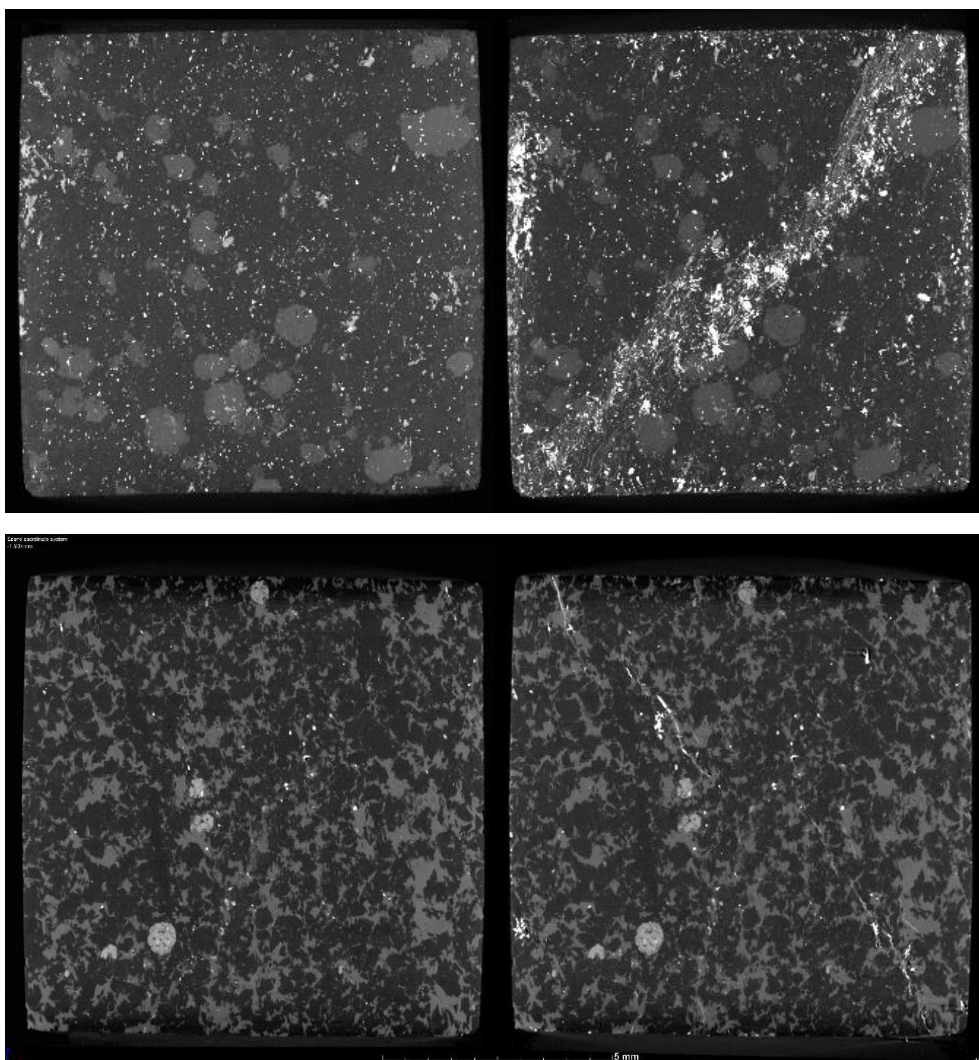
Ze srovnání CT řezů před a po MIP je zřejmé, že rozdíly v obrazech CT řezů nejsou zjevně rozeznatelné a nelze tedy celkově usuzovat na typ a distribuci póru ve zkušebním tělísku (viz Obr. 520). Drobné změny jsou viditelné u sumárních projekcí pouze na jeho okrajích, což mohou být trhlinky a póry vytvořené v procesu jejich řezání. Jsou zastoupeny především póry o velikosti v oblasti od cca 100 μm do 7 μm a dále od cca 0,2 μm do 0,008 μm (viz Obr. 508).



Obr. 520 Názorné CT řezy pro 6. hloubkovou úroveň - vrt BGS12-H, sumární ortogonální projekce CT řezů (nahore), samostatný CT řez (dole)

7. hloubková úroveň (pórovitost 0,52%, úroveň ve vrtu 6,44 m)

Ze srovnání CT řezů před a po MIP vyplývá, že zřejmé rozdíly v obrazech CT řezů jsou dobře rozpoznatelné, čemuž odpovídá i druhá nejvyšší hodnota naměřené pórovitosti ve vrtu BGS12-H. Z CT řezů je zřejmé, že pórový prostor je reprezentován víceméně jednou nespojitou subplanární strukturou (puklinou) ve vzorku prostupující víceméně celým objemem zkušebního tělíska. Tato puklina převážně prochází zrnny horniny zobrazované světlejší úrovní šedi. Dále jsou zřejmé bodové lokální výskyty rtuti, respektive pórů, asociovaných do blízkosti této pukliny s dalšími obdobnými výskyty v okrajových partiích tělíska (viz Obr. 521). Jsou zastoupeny póry o velikosti v oblasti od cca 100 μm do 8 μm , a pak je zřejmý postupný narůst objemu pórů v oblasti od cca 0,8 μm do 0,008 μm (viz Obr. 508).

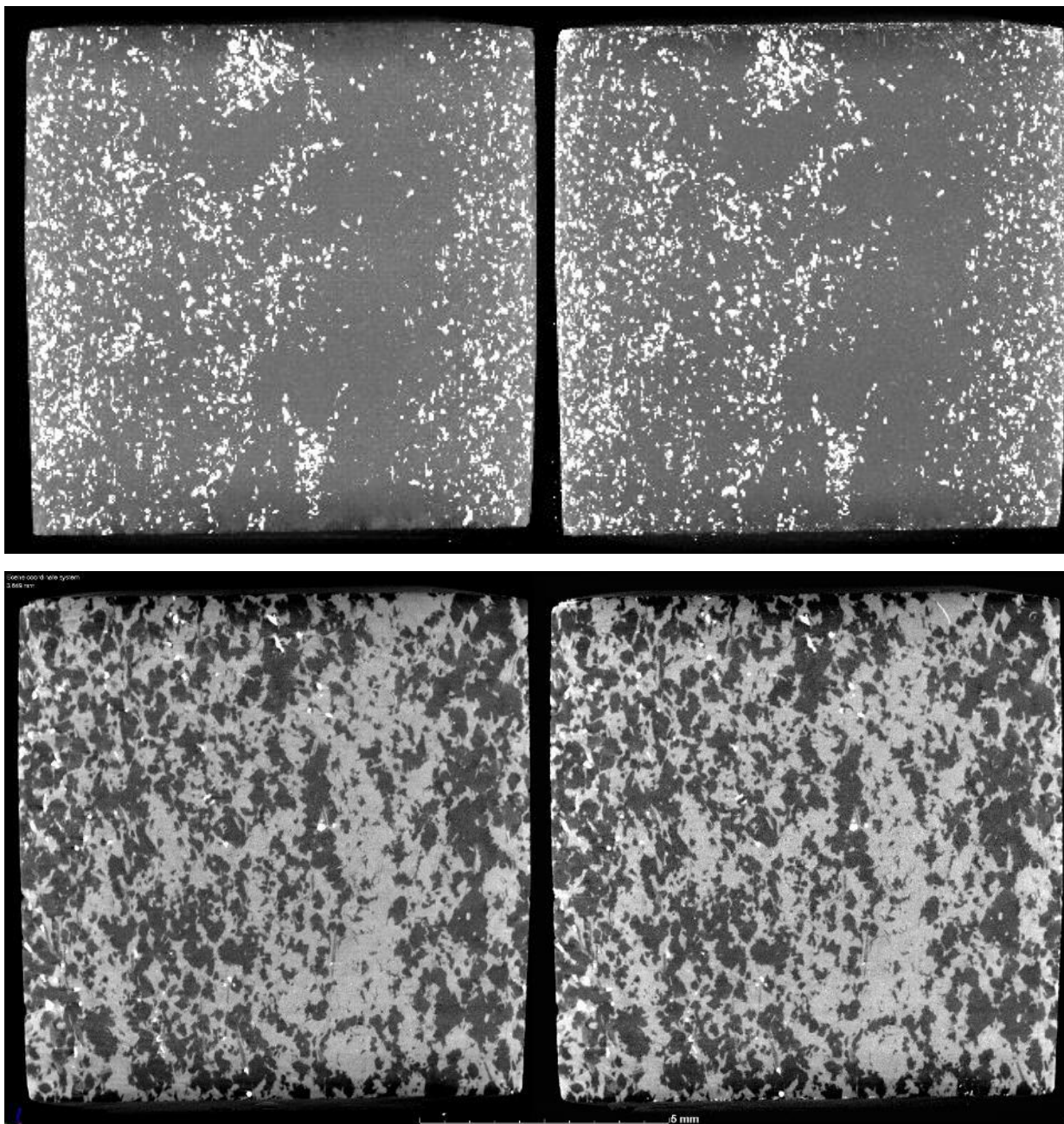


Obr. 521 Názorné CT řezy pro 7. hloubkovou úroveň - vrt BGS12-H, sumární ortogonální projekce CT řezů (nahore), samostatný CT řez (dole)

Popisy pórového prostoru pro analyzovaná tělíska z 18. patra z vrtu BGS18-H jsou následující (interní číslo ÚGN zkušebních tělísek 16500):

1. hloubková úroveň (pórovitost 0,36 %, úroveň ve vrtu 0,30 m)

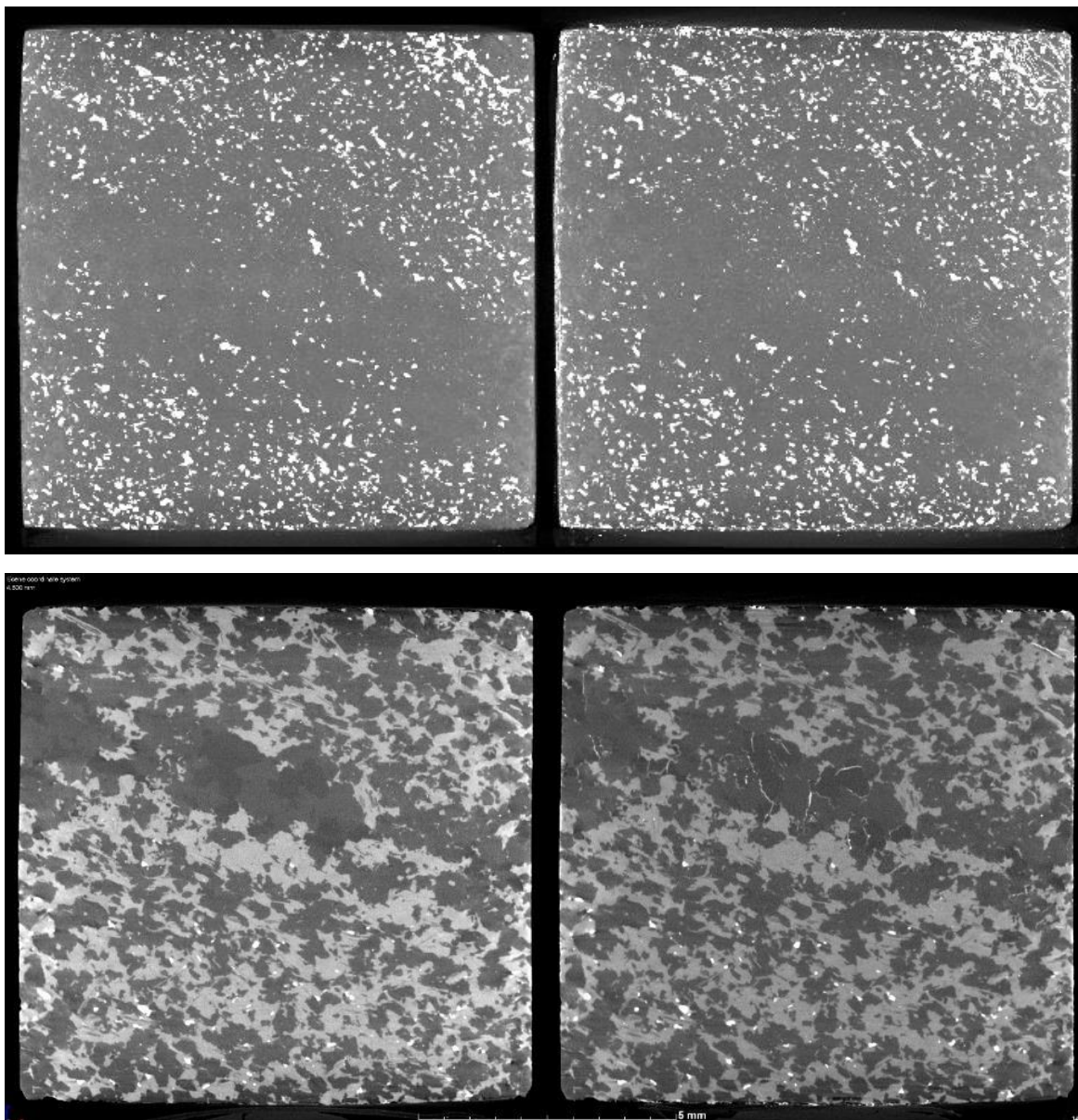
Ze srovnání CT řezů před a po MIP vyplývá, že rozdíly v obrazech CT řezů nejsou víceméně pozorovatelné a nelze tedy usuzovat na typ a distribuci pórů ve zkušebním tělísku. Ojedinele lze nalézt při okraji tělíska drobné cca 0,5 mm dlouhé trhlinky v zrnech horniny se světlejší úrovní šedi (viz Obr. 522). Jsou zastoupeny především póry o velikosti v oblasti od cca 100 μm do 9 μm (viz Obr. 508).



Obr. 522 Názorné CT řezy pro 1. hloubkovou úroveň - vrt BGS18-H, sumární ortogonální projekce CT řezů (nahore), samostatný CT řez (dole)

2. hloubková úroveň (pórovitost 0,40 %, úroveň ve vrtu 0,75 m)

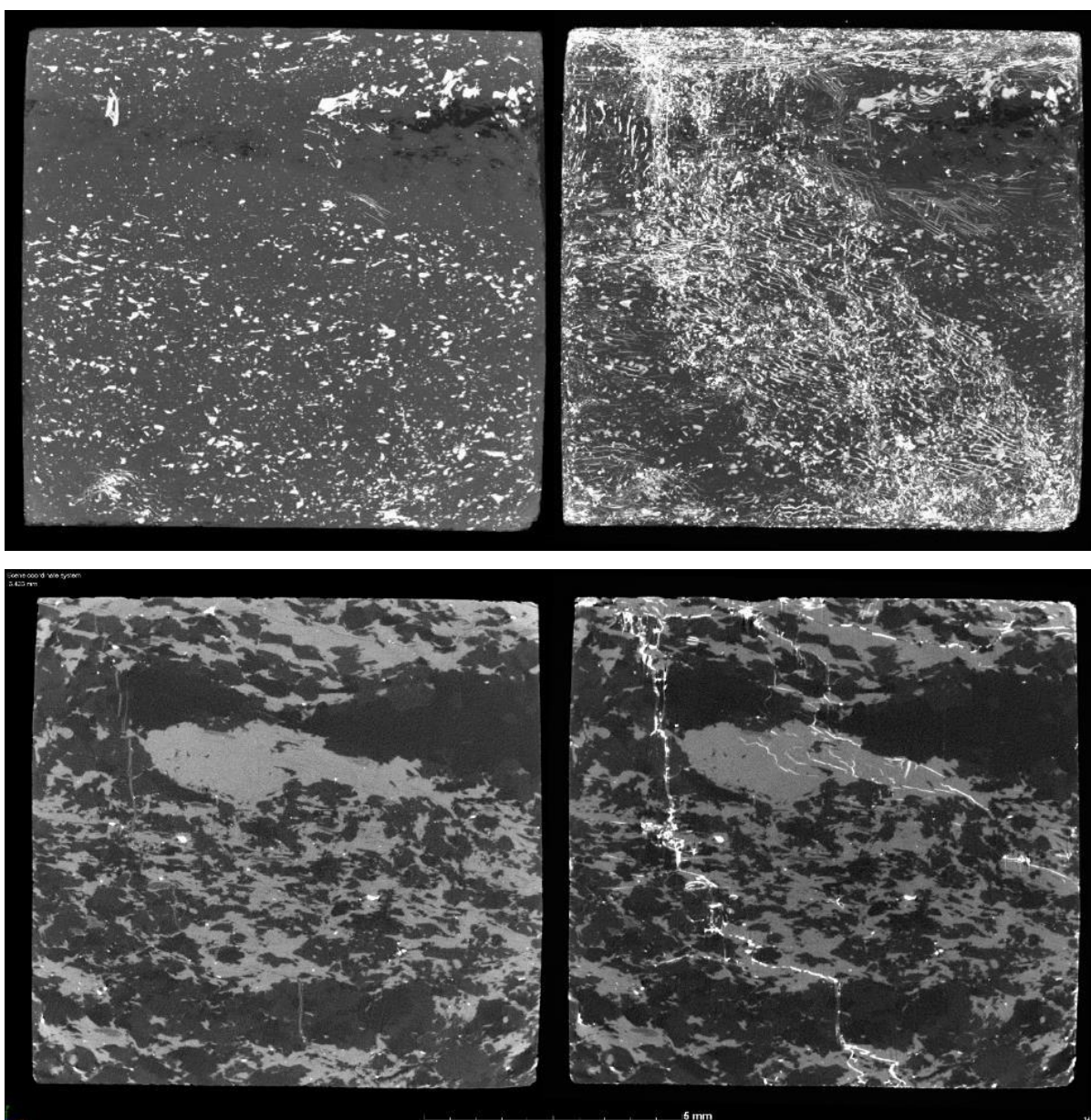
Ze srovnání CT řezů před a po MIP vyplývá, že rozdíly v obrazech v CT řezů jsou rozeznatelné převážně v zrnech horniny zobrazované tmavšími úrovněmi šedi a to na jejich kontaktu nebo i v zrnech samotných reprezentované jednou úrovní šedi (viz Obr. 523). Jsou zastoupeny především póry o velikosti v oblasti od cca 100 μm do 4 μm a v oblasti od cca 0,1 μm do 0,02 μm (viz Obr. 509).



Obr. 523 Názorné CT řezy pro 2. hloubkovou úroveň - vrt BGS18-H, sumární ortogonální projekce CT řezů (nahore), samostatný CT řez (dole)

3. hloubková úroveň (pórovitost 0,33 %, úroveň ve vrtu 1,22 m)

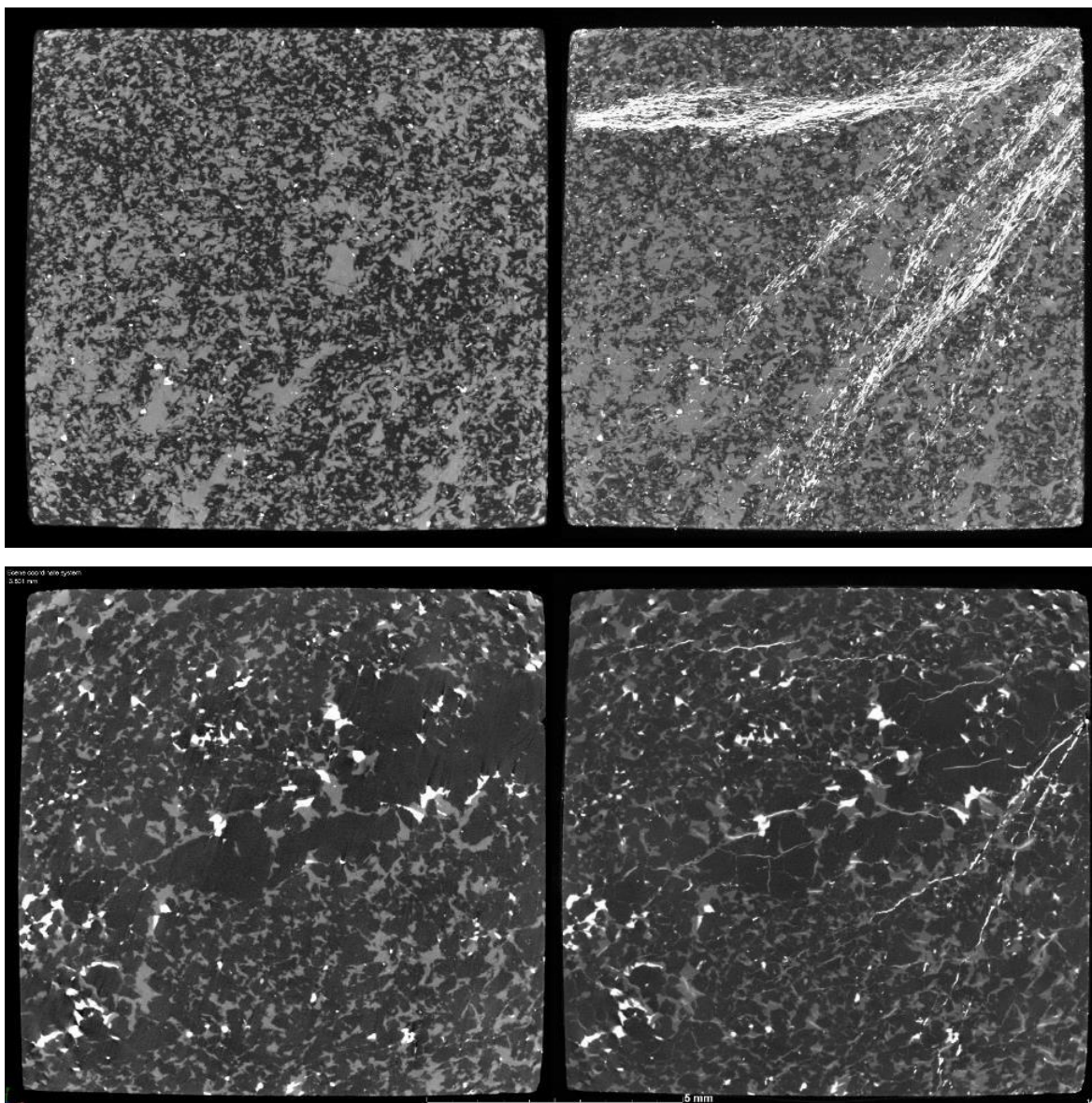
Ze srovnání CT řezů před a po MIP vyplývá, že zřetelné rozdíly v obrazech CT řezů jsou dobře rozeznatelné a jsou viditelné v celém objemu tělíska. Pórový prostor je formován do nepravidelné sítě trhlinek prostupující zrna horniny se světlou úrovní šedi, rovněž navázané na jemné světlé lineární struktury (pásky, linky) prostupující zrna zobrazované tmavšími úrovněmi šedi. V menší míře jsou rovněž trhlinky rozeznatelné v zrnech horniny zobrazované tmavšími úrovněmi šedi a to na jejich kontaktu nebo i v zrnech samotných reprezentované jednou tmavší úrovní šedi (viz Obr. 524). Jsou zastoupeny především póry o velikosti v oblasti od cca 100 μm do 3 μm (viz Obr. 509).



Obr. 524 Názorné CT řezy pro 3. hloubkovou úroveň - vrt BGS18-H, sumární ortogonální projekce CT řezů (nahore), samostatný CT řez (dole)

4. hloubková úroveň (pórovitost 0,36 %, úroveň ve vrtu 1,84 m)

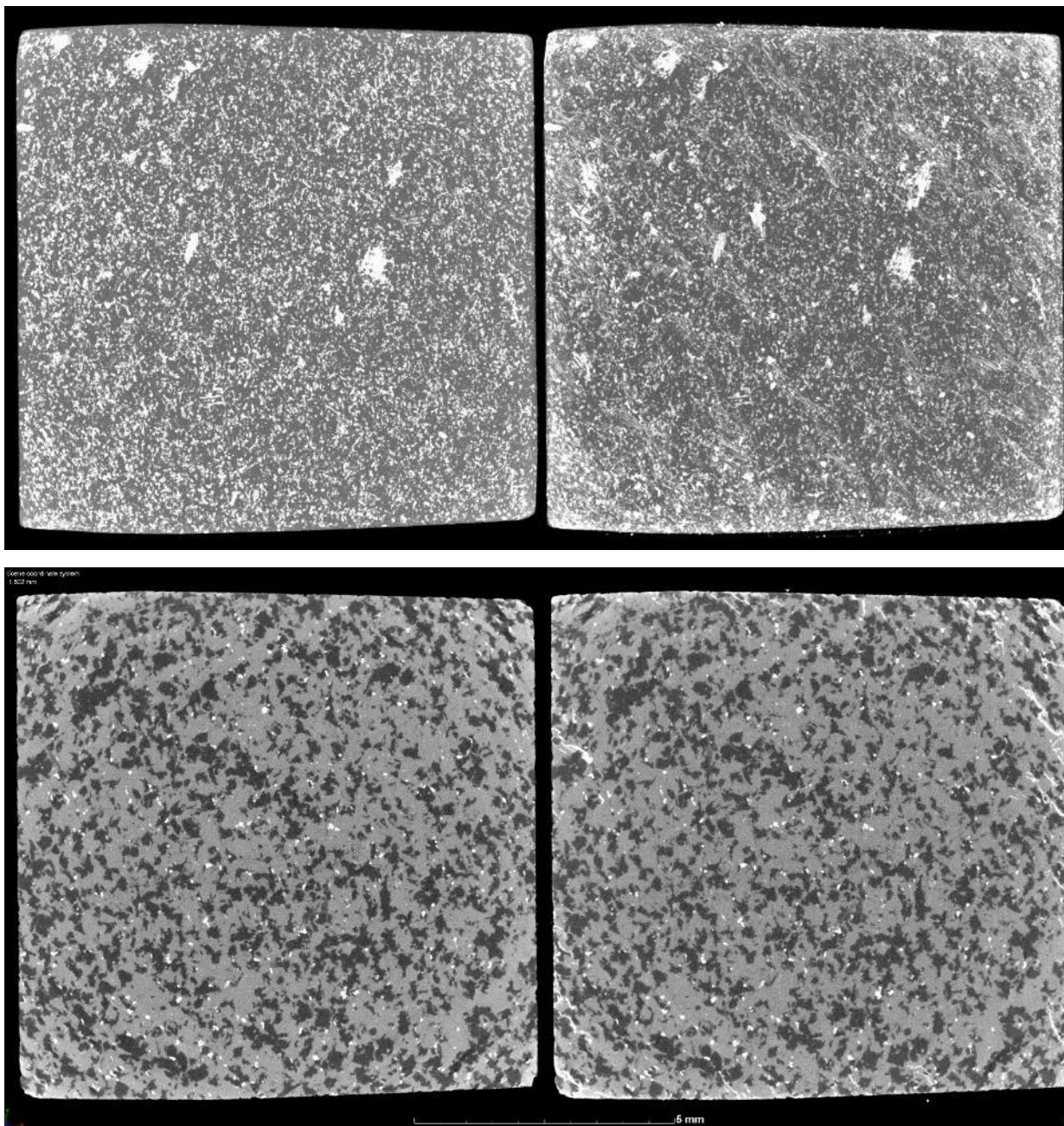
Ze srovnání CT řezů před a po MIP vyplývá, že patrné rozdíly v obrazech CT řezů jsou dobře rozeznatelné a jsou viditelné v celém objemu tělíska. Pórový prostor je formován převážně do nepravidelné sítě tří hlavních trhlinek prostupující převážně zrna horniny zobrazované světlejší úrovní šedi, z nichž jedna trhlina je navázána na otevřenou trhlínu viditelnou rovněž i v referenčním CT řezu. Velká část nepravidelných trhlinek je asociována do zrn horniny zobrazovaných světlejšími úrovněmi šedi. Viditelné jsou rovněž trhlinky v zrnech horniny reprezentované tmavší úrovní šedi a to na jejich kontaktech nebo i v samotných zrnech reprezentovanými jednou tmavší úrovní šedi (viz Obr. 525). Jsou zastoupeny póry o velikosti v oblastech od cca 100 μm do 12 μm , od cca 10 μm do 8 μm a dále od cca 1 μm do 0,03 μm (viz Obr. 509).



Obr. 525 Názorné CT řezy pro 4. hloubkovou úroveň - vrt BGS18-H, sumární ortogonální projekce CT řezů (nahore), samostatný CT řez (dole)

5. hloubková úroveň (pórovitost 0,49 %, úroveň ve vrtu 3,06 m)

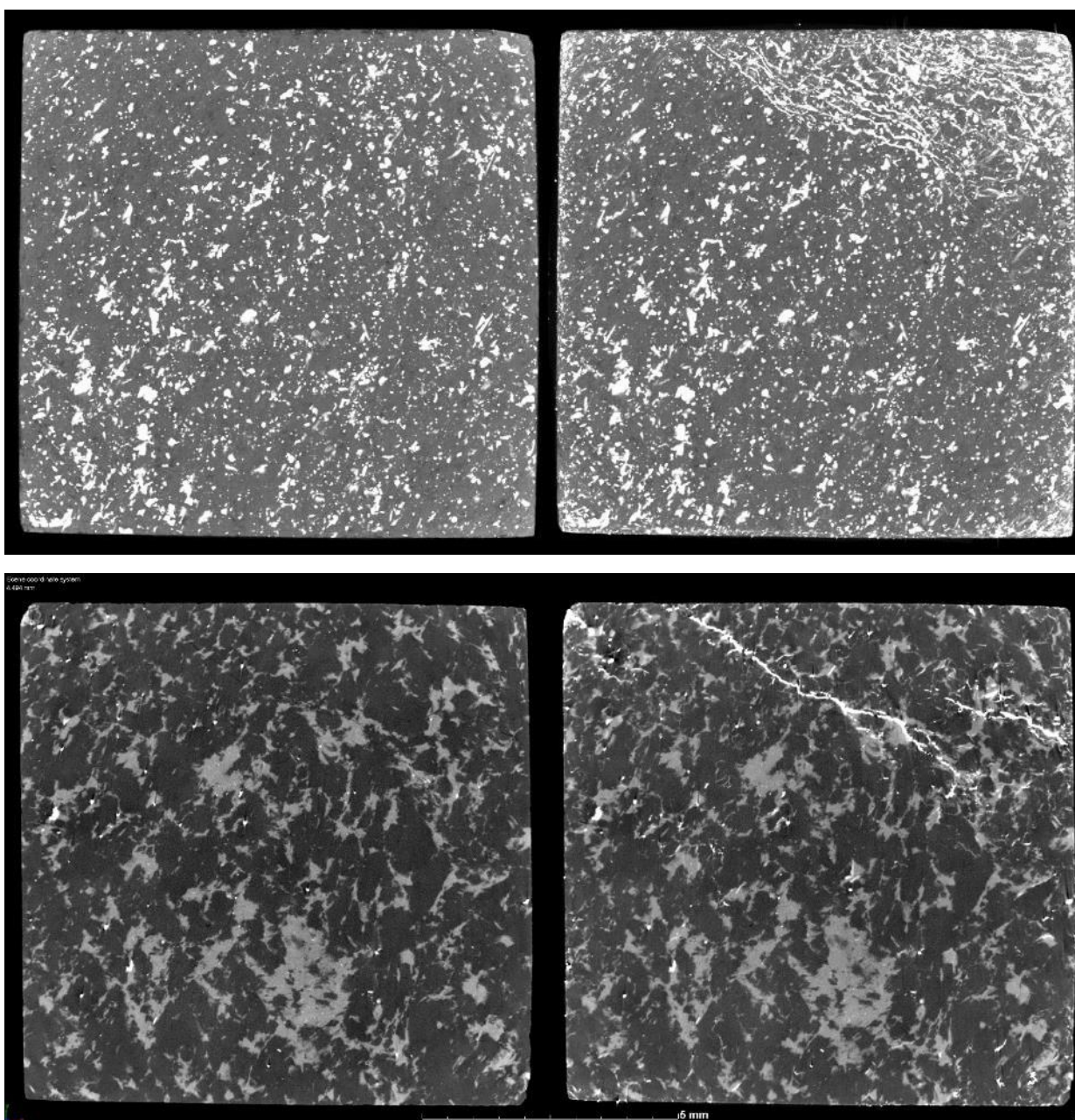
Ze srovnání CT řezů před a po MIP vyplývá, že evidentní rozdíly v obrazech CT řezů jsou dobře rozeznatelné především v okrajových částech tělíska a pórový prostor je formován do drobných trhlinek v těchto částech, převážně v oblasti zrn horniny zobrazovaných světlou úrovní šedi (viz Obr. 526). Jsou zastoupeny především póry o velikosti v oblasti od cca 100 μm do 8 μm a dále od cca 1 μm do 0,02 μm a od cca 0,009 μm do 0,008 μm (viz Obr. 509).



Obr. 526 Názorné CT řezy pro 5. hloubkovou úroveň - vrt BGS18-H, sumární ortogonální projekce CT řezů (nahore), samostatný CT řez (dole)

6. hloubková úroveň (pórovitost 0,36%, úroveň ve vrtu 4,58 m)

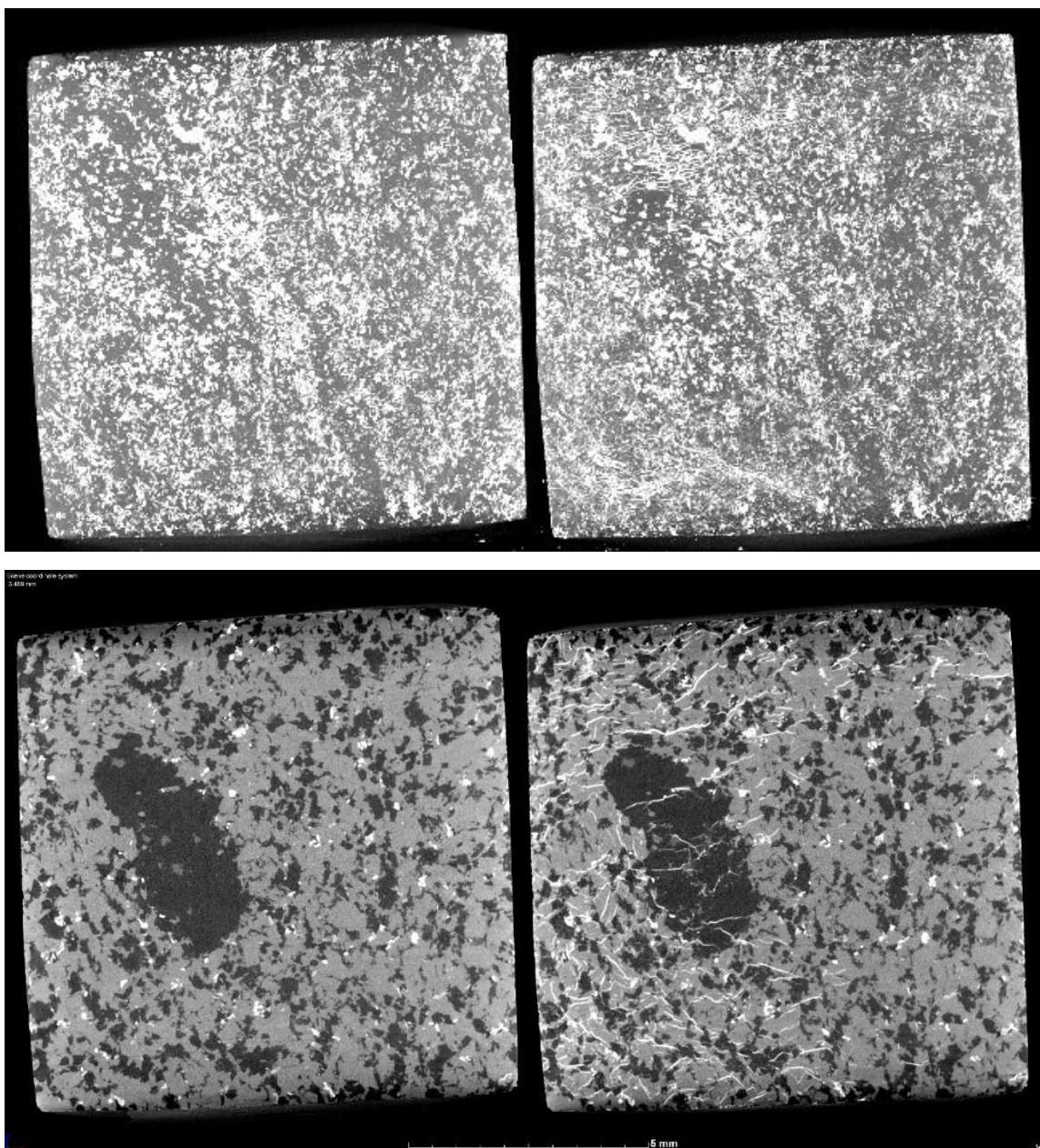
Ze srovnání CT řezů před a po MIP vyplývá, že zřejmé rozdíly v obrazech CT řezů jsou rozeznatelné a pórový prostor je formován především do drobné trhlinky procházející rohovou oblastí tělíska průběžně přes zrna analyzované horniny. Tato dominantní trhlinka v tělísku byla viditelná i na referenčním CT řezu (viz Obr. 527). Jsou zastoupeny především póry o velikosti v oblasti od cca 100 μm do 11 μm , dále nárůst pórů od cca 8 μm do 2 μm a část pórů o velikosti 0,08 μm do 0,02 μm (viz Obr. 509).



Obr. 527 Názorné CT řezy pro 6. hloubkovou úroveň - vrt BGS18-H, sumární ortogonální projekce CT řezů (nahore), samostatný CT řez (dole)

7. hloubková úroveň (pórovitost 0,52 %, úroveň ve vrtu 6,44 m)

Ze srovnání CT řezů před a po MIP vyplývá, že patrné rozdíly v obrazech CT řezů jsou rozeznatelné a pórový prostor je formován do soustavy drobných trhlinek asociovaných v zrnech horniny zobrazovaných světlejší úrovní šedi s dominantní orientací ve směru osy „X“. Částečné jsou trhlinky přítomny i v dominantním zrně zobrazovaném tmavší úrovní šedi (viz Obr. 528). Trhlinky nejsou distribuovány v celém objemu testovaného tělíska, pouze v jeho jedné polovině. Jsou zastoupeny póry o velikosti v oblasti od cca 100 μm do 9 μm , a dále pak v oblasti od cca 0,3 μm do 0,03 μm (viz Obr. 509).

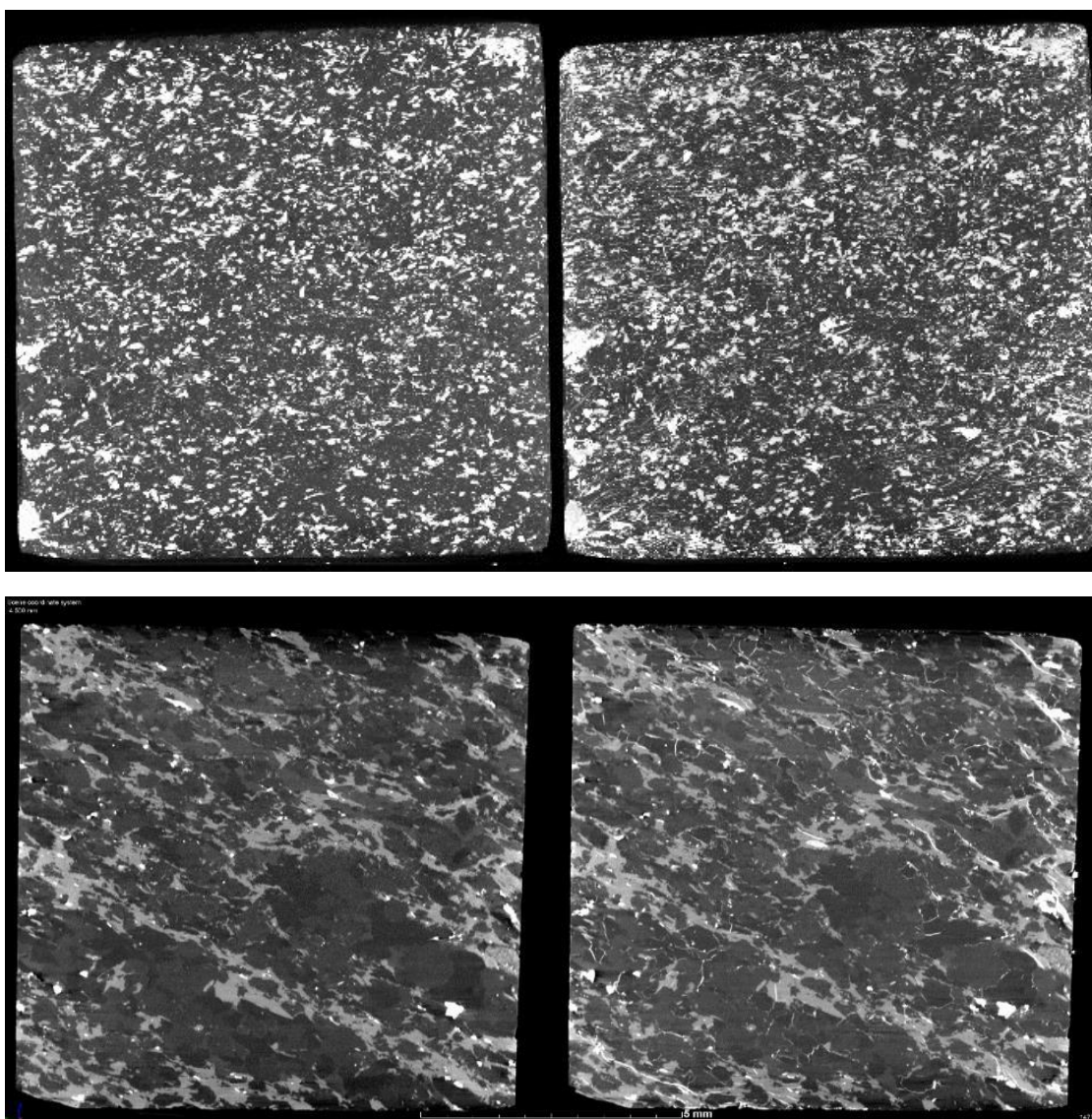


Obr. 528 Názorné CT řezy pro 7. hloubkovou úroveň - vrt BGS18-H, sumární ortogonální projekce CT řezů (nahore), samostatný CT řez (dole)

Popisy pórového prostoru pro analyzovaná tělíska z 20. patra z vrtu BGS20/1-H jsou následující (interní číslo ÚGN zkušebních tělísek 16404):

1. hloubková úroveň (pórovitost 0,52%, hloubková úroveň ve vrtu 0,13m)

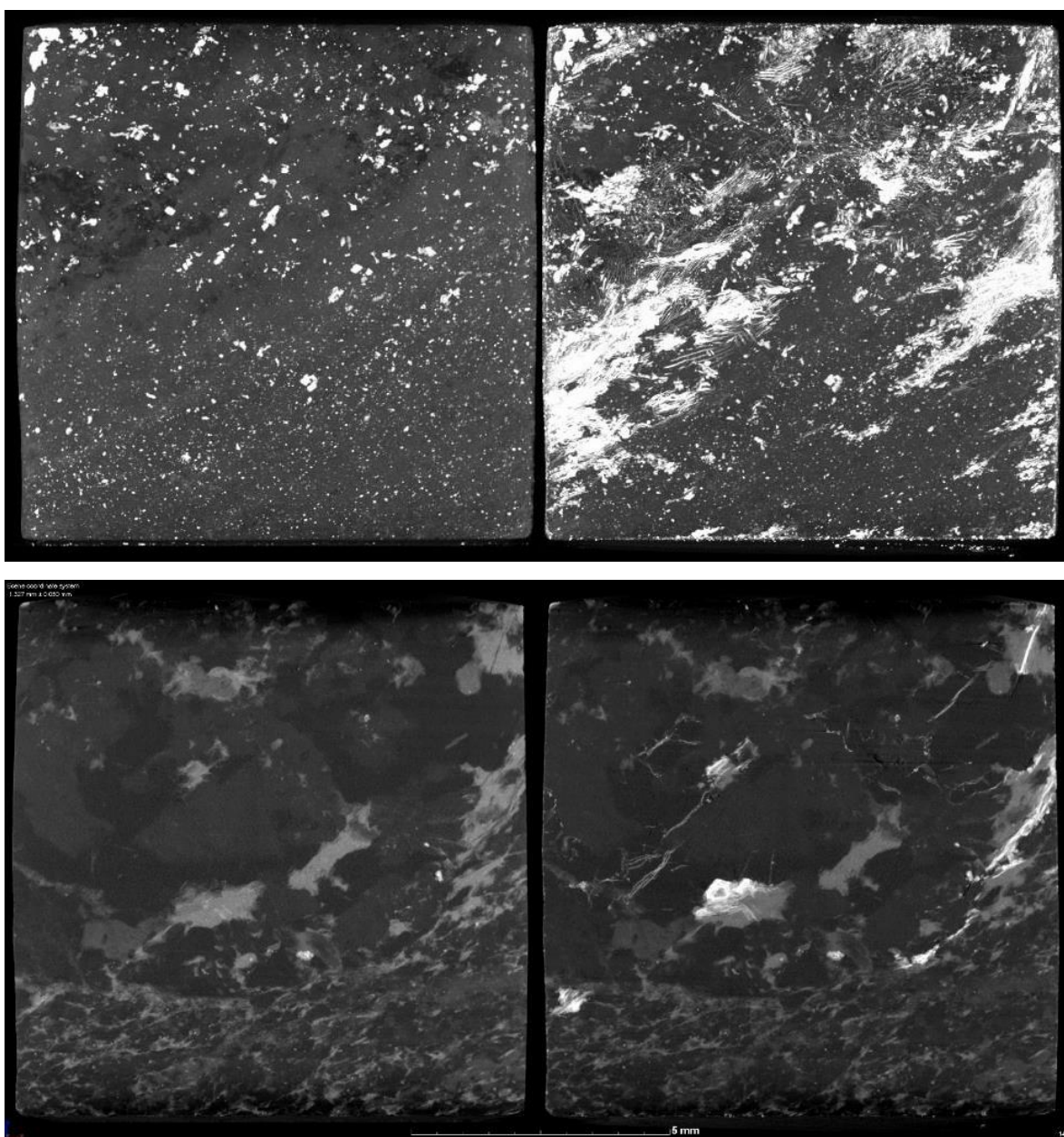
Ze srovnání CT řezů před a po MIP vyplývá, že rozdíly v obrazech CT řezů nejsou výrazně rozpoznatelné vzhledem k nižší hodnotě pórovitostí, pórový prostor je formován sítí trhlinek různé mocnosti a orientace v celém objemu tělíska, a to jak v zrnech horniny zobrazovaných světlejší i tmavší úrovní šedi, popřípadě na kontaktu jednotlivých zrn. Zdá se, že častěji se trhlinové póry vyskytují při okraji tělíska (možný vliv řezání při přípravě tělíska; viz Obr. 529). Jsou zastoupeny především póry o velikosti v oblasti od cca 100 μm do 7 μm , dále jsou to velikosti pórů v oblasti od cca 0,07 μm do 0,01 μm (viz Obr. 510).



Obr. 529 Názorné CT řezy pro 1. hloubkovou úroveň - vrt BGS20/1-H, sumární ortogonální projekce CT řezů (nahore), samostatný CT řez (dole)

2. hloubková úroveň (pórovitost 0,35 %, úroveň ve vrtu 0,58 m)

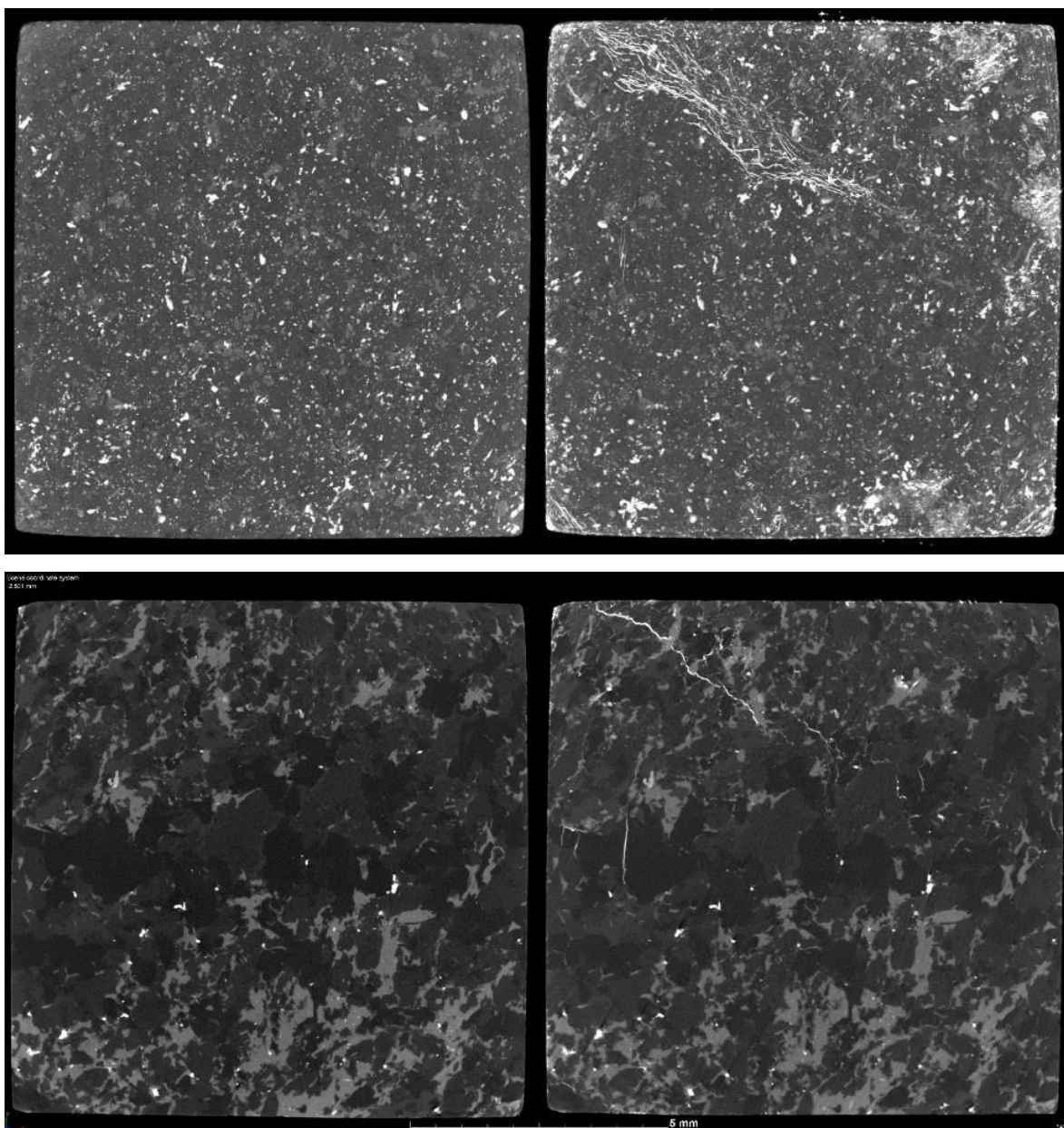
Ze srovnání CT řezů před a po MIP vyplývá, že rozdíly v obrazech CT řezů jsou velmi dobře rozpoznatelné, pórový prostor je formován sítí trhlinek různé mocnosti a orientace a to spíše lokálně v zrnech horniny zobrazovaných světlejší úrovní šedi. Dále pak v podobě trhlinek v zrnech horniny zobrazovaných tmavšími úrovněmi šedi, a to vyskytující se jak v mezizrnných prostorech, tak procházejících přes samotná zrna horniny. Z referenčního CT řezu nejsou viditelná porušení tělíska před realizovanou MIP (viz Obr. 530). Jsou zastoupeny především póry o velikosti v oblasti od cca 100 μm do 8 μm , dále jsou to velikosti pórů v oblasti od cca 0,009 μm do 0,008 μm (viz Obr. 510).



Obr. 530 Názorné CT řezy pro 2. hloubkovou úroveň - vrt BGS20/1-H, sumární ortogonální projekce CT řezů (nahore), samostatný CT řez (dole)

3. hloubková úroveň (pórovitost 0,44 %, úroveň ve vrtu 1,45 m)

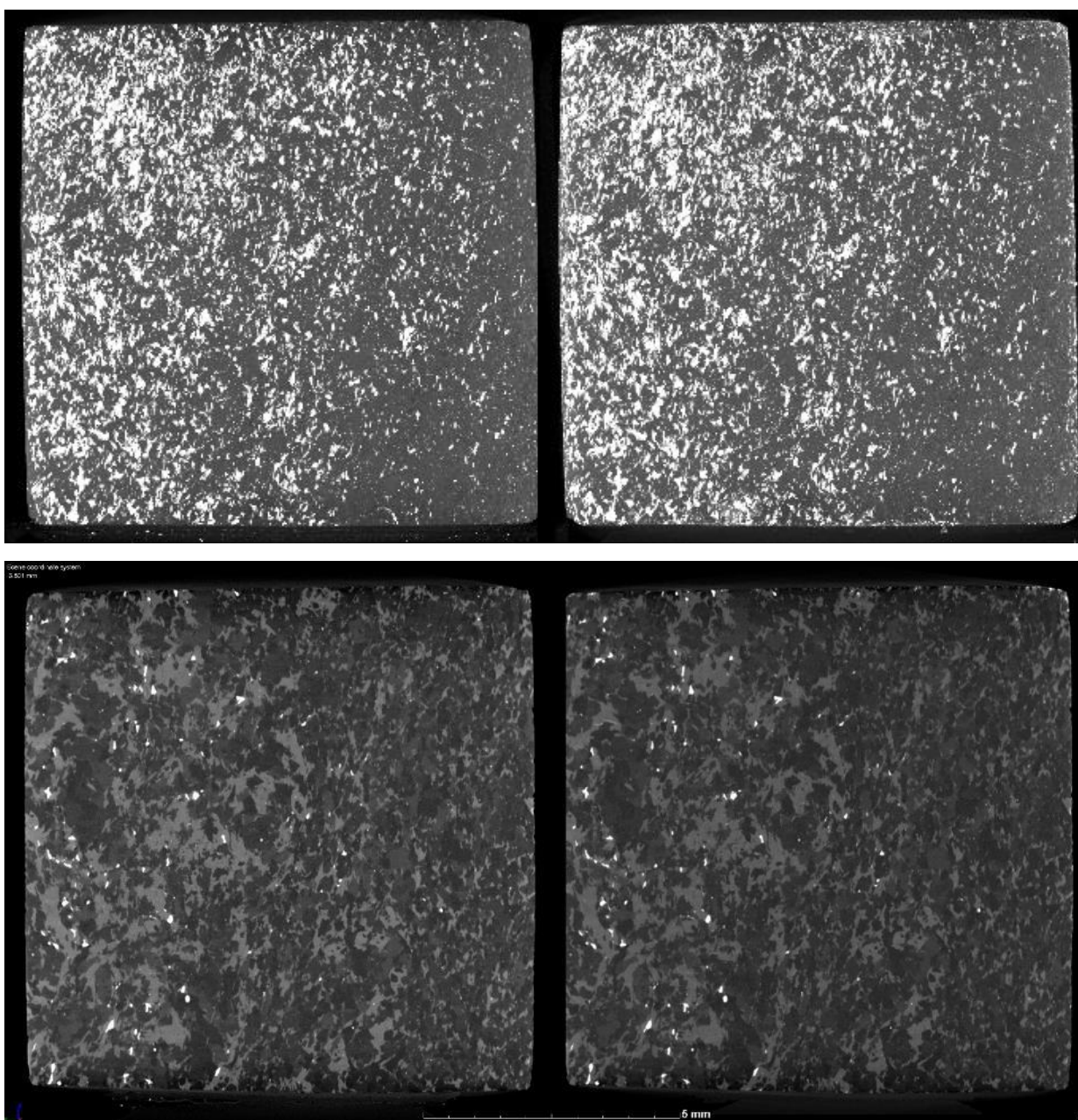
Ze srovnání CT řezů před a po MIP vyplývá, že rozdíly v obrazech CT řezů jsou velmi dobře rozpoznatelné, pórový prostor je formován výraznou lokální trhlinkou procházející napříč strukturou horniny. Dále jsou ve zkušební tělese viditelné sporadicky se vyskytující drobné trhlinky převážně na kontaktu zrn horniny. Z referenčního CT řezu nejsou viditelná výrazná porušení tělíska před realizovanou MIP (viz Obr. 531). Jsou zastoupeny především póry o velikosti v oblasti od cca 100 μm do 10 μm , dále jsou zastoupeny velikosti pórů v oblasti od cca 0,1 μm do 0,03 μm (viz Obr. 510).



Obr. 531 Názorné CT řezy pro 3. hloubkovou úroveň - vrt BGS20/1-H, sumární ortogonální projekce CT řezů (nahore), samostatný CT řez (dole)

4. hloubková úroveň (pórovitost 0,53 %, úroveň ve vrtu 2,00 m)

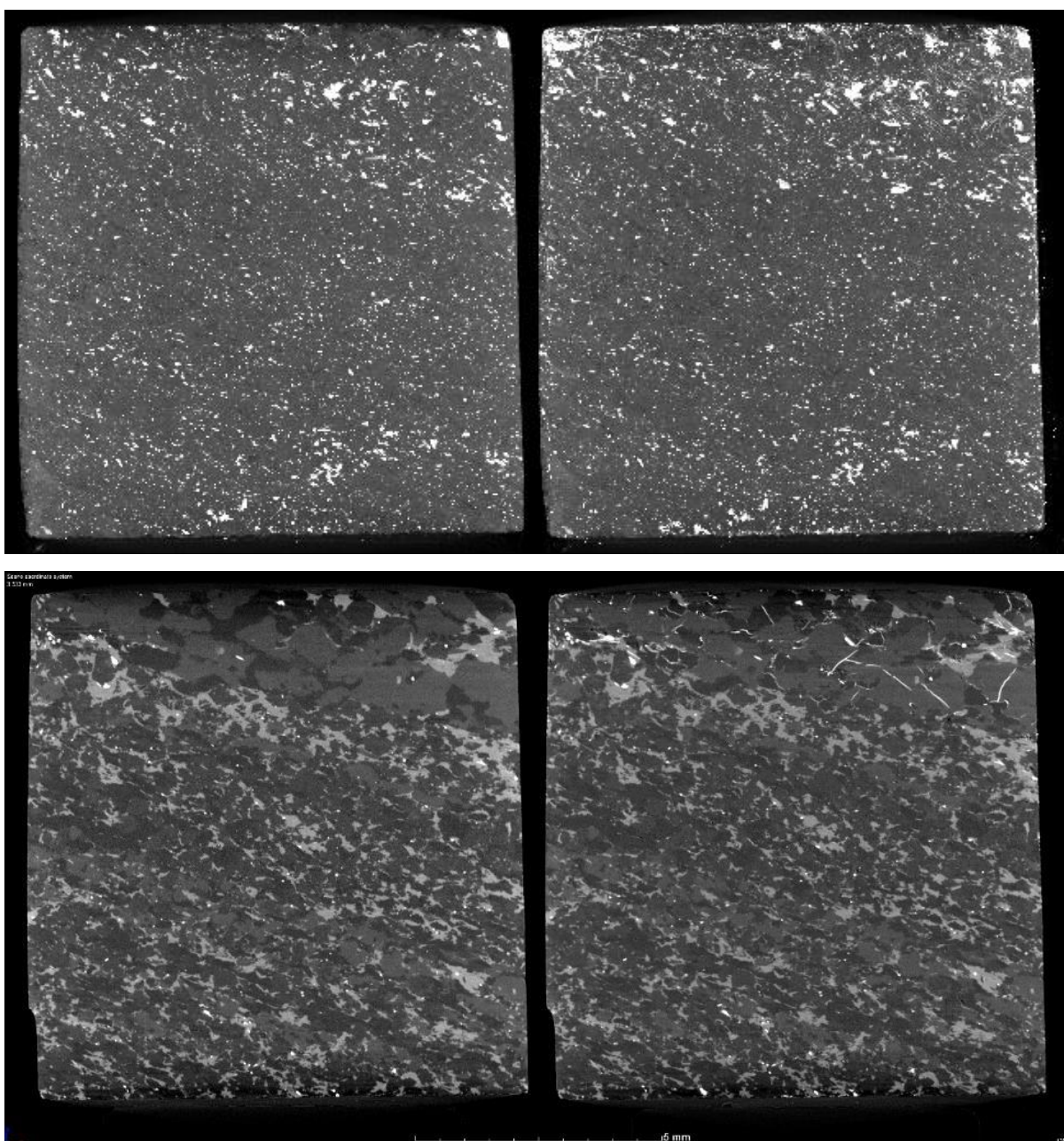
Ze srovnání CT řezů před a po MIP je zřejmé, že rozdíly v obrazech CT řezů nejsou zjevně rozeznatelné a nelze tedy celkově usuzovat na typ a distribuci pórů ve zkušebním tělísku. Drobné změny jsou viditelné u sumárních projekcí pouze na jeho okrajích, což mohou být trhlinky a póry vytvořené v procesu jejich řezání (viz Obr. 532). Jsou zastoupeny především póry o velikosti v oblasti od cca 100 μm do 8 μm , dále jsou to velikosti pórů v oblasti od cca 0,09 μm až do 0,03 μm a velikosti pórů na úrovni cca 0,01 μm (viz Obr. 510).



Obr. 532 Názorné CT řezy pro 4. hloubkovou úroveň - vrt BGS20/1-H, sumární ortogonální projekce CT řezů (nahore), samostatný CT řez (dole)

5. hloubková úroveň (pórovitost 0,33 %, úroveň ve vrtu 2,99 m)

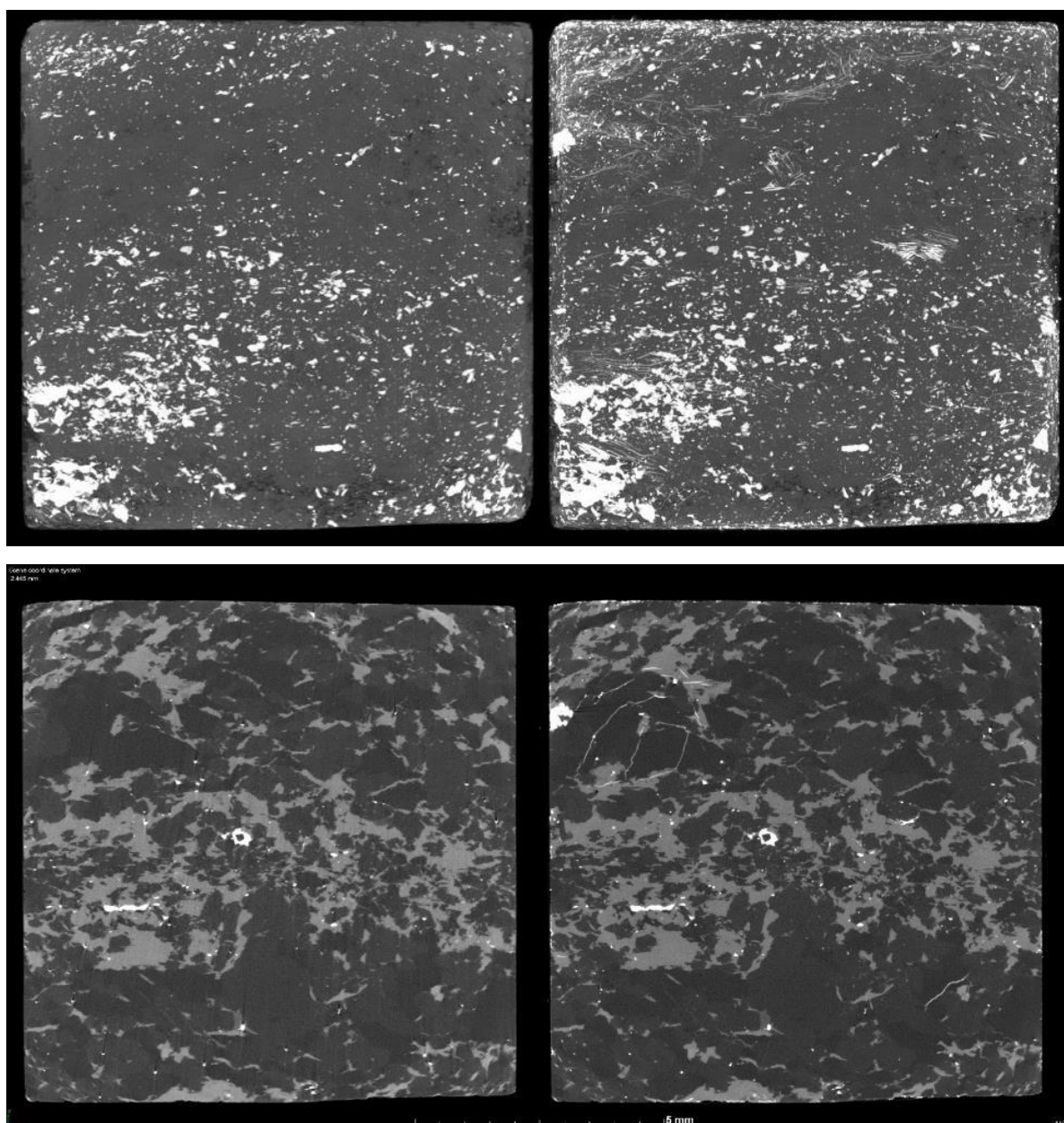
Ze srovnání CT řezů před a po MIP je zřejmé, že rozdíly v obrazech CT řezů nejsou na první pohled rozeznatelné vzhledem k nízké hodnotě pórovitosti, po detailním prohlédnutí CT řezů lze nalézt trhlinový pórový prostor (drobné trhlinky) pouze v okrajové části tělíska do hloubky cca 2 mm. Tyto trhlinky jsou vázány na zrna horniny zobrazovaných středními až tmavšími odstíny šedi (viz Obr. 533). Jsou zastoupeny především póry o velikosti v oblasti od cca 100 μm do 8 μm , dále pak velikosti pórů v oblasti od cca 0,009 μm do 0,008 μm (viz Obr. 510).



Obr. 533 Názorné CT řezy pro 5. hloubkovou úroveň - vrt BGS20/1-H, sumární ortogonální projekce CT řezů (nahore), samostatný CT řez (dole)

6. hloubková úroveň (pórovitost 0,80 %, úroveň ve vrtu 4,20 m)

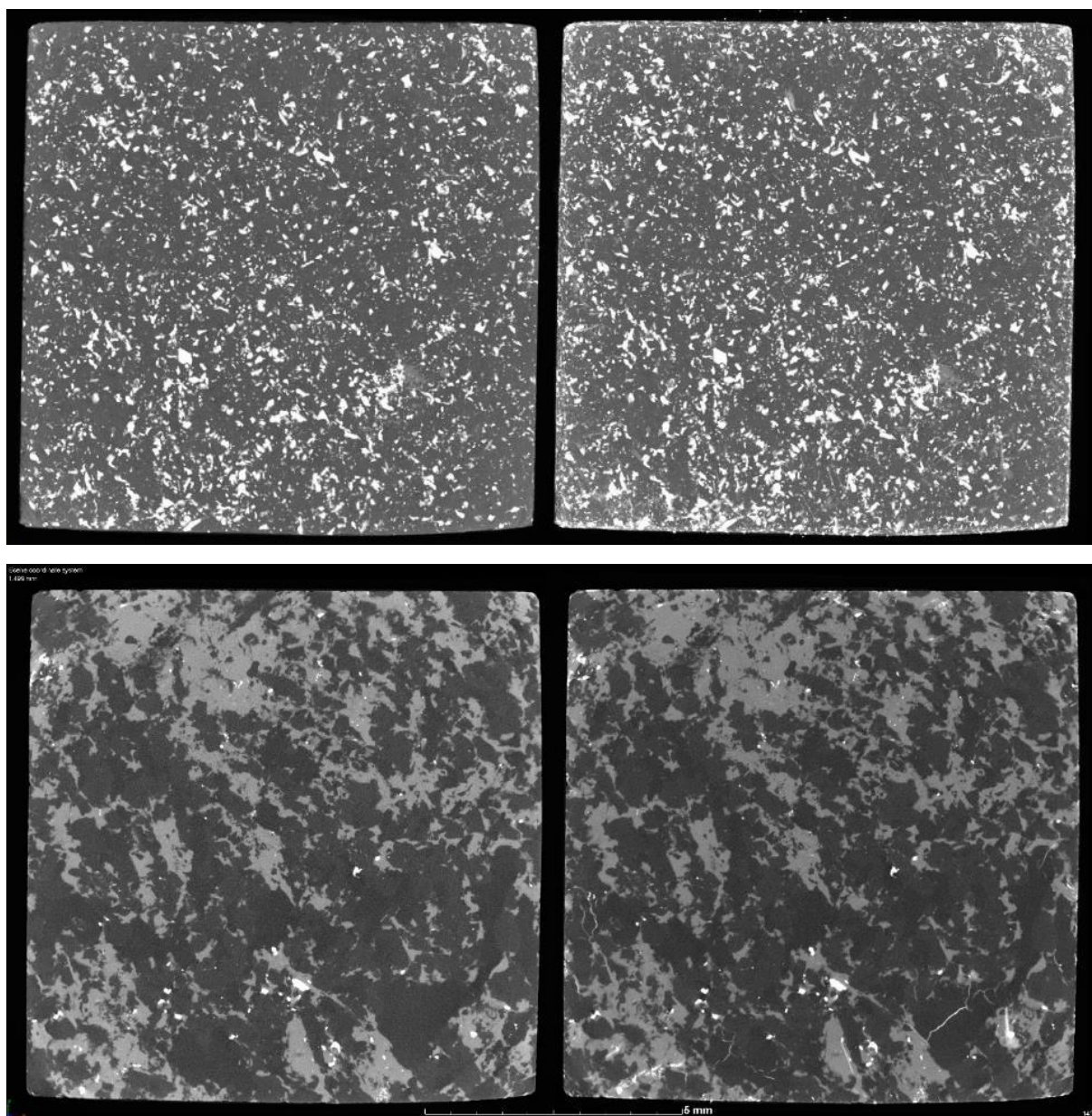
Ze srovnání CT řezů před a po MIP vyplývá, že rozdíly v obrazech CT řezů jsou na první pohled hůře rozpoznatelné i přes vyšší hodnotu pórovitosti. Pórový prostor je tvořen drobnými trhlinkami vyskytujícími se jak v zrnech horniny zobrazovaných světlejšími úrovněmi šedi, tak tmavšími, a to spíše jejich lokálním výskytem v objemu tělíska. Z referenčního CT řezu nejsou rozpoznatelná porušení před realizovanou MIP (viz Obr. 534). Jsou zastoupeny především póry o velikosti v oblasti od cca 100 μm do 12 μm , dále jsou to velikosti pórů na úrovni cca 7; 0,6 μm a dále 0,08 až do 0,01 μm (viz Obr. 510).



Obr. 534 Názorné CT řezy pro 6. hloubkovou úroveň - vrt BGS20/1-H, sumární ortogonální projekce CT řezů (nahore), samostatný CT řez (dole)

7. hloubková úroveň (pórovitost 0,81 %, úroveň ve vrtu 6,15 m)

Ze srovnání CT řezů před a po MIP vyplývá, že rozdíly v obrazech CT řezů jsou hůře na první pohled rozpoznatelné i přes vyšší hodnotu pórovitostí. Pórový prostor je tvořen drobnými trhlínkami vyskytujícími se jak v zrnech horniny zobrazovaných světlejšími úrovněmi šedi, tak tmavšími, a to spíše jejich lokálním ojedinělým výskytem v objemu analyzovaného tělíška. Z referenčního CT řezu nejsou rozpoznatelná porušení před realizovanou MIP (viz Obr. 535). Jsou zastoupeny především póry o velikosti v oblasti od cca 100 μm do 7 μm , dále jsou to velikosti pórů na úrovni cca 3; 0,9 μm (viz Obr. 510).

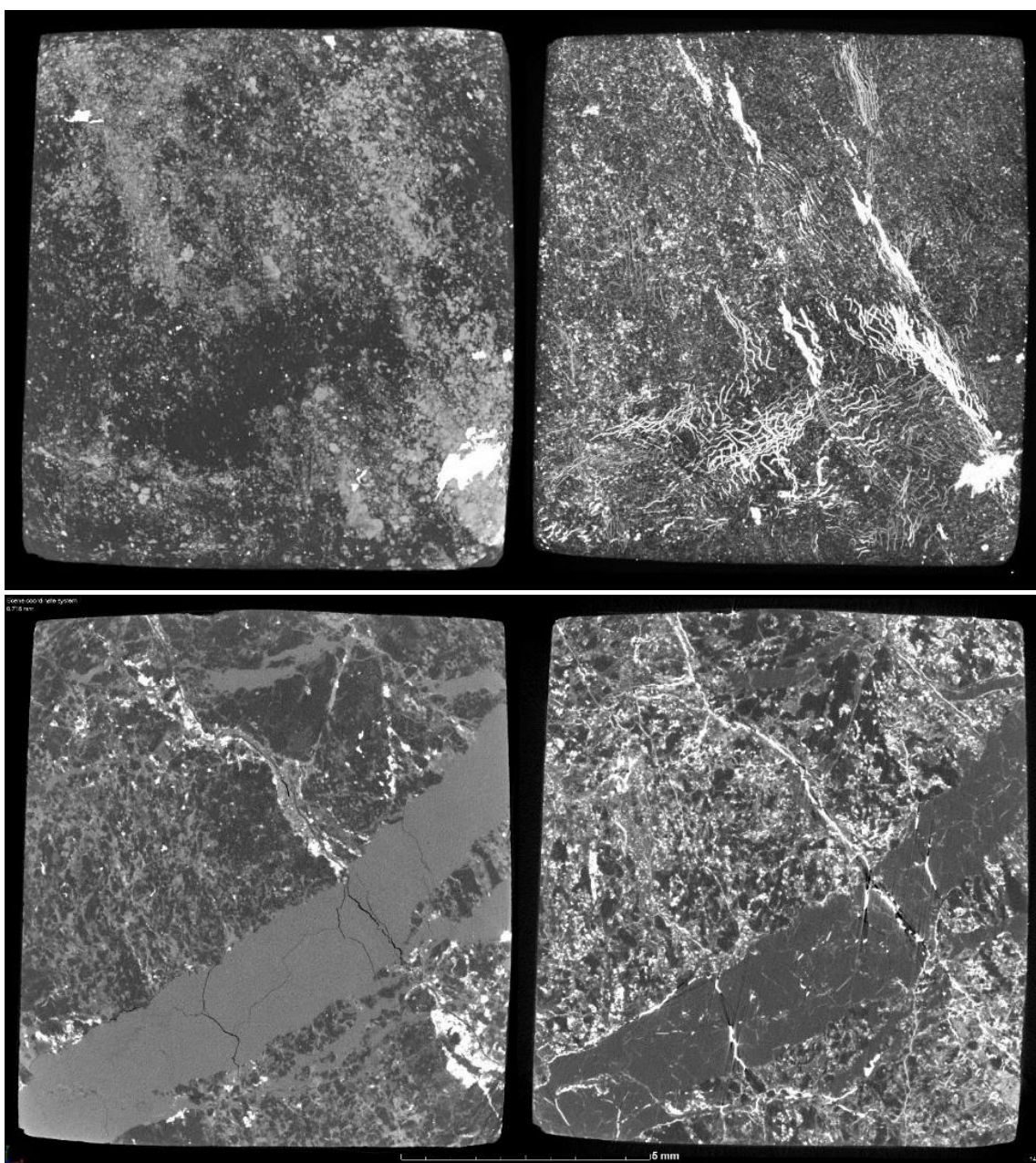


Obr. 535 Názorné CT řezy pro 7. hloubkovou úroveň - vrt BGS20/1-H, sumární ortogonální projekce CT řezů (nahore), samostatný CT řez (dole)

Popisy pórového prostoru pro analyzovaná tělíska z 20. patra z vrtu EDZ20-HA jsou následující (interní číslo ÚGN zkušebních tělísek 16501):

1. hloubková úroveň (pórovitost 1,67 %, úroveň ve vrtu 0,30 m)

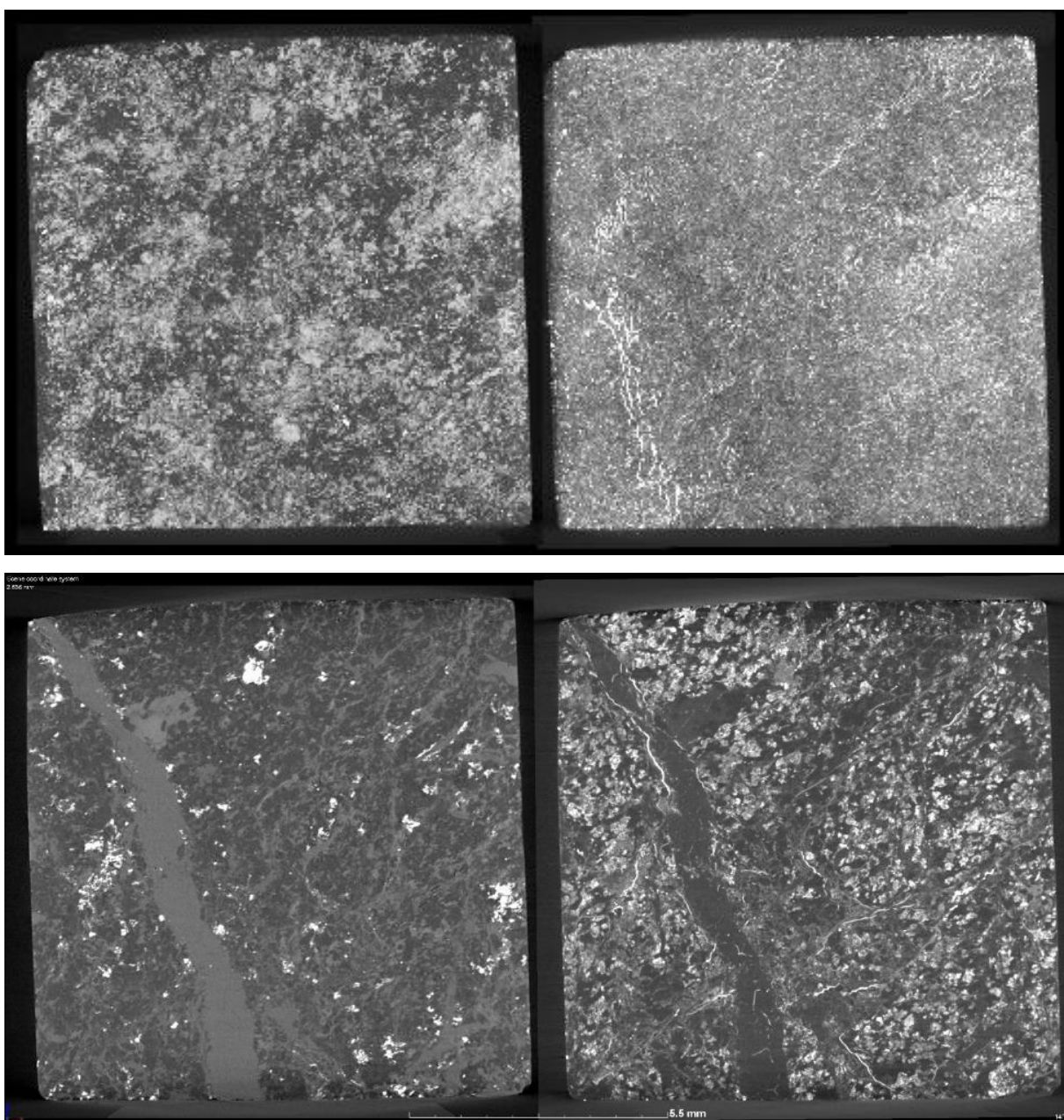
Ze srovnání CT řezů před a po MIP vyplývá, že rozdíly v obrazech CT řezů jsou velmi výrazně rozpoznatelné vzhledem k vysoké hodnotě pórovitosti, pórový prostor je formován sítí trhlinek různé mocnosti a orientace v celém objemu tělíska. Z referenčního CT řezu je viditelné značné porušení tělíska před MIP, které sehrálo významnou úlohu při proudění rtuti v tělisku. Rovněž je zřejmá komplikovanější struktura tělíska než je tomu u tělísek z předešlých vrtů (viz Obr. 536). Jsou zastoupeny především póry o velikosti v oblasti od cca 100 μm do 80 μm , dále jsou to velikosti pórů na úrovni cca 0,7 μm a v oblasti od cca 0,2 μm do 0,03 μm (viz Obr. 512).



Obr. 536 Názorné CT řezy pro 1. hloubkovou úroveň - vrt EDZ20-HA, sumární ortogonální projekce CT řezů (nahore), samostatný CT řez (dole)

2. hloubková úroveň (pórovitost 2,08 %, úroveň ve vrtu 0,70 m)

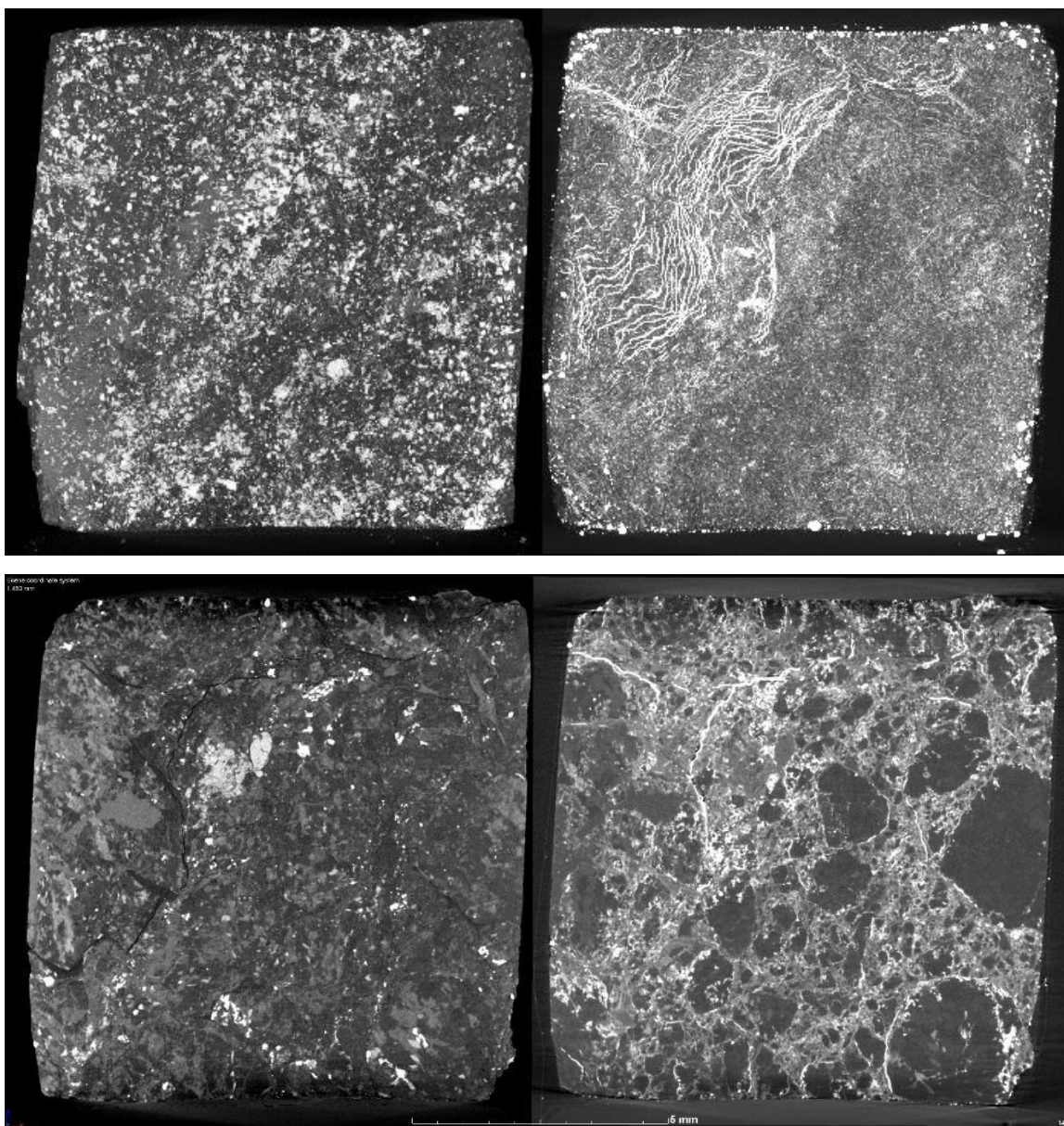
Ze srovnání CT řezů před a po MIP vyplývá, že rozdíly v obrazech CT řezů jsou velmi výrazně rozpoznatelné vzhledem k vysoké hodnotě pórovitosti. Pórový prostor je formován sítí trhlinek různé mocnosti a orientace v celém objemu tělíska. Kromě trhlinek je pórový prostor asociován na zrna, popř. jejich kontakty, zobrazovaných tmavší úrovní šedi (viz referenční CT řez). Z referenčního CT řezu jsou viditelná porušení tělíska před realizovanou MIP, která sehrála významnou úlohu při proudění rtuti v tělísku. Rovněž je zřejmá komplikovanější struktura tělíska než je tomu u tělísek z předešlých vrtů (viz Obr. 537). Jsou zastoupeny především póry o velikosti v oblasti od cca 100 μm do 80 μm , dále v oblasti od cca 1 μm do 0,03 μm (viz Obr. 512).



Obr. 537 Názorné CT řezy pro 2. hloubkovou úroveň - vrt EDZ20-HA, sumární ortogonální projekce CT řezů (nahore), samostatný CT řez (dole)

3. hloubková úroveň (pórovitost 2,95 %, úroveň ve vrtu 1,25 m)

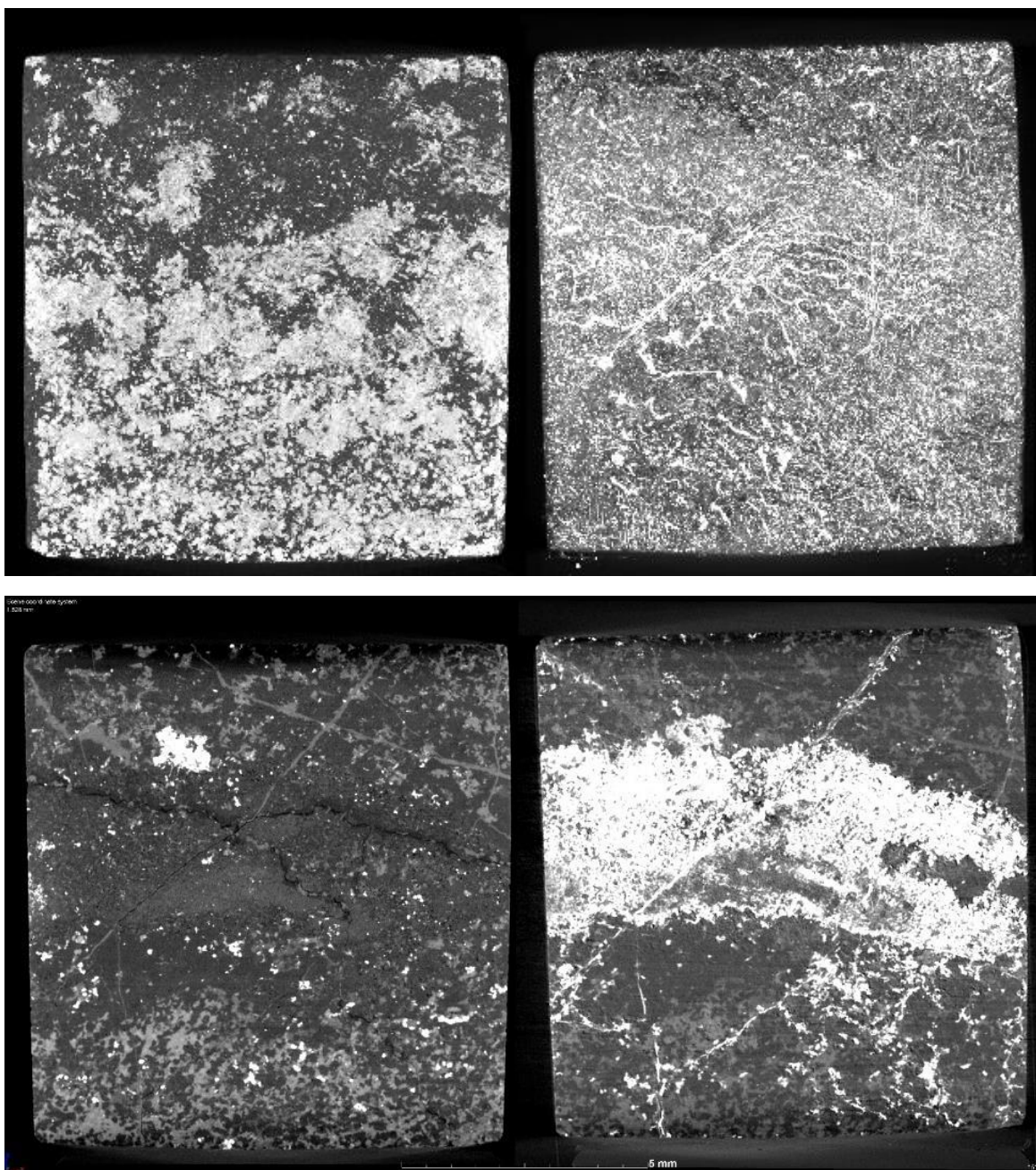
Ze srovnání CT řezů před a po MIP vyplývá, že rozdíly v obrazech v CT řezů jsou velmi dobře rozpoznatelné vzhledem k vysoké hodnotě pórovitosti. Pórový prostor je formován nejen sítí trhlinek různé mocnosti a orientace v celém objemu tělíska, ale kromě trhlinek je pórový prostor asociován na zrna, popř. jejich kontakty. Z referenčního CT řezu jsou viditelná i výrazná porušení tělíska před realizovanou MIP, která sehrála významnou úlohu při proudění rtuti v tělísku. Rovněž je zřejmá komplikovanější struktura tělíska, než je tomu u tělísek z předešlých vrtů. V hornině jsou viditelné kompaktní nepropustné polohy bez zjevné přítomnosti rtuti (viz Obr. 538). Jsou zastoupeny především póry o velikosti v oblasti od cca 100 μm do 80 μm , dále víceméně velikosti pórů v oblasti od cca 9 μm až do 0,008 μm (viz Obr. 512).



Obr. 538 Názorné CT řezy pro 3. hloubkovou úroveň - vrt EDZ20-HA, sumární ortogonální projekce CT řezů (nahore), samostatný CT řez (dole)

4. hloubková úroveň (pórovitost 2,56 %, úroveň ve vrtu 1,81 m)

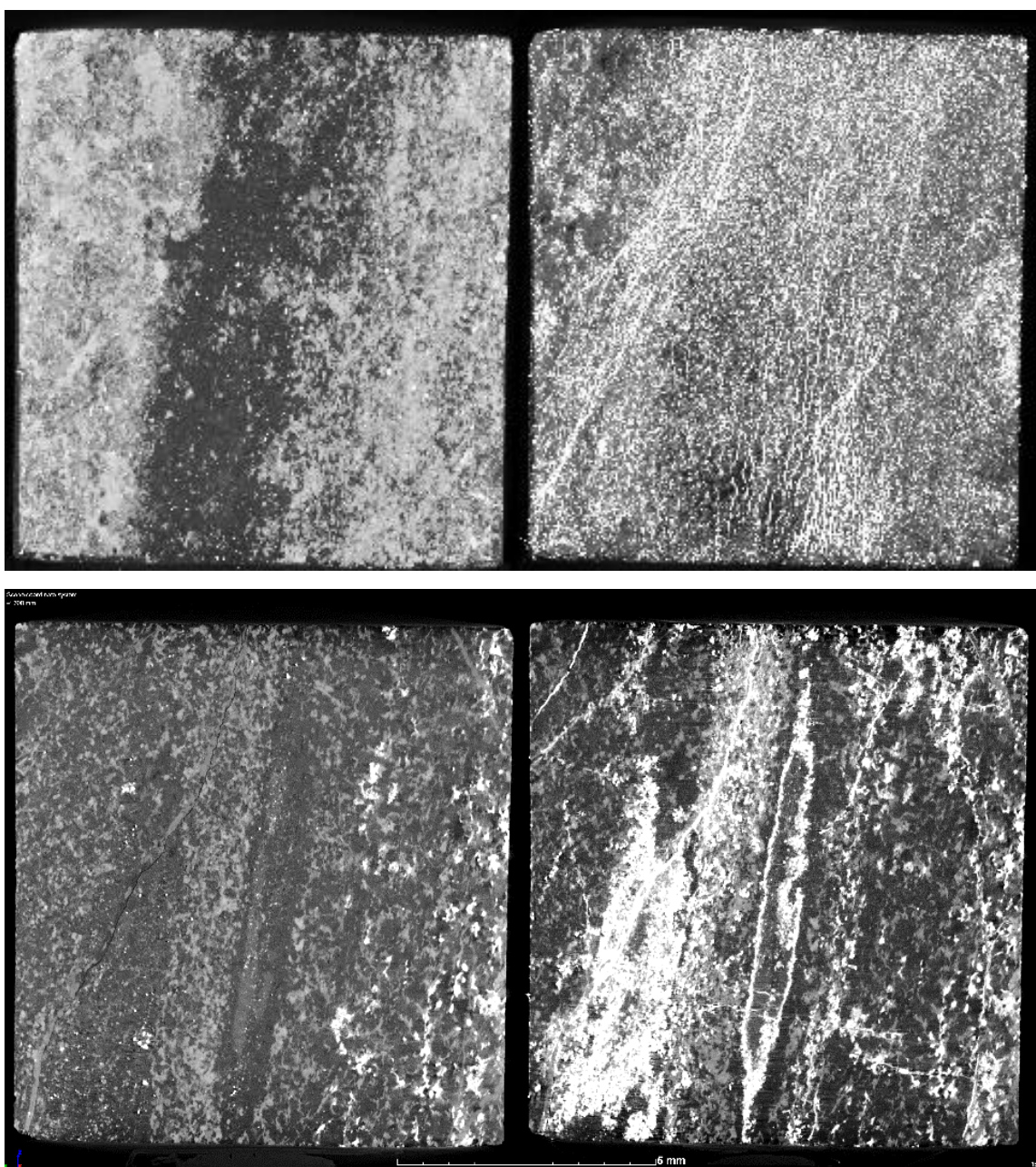
Ze srovnání CT řezů před a po MIP vyplývá, že rozdíly v obrazech CT řezů jsou velmi výrazně rozpoznatelné vzhledem k vysoké hodnotě pórovitosti. Pórový prostor je formován nejen sítí trhlinek různé mocnosti a orientace v celém objemu tělíska, ale je rozprostřen i v blízkém okolí otevřených trhlinek, zřejmých z referenčního CT řezu. Rovněž je zřejmá komplikovanější struktura tělíska než je tomu u tělísek z předešlých vrtů (viz Obr. 539). Jsou zastoupeny především póry o velikosti v oblasti od cca 100 μm do 80 μm , dále velikosti pórů v oblasti od cca 0,1 μm až do 0,009 μm (viz Obr. 512).



Obr. 539 Názorné CT řezy pro 4. hloubkovou úroveň - vrt EDZ20-HA, sumární ortogonální projekce CT řezů (nahore), samostatný CT řez (dole)

5. hloubková úroveň (pórovitost 1,14 %, úroveň ve vrtu 3,00 m)

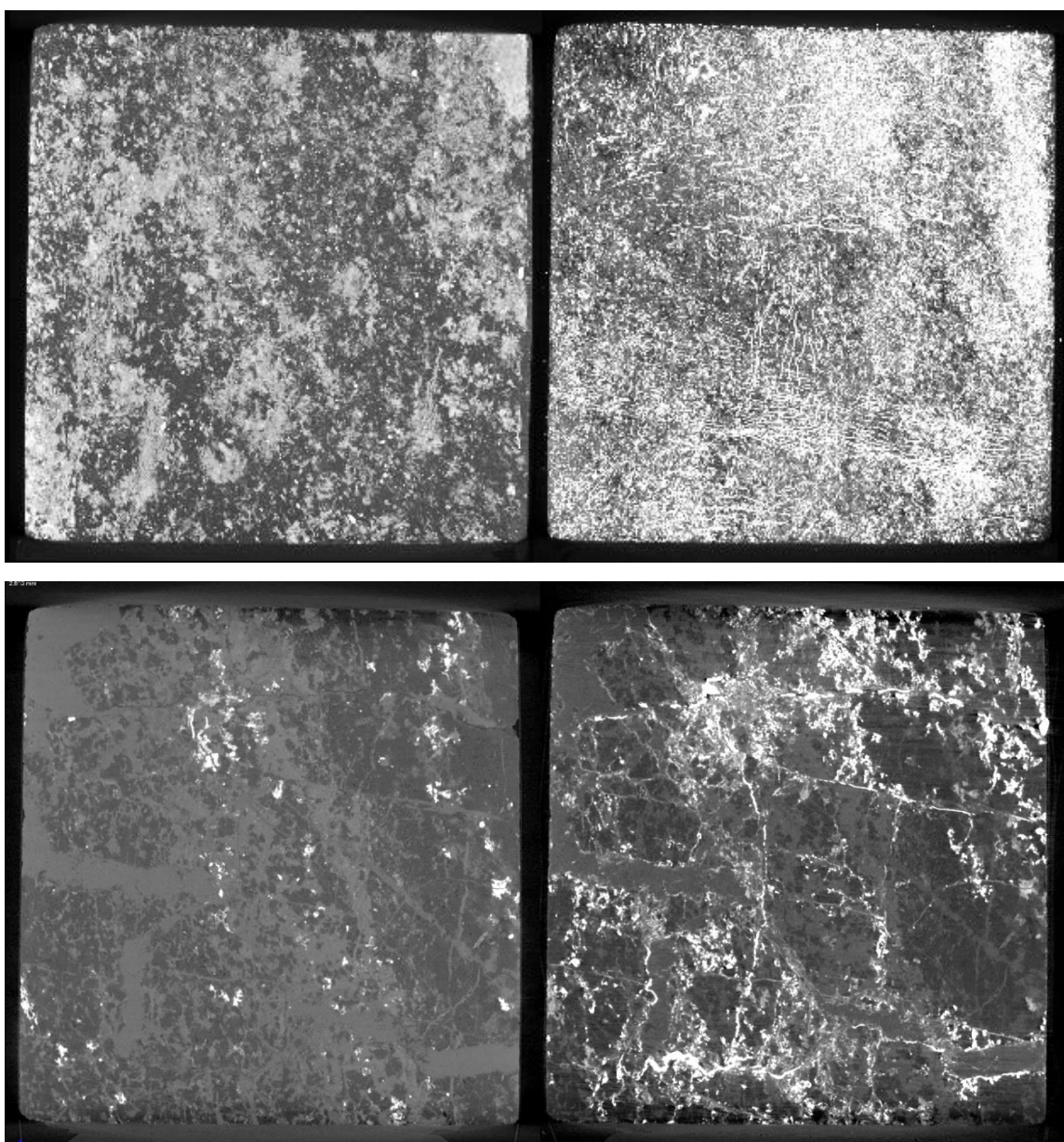
Ze srovnání CT řezů před a po MIP vyplývá, že rozdíly v obrazech CT řezů jsou velmi dobře rozpoznatelné vzhledem k vysoké hodnotě pórovitosti. Pórový prostor je formován nejen sítí trhlinek různé mocnosti s orientací převážně ve směru foliační stavby horniny, ale i lokálními (bodovými) výskyty rtuti v hornině reprezentující póry, tak jako u předešlých tělísek v tomto vrtu. Z referenčního CT řezu jsou viditelná porušení tělíska před realizovanou MIP, která sehrála významnou úlohu při proudění rtuti v tělísku (viz Obr. 540). Jsou zastoupeny především póry o velikosti v oblasti od cca 100 μm do 80 μm , dále pak velikosti pórů v oblasti od cca 0,2 μm až do 0,008 μm (viz Obr. 512).



Obr. 540 Názorné CT řezy pro 5. hloubkovou úroveň - vrt EDZ20-HA, sumární ortogonální projekce CT řezů (nahore), samostatný CT řez (dole)

6. hloubková úroveň (pórovitost 2,03 %, úroveň ve vrtu 4,19 m)

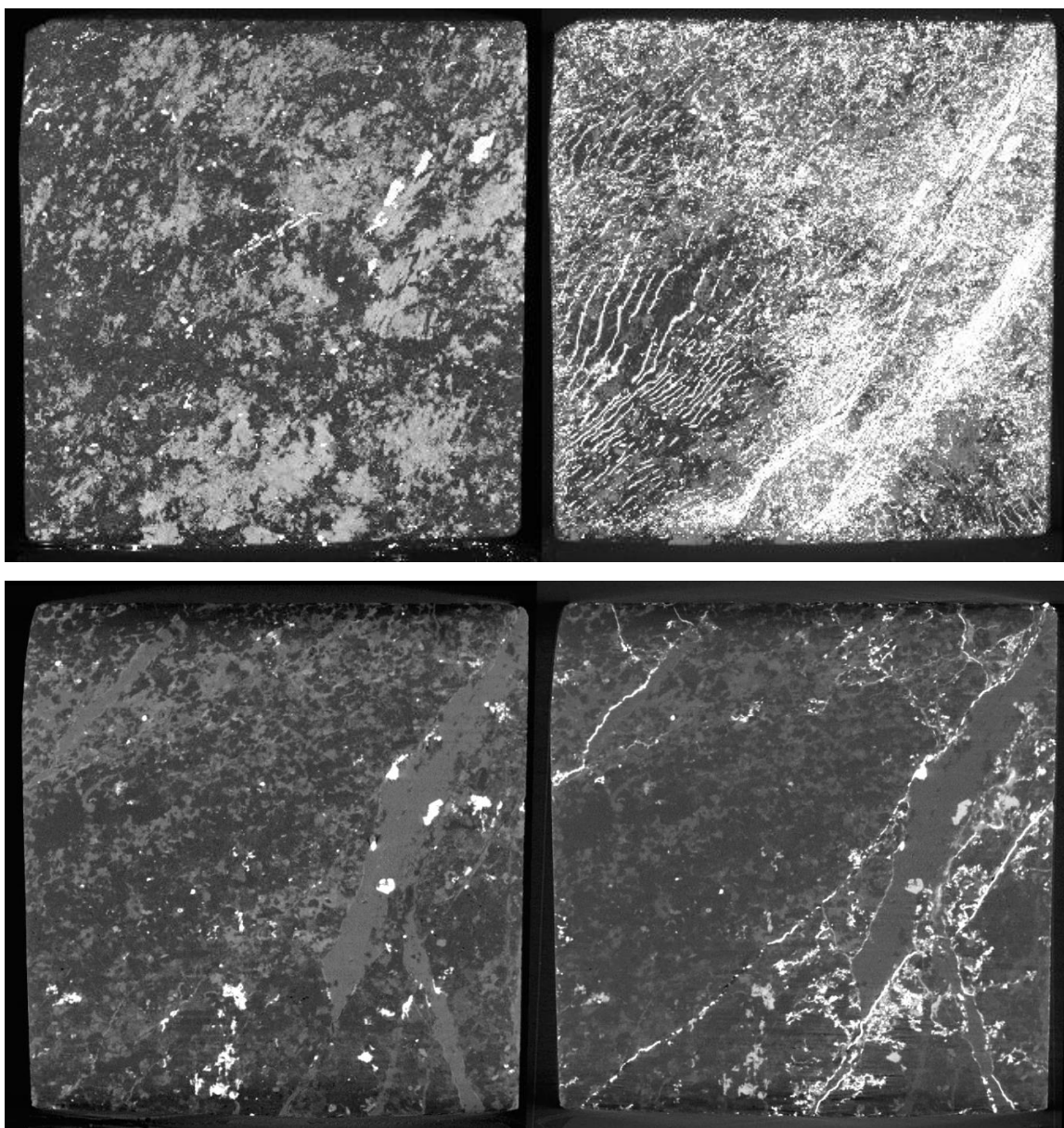
Ze srovnání CT řezů před a po MIP vyplývá, že rozdíly v obrazech CT řezů jsou zřetelně rozpoznatelné vzhledem k vysoké hodnotě pórovitosti. Pórový prostor je formován nejen sítí trhlinek různé mocnosti s orientací převážně ve směru foliační stavby a struktury horniny, ale i lokálními (bodovými) výskyty rtuti v hornině reprezentující póry, tak jako u předešlých tělísek u tohoto vrtu. Z referenčního CT řezu jsou rozpoznatelná porušení, i když ne tak výrazná, jako u předešlých zkušebních tělísek z tohoto vrtu, před realizovanou MIP (viz Obr. 541). Jsou zastoupeny především póry o velikosti v oblasti od cca 100 μm do 80 μm , dále velikosti pórů v oblasti od cca 0,1 μm až do 0,009 μm (viz Obr. 512).



Obr. 541 Názorné CT řezy pro 6. hloubkovou úroveň - vrt EDZ20-HA, sumární ortogonální projekce CT řezů (nahore), samostatný CT řez (dole)

7. hloubková úroveň (pórovitost 0,79 %, úroveň ve vrtu 6,33 m)

Ze srovnání CT řezů před a po MIP vyplývá, že rozdíly v obrazech CT řezů jsou dobře rozpoznatelné vzhledem k relativně vyšší hodnotě pórovitosti. Pórový prostor je formován nejen sítí trhlinek různé mocnosti s orientací převážně ve směru foliační stavby a struktury horniny, ale i lokálními (bodovými) výskyty rtuti v hornině reprezentující póry, tak jako u předešlých tělísek u tohoto vrtu. Z referenčního CT řezu jsou rozpoznatelná porušení, i když ne tak výrazná jako u předešlých zkušebních tělísek z tohoto vrtu, před realizovanou MIP (viz Obr. 542). Trhlinky nejsou distribuovány v celém objemu testovaného tělíska, ale pouze v jeho cca jedné polovině. Jsou zastoupeny především póry o velikosti v oblasti od cca 100 μm do 70 μm , dále jsou to velikosti pórů na úrovni cca 4 μm a v oblasti od cca 0,1 μm do 0,009 μm (viz Obr. 512).

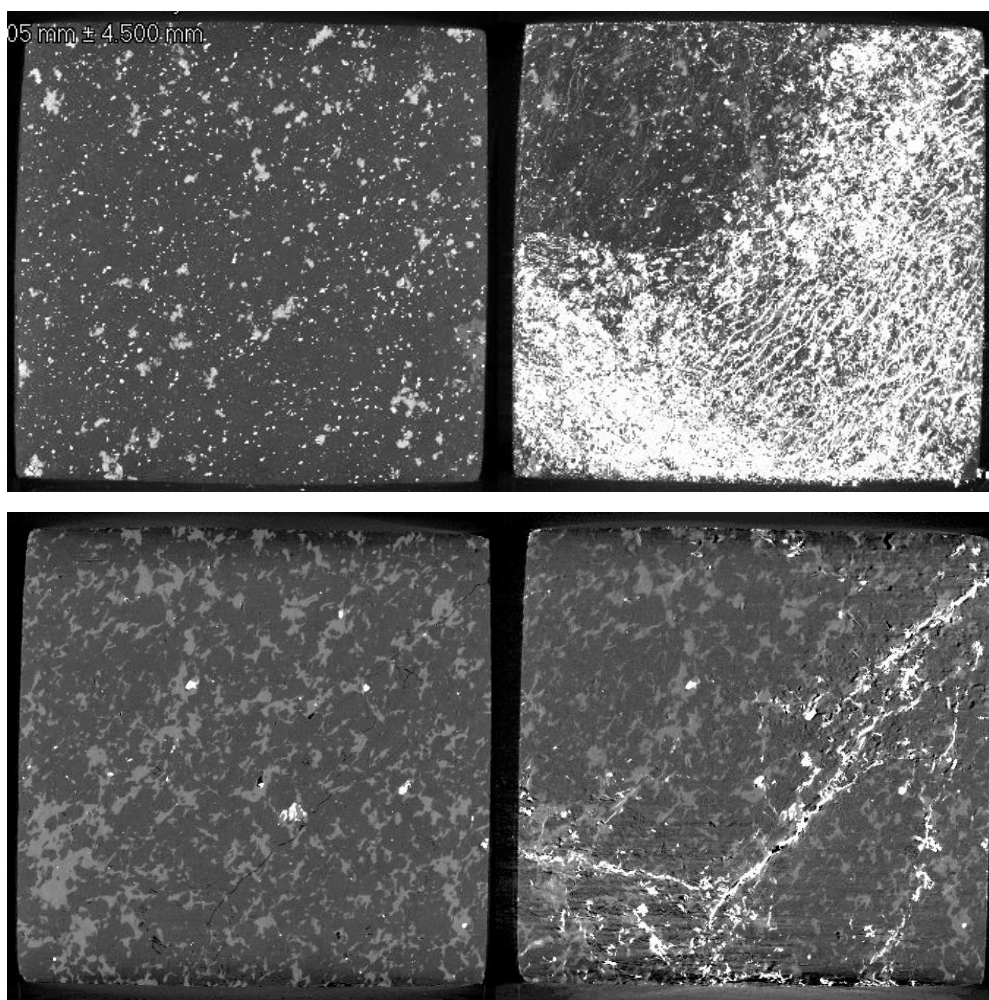


Obr. 542 Názorné CT řezy pro 7. hloubkovou úroveň - vrt EDZ20-HA, sumární ortogonální projekce CT řezů (nahore), samostatný CT řez (dole)

Popisy pórového prostoru pro analyzovaná tělíska z 20. patra z vrtu EDZ20-HC jsou následující (interní číslo ÚGN zkušebních tělísek 16405):

1. hloubková úroveň (pórovitost 1,51 %, úroveň ve vrtu 0,25 m)

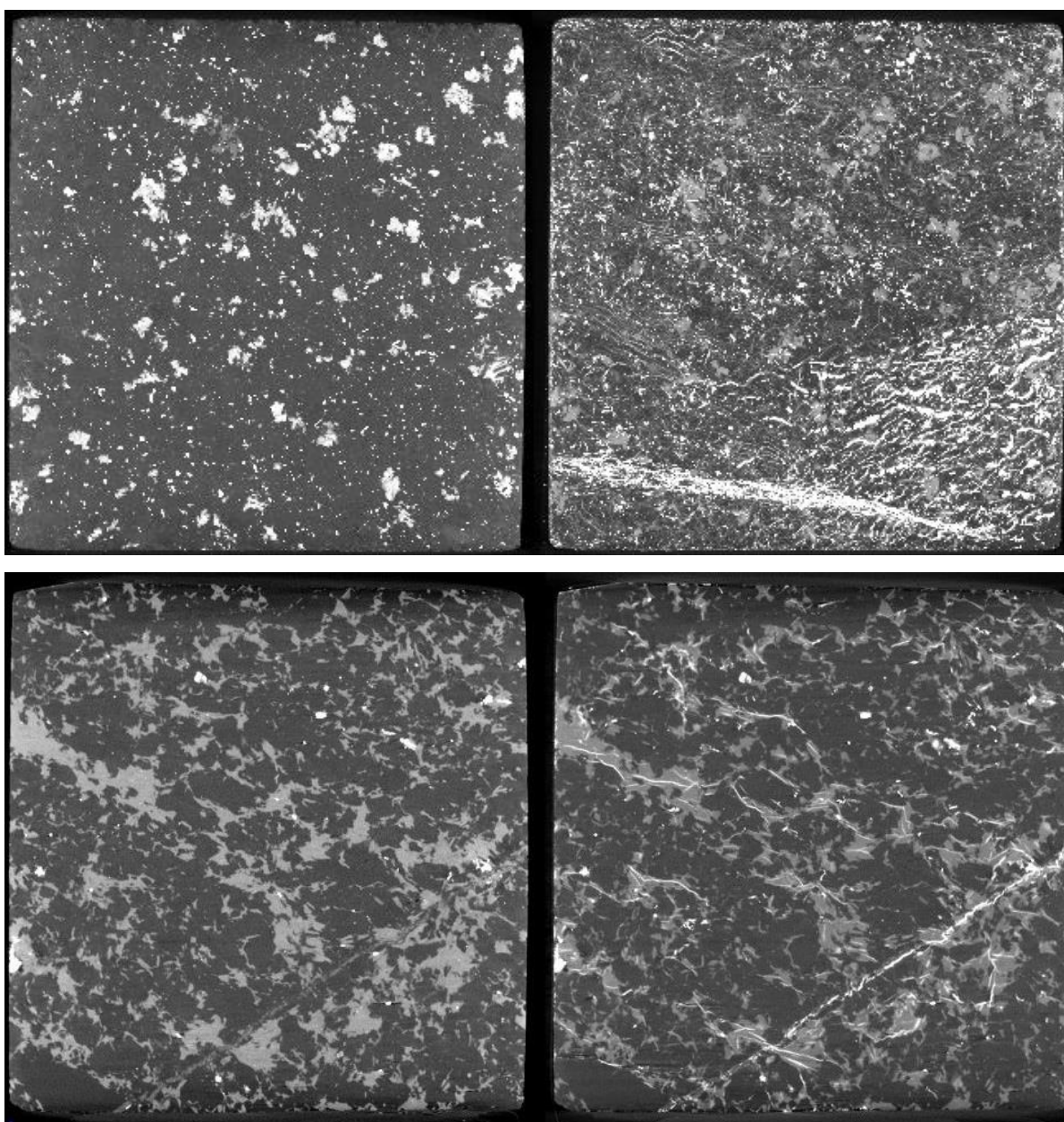
Ze srovnání CT řezů před a po MIP vyplývá, že rozdíly v obrazech CT řezů jsou dobře rozpoznatelné vzhledem k vysoké hodnotě pórovitosti. Pórový prostor je formován sítí trhlinek různé mocnosti a obdobné orientace v téměř celém objemu tělíska. Síť trhlinek je navázána především na zrna horniny zobrazované světlejší úrovní šedi, sledující ve velké míře foliaci popřípadě strukturu horniny. Pórový prostor je viditelný i na referenčních 2D CT řezech zobrazujících se jako jednotlivé, tmavé lokální (bodové) útvary, které jsou komunikativní s celkovým pórovým prostorem v tělísku. O tomto vypovídá přítomnost rtuti v místě jejich výskytu. Z referenčního CT řezu jsou viditelná porušení (otevřené trhlinky) tělíska před realizovanou MIP, které sehrálo významnou úlohu při proudění rtuti v tělísku (viz Obr. 543). Jsou zastoupeny především póry o velikosti v oblasti od cca 100 μm do 80 μm , dále jsou to velikosti pórů na úrovni cca 0,7; 1,0; 0,2; 0,09; 0,06; 0,03; 0,02 μm (viz Obr. 513).



Obr. 543 Názorné CT řezy pro 1. hloubkovou úroveň - vrt EDZ20-HC, sumární ortogonální projekce CT řezů (nahore), samostatný CT řez (dole)

2. hloubková úroveň (pórovitost 3,38 %, úroveň ve vrtu 0,75 m)

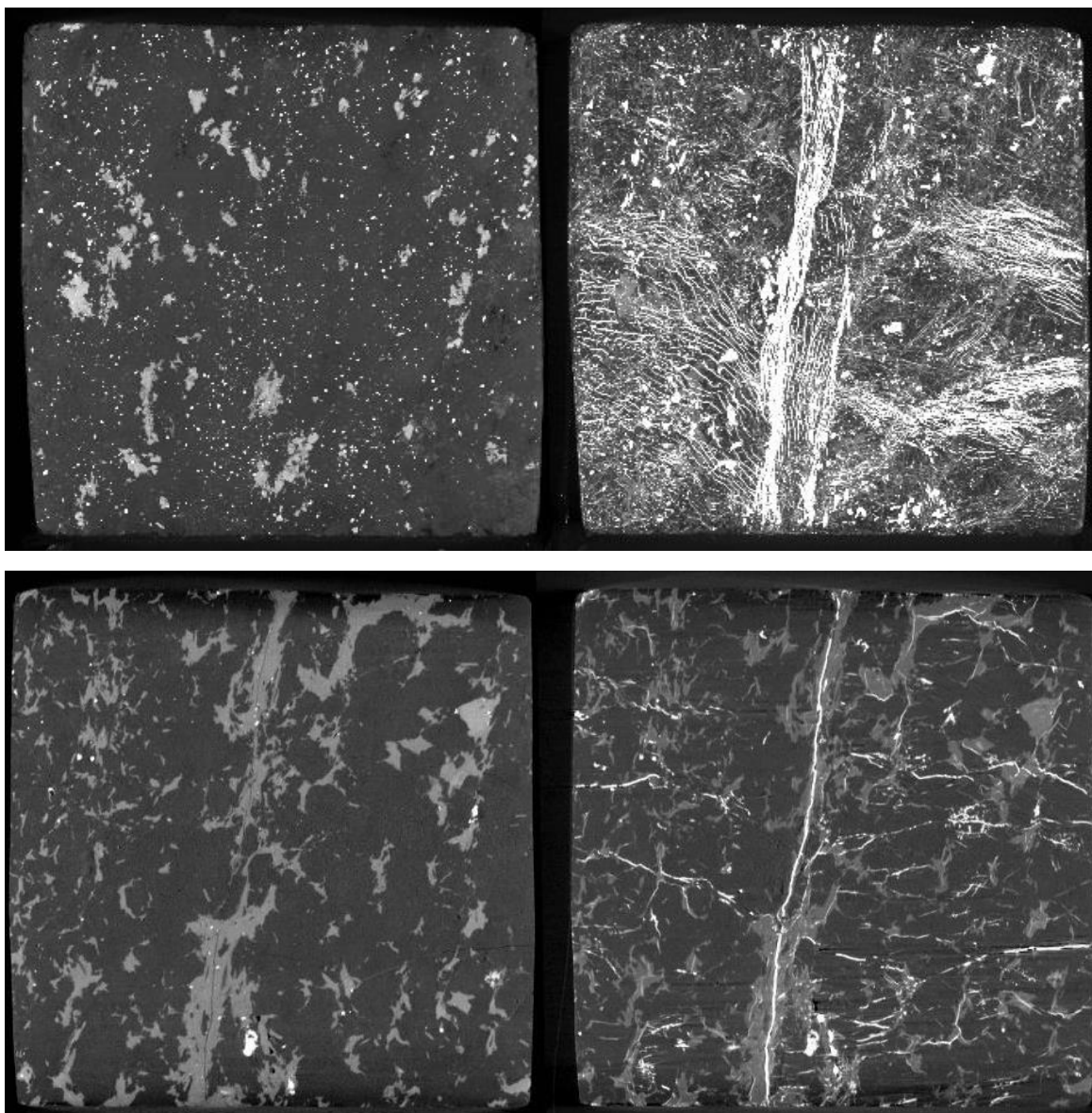
Ze srovnání CT řezů před a po MIP vyplývá, že rozdíly v obrazech CT řezů jsou dobře rozpoznatelné vzhledem k vysoké hodnotě pórovitosti. Pórový prostor je formován sítí trhlinek různé mocnosti a různé orientace sledující strukturu horniny. Síť trhlinek je navázána především na zrna horniny zobrazované světlejší úrovní šedi, sledující ve velké míře foliaci, popřípadě strukturu horniny. Z referenčního CT řezu jsou viditelná porušení (otevřené trhlinky) tělíska před realizovanou MIP, které sehrálo významnou úlohu při proudění rtuti v tělísku (viz Obr. 544). Jsou zastoupeny především póry o velikosti v oblasti od cca 100 μm do 80 μm , dále jsou to velikosti pórů na úrovni cca 0,7; 0,3; 0,09; 0,04; μm (viz Obr. 513).



Obr. 544 Názorné CT řezy pro 2. hloubkovou úroveň - vrt EDZ20-HC, sumární ortogonální projekce CT řezů (nahore), samostatný CT řez (dole)

3. hloubková úroveň (pórovitost 0,74 %, úroveň ve vrtu 1,18 m)

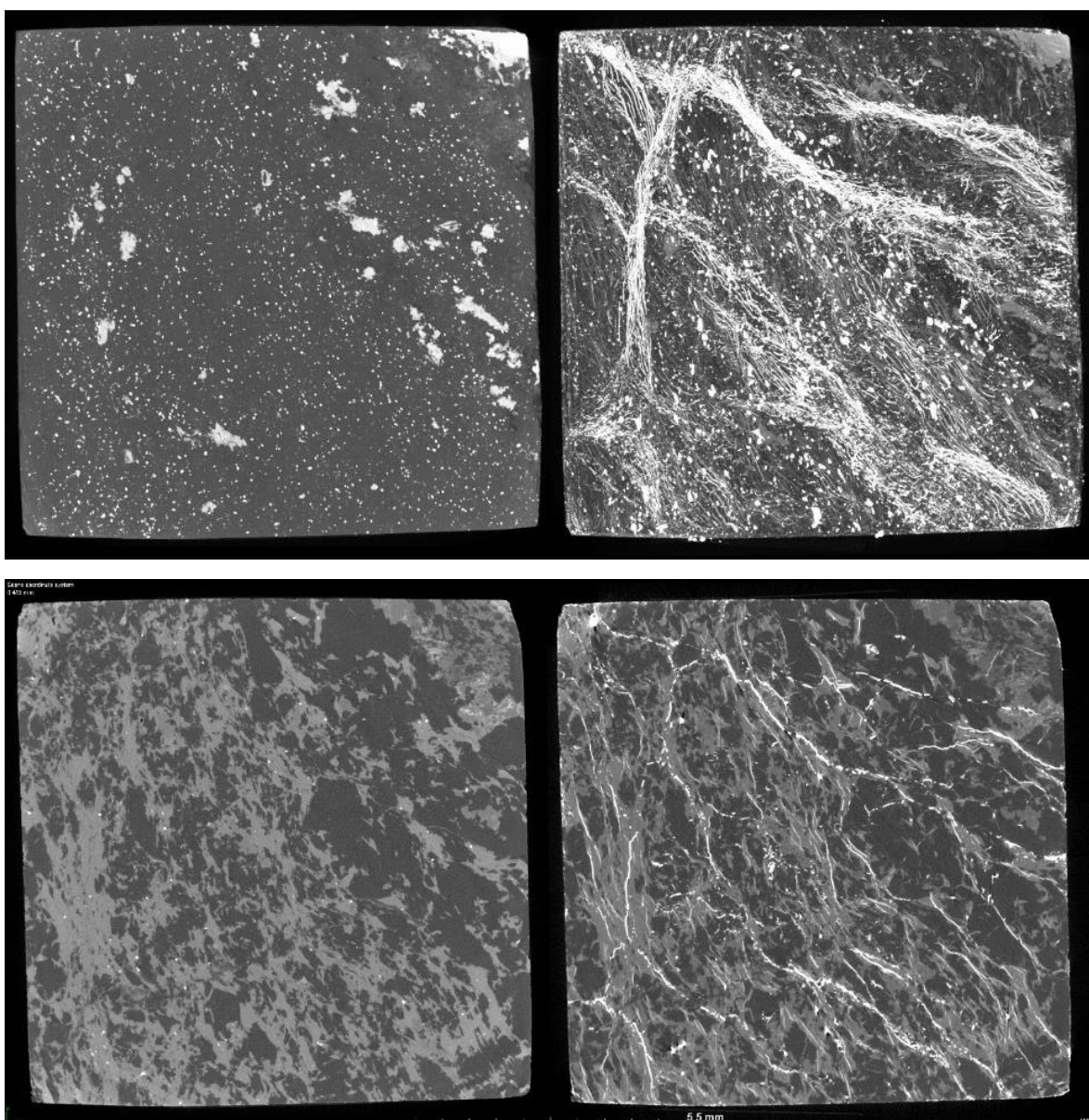
Ze srovnání CT řezů před a po MIP vyplývá, že rozdíly v obrazech CT řezů jsou velmi dobře rozpoznatelné vzhledem k vyšší hodnotě pórovitosti. Pórový prostor je formován sítí trhlinek různé mocnosti a orientace sledující strukturu horniny. Tato síť trhlinek je navázána především na zrna horniny zobrazované světlejší úrovní šedi, sledující ve velké míře foliaci, popřípadě strukturu horniny. Druhý systém trhlinek je orientován víceméně příčně k systému prvnímu a je asociován do oblasti zrn zobrazovaných tmavšími odstíny šedi. Z referenčního CT řezu jsou viditelná porušení (otevřené trhlinky) tělíska před realizovanou MIP, které sehrálo významnou úlohu při proudění rtuti v tělísku (viz Obr. 545). Jsou zastoupeny především póry o velikosti v oblasti od cca 100 μm do 80 μm , dále jsou to velikosti pórů v oblasti od cca 10 μm do 0,008 μm s absencí póru na úrovni 2 až 3 μm (viz Obr. 513).



Obr. 545 Názorné CT řezy pro 3. hloubkovou úroveň - vrt EDZ20-HC, sumární ortogonální projekce CT řezů (nahore), samostatný CT řez (dole)

4. hloubková úroveň (pórovitost 0,69 %, úroveň ve vrtu 1,78 m)

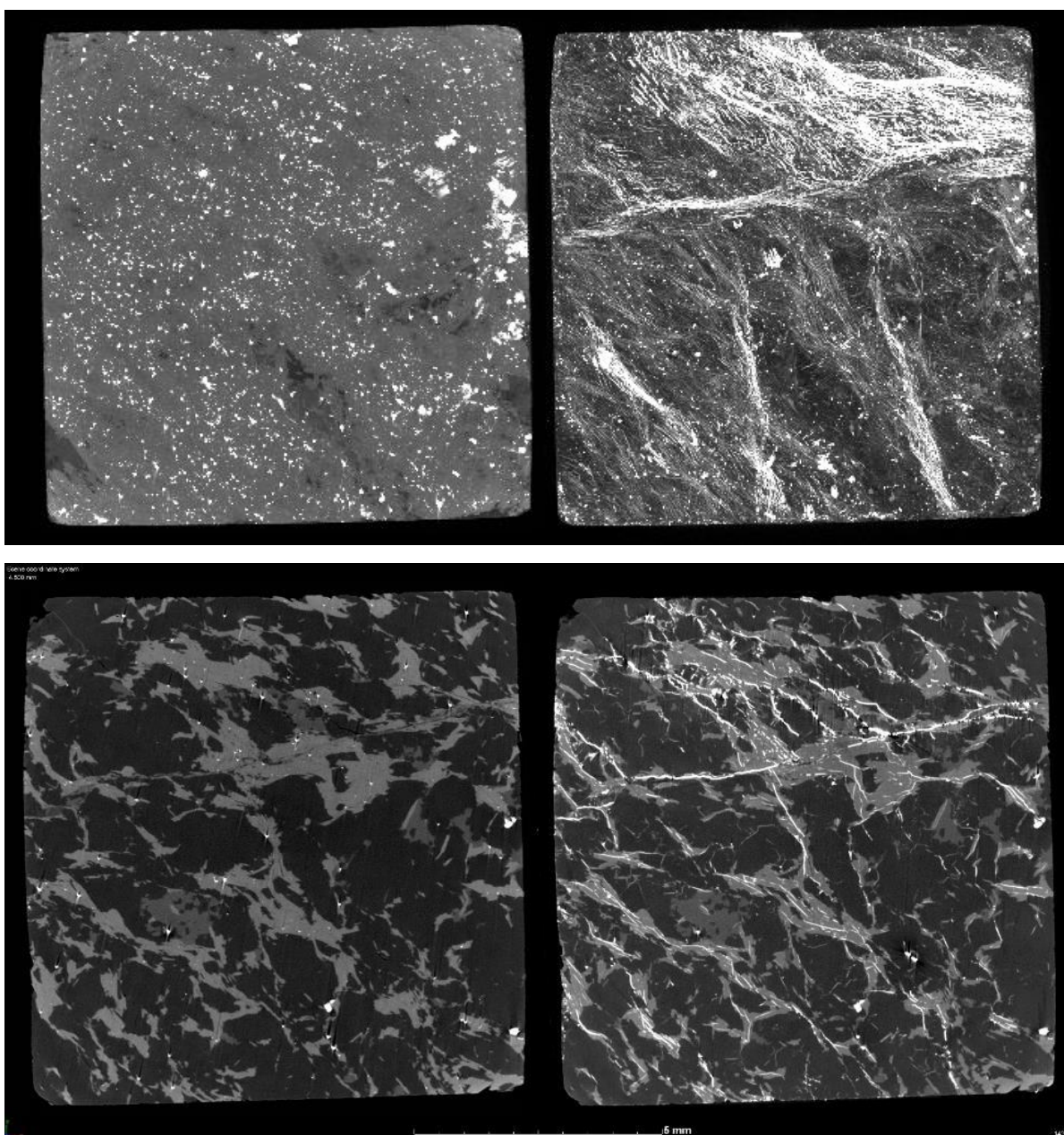
Ze srovnání CT řezů před a po MIP vyplývá, že rozdíly v obrazech CT řezů jsou velmi dobře identifikovatelné vzhledem k vyšší hodnotě pórovitosti. Pórový prostor je formován sítí trhlinek různé mocnosti a orientace sledující strukturu horniny. Tato síť trhlinek je navázána především na zrna horniny zobrazovaná světlejší úrovní šedi, sledující ve velké míře foliaci, popřípadě strukturu horniny. Z referenčního CT řezu jsou viditelná i porušení (otevřené trhlinky) tělíska před realizovanou MIP, které sehrálo významnou úlohu při proudění rtuti v tělísku (viz Obr. 546). Jsou zastoupeny především póry o velikosti v oblasti od cca 100 μm do 80 μm , dále jsou to velikosti pórů v oblasti od cca 10 μm do 0,008 μm s absencí póru na úrovni cca 2 až 7 μm (viz Obr. 513).



Obr. 546 Názorné CT řezy pro 4. hloubkovou úroveň - vrt EDZ20-HC, sumární ortogonální projekce CT řezů (nahore), samostatný CT řez (dole)

5. hloubková úroveň (pórovitost 0,57 %, úroveň ve vrtu 3,03 m)

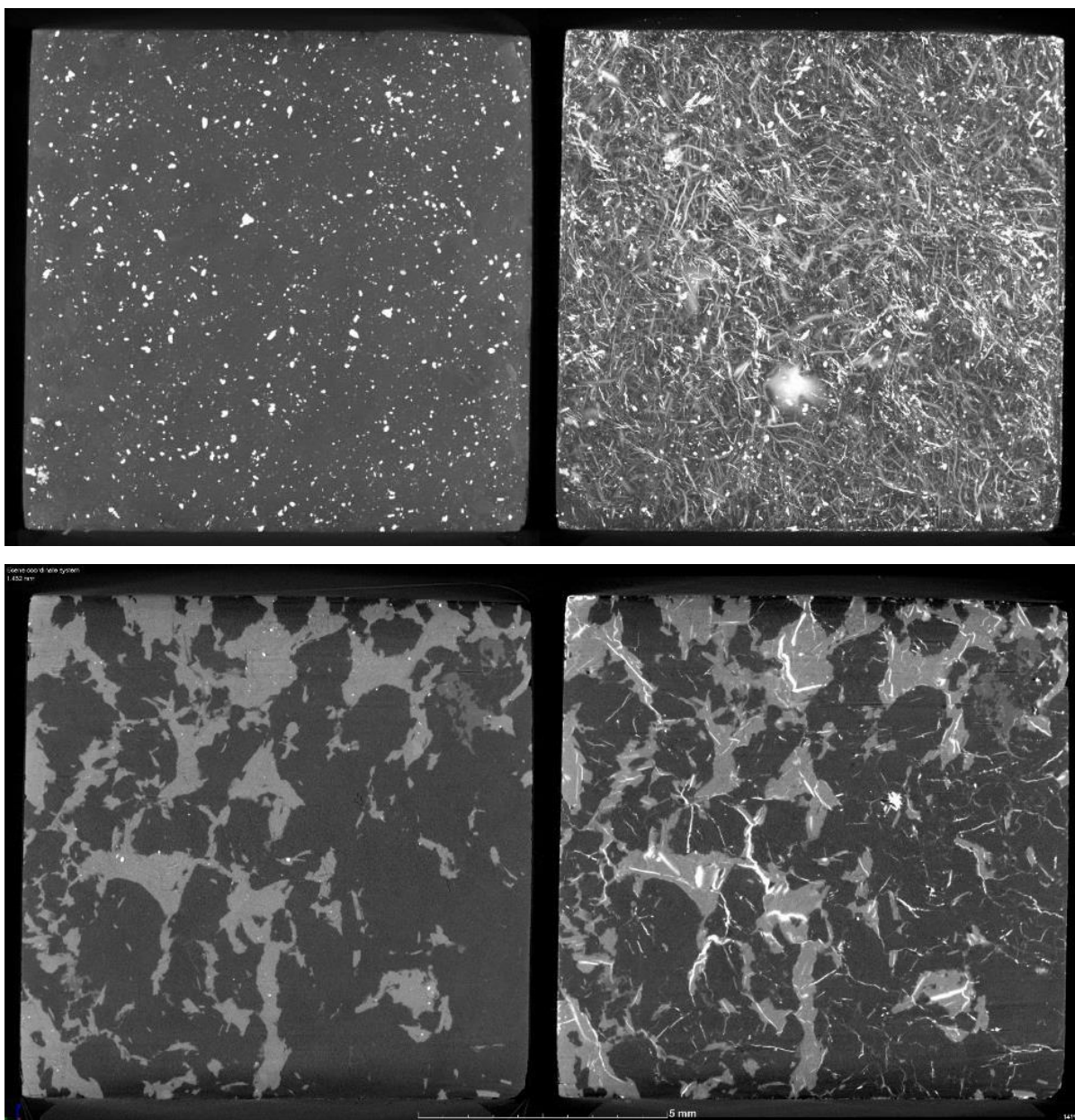
Ze srovnání CT řezů před a po MIP vyplývá, že rozdíly v obrazech CT řezů jsou dobře identifikovatelné, pórový prostor je formován sítí trhlinek různé mocnosti a orientace sledující strukturu horniny. Tato síť trhlinek je navázána především na zrna horniny zobrazovaná světlejší úrovní šedi, sledující ve velké míře foliaci, popřípadě strukturu horniny. Z referenčního CT řezu jsou viditelná i porušení (otevřené trhlinky) tělíska před realizovanou MIP, které sehrálo významnou úlohu při proudění rtuti v tělísku (viz Obr. 547). Jsou zastoupeny póry o velikosti zastoupené v téměř celé oblasti měření, tj. od cca 100 μm do 0,008 μm s absencí póru na úrovni cca 7 μm (viz Obr. 513).



Obr. 547 Názorné CT řezy pro 5. hloubkovou úroveň - vrt EDZ20-HC, sumární ortogonální projekce CT řezů (nahore), samostatný CT řez (dole)

6. hloubková úroveň (pórovitost 1,4 %, úroveň ve vrtu 4,20 m)

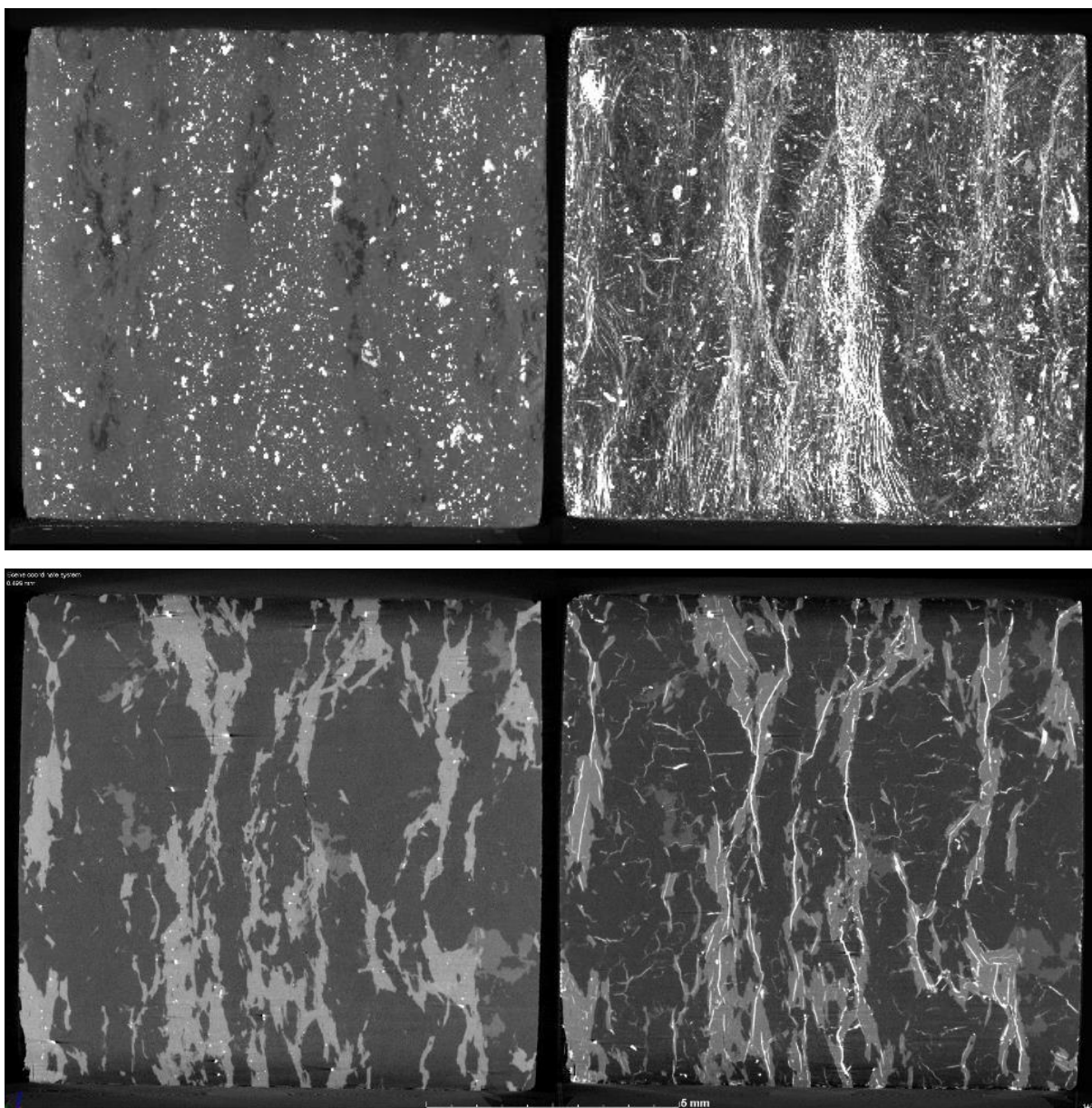
Ze srovnání CT řezů před a po MIP vyplývá, že rozdíly v obrazech CT řezů jsou dobře rozpoznatelné vzhledem k vyšší hodnotě pórovitosti. Pórový prostor je formován sítí trhlinek různé mocnosti a orientace sledující strukturu horniny. Tato síť trhlinek je navázána především na zrna horniny zobrazovaná světlejší úrovní šedi, sledující ve velké míře foliaci, popřípadě strukturu horniny. Druhý systém trhlinek, je orientován víceméně neusměrněně k prvnímu systému a je asociován do oblasti zrn a jejich kontaktů zobrazovaných tmavšími odstíny šedi. Z referenčního CT řezu nejsou viditelná porušení (otevřené trhlinky) tělíska před realizovanou MIP (viz Obr. 548). Jsou zastoupeny především póry o velikosti v oblasti od cca 100 μm do 30 μm , dále jsou to velikosti porů na úrovni cca 2; 0,2; 0,09; 0,07; 0,04 μm (viz Obr. 513).



Obr. 548 Názorné CT řezy pro 6. hloubkovou úroveň - vrt EDZ20-HC, sumární ortogonální projekce CT řezů (nahore), samostatný CT řez (dole)

7. hloubková úroveň (pórovitost 0,79 %, úroveň ve vrtu 6,33 m)

Ze srovnání CT řezů před a po MIP vyplývá, že rozdíly v obrazech CT řezů jsou dobře rozpoznatelné vzhledem k vyšší hodnotě pórovitosti. Pórový prostor je formován sítí trhlinek různé mocnosti a orientace sledující strukturu horniny. Tato síť trhlinek je navázána především na zrna horniny zobrazovaná světlejší úrovní šedi, sledující ve velké míře foliaci, popřípadě strukturu horniny. Druhý systém trhlinek, je orientován víceméně příčně k prvnímu systému a je asociován do oblasti zrn a jejich kontaktů zobrazovaných tmavšími odstíny šedi. Z referenčního CT řezu nejsou viditelná porušení (otevřené trhlinky) tělíska před realizovanou MIP (viz Obr. 549). Jsou zastoupeny póry o velikosti zastoupené v téměř celé oblasti měření, tj. od cca 100 μm do 0,008 μm s absencí póru na úrovni od cca 2 do 8 μm (viz Obr. 513).

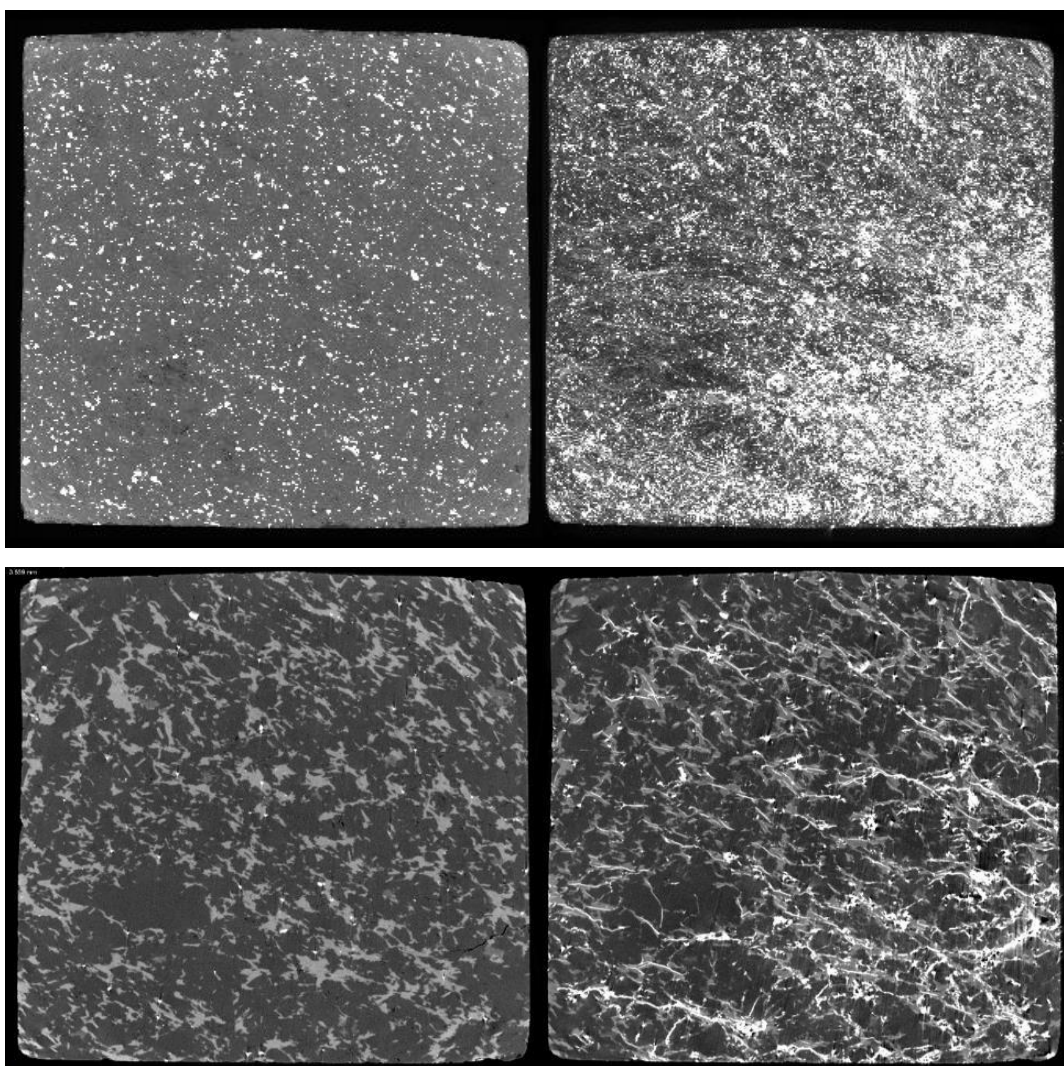


Obr. 549 Názorné CT řezy pro 7. hloubkovou úroveň - vrt EDZ20-HC, sumární ortogonální projekce CT řezů (nahore), samostatný CT řez (dole)

Popisy pórového prostoru pro analyzovaná tělíska z 20. patra z vrtu BGS20/2-H jsou následující (interní číslo ÚGN zkušebních tělísek 16406):

1. hloubková úroveň (pórovitost 0,89 %, úroveň ve vrtu 0,23 m)

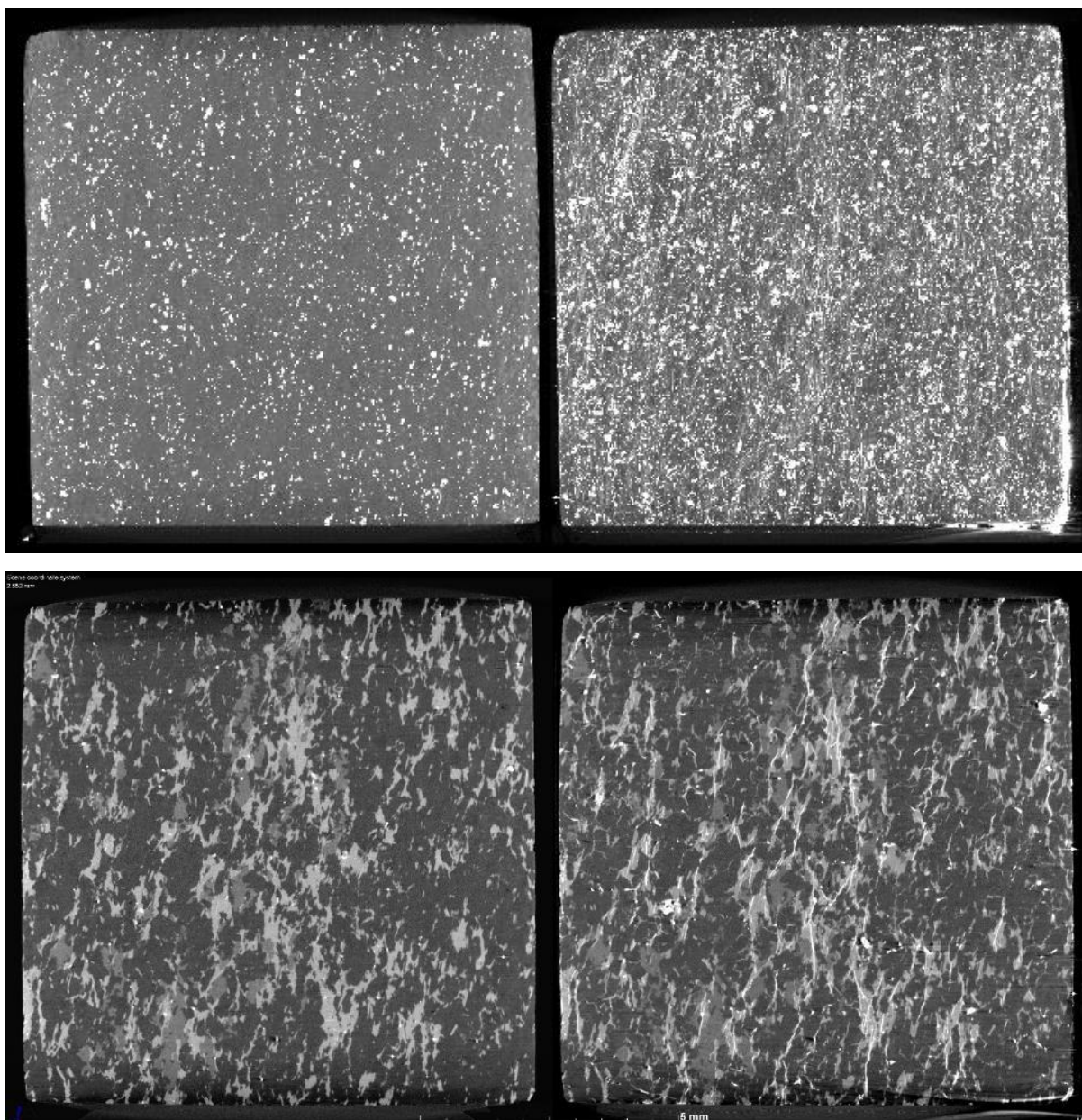
Ze srovnání CT řezů před a po MIP vyplývá, že rozdíly v obrazech CT řezů jsou dobře rozpoznatelné vzhledem k vyšší hodnotě pórovitosti. Pórový prostor je formován sítí trhlinek různé mocnosti a orientace sledující strukturu horniny. Tato síť trhlinek je navázána především na zrna horniny zobrazovaná světlejší úrovní šedi, sledující ve velké míře foliaci, popřípadě strukturu horniny. Druhý systém trhlinek, méně výrazný, je asociován do oblasti zrn a jejich kontaktů zobrazovaných tmavšími odstíny šedi. Z referenčního CT řezu jsou viditelná porušení (otevřené trhlinky) tělíska před realizovanou MIP (viz Obr. 550). Jsou zastoupeny především póry o velikosti v oblasti od cca 100 μm do 80 μm , dále jsou to velikosti pórů v oblasti od cca 0,7 μm do 0,008 μm (viz Obr. 511).



Obr. 550 Názorné CT řezy pro 1. hloubkovou úroveň - vrt BGS20/2-H, sumární ortogonální projekce CT řezů (nahore), samostatný CT řez (dole)

2. hloubková úroveň (pórovitost 0,61 %, úroveň ve vrtu 0,65 m)

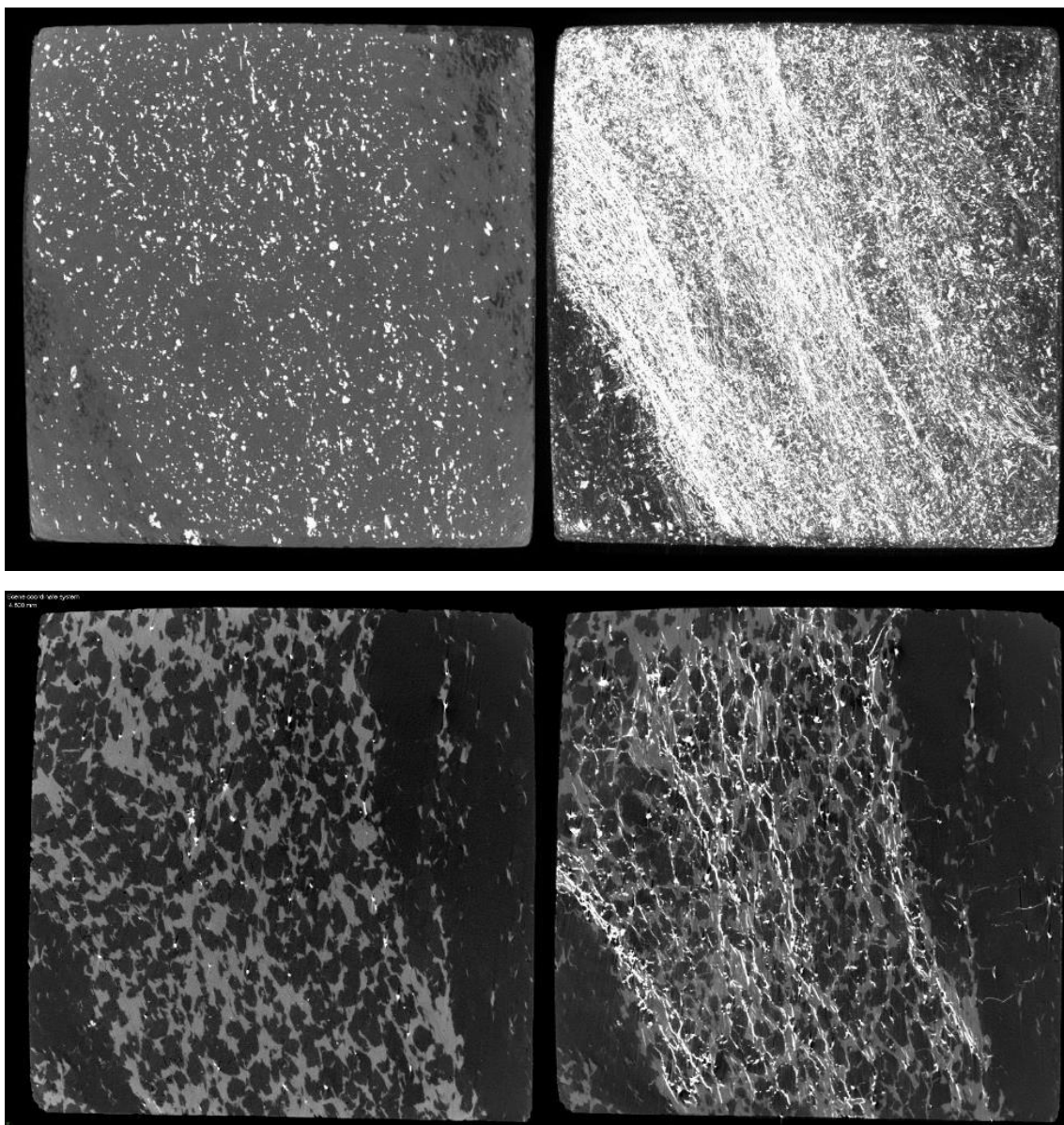
Ze srovnání CT řezů před a po MIP vyplývá, že rozdíly v obrazech CT řezů jsou dobře rozpoznatelné. Pórový prostor je formován sítí trhlinek o různé mocnosti, která je méně výrazná než v předešlém případě. Síť trhlinek je navázána především na zrna horniny zobrazované světlejší úrovní šedi, sledující víceméně strukturu horniny. Z referenčního CT řezu nejsou viditelná porušení (otevřené trhlinky) tělíska před realizovanou MIP (viz Obr. 551). Jsou zastoupeny především póry o velikosti v oblasti od cca 100 μm do 80 μm , dále jsou to velikosti pórů v oblasti od cca 0,7 μm do 0,008 μm (viz Obr. 511).



Obr. 551 Názorné CT řezy pro 2. hloubkovou úroveň - vrt BGS20/2-H, sumární ortogonální projekce CT řezů (nahore), samostatný CT řez (dole)

3. hloubková úroveň (pórovitost 1,23 %, úroveň ve vrtu 1,20 m)

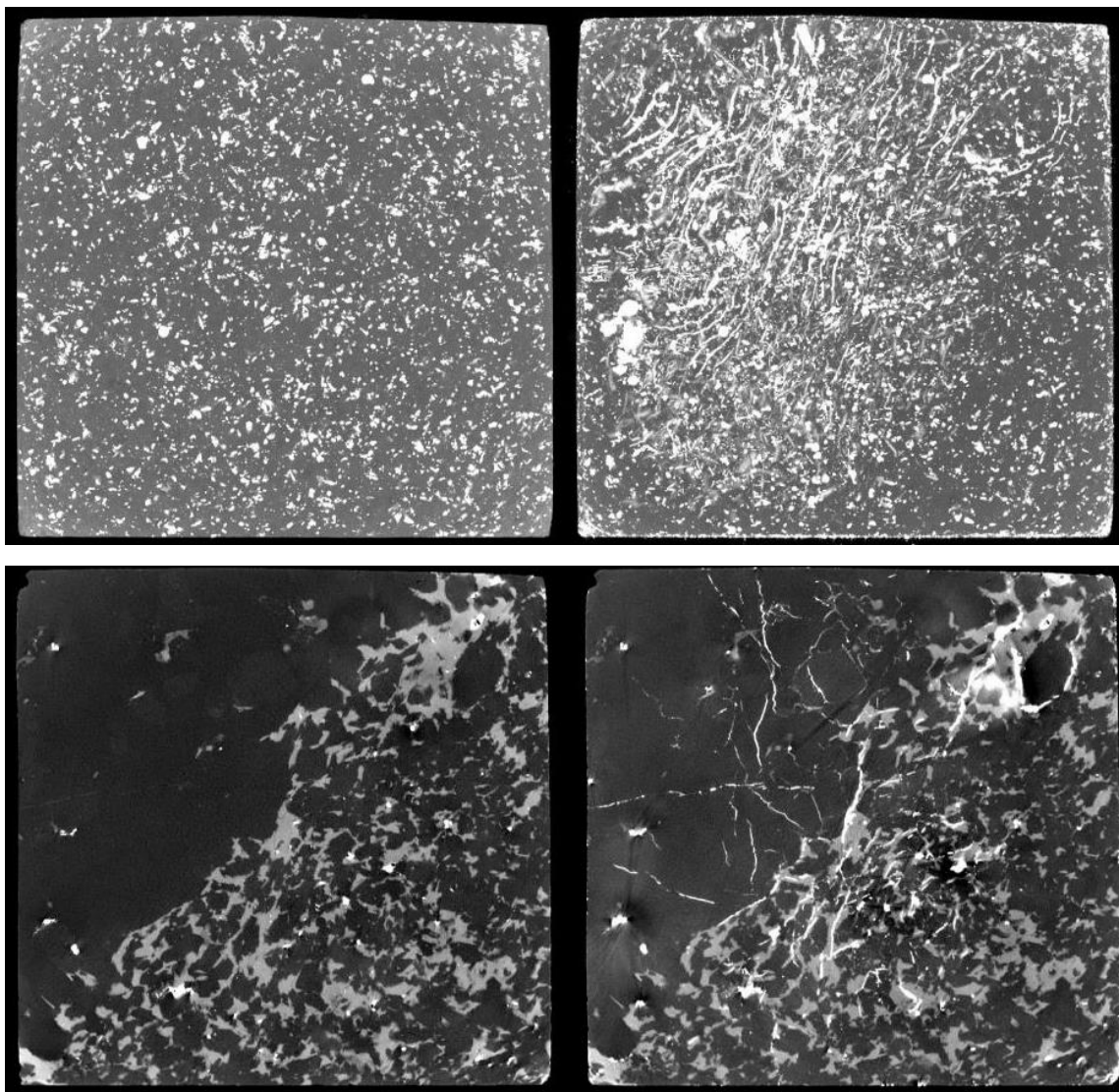
Ze srovnání CT řezů před a po MIP vyplývá, že rozdíly v obrazech CT řezů jsou dobře rozpoznatelné vzhledem k vyšší hodnotě pórovitosti. Pórový prostor je formován sítí trhlinek různé mocnosti a orientace sledující strukturu horniny. Tato síť trhlinek je navázána především na zrna horniny zobrazovaná světlejší úrovní šedi, sledující ve velké míře foliaci, popřípadě strukturu horniny. Druhý minoritní systém trhlinek je asociován do oblasti zrn a jejich kontaktů zobrazovaných tmavšími odstíny šedi. Z referenčního CT řezu jsou rovněž identifikovatelná porušení (otevřené trhlinky) tělíška před realizovanou MIP, které sehrálo významnou úlohu při proudění rtuti v tělísku (viz Obr. 552). Jsou zastoupeny především póry o velikosti v oblasti od cca 100 μm do 80 μm , dále jsou to velikosti pórů v oblasti od cca 0,7 μm do 0,008 μm s výraznějším nárůstem pórů pod 0,01 μm (viz Obr. 511).



Obr. 552 Názorné CT řezy pro 3. hloubkovou úroveň - vrt BGS20/2-H, sumární ortogonální projekce CT řezů (nahore), samostatný CT řez (dole)

4. hloubková úroveň (pórovitost 2,29 %, úroveň ve vrtu 1,88 m)

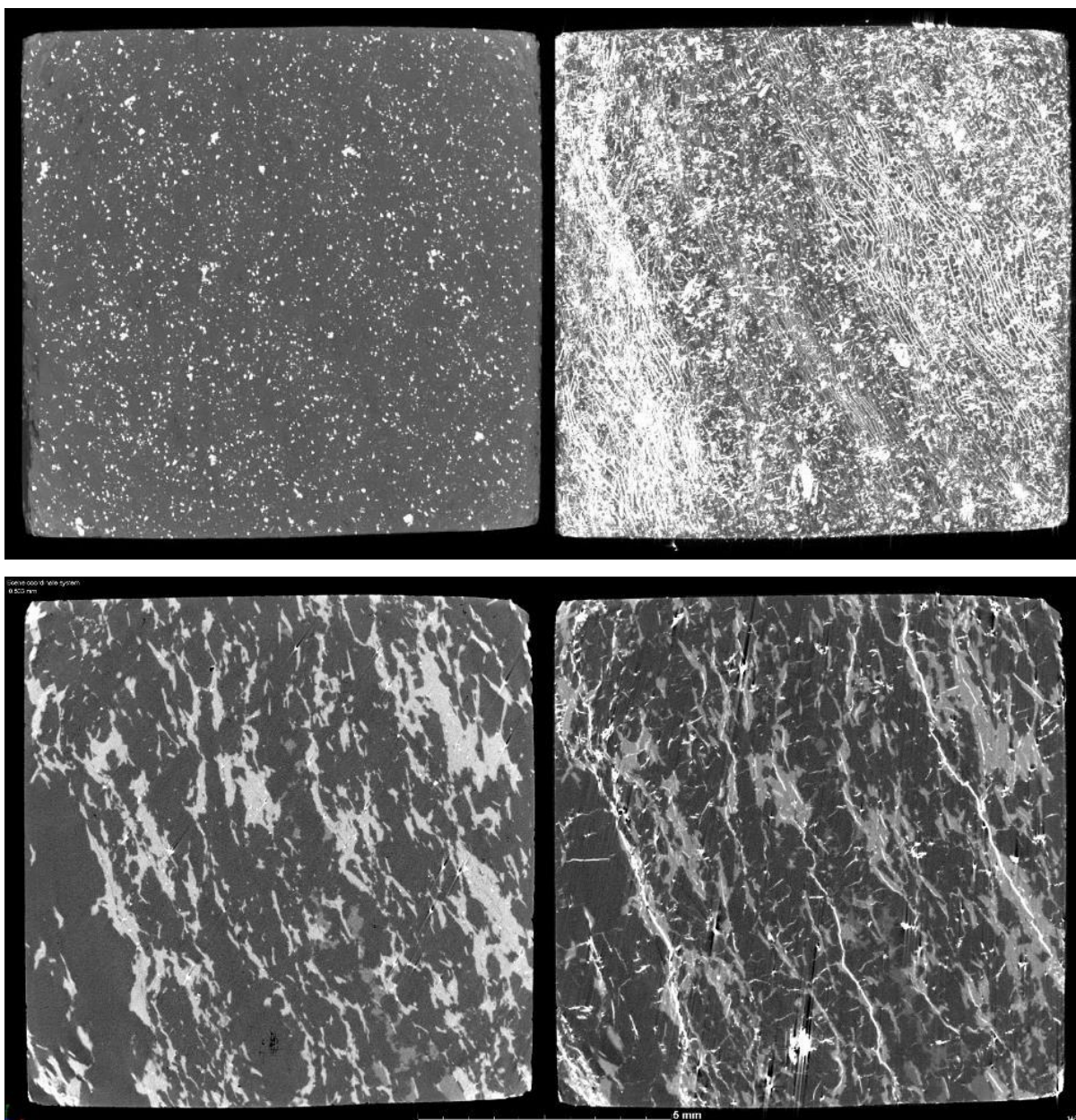
Ze srovnání CT řezů před a po MIP vyplývá, že rozdíly v obrazech v CT řezů jsou dobře identifikovatelné vzhledem k vysoké hodnotě pórovitosti. Pórový prostor je formován sítí trhlinek různé mocnosti a obdobné orientace sledující strukturu horniny pouze v omezené části vzorku (cca ¼ tělíska). Tato síť trhlinek je navázána především na zrna horniny zobrazovaná světlejší úrovní šedi, sledující strukturu horniny v oblasti výrazného rozhraní mezi zrny horniny zobrazovanými světlejší úrovní šedi a zrny zobrazovanými tmavší úrovní šedi. Síť trhlinek lokalizovaných v zrnech zobrazovaných tmavší úrovní šedi má odlišnou orientaci než trhlinky asociované do oblasti zrn horniny zobrazovaných světlejší úrovní šedi. Z referenčního CT řezu nejsou viditelná zjevná porušení (otevřené trhlinky) tělíska před realizovanou MIP (viz Obr. 553). Jsou zastoupeny především póry o velikosti v oblasti od cca 100 μm do 80 μm , dále jsou to velikosti pórů v oblasti od cca 0,7 μm do 0,008 μm s výraznějším nárůstem pórů pod 0,01 μm (viz Obr. 511).



Obr. 553 Názorné CT řezy pro 4. hloubkovou úroveň - vrt BGS20/2-H, sumární ortogonální projekce CT řezů (nahore), samostatný CT řez (dole)

5. hloubková úroveň (pórovitost 0,57 %, úroveň ve vrtu 3,07 m)

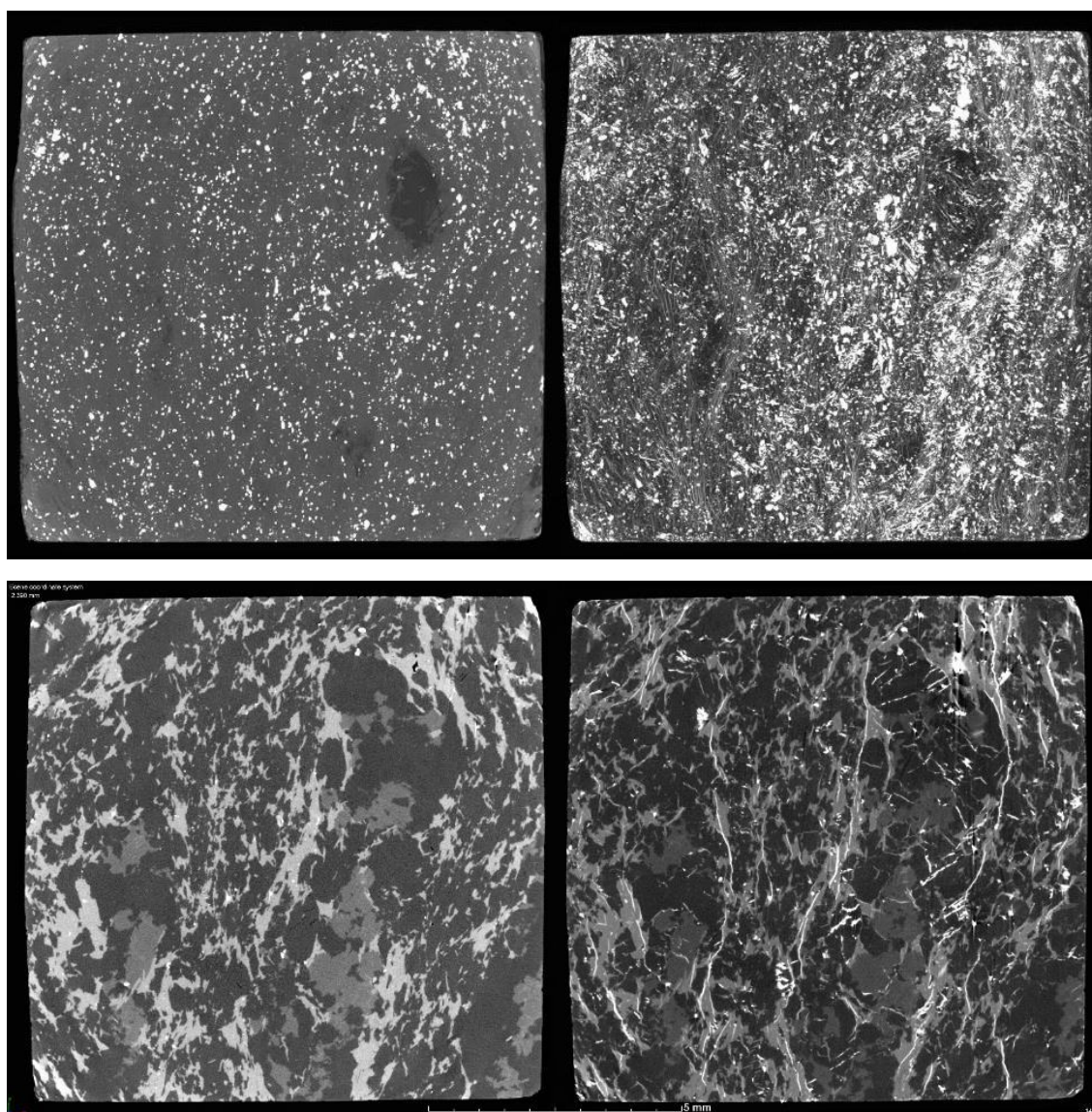
Ze srovnání CT řezů před a po MIP vyplývá, že rozdíly v obrazech CT řezů jsou dobře identifikovatelné, pórový prostor je formován sítí trhlinek různé mocnosti a orientace sledující strukturu horniny. Tato síť trhlinek je navázána především na zrna horniny zobrazovaná světlejší úrovní šedi, sledující ve velké míře foliaci, popřípadě strukturu horniny. Druhý systém trhlinek je orientován víceméně příčně k prvnímu systému a je asociován do oblasti zrn zobrazovaných tmavšími odstíny šedi. Z referenčního CT řezu nejsou viditelná porušení (otevřené trhlinky) tělíska před realizovanou MIP (viz Obr. 554). Jsou zastoupeny především póry o velikosti v oblasti od cca 100 μm do 80 μm , dále jsou to velikosti pórů v oblasti od cca 0,9 μm do 0,02 μm (viz Obr. 511).



Obr. 554 Názorné CT řezy pro 5. hloubkovou úroveň - vrt BGS20/2-H, sumární ortogonální projekce CT řezů (nahore), samostatný CT řez (dole)

6. hloubková úroveň (pórovitost 1,63 %, úroveň ve vrtu 4,60 m)

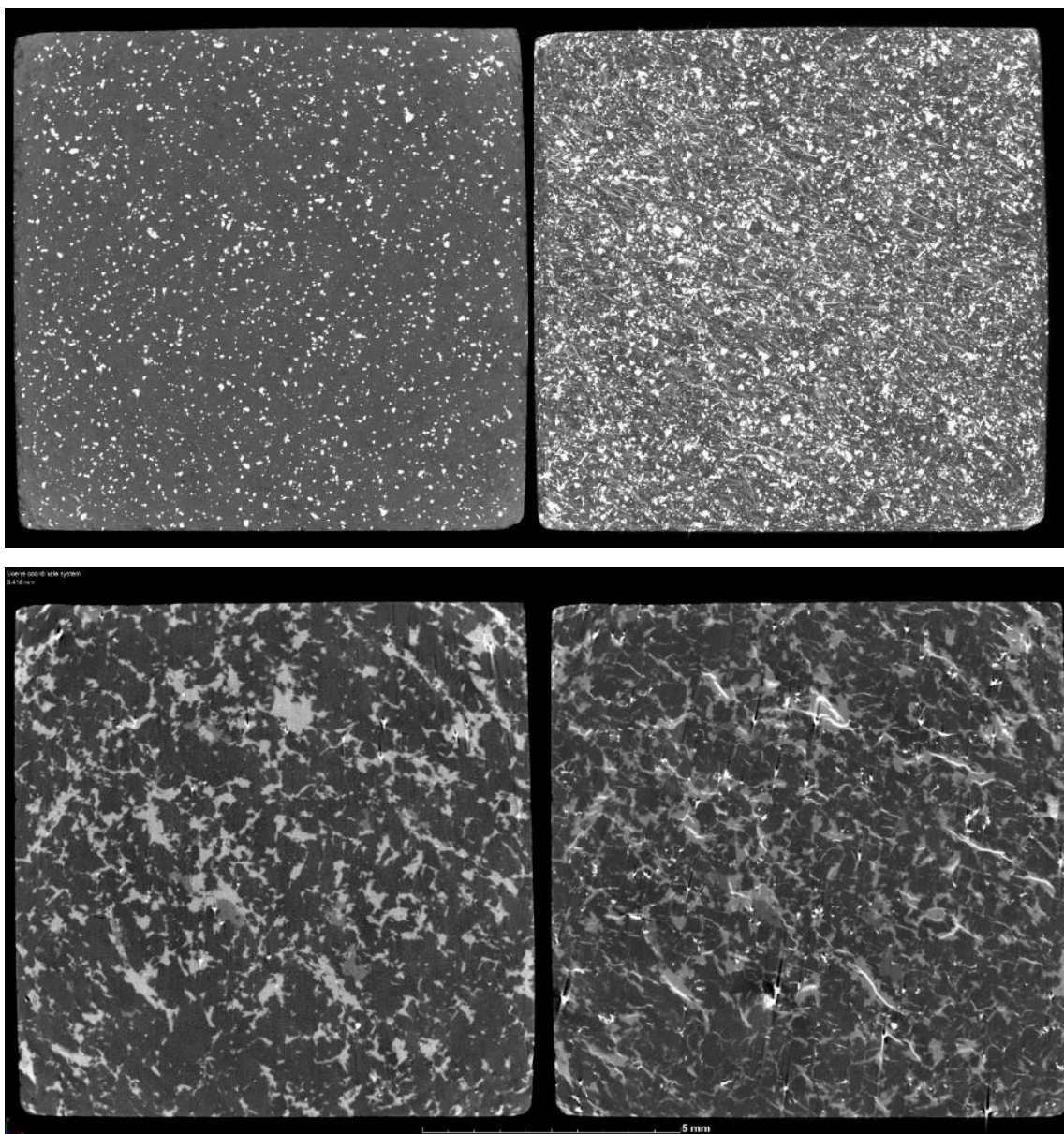
Ze srovnání CT řezů před a po MIP vyplývá, že rozdíly v obrazech CT řezů jsou velmi dobře rozpoznatelné vzhledem k vyšší hodnotě pórovitosti. Pórový prostor je formován sítí trhlinek různé mocnosti a orientace sledující strukturu horniny. Tato síť trhlinek je navázána především na zrna horniny zobrazovaná světlejší úrovní šedi, sledující ve velké míře foliaci, popřípadě strukturu horniny. Druhý minoritní systém trhlinek je orientován víceméně neusměrněně k prvnímu systému a je asociován do oblasti zrn, popřípadě jejich kontaktů, zobrazovaných tmavšími odstíny šedi. Z referenčního CT řezu nejsou viditelná porušení (otevřené trhlinky) tělíška před realizovanou MIP (viz. Obr. 555). Jsou zastoupeny především póry o velikosti v oblasti od cca 100 μm do 80 μm , dále jsou to velikosti pórů na úrovni cca 7 μm ; 0,7 μm ; výrazná oblast na úrovni cca 0,09 μm a 0,07 μm , do 0,008 μm s nevýrazným nárůstem objemu pórů v oblasti pod cca 0,07 μm (viz Obr. 511).



Obr. 555 Názorné CT řezy pro 6. hloubkovou úroveň - vrt BGS20/2-H, sumární ortogonální projekce CT řezů (nahore), samostatný CT řez (dole)

7. hloubková úroveň (pórovitost 0,57 %, úroveň ve vrtu 6,03 m)

Ze srovnání CT řezů před a po MIP vyplývá, že rozdíly v obrazech CT řezů jsou dobře rozpoznatelné. Pórový prostor je formován sítí trhlinek o různé mocnosti, která je méně výrazná než v předešlém případě a je obdobná jako u hloubkové úrovně 2 s obdobnou hodnotou pórovitosti (tj. 0,61 %). Síť trhlinek je navázána především na zrna horniny zobrazovaná světlejší úrovní šedi, sledující víceméně strukturu horniny. Drobné trhlinky jsou rozpoznatelné i na kontaktech zrn zobrazovaných tmavšími odstíny šedi. Z referenčního CT řezu nejsou viditelná porušení (otevřené trhlinky) tělíska před realizovanou MIP (viz Obr. 556). Jsou zastoupeny především póry o velikosti v oblasti od cca 100 μm do 80 μm , dále jsou to velikosti pórů v oblasti od cca 0,7 μm do 0,008 μm (viz Obr. 511).

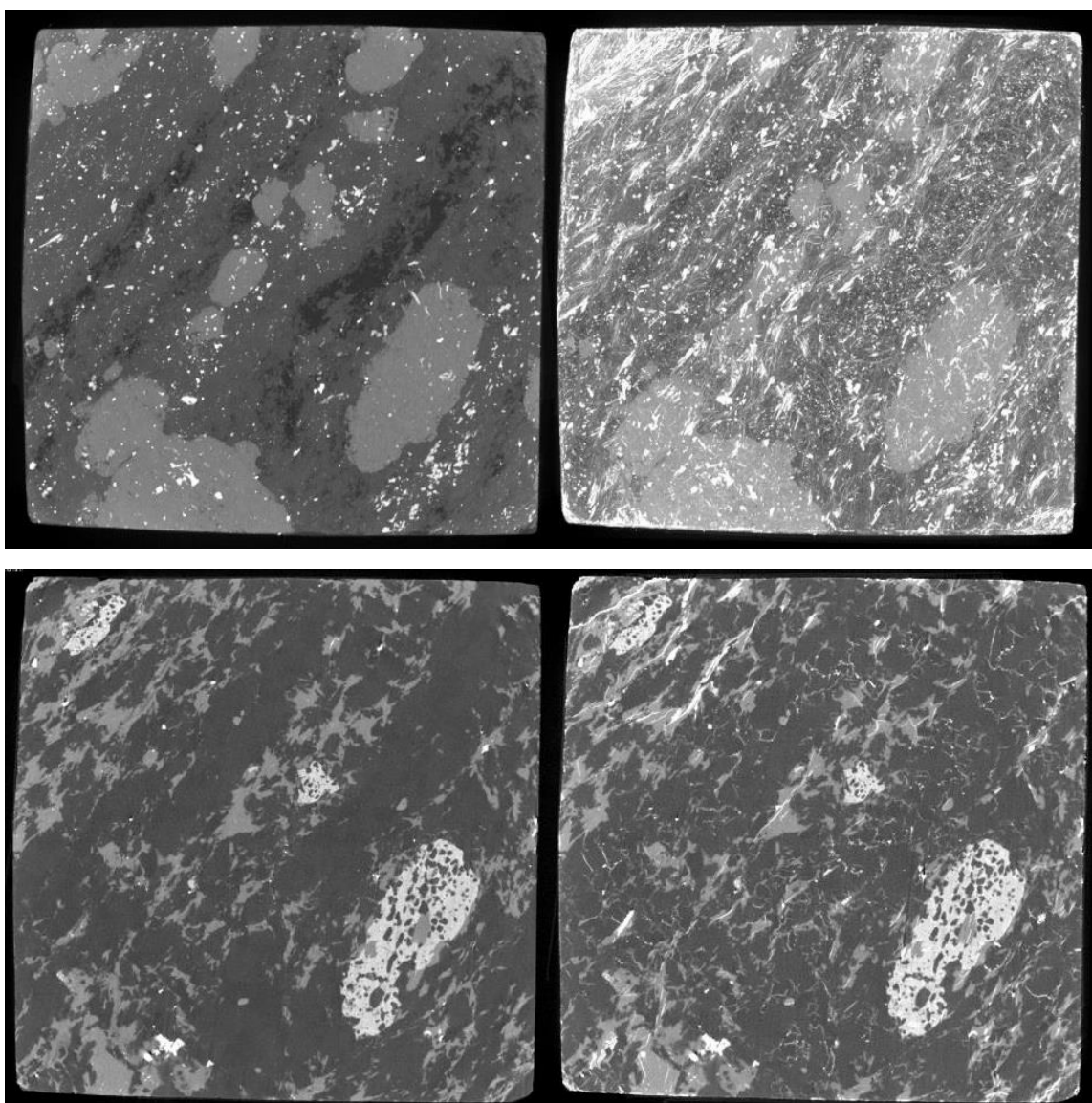


Obr. 556 Názorné CT řezy pro 7. hloubkovou úroveň - vrt BGS20/2-H, sumární ortogonální projekce CT řezů (nahore), samostatný CT řez (dole)

Popisy pórového prostoru pro analyzovaná tělíska z 24. patra z vrtu BGS24-H jsou následující (interní číslo ÚGN zkušebních tělísek 16505):

1. hloubková úroveň (pórovitost 0,69 %, úroveň ve vrtu 0,31 m)

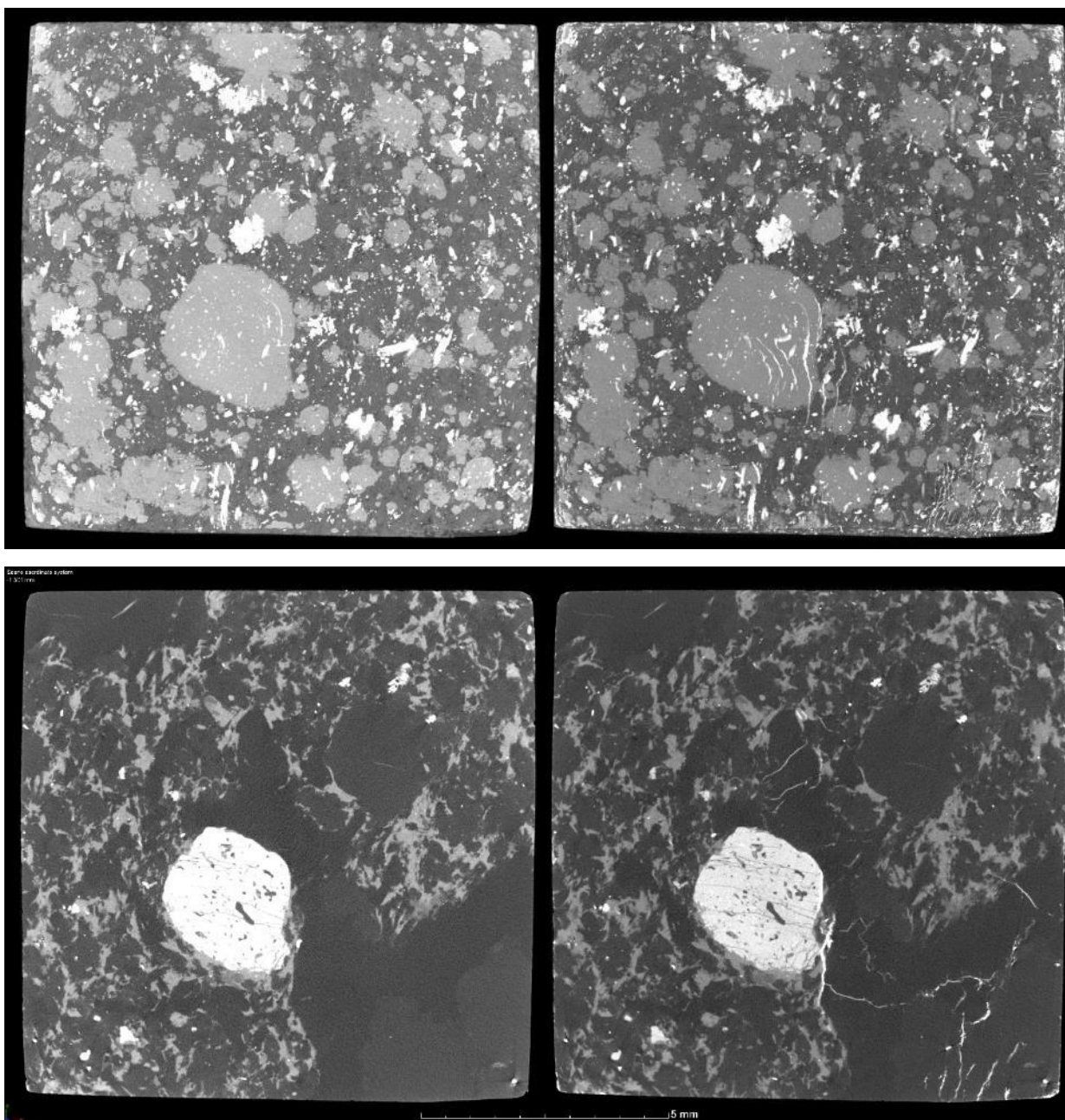
Ze srovnání CT řezů před a po MIP vyplývá, že rozdíly v obrazech CT řezů jsou velmi dobře rozpoznatelné vzhledem k vyšší hodnotě pórovitostí, pórový prostor je formován sítí trhlinek různé mocnosti a orientace sledující strukturu horniny. První síť trhlinek je navázána na zrna horniny zobrazovaná světlejší úrovní šedi, sledující ve velké míře foliaci, popřípadě strukturu horniny. Druhý systém trhlinek je asociován především do oblasti zrn a jejich kontaktů zobrazovaných tmavšími odstíny šedi. Z referenčního CT řezu nejsou viditelná porušení (otevřené trhlinky) tělíska před realizovanou MIP (viz Obr. 557). Jsou zastoupeny především póry o velikosti v oblasti od cca 100 μm do 20 μm , dále jsou to velikosti pórů v oblasti od cca 1 μm do 0,008 μm (viz Obr. 514).



Obr. 557 Názorné CT řezy pro 1. hloubkovou úroveň - vrt BGS24-H, sumární ortogonální projekce CT řezů (nahore), samostatný CT řez (dole)

2. hloubková úroveň (pórovitost 0,24 %, úroveň ve vrtu 0,72 m)

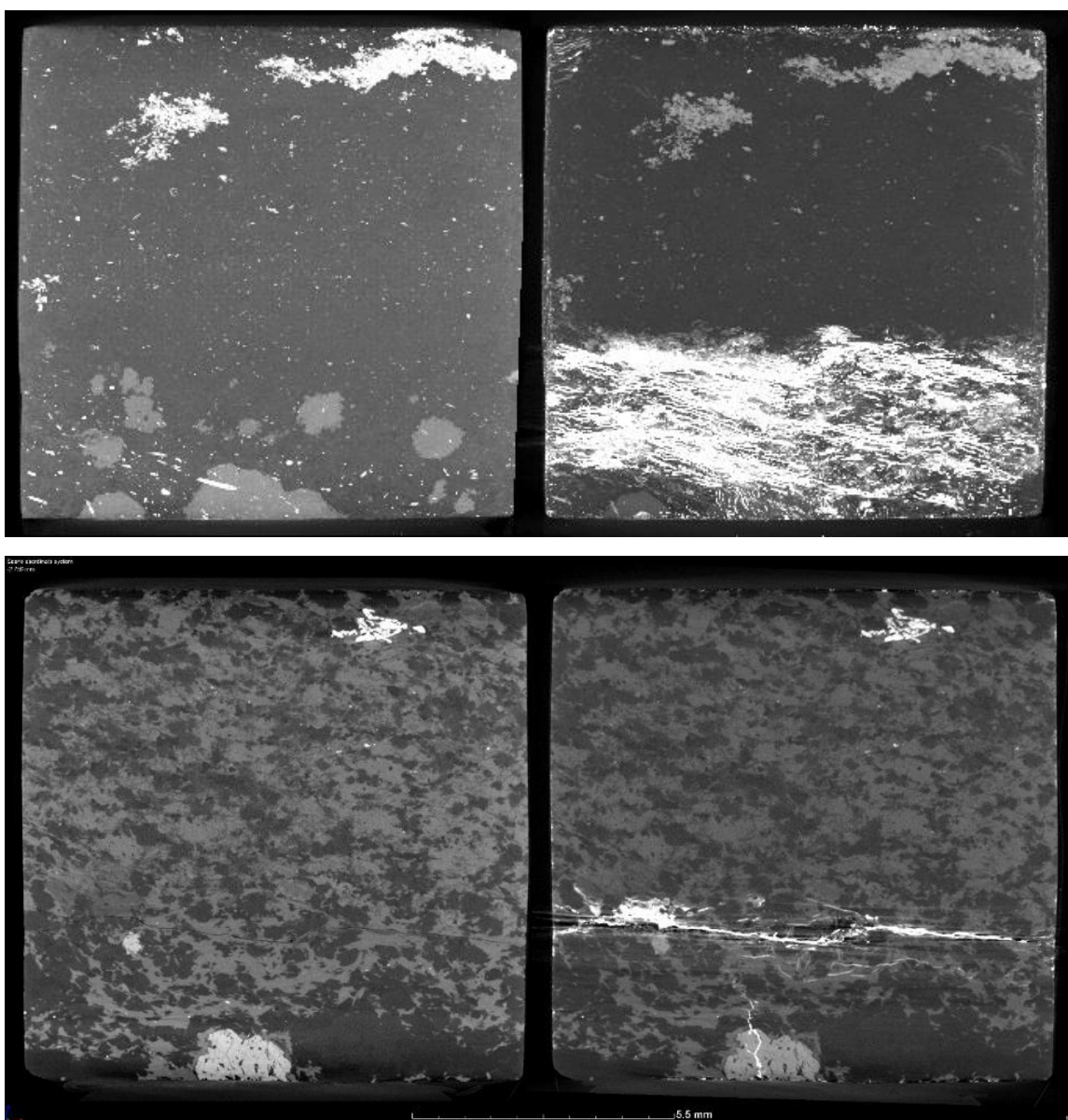
Ze srovnání CT řezů před a po MIP vyplývá, že rozdíly v obrazech CT řezů jsou rozpoznatelné, ale vzhledem k nízké hodnotě porozity méně zastoupené. Pórový prostor je formován sítí trhlinek o různé mocnosti, která je méně výrazná než u předešlého tělíska. Síť trhlinek je navázána především na zrna horniny, popřípadě na jejich kontakty, zobrazované tmavšími úrovněmi šedi. Síť trhlinek není nijak usměrněna. Z referenčního CT řezu nejsou viditelná porušení (otevřené trhlinky) tělíska před realizovanou MIP (viz Obr. 558). Jsou zastoupeny především póry o velikosti v oblasti od cca 100 μm do 10 μm (viz Obr. 514).



Obr. 558 Názorné CT řezy pro 2. hloubkovou úroveň - vrt BGS24-H, sumární ortogonální projekce CT řezů (nahore), samostatný CT řez (dole)

3. hloubková úroveň (pórovitost 0,50 %, úroveň ve vrtu 1,25 m)

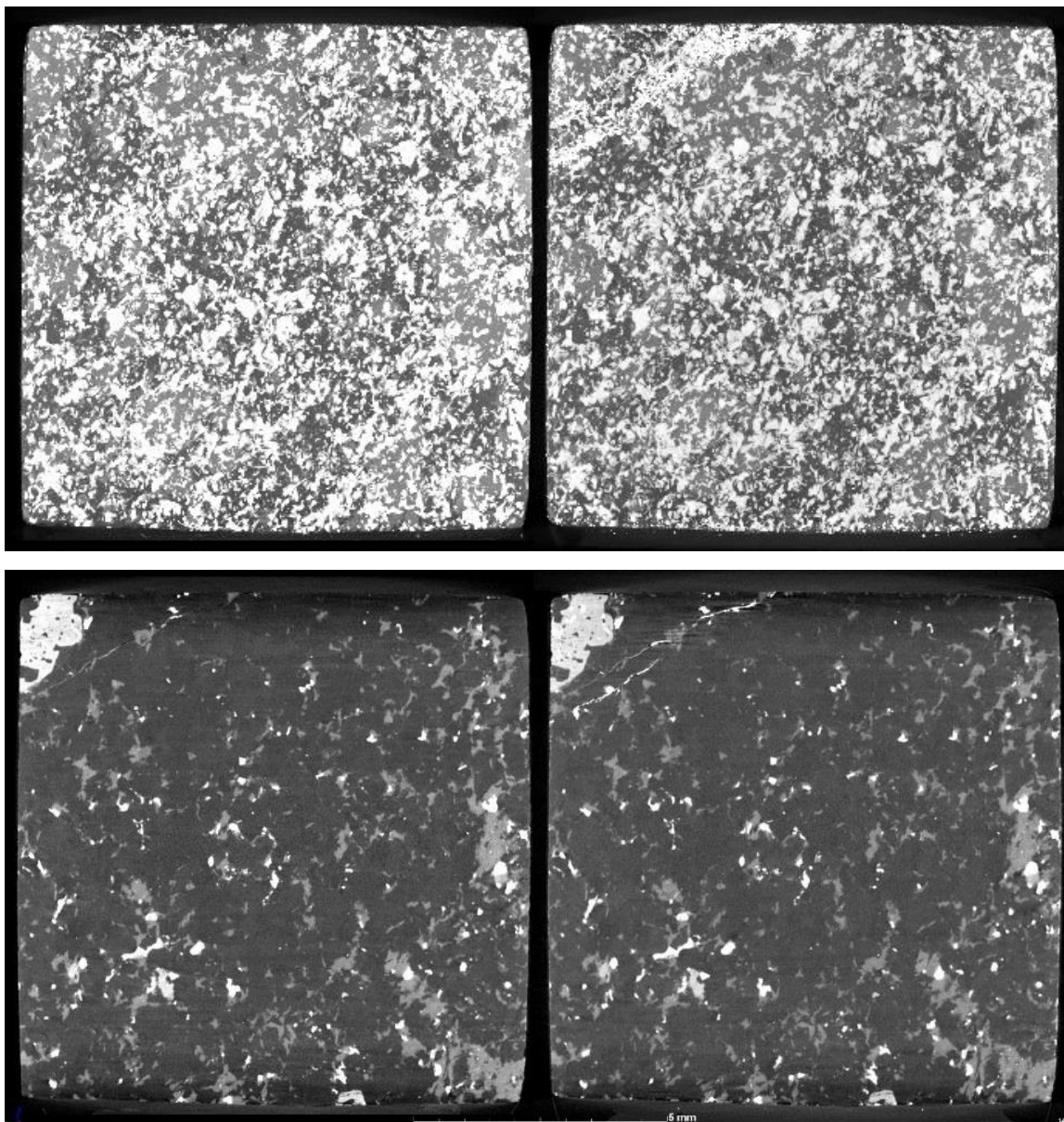
Ze srovnání CT řezů před a po MIP vyplývá, že rozdíly v obrazech CT řezů jsou velmi dobře rozpoznatelné vzhledem k vyšší hodnotě pórovitosti. Z referenčního CT řezu je identifikovatelné výrazné porušení (otevřená trhlinka) tělíska před realizovanou MIP, která sehrála významnou úlohu při proudění rtuti v tělísku. Pórový prostor je formován právě do této otevřené struktury a do jejího blízkého okolí. V tomto okolí jsou viditelné drobné puklinky vyplněné rtutí charakterizující pórový prostor (viz Obr. 559). Jsou zastoupeny především póry o velikosti v oblasti od cca 100 μm do 7 μm s výrazným objemem póru na úrovni cca 7 μm , dále jsou to velikosti pórů v oblasti od cca 1 μm do 0,03 μm (viz Obr. 514).



Obr. 559 Názorné CT řezy pro 3. hloubkovou úroveň - vrt BGS24-H, sumární ortogonální projekce CT řezů (nahore), samostatný CT řez (dole)

4. hloubková úroveň (pórovitost 0,34 %, úroveň ve vrtu 1,83 m)

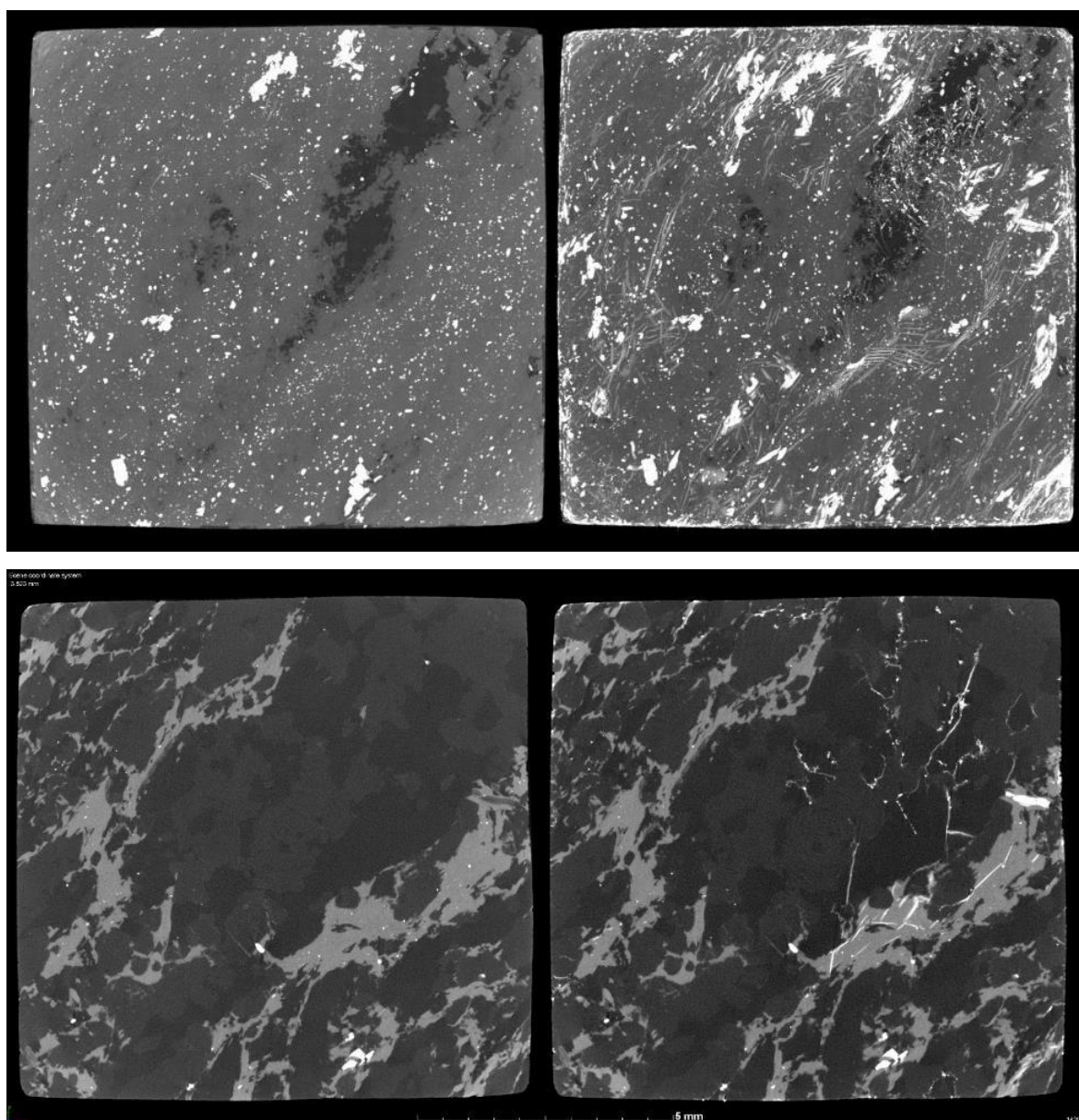
Ze srovnání CT řezů před a po MIP vyplývá, že rozdíly v obrazech v CT řezů nejsou víceméně pozorovatelné a nelze tedy usuzovat na typ a distribuci pórů ve zkušebním tělísku. Ojedinele lze nalézt drobné trhlinky při okrajích tělíska, v zrnech horniny zobrazených světlejší úrovní šedi (viz Obr. 560). Jsou zastoupeny především póry o velikosti v oblasti od cca 100 μm do 8 μm , dále jsou to velikosti pórů s menším objemem v oblasti od cca 8 μm do 0,09 μm (viz Obr. 514).



Obr. 560 Názorné CT řezy pro 4. hloubkovou úroveň - vrt BGS24-H, sumární ortogonální projekce CT řezů (nahore), samostatný CT řez (dole)

5. hloubková úroveň (pórovitost 0,30 %, úroveň ve vrtu 2,90 m)

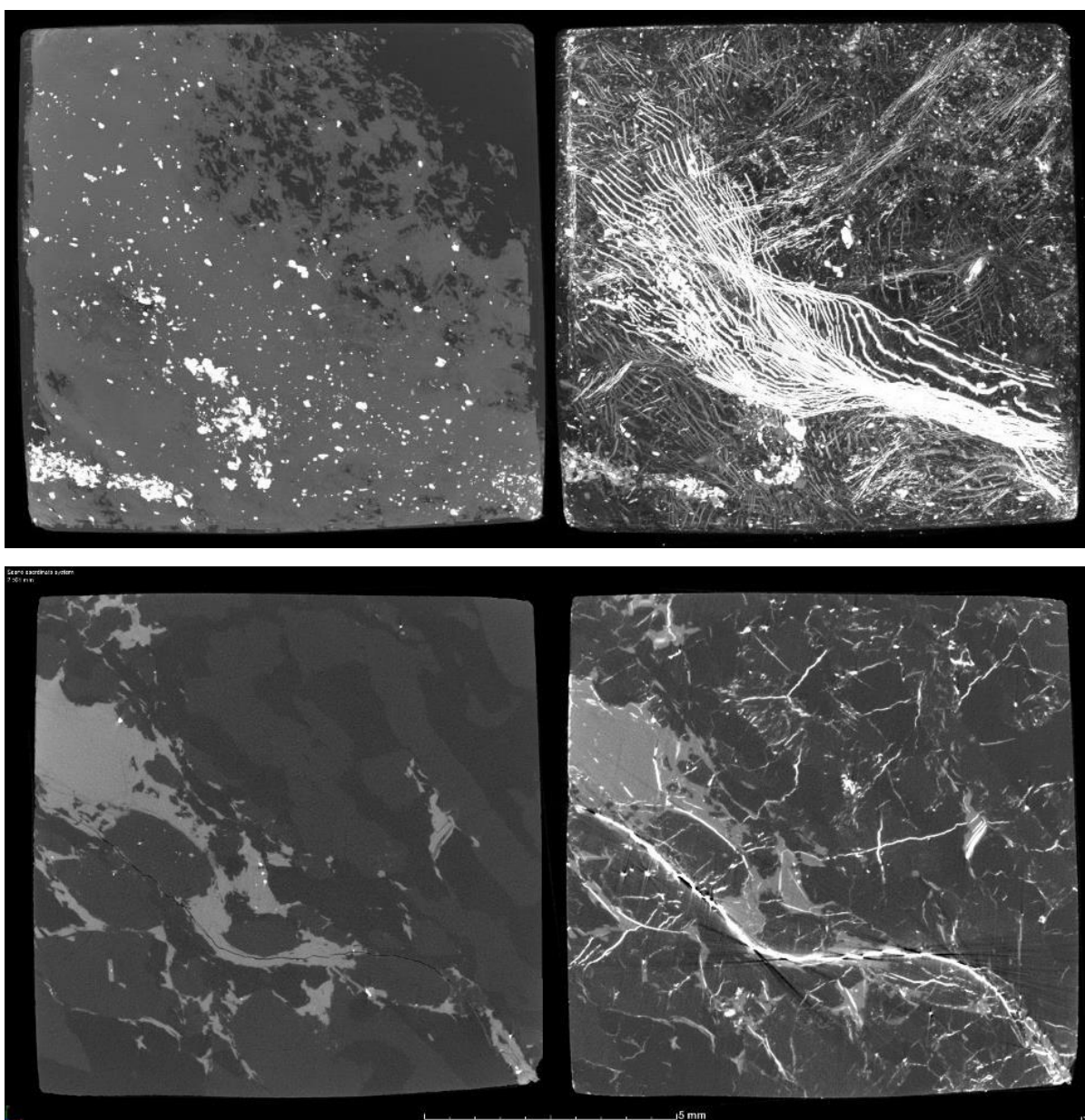
Ze srovnání CT řezů před a po MIP vyplývá, že rozdíly v obrazech CT řezů jsou dobře identifikovatelné. Pórový prostor je formován trhlinkami různé mocnosti. Tyto trhlinky jsou víceméně rovnoměrně navázány jak na zrna horniny zobrazované světlejšími úrovněmi šedi, tak na zrna horniny zobrazovaná tmavšími úrovněmi šedi. Z referenčního CT řezu nejsou viditelná porušení (otevřené trhlinky) tělíska před realizovanou MIP (viz Obr. 561). Jsou zastoupeny především póry o velikosti v oblasti od cca 100 μm do 7 μm , dále jsou to velikosti pórů v oblasti od cca 2 μm do 0,08 μm (viz Obr. 514).



Obr. 561 Názorné CT řezy pro 5. hloubkovou úroveň - vrt BGS24-H, sumární ortogonální projekce CT řezů (nahore), samostatný CT řez (dole)

6. hloubková úroveň (pórovitost 0,32 %, úroveň ve vrtu 4,20 m)

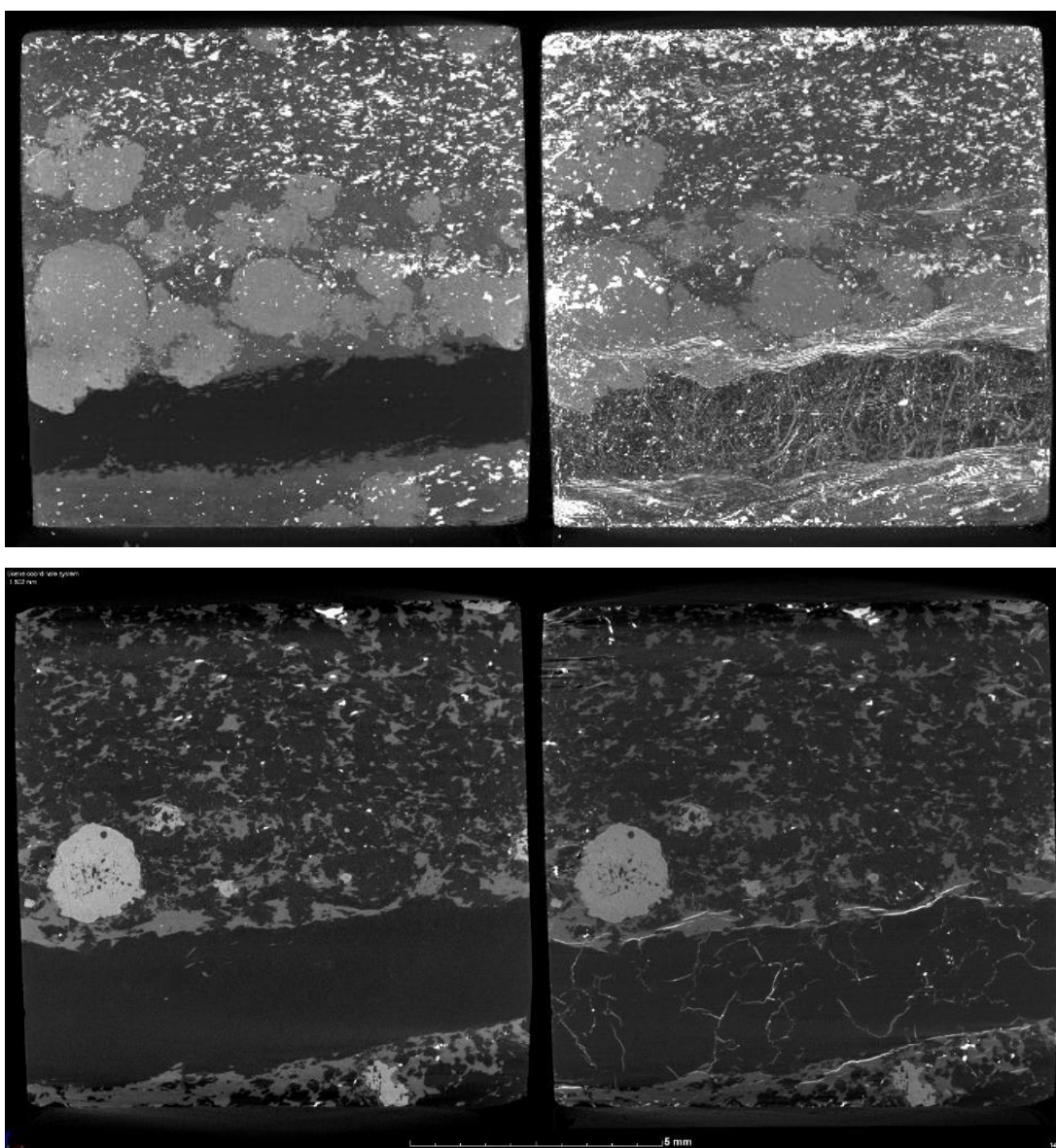
Ze srovnání CT řezů před a po MIP vyplývá, že rozdíly v obrazech CT řezů jsou velmi dobře rozpoznatelné. Pórový prostor je formován sítí trhlinek různé mocnosti a orientace sledující strukturu horniny. Tato síť trhlinek je navázána na zrna horniny zobrazované světlejší úrovní šedi, sledující ve velké míře foliaci. Druhý systém trhlinek je orientován víceméně neusměrněně k systému prvnímu a je asociován do oblastí zrn popřípadě jejich kontaktů zobrazovaných tmavšími odstíny šedi. Z referenčního CT řezu je viditelné porušení (otevřená nerovná trhlinka), které ovlivnilo proudění a distribuci rtuti ve zkušebním tělísku (viz Obr. 562). Jsou zastoupeny póry o velikosti v oblasti od cca 100 μm do 0,09 μm (viz Obr. 514).



Obr. 562 Názorné CT řezy pro 6. hloubkovou úroveň - vrt BGS24-H, sumární ortogonální projekce CT řezů (nahore), samostatný CT řez (dole)

7. hloubková úroveň (pórovitost 0,41 %, úroveň ve vrtu 6,35 m)

Ze srovnání CT řezů před a po MIP vyplývá, že rozdíly v obrazech CT řezů jsou dobře rozpoznatelné. Pórový prostor je formován rovnoměrnou sítí trhlinek o různé mocnosti, které se vyskytují především v oblasti tělíska vyznačující se masívní polohou zobrazovanou tmavším odstínem šedi. Další, méně výrazný systém trhlinek, je asociován do oblasti jejího kontaktu, do zrn horniny zobrazovaných světlejšími odstíny šedi. Z referenčního CT řezu nejsou viditelná porušení (otevřené trhlinky) tělíska před realizovanou MIP (viz Obr. 563). Jsou zastoupeny především póry o velikosti v oblasti od cca 100 μm do 9 μm , dále je zřejmý narůst objemu pórů na úrovni cca 0,008 μm (viz Obr. 514).

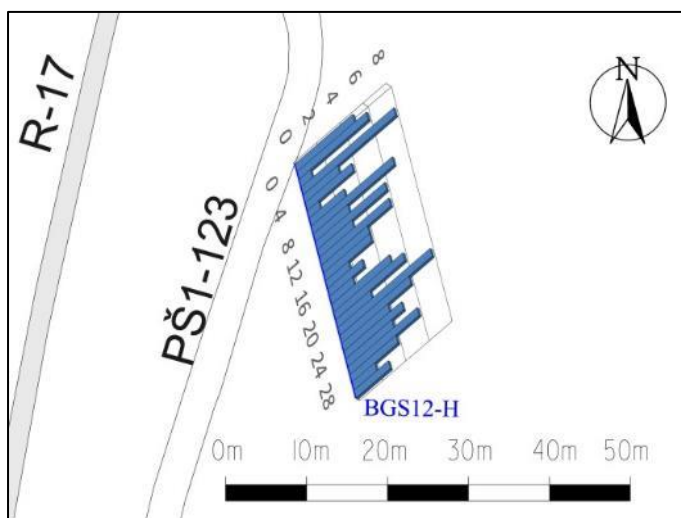


Obr. 563 Názorné CT řezy pro 7. hloubkovou úroveň - vrt BGS24-H, sumární ortogonální projekce CT řezů (nahore), samostatný CT řez (dole)

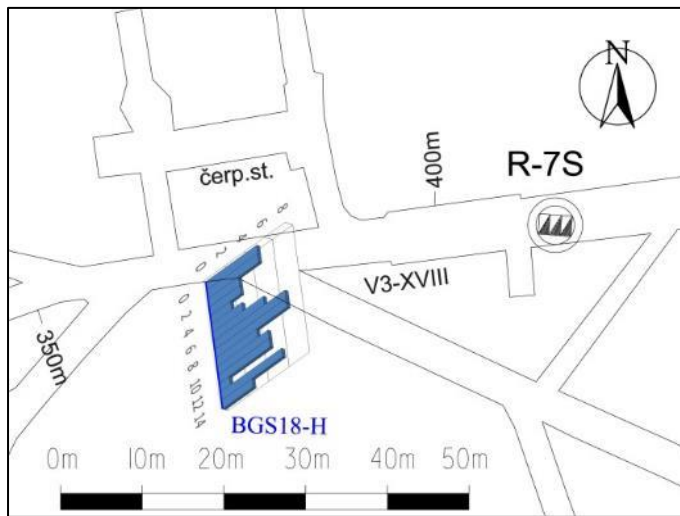
2.4.7.4.3 Charakterizace EDZ analýzou orientovaných obrazů stěn průzkumných vrtů

Studium změn porušenosti HM v závislosti na vzdálenosti od líce výrubu důlního díla bylo provedeno na základě interpretace orientovaných záznamů stěn pořízených optickým televizorem (OPTV) v pěti horizontálních vrtech jednotlivých GS a v třech horizontálních vrtech umístěných mezi GS20/1 a GS20/2. Ve vrtu EDZ20-HA nebyl orientovaný záznam pořízen z důvodu velké nestability stěny předmětného vrtu, která byla nepochybně způsobena blízkostí první zóny.

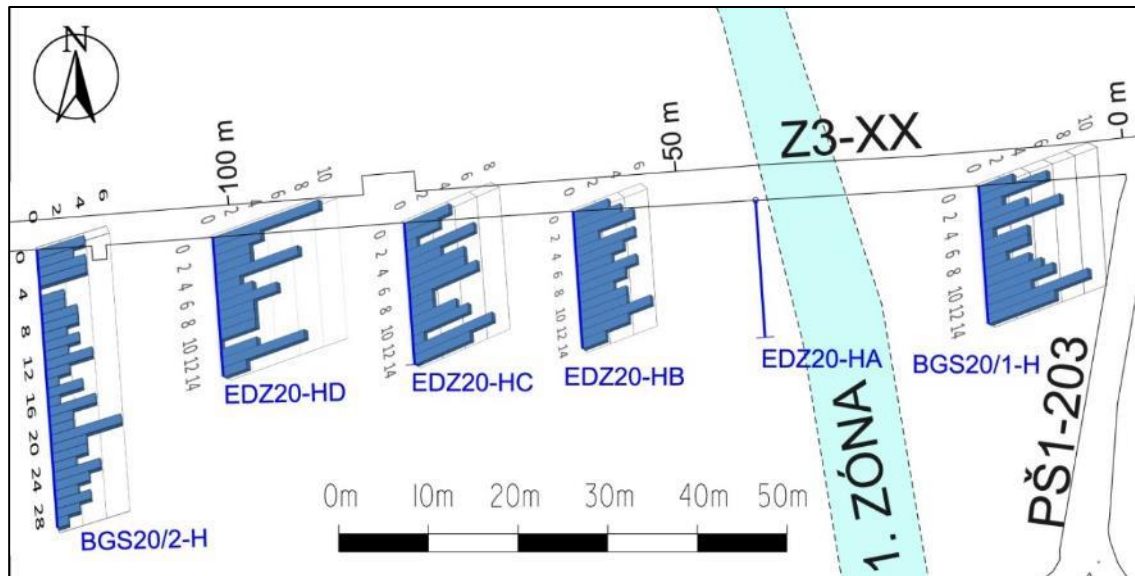
Veškeré strukturní prvky zachycené na stěnách průzkumných vrtů skenovaných karotážní sondou OPTV byly charakterizovány (hloubka, směr, úklon, výplň, mocnost) ve specializovaném modulu programu WellCAD. Dle použité metodiky (viz kapitola 2.4.1.2) byly pro studium porušenosti HM brány v úvahu všechny plochy nespojitosti (puklin), které byly interpretovány jako systém otevřených dislokací (OFS), podrcené zóny (CZS) a systém uzavřených dislokací (CFS). Z interpretovaných ploch nespojitosti (OFS+CZS+SFS) byly kalkulovány jejich frekvence výskytu na jeden metr záznamu, které byl podkladem pro sestavení histogramů. Závislosti porušení HM (četnost ploch nespojitosti) na vzdálenosti od líce výrubu důlního díla jsou přehledně graficky prezentovány v Obr. 564 až Obr. 570. Grafy frekvence výskytu ploch nespojitosti jsou také součástí profilů jednotlivých skenovaných vrtů (viz Elektronická příloha 25).



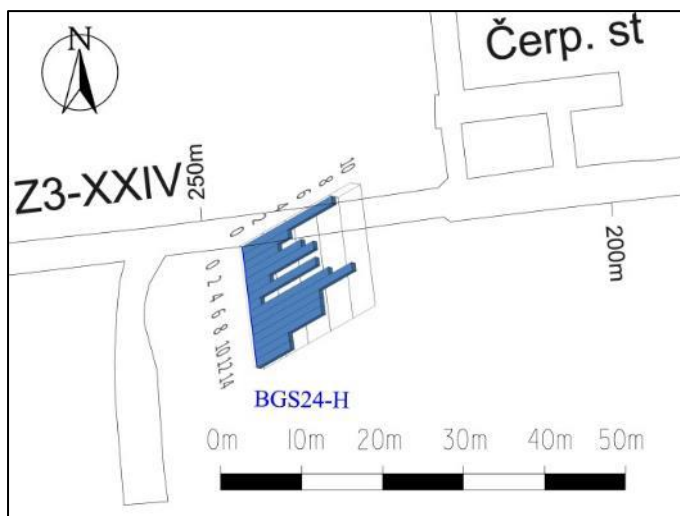
Obr. 564 Četnost puklin interpretovaných ze záznamu OPTV vrtu BGS12-H na 12. patře



Obr. 565 Četnost puklin interpretovaných ze záznamu OPTV vrtu BGS18-H na 18. patře



Obr. 566 Četnost puklin interpretovaných ze záznamů OPTV subhorizontálních vrtů na 20. patře

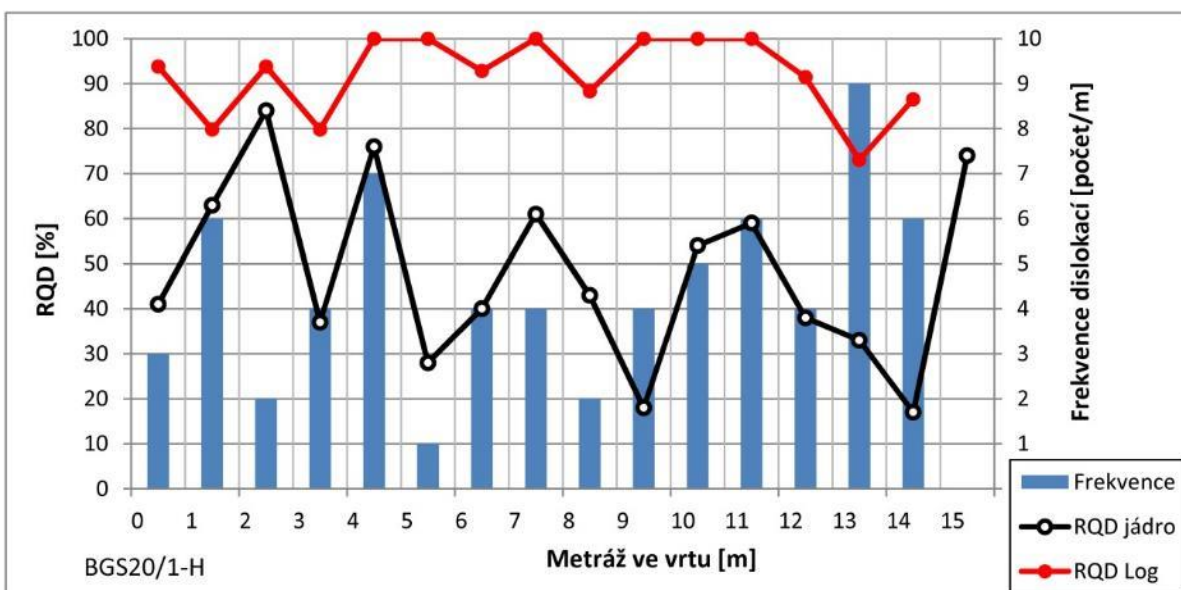
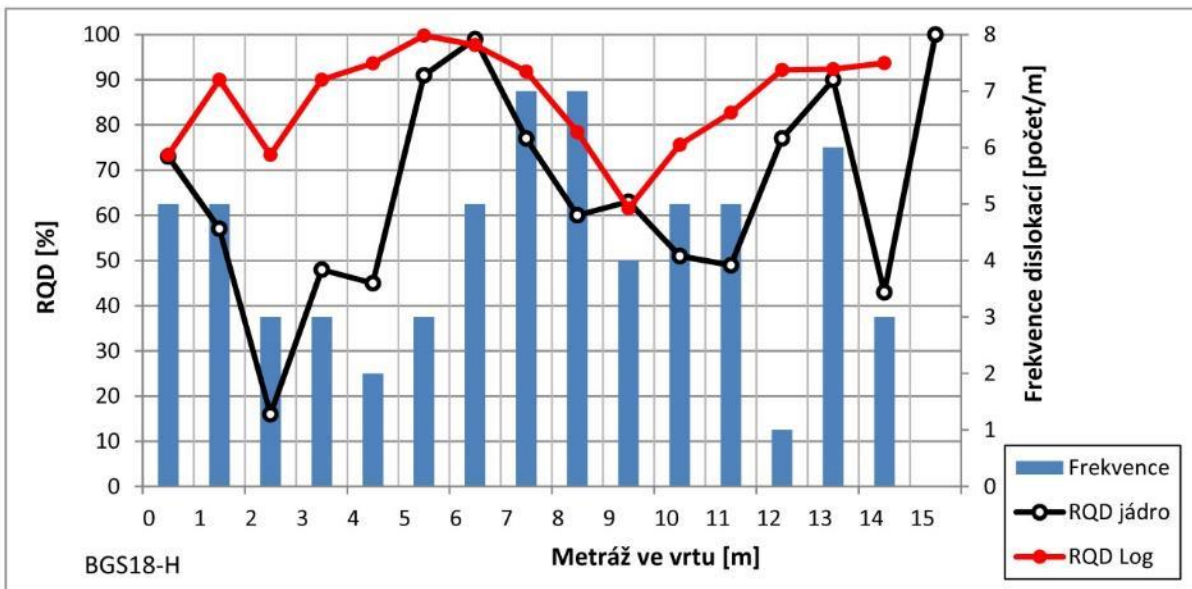
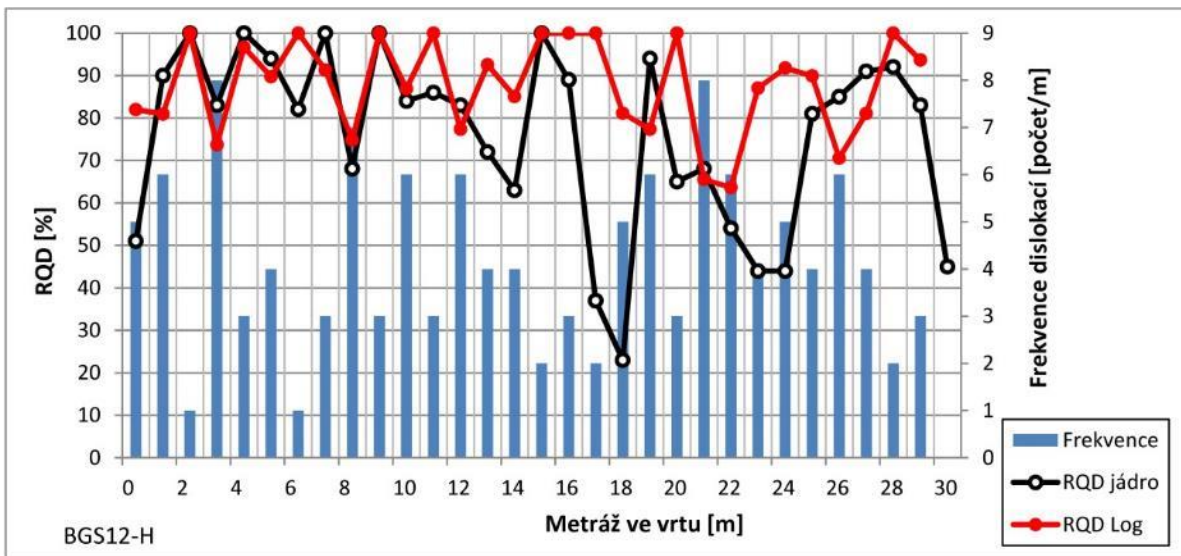


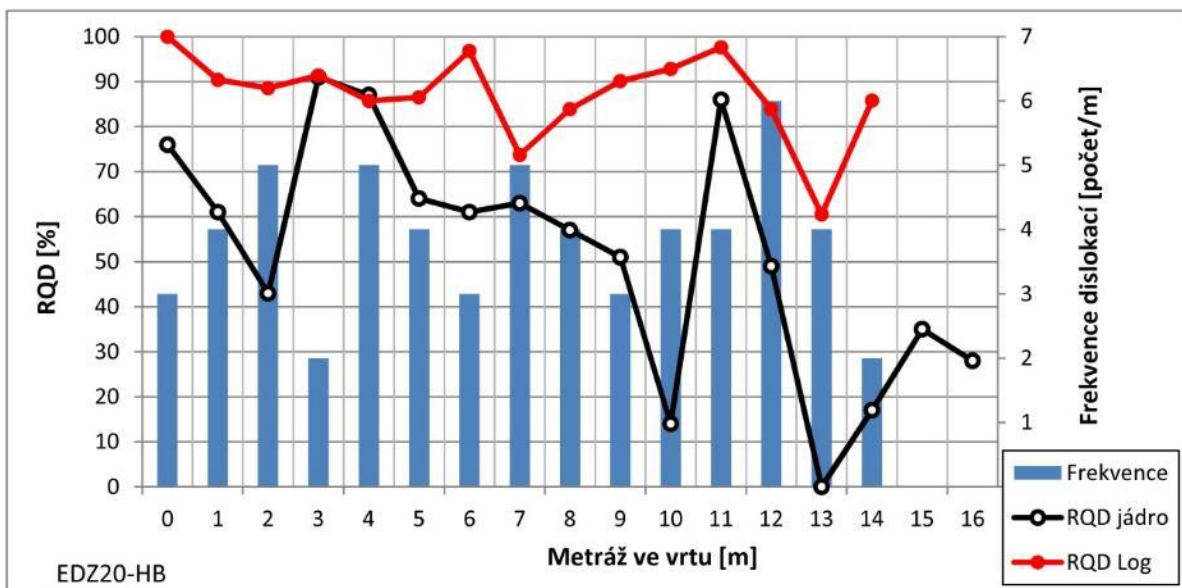
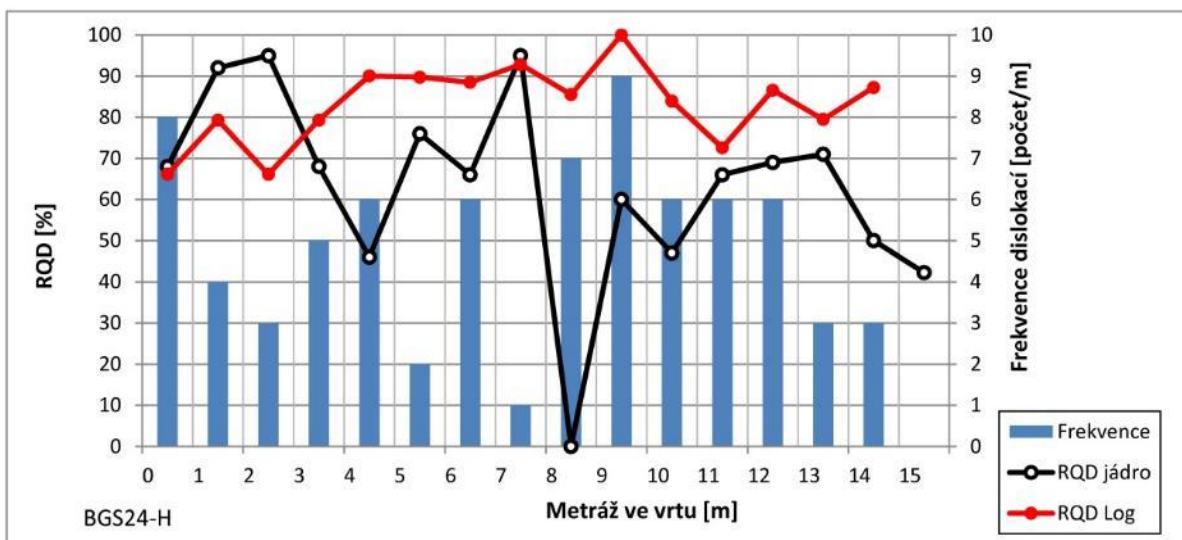
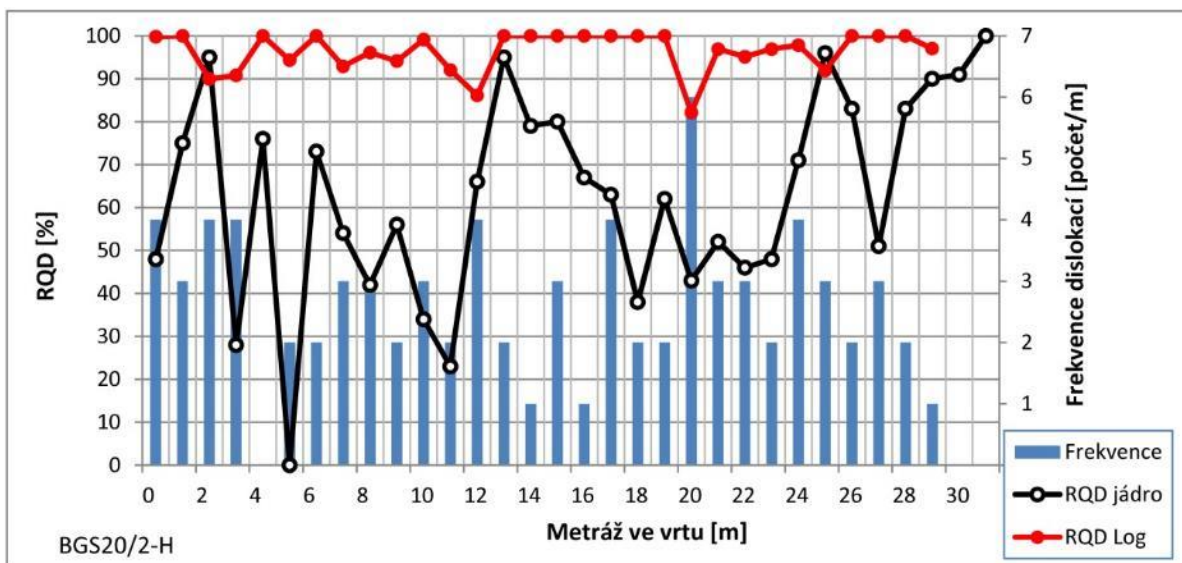
Obr. 567 Četnost puklin interpretovaných ze záznamu OPTV vrtu BGS24-H na 24. patře

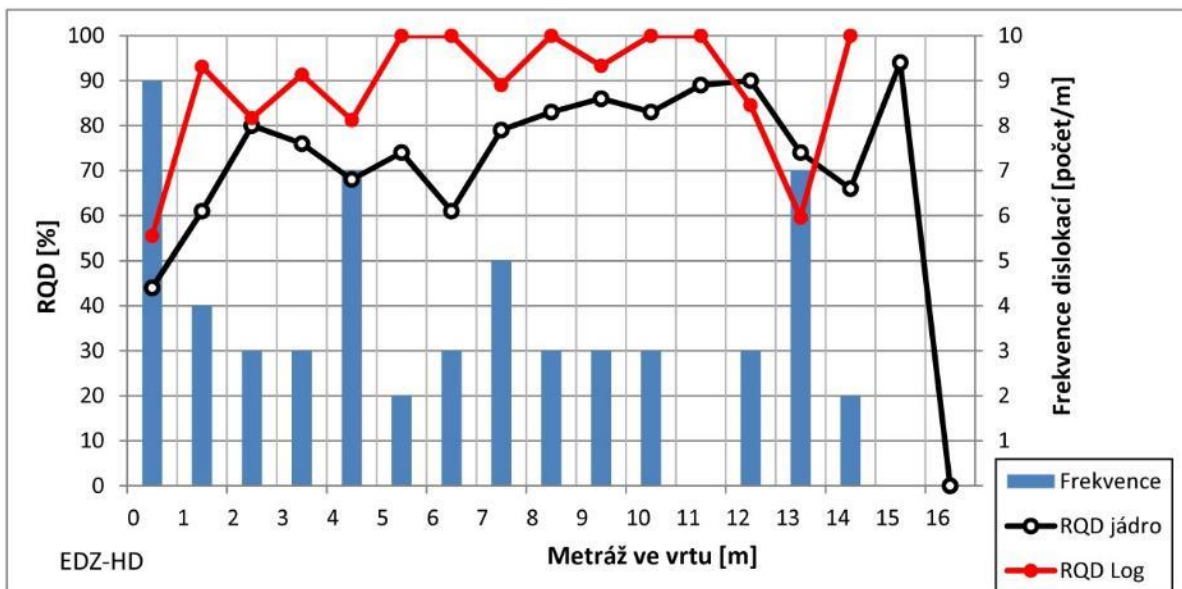
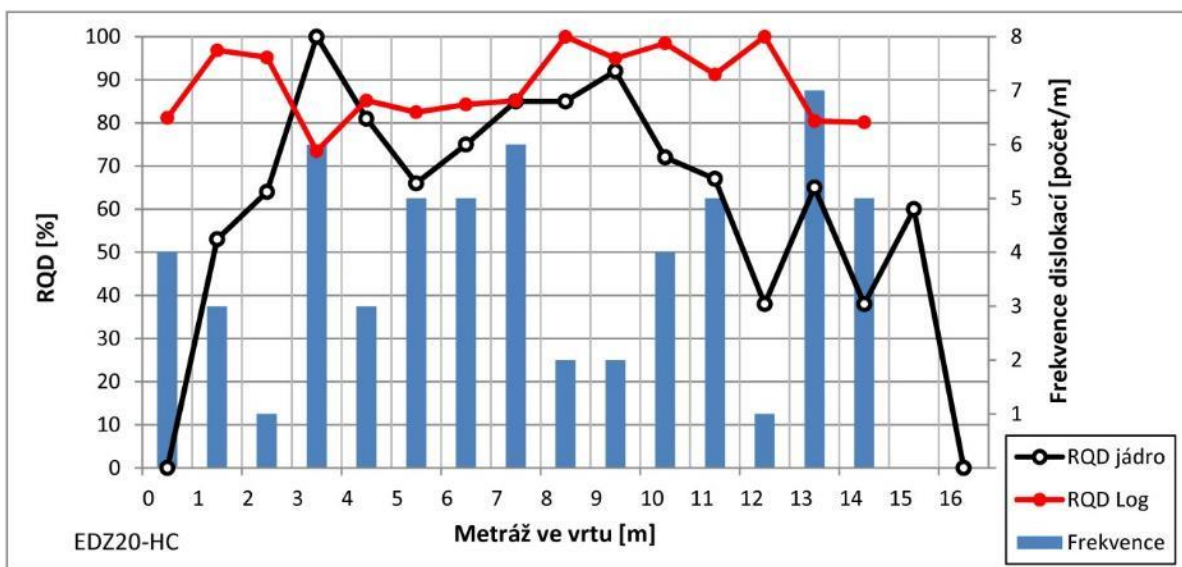
Z histogramů četnosti výskytu interpretovaných ploch nespojitosti je zřejmé, že téměř ve všech horizontálních vrtech byla zjištěna zvýšená porušenost HM v úseku přibližně do vzdálenosti 1 až 4 m od líce výrubu (BGS12-H – 4 m, BGS18-H – 2 m, BGS20/1-H – 2 m, BGS20/2-H – 4 m, EDZ20-HB – 3 m, EDZ20-HC – 2 m, EDZ20-HD – 1 m, BGS24-H – 1 m). Následně pak četnost puklin prudce klesá. Ovšem dále směrem do hloubky je porušenost HM vyvinuta zcela nepravidelně.

Podobně jako v úpadně vedených průzkumných vrtech (viz kapitola 2.4.1.1), jsou i v horizontálně vedených vrtech indexy RQD stanovené na vrtném jádře výrazně nižší než RQD určené pomocí struktur nespojitosti interpretovaných na stěnách vrtů (viz Obr. 568). Tato zjištění jsou plně v souladu s poznatky z jiných partií dolu Rožná (Vavro et al. 2015). Nepravidelný průběh indexů RQD ve vztahu ke vzdálenosti od líce výrubu potvrzují, že jak stanovené hodnoty četnosti puklin, tak samotné hodnoty indexu RQD spíše reflektují lokální stupeň tektonického postižení horninového masívu než oblast ovlivnění masívu v okolí důlního díla vzniklou v důsledku jeho ražby.

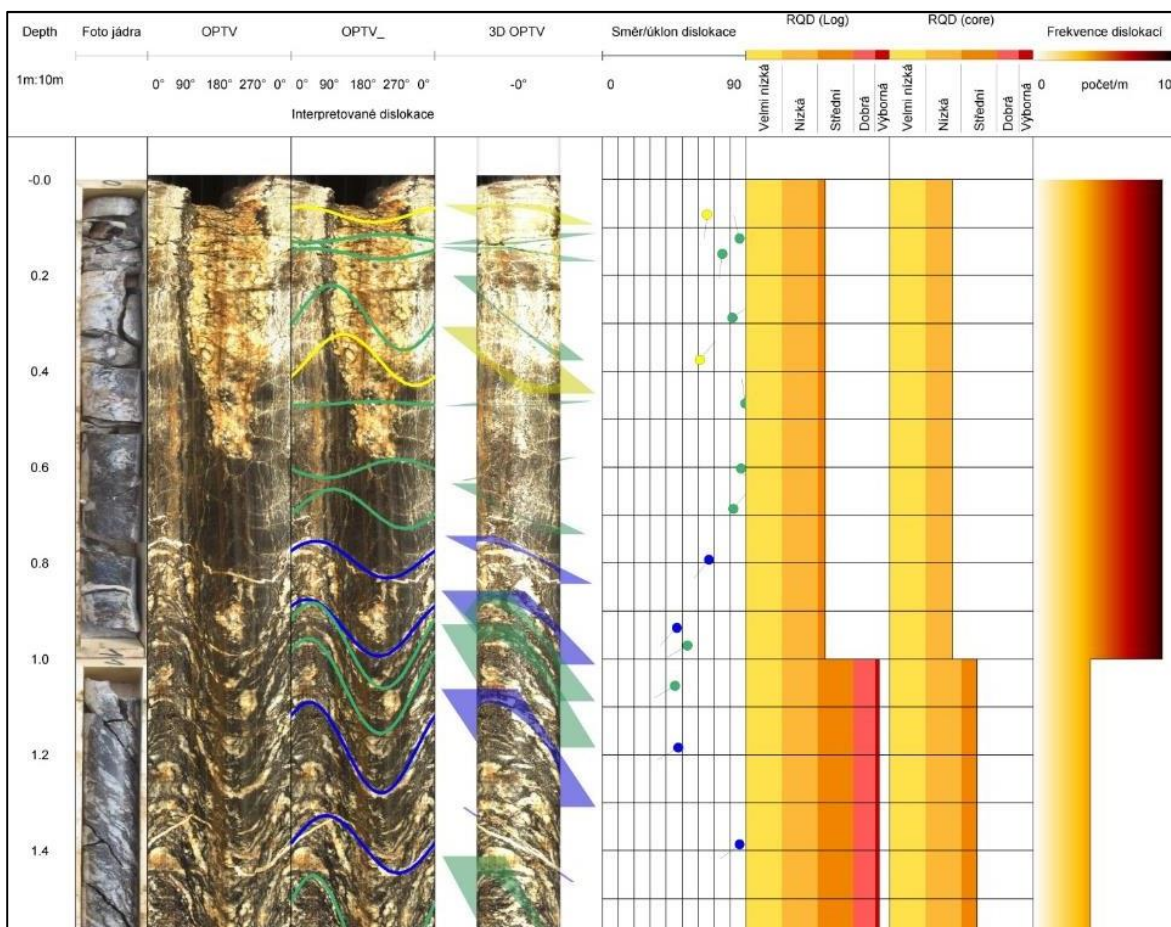
Jak vyplývá ze strukturně-geologického hodnocení HM provedeného na základě interpretovaných struktur orientovaných záznamů, je většina interpretovaných ploch nespojitosti (OFS+CZS+SFS) predisponována metamorfní foliací, případně sekundárními výplněmi (viz kapitola 2.4.1). Téměř ve všech horizontálních vrtech, byly v prvním metru od líce výrubu identifikovány výrazné plochy nespojitosti (viz Elektronická příloha 25). Jedná se o otevřené případně uzavřené pukliny (OFS, CZS) bez sekundárních výplní, které jsou přibližně paralelní s bokem chodby (viz Obr. 569). Vzhledem k charakteru těchto puklin se nepochybně jedná o extenzní pukliny, jejichž vznik souvisí s procesy při ražbě předmětného důlního díla, tedy i s vytvářením EDZ. Jak vyplývá z orientovaných záznamů (viz Elektronická příloha 25) je hloubkový dosah interpretovaných extenzních puklin ve všech horizontálních vrtech velice podobný a pohybuje se v rozmezí 0,2 až 0,8 m (BGS12-H – 0,6 m, BGS18-H – 0,2 m, BGS20/1-H – 0,4 m, BGS20/2-H – nezachyceno, EDZ20-HB – 0,5 m, EDZ20-HC – 0,2 m, EDZ20-HD – 0,6 m, BGS24-H – 0,8 m). Dále s větší vzdáleností od líce výrubu chodbu již převládají pukliny, které jsou predisponovány vnitřní strukturou HM, tedy metamorfní foliací (viz Obr. 569). Extenzní pukliny shodného charakteru, byly také zachyceny v rámci odběru velkoobjemových vzorků v jednotlivých široko-průměrových vrtech (viz Obr. 570).







Obr. 568 Srovnání RQD indexů stanovených na vrtném jádře s RQD indexy stanovenými ze záznamu OPTV (log) v horizontálních vrtech GS na 12., 18., 20. a 24. patře



Obr. 569 Příklad extenzních puklin – profil vrtu EDZ20-HD (viz Elektronická příloha 25)



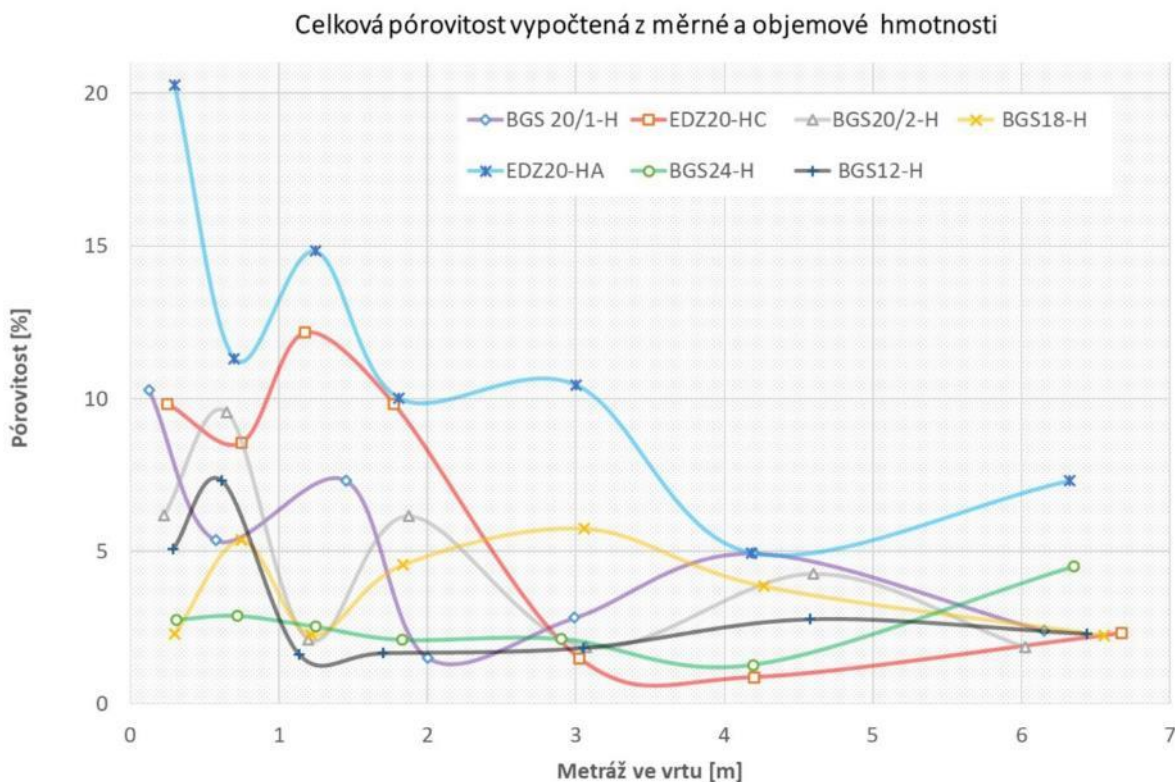
Obr. 570 Příklad extenzních puklin – 18. p. širokopřeměrový vrt V18-2

2.4.7.4.4 Sumarizace výsledků týkajících se problematiky EDZ

Ve vztahu k problematice rozvoje EDZ jsou v této podkapitole sumarizovány a použity výsledky prací uvedených v předešlých kapitolách této závěrečné zprávy projektu:

Výzkum změn FMV v závislosti na vzdálenosti od líce výrubu důlního díla (kap. 2.4.7.4.1)

Jak vyplývá z výsledků studia vybraných FMV v sedmi definovaných odběrných úrovních ve vrtech BGS12-H, BGS18-H, BGS20/1-H, EDZ20-HA, EDZ20-HC a BGS24-H, jedinou z těchto vlastností, která mohla být s ohledem na stav jádra stanovena ve všech 49 testovaných pozicích, je celková pórovitost. Na Obr. 571 jsou prezentovány profily hodnot celkové pórovitosti pro jednotlivé EDZ vrty. BGS20/1 –H



Obr. 571 Rozložení hodnot pórovitosti hornin zastižených horizontálními geotechnickými vrty v závislosti na vzdálenosti od líce výrubu

Jak vyplývá z Obr. 571, u většiny vrtů se první oblast se zvýšenou pórovitostí nachází ve vzdálenosti cca do 2 m od líce výrubu, u některých vrtů (např. BGS20/1-H nebo BGS20/2-H) je pak viditelná i druhá „zóna“ vyšších hodnot pórovitosti, a to zhruba mezi 4–5 metry od líce výrubu. Na druhé straně, ale existují vrty (typicky např. BGS24-H), u nichž v celém úseku posuzovaných přibližně 6–7 m od líce výrubu nebyla zjištěna žádná zásadní proměnlivost v celkové pórovitosti a hodnoty se pohybují v poměrně úzkém rozpětí mezi cca 2–4%. Nejvyšší

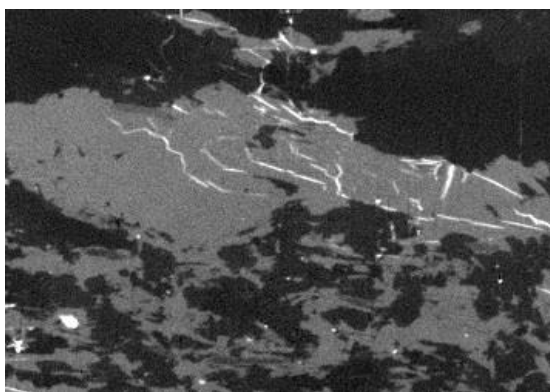
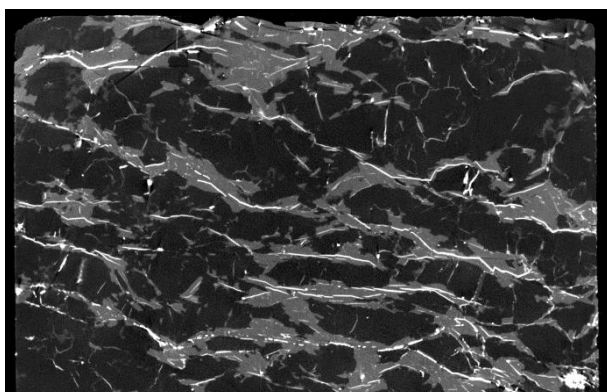
celková pórovitost byla, vcelku logicky, zjištěna ve vrtu EDZ20-HA. Z tohoto pohledu jsou zjištěné trendy v prostorovém rozložení celkové pórovitosti velmi podobné poznatkům získaným při studiu pórovitosti pomocí RTG μ -CT a MIP (viz dále). Lze tedy vyslovit názor, že stanovené hodnoty celkové pórovitosti spíše reflektují lokální stupeň tektonického postižení horninového masívu, zejména lokalizaci vrtů vůči tzv. první zóně než aby pomocí nich bylo možno vymezit oblast ovlivnění masívu v okolí důlního díla vzniklou v důsledku jeho ražby.

Charakterizace pórového prostoru pomocí RTG μ -CT a MIP v EDZ vrtech (kap. 2.4.7.4.2)

Většina naměřených hodnot pórovitosti stanovené pomocí MIP se pohybuje v rozmezí cca 0,3–0,8 %, cca 22 % ze všech hodnot pórovitosti se ale nachází nad tímto intervalem, špičkově pak pórovitosti dosahují hodnot 2,0 až 3,5 %. Vyšší hodnoty pórovitosti (cca nad 1 %) byly generálně naměřeny u horizontálního vrtu EDZ20-HA. Na základě zhodnocení vývoje hodnot pórovitosti stanovených pomocí MIP lze konstatovat, že první skupina zvýšených hodnot pórovitostí (cca vyšší než 1 %) se u některých vrtů (EDZ20-HA, EDZ20-HC a BGS20/2-H) nachází do vzdálenosti cca 2 m od líce výrubu, druhá skupina pak v oblasti okolo 4 m od líce výrubu. Tato skutečnost je však způsobena, dle našeho názoru, spíše vlastním primárním stavem kvality horniny v těchto vrtech, než sekundárním ovlivněním zónou porušení (EDZ). U některých dalších vrtů (BGS18-H, BGS20/2-H nebo BGS24-H) totiž žádná zásadní variabilita hodnot pórovitosti v profilu vrtným jádrem nebyla zjištěna, jak je patrné z grafu v kapitole 2.4.7.4.2. Měření pórovitosti pomocí MIP přímo neprokázalo zjevnou souvislost k tomuto geomechanickému fenoménu. Vyšší hodnoty pórovitostí byly naměřeny u vrtů na 20. patře, jedná se o vrty EDZ20-HA, EDZ20-HC a BGS20/2-H, což může být pravděpodobně ovlivněno skutečností, že se tyto vrty nacházejí v nadloží výrazné geologické struktury, tj. první zóny.

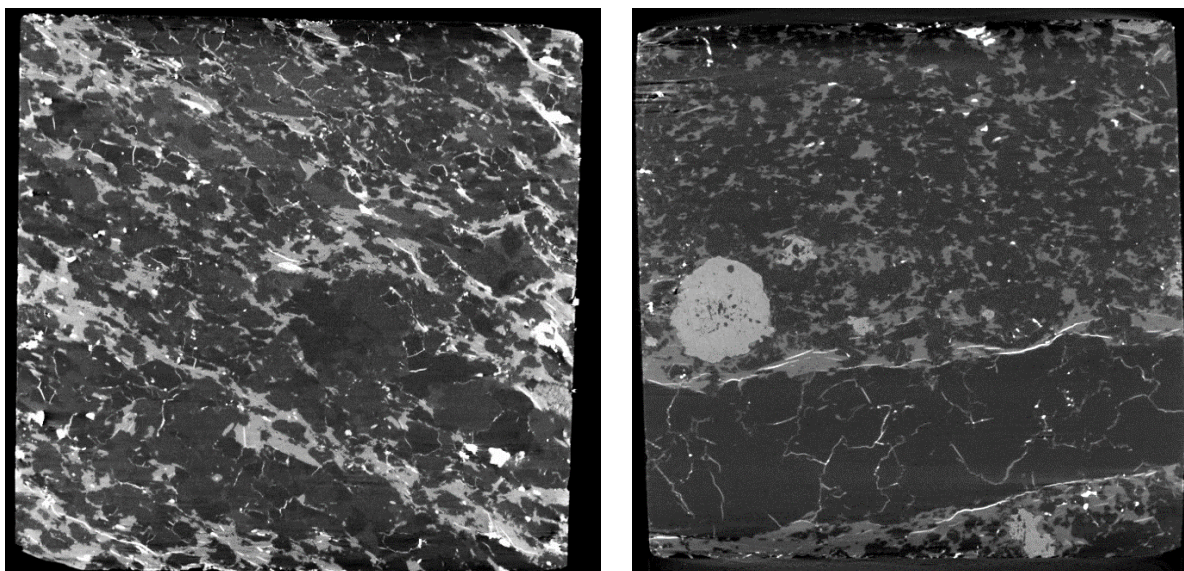
Součástí této kapitoly je rovněž základní charakteristika pórového prostoru jako informace přímo související s měřením pórovitosti pomocí MIP. Na základě studia identických tomografických řezů zkušebních těles před a po provedené vysokotlaké rtuťové porozimetrii lze rozlišit pět druhů pórového prostoru na základě jeho lokalizace v zrnech minerálů a celkového vzhledu. Rtuť je v tomografických řezech zkušebního tělíska reprezentována bílou barvou. Jedná se především tyto typy pórového prostoru:

1. V převážné části analyzovaných tělísek se jedná o efektivní pórový prostor trhlinového typu, který sleduje převážně foliační stavbu a strukturu horninu, pórový prostor je převážně lokalizován v biotitových zrnech se štěpnými trhlinami (viz Obr. 572).



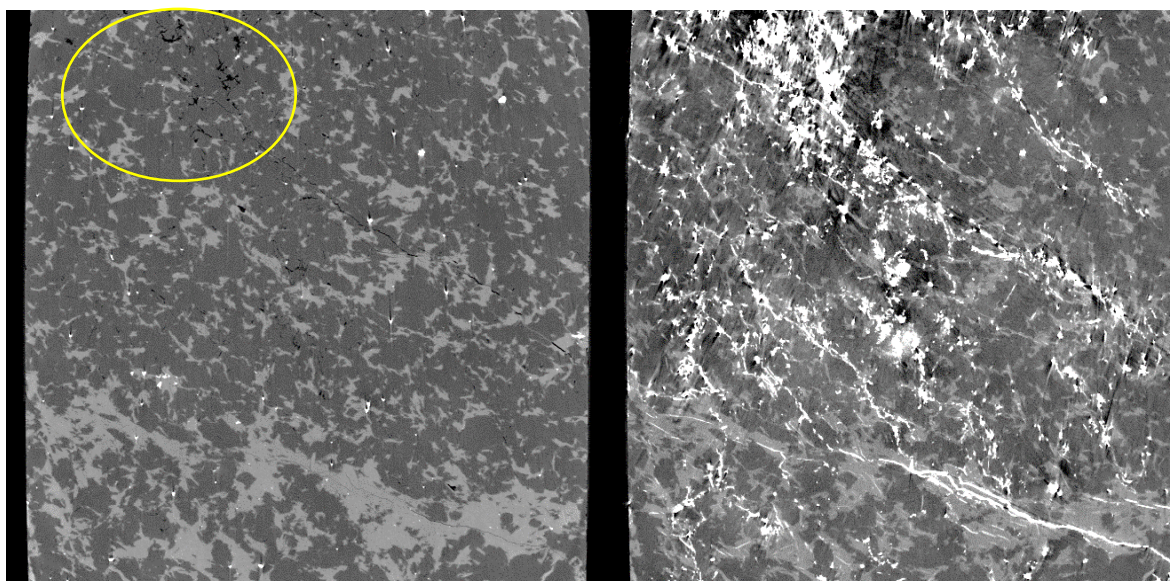
Obr. 572 Dokumentační tomografické řezy prvního typu pórového prostoru

2. Druhý, také rozšířený typ pórového prostoru, je rovněž trhlinového typu, ale je formován v oblastech horniny zobrazovaných tmavšími úrovněmi šedi (živce a křemen). Jedná se jak o trhlinky na kontaktu zrn, tak trhlinky v zrnech samotných (pravděpodobně živce), viz Obr. 573.



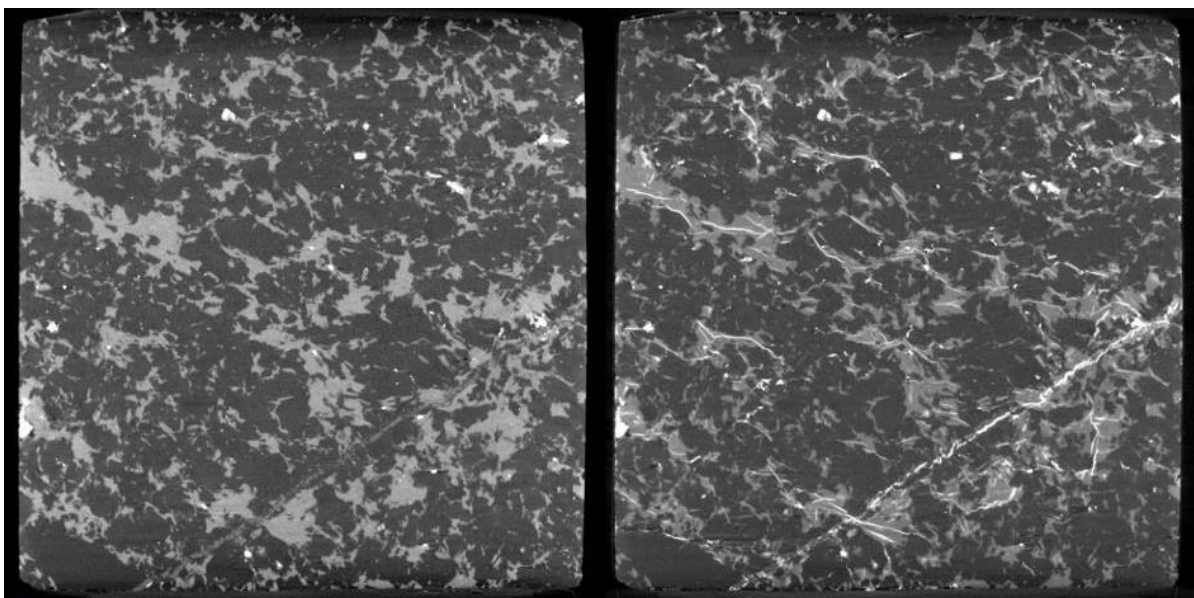
Obr. 573 Dokumentační tomografické řezy druhého typu pórového prostoru

3. Třetí typ, velmi zřídka se vyskytující, je znázorněn na Obr. 574, kde komunikační (efektivní) pórový prostor je reprezentován viditelnými bodovými póry na referenčním CT řezu (vlevo), které jsou propojeny s trhlinovým pórovým systémem.



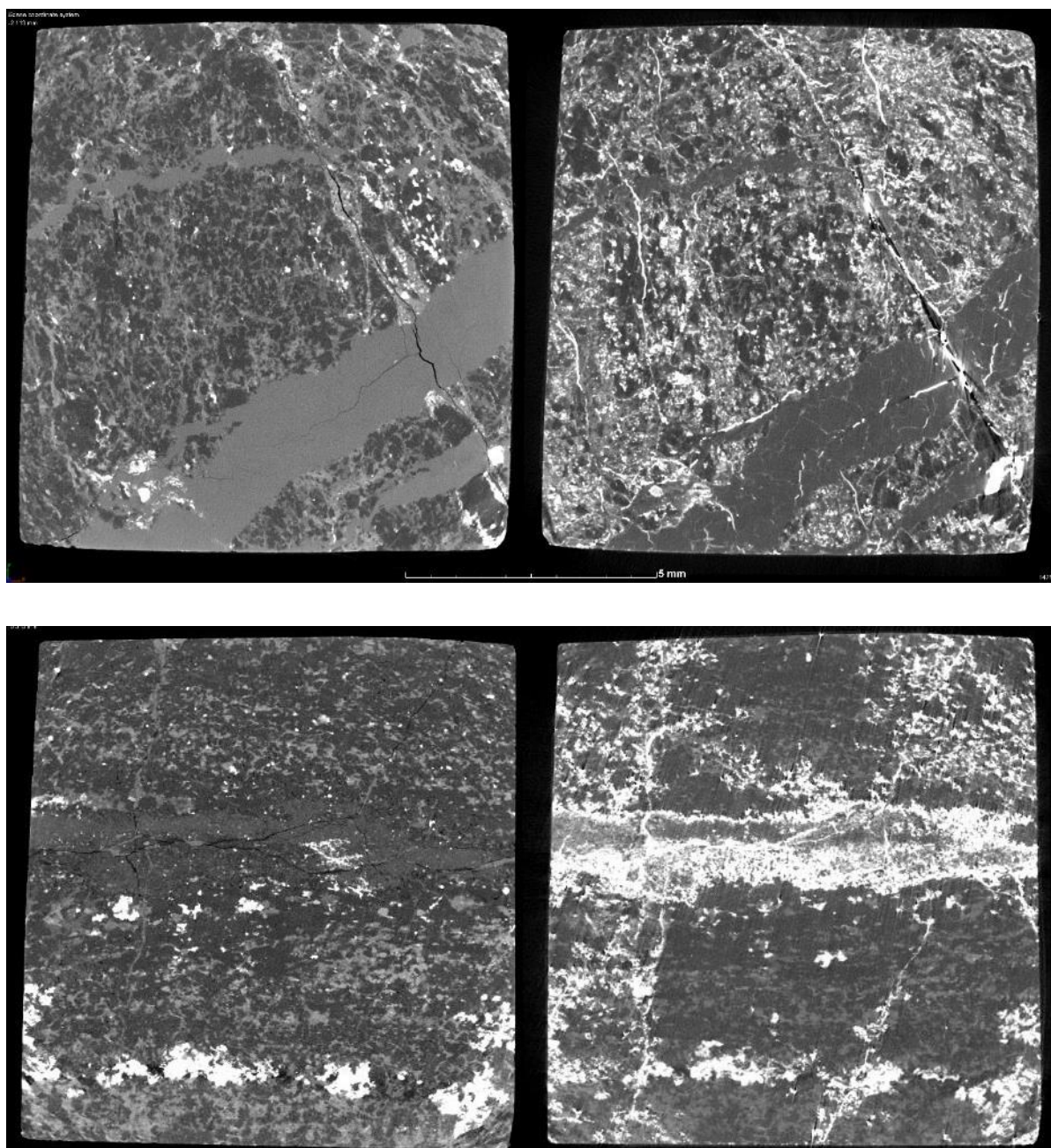
Obr. 574 Dokumentační tomografické řezy třetího typu pórového prostoru

4. Čtvrtý typ pórového prostoru je napojen na lineární struktury probíhající napříč matricí horniny, s velkou pravděpodobností se jedná o vyhojené pukliny, u kterých se na jejich kontaktech s okolní matricí horniny, popřípadě uvnitř pukliny, nachází komunikační pórový systém (prostor), viz Obr. 575.



Obr. 575 Dokumentační tomografické řezy čtvrtého typu pórového prostoru

5. Pátý typ pórového prostoru je nejkomplicovanější, je to víceméně kombinace všech výše uvedených typů a lze konstatovat, že se vyskytuje převážně u vrtu EDZ20-HA, který je lokalizován v blízkosti první zóny. Vrt zastihl horninu, která je ještě stále ovlivněna geologickými procesy při jejím formování. Nejvíce ovlivněná hornina byla nalezena v prvních cca 2 – 3 metrech od líce výrubu. V této oblasti ovšem, spíše než na vliv vlastní EDZ na stav horniny, lze usuzovat právě na ovlivnění zónou R1, což v podstatě platí pro celý šestimetrový analyzovaný úsek vrtu EDZ20-HA. Z následujících obrázků je zřejmé, že pórový prostor je silně ovlivněn strukturou horniny. Pórový prostor je formován podél vyplněných puklin, jsou tu relativně časté výskyty otevřených puklin oproti ostatním vrtům a velice často se vytvářejí shluky pórů v zrnech horniny. V jednom případě byla nalezena vysoce propustná jemnozrnná oblast horniny kolem otevřené pukliny s viditelnými bodovými póry i na referenčním CT řezu (viz Obr. 576).

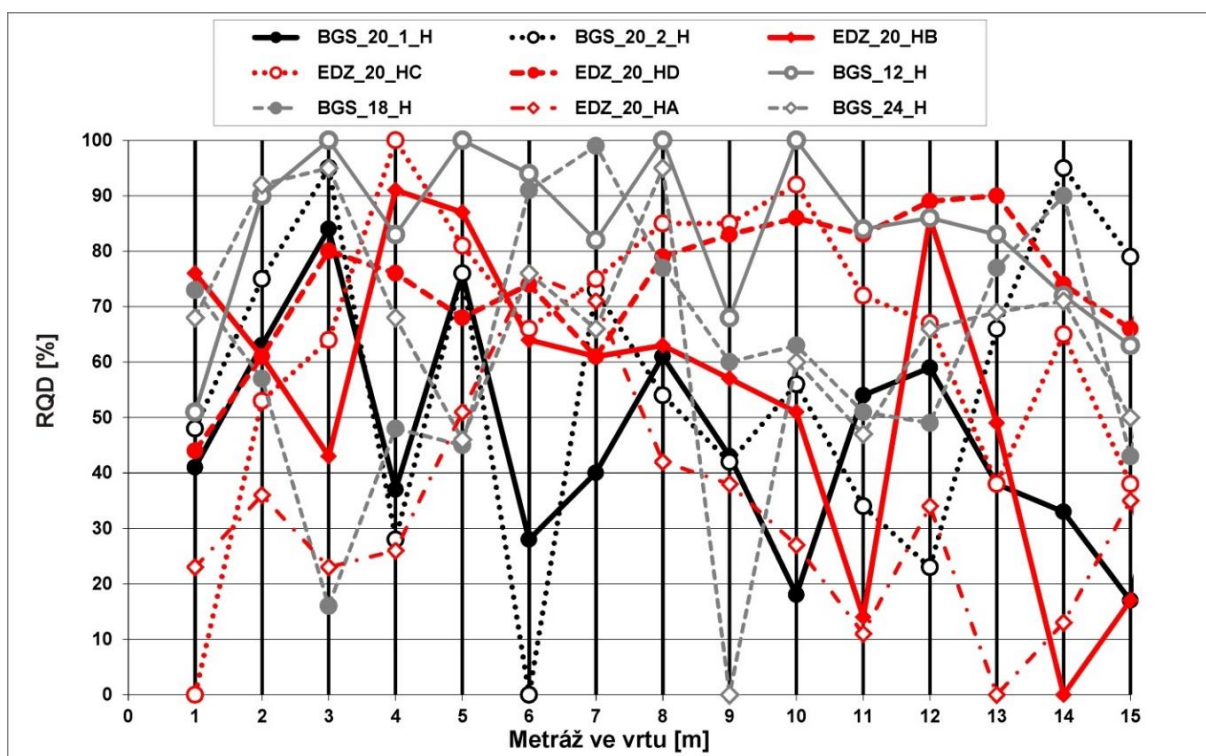


Obr. 576 Dokumentační tomografické řezy pátého typu pórového prostoru

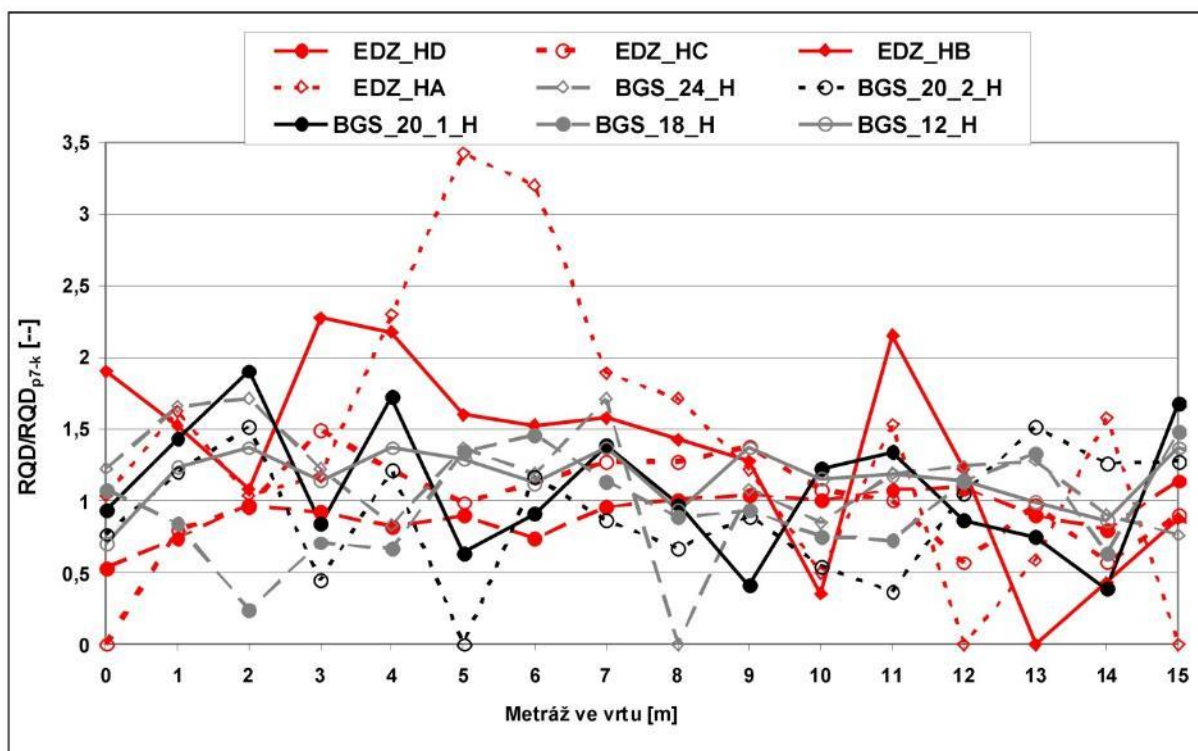
Stanovení kvality hornin vrtného jádra pomocí parametru RQD (kapitola 2.4.1.1)

Výsledné délkové profily RQD indexů ze všech geotechnických vrtů na jednotlivých geotechnických stanicích ukázaly, že pravděpodobně z důvodu výrazného stupně tektonického porušení a heterogenity předmětného horninového masivu nelze tímto způsobem jednoznačně dedukovat rozsah zóny EDZ. Byly vyhodnoceny všechny profily RQD parametru na všech GS, které měly obdobný průběh jako na Obr. 577, kde jsou znázorněny RQD profily všech horizontálních vrtů. Z Obr. 577 je zřejmé, že hodnoty značně oscilují a nelze tak spolehlivě zhodnotit vliv EDZ na horninový masiv. Byly provedeny i další analýzy hodnot RQD parametru

například porovnáním hodnot RQD v jednotlivých metrech k průměrné hodnotě RQD_{p7-k} odpovídající vzdálenější oblasti HM ve vrtu (od 7 m k čelbě vrtu) to proto, aby se zřetelněji prokázalo ovlivnění EDZ v oblasti HM přilehlého k důlní chodbě. Tyto analýzy, ale rovněž neumožňují zhodnotit vliv stárí a samotných ražeb na stav horninového masivu vzhledem k nejednoznačnému vývoji hodnot tohoto normovaného RQD parametru. Příklad takové analýzy pro RQD profily všech horizontálních vrtů je znázorněn na Obr. 578. Dá se tedy konstatovat, že na základě srovnání průběhu hodnot RQD v části horninového masivu v blízkém okolí chodeb (tj. v úseku cca do 7 m od ústí vrtu, resp. od líce výrubu) nebyly pozorovány žádné výrazné rozdíly ve srovnání s vývojem tohoto geotechnického parametru ve vrtech v oblasti masivu mimo teoretický dosah EDZ (tj. od 7 metrů až po čelbu vrtu).



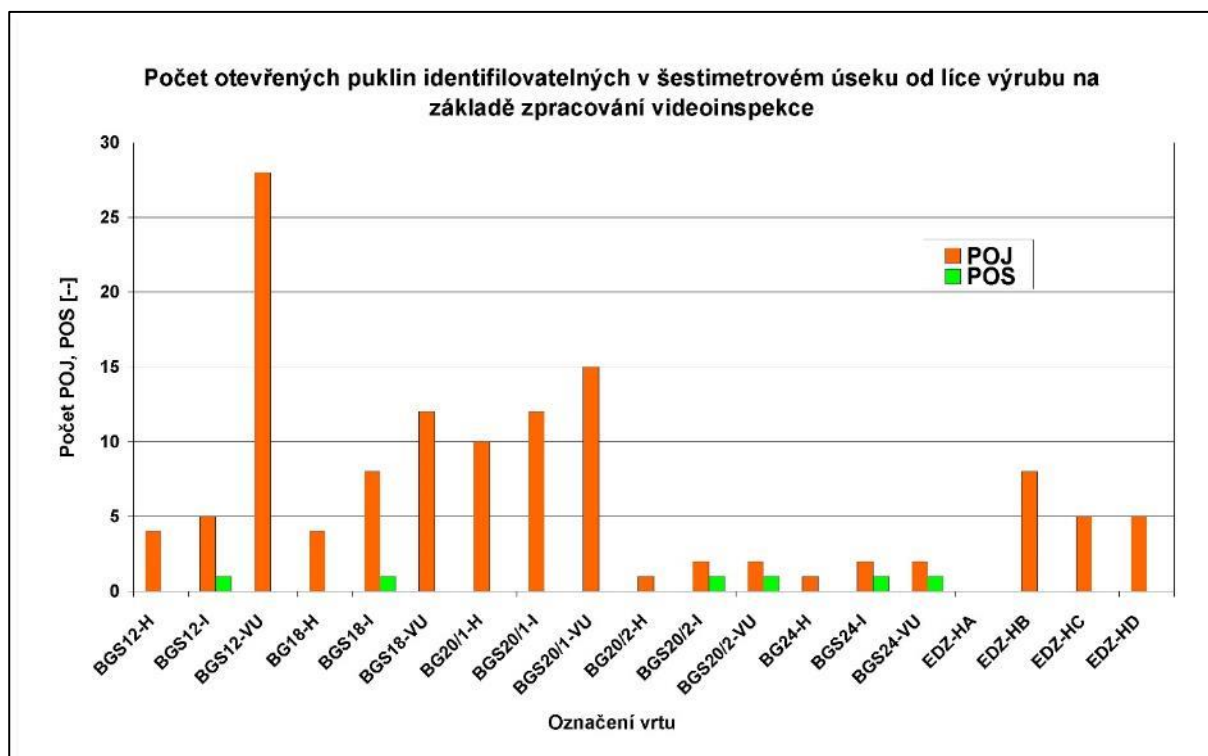
Obr. 577 Profily indexu RQD pro všechny horizontální geotechnické vrty (pozn.: pro všechny vrty je zobrazena metráž 0–15 metrů, číslo 1 na ose x reprezentuje úsek 0–1 m, číslo 2 pak úsek 1–2 m atd.



Obr. 578 Profily znormované hodnoty RQD indexu v jednotlivých metrech průměrnou hodnotou RQD_{p7-k} pro všechny horizontální geotechnické vrty (pozn.: pro všechny vrty je zobrazena metráž 0–15 metrů, číslo 1 na ose x reprezentuje úsek 0–1 m, číslo 2 pak úsek 1–2 m atd.).

Stanovení porušenosti horninového masivu z analýz videoinspekcí (kapitola 2.4.1.2)

Z hodnocení záznamu videoinspekcí geotechnických vrtů na všech geotechnických stanicích, v šestimetrovém úseku od líce výrubu byl vyhodnocen počet otevřených puklin „POJ“, popř. počet úseků se systémem otevřených puklin „POS“. Nejmenší počet identifikovatelných otevřených puklin v hodnoceném intervalu vykazují vrty na GS24, GS20/2 a dále dva vrty na GS12 (BGS12-H a BGS12-I) a jeden vrt na GS18 (BGS18-H). Nejvyšší počet POJ, mají naopak vrty na GS20/1 které jsou v podloží první zóny a kvalita HM zde může být ovlivněna přítomností této struktury. Vysoké počty nalezených puklin byly pozorovány i ve dvou dovrchních vrtech na GS12 a GS20/1, které mohou být způsobeny rozvojem napěťovo-deformačních procesů (rozvolnění horniny) v klenbě důlní chodby. Rovněž vrty EDZ nevykazují zvýšené počty POJ, pouze o něco vyšší hodnota byla nalezena u vrtu EDZ20-HB, který se nachází o něco blíže první zóně. Systémy otevřených puklin byly v hodnoceném úseku u všech geotechnických vrtů pozorovány pouze sporadicky (Obr. 579).



Obr. 579 Počet otevřených puklin POJ a systémů otevřených puklin POS v šestimetrovém úseku od líce výrubu

Stanovení porušenosti horninového masivu z analýz záznamů stěn vrtů (viz kapitola 2.4.1.2)

Vzhledem k charakteru měření pomocí karotážních sond OPTV a HiRAT (viz 2.4.1.2) bylo možné posoudit rozsah zóny poškození výrubem (EDZ) jen na základě interpretací struktur v horizontálně vedených vrtech, tedy v boku důlního díla. V úpadně vedených vrtech díky instalované kovové úvodní pažnici bylo měření prováděno zpravidla až od hloubky cca 1,5 m, což znemožnilo interpretovat strukturální prvky v těsné blízkosti počvy důlního díla, tedy v předpokládané zóně EDZ. Z orientovaných záznamů stěn lze na základě interpretovaných extenzních puklin usuzovat na poměrně mělký hloubkový dosah EDZ v boku důlního díla. Jak již bylo uvedeno, hloubkový dosah interpretovaných extenzních puklin je ve všech horizontálních vrtech velice podobný a pohybuje se v rozmezí 0,2 až 0,8 m. Tyto hodnoty dobře korelují s rychlostními tomografickými řezy, z kterých lze interpretovat zóny s relativně zvýšeným porušením HM v okolí chodeb. V průzkumném vrtu BGS12-H byly extenzní pukliny interpretovány do vzdálenosti 0,6 m od líce výrubu chodby, což koreluje s nárůstem seismických rychlostí v hloubce cca 1 m. Podobně v tomografickém řezu z 18. patra je v linii horizontálního vrtu BGS18-H nárůst rychlostí interpretován již v hloubce 40 cm v porovnání s interpretovanými extenzními puklinami do hloubky 0,2 m. Na 20. patře lze srovnat hodnoty zóny poškození výrubem EDZ pouze západně od vrtu EDZ20-HB, neboť jak z hodnot indexů RQD, tak z interpretovaných seismických rychlostí lze přibližně do úrovně této linie usuzovat na významnější vliv první zóny na porušení masivu. V horizontálních vrtech EDZ20-HC, EDZ20-HD a BGS20/2-H jsou interpretované extenzní pukliny zachyceny v hloubkách 0,2 až 0,6 m. Ve srovnatelné partii tomografických řezů na 20. patře, jsou snížené hodnoty seismických rychlostí patrné do hloubky cca 1 m až 2 m od líce výrubu chodby Z3-XX. Podobně korelují interpretace na 24. patře, kde je

hlubkový dosah interpretovaných extenzních puklin 0,8 m a snížené seizmické rychlosti v úrovni vrtu BGS24-H do hloubky cca 1 m od líce výrubu chodby.

2.4.7.5 Rozsah a charakter EDZ stanovený v prostoru mezi vrty a důlními díly – geofyzikální práce

2.4.7.5.1 Měření mezi vrty na geotechnických stanicích

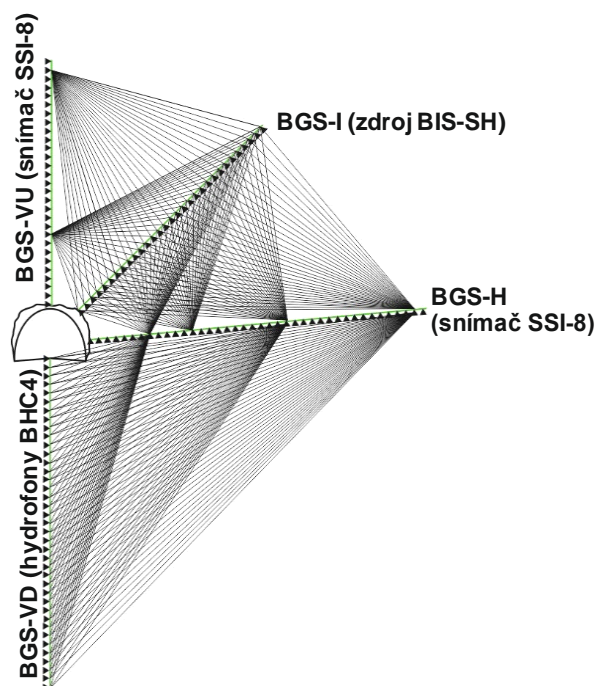
Rozsáhlou část prací tvořilo stanovení stavu a charakteru horninového masivu v prostředí mezi vrty na jednotlivých geotechnických stanicích provedené pomocí seizmické tomografie. Na každé stanici byly využity všechny čtyři vrty pro instalaci snímačů nebo zdrojů seizmické energie. Takto byly získány tři 2D rychlostní řezy, které charakterizují horninu z hlediska rychlostí šíření podélných seizmických vln.

Průzkum byl proveden s následujícím technickým vybavením:

- seismograf Terraloc PRO – 48 kanálů, registrace signálu ze snímačů ve vrtu (sonda SSI-8) a na stěně štol (výrobce ABEM, Švédsko);
- seismograf Terraloc MK6 – 24 kanálů, registrace signálu hydrofony ve vrtech;
- snímače rychlosti kmitání (geofony) osazené elementy SM-11 (Sensor, Holandsko) o vlastní frekvenci 30 Hz (stěny štol);
- vrtná sonda vlastní konstrukce SSI-8 osazená osmi trojosými snímači rychlosti kmitání s měřicími elementy OMNI-2400 (15 Hz) s krokem 0,5m;
- řetězec hydrofonů BHC4 s 24 snímači osazenými elementy AQ2000 s frekvenčním rozsahem 1–10 000 Hz (výrobce Geotomographie GmbH, Německo);
- elektrodynamický vrtný seizmický zdroj BIS-SH s pulsním generátorem IPG (Geotomographie GmbH, Německo);
- jako seizmický zdroj na stěnách a počvě byly použity úderky 2 kg úderníku do ocelové podložky.

Umístění snímačů a zdrojů bylo pro všechny stanice obdobné:

- vrty BGSXX-V(U) osazené elektrodynamickým vrtným seizmickým zdrojem BIS-SH s pulsním generátorem IPG (výrobce Geotomographie GmbH, Německo), krok měření 0,5 m pro hlubkový interval 0–5 m, krok 1 m pro hlubkový interval 5–15 m;
- vrty BGSXX-I použity pro snímací sondu SSI-8 (výroba INSET s.r.o.) osazenou osmi trojosými snímači rychlosti kmitání s měřicími elementy OMNI2400 (15 Hz) s krokem 0,5 m v celé délce vrtu;
- vrty BGSXX-H byly použity pro umístění zdroje seizmických vln, použit byl stejný zdroj jako pro vrty vertikální, krok měření 0,5 m pro hlubkový interval 0–5 m, krok 1 m pro hlubkový interval 5–15 m;
- vrty BGSXX-V(D) byly osazené řetězcem hydrofonů BHC4 s 24 snímači AQ2000 (výrobce Geotomographie GmbH, Německo);
- odkryté stěny štol v okolí vrtů byly osazené snímači s měřicími elementy SM-11 (30 Hz) ve vertikální a horizontální linii, krok snímačů byl volen 0,25–0,5 m.



Obr. 580 Schematické znázornění uspořádání pro měření seismické tomografie mezi vrty na geotechnických stanicích

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

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

Soubor získaných časů pro každou použitou dvojici zdroj – snímač tvoří spolu s prostorovými souřadnicemi zdroje a snímače vstupní data tomografického zpracování seismického měření. Tomografický výpočet rychlostního pole šíření seismických vln prostředím byl proveden v pravidelné pravoúhlé výpočetní síti s krokem 0,2 x 0,2 m. Jako nultý vstupní model pro iterační inverzní proces je možné použít prostředí s konstantní rychlostí v celé ploše nebo prostředí s gradientem rychlostí v okrajové části. Seismické paprsky, představující trajektorie šíření vysokofrekvenční složky seismického signálu, jsou v programu počítány jako dvojrozměrné zakřivené trajektorie v 2D rovině sledovaného řezu. Tato rovina je určena oběma použitými vrty, případě vrtem a linií snímačů umístěných na stěně štoly.

Geotechnická stanice GS20/1

Vypočtené rychlostní řezy pro jednotlivé dvojice vrtů jsou uvedeny v odpovídajících elektronických přílohách:

- Elektronická příloha 83 – řez mezi vrty BGS20-1-V(U) – BGS20-1-I;
- Elektronická příloha 84 – řez mezi vrty BGS20-1-I – BGS20-1-H;
- Elektronická příloha 85 – řez mezi vrty BGS20-1-H – BGS20-1-V(D);
- Elektronická příloha 86 – společné zobrazení rychlostních řezů pro GS20/1.

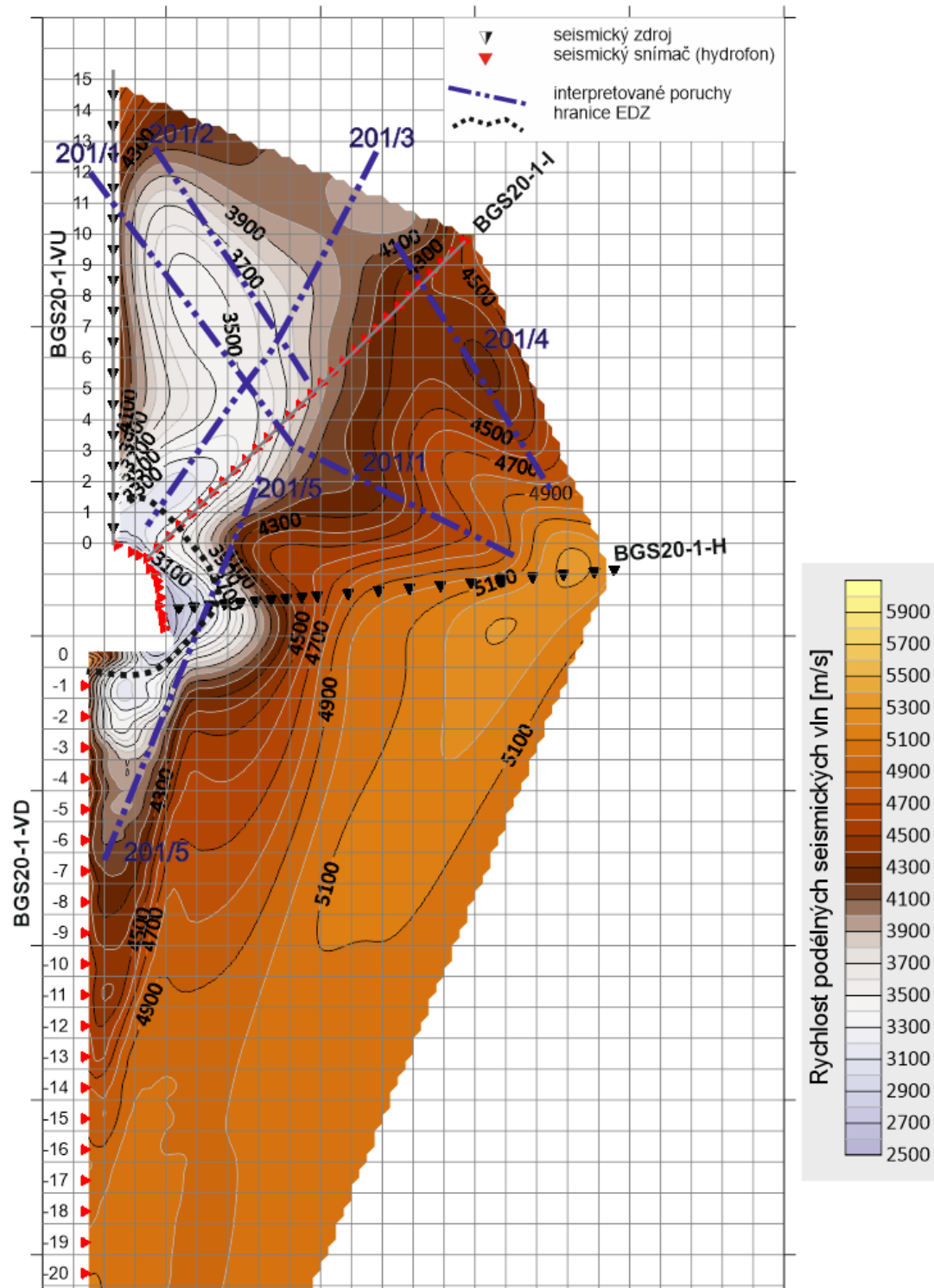
Nejvýraznější porušení horninového prostředí je podle rychlostních řezů zachyceno v prostoru mezi vrty BGS20-1-V(U) – BGS20-1-I. Podle Tab. 188 jsou průměrné i maximální hodnoty zhruba o 10–15 % nižší než v ostatních řezech na této geotechnické stanici. Vzhledem k tomu, že zejména vertikální vrt leží velmi blízko první zóny, je toto logické. Na základě rozložení rychlostí v řezu jsou interpretovány lokální porušení (zakresleny v příloze jako 201/1, 201/2, 201/3), nicméně v případě tohoto řezu je jejich zakreslení generalizující, prostředí je natolik porušené a hodnoty rychlostí tak nízké, že lokálních poruch bude ve skutečnosti velké množství.

V řezu mezi vrty BGS20-1-I – BGS20-1-H jsou již rychlosti o poznání vyšší a předpokládané porušení horninového masivu menší. V řezu jsou interpretovány poruchy 201/1 (pokračuje od vrtu BGS20-1-VU) a 201/4, které sledují lokální minima rychlostí. V blízkosti ústí vrtu je naznačena přítomnost poruchy 201/5, která je dále interpretována směrem k vrtu BGS20-1-VD.

Řez mezi vrty BGS20-1-H a BGS20-1-VD lze s ohledem na Tab. 188 označit jako prostředí s nejvyššími rychlostmi, a to zejména ve větších hloubkách vrtu BGS20-1-VD. V mělkých partiích vrtu BGS20-1-VD (0–5 m hloubky) jsou ovšem rychlosti také poměrně na nízkých hodnotách (3 500– 4 000 m/s) a horninový masiv je v této části rozpukaný.

Podle průběhu zjištěných seismických rychlostí je provedena v jednotlivých řezech také interpretace průběhu EDZ.

TOMOGRAFICKÝ RYCHLOSTNÍ ŘEZ GEOTECHNICKÁ STANICE GS 20/1



Obr. 581 Tomografický rychlostní řez, geotechnická stanice GS20/1 (Elektronická příloha 86)

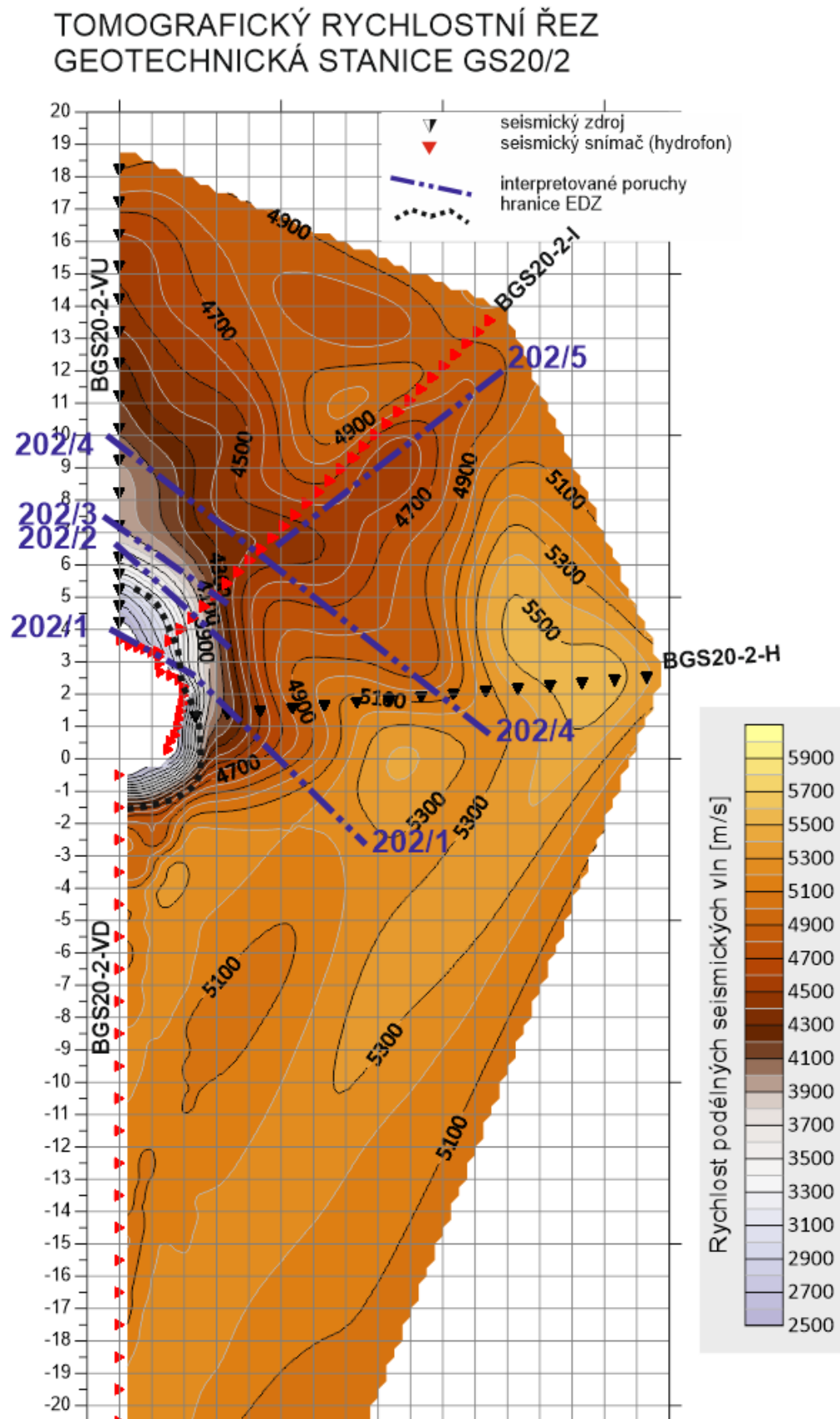
Geotechnická stanice GS20/2

Přiřazení vypočtených rychlostních řezů a příslušných elektronických příloh je následovné:

- Elektronická příloha 88 – řez mezi vrty BGS20-2-V(U) – BGS20-2-I;
- Elektronická příloha 89 – řez mezi vrty BGS20-2-I – BGS20-2-H;
- Elektronická příloha 90 – řez mezi vrty BGS20-2-H – BGS20-2-V(D);
- Elektronická příloha 91 – společné zobrazení rychlostních řezů pro GS20/21.

Nejvýraznější mechanické porušení hornin v okolí štoly je podle vypočtených řezů možné očekávat v prostoru mezi vrty BGS20-2-V(U) – BGS20-2-I, i když to není tak výrazně jako u vrtů na stanici GS20/1. Hodnoty rychlostí jsou nižší oproti zbývajícím dvěma řezům o méně než 10 %. Interpretované lokální poruchy 202/1, 202/2, 202/3 leží v nadloží štoly, více v masivu je lokalizována porucha 202/4, která je spolu s linií 202/1 interpretována i do sousedního řezu. V prostředí mezi vrty BGS20-2-I – BGS20-2-H je kromě struktur 202/1 a 202/4 interpretována linie 202/5, která je lokalizována přibližně ve směru vrtu BGS20-2-I a sleduje lokální snížení seismických rychlostí. Klidnější rychlostní pole je patrné na řezu získaném měřením mezi vrty BGS20-2-H – BGS20-2-V(D). V okolí vrtu BGS20-2-V(D) je patrný rychlý nástup relativně vysokých seismických rychlostí již v hloubce kolem 2 m. Znamky lokálních poruch 202/1 a 202/4 se postupně směrem do masivu ztrácí.

Interpretovaný ideový průběh dosahu EDZ je patrný z grafických příloh. V souladu s předpoklady je největší dosah do masivu v prostředí nad stropem štoly Z3-XX, tedy mezi vrty BGS20-2-V(U) – BGS20-2-I.



Obr. 582 Tomografický rychlostní řez, geotechnická stanice GS20/2 (Elektronická příloha 91)

Geotechnická stanice GS12

Vypočtené rychlostní 2D řezy pro dvojice průzkumných vrtů na geotechnické stanici GS12 jsou uvedeny v přílohách dle následujícího rozdělení:

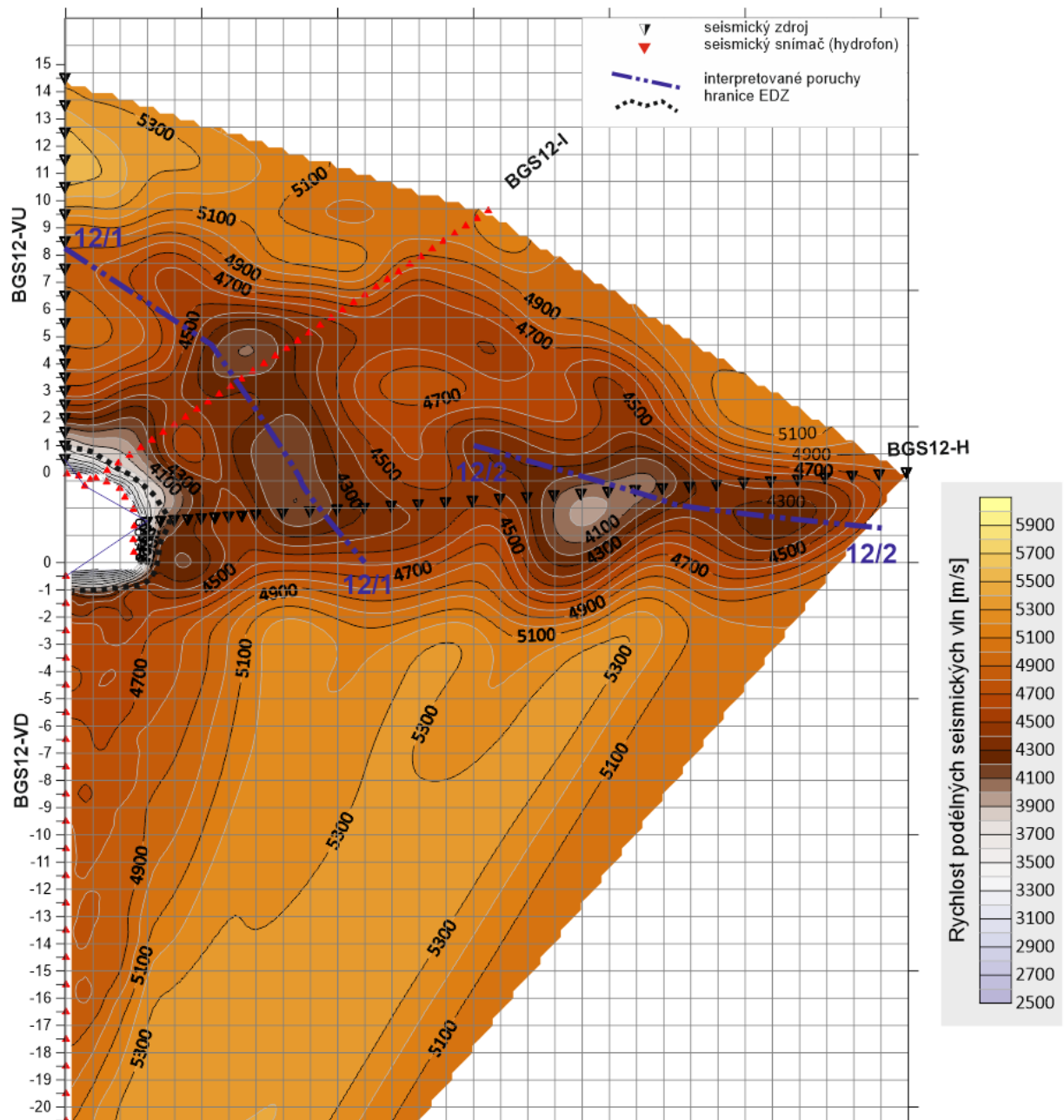
- Elektronická příloha 93 – řez mezi vrty BGS12-V(U) – BGS12-I;
- Elektronická příloha 94 – řez mezi vrty BGS12-I – BGS12-H;
- Elektronická příloha 95 – řez mezi vrty BGS12-H – BGS12-V(D);
- Elektronická příloha 96 – společné zobrazení rychlostních řezů pro GS12.

V rychlostním řezu získaném mezi vrty BGS12-V(U) – BGS12-I je patrně nejvýznamnější jevem pokles rychlostí zachycený v okolí vrtu BGS12-I v jeho staničení 6–9 m. Oblast snížených rychlostí lze sledovat směrem k vrtu BGS12-VU k úrovni jeho staničení 10 m. V oblasti snížených rychlostí je interpretována poruchová linie 12/1. Tato dále pokračuje směrem k vrtu BGS12-H do sousedního řezu BGS12-I – BGS12-H. V tomto řezu je také patrné pokračování oblasti snížených rychlostí, která je v okolí vrtu BGS12-H patrná v rozmezí staničení 5,0–7,5 m. Okolí vrtu BGS12-H je oslabené také v úseku staničení 15–19 m a 22–25 m, kde jsou v rychlostním řezu patrné snížení hodnoty rychlostí. Do těchto úseků je lokalizovaná interpretovaná linie 12/2. Prostor mezi vrty BGS12-I – BGS12-H je podle přehledu uvedeného v Tab. 188 charakterizován nejnižšími průměrnými rychlostmi v rámci celé stanice. V prostoru mezi vrty BGS12-H – BGS12-V(D) jsou úseky snížených rychlostí vázané zejména na již zmíněné intervaly v okolí vrtu BGS12-H. V okolí vrtu BGS12-VD jsou patrné mírně nižší rychlosti (<5 000 m/s) do hloubky kolem 19 m. Výrazné snížení rychlostí u tohoto vrtu je patrné v úvodní části, ovšem v intervalu 0–2 m hloubky rychlosti strmě narůstají.

Společné zobrazení všech tří tomografických řezů ze stanice GS12 ukazuje Obr. 583.

Dosah zóny ovlivněné ražbou (EDZ) je interpretován podle získaných rychlostí jako největší v okolí vrtu BGS12-H (1,3 m), je ovšem třeba si uvědomit, že na této stanici nejsou vrty vedeny kolmo do stěny chodby (90°), ale pod úhlem cca 33°.

TOMOGRAFICKÝ RYCHLOSTNÍ ŘEZ GEOTECHNICKÁ STANICE GS12



Obr. 583 Tomografický rychlostní řez, geotechnická stanice GS12 (Elektronická příloha 96)

Geotechnická stanice GS18

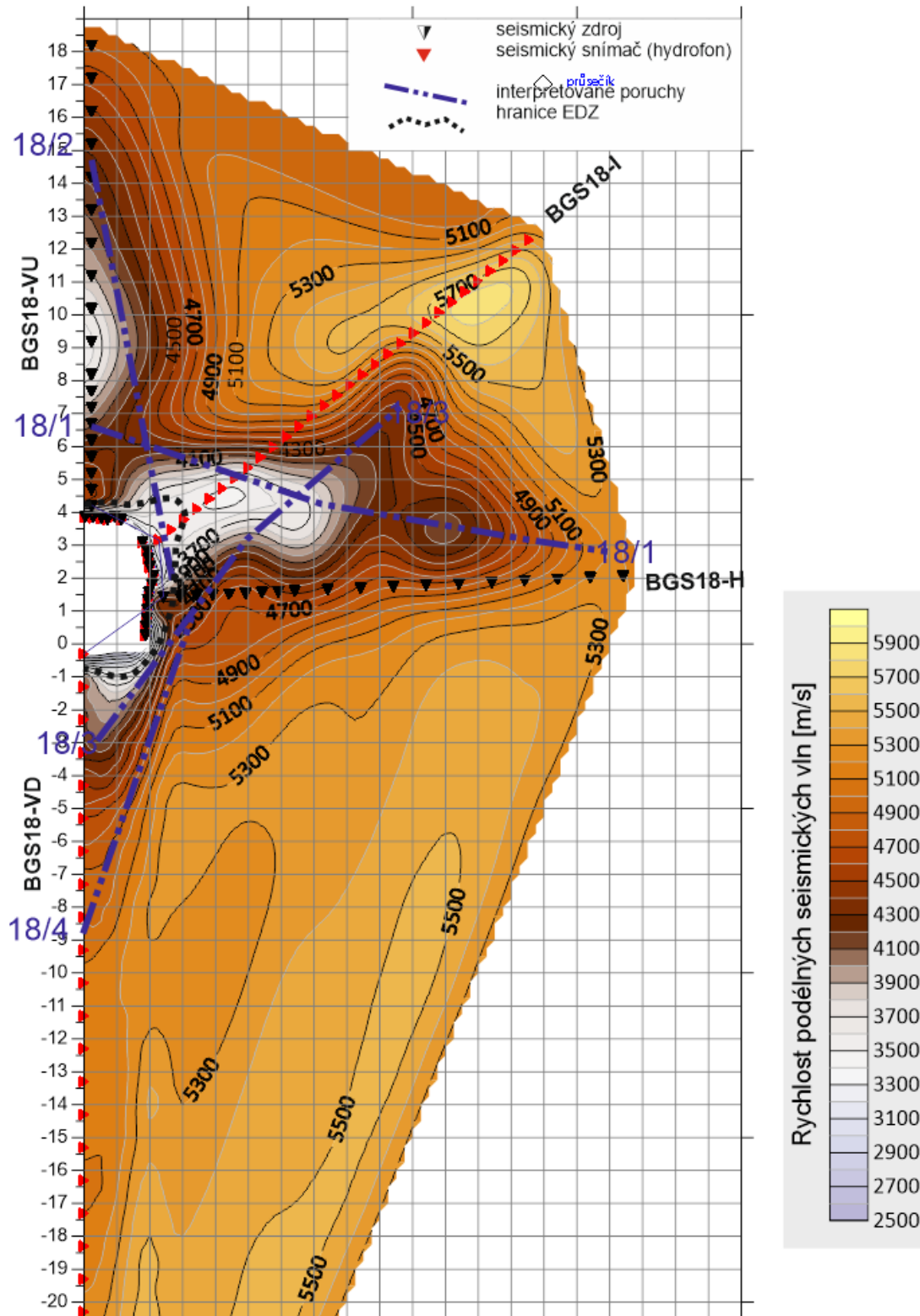
Příslušné rychlostní řezy pro odpovídající dvojice vrtů ze stanice GS18 lze nalézt v těchto elektronických přílohách:

- Elektronická příloha 98 – řez mezi vrty BGS18-V(U) – BGS18-I;
- Elektronická příloha 99 – řez mezi vrty BGS18-I – BGS18-H;
- Elektronická příloha 100 – řez mezi vrty BGS18-H – BGS18-V(D);
- Elektronická příloha 101 – společné zobrazení rychlostních řezů pro GS18.

V rychlostním řezu, sestaveném pro dvojici vrtů BGS18-V(U) – BGS18-I je patrná oblast snížených rychlostí v okolí vrtu BGS18_VU v rozmezí jeho staničení 3–8 m, kolem které jsou interpretovány poruchové linie 18/1 a 18/2. V úseku vrtu BGS18-VU v hloubkách 0,5–3,0 m jsou zjištěné rychlosti poměrně vysoké, což nebývá nad stropem štol obvyklé. Zřejmě se jedná o kompaktní blok horniny, která tvoří klenbu štoly. Okolí vrtu BGS18-I je v úvodních partiích oproti tomu relativně více rozrušené (hloubka 0–4,5 m), teprve od cca 5 m hloubky rychlosti stoupají. Naopak ve vyšších metrážích prochází vrt kompaktními málo porušenými horninami. Zmíněná oblast nízkých rychlostí patrná v úvodních metrech vrtu BGS18-I pokračuje i v řezu pro dvojici vrtů BGS18-I – BGS18-H. Minimum rychlostí v řezu je sledováno pokračováním linie 18/1, které vede do masivu, aniž by ovšem protнула vrt BGS18-H. Ve směru paralelně k vrtu BGS18-I je interpretováno porušení v linii 18/3. Tato linie pokračuje i v posledním prezentovaném rychlostním řezu, který byl získán mezi vrty BGS18-H – BGS18-V(D). Linie 18/3 je ukončena křížením s vrtem BGS18-VD na jeho metráži 3,3 m. Paralelně s ní je lokalizována struktura s označením 18/4. Informativně je tomografický řez pro všechny vrty stanice prezentován na Obr. 584.

Interpretovaný průběh dosahu zóny EDZ je ovlivněn uvedenou oblastí nízkých rychlostí v okolí úvodní části vrtu BS18I. Vliv ražby je zde předpokládán do vzdálenosti 1,5 m od líce výrubu.

TOMOGRAFICKÝ RYCHLOSTNÍ ŘEZ GEOTECHNICKÁ STANICE GS18



Obr. 584 Tomografický rychlostní řez, geotechnická stanice GS18 (Elektronická příloha 101)

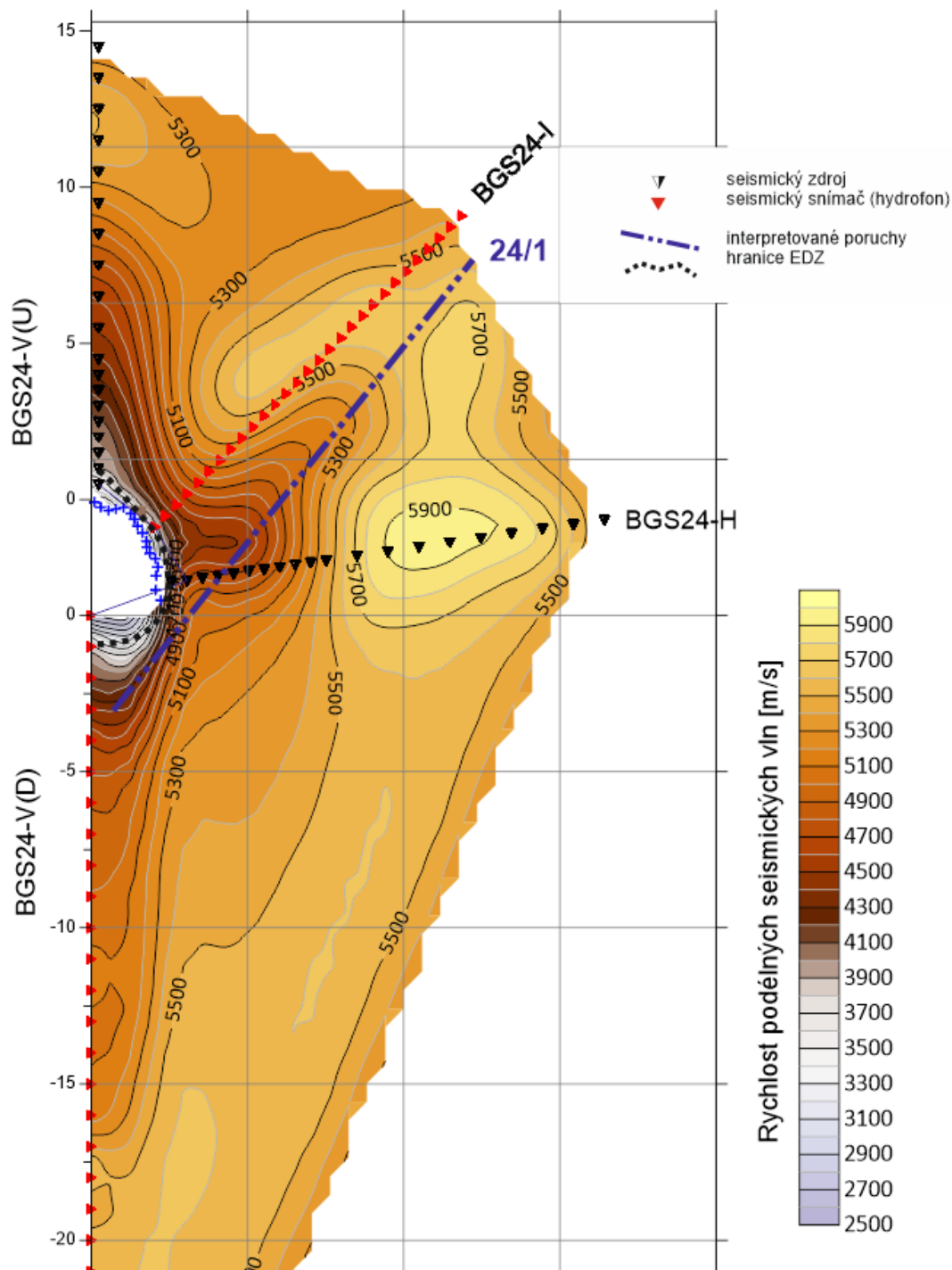
Geotechnická stanice GS24

Výsledky seismické tomografie ve vrtech provedených v rámci stanice GS24 jsou ve formě rychlostních řezů zařazeny do následujících elektronických příloh:

- Elektronická příloha 103 – řez mezi vrty BGS24-V(U) – BGS24-I;
- Elektronická příloha 104 – řez mezi vrty BGS24-I – BGS24-H;
- Elektronická příloha 105 – řez mezi vrty BGS24-H – BGS24-V(D);
- Elektronická příloha 106 – společné zobrazení rychlostních řezů pro GS24/1.

Rychlostní pole zastižené trojicí tomografických řezů v okolí geotechnické stanice GS24 lze označit jako klidné a málo porušené. Rozhodně se jedná o nejhomogennější obraz ze všech sledovaných stanic. Také z hlediska hodnot rychlostí je masiv v okolí GS24 na prvním místě, co se týká průměrných hodnot seismických rychlostí. V řezu pro dvojici vrtů BGS24-V(U) – BGS24-I nejsou interpretovány žádné poruchové linie, patrně jsou relativně nižší rychlosti v nadloží štoly, tedy v úvodních metrech vrtu BGS24-VU. V řezu pro vrty BGS24-I – BGS24-H je interpretovaná lokální poruchová linie 24/1, které sleduje lokální minimum rychlostí protažené ve směru vrtu BGS24-I směrem do horniny. Tato linie je interpretovaná také v řezu pro vrty BGS24-H – BGS24-V(D), kde je ukončena při vrtu BGS24-VD v úrovni jeho metráže 3 m.

TOMOGRAFICKÝ RYCHLOSTNÍ ŘEZ GEOTECHNICKÁ STANICE GS24



Obr. 585 Tomografický rychlostní řez, geotechnická stanice GS24 (Elektronická příloha 106)

Průběh zóny ovlivnění masivu ražbou je podle získaných seismických rychlostí nejvyšší v nadloží štol v okolí vrtu BGS24-VU.

Tab. 188 Charakterizace rychlostních řezů mezi vrty na geotechnických stanicích podle zjištěných hodnot seismických rychlostí

Označení tomografického řezu	Minimální rychlost [m/s]	Maximální rychlost [m/s]	Průměr [m/s]	Medián [m/s]	Příloha
BGS20/1 (VU-I)	2632	4745	3812	3852	Elektronická příloha 83
BGS20/1 (I-H)	2507	5337	4398	4413	Elektronická příloha 84
BGS20/1 (H-VD)	2411	5315	4875	5006	Elektronická příloha 85
BGS20/2 (VU-I)	2165	5023	4545	4695	Elektronická příloha 88
BGS20/2 (I-H)	2474	5559	4884	4888	Elektronická příloha 89
BGS20/2 (H-VD)	1882	5560	5124	5157	Elektronická příloha 90
BGS12 (VU-I)	2400	5604	4874	4984	Elektronická příloha 93
BGS12 (I-H)	2838	5194	4562	4550	Elektronická příloha 94
BGS12 (H-VD)	2279	5474	5071	5199	Elektronická příloha 95
BGS18 (VU-I)	2826	5781	4761	4914	Elektronická příloha 98
BGS18 (I-H)	2826	5845	4734	4705	Elektronická příloha 99
BGS18 (H-VD)	1544	6089	5308	5378	Elektronická příloha 100
BGS24 (VU-I)	3132	5678	5157	5282	Elektronická příloha 103
BGS24 (I-H)	3170	5958	5404	5540	Elektronická příloha 104
BGS24 (H-VD)	2462	5958	5406	5511	Elektronická příloha 105

2.4.7.5.2 Měření mezi vrty a důlními díly na geotechnických stanicích

V rámci seismického sledování horninového prostředí v okolí geotechnických stanic bylo také provedeno tomografické měření v konfiguraci vrt – povrch. Na odstrojených úsecích výrubu byly umístěny snímače seismického signálu a v horizontálním vrtu byl použit vrtný zdroj energie. Takto byly získány trojúhelníkové subhorizontální rychlostní řezy. Přístrojové vybavení využité pro tato měření sestávalo z:

- seismograf Terraloc PRO – 48 kanálů, registrace signálu ze snímačů na stěně výrubu (výrobce ABEM, Švédsko);
- snímače rychlosti kmitání (geofony) osazené elementy SM-11 (Sensor, Holandsko) o vlastní frekvenci 30 Hz (stěny štol);
- elektrodynamický vrtný seismický zdroj BIS-SH s pulsním generátorem IPG (Geotomographie GmbH, Německo).

Zpracování naměřených probíhalo obdobně jako v předchozích kapitole popisující seismická tomografická měření (např. kapitola 2.4.7.5.1).

Měření mezi vrtem BGS20-1-H a stěnou štoly Z3-XX

Získaný rychlostní řez je zobrazen v Elektronická příloha 87. V okolí vrtu BGS20/1–H je patrná oblast nízkých rychlostí, která zasahuje do masivu stěny do vzdálenosti kolem 4 m. Pokles rychlostí může souviset s přítomností interpretované poruchy podle geofyziky s označením GFA (linie je určena v horizontálním rychlostním řezu na 20. patře, více v kapitole 2.4.5.2.2). Příloha také zobrazuje interpretovaný odhad dosahu zóny EDZ ve stěně štoly.

Měření mezi vrtem BGS20-2-H a stěnou štoly Z3-XX

Rychlostní řez uvádí Elektronická příloha 92. V rozmezí staničení 117–120 m je patrná při líci stěny štoly oblast snížených rychlostí protažená k jihu směrem do masivu podél vrtu BGS20/2–H, která dosahuje do úrovně 12 m hloubky vrtu. V tomto úseku vrtu je dokumentováno nízké RQD, často pod hodnotou 50 %. Obojí ukazuje na přítomnost intenzivně rozpukaných hornin, v tomto případě převážně biotitických rul. Geofyzikální struktura s označením GFI vedená od stěny štoly ve směru jihovýchodním, prochází zhruba středem širší oblasti nízkých rychlostí západně od vrtu EDZ20-HD, lokalizované v úrovni odpovídající hloubce vrtu 10–15 m. Podle rychlostního pole je v příloze interpretován průběh EDZ, která v místě oblasti nižších rychlostí (117–120 m) je interpretována v mocnosti mírně nad 1 m, v ostatních úsecích pak méně než 1 m.

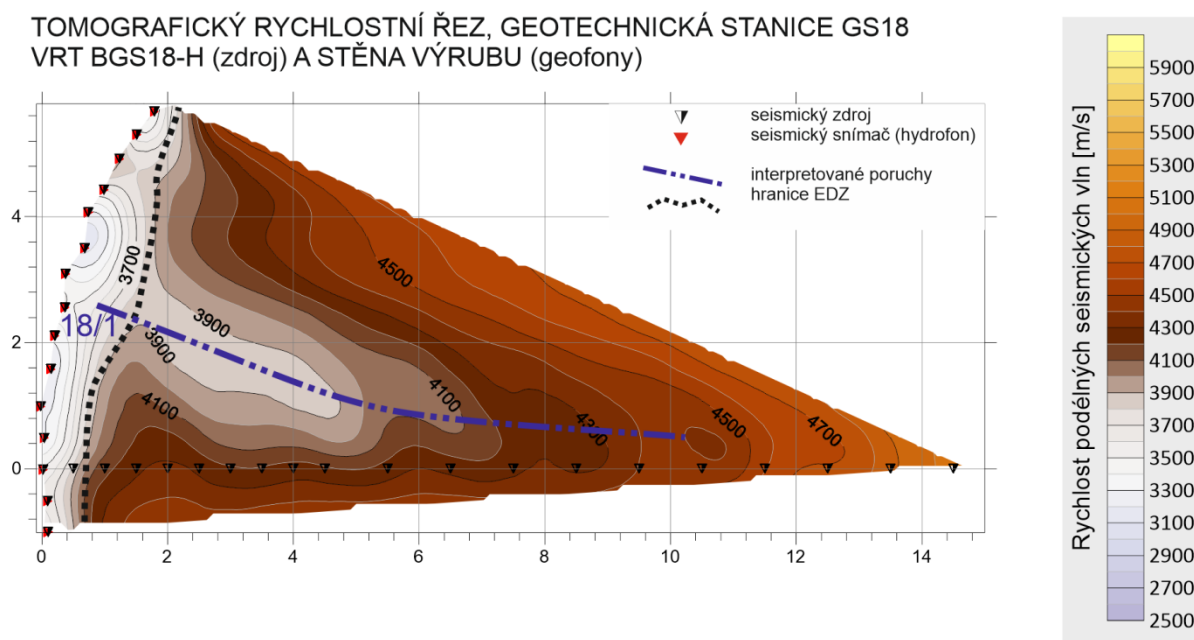
Měření mezi vrtem BGS12-H a stěnou štoly Z3-XII

Pro tato měření byl využit odkrytý úsek výrubu štoly v délce 12 m, který byl osazen geofony s krokem 0,5 m. Získaný rychlostní řez uvádí Elektronická příloha 97. Geometrie měření je na stanici GS12 odlišná od ostatních stanic, směr vrtů zde není kolmý na osu štoly, úhel mezi směrem vrtu a osou štoly je cca 33°. V rychlostním řezu jsou patrné nízké rychlosti v okolí ústí vrtu do úrovně hloubky 2,5 m (to odpovídá vzdálenosti k líci výrubu kolem 1,6 m). Do této úrovně

je v řezu také interpretován dosah zóny EDZ v úseku kolem ústí vrtu. V oblasti vzdálenější ústí vrtu je mocnost EDZ interpretována menší, kolem 1,0–0,5 m.

Měření mezi vrtem BGS18-H a stěnou štoly V3-XVIII

V místě geotechnické stanice GS18 bylo využito čisti stěny výrubu v délce 6 m, na kterou byly instalovány seismické snímače s krokem 0,5 m. Získaný rychlostní řez je uveden v Elektronická příloha 102 a také na Obr. 586. V řezu je nápadná oblast snížených rychlostí, která od líce výrubu pokračuje podél vrtu BGS18-H do masivu. Jedná se s velkou pravděpodobností o projev porušení horniny zachycené v okolí vrtu BGS18-I, do které je interpretována lokální porucha 18/1. Průběh interpretovaného odhadu dosahu zóny EDZ ukazuje, že tato zasahuje do masivu do vzdálenosti 0,5–1,3 m s maximem v místě interpretované poruchy.



Obr. 586 Seismický tomografický řez mezi vrtem a stěnou štoly, geotechnická stanice GS18

Měření mezi vrtem BGS24-H a stěnou štoly Z3-XXIV

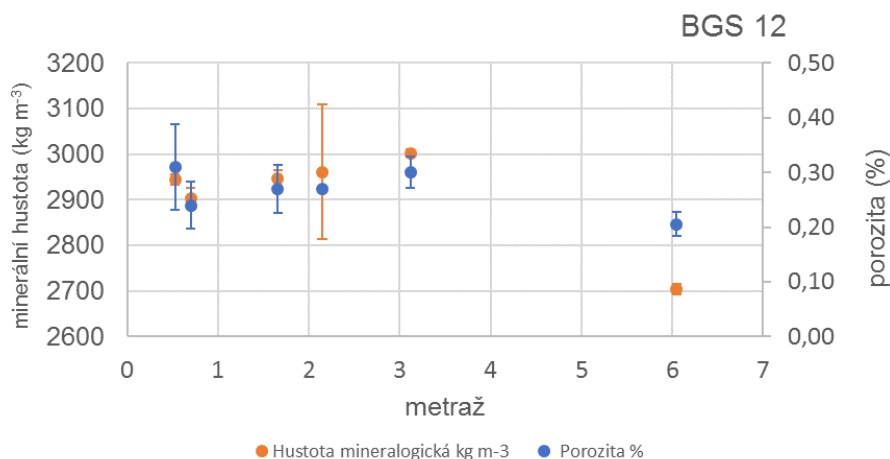
Pro získání tomografického řezu v okolí GS24 byly snímače osazeny na odkrytou část stěny štoly v délce 4 m, které registrovaly odpaly pořízené vrtným zdrojem ve vrtu BGS24-H. Takto získaný tomografický řez je součástí Elektronická příloha 107. Podle průběhu je v blízkosti vrtu patrná lokální oblast se sníženými seismickými rychlostmi, která zasahuje do masivu do hloubky cca 3 m. Poruchová linie s označení 24/1 je v tomto řezu lokalizována více méně paralelně se stěnou štoly. Vzhledem k hodnotám zjištěných seismických rychlostí je hranice EDZ interpretována ve vzdálenosti 0,5–0,8 m od líce výrubu, nejvyšší mocnost předpokládáme v místě lokálního snížení rychlostí.

2.4.7.6 Rozsah a charakter EDZ stanovený v prostoru mezi vrty a důlními díly – transportní parametry

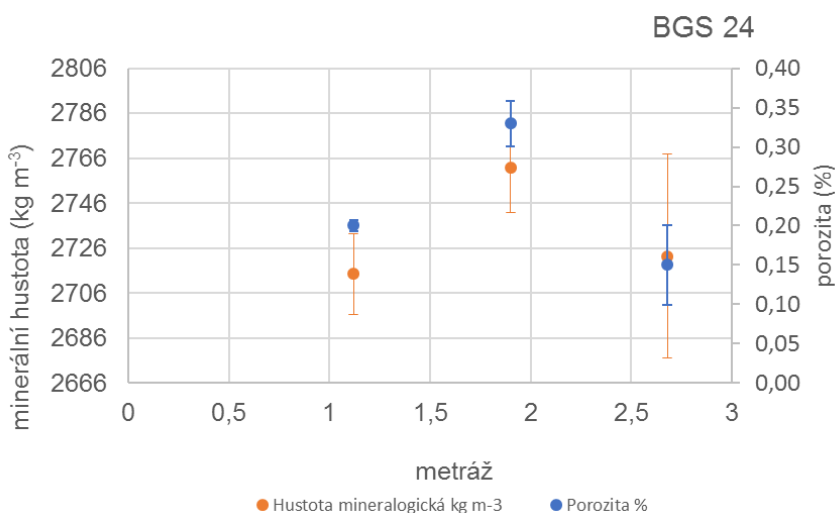
2.4.7.6.1 Difúzní experimenty tritia (HTO) a chloridu (^{36}Cl) na vzorcích EDZ

Pro studium vlivu EDZ na transportní charakteristiky byly použity a připraveny vzorky z vrtů BGS12-H a BGS24-H. Vzorky byly odebrány ve spolupráci s ÚGN, následně bylo vrtné jádro převrtáno na 48 mm a naformátováno na 10 mm disky pro difúzní experimenty.

Naměřené hodnoty porozity z jádra BGS24-H byly velmi nízké a pohybovaly se kolem 0,23 % a u vrtu BGS12-H kolem 0,26 % (Obr. 587 a Obr. 588). U vzorků nebyly pozorovány výrazné změny porozity a mineralogické hustoty s rostoucí hloubkou ve vrtu tj. vzdálenosti od stěny rozrážky (pozn. vrt BGS12-H nebyl vrtán kolmo na stěnu díla, a tak metráže ve vrtu neodpovídají vzdálenosti od líce výrubu, koeficient 0,515, např. metráži 2 m od ústí vrtu odpovídá vzdálenost cca 1,03 m od líce výrubu). Souhrnné výsledky měření jsou uvedeny v Elektronická příloha 36.



Obr. 587 Naměřené hodnoty porozity a minerální hustoty na vzorcích (disky 48 x 10 mm) z vrtu BGS12-H (medián ± 95% interval spolehlivosti)



Obr. 588 Naměřené hodnoty porozity a minerální hustoty na vzorcích (disky 48 x 10 mm) z vrtu BGS24-H (medián ± 95% interval spolehlivosti)

Vrtné jádro z 24. patra bylo s četnými poruchami a bylo tedy problematické vytvoření potřebného počtu vzorků. S ohledem na omezený počet vzorků pro studium EDZ (24. patro) byly nahrazeny/doplněny o další tělíška z jiných částí dolu (18. patro).

Princip vyhodnocení difúzních experimentů u vzorků EDZ z 12. a 24. patra dolu Rožná byl totožný jako tomu bylo u patrových horizontů výše (kap. 2.3.6). Hodnoty efektivních difúzních koeficientů pro vzorky EDZ jsou uvedeny v Tab. 189 s příslušnou nejistotou na hladině významnosti 0,05 (tj. $1,96 \cdot \sigma$). Vzhledem k tomu, že měřený signál objemové aktivity ve výstupních rezervoárech se u některých difúzních experimentů i po delší době trvání experimentu pohyboval pouze lehce nad hodnotami limitu detekce a to mnohem výrazněji, jako tomu bylo v případě experimentů z patrových horizontů (viz 0), byly experimenty s tritiovanou vodou prodlouženy (až na 20 týdnů) a plánované difúzní experimenty s jodidem nebyly realizovány, protože šlo očekávat, že než by došlo k průniku, detekovaný radiojodid $^{125}\text{I}^-$ by podlehnul radioaktivní přeměně. Při uvážení přijatelně dosažitelné nejistoty měření signálu u nízkých aktivit (tj. signál měření je tří až čtyřnásobek měřeného pozadí) lze veškeré výsledky efektivních difúzních koeficientů nižších než $2 \cdot 10^{-13} \text{m}^2 \text{s}^{-1}$ považovat za hodnoty nižší nebo rovny $2 \cdot 10^{-13} \text{m}^2 \text{s}^{-1}$ a hodnoty uvedené v Tab. 189 lze považovat za pouhý odhad. Souhrnné výsledky jsou v přehledu uvedeny v tabulce Elektronická příloha 39.

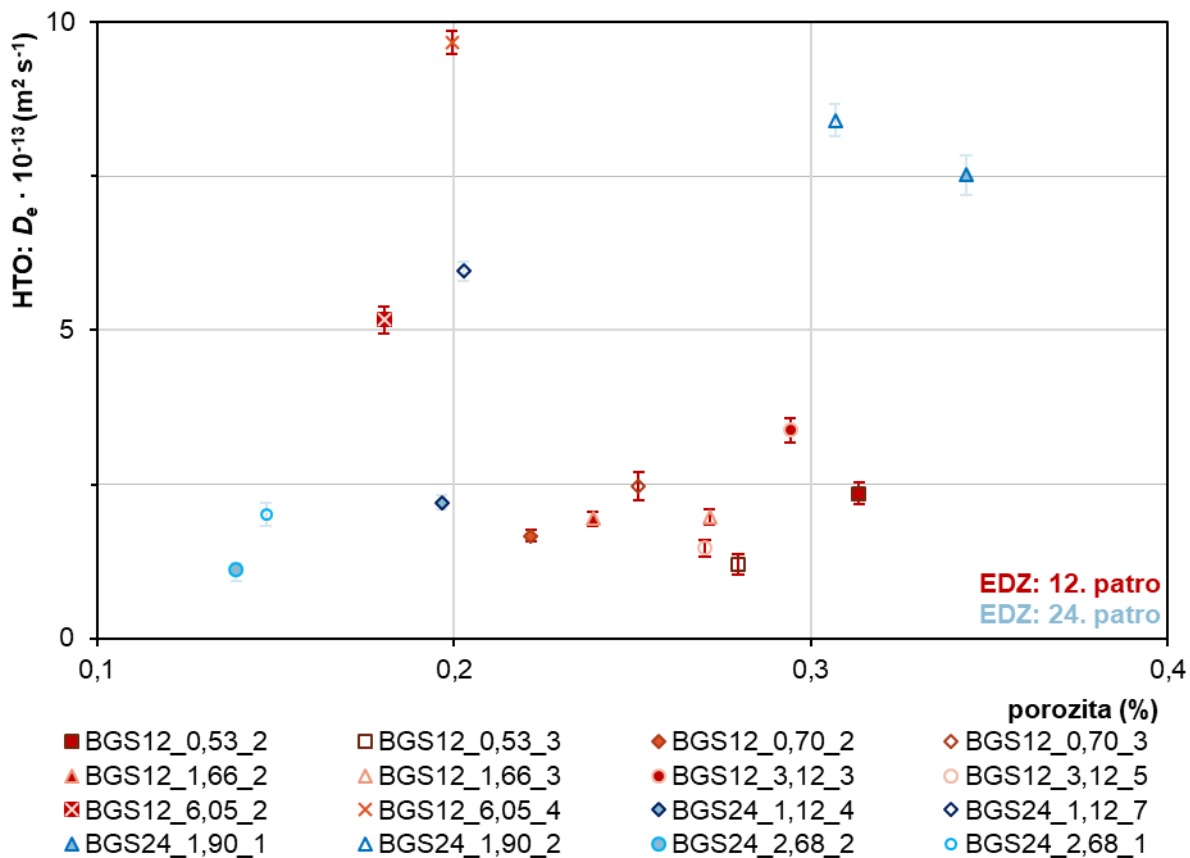
Tab. 189 Seznam vzorků EDZ s rozměry pro difúzní experimenty a vyhodnocení efektivních difúzních koeficient

Označení vzorku	ε	Tloušťka L (mm)	D_e (^3H)	D_e (^{36}Cl)	Poměr D_e	Vyhodnocení
	%	Průměr d (mm)	$\cdot 10^{-13} \text{m}^2 \text{s}^{-1}$	$\cdot 10^{-14} \text{m}^2 \text{s}^{-1}$	$^{36}\text{Cl}/^3\text{H}$	
BGS12_0,53_2	0,31	10,58	$2,3 \pm 0,2$	-	-	analytické řeš.
		48,95	$2,3 \pm 0,2$	-	-	<i>time-lag</i>
BGS12_0,53_3	0,28	10,66	$1,2 \pm 0,2$	$1,7 \pm 1,1^1$	$0,14 \pm 0,09$	analytické řeš.
		48,92	$1,2 \pm 0,1$	$1,2 \pm 0,2$	$0,10 \pm 0,02$	<i>time-lag</i>
BGS12_0,70_2	0,22	9,96	$1,7 \pm 0,1$	-	-	analytické řeš.
		48,90	$1,7 \pm 0,1$	-	-	<i>time-lag</i>
BGS12_0,70_3	0,25	9,71	$2,5 \pm 0,2$	$4,2 \pm 1,3$	$0,17 \pm 0,05$	analytické řeš.
		48,87	$2,6 \pm 0,2$	$4,1 \pm 0,2$	$0,16 \pm 0,01$	<i>time-lag</i>
BGS12_1,66_2	0,24	9,92	$1,9 \pm 0,1$	-	-	analytické řeš.
		48,92	$1,9 \pm 0,1$	-	-	<i>time-lag</i>

Difúzní experiment na vzorku BGS12_0,53_3 poskytoval ve výstupním rezervoáru v případě chloridu požadové hodnoty i po 120 dnech.

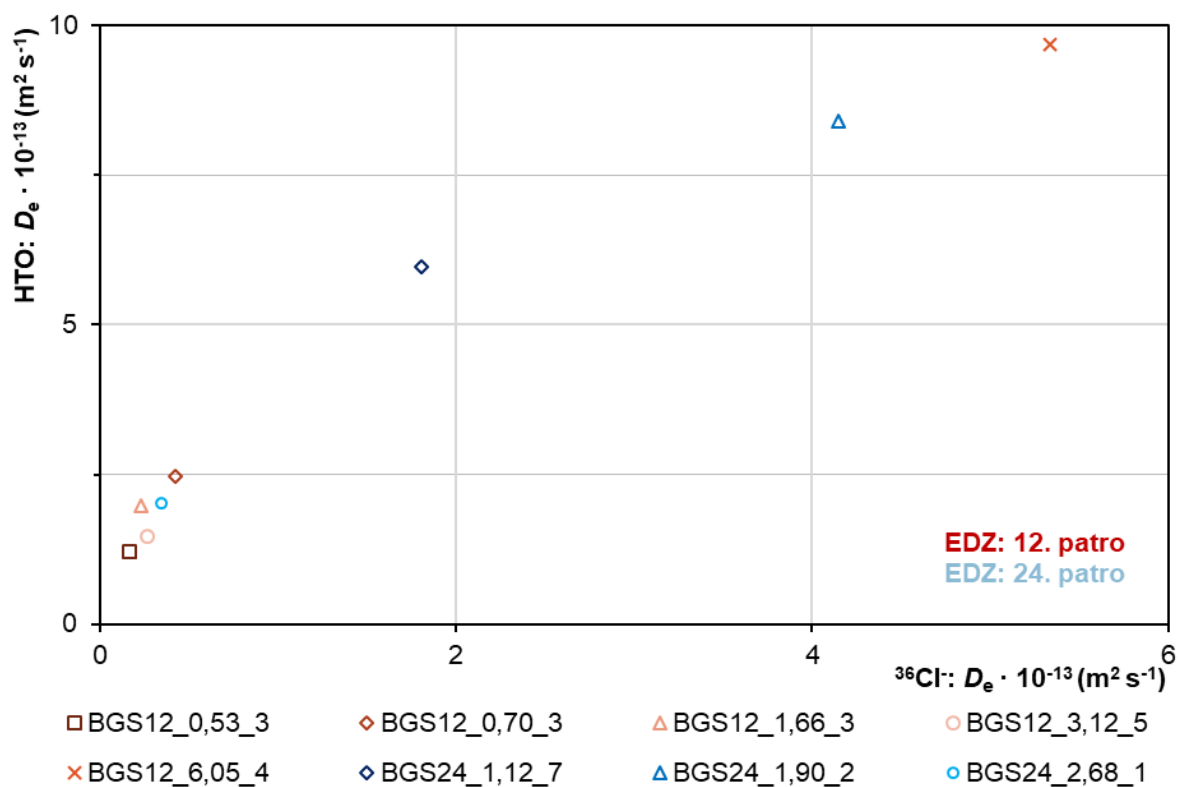
BGS12_1,66_3	0,27	9,96	$2,0 \pm 0,1$	$2,3 \pm 1,1$	$0,12 \pm 0,06$	analytické řeš.
		48,92	$2,0 \pm 0,2$	$1,7 \pm 0,2$	$0,08 \pm 0,01$	<i>time-lag</i>
BGS12_3,12_3	0,29	10,29	$3,4 \pm 0,2$	-	-	analytické řeš.
		48,94	$3,1 \pm 0,4$	-	-	<i>time-lag</i>
BGS12_3,12_5	0,27	10,42	$1,5 \pm 0,1$	$2,7 \pm 1,1$	$0,18 \pm 0,08$	analytické řeš.
		48,94	$1,6 \pm 0,2$	$2,3 \pm 0,2$	$0,15 \pm 0,02$	<i>time-lag</i>
BGS12_6,05_2	0,18	10,59	$5,2 \pm 0,2$	-	-	analytické řeš.
		48,94	$5,3 \pm 0,7$	-	-	<i>time-lag</i>
BGS12_6,05_4	0,20	10,29	$9,7 \pm 0,2$	$53,3 \pm 1,9$	$0,55 \pm 0,02$	analytické řeš.
		49,00	$8,9 \pm 0,6$	$50,9 \pm 2,1$	$0,57 \pm 0,05$	<i>time-lag</i>
BGS24_1,12_4	0,20	9,25	$2,2 \pm 0,1$	-	-	analytické řeš.
		48,70	$2,1 \pm 0,1$	-	-	<i>time-lag</i>
BGS24_1,12_7	0,20	9,63	$6,0 \pm 0,1$	$18,1 \pm 1,3$	$0,30 \pm 0,02$	analytické řeš.
		48,60	$6,8 \pm 0,3$	$18,2 \pm 1,0$	$0,27 \pm 0,02$	<i>time-lag</i>
BGS24_1,90_1	0,34	10,32	$7,5 \pm 0,3$	-	-	analytické řeš.
		48,66	$6,7 \pm 0,7$	-	-	<i>time-lag</i>
BGS24_1,90_2	0,31	10,62	$8,4 \pm 0,3$	$41,5 \pm 2,5$	$0,49 \pm 0,03$	analytické řeš.
		48,68	$8,6 \pm 0,5$	$44,9 \pm 3,1$	$0,52 \pm 0,05$	<i>time-lag</i>
BGS24_2,68_2	0,14	10,52	$1,1 \pm 0,1$	-	-	analytické řeš.
		48,65	$1,2 \pm 0,1$	-	-	<i>time-lag</i>
BGS24_2,68_1	0,15	10,56	$2,0 \pm 0,2$	$3,4 \pm 1,5$	$0,17 \pm 0,07$	analytické řeš.
		48,63	$2,1 \pm 0,3$	$3,3 \pm 0,2$	$0,15 \pm 0,02$	<i>time-lag</i>

Vyšší hodnoty efektivních difúzních koeficientů D_e u vzorků BGS24_1,90_1 a 2 lze přisuzovat mikroprasklinám díky výskytu praskliny u sousedních vzorků 3 a 4, jež pro difúzní experimenty nebyly využity. Rozdíly paralelních experimentů lze vysvětlit finální úpravou (převrtáním a nařezáním) vzorků. Porovnání EDZ vzorků z obou pater lze konstatovat, že transportní parametry v 12. i 24. patře jsou podobné. Z Obr. 589 je zřejmé, že celková porozita u EDZ vzorků (konkrétně 0,14 až 0,34 %) není určující pro velikost efektivního difúzního koeficientu tritia $D_{e,HTO}$ ($m^2 s^{-1}$), nýbrž na D_e má vliv především geometrické uspořádání a tvar pórů, tj. geometrický faktor G (-) dle rovnice (35).



Obr. 589 Hodnoty efektivních difúzních koeficientů (analytické řešení) tritia (^3H) v závislosti na porozitě vzorku (stanovené metodou osychání) pro vzorky EDZ z 12. a 24. patra dolu Rožná a PVP Bukov

Porovnáním hodnot efektivních difúzních koeficientů HTO a chloridu ^{36}Cl (viz Obr. 590) lze potvrdit aniontovou exkluzi, stejně jako tomu bylo v případě patrových horizontů (12., 18., 20. a 22. patro) a odvodňovacích štol v hloubce 1025 m v kapitole 0. Ovšem poměr chlorid vs. ^3H uvedený v Tab. 189 je s ohledem na velmi nízké hodnoty D_e u chloridu, vycházející z malého měřeného signálu po velmi dlouhou dobu, pouhý odhad a čísla mohou být fakticky při tak nízkých hodnotách celkové porozity (pod 1 %) ještě nižší. Lze tedy konstatovat, že s klesajícím $D_{e,\text{HTO}}$ se efekt aniontové exkluze zvyrazňuje (poměr klesá z max. 0,57 na min. 0,08).



Obr. 590 Hodnoty efektivních difúzních koeficientů (analytické řešení) chloridu (^{36}Cl) vs. tritia (^3H)

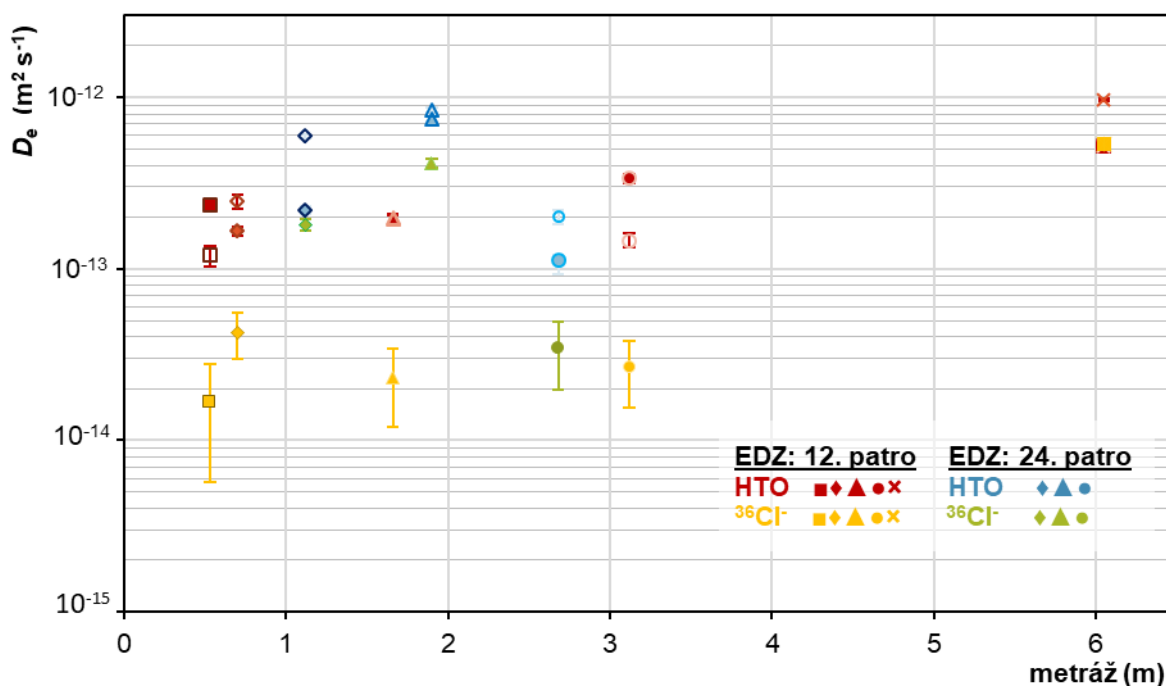
EDZ vzorky (celkem 17 vzorků), i přes očekávané poruchy vzniklé ražbou tunelu, jsou výrazně kompaktnější než vzorky z patrových horizontů a odvodňovací štoly (celkem 22 vzorků) v podkapitole 2.3.6, což prokazují nižší difúzní koeficienty u obou stopovačů (HTO a ^{36}Cl), jež se ve většině případů dostávají pod hodnoty $D_{e,\text{HTO}} < 6 \cdot 10^{-13} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, resp. $D_{e,\text{Cl}} < 2 \cdot 10^{-13} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ (viz srovnání mediánů v Tab. 190).

Tab. 190 Porovnání transportních parametrů u vzorků EDZ oproti patrovým horizontům a odvodňovací štoly

Vzorky (počet vzorků)	Vzorky EDZ	Vzorky z patrových horizontů	Vzorky z odvodňovací štoly
Transportní parametr			
ε (%) – medián	0,25 ₍₁₆₎	0,28 ₍₁₈₎	0,31 ₍₄₎
$D_{e,\text{HTO}}$ ($\text{m}^2 \text{ s}^{-1}$) – medián	$2,3 \cdot 10^{-13}$ ₍₁₆₎	$8,3 \cdot 10^{-13}$ ₍₁₈₎	$6,3 \cdot 10^{-13}$ ₍₄₎
$D_{e,\text{Cl}}$ ($\text{m}^2 \text{ s}^{-1}$) – medián	$3,8 \cdot 10^{-14}$ ₍₈₎	$4,7 \cdot 10^{-13}$ ₍₈₎	$6,4 \cdot 10^{-13}$ ₍₂₎

¹Hodnoty nižší než $2 \cdot 10^{-13} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ jsou považovány pouze za odhad vycházející z nízkého měřeného signálu objemové aktivity ve výstupním rezervoáru.

Malé rozdíly mezi sousedními vzorky je možné i pozorovat v závislosti na metrži vyvrtaného jádra EDZ vzorků, jak je vidět ve srovnání v Obr. 591. V případě vzorků z 24. patra je srovnání obtížné z důvodu možného výskytu mikrotrhlin u prostřední metrže 1,90 m. Srovnání metrží na 12. patře poskytuje nesoulad při srovnání porozit ve vzorcích. Tento nesoulad (s klesající porozitou roste efektivní difúzní koeficient obou stopovačů) jde i proti předpokladu, že by s klesajícím narušením horniny a rostoucí metrží měla být očekávána menší konstruktivita, resp. větší tortuozita (menší geometrický faktor) difúzní dráhy pórového prostředí horninového vzorku, a proto interpretace metrže 6,05 m (cca 3 m od líce výrubu) oproti ostatním metržím dle rovnice (35) je možné na základě vlivu EDZ obtížně vysvětlit. Vysvětlením může být změna litologie a složení horniny, kdy dochází k přechodu od amfibol-biotitické ruly s granátem (až amfibolit) k biotit-amfibolické pararule (bez granátu). Tento přechod je možné pozorovat i na poklesu mineralogické hustoty a porozity.



Obr. 591 Efektivní difúzní koeficienty HTO a $^{36}Cl^-$ na horninových EDZ vzorcích v závislosti na vzdálenosti od zhlaví vrtu

2.5 Ostatní práce (dílčí plnění 3 a 4)

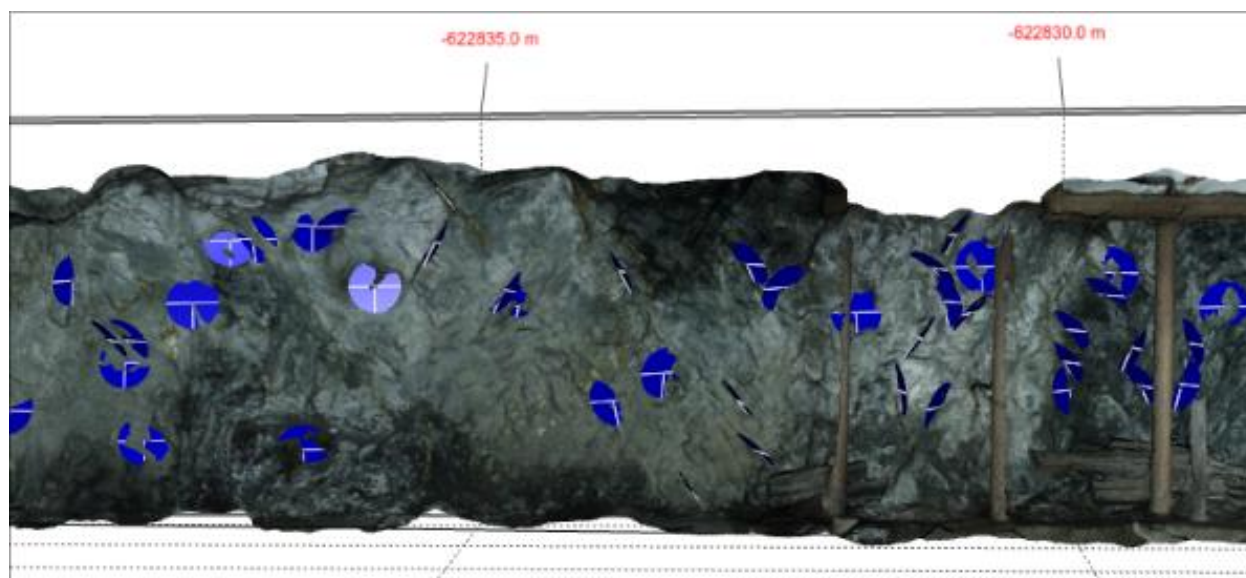
2.5.1 Odhad a charakterizace HHB

Pro účely stanovení relativně méně porušené části horninového prostředí dolu Rožná byly zkoumány veškeré přístupné stěny v rámci přístupných důlních děl (viz kapitola 2.1.2.1). Pro účely stanovení míry postižení horninového prostředí poruchami byla veškerá takto přístupná místa nafocena a byly zaměřeny dílčí struktury. Fotodokumentace byla pořizovaná za účelem tvorby 3D fotogrammetrických modelů těchto stěn. Tento postup byl zvolen jednak k velké časové náročnosti detailní dokumentace obnažených stěn in situ, která by dalece přesáhla možnosti této zakázky, zejména s ohledem na finanční náročnost zajištění pobytu v dole. Druhým neméně důležitým důvodem bylo lokální ovlivnění měření geologickým kompasem, případně podobnými nástroji, díky přítomnosti kovových objektů v chodbách dolu (koleje, výztuže, oplechování apod.). Vliv těchto objektů je místy významný natolik, že měření nelze považovat za kredibilní.

Tvorba fotogrammetrických modelů sestávala z detailního nafocení stěn, zahrnutí měřítka pro další škálování, zaměření několika struktur na intervalu cca 10 m. Dokumentace se soustředila na úseky s rozsahem alespoň 4 m, jejichž lokalizace je znázorněna na Obr. 381 a v Elektronická příloha 139. Kromě běžné fotodokumentace pro tvorbu modelů (Elektronická příloha 140) byla měření zanesena do fotodokumentace provedené na tabletu (Elektronická příloha 141). Za využití software Agisoft Metashape v.1.5.2 byly zrekonstruovány jednotlivé fotogrammetrické modely tak, aby byly dostatečně reprezentativní pro následný odečet lokalizací a orientací jednotlivých křehkých struktur (Elektronická příloha 142, Obr. 592). Za reprezentativní byl považován takový model, jehož míra detailu (počet trojúhelníků ve výsledném meshi) umožnila korektní vykreslení hran, tak aby bylo možné vzniklé plochy identifikovat a změřit nástroji v MOVE. V závislosti na velikosti a typu dokumentovaného úseku (chodba, výklenek, aj.) výsledné modely sestávaly z cca půl až dvou a půl milionu trojúhelníků. Model byl následně doplněn fototexturou ve vysokém rozlišení, která hraje zásadní vliv při identifikaci strukturálních prvků. Následně byly tyto modely usazeny dle lokalizací jednotlivých zdokumentovaných úseků v programu MOVE na odpovídající místo na půdorys chodby v souřadném systému S-JTSK. V takto usazených modelech pak byly určeny přítomné detekovatelné poruchy (pukliny, zlomy, průběhy foliace, případně reaktivované foliace) a odečtena jejich orientace. Tato data byla využita pro dílčí výzkumy (kapitola 2.4.5.1).



Obr. 592 Náhled fotogrammetrického modelu části 12. patra u náraží jámy R-7S

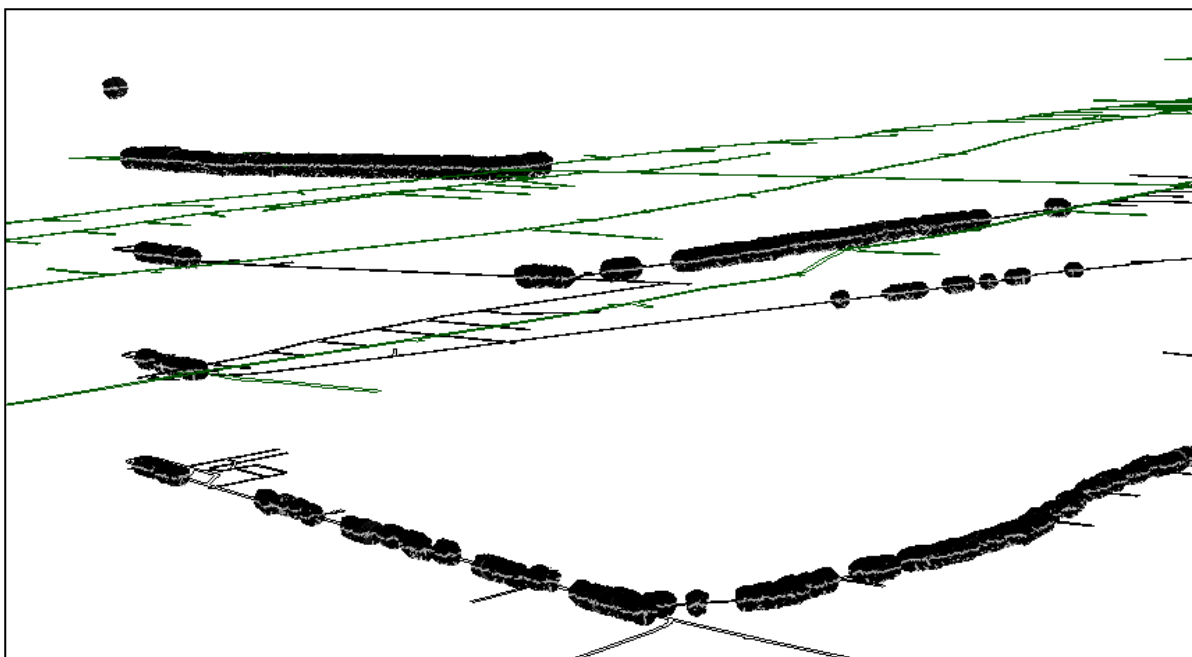


Obr. 593 Náhled fotogrammetrického modelu usazeného v MOVE s individuálním zobrazením poruch (18. patro)

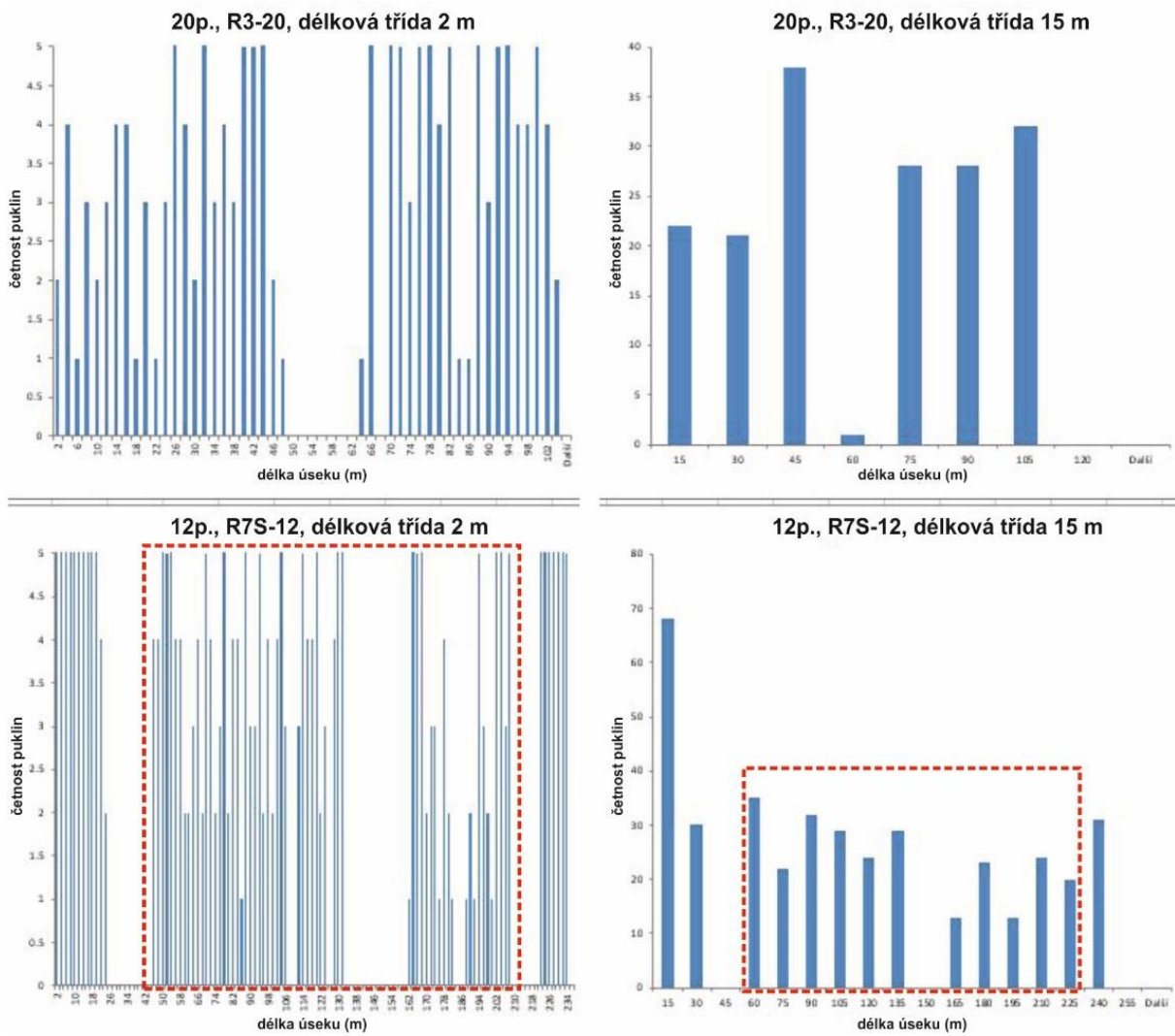
Pro určení méně porušených oblastí, které by mohly reprezentovat relativně homogenní horninové bloky ve srovnání se svým okolím, byly podél jednotlivých chodeb vybrány úseky s dostatkem dat (Obr. 594). Ze všech studovaných pater bylo vybráno deset zdokumentovaných úseků, které měly délku alespoň 100 m.

V tabulkovém editoru Excel byly pro každý jednotlivý úsek vyneseny všechny pukliny, určena jejich relativní lokalizace na metrůž daného úseku a následně byla spočítána jejich četnost v různých délkových třídách v rámci jednoho úseku (délkové třídy – 2, 5, 10, 15, 20 metrů). Pro tyto četnostní třídy byly vyhotoveny histogramy (Elektronická příloha 143), ze kterých bylo možné porovnat četnost puklin v každém úseku a v různých délkových třídách. Po prvním porovnání jednotlivých studovaných úseků stran četnosti puklin byla nastavena hranice pro minimální délku úseku, a sice 100 m. Zároveň pro určení nejméně porušených úseků byla určena maximální

četnost puklin v délkové třídě 15 m v rámci celého úseku, a to max. 40 puklin. Na základě této prvotní selekce se výběr zúžil z deseti úseků na čtyři úseky, které splňovaly zadané podmínky. Tyto čtyři úseky byly dále zkoumány v detailnější délkové třídě po 2 metrech. Podmínkou bylo mít v rámci celého studovaného úseku převahu intervalů s maximálně čtyřmi puklinami na každé 2 m úseku (délková třída 2 metry). Tato selekce nám dovolila vyčlenit dva nejvhodnější úseky – tedy relativně nejméně porušené horninové bloky – na 12. patře poblíž jámy R-1 (RZS_12) a na 20. patře poblíž jámy R-3 (R3_20). V obou histogramech se četnost puklin pohybuje v rozmezí 1–4 s několika odlehlými hodnotami, kde četnost dosahuje až 5 puklin na 2 metry stěny. Tuto statistiku je dobře vidět na Obr. 595, kde byla osa y (četnost) ořezána na maximální hodnotu 5. Tím byly zanedbány úseky, které u obou úseků dosahovaly až hodnot 7 puklin na 2 metry, ale v rámci celého profilu a po porovnání s ostatními úseky mohou být tyto hodnoty charakterizované jako odlehlé hodnoty, které neznehodnocují celkový výsledek a závěrečný výběr. V ostatních úsecích je těchto odlehlých hodnot výrazně více a mají i větší četnost puklin. V místech, kde nejsou žádná data, nebylo možné na místě puklinovou síť měřit, jelikož místa byla nepřístupná, nebo byla zapažena. V těchto místech očekáváme s vysokou pravděpodobností větší četnost puklin v rámci délkových tříd.



Obr. 594 Výřez z vizualizace průběhů jednotlivých důlních děl se zdokumentovaným puklinovým systémem (černá kolečka a jejich shluky reprezentují jednotlivé dokumentované poruchy)



Obr. 595 Histogramy dvou vybraných úseků pro lokalizaci kvazihomogenních bloků znázorňující četnost puklin v délkové třídě 2 a 15 m

2.5.2 Návrh kvazihomogenních horninových bloků

Na základě výše zmíněného postupu byly vymezeny následující kvazihomogenní bloky:

- V blízkosti jámy R-1 na 12. patře byl vymezen kvazihomogenní blok (HHB 12p.) na relativní metrži 45–208 m dokumentovaného úseku chodby Z-XII (s 0 m u křížení čerpací stanice a chodby Z-XII). Tento blok je vymezen mocnými polohami středně až hrubozrnné biotitické pararuly s vložkami (čočkami) jemnozrnné biotitické pararuly. V rámci bloku se rovněž vyskytuje tenká vložka amfibolitu a aplitického granitu. Západní část oblasti (modelu) zasahuje do mocné polohy amfibolitu. Všechny čočky hornin mají generální průběh SSZ–JJV. Rozsah modelu je 187 m paralelně s chodbou Z3-XII a 166 m kolmo na ni. Vertikálně je model protažen 30 m na každou stranu a model je tedy definovaný kvádrem 187 x 166 x 60 m.
- V blízkosti jámy R-3 na 20. patře byl vymezen kvazihomogenní blok (HHB 20p.) na relativní metrži 0–103 m. Dokumentovaný úsek je vymezen na hlavním překopu západně a východně od oběhu jámy R-3. Tento blok zastihuje jednotnou litologii středně až hrubozrnné biotitické pararuly. Rozsah modelu je 100 m paralelně s chodbou hlavním překopem a 102 m kolmo na ni. Vertikálně je model protažen 30 m na každou stranu a model je tedy definovaný kvádrem 102 x 100 x 60 m.

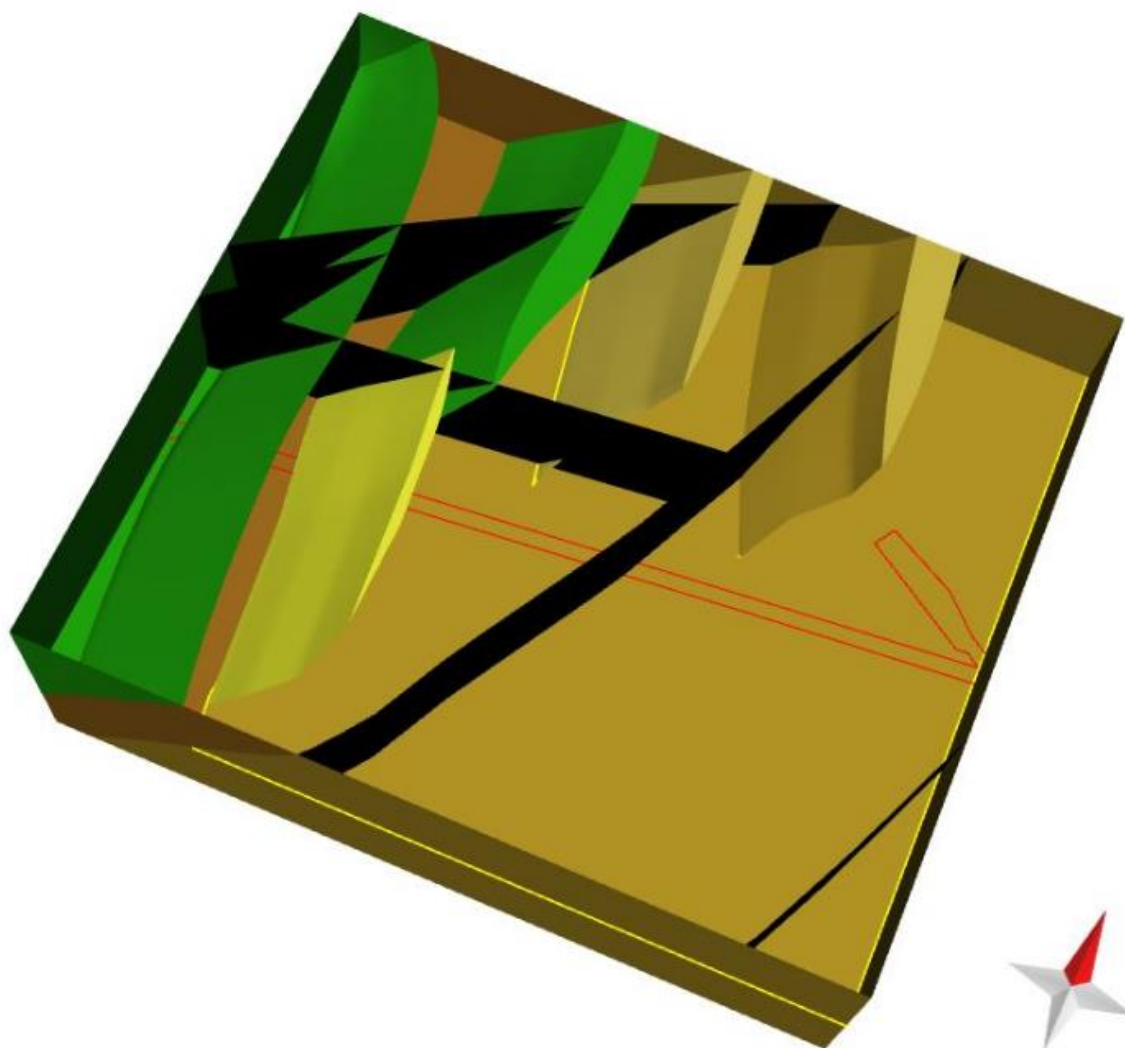
Pro tyto dva úseky stěn pak byly vytvořeny na základě dostupných archivních map 3D modely v softwaru MOVE. Tyto bloky byly vytvořeny pro blok na 12. patře na základě mapy Nohála (2019; Elektronická příloha 149) a pro blok na 20. patře na základě dílčích důlních map 1 : 1 000. Rozsah těchto bloků byl stanoven na ± 30 m ve vertikálním rozsahu od průběhu dané chodby se zhruba čtvercovým půdorysem. Průběhy litologických hranic byly určeny na základě základní důlní dokumentace a dílčích strukturních měření v ní zanesených. Detailní postup tvorby 3D geologických modelů v softwaru MOVE je obsahem kapitoly 2.5.3.4. Tento model zahrnuje nejen rozsahy zastížených horninových těles, ale obsahuje také digitalizované poruchy a původní fotogrammetrický model (Elektronická příloha 144, resp. Elektronická příloha 145). Dále byly pro oba bloky z tohoto modelu vygenerovány geologické mapy těchto bloků (Elektronická příloha 146, resp. Elektronická příloha 147).

Srovnání navržených kvazihomogenních bloků se studovaným blokem na 20. patře

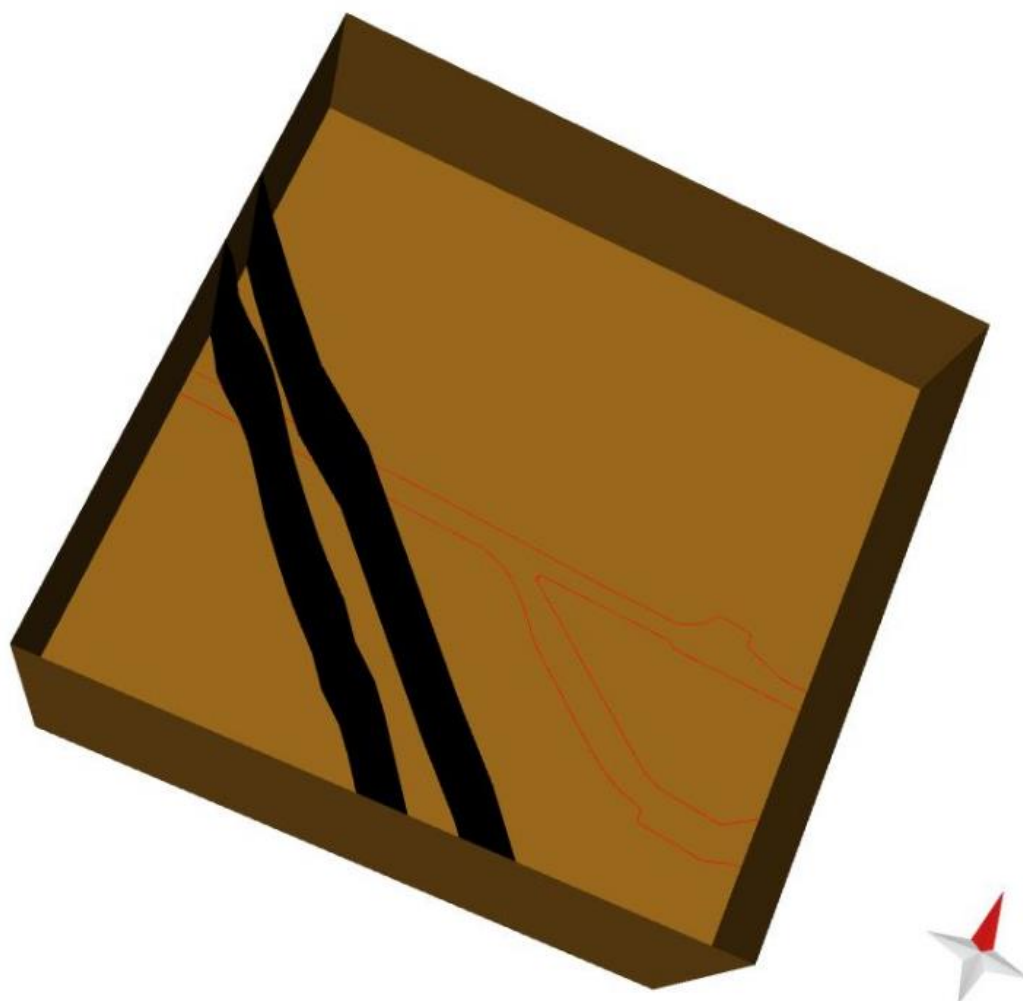
Pro určení míry relativní homogenity (resp. porušení) výše navržených kvazihomogenních bloků byly tyto bloky porovnány se studovaným horninovým blokem na 20. patře. K porovnání bylo přistoupeno stejným způsobem jako k vyčlenění kvazihomogenních bloků pomocí srovnání histogramů s počtem zastížených struktur (poruch) v délkové třídě 2 m (Obr. 600). V rámci porovnání byla také využita stereografická projekce orientací jednotlivých struktur zobrazená ve formě pólů s vnesenými konturami pro zdůraznění trendů (Obr. 600). Zde je patrné, že jen málo struktur zastížených na jižní stěně chodby Z3-XX má blízkou orientaci k orientaci první zóny (slabé maximum v pravém horním kvadrantu diagramu), ačkoli jsou tyto poruchy orientovány optimálně více méně kolmo ke stěně pro jejich zastížení v dokumentaci. Míra porušení horninového masivu makrosokpicky pozorovatelnými poruchami je mírně nižší v podloží první zóny než v jejím nadloží (vlevo, resp. vpravo od zóny na Obr. 600). Dále směrem do nadloží zóny lehce klesá množství zastížených struktur, jejich vyšší míra se projevuje do cca 50 m od hranice

první zóny, resp. jejího dílčího odžilku. Bohužel dostupná data nám neposkytují delší kontinuální úsek pro ověření tohoto trendu a jiné úseky jsou ovlivněny změnami litologií apod.

Ve srovnání histogramů z vybraných kvazihomogenních bloků se studovaným blokem na 20. patře (Obr. 601) je zjevná menší míra porušení u obou vybraných bloků, která po přepočtení je reprezentována počtem puklin zastíženým na jednom metru stěny, který odpovídá u studovaného bloku na 20. patře 3,18 puklinám na 1 m stěny (na celou výšku dokumentované stěny, cca 2,5 m od počvy), zatímco pro kvazihomogenní blok na 12. patře vychází tento parametr na 1,93 pukliny na 1 m stěny a pro kvazihomogenní blok na 20. p. je téměř totožný – 1,932 pukliny na 1 m stěny výšky cca 2,5 m (Obr. 601). Tento rozdíl není překvapivý, nicméně může být lehce ovlivněn odlišnou situací dokumentovaných stěn – zejména v případě Z3-XX byly stěny očištěny a tudíž na nich mohlo vyniknout více struktur, ačkoli přístup k digitalizaci struktur z fotogrammetrických modelů byl totožný. I vzhledem k větší homogenitě distribuce dokumentovaných poruch lze konstatovat, že nejhomogennějším se jeví blok vytyčený na 20. patře v blízkosti jámy R-3, kde tento blok je lokalizován v jednom horninovém typu, což také podporuje homogenitu horninového bloku, na rozdíl od bloku na 12. patře, kde je v bloku litologická hranice a několik horninových typů.

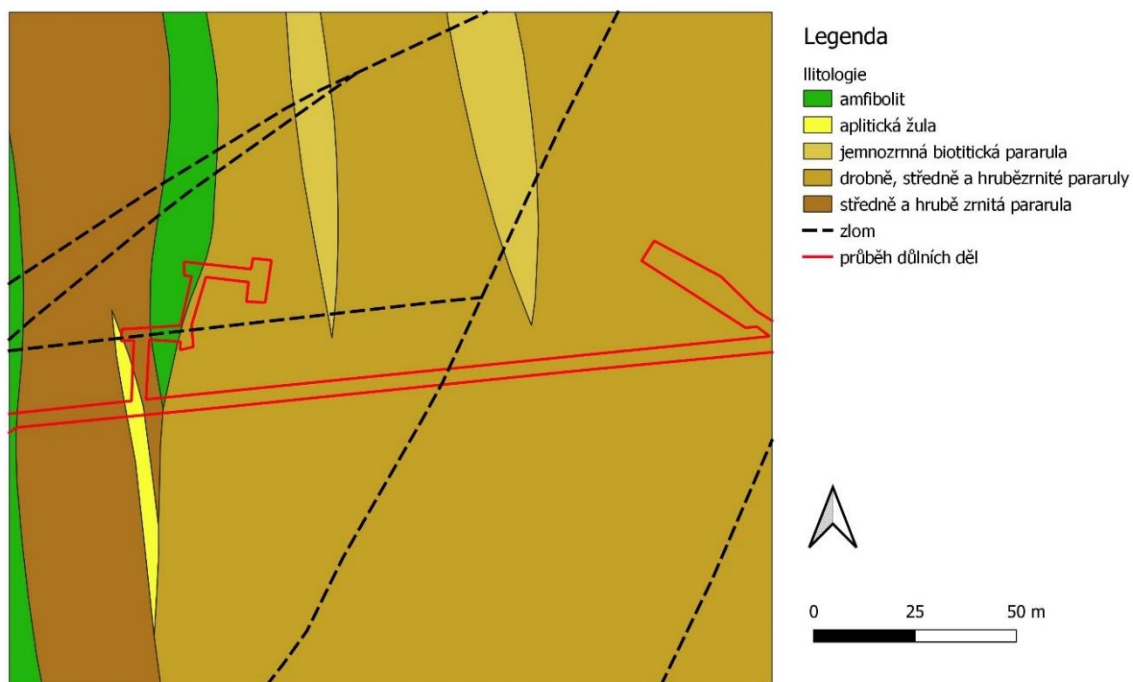


Obr. 596 Náhled výsledného modelu vybraného kvazihomogenního bloku na 12. patře v blízkosti jámy R-1 (Z-XII): černá – zlomy, horninová tělesa viz Obr. 598; červenou linií znázorněn průběh chodeb na 12. p.



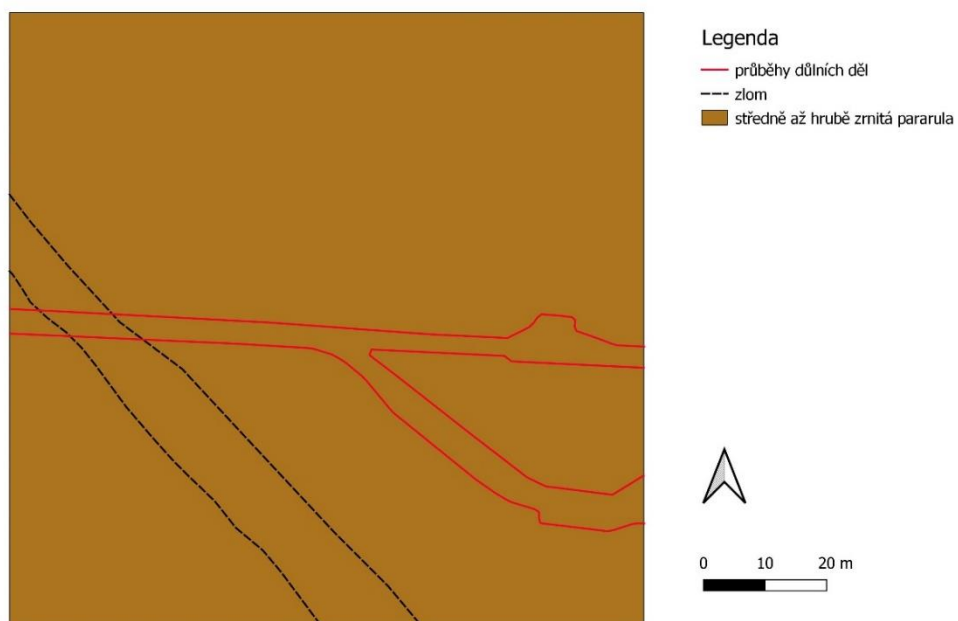
Obr. 597 Náhled výsledného modelu vybraného kvazihomogenního bloku na 20. patře v blízkosti jámy R-3 (Z-XX)

Geologická mapa kvazi homogenního bloku
12. patro dolu Rožná, Z-XII

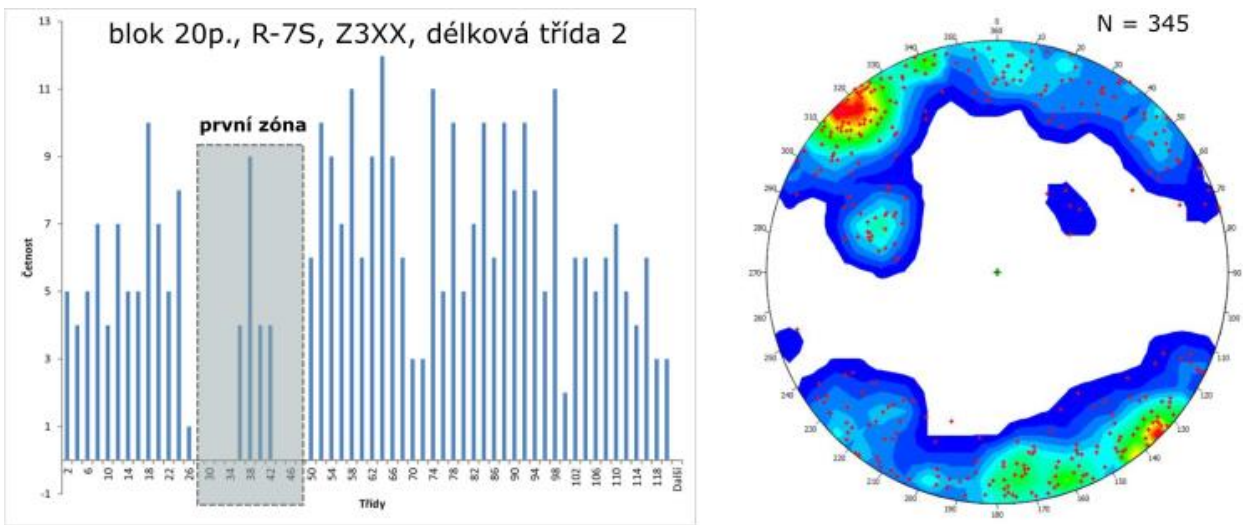


Obr. 598 Mapa vybraného kvazi homogenního bloku na 12. patře v blízkosti jámy R-1 (Z-XII)

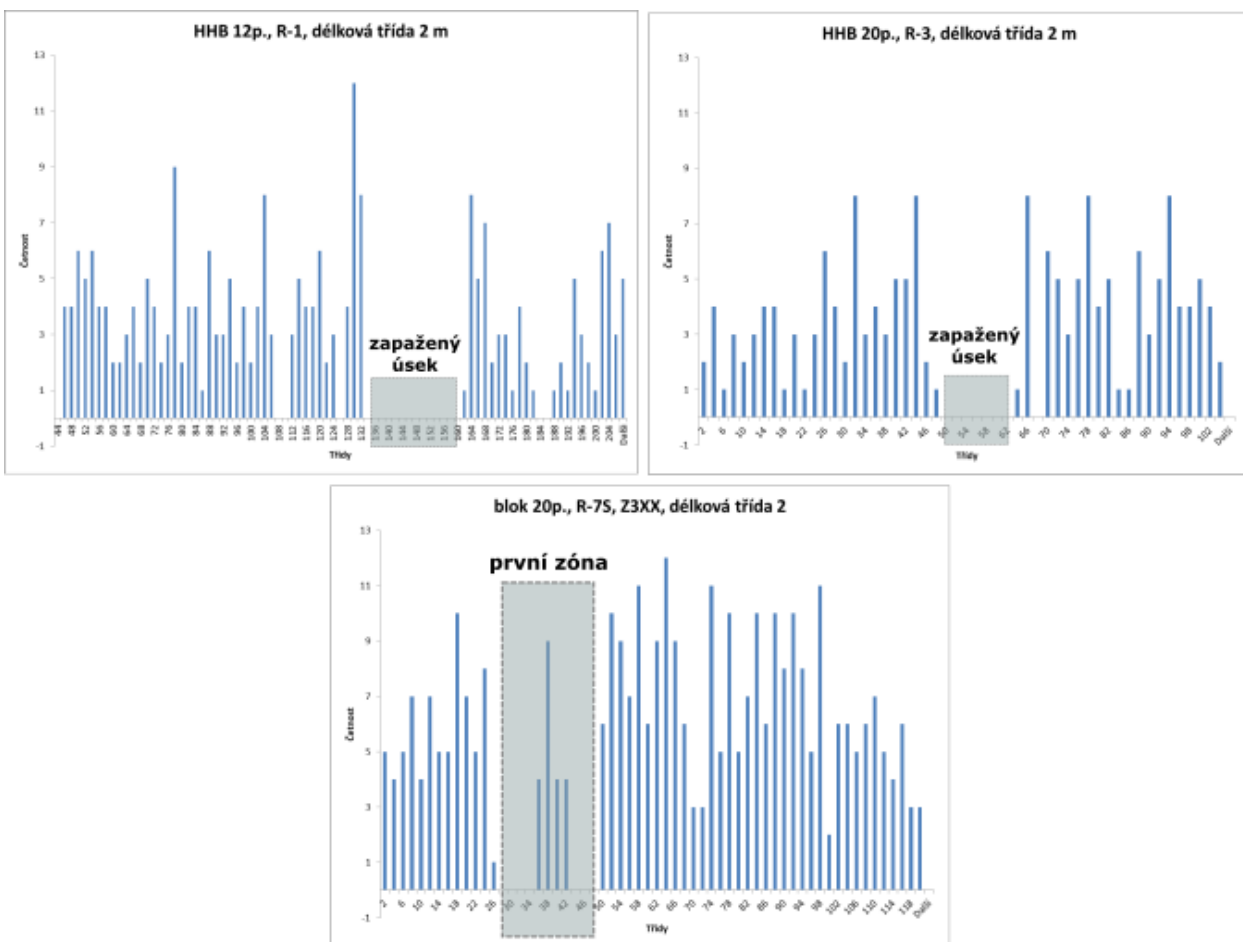
Geologická mapa kvazi homogenního bloku
20. patro dolu Rožná, R-3



Obr. 599 Mapa vybraného kvazi homogenního bloku na 20. patře v blízkosti jámy R-3 (Z-XX)



Obr. 600 Histogram porušení kvazihomogenního bloku podél chodby Z3-XX a stereografická projekce dat



Obr. 601 Srovnání histogramů kvazihomogenních bloků na 12. (HHB 12p.) a 20. patře (HHB 20p.) se studovaným horninovým blokem na 20. patře (blok 20p.)

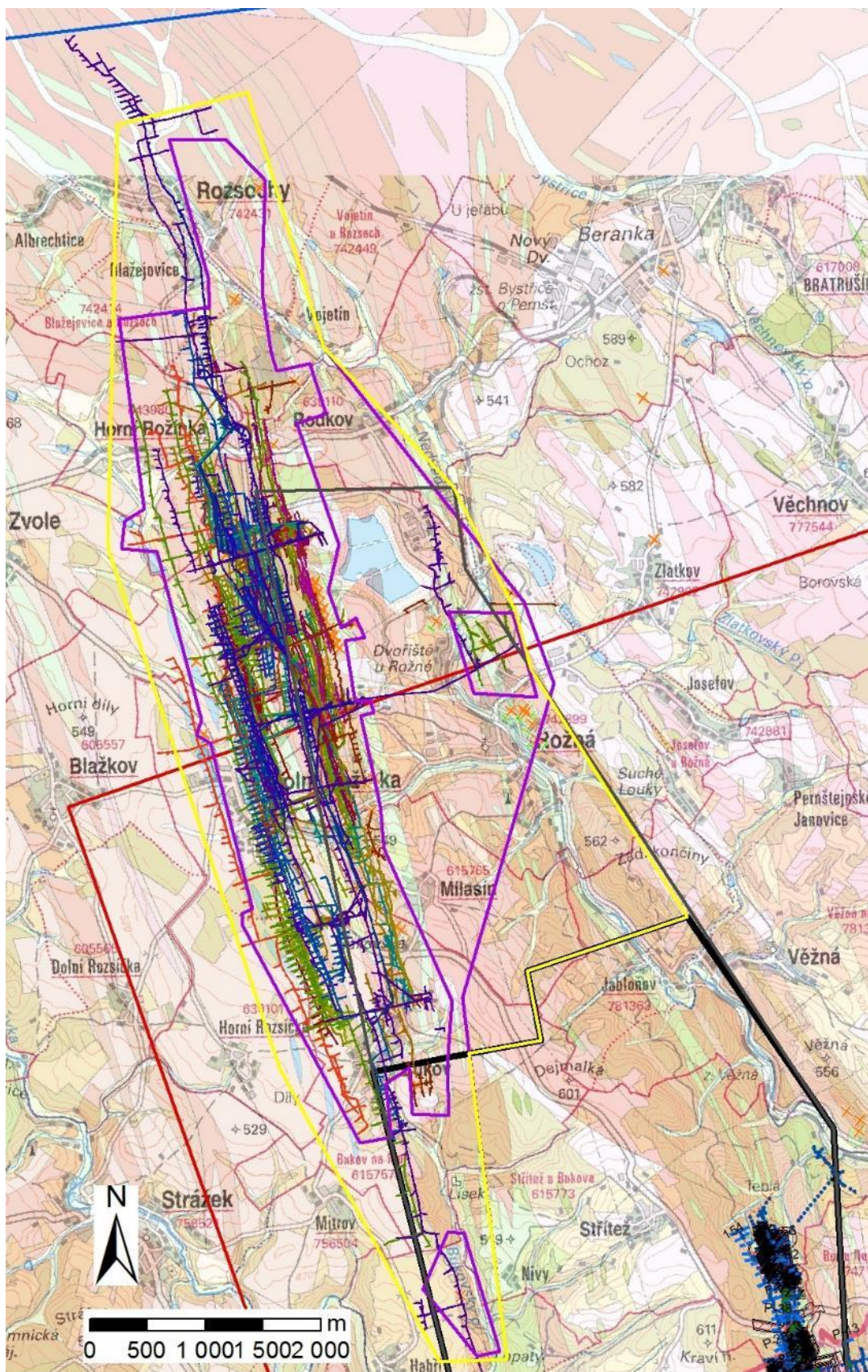
2.5.3 Konceptuální 3D geologický model

Území konceptuálního 3D geologického modelu zahrnuje dvě odlišné jednotky metamorfovaných hornin, a to strážecké moldanubikum na západě a svratecké krystalinikum v jeho východní části (dle Chlupáč a Štorch 1992). Do hornin strážeckého moldanubika byly dále vmístěny granitoidy až syenitoidy drahonínského plutonu (Verner et al. 2009). Základní přehled litologického složení, metamorfního a tektonického vývoje širšího okolí území 3D geologického modelu uvádí práce Vernery et al. (2009), Pertoldové et al. (2009, 2010), Buriánka et al. (2009), Kříbka a Hájka eds. (2005), Schulmanna et al. (2005) a Soejona et al. (2010). Strážecké moldanubikum je tvořeno migmatizovanými pararulami, migmatity, ortorulami a granulity s hojnými polohami amfibolitů, mramorů a kvarcitů. Území svrateckého krystalinika je dominantně tvořeno leukokrátními dvojslídnyými migmatity, ortorulami, pararulami a svory s polohami mramorů, vápenatosilikátových hornin a amfibolitů. Mezi zastoupené pokryvné útvary patří svahové a říční sedimenty omezené mocnosti. Kvůli jejich malé mocnosti nejsou v 3D geologickém modelu zohledněny.

Území 3D geologického modelu spadá do území rudního pole Rožná – Olší, kde od roku 1957 do roku 2017 probíhala hlubinná těžba uranu (shrnutí v Kříbek a Hájek eds. 2005). Uranová mineralizace je zde vázána na mladovariské zóny mylonitizace a katalázy, které protínají komplexy metamorfovaných hornin (Kříbek a Hájek eds. 2005 a citace v práci uvedené).

2.5.3.1 Rozsah 3D geologické modelu

3D konceptuální geologický model (Elektronická příloha 150) svým rozsahem vychází z realizačního projektu prací (Švagera et al. 2018). Model je tedy sestaven na základě archivních materiálů v polygonu opsaném průmětu ražeb Rožná, Habří a Zlatkov, vertikálně sahá do hloubky 50 m pod 24. patro ložiska Rožná, přičemž obsáhl všechny těžené struktury – viz žlutý polygon na Obr. 602. Cílem modelu je sjednocená vizualizace geologie a zlomů pod povrchem v oblasti ložiska Rožná. Veškeré podrobně zpracovávané materiály se tedy soustředí na prostředí podrobněji studovaných pater a úseků ložiska, v případě podkladů pro 3D geologický model zahrnují také úseky ložisek Habří a Zlatkov.



Obr. 602 Umístění a rozsah 3D konceptuálního geologického modelu (žlutě) na podkladu geologické mapy 1 : 50 000 je zobrazeno bývalé PÚ Kraví Hora (černě), rozsah poddolovaných území ložiska Rožná včetně úseků Zlatkov a Habří (fialově), rozsah patrových ražeb ložisek Rožná na Z a Olší na JV

Problematickou je při zpracování důlních dat, obzvláště patrových map, nadmořská výška odpovídajícího patra, která není na žádném patře konstantní. Z důvodu přirozeného odvodňování pater a dalších technických příčin se vertikální souřadnice průběžně mění mezi jednotlivými šachtami ložiska i směrem do okrajových částí ložiska. Pro konstrukci 3D geologického modelu byly využity generalizované výšky jednotlivých pater uvedené v Tab. 191, odvozené z archivních materiálů DIAMO s. p. Maximální rozdíl v nadmořské výšce důlních chodeb jednoho patra je cca 20 m na koncích chodeb na severním a jižním okraji ložiska v porovnání s nadmořskou výškou těchto chodeb u jednotlivých šachet.

Tab. 191 Generalizované nadmořské výšky jednotlivých pater využité při tvorbě 3D geologického modelu. Hodnoty jsou zhruba průměrem, blíží se spíše hodnotě u šachet, než na okraji ložiska

Patro ložiska Rožná	Generalizovaná nadmořská výška (bpv)
P1	505
P2	462
P3	407
P4	353
P5	331
P6	287
P8	216
P9	167
P10	119
P11	69
P12	21
P13	-33
P15	-136
P16	-187
P17	-218
P18	-287
P19	-322
P20	-378
P21	-432
P22	-485
P23	-539
P24	-594

2.5.3.2 Základní data využitá pro tvorbu modelu

Model byl vytvořen na základě následujícího spektra základních geologických dat:

Standardní geologické schéma (legenda)

Geologická legenda použitá pro modelování byla vytvořena po vzájemných diskusích odborníků na krystalinickou geologii širšího regionu z řad DIAMO s. p. a ČGS (Obr. 603, Elektronická příloha 148). Litostratigrafické jednotky byly navrženy již v počáteční fázi projektu na základě znalostí regionální geologie, petrografických a stratigrafických argumentů. Při shromažďování a reinterpretaci všech dostupných geovědních dat se postupně ukázalo, že ne všechny navrhované jednotky bude možné jednoznačně rozlišit v celé modelované oblasti, zejména kvůli nedostatku nebo špatné kvalitě archivních dat. Z tohoto důvodu nejsou všechny plánované jednotky použity v konečné společné geologické mapě a ve 3D geologickém modelu.

Legenda ČGS pro Hluboké horizonty:	Oficiální legenda Diamo s.p., o.z. GEAM
Tektonos/Litologie	
PŘEDPLATFORMNÍ JEDNOTKY ČESKÉHO MASIVU	
KRYSTALINIKUM A ZVRÁSNĚNÉ PALEOZOIKUM	
moldanubikum	
žilné horniny v moldanubiku	
SVRCHNÍ PALEOZOIKUM	
aplit a pegmatit	= pegmatity (VYVŘELINY A METASOMATICKO HORNINY)
leukokrání granit	= aplitické žuly (VYVŘELINY A METASOMATICKO HORNINY)
muskovit-biotitický až biotitický granit	= ---
intruzivní horniny v moldanubiku	
ultradasečné plutonity	
đurbáčit	= ---
metamorfní jednotky v moldanubiku	
metamorfní jednotky v pestré a jednotvárné skupině moldanubika	
NEOPROTEROZOIKUM – PALEOZOIKUM	
biotitická až amfibol-biotitická pararula místy migmatizovaná	= souvrství drobně až středně zrnitých porfyrických plagioklas biotitických rul (DOLOMITO - RULOVÁ SÉRIE)
	= souvrství drobně zrnitých plagioklas biotitických rul s polohami dolomitů, erlánů, ojediněle amfibolitů (DOLOMITO - RULOVÁ SÉRIE)
	= souvrství drobně, středně a hrubě zrnitých plagioklas biotitických rul + cordierit, sillimanit (AMFIBOLIT - RULOVÁ SÉRIE)
	= jemně zrnité plagioklas biotitické ruly (MONOTONNÍ RULOVÁ SÉRIE)
	= středně až hrubě zrnité plagioklas biotitické ruly místy migmatizované (MONOTONNÍ RULOVÁ SÉRIE)
	= cordieritické rohovce (MONOTONNÍ RULOVÁ SÉRIE) - přiřazeny k pararulám, protože jde pravděpodobně jen o několik drobných těles pravděpodobně jemnozrnných kvarcických pararul, a ne Crd-rohovců
stromatitický biotitický až amfibol-biotitický migmatit místy s polohami migmatizovaných amfibolitů	= drobně až středně zrnité migmatizované ruly (MONOTONNÍ RULOVÁ SÉRIE)
mramor	= krystalické vápence a dolomity (MONOTONNÍ RULOVÁ SÉRIE)
vápenato-silikátová hornina (erlan, skarn)	= erlány (MONOTONNÍ RULOVÁ SÉRIE)
amfibolit až biotitický amfibolit	= amfibolity (MONOTONNÍ RULOVÁ SÉRIE)
eklogit, pyroxenit	= eklogity a pyroxenity (MONOTONNÍ RULOVÁ SÉRIE)
peridotit, serpentinit	= hadce (VYVŘELINY A METASOMATICKO HORNINY)
ortorula	= "sedé" ortoruly (VYVŘELINY A METASOMATICKO HORNINY)
ortorula až migmatit (gřohská rula)	= dvojsložné žuloruly a jejich migmatity ("růžové" ortoruly) (VYVŘELINY A METASOMATICKO HORNINY)
granulitové komplexy moldanubika	
felzický granulit, granulitová rula	= ---
Si - hydrotermální žila nebo žilník, e - epidotizace až epidotit, k - kataklazit, m - mylonit, h - hematizace, a - albitizace, ch - chloritizace	= dislokace, tektonické zóny

Obr. 603 Legenda - převodní tabulka mezi návrhem legendy pro 3D geologický model (vychází z detailního 3D modelu lokality Kraví hora a zjednodušené legendy z charakterizace PVP Bukov) a legendou užívanou v DIAMO pro tvorbu map a řezů v tomto projektu; červeně zvýrazněné položky nejsou ve finálním 3D geologickém modelu obsaženy

Sjednocená digitální geologická mapa oblasti 3D modelu

Sjednocená zjednodušená speciální digitální geologická mapa pro modelovanou oblast byla vytvořena na základě archivních map a dalších prostorových dat (Obr. 605), které se často vzájemně liší nebo si někdy lokálně až protičejí. Všechny tyto archivní mapy jsou součástí GIS projektu vytvořeného během přípravy dat v softwaru ESRI ArcMap 10.6 (Elektronická příloha

149). Nejpravděpodobnější geologické hranice byly určeny kvalifikovaným odhadem a současně byl definován litologický typ, který tvoří základ pro definici litostratigrafických jednotek modelu – „Horizontů“ v modelovacím programu MOVE. Slučování litologických typů a těles bylo založeno na petrografické a mechanické podobnosti některých typů hornin, např. dvou podobných typů granitoidů. Dále byly zjednodušeny lokálně příliš komplikované hranice geologických těles, které jsou nevýznamné z hlediska rozměrů celého modelu. Takto zkomponovaná digitální geologická mapa byla použita pro konstrukci geologického 3D modelu.

Po diskuzích se zástupci SÚRAO a DIAMO s. p. bylo rozhodnuto, že povrchová geologická mapa včetně zlomové sítě bude v území bývalého PÚ Kraví hora převzata z geologické mapy pro detailní 3D geologický model lokality Kraví hora (Obr. 605) a zároveň zde bude využitý geologický 3D detailní model lokality Kraví Hora (Franěk et al. 2018). V ostatních částech zájmového území zakázky Hluboké horizonty bude geologická mapa převzata hlavně z vektorizovaných podkladů od DIAMO s. p., jejichž základ tvoří archivní geologická mapa Plhala a Katargina (1973), s přihlédnutím k mapě 12. patra ložiska Rožná od Nohála et al. (2019) – srovnání map viz Obr. 604, a k předchozím pracím ČGS v této oblasti zaměřeným obzvláště na zlomovou síť. V předchozích zakázkách ČGS pro SÚRAO byla v severní části drahonínského granulitového masivu a jeho okolí provedena detailní revize zlomů. Kromě archivních geologických map standardně využívaných pro tvorbu 3D strukturně geologických modelů (Franěk et al. 2018) zde byly tyto zlomy podrobně vyhodnoceny na základě:

- podrobných syntetických map Mazucha et al. (2010) pro úrovně 550, 360, 175, 25 a -220 m. n. m.;
- práce Ondříka et al. (2011a);
- archivních geologických map 1 : 5 000 ložiska Rožná a ložiska Olší (Obr. 606), které obsahují lokalizaci jednotlivých povrchových průzkumných rýh (ale neobsahují jejich geologickou dokumentaci);
- rukopisných patrových map ložisek Rožná, Habří a Olší v rozsahu 1.–12. patra poskytujících geologickou dokumentaci z doby ražby jednotlivých důlních pater v měřítku 1 : 1 000 vytvořených kolektivem autorů DIAMO s. p. (na každé mapě se podíleli geologové a měřiči, kteří měli daný úsek v době ražby na starosti);
- terénních strukturních dat pořízených ČGS v sezóně 07/2016–05/2017 v rámci zakázky 3D strukturně geologické modely HÚ (Franěk et al. 2018);
- 3D modelu ražeb na ložisku Rožná (chybí většina komínů) a na ložisku Olší (cca 80 % mezipatrových komínů zpracováno), jejichž autorem je K. Hlisenkovský z DIAMO s. p.

V přechodné zóně těchto dvou map (podél severního okraje detailního modelu) byla mapa Plhala a Katargina (1973), a v případě nutnosti i detailní 3D model Kraví hory, adaptovány tak, aby byl přechod těchto dvou zdrojů bezešvý – týká se horninových těles i zlomů. Drobné protáhlé čočky amfibolitů v mapě Plhala a Katargina (1973) byly zjednodušeny jako větší tělesa amfibolitu, nebo byla využita nová legendová položka „pararuly s četnými vložkami amfibolitů“.

Konkrétní úpravy provedené pro sešití těchto 2 map:

Zlomy: Rodkovské poruchy – jsou převzaty z mapy Plhala a Katargina (1973). Jsou vertikální a došlo podél nich k výzdvihu (bez horizontálního posunu) severní kry o cca 50 m nahoru. Na 10. patře ložiska Rožná jsou tyto poruchy téměř přesně v.–z., tedy se do hloubky stácejí. Možný průběh je podle archivní mapy DIAMO 1 : 5 000 cca Z-V i na povrchu, podle archivní mapy DIAMO 1 : 20 000 je jejich průběh ZSZ-VJV.

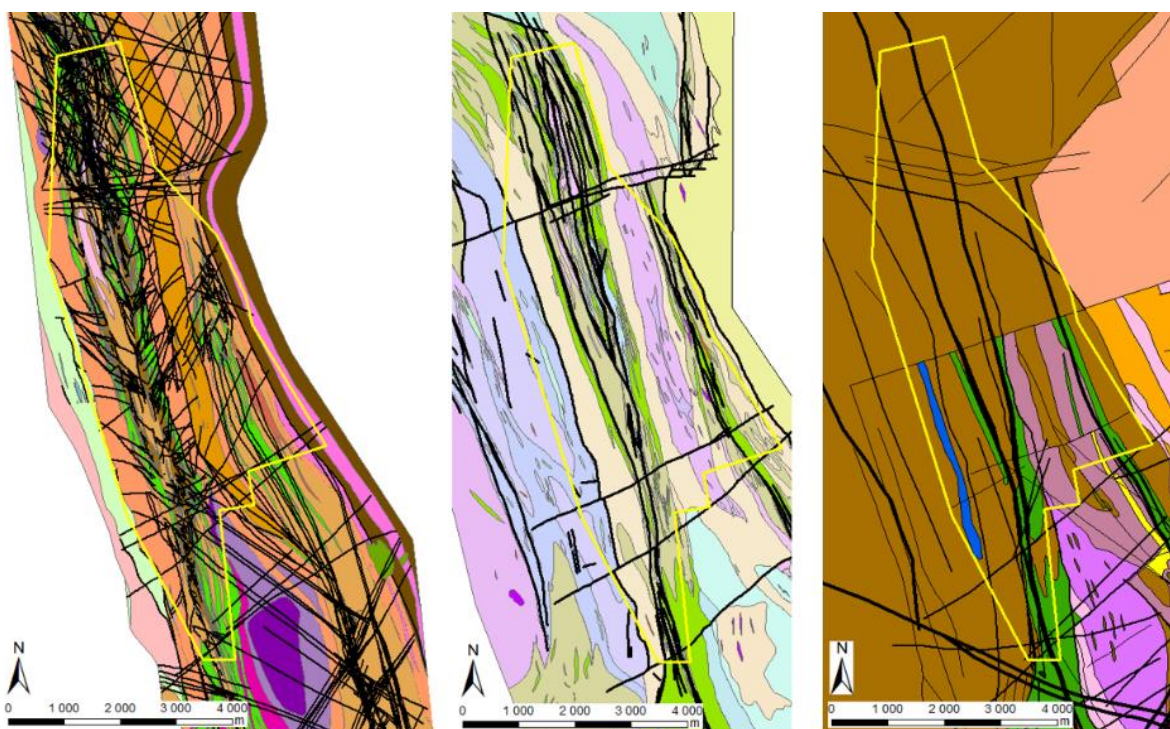
S-J poruchy byly převzaty z mapy Plhala a Katargina (1973).

Vírská dislokace ID65 byla převzata z regionálního modelu Kraví hora (Franěk et al. 2018).

Příčné poruchy u severní hranice bývalého PÚ Kraví hora, které chybí v mapě Plhala a Katargina (1973), byly individuálně prodiskutovány a vyřešeny s D. Holéczym z DIAMO s. p.

Horninová tělesa: Centrální a východní část byla napojena bez problémů. V západní části byla drobná tělesa amfibolitů (jedná se spíše o amfibolické ruly s ččkami amfibolitů) mírně zjednodušena jakožto amfibolická rula.

Pro tvorbu modelu v úrovni cca 20 m. n. m. byla dále využita geologická mapa 12. patra dolu Rožná od Nohála et al. (2019), avšak se zjednodušenými tvary horninových těles s ohledem na přehlednost celého 3D geologického modelu a výrazně zjednodušenou zlomovou sítí tak, aby korespondovala povrchovým mapovým podkladům. V mapě Nohála et al. (2019) jsou totiž vyobrazeny všechny zlomy mocnější než cca 5 cm a navíc výrazné puklinové zóny, což odpovídá řádově vyšší podrobnosti zobrazení, než jakou poskytují dostupné povrchové geologické mapy. Velmi výrazný rozdíl v hustotě zlomové sítě na povrchu (mapa Plhala a Katargina 1973 a mapa Fraňka et al. 2018 ze 3D modelu Kraví hora – menší počet zlomů) a mapa 12. patra M. Nohála et al. (2019; velký počet zlomů) byl řešen individuálním výběrem zlomů, které budou konstruovány v geologickém 3D modelu, také s přihlédnutím k navázání na již existující 3D geologický model lokality Kraví hora.

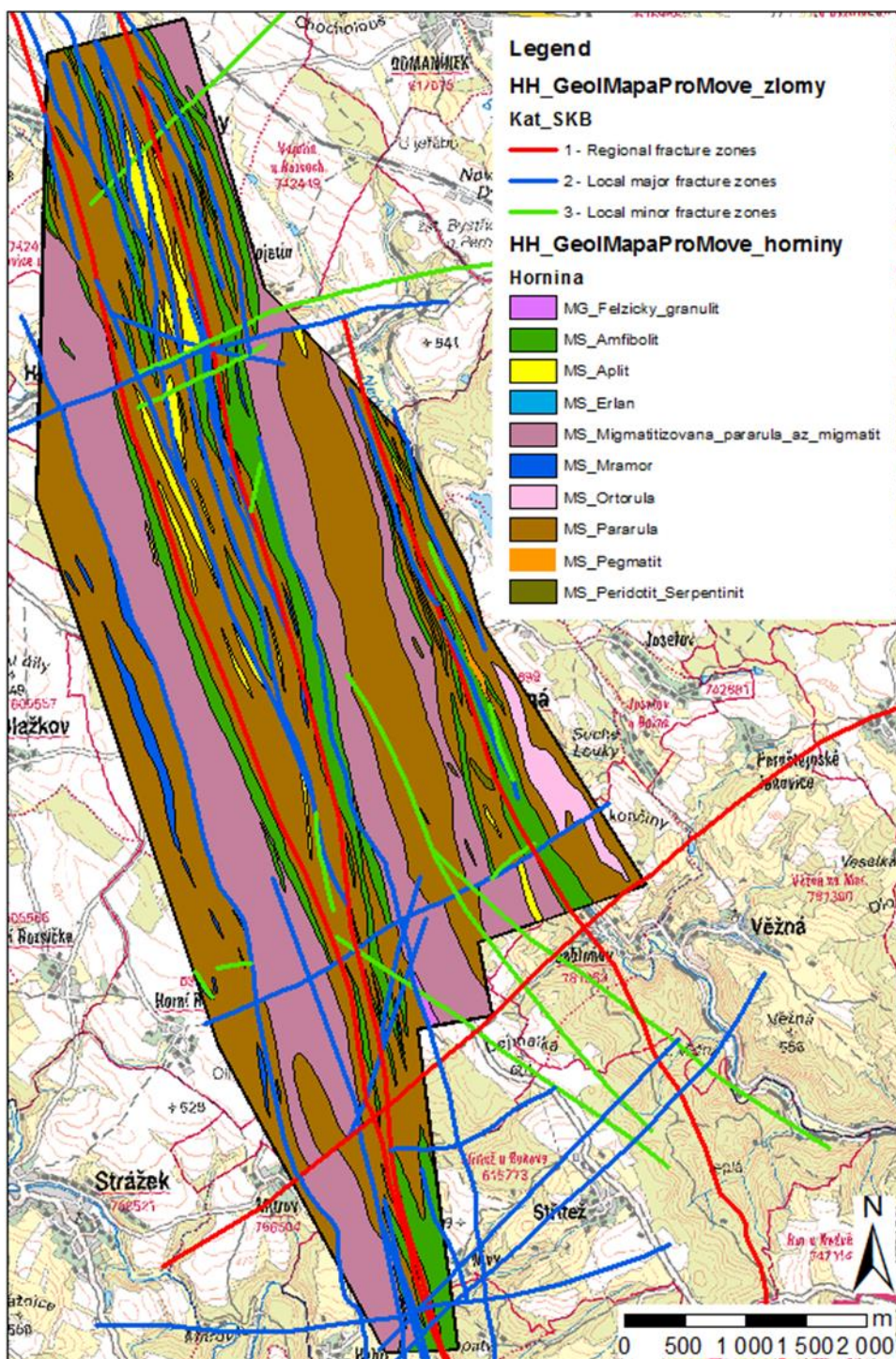


M. Nohál et al. 2019 – 12. patro

Katargin a Plhal – povrch

Franěk et al. 2018 det. model K.H. - Povrch

Obr. 604 Srovnání tří geologických map sloužících jako základní mapové vstupy pro tvorbu 3D geologického modelu

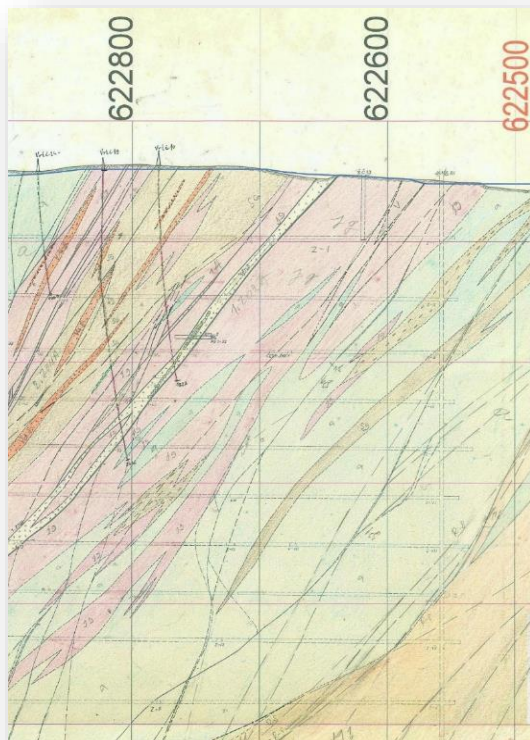


Obr. 606 Výsledná povrchová geologická mapa využitá pro tvorbu 3D geologického modelu

Geologické řezy

Téměř celé území 3D geologického modelu je pokryto vertikálními příčnými řezy ložiskem Rožná – celkem 38 paralelních řezů cca v v.-z. orientaci (Obr. 607). Tyto řezy byly importovány do MOVE ve formě rastrových obrázků a georeferencovány (podle dostupných mapových dat). Byly využity ke zpřesnění geologického modelu hlavně v oblastech, kde bylo k dispozici méně údajů

z patrových map (v měřítku 1 : 1 000). Zde byly použity hlavně pro doplnění průběhu zlomových ploch rudních systémů.



Obr. 607 Výřez z archivního vertikálního příčného geologického řezu 0-0 jámou R1

Strukturní data

Pro 3D geologický model bylo nutné transformovat archivní strukturní data z tištěných patrových map 1 : 1 000 v prostředí SW ArcMap do digitální tabulkové formy. Výsledná tabulka byla importována do MOVE; jednotlivá měření byla vizualizována z hlediska jejich orientace a použita při konstrukci těles metamorfovaných hornin. Archivní struktury představují především foliační plochy, správnost těchto strukturních měření byla namátkově ověřena v předchozích zakázkách ČGS pro SÚRAO. Digitalizace struktur byla realizována napříč celým rozfáraným objemem horninového masívu na ložisku Rožná.

Zlomová síť

Zlomová síť v této oblasti vykazuje složitou geometrii a vícefázový vývoj od závěrečných fází variské kolize přes pravděpodobnou mesozoickou aktivitu až po možnou lokální kvartérní reaktivaci (Hájek a Kříbek eds. 2005). Tento vývoj křehké tektoniky vedl k vývoji husté sítě zlomů, jejichž přesnou lokalizaci je na povrchu často obtížné určit kvůli kvartérnímu pokryvu a obecně špatné výchozové situaci. Všechny zlomy zjištěné v archivních materiálech ze zemského povrchu jsou obsaženy ve 3D geologickém modelu, neboť pozice a charakter jednotlivých zlomů jsou pro

projekt důležité. Všechny zlomy byly seskupeny s ohledem na jejich orientaci, což pravděpodobně naznačuje jejich genetický a geometrický vztah. Poruchy byly navíc barevně označeny z hlediska jejich důležitosti s klesající významností od červené přes modrou po zelenou. Zvláště pečlivě byly definovány zlomové zóny rudních systémů vybraných pro navazující ložiskový model.

Všechna výše popsaná data byla integrována do 3D geologického modelu v softwaru MOVE, zejména jako: 1) shapefile (.shp) formát pro linie a polygony; 2) formát souboru TIFF s pohyblivou desetinnou čárkou v případě gridů, včetně doplňkových souborů GIS pro georeferencování rastrů; 3) formát JPEG pro rastrové obrázky (zejména naskenované geologické vertikální profily); 4) strukturovaný formát souboru TXT s oddělovačem TAB strukturní data (foliace atd. – pozice a orientace).

2.5.3.3 Detailní archivní podklady z dolu Rožná

Kromě výše uvedených obvyklých zdrojů archivních dat byla v případě tohoto modelu k dispozici řada podrobných archivních podkladů vytvořených v průběhu průzkumu a těžby místních uranových ložisek. Tyto specifické detailní archivní podklady z dolu Rožná, testované a z velké části následně využité pro tvorbu 3D geologického modelu, jsou z velké části podrobně popsány ve zprávě Navrátila a Bukovské (2018). Zahrnují tyto materiály:

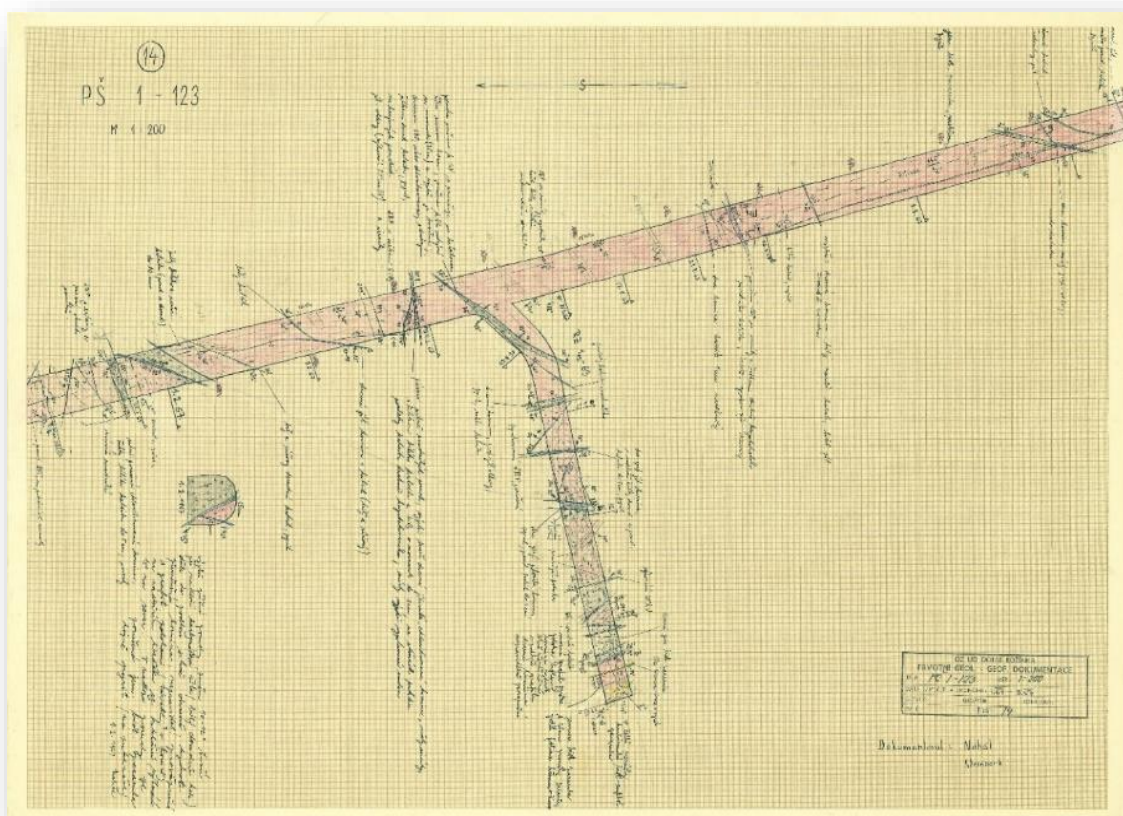
- základní důlní mapy (ZDM - měřické) v měřítku 1 : 1 000 včetně jejich usazení v souřadnicovém systému S - JTSK;
- prvotní dokumentaci horizontálních ražeb vybraných úseků důlních děl k rekognoskaci v měřítku 1 : 200 vynesenu na milimetrové papíry (Obr. 608);
- dokumentace rozsahu a zrudnění jednotlivých dobývek, tzv. „lenty“, a těžných bloků, tzv. „blokové mapy“ (Obr. 609);
- vertikální projekce jednotlivých rudonosných systémů v měřítku 1 : 1 000 a 1 : 5 000 s vyznačením rozsahu vydobytí a kontur zrudnění;
- příčné řezy 1 : 1 000 ve formě provozní dokumentace;
- rozsah patrových ražeb ve formátu dxf (doplněné o nově raženou odvodňovací štolu případně prostory PVP Bukov);
- geologickostrukturní mapu rudního pole Rožná – Olší v úrovni cca 600 m pod povrchem (12. patro dolu Rožná ~ 10. patro dolu Olší; Nohál et al. 2019).

Všechny tyto podklady byly testovány pro využití při tvorbě geologického modelu, avšak některé se ukázaly jako nepoužitelné (lenty, blokové mapy a prvotní dokumentace) z důvodu přílišného detailu v kontextu měřítka celého modelu a zároveň četných chyb v názvech dokumentovaných struktur a technických prvků (rozrážek, dobývek a komínů). Jiné (např. vertikální projekce jednotlivých rudonosných systémů) byly pouze vizualizovány pro kontrolu rozsahu modelovaných struktur, nebyly však pro tvorbu geologického modelu nijak vektorizovány. Z patrových map 1 : 1 000 byly kromě geologických fenoménů dále jako součást budoucího ložiskového modelu a ve spolupráci s DIAMO s. p. digitalizovány projekční linie vybraných rudních systémů, které představují horizontální průměty vertikálních projekčních rovin těchto systémů pro zobrazení jednotlivých těžných bloků v souhrnných projekcích.

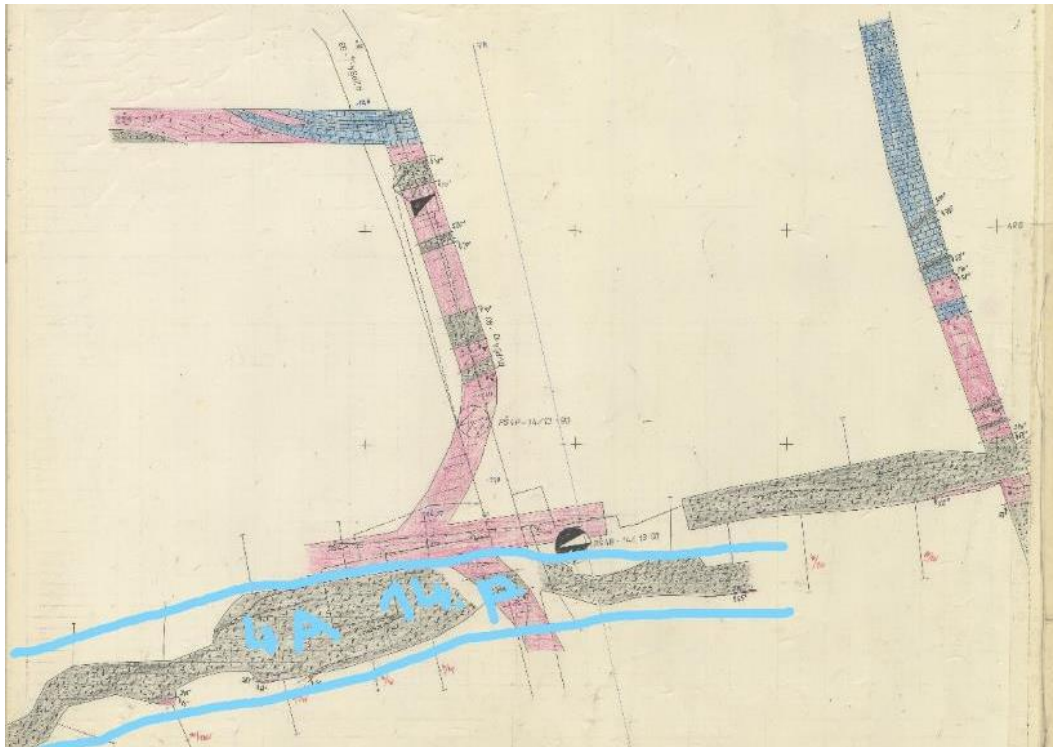
Zmíněné chyby v názvech vyobrazených objektů hlavně v podrobných archivních materiálech vychází ze složité struktury ložiska, kdy se jednotlivé rudní žíly, resp. zlomy, lokálně rozmršťují do řady odžilků, které se místy spojují s jinými subparalelními rudními zónami. Dokumentace přitom měly dvě fáze:

- příprava – otvírkové rozrážky + ražba komína = přípravná dokumentace;
- těžba – dokumentace se vede již jen ve velké podrobnosti v rámci bloku, zpětně se přípravná dokumentace už nekoriguje.

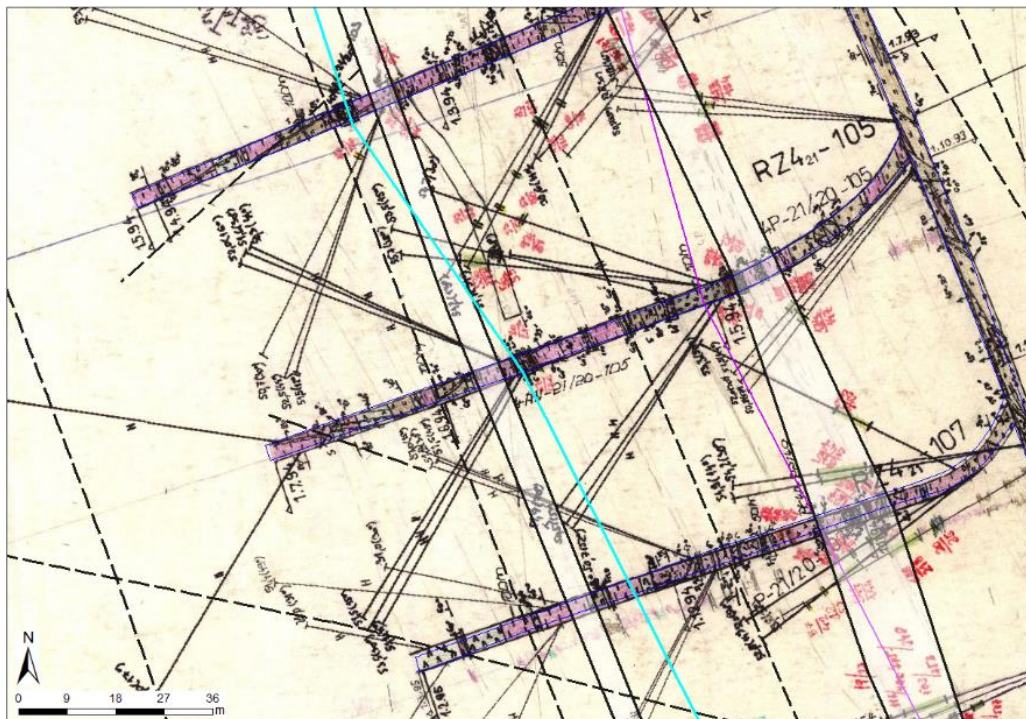
Ve strukturně složité situaci se v přípravné fázi často nepodařilo přesně určit, který z odžilků, výjimečně ani která z hlavních struktur, je nafárána, a primární i zjednodušená dokumentace (například patrové mapy 1 : 1 000) se pak místo od místa neshoduje (Obr. 610). Hlavně ve vyšších patrech ložiska pak nelze využít korekce od pamětníků, a všechny podniknuté pokusy o přesné a zároveň podrobné vymodelování jednotlivých rudních struktur (cca 60 žil v celém ložisku Rožná) skončily z tohoto důvodu nezdarem (Obr. 611).



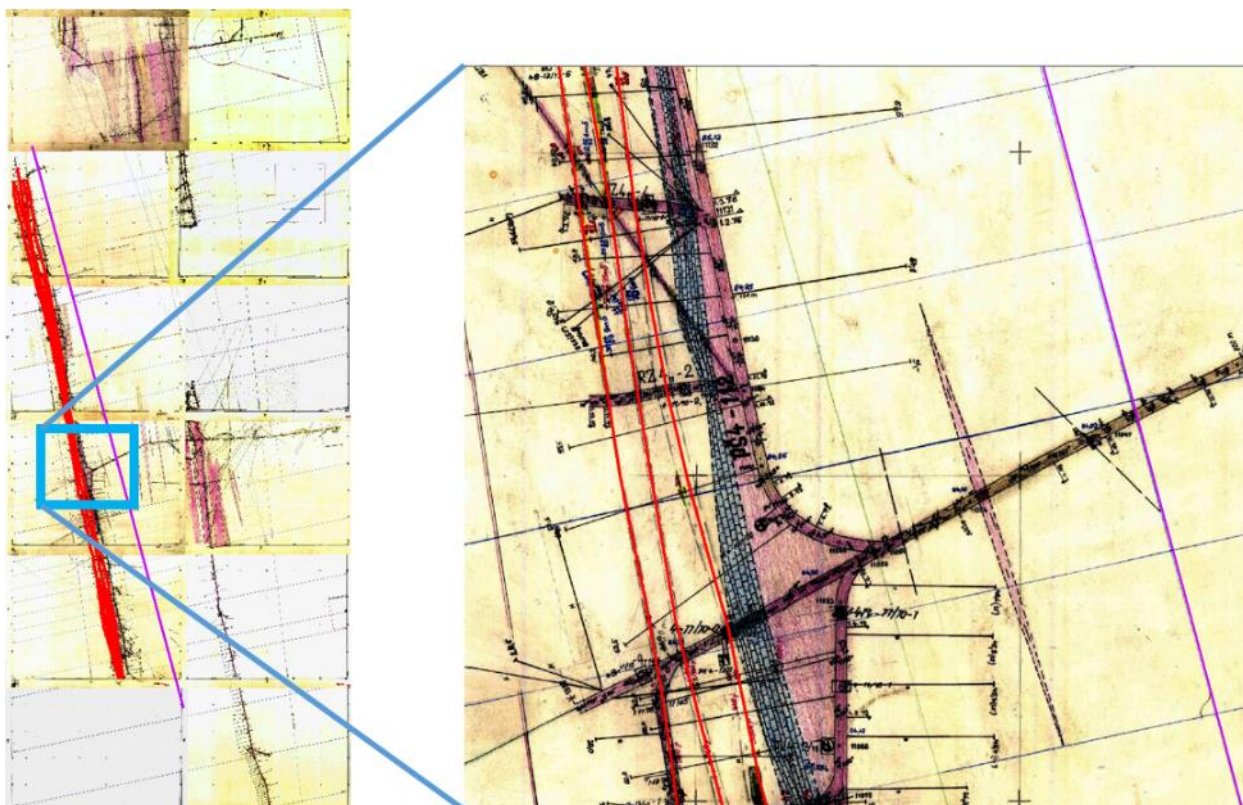
Obr. 608 Prvotní geologická dokumentace v měřítku 1 : 200 – 12. patro, překop PŠ1-123



Obr. 609 Detailní bloková mapa z ložiska Rožná – příklad žíly 4A na 14. patře



Obr. 610 21. patro – uprostřed špatné označení komína – 4AN, ale vzhledem k pozici v (těsném) podloží zlomu R4A by měl správně být označený 4AP – typický příklad, který se v dokumentaci mnohokrát opakuje a způsobuje velké problémy při identifikaci jednotlivých zlomových ploch



Obr. 611 Dle georeferencovaných patrových map 1 : 1 000 byla podrobně zvektorizována část zóny R4 jakožto první struktury, na které byla testována podrobná tvorba ložiskového modelu; zde příklad z 11. patra. Z patrových map 1 : 1 000 však není zřejmé, jaká jména (4AN, 4AP apod.) patří kterým odžilkům zóny R4

2.5.3.4 Metodika konstrukce 3D geologického modelu

Technicky se 3D geologický model skládá z meshů, tj. TIN objektů, které představují dva typy geologických objektů – litostratigrafické hranice a zlomové plochy. Horní část modelu představuje rastr digitálního modelu reliéfu 20 x 20 m vytvořený na základě 4G LIDAR dat, strany modelu jsou svislé a báze modelu byla stanovena horizontální v hloubce -700 m n. m.

Konstrukce 3D modelu byla založena na digitálním zpracování a interpretaci dostupných geologických dat, zahrnující hlavně tyto položky: geologické mapy v různých měřítcích, vertikální geologické řezy, strukturní údaje o orientaci ploch foliace a orientaci zlomových ploch. Vrtná data nebyla využita z důvodu neexistující inklinometrie vrtů a zároveň velkého množství výrazně přesnějších podzemních dokumentací z ložiska Rožná. Pro konstrukci 3D modelu byl použit software MOVE verze 2018.1.

2.5.3.4.1 Předpoklady modelu

Pro dokončení modelu s částečným nedostatkem důležitých dat bylo nutno aplikovat několik předpokladů. Nejprve byly zlomy seskupeny a každé skupině byl při neznalosti hloubkového průběhu přiřazen konstantní sklon na základě známého sklonu jedné nebo několika poruch ve skupině nebo odhadem sklonu na základě regionálně významného zlomu stejného směru

poblíž. Pokud žádný z těchto odhadů nebyl možný, pak byl zlom modelován jako vertikální. Dále malá tělesa metamorfovaných hornin (např. amfibolity) byla modelována jako čočky, s největším rozsahem na zemském povrchu a zmenšováním dolů po sklonu okolních foliací. Žíly granitických hornin byly modelovány obdobně jako vertikální čočkovitá tělesa.

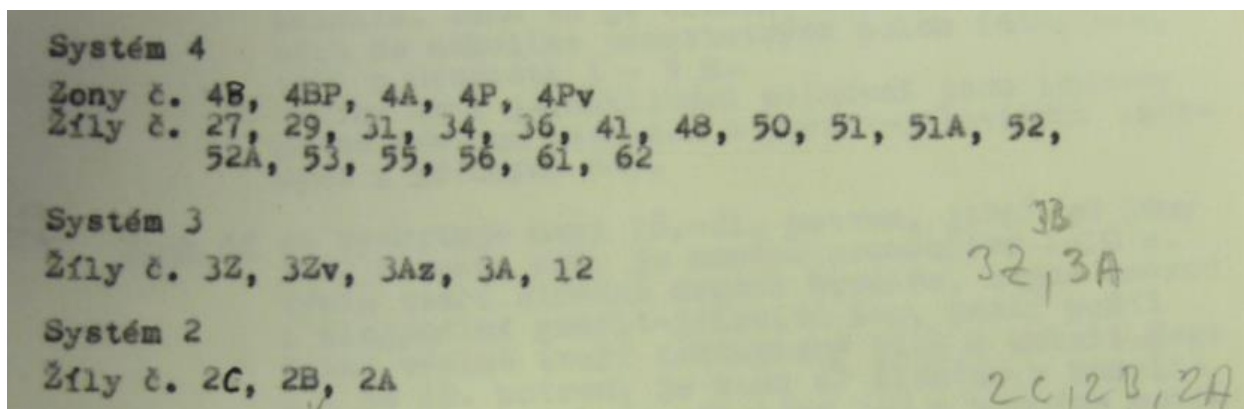
2.5.3.4.2 Pravidla modelování

V průběhu celého modelovacího procesu bylo při tvorbě litologických hranic aplikováno obecné geologické pravidlo: mladší litostratigrafické jednotky přetínají starší jednotky. Pokud jde o zlomy, nelze použít tyto vztahy z důvodu opakované reaktivace jednotlivých zlomových populací během dlouhé křehce tektonické historie této oblasti od pozdně variského období (cca 340 Ma) až po mesozoický a kenozoický vývoj. Zlomová síť byla modelována extruzí povrchového průběhu zlomů podle sklonu určeného z archivních materiálů DIAMO s. p. nebo odhadnutého pro každý zlom. Modelovaná zlomová síť byla poté použita jako jedno z omezení při modelování sousedících horninových těles. Modelování geologických těles bylo prováděno ručně a individuálně na základě odborného posouzení geologické pozice a strukturních údajů z okolí každého tělesa.

2.5.3.4.3 Tvorba hlavních rudních systémů vybraných pro ložiskový 3D model

Jedním ze základů konceptuálního 3D ložiskového modelu je model prostorového průběhu hlavních struktur šesti rudních systémů vybraných pro ložiskový model (SY1, SY2, SY3, SY4, SY7 a SY11 – viz Obr. 615). Tyto systémy byly vzhledem ke svému ložiskovému významu vymodelovány s vysokou přesností výrazně přesahující přesnost všech ostatních objektů ve výsledném 3D geologickém modelu.

Po iniciálních neúspěšných pokusech (viz kapitola 2.5.3.3) bylo nutno přistoupit ke zjednodušení plánovaného modelu. Model byl vytvořen na základě vertikálních projekcí celých tzv. „rudních systémů“, kterých je pro celé ložisko Rožná z doby těžby ustanoveno osm (v závorce je vždy uvedena hlavní neboli nosná rudní struktura – žíla – pro daný systém) : SY1 (první zóna), SY2 (druhá zóna), SY3 (třetí zóna), SY4 (čtvrtá zóna), SY7 (žíla 1C), SY11 (žíla 11), SY17 (žíla 1Z) a SY18 (žíla 62). Jedná se o relativně méně přesný, ale vzhledem k popsáním chybám v prvotní dokumentaci v důsledku správnější postup. Pro tyto systémy existují v archivních materiálech DIAMO s. p. podrobnější popisy (Obr. 612) a dále tzv. „souhrnné vertikální projekce“ v měřítku 1 : 5 000, do kterých byly vyznačeny pracovníky DIAMO s.p. obálky jednotlivých rudních těles. Pro tato jednotlivá rudní tělesa pak DIAMO s. p. dodalo další doplňující údaje, které byly vypočteny na základě neveřejných databázových údajů DIAMO s. p. pocházejících z doby těžby a zpracování jednotlivých dobývaných bloků, které skládají každé rudní těleso. Na ložisku Zlatkov nebyla po konzultacích s ložiskovým týmem a pracovníky DIAMO s. p. takto vytvářená žádná struktura, neboť zde bylo těženo jen několik bloků na zóně O45 a to pouze na 12. patře, tudíž je toto ložisko v měřítku celé ložiskové oblasti Rožná – Olší zcela nevýznamné a pod rozlišovací možnosti výsledného ložiskového 3D modelu.



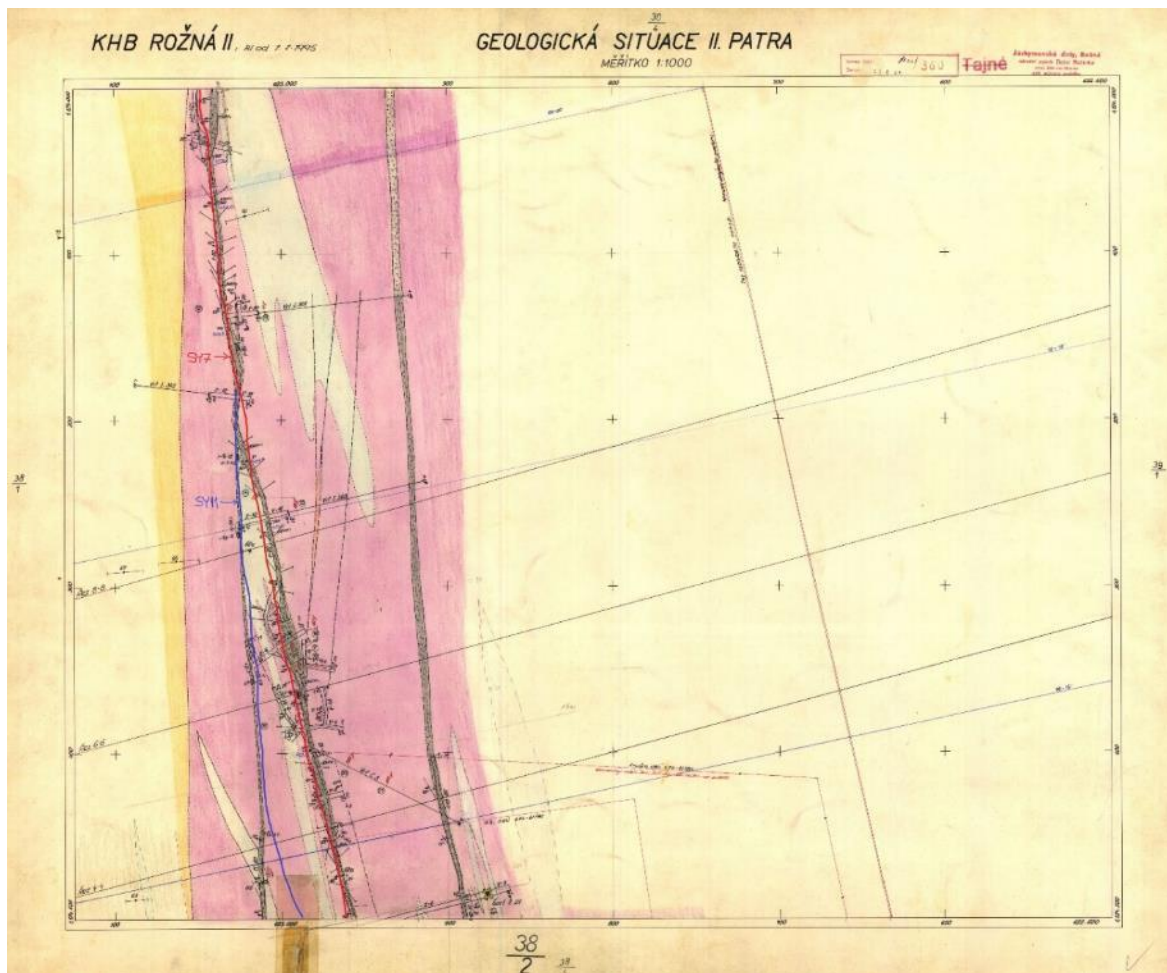
Obr. 612 Příklad příslušnosti jednotlivých žil, resp. zrudnělých zlomů, k jednotlivým systémům – z generálního výpočtu zásob ložiska Rožná z roku 1984

Průběhy nosných struktur pro jednotlivé rudní systémy jsou na všech patrech ložiska Rožná zdigitalizovány dle patrových map 1 : 1 000 a na tomto základě byl vytvořen model průběhu těchto systémů v prostoru. Digitalizována byla konvenčně vždy spodní (podložní) plocha nosné struktury pro každý systém. Ve spolupráci s odborníky DIAMO s. p. byl zvektorizován průběh všech těchto systémů v celém rozfáraném objemu ložiska – na 3., 6., 9., 12., 15., 18., 21. a 24. patře. Následně byly tyto struktury protaženy dle nesouvislých indicií rudních zón v patrových mapách 1 : 1 000 v okrajových částech ložiska, kde už nebyla příslušnost nafáraných zlomů ke konkrétním systémům zcela zřejmá (Obr. 617). Takto získané konstrukční linie byly importovány do programu MOVE, vytvořeny podle nich pracovní meshe zlomových ploch a tyto meshe automaticky extrapolovány řádově stovky metrů do všech stran. Extrapolované meshe byly rozřezány horizontálními sekcemi v úrovni jednotlivých pater, odpovídající intersekční linie byly importovány do ArcMap GISu a zde spolu s patrovými mapami 1 : 1 000 ve zcela okrajových částech ložiska a na zemském povrchu využity pro odhad průběhu rudních zón v co největším rozsahu (Obr. 618). Tímto postupem získané prodloužené konstrukční linie byly z ArcMap opět importovány do MOVE, konfrontovány s vertikálními příčnými řezy ložiskem (Obr. 614). V místech, kde nebyly k dispozici údaje z patrových map 1 : 1 000, ale vertikální příčné řezy danou strukturu vyobrazovaly, byl průběh konstrukčních linií v MOVE upraven dle těchto vertikálních řezů. Z takto finalizovaných horizontálních konstrukčních linií byly vytvořeny meshe zmíněných šesti systémů. Tyto meshe byly následně manuálně drobně upraveny tak, aby se nikde navzájem neprotínaly, neboť všechny vybrané systémy jsou subparalelní a nepřetínají se navzájem, a aby měly zhruba eliptický tvar předpokládaný pro celkovou geometrii těchto struktur v prostoru.

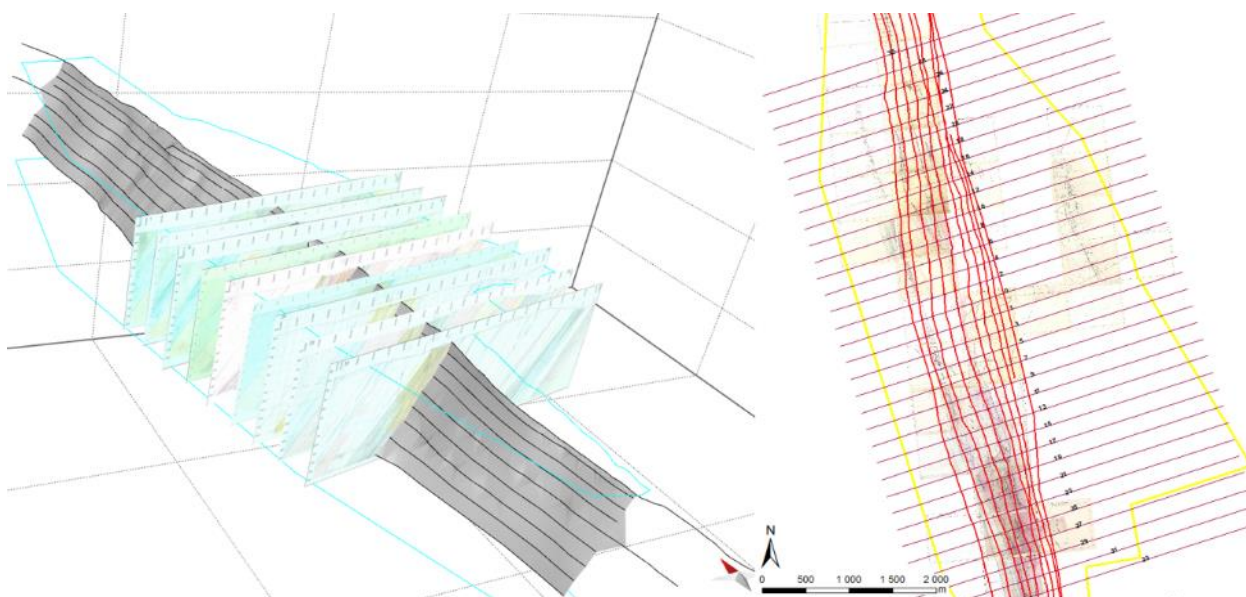
Hlavní silnou stránkou tohoto zjednodušeného přístupu je velmi podrobně a dle dostupných podkladů v měřítku modelu zcela přesně vykreslená geometrie těchto poruch napříč celým rozfáraným objemem horninového masívu.

Dále byly zdigitalizovány průběhy projekčních rovin pro tyto systémy a byla zkontrolována správnost jejich azimutu dle údajů na vertikálních projekcích 1 : 5 000. Dle informací pracovníků DIAMO s. p. probíhalo projektování dobývaných bloků na vertikální projekční rovinu vždy kolmo na tuto rovinu. Na základě těchto dat bylo možné ložiskovým týmem ČGS usadit a digitalizovat všechny souhrnné vertikální projekce 1 : 5 000 dle metodiky schválené v průběhu projektu. Do vertikálních projekčních rovin tak byly v MOVE georeferencovány vertikální projekce 1 : 5 000 – ve vertikálním směru dle nadmořských výšek uvedených v projekci, v horizontálním směru dle

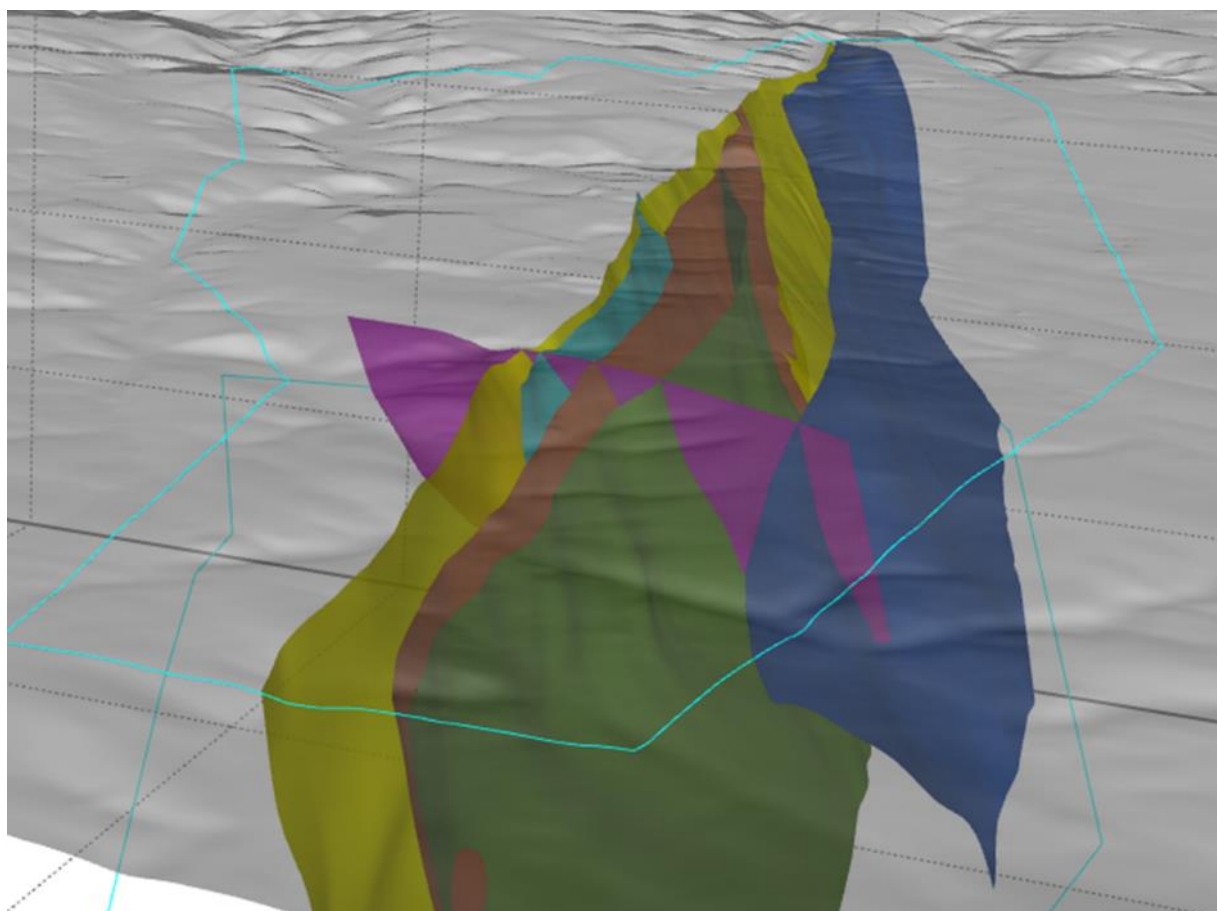
pozice rozrážek (Obr. 616), které jsou shodně číslovány jak v patrových mapách 1 : 1 000, tak ve vertikálních projekcích 1 : 5 000.



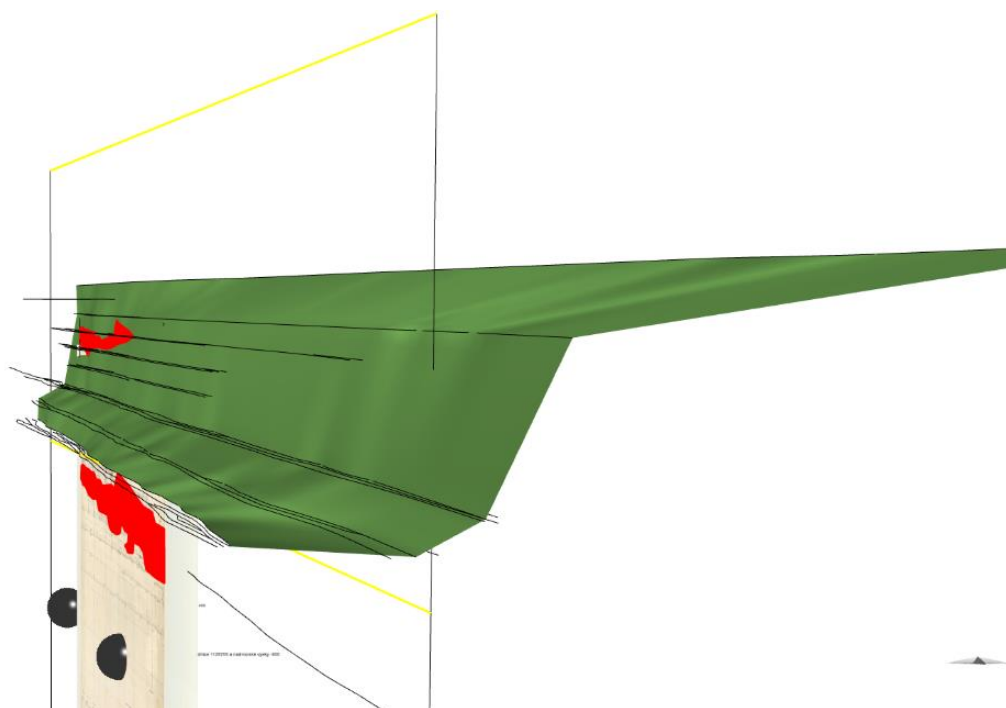
Obr. 613 Patrová mapa 1 : 1 000, list 38-2, 2. patro. Modrou čarou je znázorněn styk systému 7 napojujícím se z podloží na systém 1. Obrázek dává představu o přesnosti digitalizace průběhu jednotlivých zpracovaných rudních systémů



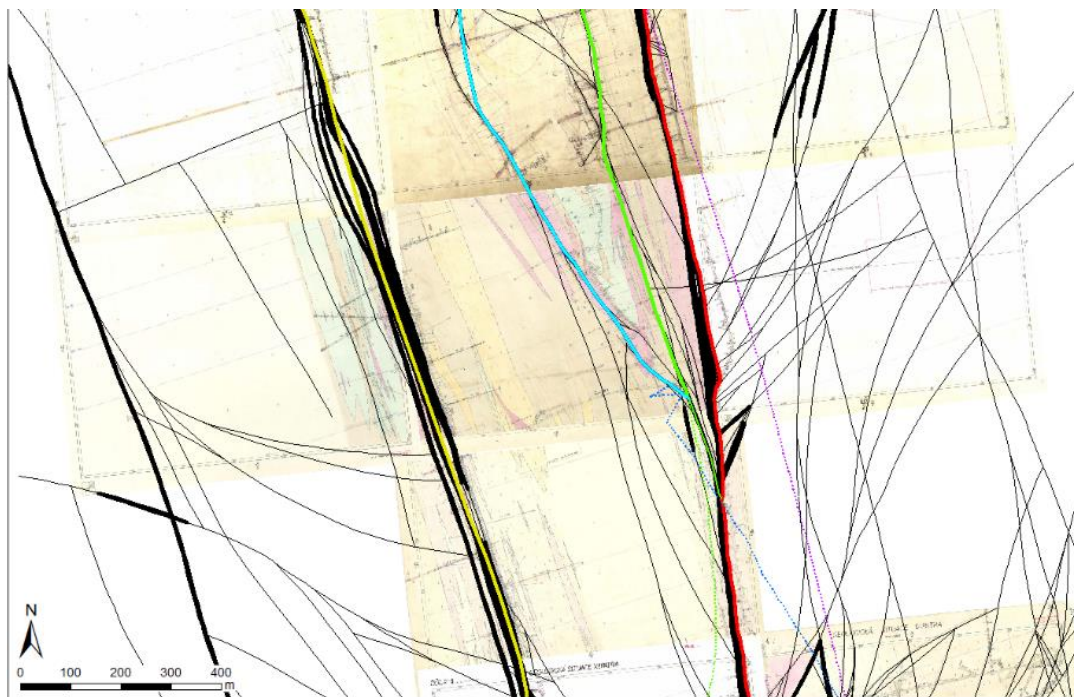
Obr. 614 URT – systém 1 při finální úpravě geometrie s pomocí vertikálních příčných řezů (vlevo). Paralelně probíhala úprava dle patrových map v GIS (vpravo), protože patrové mapy z důvodu HW limitů není možné v MOVE současně s příčnými řezy zobrazit



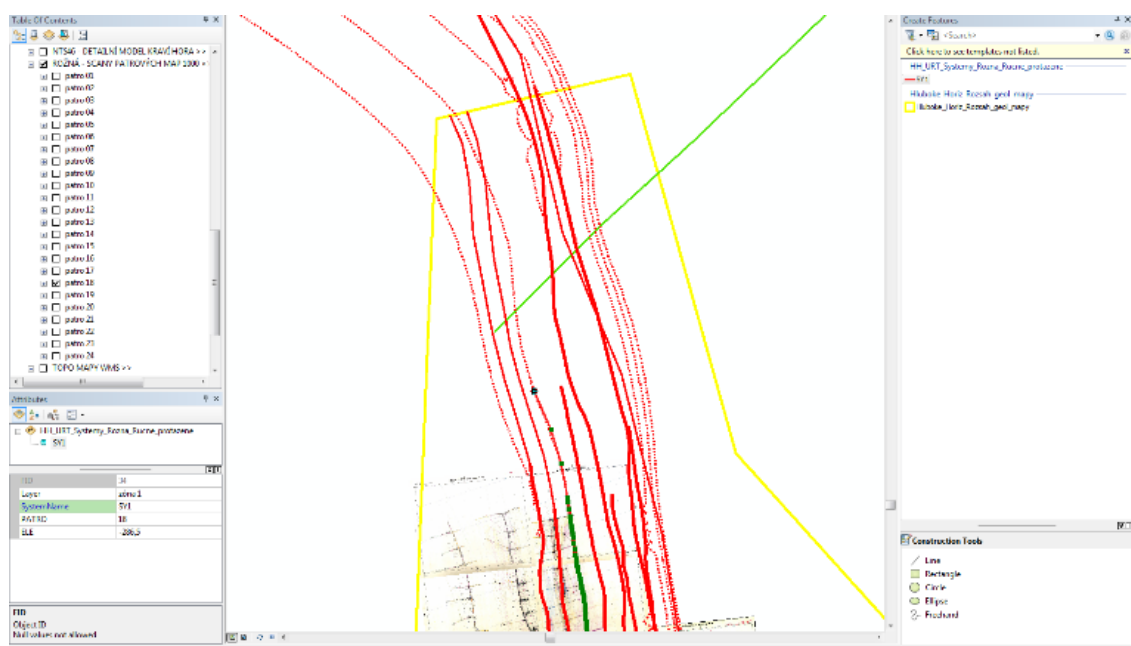
Obr. 615 3D model 6 vybraných rudních zón připravených pro vynášení kontur ložiskových těles



Obr. 616 Tvorba meshe dané žíly (zelený) z linií žíly z patrových map (černé), tvorba 2D vertikální sekce v místě projekční roviny dané zóny (žlutě) a georeferencování skenu vertikální projekce odpovídajícího URT na tuto projekční rovinu s využitím nadmořských výšek a vřícovacích bodů uvedených na této vertikální projekci (referenční vřícovací body zobrazeny jako šedé koule)



Obr. 617 Protažení průběhu hlavních rudních zón (silné barevné linie) na 12. patře v GIS, na základě projekce všech dosavadních dat v MOVE s pomocí skenů patrových map 1 : 1 000 a mapy zlomů 12. patra (tenké a silné černé linie) Nohála et al. (2019)



Obr. 618 Doplňování průběhu URT (zde systém 1) na základě horizontálních řezů extrapolací vymodelované zlomové plochy – tečkovanou čarou (extrapolace a její horizontální nařezání realizováno v MOVE a importováno do GISu v SHP formátu). Ve spodní části obrázku je vidět dosah patrových map 1 : 1 000 na 18. patře, odpovídajícím editované linii (zde horizontální průmět zóny 1 na průměrnou hloubku 18. patra)

2.5.3.5 Popis věrohodnosti výsledného 3D geologického modelu

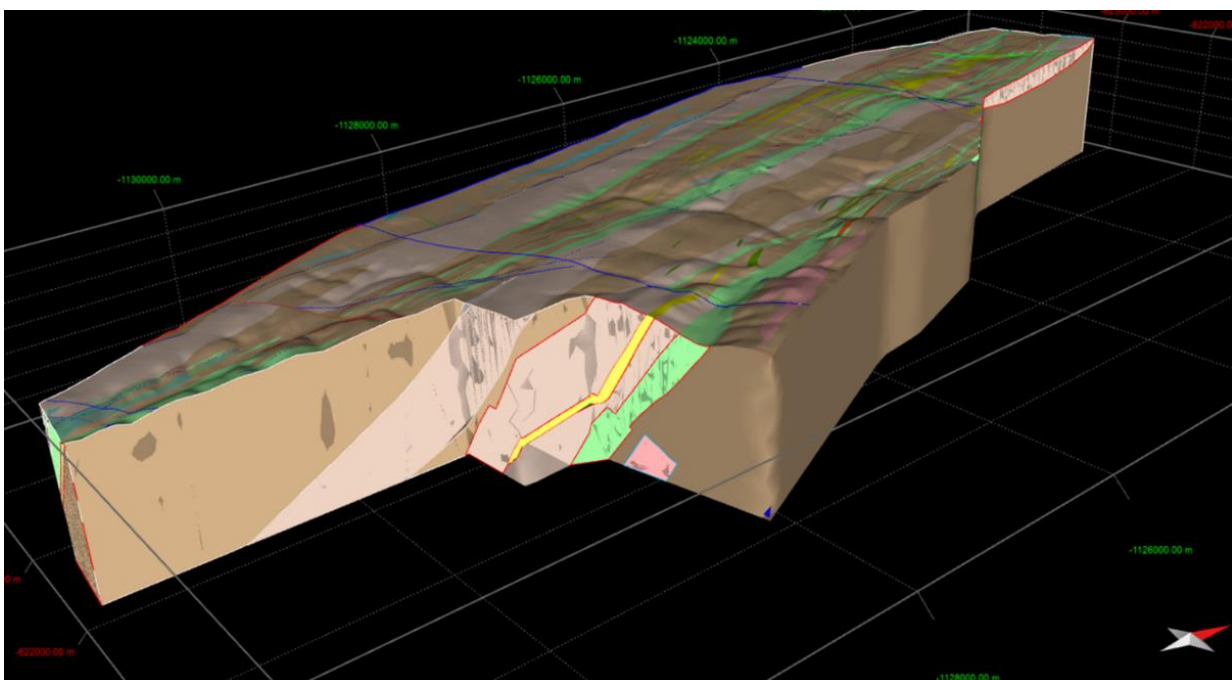
3D geologické modely jsou často vytvářeny z nejednoznačných a nepřesných dat, která jsou při sběru a interpretaci předmětem šíření chyb. Dále jsou data často heterogenní a nedostatečně pokrývají zájmové území, takže modelář závisí na interpretaci založené na nějakém generalizovaném modelu, např. předpokladem konkrétního tektonického režimu nebo stylu deformace. Tyto nejistoty často nejsou vyhodnocovány ani prezentovány uživatelům a zúčastněným stranám, protože v současné době neexistuje žádný standardizovaný ani publikovaný přístup k vyčíslení nejistot pro obdobně složité geologické modely.

V případě tohoto projektu jsou nejistoty modelu způsobeny chybami v datech, nedostatkem údajů a metodikou modelování. Tyto chyby dat se vztahují k různým měřítkům zpracování, chybám projekce a digitalizačním chybám geologických map. Kromě toho byly zdrojové mapy vytvořeny různými geology, kteří měli různé názory na geologickou genezi zájmové oblasti. K důkladnému ověření litologických hranic nebo zlomové sítě geologickým mapováním napříč celou modelovanou oblastí nikdy nedošlo. Nepřesnosti hranic modelových jednotek se také vztahují k nepřesnosti zlomové sítě. Použitá zlomová síť byla vytvořena jako kompilace výše popsanych dostupných tektonických interpretací a map. Každý jejich autor měl však opět odlišný názor a měřítko zpracování zlomové sítě, a proto se archivní mapy zlomové sítě neshodují. Smysl a magnituda pohybu nemohly být pro žádný ze zlomů určeny.

Zlomová síť je ve výsledném modelu dobře podložena archivními daty a v území pokrytém patrovými mapami 1 : 1 000 velmi pravděpodobně dobře odráží skutečné zlomové porušení horninového masívu. Nelze však vyloučit přítomnost některých příčných struktur, které byly dle

ústního sdělení geologů z DIAMO s. p. často při dokumentaci opomíjeny nebo podceňovány, pokud nenesly indicie uranového zrudnění. Toto se týká hlavně V-Z až SV-JZ probíhajících zlomů. Další neznámou jsou potenciální směrné zlomy (S-J až SSZ-JJV směru) v podloží a nadloží uranového ložiska, které by nenesly uranové zrudnění. Jejich přítomnost je občas naznačena v patrových mapách 1 : 1 000, avšak zcela nedostatečně pro konkrétnější odhad jejich průběhu. Pokud takové zlomy nenesou uranové zrudnění a nebyly tudíž předmětem zájmu povrchových nebo podzemních průzkumných prací, jsou prostým geologickým mapováním v místních geologických a topografických podmínkách téměř nedetekovatelné.

Relativně horší je situace v případě modelování horninových těles. Podrobné geologické mapy i patrové mapy 1 : 1 000 často obsahují tělesa hornin, která nelze napříč patry sledovat, ačkoli by vzhledem ke své horizontální délce a lokální orientaci foliací měly probíhat napříč více patry. Podrobné litologické členění prezentované na patrových mapách bylo dále dle ústního sdělení pracovníků DIAMO s. p. zvláště v prvních dekádách těžby ložiska částečně subjektivní a petrografickou klasifikaci v patrových mapách je tedy nutno zpracovávat s kritickým odstupem. Z těchto důvodů byla pro účely tvorby konceptuálního 3D geologického modelu v oblastech ložiska Rožná zjednodušena distribuce horninových těles. Dle archivních geologických map 1 : 5 000 a 1 : 10 000 a patrových geologických map 1 : 1 000 je toto území charakterizováno přítomností četných drobných silně protáhlých těles amfibolitů a dalších pestrých horninových vložek uložených v pararulách v různém stupni migmatitizace. Z výše popsaných a dále z technických důvodů tvorby finálních meshů bylo přistoupeno ke zjednodušení litologické členitosti, kdy byla drobnější tělesa těchto hornin sjednocena do jediného většího tělesa dané horniny v místech, kde tyto horniny výrazně převažovaly nad částečně migmatitizovanými pararulami. Vzhledem k vysoké četnosti těchto těles v zájmové oblasti lze předpokládat, že se podobná horninová tělesa vyskytují i v partiích masivu, kde nebyla kvůli absenci hornických prací a odpovídajících patrových dokumentací dosud detekována a tudíž nejsou ani přítomna ve výsledném geologickém modelu (Obr. 619; Elektronická příloha 150; Elektronická příloha 151).



Obr. 619 Náhled 3D geologického modelu oblasti ložiska Rožná

3 Interpretace výsledků s ohledem na vliv první zóny a hloubku horninového masivu

Litologická homogenita

Přestože celá studovaná oblast je litologicky relativně homogenní, tvořená dvěma základními litologickými typy – migmatitizovanými pararulami až migmatity, vzájemné přechody mezi těmito dvěma krajními typy a zejména pak migmatitizace způsobuje silnou nehomogenitu v měřítku metrů až centimetrů. Velmi dobře je to patrné na detailní geochemické charakteristice „homogenního bloku“ na 20. patře u jámy R-7S. Přestože se dle důlní dokumentace jedná o migmatitizované ruly, je geochemická variace měřená pomocí XRF detektoru, který je schopen měřit oblast asi 2 cm² extrémní. Obsahy SiO₂ kolísají mezi 20–70 hm.%. Takovéto kolísání SiO₂ je vyvoláno dvěma jevy. Vysoké obsahy byly změřeny při analýze leukosomu, obsahy kolem 40–50 % odpovídají spíše paleosomu. Různé obsahy taveniny v hornině reflektují především primární litologické variace protolitové vulkanosedimentární sekvence a v menší míře pravděpodobně i různou intenzitu migmatitizace. Velmi nízké obsahy SiO₂ pak korelují s vysokými obsahy CaO a odpovídají zónám alterace s výskytem karbonátových žilek. Právě alterace hornin je dalším zdrojem nehomogenity horniny. Silná alterace horniny (chloritizace, sericitizace, karbonatizace), je typicky vyvinuta kolem karbonátových či křemen-karbonátových žilek. Jejich mocnost kolísá od mm po desítky cm. Místy je tato alterace vyvinuta i kolem puklin bez karbonátové výplně. Mocnost samotných alteračních zón kolísá ve studované oblasti od několika mm po desítky cm, makroskopicky se projevuje zejména změnou barvy horniny na světle šedou. Uvedené nehomogenity je třeba brát v úvahu při interpretaci zejména petrofyzikálních analýz. Příkladem může být extrémní a ojedinělý případ alterace horniny (její pyritizace), která způsobila anomální hodnoty elektrické vodivosti a dalších parametrů.

Byl rovněž sledován potenciální litologický rozdíl mezi horninami vystupujícími na 12. až 24. patře související s hloubkou. Žádná významná odlišnost však pozorována nebyla. Samotná první zóna je kromě silné křehké deformace postižena zejména silnou karbonatizací, již makroskopicky patrnou v podobě výskytu karbonátových žil o mocnosti v cm až dm. Karbonatizace v různé míře postihuje i primární horniny zóny. Karbonatizace v menší míře postihuje i horniny v bezprostředním podloží zóny, jak je vidět na zvýšených obsazích Ca na Obr. 157.

Vliv zóny R1 na FMV a geotechnické vlastnosti intaktních hornin

Jak vyplývá z výsledků prezentovaných v kapitole 2.3.5, hmotnostní vlastnosti (měrná a objemová hmotnost) sledovaných metamorfovaných hornin jednoznačně odrážejí jejich mineralogické složení. Platí tedy, že u migmatitizovaných biotitických rul se hodnoty těchto hmotnostních parametrů pohybují zhruba v rozpětí 2680–2780 kg.m⁻³, u amfibol-biotitických rul pak okolo 2800 kg.m⁻³, amfibolity vykazují hodnoty zhruba 2800–2900 kg.m⁻³ a u granátických amfibolitů mohou dosahovat a případně i překračovat hodnotu 3000 kg.m⁻³. S mineralogickým složením testovaných hornin jsou pak v souladu také zjištěné hodnoty rychlostí průchodu ultrazvukových vln (UV) a tepelných vlastností. Rychlost šíření UV analyzovaná na intaktních zkušebních těliscích hornin z dolu Rožná se pohybuje zhruba v rozmezí 3,5–6,8 km.s⁻¹ a odpovídá tak obecným hodnotám publikovaným pro bazické horniny a ruly např. Milsomem

(2003). Koeficient tepelné vodivosti dosahuje u většiny testovaných hornin hodnot v rozmezí přibližně 2,5–3,3 W.m⁻¹.K⁻¹, což je opět v souladu s publikovanými údaji pro rulové horniny (Schön 1983). Uvedeným hodnotám tepelné vodivosti se vymyká pouze biotitický kvarcit až kvarciticá rula VO vzorku V-12 s hodnotami λ okolo 4,3–4,4 W.m⁻¹.K⁻¹, což však jednoznačně souvisí s dominantním obsahem křemene ($\lambda \cong 7 - 13$ W.m⁻¹.K⁻¹) v této hornině.

Celková pórovitost hornin sledovaných v rozpětí 12. až 24. patra dolu Rožná se, až na VO vzorek V-12, pohybuje zpravidla pod 2 % objemu horniny, otevřená pórovitost pak povětšinou pod 0,6 obj.% (u VO vzorku V-12 ale až 1,8 obj.%). Hodnoty efektivní pórovitosti, stanovené pomocí MIP dosahují u většiny testovaných vzorků cca 0,1–0,5%, jen výjimečně až okolo 1%. Nasákavost hornin se pak zpravidla pohybuje v rozpětí cca 0,05–0,25 hm. %. S touto vysokou hutností sledovaných hornin pak souvisejí nízké hodnoty propustnosti pro vodu a plyny. Z hlediska laboratorně stanovených hodnot koeficientu hydraulické vodivosti (řádově 10⁻¹¹ až 10⁻¹⁴ m.s⁻¹) lze intaktní horniny dolu Rožná charakterizovat jako nepatrně propustné (very low hydraulic conductivity) např. ve smyslu klasifikace podle Singhala a Gupty (2010). Z pohledu stanovených hodnot koeficientu plynopropustnosti, které se např. při velikosti okolního tlaku 10 MPa řádově pohybují v rozmezí 10⁻¹⁷–10⁻²¹ m², lze studované horniny označit jako velmi málo propustné. Je však nutné si uvědomit, že tyto charakteristiky propustnosti mohou být u horninového masivu zcela odlišné než u intaktního vzorku horniny, a to v závislosti na strukturní stavbě HM (tj. četnosti puklin, jejich výplni, stupni rozevření apod.).

Abrazivnost hornin, měřená metodou CERCHAR, odpovídá prakticky u všech VO vzorků extrémně vysokému stupni podle CAI indexu. Paradoxně nejnižší abrazivitu vykázaly biotitické kvarcicity až kvarciticé ruly VO vzorku V-12, zde se však s největší pravděpodobností projevil vliv až 20 % obsahu pyritu (tvrdost 6–6,5 podle Mohse) v hornině.

Naprostá většina laboratorně testovaných intaktních zkušebních těles vzorků rulových hornin z 12., 18., 20., 22. a 24. patra vykazuje pevnost v prostém tlaku v rozmezí cca 70–170 MPa. Horniny dolu Rožná tak lze zařadit do třídy hornin s vysokou až velmi vysokou pevností ve smyslu známých pevnostních klasifikací (např. Bieniawski 1989; Hoek a Brown 1997). Průměrné hodnoty základních přetvárných parametrů – modulu přetvárnosti, modulu pružnosti a Poissonova čísla korespondují se zjištěnými pevnostními vlastnostmi a jsou obdobné jiným krystalickým horninám obdobného složení a stavby. Rozdíly v hodnotách modulů přetvárnosti zjištěné měřením na Ústavu geoniky AV ČR, v.v.i. a v laboratořích SG Geotechniky, a.s., lze vysvětlit rozdílnou metodikou měření a vyhodnocování této zkoušky. Průměrné hodnoty pevnosti v příčném tahu se pohybují v převážně v rozmezí 8–14 MPa, ojediněle až 17 MPa.

Na základě těchto výsledků lze konstatovat, že stanovené hodnoty FMV hornin z dolu Rožná jsou generálně v souladu s materiálovými vlastnostmi krystalických hornin obdobného mineralogického složení a geneze (viz např. Anttila et al. 1999; Kukkonen et al. 2011; Siren et al. 2015 apod.). Zároveň je třeba zdůraznit, že typickým rysem hornin v hodnocených partiích dolu Rožná je často poměrně výrazná anizotropie, a to jak fyzikálních (např. rychlost šíření podélných ultrazvukových vln, tepelná vodivost a kapacita), tak také mechanických vlastností (pevnost v příčném tahu, pevnost v tlaku). Tato zjištění odpovídají předchozím poznatkům získaným v jiných částech dolu Rožná, např. v rámci PVP Bukov (Berčáková et al. 2017; Berčáková et al. 2019; Bukovská et al. 2019; Souček et al. 2018; Vavro et al. 2015) a jsou obecně platná pro metamorfity s výrazně vyvinutou foliační stavbou (viz např. Hakala et al. 2007; Petružálek et al. 2019). Ukazuje se, že anizotropie horninových vlastností vzrůstá s rostoucím stupněm

migmatizace rulových hornin a s nárůstem velikosti jejich zrna, tj. je přímo úměrná texturní anizotropii horniny.

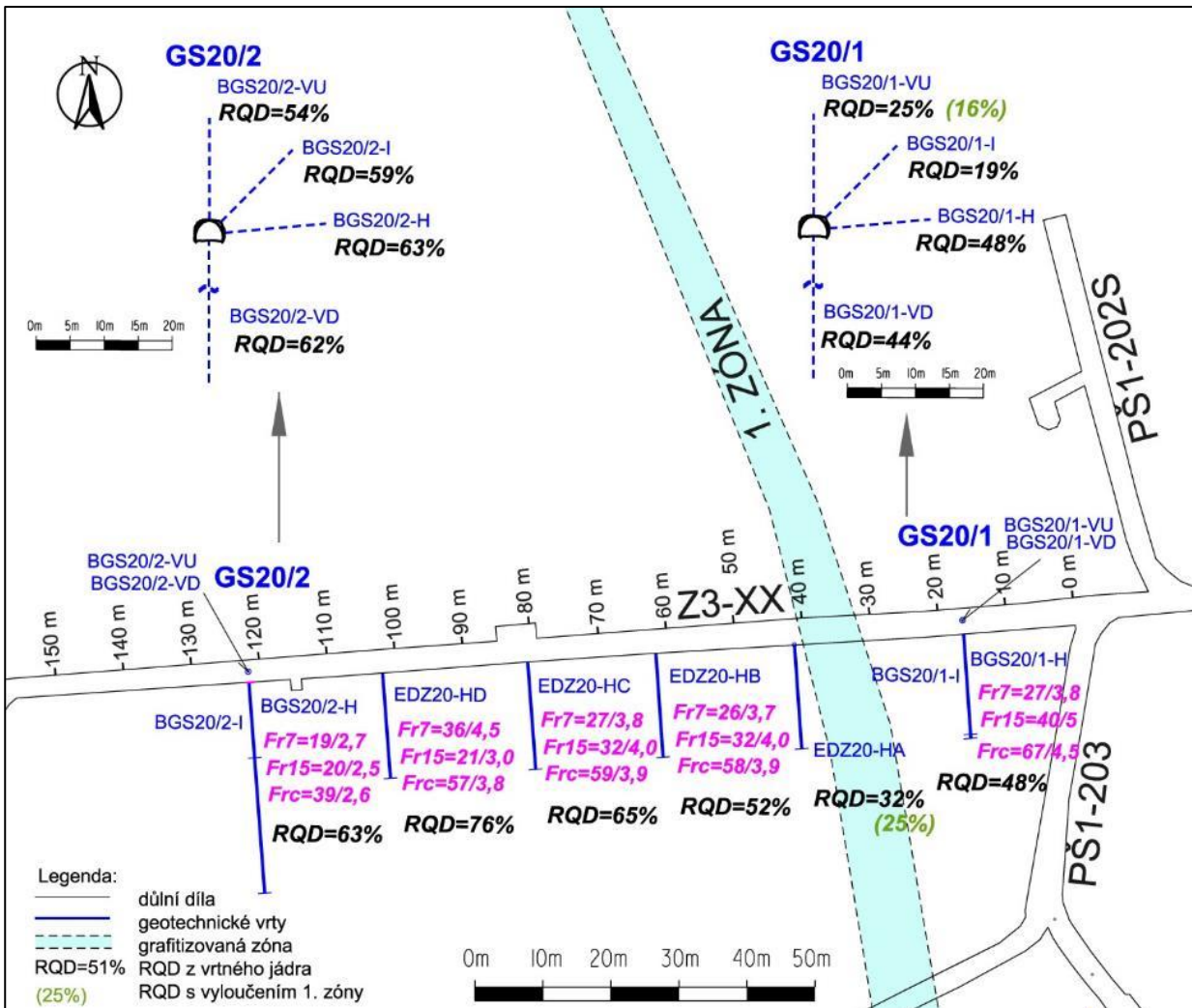
Z výsledků laboratorních stanovení uvedených v kap. 2.3.5 zároveň vyplývá, že nebyla prokázána závislost studovaných FMV intaktních hornin na hloubce jejich uložení pod zemským povrchem ani na vzdálenosti odběrného místa od tzv. první zóny.

Výsledky stanovení fyzikálně mechanických vlastností hornin stanovených v laboratoři SG Geotechnika jsou přehledně uvedeny v dílčích grafech (Obr. 251 – Obr. 272). Jedná se o průměrné hodnoty uvedené v kapitole 2.3.5.3. Z grafů Obr. 251 až Obr. 261 není patrná závislost studovaných parametrů na hloubce, která klesá zleva doprava (18. až 24. patro). Vyšší specifická hustota a objemová hmotnost vzorků z 24. patra je dána tím, že se jedná o amfibolity. Ostatní horniny byly popsány jako migmatizované pararuly. Z grafů Obr. 258 a Obr. 260 je patrné, že vzorky, které byly zatěžovány paralelně s foliací, mají vyšší pevnost v prostém tlaku a modul přetvárnosti než vzorky zatěžované kolmo na foliaci. Z grafu Obr. 259 je patrné, že tahová trhlinka vzniklá v ploše foliace má nižší pevnost v příčném tahu než puklinka kolmá na foliaci. Z grafů Obr. 262 až Obr. 272 není patrný vliv první zóny na studované parametry. V grafech nebyly vykresleny amfibolity z 24. patra, které jsou daleko od zóny. Heterogenita studovaných migmatizovaných pararul je výraznější než vliv zlomové struktury.

Vliv zóny R1 na kvalitu HM vyjádřenou parametrem RQD stanoveném na vrtném jádře

V kap. 2.4.1.1a v Elektronická příloha 27 jsou uvedeny výsledky stanovení parametru RQD na horninách vrtného jádra celkem 24 geotechnických vrtů, realizovaných jednak v rámci jednotlivých geotechnických stanic na 12., 18., 20. a 24. patře, jednak na přibližně 130 metrů dlouhém profilu mezi stanicemi GS20/1 a GS20/2. Jak je patrné z průměrných hodnot RQD vrtů na 12., 18. a 24. patře jámy R-7S a vzhledem k výsledkům předcházejících výzkumů realizovaných ÚGN na dole Rožná (viz např. Souček et al. 2018), průměrná hodnota RQD pro horninový masiv (HM) dolu Rožná se pohybuje přibližně mezi 60–65 %. S ohledem na tuto skutečnost lze konstatovat, že v rámci opěrného profilu na 20. patře jámy R-7S byl zjištěn zřetelný vliv přítomnosti tzv. první zóny na kvalitu HM. To lze dokumentovat velmi nízkými hodnotami RQD indexu zjištěnými u vrtů navrtaných v rámci geotechnické stanice GS20/1, která je situována v bezprostředním podloží struktury R1. Rovněž tak u čtyř subhorizontálních vrtů určených k charakterizaci EDZ a situovaných mezi geotechnickými stanicemi GS20/1 a GS20/2 byl zjištěn jednoznačný vliv první zóny na kvalitu HM projevující se vzrůstající hodnotou indexu RQD se zvětšující se vzdáleností analyzovaného vrtu od této struktury. V nadloží struktury R1 se tak kvalita HM dostává na hodnoty RQD známé z jiných částí dolu Rožná až v horizontální vzdálenosti zhruba 40 metrů od jejího stropu (Obr. 620).

Vliv první zóny na kvalitu HM je pak patrný také z počtu a frekvencí puklin analyzovaných z orientovaných záznamů stěn horizontálních vrtů na 20. patře. Jak je patrné z Obr. 620, u vrtů BGS20/1, EDZ20-HB, EDZ20-HC a EDZ20-HD se počet puklin na analyzovaných 15 m délky vrtů pohybuje v rozmezí 57–67 s průměrnou frekvencí 3,8–4,5 pukliny na metr délky vrtu, kdežto u vrtu BGS20/2-H je celkový počet puklin v prvních 15 metrech délky výrazně nižší (39) a nižší je i jejich průměrná četnost (2,6/m). Je tedy možno konstatovat, že v případě četnosti puklin na stěnách vrtů se pravděpodobný vliv první zóny projevuje do poněkud větší vzdálenosti (cca 60 metrů směrem do nadloží) než tomu bylo u parametru RQD.



Obr. 620 Průměrné hodnoty parametru RQD hornin vrtného jádra pro celou délku všech analyzovaných geotechnických vrtů na 20. patře a počet a četnost puklin na stěnách jednotlivých vrtů vzhledem k jejich pozici vůči tzv. první zóně (pozn.: údaje o počtu a frekvenci puklin jsou uvedeny zvlášť pro úsek 0–7 m od ústí vrtu, zvlášť pro úsek 7–15 m a pro celý úsek 0–15 m; např. zápis $Fr_{15}=21/3,0$ tak znamená, že v úseku 7–15 m od ústí příslušného vrtu bylo nalezeno celkem 21 puklin s průměrnou frekvencí 3 pukliny na metr)

Vliv zóny R1 na hodnoty efektivní pórovitosti stanovené metodou MIP v EDZ vrtech

V kapitole 2.4.7.4.2 jsou podrobně prezentovány výsledky provedené charakterizace pórového prostoru vzorků hornin odebraných z různých vzdáleností od líce výrubu ve všech 7 subhorizontálních vrtech určených ke studiu EDZ. V Tab. 192 je uvedeno srovnání hodnot efektivních pórovitostí, stanovených v rámci této charakterizace pomocí MIP pro každou ze sedmi odběrných úrovní. Průměrná efektivní pórovitost pro celý vrt je vypočtena jako aritmetický průměr hodnot pro jednotlivé odběrné úrovně 1–7.

Tab. 192 Efektivní pórovitosti stanovené metodou MIP v jednotlivých EDZ vrtech

Úroveň	1	2	3	4	5	6	7	Ø
Vrt								
BGS12-H	0,37	0,28	0,37	0,74	0,45	0,36	0,52	0,44
BGS18-H	0,36	0,40	0,33	0,36	0,49	0,37	0,26	0,37
BGS20/1-H	0,52	0,35	0,44	0,53	0,33	0,80	0,81	0,54
EDZ20-HA	1,67	2,08	2,95	2,56	1,14	2,03	0,79	1,89
EDZ20-HC	1,51	3,38	0,74	0,69	0,57	1,40	0,51	1,26
BGS20/2-H	0,89	0,61	1,23	2,29	0,57	1,63	0,57	1,11
BGS24-H	0,69	0,24	0,50	0,34	0,30	0,32	0,41	0,40

Z údajů v Tab. 192 vyplývá, že horizontální EDZ vrty na 12., 18. a 24. patře, ale také vrt BGS20/1-H vykazují průměrné hodnoty efektivní pórovitosti v rozmezí cca 0,4–0,5 %, což je v souladu s výsledky stanovení MIP pórovitosti na VO vzorcích a úpadních a diagonálních vrtech. Naproti tomu se průměrná pórovitost ve vrtech EDZ20-HA, EDZ20-HC a BGS20/2-H pohybuje v rozmezí cca 1,1–1,9 % a

dosahuje tak 3–4 x vyšších hodnot oproti vrtům BGS12-H, BGS18-H, BGS20/1-H a BGS24-H. Dá se tedy předpokládat, že i hodnoty efektivní pórovitosti stanovené metodou MIP mohou být brány jako jistý indikátor vlivu první zóny na vlastnosti HM s tím, že na rozdíl od parametru RQD a četnosti puklin na stěnách vrtů se zvýšená pórovitost projevuje ještě ve vrtu BGS20/2-H, který se nachází přibližně 80 m v nadloží zóny R1.

Vliv zóny R1 na hodnotu RQD stanovenou ze strukturně-geologického mapování na stěně důlního díla a na hodnotu odrazivosti určenou pomocí Schmidtova kladívka, vliv zóny R1 zjištělný z videoinspekce vrtů

V kapitolách 2.4.2.1 a 2.4.2.2 jsou popsány dosažené výsledky z měření in situ, a to z geologického mapování na stěnách odkrytých boků zájmových úseků chodeb včetně měření odrazivosti pomocí Schmidtova kladívka. Z těchto měření byly sestrojeny profily hodnot RQD, vývoje četnosti puklin a hodnot odrazivosti, které jsou uvedeny ve výše zmíněných kapitolách závěrečné zprávy. Stěžejní mapovací profil byl lokalizován na 20. patře, byl cca 100 m dlouhý a procházel přes zónu R1. Měření a profily na ostatních patrech, které nebyly přímo v dosahu ovlivnění zónou R1, sloužily především pro referenční účely s profily hodnot na 20. patře.

Průměrná hodnota RQD parametru získaného z údajů geologického mapování na GS12, GS18 a GS24 se pohybovala v rozmezí 74±8 %. Do tohoto rozmezí hodnot se RQD na profilu dostává

cca 17 m za zónou R1. Dále od tohoto staničení se hodnoty RQD již pohybují na svých typických hodnotách pro HM v zájmové oblasti.

Z analýzy vývoje hodnot četností získané z údajů strukturního mapování na GS12, GS18 a GS24 bylo stanoveno, že průměrná hodnota četnosti puklin se pohybuje v rozmezí hodnot 8 ± 3 . Pro určení vypovídající hodnoty četnosti, kdy považujeme HM bez ovlivnění zóny, jsme použili hodnotu horní, měkčí hranice tohoto intervalu, tj. 11. Lze říci, že pod touto hranicí se HM blíží standardním podmínkám dolu Rožná, tj. masivu bez ovlivnění jeho vlastností první zónou. Pod definovanou hodnotu 11 se hodnoty četnosti na profilu na 20. patře dostávají cca 26 m za zónou R1. Od této vzdálenosti, se pak hodnoty četnosti, víceméně v 95 %, pohybují stabilně pod výše uvedenou mezí.

Z analýzy vývoje hodnot odrazivosti naměřených pomocí Schmidtova kladívka na GS12, GS18 a GS24 jsme si ověřili, že zvýšená četnost puklin a jejich hustota v místě měření Schmidtovým kladívkem má vliv na výslednou hodnotu odrazivosti. V místech se zvýšeným výskytem puklin se odrazivost pohybuje zpravidla v oblasti intervalu cca 10 až 30. V úsecích s menším počtem puklin se hodnoty nalézají v intervalu cca 30 až 60 – jedná se tedy o kompaktnější úseky horninového masivu. U těchto GS se hodnoty pohybují spíše ve druhém intervalu, pouze lokálně v intervalu prvním. Z profilu hodnot odrazivosti na 20. patře je zřejmé, že se hodnoty odrazivosti na profilu dostávají do intervalu 30–60 cca 16 m za zónou R1, pouze lokálně, v krátkých úsecích se dostávají pod tento interval. Z vývoje hodnot odrazivosti je zřejmý vliv první zóny na kvalitu horninového masivu i směrem do podloží, a to do vzdálenosti cca 7 m od její počvy.

Rovněž videoinspekce vrtů ukázaly vliv zóny R1 na kvalitu horninového masivu. Z výsledků analýzy videoinspekce bylo zřejmé, že ve vrtu EDZ20-HA, který je umístěn nejbliž zóně, byly značně porušené stěny vrtu a nebyl zachován jeho kruhový profil (nadvýlomy, nepravidelný tvar apod.) u cca 66 % délky vrtu. U cca 26 % délky tohoto vrtu byly stěny hladké, kruhový profil víceméně zachován, ale stěny byly porušeny výtluky puklin apod. Ve vrtu EDZ20-HB, který je umístěn o 20 m dále od zóny R1 než vrt EDZ20-HA, není kruhový profil zachován již pouze v cca 2 % délky vrtu, cca 10 % délky vrtu má stěny porušeny výtluky puklin a cca 88 % délky vrtu mělo stěny hladké s pravidelným kruhovým profilem vrtu. Vrty EDZ20-HC a EDZ20-HD, které jsou lokalizovány o dalších 20 a 40 m dále od zóny R1, měly rovněž stěny vrtu hladké s pravidelným kruhovým profilem vrtu u cca 97 % jejich délky. Geotechnické vrty na 20. patře na GS20/2, vzdálené od zóny R1 cca 80 m, rovněž vykazovaly stěny vrtu hladké s perfektním kruhovým profilem vrtu a to v cca 95–100 % jejich délky. Vrty na GS20/1, vzdálené od zóny R1 cca 10 m směrem do podloží, vykazovaly stěny vrtu hladké s pravidelným kruhovým profilem vrtu v cca 61–90 % jejich délky a v 10–16 % délky těchto vrtů mělo jejich stěny porušeny výtluky puklin.

Korelační analýza petrofyzikálních parametrů

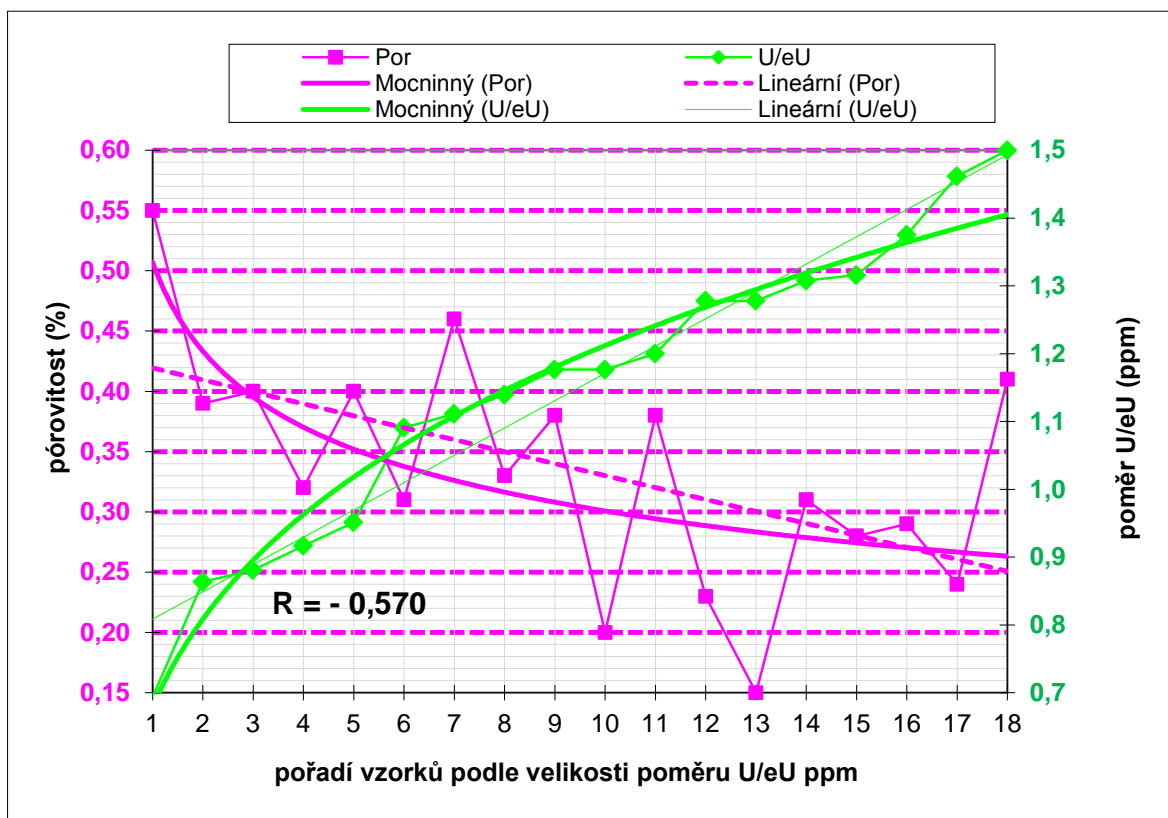
Pro interpretaci vztahu výsledků měření petrofyzikálních vlastností horninových vzorků byla využita korelační analýza. Korelační matici všech naměřených fyzikálních vlastností uvádí Tab. 193, vyjma vzorku V-12. Zde je třeba zdůraznit záporný korelační vztah D_m a D_o , tedy hustot s obsahy U, $eU(Ra)$ a K. Vztah pravděpodobně odráží kolísání obsahu taveniny v jednotlivých vzorcích spíše než vliv poruchové zóny či jiné možné vlivy. Pokud je leukosom nositelem přirozených radionuklidů s jejich relativně vyššími obsahy, potom vyšší obsah taveniny znamená nižší D_m (příp. D_o). Podobně lze vyložit i zápornou korelaci SUSC s obsahy radionuklidů. Vyšší obsahy taveniny též znamenají nižší SUSC doprovázenou vyššími obsahy radionuklidů. Čím

menší hustota tím vyšší obsahy sledovaných radionuklidů. U thoria (Th) není vztah tak těsný, což zřejmě souvisí s jeho větší geochemickou stabilitou.

Mezi prezentovanými daty jsou hodnoty U a eU(Ra), kde obsahy U znamenají přímé stanovení obsahů uranu, hodnoty eU(Ra) pak obsahy uranu zjištěné z aktivity radia. Prvky Ra a U se ovšem ve svých chemických reakcích chovají odlišně. Proto též hodnoty U na straně jedné a eU(Ra) na straně druhé naměřené na témže vzorku se mohou lišit. Relace pórovitosti a poměru U/eU(Ra) je dobře patrná z Obr. 621, který dokumentuje obohacení migrujícím uranem se zvětšující se pórovitostí. Možnost migrace a obohacení uranem podzemními vodami je v blízkosti ložiskových zdrojů pravděpodobná. Velikost pórovitosti má tedy přímý vliv na obsah migrovaného uranu.

Tab. 193 Korelační matice fyzikálních vlastností – koeficienty korelace kombinací jednotlivých stanovených fyzikálních parametrů, $n = 18$, kritická hodnota významnosti (na hladině 95 %) = 0,468 – důlní dílo Rožná (Do-objemová hustota, Dm-mineralogická hustota, Por-pórovitost, SUSC-susceptibilita, Th, U, eU, K-obsahy radioaktivních prvků, HUP-tepelná produkce odvozená z obsahů radionuklidů a hustot)

	Do	Dm	Por	SUSC	Th	U	eU	K	U/eU _(Ra)
Do	1								
Dm	0,997	1							
Por	-0,411	-0,346	1						
SUSC	0,497	0,456	-0,723	1					
Th	-0,388	-0,371	0,374	-0,502	1				
U	-0,500	-0,494	0,268	-0,497	0,931	1			
eU	-0,738	-0,717	0,540	-0,610	0,820	0,841	1		
K	-0,676	-0,651	0,595	-0,697	0,664	0,739	0,894	1	
U/eU _(Ra)	0,492	0,460	-0,570	0,356	-0,039	-0,030	-0,529	-0,550	1
HUP	-0,600	-0,580	0,476	-0,584	0,945	0,924	0,960	0,822	-0,316



Obr. 621 Relace pórovitosti a poměru $U/eU_{(Ra)}$, vzorky seřazeny podle velikosti poměru U/eU – důlní dílo Rožná

Vliv zóny R1 na horninový masiv dle seismických metod

Projev hlavní zlomové zóny R1 (označované také jako první zóna) je ve výsledcích sledování vlastností horninového masivu pomocí geofyzikálních metod významný. V realizovaných metodách průzkumu výrazně převažují seismické metody, které popisují prostředí na základě zjištěných rychlostí šíření seismických vln. Zlomové struktury, které se projevují mimo jiné intenzivním rozpukáním postižených hornin, jsou charakterizovány snížením rychlostí šíření seismických vln oproti klidnému neporušenému horninovému prostředí. Provedený průzkum se snaží přispět k odpovědi na otázku, do jaké vzdálenosti od hlavní zlomové struktury lze sledovat podle hodnot seismických rychlostí ovlivnění vlastností horninového masivu.

Představu o rozložení seismických rychlostí v okolí zóny R1 podávají tomografické řezy získané výzkumem na úrovni 20. patra (studium horizontálního bloku v okolí zlomové zóny, Elektronická příloha 48) a mezi 20. a 21. patrem (vertikální rychlostní řez, Elektronická příloha 47). Strukturu R1 lze v těchto řezech vymežit poměrně jednoznačně, detailněji je toto popsáno v příslušných kapitolách (2.4.5.2.1, 2.4.5.2.2). Hledanou odpověď na zadanou otázku je možné v případě předkládaných rychlostních řezů ztotožnit s určením hranice, na které vlastnosti hornin již dosahují „normálních“ hodnot odlišných od hodnot v prostoru vlivu zóny.

V případě šikmého řezu, který popisuje prostor mezi 20. a 21. patrem, je možné tyto hranice ztotožnit s liniemi označenými jako GFK na východě a GFM na západě. Východní hranice dosahu vlivu první zóny je v úrovni 20. patra kolem 15 m, směrem do hloubky se tato vzdálenost snižuje

a linie GFK splývá s okrajem zóny. V úrovni 21. patra je hranice mezi zónou a relativně nepostíženým masivem ostrá, bez přechodové oblasti. Západní okraj dosahu zóny R1, lokalizovaný pomocí linie GFM, je charakterizován „přechodovou“ oblastí s hodnotami seismických rychlostí nižší než v „klidné“ části pole západně od linie GFM. Mocnost této oblasti ovlivnění zónou je podle rychlostního řezu 12–17 m. Podobná mocnost oblasti ovlivnění první zónou byla na 20. patře, v nadloží struktury, zjištěna pomocí RQD parametru a četnosti puklin, stanovených ze strukturně-geologického mapování a pomocí hodnot odrazivosti Schmidovým kladívkem.

V horizontálním řezu v prostoru východně od poruchy R1 je stanovení rychlostní hranice ukončující dosah vlivu zóny méně jednoznačné. S určitostí lze označit hranici neporušeného prostředí na spojnici bodů vymezených následujícím staničením ve štolách: 12 m v Z3-XX – 36 m PŠ-203. V západním prostoru je dosah vlivu zóny dobře stanoven průběhem linie s označením GFE (která je ve vertikálním řezu ztotožněná s linií GFM). V úrovni štoly Z3-XX je dosah vlivu zóny (vzdálenost od geologické hranice k linii GFE) kolem 13 m. V masivu je tato vzdálenost výrazně nižší, od štoly Z3-XX směrem k jihu (ke štole RV4₂₀-101) se postupně mocnost ovlivněné oblasti snižuje až na 5 m, v této hodnotě zůstává v úrovni štoly RV4₂₀-101.

Vliv zóny R1 na strukturní elementy a homogenitu horninového prostředí

Studium porušení hornin v okolí zlomových struktur (Fault Damage Zone, FDZ), doprovázejících jejich vznik a vývoj, je jedním z klíčových témat geotechnických a strukturně geologických oborů. V několika posledních dekádách bylo dosaženo výrazného pokroku v určení různých typů FDZ a charakterizaci různých struktur tvořících FDZ (McGrath a Davison 1995; Kim et al. 2004; Choi et al. 2016; Torabi et al. 2020). Nicméně deformační mechanismy a faktory ovlivňující mocnost a morfologii FDZ stále nejsou v úplném rozsahu pochopeny. Navíc FDZ a obecně zlomové struktury a jejich vznik a vývoj jsou téměř výhradně studovány v co nejvíce homogenních horninách (např. mladé granity a sedimenty nepostížené staršími ani mladšími deformacemi než studovanými zlomy) a pro čistě křehké podmínky deformace.

FDZ lze definovat jako oblast v okolí zlomové plochy, ve které jsou horniny deformované v důsledku iniciace, propagace zlomu a pohybu na něm (Segall a Pollard 1980; McGrath a Davison 1995; Lin a Yamashita 2013). Obecně lze FDZ také popsat jako zónu ve které se vyskytuje větší množství doprovodných poruch než v okolním prostředí mimo vliv zlomové zóny (Riley et al. 2010; Choi et al. 2016). Velké množství prací klade důraz na závislost mocnosti FDZ na velikosti přemístění na zlomu, jeho délce, kinematice a teplotně-tlakových podmínkách (Evans 1990; Knott 1994; Torabi et al. 2020). Tyto parametry jsou spolu s litologií, strukturní stavbou a asociovanými diagenetickými procesy nejdůležitější pro stanovení konfigurace FDZ.

Zatímco délka a mocnost jádra studované tektonické zóny jsou relativně dobře stanovené (až 15 km; Kříbek a Hájek 2005), hloubka a kinematické podmínky ve kterých tato zóna vznikala, jsou nejisté. Rudní zóny dolu Rožná byly interpretovány Kříbkem a Hájkem (2005) jako levostranné transtenzní struktury, ale vzhledem ke špatné odkrytosti, absenci jasných korelačních horizontů a několikanásobné reaktivaci lze podmínky a kinematický rámec vzniku tektonické zóny odhadovat pouze na základě známého geologického vývoje širšího okolí. Minimální stáří vzniku zóny bylo na základě datování zlomových výplní stanoveno jako permské (300–290 Ma; Kříbek et al. 2009; Bukovská et al. 2019). Tento věk reprezentuje stáří mineralizace a alterace v zóně

a skutečný vznik může být i podstatně starší. Poklesové příkopové struktury permského stáří (např. boskovická a blanická brázda) mají sice identické směry (SSV–JJZ) jako studovaná první zóna, pravděpodobně se ale jedná o pozdější extenzní reaktivaci starších střížných zón korového měřítká. Smysl pohybu těchto významných lokalizovaných deformačních zón je většinou autorů považován za pravostranný (např. Pitra et al. 1999; Žák et al. 2011). Nejblíže příkladem takovéto struktury je nedaleká přibyslavská mylonitová zóna interpretovaná jako významná pravostranná transpresní struktura aktivní v cca 330 Ma (Verner et al. 2006; Žák et al. 2011). Obecně jsou tyto pozdně variské střížné zóny považovány za projev gravitačního kolapsu ztluštělého orogenního kořene (Matte 1990; Schulmann et al. 2014). Vzhledem k celkovému strukturnímu rámci oblasti, orientaci, mocnosti a charakteru výplně studované první zóny je velice pravděpodobné, že tato zóna reprezentuje primárně analogickou strukturu menšího měřítká. Na základě předpokládaného stáří a hloubky je jisté, že tato deformační zóna měla spíše křehce-duktilní než čistě křehký charakter (Gueydan et al. 2004). Samotná střížná zóna a její doprovodné struktury přetínají nebo reaktivují starší metamorfní stavby. Pozdější deformační vývoj se projevil polycyklickou křehkou reaktivací, mineralizací a alterací. Tyto naložené procesy způsobily současnou konfiguraci a charakter zóny a jejího okolí.

Stanovení podmínek vzniku první zóny a jejího charakteru je důležité nejenom z genetického hlediska, ale je také klíčové pro určení jejího výsledného vlivu na horninový masív. Primárně semiduktilní charakter studované poruchové zóny neumožňuje přistoupit ke stanovení FDZ stejně jako v případě výše popsaných čistě křehkých zlomových zón. Na rozdíl od nich se duktilní až křehce duktilní deformační zóny ve svém bezprostředním okolí projevují snižující se intenzitou související deformace (Ramsay 1967; Fossen 2016). Charakter deformace v okolí samotné zóny závisí především na teplotních podmínkách a reologických vlastnostech (Passchier a Trouw 2005). V zóně ovlivnění v okolí křehce-duktilní deformační zóny se mohou projevit různé typy doprovodných deformačních mechanismů plastického až křehkého charakteru především v mikroměřítku (dynamická rekrystalizace až mikrofrakturace) a jejich kombinace (Passchier a Trouw 1996; Gueydan et al. 2003). Obecně se křehké mechanismy více projevují s klesající teplotou, větší intenzitou a rychlostí deformace, tlaku fluid atd. Intenzita a podíl různých deformačních módů bude v závislosti na rozmístění jednotlivých fází, lokalizaci deformace a především predisponované strukturní stavbě značně heterogenní.

Na základě nových terénních pozorování, výsledků strukturního studia a zhodnocení celkového tektonického kontextu se domníváme, že studovaná poruchová zóna představuje hybridní typ. Vzhledem k mladší polyfázové reaktivaci a intenzivní alteraci v jádru zóny jsou její primární struktury kompletně přepracované a nelze tak přesně určit její původní charakter. Lze však předpokládat, že mocnost a morfologie zóny ovlivnění (tj. „damage zone“) bude kombinací prostorově značně variabilní FDZ u zlomových zón (Kim et al. 2004; Choi et al. 2016) a relativně pravidelné oblasti doprovodné difúzní deformace u čistě duktilních zón (Passchier 1984; Montési 2007).

Vliv první zóny (R1) na strukturní záznam, primárně zaměřený na křehké porušení horninového masivu, byl v rámci projektu sledován jednak z hlediska četnosti a pak také z hlediska orientace makroskopických poruchových struktur. Intenzita porušení hornin v prostorech dolu Rožná vzhledem k první zóně byla studována statistickým zpracováním křehkých struktur zanesených v archivních důlních mapách (kapitola 2.4.5.1) a také ze získaných strukturních dat (kapitola 2.5.1). Archivní data byla zpracována na několika chodbách v.–z průběhu, které protínají první zónu (ale často i čtvrtou zónu). Dále byly sledovány změny orientace větších křehkých struktur,

získaných nepřímo z fotogrammetrických modelů v závislosti na vzdálenosti od první zóny. Provedené práce tak umožňují získat alespoň přibližnou představu o charakteru, intenzitě a rozsahu poškození horninového masívu první zónou a doprovodnými poruchami. Výsledky zmíněných prostorových analýz křehkých struktur jsou detailně popsány v kapitole 2.4.5.1 a 2.5.1.

Četnostní analýza (kapitola 2.4.5.1) ukázala, že obě poruchové zóny se ve většině případů projevují zvýšeným výskytem dokumentovaných struktur. Zvýšené množství poruch se obvykle projevuje v rozsahu 40–120 m okolo samotné zóny. Nicméně v histogramech se vyskytuje celá řada výrazných četnostních maxim, která se nenachází v blízkosti sledovaných zón (Obr. 388, Obr. 389, Obr. 390). Překvapující je fakt, že v některých případech je největší hustota poruch v místech mimo poruchové zóny. Navíc se na několika chodbách v místech těchto zón neprojevil nadprůměrný výskyt křehkých struktur nebo nejsou v místech první zóny v mapě zaznamenány žádné poruchy. To může být dáno nesystematickou dokumentací, ale zejména tím, že dílčí poruchy v rámci zón se nedokumentují a jsou zahrnuty v mocnosti dané zóny, kde se lokalizuje deformace, tyto se pak projeví jako jediná porucha.

Studium prostorových změn orientací křehkých struktur bylo v rámci celé studované části dolu provedeno ve třech doménách. Vzhledem k omezeným možnostem pozorování přímých vztahů jednotlivých struktur se zónou samotnou je určení jejich genetické souvislosti se zónou velice problematické. Předpokládáme, že poruchy subparalelní s orientací první zóny vznikaly ve shodném napěťovém poli a během stejné fáze deformačního vývoje oblasti. Systematické statistické zpracování orientací poruch v závislosti na vzdálenosti od první zóny odhalilo, že v severní části dolu se vzrůstající vzdáleností od zóny (do podloží) výrazně přibývá struktur se zónou subparalelních (Obr. 391). Podobný trend lze v menší míře sledovat i v jižní části dolu směrem do nadloží. Tento gradient lze interpretovat tak, že v bezprostředním okolí poruchové zóny se během zlomové aktivity první zóny deformace z velké části lokalizovala v zóně samotné. Naopak ve větších vzdálenostech od zóny docházelo ve stejné době k vzniku samostatných poruch. Výskyt těchto poruch kinematicky konzistentních s první zónou není v rámci celé studované oblasti rovnoměrný a je spíše velice lokalizovaný, což může také úzce souviset s rozdílnými litologiemi a jejich častým střídáním, které vede k rozdílným mechanickým vlastnostem horninového masívu. Struktury kinematicky konzistentní s první zónou byly v severní části dokumentované ve větší míře pouze v úsecích 30–120 m podloží první zóny a ve střední části v úseku 180–210 m podloží první zóny (Obr. 392). Ve střední části dolu jsou data dostupná až v úseku vzdáleném 120 m od hranice první zóny, nicméně v této části naopak směrem do podloží struktur asociovaných s první zónou zřetelně ubývá.

Z analýzy DFN modelu na 20. patře v kvazihomogenním bloku vycházející ze strukturních dat vyplývá, že nejméně jsou zastoupeny struktury semiparalelní s první zónou (Obr. 420) ložiska a struktury S-J průběhu asociovatelné s V–Z extenzí (Obr. 422). Ostatní orientace zaujímající cca 90 % datasetu jsou popsány v kapitole 2.4.5.4. Výsledky modelování jsou tak ve shodě s dalšími strukturními pozorováními z prostor dolu Rožná.

Orientace ostatních maxim významnějších křehkých struktur je kinematicky nekonzistentní s ~V–Z orientovanou extenzí, během které došlo ke vzniku poklesových zón průběhu S–J. K založení těchto struktur došlo nejpozději během permu (Bukovská et al. 2019; Kříbek et al. 2009). Tato představa je plně v souladu s široce přijímanou představou o svrchnopaleozoickém vývoji Českého masívu ale i středoevropských variscid (McCann 2008). S vertikálním zkracováním lze korelovat nerovnoměrně vyvinuté extenzní subvertikální pukliny průběhu S–J (Obr. 383b), které

jsou relativně tenké, mají často kalcitovou výplň a jsou uzavřené. Tyto pukliny většinou netvoří na stěnách morfologické hrany, a tudíž nejsou v datech nepřímo získaných z fotogrammetrických modelů výrazněji zahrnuty. Tento puklinový set však nepředstavuje vzhledem k velikosti, charakteru a výplni důležité prvky významněji snižující homogenitu horninového prostředí. Ostatní makroskopické strukturní prvky, jako jsou starší metamorfnní foliace nebo střížné struktury patřící geneticky k jiným fázím křehkého deformačního vývoje, jsou oproti nim často otevřené a zvodnělé. Z hlediska homogenity prostředí jsou, kromě první zóny samotné, makroskopické struktury, které nesouvisí se vznikem a aktivitou zóny, výrazně významnější.

Zpracování archivních i nových strukturních dat vztažených k první zóně ukázalo, že prostorová distribuce doprovodných struktur je velice heterogenní a mění se jak s hloubkou, tak i podél průběhu zóny. Výsledky prostorového zhodnocení orientací poruch jsou v rozporu se zvýšeným výskytem křehkých struktur v místech zóny v archivních mapách. Tento rozpor je částečně způsoben nehomogenitou archivního datového souboru detailně popisovanou v kapitole 2.4.5.1a lze předpokládat, že první zóna se ve skutečnosti mimo její samotný rozsah výrazněji neprojevuje vznikem makroskopických křehkých struktur. Dále je možné tento rozpor vysvětlit snížením pevnosti mikroskopickými frakturami v okolí první zóny a intenzivnějším porušením této oblasti mladšími deformacemi. Výsledky geotechnických testů (kapitola 2.4.3), seismické refrakční tomografie (kapitola 2.4.5.2) a charakterizace HHB (kapitola 2.5.1) ukázaly, že horninové prostředí v okolí zóny (cca 50–60 m od zóny) vykazuje výrazné snížení pevnostních parametrů. Tento jev je spojován se vznikem vzájemně propojené sítě intergranulárních mikrofraktur typických pro bezprostřední okolí deformačních zón (Choi et al. 2016; Scholz 1968; Vermilye and Scholz 1998). Malé množství synkinematických poruch v blízkosti první zóny lze vysvětlovat také dominantní lokalizací deformace do mechanicky oslabené zóny. Zároveň větší postižení horninového masivu přítomností intergranulárních a intragranulárních fraktur se může projevit pozdější tvorbou puklin s kinematicky odlišnými orientacemi v takto oslabeném horninovém masivu. Toto je důležité i pro množství puklin, které reaktivují foliace v komplikovaně zvrátněném prostředí dolu Rožná. Pokud se intergranulární mikrofraktury budou přednostně vyskytovat podél fylsilikátů, kde běžně využívají bazálních ploch (viz konfokální mikroskopie v kapitole 0), tedy ploch paralelních s foliací, bude velmi běžně jednodušší vznik puklin podél těchto foliačních ploch, i když nemusí být přesně orientovány v daném napěťovém poli (viz také výsledky 2.3.5).

Kromě zóny samotné se daná deformační fáze, ve které vznikla první zóna, v horninovém prostředí v podstatě neprojevuje vznikem makroskopických křehkých poruch. Až na některá místa, jsou struktury kinematicky konzistentní s daným napěťovým režimem málo četné. Deformace se realizovala převážně vznikem a pohybem v relativně lokalizovaných zlomových zónách. Významnější je nejspíše vliv první zóny v mikroměřítku. Související vznik sítě mikrofraktur a zvýšení intragranulární a intergranulární porozity v okolí zóny snižuje pevnost horniny a usnadňuje vznik makroskopických poruch během následných fází křehkého deformačního vývoje masivu. Toto potvrzují také měření porozity, jejíž hodnota klesá se vzdáleností od první zóny, jak ukazují vzorky z GS na 20. patře (2.3.5.3).

Z hlediska studia strukturního záznamu ukazují výsledky na zřejmý mikrostrukturní vliv zlomové zóny na své okolí, zejména na predispozici k lokalizaci naložených (tj. mladších) deformací. Detailnější pochopení mechanismu a rozsahu doprovodné mikrofrakturace a jejího vlivu na oslabení okolí zóny by vyžadovalo navazující mikrostrukturní výzkum ve výrazně širším rozsahu.

4 Implikace pro HÚ

Výplně poruchových zón

Ve studovaných horninách se lokálně vyskytují alterované domény, které se objevují převážně okolo karbonátových žilek mocných od několika mm po první decimetry. Mocnost alterovaných zón v hornině bývá řádově vyšší než mocnost samotné karbonátové žilky. Živce v alterované hornině bývají postiženy sericitizací a kaolinizací, Ca bohaté plagioklasy bývají i karbonatizovány, podobně jako amfibol. Biotit podléhá chloritizaci. Jedná se pravděpodobně o relativně nízkoteplotní alteraci s teplotami do 150 °C (viz kapitola 2.3.3). Přítomnost karbonátů ukazuje, že tuto alteraci vyvolala fluida obsahující CO₂. Geochemické modelování stability hornin ve studované oblasti poukázalo na relativně vysokou rozpustnost hornin ve vodách obsahující uhličitánové ionty i za teploty 25 °C. Geologické modelování i petrologický výzkum ukazují tedy na nižší stabilitu hornin za přítomnosti vodních fluid obsahujících CO₂. Alterované zóny mohou zhoršovat geomechanické vlastnosti horninového masivu.

V budoucnosti by tedy bylo vhodné:

- podrobněji charakterizovat jednak fosilní alterované zóny v horninách, jejich prostorovou vazbu na křehkou tektoniku, stáří, teploty vzniku, původ fluid aj.
- Věnovat pozornost důlním vodám, zejména s ohledem na obsah uhličitánů a zvýšenou rozpustnost hornin. Kromě samotných vod analyzovat i povlaky na puklinách, po kterých vody migrují a horniny v nejbližším okolí takovýchto zvodnělých puklin. Studovat laterální i horizontální složení důlních vod s ohledem na jejich potenciální vliv na okolní horniny.
- Na základě výsledků zpřesnit geochemické modely stability hornin.

Geofyzikální práce

Výsledky geofyzikálních prací, provedených v rámci výzkumného úkolu, ukazují, že průzkumy in-situ realizované s využitím seismických a dalších metod přináší poznatky, které je užitečné zohlednit v případných dalších úvahách o dlouhodobém chování horninového masivu v interakci s budováním a provozem podzemního objektu určeného ke skladování radioaktivního odpadu. Stanovení vlivu významné tektonické poruchy (zde zóny R1) na rozložení seismických rychlostí v jejím okolí ukázalo, že minimální vzdálenost vlastního zařízení pro ukládání a významné poruchy v řádu vyšších desítek metrů je opodstatněný a dostatečný. Samozřejmě nelze tento jeden konkrétní příklad považovat za univerzální pravidlo, vzhledem k mnoha specifickým sledované lokality je nezbytné všechny závěry generalizovat obezřetně.

Problematika rozsahu EDZ a její detekce by nesporně měla být významnou součástí monitoringu při budování podzemních staveb souvisejících s úložišti (nejen) radioaktivního odpadu. Seismická měření jsou efektivní a přináší některé výhody (rychlost, téměř spojitá informace, možné stanovení i bez provedení vrtů, opakovatelnost – časový monitoring). Vhodné rozšíření poznatků, které mohou seismické metody nabídnout:

- stanovení rozsahu EDZ s využitím geofyzikálních seismických měření;
- detailní sledování vzájemného vztahu mezi rychlostmi šíření podélných a příčných vln v horninovém prostředí a porovnání zjištěných výsledků se stávajícími poznatky z ostatních aplikovaných metodik;

- také využití analýzy povrchových vln si nesporně zaslouží pozornost.

Geotechnické práce

Přínosem této práce je komplexní zpracování vlastností hornin všemi dostupnými metodami měření s výhledem na realizaci hlubinného úložiště radioaktivních odpadů. Pórovitost je hlavní parametr ovlivňující nejen hydraulické, ale i mechanické a fyzikální parametry horniny. Studium vizualizace pórového prostoru pomocí rozdílných metod se v poslední době zabývá řada prací (např. Autio et al. 1998; Degueldre et al. 1996; Hellmuth et al. 1999; Menéndez et al. 1999). K dalšímu studiu pórovitosti granitů lze tedy doporučit použití metody odlišné od široce rozšířené metody vodní gravimetrie, např. konfokální mikroskopie. S rostoucí teplotou nejen klesá dynamická viskozita vody, ale dochází i k termální expanzi hornin, kterou doprovází uzavírání mikrotrhlin a pokles hydraulické vodivosti. Teplota má vliv i na strukturu a mechanické parametry hornin (např. Chaki et al. 2008; Reuschlé et al. 2006; Takarli et al. 2008), které lze vyhodnotit mimo jiné pomocí ultrazvukového prozařování. Navrhujeme podrobit sérii laboratorních vzorků tepelnému namáhání a výsledky porovnat se vzorky nepostiženými. To by mohlo např. přispět k bezpečnosti během provozování částečně zaplněného hlubinného úložiště. Laboratorní studium mechanických parametrů je vhodné doplnit o stanovení akustických emisí během stlačování (např. Heap et al. 2009), které vedle mikroskopie určí lokalizaci a tvar smykových ploch. Velmi důležité je přenesení poznatků zjištěných v laboratorních podmínkách do podmínek in situ. Např. výsledky Schilda et al. (2001) a Oty et al. (2003) uvádějí 2–3násobně vyšší pórovitost stanovenou na vzorcích z vrtných jader ve srovnání s identickou horninou in situ způsobenou vlivem odlehčení. Navrhujeme provést in situ impregnaci horniny pryskyřicí. To by mohlo např. pomoci s objasněním difuzního transportu radionuklidů.

S ohledem na výše zmíněné lze doporučit:

- Sledování změn geometrie pórového prostoru na sérii vzorků s různým stupněm porušení a tedy objasnění vzniku strukturních prvků sledovaných v makroměřítku.
- Studium vlivu teploty na propustnost horniny skrze sérii tepelně namáhaných laboratorních vzorků a porovnání se vzorky nepostiženými.
- Tato studia doplnit o stanovení akustických emisí pro určení smykových ploch.
- In situ impregnace pryskyřicí.

Z výsledků, získaných řešením projektu vyplývají následující doporučení a náměty ve smyslu dalších možných výzkumných prací v rámci procesu přípravy a budování hlubinného úložiště.

Oblast laboratorního stanovení fyzikálně-mechanických a geotechnických vlastností hornin (FMV):

- detailnější studium vlivu texturní anizotropie na vlastnosti hornin,
- vliv zatížení na změnu FMV hornin, např. rychlosti průchodu ultrazvukových vln,
- testování FMV za podmínek, které reálněji vystihují poměry v horninovém masivu, např. pokud jde o vliv vlhkosti na hodnoty FMV.

Geotechnické práce in situ:

- výzkum napěťových poměrů horninového masivu (HM) dalšími metodami, které by obsáhly větší zájmový objem horninového prostředí a zohlednily časové hledisko, tj. např. sledování časových změn tvaru vrtů (ovalizace) a ražených důlních děl, vznik a vývoj breakoutů v čase, aplikace metody inverzní analýzy konvergenčních měření deformace důlních děl a vrtů, popřípadě přetváření HM v předpolí ražených důlních děl v čase apod.,
- ověření vztahu mezi parametrem RQD, zjištěným měřením na vrtném jádře a získaným pomocí tzv. alternativních metod (např. OPTV, HiRAT, strukturní mapování) i na jiných petrografických typech hornin než jsou metamorfity typu rul, migmatitů nebo amfibolitů.

EDZ:

- analýza EDZ na základě parametrů propustnosti HM in situ, zjišťovaných v různých vzdálenostech od líce výrubu důlního díla, rovněž s ohledem na vývoj propustnosti v čase.

Vliv významných tektonických struktur:

- rozsah ovlivnění horninového masivu, zjištěný v případě zóny R1 ověřit i na jiné struktuře a v poněkud jiném typu horninového prostředí pokud jde o litologii nebo strukturně-tektonickou stavbu.

Transportní charakteristiky

Studium transportních charakteristik hornin rozšířilo poznatky o soubor hodnot zaměřených na studium sorpčních (rozdělovacího distribučního koeficient R_d) a difúzních parametrů (např. efektivní difúzní koeficient D_e), které jsou důležité pro hodnocení bezpečnosti HÚ, a to zejména pro realistický popis transportních cest v geosféře. Při studiu se ukázalo, že litotyp hraje nejpodstatnější roli pro charakteristiky vstupující do bezpečnostního hodnocení a že vliv porušení horniny vliv antropogenní činnosti (EDZ) díky tomu ustupuje do pozadí. Byla potvrzena aniontová difúze pro metamorfované horniny z dolu Rožná.

Studium parametrů bylo zaměřeno především na charakterizaci horniny samotné (horninová matrice). Pro migraci radionuklidů jsou však významné vlastnosti puklin, ve kterých dominantně v horninovém prostředí transport probíhá, a ty jen zřídka nemají minerální výplň. Dále lze na základě charakterizace prostředí (hydrochemie, stanovení složení roztoku v horninovém masivu) předpokládat, že podmínky (Eh, pH, složení podzemní vody a pórových roztoků) pro migraci se budou lišit, a to jak ve vztahu k typu horniny, tak ve vztahu k uvažované hloubce.

Vzhledem k tomu, že důl Rožná je jednou z mála dostupných lokalit, kde bylo možno získat vzorky z hloubek, odpovídajících umístění VJP v HÚ, a pro ostatní lokality nejsou dostupné vzorky z většího hloubek než 100 m, do budoucna bude vhodné se zaměřit na následující oblasti

- Stanovení transportních vlastností (sorpce, difúze, pórovitost, CEC apod.) pro horniny z hloubek, odpovídajících hloubce úložiště (potenciální lokality).
- Stanovení transportních vlastností (sorpce, difúze, pórovitost, CEC apod.) pro puklinové výplně (PVP Bukov, potenciální lokality) a studium vlivu jednotlivých přítomných minerálů na retenci radionuklidů; puklinové výplně mohou mít výrazný vliv na retenci radionuklidů. Bez zahrnutí do bezpečnostního hodnocení se takové hodnocení stává příliš konzervativním.
- Studium vlivu pórového prostoru a struktury difúzních pórů jako důležitého parametru, který má výrazný vliv na difuzi radionuklidů horninou (PVP Bukov, potenciální lokality).

- Studium pórové vody/stagnační vody v horninovém masivu v dlouhodobém měřítku; Metody stanovení pórové vody jsou solitérní a velmi špatně opakovatelné. Z tohoto důvodu by bylo třeba využít dlouhodobého odběru stagnačních vod z horninového masivu a studii rozšířit na delší časový interval.
- Studium geochemických podmínek v horninovém masivu v dlouhodobém měřítku (dlouhodobý hydrochemický monitoring, pH, Eh, složení vody, plyny v masivu aj.).

Popis strukturních elementů

Výsledky strukturní analýzy (kapitola 2.4.5 a 2.5.1) ukazují, že v rámci studovaných profilů přes první zónu existují oblasti zvýšených množství poruch rozsah 40–120 m od jádra zóny. Studium geotechnických parametrů (kapitola 2.3.5) a geofyzikální práce (kapitola 2.4.5) navíc indikují oblast cca 50 m snížené kvality hornin od jádra zóny. Výsledky konfokální mikroskopie (kapitola 2.3.5.3) ukazují na přítomnost sítě mikroskopických trhlin, nicméně jeden studovaný vzorek neumožňuje stanovit případný gradient pozorované mikrofrakturace a její vztah ke studované zóně. Pozorovaný zvýšený výskyt makroskopických poruch v bezprostředním okolí zóny může být způsoben preferenčním výskytem naložených struktur v oblasti postižení různým stupněm mikrofrakturace potencionálně souvisejícím se vznikem zóny. Zóna/oblast ovlivnění okolí první zóny by v takovém případě byla tvořena především systémem trhlin mikroskopického měřítka, který způsobil mechanické oslabení v okolí zóny využitě mladšími naloženými deformacemi. Bohužel nejsme schopni s jistotou určit, jestli porušení pozorované v okolí zóny má přímou genetickou souvislost se vznikem samotné struktury, její pozdější reaktivací doprovázenou intenzivními hydrotermálními procesy nebo zcela jinou naloženou deformací. Následné deformace se v případě vhodné orientaci napětového pole dominantně projevovaly reaktivací první zóny lubrikovanou mocnou sekundární výplní (jílové minerály, grafit). Naložené mladší poruchy mohly vzniknout pouze v relativně úzkém rozmezí orientací napětí, které vylučovalo reaktivaci zóny a existujících metamorfních staveb. Rekonstrukce deformačního vývoje první zóny a jejího okolí je výrazně komplikována přítomností složité vrásové stavby metamorfních staveb představujících různě orientované plochy preexistující mechanické anizotropie. Studium deformačních zón a jejich projevy na okolní horninový masiv představuje v současnosti jednu z nesožitějších výzev strukturní geologie (Carreras et al. 2013; Misra et al. 2015). Tyto metamorfní struktury byly během vzniku i následného polycyklického vývoje první zóny v různé míře duktilně i křehce reaktivovány a způsobily tak výrazné lokální disturbance napětového pole a deformace v horninovém masívu.

Nejistota stanovení mocnosti zóny ovlivnění okolo studované zóny je také způsobena faktem, že nově detailně dokumentované chodby protínající zónu reprezentují pouze jeden řez (okolí jámy R-7S). V případě složitější tvarové typologie FDZ typické pro lokalizaci deformace v koncových doménách zlomů (wedge-shaped FDZ; Segall a Pollard 1980; Kim et al. 2004) nelze stanovit v jaké části vějířovité FDZ je vertikální řez u R-7S lokalizován. Maximální mocnost zóny ovlivnění okolo studované zóny může být v takovém případě výrazně větší. Vzhledem k výše popsaným nevyřešeným charakteristikám studované zóny a genetickým vztahům dokumentovaných struktur v jejím okolí není možné na základě dostupných dat jednoznačně stanovit přesnou mocnost a tvar zóny ovlivnění. Přesnější pochopení vzniku, vývoje takovéto tektonické zóny a zóny ovlivnění vyžaduje další detailní výzkum. Studovaná zóna navíc představuje svou primární povahou i sekundárním mineralizačním a tektonickým vývojem velice specifickou strukturu a získané poznatky není možné přímo aplikovat na tektonické linie odlišného typu. Na druhou

stranu, lze předpokládat, že podobné polyfázově reaktivované primárně duktilní až křehce-duktilní deformační zóny, jsou v oblasti Českého masivu relativně časté. Pochopení jejich vzniku, vývoje a vlivu na okolní prostředí je pro výběr lokality pro HÚ velice důležité.

Proto lze pro další porozumění těmto fenoménům doporučit následující témata:

- Definice ovlivnění okolí a deformačního projevu jednotlivých typů poruch (křehké vs. křehce duktilní a duktilní) dle jejich geneze a sjednocení používané terminologie dle charakteru struktur;
- Studium dostatečně jednoduchého případu porušení horninového masivu různými strukturami (viz předchozí bod) v co nejhomogennějším prostředí (např. nedeformované granity) pro definici rozsahu ovlivnění masivu přítomností struktury, geneze, významu a odlišení naložených mladších deformací. Optimální variantou by bylo srovnání různých typových poruch v různě starých horninových masivech (např. alpské vs. variské) s různým množstvím zaznamenaných deformačních fází. Tato data není zřejmě možné získat z větší hloubky, ale stávající výzkumy ukazují, že mohou být dobře využita i pro hloubkovou úroveň HÚ.
- Objasnění vztahů jednotlivých křehkých či křehce duktilních struktur a jejich prostorového rozsahu.

Modelování puklinových sítí a 3D geologické stavby

Pochopení geometrie a vlastností puklinových sítí je důležitou součástí pro vyhodnocení bezpečnosti plánovaného HÚ. Puklinová síť může sloužit jako preferenční cesta roztoků z hloubky úložiště a udává geometrii těchto cest pro navazující hydraulické modelování. V tomto projektu byla vytvořena puklinová (DFN) síť z dat získaných pomocí strukturní dokumentace rozšířené o prvky klíčové pro navazující DFN modelování (vysoká míra detailu, unikátní ID struktur a ukončování struktur), které po jejich zakomponování do 3D modelů stěn chodeb vytváří robustní dataset, který vystihuje strukturní charakter křehkého porušení studované oblasti puklinami. Tento postup je v praxi aplikovatelný na jakékoli podzemní dílo, jehož stěny jsou dostatečně odkryté. Strukturní dokumentaci a pořízení fotografií pro tvorbu 3D modelu, lze provádět etapově (např. během ražby) i ve špatných světelných podmínkách. Program DFraM vhodně optimalizoval vstupní strukturní data a simulace optimalizovaných parametrů byla s daty získanými ze strukturní dokumentace chodeb téměř shodná (viz kapitola 2.4.5.4). Na základě optimalizovaných parametrů byly vytvořeny 3D DFN modely jak v nativním formátu *.vtk, tak v programu MOVE, který je využíván pro 3D modelování geologické stavby (kapitola 2.5.3). Jejich výsledky byly shodné a do budoucna lze tedy využívat obě varianty. Dostatečné množství dat (stovky měření) je klíčové pro tvorbu reprezentativního DFN modelu, což může limitovat jeho využití na rozsáhlých územích s nedostatkem dat. Do budoucna je třeba vyřešit využití vrtných dat, resp. provázání 1D (vrty), 2D (stopy puklin) a 3D (strukтуры) dokumentací tak, aby bylo možné postihnout geometrii puklinové sítě (2D a 3D) a rovněž zajistit dostatečně robustní dataset (1D), který by mohl pomoci při zhodnocení i hůře dokumentovatelných oblastí, např. právě za využití vrtných prací.

Aktuálně největším limitem mimo dostupnost horninových výchozů je odhad délek jednotlivých poruch. Je zřejmé, že se strukтуры často propagují dále do HM, ale není často možné jejich skutečnou délku určit.

Pro další rozvoj poznání v těchto tématech lze doporučit:

- Využití metod dálkového průzkumu Země a detekce morfolineamentů, či zvodnělých lineárních zón, pro určení délkového parametru pro DFN modely, které by bylo možné v dobře zmapovaném terénu s dostatkem horninových výchozů korelovat pomocí směrové analýzy s měřenými daty z výchozů či lomových stěn.
- V dalším vývoji programu DFraM bude třeba zohlednit prostorovou variabilitu puklinové sítě, např. formou domén v blízkosti a okolí významných poruch nebo v EDZ.

Výsledný geologický 3D model velmi podrobně vyobrazuje složitost litologické stavby i zlomové sítě severní poloviny návrhu průzkumného území lokality Kraví hora. Využitím rozsáhlých hlubkových geologických dat z celého vertikálního rozsahu rozfárání ložiska Rožná výrazně zpřesňuje výsledný model této lokality a zvyšuje jeho věrohodnost.

Z hlediska doporučení pro budoucí projekty jsou velkým přínosem pro konstrukci modelů strukturní data (orientace foliací a zlomových zón) z hlubších částí zájmového území:

- Hlubková data pro uvažovanou lokalitu významně zpřesní 3D geologický model, přičemž v budoucnu bude potřeba je získat např. kombinací geofyzikálního a vrtného průzkumu.

5 Shrnutí

V rámci projektu byly provedeny práce in situ i v laboratořích za účelem objasnění vlivu tektonické zóny (poruchy) na horninový masiv v hloubce cca 550–1200 m pod povrchem a zejména práce směřující k získání geologických a geotechnických dat z těchto v našich podmínkách vzácně přístupných hloubek. Soubor získaných prostorově objemných dat tvoří obsah 156 elektronických příloh této zprávy. Získané výsledky pak vypovídají jak o celkovém stavu horninového masivu v zájmové oblasti ve vztahu k významné geologické struktuře, ale také napříč jednotlivými hloubkovými úrovněmi (patry dolu). Výsledky prací a poznání získané z tohoto projektu mají přímou souvislost s bezpečností hlubinného úložiště radioaktivního odpadu. V základním konceptu hlubinného úložiště představuje kvalita a stav horninového masivu jeden z mnoha základních a významných požadavků na jeho bezpečnost. Horninový masiv totiž reprezentuje významnou bariéru proti šíření radioaktivních polutantů. Provedené typy prací in situ a jejich výsledky umožňují zhodnotit použitelnost jednotlivých metod v oblasti problematiky týkající se horninového inženýrství a jejich vypovídající schopnost v dalším procesu výběru vhodných kandidátních lokalit pro výstavbu HÚ.

Petrologické a geochemické studium ukázalo, že studovaná oblast je budována migmatitizovaným vulkanosedimentárním komplexem pararul a amfibolitů metamorfovaných v podmínkách amfibolitové facie. Typická je velká nehomogenita horninového souboru v měřítku cm až m způsobená jednak proměnlivým zastoupením původní sedimentární a vulkanické komponenty a zejména pak různým stupněm migmatitizace rul.

Výplň zlomů a puklin je tvořena několika generacemi žil. Nejstarší jsou pravděpodobně pozdně metamorfní křemenné a křemen-živcové žíly s teplotami vzniku kolem 350 °C, malá část karbonátových žil s teplotami vzniku nad 150 °C reprezentuje rudní stádium vývoje ložiska Rožná. Většina karbonátových, příp. křemen-karbonát-barytových žil s teplotami vzniku pod 130 °C vznikla během porudního, příp. pouranového vývoje ložiska Rožná.

Na základě vývoje rudních těles a stylů uranové mineralizace s hloubkou ukázala revalidace zbytkového ložiskového potenciálu, že nelze očekávat výskyt významnějších zásob uranové mineralizace ani na otevřených horizontech, ani pod úrovní 24. patra. Potvrzují to i výsledky modelování ložiskových těles, které ukázaly, že jsou ložisková tělesa uložena ploše a směrem do hloubky se rozpadají na celou řadu menších těles s velmi rozdílnými obsahy uranu. Navíc směrem do hloubky přibývá množství technologicky hůře upravitelných rud vzhledem k vazbě uranové mineralizace na štěpné plochy biotitu a na složité směsi uranových minerálů s oxidy titanu a s hydrozirkonem. Mimo uranu obsahuje ložisko poměrně vysoké obsahy vzácných zemin a yttria, jejichž průmyslové využití by však bylo možné pouze v případě obnovení těžby uranových rud. To platí i pro poměrně velké zásoby stratiformních baryt-sulfidických rud, které se na ložisku vyskytují. Půdně metalometrickým výzkumem provedeným na území jižně od jámy B1 nebyly potvrzeny významné indicie uranové mineralizace. Pokračování ložiska Rožná jižním směrem proto nelze očekávat. Poměrně značné zdroje uranu, olova, zinku, vzácných zemin a niobu jsou vázány na rmuty uložené na úpravně v Dolní Rožince. Nízká koncentrace uvedených prvků ve rmutech však v současné době neumožňuje jejich průmyslové získávání.

Dle výsledků detailního výzkumu fyzikálních, mechanických i přetvárných vlastností (FMV) lze konstatovat, že stanovené hodnoty FMV hornin z dolu Rožná jsou v obecném souladu s parametry krystalických hornin obdobného mineralogického složení a geneze.

Charakteristickým rysem hornin v hodnocených partiích dolu Rožná je často poměrně výrazná anizotropie, a to jak fyzikálních (např. rychlost šíření podélných ultrazvukových vln, tepelná vodivost a kapacita), tak také mechanických vlastností (pevnost v příčném tahu, pevnost v tlaku). Tato zjištění odpovídají předchozím poznatkům získaným v jiných částech dolu Rožná, např. v rámci PVP Bukov, přičemž platí, že anizotropie horninových vlastností vzrůstá s rostoucím stupněm migmatitizace rulových hornin a s nárůstem velikosti jejich zrna, tj. je přímo úměrná stupni texturní anizotropie horniny. Zároveň je třeba konstatovat, že z výsledků laboratorních stanovení, uvedených v kap. 2.3.5, není patrná závislost studovaných parametrů na hloubce jejich uložení pod zemským povrchem ani na vzdálenosti odběrného místa od tzv. první zóny. Heterogenita vlastností studovaných hornin je výraznější než případný vliv sledované poruchové zóny v daném místě.

V oblasti problematiky strukturních měření a studia vývoje RQD parametru měřeného na vrtných jádrech, získaného z inspekčních prací ve vrtech a na stěnách důlních chodeb (videoinspekce, sondy OPTV, HiRAT, strukturně geologické mapování) lze konstatovat, že porušení samotného vrtného jádra je značně ovlivněno technologií vrtání. Z provedených analýz orientovaných skenů stěn vrtů zaznamenaných pomocí sond OPTV a HiRAT vyplývá, že hodnoty RQD stanovené na vrtném jádře jsou u většiny vrtů výrazně nižší než je RQD určené pomocí struktur nespojitosti interpretovaných na stěnách vrtů. Obdobný trend lze vysledovat i z výsledků mapování boků důlních chodeb. Tato zjištění jsou plně v souladu s poznatky z jiných partií dolu Rožná (viz kap. 2.4.1.2). Generelně byly ve skenovaných vrtech pomocí sond OPTV a HiRAT na všech geotechnických stanicích zachyceny dva až čtyři výraznější puklinové systémy. Nejvýraznější puklinový systém na všech GS je prostorově shodný s metamorfní foliací s generálním směrem úklonu k JZ až ZJZ a úklony v rozmezí cca 30° až 70° (viz kapitola 2.4.1.2).

Z výsledků z oblasti měření napětí HM lze konstatovat, že na základě aktuálních i dřívějších měření mimo tento projekt je masiv z hlediska demonstrace tvaru a velikosti napěťového pole poměrně značně komplikovaný. Lokální variabilita interpretovaných výsledků se projevuje zejména ve směrovosti, což lze přisuzovat objektivně částečnému působení blízkých lokálních strukturních nehomogenit, subjektivně v některých případech nemožnosti identifikovat jednoznačně aktivovanou diskontinuitu v rámci aplikace metody hydroštěpení. Velikosti složek napěťového pole však odpovídají předpokládaným hodnotám – i z předchozích období. Při globálním hodnocení celé skupiny aktuálních i již dřívějších provedených napěťových měření je patrná směrovost většího horizontálního napětí ve směru SZ–JV až S–J, avšak nejsou výjimečné ani směry SSV–JJZ. Z hlediska magnitud horizontálních hlavních složek napětí dosahuje větší složka hodnot 1–3 násobku předpokládaného vertikálního napětí pro danou hloubku a anizotropie horizontálních napěťových složek většinou dosahovala poměru 1,5–2:1 v některých případech až 3:1. Velmi často není ani jedna z hlavních složek napětí paralelní předpokládané vertikální orientaci. V oblasti hodnocení EDZ na základě studia histogramů frekvence výskytu interpretovaných ploch nespojitosti je zřejmé, že téměř ve všech horizontálních vrtech byla zjištěna zvýšené porušení HM v úseku přibližně do vzdálenosti 1 až 4 m od líce výrubu. Následně pak frekvence puklin prudce klesá. Dále směrem do hloubky je porušení HM vyvinuto zcela nepravidelně (viz kap. 2.4.7.5).

V oblasti hodnocení EDZ na základě analýzy parametru RQD můžeme konstatovat, že podobně jako v úpadně vedených průzkumných vrtech (viz kap. 2.1.3), jsou i v horizontálně vedených vrtech indexy RQD stanovené na vrtném jádře výrazně nižší než RQD určené pomocí struktur nespojitosti interpretovaných na stěnách vrtů. Tato zjištění jsou plně v souladu s poznatky z jiných

partii dolu Rožná. Nepravidelný průběh indexů RQD ve vztahu ke vzdálenosti od líce výrubu potvrzuje, že jak stanovené hodnoty frekvence puklin, tak samotné hodnoty indexu RQD spíše reflektují lokální stupeň tektonického poškození HM než oblast ovlivnění masívu v okolí důlního díla vzniklou v důsledku jeho ražeb.

V oblasti hodnocení EDZ na základě studia interpretovaných struktur z orientovaných záznamů lze konstatovat, že téměř ve všech horizontálních vrtech byly v prvním metru od líce výrubu identifikovány výrazné plochy nespojitosti. Jedná se o otevřené, případně uzavřené pukliny bez sekundárních výplní, které jsou přibližně paralelní s bokem chodby. Vzhledem k charakteru těchto puklin se nepochybně jedná o extenzní pukliny, jejichž vznik souvisí s procesy při ražbě předmětného důlního díla, tedy i s vytvářením EDZ. Hlubkový dosah těchto interpretovaných extenzních puklin ve všech horizontálních vrtech je velice podobný a pohybuje se v rozmezí 0,2 až 0,8 m. Dále směrem do masívu, s větší vzdáleností od líce výrubu chodby, již převládají pukliny, které jsou predisponovány vnitřní strukturou HM, tedy metamorfní foliací. Extenzní pukliny shodného charakteru byly také zachyceny v rámci odběru velkoobjemových vzorků v jednotlivých širokopřůměrových vrtech (viz kap. 2.4.7.5).

V oblasti hodnocení EDZ na základě FMV byla jedinou ze sledovaných vlastností, která mohla být s ohledem na stav jádra stanovena ve všech 49 testovaných pozicích, celková pórovitost. U většiny vrtů se první oblast se zvýšenou pórovitostí nachází ve vzdálenosti cca do 2 m od líce výrubu, u některých vrtů je pak viditelná i druhá „zóna“ vyšších hodnot pórovitosti, a to zhruba mezi 4–5 metry od líce výrubu. Na druhé straně ale existují vrty, u nichž v celém úseku posuzovaných přibližně 6–7 m od líce výrubu nebyla zjištěna žádná zásadní proměnlivost v celkové pórovitosti a hodnoty se pohybují v poměrně úzkém rozpětí mezi cca 2–4%. Nejvyšší celková pórovitost byla, vcelku logicky, zjištěna ve vrtu EDZ20-HA lokalizovaném v bezprostředním nadloží zóny R1. Z tohoto pohledu jsou zjištěné trendy v prostorovém rozložení celkové pórovitosti velmi podobné poznatkům získaným při studiu pórovitosti pomocí počítačové mikrotomografie (RTG μ -CT) a rtuťové porozimetrie (MIP). Lze tedy vyslovit názor, že stanovené hodnoty celkové pórovitosti spíše reflektují lokální stupeň tektonického poškození horninového masívu, zejména lokalizaci vrtů vůči první zóně (R1), než aby pomocí nich bylo možno vymezit oblast ovlivnění masívu v okolí důlního díla vzniklou v důsledku jeho ražby (viz kap. 2.4.7.5).

V oblasti hodnocení EDZ byla součástí této problematiky rovněž charakterizace pórového prostoru pomocí RTG μ -CT a MIP v EDZ vrtech. Na základě zhodnocení vývoje hodnot pórovitosti stanovených pomocí MIP lze konstatovat, že první skupina zvýšených hodnot pórovitostí (cca vyšší než 1 %) se u některých vrtů nachází do vzdálenosti cca 2 m od líce výrubu, druhá skupina pak v oblasti okolo 4 m od líce výrubu. Tato skutečnost je však způsobena, dle našeho názoru, spíše vlastním primárním stavem kvality horniny v těchto vrtech než sekundárním ovlivněním zónou porušení (EDZ). Měření pórovitosti pomocí MIP přímo neprokázalo zjevnou souvislost s EDZ. Na základě studia identických tomografických řezů zkušebních těles před a po provedené MIP bylo možné rozlišit pět druhů pórového prostoru na základě jeho lokalizace v zrnech horninotvorných minerálů a celkového vzhledu. Jedná se převážně o trhlinový pórový prostor, který ctí foliační a strukturní stavbu studované horniny. Ojedinele se ve vzorcích vyskytují bodové typy pórů (viz kap. 2.4.7.5).

Z výsledků v oblasti studia vlivu zóny R1 na FMV a geotechnické vlastnosti intaktních hornin vyplývá, že nelze prokázat závislost studovaných FMV intaktních hornin na hloubce jejich uložení pod zemským povrchem ani na vzdálenosti odběrného místa od tzv. první zóny.

Z výsledků v oblasti studia vlivu zóny R1 na kvalitu HM vyjádřenou parametrem RQD stanoveném na vrtném jádře lze konstatovat, že vzhledem k výsledkům předcházejících výzkumů realizovaných ÚGN na dole Rožná (viz např. Souček et al. 2018), se průměrná hodnota RQD pro horninový masiv (HM) dolu Rožná pohybuje přibližně mezi 60–65 %. S ohledem na tuto skutečnost lze konstatovat, že v rámci opěrného profilu na 20. patře jámy R-7S byl zjištěn zřetelný vliv přítomnosti první zóny na kvalitu HM. To lze dokumentovat velmi nízkými hodnotami RQD indexu zjištěnými u vrtů navrtaných v rámci geotechnické stanice GS20/1, která je situována v bezprostředním podloží struktury R1. Rovněž tak u čtyř subhorizontálních vrtů určených k charakterizaci EDZ a situovaných mezi geotechnickými stanicemi GS20/1 a GS20/2 byl zjištěn jednoznačný vliv první zóny na kvalitu HM projevující se vzrůstající hodnotou indexu RQD se zvětšující se vzdáleností analyzovaného vrtu od této struktury. V nadloží struktury R1 se tak kvalita HM dostává na hodnoty RQD, známé z jiných částí dolu Rožná, až v horizontální vzdálenosti v rozmezí mezi 20 a 40 metry od jejího stropu (viz kap. 3).

Vliv první zóny na kvalitu HM byl patrný také z počtu a frekvencí puklin analyzovaných z orientovaných záznamů stěn horizontálních vrtů na 20. patře, pravděpodobný vliv první zóny se projevuje do poněkud větší vzdálenosti (cca 60 metrů směrem do nadloží) než tomu bylo u parametru RQD (viz kap. 3). Obdobné výsledky dalo také studium struktur nejen na bloku na 20. patře, ale i v dalších částech dolu (kapitola 2.4.5).

Dá se rovněž předpokládat, že i hodnoty efektivní pórovitosti stanovené metodou MIP mohou být brány jako jistý indikátor vlivu první zóny na vlastnosti HM s tím, že na rozdíl od parametru RQD a četnosti puklin na stěnách vrtů se zvýšená pórovitost projevuje ještě ve vrtu BGS20/2-H (vzdálenost od první zóny v nadloží cca 80 m). Z MIP měření vyplývá, že horizontální EDZ vrty na 12., 18. a 24. patře, ale také vrt BGS20/1-H vykazují průměrné hodnoty efektivní pórovitosti v rozmezí cca 0,4–0,5 %, což je v souladu s výsledky stanovení MIP pórovitosti na VO vzorcích a úpadních a diagonálních vrtech. Naproti tomu se průměrná pórovitost ve vrtech EDZ20-HA, EDZ20-HC a BGS20/2-H pohybuje v rozmezí cca 1,1–1,9 % a dosahuje tak 3–4 x vyšších hodnot oproti vrtům BGS12-H, BGS18-H, BGS20/1-H a BGS24-H (viz kap. 3).

Průměrná hodnota RQD parametru získaného z údajů geologického mapování na GS12, GS18 a GS24 se pohybovala v rozmezí 74 ± 8 % (hodnota neovlivněná zónou R1). Do tohoto rozmezí se hodnoty RQD na profilu dostávají cca 17 m za zónou R1. Dále od tohoto staničení se hodnoty RQD již pohybují v rozmezí typických hodnot pro HM v zájmové oblasti (viz kap. 3).

Z profilu hodnot odrazivosti, získaných pomocí měření Schmidovým kladívkem na 20. patře je zřejmé, že se hodnoty odrazivosti na profilu v nadloží zóny R1 dostávají do intervalu odrazivosti 30–60, který byl stanoven pro kompaktnější úseky horninového masivu, ve vzdálenosti cca 16 m od jejího stropu. Ve větší vzdálenosti od zóny se hodnoty odrazivosti již jen lokálně v krátkých úsecích dostávají pod stanovený interval. Z vývoje hodnot odrazivosti je rovněž zřejmý vliv první zóny na kvalitu horninového masivu i směrem do podloží, a to do vzdálenosti cca 7 m od její počvy (viz kap. 3).

Rovněž videoinspekce vrtů ukázaly vliv zóny R1 na kvalitu horninového masivu. Z výsledků analýzy videoinspekce bylo zřejmé, že vrt nejvíce postižený špatnou kvalitou horniny byl vrt EDZ20-HA, který je umístěn nejbližší zóně. U tohoto vrtu byly nalezeny značně porušené stěny vrtu a nebyl zachován jeho kruhový profil (nadvýlomy, nepravidelný tvar apod.) u cca 66 % délky vrtu. Ve vrtu EDZ20-HB, který je umístěn o 20 m dále od zóny R1 než vrt EDZ20-HA, není kruhový profil zachován pouze v cca 2 % jeho délky. Vrty EDZ20-HC a EDZ20-HD, které jsou lokalizovány

o dalších 20 a 40 m dále od zóny R1, měly již stěny vrtu hladké s pravidelným kruhovým profilem vrtu u cca 97 % jejich délky a dá se konstatovat, že u těchto vrtů nebyl zřejmý vliv zóny R1 na kvalitu hornin. Ostatní geotechnické vrty na 20. patře na GS20/2, vzdálené od zóny R1 cca 80 m, rovněž vykazovaly stěny vrtu hladké s perfektním kruhovým profilem vrtu a to v cca 95–100 % jejich délky. Vrty na GS20/1, vzdálené od zóny R1 cca 10 m směrem do podloží, vykazovaly neporušené hladké stěny vrtu s pravidelným kruhovým profilem vrtu v cca 61–90 %, což opět svědčí o určitém stupni postižení hornin v HM geologickými procesy v průběhu formování zóny R1.

Geofyzikální průzkumné práce, realizované ve vybraných partiích dolu Rožná jako součást komplexní studie, byly provedeny s využitím seismických a geoelektrických metod. Vybrané geofyzikální parametry horninového prostředí (rychlost šíření seismických vln, elektromagnetické vlastnosti) byly těmito metodami sledovány v průzkumných jádrových vrtech a na odkrytých stěnách štol. Interpretace geofyzikálních měření stanovila oblast vlivu poruchové zóny označované jako R1 na sledované parametry (především rychlost šíření seismických vln) v jejím okolí v prostoru 20. a 21. patra dolu. Vliv této významné poruchové struktury je zřejmý a v rychlostních řezech dobře patrný. Z hlediska stanovení bezpečné vzdálenosti pro lokalizaci případného HÚ je rychlost šíření seismických vln v hornině jedním z parametrů, který by měl být sledován a hodnocen. Výsledky zkoumání horninového bloku na 20. patře ukazují, že dosah vlivu zóny R1 se v tomto konkrétním případě pohybuje v řádu prvních desítek metrů. V rámci vyhodnocení průzkumných prací na 20. patře a ve vrtech na geotechnických stanicích na 12., 18. a 24. patře byla stanovena hranice zóny EDZ v okolí průzkumných vrtů a na odkrytých stěnách štol. Větší mocnosti EDZ byly stanoveny v místě zóny R1 a v jejím blízkém okolí (maximálně 4,2 m), zvýšený dosah EDZ byl také patrný v nadloží štol nad klenbou (1,5–2,0 m). Běžné hodnoty mocnosti EDZ se pohybovaly v rozmezí 0,5–1,0 m, což odpovídá hodnotám zjištěným obdobnými projekty (Bláha et al. 2017; Cosma et al. 2010).

Studium strukturního záznamu v oblasti dolu Rožná se zaměřilo na postižení způsobené aktivitou a přítomností první zóny v rámci horninového masivu, a to jednak v řezu kolmém na zónu, jednak podél směrného průběhu zóny zhruba severojižně, ale také s hloubkou horninového masivu. Patrné jsou dílčí změny ve všech těchto směrech, tyto jsou popsány v kapitole 2.4.5.1. S ohledem na postižení masivu jednou konkrétní zónou lze konstatovat, že v nejbližším okolí zóny se příliš neprojevuje makroskopické porušení horninového masivu, které by bylo kinematicky navázané na aktivitu této zóny, což zřejmě souvisí s jejím založením v křehce-duktilním režimu. Postižení horninového masivu je sledovatelné v mikroměřítku a projevuje se mikrofrakturací, která zřetelně mechanicky oslabuje horniny v blízkosti zóny, nejméně na vzdálenost 60 m. Dílčí rozdíly ale přímo závisí na konkrétní stavbě horninového masivu, charakteru, projevu a množství zaznamenaných deformačních fází a také na horninové pestrosti a s ní související variabilitě prostředí. V tomto projektu nebylo možné s ohledem na dostupnost dat a přístupnost, resp. otevření podzemních prostor, studovat a odlišit projevy dalších zón v okolí, které ovšem mohou (a budou) mít vliv na postižení masivu. Význam větší tektonických poruch je vhodné vždy určit individuálně s ohledem na výše zmíněné parametry, zejména u tektonických poruch založených v homogenním horninovém prostředí může být jejich dosah na ovlivnění masivu velmi odlišný.

Modelování DFN v kvazihomogenním bloku na 20. patře prokázalo využitelnost detailního strukturního záznamu za pomoci 3D fotogrammetrických modelů. Po optimalizaci naměřených dat a vypočtení DFN sítě jsou její parametry ve shodě se strukturním pozorováním, včetně četností struktur asociovaných s první zónou. Tuto metodiku lze tedy aplikovat i v dalších

projektech souvisejících s hodnocením intenzity rozpukání HM a navazujících hydraulických simulací.

Studium transportních charakteristik bylo zaměřené na difúzní experimenty s ^3H jako konzervativním nesorbujícím se stopovačem a radionuklidy v aniontové formě (^{125}I popř. ^{36}Cl). Sorpční experimenty byly stanoveny pro vybrané radionuklidy Cs(I), Sr(II), Se(IV) a U(VI). Rozdíly v hodnotách rozdělovacího distribučního koeficientu R_d mezi jednotlivými speciemi poukazují na rozdílné sorpce mezi jednotlivými radionuklidy. Nejvyšší sorpce na horninový materiál byla naměřena v případě cesia. Radionuklidy v aniontové formě (např. Se, U) se převážně nesorbují, krom vzorků z 12. patra s vyššími obsahy Fe-minerálů

Porovnáním hodnot efektivních difúzních koeficientů HTO (medián $8,3 \cdot 10^{-13}$) a aniontu (chlorid $^{36}\text{Cl}^-$ (medián $4,7 \cdot 10^{-13}$) nebo jodid ^{125}I) je patrná nižší difuzivita aniontů oproti tritiu, což je možné přisuzovat aniontové exkluzi. Porovnáním amfibolických pararul (12. patro) a migmatitizovaných pararul (18. patro a níže), je vidět významný rozdíl ve velikosti poměru D_e (aniont/ ^3H), což lze vysvětlit jednak typem horniny, ale i výrazně odlišným geometrickým uspořádáním pórového prostoru. Porovnání EDZ vzorků z obou pater lze konstatovat, že transportní parametry v 12. i 24. patře jsou podobné. EDZ jsou výrazně kompaktnější než vzorky z patrových horizontů, což prokazuje nižší difúzní koeficienty u obou stopovačů (HTO a ^{36}Cl), jež se ve většině případů dostávají pod hodnoty $D_{e,\text{HTO}} < 6 \cdot 10^{-13} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, resp. $D_{e,\text{Cl}} < 2 \cdot 10^{-13} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$. Hodnoty tak spíše odrážejí rozdílné horninové složení a variabilitu prostředí.

Na základě četnostní analýzy poruch na dostupných bocích důlních děl byly definovány dva kvazihomogenní horninové bloky, které svým postižením reprezentují méně rozpukáný přístupný horninový masiv. Tyto bloky byly vytyčeny na 12. patře v blízkosti jámy R-1 a na 20. patře v blízkosti jámy R-3. Ačkoli mají tyto horninové bloky velmi odlišné litologické složení – pestré či zcela fádňní, prokázaly se jako nejméně postižené dle analýzy dat získaných z fotogrammetrických modelů. Za účelem vizualizace tohoto prostředí byly pro tyto bloky vytvořeny 3D geologické modely a geologické mapy na základě archivních podkladů (viz kap. 2.5.2). Dále byl pro studovanou oblast dolu Rožná a přilehlé úseky Habří a Zlatkov vytvořen 3D geologický model (kapitola 2.5.3) přímo navazující na 3D geologický model potenciální lokality Kraví hora na jihu (Franěk et al. 2018).

Tato závěrečná zpráva souhrnně popisuje získaná data z hlubokých horizontů dolu Rožná a vliv větší tektonické zóny v komplexu metamorfovaných hornin, které postihlo množství deformačních fází. Dílčí výsledky ukazují přímé postižení horninového masivu makroskopicky alespoň do vzdálenosti 60 m od okraje zóny a to v rámci využití geofyzikálních, geotechnických a strukturně geologických metod, nicméně v mikroměřítku je postižení znatelné i dále v horninovém masivu. Výsledky tohoto studia musí být vnímány obezřetně vzhledem k charakteristice konkrétního horninového masivu a charakteru (a genezi) konkrétní tektonické poruchy. Pro účely budování hlubinného úložiště radioaktivních odpadů a zajištění jeho bezpečnosti je třeba takovéto zóny na pomezí 1. a 2. kategorie dle Anderssona et al. (2000) důkladně zkoumat a s ohledem na jejich rozsah a projev v horninovém masivu stanovit dostatečnou vzdálenost od budovaných úložných prostor či využít adekvátní technické řešení. V jiných horninách mohou být rozsahy a postižení masivu velmi odlišné, zejména souvisí s podmínkami deformace (resp. deformací), která je původcem takovéto zóny.

6 Reference

- AMERICAN GEOLOGICAL INSTITUTE (1962): Dictionary of geological terms. – Dolphin Reference Books, 545 pp.
- ANDERS E., GREVESSE N. (1989): Abundances of the elements: Meteoric and solar. – *Geochim. Cosmochim. Acta*, 53, 1, 197–214.
- ANDERSSON K., ALLARD B. (1983): Sorption of radionuclides on geologic media. – A literature survey. I: Fission Products. Report 83-07. – SKB, Stockholm, Sweden.
- ANDERSON J. L., SMITH D. R. (1995): The effects of temperature and f_{O_2} on the Al-in-hornblende barometer. – *American Mineralogist*, 80, 5-6, 549–559.
- ANDERSSON, J., STRÖM, A., SVEMAR, C., ALMÉN, K.-E., ERICSSON, L. E. (2000): What requirements does the KBS-3 repository make on the host rock? Geoscientific suitability indicators and criteria for siting and site evaluation. – SKB Technical Report TR-00-12, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company, Stockholm, Sweden.
- ANDERSON E. B., IVANOV P.A., KOMÍNEK J. (1988): Rudní metasomatóza na uranových žilách ložiska Rožná. – *Geol. Hydrometalurg. Uranu*, 12, 70–88.
- ANTTILA P., AHOKAS H., FRONT K., HINKKANEN H., JOHANSSON E., PAULAMÄKI P., RIEKKOLA R., SAARI J., SAKSA P., SNELLMAN M., WIKSTRÖM L., ÖHBERG A. (1999): Final disposal of spent nuclear fuel in the Finnish bedrock - Olkiluoto site report. – Posiva Report 99-10, Posiva Oy, Helsinki, Finland.
- 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.
- AUTIO, J., SIITARI-KAUPPI, M., TIMONEN, J., HARTIKAINEN, K., HARTIKAINEN, J., 1998. Determination of the porosity, permeability and diffusivity of rock in the excavation-disturbed zone around full-scale deposition holes using the ^{14}C -PMMA and He-gas methods. – *Journal of Contaminant Hydrology* 35, 19-29.
- BAJUŠKIN I. M., GURVIČ M.J., HEJTMÁNEK J., IVANOV P.A., JURGENSON V.P. (1981): Petrografija i mineralogija městorožděnij rožno-olšinskogo rudnogo polja. – MS Archív DIAMO s.p., 46 s.
- 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.
- BARTON N., LIEN R., LUNDE J. (1974): Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. – *Rock Mechanics*, 6, 189–236.
- BATH (2011): Infiltration of dilute groundwaters and resulting groundwater compositions at repository depth. – Report 2011:22. SSM, Sweden.
- BECKER R.H. AND CLAYTON R.N. (1976). Oxygen Isotope Study of a Precambrian Banded Iron-Formation, Hamersley Range, Western-Australia. – *Geochimica et Cosmochimica Acta* 40(10), 1153–1165.
- BERČÁKOVÁ A., MELICHAR R., OBARA Y., PTÁČEK J., SOUČEK K. (2017): Evaluation of anisotropy of fracture toughness in brittle rock, migmatized gneiss. – *Procedia Engineering*, 191, 900–907.

- BERČÁKOVÁ A., MELICHAR R., SOUČEK K. (2019): Mechanical properties and failure patterns of migmatized gneiss with metamorphic foliation under UCS test. – *Rock Mechanics and Rock Engineering*, <https://doi.org/10.1007/s00603-019-02012-2>.
- BIENIAWSKI Z.T. (1976): Rock mass classification in rock engineering. *In* Proceedings of the Symposium Exploration for Rock Engineering, Johannesburg, 1–5 November 1976. – Geotechnical Division of the South African Institution of Civil Engineers and the South African National Group on Rock Mechanics. A.A. Balkema, Cape Town, 97–106.
- BIENIAWSKI Z.T. (1984): Rock mechanics design in mining and tunnelling. – A.A. Balkema, Rotterdam, 272 pp.
- BIENIAWSKI Z.T. (1989): Engineering rock mass classifications: a complete manual for engineers and geologists in mining, civil and petroleum engineering. – John Wiley & Sons, Inc., New York, 251 pp.
- BLÁHA P., DURAS R., GEBAUER, J., NOVOTNÁ, J. (2017): Souhrn výsledků geofyzikálních měření na lokalitě Bukov (Etapa 5). – SÚRAO, TZ 184/2017, Praha.
- BLUNDY J. D., HOLLAND T. J. B. (1990): Calcic amphibole equilibria and a new amphibole-plagioclase geothermometer. – *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 104, 2, 208–224.
- 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.
- BOJCOV V. J. (1974): Některé vlastnosti minerálního složení, posloupnost a časové zařazení zrudnění na ložiscích rudního pole Rožná – Olší. – MS archiv Čs. uran. prům. Příbram.
- BOJCOV V.E. (1974): Někotoryje osobnosti miněranogo sostava , posledovatělnost' i vremja miněraloobrazovanija na městorožděnijach rožno-olšinskogo rudogo polja. – MS Archiv GEAM, Dolní Rožinka, 124 s.
- BOJCOV V.E. (1975): Ob izměnenii miněralnogo satava rud na nižnyh gorizontach městorožděnij Rožná i Olší. – MS Archiv GEAM Dolní Rožinka. 45 s.
- BRUKER AXS (2014): Topas 5. – Karlsruhe, Germany.
- BRUKER AXS. (2015): Diffrac.Eva (PC program), – Karlsruhe, SRN
- BUKOVSKÁ Z., BOHDÁLEK, P., BUDA, J., DOBEŠ P., FILIPSKÝ D., FRANĚK J., HAVLOVÁ V., CHABR T., KNĚSL I., KRYL J., KŘÍBEK B., LAUFEK F., LEICHMANN J., NAVRÁTIL P., POŘÁDEK P., ROSENDORF T., SOEJONO I., SOSNA K., SOUČEK K., ŠUSTKOVÁ E., ŠVAGERA O., VAVRO L., VAVRO M., VESELOVSKÝ F., WACLAWIK P., ZUNA M. (2018): Technická zpráva za rok 2018 – získání dat z hlubokých horizontů dolu Rožná. – SÚRAO, TZ 328/2018, Praha.
- BUKOVSKÁ Z., KRYL J., BOHDÁLEK, P., BUDA, J., DOBEŠ P., FILIPSKÝ D., FRANĚK J., HAVLOVÁ V., HOLÉCZY D., CHABR T., JELÍNEK JAR., JELÍNEK JAN, KNĚSL I., KŘÍBEK B., LAUFEK F., LEICHMANN J., NAVRÁTIL P., POŘÁDEK P., SOEJONO I., SOSNA K., SOUČEK K., ŠVAGERA O., VAVRO L., VAVRO

- M., VESELOVSKÝ F., WACLAWIK P., ZUNA M. (2019): Technická zpráva za rok 2018 – získání dat z hlubokých horizontů dolu Rožná. – SÚRAO, TZ /2019, Praha.
- BUKOVSKÁ Z., SOEJONO I., VONDRONIC L., VAVRO M., SOUČEK K., BURIÁNEK D., DOBEŠ P., ŠVAJGERA O., WACLAWIK P., ŘIHOŠEK J., VERNER K., SLÁMA J., VAVRO L., KONÍČEK P., STAŠ L., PÉCSKAY Z., VESELOVSKÝ F. (2019): Characterization and 3D visualization of underground research facility for deep geological repository experiments: A case study of underground research facility Bukov, Czech Republic. – *Engineering Geology*, 259, 105186.
- BUKOVSKÁ Z., VERNER K., BRÁZDA L., BURIÁNEK D., DOBEŠ P., DUDÍKOVÁ SCHULMANNOVÁ B., ERBAN V., FRANĚL J., HALODOVÁ P., HANÁK J., HAVLOVÁ V., HOLEČEK J., JAČKOVÁ I., JELÉNEK J., KAŠPAR V., KOLOMÁ K., KOPAČKOVÁ V., KOUCKÁ L., KUČERA P., LAUFEK F., LNĚNIČKOVÁ Z., KOČERGINA J., MYŠKA O., NAHODILOVÁ R., NOVOTNÁ I., PERTOLDOVÁ J., RUKAVIČKOVÁ L., SOEJONO I., ŠVAGERA O., TOMEK F., VESELOVSKÝ F., ZUNA M. (2017): Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov, závěrečná zpráva. – Technická zpráva č. 191/2017. SÚRAO, Praha, 2017.
- 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.
- CARBOL P., ENGVIST I. (1997): Compilation of radionuclide sorption coefficients for performance assessment. SKB rapport R-97-13. – SKB, Stockholm, Sweden.
- CARRERAS J, COSGROVE J. W., DRUGUET E. (2013): Strain partitioning in banded and/or anisotropic rocks: Implications for inferring tectonic regimes. – *Journal of Structural Geology* 50, 7-21
- CARGILL J. S., SHAKOOR A. (1990): Evaluation of empirical methods for measuring the uniaxial compressive strength of rock. – *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 27, 6, 495–503.
- CATHELINÉAU M. (1986): The hydrothermal alkali metasomatism effects on granitic rocks: quartz dissolution and related subsolidus changes. – *J. Petrol.* 27, 945–965.
- COSMA C., ENESCU N., HEIKKINEN E. (2010): Very High Resolution Hard Rock Seismic Imaging for Excavation Damage Zone Characterisation. – *Near Surface 2010*
- COUTURE R.A., SEITZ M.G., STEINDLER M.J. (1983): Sampling of brine in cores of Precambrian granite from northern Illinois. – *J. Geophys.* 88B, 7331–7334. de Marsily, G., Gonc_alves, J., Violette,
- CRANK J. (1975): *The Mathematics of diffusion*. Second edition. – Oxford university press. ISBN 0198533446.
- CUNEY M., KYSER K.T. (2015): *Geology and geochemistry of uranium and thorium deposits*. Short course series, vol. 46. – Mineralogical Association of Canada, Montreal, Quebec, 345 s.
- ČERVINKA R., GONDOLLI J. (2016): Výběr reprezentativních podzemních vod a příprava jejich syntetických ekvivalentů. – TZ 41/2016. SÚRAO Praha, 122 str.

- ČERVINKA R., GONDOLLI J., KLAJMON M., TOMÁŠOVÁ Z., RUKAVIČKOVÁ L., ŘIHOŠEK J., PACHEROVÁ P., ZEMAN J., VENCELIDES Z. (2017): Chování horninového prostředí/Příprava geochemického modelu úložiště – Definice vstupních dat a příprava modelů, průběžná zpráva. – Technická zpráva číslo 125/2017. SÚRAO, 118 str.
- ČERVINKA R., KLAJMON, M., ZEMAN J., VENCELIDES Z. (2018): Chování horninového prostředí/Příprava geochemického modelu úložiště – Závěrečná zpráva číslo 271/2018. SÚRAO, 118 str.
- 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. – Technická zpráva č. 2015/18, SÚRAO, Praha, 2015.
- ČÍŽEK J., PECHAR T., RAUS M. ET AL. (2011): Provedení průzkumných a analytických prací na vybraných lokalitách a hodnocení rizikových úložišť těžebních odpadů: Metodika prací. – Evidenční číslo ČGS. – Geofond: 1236/2011. Sdružení OPV – GET – GV.
- DAVIS D.W., LOWENSTEIN T.M., SPENCER R.J. (1990): Melting behavior of fluid inclusions in laboratory-grown halite crystals in the systems NaCl-H₂O, NaCl-KCl-H₂O, NaCl-MgCl₂-H₂O, and NaCl-CaCl₂-H₂O. – *Geochim. Cosmochim. Acta*, 54, 591–601.
- DEERE D.U. (1989): Rock quality designation (RQD) after twenty years. – Contract Report GL-89-1, U.S. Army Corps of Engineers, Washington, D.C., 67 pp.
- DEERE D. U., HENDRON, A. J., PATTON F. D., CORDING E. J. (1967): Design of surface and near surface construction in rock. *In Proceedings of the 8th U. S. Symposium on Rock Mechanics*, Minneapolis, Minn., September 1966. – Society of Mining Engineers, The American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers (AIME), New York, 237–302.
- DEGUELDRE C., PLEINERT H., MAGUIRE P., LEHMAN E., MISSIMER J., HAMMER J., LEENDERS K., BÖCK H., TOWNSEND D. (1996): Porosity and pathway determination in crystalline rock by positron emission tomography and neutron radiography. – *Earth and Planetary Science Letters*, 140, 213–225.
- DOLEŽALOVÁ H. (2003): Sulfidické parageneze na uranovém ložisku Rožná. – Diplomová práce, MS, Přírodovědecká fakulta Masarykovy univerzity v Brně, 128 s.
- EBONG F. S., EVANS N. (2011): Sorption of Ni And Eu in a Multi-element System. – *J. Mat. Sci. Engin.*, B1, 504–515.
- EICHINGER F., RÜEDI J., WABER H.N., MÖRI A. (2008): Characterisation of matrix pore water – Diffusion profile in GTS rock matrix. – Project Report, Nagra, NPB 08-16.
- EICHINGER F.L., WABER H.N., SMELLIE J.A.T. (2006): Characterisation of matrix pore water at the Olkiluoto investigation site, Finland. – Posiva Working Report 2006-103.
- ESA (2017): Annual Report 2017. – Euratom Supply Agency (Evropská agentura pro společnou zásobovací politiku). Luxembourg.
- ESA (2018): Annual Report 2018. – Euratom Supply Agency (Evropská agentura pro společnou zásobovací politiku) Luxembourg.

- EVANS J. P. (1990): Thickness-displacement relationships for fault zones. – *J. Struct. Geol.* 12, 1061–1065.
- FIZ (2015): ICSD Database, – Karlsruhe, Germany.
- FOSSEN H. (2016): Structural geology. – Cambridge University Press, Cambridge
- FRANĚK J., BUKOVSKÁ Z., BURIÁNEK D., DUDÍKOVÁ SCHULMANNOVÁ B., GRUNDLOCH J., HOLEČEK J., JELÉNEK J., JELÍNEK J., KLOMÍNSKÝ J., KRYŠTOFOVÁ E., KUČERA R., KUNCEOVÁ E., KŮRKOVÁ I., NAHODILOVÁ R., PACHEROVÁ P., PERTOLDOVÁ J., PEŘESTÝ V., RUKAVIČKOVÁ L., SOEJONO I., ŠVAGERA O., VERNER K., ŽÁČEK V. (2018): Závěrečná zpráva 3D strukturně-geologické modely potenciálních lokalit HÚ. – MS SÚRAO, Praha, 595 s.
- GARÍA-GUTIERREZ M., CORMENZANA J. L., MISSANA T., MINGARRO M. (2004): Diffusion coefficients and accessible porosity for HTO and ³⁶Cl in compacted FEBEX bentonite. – *Applied Clay Science* 26, 65-73.
- GASCOUYNE M. (2004). Hydrogeochemistry, groundwater ages and sources of salts in a granitic batholith on the Canadian Shield, southeastern Manitoba. – *Appl. Geochem.* 19, 519–560.
- GASCOUYNE M., ROSS J.D., WATSON R.L. (1996): Highly saline pore fluids in the rock matrix of a granitic batholith on the Canadian Shield. – In: *Abstr.: 30th International Geological Congress, Beijing, China, August, 1996.*
- GEHÖR S. ET AL. (2002): Fracture calcites at Olkiluoto – Evidence from quaternary infills for palaeohydrogeology. – *Posiva Reports*, 118, Helsinki.
- GLAUS M. A., FRICK S., ROSSÉ R., VAN LOON, LUC R. (2011): Consistent interpretation of the results of through-, out-diffusion and tracer profile analysis for trace anion diffusion in compacted montmorillonite". – *Journal of Contaminant Hydrology* 123 (1–2): 1–10.
- GREEN C.R., WHIE R.W., DIENER J.F.A., POWELL R., HOLLAND T.J.B., PALIN R.M. (2016): Activity–composition relations for the calculation of partial melting equilibria in metabasic rocks. – *Journal of Metamorphic Geology* 2016, 34, 9, 845–869.
- GRIMAUD D., BEAUCAIRE C., MICHARD G. (1990): Modelling of the evolution of ground waters in a granite system at low temperature: the Stripa ground waters, Sweden. – *Applied Geochemistry* 5, 515-525.
- GRINĚNKO V.A. (1962): Prigotovlenije dvoukisi sery dlja izotopnogo analiza. – *Ž. neorg. chimiji*, 7, 2479, Moskva.
- GUEYDAN F., LEROY Y. M., JOLIVET M, AGARD P (2003): Analysis of continental midcrustal strain localization induced by microfracturing and reaction-softening, – *J. Geophys. Res.*, 108(B2).
- GUEYDAN F., LEROY Y. M., JOLIVET M. (2004): Mechanics of low-angle extensional shear zones at the brittle-ductile transition, – *J. Geophys. Res.*, 109.
- GVOŽDÍK J., BUKOVSKÁ, Z., GRECKÁ, M., JANKOVEC, J., KABELE, P., KRÁLOVCOVÁ, J., KRYL, J., MARYŠKA, J., MILICKÝ, M., ŘÍHA, J., ŠVAGERA, O., TRPKOŠOVÁ, D., UHLÍK, J., URBAN, P., VETEŠNÍK, ZELINKOVÁ, T. (2019): Transport radionuklidů z hlubinného úložiště/testování koncepčních a výpočetních modelů – Závěrečná zpráva. Technická zpráva, SÚRAO TZ 463/2020, Praha.
- HAKALA M., KUULA H., HUDSON J. A. (2007): Estimating the transversely isotropic elastic intact rock properties for in situ stress measurement data reduction: A case study of the Olkiluoto

- mica gneiss, Finland. – *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 44, 14–46.
- HAKANEN M., EEVANNE H., PUUKKO E. (2014): Safety Case for the Disposal of Spent Nuclear Fuel at Olkiluoto. POSIVA 2012-41. – Posiva Oy, Eurajoki, Finland.
- HAVLOVÁ V., BRÁZDA L., KOLOMÁ K., ŠUSTKOVÁ E., ROSENDORF T., ZUNA M. (2018): Migrační procesy radionuklidů v prostředí krystalických hornin a migrační parametry hornin českého masivu. – SÚRAO: TZ 333/2018
- HAVLOVÁ V., VIDENSKÁ K., HOFMANOVÁ E., PALÁGYI Š., ŠTAMBERG K., VEČERNÍK P., VOPÁLKA D. (2013): Laboratorní výzkum vybraných vzorků horninového prostředí. – Zpráva 14060, projekt TIP FR-TI1/362, SÚRAO, Praha, 2013.
- HAVLOVÁ V., HOFMANOVÁ E., TRPKOŠOVÁ D. (2018): Realizace a vyhodnocení LTD etapa III. experimentu v Grimsel Test Site. – Průběžná zpráva projektu za rok 2018. ÚJV Řež, a. s.
- HAVLOVÁ V., VOKÁL A. (2009): Metodický postup – Stanovení difúzních parametrů hornin a půd. Pracovní postup. – PP 213.04. ÚJV ŘEŽ a.s.
- HÁJEK A., ZÁBOJNÍK P. (2009): Vyhodnocení výsledků vrtného průzkumu pod 24. patrem ložiska Rožná. – DIAMO s. p. o. z. GEAM, Dolní Rožínka.
- HEAP M.,J., VINCIGUERRA S., MEREDITH P. G. (2009): The evolution of elastic moduli with increasing crack damage during cyclic stressing of a basalt from Mt. Etna volcano. – *Tectonophysics*, 471, 153-160.
- HELLMUTH K.H., SIITARI-KAUPPI M., KLOBES P., MEYER K., GOEBBELS J. (1999): Imaging and analyzing rock porosity by autoradiography and Hg-porosimetry/X-ray computertomography - applications. – *Physical and Chemical Earth*, 24, 569–573.
- HEUZE F. E. (1984): Suggested Method for estimating the In-Situ Modulus of Deformation of Rock Using the NX-Borehole Jack. *Geotechnical Testing*. – *Journal GTJODJ*, Vol. 7, No. 4, pp 205-210.
- HEUZE F. E., AMADEI B. (1985): The NX-Borehole Jack: A Lesson in Trials and Errors. *Int. – J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.* Vol. 22 No. 2, pp 105-122. Pergamon Press Ltd.
- HOEK E. (1994): Strength of rock and rock masses. – *ISRM News Journal*, 2, 2, 4–16.
- HOEK E., BROWN E.T. (1980): *Underground excavations in rock*. – Institution of Mining and Metallurgy, London, 532 pp.
- HOEK E., BROWN E.T. (1997): Practical estimates of rock mass strength. – *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 34, 8, 1165–1186.
- HOEK E., KAISER P. K., BAWDEN W. F. (1995): Support of underground excavations in hard rock. – A. A. Balkema, Rotterdam/Brookfield, 228 pp.
- HOLLAND T., POWELL R. (2003): Activity–composition relations for phases in petrological calculations: an asymmetric multicomponent formulation. – *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 145, 4, 492–501.
- HOLLAND T.J.B., POWELL R. (2011): An improved and extended internally consistent thermodynamic dataset for phases of petrological interest, involving a new equation of state for solids. – *Journal of Metamorphic Geology*, 29, 3, 333–383.

- CHAKI S., TAKARLI M., AGBODJAN W.P. (2008). Influence of thermal damage on physical properties of a granite rock: Porosity, permeability and ultrasonic wave evolutions. – *Construction and Building Materials* 22, 1456–1461.
- CHLUPÁČ I., ŠTORCH P. (EDS) (1992): Regionálně geologické dělení Českého masívu na území České republiky. – *Čas. Mineral. Geol.* 37, 257–275.
- CHOI J. H., EDWARDS P., KO, K., KIM, Y. S. (2016): Definition and classification of fault damage zones: A review and a new methodological approach. – *Earth-Science Reviews*, 152, 70–87.
- CHOI S.Y., PARK H.D. (2004): Variation of rock quality designation (RQD) with scanline orientation and length: a case study in Korea. – *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 41, 2, 207–221.
- ICDD (2002): PDF-2 Database, International Centre for Diffraction Data. – Newton Square, USA
- JANOŠEK 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.
- JAKOB A. (2004): Matrix diffusion for performance assessment - experimental evidence, modelling assumptions and open issues. – PSI Report Nr. 04-08.
- JAKUBCOVÁ M. (2014) Uranová a sulfidická mineralizace na 21. patře dolu Rožná. MS. – diplomová práce. Masarykova univerzita, Brno.
- JAUCH F. (2000): Using borehole geophysics for geotechnical classifications of crystalline rock masses in tunneling. - Ph.D. thesis, Swiss Federal Institute of Technology (ETHZ), Zürich, 162 pp.
- KABELE P., ŠVAGERA O., NEŽERKA V., SOMR M., ZEMAN J., BUKOVSKÁ Z., FRANĚK J., JELÍNEK J., SOEJONO I. (2018): Mathematical modelling of brittle fractures in rock mass by means of the DFN method. Technical report 286/2018. – SÚRAO, Praha 2018.
- KAHRAMAN S. A. (2001): Correlation between P-wave velocity, number of joints and Schmidt hammer rebound number. – *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 38, 5, 729–733.
- KÄRKI A., PAULAMÄKI S. (2006): Petrology of Olkiluoto, POSIVA 2006-02. – POSIVA OY.
- KATARGIN V.S., BOJCOV V.E., ČECH J., FRUEHBAUER M., KÁNSKÝ L., PREISS R., STUHLÍKOVÁ K., TOLSTOKUZOV B. (1966): Geologija uranových mestorožďenij Rožná i Olšij v Zapadnoj Moravii. – MS Archiv DIAMO, Dolní Rožinka, 85 s.
- KATZ O., RECHE Z., ROEGIERIS J.-C. (2000): Evaluation of mechanical rock properties using a Schmidt hammer. – *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 37, 4, 723–728.
- KIM S.-T., O'NEIL J.R. (1997). Equilibrium and nonequilibrium oxygen isotope effects in synthetic carbonates. – *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 61, 3461-3475.
- KIM Y. S., PEACOCK D. C. P., SANDERSON D. J. (2004): Fault damage zones. – *J. Struct. Geol.* 26, 503–517.
- KNOTT S. D. (1994): Fault zone thickness versus displacement in the Permo-Triassic sandstones of NW England. – *J. Geol. Soc.* 151, 17–25.

- KOŠULIČOVÁ M., ŠTÍPSKÁ P. (2007): Variations in the transient prograde geothermal gradient from chloritoid-staurolite equilibria: a case study from the Barrovian and Buchan-type domains in the Bohemian Massif. – *Journal of Metamorphic Geology*, 25, 1, 19–36.
- KŘÍBEK B. (1997): Uhlíkaté formace Českého masivu a jejich mineralizace. – Knihovna ČGU, sv. 66, Český geologický ústav Praha, 126 s.
- KŘÍBEK B., HÁJEK A. EDS. (2005): Uranové ložisko Rožná. Model pozdně variských a povariských mineralizací. – Česká geologická služba. Praha, 98 s.
- KŘÍBEK B., SÝKOROVÁ I., MACHOVIČ V., KNĚSL I., LAUFEK F., ZACHARIÁŠ J. (2015): The origin and hydrothermal mobilization of carbonaceous matter associated with Paleoproterozoic orogenic-type gold deposits of West Africa. – *Precambrian Research*, 270, 300–317.
- KŘÍBEK B., SÝKOROVÁ I., MACHOVIČ V., LAUFEK F. (2008): Graphitization of organic matter and fluid-deposited graphite in Palaeoproterozoic (Birimian) black shales of the Kaya-Gorengreenstone belt (Burkina Faso, West Africa). – *J. metamorphic Geol.*, 26, 937–958.
- KŘÍBEK B., UHLÍK Z. (1993): Stratiformní baryt-hyalofán-sulfidické zrudnění na ložisku Rožná, nový typ mineralizace v moldanubiku. – *Geologický průzkum*, ročník 35, 4, 97–100.
- 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.
- KUKKONEN I., KIVEKÄS L., VUORIAINEN S., KÄÄRIÄ M. (2011): Thermal properties of rocks in Olkiluoto: results of laboratory measurements 1994-2010. – Working Report 2011-17, Posiva Oy, Helsinki, Finland.
- KVAČEK M. (1979): Komplexní vyhodnocení poznatků mineralogicko-petrografického a chemického výzkumu ložiska Rožná za léta 1971–1976. – MS, ÚNS Kutná Hora. Archiv DIAMO, Dolní Rožínka, 48 s.
- KVAČEK M., MALEC J., NOVÁK F. (1973): Mineralogicko-geochemické a petrografické vyhodnocení ložiska Rožná. – MS UNS Kutná Hora, Archiv DIAMO, Dolní Rožínka. 98 s.
- LI L., OUELLET S., AUBERTIN M. (2009): An improved definition of rock quality designation, RQD_c. *In* Proceedings of the 3rd Canada–US Rock Mechanics Symposium & 20th Canadian Rock Mechanics Symposium RockEng09 Rock Engineering in Difficult Conditions, Toronto, Ont., 9–15 May 2009. – Canadian Rock Mechanics Association, University of Toronto Press, Toronto, Ont., paper 3934, 107–108.
- LIN A., YAMASHITA K. (2013): Spatial variations in damage zone width along strike-slip faults: an example from active faults in southwest Japan. – *J. Struct. Geol.* 57, 1–15.
- MAZUCH P., HLISNIKOVSKÝ K., ONDŘÍK J. ET AL. (2010): Lokalita Skalka - Kraví hora - ověření plošné a prostorové lokalizace hlubinného úložiště. – DIAMO, státní podnik odštěpný závod GEAM, Dolní Rožínka.
- MCCANN T. (ed.) (2008): The Geology of Central Europe, vol. 1: Precambrian and Palaeozoic. – Geological Society, London, 748 pp. doi:10.1144/CEV1P.1
- MCLENNAN S. M. (2001) Relationships between the trace element composition of sedimentary rocks and upper continental crust. – *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2(4).

- 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 (3-4), 223-253.
- MELNYK T. W., SKEET A. (1986): An improved technique for determination of rock porosity. –*Can. J. Earth Sci.* 23, 1068 - 1074.
- MENÉNDEZ, B., DAVID, C., DAROT, M., 1999. A Study of the Crack Network in Thermally and Mechanically Cracked Granite Samples using Confocal Scanning Laser Microscopy. – *Phys. Chem. Earth*, 24, 627-632.
- MERRITT A. H. (1972): Geologic prediction for underground excavations. *In*Proceedings of First North American Rapid Excavation and Tunneling Conference, Chicago, Ill., 5–7 June 1972. – Society of Mining Engineers, The American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers (AIME), New York, 1, 115–132.
- MOLLER P., WEISE S.M., ALTHAUS E., BACK W., BEHR H.J., BORCHARDT R., BRÄUER K., DRESCHER J., ERZINGER J., FABER E., HANSEN B.T., HORN E., HUENGES E., KÄMPF H., KESSELS W., KIRSTEN T., LANDWEHR D., LODEMANN M., MACHON L., PEKDEGER A., PIELOW H.U., REUTEL C., SIMON K., WALTHER J., WEINLICH F.H., ZIMMER M. (1997): Palaeofluids and recent fluids in the upper continental crust: results from the German continental deep drilling program (KTB). – *J. Geophys. Res.* 102, 18233–18254.
- MONTÉSI L. G. (2007): A constitutive model for layer development in shear zones near the brittle-ductile transition, – *Geophys. Res. Lett.*, 34, L08307, doi:10.1029/2007GL029250.
- MOYE D. G. (1967): Diamond Drilling for Foundation Exploration. – *Civil Engineering Transactions*, Institute of Engineers, Austrálie, Vol 9, NO 1, 1967, 95 – 100.
- MUURI E., IKONEN J., MATARA-AHO M., LINDBERG A., HOLGERSSON S., VOUTILAINEN M., SIITARI-KAUPPI M., MARTIN A. (2016): Behavior of Cs in Grimsel granodiorite: sorption on main minerals and crushed rock. – *Radiochim. Acta*, 104, 575–582.
- MILSON J. (2003): *Field Geophysics*. 3rd edition. – John Wiley & Sons Ltd., Chichester, England.
- MISRA S., ELLIS S., MANDAL N. (2015): Fault damage zones in mechanically layered rocks: The effects of planar anisotropy, – *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 120, 5432–5452.
- NAVRÁTIL P., BUKOVSKÁ Z., HLISNIKOVSKÝ K., HOLÉČZY D., JAROŠ M., JELÍNEK J., SVOBODA M., ŠVAGERA O., VOREL J. (2018): Zpráva o vyhodnocení archivních podkladů – získání dat z hlubokých horizontů dolu Rožná. – SÚRAO, TZ 269/2018, Praha.
- NEDRA 1992. Characterisation of crystalline rocks in deep boreholes: The Kola, Krivoy Rog and Tyrnauz boreholes. – SKB Technical Report (TR-92-39). SKB, Stockholm, Sweden.
- NOHÁL M. (ED.) (2019): Geologicko – strukturní mapa rudního pole Rožná – Olší v úrovni cca 600 m pod povrchem (12. patro dolu Rožná = 10. patro dolu Olší). – MS DIAMO s.p., o.z. GEAM.
- NOVÁKOVÁ L., BÍLÝ P., BLÁHA V., BROŽ M., DOBEŠ P., ENGLMAIEROVÁ M., GVOŽDÍK L., HANÁK J., HAVLOVÁ V., HOFMANOVÁ E., HOLEČEK J., KASÍKOVÁ J., LUKEŠ J., KOVÁŘOVÁ R., METELKOVÁ Z., MILICKÝ M., MYŠKA O., NAJSER J., NOVÁK P., NOVÁKOVÁ L., PALUKOVÁ V., PITRÁK M., POLÁK M., ROHOVEC J., RUKAVIČKOVÁ L., SOSNA K., SCHWEIGSTILLOVÁ J., ŠTRUNC J., VANEROVÁ Z., VANĚČEK M., VEČERNÍK P., VEJSADŮ J., ZÁRUBA J., ZUNA M. (2013): Výzkum vlivu mezizrné

propustnosti granitů na bezpečnost hlubinného ukládání do geologických formací a vývoj metodiky a měřicí aparatury. Etapová zpráva o řešení projektu v roce 2013 (V.c). Návrh metodiky studia a měření mezizrně propustnosti. – Arcadis-Geotechnika, Praha.

ONDŘÍK J., NOHÁL M., MAZUCH J., HLISNIKOVSKÝ K. (2011): Shrnutí informací o strukturních prvcích v území mezi centrální částí ložiska Rožná a severním křídlem ložiska Olší. – In: Výpočet zásob ložiska Rožná, MS DIAMO s.p., o.z. GEAM.

OTA K., MÖRI A., ALEXANDER W.R., FRIEG B., SCHILD M., 2003. Influence of the mode of matrix porosity determination on matrix diffusion calculations. – *Journal of Contaminant Hydrology* 61, 131–145.

PAČES T. (1973): Steady-state kinetics and equilibrium between ground water and granitic rock. – *Geochimica et Cosmochimica Acta* 37, 2641-2663.

PAČES T. (1983): *Základy geochemie*. – Academia Praha, 1983, 300pp.

PASSCHIER C. W. (1984): The generation of ductile and brittle shear bands in a low-angle mylonite zone, – *J. Struct. Geol.*, 6(3), 273–281.

PASSCHIER C.W., TROUW R.A.J. (2005): *Microtectonics*. – Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 366 pp.

PELLS P.J., BIENIAWSKI Z.T., HENCHER S.R., PELL S.E. (2017): Rock quality designation (RQD): time to rest in peace. – *Canadian Geotechnical Journal*, 54, 6, 825–834.

PETRUŽÁLEK M., LOKAJÍČEK T., SVITEK T., JECHUMTÁLOVÁ Z., KOLÁŘ P., ŠÍLENÝ J. (2019): Fracturing of migmatite monitored by acoustic emission and ultrasonic sounding. – *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 52, 1, 47–59.

PERTOLDOVÁ J., HALODOVÁ P., VERNER K., KOŠULIČOVÁ M., PERTOLD Z., KOŠLER J., KONOPÁSEK J., PUDILOV 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, 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 northern margin of the Moldanubian Zone: implications for geodynamic evolution in the northeastern part of the Bohemian Massif. – *J. Geosci.* 55, 4, 299–319.

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.

PIPER D. Z., BAU, M. (2013) Normalized rare earth elements in water, sediments, and wine: identifying sources and environmental redox conditions. – *American Journal of Analytical Chemistry* 4 (10), 69-83.

PITRA P., GUIRAUD M. (1996): Probable anticlockwise P-T evolution in extending crust: Hlinsko region, Bohemian Massif. – *Journal of Metamorphic Geology* 14, 49–60.

PITRA P., BURG J. P., GUIRAUD M. (1999): Late Variscan strike-slip tectonics between the Teplá-Barrandian and Moldanubian terranes (Czech Bohemian Massif): petrostructural evidence. – *Journal of the Geological Society*, 156, 1003-1020

- PLHAL J., KATARGIN V.S.(1973): Geologická mapa ložiskové oblasti Rožná – Olší 1 : 10 000. – MS archiv DIAMO s.p., o.z. GEAM.
- POST J.E., BICH 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 temperatures sous le microscope: L' installation de microthermometrie Chaixmeca. – Bull. Soc. fr. Mineral. Cristallogr. 99: 182–186.
- POWELL R., HOLLAND T., WORLEY B. (1998): Calculating phase diagrams involving solid solutions via non-linear equations, with examples using THERMOCALC. – *Journal of metamorphic Geology*, 16, 4, 577–588.
- PRIEST S.D., HUDSON J. A. (1976): Discontinuity spacings in rock. – *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 13, 135–148.
- RAMBOUSEK P., MALIŠ J., TOMAN F. ET AL. (2016): Závěrečná zpráva o realizaci projektu TB020CBU001 'Výzkum technologických možností získávání vzácných kovů v ČR s ohledem na minimalizaci dopadů na životní prostředí a jejich legislativní zajištění" - Vzácné kovy. – Závěrečná zpráva 46 s. MS archiv Geofond, Česká geologická služba.
- RAMSAY J. G. (1967): *Folding and fracturing of rocks*: – New York, McGraw-Hill Book Company, 568 p.
- 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.
- REUSCHLÉ, T., GBAGUIDI HAORE, S., DAROT, M., 2006. The effect of heating on the microstructural evolution of La Peyratte granite deduced from acoustic velocity measurements. – *Earth and Planetary Science Letters* 243, 692–700.
- RILEY P. R., GOODWIN L. B., LEWIS C. J. (2010): Controls on fault damage zone width, structure, and symmetry in the Bandelier Tuff, New Mexico. – *J. Struct. Geol.* 32, 766–780.
- SAVOYE S., FRASCA B., GRENUT B., FAYETTE A. (2012). „How mobile is iodide in the Callovo–Oxfordian claystones under experimental conditions close to the in situ ones?“ – *Journal of Contaminant Hydrology* 142–143: 82–92.
- SEGALL P., POLLARD D. D. (1980): Mechanics of discontinuous faults. – *J. Geophys. Res.* 85, 4337–4350.
- SCHILD, M., SIEGESMUND, S., VOLLBRECHT, A., MAZUREK, M., 2001. Characterization of granite matrix porosity and pore-space geometry by in situ and laboratory methods. *Geophys.* – *J. Int.*, 146, 111-125.
- SCHINDELIN J.; ARGANDA-CARRERAS I., FRISE E. ET AL. (2012), "Fiji: an open-source platform for biological-image analysis". – *Nature methods* 9(7): 676-682, PMID 22743772.
- SCHOLZ C.H.(1968) Microfracturing and the inelastic deformation of rock in compression. – *Journal of Geophysical Research*, 73, 1417–1432.

- SCHÖN J. (1983): *Petrophysik. Physikalische Eigenschaften von Gesteinen und Mineralen.* – F. Enke Verlag, Stuttgart, Deutschland.
- 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., JANOUŠEK V., LARDEAUX J.M., EDEL J.B. (2014): anatomy of a diffuse cryptic suture zone: An example from the Bohemian Massif, European Variscides. – *Geology.* 305, 42, 275–278.
- SINGHAL B.B.S., GUPTA R.P. (2010): *Applied hydrogeology of fractured rocks.* 2nd edition. – Springer B.V., London, England.
- SIREN T., HAKALA M., VALLI J., KANTIA P., HUDSON J. A., JOHANSSON E. (2015): In situ strength and failure mechanisms of migmatitic gneiss and pegmatitic granite at the nuclear waste disposal site in Olkiluoto, Western Finland. – *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 79, 135–148.
- SKAGIUS K., NERETNIEKS I. (1986). Porosities and diffusivities of some non-sorbing species in crystalline rocks. – *Water Resour. Res.* 22, 389–397.
- SMELLIE J.A.T., WABER H.N., FRAPE S.K. (2003): *Matrix fluid chemistry experiment.* – Technical Report, SKB, TR-03-18.
- SÖDERLUND M., LUSA M., VIRTANEN S., VÄLIMAA I., HAKANEN M., LAHTO 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.
- SOEJONO I., ŽÁČKOVÁ, E., JANOUŠEK V., MACHEK M., KOŠLER J. (2010): Vestige of an Early Cambrian incipient oceanic crust incorporated in the Variscan orogen: Letovice Complex, Bohemian Massif. – *Journal of the Geological Society London* 167, 6, 1113-1130. ISSN 0016-7649. DOI 10.1144/0016-76492009-180.
- SOUČEK K., STAŠ L. (2014): *Metodika 3D vizualizace stavby a struktury geomateriálů pomocí průmyslové rentgenové počítačové tomografie - zásady pro získání kvalitních tomografických dat.* – Interní metodický postup Ústavu geoniky AV ČR, v. v. i., Ostrava (nepublikováno).
- SOUČEK K., VAVRO M., STAŠ L., KALÁB Z., KONÍČEK P., GEORGIOVSKÁ L., KALÁB T., KONEČNÝ P., KOLCUN A., KRÁLOVÁ L., KUBINA L., LEDNICKÁ M., MALÍK J., MARTINEC P., PTÁČEK J., VAVRO L., WACLAWIK P., ZAJÍCOVÁ V. (2018): *Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov - část II Geotechnická charakterizace.* – SÚRAO, TZ 221/2018, Praha.
- STARÝ J., NOVÁK J. (2019): *Bilance zásob výhradních ložisek nerostů České republiky k 1. lednu 2018. Díl II.: Palivoenergetické suroviny.* – Ministerstvo životního prostředí, Česká geologická služba, Praha.
- STAŠ ET AL. (1997): *Měření primárního napětí horského masivu na ložisku Rožná metodou hydroporušování stěn vrtu.* – Zpráva pro DIAMO s.p. GEAM Dolní Rožínka, ÚGN AV ČR, Ostrava.
- STAŠ L., BLÁHA P., DURAS R., GEBAUER J., GEORGIOVSKÁ L., KAJZAR V., KALÁB T., KOHUT R., KOLCUN A., KUKUTSCH R., MALÍK J., NOVOTNÁ J., SOUČEK K., VAVRO M., ZAJÍCOVÁ V. (2018):

- Vznik a monitoring EDZ při výstavbě PVP Bukov – závěrečná zpráva. – SÚRAO, TZ 351/2019, Praha.
- STUMPF S., STUMPF T., WALTHER C., BOSBACH D., FANGHÄNEL T. (2006): Sorption of Cm(III) onto different Feldspar surfaces: a TRLFS study. – *Radiochim. Acta*, 94, 243–248.
- SÚRAO (2017): Požadavky, indikátory vhodnosti a kritéria výběru lokalit pro umístění hlubinného úložiště. – Metodický pokyn SÚRAO MP.22, SÚRAO, Praha.
- ŠVAGERA O., BUKOVSKÁ Z., SOUČEK K., VAVRO M., WACLAWIK P., SOSNA K., HAVLOVÁ V., ZUNA M., JANKOVSKÝ F., FILIPSKÝ D., CHABR T., NAVRÁTIL P., SOEJONO I., LAUFEK F., KŘÍBEK B., LEICHMANN J., ZEMAN J. (2018): Realizační projekt prací – získání dat z hlubokých horizontů dolu Rožná. – SÚRAO, TZ 224/2018, Praha.
- TAJČMANOVÁ L., SOEJONO I., KONOPÁSEK J., KOŠLER J., KLOTZLI U. (2010): Structural position of high-pressure felsic to intermediate granulites from NE Moldanubian domain (Bohemian Massif). – *Journal of the Geological Society, London*, 167, 329–345.
- TAKARLI, M., PRINCE, W., SIDDIQUE, R., 2008. Damage in granite under heating/cooling cycles and water freeze–thaw condition. – *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 45, 1164–1175.
- TICKNOR K. V., VANDERGRAAF T. T. (1989): Radionuclide sorption on primary and fracture-filling minerals from the East Bull Lake pluton, Massey, Ontario, Canada. – *Appl. Geochem.*, 4, 163–176.
- TORABI A., ELLINGSEN T. S. S., JOHANNESSEN M. U., ALAEI B., ROTEVATN A., CHIARELLA D. (2019): Fault zone architecture and its scaling laws: where does the damage zone start and stop? – *Geological Society, London, Special Publications*, SP496-2018–2151. <https://doi.org/10.1144/sp496-2018-151>
- TUISKU P., KÄRKI A. (2010): Metamorphic Petrology of Olkiluoto. Working Report 2010-54. – POSIVA OY, Olkiluoto.
- TULLBORG E-L., DRAKE H., SANDSTROM B. (2008): Palaeohydrology: A methodology based on fracture mineral studies. – *Applied Geochemistry*, 23, 1881–1897.
- URANIUM (2018): Resources, Production and Demand. – A Joint Report by the Nuclear Energy Agency and the International Atomic Energy Agency. OECD.
- VAN DEN KERKHOF A.M., THIERY R. (2001): Carbonic inclusions.. – *Lithos* 55: 49–68.
- VANĚČEK M. A KOL. (2018): Plán kvality – získání dat z hlubokých horizontů dolu Rožná. – SÚRAO, TZ 226/2018, Praha.
- VAN LOON L. R., SOLER J. M, JAKOB A., BRADBURY M. H. (2003): Effect of confining pressure on the diffusion of HTO, ³⁶Cl⁻ and ¹²⁵I⁻ in a layered argillaceous rock (Opalinus Clay): diffusion perpendicular to the fabric. – *Applied Geogemistry* 18, 1653–1662.
- VAVRO M., SOUČEK K., STAŠ L., WACLAWIK P., VAVRO L., KONÍČEK P., PTÁČEK J. (2015): Application of alternative methods for determination of rock quality designation (RQD) index: A case study from the Rožná I uranium mine, Strážek Moldanubicum, Bohemian Massif, Czech Republic. – *Canadian Geotechnical Journal*, 52, 10, 1466–1476.
- VENCELIDES Z. (1991): Sulfid-barytová mineralizace na ložisku Rožná. – MS Přírodovědecká fakulta Univerzity Karlovy, 84 s.

- VERMILYE J.M., SCHOLZ C.H.(1998): The process zone: a microstructural view of fault growth. – Journal of Geophysical Research. 103, 12223–12237.
- VERNER K., BUKOVSKÁ Z. A KOL. (2015): Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov, Roční etapová zpráva 2015. – Česká geologická služba, Praha. 245 p.
- 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., ŽÁK J., HROUDA F., HOLUB F.V. (2006): Magma emplacement during exhumation of the lower- to mid-crustal orogenic root: The Jihlava syenitoid pluton, Moldanubian Unit, Bohemian Massif. – J. Struct. Geol., 28: 1553-1567.
- VILHELM S., BAJER B., HÁJEK A., HALÍK L., HEJTMÁNEK J., KONOPÁSEK R., CHRÁST M., KŘIVÁNEK K., KUBEČEK J., MACH J., NOHÁL M., PEASCH J., BULLOVÁ J., ROZHOŇ V., ŠENK M., UHLÍK Z., VOKOUN J., ŽVÁČEK B. (1984): Generální výpočet zásob uranu v rudním poli Rožná – Olší k 1. 1. 1984. – MS ČSUP, Dolní Rožínka.
- WABER H.N., SMELLIE J.A.T. (2008): Characterisation of pore water in crystalline rocks. – Applied Geochemistry 23, 1834-1861.
- WHITE R.W., POWELL R., JOHNSON T.E. (2014): The effect of Mn on mineral stability in metapelites revisited: New a–x relations for manganese-bearing minerals. – Journal of Metamorphic Geology, 32, 8, 809–828.
- WILLIAMS, J.H., AND JOHNSON, C.D. (2004): Acoustic and optical borehole-wall imaging for fractured-rock aquifer studies. – Journal of Applied Geophysics, 55(1–2): 151–159.
- ZAVORAL J., CINK R., ČERVENÝ J., EICHLER J., HOŘEJŠÍ V., CHLUMSKÝ J., KAŠPAR I., KURKA J., KŘÍŽOVÁ H., MENZELOVÁ O., MITTNEROVÁ A., MÜHLDFORD J., PAVLÍK J., POLÁK V., PŘÍDALOVÁ O., SMEJKAL A., ŠKOPEK J., ŠŤASTNÝ J., ŠVANDA A., VANĚČEK I. (1987): Metodiky laboratorních zkoušek v mechanice zemin a hornin, III – Mechanika hornin. – Český geologický úřad Praha, 90 s.
- ŽÁČEK M. ET AL. (2018): Ověřování zlomových struktur metodou geochemického profilování a korelace výsledků s geologickými a geofyzikálními daty. – MS Geomin Jihlava, s.r.o.
- ŽÁK J., VERNER K., FINGER F., FARYAD S. W., CHLUPÁČOVÁ M., VESELOVSKÝ M. (2011): The generation of voluminous S-type granites in the Moldanubian unit, Bohemian Massif, by rapid isothermal exhumation of the metapelitic middle crust. – Lithos, 121: 25-40.

Technické normy a standardy:

- ASTM D4971-16, 2016. Standard Test Method for Determining the In Situ Modulus of Deformation of Rock Using the Diametrically Loaded 76-mm (3-in.) Borehole Jack, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM D7625 – 10 Standard Test Method for Laboratory Determination of Abrasiveness of Rock Using the CERCHAR Method, 2010.
- ČSN 72 1154 *Stanovení měrné a objemové hmotnosti, hutnosti a pórovitosti přírodního stavebního kamene*. Praha: Úřad pro normalizaci a měření. 1983. 8 s.

- ČSN EN 1926 (72 1142) *Zkušební metody přírodního kamene - Stanovení pevnosti v prostém tlaku*. Praha: Český normalizační institut. 2007. 20 s.
- ČSN EN 1936 (72 1143) *Zkušební metody přírodního kamene - Stanovení měrné a objemové hmotnosti a celkové a otevřené pórovitosti*. Praha: Český normalizační institut. 2007. 12 s.
- ČSN EN 13755 (72 1149) *Zkušební metody přírodního kamene - Stanovení nasákavosti vodou za atmosférického tlaku*. Praha: Český normalizační institut. 2008. 8 s.
- ČSN EN 14581 (72 1131) *Zkušební metody přírodního kamene – Stanovení součinitele lineární tepelné roztažnosti*. Praha: Český normalizační institut. 2005. 12 s.
- ČSN EN 14579 (72 1156) *Zkušební metody přírodního kamene – Stanovení rychlosti šíření zvuku*. Praha: Český normalizační institut. 2005. 15 s.
- ČSN CEN ISO/TS 17892-11 – *Geotechnický průzkum a zkoušení – Laboratorní zkoušky zemin – Část 11: Stanovení propustnosti zemin při konstantním a proměnném spádu*, 2005.
- International Society For Rock Mechanics Commission On Testing Methods (1978a): Suggested methods for determining sound velocity. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 15, 2, 53-58.
- International Society For Rock Mechanics Commission On Testing Methods (1978b): Suggested methods for determining tensile strength of rock materials. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 15, 3, 99-103.
- International Society For Rock Mechanics Commission On Testing Methods (1978c): Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses. - *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 15, 6, 319–368.
- International Society For Rock Mechanics Commission On Testing Methods (1979a): Suggested methods for determining the uniaxial compressive strength and deformability of rock materials: Part 1. Suggested method for determination of the uniaxial compressive strength of rock materials. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 16, 2, 137-138.
- International Society For Rock Mechanics Commission On Testing Methods (1979b): Suggested methods for determining the uniaxial compressive strength and deformability of rock materials: Part 2. Suggested method for determining deformability of rock materials in uniaxial compression. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 16, 2, 138-140.
- International Society For Rock Mechanics Commission on Testing Methods 1981. Suggested methods for geophysical logging of boreholes. Co-ordinated by M.S. King. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 18(1): 67–84.
- International Society For Rock Mechanics Commission On Testing Methods, 1996. Suggested method for deformability determination using a stiff dilatometer. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.* Vol. 33, No. 7. pp. 733-741. Elsevier Science Ltd.
- Vyhláška SÚJB č. 378/2016 Sb., ze dne 7. listopadu 2016, o umístění jaderného zařízení.



SÚRAO

SPRÁVA ÚLOŽIŠŤ
RADIOAKTIVNÍCH
ODPADŮ

NAŠE
BEZPEČNÁ
BUDOUCNOST

info@sura0.cz | www.sura0.cz