

Technická zpráva číslo 289/2018

**VÝVOJ A OVĚŘOVÁNÍ
METODIK PRO
CHARAKTERIZACI
HORNINOVÉHO PROSTŘEDÍ –
VÝSLEDKY MONITORINGU
V PŘÍPADĚČI BEDŘICHOV
ZÁVĚREČNÁ ZPRÁVA**

Autoři: Milan Hokr, Lenka Rukavičková,
Václava Havlová

a kolektiv

Technická univerzita v Liberci

Liberec, červen 2018

Název projektu: Výzkumná podpora pro bezpečnostní hodnocení hlubinného úložiště

Název dílčího projektu: Charakterizace horninového prostředí / Vývoj a ověření metodik pro charakterizaci horninového prostředí

Název dílčí etapové zprávy: Vývoj a ověření metodik pro charakterizaci horninového prostředí – Výsledky monitoringu v přivaděči Bedřichov

Závěrečná zpráva

Evidenční číslo objednatele: SÚRAO TZ 289/2018

Evidenční číslo poskytovatele: PB-2018-ZZ-S2566-012-Bedrichov-180630

ŘEŠITELÉ:

Technická univerzita v Liberci¹, Česká geologická služba², ÚJV Řež³

Ústav struktury a mechaniky hornin AV⁴, Geofyzikální ústav AV⁵, G-IMPULS, s.r.o.⁶,
Geologický ústav AV⁷

Autoři: Milan Hokr¹, Lenka Rukavičková², Václava Havlová³

Autorský kolektiv: Aleš Balvín¹, Jaroslav Bárta⁶, Petr Dědeček⁵, Eva Hofmanová³, Jan Holeček², Jiří Málek⁴, Xavi Martí⁴, Matěj Petružálek⁷, Petr Rálek¹, Matthew D. Rowberry⁴, Jan Šafanda⁵, Libor Žanda⁴

Horní Indexy u jmen autorů odkazují na výčet institucí výše. Podíl autorů na jednotlivých kapitolách je dále vyznačen přímo v textu.



SÚRAO

Obsah

1	Úvod	17
2	Monitoring režimu toku a chemismu podzemních vod	19
2.1	Rozmístění a metodika měření	19
2.2	Monitoring vydatnosti průsaků	21
2.2.1	Kapající vývěry	21
2.2.2	Tekoucí vývěry se stabilním průtokem	22
2.2.3	Tekoucí vývěry s variabilním průtokem	26
2.2.4	Celkový průsak do štoly	27
2.3	Monitoring na povrchu	29
2.4	Odběry a monitoring stopovačů	30
2.4.1	Stanovení obsahu freonů a SF6 v podzemních vodách	30
2.4.2	Monitoring stabilních izotopů 18O a 2H	31
2.5	Hydrochemický monitoring	37
2.5.1	Variabilita složení podzemních vod v rámci vodovodního přivaděče a její změna v čase	37
2.5.2	Variabilita chemického složení podzemních vod na monitorovaných přítocích	40
2.5.3	Automatické měření konduktivity	50
2.6	Modelování transportu stopovačů	51
2.7	Vyhodnocení	56
3	Monitoring posunů puklin	60
3.1	Přístroje a metodika	60
3.1.1	Mechanické extenzometry	60
3.1.2	Automatický monitorovací systém	61
3.2	Monitorování	62
3.2.1	Monitorovací bod D235	63
3.2.2	Monitorovací bod D278	64
3.2.3	Monitorovací bod D792	67
3.2.4	Monitorovací bod D881	67
3.3	Vyhodnocení	68
4	Monitoring seismicity	73
4.1	Příprava nové seismické stanice	73
4.2	Vývoj nového seismometru	75
4.3	Výsledky seismického monitoringu	79
5	Monitoring teplot	83

5.1	Přístroje a metodika	83
5.1.1	Instalace v bedřichovském tunelu	83
5.1.2	Instalace na povrchu nad bedřichovským tunelem	86
5.1.3	Instalace v nádrži Josefův Důl.....	86
5.2	Teplotní monitoring	87
5.2.1	Monitoring v bedřichovském tunelu	87
5.2.2	Monitoring na povrchu nad tunelem	94
5.2.3	Monitoring v nádrži Josefův Důl	99
5.3	Vyhodnocení	102
6	Geofyzikální měření	103
6.1	Přístroje a metodika	103
6.1.1	Odporová tomografie.....	103
6.1.2	Seismická měření.....	104
6.1.3	Přehled hlavních sledovaných veličin	105
6.2	Průběh monitorovacích prací.....	105
6.3	Závěrečné vyhodnocení	106
6.3.1	Odporová tomografie.....	106
6.3.2	Seismická měření.....	109
7	Měření migračních parametrů na vzorcích	118
7.1	Přehled studovaných vzorků	118
7.2	Ultrazvukové prozařování kulových vzorků.....	120
7.3	Stanovení koeficientu hydraulické vodivosti	122
7.4	Stanovení porozity vzorků	124
7.5	Průnikové difúzní experimenty s HTO	127
7.6	Elektromigrační experimenty s jodidem	132
7.6.1	Vliv velikosti vzorku – srovnání $D_e(EM_NaCl)$ stanoveného na 5cm a 1cm vzorku 133	
7.6.2	Vliv iontové síly na migraci – srovnání EM za různých salinit	134
7.6.3	Vliv použité techniky.....	135
7.6.4	Shrnutí migrace jodidu	135
7.7	Stanovení hloubkového dosahu EDZ	137
8	Závěry	140
9	Reference.....	145

Seznam obrázků:

Obr. 1 Základní schéma bedřichovské štoly s pozicemi vývěřů a znázorněním nadloží.....	20
Obr. 2 Průběh vydatnosti vývěru V1 (srovnání automatického a ručního měření).....	21
Obr. 3 Průběh vydatnosti vývěru V2 (srovnání automatického a ručního měření).....	22
Obr. 4 Průběh vydatnosti vývěru V3 (srovnání automatického a ručního měření).....	22
Obr. 5 Průběh vydatnosti vývěru V4-2 (srovnání automatického a ručního měření). V roce 2014 je zobrazen „mrak“ surových dat vydatností s velkým rozptylem.	23
Obr. 6 Průběh vydatnosti vývěru W2313 (srovnání automatického a ručního měření).	24
Obr. 7 Průběh vydatnosti vývěru V5 (srovnání automatického a ručního měření). Výpadky měření byly způsobeny jak problémy při přenosu dat, tak opotřebením mechanismu a magnetu sklopného člunku.....	24
Obr. 8 Vývoj vydatnosti přítoku W930 m v čase (průměrné denní hodnoty z jednotlivých odečtů), měsíční úhrny srážek, srážkoměrné stanice Josefův Důl.....	25
Obr. 9 Vývoj vydatnosti přítoku W930 m v čase, vyhodnocení podle doby naplnění válce (klouzavý průměr 3 měření) a 3denní klouzavý průměr jednotlivých odečtů.	25
Obr. 10 Průběh vydatnosti vývěru V6 (srovnání automatického a ručního měření).....	26
Obr. 11 Průběh vydatnosti vývěru V7 (srovnání automatického a ručního měření).....	27
Obr. 12 Průběh průtoku na různých místech ve sběrném kanálu, doplněný o hodnoty ze směšovací zkoušky.	28
Obr. 13 Podrobné rozložení průsaků podél délky štoly při jednotlivých experimentech směšovací metody.	28
Obr. 14 Data z meteorologické stanice v prostoru úpravny za celé období provozu. Kromě denního úhrnu srážek jsou zobrazeny denní klouzavé průměry ostatních hodnot. V první polovině roku 2017 došlo k výpadku provozu celé meteostanice.	29
Obr. 15 Koncentrace izotopu ^2H ve vývěrech v tunelu.	32
Obr. 16 Koncentrace izotopu ^{18}O ve vybraných kapajících vývěrech v tunelu. Je vidět rozdíl mezi V1 se sezónním nebo delším trendem a ostatní dva bez těchto změn.	33
Obr. 17 Koncentrace izotopu ^{18}O ve vybraných hlubokých vývěrech v tunelu bez sezónních trendů.....	33
Obr. 18 Pozice koncentrací vybraných vývěřů charakteristických pro jednotlivé skupiny vůči globální meteorické linii (GMWL).....	34
Obr. 19 Krabicové diagramy pro porovnání jednotlivých vzorkovaných míst (shora maximum, 3. kvartil, medián, 1. kvartil a minimum).....	35
Obr. 20 Zobrazení kolísající koncentrace ve srážkách (měřeno na povodí Uhlířská, data ČVUT) a utlumení kolísání ve vývěru V7.	36
Obr. 21 Durovův diagram chemického složení podzemních vod hlavních přítoků do přivaděče	37
Obr. 22 Hodnoty měrné elektrické vodivosti měřených přítoků v profilu přivaděče Bedřichov.	38
Obr. 23 Hodnoty pH měřených přítoků v profilu přivaděče Bedřichov.	39

Obr. 24 Durovův diagram variability chemického složení podzemních vod na monitorovaných přítocích, TDS – celkový obsah rozpuštěných látek.....	40
Obr. 25 Časový vývoj vydatnosti, obsahů vybraných iontů a pH v podzemní vodě z přítoku V07, první část.	42
Obr. 26 Časový vývoj vydatnosti, obsahů vybraných iontů a pH v podzemní vodě z přítoku V07, druhá část.	42
Obr. 27 Časový vývoj vydatnosti, obsahů vybraných iontů a pH v podzemní vodě z přítoku V05, první část.	43
Obr. 28 Časový vývoj vydatnosti, obsahů vybraných iontů a pH v podzemní vodě z přítoku V05, druhá část.	43
Obr. 29 Časový vývoj vydatnosti, obsahů vybraných iontů a pH v podzemní vodě z přítoku W1565, první část.	44
Obr. 30 Časový vývoj vydatnosti, obsahů vybraných iontů a pH v podzemní vodě z přítoku W1565, druhá část.	44
Obr. 31 Časový vývoj vydatnosti, obsahů vybraných iontů a pH v podzemní vodě z přítoku W2210, první část.	45
Obr. 32 Časový vývoj vydatnosti, obsahů vybraných iontů a pH v podzemní vodě z přítoku W2210, druhá část.	45
Obr. 33 Časový vývoj celkového obsahu rozpuštěných látek (TDS) u monitorovaných přítoků.	46
Obr. 34 Theil-Senův odhad trendu celkového obsahu rozpuštěných látek obsahu SO_4^{2-} v přítocích V05, W1565 a W2210.....	47
Obr. 35 Theil-Senův odhad trendu celkového obsahu rozpuštěných látek (TDS) v přítocích V05, W1565 a W2210.	47
Obr. 36 Krabicové diagramy vybraných složek a parametrů podzemních vod z monitorovaných přítoků.....	49
Obr. 37 Časový vývoj konduktivity v porovnání s vydatností vývěru V7.	50
Obr. 38 Časový vývoj konduktivity v porovnání s vydatností vývěru V7 – detail posledních 6 měsíců.	50
Obr. 39 Časový vývoj konduktivity v porovnání s vydatností vývěru V6.	51
Obr. 40 Výsledky kalibrace vývěrů V7 (W76), V1 (W125), V6 (W142) a V5 (W226) v softwaru FLOWPC. Porovnání vstup koncentrace ze srážek (červená čára) s redistribucí koncentrace ze sněhové pokrývky do jarního tání (zelená čára).....	53
Obr. 41 Gemotrické parametry a okrajové podmínky 2D numerického modelu (vlevo); ukázka diskretizace úlohy pro hlubší vývěr (vpravo).	54
Obr. 42 Výsledky kalibrace vývěrů V7 (W76), V1 (W125), V6 (W142) a V5 (W226) v softwaru flow123d. Porovnání dvou variant modelů – model s ustálenou hydraulikou a model s neustálenou hydraulikou.....	56
Obr. 43 Srovnání reakcí vývěrů V1, V7 a V6 na srážkové události (2015).	57
Obr. 44 Srovnání reakcí vývěrů V1, V7 a V6 na srážkové události (2016).	57

- Obr. 45 Srovnání relativních změn vydatností vývěrů v mělké části štoly v reakci na srážkové události (2017). Pro V1, V7: $100\% = (\text{max. průtok} + \text{min. průtok})/2$; pro V5, V6: $100\% = \text{průměr průtoků za dané období}$58
- Obr. 46 Časový vývoj vydatnosti vývěru W2313 ve srovnání s výškou hladiny ve vodní nádrži Josefův Důl (data z Povodí Labe) a denním úhrnem srážek (data z povodí Labe v kombinaci s meteostanicí v areálu vodárny Bedřichov). Srážky jsou vyznačeny proporcionálně bez absolutních hodnot. Pro doplnění je znázorněn též vývoj vydatností na vývěru V7 (s rychlou odezvou na infiltraci).58
- Obr. 47 (A) Modul automatického sběru dat představuje základní modul monitorovacího systému Všechny jeho součástky jsou uloženy v hermeticky uzavřené ochranné skříni s označením stupně krytí IP-68. (B) Uvnitř modulu automatického sběru dat se nacházejí zásadní elektronické součástky zodpovědné za zpracování obrazových dat, uložení a přenos dat. (C) Vstupy z vnější strany modulu automatického sběru dat. Veškeré kabely jsou vybaveny vodotěsnými elektrickými konektory se stupněm krytí IP-68.62
- Obr. 48 (A) Schéma jednotlivých částí uvnitř modulu automatického sběru dat vyvinutého pro případy, v nichž není možné spoléhat na dodávky energie i telekomunikační síť. (B) Schéma jednotlivých částí monitorovacího systému (plná červená čára = proud; přerušovaná červená čára = data, či data a proud).....63
- Obr. 49 Posuny a rotace zaznamenané v monitorovacím bodě posunů puklin D235. (A) Otevírání a zavírání pukliny, představované osou x; (B) Horizontální posuny, představované osou y; (C) Vertikální posuny představované osou z; (D) Rotace v horizontální rovině, představované osou xy; (E) Rotace ve vertikální rovině, představované osou xz.65
- Obr. 50 Posuny a rotace zaznamenané v monitorovacím bodě posunů puklin D278. (A) Otevírání a zavírání pukliny, představované osou x; (B) Horizontální posuny, představované osou y; (C) Vertikální posuny představované osou z; (D) Rotace v horizontální rovině, představované osou xy; (E) Rotace ve vertikální rovině, představované osou xz.65
- Obr. 51 Posuny a rotace zaznamenané v monitorovacím bodě posunů puklin D792. (A) Otevírání a zavírání pukliny, představované osou x; (B) Horizontální posuny, představované osou y; (C) Vertikální posuny představované osou z; (D) Rotace v horizontální rovině, představované osou xy; (E) Rotace ve vertikální rovině, představované osou xz.66
- Obr. 52 Posuny a rotace zaznamenané v monitorovacím bodě posunů puklin D881. (A) Otevírání a zavírání pukliny, představované osou x; (B) Horizontální posuny, představované osou y; (C) Vertikální posuny představované osou z; (D) Rotace v horizontální rovině, představované osou xy; (E) Rotace ve vertikální rovině, představované osou xz.66
- Obr. 53 Normalizované časové řady posunů a rotací zaznamenané na každém ze čtyř monitorovacích bodů: osa x představuje otevírání, či uzavírání; osa y představuje horizontální posuny; osa z představuje vertikální posuny; osa xy představuje úhlovou rotaci v horizontální rovině; a osa xz představuje úhlovou rotaci ve vertikální rovině. Je třeba zmínit, že pro získání matice bylo zapotřebí interpolovat veškerá chybějící data.70
- Obr. 54 Matice zobrazující sílu souvztažnosti mezi posunovými a rotačními osami na každém ze čtyř monitorovacích bodů: osa y představuje horizontální posuny; osa z představuje vertikální posuny; osa xy představuje úhlovou rotaci v horizontální rovině; a osa xz představuje úhlovou rotaci ve vertikální rovině. Je třeba zmínit, že pro získání matice bylo zapotřebí interpolovat veškerá chybějící data.....70
- Obr. 55 Rychlá Fourierova transformace rotačních časových řad získaných na každém ze čtyř monitorovacích bodů. K analýze jsme zvolili rotační osy, jelikož jsou citlivější na pohyb než osy

posunů. I přes tuto jejich citlivost však nebylo možné prokázat denní ani půldenní pravidelnost.	71
Obr. 56 Welchova metoda zjišťování výkonové spektrální hustoty na časových řadách rotačních os. K analýze jsme zvolili rotační osy, jelikož jsou citlivější na pohyb než osy posunů. I přes tuto jejich citlivost však nebylo možné prokázat denní ani půldenní signály.	72
Obr. 57 Přehled vektorů posunů puklin zavěšených bloků v monitorovacím bodě D235 (vlevo), D792 (uprostřed) a D881 (vpravo). Zlomové plochy jsou zobrazeny na spodní hemisféře každé stereografické projekce. Visící blok je umístěn ve spodní části u projekce k D235 a D881 napravo u bodu D791. U horizontálních os převažuje otevírání a uzavírání puklin v bodech D235 a D881, zatímco v bodě D792 vedla vstupní data vytvořená dalším výzkumem v oblasti k odchylkám v posunech. Použitá metoda je popsána v Blahůt et al. (2018).	72
Obr. 58 Seismický snímač s geofony SM6-HB(UB) 3K5 na měřicím stanovišti ve štole.....	73
Obr. 59 Seismický A/D převodník EE&S s dynamikou 32 bitů.	76
Obr. 60 Záznamový počítač EE&S pro seismometr.	77
Obr. 61 Seismogram důlního otřesu u Lubinu 31.5.2017 20:25:45 UTC ML4,1	81
Obr. 62 Seismogram důlního otřesu u Lubinu 21.4.2018 01:08:11 UTC ML1,2	82
Obr. 63 Schéma zapojení měřicí sestavy u vrtu ve vzdálenosti 250 m od vstupu do tunelu .	84
Obr. 64 Schéma instalace teplotního řetězce ve vrtu uvnitř bedřichovského tunelu, ve výřezu detail prstence vyrobeného ze slitiny hořčíku (elektron).....	84
Obr. 65 instalace teplotního řetězce v jednom z horizontálních vrtů	85
Obr. 66 Fotografie umístění měřicí aparatury na metrůži 1700 m od vstupu do tunelu	85
Obr. 67 Zákres umístění měřicích stanic na povrchu v linii tunelu	86
Obr. 68 Rozložení teplotních čidel v nádrži Josefův Důl	87
Obr. 69 Kontrola aparatury uvnitř bedřichovského tunelu.	88
Obr. 70 Vyjímání teplotního řetězce z vrtu, ve výřezu pohled na zoxidovaný kovový prsteneček	88
Obr. 71 Graf průběhu teplot ve vrtu na metrůži 250 m od vstupu do tunelu.	89
Obr. 72 Graf změn hloubky odběru vody z přehradní nádrže.....	90
Obr. 73 Graf průběhu teplot ve vrtu na metrůži 880 m od vstupu do tunelu.	91
Obr. 74 Graf průběhu teplot ve vrtu na metrůži 1700 m od vstupu do tunelu.	91
Obr. 75 Roční průměrné teploty v roce 2017 v jednotlivých sledovaných vrtech.....	92
Obr. 76 Graf průběhu teploty v hloubce 160 cm v jednotlivých sledovaných vrtech	93
Obr. 77 Graf průběhu teploty vzduchu na jednotlivých stanovištích	93
Obr. 78 Průměrné roční teploty v půdě a ve vzduchu a roční maxima a minima teploty v půdě na louce (a) a v lese (b).....	95
Obr. 79 Průměrné roční teploty v půdě a ve vzduchu na louce (a) a v lese (b).	97
Obr. 80 Hloubkové profily průměrných ročních teplot v půdě (20 cm - 1 m) a roční teploty vzduchu (2 m) na louce (a) a v lese (b) v jednotlivých letech období 2013-2017.	98

Obr. 81 Průběh naměřených teplot v přehradní nádrži Josefův Důl. Čidlo na dně v hloubce 26 m.....	100
Obr. 82 Průměrné roční teploty v přehradní nádrži Josefův Důl a jejich porovnání s ročními průměry vzduchu na louce. V období 2012 – 2014 se jedná o 12měsíční průměry v intervalech 27.7.2012 - 26.7.2013 a 8.7.2013 - 7.7.2014.....	101
Obr. 83 Pohled na měřicí panel aparatury ARES II včetně výčtu základních technických parametrů.....	104
Obr. 84 Seismická aparatura Terraloc Mk-6 při měření ve štole Bedřichov.....	105
Obr. 85 Seismické geofony - jedna z variant jejich umístění na stěně štoly	105
Obr. 86 Odporové řezy z let 2015, 2016 a 2017 z profilu P3	107
Obr. 87 Odporové řezy z let 2015, 2016 a 2017. Profil 0.	108
Obr. 88: Porovnání hodochron (čas příchodu vlny versus poloha geofonu). Profil P3, typ vlny S.	111
Obr. 89 Porovnání hodochron (čas příchodu vlny versus poloha geofonu). Profil P3, typ vlny P.	112
Obr. 90 Porovnání hodochron (čas příchodu vlny versus poloha geofonu). Profil P0, typ vlny S.	113
Obr. 91 Porovnání hodochron (čas příchodu vlny versus poloha geofonu). Profil P0, typ vlny P.	114
Obr. 92 Přehled vybraných seismických záznamů z profilu P3 z roků 2015, 2016, 2017	115
Obr. 93 Porovnání disperzních křivek (fázová rychlost/frekvence). Rok 2015 až 2017. Seismický zdroj umístěn na profilu P3, staničení 0,25.	116
Obr. 94 Isolinie elastických rychlosti P vln v Schmidově stereografické projekci do spodní polokoule; vzorek LIB11	120
Obr. 95 Průběh koeficientu anizotropie a minimální, střední a maximální rychlosti s působícím všesměrným tlakem; nahoře vzorek LIB7, dole vzorek LIB11	121
Obr. 96 Fotografie komory pro měření hydraulické vodivosti (nahore) a permeometru Quizix 5000 (dole).	123
Obr. 97 Křivky osychání 1cm vzorků z vrtané části tunelu	126
Obr. 98 Křivky osychání 1cm vzorků ze střílené části tunelu	126
Obr. 99 Stanovené hodnoty porozity studovaných vzorků - mezilaboratorní srovnání, vliv měřítka a metodik.....	127
Obr. 100 Srovnání efektivních difúzních koeficientů HTO a koeficientů hydraulické vodivosti	130
Obr. 101 Tři testované případy profilů porozity pro 1cm vzorky z vrtané a střílené části tunelu s průměrnou porozitou odpovídající hodnotě stanovené dle vztahu (7.2)	131
Obr. 102 Vývoj rezistivit vzorků v průběhu EM experimentu po injekci jodidu do zdrojového rezervoáru	134
Obr. 103 Vývoj rezistivit vzorků v průběhu EM experimentu po injekci jodidu do zdrojového rezervoáru	135

Obr. 104 Získané efektivní difúzní koeficienty jodidu (A) v prostředí 0,1 mol/l NaCl (B) v prostředí podzemní vody z tunelu Bedřichov	136
Obr. 105 Porovnání difúzních koeficientů tritia a jodidu (z dvou různých metod), vynesena v závislosti na poloze vzorků žuly v tunelu.....	136
Obr. 106 Vrtná jádra, nahoře z metráže 1250 (střílená část), dole jádro z metráže 607 (vrtaná část)	137
Obr. 107 Ultrazvukové prozařování horninových vzorků, vlevo: pulzní zdroj, osciloskop a zesilovač; vpravo: testovaný vzorek osazený mezi ultrazvukovými snímači	137
Obr. 108 Ultrazvukové prozařování horninových vrtných jader ilustrující hloubkový dosah EDZ způsobený dvěma typy ražeb	138

Seznam tabulek:

Tab. 1 Rozložení průsaků v úsecích štoly při jednotlivých experimentech směšovací metody.	29
Tab. 2 Střední doba zdržení podzemní vody pro vzorkované přítoky hodnoty uváděny v letech.	30
Tab. 3 Střední doba zdržení podzemní vody pro vybrané modelované vývěry v měsících. ...	36
Tab. 4 Výsledky terénních měření chemicko-fyzikálních vlastností podzemních vod, v tabulce jsou zahrnuty přítoky měřené v obou etapách 2015 a 2017.....	39
Tab. 5 Statistické zhodnocení variability vybraných složek a parametrů podzemní vody, přítok V05.....	49
Tab. 6 Statistické zhodnocení variability vybraných složek a parametrů podzemní vody, přítok W1565.....	49
Tab. 7 Statistické zhodnocení variability vybraných složek a parametrů podzemní vody, přítok W2210.....	49
Tab. 8 Výsledky kalibrace modelu vývěrů V7, V1, V6 a V5 v softwaru FLOWPC.....	52
Tab. 9 Výsledky kalibrace modelu vývěrů V7 (W76), V6 (W142), V1 (W125) a V5 (W226) v softwaru FLOW123d.....	54
Tab. 10 Průměrné roční teploty vzduchu (2 m nad zemí) a půdy (v hloubkách 20 cm, 50 cm a 100 cm) na lučním (750 m n.m.) a lesním (700 m n.m.) stanovišti nad bedřichovským tunelem.	94
Tab. 11 Průměrné roční teploty v přehradní nádrži Josefův Důl. V období 2012 – 2014 se jedná o 12měsíční průměry v intervalech 27.7.2012 - 26.7.2013 a 8.7.2013 - 7.7.2014.	99
Tab. 12 Seznam všech vzorků libereckého granitu ze dvou kampaní odběrů pracovníky GLÚ AV ČR, značení vzorků a provedená stanovení (k_{f10} hydraulická vodivost, ϵ porozita, UZ ultrazvuk, EM elektromigrace, TD průniková difúze).....	119
Tab. 13 Maximální, průměrná a minimální rychlost při tlaku 0 MPa a 300 MPa spolu s parametry ΔV_{mean} a Δk pro jednotlivé měřené vzorky, doplněno o vzorky LIB1-LIB6 z projektu FR-TI1/362	122
Tab. 14 Souhrn hodnot koeficientů filtrace spolu s experimentálními podmínkami. LIB3*, LIB6* představují opakovaná měření v roce 2017	124

Tab. 15 Stanovené hodnoty porozity na 5cm vzorcích dle vztahu (7.2)	125
Tab. 16 Výsledky HTO difúzních experimentů na vzorcích z vrtané části tunelu Bedřichov	128
Tab. 17 Výsledky HTO difúzních experimentů na vzorcích ze střílené části tunelu Bedřichov	129
Tab. 18 Výsledky testování HTO difúzních experimentů na vzorcích 1115 a 1615 z tunelu Bedřichov	131
Tab. 19 Výsledné hodnoty efektivního difúzního koeficientu $D_e \cdot 10^{13}$ ($m^2 \cdot s^{-1}$) získané za rozdílných elektrických gradientů a technik detekce jodidu (ISE jodidová selektivní elektroda, UV spektrofotometrie)	133
Tab. 20 Výsledné hodnoty efektivního difúzního koeficientu $D_e \cdot 10^{12}$ ($m^2 \cdot s^{-1}$) získané EM experimenty v 0,1 mol/l NaCl na 1cm vzorcích	134
Tab. 21 Výsledné hodnoty efektivního difúzního koeficientu $D_e \cdot 10^{13}$ ($m^2 \cdot s^{-1}$) získané EM experimenty v podzemní vodě z tunelu Bedřichov na 1cm vzorcích	135
Tab. 22 Výsledné hodnoty efektivního difúzního koeficientu $D_e \cdot 10^{13}$ ($m^2 \cdot s^{-1}$) získané za rozdílných salinit pomocí průnikové difúzní metody	135
Tab. 23 Vyhodnocené rychlosti seismických vln a dynamických elastických konstant	139

Seznam textových příloh:

Příloha č. 1 – Tabulka s aktuálním přehledem kontinuálně měřených fyzikálních veličin, způsob a frekvence měření a odběrů vzorků na jednotlivých pramenech či místech ve sběrných kanálech.

Příloha č. 2 – Schematický řez štolou s rozmístěním měřících stanovišť.

Příloha č. 3 – Seznam předávaných datových souborů.

Seznam příloh – metodik:

Příloha č. 4 METODICKÉ POZNATKY Z MONITORINGU CHEMICKÉHO SLOŽENÍ PODZEMNÍCH VOD V PODZEMNÍCH DÍLECH (Lenka Rukavičková, Jaroslav Řihošek a kolektiv)

Příloha č. 5 MĚŘENÍ VYDATNOSTI PRŮSAKŮ DO PODZEMNÍHO DÍLA – METODICKÉ POZNATKY Z APLIKACE (Petr Rálek, Milan Hokr Lenka Rukavičková, Jan Holeček)

Příloha č. 6 METODICKÉ POZNATKY Z MONITORINGU POSUNŮ PUKLIN (Matthew Rowberry, Xavi Marti)

Příloha č. 7 METODICKÉ POZNATKY ZE SEISMICKÉHO MONITORINGU (Jiří Málek, Libor Žanda)

Příloha č. 8 METODICKÉ POZNATKY Z MONITORINGU TEPLIT (Petr Dědeček, Jan Šafanda)

Příloha č. 9 METODIKA GEOFYZIKÁLNÍHO MONITOROVÁNÍ GRANITOVÉHO MASIVU V SYSTÉMU ČTVRTLETNÍCH AŽ ROČNÍCH ČASOVÝCH INTERVALŮ (Jaroslav Bárta a kolektiv)

Seznam elektronických příloh:

Datové soubory s krycími listy databáze SÚRAO (seznam jako Příloha č.3)

Seznam použitých zkratk:

ADAM	Automatic Data Acquisition Modules
ADC	Analogově-digitální převodník
BDZ	Boundary disturbed zone
CFC	Chloro-fluoro-carbons (freony)
CPU	Centrální procesorová jednotka
ČVUT	České vysoké učení technické
DTS	Distributed Temperature Sensing
EDZ	Excavation disturbed zone
EM	Elektromigrace
EMS	Environmental Monitoring Stations
GMWL	Global meteoric water line
GNIP	Global Network of Isotopes in Precipitation
IAEA	International Atomic Energy Agency
MPO	Ministerstvo průmyslu a obchodu
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
NRTM	Nová rakouská tunelovací metoda
NSE	Nash–Sutcliffe model efficiency coefficient
PVP	Podzemní výzkumné pracoviště
SČVK	Severočeské vodovody a kanalizace a.s.
TBM	Tunnel boring machine (vrtací stroj)
TD	Through-diffusion (průnikový difúzní experiment)
TDS	Total dissolved solids (celkové rozpuštěné látky)
TT	Transit time (Doba zdržení)
UZ	Ultrazvuk

Abstrakt

Zpráva shrnuje řešení dílčího projektu zaměřeného na monitoring ve vodárenském přivaděči Bedřichov za účelem vývoje a ověření metodik charakterizace horninového prostředí in-situ. Výstupem projektu jsou kromě závěrečné zprávy samostatné dokumenty metodik, na které se zpráva odkazuje a v jednotlivých kapitolách jsou shrnuty. Zpráva se skládá z kapitol dle jednotlivých odborností resp. měřených jevů – vydatnosti vývěrů vody, přirozené stopovače, chemismus vody, posuny puklin, seismicity, teploty horniny a geofyzika. V samostatné kapitole jsou zpracovány laboratorní analýzy a experimenty s horninovými vzorky odebranými v tunelu: propustnost, pórovitost, distribuce rychlosti seismických vln a difúzní koeficienty, rozlišené pro různé stopovače a porovnané mezi difúzním průnikem a elektromigrací. Ve zprávě jsou prezentovány výsledky měření, jejich vyhodnocení a možnosti využití pro hodnocení bezpečnosti hlubinného úložiště.

Klíčová slova

Charakterizace lokality, monitoring, podzemní voda, geofyzika, seismicity, pukliny, migrace, metodika

Abstract

The report summarizes the solution of the project focused on monitoring in the Bedřichov water supply tunnel for sake of the development and verification of in-situ rock characterization methods. Outputs of the project are, apart from this final report, separate documents of the methodologies to which the report refers and which are summarized in the individual report chapters. The report consists of chapters according to individual specializations or measured phenomena - water inflow rates, natural tracers, water chemistry, fracture displacements, seismicity, rock temperature and geophysics. Laboratory analyzes and experiments with rock samples taken in the tunnel are processed in a separate chapter: permeability, porosity, velocity distribution of seismic waves, and the diffusion coefficients compared for different tracers and between through-diffusion and electromigration. The report presents the results of the measurements, their evaluation and the possibilities for their use in the safety assessment of the deep repository.

Keywords

Site characterisation, monitoring, groundwater, geophysics, seismicity, fractures, migration, methodology


1 Úvod

Tato zpráva byla zpracována v rámci projektu SÚRAO „Výzkumná podpora bezpečnostního hodnocení hlubinného úložiště“, který je součástí přípravy hlubinného úložiště radioaktivních odpadů (dále jen HÚ). Cílem projektu je získat vybraná data, modely, argumenty a další informace potřebné pro zhodnocení potenciálních lokalit pro umístění HÚ z hlediska dlouhodobé bezpečnosti. Na základě veřejného zadávacího řízení byla v červenci 2014 uzavřena čtyřletá smlouva s ÚJV Řež, a. s. a jeho subdodavateli: Českou geologickou službou; ČVUT v Praze; Technickou univerzitou v Liberci; Ústavem Geoniky AV ČR, v.v.i.; a společnostmi SG Geotechnika a.s.; Progeo, s.r.o.; Chemcomex, a.s. a Centrum výzkumu Řež s.r.o. o poskytování výzkumné podpory hodnocení dlouhodobé bezpečnosti v následujících oblastech:

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

Cílem tohoto dílčího projektu „*Vývoj a ověřování metodik pro charakterizaci horninového prostředí*“ je vývoj metodik pro hodnocení a monitoring horninového prostředí, které je třeba ověřit ještě před jejich rutinním použitím pro charakterizaci horninového prostředí kandidátních lokalit. Jde především o metodiky pokrývající geofyzikální měření, hydrogeologické měření, měření chemického složení vody, měření posunů horninových masivů, seismická měření či měření transportních vlastností. Tyto práce již byly zahájeny v rámci prací prováděných na lokalitě vodárenského přivaděče Bedřichov (Hokr a kol 2014). Tento dílčí projekt má navázat na tyto práce zejména se zaměřením na:

- Provoz a údržba stávajících měřících prvků a průběžné vyhodnocení dat z provedených měření.
- Doplnění vyvinutých měřících zařízení na další místa dle potřeby.
- Doplnění dalších měřících zařízení pro potřebu komplexnějšího pokrytí sledovaných jevů relevantních pro hodnocení bezpečnosti.
- Měření ve výše uvedených případech sestávajících z online automatického sběru do databáze, periodického stahování dat z lokálních záznamníků (místa bez infrastruktury, nebo nepřipojitelné přístroje) a ručního periodického kontrolního měření a vzorkování.
- Analýzy vzorků (horniny) pro určení vlastností přímo souvisejících se sledovanými jevy a veličinami in-situ relevantními pro hodnocení bezpečnosti.
- Geofyzikální měření (periodické manuální a v pozdější fázi použití zařízení pro automatický záznam profilů).

 SÚRAO	Vývoj a ověřování metodik pro charakterizaci horninového prostředí – výsledky monitoringu v přivaděči Bedřichov	Evidenční označení:
		SÚRAO TZ 289/2018

Metodiky mají být připraveny tak, aby byly rutinně využitelné pro podrobnou charakterizaci kandidátních lokalit pro hlubinné úložiště.

Cílem této zprávy je popsat a vyhodnotit výsledky měření za celé období řešení projektu, případně v kontextu předchozí řady dat. Vyhodnocení zahrnuje jednak jevy jako takové, jednak projev vlastností horniny relevantních pro bezpečnost hlubinného úložiště. Metodické postupy, které byly v hrubé podobě představeny v první průběžné zprávě, jsou samostatným výstupem projektu. Ve zprávě jsou v příslušných kapitolách (struktura v následujícím odstavci) v kontextu výsledků měření shrnuty hlavní rysy metodik a na úplný popis se odkazuje právě do samostatně zpracovaných příloh. V Příloze 3 je pak uveden seznam předávaných dat získaných ze všech měření.

Členění zprávy do kapitol je podle tematických oblastí a v rámci každé je členění druhé úrovně (přístroje + monitoring + vyhodnocení), odpovídající etapám 3-5 v prvním období a 8 a 9 v druhém období, v případě kapitol s rozsáhlejším měřením různého typu rozlišuje pak členění druhé úrovně i tyto případy.

Individuální strukturu má kapitola 7, zaměřená na laboratorní experimenty na vzorcích a vyhodnocení vztahu různých parametrů, s výsledky Etap 6 a 7, dle jednotlivých typů měření.

Popisované práce a výsledky navazují na předchozí dlouhodobý výzkum na lokalitě, prováděný v rámci několika projektů zadaných SÚRAO i státních programů pro podporu vědy a výzkumu (MPO TIP, Hokr et al. 2013). Zaměření projektů se postupně vyvíjelo od prvního geologického mapování, přes multidisciplinární geovědní témata, vývoj měřicích prvků a budování infrastruktury pro přenos dat, po současný provoz monitoringu v podobě blízké použití v podzemní laboratoři nebo testovací lokalitě (Klomínský et al, 2003, Klomínský et al, 2008, Hokr et al, 2010, Hokr et al, 2014).

Studovaná lokalita nespadá do oblasti uvažované jako kandidátní pro HÚ, ale díky přístupu do hloubky přes 100 m v obdobném geologickém prostředí uvažovaného HÚ poskytuje unikátní podmínky pozorování relevantních fyzikálních vlastností a procesů a umožňuje ověření metodik měření použitelných na jiných lokalitách.

Terénní práce jsou prováděny v prostorách provozovaných Severočeskými vodovody a kanalizacemi a.s. (SČVK), vedení pracoviště Úpravny vody Bedřichov je dlouhodobě vstřícné k provádění výzkumných a monitorovacích prací v tunelu a okolí. Tyto práce nesmějí nijak narušit nebo omezit provoz zařízení pro vodárenské účely, což může omezovat volbu některých invazivních metod nebo aplikací rozměrnějších přístrojů.

Tunel propojuje vodní nádrž Josefův důl s úpravnou vody v Bedřichově, v délce cca 2600 m, s výškovým rozdílem 40 m. Tunelem prochází potrubí pro přívod surové vody z nádrže do úpravy. Detailní popis geologie lokality je proveden ve zprávách Klomínského et al. (2003, 2008).

2 Monitoring režimu toku a chemismu podzemních vod

Autoři: L. Rukavičková, P. Rálek, M. Hokr, A. Balvín, J. Holeček

2.1 Rozmístění a metodika měření

Monitoring průsaků podzemních vod do štoly vychází z volby pozorovacích míst v pracích Klomínského et al. (2008) (označení V1-V8), která byly dále doplněna a nová označována kódem Wxxx, s použitím číselné hodnoty metráže (tabulka jako Příloha 1). Měření probíhá na dvou typech stanovišť:

1. **Vývěry** ze stěn či stropu štoly. Podle vydatnosti rozlišujeme
 - kapající vývěry (V1/2/3),
 - tekoucí vývěry (V4-2/5/6/7, W142/930/1565/2210/2313/2470/2500).
 Vývěry lze rozdělit také podle variability jejich vydatnosti:
 - vývěry v hluboké části masivu s malou variabilitou (V2/3/4, W930/1565),
 - vývěry v mělké části s velkou variabilitou (V1/6/7).
 - vývěry na rozhraní hluboké a mělké části se střední variabilitou (V5, W2210/2313).
2. **Sběrný kanál** v počvě štoly zachycuje veškeré průsaky do štoly. Rozdílem hodnot průtoku ze dvou míst v kanále lze dostat celkový průsak do štoly v daném úseku.

Seznam měřících stanovišť, jejich stručná charakteristika a přehled použitých měřících a záznamových metod (vč. použitých přístrojů) na jednotlivých stanovištích jsou uvedeny v tabulce a plánu v Příloze 1 a 2. Základní přehled polohy sledovaných vývěrů poskytuje Obr. 1.

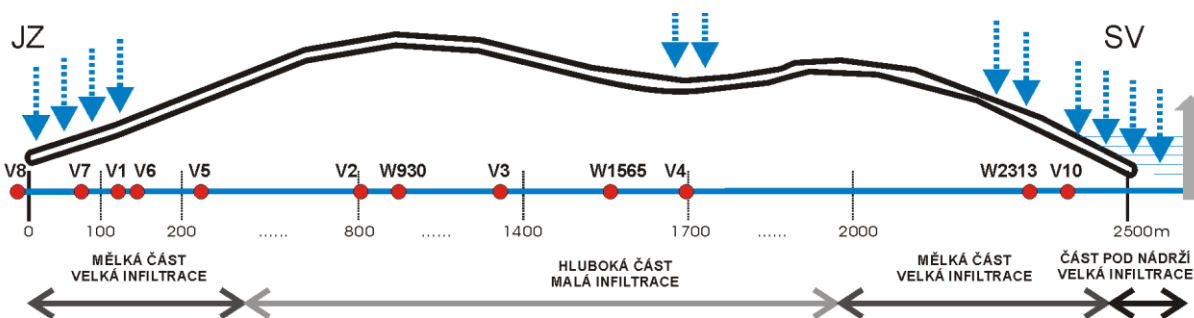
Měření vydatnosti průsaků (jednotlivých vývěrů) probíhá pomocí tří metod (detailně je popsáno v Příloze 5 v podobě metodiky):

1. **Překlopné člunky.** Naplněním člunku o známém objemu a jeho překlopením se indukuje signál. Zaznamenává se a) každé sklopení člunku (V2) nebo b) počet sklopení za určený čas (V1/3/6).
2. **Danaidy** (odměrné nádoby s jedním či více výtakovými otvory). Zaznamenává se výška hladiny v nádobě pomocí tlakové sondy relativního tlaku (V5/6/7) nebo absolutního s barometrickou kompenzací (V4-2, W2313).
3. **Měrný válec** (W930). Zaznamenává se narůstající výška hladiny tlakovou sondou s kompenzací, po naplnění válce je tento vypuštěn.

Měření průtoku ve sběrném kanále (tj. úhrnného průsaku do tunelu) probíhá pomocí:

1. **měrných clon** (W104, H249, H1995, V10),
2. **měrných žlabů** (V8),
3. **jednorázově směšovací metodou** (v celém kanále naráz, ale nelze použít k nepřetržitému monitoringu).

Z výšky hladiny v kanále nad měrným profilem se vypočítá průtok.



Obr. 1 Základní schéma bedřichovské štoly s pozicemi vývěřů a znázorněním nadloží.

Hladina v kanále se měří pomocí:

1. tlakové sondy s kompenzací atmosférického tlaku (V10, H1995, W2313) nebo na základě relativního tlaku (W104, H249),
2. zatížení struny částečně ponořeným závažím (W104) nebo
3. ultrazvukovým snímačem hladiny (V8).

Konkrétní použité přístroje byly popsány v úvodní zprávě (Hokr et al 2015) včetně zkušeností s použitými metodami v předchozím období. Detailní popis principů, způsobu použití a zhodnocení zkušeností s aplikací je předmětem samostatného výstupu projektu, tzv. „metodiky“ – Příloha 5. Použitelnost lze shrnout následovně i s uvážením provozu za aktuální období:

Sklopné člunky – osvědčené a vhodné pro kapající vývěry. U tekoucích vývěřů jsou jejich možnosti omezené: při menším objemu sklopného člunku (vůči vydatnosti měřeného průtoku) dochází k opotřebení mechanismu člunku; větší objem použitého sklopného člunku zase není citlivý na změny průtoku.

Danaidy – osvědčily se pro velký rozsah vydatností tekoucích vývěřů, při vhodně zvolené velikosti otvoru a pracovní výšce hladiny jsou citlivé na změny průtoku.

Měrný válec – vhodný pro tekoucí či kapající vývěry se stabilním průtokem. Citlivost na změny průtoku závisí na frekvenci záznamu dat. Pro dlouhodobé trendy vydatností stabilních vývěřů postačují i jen záznamy časů naplnění válce.

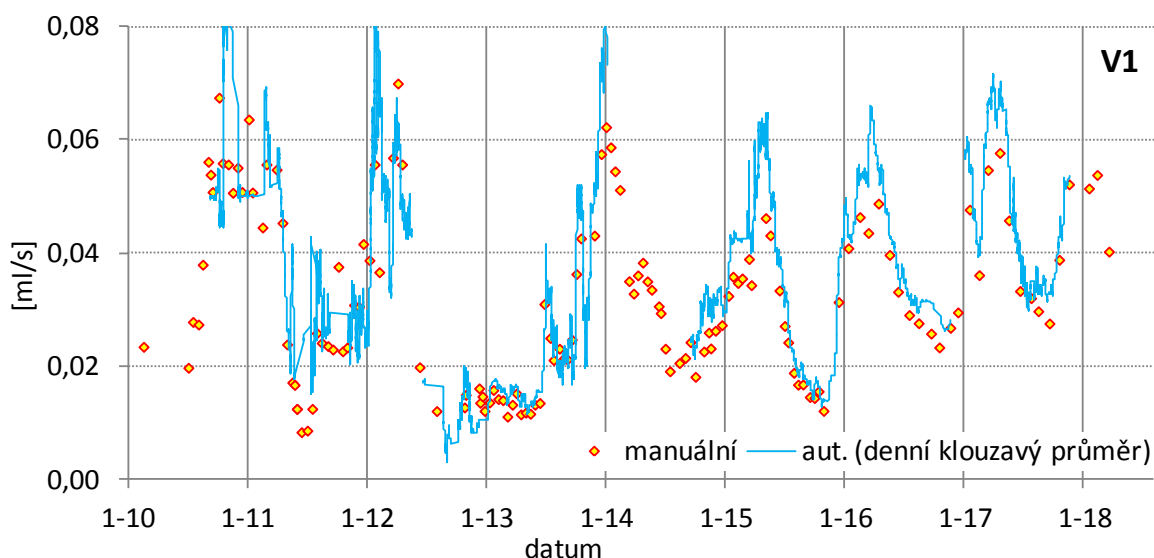
Měrné profily – použitý profil clony není příliš citlivý na změny průtoku a i malá změna výšky hladiny (byť jen čeřením) vnáší do dat fluktuace. Samotné měření sondami může být ovlivněno postupným zanášením kanálových šachet usazeninami a také občasným pohybem těla sondy. Sondy Levelogger vykazují delší životnost než sondy BD-Sensor (na H249 došlo k nahrazení nefunkční sondy cca po 3 letech).

2.2 Monitoring vydatnosti průsaků

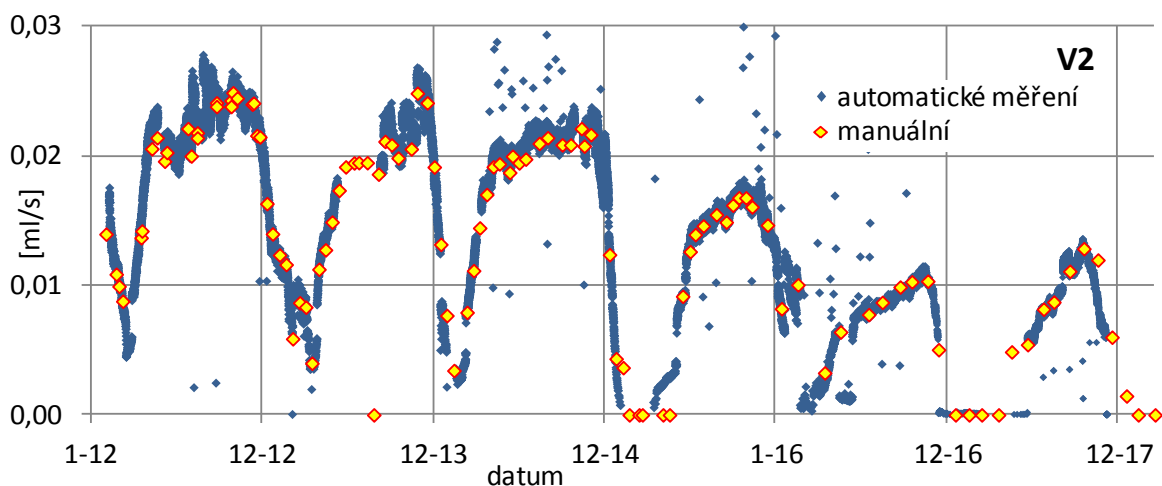
Na jednotlivých vývěrech pokračovalo stávající měření vydatností průsaku. Prezentované grafy a popis jsou členěny do sekcí podle charakteru sledovaných vývěrů (kapající, tekoucí stabilní/variabilní, sběrný kanál). Dalšímu vyhodnocení výsledků měření v souvislostech se věnuje kapitola 2.7. Data jsou pro přehlednost prezentována buď ve formě klouzavých průměrů (bleděmodré čáry) nebo jako zředěný výběr (obvykle hodinový) měřených dat tam, kde charakter a fluktuační dat neovlivňují přehlednost grafu.

2.2.1 Kapající vývěry

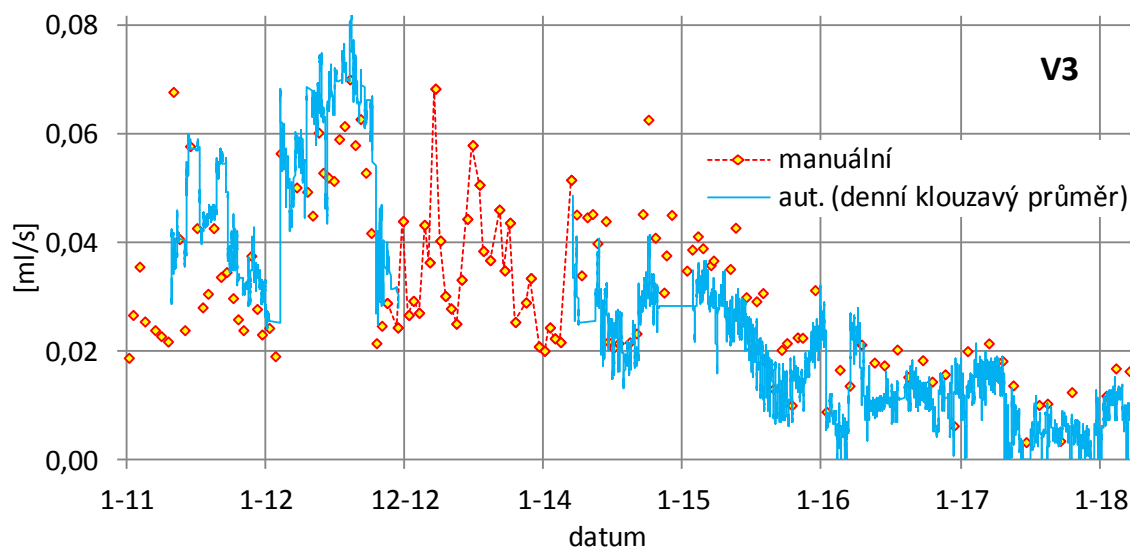
U vývěrů V1 (125 m), V2 (798 m) a V3 (1375 m) zachycuje nerezový žlábek vodu z pukliny na stěně tunelu a z jeho okraje stéká v jednotlivých kapkách. Časové řady vydatností jsou znázorněny na Obr. 2, Obr. 3 a Obr. 4. U vývěru V1 (nacházejícího se v mělké části štoly) dochází ke kombinaci sezónních cyklů s krátkodobými odezvami na vyšší infiltrace na povrchu (viz též grafy v kapitole 2.7). Tyto odezvy nejsou tak markantní a časté jako u vývěru V7. Patrný je postupný pokles maxim i minim sezónních cyklů vydatností u sledovaných vývěrů z hluboké části štoly V2 a V3, který lze přičíst dlouhodobému efektu suššího období minulých let (2014, 2015). Sezónní cykly V2 patrně souvisí s odparem vody z povrchu tunelu v zimním období.



Obr. 2 Průběh vydatnosti vývěru V1 (srovnání automatického a ručního měření).



Obr. 3 Průběh vydatnosti vývěru V2 (srovnání automatického a ručního měření).



Obr. 4 Průběh vydatnosti vývěru V3 (srovnání automatického a ručního měření).

2.2.2 Tekoucí vývěry se stabilním průtokem

Jedná se převážně o vodu zachycenou hadicí skrz betonový nástřik na stěně tunelu. Časové řady měření vývěrů V4-2 (1728 m), V5 (226 m) a W2313 jsou znázorněny na Obr. 5, Obr. 6 a Obr. 7. U vývěru V4-2 je patrný mírný pokles vydatnosti od roku 2014. Dle ručního měření je pak tento pokles ještě markantnější. Zvětšující se rozpor mezi automatickým a ručním měřením nebyl uspokojivě vysvětlen. Vývěr V4-2 totiž vykazuje velkou fluktuaci vydatnosti až $\pm 1 \text{ ml} \cdot \text{s}^{-1}$ v intervalech desítek vteřin (viz ukázka „mraku“ nezhlazených dat v grafu na Obr. 5), a dokud ruční měření ležela v pozorovaném rozsahu vydatností, nebudil daný rozpor podezření, tedy ani potřebu podrobnějšího zkoumání.

Vydatnost vývěru W2313 je ovlivněna primárně blízkou vodní nádrží (viz Obr. 46) v kombinaci s krátkodobými odezvami na srážky (podrobněji v kapitole 2.7).

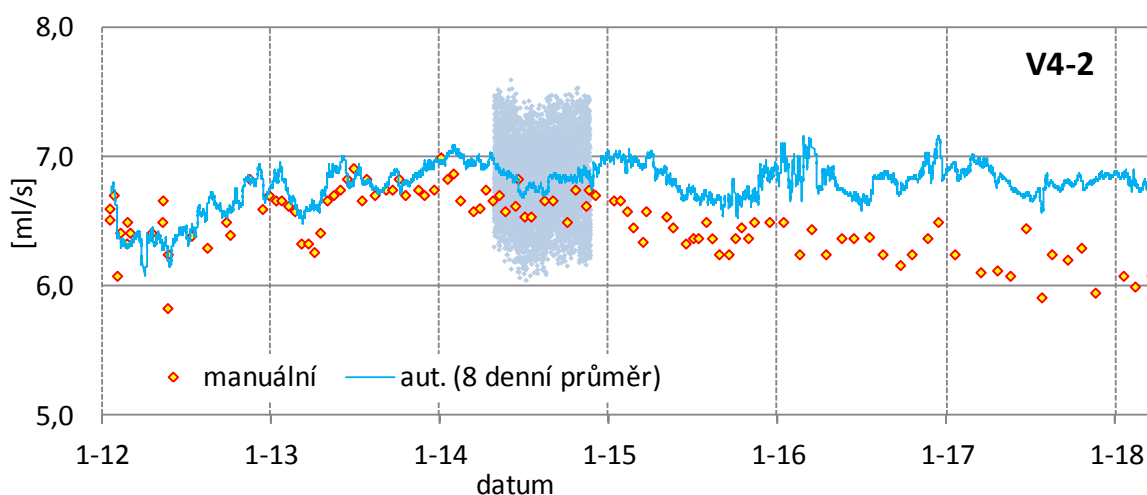
Bod V5 je voda slabě tryskající v souvislém proudu z malé pukliny ve stěně. Automatické měření V5 bylo ovlivněno zejména poruchami funkce sklopného člunku, které se promítly do chybějících či nekonzistentních dat (viz Obr. 7). Opotřebením mechanismu ovlivnilo jak

sklápění člunku, tak pozici magnetu indukujícího elektrické pulsy. Skokový nárůst ve vydatnostech od dubna 2015 do listopadu 2016 zatím nebyl vysvětlen. Od konce roku 2016 byl sklopný člunek nahrazen danaidou; od té doby jsou již k dispozici konzistentní data, umožňující například i hodnocení odezvy V5 na srážkové události (viz 2.7).

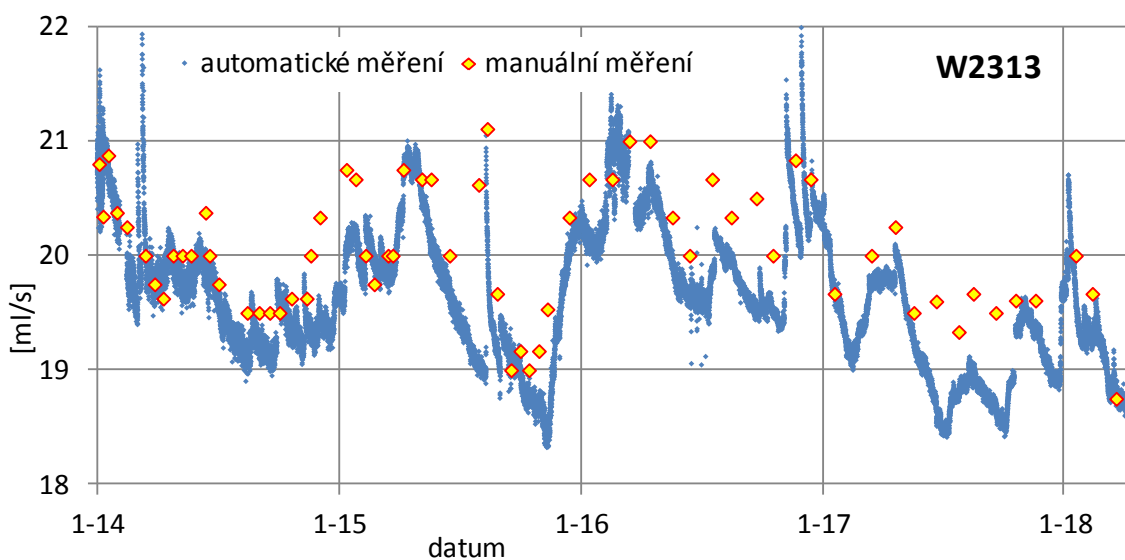
Na pozici W930 je plachtou zachytáván odkap ze stropu tunelu v ploše cca 1 m². Výsledky monitoringu vydatnosti přítoku W930 jsou grafickou formou prezentovány na Obr. 8 a Obr. 9. Zpracování dat různými způsoby prezentovanými v grafech přináší srovnatelné výsledky. Průměrování jednotlivých odečtů pro vhodně zvolené intervaly umožňuje odfiltrvat drobné šумы způsobené zejména nepravidelným stokem kapek ze sběrné plachty.

W930 je průsak se stabilní vydatností, bez přímé vazby na srážky. Průměrná vydatnost v období od června 2015 do března 2017 byla 0,39 ml.s⁻¹, poté došlo k jednorázovému poklesu vydatnosti na průměrnou hodnotu 0,36 ml.s⁻¹ (březen až listopad 2017). Tento pokles mohl být způsoben zatěsněním některé z puklin sekundárními minerály (posun výplně pukliny). V obou uvedených časových intervalech nepřesahují odchylky průměrných denních vydatností od celkového průměru 5 %. V rámci těchto poměrně stabilních úseků lze vysledovat slabé celkové trendy nárůstu vydatnosti v červnu 2015, 2016 i 2017 a nástup poklesů naopak v lednu až v únoru. Jsou-li červnová zvýšení vydatnosti přítoku W930 způsobená tlakovou odezvou na vyšší vodní stavy (hladiny podzemní vody) v jarních měsících by mohl prokázat dlouhodobější monitoring v následujících letech.

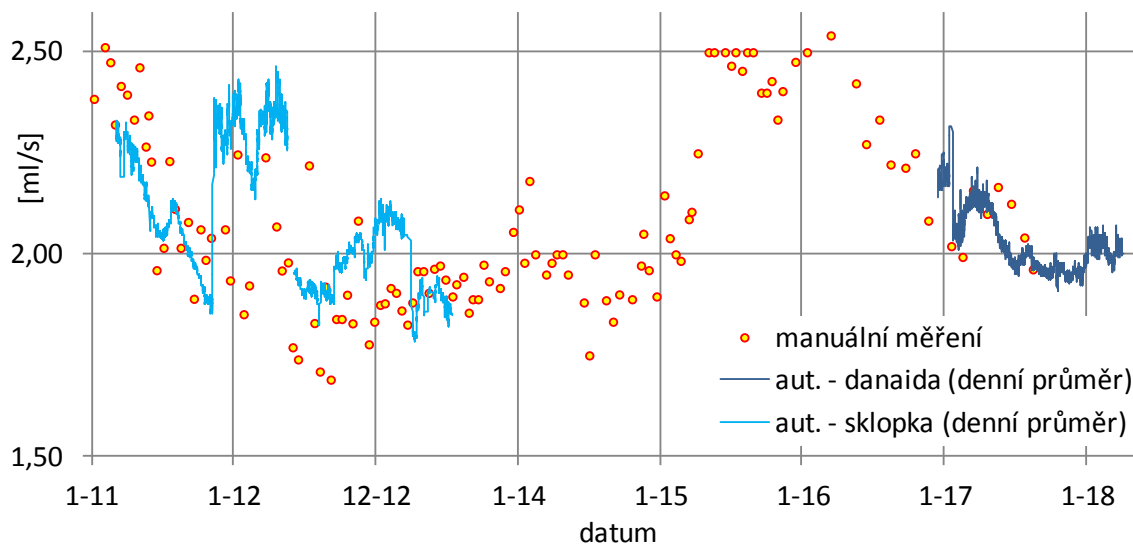
V listopadu 2017 začala vydatnost přítoku výrazně klesat. Obdobný pokles byl zaznamenán také u průsaku W2210 (Obr. 31). Trend poklesu vydatnosti u dvou stabilních průsaků je pravděpodobně reakcí na dlouhotrvající sucho. Velmi nízké srážkové úhrny byly v oblasti zejména v letech 2014 a 2015, kdy spadlo 65 až 75 % běžného ročního srážkového úhrnu.



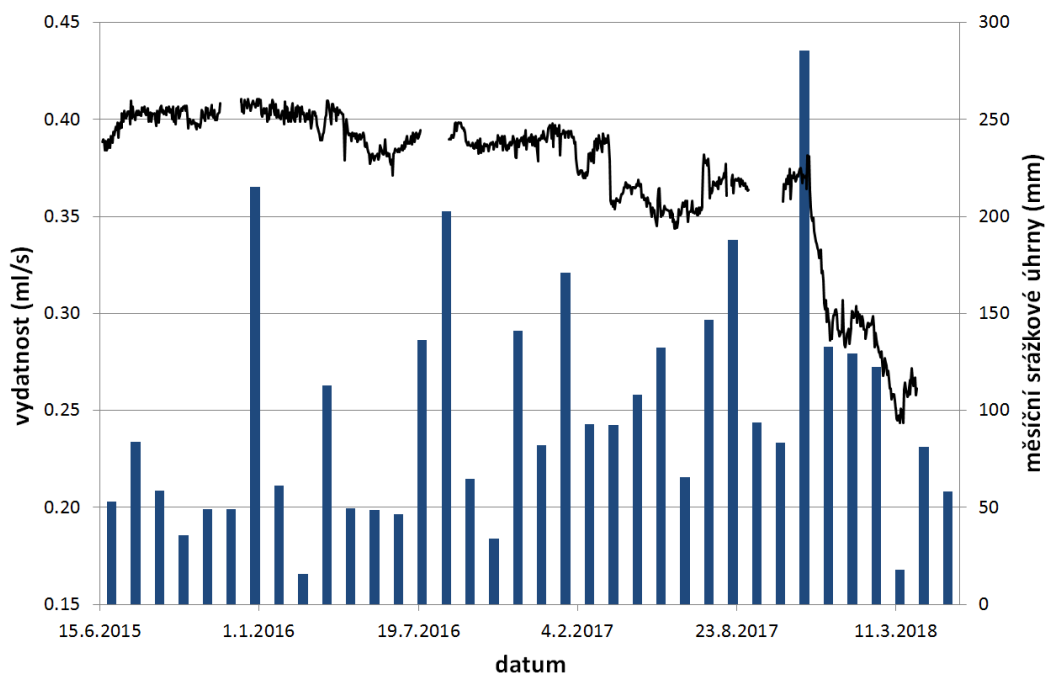
Obr. 5 Průběh vydatnosti vývěru V4-2 (srovnání automatického a ručního měření). V roce 2014 je zobrazen „mrak“ surových dat vydatností s velkým rozptylem.



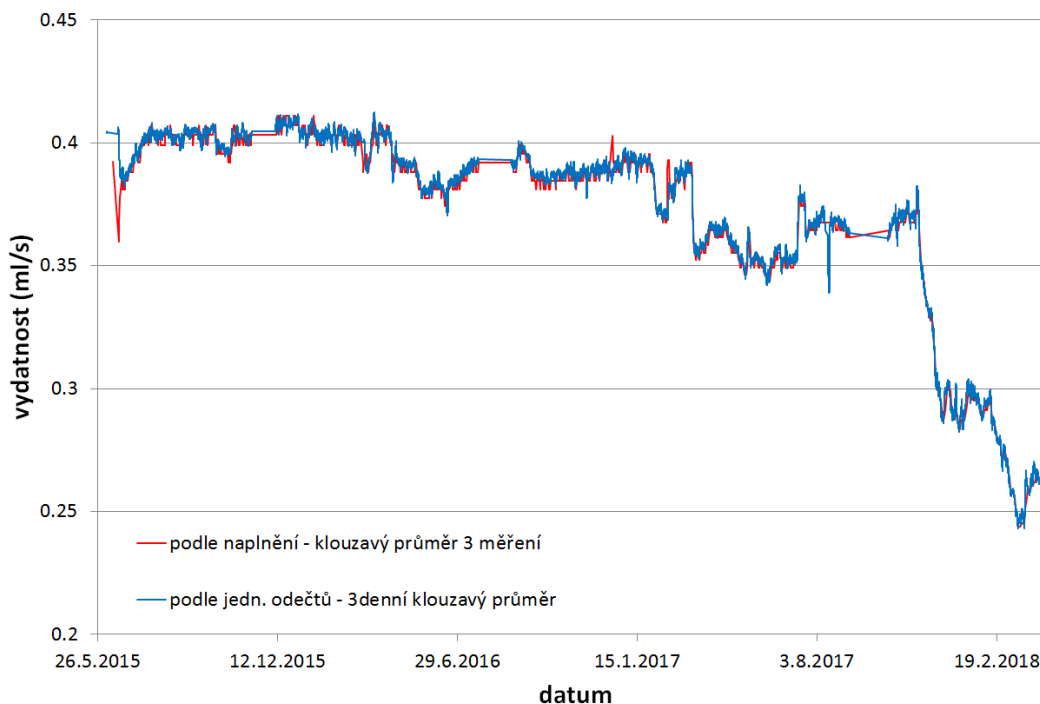
Obr. 6 Průběh vydatnosti vývěru W2313 (srovnání automatického a ručního měření).



Obr. 7 Průběh vydatnosti vývěru V5 (srovnání automatického a ručního měření). Výpadky měření byly způsobeny jak problémy při přenosu dat, tak opotřebením mechanismu a magnetu sklopného člunku.



Obr. 8 Vývoj vydatnosti přítoku W930 m v čase (průměrné denní hodnoty z jednotlivých odečtů), měsíční úhrny srážek, srážkoměrné stanice Josefův Důl.

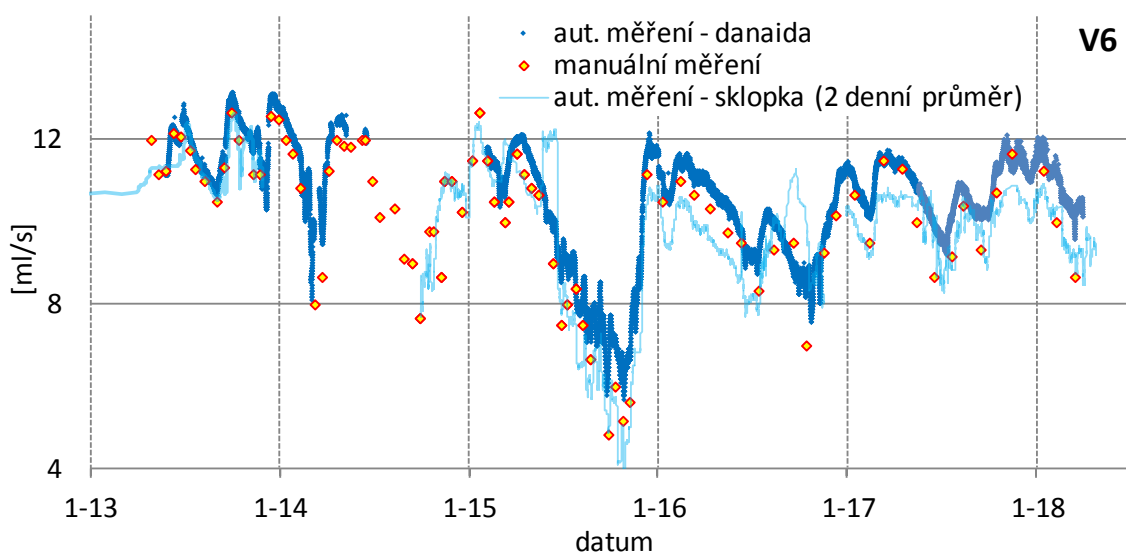


Obr. 9 Vývoj vydatnosti přítoku W930 m v čase, vyhodnocení podle doby naplnění válce (klouzávní průměr 3 měření) a 3denní klouzávní průměr jednotlivých odečtů.

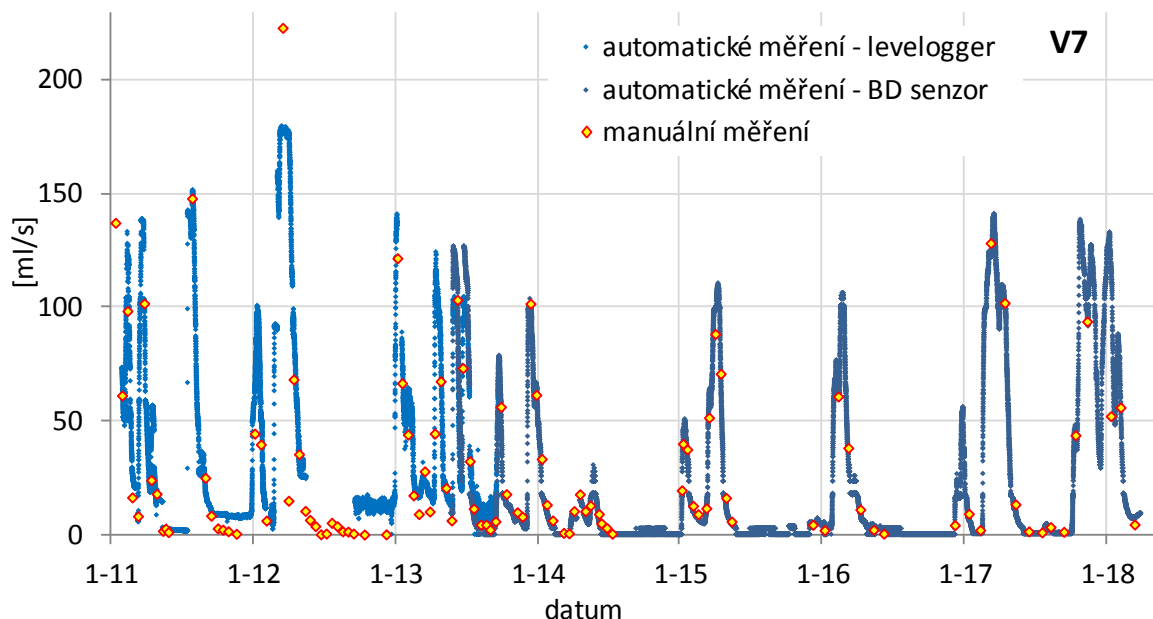
2.2.3 Tekoucí vývěry s variabilním průtokem

Vydatnost vývěru V6 (142 m), což je kovová trubka ve stropu tunelu s volně vytékající vodou, je ovlivněna kombinací sezónních cyklů dle stavu hladiny podzemní vody a srážkových událostí. Graf na Obr. 10 dobře zachycuje suché období roku 2015, od té doby dochází k pozvolnému zvyšování vydatnosti. Pro daný vývěr dobře fungují obě souběžně používané metody (danaida a sklopný člunek – dobře funkční od opravy v červnu 2015).

Vývěr V7 (76 m) je z hadice přes betonový nástřik v dolní části stěny tunelu. Vydatnost je ovlivněna především událostmi povrchové infiltrace. V posledním období měření jsou po dvou suchých letech 2015-16, kdy byly patrné pouze zvýšené přítoky vlivem oblev, opět zřetelná častější zvýšení vydatností v reakci na srážky (Obr. 11).



Obr. 10 Průběh vydatnosti vývěru V6 (srovnání automatického a ručního měření).



Obr. 11 Průběh vydatnosti vývěru V7 (srovnání automatického a ručního měření).

2.2.4 Celkový průsak do štoly

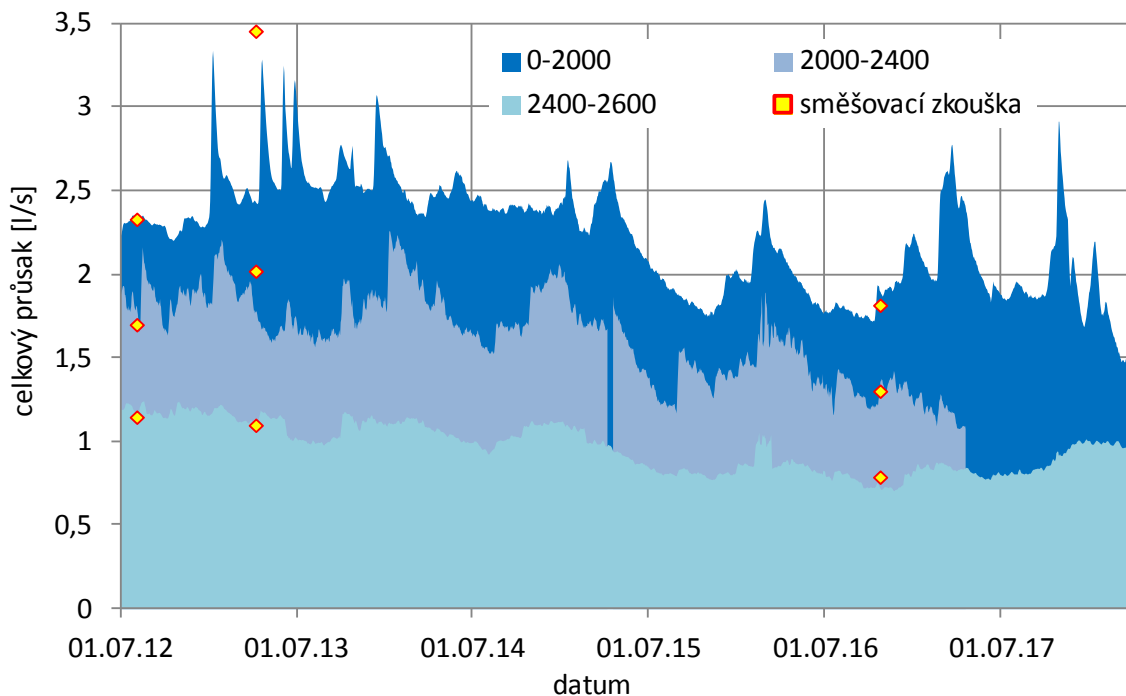
Stanoviště ve sběrném kanále W10 (2420 m), W1995 (1995 m), H249 (249 m), W104 (104 m) a V8 (0 m – vstupní objekt) dělí štolu na 5 úseků, lišících se charakteristikou a velikostí průsaků. Pozice hranic úseků jsou určeny polohou šachet sběrného kanálu a nekopírují přesně geologická rozhraní.

Rozložení průtoku podél délky štoly proměnné v čase je zobrazeno na Obr. 12. Pokles průtoku po celé délce kanálu z automatického měření v posledních dvou letech je potvrzen jednak ručním měřením výšky hladiny (byť hrubým), hlavně však interpretací hodnot z experimentů směšovací metody (popis uveden v Metodice – Příloha 5). Ta určuje průtok v daném úseku z koncentrace postupně ředěného stopovače v kanále po jeho kontinuálním dávkování daným průtokem na začátku sběrného kanálu.

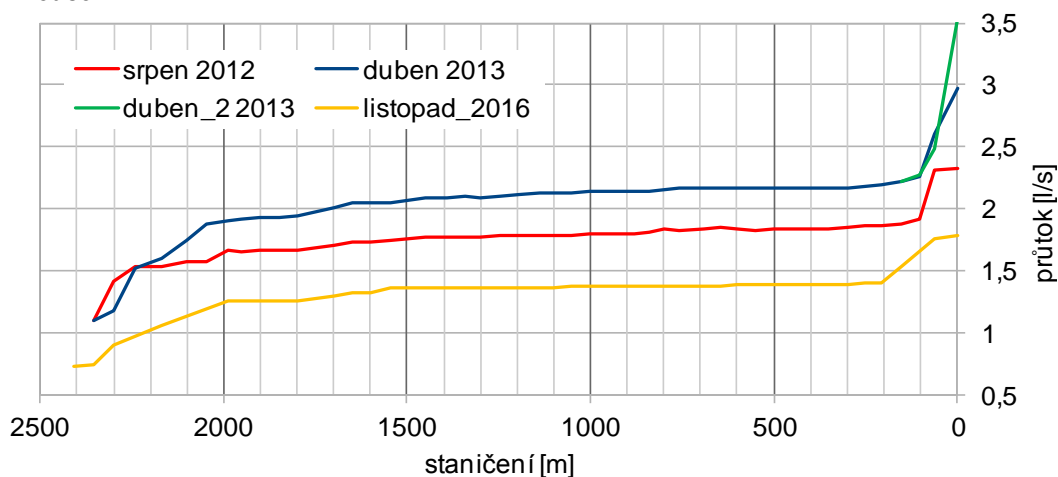
Dominantní průsak s malou variabilitou vydatnosti se nachází v hloubené části štoly pod hladinou vodní nádrže (2450–2500 m) a přilehlém cca 250 m dlouhém úseku raženém porušenou horninou (2200–2450 m). Sezónně kolísá mezi 1–2 l/s, nepravidelně v jednotlivých letech. Druhý úsek silného průsaku je prvních cca 200 m štoly (od portálu), ražený v připovrchové zóně porušené horniny, dále rozdělený na část 100–200 m se stabilním povrchem stěn a část 0–100 m krytou betonovým nástřikem. Vydatnost je výrazně kolísající během roku (0,3–1,5 l/s). Průsak ve střední části tunelu (200 m–2200 m převážně pevnou horninou) tvoří jen okolo 5–10 % celkového průsaku a je buď slabý z jednotlivých puklin, nebo silnější z tektonických zón protnutých tunelem.

Hodnoty průsaků v jednotlivých úsecích tunelu dokumentují výsledky směšovací metody v Tab. 1. Metoda také dobře zachycuje podrobné rozložení průsaku podél celé délky štoly (viz graf na Obr. 13).

Hodnoty celkového průsaku do štoly kolísají mezi hodnotami 2–3,5 l/s, přičemž maxima bývají obvykle dosažena v době jarního tání sněhu (duben), minima pak v létě nebo na podzim. Vlivem suchých období posledních dvou let došlo k poklesu minimálního průtoku až na hodnotu okolo 1,5 l/s.



Obr. 12 Průběh průtoku na různých místech ve sběrném kanálu, doplněný o hodnoty ze směšovací zkoušek.



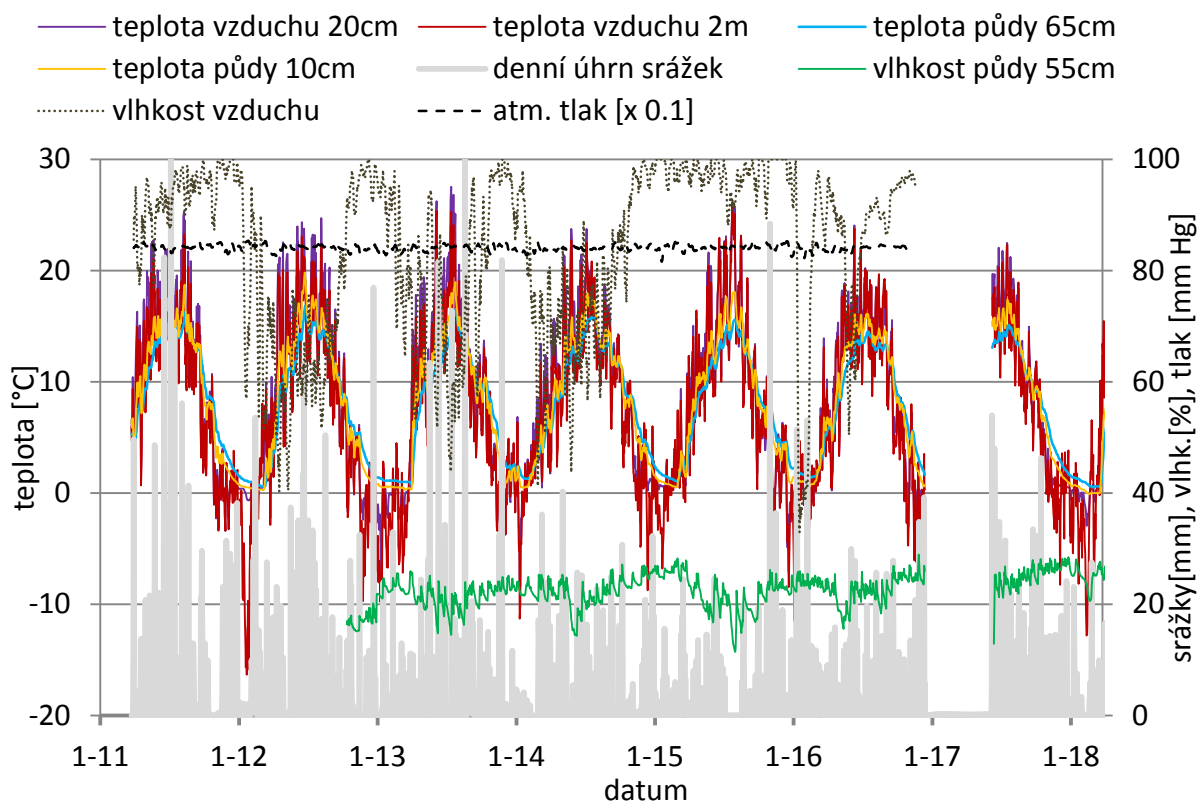
Obr. 13 Podrobné rozložení průsaků podél délky štoly při jednotlivých experimentech směšovací metody.

Tab. 1 Rozložení průsaků v úsecích štoly při jednotlivých experimentech směšovací metody.

úsek [m]	02/2012 [l/s]	08/2012 [l/s]	04/2013 [l/s]	11/2016 [l/s]
0 - 150	0,56	0,39	0,76	0,27
150 - 885	0,06	0,05	0,08	0,16
885- 1995	0,09	0,11	0,24	0,12
1995-2424	0,64	0,63	0,85	0,50
2424-2600	1,35	1,09	1,05	0,74
Celkem	2,69	2,26	2,98	1,79

2.3 Monitoring na povrchu

Měření pomocí vlastní meteorologické stanice umístěné v areálu úpravní vody (vedle vstupu do tunelu) pokračuje v dosavadní podobě. Vyhodnocení meteorologických jevů není předmětem projektu, data jsou pro podporu vyhodnocení jevů v podzemí. Záznam za celé období je v grafu na Obr. 14. V několika případech byly zaznamenány poruchy nebo konec životnosti čidel, které byly následně vyměněny (naposledy čidlo relativní vlhkosti vzduchu v zimě 2016). Z důvodu poruchy napájení pak došlo k výpadku provozu celé meteostanice v první polovině roku 2017.



Obr. 14 Data z meteorologické stanice v prostoru úpravní za celé období provozu. Kromě denního úhrnu srážek jsou zobrazeny denní klouzavé průměry ostatních hodnot. V první polovině roku 2017 došlo k výpadku provozu celé meteostanice.

2.4 Odběry a monitoring stopovačů

2.4.1 Stanovení obsahu freonů a SF₆ v podzemních vodách

Na čtyřech přítocích ve vodovodní štolě Bedřichov byly odebrány pracovníky ČGS a TUL vzorky vody, ve kterých byla stanovena koncentrace freonů 11, 12, 113 a SF₆. Metodika odběrů a způsob vyhodnocení byly popsány ve zprávě Hokra et al. (2016).

Výsledky vyhodnocení jsou uvedeny v Tab. 2. Rozsah hodnot je dán uvažováním naměřené koncentrace ± směrodatné odchylky. Tabulka uvádí rozsah střední doby zdržení v letech (maximální rozsah hodnot). SF₆ nebyl pro vyhodnocení použit, protože jeho koncentrace jsou řádově vyšší, než jsou rovnovážné koncentrace s atmosférou. Příčinou je zřejmě kontaminace SF₆, buď geogenního (přírodního) původu (opakovaně zjištěno v Sudetech, tj. Jizerské Hory, Krkonoše, Králický Sněžník), nebo lidskou činností.

Všechny stopovače naznačují, že studované objekty mají střední dobu zdržení pod 30 let a to u tří z nich výrazně pod 30 let. U výtoku W2210 lze z kombinace všech tří stopovačů odhadnout střední dobu zdržení na zhruba 20-25 let. Výtok W2210 se řadí mezi skupinu průsaků s delší dobou oběhu také podle chemického složení (viz kapitola 2.5.1).

Tab. 2 Střední doba zdržení podzemní vody pro vzorkované přítoky hodnoty uváděny v letech.

roky	freon 12	freon 11	freon 113
W2313	0	0 až 27	0 až 20
W2210	0 až 25	20 až 45	16 až 33
W1565	0 až 15	0 až 30	0 až 25
W142	0 až 20	0 až 30	0 až 26

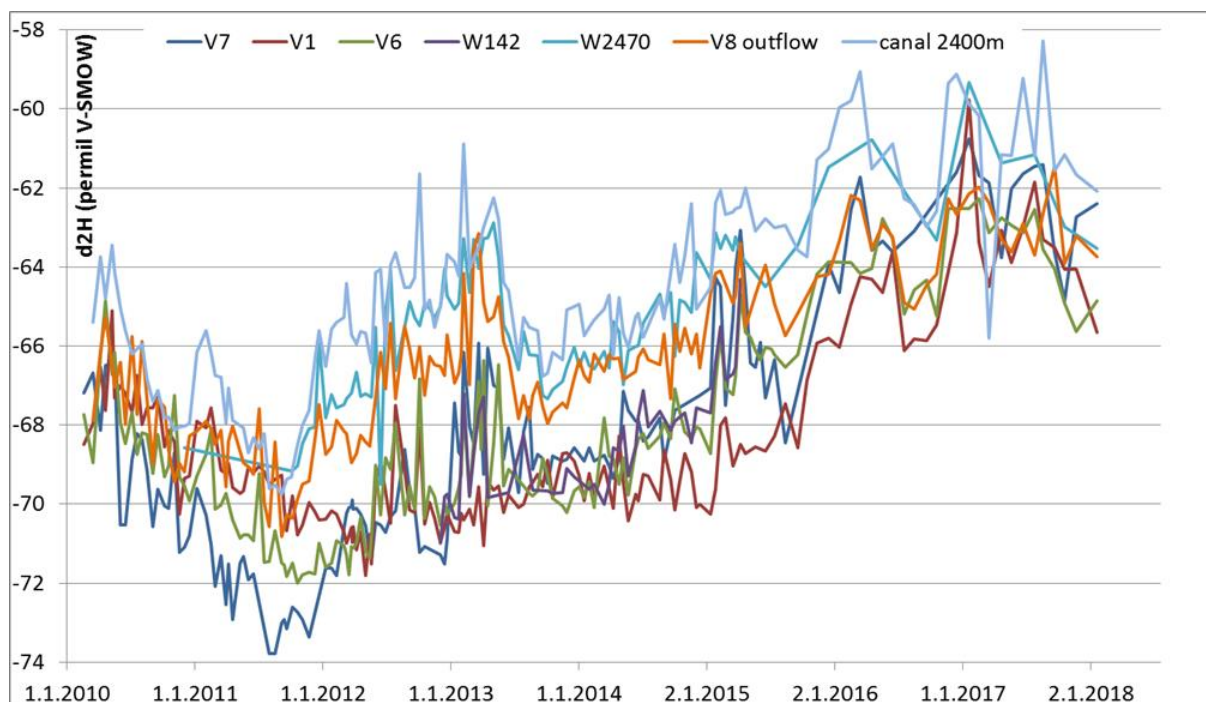
Odběry vzorků pro stanovení obsahu freonů a SF₆ v podzemních vodách a výsledky datování vod provedené ve vodovodním přivaděči Bedřichov a současně také v Podzemním výzkumném pracovišti (PVP) Bukov umožňují definování těchto metodických poznatků:


1. Splnění požadavku na odběr vzorku podzemní vody bez přístupu vzduchu z výtoků z puklin nebo subhorizontálních vrtů v podzemních dílech je velmi problematické. Nelze zcela vyloučit styk podzemní vody se vzduchem za stěnou podzemního díla. Při odběrech v Bedřichovském přivaděči docházelo při manipulaci se sběrnou hadičkou jejímu zavzdušnění - při zvýšení hydraulického gradientu docházelo k nasávání vzduchu z puklin za stěnou přivaděče. Možným řešením tohoto problému je odběr vzorků čerpadlem vertikálních vrtů v počvě důlního díla - z nasyceného horninového prostředí.
2. Výsledek interpretace závisí výrazně na použitém modelu a modelovaném obsahu freonu.
3. Podzemní voda je obvykle směsí různě starých vod, freony je možné použít k ověření podílu „mladších vod“ (stáří v desítkách let).

4. Význam má srovnání výsledků z různých zdrojů, například u Bedřichova bylo stanoveno stáří vod do 30 let, zatímco v PVP Bukov u datovaných přítoků převažovalo stáří nad 200 let.
5. SF₆ na obou lokalitách bylo pravděpodobně geogenního původu – nelze využít k datování.

2.4.2 Monitoring stabilních izotopů ¹⁸O a ²H

Stabilní izotopy ¹⁸O a ²H v molekule vody se jako stopovače standardně používají v hydrologii k odhadům doby transportu vody v hydrologickém cyklu v řádech měsíců až roků, tj. v kratším časovém měřítku než stopovače uvažované v předchozí kapitole. Vzorkování vody a analýzy koncentrací ¹⁸O a ²H navazují na předchozí dlouhodobé vzorkování. Odběr vzorků probíhá ručně pracovníky TUL na 13 vývěrech a dvou místech sběrného kanálu v tunelu plus na povrchu ve srážkách ve srážkoměrné stanici a v půdní sondě. Pro každý vývěr byla stanovena různá frekvence odběru vzorků dle předpokládaných vlastností vývěru určených z předchozího vzorkování – nově nastavené frekvence byly zavedeny od roku 2016 na základě projednání na kontrolním dni. Odběry odebírané do vzorkovnic nemají žádné zvláštní požadavky na kvalitu vody z hlediska styku s atmosférou, kontaminaci apod., kromě kontaminace vodou z jiného zdroje. Vzorky jsou analyzovány na pracovišti ČVUT v Praze týmem doc. Martina Šandy na přístroji Liquid Water Isotope Analyzer, LGR Inc. Koncentrace jsou vyjádřené jako odchylky δ¹⁸O a δ²H od standardu, který je označena „Vienna men ocean water“. Z časové řady koncentrací měřených izotopů je možné pomocí různých modelů odhadnout stáří vody, tj. dobu od kontaktu vody s atmosférou (kapitola 2.6). Vzhledem k časovému měřítku je vyhodnocení stáří použito pro vývěry v menší hloubce pod povrchem, ale data jsou pro širší analýzu prezentována ze všech analýz.



 SÚRAO	Vývoj a ověřování metodik pro charakterizaci horninového prostředí – výsledky monitoringu v přivaděči Bedřichov	Evidenční označení:
		SÚRAO TZ 289/2018

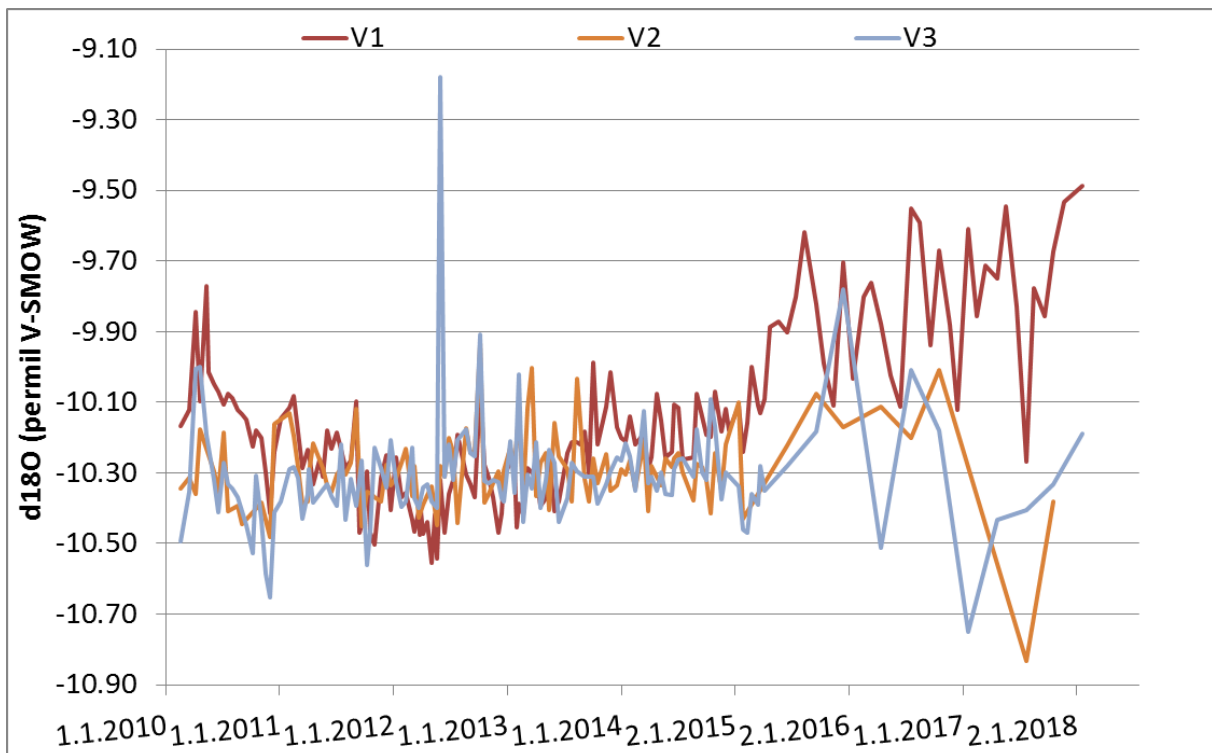
Obr. 15 Koncentrace izotopu 2H ve vývěrech v tunelu.

Celá naměřená časová řada hodnot $\delta^{18}O$ a δ^2H vybraných míst v tunelu je zobrazena na Obr. 15. Charakteristiky obou izotopů jsou podobné, proto je uveden obrázek vždy pro jeden izotop. Z hlediska časového vývoje se vývěry dají rozdělit na kolísající a ustálené (kapitola 2.2). Ve vybraných kolísajících vývěrech na Obr. 15 lze zaznamenat sezónní kolísání s nejnižší koncentrací v létě 2011. Spolu s vývěry je zde zobrazena i kolísající koncentrace na začátku a na konci štoly odebíraná v odvodňovacím kanálu („canal 2400m“ a „V8 outflow“). Tyto vody spolu s vývěrem W2470 mají odstup od ostatních kolísajících vývěřů díky předpokládanému odpaření lehčích izotopů v nádrži Josefův důl, odkud dominantně prosakují. Odtok z celého tunelu je pak směsí vody z nádrže a průsaku z horniny. Pro kontrolu jsou v části období analyzovány dva vývěry ve stejné místě štoly (V6 a W142 staničení 142 m), potvrzuje se téměř stejný charakter průběhu a dílčí výchyly považujeme za rozptyl vlivem chyb analýz.

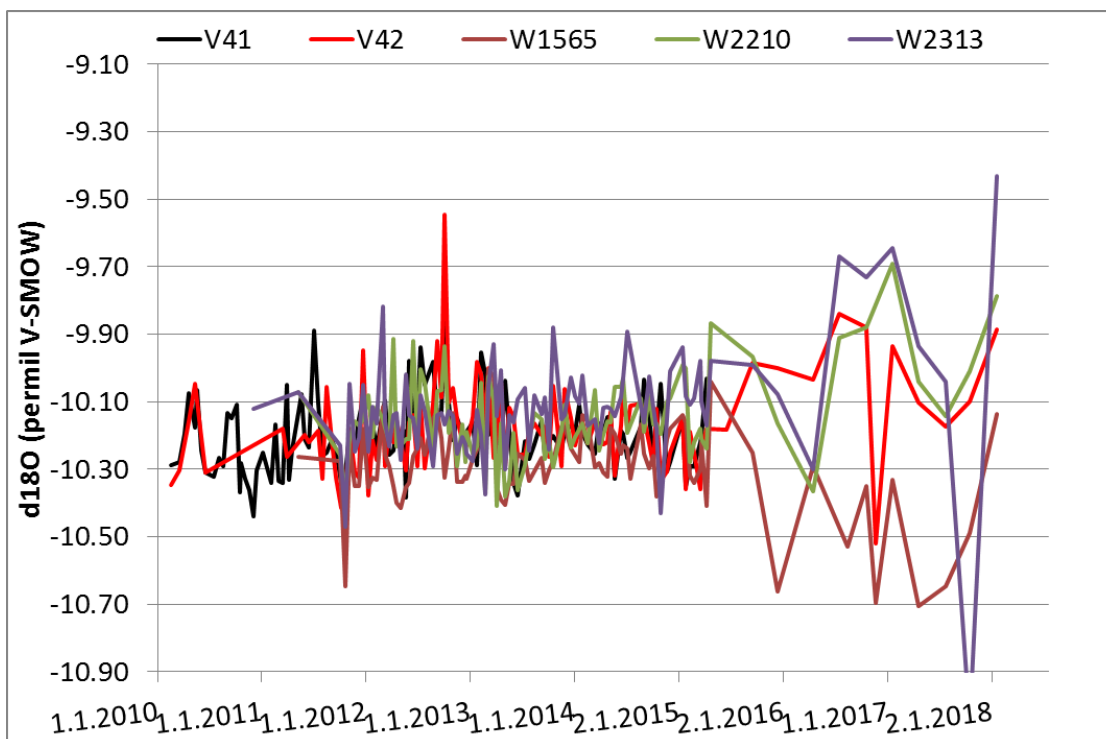
Celkově lze konstatovat, že z pozice vývěru v rámci tunelu lze usuzovat na charakter kolísání; že vývěry v mělké části štoly V7, V1, V6 a W142 se staničením 50 – 150 m od vchodu a na opačné straně vývěř W2470 mají sezónní charakter. U ostatních vývěřů již není zřetelná časová změna koncentrace kromě „šumu“ v rozsahu chyby měření.

Na Obr. 16 jsou uvedeny vývěry s malým průtokem. Vývěř V1 (staničení 125 m) v mělkém úseku byl uveden v předchozím odstavci a sezónní trend je zřetelný i přes malý průtok. Ostatní dva vývěry V2 (staničení 798 m) a V3 (staničení 1375 m) mají již ustálenější charakter a výchyly nelze interpretovat jako projev pohybu vody ve větším měřítku (v rozsahu nejistoty měření). Zvláštností je propad v posledním roce po snížení frekvence vzorkování, u něhož nelze jednoznačně říci, zda je to projev nějaké změny v charakteru pohybu vody, nebo jde o jiný efekt v proceduře vzorkování a měření. Z laboratorních protokolů nevyplývala větší chyba měření než v předchozích případech. Změnou by mohlo být delší skladování vzorků v souvislosti s jejich menším počtem.

Tekoucí vývěry z opačné části štoly blíže k nádrži vykazují také stabilní koncentraci se zatím nevysvětlenými výkyvy v posledním období měření (Obr. 17). Vývěry V41 a V42 (staničení 1728 a 1727 m) spolu s W1565 (staničení 1565 m) jsou tekoucí vývěry v nejhlubší části tunelu. Stabilní koncentrace u těchto vývěřů je očekávaná a ukazuje na dostatečné promíchání podzemní vody infiltrované v různém období (dalšími stopovači v W1565 vymezeném 0-30 let). Pravděpodobně stejně na tom je i W2210 a W2313, u kterého byl původně předpoklad, že se nachází na hranici ovlivnění průsakem z nádrže, čemuž ale časová řada koncentrací neodpovídá.



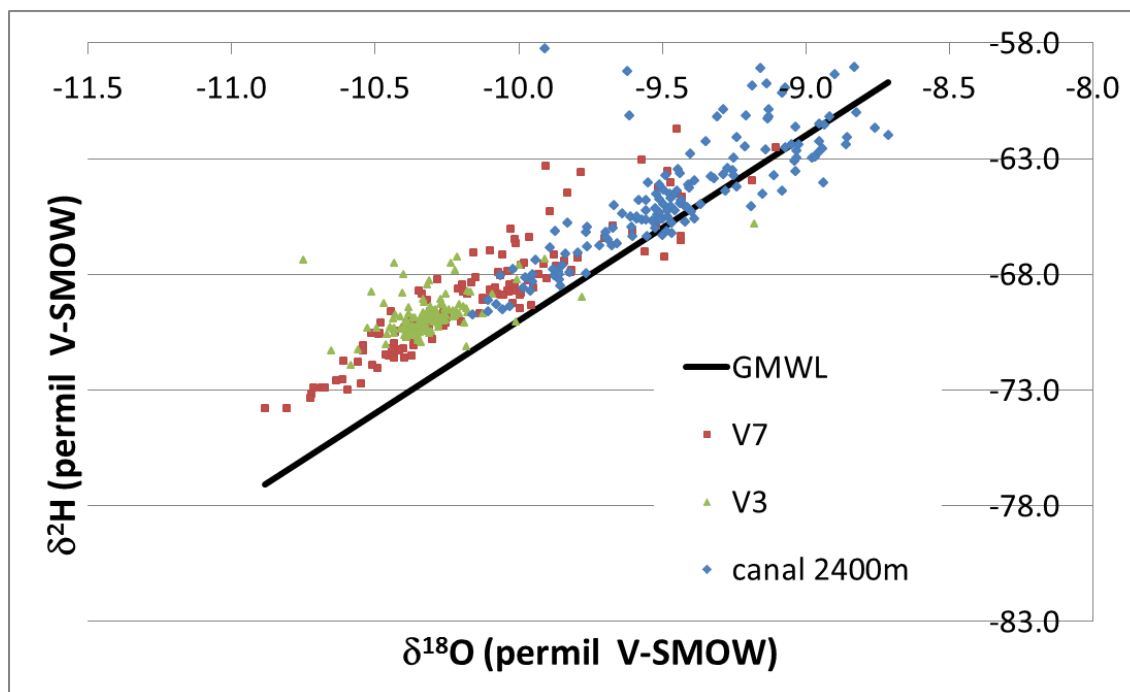
Obr. 16 Koncentrace izotopu ^{18}O ve vybraných kapajících vývěrech v tunelu. Je vidět rozdíl mezi V1 se sezónním nebo delším trendem a ostatní dva bez těchto změn.



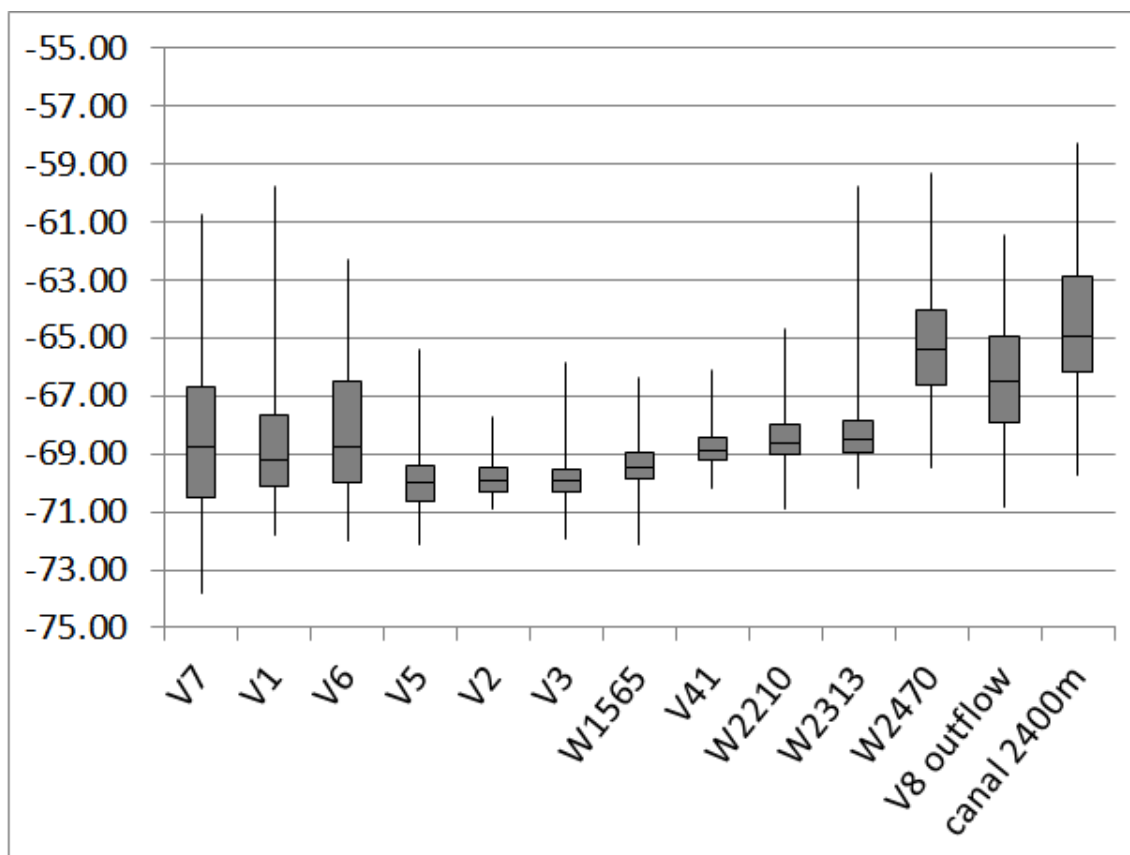
Obr. 17 Koncentrace izotopu ^{18}O ve vybraných hlubokých vývěrech v tunelu bez sezónních trendů.

Pozice koncentrace stabilních izotopů vůči globální meteorické linii (GMWL) jsou zobrazeny na grafu Obr. 18. Poloha mimo linii obecně detekuje odchylku od vod meteorického původu, tj. známku probíhajícího procesu ovlivňujícího frakcionaci izotopů po dopadu srážek. Celkově jsou data na linii nebo mírně nad ní. Překvapivě se málo projevuje odpar z hladiny nádrže, který by vedl na vzorky pod linií. Poloha nad linií může znamenat původ vody z kondenzace nebo efekt interakce s horninou – jako příklad v literatuře je uvedena hydratace silikátů (Pearson, 1983). Nejvýrazněji nad GMWL jsou data z vývěrů v nejhlubší části (v grafu ukázka V3). Podobně však vychází i část dat u V7, který ale vykazuje rychlou reakci na srážky, efekt je tedy pravděpodobně způsoben vytlačení původní vody z puklinového nebo pórového systému novou srážkovou vodou. Toto porovnání rozšiřuje závěry zjištěné na základě kolísání zmíněné výše.

Míru kolísání je možné dále porovnat s použitím krabicových diagramů, tj. zobrazením maximální a minimální hodnoty a rozmezím 25% – 75% kvantilu pro jednotlivé vývěry na Obr. 19. Vývěry jsou seřazeny dle staničení v tunelu a je vidět, že rozsah hodnot se mění od největšího u vstupu V7 a V1 k V6, přes menší ve střední části, opět k většímu s obdobným rozsahem u vody obvlivněné nádrží. Je vidět jen velmi malý posun mezi začátkem a koncem sběrného kanálu, tj. vliv menšího poměru vody z horniny proti vodě z nádrže. V nejhlubších částech tunelu ležící vývěry V2 a V41 a vykazují nejménší rozsah a nejnížší hodnoty mediánu. Tyto vývěry se pravděpodobně nejvíce blíží svou koncentrací plně promíchané podzemní vodě. Celkově graf potvrzuje interpretaci o hranicích dosahu vlivu srážkové variability a zároveň rozlišuje vodu bez sezónní variability z různých hloubek nebo různých podmínek (méně vydatné V5, V2, V3 s nižší průměrnou koncentrací než vydatnější V4, W1565 a W2210). Může to být projev jak interakce s horninou (tj. doprovázený odchylkou od GMWL) nebo nestejně zachycení srážek v zimním a letním období (bez odchylky od GMWL), tj. do větší hloubky se spíše dostane voda z dlouhodobého vsakování např. při tání sněhu.



Obr. 18 Pozice koncentrací vybraných vývěrů charakteristických pro jednotlivé skupiny vůči globální meteorické linii (GMWL).



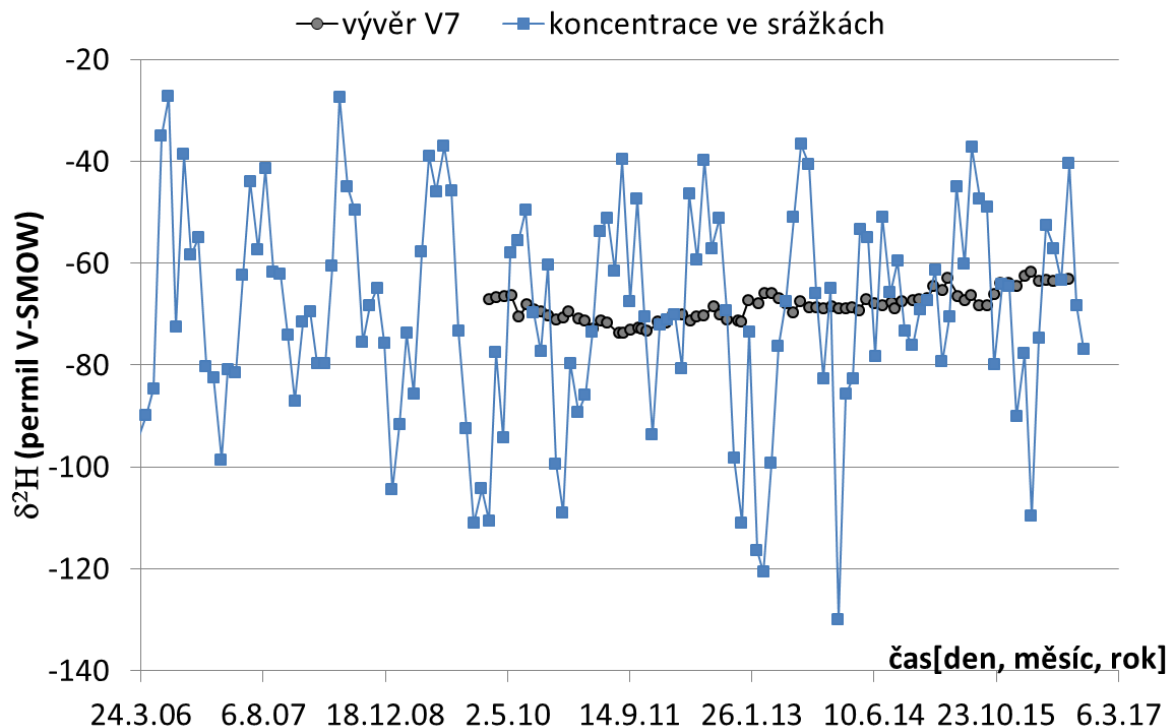
Obr. 19 Krabicové diagramy pro porovnání jednotlivých vzorkovaných míst (shora maximum, 3. kvartil, medián, 1. kvartil a minimum).

Časové řady koncentrací byly použity pro odhad doby zdržení (TT), tj. pohybu stopovače z povrchu (od prvního kontaktu s půdou) do místa odběru vzorku, pomocí modelů. Byly provedeny výpočty doby zdržení pomocí modelu sdružených parametrů FLOWPC a 2D numerického modelu Flow123d, pro vývěry jsou z mělké části tunelu. Modely jsou založeny na transformaci sezónní variability koncentrace ve srážkách na variabilitu ve vývěrech. Ukázka průběhu koncentrace ve srážkách (odběry z nedalekého povodí Uhlířská prováděné a analyzované ČVUT v rámci jiných výzkumných aktivit, Šanda et al., 2013) v porovnání s tunelem (pozice V7) je na Obr. 20. V kapitole 2.6 je popsán postup a použité modely. Shrnutí TT je uvedeno v tabulce Tab. 3. Je vidět, že mělký vývěr V7 má kratší TT, ale mezi V1 a V6 tento vztah neplatí a zřejmě se projevuje rozdílná vydatnost i na rychlosti toku (V1 mělký, kapající, s delší TT). Rozdíl mezi modely je způsoben v nich daným rozložením dob zdržení: disperzní funkce u FLOWPC a geometrie trajektorií modelu toku u Flow123d, s odlišným příspěvkem nejdelších dob, které výrazně ovlivňují střední dobu, určenou jako první moment distribuční funkce. Poloha maxima na časové ose, tj. hodnoty nejvíce zastoupených dob zdržení resp. trajektorií se přitom liší výrazně méně.

Tab. 3 Střední doba zdržení podzemní vody pro vybrané modelované vývěry v měsících.

	V7(W76)	V1(W125)	V6(W142)	V5(W226)
FLOWPC (průběžná zpráva Hokr et al., 2016))	30-35	31-36	29-34	35-42

FLOWPC (aktuální – delší časová řada, inverzní model)	21-22	31-34	25-26	17-26
FLOW123D (numerický 2D model, inverzní)	61-115	95-380	95-171	105-275



Obr. 20 Zobrazení kolísající koncentrace ve srážkách (měřeno na povodí Uhlířská, data ČVUT) a utlumení kolísání ve vývěři V7.

Na základě zkušeností z použití stabilních izotopů ^{18}O a ^2H jako přirozených stopovačů a zpracování jejich datových řad lze shrnout metodické doporučení pro jejich aplikaci a vyhodnocení (v podstatě se neliší od standardních informací v literatuře):

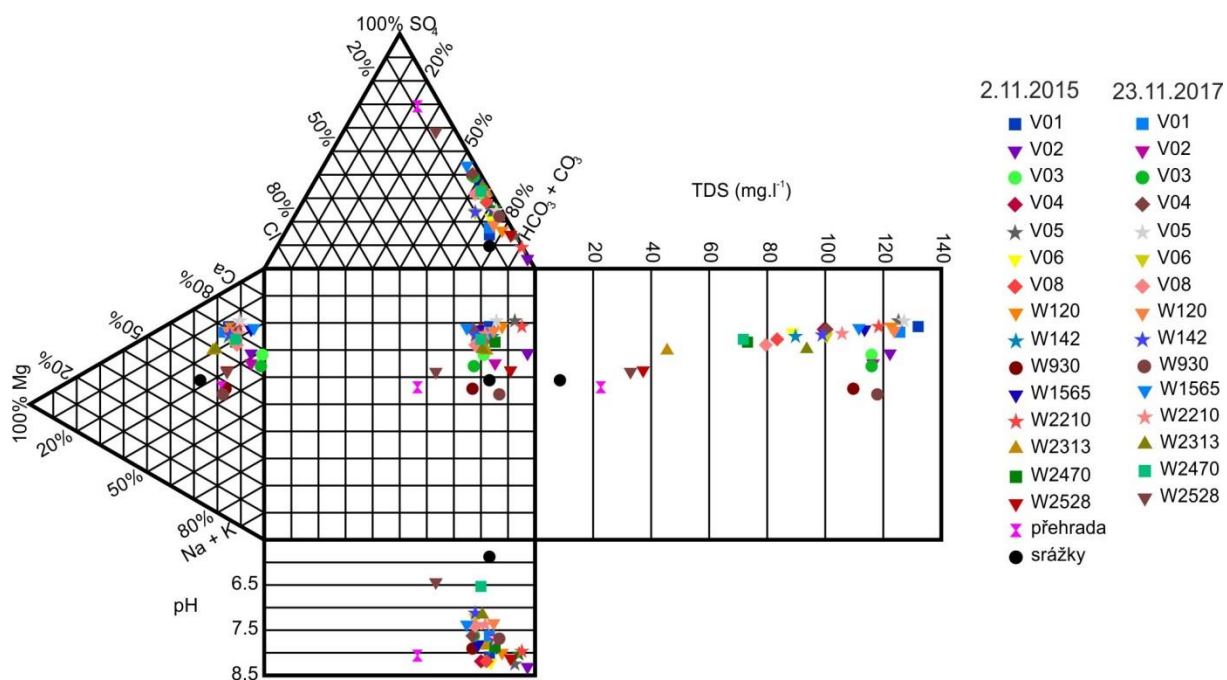
1. Stabilní izotopy ^{18}O a ^2H jsou v porovnání s jinými přirozenými stopovači nenáročné na odběr vzorku. Je s nimi snadná manipulovatelnost a nepotřebují žádné speciální vybavení při odběru, skladovat se dají v chladničce.
2. Je nutné vzorkování srážek v lokalitě předpokládané infiltrace za dobu několika let zpětně (projevuje se mnohem více vlivů než jen sezóna)
3. Pro určení doby zdržení je potřeba delší řada pravidelných odběrů a aplikace vhodného transportního modelu
4. Rozsah jejich použití je vhodný pro předpokládanou dobu dotoku v řádech jednotek let. Vedle toho mohou dát doplňující informaci o původu podzemní vody ve větších hloubkách, ale to je podmíněno konkrétní konfigurací hydraulických podmínek.
5. V případě odběrných míst s malou variabilitou koncentrace (ve větší hloubce) je vyhodnocení limitováno přesností laboratorního měření (změny v řádu chyby měření).

2.5 Hydrochemický monitoring

2.5.1 Variabilita složení podzemních vod v rámci vodovodního přivaděče a její změna v čase

Délka vodovodního přivaděče Bedřichov je přibližně 2600 m, mocnost nadloží se pohybuje od prvních desítek po 150 m. To umožňuje srovnávat chemické složení podzemních vod z rozsáhlé části granitového masivu a v různých hloubkách pod zemským povrchem.

Plošné odběry vzorků podzemních vod z hlavních přítoků do přivaděče byly provedeny v listopadu 2015 a nad rámec projektu ještě v listopadu 2017, aby bylo možné srovnat případné změny v čase. Součástí bylo také měření chemicko-fyzikálních vlastností podzemních vod. Výsledky analýz a měření jsou uvedeny v Durovově diagramu na Obr. 21, v Tab. 4.



Obr. 21 Durovův diagram chemického složení podzemních vod hlavních přítoků do přivaděče

Podzemní vody přítékající do přivaděče jsou hydrochemického typu Ca-HCO₃, vzorek vody odebraný z vodní nádrže Josefův Důl je typu Ca-SO₄. Typu Ca-SO₄ byl při odběru v roce 2017 přítok W2528 ležící v části přivaděče pod hladinou nádrže. Z hlediska poměrného zastoupení kationtů se průměrnému složení – Ca 70 meq%, Na a Mg kolem 15 meq%, vymykají přítoky přímo ovlivněné nádrží (W2313 a W2528) a přítok W930, u kterého voda prosakuje přes betonový nástřík. Přítoky V02 a V03 v centrální části přivaděče mají nižší poměrný obsah hořčíku mezi kationty.

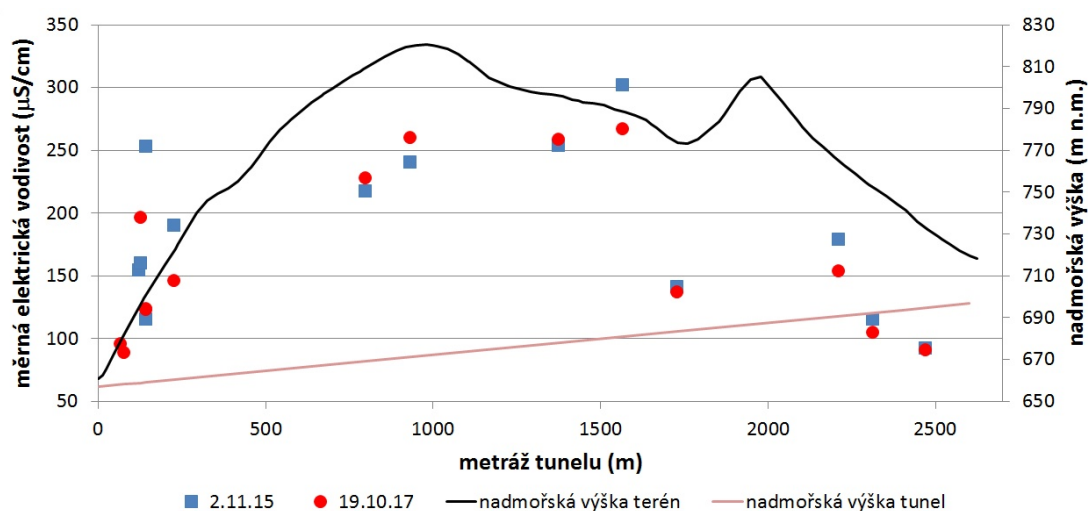
Převažují podzemní vody s neutrální nebo mírně zásaditou reakcí, nízkce mineralizované. Teplota podzemní vody se v době odběrů pohybovala nejčastěji mezi 6 a 8 °C. Vody jsou v převážné většině silně okysličené.

Rozdíly mezi jednotlivými přítoky byly zejména v měrné elektrické vodivosti, která je dána celkovým obsahem rozpuštěných látek (TDS). V prvních desítkách metrů přivaděče se vzrůstající mocností nadloží vodivost prudce stoupá (Obr. 22) z hodnot 80 na 200 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$, poté následuje pomalejší nárůst. V částech přivaděče s nejvyšší mocností nadloží dosahuje vodivost hodnot 200 až 260 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ (odpovídá celkovému obsah rozpuštěných látek 110 až 130 $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$). V koncové části přivaděče elektrická vodivost opět klesá, mocnost nadloží je zde malá a režim přítoků ovlivňuje přítomnost přehradní nádrže.

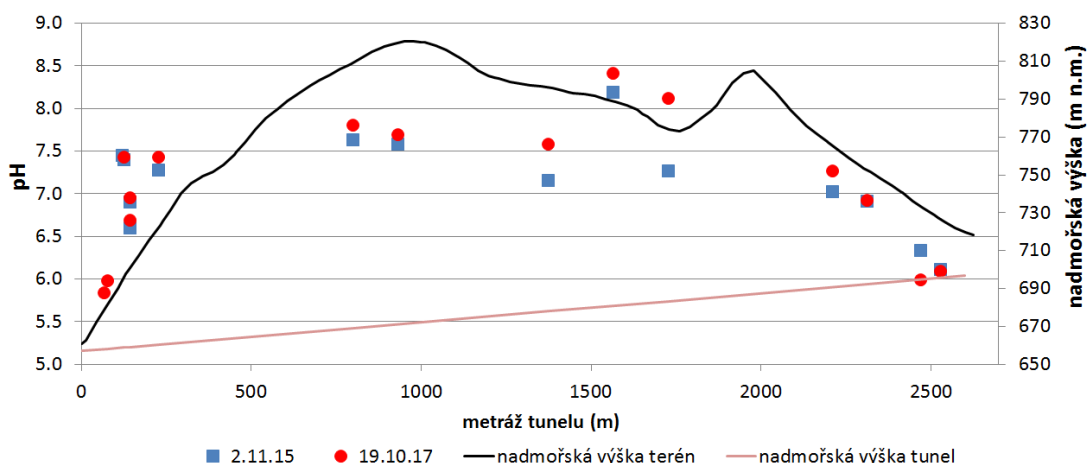
Výjimkou v popsaném trendu je přítok V04 ležící na metrži 1728 m, jehož vodivost odpovídá přítokům z okrajových částí přivaděče. Tento přítok leží pod mírnou depresí v sedle u Jablonecké chaty. Geofyzikálním měřením byly v této části zjištěny nízké hodnoty zdánlivých měrných odporů hornin, tedy vyšší míra porušení hornin (Hokr et al. 2014). Lze tedy předpokládat, že zde dochází k rychlejšímu proudění podzemních vod po zlomu.

Měrná elektrická vodivost se v homogenním geologické prostředí a v hloubkách do 150 m pod zemským povrchem ukázala jako velmi dobrý indikátor doby zdržení (hloubky oběhu) podzemní vody v horninovém prostředí včetně možnosti lokalizace přítoku po zlomu. Přítoky s delší dobou zdržení vod v masivu mají výrazně vyšší měrnou elektrickou vodivost.

Hodnoty pH také rostou se zvyšující se mocností nadloží (Obr. 23), trend není tak výrazný jako u měrné elektrické vodivosti.



Obr. 22 Hodnoty měrné elektrické vodivosti měřených přítoků v profilu přivaděče Bedřichov.



Obr. 23 Hodnoty pH měřených přítoků v profilu přivaděče Bedřichov.

Delší setrvání podzemní vody v masivu předpokládáme u přítoků V05 (226 m), V02 (798 m), W930, V03 (1374 m), W1565 m a W2210. U přítoku W2210 byla potvrzena delší doba zdržení v masivu také datováním pomocí freonů. Hranice mezi výskytem přítoků drénujících velmi mělký a přítoků drénujících hlubší oběh podzemních vod je ostrá. Stabilní přítoky V05 (226 m) a W2210 se vyskytují v okrajových částech přivaděče a leží v těsné blízkosti přítoků prokazatelně ovlivněných povrchovými nebo velmi mělkými podzemními vodami. Ke změně charakteru přítoků dochází při mocnosti nadloží kolem 60 až 70 m, což je pravděpodobně hloubka dosahu rychlého oběhu podzemních vod v připovrchové zóně rozevření puklin.

Tab. 4 Výsledky terénních měření chemicko-fyzikálních vlastností podzemních vod, v tabulce jsou zahrnuty přítoky měřené v obou etapách 2015 a 2017

číslo bodu	pozice (m)	pH		vodivost ($\mu\text{S/cm}$)		t voda ($^{\circ}\text{C}$)		Obsah O_2 (mg/l)		Eh (mV)		vydatnosť (ml/s)
		2.11.2015	19.10.2017	2.11.2015	19.10.2017	2.11.2015	19.10.2017	2.11.2015	19.10.2017	2.11.2015	19.10.2017	
V01	125	7,40	7,43	160,6	197,0	7,4	7,3					>0,1
V02	798	7,63	7,81	218,0	228,0	7,6	7,0					>0,1
V03	1374	7,16	7,58	254,0	259,0	7,6	6,7					>0,1
V04	1728	7,27	8,12	141,4	137,0	7,4	6,7	10,01	10,06	191,3	169,9	6,61
V05	226	7,28	7,43	190,3	146,5	7,5	6,9	7,91	8,22	211,9	218,0	1,94
V06	142	6,90	6,95	253,0	123,7	7,6	7,0	10,10	10,01	174,1	217,7	10,05
V08	0	7,25	7,12	106,4	99,5	7,4	7,0					
V10	2420	6,92	6,72	79,4	85,4	6,9	6,6	10,30		161,2		
W0142	142	6,60	6,69	115,3	123,6	8,4	6,9	9,18	9,19	186,7	218,0	35,21
W0930	930	7,58	7,69	241,0	260,0	7,8	7,3		11,17		167,0	0,30
W1565	1565	8,19	8,41	302,0	267,0	7,2	6,8	6,50	9,51	220,5	166,4	10,64
W2210	2210	7,02	7,27	179,5	154,0	7,1	6,5	5,97	6,20	190,7	179,3	14,12
W2313	2313	6,91	6,92	115,3	104,9	7,0	6,5	8,78	9,24	191,9	172,8	24,23
W2470	2470	6,34	5,99	92,7	91,5	7,6	7,9	2,52	1,92	93,6	16,7	35,70
W2528	2528	6,11	6,09	41,1	41,7	6,5	5,9	7,02	5,82		109,1	166,67

Obecně jsou změny chemického složení i fyzikálně-chemických parametrů podzemních vod mezi rokem 2015 a 2017 velmi malé. Změny v poměrném zastoupení hlavních kationtů jsou tak malé, že na Durovově diagramu (Obr. 21) dochází k překryvu značek odběrů. Pokud byla zaznamenána změna, jedná se o první jednotky meq%. Minimální jsou také změny v celkovém

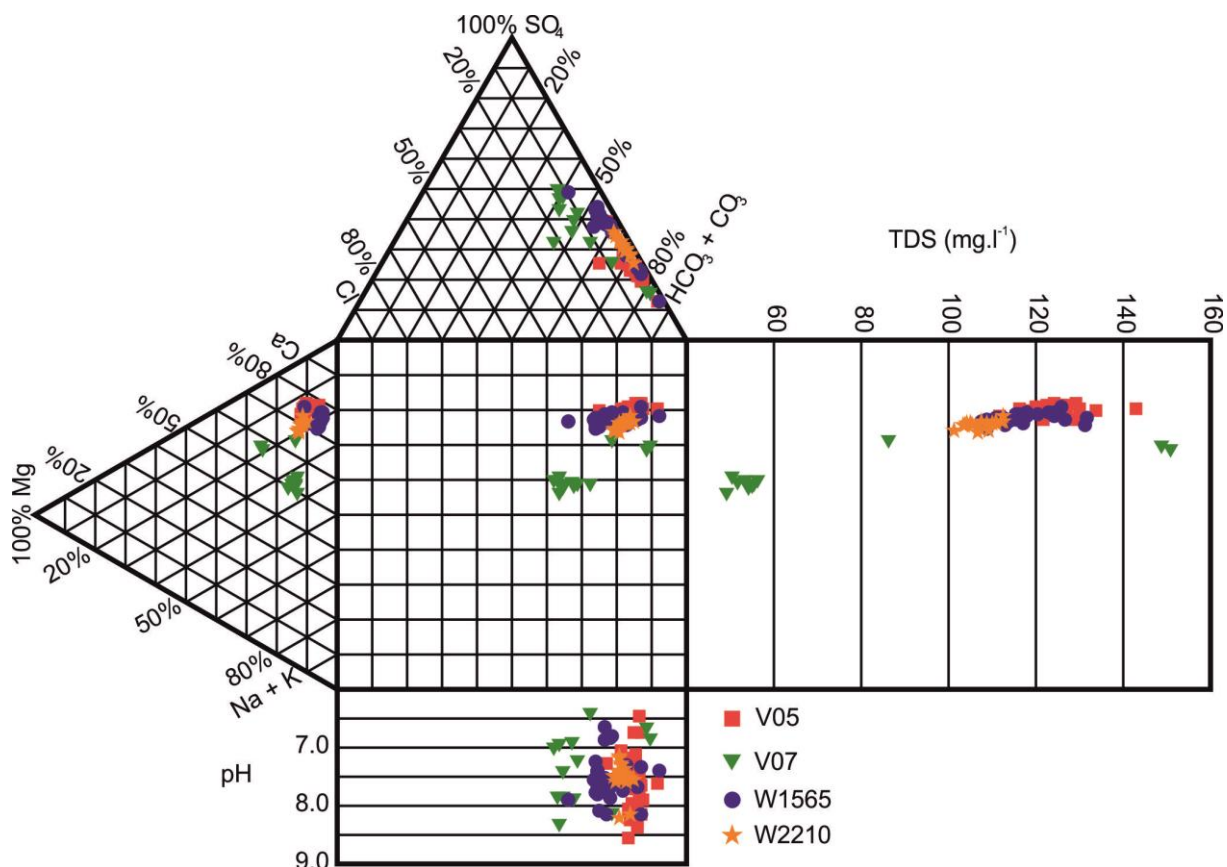
obsahu rozpuštěných látek. Výrazné změny v chemickém složení byly zaznamenány pouze u přítoků W2313 a W2528 ovlivněných kvalitou a kvantitou vody v přehradní nádrži Josefův důl. V prvním případě došlo k výraznému nárůstu celkového obsahu rozpuštěných látek, v případě druhé o změnu poměrného zastoupení síranů a hydrogenuhličitanů.

2.5.2 Variabilita chemického složení podzemních vod na monitorovaných přítocích

Monitoring chemického složení podzemních vod byl zahájen v lednu 2015. Odběry vzorků podzemní vody probíhaly v měsíčních intervalech až do března 2018. V období od ledna 2015 do května 2016 byly vzorkovány přítoky V05, V07 a W1565. Vzhledem k dlouhodobému vysychání přítoku V07, které znemožňuje získat reprezentativní časovou řadu chemického složení podzemní vody, byl tento přítok z monitoringu vyřazen a od června 2016 nahrazen přítokem W2210

Cílem monitoringu bylo stanovení míry variability chemického složení podzemních vod v geologicky homogenním prostředí granitu. Z výsledků monitoringu a dostupných datových řad z podzemní laboratoře Josef u Mokrska a PVP Bukov byly současně sestaveny metodické poznatky a doporučení pro odběry vzorků podzemních vod v podzemních dílech s cílem optimalizovat monitoring podzemních vod v prostředí HÚ (Příloha 4).

Současná datová řada zahrnuje 39 měsíců monitoringu.



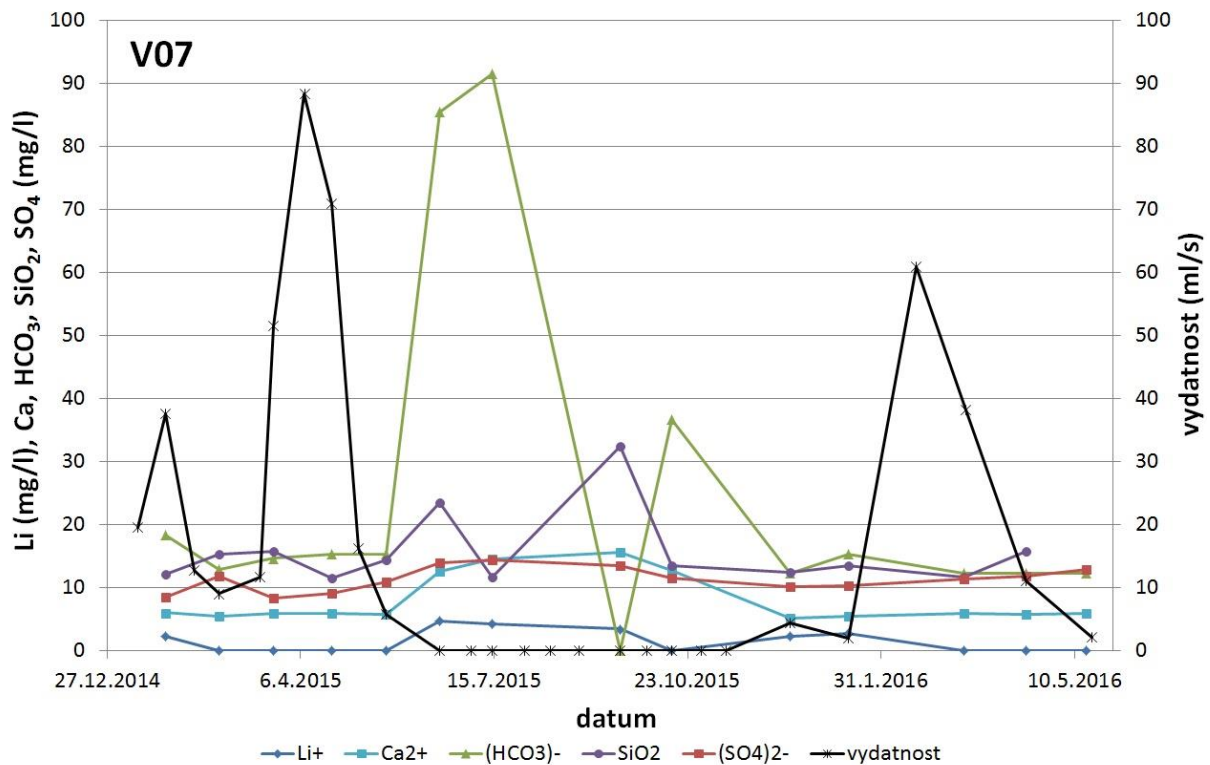
Obr. 24 Durovův diagram variability chemického složení podzemních vod na monitorovaných přítocích, TDS – celkový obsah rozpuštěných látek.

V Durovově diagramu na Obr. 24 jsou znázorněny změny v poměrném zastoupení hlavních aniontů a kationtů, změny pH a celkového obsahu rozpuštěných látek (TDS). Variabilita chemického složení u přítoku **V07** je vysoká. Jedná se o přítok v úvodní části vodovodního přivaděče (metráž 76,5 m) s přímou závislostí na množství atmosférických srážek. Zatímco v jarních měsících je vydatnost tohoto přítoku ve vyšších desítkách ml.s⁻¹, v průběhu léta a podzimu 2015 přítok zcela vyschl (Obr. 25). S postupným vysycháním se u přítoku výrazně zvýšil obsah rozpuštěných látek a to až na trojnásobek původní hodnoty, zvýšil se obsah a zároveň i podíl hydrogenuhličitanů, vápníku a hořčíku. Tento výrazný nárůst obsahu rozpuštěných látek je pravděpodobně dán vyprazdňováním puklin se stagnující vodou v období sucha a také delší dobou potřebnou na odběr vzorku. Nejedná se tedy přímo o změnu chemického složení mělké podzemní vody. Ve srovnání s přítoky V05 a W1565 má přítok V07 v menší poměrné zastoupení vápníku mezi kationty a hydrogenuhličitanů mezi anionty.

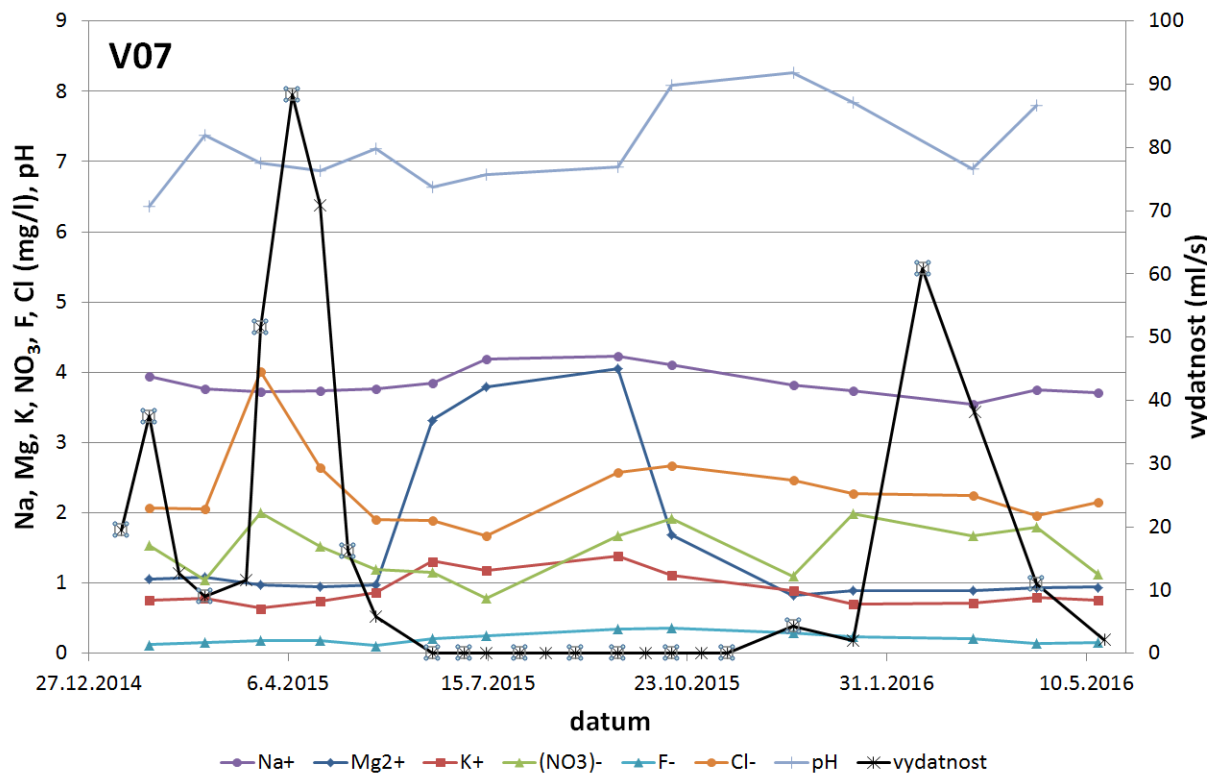
Poměrné zastoupení kationtů v podzemní vodě bylo u přítoků **V05 (226,4 m), W1565 a W2210** stabilní, bez výrazných změn. Z diagramu je patrné pouze mírně zvýšený podíl sodíku a draslíku u přítoku W2210. Variabilita podílu síranů a hydrogenuhličitanů je u přítoků V05 a W2210 obdobná, fluktuace v průběhu roku jsou kromě odlehlých hodnot v rozmezí 15 až 20 meq%. Variabilita poměrného zastoupení aniontů u přítoku W1565 je vyšší, do 30 meq%.

Přítok V05 má celkově vyšší poměrný podíl hydrogenuhličitanů mezi anionty, přítok W2210 má mírně zvýšený podíl hořčíku mezi kationty. Nejnížší hodnoty celkového obsahu rozpuštěných látek (průměrná hodnota 108 mg.l⁻¹) byly zaznamenány u přítoku W2210, nejvyšší hodnoty (průměr 124 mg.l⁻¹) u přítoku V05. pH se u všech přítoků pohybovalo v rozmezí od 6,5 po 8,5, jedná se o podzemní vody s neutrální a slabě zásaditou reakcí.

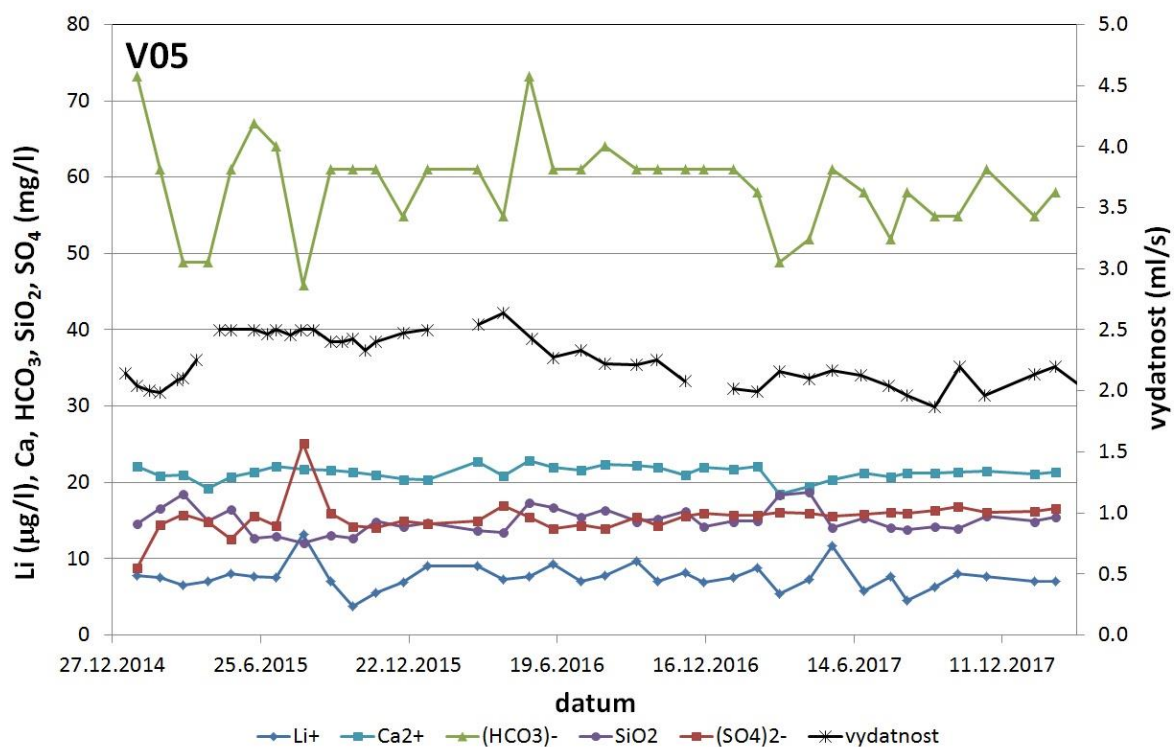
Časový vývoj monitorovaných složek a parametrů podzemních vod je prezentován pro všechny 4 monitorované přítoky v grafech na Obr. 25 až Obr. 33.



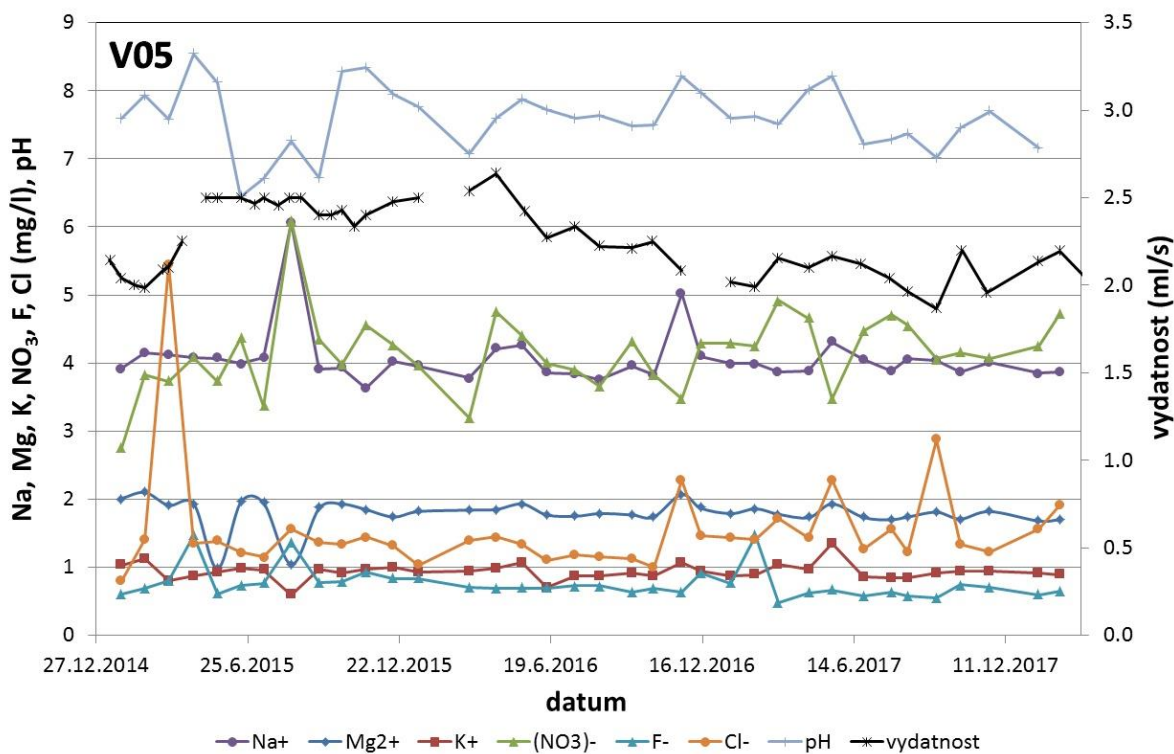
Obr. 25 Časový vývoj vydatnosti, obsahů vybraných iontů a pH v podzemní vodě z přítoku V07, první část.



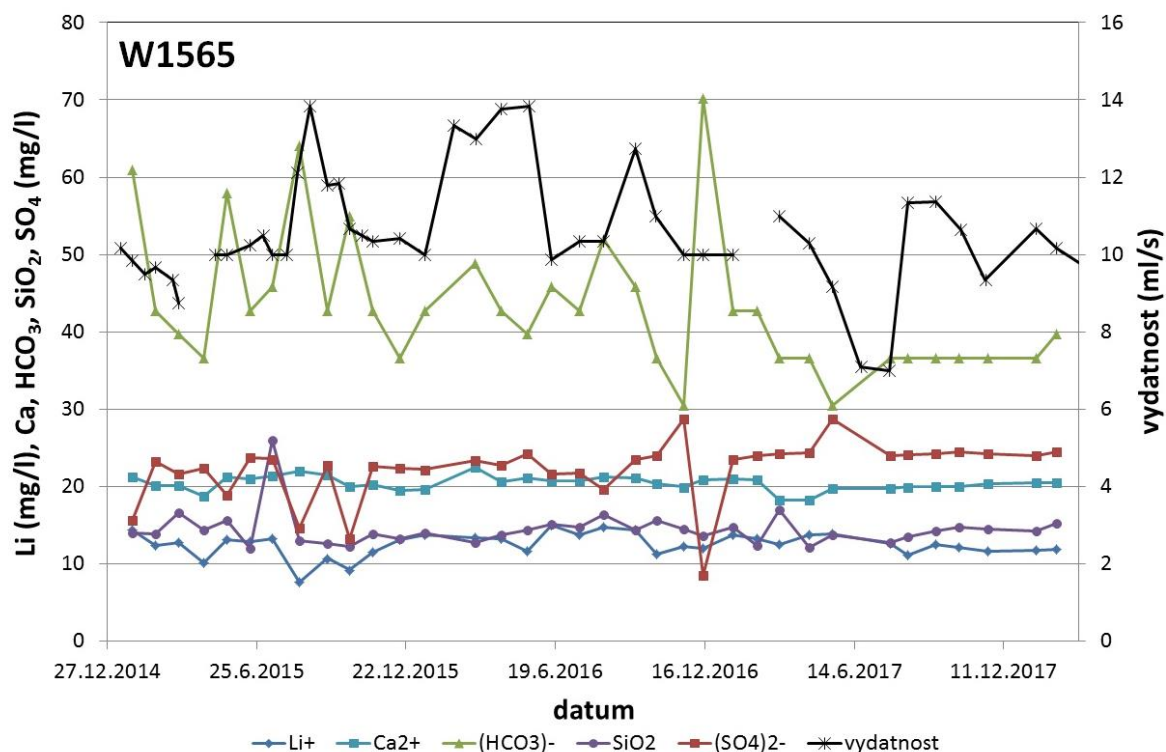
Obr. 26 Časový vývoj vydatnosti, obsahů vybraných iontů a pH v podzemní vodě z přítoku V07, druhá část.



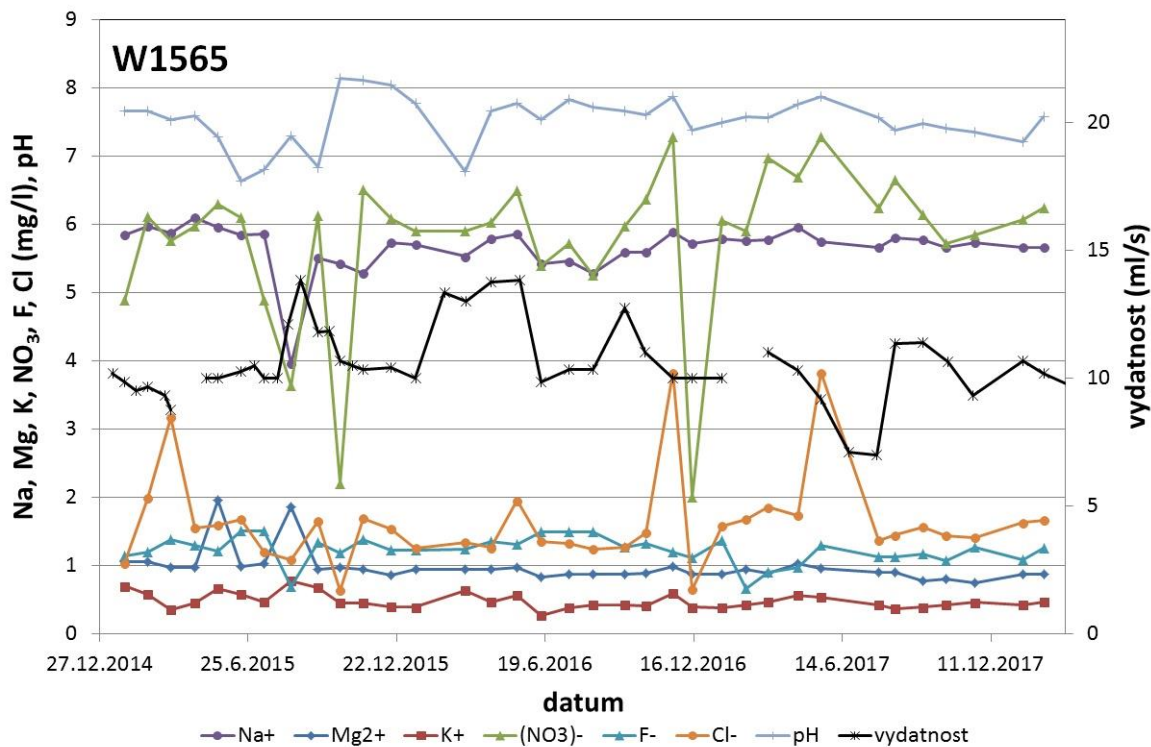
Obr. 27 Časový vývoj vydatnosti, obsahů vybraných iontů a pH v podzemní vodě z přítoku V05, první část.



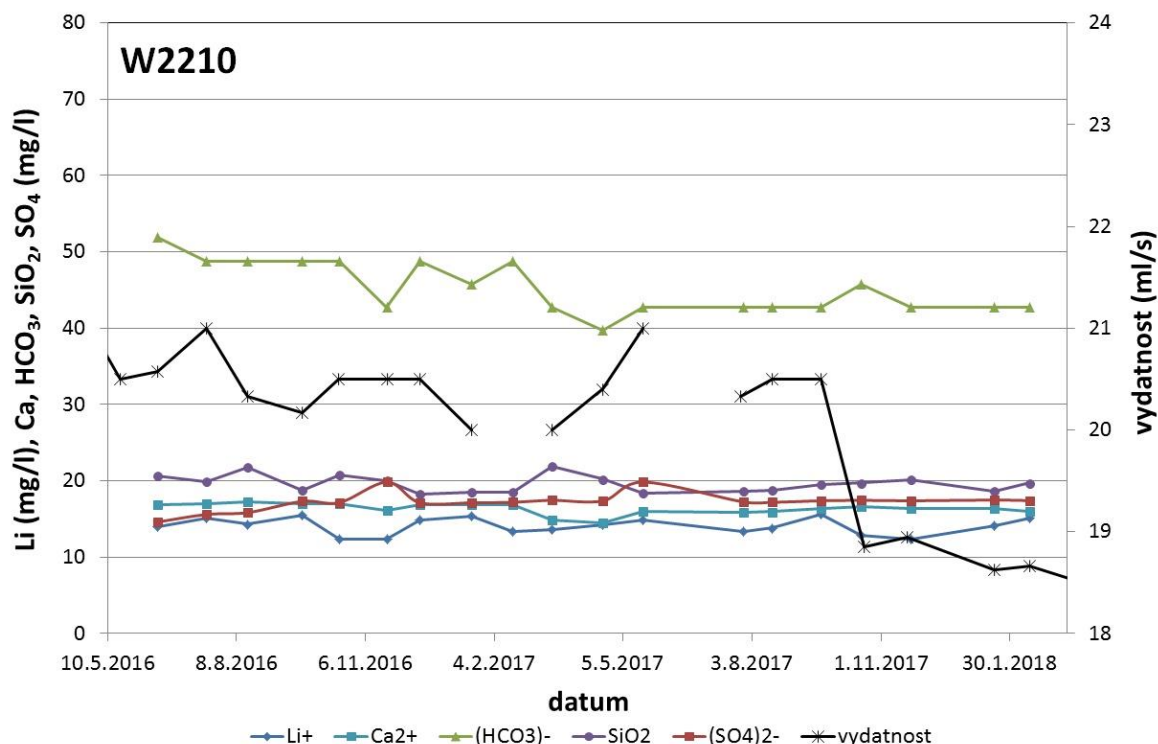
Obr. 28 Časový vývoj vydatnosti, obsahů vybraných iontů a pH v podzemní vodě z přítoku V05, druhá část.



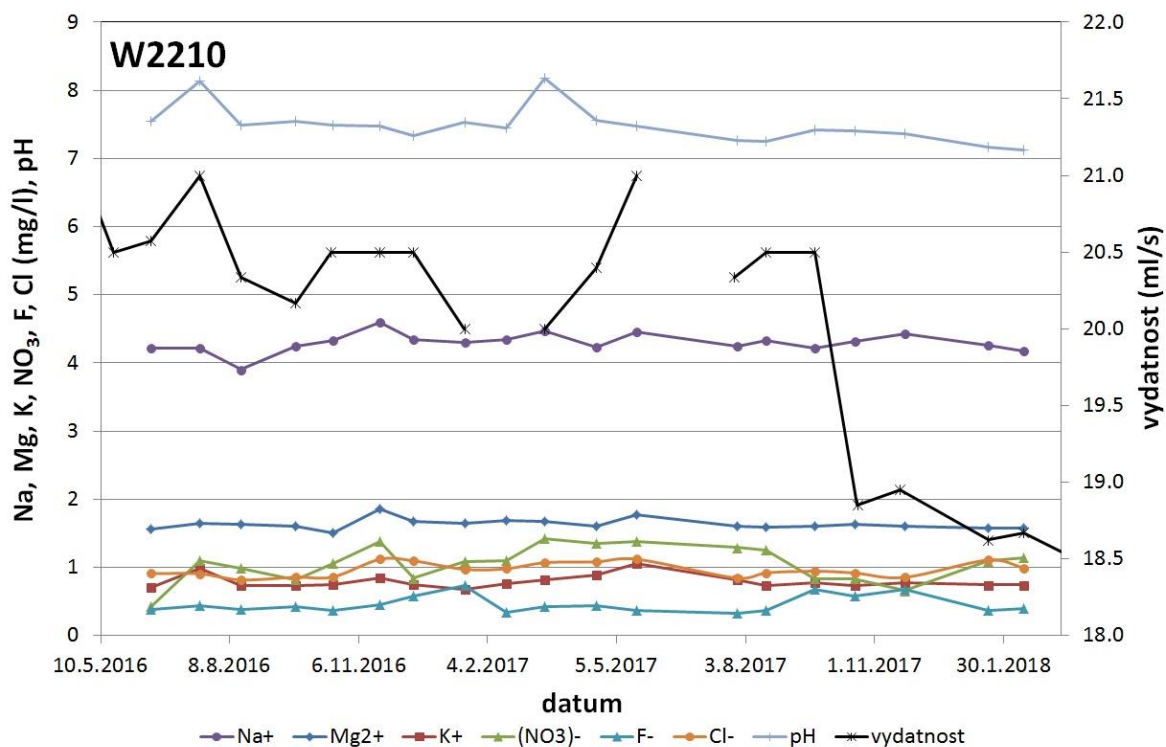
Obr. 29 Časový vývoj vydatnosti, obsahů vybraných iontů a pH v podzemní vodě z přítoku W1565, první část.



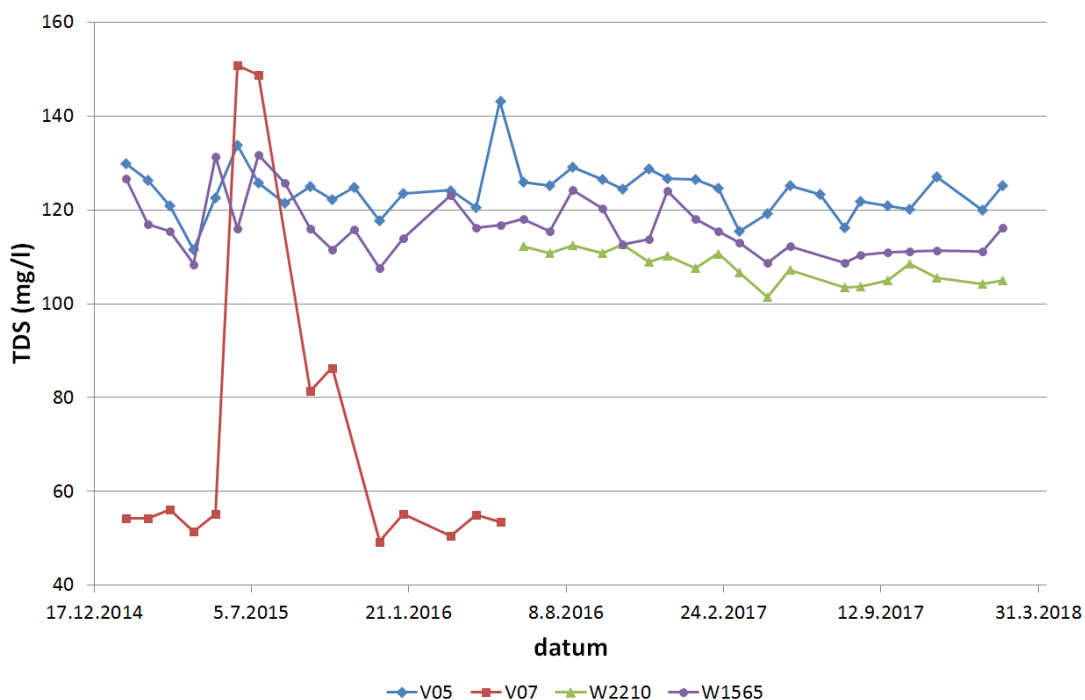
Obr. 30 Časový vývoj vydatnosti, obsahů vybraných iontů a pH v podzemní vodě z přítoku W1565, druhá část.



Obr. 31 Časový vývoj vydatnosti, obsahů vybraných iontů a pH v podzemní vodě z přítoku W2210, první část.



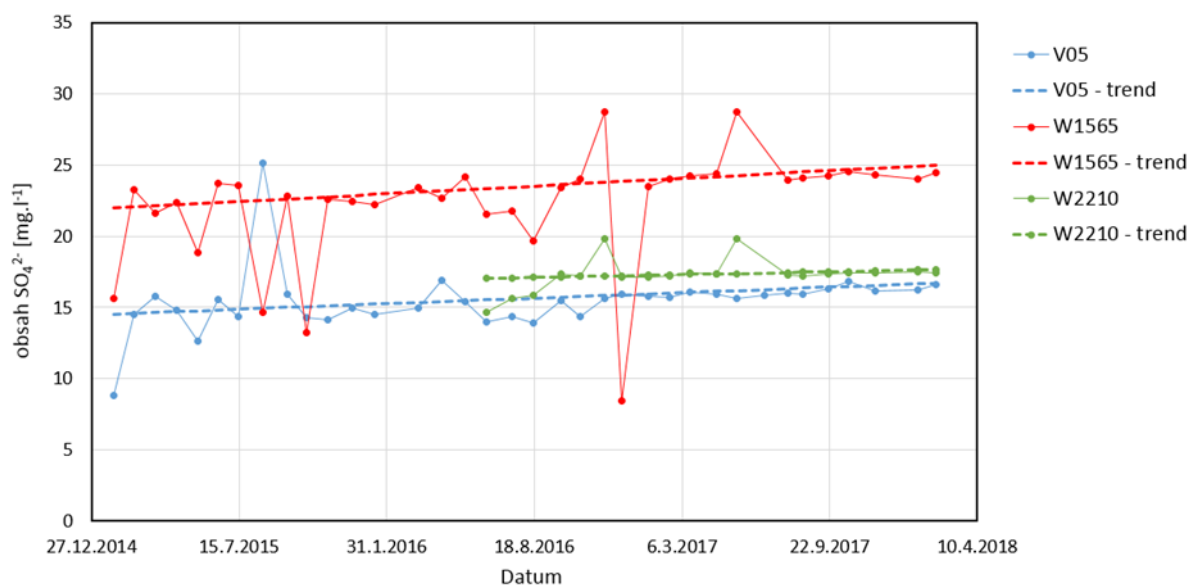
Obr. 32 Časový vývoj vydatnosti, obsahů vybraných iontů a pH v podzemní vodě z přítoku W2210, druhá část.



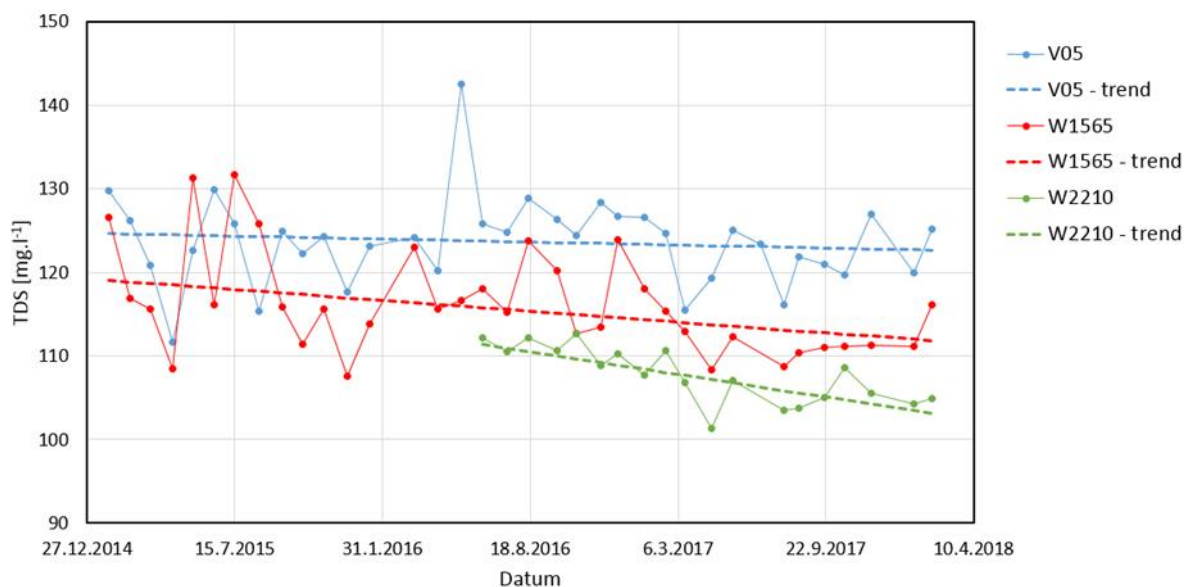
Obr. 33 Časový vývoj celkového obsahu rozpuštěných látek (TDS) u monitorovaných přítoků.

U většiny složek a parametrů podzemní vody u sledovaných přítoků nebyl zjištěn žádný prokazatelný trend vývoje. Ve sledovaném období nedocházelo k trvalému poklesu nebo nárůstu obsahu složek podzemních vod, hodnoty spíše oscilovaly kolem průměrné hodnoty.

Výjimkou byly obsahy síranů a uhličitánů a celkový obsah rozpuštěných látek. U těchto složek se slabý trend nárůstu respektive poklesu projevil. U síranů byl zaznamenán velmi slabý nárůst obsahů v desetinách mg.l^{-1} za rok (Obr. 34), nejvýraznější nárůst byl u přítoku W1565. Celkový obsah rozpuštěných látek (TDS) naopak slabě klesal (Obr. 35), pokles byl výraznější u přítoků W2210 ($4,9 \text{ mg.l}^{-1}$ za rok) a W1565 ($2,4 \text{ mg.l}^{-1}$ za rok). U obou přítoků byl pokles TDS z podstatné části dán poklesem obsahu hydrogenuhličitánů ve vodách.



Obr. 34 Theil-Senův odhad trendu celkového obsahu rozpuštěných látek obsahu SO_4^{2-} v přítocích V05, W1565 a W2210.



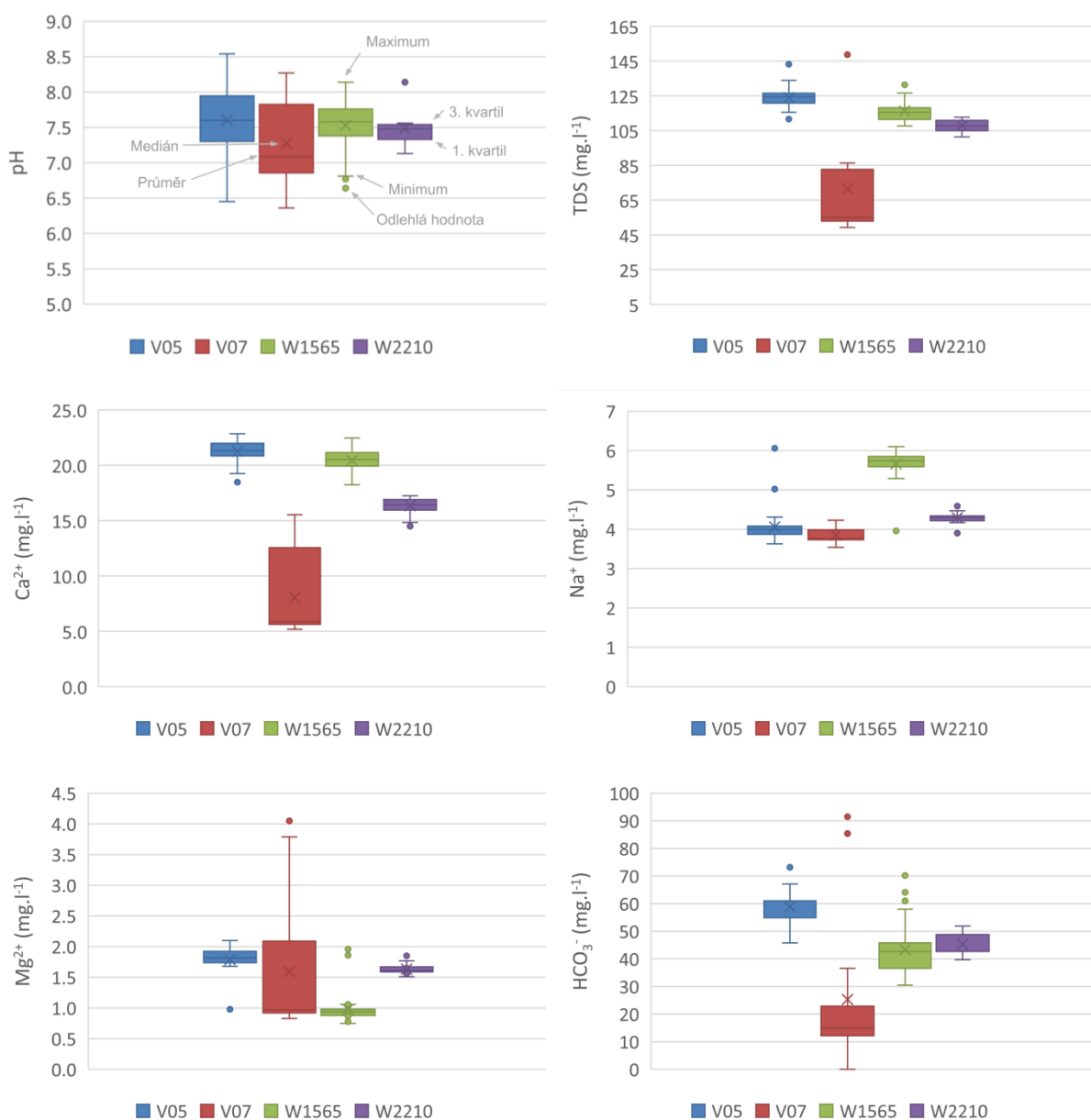
Obr. 35 Theil-Senův odhad trendu celkového obsahu rozpuštěných látek (TDS) v přítocích V05, W1565 a W2210.

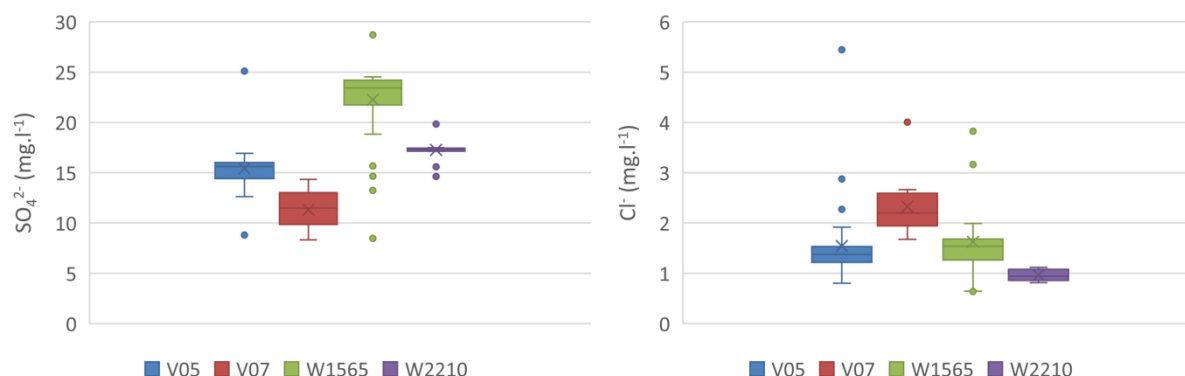
Statistické zhodnocení variability chemického složení monitorovaných přítoků je pro vybrané složky a parametry zpracováno v Obr. 36, Tab. 5, Tab. 6 a Tab. 7. Statistické zpracování dat potvrdilo vysokou stabilitu chemického složení podzemní vody z přítoku W2210. U přítoku V05 je variabilita u některých prvků jen slabě zvýšená ve srovnání s W2210. U obou přítoků předpokládáme vyšší dobu zdržení v granitovém masivu. Variabilita chemického složení i vydatnosti přítoku W1565 v centrální části přivaděče je vyšší. Výše nadožší v místě přítoku W1565 je vyšší ve srovnání s přítoky V05 a W2210. Přítok W1565 leží cca 200 m od středu širší poruchové zóny pod sedlem Jablonecké chaty (viz kapitola 2.5.1) je možné, že je systémem puklin napojen na tuto zónu s rychlejším oběhem podzemních vod.

Pro ilustraci je v Obr. 36 znázorněna i vysoká variabilita přítoku V07, která je dána jeho opakovaným vysycháním.

Pokud srovnáme variabilitu jednotlivých prvků napříč jednotlivými přítoky, k největším změnám obsahů dochází u aniontů, zejména u hydrogenuhličitanů a síranů. Kationty jsou poměrně stabilní, zejména sodík, draslík a hořčík.

Obecně je možné zhodnotit chemické složení podzemních vod ve vodovodním přivaděči Bedřichov jako stabilní bez výrazné variability v čase a bez výrazných trendů. Tato stabilita je dána homogenním prostředím libereckého granitu, který neobsahuje vyšší obsahy sulfidů a karbonátů na poruchových zónách. Pokud bude hlubinné úložiště umístěno v obdobném homogenním prostředí, je možné očekávat pouze malé změny v chemickém složení podzemních vod v jeho okolí.





Obr. 36 Krabicové diagramy vybraných složek a parametrů podzemních vod z monitorovaných přítoků.

Tab. 5 Statistické zhodnocení variability vybraných složek a parametrů podzemní vody, přítok V05

V05	Na⁺	K⁺	Mg²⁺	Ca²⁺	HCO₃⁻	SO₄²⁻	Cl⁻	SiO₂	pH	TDS
	mg.l ⁻¹	mg.l ⁻¹	mg.l ⁻¹	mg.l ⁻¹	mg.l ⁻¹	mg.l ⁻¹	mg.l ⁻¹	mg.l ⁻¹		mg.l ⁻¹
Minimum	3,63	0,59	0,98	18,47	45,80	8,81	0,80	12,10	6,45	111,61
Maximum	6,06	1,35	2,10	22,84	73,20	25,10	5,44	18,70	8,54	143,12
Průměr	4,06	0,94	1,79	21,25	58,89	15,43	1,54	15,01	7,60	124,06
Medián	3,99	0,93	1,81	21,32	61,00	15,62	1,38	14,90	7,60	124,54
Směrodatná odchylka 2σ	0,81	0,24	0,43	1,83	11,83	4,33	1,52	3,19	0,93	10,65
Variační koeficient	0,099	0,127	0,120	0,043	0,100	0,140	0,494	0,106	0,061	0,069

Tab. 6 Statistické zhodnocení variability vybraných složek a parametrů podzemní vody, přítok W1565

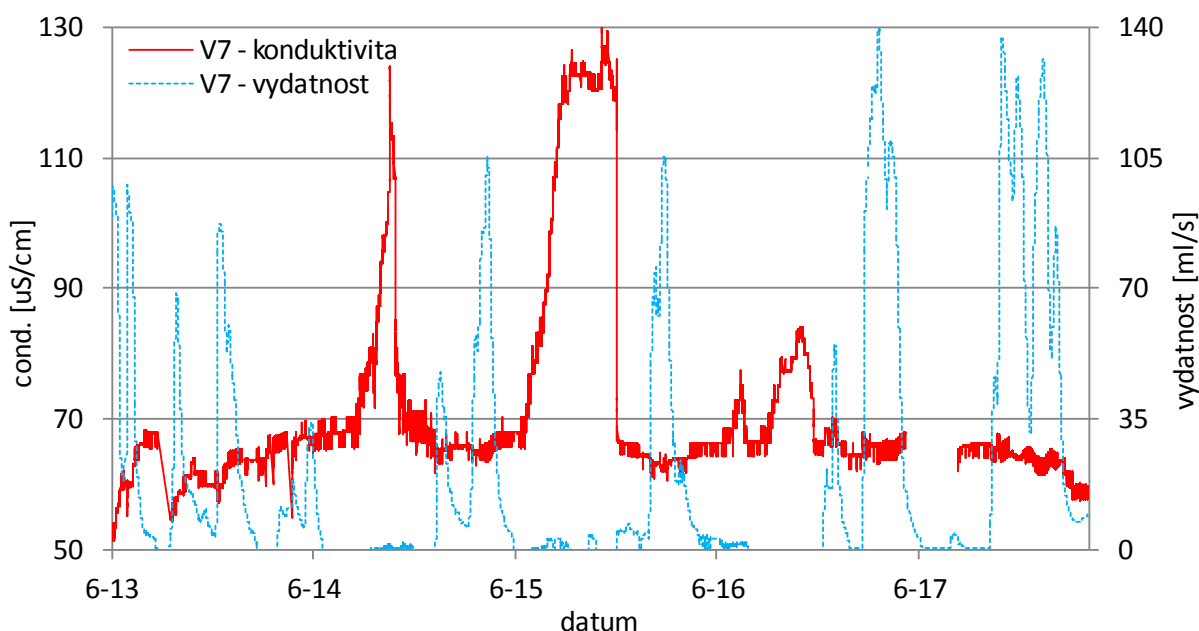
W1565	Na⁺	K⁺	Mg²⁺	Ca²⁺	HCO₃⁻	SO₄²⁻	Cl⁻	SiO₂	pH	TDS
	mg.l ⁻¹	mg.l ⁻¹	mg.l ⁻¹	mg.l ⁻¹	mg.l ⁻¹	mg.l ⁻¹	mg.l ⁻¹	mg.l ⁻¹		mg.l ⁻¹
Minimum	3,96	0,27	0,75	18,23	30,51	8,48	0,64	12,00	6,64	107,61
Maximum	6,10	0,78	1,96	22,46	70,20	28,71	3,83	26,00	8,14	131,69
Průměr	5,66	0,48	0,98	20,44	43,24	22,27	1,63	14,46	7,53	116,29
Medián	5,74	0,45	0,94	20,51	42,70	23,44	1,54	14,20	7,58	115,55
Směrodatná odchylka 2σ	0,69	0,22	0,48	1,82	17,91	7,79	1,36	4,65	0,70	12,29
Variační koeficient	0,061	0,231	0,246	0,045	0,207	0,175	0,417	0,161	0,046	0,132

Tab. 7 Statistické zhodnocení variability vybraných složek a parametrů podzemní vody, přítok W2210

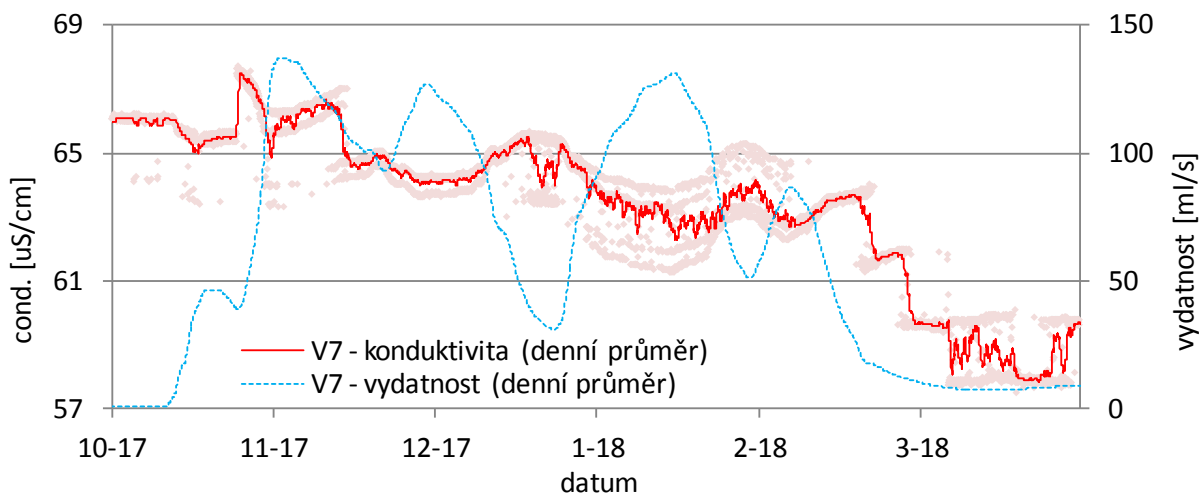
W2210	Na⁺	K⁺	Mg²⁺	Ca²⁺	HCO₃⁻	SO₄²⁻	Cl⁻	SiO₂	pH	TDS
	mg.l ⁻¹	mg.l ⁻¹	mg.l ⁻¹	mg.l ⁻¹	mg.l ⁻¹	mg.l ⁻¹	mg.l ⁻¹	mg.l ⁻¹		mg.l ⁻¹
Minimum	3,90	0,68	1,51	14,50	39,70	14,63	0,82	18,20	7,13	101,38
Maximum	4,59	1,05	1,85	17,24	51,90	19,84	1,12	21,90	8,18	112,69
Průměr	4,29	0,79	1,63	16,35	45,28	17,27	0,97	19,61	7,49	107,77
Medián	4,30	0,75	1,61	16,43	42,71	17,32	0,94	19,70	7,48	107,66
Směrodatná odchylka 2σ	0,28	0,18	0,15	1,42	6,64	2,31	0,20	2,19	0,52	6,68
Variační koeficient	0,032	0,117	0,046	0,044	0,073	0,067	0,105	0,056	0,035	0,082

2.5.3 Automatické měření konduktivity

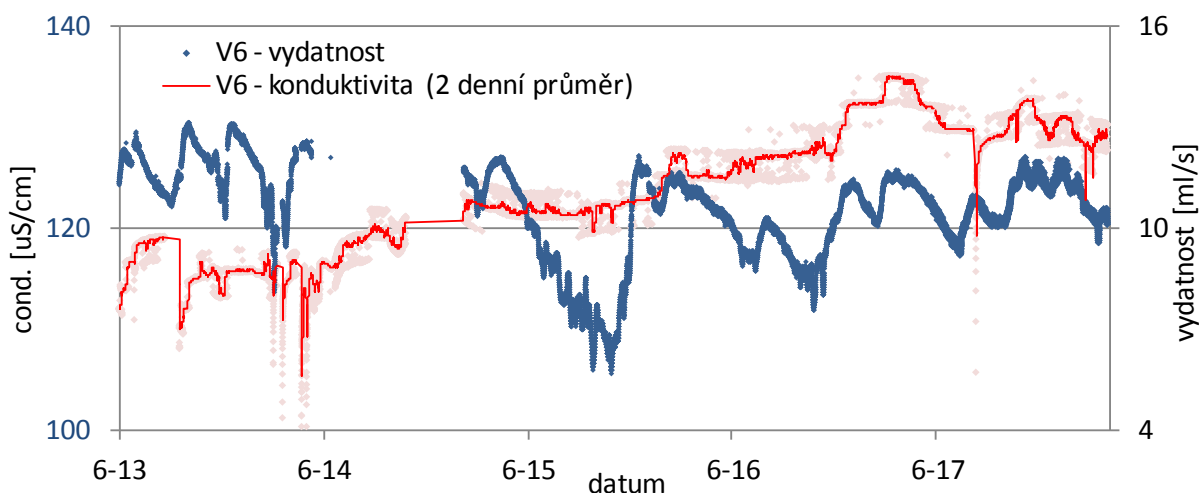
Vývěry V6 a V7 byly od poloviny roku 2013 osazeny automatickým záznamem konduktivity ze sond Greisinger. Velké výchyly (směrem nahoru) naměřených hodnot konduktivity u V7 v období sucha (viz Obr. 37, 2. pololetí 2014 i 2015, částečně pak podzim 2016) opět nelze přičítat změně složení podzemní vody, spíše pak výplachu puklin a „zahušťování“ zbylého roztoku v měrné nádobě odparem vody. V detailnějším grafu pro rok 2017 a začátek roku 2018 (Obr. 38) lze sledovat očekávané protichůdné trendy konduktivity proti změnám průtoku (12/2017-02/2018), nicméně v závěru sledovaného období s průtokem klesala i konduktivita. Vztah mezi vydatností a konduktivitou u vývěru V6 není jednoduchý – v prvním období lze pozorovat negativní korelaci okamžitých hodnot, vedle toho může být dlouhodobý efekt v různém časovém měřítku, např. nárůst konduktivity v posledních dvou letech jako efekt nižších průtoků v letech 2015 a 2016, což by i odpovídalo době zdržení 3-4 roky určené přirozenými stopovači.



Obr. 37 Časový vývoj konduktivity v porovnání s vydatností vývěru V7.



Obr. 38 Časový vývoj konduktivity v porovnání s vydatností vývěru V7 – detail posledních 6 měsíců.



Obr. 39 Časový vývoj konduktivity v porovnání s vydatností vývěru V6.

2.6 Modelování transportu stopovačů

Modelování přirozených stopovačů, izotopů ^{18}O a ^2H , bylo provedeno v softwaru sdružených parametrů FLOWPC (Maloszewski a Zuber, 1996) a v numerickém simulačním softwaru proudění a transportu Flow123d (TUL 2017) pomocí 2D modelu. Automatická kalibrace byla provedena pomocí softwaru UCODE (freeware vyvinutý americkou geologickou službou USGS) (Poeter and Hill, 1998).

Použitý software FLOWPC umožňuje odhadnout dobu transportu stopovače z povrchu do tunelu za použití konvolučního integrálu. Odhaduje se doba transportu – pohybu molekul vody z povrchu do tunelu. Pro výpočet byl použit disperzní model, který vedl na nejlepší výsledky. Vstupními daty jsou měřené hodnoty koncentrací stopovačů ve srážkách z 5 kilometrů vzdálené srážkoměrné stanice povodí Uhlířská (ukázka průběhu koncentrace srážek v rámci Obr. 20), která je součástí mezinárodní sítě IAEA měřící stabilní izotopy vodíku a kyslíku ve srážkách (GNIP) – IAEA(2015). Vstupní časová řada stabilních stopovačů je vážena pomocí odhadu infiltrace ze srážek, sněhové pokrývky a odtoku z povodí. Voda s danou koncentrací stopovače je během zimy zachycena ve sněhové pokrývce a v jarních měsících je v korelaci s odtokem z povodí opět uvolněna.

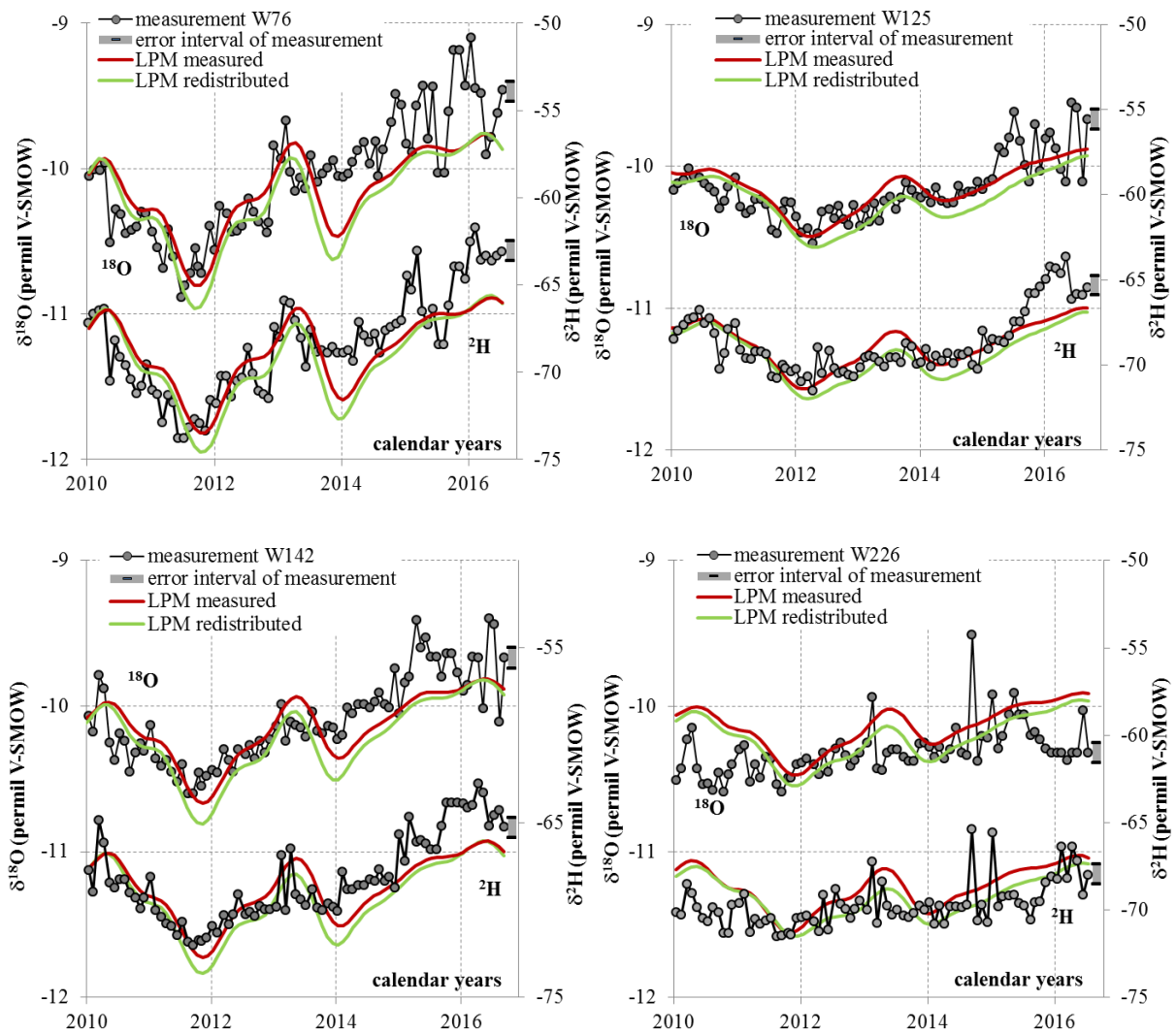
Za poslední období byla provedena hlubší analýza čtyř vybraných mělčích pramenů V7 (W76), V1 (W125), V6 (W142) a V5 (W225) s pozorovatelným sezónním trendem. Modelovaná časová řada měření byla rozšířena do října 2017. Pomocí automatické kalibrace softwaru UCODE byly získány hodnoty doby zdržení (TT) v rozsahu 21-35 měsíců. Tyto hodnoty jsou nižší než hodnoty uváděné v předchozí zprávě (32-42 měsíců), nicméně jsou stále v řádu získané z modelování CFC a tritia-helia v předchozí kapitole (2.4.1). Mírně jiné hodnoty TT mohou být ovlivněny delší časovou řadou měření a lepší přesností modelování. Modely sdružených parametrů byly provedeny s variantou s čistým měřením koncentrace a s koncentrací redistribuovanou ze sněhové pokrývky do jarního tání. Obecně byl koeficient shody (NSE – Nash-Sutcliffe koeficient) nižší u redistribuovaných variant, což může indikovat nedokonalost redistribuce koncentrace ze sněhu do tání (Tab. 8). Z grafů Obr. 40 je vidět, že obě metody zachytily obdobně trend i sezonní variace měření. Hůře bylo zachyceno snížení

koncentrace v létě 2014 a stoupající trend měření po tomto propadu. Na první pohled je modelem dobře zachaceno měření vývěru V1 (W125) s nejvyšší hodnotou NSE=0,59 pro variantu bez redistribuce. Vývěr V5 (W226), který má ustálenější charakter koncentrace a je nejhlouběji, nezachycuje trend měření ale pouze rozsah s hodnotami okolo nuly s nejvyšším NSE=0,04. Vývěry V7 (W76) a V6 (W142) postihují dobře sezónní charakter s nejvyšším NSE=0,57 respektive 0,59, ale od léta 2014 model na první pohled vykazuje podhodnocené hodnoty.

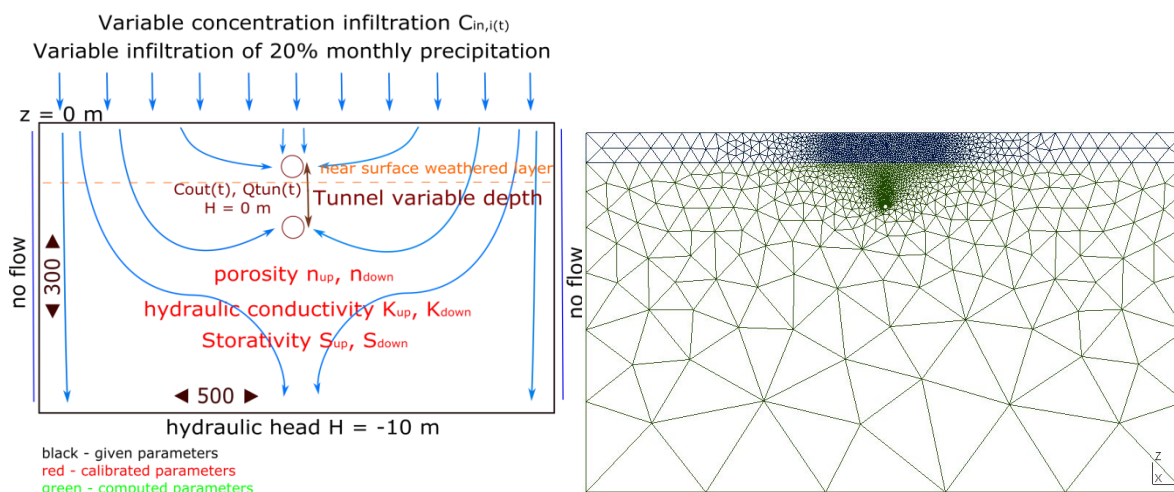
Numerický model byl uvažován jako 2D plocha o rozměrech 300 × 500 m s tunelem uprostřed modelu s různou hloubkou. Při povrchu byla uvažována propustnější přípovrchová zóna. Všechny geometrické a okrajové podmínky jsou zobrazeny na obrázku (Obr. 41)

Tab. 8 Výsledky kalibrace modelu vývěrů V7, V1, V6 a V5 v softwaru FLOWPC.

	Označení vývěru	W76		W125		W142		W226	
	Druh stopovače	d ¹⁸ O	d ² H	d ¹⁸ O	d ² H	d ¹⁸ O	d ² H	d ¹⁸ O	d ² H
Měřené srážky	TT [month]	22,2	22,2	33,8	31,8	26,3	25,1	33,7	31,9
	Dispersní par.	0,159	0,132	0,121	0,129	0,156	0,144	26,1	19,6
	σ pro ¹⁸ O; σ/8 pro ² H	0,279	0,234	0,144	0,135	0,189	0,18	0,2	0,22
	NSE	0,514	0,576	0,573	0,593	0,584	0,598	<0	0,04
Redistribuované srážky	TT [month]	21,2	21,4	34,7	32,4	25	24,4	34,7	35,1
	Dispersní par.	0,169	0,136	0,123	0,13	0,165	0,154	22,5	17,0
	σ pro ¹⁸ O; σ/8 pro ² H	0,306	0,251	0,18	0,162	0,225	0,209	0,23	0,239
	NSE	0,409	0,506	0,362	0,44	0,419	0,492	<0	<0



Obr. 40 Výsledky kalibrace vývěřů V7 (W76), V1 (W125), V6 (W142) a V5 (W226) v softwaru FLOWPC. Porovnání vstup koncentrace ze srážek (červená čára) s redistribucí koncentrace ze sněžové pokrývky do jarního tání (zelená čára).



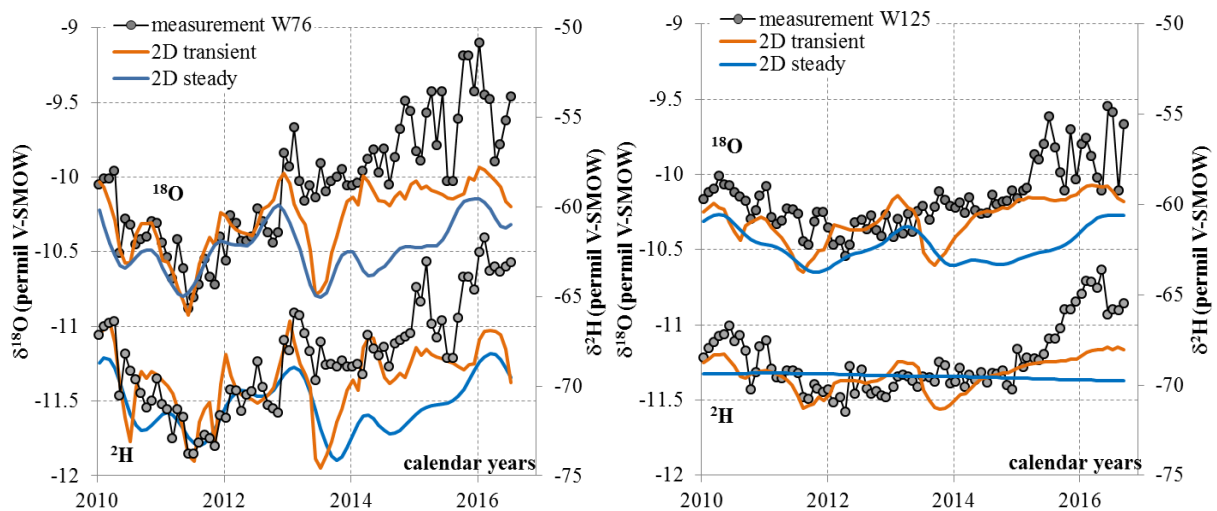
Obr. 41 Gemotrické parametry a okrajové podmínky 2D numerického modelu (vlevo); ukázka diskretizace úlohy pro hlubší vývěr (vpravo).

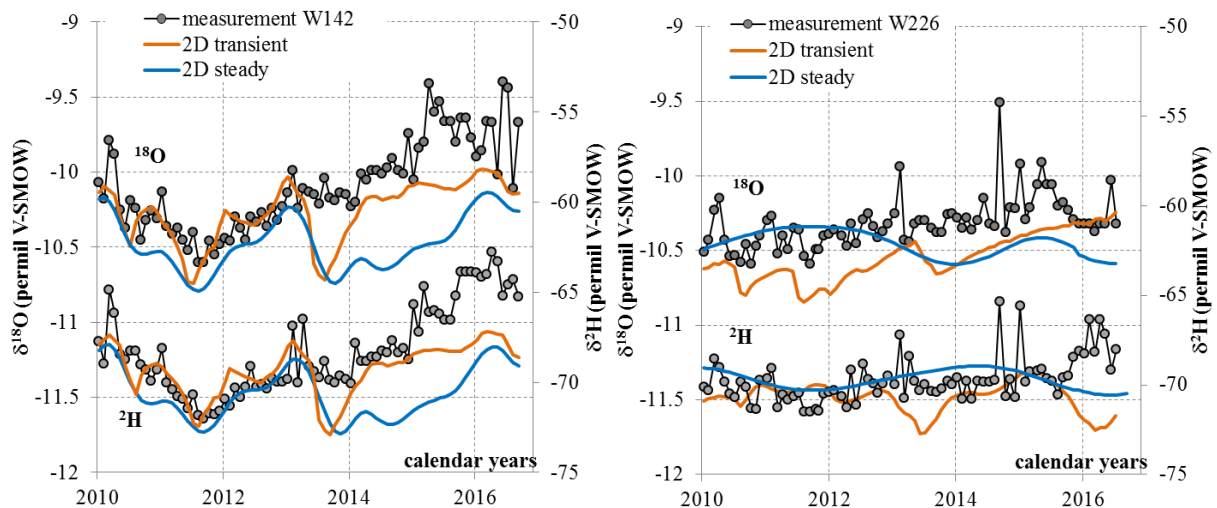
U 2D numerického modelu byla uvažována varianta s ustálenou hydraulikou a varianta s transientním tokem. V prvním kroku byla provedena softwarem UCODE nejdříve kalibrace hydrauliky na měřené hodnoty průtoku ve vývěru a poté kalibrace transportu na měřené hodnoty koncentrací ve vývěru. U transportu byly kalibrovány hodnoty porozity a disperzivity a byla zjištěna hodnota doby zdržení (TT) určená jako těžiště průnikové křivky koncentrace. Obecně jsou hodnoty TT z numerického modelu vyšší než hodnoty u modelu sružených parametrů. Nicméně odpovídají nastavení a možnostem 2D numerického modelu. Kalibrační kritérium je obecně nižší než u modelu sružených parametrů, přesto je stále v dobrých hodnotách vzhledem ke složitosti numerického modelu (Tab. 8). Z Obr. 42 je vidět, že pro vývěry V7 (W76) a V6 (W142) model zachytil trend měření velice dobře do léta 2014 a poté má nižší hodnoty, přičemž transientní varianta modelu se k měřením téměř přiblížila. U pramene V5 (W226) bylo dosaženo lepší shody modelu s měřením pro transientní proudění, kdežto u ustálené varianty nejsou výsledky dobré. Dokonce pro stopovač vodíku software UCODE nakalibroval jako nejlepší výsledek jednu ustálenou hodnotu. Pro V1 (W125) jsou výsledky obdobné jako pro V5 (W226) s tím, že ustálená varianta byla kalibrována do tvaru jedné sinusoidy přes celý měřený interval. Obecně numerický model dal nový pohled na vývěry.

Tab. 9 Výsledky kalibrace modelu vývěrů V7 (W76), V6 (W142), V1 (W125) a V5 (W226) v softwaru FLOW123d.

	Označení vývěru	W76		W125		W142		W226	
		d ¹⁸ O	d ² H	d ¹⁸ O	d ² H	d ¹⁸ O	d ² H	d ¹⁸ O	d ² H
2D ustálený	Porozita [-]	0,086	0,1	$4,8 \times 10^{-4}$	1×10^{-3}	0,099	0,099	0,032	0,046
	α_L [m]	9,921	1,148	10 (max)	10 (max)	10 (max)	10 (max)	3,99	0,074

	σ u ^{18}O ; $\sigma/8$ u ^2H	0,536	0,405	0,361	0,245	0,457	0,384	0,223	0,131
	NSE	<0	<0	<0	<0	<0	<0	<0	<0
	TT [měsíce]	75	94	263,41	370,3	171,5	171,5	215,77	275,85
	Pozice maxima [měsíce]	7	9	34	72	20	20	52	73
2D neustálý	Porozita [-]	0,063	0,078	$1,21 \times 10^{-4}$	$1,47 \times 10^{-4}$	0,038	0,039	0,013	0,022
	α_L [m]	2,115	1,141	6,34	5,496	4,9	5,6	10 (max)	10 (max)
	σ u ^{18}O ; $\sigma/8$ u ^2H	0,37	0,316	0,216	0,186	0,277	0,249	0,274	0,176
	NSE	0,136	0,222	<0	0,265	0,125	0,314	<0	<0
	TT [měsíce]	61	115,4	95,5	114,3	95,5	114,3	105	172,64
	Pozice maxima [měsíce]	6	4	10	12	10	12	19	36,5





Obr. 42 Výsledky kalibrace vývěřů V7 (W76), V1 (W125), V6 (W142) a V5 (W226) v softwaru flow123d. Porovnání dvou variant modelů – model s ustálenou hydraulikou a model s neustálenou hydraulikou.

2.7 Vyhodnocení

Vyhodnocení měřených dat vydatností průsaků, hydrochemie a přirozených stopovačů, v kontextu dalších hydrologických a meteorologických dat na povrchu, je komplexním úkolem, zahrnujícím širokou paletu jevů a vazeb, které se v naměřených datech dílčím způsobem projevují. Z důvodu nejistot měření může být řada jevů, projevujících se jen nepatrnými změnami, nepozorovatelná. Naopak více různých indicií k jednomu jevu může být navzájem v rozporu (např. doba zdržení podle stopovačů, podle vydatnosti a podle chemismu).

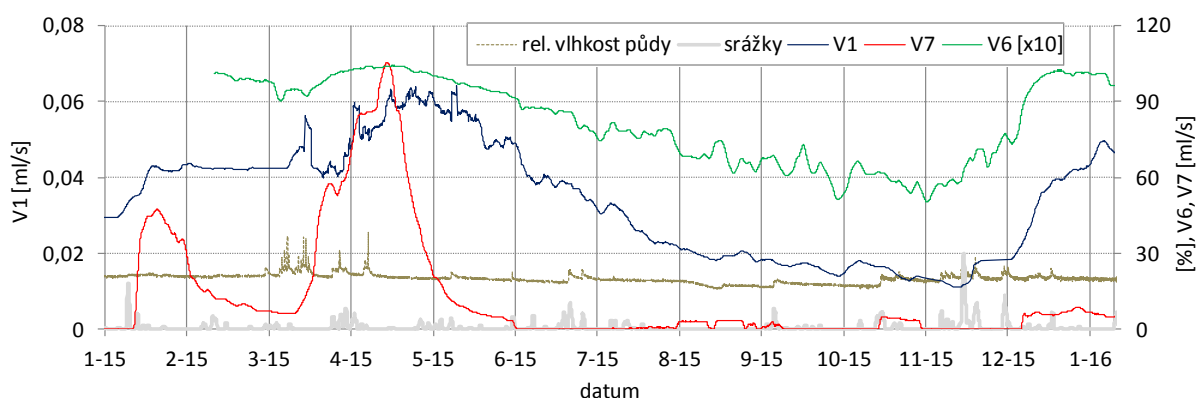
Některé vzájemné vazby v datech, charakterizující hydraulické chování, jsou prezentovány v následujících grafech. Jde o analýzu mechanismů ovlivňujících kolísání vydatnosti, která navazuje na závěry z monitoringu v rámci dřívějšího projektu (Hokr et al. 2014).

Na Obr. 43, Obr. 44 a Obr. 45 jsou zobrazeny reakce mělkých vývěřů (V1, V6 a V7) na infiltrace (zachycené měřením srážek a půdní vlhkosti). Dle dosavadní interpretace vydatnost přímo reaguje na epizody nebo období zvýšené infiltrace. Okamžik první reakce je v řádu jednoho dne a podle podmínek u všech bodů synchronně nebo s mírnými rozdíly. Je možné, že záleží na předchozí saturaci – pokud V7 neroste z nuly, tak reaguje rychleji (2/2016, přelom 10-11/2017), pokud byla V7 suchá, reagují nejdříve V1 a V6, byť tento nárůst je obvykle pozvolný (např. 12/2015, 2/2017, 10/2017). Lze také najít případy, kdy reaguje jen některý z bodů průsaku (7/2017).

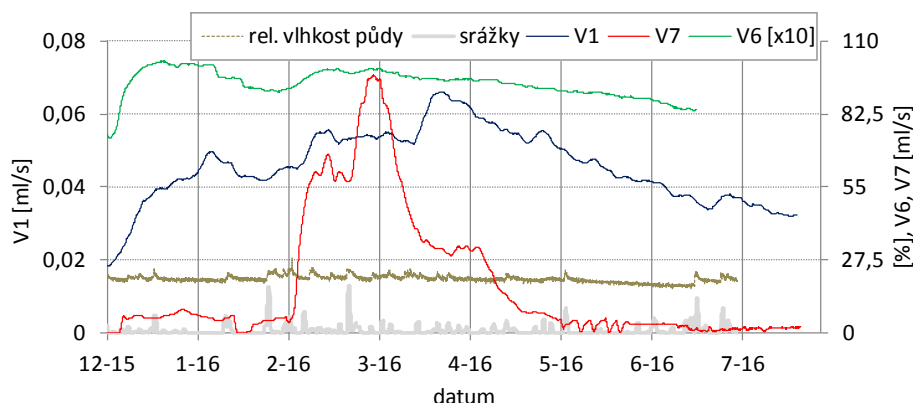
Data z nově umístěné danaidy umožnila doplnit tyto reakce o vývěř V5 (viz Obr. 45). Ten, ač vykazuje dlouhodobou stabilitu průtoku, také kombinuje sezónní cykly s krátkodobými odezvami na infiltrace (patrné z vykreslení vydatnosti V5 na samostatné ose na Obr. 45).

Na Obr. 46 je znázorněn časový vývoj vydatností průtoků na vývěř W2313 v porovnání s časovým průběhem srážek a výškou hladiny v nádrži Josefův Důl. Průsak může být řízen kombinací přímého hydraulického efektu výšky hladiny vody v nádrži a aktuální infiltrace ze srážek (proto je do grafu doplněn vývěř V7, reagující na srážky). Tyto dva jevy není možné

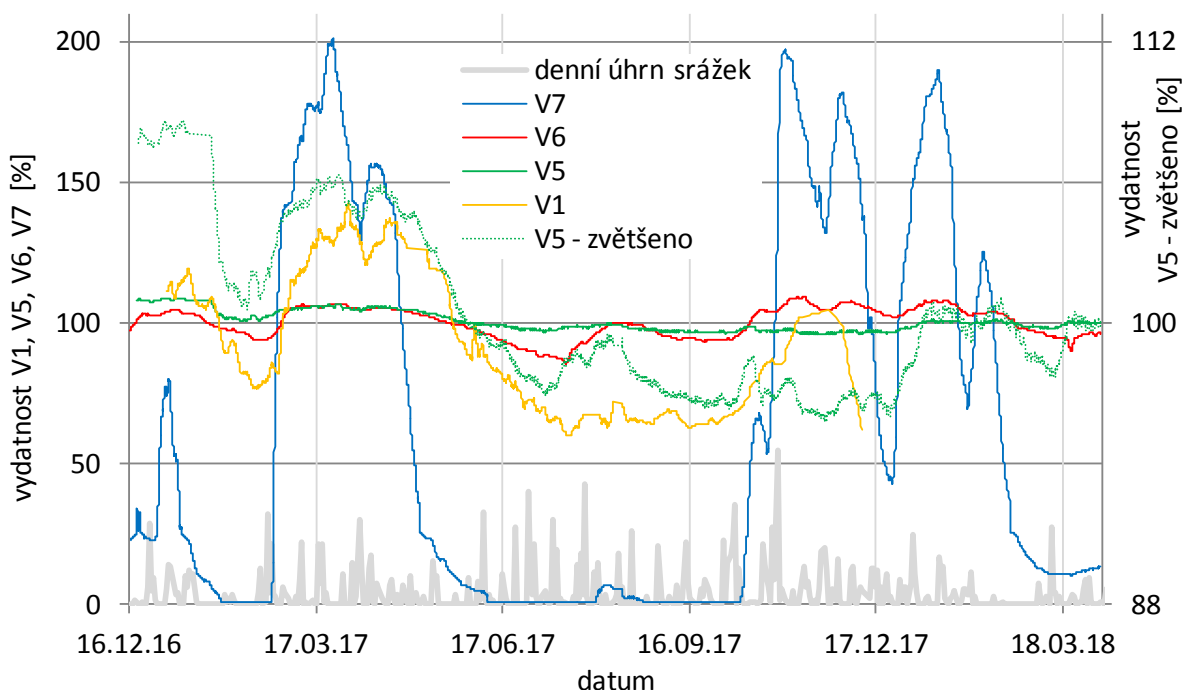
plně odlišit, neboť srážkové epizody či delší období srážek/sucha se projeví na hladině v nádrži jen z části, a to z důvodu umělé manipulace s odtokem. Obecně vydatnost vývěru W2313 koreluje s výškou hladiny v nádrži při jejím poklesu v bezsrážkovém období či při jejím nárůstu. Dále pak lze najít případy, kdy při soustavně klesající (či setrvalé) hladině v nádrži vývěry reagovaly na srážky (2-3/2015; 1/2018 – kombinace s oblevou), tak případy, kdy nereagovaly (10/2015, 11/2017; 1/2017 – kombinace s oblevou). Kromě toho ještě dochází k občasným nevysvětleným krátkodobým zvýšením průtoků, který není provázen zvýšením hladiny v nádrži či odezvou vývěru V7 (3/2014, 8/2015, 11/2016).



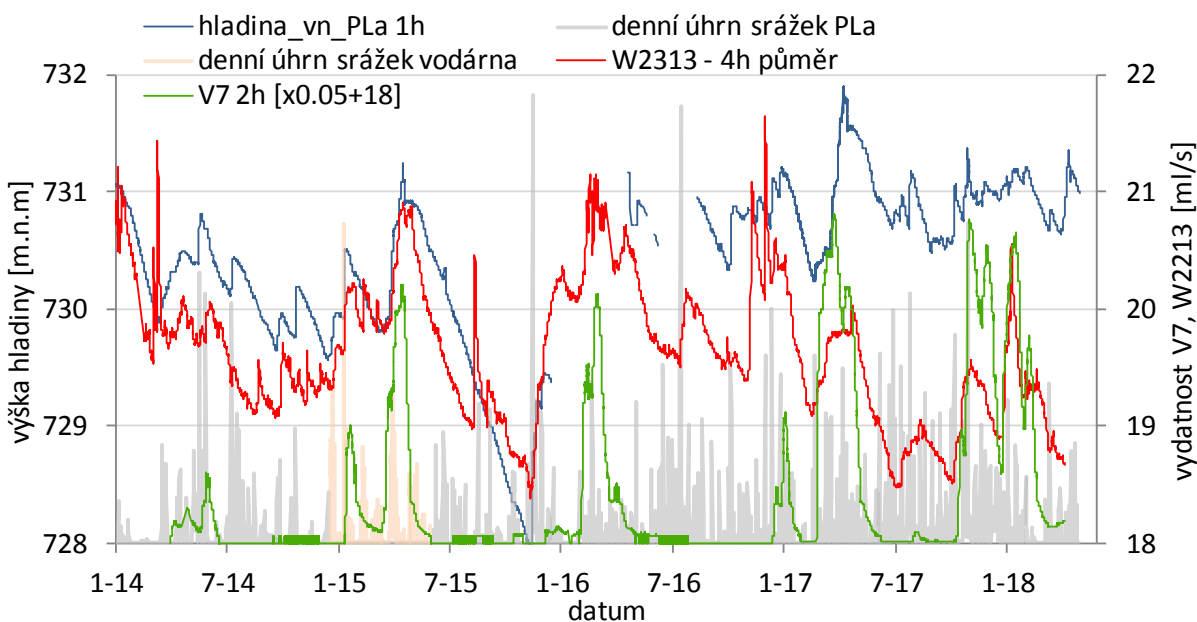
Obr. 43 Srovnání reakcí vývěrů V1, V7 a V6 na srážkové události (2015).



Obr. 44 Srovnání reakcí vývěrů V1, V7 a V6 na srážkové události (2016).



Obr. 45 Srovnání relativních změn vydatností vývěrů v mělké části štoly v reakci na srážkové události (2017). Pro V1, V7: $100\% = (\max. \text{průtok} + \min. \text{průtok})/2$; pro V5, V6: $100\% = \text{průměr průtoků za dané období}$.



Obr. 46 Časový vývoj vydatnosti vývěru W2313 ve srovnání s výškou hladiny ve vodní nádrži Josefův Důl (data z Povodí Labe) a denním úhrnem srážek (data z povodí Labe v kombinaci s meteostanicí v areálu vodárny Bedřichov). Srážky jsou vyznačeny proporcionálně bez absolutních hodnot. Pro doplnění je znázorněn též vývoj vydatností na vývěru V7 (s rychlou odezvou na infiltraci).

Uvedená pozorování a vyhodnocení průběhů potvrzují hydrogeologický model propustné přivodkové zóny a pevného masivu přerušeno vertikálními propustnými zónami. Variace

vydatnosti průsaků, jako efekt hydraulického rozdílu mezi vertikální polohou tunelu a hladinou podzemní vody nad danými místem odpovídají kolísání hladiny v rozsahu připovrchové zóny do hloubky cca 30 m, kromě míst s mokřady (nad metráží 1700 m – V4) a hydraulické komunikace s řízenou hladinou nádrže. Pro úplné vyhodnocení ale chybí právě přímé měření hladiny podzemní vody.

Vydatnost průsaku je v přímém vztahu jednak s hydrostatickým tlakem v dané hloubce (podléhající časovým změnám), jednak propustností horniny. Prostorová nehomogenita průsaku vypovídá o nehomogenitě propustnosti masivu. Tato data byla v rámci projektu získána jednak jako porovnání hodnot jednotlivých vývěřů, jednak měřeními ve sběrném kanále. Obecným problémem měření je zachycení průsaku, který může být v různé míře soustředěný nebo rozptýlený. V rámci projektu byla aplikována různá řešení, která je možno v obdobné formě vidět i v zahraničních podzemních laboratořích (trubka z vrtu, zapuštěný žlábek ve stěně, plachta) a jim odpovídající metody měření průtoku zahrnující i vlastní vývoj.

Zjištěné doby zdržení (stáří) podzemní vody jsou v rozmezí jednotek až prvních desítek let. Stáří vod v mělkém úseku tunelu (do metráže 200 m, hloubky 40 m) bylo určeno stabilními izotopy ^2H a ^{18}O , stáří ostatních vývěřů pak pomocí tritia, helia (v rámci jiného projektu) a freonů. Stopovače udávají spíše širší intervaly časů, ty jsou ale vzájemně konzistentní. Lokalita a podmínky odběru jsou částečně omezující – některé vývěry nelze vzorkovat bez kontaktu s atmosférou (což je podmínka dostupných typů přirozených stopovačů pro potřebné rozsahy stáří) a nelze použít SF_6 , který by byl jinak průběhem v relevantním časovém období vhodný, kvůli neatmosférickým zdrojům (kontaminaci)

Kombinace dat hydrauliky a stopovačů umožňují odhadnout objem mobilní vody v hornině, což by v ideálním případě porézního prostředí odpovídalo pórovitosti. Použití 2D numerického modelu pro interpretaci poskytlo hodnoty jednak pro porušené zóny v podobě hodnoty pórovitosti, jednak pro jednotlivé pukliny jako hodnoty rozevření.

Hodnoty měrné elektrické vodivosti se ukázaly jako další velmi dobrý indikátor doby zdržení (hloubky oběhu) podzemní vody v horninovém prostředí včetně možnosti lokalizace přítoku po zlomu. Přítoky s delší dobou zdržení vod v masivu na základě odhadu ze stopovačů měly výrazně vyšší měrnou elektrickou vodivost.

Pro určení rychlosti pohybu vody jako vstupu do hodnocení bezpečnosti HÚ mají jednotlivá měření značnou nejistotu, ale výhodou je možnost jejich sourného vyhodnocení (hydrauliky, stopovačů, chemismu), které může představu i kvantitativní určení hodnot významně zpřesnit.

3 Monitoring posunů puklin

Autoři: M. Rowberry, X. Martí

Primárním účelem hlubinných geologických úložišť radioaktivního odpadu je trvalé uložení vyhořelého paliva z jaderných reaktorů. Přestože monitorování puklin představuje důležitý přínos pro již zavedený obor geomechaniky i pro nově vznikající oblast monitorování zdravého stavu konstrukcí, stále se nedostává přímého experimentálního monitorování puklin prováděného v podzemních laboratořích. Překonání těchto nedostatků pomůže zajistit bezpečné uložení budoucího radioaktivního odpadu, které bude v souladu s nařízeními týkajícími se jaderné bezpečnosti, ochrany lidského zdraví i životního prostředí.


V této části zprávy představujeme nástin nových automatizovaných systémů, které byly instalovány během obnovy a modernizace infrastruktury – souhrnný a vyčerpávající popis systému naleznete v příloženém metodologickém dokumentu - a analýzu dat z monitorování posunů puklin v tunelu v Bedřichově, jež byla pořízena v období od září 2015 do března 2018. Povrchové pukliny sledované v tomto tunelu byly stabilní po celou dobu monitorovacího období: míra sezónních otevírání a zavírání, které představuje osa x, často značně přesahuje horizontální posuny, tedy osu y, a vertikální posuny, tedy osu z.

3.1 Přístroje a metodika

V bedřichovském tunelu byly identifikovány dvě skupiny strmě ukloněných puklin, směr první starší skupiny je SZ-JV a směr druhé skupiny puklin, kterou hodnotíme jako mladší, směřuje SV-JZ (Klomínský 2009). Pukliny směřující SV-JZ se z velké části rozšiřují a charakterizuje je značná mineralizace, zatímco pukliny ve směru SV-JZ se obecně zužují a vykazují nízký stupeň mineralizace (Klomínský et al. 2012). Je velmi obtížné získat přesné informace o pohybu puklin, jelikož rychlosti jejich pohybu jsou jen velice pomalé. Co se týká způsobu pohybu na puklinách, často převažují smykové posuny (Rinaldi-Montes et al. 2017). Jedním z mála přístrojů, který dokáže překonat tento nedostatek, je mechanický extenzometr s názvem TM-71 (Košťák 1969). Monitorování v tunelu v Bedřichově započalo s instalací čtyř mechanických extenzometrů. Dva extenzometry byly uchyceny u paralelních puklin v tzv. sudetském směru, tedy ve směru SZ-JV, a další dva u paralelních puklin v tzv. krušnohorském směru, tedy směru SV-JZ (Stemberk a Košťák 2008).

3.1.1 Mechanické extenzometry

Mechanický extenzometr TM-71 je třeba koncipovat jako dvě vzájemně spolupracující soustavy, a ne jako jeden přístroj (Rowberry et al. 2016). Každá soustava se skládá ze čtvercové čelní desky a dvou kovových rámečků. Jeden z rámečků je na desku uchycen na její horizontální a druhý na její vertikální hraně. Oba kovové rámečky nesou leptanou skleněnou desku. Spojující rameno navrtané do stěny na jedné straně pukliny pevně drží čtvercovou stěnu první soustavy na svém místě, zatímco spojující rameno navrtané do protilehlé strany pukliny pevně fixuje čtvercovou stěnu druhé soustavy na svém místě (Klimeš et al. 2012). Představují tak dvě pravoúhlé stěny finálního kvádru, jehož další dvě pravoúhlé stěny zůstávají otevřené. Propojující ramena a obě soustavy jsou pak nastaveny tak, aby se skleněné desky překrývaly. Desky jsou přitom uchyceny klipy, což zajišťuje, že se obě

 SÚRAO	Vývoj a ověřování metodik pro charakterizaci horninového prostředí – výsledky monitoringu v přivaděči Bedřichov	Evidenční označení:
		SÚRAO TZ 289/2018

soustavy mohou nezávisle pohybovat jedna na druhé, a to i přes to, že celý extenzometr vypadá jako jediný přístroj.

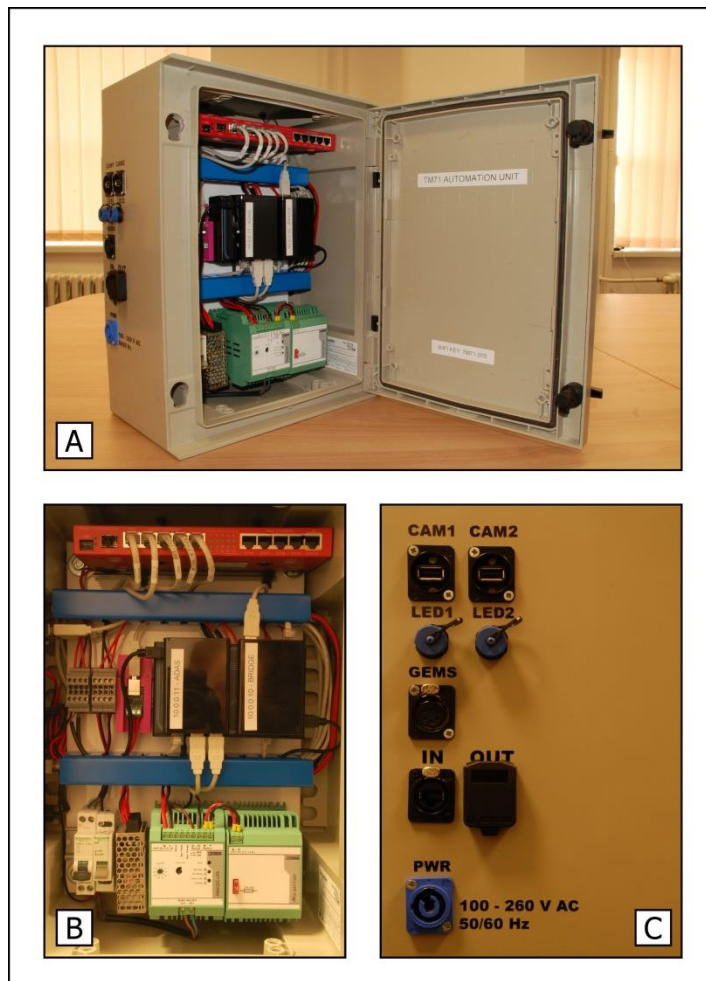
K trojrozměrného pohybu puklin extenzometr využívá moaré efektu optických interferencí (Košťák 1991). Moaré vzory jsou makroskopickými interferenčními mřížkami, které vznikají při prolínání dvou sad rovnoběžných čar, při nichž se jedna pohybuje vzhledem k druhé sadě. (Amidoror 2009). Do každé ze čtyř skleněných desek jsou vyryty dostředivé mřížky. Dvě překrývající se sady dostředivých mřížek s roztečí s minimálním rozdílem vytvářejí sady hyperbolických interferenčních proužků. Zároveň jsou mřížky citlivé na velikost a směr posunutí, ale rotace na ně nikterak nepůsobí (Martí et al. 2013). Počet interferenčních proužků se zvyšuje se zvětšováním vzdálenosti obou soustav, směr posunu přitom označuje směr hlavní osy. Rozlišení pohybu puklin zobrazovaného přístrojem tak záleží na rozteči kruhových mřížek. V bedřichovském tunelu bylo na původních skleněných deskách 20 řad na mm, ty však byly v roce 2015 nahrazeny za 80 řad na mm. Rotační rozlišení měření přístrojem závisí na rozteči lineárních mřížek, která je vždy 100 řad na mm. Rozlišení posunu naměřené extenzometry je přibližně 5 μm , zatímco rotační rozlišení je přibližně $8,70 \times 10^{-5}$ rad (Rowberry et al. 2016).

3.1.2 Automatický monitorovací systém

Každý z mechanických extenzometrů je vybaven modulem automatického sběru dat a dalším hardwarem – kamerami a podsvícením – jenž je potřebný k pořízení obrazových snímků ve vysokém rozlišení. Úkolem modulu automatického sběru dat je zajišťovat komunikaci mezi různými součástmi hardwaru a přenášet moaré interferenční obrazce vytvářené na skleněných deskách mechanickým extenzometrem do centrální databáze pod Ústavem struktury a mechaniky hornin. Snímky z každé kamery byly pořizovány každou hodinu v období od října 2015 do března 2018. Každý modul obsahuje dvě procesorové jednotky, první je zodpovědná za pořizování obrazových dat a druhá zajišťuje komunikaci, dále jednotku regulace elektrické energie, jež stabilizuje vstupní proud, a systém nepřerušovaného napájení, jenž poskytuje elektrický proud od dvou hodin po dva dny. Programovatelná relé deska v reálném čase slouží k vypínání přívodu energie do jakékoliv části modulu, a tím přispívá k úsporám spotřeby energie. Relé deska navíc v přesný čas potřebný pro pořízení obrazových dat spouští nasvícení skleněných desek. Součástky jsou uloženy v hermeticky uzavřené ochranné skříni s označením stupně krytí IP-68.

Snímky jsou pořizovány průmyslovými kamerami IDS Imaging uEye XS, které jsou uloženy v komolých jehlanech z akrylonitril-butadien-styrenu, které jsou přivrtány ke kovovým rámcům mechanických extenzometrů. Hermetické spojení schránky je zajištěno plochým, posilikonovaným a gumovým těsnícím spojem, který je umístěn mezi jednotlivé obruby a extenzometr. Vzdálenost mezi kamerou a skleněnou deskou je 10,5 cm. Všechny kamery jsou propojeny s centrální procesorovou jednotkou pomocí USB kabelu, který slouží pro napájení i pro přenos dat. K podsvícení skleněných desek proto byly použity bílé LED diody, jež jsou rozmístěny po jedné straně termoplastické průsvitné polymerové desky. Napájení 12 V DC je zajištěno modelem automatického sběru dat. Světlo z diod dopadá kolmo na skleněnou desku. Spodní část polymerové desky je pokryta kovovou fólií, která odráží pravidelně zakřivené paprsky světla a náhodně směřuje jejich trajektorie přes průhlednou desku. Hermetické spojení je zajištěno plochým, posilikonovaným, gumovým těsnícím spojem, jenž

je umístěn mezi desku a extenzometr. Obr. 47 a Obr. 48 ukazují modul automatického sběru dat a jeho schematické uspořádání.

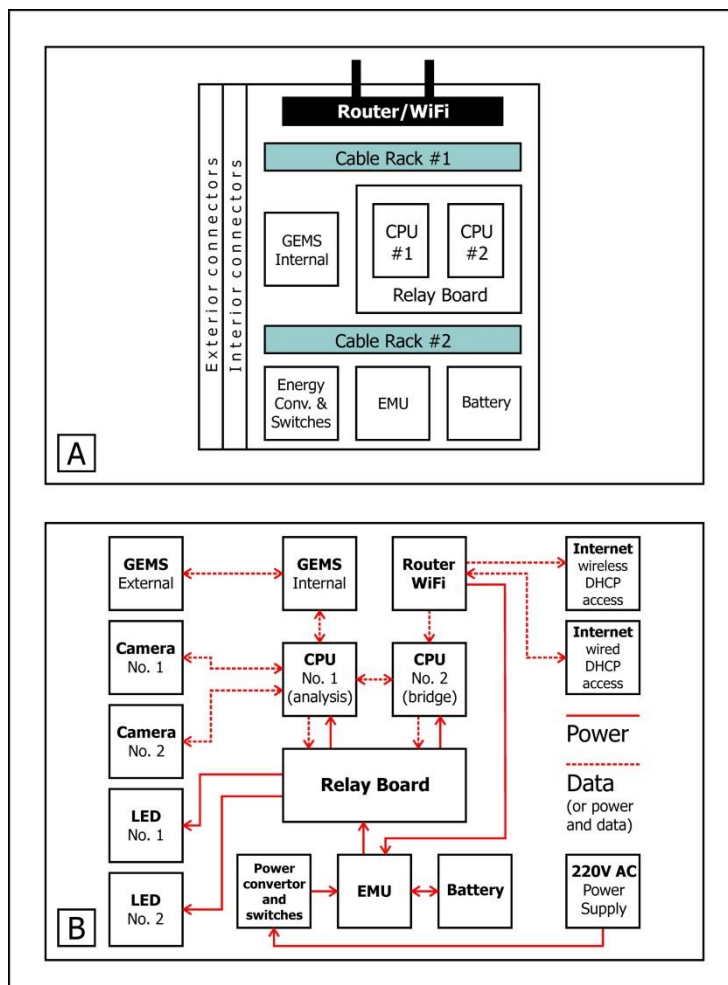


Obr. 47 (A) Modul automatického sběru dat představuje základní modul monitorovacího systému. Všechny jeho součástky jsou uloženy v hermeticky uzavřené ochranné skříni s označením stupně krytí IP-68. (B) Uvnitř modulu automatického sběru dat se nacházejí zásadní elektronické součástky zodpovědné za zpracování obrazových dat, uložení a přenos dat. (C) Vstupy z vnější strany modulu automatického sběru dat. Veškeré kabely jsou vybaveny vodotěsnými elektrickými konektory se stupněm krytí IP-68.

3.2 Monitorování

Algoritmus, pomocí něhož jsou získávány moaré obrazce, rozkládá intenzitu světla a následně pomocí metody nejmenších čtverců vede k aproximaci křivky, která dostatečně kopíruje experimentální datové body. Poslední verze algoritmu vyžaduje před samotným sběrem dat jen velmi málo vstupních parametrů. Analyzovanými parametry jsou rozteč kruhové mřížky, pixel, který představuje střed kruhové mřížky, vnitřní a vnější poloměr kruhové mřížky. Algoritmus v prvním kroku převádí snímky pořízené kamerou na matrice, jež představují

světelnou intenzitu každého pixelu. Následně pomocí metody pokus-omyl se snaží určit hlavní osu a dospět k aproximaci křivky, která dostatečně kopíruje experimentální datové body. Pro každý pořízený snímek je vypracována zpráva, která ukazuje, zda byl proces úspěšný, či nikoliv. Po úspěšném pořízení snímku lze k výpočtu trojrozměrného posunu puklin využít vzdáleností mezi středy a směry hlavní osy. Během monitorovacího období docházelo ke ztrátě dat z důvodu problémů s dodávkou elektrické energie či s telekomunikační sítí.



Obr. 48 (A) Schéma jednotlivých částí uvnitř modulu automatického sběru dat vyvinutého pro případy, v nichž není možné spoléhat na dodávky energie i telekomunikační síť. (B) Schéma jednotlivých částí monitorovacího systému (plná červená čára = proud; přerušovaná červená čára = data, či data a proud).

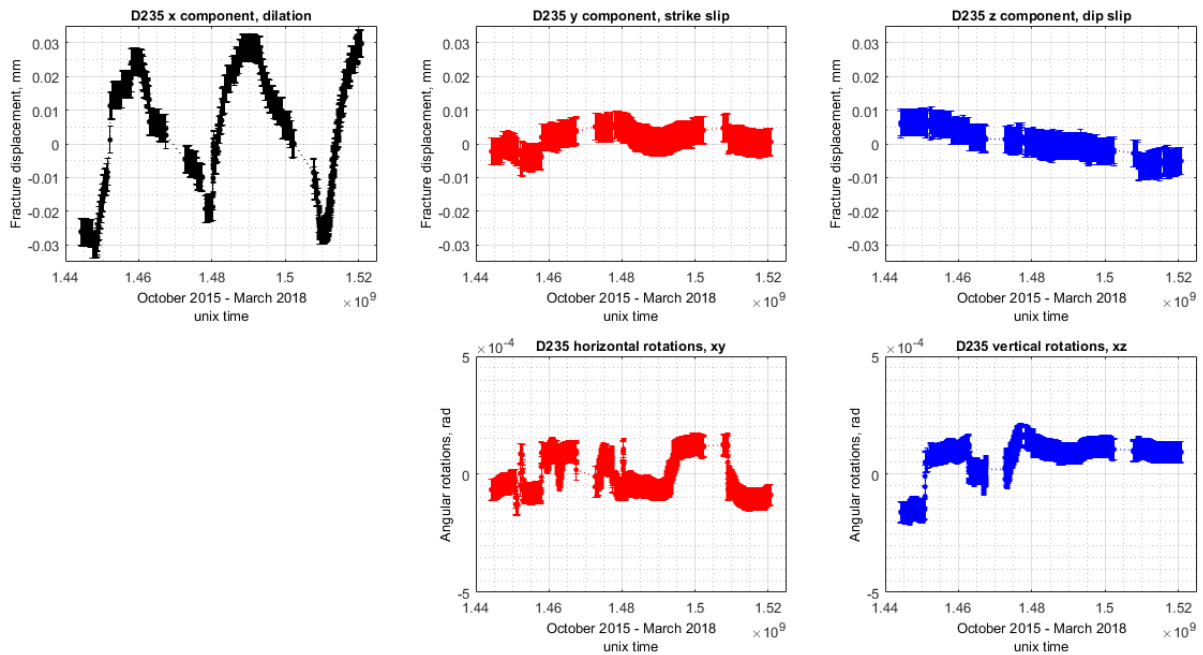
3.2.1 Monitorovací bod D235

Časové řady zaznamenávané v monitorovacím D235 byly pořizovány v období od října 2015 do března 2018. Zakázkově navržený automatický monitorovací systém pořídil celkem 43 853 snímků, které byly přímo zasílány do databázového serveru ÚSMH – je třeba poznamenat, že po celou monitorovací dobu byly snímky pořizovány s frekvencí třiceti minut. Na ose x je patrná

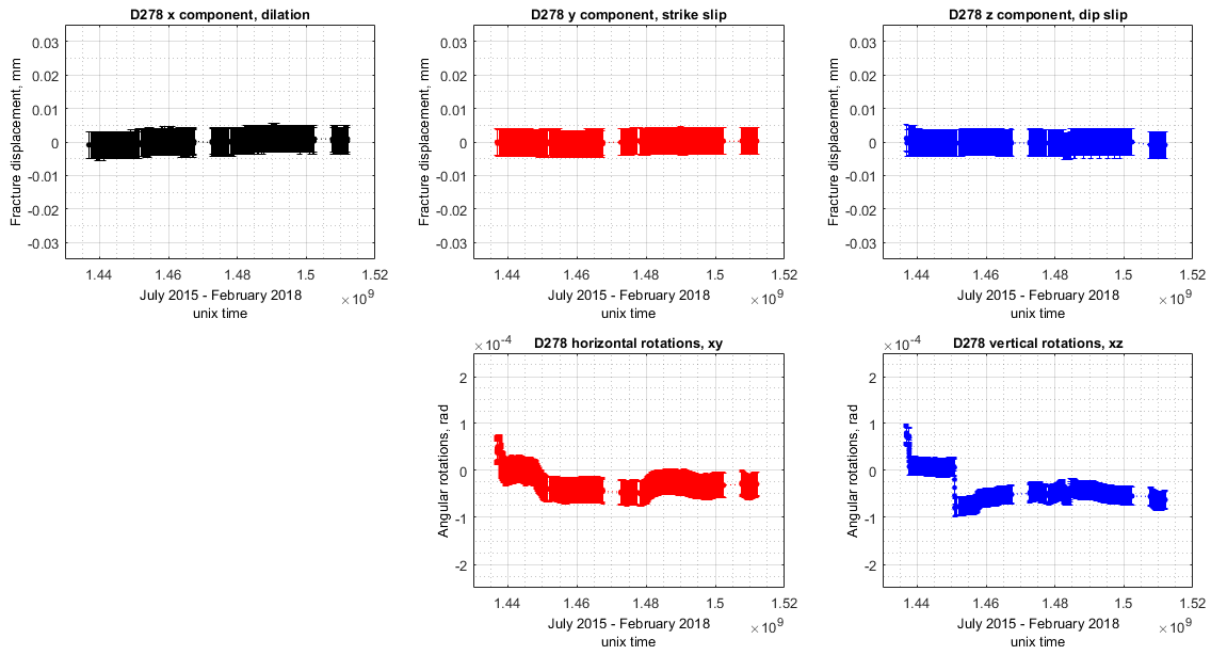
tendence k velké oscilaci s maximálním rozkmitem amplitudy 0,0598 mm; osa y zobrazuje nízkou oscilaci s maximálním rozkmitem amplitudy 0,0116 mm a osa z vykazuje tendenci k vertikálním posunům s rozkmitem až 0,0142 mm (Obr. 49). Je patrné, že sezónní rozkmit amplitudy, a to vždy na konci února a počátku března, odpovídají opačnému vývoji na ose y. Rotační osa xy ukazuje nízkou oscilační tendenci, při níž sezónní maximální rozkmit dosahuje $2,619 \times 10^{-4}$ rad, podobně rotační osa xz ukazuje nízkou oscilační tendenci, při níž sezónní maximální rozkmit dosahuje $3,411 \times 10^{-4}$ rad (Obr. 49). Mezi pohyby na monitorovacím bodě D235 a dalšími přístroji lze pozorovat vzájemné korelace. Prvně se jedná o pohyby na ose y na bodě D235 s osou y na bodě D792 a osou z na bodě D881. Za druhé se jedná o korelaci pohybů v ose z v bodě D235 s osami x a y v bodě D278, osami y a z v bodě D792 a osami x a z v bodě D881 (Obr. 53 a Obr. 54). Mezi rotačními osami můžeme rovněž pozorovat vzájemný vztah, a to zaprvé na rotační ose xz v bodě D235, rotační ose xz v bodě D792 a na rotační ose xz bodě D881 (Obr. 53 a Obr. 54). Bohužel však ani Rychlá Fourierova transformace, ani Welchova metoda zjišťování výkonové spektrální hustoty na časových řadách rotačních os neprokázaly denní ani půldenní pravidelnost (Obr. 55 a Obr. 56). Pokusy o výpočet stavu lokálního napětí na základě těchto dat a pomocí metodologie v nedávné době popsané v Blahůt et al. (2018) se ukázaly taktéž neúspěšné, a to z toho důvodu, že otevírání a uzavírání puklin v tomto monitorovacím bodě, je na ose y převážně charakterizováno horizontálními a na ose z vertikálními posuny (Obr. 57).

3.2.2 Monitorovací bod D278

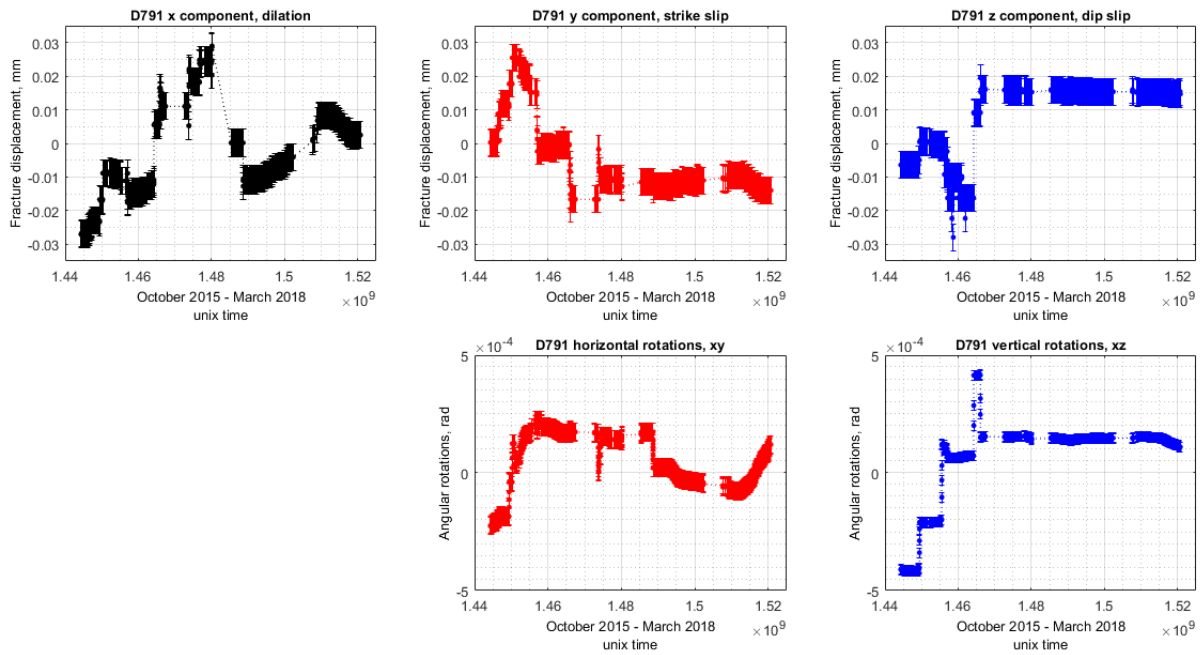
Časové řady zaznamenávané v monitorovacím D278 byly pořizovány v období od července 2015 do února 2018. Zakázkově navržený automatický monitorovací systém pořídil celkem 30 676 snímků, které byly přímo zasílány do databázového serveru ÚSMH. Žádná z os x, y a z neukazuje oscilační či trendové tendence: na tomto místě byla celková míra posunů na ose x 0,0032 mm, celková míra posunů na ose y byla 0,0023 mm (Obr. 50). Tyto posuny se pohybují pod hranicí rozlišení posunu puklin mechanickým extenzometrem, a tak lze předpokládat, že po celou dobu monitorovacího období byla puklina stabilní. Rotační osa xy vykazuje tendence ke slabé oscilaci se sezónním maximálním rozkmitem amplitudy $1,018 \times 10^{-4}$ rad, zatímco rotační osa xz vykazuje nejednoznačné směřování se sezónním maximálním rozkmitem amplitudy $1,602 \times 10^{-4}$ rad (Obr. 50). Mezi osami pohybu puklin můžeme pozorovat významný vztah, a to zaprvé mezi pohyby puklin na ose x v bodě D278, pohyby puklin na ose z v bodě D235 a pohyby puklin na ose x a z v bodě D881, zadruhé pak mezi pohyby puklin na ose y v bodě D278, pohyby puklin na ose y v bodě D235 a pohyby puklin na ose x v bodě D792 (Obr. 53 a Obr. 54). Mezi rotačními osami můžeme pozorovat významný vztah, a to zaprvé na rotační ose xy v bodě D278, rotační ose xy v bodě D791 a zadruhé na rotační ose xz bodě D278 a ose xz v bodě D235 (Obr. 53 a Obr. 54). Ani v tomto případě Rychlá Fourierova transformace, ani Welchova metoda zjišťování výkonové spektrální hustoty na časových řadách rotačních os neprokázaly denní ani půldenní pravidelnost (Obr. 55 a Obr. 56). Na základě těchto dat nebyly provedeny pokusy o výpočet stavu lokálního napětí, jelikož zaznamenaný posun nebyl dostatečně velký, aby jej bylo možno využít jakožto vstupních dat pro výpočet.



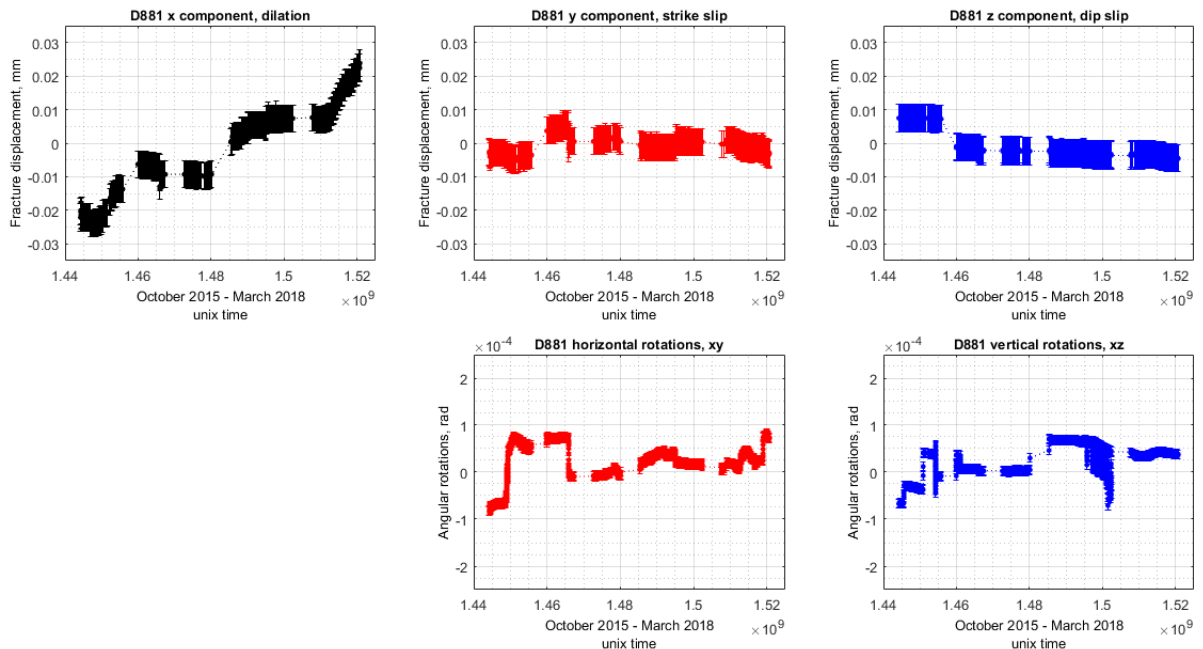
Obr. 49 Posuny a rotace zaznamenané v monitorovacím bodě posunů puklin D235. (A) Otevírání a zavírání pukliny, představované osou x; (B) Horizontální posuny, představované osou y; (C) Vertikální posuny představované osou z; (D) Rotace v horizontální rovině, představované osou xy; (E) Rotace ve vertikální rovině, představované osou xz.



Obr. 50 Posuny a rotace zaznamenané v monitorovacím bodě posunů puklin D278. (A) Otevírání a zavírání pukliny, představované osou x; (B) Horizontální posuny, představované osou y; (C) Vertikální posuny představované osou z; (D) Rotace v horizontální rovině, představované osou xy; (E) Rotace ve vertikální rovině, představované osou xz.



Obr. 51 Posuny a rotace zaznamenané v monitorovacím bodě posunů puklin D792. (A) Otevírání a zavírání pukliny, představované osou x; (B) Horizontální posuny, představované osou y; (C) Vertikální posuny představované osou z; (D) Rotace v horizontální rovině, představované osou xy; (E) Rotace ve vertikální rovině, představované osou xz.



Obr. 52 Posuny a rotace zaznamenané v monitorovacím bodě posunů puklin D881. (A) Otevírání a zavírání pukliny, představované osou x; (B) Horizontální posuny, představované osou y; (C) Vertikální posuny představované osou z; (D) Rotace v horizontální rovině, představované osou xy; (E) Rotace ve vertikální rovině, představované osou xz.

3.2.3 Monitorovací bod D792

Časové řady zaznamenávané v monitorovacím D792 byly pořizovány v období od října 2015 do března 2018. Zakázkově navržený automatický monitorovací systém pořídil celkem 28 916 snímků, které byly přímo zasílány do databázového serveru ÚSMH. Osa x vykazuje obecně oscilační tendenci s maximálním rozkmitem amplitudy 0,0560 mm, osa y vykazuje obecně oscilační tendenci s maximálním rozkmitem amplitudy 0,0450 mm a osa z vykazuje jak skoky ve vertikálních posunech, tak lineární směřování až k 0,0474 mm (Obr. 51). První polovinu časové řady nelze spolehlivě analyzovat, jelikož na konci roku 2016 probíhaly v blízkosti monitorovacího bodu výzkumné práce (časová značka 1483228800). Rotační osa xy vykazuje nejednoznačný trend s maximálním rozkmitem amplitudy $4,516 \times 10^{-4}$ rad a taktéž rotační osa xz vykazuje nejednoznačný trend s maximálním rozkmitem amplitudy $8,380 \times 10^{-4}$ rad (Obr. 51). Mezi osami pohybu puklin můžeme pozorovat vzájemný vztah, a to zaprvé mezi pohyby puklin na ose y v bodě D792, pohyby puklin na ose y a z v bodě D235 a pohyby puklin na ose z v bodě D881, zadruhé pak mezi pohyby puklin na ose z v bodě D792, pohyby puklin na ose z v bodě D235 a pohyby puklin na ose y v bodě D278 (Obr. 53 a Obr. 54). Mezi rotačními osami můžeme pozorovat významný vztah, a to zaprvé na rotační ose xy v bodě D792, rotační ose xy v bodě D278 a zadruhé na rotační ose xz bodě D792 a ose xz v bodě D278 (Obr. 53 a Obr. 54). Ani v tomto případě Rychlá Fourierova transformace, ani Welchova metoda zjišťování výkonové spektrální hustoty na časových řadách rotačních os neprokázaly denní ani půldenní pravidelnost (Obr. 55 a Obr. 56). Snahy o výpočet stavu lokálního napětí na základě získaných dat přinesly nejednoznačné výsledky – jedním z vysvětlení může být fakt, že anomálie při posunu puklin používané jako vstupní data mohly být způsobeny jiným vědeckým výzkumem probíhajícím ve stejný čas v tomto monitorovacím bodě (Obr. 57) – úprava stanoviště pro geofyzikální profilování.

3.2.4 Monitorovací bod D881

Časové řady zaznamenávané v monitorovacím D881 byly pořizovány v období od října 2015 do března 2018. Zakázkově navržený automatický monitorovací systém pořídil celkem 26 621 snímků, které byly přímo zasílány do databázového serveru ÚSMH. Osa x vykazuje oscilační trend, jenž dominuje nad dilační tendencí s maximálním rozkmitem amplitudy 0,0476 mm, osa y vykazuje málo zřetelný oscilační směr s maximálním rozkmitem amplitudy 0,0108 mm a osa z vykazuje lineární směr s maximálním rozkmitem amplitudy 0,0120 mm (Obr. 52). Předpokládáme, že je možné, že za skokem zaznamenaným na všech rotačních i posunových osách mezi časovými značkami 1455808241 a 1459933066 stojí manuální manipulace s mechanickým extenzometrem. Rotační osa xy vykazuje nejednoznačnou tendenci s maximálním rozkmitem amplitudy až $1,663 \times 10^{-4}$ rad a rotační osa xz taktéž vykazuje nejednoznačnou tendenci s maximálním rozkmitem amplitudy až $1,419 \times 10^{-4}$ rad (Obr. 52). Mezi osami pohybu puklin můžeme pozorovat významný vztah, a to zaprvé mezi pohyby puklin na ose x v bodě D881, pohyby puklin na ose z v bodě D235 a pohyby puklin na ose x v bodě D278, zadruhé pak mezi pohyby puklin na ose z v bodě D881, pohyby puklin na ose y a z v bodě D235, pohyby puklin na ose x v bodě D278 a pohyby na ose y v bodě D792 (Obr. 53 a Obr. 54). Mezi rotačními osami v tomto monitorovací bodě a rotacemi zaznamenanými v dalších monitorovacích bodech není možno vypočítat významnou souvislost (Obr. 53 a Obr. 54). Ani v tomto případě Rychlá Fourierova transformace, ani Welchova metoda zjišťování výkonové spektrální hustoty na časových řadách rotačních os neprokázaly denní

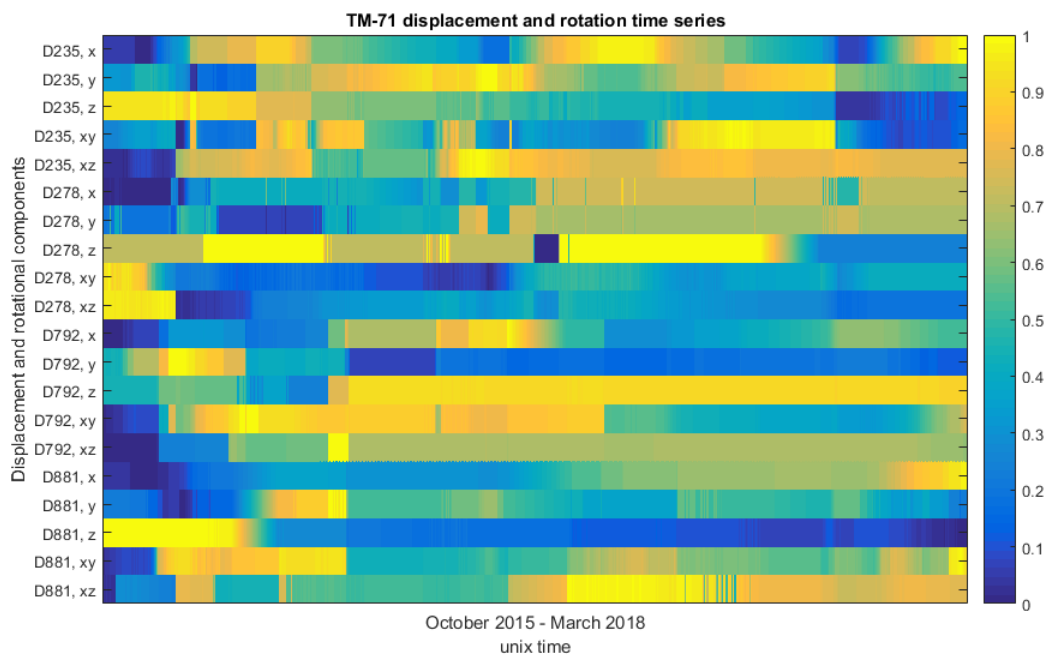
ani půldenní pravidelnost (Obr. 55 a Obr. 56). Snahy o výpočet stavu lokálního napětí na základě získaných dat byly neúspěšné, jelikož otevírání a uzavírání puklin v tomto monitorovacím bodě zobrazené na ose x převažuje nad horizontálním posunem na ose y a vertikálním posunem na ose z (Obr. 57).

3.3 Vyhodnocení

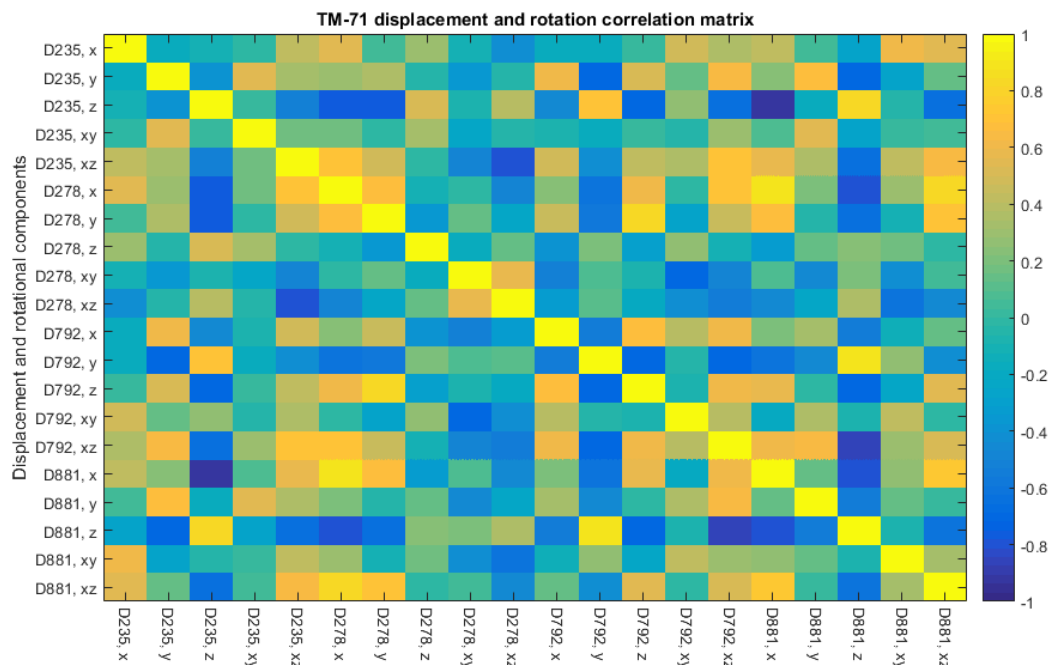
Monitorování posunů puklin v bedřichovském tunelu navazuje na výzkum prováděný v této lokalitě mezi lety 2005 až 2014. Je však důležité podtrhnout důležitou změnu či posun paradigmatu monitorování, k němuž došlo na začátku roku 2015. V tu dobu jako nezbytnost ukázalo navržení a výroba odolných automatických monitorovacích systémů, jež budou schopny každou hodinu pořizovat snímky a okamžitě je zasílat do databázového serveru. Největší překážka, kterou jsme museli v té době překonat, se však netýkala spolehlivosti hardwaru. Od roku 2005 do roku 2014 musel být každý snímek pořízený v tunelu v Bedřichově, a to bez ohledu na to, zda byl pořízen manuálně, či automaticky, popsán technikem – což nepřispívá k přesným výsledkům měření. Největší překážkou, kterou jsme v souvislosti s vývojem odolného monitorovacího systému museli překonat, byl vývoj softwaru. K tomu, abychom mohli software plně použít, je zapotřebí zajistit, že jsou kamery umístěny kolmo k přístroji a že podsvícení zajišťuje jednotné nasvícení – tyto dva předpoklady jsou naprostou nezbytností k získání přesných obrazových dat. Z tohoto důvodu nemůžeme využít snímky získané mezi lety 2013 a 2014 k nové analýze, jelikož kamery nebyly správně nastaveny a podsvícení bylo velmi slabé. Veškerá dokumentace, kterou jsme vyvinuli v rámci tohoto projektu, nám však zaručuje získávání snímků s bezkonkurenční přesností a precizností.

V období 2015 až 2018 nezaznamenaly měřicí přístroje v bedřichovském tunelu zásadní pohyby ani nezachytili vzestupné nebo sestupné trendy podmíněné tektonickými pohyby. Zaznamenané pohyby byly podmíněny klimatickými oscilacemi. Zároveň ale přístroje zaznamenaly zajímavé skutečnosti, které stojí za bližší prozkoumání. Za hlavní závěr celého monitorovacího období můžeme považovat skutečnost, že i velmi mělké pukliny v krystalické hornině mohou po dlouhou dobu zůstat stabilní: velikost sezónních oscilací (otevírání a zavírání) totiž často z velké části přesáhlo předpokládané tektonicky podmíněné horizontální a vertikální posuny. I přes tento jasný závěr se nám však nepodařilo objasnit určité skutečnosti. Zprvce není jasné, z jakého důvodu je jeden ze čtyř monitorovacích bodů, a to bod D278, stabilní, zatím co u ostatních dochází k sezónním otevíráním a zavíráním. Za druhé zůstává neobjasněno, proč na jednom ze zbylých tří monitorovacích bodů, a to v bodě D792, je směr otevírání a zavírání zcela odlišný od otevírání a zavírání zaznamenaných v bodě D235 a D881. Pro objasnění těchto zjevných rozporů je zapotřebí dalšího výzkumu. Bohužel do času zpracování zprávy nebylo možné vést rozsáhlou analýzu vzájemných vlivů mezi osami zaznamenávajícími posuny a rotaci a dalšími proměnnými z dané lokality, tedy klimatickými proměnnými či hydrologickým průtokem v tunelu, z důvodu dostupnosti ostatních dat v rámci projektu až v rámci jejich kompletace. V průběžné zprávě byla prokázána významná provázanost mezi otevíráním a zavíráním puklin a hydrologickým průtokem v monitorovacích bodech V1 a V2. Na druhou stranu stejná analýza neodhalila žádnou provázanost mezi jakoukoliv osou pohybu puklin a klimatickými daty naměřenými u vstupu do tunelu.

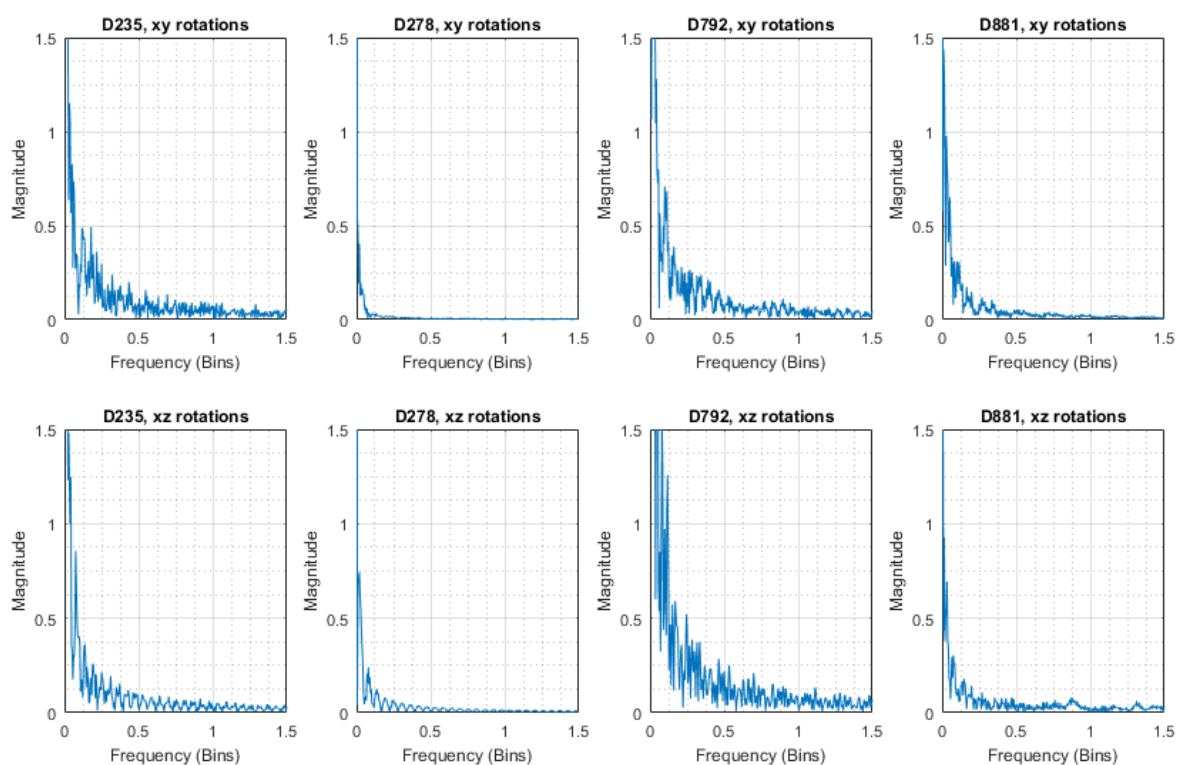
Je velmi obtížné analyzovat data o rotaci získávaná mechanickým extenzometrem, a tak jsou tato měření často přehlížena. V této studii je však jasně viditelné, že rotační osy často vykazují stejné tendence jako osy zobrazující posuny. Zároveň bylo potvrzeno, že jsou skleněné desky mechanických extenzometrů citlivější na zachycení rotací než posunů. Proto jsme na základě snímků získaných s unikátní přesností a precizností stanovili hypotézu, že rotační časové řady mohou obsahovat denní a půldenní signály. Tato hypotéza má své ukotvení – přítomnost denních a půldenních signálů byla prokázána během extenzometrického výzkumu vedeného v podzemní výzkumné laboratoři (Underground Research Laboratory) na jílovcích ve větraném prostředí v Tournemire (Bailly et al. 2014). Naše počáteční pokusy o spektrální rozklad by měly přinést kladné výsledky, následně se však budeme soustředit spíše na jednotlivé části časových řad. Zároveň je jasné, že některé přístupy citované v této zprávě – například Rychlá Fourierova transformace či Welchova metoda zjišťování výkonové spektrální hustoty na časových řadách rotačních os – je možné aplikovat pouze na vysokofrekvenční a velmi přesné časové řady, které byly pořízeny na každém ze čtyř monitorovacích bodů tunelu v Bedřichově mezi lety 2015 a 2018. Bude-li snahou dalšího výzkumu dokázat denní a půldenní signály, není v současnosti na místě snižovat frekvenci pořizování snímků.



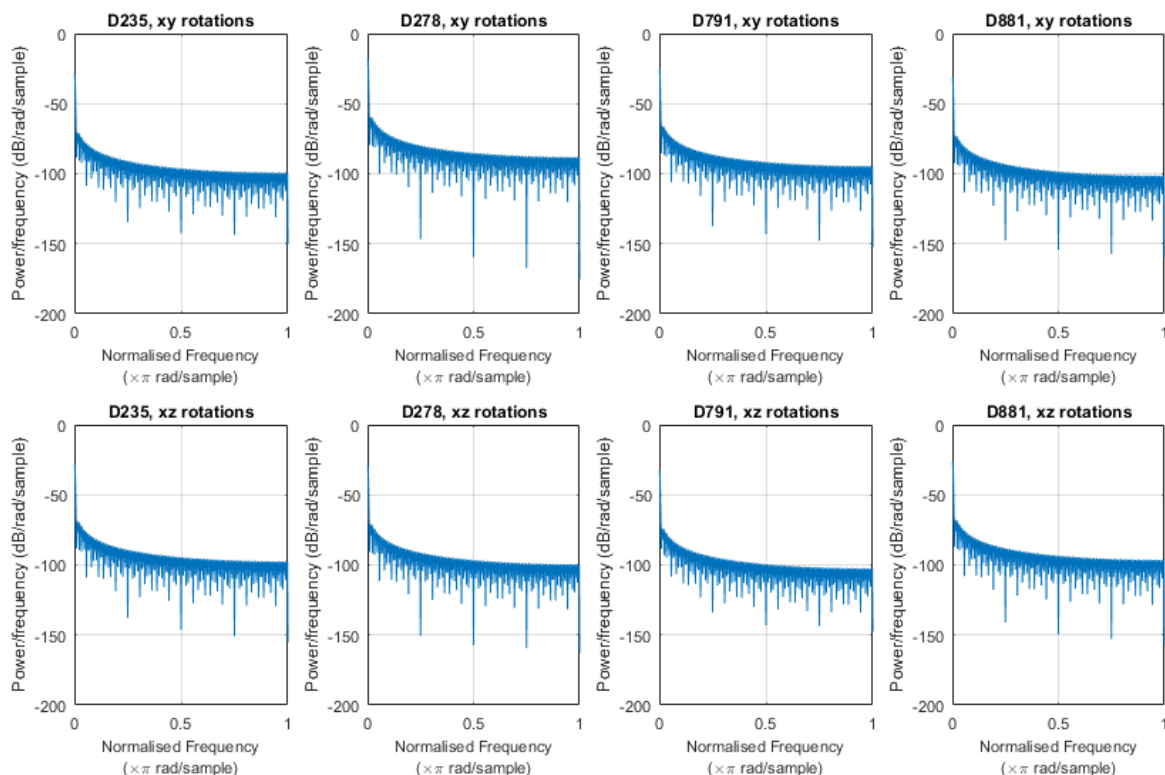
Obr. 53 Normalizované časové řady posunů a rotací zaznamenané na každém ze čtyř monitorovacích bodů: osa x představuje otevírání, či uzavírání; osa y představuje horizontální posuny; osa z představuje vertikální posuny; osa xy představuje úhlovou rotaci v horizontální rovině; a osa xz představuje úhlovou rotaci ve vertikální rovině. Je třeba zmínit, že pro získání matice bylo zapotřebí interpolovat veškerá chybějící data.



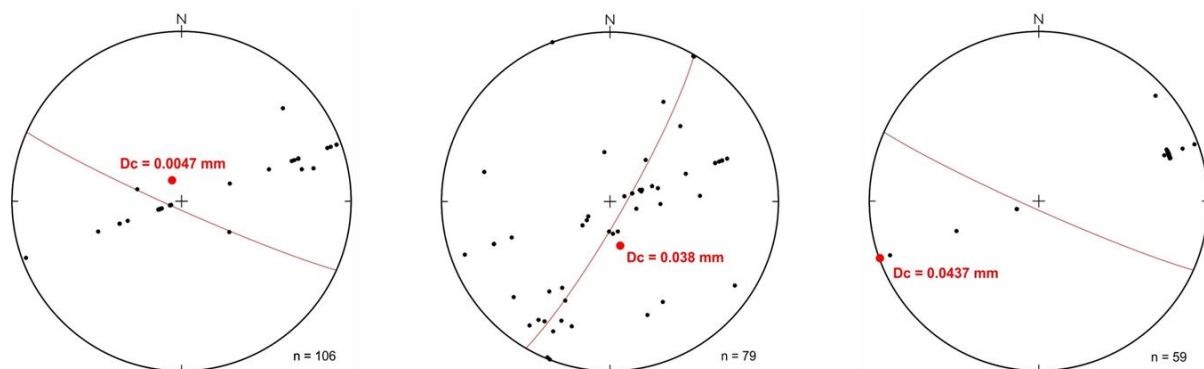
Obr. 54 Matice zobrazující sílu souvztažnosti mezi posunovými a rotačními osami na každém ze čtyř monitorovacích bodů: osa y představuje horizontální posuny; osa z představuje vertikální posuny; osa xy představuje úhlovou rotaci v horizontální rovině; a osa xz představuje úhlovou rotaci ve vertikální rovině. Je třeba zmínit, že pro získání matice bylo zapotřebí interpolovat veškerá chybějící data.



Obr. 55 Rychlá Fourierova transformace rotačních časových řad získaných na každém ze čtyř monitorovacích bodů. K analýze jsme zvolili rotační osy, jelikož jsou citlivější na pohyb než osy posunů. I přes tuto jejich citlivost však nebylo možné prokázat denní ani půldenní pravidelnost.



Obr. 56 Welchova metoda zjišťování výkonové spektrální hustoty na časových řadách rotačních os. K analýze jsme zvolili rotační osy, jelikož jsou citlivější na pohyb než osy posunů. I přes tuto jejich citlivost však nebylo možné prokázat denní ani půldenní signály.



Obr. 57 Přehled vektorů posunů puklin zavěšených bloků v monitorovacím bodě D235 (vlevo), D792 (uprostřed) a D881 (vpravo). Zlomové plochy jsou zobrazeny na spodní hemisféře každé stereografické projekce. Visící blok je umístěn ve spodní části u projekce k D235 a D881 napravo u bodu D791. U horizontálních os převažuje otevírání a uzavírání puklin v bodech D235 a D881, zatímco v bodě D792 vedle vstupní data vytvořená dalším výzkumem v oblasti k odchýlkám v posunech. Použitá metoda je popsána v Blahůt et al. (2018).

4 Monitoring seismicity

Autoři: J. Málek a L. Žanda

Od začátku roku 2015 se seismický monitoring prováděl původní seismickou stanicí se dvěma snímači na měřicích stanovištích ve staničení štoly 235 m a 278 m. Snímače vybavené geofony LF-24 s poměrně nízkou citlivostí 15 V/m/s byly doplněny seismickými zesilovači se zesílením 100. Oba snímače byly připojeny dlouhými kabely k záznamovému počítači (stolní PC s ADC) umístěnému v elektroskříní u portálu štoly.

Předcházející měření ukázalo nedostatky tohoto řešení pro měření slabých seismických jevů. Zejména se jednalo o značné rušení signálu šumem seismických zesilovačů a elektromagnetickou indukci od elektrického vedení a elektrozařízení ve štole. Dalším problémem byly otřesy z nejbližšího okolí obou snímačů způsobované činnostmi na těchto místech a dopravou na pozemní komunikaci nad poměrně nízkým nadložím štoly nad oběma měřicími stanovišti.

4.1 Příprava nové seismické stanice

Nejvhodnějším řešením, které by nemělo uvedené nedostatky, bylo sestavení nového seismometru a jeho umístění na klidnějším měřicím stanovišti. Proto byly zakoupeny nové seismické snímače s geofony SM-6 (Obr. 58), nový seismický A/D převodník a malý průmyslový počítač s pasivním chlazením. Pro dva nové seismometry byla vybrána stanoviště v úseku staničení štoly 792 m až 881 m.



Obr. 58 Seismický snímač s geofony SM6-HB(UB) 3K5 na měřicím stanovišti ve štole.

Specifikace součástí nového seismometru:

Geofony SM-6

nízkofrekvenční rychlostní geofon
výrobce Sensor Products BV, Netherlands
typ SM6-HB(UB) 3K5
vlastní frekvence 4,5 Hz
frekvenční rozsah 2 až 100 Hz
citlivost 80 V/m/s

A/D převodník (USB Digitizér)

výrobce Embedded Electronics & Solutions, s.r.o., Praha 8
dynamický rozsah 24 bitů
vstupní napětí ± 1 V nebo $\pm 2,5$ V
vzorkovací frekvence 250 Hz
maximální počet kanálů 16
napájení 5 V přes USB

Záznamový počítač (průmyslový) ARK-1122H

výrobce Advantech
CPU Intel® Atom™ N2600 1.6 GHz
operační systém Linux
časová synchronizace po internetu nebo pomocí GPS
záznam dat na SSD
napájení vnějším zdrojem 12V DC

Geofony SM6-HB(UB) 3K5 mají 5x větší citlivost než geofony LF-24. Průmyslový počítač Advantech je vhodný i do studeného a vlhkého prostředí a proto může být i s A/D převodníkem instalován ve štole v místě měření. Kabel, kterým je k A/D převodníku připojen seismický snímač, pak může být krátký. Počítač má přibližně 10x nižší spotřebu elektrické energie (cca 20 W) a může proto být napájený i z elektrického akumulátoru.

První nový seismometr byl instalován ve staničení štoly 868 m v říjnu 2015. Byl spuštěn a připojen k místní počítačové síti a k internetu. Nová seismická stanice ukládala data do

souborů (5 MB) každých 10 minut, připojení k síti umožňovalo vzdálenou kontrolu, základní přenastavení a ruční stažení datových souborů.

Porovnání vlastností původní (235 a 278 m) a nové (868 m) seismické stanice:

původní stanice :

geofony LF-24

citlivost 15 V/m.s⁻¹

vlastní kmitočet 1 Hz

frekvenční rozsah geofonu 1 Hz až 1 kHz

seismický zesilovač 100x

ADC TEDIA UDAQ-2104 21 bitů

vstupní napětí ADC ± 2 V

vzorkovací frekvence 250 Hz

LSB (1 dílek) 1,27 nm/s

MSB (rozsah) ±1,3 mm/s

nová stanice :

geofony SM6-HB(UB) 3K5

citlivost 80 V/m.s⁻¹

vlastní kmitočet 4,5 Hz

frekvenční rozsah geofonu 2 až 100 Hz

bez zesílení

ADC EE&S USB Digitizér 24 bitů

vstupní napětí ADC ± 1 V

vzorkovací frekvence 250 Hz

LSB (1 dílek) 1,66 nm/s

MSB (rozsah) ±13,9 mm/s

Následující měření nové seismické stanice na tomto seismicky velmi klidném stanovišti však ukázalo značný šum A/D převodníku a proto byl objednáno nový model převodníku s nižším šumem. Současně bylo rozhodnuto, že až do vyřešení problému s A/D převodníkem nebude pokračovat příprava instalace druhého seismometru.

Při výměně A/D převodníku za nový model v únoru 2016 ale došlo neopatrností obsluhy seismické stanice k poškození nového modelu a tak musel být na stanici ponechán původní a pro měření slabých seismických jevů nevhodný A/D převodník.

Po instalaci opraveného nového modelu převodníku v dubnu 2016 se ale odstup seismického signálu od šumu nezlepšil potřebnou měrou. Úpravy odstínění také nepřinesly potřebné zlepšení. Pokus snížit šum A/D převodníku a zvětšit odstup rozdělením signálů do čtyř kanálů převodníku a vypočítáním průměru čtyř současných hodnot na jeho výstupu byl také neúspěšný. Zpracování třikrát (3 složky pohybu) čtyř signálů (4 kanály pro každou složku) bylo softwarově náročné a pomalé. Neúměrně by to zpomalilo zobrazování seismogramů nepřetržitého záznamu při jeho prohlížení.

Poměrně dlouhé zkušební měření nového seismometru ve staničení 868 m sice prokázalo odolnost všech jeho součástí vůči nepříznivým podmínkám prostředí ve štole, ale A/D převodník se ukázal být pro své vlastnosti nevhodný.

4.2 Vývoj nového seismometru

Na konci roku 2016 bylo rozhodnuto ukončit zkušební měření nového seismometru jako neúspěšné řešení a úsilí věnovat dokončení vývoje nového typu seismického A/D převodníku a nové počítačové sestavy pro záznam seismických dat. Na vývoji se podílel výrobce

Embedded Electronics & Solutions, s.r.o., Praha 8 a Ústav struktury a mechaniky hornin AV ČR, v.v.i., Praha 8. Základní vývoj seismometru byl dokončen v následujícím roce 2017 a prototyp se dvěma snímači byl instalován ve staničení 870 m (první snímač a počítač s převodníkem) a 833,5 m (druhý snímač) v říjnu téhož roku.

Nový A/D převodník (Obr. 59) má velký dynamický rozsah. Oproti 24 bitům původního A/D převodníku je 32 bitový a dynamiku bez šumu má podle výrobce 28 bitů. Jeho šest kanálů umožňuje připojení dvou třísložkových seismických snímačů. Rozsah vstupního napětí je $\pm 2,5$ V a frekvenční rozsah až 120 Hz (vzorkovací frekvence převodníku je 250 Hz). A/D převodník je připojen k záznamovému počítači kabelem USB 2.0 a je přes něj napájen napětím 5V/300 mA.



Obr. 59 Seismický A/D převodník EE&S s dynamikou 32 bitů.

Záznamový počítač (Obr. 60) má modulární stavbu, která umožňuje podle potřeby konkrétního měření zvolit různé funkce počítačové sestavy. Počítač s dvoujádrovým procesorem ARM Cortex-A7 1,2 GHz pracuje s operačním systémem Linux a systémový čas synchronizuje pomocí NTP (Network Time Protocol) serverů na internetu nebo pomocí vestavěného GPS přijímače. Přesnost synchronizace je lepší než 4 ms. Počítač ukládá seismická data na externí USB 2.0 disk (napájecí proud až 1 A), který je možné odpojit i během provozu počítače.

Připojení počítače do sítě internet je možné buď pomocí síťové karty kabelem TP kategorie 5 přes síť Ethernet 100BASE-TX (Fast Ethernet) nebo pomocí modemu GSM 2G/3G přes mobilní datové sítě nebo pomocí WiFi adaptéru standardu IEEE 802.11 b/g. v režimu přístupového bodu k bezdrátové síti (Access Point).

Instalovaný webový server umožňuje zobrazení stavových informací, základní nastavení, on-line tabulkové zobrazení vzorkovaných dat, on-line zobrazení seismogramů a stahování datových souborů.



Obr. 60 Záznamový počítač EE&S pro seismometr.

Napájení celé sestavy seismometru je síťovým adaptérem 230V AC / 24V DC , max. 750 mA a spotřeba je při aktivním Wi-Fi rozhraní menší než 6 W. Sestava seismometru může pracovat za teploty okolí v rozsahu od -20 °C do +70 °C.

Porovnání vlastností původní (235 a 278 m) a nejnovější (870 a 833 m) seismické stanice:

původní stanice :

geofony LF-24
citlivost 15 V/m.s⁻¹
vlastní kmitočet 1 Hz
frekvenční rozsah geofonu 1 Hz až 1 kHz
seismický zesilovač 100x
ADC TEDIA UDAQ-2104 21 bitů
vstupní napětí ADC ± 2 V

nejnovější stanice :

geofony SM6-HB(UB) 3K5
citlivost 80 V/m.s⁻¹
vlastní kmitočet 4,5 Hz
frekvenční rozsah geofonu 2 až 100 Hz
bez zesílení
ADC EE&S USB Digitizér 32 bitů
vstupní napětí ADC ± 2,5 V

vzorkovací frekvence 250 Hz

LSB (1 dílek) 1,27 nm/s

MSB (rozsah) $\pm 1,3$ mm/s

vzorkovací frekvence 250 Hz

LSB (1 dílek) 0,015 nm/s

MSB (rozsah) ± 31 mm/s

Nejdůležitější předností nejnovější seismické stanice je její schopnost měřit slabé seismické jevy. Díky kvalitním geofonům a velkému rozlišení A/D převodníku poskytuje věrnější vlnový obraz slabých seismických jevů. Dostatečný odstup signálu od šumu umožňuje i u těchto slabých seismických jevů vyhledat první nasazení P a S vln. To je nutná podmínka správné identifikace seismických jevů a dostatečně přesného odečtu časů příchodu P a S vln. Zřetelné první nasazení a odečtené časy příchodu P a S vln umožňují lokalizaci ohnisek jevů.

Dalšími přednostmi nejnovější seismické stanice jsou: vhodnost do nepříznivých vnějších podmínek, různé možnosti internetového připojení (výborná konektivita), jednoduchá obsluha, snadná přemístitelnost umožněná malými rozměry, malou hmotností a malou elektrickou spotřebou.

Během zkušebního provozu této nejnovější seismické stanice od října 2017 do května 2018 bylo ověřeno, že stanice dlouhodobě měří v prostředí štoly bez jediné poruchy. Stanice zapisovala data na externí USB disk, její provoz bylo možné pomocí vzdáleného ovládní kontrolovat a stahovat jednotlivé datové soubory a data byla pravidelně ukládána do úložiště v ÚSMH. Hardware seismometru proto lze považovat za spolehlivý a bezporuchový. Také výsledky měření seismometru jsou velmi dobré.

Ukázalo se ale, že programové vybavení (software) dodané výrobcem seismometru nebylo dobře navrženo. Konkrétně se jednalo o program, který běží na počítači stanice a zapisuje naměřené hodnoty do datových souborů, které pak pravidelně jednou za stanovený časový interval ukládá na externí disk. Jednak nebylo možné sledovat průběh měření (tzv. živé seismogramy) přímo na obrazovce, což komplikovalo kontrolu funkčnosti seismometru při jeho instalaci. A dále byl zvolen pro následné zpracování nevhodný formát ukládaných dat. Používal se formát .csv, který je sice standardní pro mnoho rozšířených programů (například Excel), ale při prohlížení většího množství dat trvá poměrně dlouho než se načtou do paměti počítače. Výhodnější je používat binární formát dat, se kterým pracuje interpretační program KUK. Proto byl software upraven a 9. března 2018 byl záznamový počítač se starým software ve štole vyměněn za jiný s nainstalovaným novým software. S touto novou verzí software měří seismometr teprve necelé tři měsíce a proto se, pokud jde o software, stále jedná o zkušební provoz.

Další malé úpravy software nelze během následujícího provozu nového seismometru vyloučit. Dosud totiž nejsou v provozních podmínkách prověřeny některé jeho další funkce, zejména všechny způsoby internetového připojení a vzdálené správy systému a správy programového vybavení. Také během práce s interpretačním programem KUK a při jeho rozšiřování o další funkce se může zjistit, že software seismometru je nutné upravit (upgradovat). Proto byla až do současnosti ponechána v provozu původní stanice se seismickými snímači ve staničení 235 a 278 metrů, aby v případě úpravy nového seismometru nebyl seismický monitoring přerušen.

4.3 Výsledky seismického monitoringu


Seismický monitoring probíhal v uplynulém období let 2015 až 2018 na původní seismické stanici se snímači ve staničení štoly 235 a 278 metrů. Měření bylo průběžné s výjimečnými několikadenními přerušeními, ke kterým docházelo po výpadku el. energie ve štole.

Chyba hardware stanice způsobuje, že po výpadku el. energie nedochází k automatickému obnovení měření a je nutný zásah obsluhy na místě. Tuto chybu je možné odstranit pouze na patřičně vybaveném pracovišti a proto byla oprava seismické stanice odložena. Oprava byla plánována až na dobu, kdy bude seismický monitoring spolehlivě zajištěn připravovanou novou seismickou stanicí. Toto rozhodnutí bylo učiněno s přihlédnutím k tomu, že k výpadkům el. energie ve štole docházelo v poslední době málokdy (jednou, výjimečně dvakrát za rok).

Během seismického monitoringu nebyl zaznamenán a rozpoznán žádný tektonický otřes s ohniskem ve sledovaném masivu.

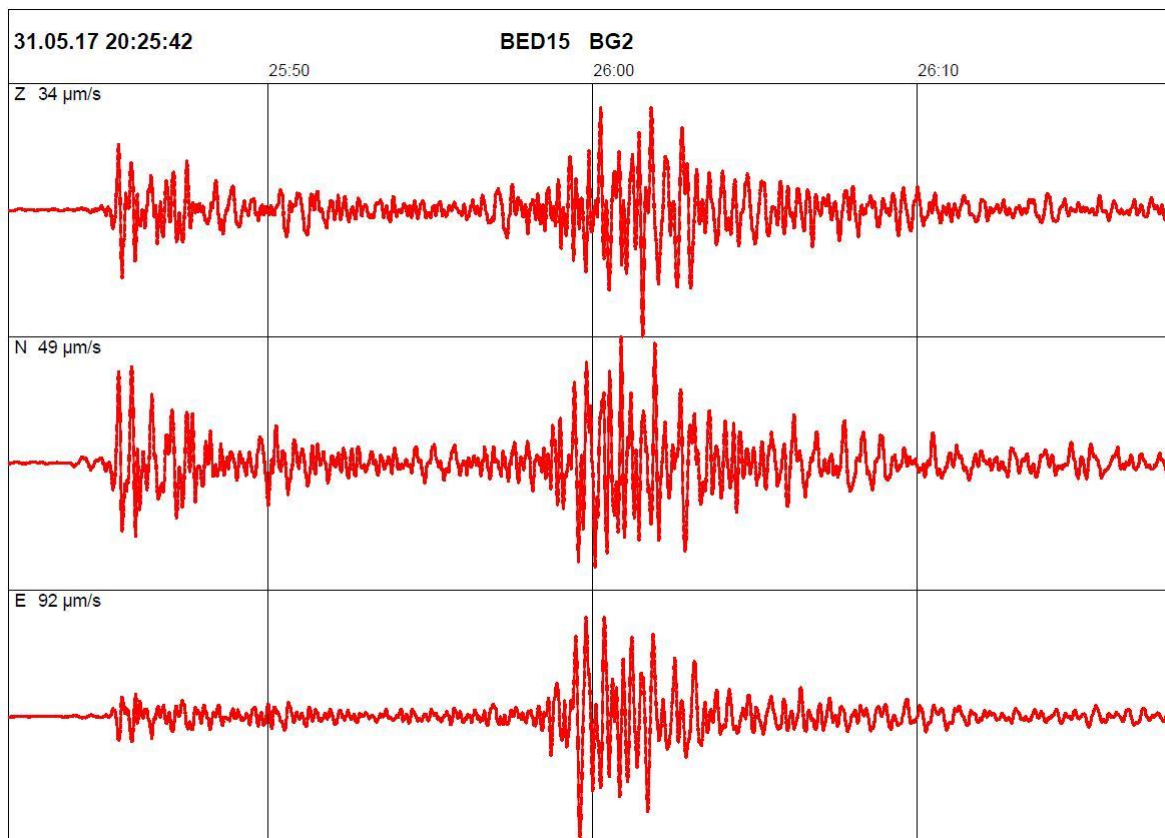
Nejsilnějšími seismickými jevy byly důlní otřesy z oblasti měděných dolů u Lubinu v Polsku s magnitudy blízkými 4. Řádově stejným účinkům těchto otřesů byl vzhledem k velkému poměru vzdálenosti jejich ohnisek (přibližně 90 km) k rozměrům sledovaného masivu (přibližně do 30 km) vystaven celý masiv. Maximální amplitudy rychlosti kmitání při nich dosahovaly hodnot desítek $\mu\text{m/s}$. Důlní otřesy s největšími rychlostmi kmitání byly v bedřichovské štole zaznamenány ve dnech a v časech, jak je dále uvedeno :

	Datum	Čas (UTC)	Lokální magnitudo
2015	5. 2. 2015	04:44:15	3,4
	8. 7. 2015	06:53:38	4,1
	19. 7. 2015	19:18:23	3,7
	9. 9. 2015	19:30:34	3,5
	29. 10. 2015	02:27:11	3,5
2016	25. 2. 2016	04:36:42	3,6
	11. 5. 2016	04:01:52	3,7
	2. 6. 2016	04:09:17	3,7
	13. 8. 2016	12:01:16	3,8
	14. 9. 2016	07:59:28	3,8
	17. 10. 2016	23:50:50	3,9
	29. 11. 2016	20:10:01	4,1
	16. 12. 2016	06:47:11	4,1

 SÚRAO	Vývoj a ověřování metodik pro charakterizaci horninového prostředí – výsledky monitoringu v přivaděči Bedřichov		Evidenční označení:
			SÚRAO TZ 289/2018
2017	4. 3. 2017	16:46:30	3,6
	8. 4. 2017	22:23:32	4,0
	31. 5. 2017	20:25:45	4,1
	10. 11. 2017	11:19:26	3,5
	7. 12. 2017	17:43:09	3,8
	26. 12. 2017	11:15:50	3,9
2018	14. 4. 2018	15:59:10	3,3

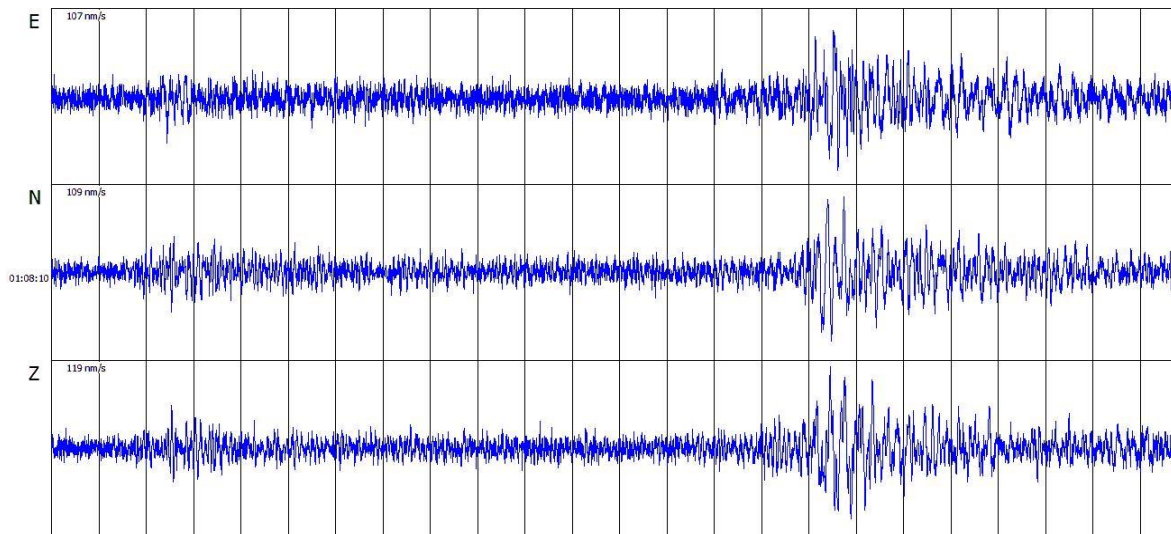
Lokální magnitudo je určené ze záznamů stanic České regionální seismické sítě a je převzato z Katalogu regionálních seismických jevů, který sestavuje Geofyzikální ústav Akademie věd ČR.

Seismogram jednoho z nejsilnějších důlních otřesů u Lubinu, který byl zaznamenán seismickým snímačem ve staničení štoly 235 metrů dne 31.5.2017 ve 20:25:45 světového času (UTC) je na Obr. 61. Maximální hodnoty na složkách rychlosti kmitání byly 34 $\mu\text{m/s}$ na složce Z, 49 $\mu\text{m/s}$ na složce N, 92 $\mu\text{m/s}$ na složce E.



Obr. 61 Seismogram důlního otřesu u Lubinu 31.5.2017 20:25:45 UTC ML4,1

U Lubinu dochází ke stovkám důlních otřesů s různými magnitudy za rok. Zatímco v záznamu původní seismické stanice je možné rozpoznat tyto důlní otřesy od magnituda asi 1,9, tak v záznamu nejnovější stanice jsou rozpoznatelné již otřesy s magnitudem 1,2. Je to doloženo na Obr. 62, na kterém je seismogram důlního otřesu ze dne 21.4.2018 01:08:11 UTC zaznamenaný nejnovější seismickou stanicí ve staničení 870 m. Otřes s lokálním magnitudem 1,2 měl v bedřichovské štolě maximální amplitudy rychlosti kmitání cca 0,1 $\mu\text{m/s}$. Amplitudy tohoto slabého seismického jevu jsou tedy přibližně 500x menší než amplitudy nejsilnějších seismických jevů (cca 50 $\mu\text{m/s}$).




Obr. 62 Seismogram důlního otřesu u Lubinu 21.4.2018 01:08:11 UTC ML1,2

Původní stanice postavená na základě stolního PC a se dvěma seismickými převodníky TEDIA UDAQ-2104 (pro dva snímače) je spolehlivá, ale nemůže dlouhodobě měřit ve vlhkém prostředí a má poměrně velkou spotřebu elektrické energie. Není navržena pro měření velmi slabých seismických jevů, ale při použití citlivých geofonů, může v příznivých podmínkách spolehlivě měřit seismické jevy s největšími amplitudami rychlosti kmitání již od jednotek $\mu\text{m/s}$ výše. S připojeným novým seismickým snímačem s citlivými geofony SM6-HB(UB) 3K5 by měla rozlišení 24 nm/s, měřicí rozsah ± 25 mm/s a frekvenční rozsah 2 Hz až 100 Hz.

V současnosti je stále ještě její velkou výhodou kvalitní programové vybavení. Registrační program RUP i program k prohlížení průběžných záznamů KUK jsou prověřeny dlouhodobým používáním a vyznačují se snadnou obsluhou a velkou spolehlivostí. Program KUK má i další funkce k interpretaci jevů jako je odečet času pomocí kurzoru, digitální filtrace signálu pro odstranění šumu, výpočet amplitudového spektra, výpočet lokální magnituda, tisk seismogramů a další. Tato stanice zůstává i nadále možnou volbou (alternativou) pro měření seismických jevů ve vhodných objektech především na povrchu.

K měření slabých seismických jevů je určen nejnovější seismometr EE&S, který ÚSMH AV ČR instaloval v bedřichovské štole ve staničení 870 m a který tam stále měří. Je nutné dokončit prověření jeho programového vybavení (software) v provozu a do interpretačního programu pro zpracování jím zaznamenaných seismických dat je potřeba integrovat všechny funkce k interpretaci jevů. Proto ÚSMH AV ČR ponechá tento seismometr ve štole ve zkušebním provozu, dokud to bude technicky, organizačně a ekonomicky možné.

 SÚRAO	Vývoj a ověření metodik pro charakterizaci horninového prostředí – výsledky monitoringu v přivaděči Bedřichov	Evidenční označení:
		SÚRAO TZ 289/2018

5 Monitoring teplot

Autoři: J. Šafanda a P. Dědeček

Dlouhodobý teplotní monitoring probíhá jednak uvnitř bedřichovského tunelu, dále na povrchu v jeho ose a také na dně nádrže Josefův Důl. Jeho účelem je popsat teplotní pole horninového masivu, kvantifikovat vnější (klíma) a vnitřní (vodárenský přivaděč) faktory, které ho ovlivňují a posoudit případný vliv konvektivního přenosu tepla puklinovým systémem masivu.

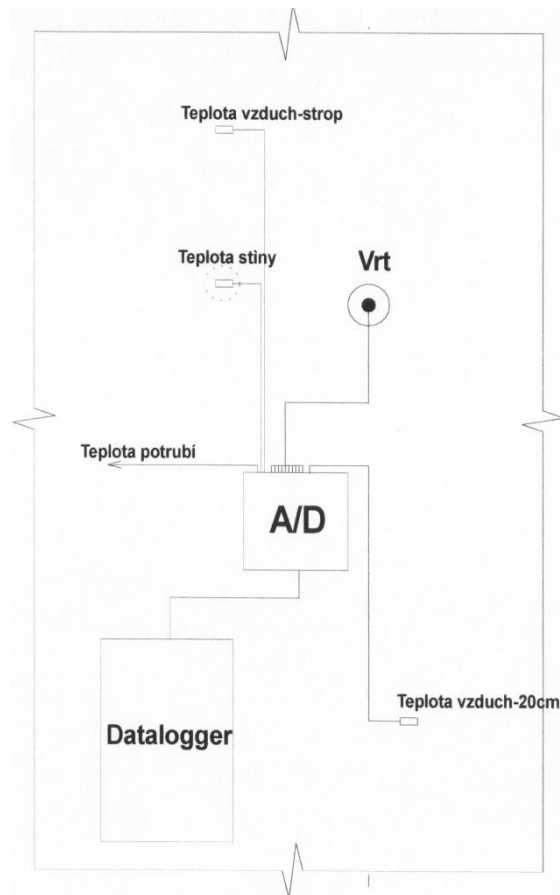
5.1 Přístroje a metodika

Kontinuální monitoring probíhá celkem na šesti stanovištích (3 x tunel, 2 x povrch, nádrž). V pěti případech je měření zajišťováno autonomní jednotkou Minilog (4 – 6 kanálů) výrobce FIEDLER AMS s.r.o., v jednom případě (tunel 250 m) pak šestnácti kanálovou jednotkou M4016 ve spojení se dvěma 4 kanálovými převodníky stejného výrobce. Na všech stanovištích je nastaven krok měření 20 min a odečet probíhá několikrát ročně s přihlédnutím ke klimatickým podmínkám.

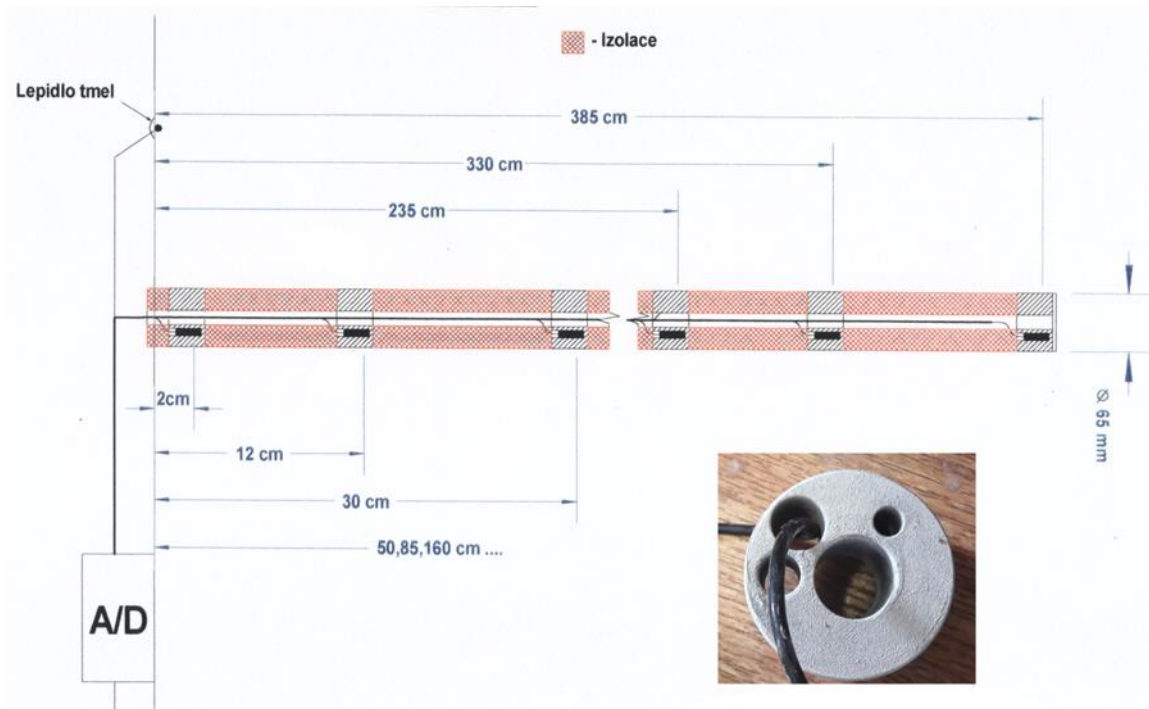
5.1.1 Instalace v bedřichovském tunelu

V bedřichovském tunelu probíhá dlouhodobý teplotní monitoring horninového masivu na třech stanovištích ve vzdálenostech 250, 880 a 1700 m od vstupu do tunelu. Teplota se měří ve vrtech přibližně kolmých ke stěně tunelu, které mají průměr několik centimetrů a délku (hloubku) 200 až 380 cm.

Nejdéle, od srpna 2008, probíhá měření ve vzdálenosti 250 m od vstupu do tunelu. Měření je zde zajištěno jednotkou M4016 se dvěma měřícími moduly (převodníky) TEP06/S (FIEDLER AMS s.r.o.). Jednotka disponuje 12 měřícími kanály a měření probíhá s krokem 20 min. Platinová teplotní čidla jsou instalována jednak ve vrtu do hloubky 380 cm od stěny tunelu (hloubky 2, 12, 30, 50, 85, 160, 235, 330 a 380 cm), na stěně tunelu, dále u stropu pro monitoring teploty vzduchu a rovněž na vodárenském potrubí. Na Obr. 63 je schematicky znázorněno zapojení měřící sestavy. Odpor jednotlivých teplotních čidel je měřen převodníky (A/D), digitalizován a poslán do dataloggeru, kde je na základě zadaných konstant spočítána teplota. Instalace teplotních čidel uvnitř vrtu je schematicky znázorněna na Obr. 64. Tepelně vodivé elektronové prstence (šedá barva) jsou pevně osazené na málo tepelně vodivé trubce z odolného plastu v předem stanovených vzdálenostech. Prstence obsahují teplotní čidla orientovaná směrem dolů (černé obdélníky), přičemž kabely mohou být vedeny uvnitř nebo podél trubky. V průběhu zasouvání řetězce je vždy mezi prstence vložena izolace pomocí pěnového PVC (růžová barva) tak, aby nemohlo docházet ke konvektivnímu přenosu tepla případným prouděním vzduchu. Samotná instalace řetězce je zachycena na fotografii na Obr. 65.



Obr. 63 Schéma zapojení měřící sestavy u vrtu ve vzdálenosti 250 m od vstupu do tunelu



Obr. 64 Schéma instalace teplotního řetězce ve vrtu uvnitř bedřichovského tunelu, ve výřezu detail prstence vyrobeného ze slítiny hořčíku (elektron)

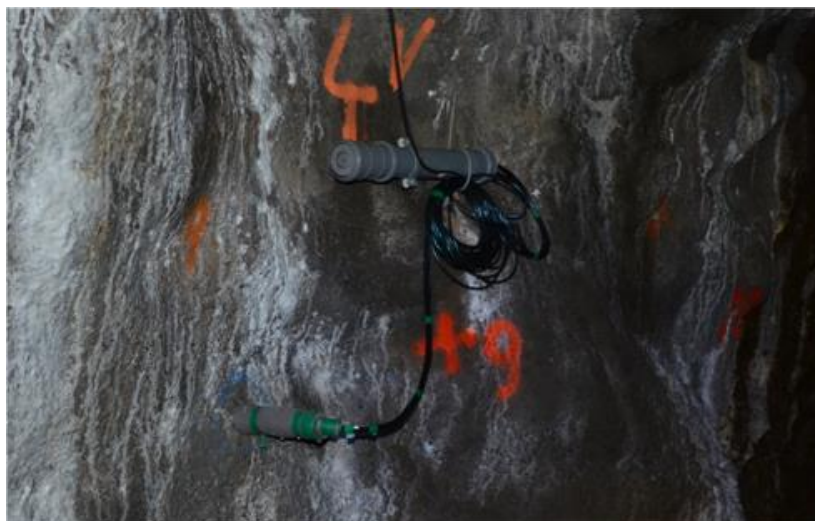
Druhé stanoviště se nachází 880 m od vstupu do tunelu, kde je předpokládána největší mocnost nadloží nad tunelem (140 m). Zde byl vyvrtán subhorizontální vrt do hloubky 205 cm od stěny tunelu a měření bylo spuštěno v červenci 2012. Monitoring s krokem 20 min. probíhá ve vzdálenostech 205 cm, 160 cm, 85 cm, 30 cm a 12 cm od stěny tunelu a ve vzduchu u stropu. Je zajištěn jednotkou Minilog T6-U6-RV1-PV1 (6 měřících kanálů T, FIEDLER AMS s.r.o.).

Třetí stanoviště ve vzdálenosti 1700 m od vstupu do tunelu bylo situováno do poruchového pásma, kde dochází k přítokům vody do tunelu a lze tedy předpokládat vliv konvektivního přenosu tepla. Byl zde vyvrtán subhorizontální vrt do hloubky 190 cm od stěny tunelu a měření, které bylo spuštěno v prosinci 2012, zajišťuje shodná jednotka Minilog. Monitoring s krokem 20 min. probíhá ve vzdálenostech 190 cm, 160 cm, 85 cm, 30 cm a 12 cm od stěny tunelu a ve vzduchu u stropu tunelu.

Jak je patrné z Obr. 66, jednotka Minilog je velice skladná a snadno se instaluje na stěnu horninového masivu. Samotný datalogger je chráněn v pouzdře z plastové trubky.



Obr. 65 instalace teplotního řetězce v jednom z horizontálních vrtů



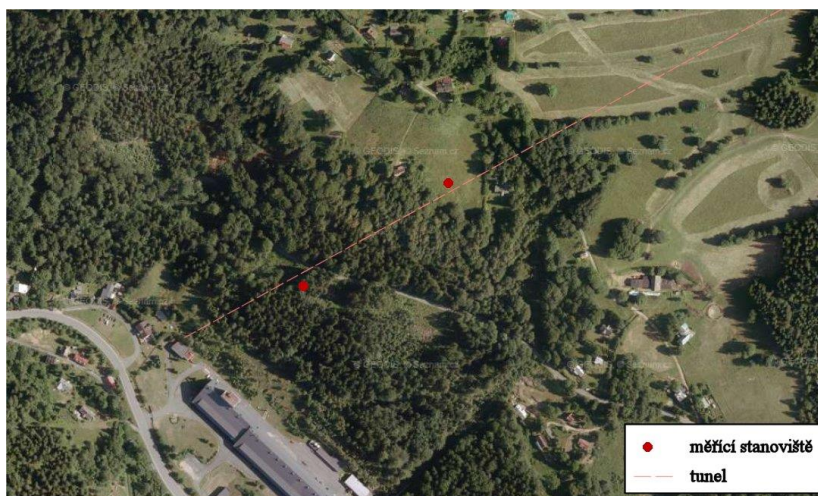
Obr. 66 Fotografie umístění měřící aparatury na metrži 1700 m od vstupu do tunelu

5.1.2 Instalace na povrchu nad bedřichovským tunelem

Teplotní měření v půdě nad tunelem byla zahájena v létě 2008. Jejich cílem bylo zjistit průměrnou roční teplotu půdy na dvou nejtypičtějším stanovištích okolí tunelu – v lese a na louce (Obr. 67). Lesní stanoviště se nachází v nadmořské výšce 700 m n.m., luční v 750 m n.m.

V první fázi monitoringu, která trvala na stanovišti v lese od 31.7.2008 do 14.9.2011 a na louce od 21.8.2008 do 12.4.2011, obě s mezerou 38 dní (14.3. - 20.4.2010) způsobenou přeplněním paměti záznamníku, byly použity autonomní jednotky Minikin TT se dvěma teplotními čidly (výrobce EMS Brno, udávaná absolutní přesnost 0,2 °C, recalibrováno v laboratoři GFU). Měření probíhala v hodinových intervalech v hloubkách 50 cm a 70 cm (les) a 50 cm a 90 cm (louka). Vzhledem k uvedeným výpadkům bylo možné spočítat roční průměry pro dvě 12měsíční disjunktní období – pro rok 2009 a pro období 20.4.2010 – 19.4.2011 (zde u louky s korekcí na chybějících 8 dní v dubnu 2011).

Vzhledem k nedostatečné spolehlivosti jednotek Minikin TT byla v létě 2012 instalována modernější čidla. Jedná se o autonomní jednotky Minilog T4 firmy Fiedler, které v použité konfiguraci disponují čtyřmi kanály pro měření teploty s rozlišením 0,01°C a teplotní stabilitou 5 ppm. Měření teploty půdy v hloubkách 20 cm, 50 cm a 100 cm jsou na obou stanovištích doplněna měřením teploty vzduchu ve 2 m nad zemí. Měří se s časovým krokem 1 hodina od 11.6.2012, poslední odečet dat proběhl 27.dubna 2018.

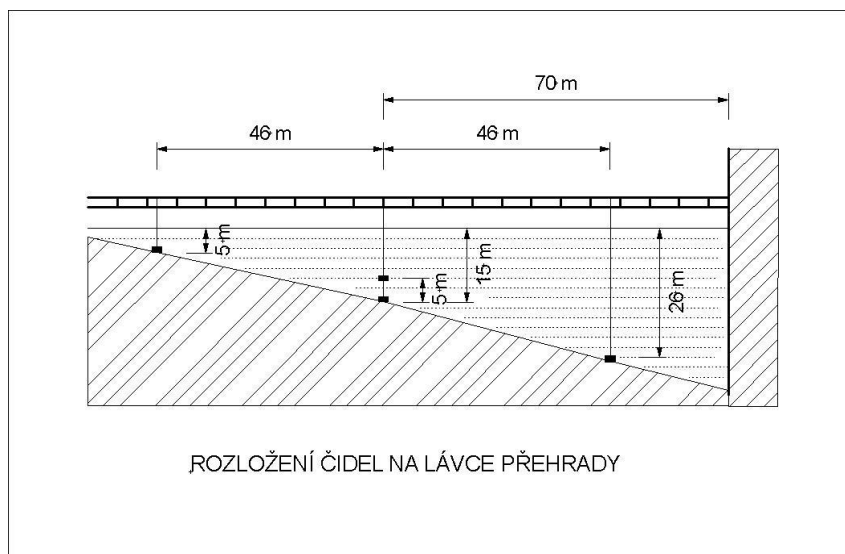


Obr. 67 Zákres umístění měřících stanic na povrchu v linii tunelu

5.1.3 Instalace v nádrži Josefův Důl

Koncem července 2012 byl spuštěn monitoring teploty na dně nádrže Josefův Důl, v blízkosti ústí bedřichovského tunelu. Byla instalována tři teplotní čidla na dno nádrže v hloubkách 5, 15 a 26 m a jedno čidlo ve vodě v hloubce 10 m, totiž 5 m nad čidlem na dně v hloubce 15 m. Rozložení teplotních čidel je patrné z Obr. 68. Monitoring je zajišťován, stejně jako v případě lesa a louky, autonomní jednotkou Minilog T4 firmy Fiedler, která byla původně umístěna na dně nádrže v hloubce 15 m. V létě 2014 však došlo k jejímu poškození a několikaměsíčnímu výpadku měřených dat. V lednu 2015 byla instalována jednotka nová, která byla z důvodu

snadnějšího vytahování i menšího hydrostatického tlaku zavěšena zhruba 5 m pod hladinu nad čidlo na dně v hloubce 15 m. Teplota je měřena s časovým krokem 20 minut. Poslední odečet dat proběhl 27. dubna 2018



Obr. 68 Rozložení teplotních čidel v nádrži Josefův Důl

5.2 Teplotní monitoring

Poslední odečet dat proběhl na konci dubna 2018. Všechny měřící stanice kromě instalace v tunelu 250 m od jeho vstupu do a jednoho čidla na dně nádrže pracují bez problému.

5.2.1 Monitoring v bedřichovském tunelu

V bedřichovském tunelu probíhá teplotní monitoring již téměř deset let. První měření bylo spuštěno v roce 2008 ve vrtu 250 m od vstupu do tunelu a do roku 2012 běželo bez problémů. V roce 2012 došlo kvůli poruše převodníků k většímu výpadku měření, které bylo znovu spuštěno po jejich výměně. Od té doby běžel monitoring bez výpadků až do roku 2016, kdy došlo k poruše záznamové jednotky. Ta byla odstraněna, nicméně v průběhu měření byly na některých kanálech zaznamenány odchylky, aniž bylo možné určit, zda je jejich původ v elektronice vně masivu, či přímo v teplotních čidlech. Proto byla provedena na jaře 2018 kontrola aparatury přímo uvnitř tunelu (Obr. 69) a na základě analýzy získaných dat bylo v květnu 2018 přistoupeno k vyjmutí řetězce z vrtu (Obr. 70).

Kontrola aparatury uvnitř tunelu byla možná díky možnosti odpojit čidla od převodníků a postupně na jejich místo na několik minut připojit přesný odporový normál (na Obr. 69 v pravém dolním rohu) a zároveň změřit přesným ohmmetrem odpor jednotlivých čidel. Analýzou dat v laboratoři GFU pak byly zjištěny odchylky některých kanálů a proto byl následně řetězec vyjmut z vrtu. Vyjmutí řetězce proběhlo bez problémů, nicméně jako problém se ukázalo vyjmutí samotných čidel z kovových prstenců. V jednom případě se to díky oxidaci materiálu prstence nepodařilo vůbec. Čidla byla následně umístěna do kalibrační lázně a byla provedena jejich kalibrace. Získané kalibrační konstanty byly použity pro zpětný přepočítání naměřených dat. Tento přepočítání bylo ale komplikované tím, že ke změnám charakteristik

některých čidel docházelo nahodile během měření bez zjevné vnější příčiny. Bylo nutné hledat v datech místa, kde došlo ke změně chování čidla a od této doby aplikovat nové kalibrační konstanty. Například v hloubce 85 cm, kde byla změna jednoznačně největší, se měřená teplota odchytila během prosince 2015 o téměř $0,3^{\circ}\text{C}$. Platinová čidla jsou pokládána za velice stabilní a odolná, a proto jsou tyto změny překvapivé a budou podrobeny dalšímu zkoumání. Je možné, že analýza ukáže potřebu použít v budoucnu odolnější čidla. Již dnes na trhu existují speciální čidla odolná jak vůči chemickým změnám, tak i vůči radioaktivnímu záření.



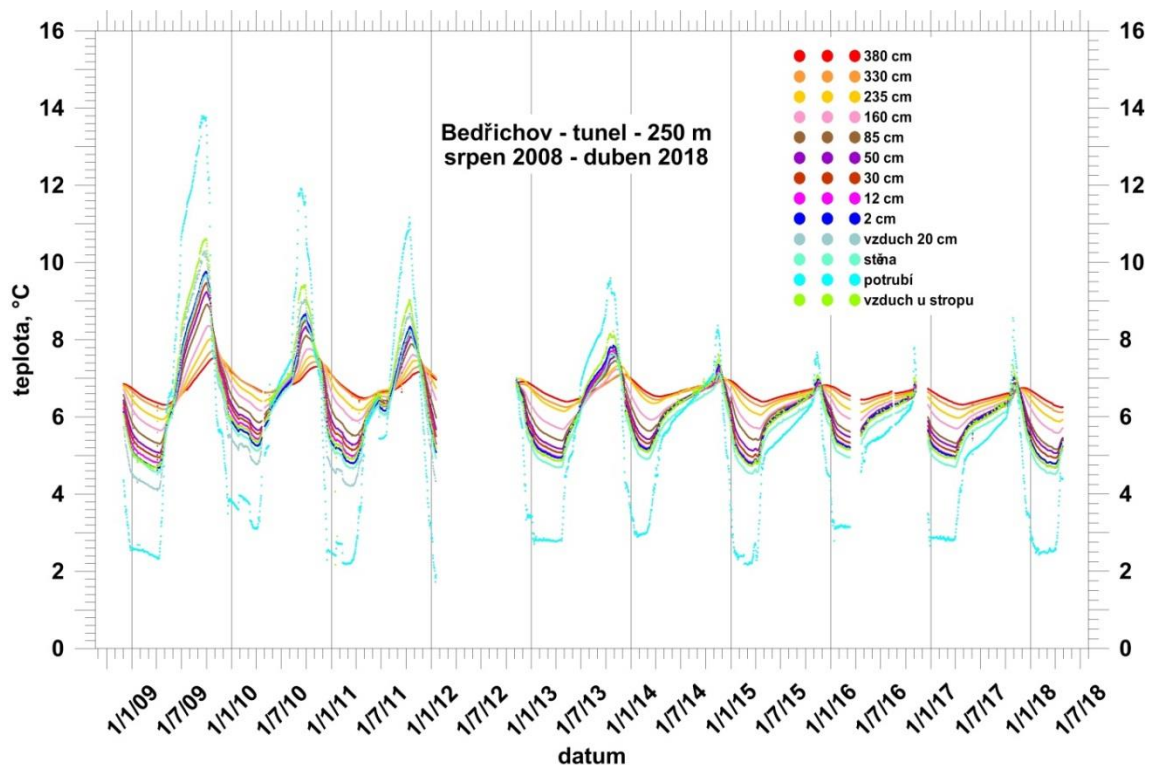
Obr. 69 Kontrola aparatury uvnitř bedřichovského tunelu.



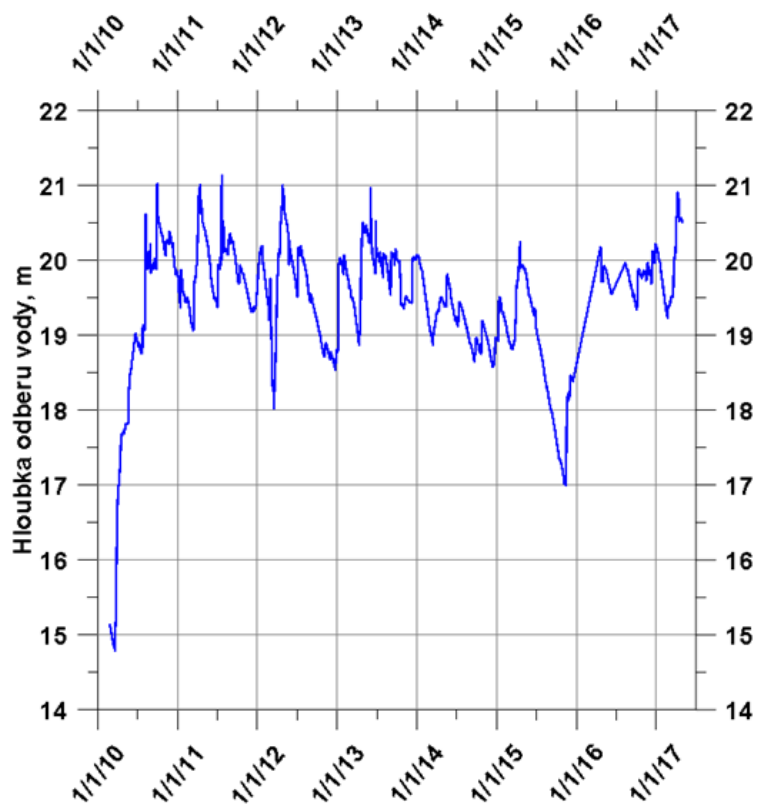
Obr. 70 Vyjímání teplotního řetězce z vrtu, ve výřezu pohled na zoxidovaný kovový prsteneček

Na Obr. 71 je znázorněn průběh měřených teplot za celou dobu monitoringu v letech 2008 až 2018. Je zde patrný pokles teploty vody přiváděné potrubím z nádrže Josefův Důl v letních měsících a s tím související pokles amplitud časových variací teploty uvnitř horninového

masivu. Z toho je zřejmé, že teplotní režim v tunelu je určován teplotou přiváděné vody. Není ale jasné, z jakého důvodu v průběhu let teplota vody v potrubí klesala. Dle informace obsluhy přehradní nádrže dochází k odběru vody ze stále stejného okna v nadmořské výšce 711 m. Na základě této informace a informace o změnách hladiny vody v nádrži tak byla spočítána hloubka odběru vody (Obr. 72). Nelze nalézt žádnou korelaci mezi hloubkou odběru vody a teplotou vody v přivaděči.

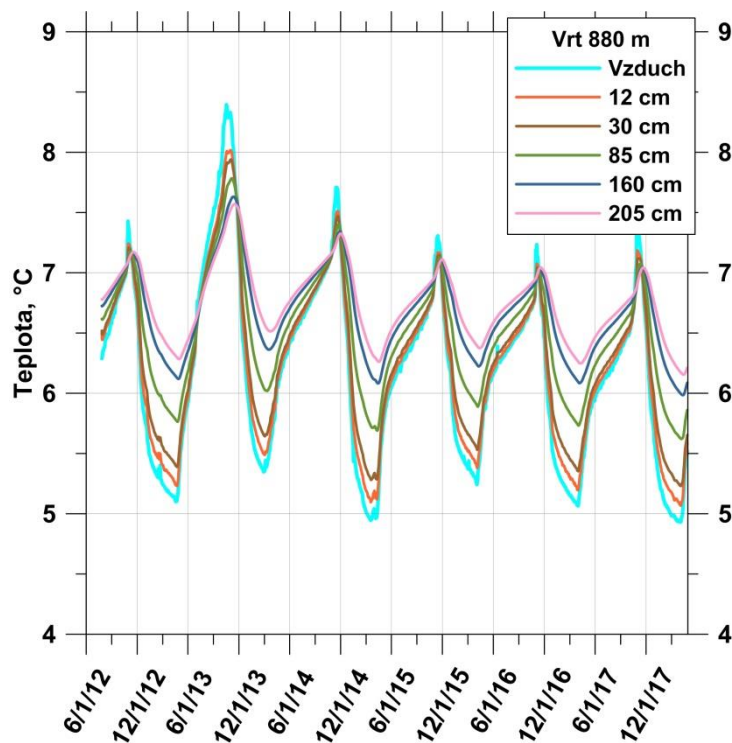


Obr. 71 Graf průběhu teplot ve vrtu na metrži 250 m od vstupu do tunelu.

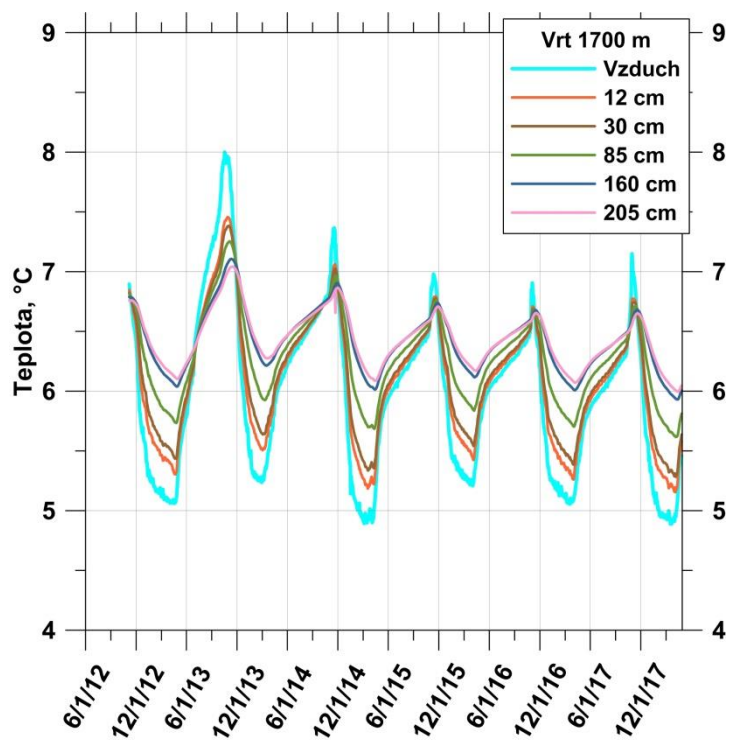


Obr. 72 Graf změn hloubky odběru vody z přehradní nádrže

Měření na stanovištích 880 a 1700 m běží od roku 2012. Obě jsou osazena shodným 6-ti kanálovým dataloggerem, který neumožňuje odpojení jednotlivých kanálů a proto není možná kontrola čidel bez vytažení řetězce z vrtu. Měření zde probíhají od počátku bez problémů a jak je vidět na Obr. 73 a Obr. 74, lze sledovat obdobný průběh měřených teplot jako na metráži 250 m.



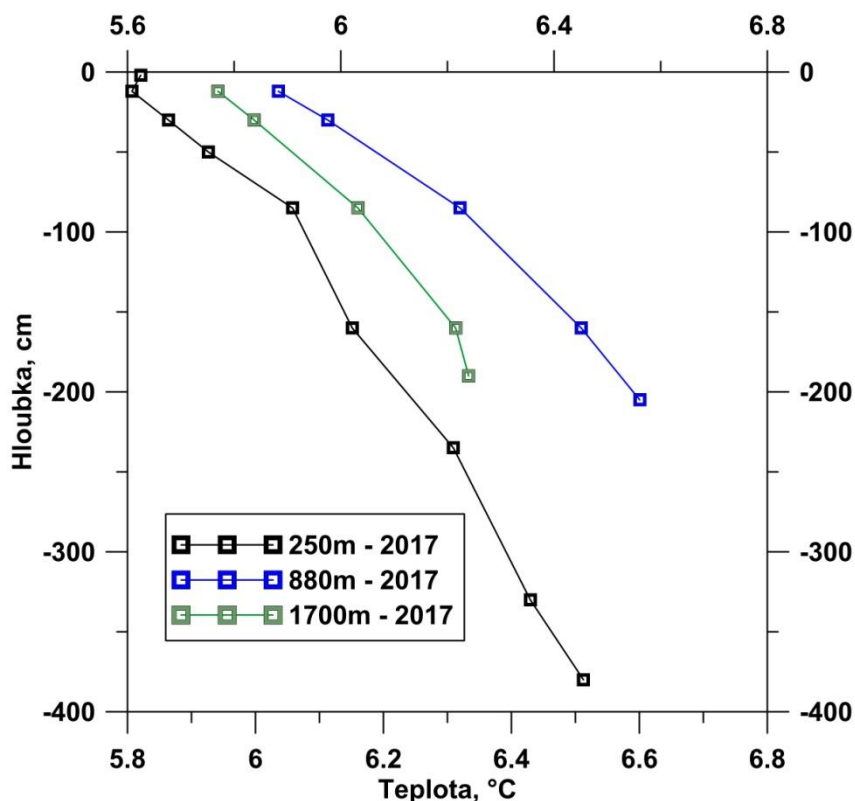
Obr. 73 Graf průběhu teplot ve vrtu na metrži 880 m od vstupu do tunelu.



Obr. 74 Graf průběhu teplot ve vrtu na metrži 1700 m od vstupu do tunelu.

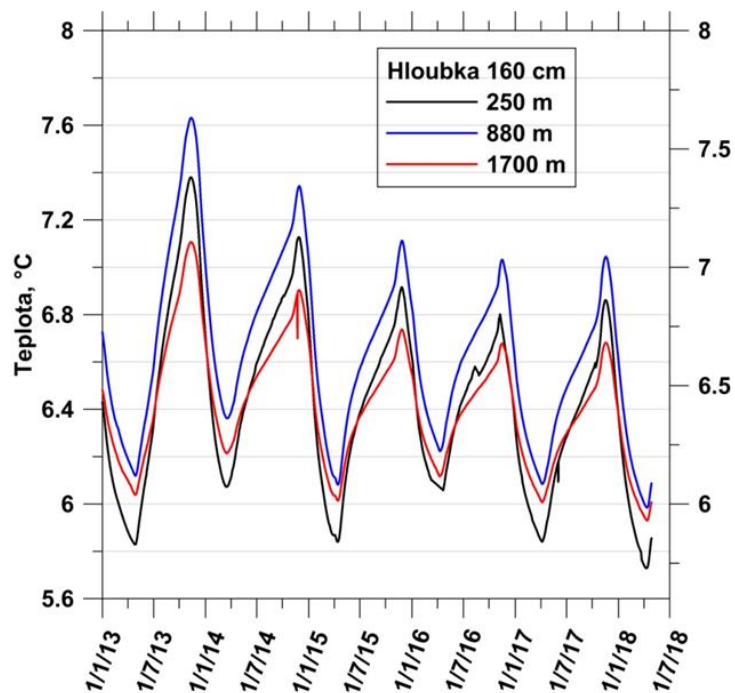
Jak bylo zmíněno výše, průběh teplotních změn v čase je na všech třech stanovištích podobný, nicméně jsou zde patrné rozdíly. Na Obr. 75 jsou znázorněny roční průměrné teploty v různých hloubkách jednotlivých vrtů. Protože teplota na všech stanovištích s hloubkou roste, dochází k ochlazování horninového masivu vodou proudící v potrubí. Teplota vody má tedy zásadní

vliv na teplotu vzduchu v tunelu, nicméně je zde patrný i vliv teploty horniny související s různou hloubkou tunelu pod zemským povrchem. Nejvyšší roční průměrné teploty jsou tak ve vrtu 880 m od vstupu do tunelu, kde je mocnost nadloží největší (140 m), a je zde tedy vyšší teplota okolního masivu.

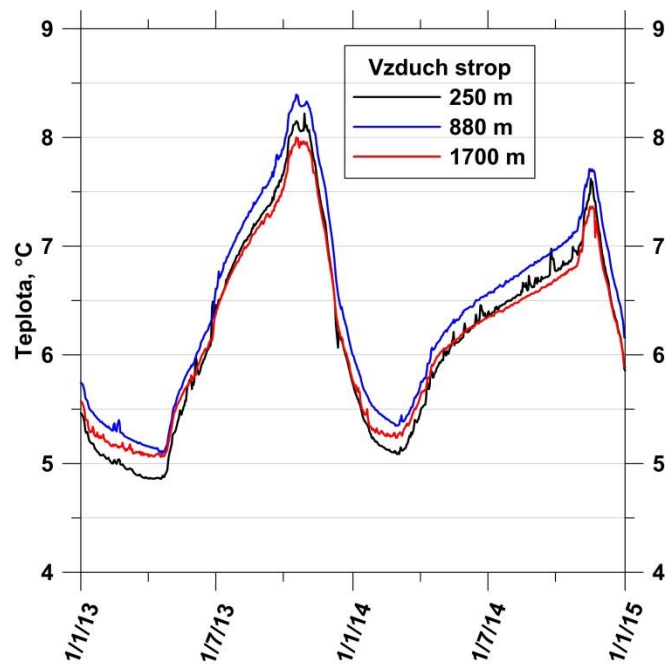


Obr. 75 Roční průměrné teploty v roce 2017 v jednotlivých sledovaných vrtech.

Porovnání průběhu teplot v hloubce 160 cm v jednotlivých vrtech je znázorněno na Obr. 76. Amplituda teploty na stanovišti 1700 m je podstatně nižší, než amplitudy na dalších stanovištích. Protože je ale toto stanoviště nejbližší nádrži, měla by zde být naopak amplituda větší, nebo shodná s amplitudami dále po proudu vody v potrubí. Jedním z důvodů tohoto jevu by mohla být nižší tepelná difuzivita horniny v místech, kde tunel prochází tektonickou poruchou a je zde velké množství puklin. Pokud se ale podíváme na Obr. 77, kde je detailní pohled na průběh teploty vzduchu u stropu tunelu na jednotlivých stanovištích, zjistíme zde podobný jev, což výše zmíněnou teorii vylučuje. Rozdíl teplot vzduchu u stropu tunelu ve vzdálenostech 250 a 880 m jeho vstupu do jeu přibližně stejný, kdežto na stanovišti 1700 m je o několik desetin °C menší. Vysvětlením těchto rozdílů by tak mohla být podstatně vyšší vlhkost v této části tunelu, díky které dochází k útlumu amplitudy teploty vzduchu.



Obr. 76 Graf průběhu teploty v hloubce 160 cm v jednotlivých sledovaných vrtech



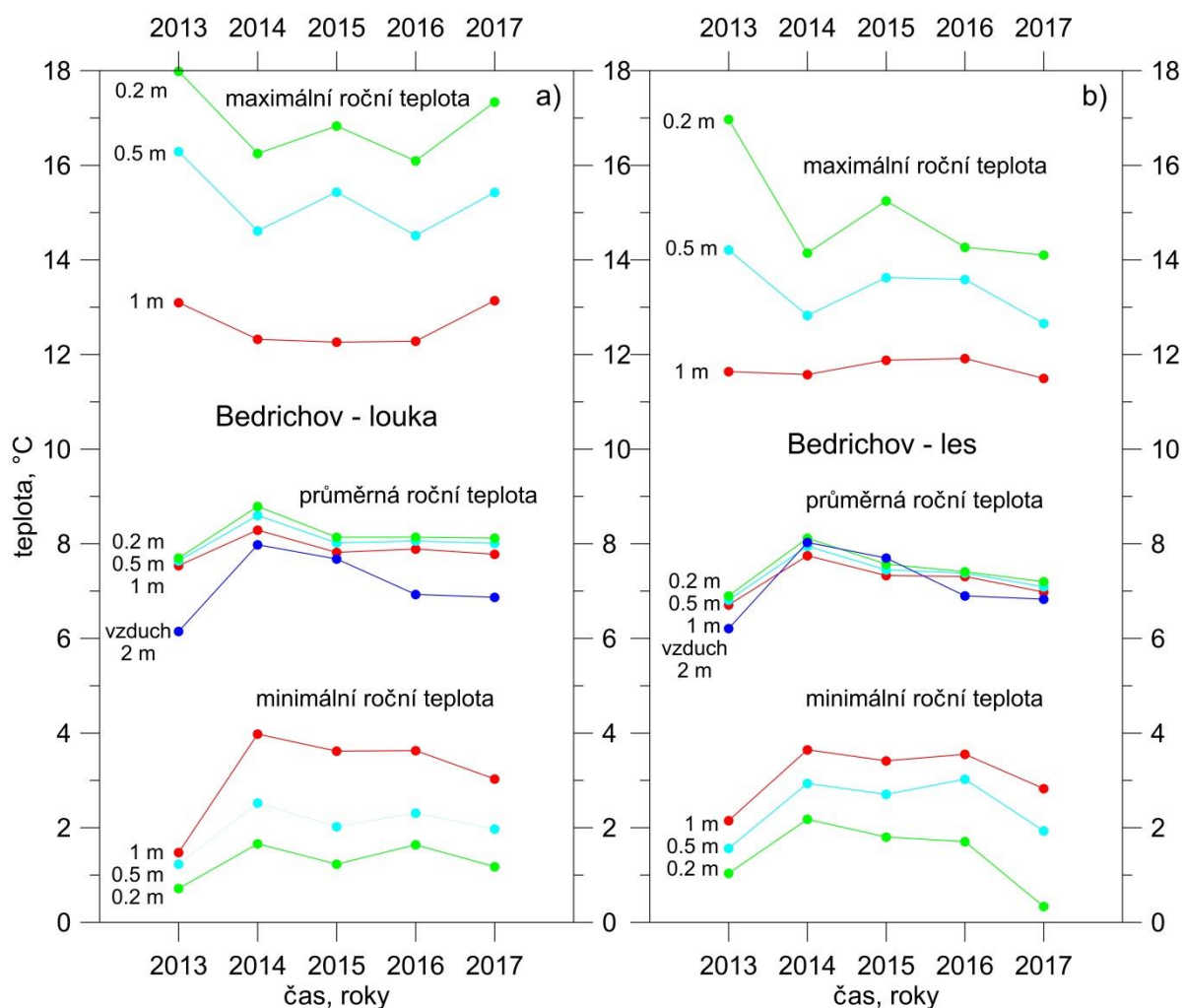
Obr. 77 Graf průběhu teploty vzduchu na jednotlivých stanovištích

5.2.2 Monitoring na povrchu nad tunelem

Vypočtené průměrné roční teploty jsou uvedeny v Tab. 10 a také, spolu s ročními maximy a minimy teploty v půdě, vyneseny v Obr. 78.

Tab. 10 Průměrné roční teploty vzduchu (2 m nad zemí) a půdy (v hloubkách 20 cm, 50 cm a 100 cm) na lučním (750 m n.m.) a lesním (700 m n.m.) stanovišti nad bedřichovským tunelem.

Louka	Vzduch	20cm	50cm	100cm
2013	6,15	7,70	7,64	7,54
2014	7,98	8,79	8,60	8,29
2015	7,68	8,14	8,02	7,82
2016	6,93	8,15	8,06	7,89
2017	6,87	8,12	8,01	7,78
Průměr 2013-17	7,12	8,18	8,07	7,86
Les				
2013	6,21	6,90	6,81	6,71
2014	8,03	8,12	7,95	7,75
2015	7,70	7,57	7,45	7,33
2016	6,90	7,41	7,38	7,31
2017	6,83	7,20	7,09	6,98
Průměr 2013-17	7,13	7,44	7,34	7,22

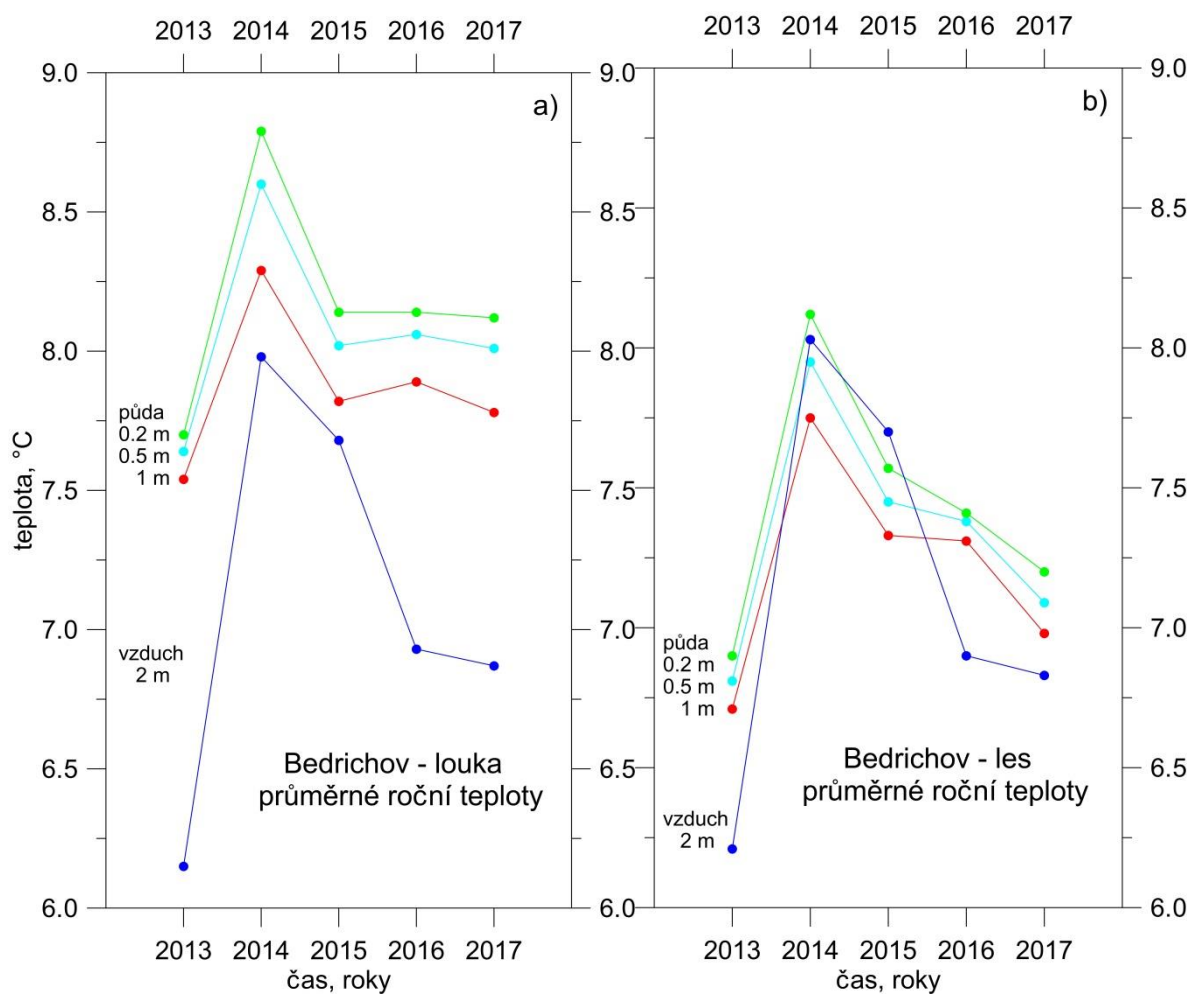


Obr. 78 Průměrné roční teploty v půdě a ve vzduchu a roční maxima a minima teploty v půdě na louce (a) a v lese (b).

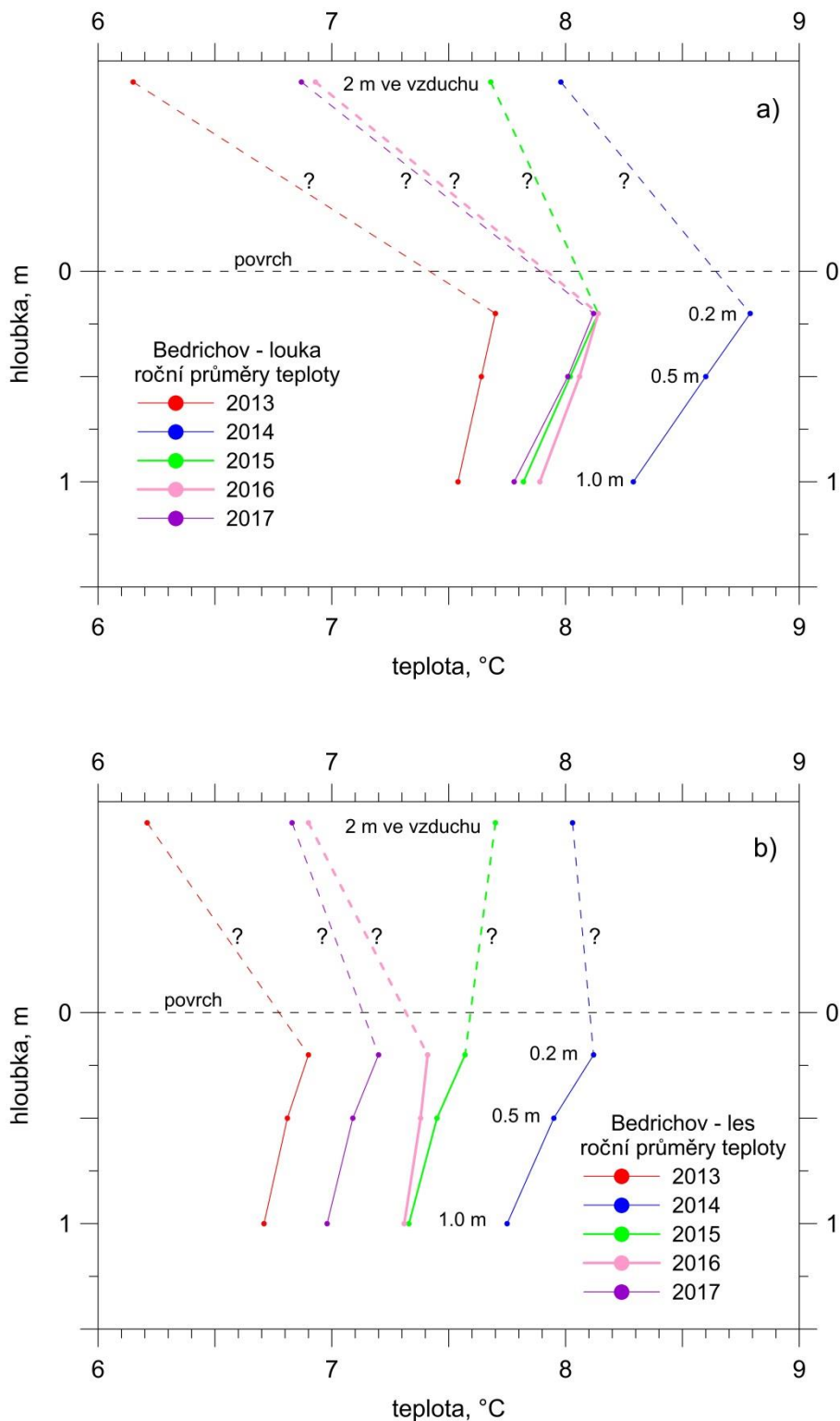
Z Tab. 10 a Obr. 78 je zřejmé, že v období 2013-17:

- Průměrné roční teploty vzduchu se mezi oběma stanovišti lišily v jednotlivých letech nepatrně (maximální rozdíl 0,06 °C v roce 2013) a průměrný rozdíl byl 0,01 °C.
- Průměrné roční teploty půdy na louce jsou výrazně vyšší než v lese. Průměrný rozdíl ve 20 cm byl 0,74 °C (max. 0,92 °C, min. 0,57 °C), v 50 cm 0,73 °C (max. 0,92 °C, min. 0,57 °C) a ve 100 cm 0,64 °C (max. 0,83 °C, min. 0,49 °C).
- V průměru je půda ve 20 cm teplejší než vzduch ve 2 m. Na louce je to o 1,06 °C (max. 1,55 °C v roce 2013, min. 0,46 °C v roce 2015)(Obr. 79a). V lese je půda v průměru teplejší o 0,31 °C (max. 0,69 °C v roce 2013, min. -0,13 °C v roce 2015, tj. půda byla v tomto roce chladnější)(Obr. 79b).
- Průměrné roční teploty v půdě na obou stanovištích ve všech pěti letech pozorování klesají mezi 20 cm a 100 cm s hloubkou. Tento pokles činí na louce v průměru 0,32 °C (max. 0,50 °C v roce 2014, min. 0,16 °C v roce 2013)(Obr. 80a) a v lese 0,22 °C (max. 0,37 °C v roce 2014, min. 0,10 °C v roce 2016)(Obr. 80b). Pokud by se teplo šířilo mezi 20 cm a 1 m půdy jen vedením a tepelná vodivost se zde během roku neměnila, znamenalo by to, že v ročním průměru teče teplo od povrchu do hloubky, tedy opačně

než je směr proudění zemského tepelného toku, jehož průměrná hodnota pro Český masiv je 68 mW/m^2 (Čermák a kol., 1991). Pro odhad tepelné vodivosti půdy 1 W/(m.K) by byl průměrný roční tok tepla do půdy (při pozorovaném spádu teploty s hloubkou) na louce 400 mW/m^2 a v lese 275 mW/m^2 . Pokles průměrné roční teploty s hloubkou je v souladu s našimi dřívějšími pozorováními na stanicích Malence ve Slovinsku a Caravelinha v Portugalsku, i když v Bedřichově je pokles mírnější. Jeden z možných mechanismů tohoto jevu byl studován Goodrichem (1982). Spočívá v časově proměnné tepelné a teplotní vodivosti půdy během ročního cyklu, kdy v chladnější části roku je vodivost vyšší buď v důsledku promrznutí půdy, nebo v důsledku vyšší půdní vlhkosti. Jak je zřejmé z Obr. 78, k promrznutí půdy ve sledovaném hloubkovém intervalu 20 cm až 1 m na našich stanovištích ve sledovaném období nedošlo, takže v úvahu připadají jen změny půdní vlhkosti. Je ale možné, že svoji roli hraje i konvektivní přenos tepla při vsakování srážek nebo vody z tajícího sněhu. Na stanicích ve Slovinsku a Portugalsku, kde je monitorována teplota do hloubky 40 m končí pokles průměrné roční teploty s hloubkou ve 2,5 m, respektive v 10 m. Jako okrajovou podmínku pro geotermický model zemské kůry je potřeba brát roční průměr v takové hloubce, kde se již tyto připovrchové vlivy neuplatňují, tj. minimálně v hloubce, kde roční průměr přestává klesat s hloubkou. Je tedy možné, že tato hodnota bude v Bedřichově o několik desetin stupně nižší, než je průměr ročních teplot z pěti zaznamenaných ročních cyklů v 1 m, tj. $7.9 \text{ }^\circ\text{C}$ na louce a $7.2 \text{ }^\circ\text{C}$ v lese.



Obr. 79 Průměrné roční teploty v půdě a ve vzduchu na louce (a) a v lese (b).



Obr. 80 Hloubkové profily průměrných ročních teplot v půdě (20 cm - 1 m) a roční teploty vzduchu (2 m) na louce (a) a v lese (b) v jednotlivých letech období 2013-2017.

- Při srovnání teplot naměřených na louce a v lese je třeba vzít v úvahu rozdíl v nadmořské výšce obou stanovišť, který činí 50 m. Podle Kubíka (1990) klesá průměrná roční teplota půdy o 0,47 K na 100 metrů nadmořské výšky. To znamená, že

po korekci na nadmořskou výšku – jako kdyby luční stanoviště bylo v nadmořské výšce lesního stanoviště, 700 m n.m., by byla průměrná teplota půdy v hloubce 50 cm na louce v období 2013-2017 rovna $7,9 + 0,47 \times 0,5 = 8,1$ °C. Rozdíl v průměrných teplotách způsobený rozdílným vegetačním krytem lze tedy pro sledované období odhadnout jako $8,1 - 7,2 = 0,9$ °C. Jinými slovy, půda na louce je v ročním průměru přibližně o 0,9 °C teplejší než v lese. Pro korekci teploty vzduchu na nadmořskou výšku byla použita hodnota poklesu o 0,7 K na 100 m výšky odvozená z rozdílu mezi průměrnou roční teplotou v Liberci a Bedřichově Petrovičem (1969, Tabulka 2.4). Průměrná teplota vzduchu v období 2013-2017 by na louce v nadmořské výšce 700 m byla tedy $7,12 + 0,7 \times 0,5 = 7,47$ °C. To je přibližně o 0,3 °C více než teplota v lese.

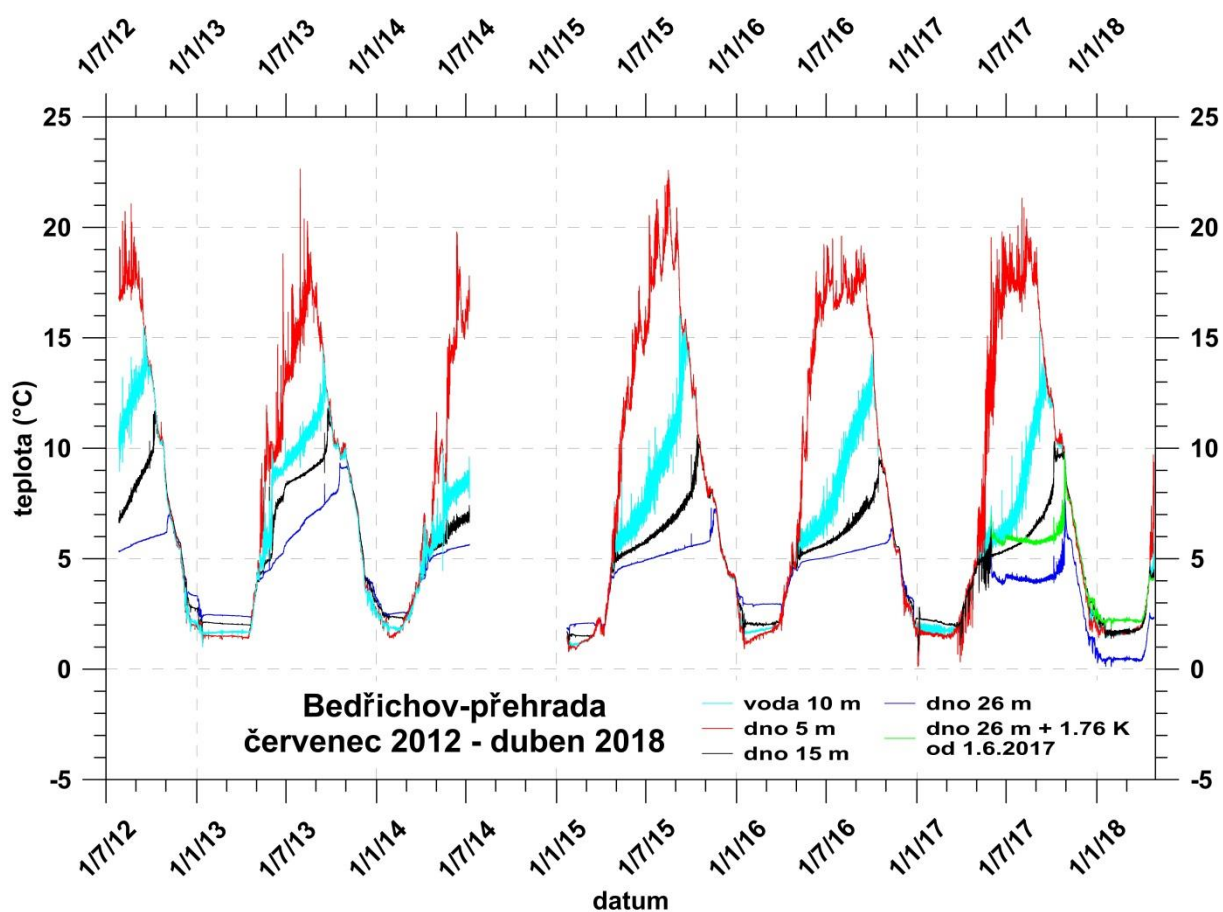
5.2.3 Monitoring v nádrži Josefův Důl

Průběh naměřených teplot je zachycen v Obr. 81. V důsledku poruchy dataloggeru v jezeře došlo k přerušení monitoringu v období 9.7.2014 – 22.1.2015 (půl roku) na všech čidlech a v období 25.12.2016 – 1.6.2017 na čidle na dně v hloubce 26 m. Průměrnou roční teplotu jednotlivých měřících míst bylo proto možné spočítat v letech 2015, 2016 a 2017 (zde s výjimkou čidla 26 m) a ve dvou 12-ti měsíčních obdobích 27.7.2012 - 26.7.2013 a 8.7.2013 - 7.7.2014 (

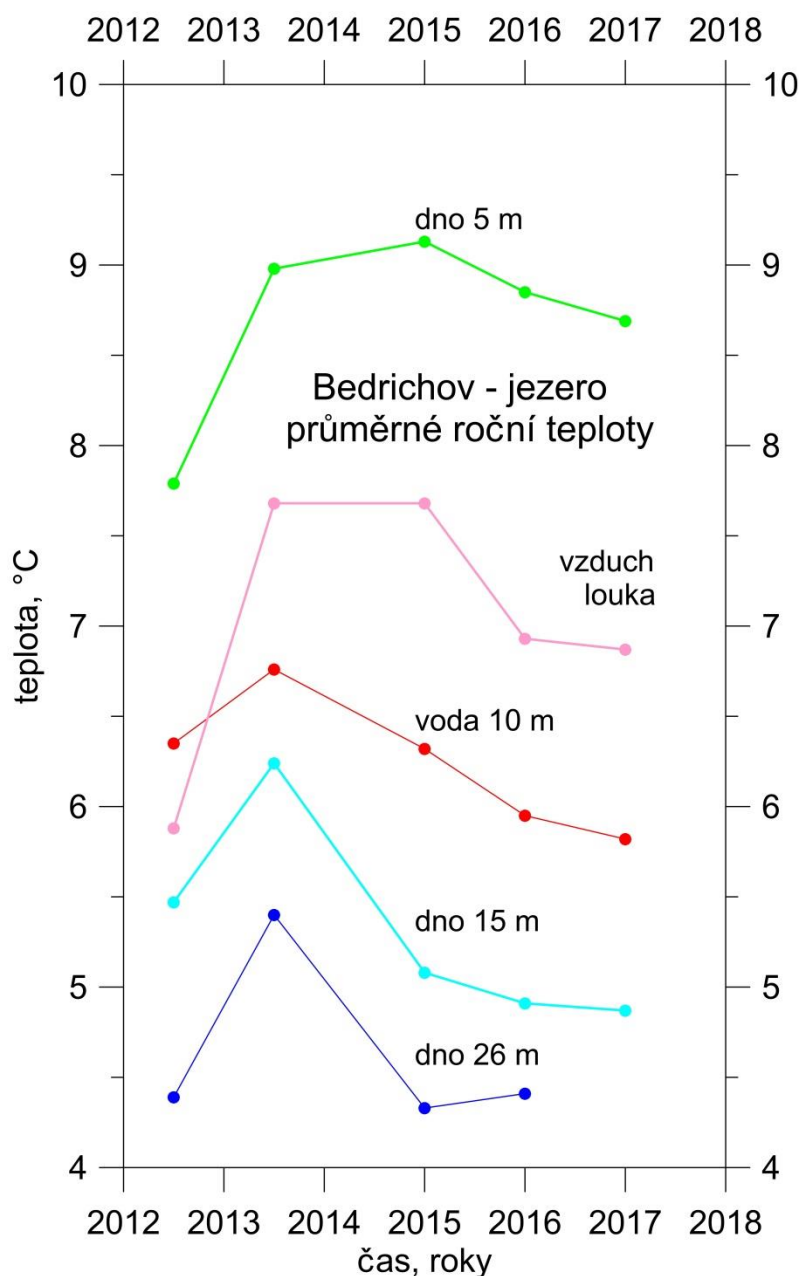
Tab. 11 a Obr. 82), tedy s nepatrným časovým překryvem v červenci 2013.

Tab. 11 Průměrné roční teploty v přehradní nádrži Josefův Důl. V období 2012 – 2014 se jedná o 12měsíční průměry v intervalech 27.7.2012 - 26.7.2013 a 8.7.2013 - 7.7.2014.

Nádrž Josefův Důl roční průměrná teplota	Voda 10 m °C	Dno 5 m °C	Dno 15 m °C	Dno 26 m °C
2012/2013	6,35	7,79	5,47	4,39
2013/2014	6,76	8,98	6,24	5,40
2015	6,32	9,13	5,08	4,33
2016	5,95	8,85	4,91	4,41
2017	5,82	4,87	8,69	-



Obr. 81 Průběh naměřených teplot v přehradní nádrži Josefův Důl. Čidlo na dně v hloubce 26 m



Obr. 82 Průměrné roční teploty v přehradní nádrži Josefův Důl a jejich porovnání s ročními průměry vzduchu na louce. V období 2012 – 2014 se jedná o 12měsíční průměry v intervalech 27.7.2012 - 26.7.2013 a 8.7.2013 - 7.7.2014.

Průměrná roční (či 12měsíční) teplota na dně nádrže klesá s jeho hloubkou. Průměr z pěti hodnot (2012/13, 2013/14, 2015, 2016 a 2017) činí v hloubce 5 m 8,7 °C (min. 7,8 °C, max. 9,1 °C), v 15 m 5,3 °C (min. 4,9 °C, max. 6,2 °C) a ve 26 m 4,6 °C (chybí rok 2017), (min. 4,3 °C, max. 5,4 °C). Z hlediska průměrné roční teploty jako okrajové podmínky geotermických modelů to znamená, že na velmi malých vzdálenostech (desítky metrů) se okrajové podmínky rychle mění. V porovnání s průměrnou teplotou půdy na louce a v lese v přibližně stejném období, je teplota dna v 5 m o 0,8 K, respektive 1,5 K vyšší.

Jak je zřejmé z Obr. 81, v nádrži dochází během roku dvakrát k situaci, kdy je teplota ve všech hloubkách stejná – na jaře (březen-duben) a na počátku zimy (listopad-prosinec). V zimě jsou

teplotní rozdíly mezi jednotlivými stanovišti minimální, teplota je všude nižší než 4 °C, přičemž s rostoucí hloubkou roste teplota a tedy i hustota a hustotní rozdělení vodních vrstev je stabilní. V teplé polovině roku teplota s rostoucí hloubkou klesá a je všude vyšší než 4 °C. To znamená, že hustota vody s rostoucí hloubkou roste a vodní sloupec je opět stabilní.

5.3 Vyhodnocení

V prostředí bedřichovského tunelu byl vyvinut a ověřen způsob teplotního monitoringu uvnitř horninového masivu. Zejména způsob osazení vrtů teplotními čidly se ukázal jako velice spolehlivý a nedocházelo k přenosu tepla mezi jednotlivými čidly mimo horninový masiv. Byl také ověřen způsob kontroly teplotního řetězce, aniž by byl vyjmut z vrtu. V podmínkách HÚ, kde budou čidla pravděpodobně natrvalo zabetonována a nebude možné jejich vyjmutí, bude nalezení systému jejich kontroly velice důležité.

Hloubkový dosah změn teplot (za stěnou tunelu) přesahuje prostor pokrytý měřením – i ve vzdálenosti 380 cm jsou pozorovány změny v rozsahu několika desetin stupně Celsia jako projev sezónních změn teploty potrubí v tunelu. Dobře pozorovatelný je také vliv rozdílných hydrogeologických podmínek na teploty, mezi jednotlivými místy pozorování.

Jako alternativa k prezentovanému měření pomocí jednotlivých Pt čidel existuje relativně nová technologie monitoringu prostorového rozložení teplot pomocí optického vlákna (DTS). Použití nebylo náplní projektu ale jedná se o perspektivní metodu, která je autory doporučena pro testování v Bedřichově nebo jiných podzemních pracovištích.

6 Geofyzikální měření

Autor: J. Bárta

Geofyzikální měření navazuje na starší observace prováděné ve štole Bedřichov – literatura a odborná sdělení Bárta a kol. (2014, 2013, 2010; 2008); Jirků a kol. (2014, 2011). Ve štole byla od roku 2004 postupně prováděna geofyzikální měření, která zahrnovala měření metodou magnetometrickou, seismickou a metodami geoelektrickými. Nakonec se pozornost soustředila zejména na pravidelná, opakovaná měření složená z metody odporové tomografie a seismiky. Měření probíhala na více místech ve štole Bedřichov, charakteristická testovací základna je na přechodu mezi ruční (NRTM) a strojní (TBM) ražbou na staničení 893 m. Při měření bylo zjištěno, že horninový masiv se nechová v čase beze změn. Jako velmi citlivý prvek, na kterém lze toto konstatování sledovat, byl prokázán měrný elektrický odpor hornin. Další geofyzikální metodou, kterou je nutno při hodnocení masivu sledovat, je charakter šíření seismických vln. Dlouhodobé poznatky ze štoly Bedřichov prokázaly, že variace zjišťovaných geoelektrických změn mají pravděpodobně různé časové periody (variace roční, měsíční, denní) a že charakter chování seismických vln je nutno sledovat jak v časové, tak i frekvenční doméně.

Zde předkládaná tematika byla v letech 2013 až 2016 předmětem výzkumného úkolu Technologické agentury ČR vedeného pod kódem: TA03020408. Úkol byl úspěšně obhájěn a zakončen schválením Certifikované metodiky a udělením Užitého vzoru pro geofyzikální monitorovací systém SGI1. Zadání úkolu však řešilo hlavně problematiku dálkového ovládání měření ve štole a zpracování velkého množství dat vstupujících do databáze řádově v hodinách až minutách. Současné práce se vrací k sledování menších objemů dat, řádově se hledají roční variace změn.

Praktickým finálním výstupem výzkumů ve štole Bedřichov má být včasná detekce vzniku puklinových systémů v krystalických horninách (granit), což by mohlo významně zvýšit bezpečnost ražby i provozu budoucího hlubinného úložiště. Teoretické základy našich předpokladů vycházejí zejména z odborných sdělení Barton (2006); Butler (2005); Petružálek a kol. (2013); Vilhelm a kol. (2012, 2013, 2015); Živor (2011).

Pro metodiku monitorovacích prací směřujících i k zajištění bezpečnosti prací bylo nutno vycházet i z problematiky řízení rizik (Rozsypal, 2001).

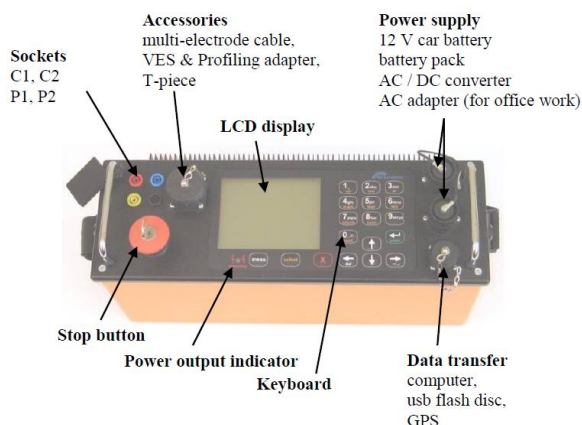
6.1 Přístroje a metodika

Současný projekt prací prodloužil časovou osu geofyzikálních měření v oblasti rozhraní střílené a vrtané části štoly o další 4 roky.

6.1.1 Odporová tomografie

Měření měrných odporů hornin je založeno na čtyřelektrodevém systému. Vnější dvě elektrody mají funkci proudových elektrod, kterými vniká elektrický proud do horniny. Vnitřní dvě elektrody mají funkci potenčních elektrod, mezi kterými se měří potenciální rozdíl proudového pole. Podíl velikosti proudu k potenciálnímu rozdílu krát konstanta (odvozená z geometrie uspořádání) dává hodnotu zdánlivého měrného odporu prostředí. Na pojem „zdánlivý“ se lze

dívat přibližně jako na pojem průměrná hodnota zkoumaného prostředí. Hloubkový dosah uspořádání je asi jedna čtvrtina rozestupu proudových elektrod. Při odporové tomografii se používá předem připravený „set“ elektrod, které jsou vloženy do horniny. V případě zde zmíněného projektu je těchto elektrod 48 a jsou od sebe vzdáleny po


Transmitter

Power	850 W (adjustable 300 / 600 / 850 W)
Voltage	15 – 1000 V (2000 V _{p-p})
Current	5.0 A

Receiver

Number of channels	10
Input impedance	20 MΩ
Input voltage range	±20 V
Mains frequency filtering	50 or 60 Hz
Precision	0.1%

Supported methods

2D/3D/4D – Multi-Electrode Resistivity and IP Tomography
 VES – Vertical Electrical Sounding
 RP – Resistivity Profiling
 SP – Self-Potential
 Borehole survey
 User defined survey
 Moving application with GPS

Obr. 83 Pohled na měřicí panel aparatury ARES II včetně výčtu základních technických parametrů

50 cm. Elektrody jsou pomocí počítačového programu postupně zapojovány jako proudové či potenční. Výsledkem je mnohonásobné překrytí prostředí naměřenými informacemi (proto tomografie). Naměřená data lze studovat jako primární hodnoty zdánlivého měrného odporu nebo je pomocí počítačového programu (v našem případě všeobecně přijímaný Res2Dinv) převádět na řez (resp. mapu) skutečných měrných odporů. Mapy získané v různém čase lze spolu navzájem porovnávat. Jako měřicí aparatura je v případě našeho projektu používána multielektrodová aparatura ARES II, výrobce GF Instruments (Brno), viz Obr. 83.

6.1.2 Seismická měření

Seismická měření jsou založena na vybuzení seismického rozruchu (v našem případě úderem seismické paličky), který se pak šíří prostředím. Odezva seismického rozruchu je přijata seismickým snímačem (resp. seismickými snímači) a zaznamenána do paměti aparatury. V našem případě jsou od sebe seismické snímače (geofony) situovány po 50 cm (shodně s elektrodami odporových měření). Ze seismických záznamů lze určit rychlost šíření seismických vln, ale také posoudit dynamické charakteristiky seismického vlnění.

Seismický výzkum zajišťuje pro měření v Bedřichově seismická aparatura Terraloc Mk-6 ve variantě se 48 seismickými kanály (výrobek společnosti ABEM, Švédsko), viz Obr. 84, Obr. 85.



Obr. 84 Seismická aparatura Terraloc Mk-6 při měření ve štoli Bedřichov



Obr. 85 Seismické geofony - jedna z variant jejich umístění na stěně štoly


6.1.3 Přehled hlavních sledovaných veličin

V rámci monitorovacích měření jsou sledovány následující fyzikální veličiny:

- měrný odpor [Ohmm] odvozený z měření velikosti proudu a napětí
- rychlost šíření seismických vln [m/s]. Jedná se podle okolností o seismické vlny přímé, refragované, difragované či reflexní nebo povrchové.
- frekvence seismického vlnění [Hz]
- relativní velikost amplitud seismických vln
- charakter hodochron seismických vln

6.2 Průběh monitorovacích prací

V roce 2015, 2016 a 2017 bylo provedeno plánované geofyzikální měření, a to odporová tomografie a seismické měření. Měření probíhá na tak zvané Základní bázi, což je místo na přechodu mezi strojně a ručně raženou částí štoly na staničení 893 m. Měření je realizováno

 SÚRAO	Vývoj a ověřování metodik pro charakterizaci horninového prostředí – výsledky monitoringu v přivaděči Bedřichov	Evidenční označení:
		SÚRAO TZ 289/2018

na dvou profilech dlouhých cca 30 m. Ve středu profilů se nachází ostrý přechod mezi zmíněnou strojní a ruční ražbou. Profil 0 je umístěn na počvě štoly. Profil 3 je situován 1,5 m nad počvou.

Odporová měření představují na primárním výstupu tabulku dat složenou z naměřených hodnot velikosti proudu a potenciálů. Vydělením potenciálů hodnotami proudů a po vynásobení konstantami, jejichž velikost je dána geometrickým uspořádáním elektrod, získáme zdánlivé měrné odpory, které jsou předmětem dalšího zpracování (vyhodnocení).

Prvotním výstupem seismických měření je seismický záznam. Záznam sestává ze 48 stop, které jsou obrazem kmitání 48 snímačů (geofonů), jejichž iniciace je dána seismickým rozruchem buzeným úderem seismického kladiva na skalní povrch.

Jak seismická, tak geoelektrická data jsou ukládána do databáze zhotovitele (G IMPULS Praha spol. s r.o.), která je zálohována. Nakonec jsou všechna naměřená data předána do databáze SÚRAO ve formě požadované smlouvou (Příloha 3). Databáze obsahuje zejména následující bloky:

Blok 1: Primární seismická data ve formátu SEG-2. Metadata potřebná k porozumění databáze.

Blok 2: Výsledky měření metodou ERT ve tvaru tabulek v textovém formátu uspořádaných pro zpracování standardně používaným programem Res2Dinv.

Blok 3: Doplňková obrazová a textová dokumentace spojená s projektem.

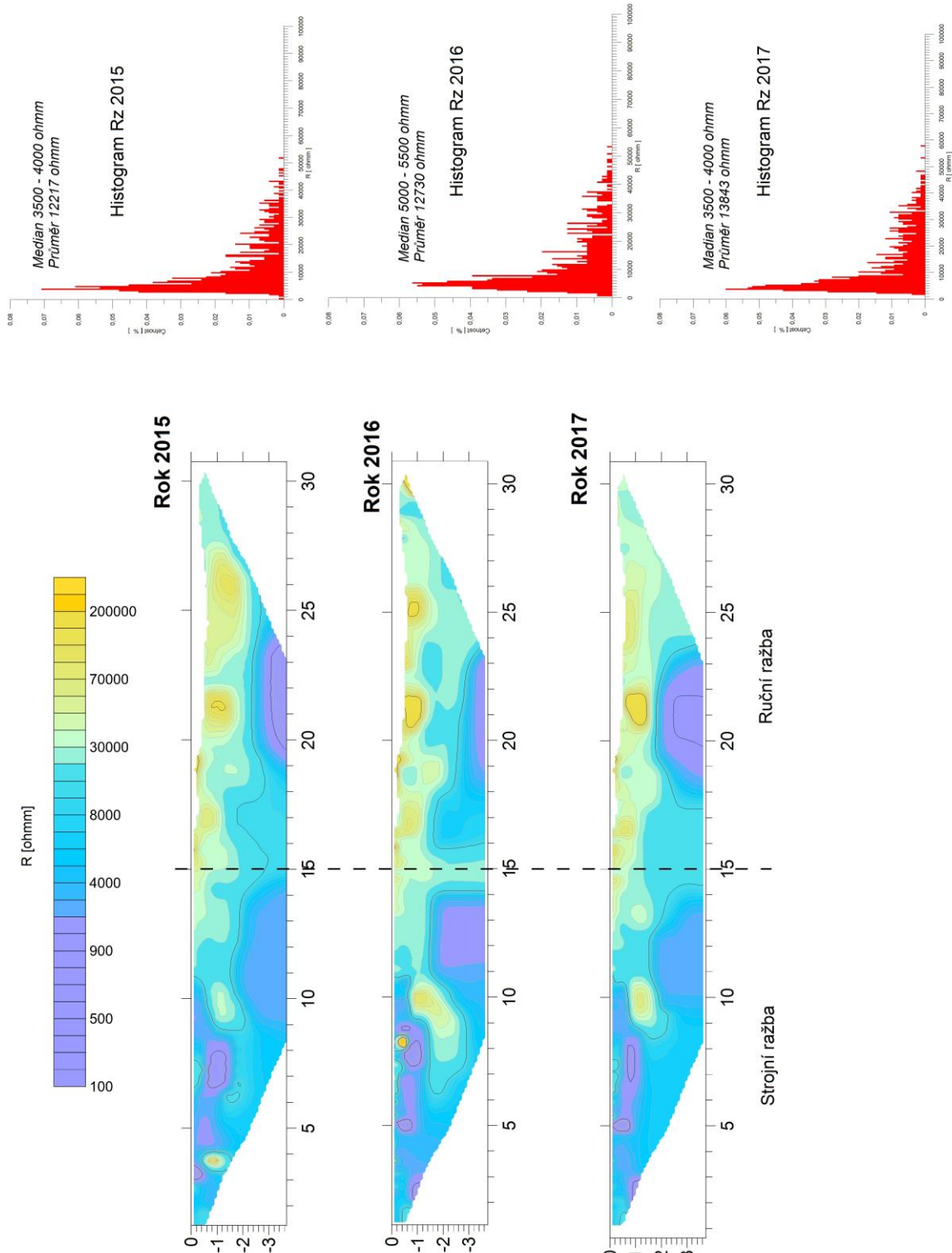
Předávaná databáze zde řešeného úkolu je kompatibilní s databází starších měření, která probíhala přibližně dvakrát až čtyřikrát ročně na přechodu strojní a ruční ražby již od roku 2004. Měření jsou dále porovnatelná se seismickým a geoelektrickým monitoringem prováděným se systémem SGI 1 kolem staničení 792 m v rámci projektu Technologické Agentury TA03020408. Systém SGI 1 umožňuje soustavný monitoring. Naměřená data jsou on-line posílána přes internet na odborná pracoviště řešitelského týmu. Rozdíl mezi měřeními na staničení 792 m a na přechodu mezi strojní a ruční ražbou, tj. na staničení 893 m, je zejména v tom, že každé sleduje jiné místo štoly (jiné geotechnické poměry) a dále, seismické měření se systémem SGI 1 je prováděno v režimu frekvencí řádově v prvních tisících Hz a měření na přechodu strojní a ruční ražby je realizováno řádově v pásmu stovek Hz.

Spojením starších měření se současnými observacemi vzniká již dlouhá řada pozorování, 14 let, která pravděpodobně nemá ve výzkumu pro hlubinná úložiště obdoby. Naměřená data jsou zpracovávána z pohledu současného projektu, jsou však k dispozici i pro případná jiná zadání, doktorské práce apod.

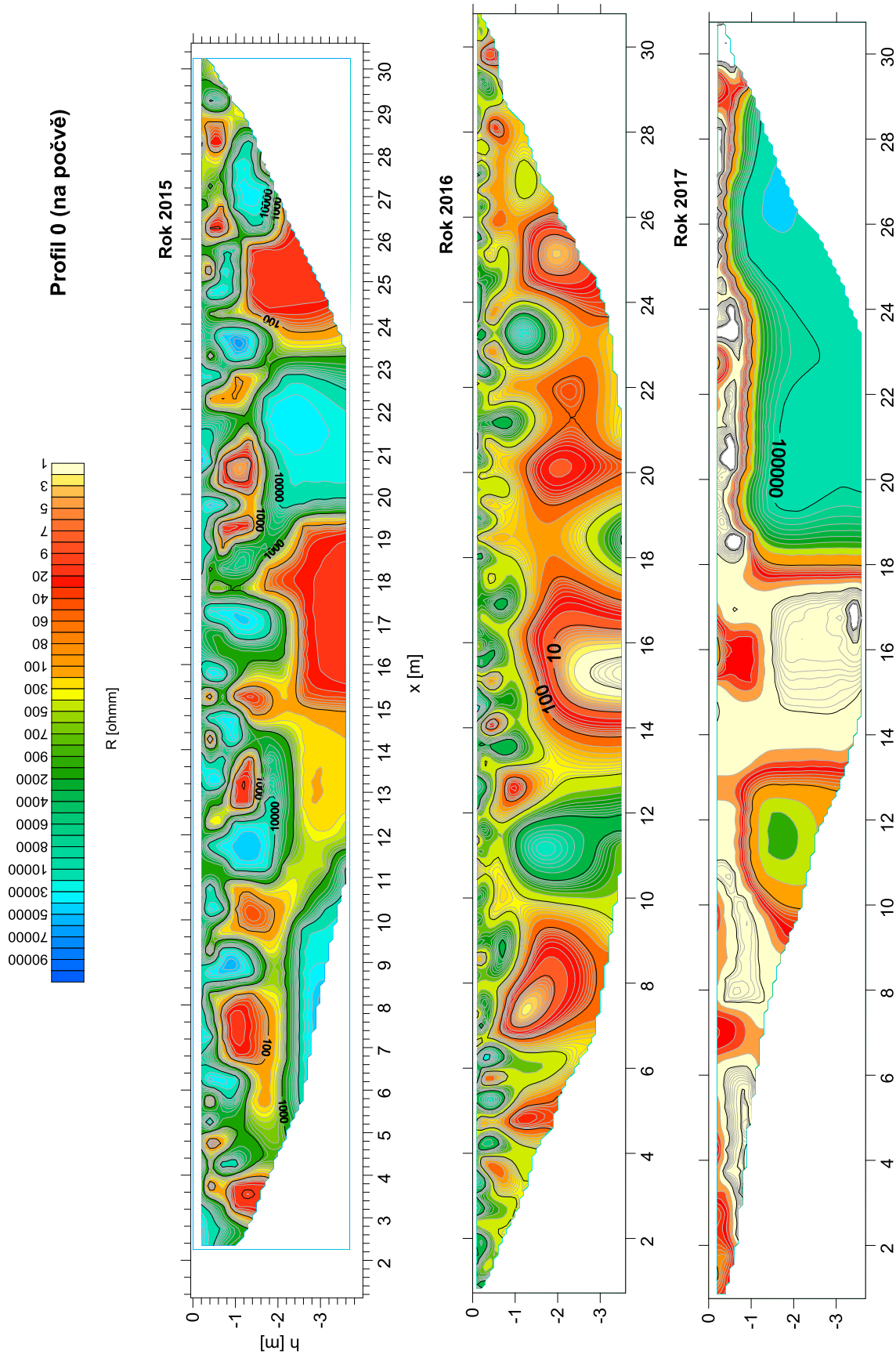
6.3 Závěrečné vyhodnocení

6.3.1 Odporová tomografie


Na Obr. 86 je uveden přehled odporových řezů získaných metodou ERT při měření na profilu P3 (tj. 1,5 m nad počvou) z roku 2015, 2016 a 2017. Obdobně Obr. 87 uvádí přehled výsledků z profilu P 0 (měření přímo na počvě).



Obr. 86 Odporové řezy z let 2015, 2016 a 2017 z profilu P3



Obr. 87 Odporové řezy z let 2015, 2016 a 2017. Profil 0.

 SÚRAO	Vývoj a ověřování metodik pro charakterizaci horninového prostředí – výsledky monitoringu v přivaděči Bedřichov	Evidenční označení:
		SÚRAO TZ 289/2018

Ze základních poznatků z měření v roce 2015 až 2017 lze akcentovat:

- Velikost měrných odporů se mění v čase. Změny dosahují vyšších jednotek až desítek procent původní hodnoty a jsou sledovatelné v delším časovém úseku. Jediným reálným důvodem pro změny v naměřených hodnotách mohou být změny obsahu vody (vlhkosti) v puklinovém systému hornin a případné změny mineralizace vody s časem. Přímá měření chemismu (kap. 2.5) to sice nepotvrzují, nicméně proměnlivý vznik i zanikání minerálních krust (prokázány např. uranové mineralizace), viditelně sledovatelných na stěnách štoly, svědčí o geochemických procesech v puklinovém systému. Změny obsahu vody v puklinách mohou souviset i tím, že se mikrotrhliny v hornině zavírají či otvírají v závislosti na napjatosti horninového masivu.
- Velikost měrných odporů se lokálně mění, celkový charakter histogramů (viz Obr. 86) však zůstává v zásadě podobný. Lze vyslovit názor, že celkový objem vody se pravděpodobně ve studovaném místě zásadně nemění, koncentruje se však lokálně podle otvírání a zavírání mikrotrhlin (podle aktuální napjatosti masivu).
- V oblasti při povrchu terénu (při povrchu štoly) vypadávají některé měřicí body (tj. nejsou měřitelné). Jsou to místa, kde elektrické pole má obrácenou polaritu, než je očekáváno při klasickém zpracování elektrických potenciálních polí (Res2D Inv). Jevy spojené s obrácenou polarizací jdou nejspíše vysvětlit pomocí Kirchhoffových zákonů (elektrické sítě). Tato problematika je však teprve na začátku odborného studia.
- Profil P3 se vyznačuje všeobecně vyššími měrnými odpory než profil P0 (počva). Počva štoly byla při ražbě evidentně silněji porušena, určitý vliv má i betonová rovnanina na dně počvy.
- Na Obr. 86 a Obr. 87 jsou uváděny řezy skutečných měrných odporů (po interpretaci softwarem Res2D inv). V průběhu měření však byla použita i metoda porovnávání primárně naměřených hodnot (zdánlivých měrných odporů), která umožňuje zachytit objektivně i malé změny v naměřených hodnotách, aniž by byly zastíněny vlivem výpočtu skutečných měrných odporů. Postup sledování primárních dat je nezbytný při zpracovávání dlouhých časových řad, není však tak ilustrativní jako porovnávání skutečných měrných odporů.

6.3.2 Seismická měření

Seismická měření mají za primární cíl udržet plynulost monitorovací řady (jak již bylo uvedeno, od roku 2004). Zároveň jsou sledovány zajímavé charakteristiky naměřených dat a jsou studovány i možnosti jejich dalšího využití.

Ze získaných poznatků lze akcentovat zejména následující:

- Zájmovým prostředím se výrazně šíří seismická vlna, která má pravděpodobně charakter vlny příčné a její seismická rychlost se pohybuje kolem 3300 m/s. Prostředím se šíří také vlna, o které předpokládáme, že je to vlna podélná a ta má rychlost kolem 5200 m/s. Tato vlna není výrazná a má často málo zřetelná první nasazení. Z většího

souboru dat bylo zatím stanoveno, že Poissonovo číslo získané seismickou cestou se pohybuje kolem 0,25.

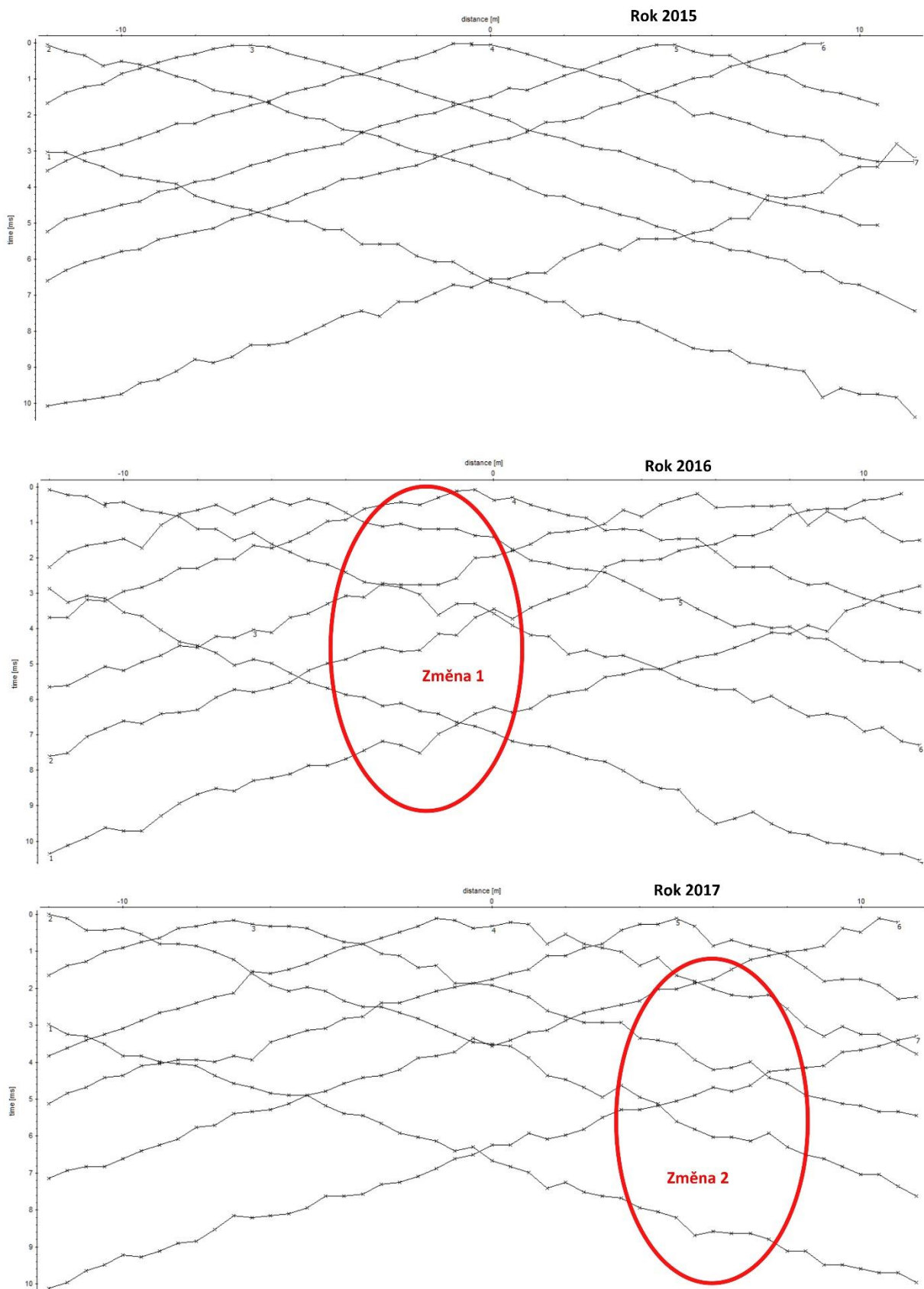
- Při podrobnějším pohledu lze zjistit, že zkoumané prostředí se projevuje při vyšších frekvencích (vyšší stovky až tisíce Hz) seismických vln jako značně nehomogenní. Vysoké frekvence seismických vln mají výrazný útlum se vzdáleností šíření. Z toho lze učinit závěr, že skalní prostředí je zejména při povrchu (EDZ, resp. Trompeterova zóna) postiženo hustou sítí mikrotrhlin (mikropuklin).

Jedním z prověřených způsobů analýzy naměřených seismických záznamů je odečtení vstupů reprezentativních seismických vln. V našem případě byly při zpracování sledovány vlny, o kterých soudíme, že se jedná o vlnu příčnou (S) a podélnou (P). Vlna podélná se jeví jako méně intenzivní. „Pickování“ seismických záznamů (tj. odečítání časů příchodů vln) vnáší do analýzy určitý subjektivní prvek (vliv interpretátora), na druhé straně je možno velmi jednoduše zachytit principiální vlastnosti vlnového prostředí. Na Obr. 88, Obr. 89, Obr. 90, Obr. 91 jsou vykresleny vybrané hodochrony z profilů P0 (počva) a P3 (1,5 m nad počvou). Na obrázcích se porovnávají data z let 2015, 2016 a 2017.

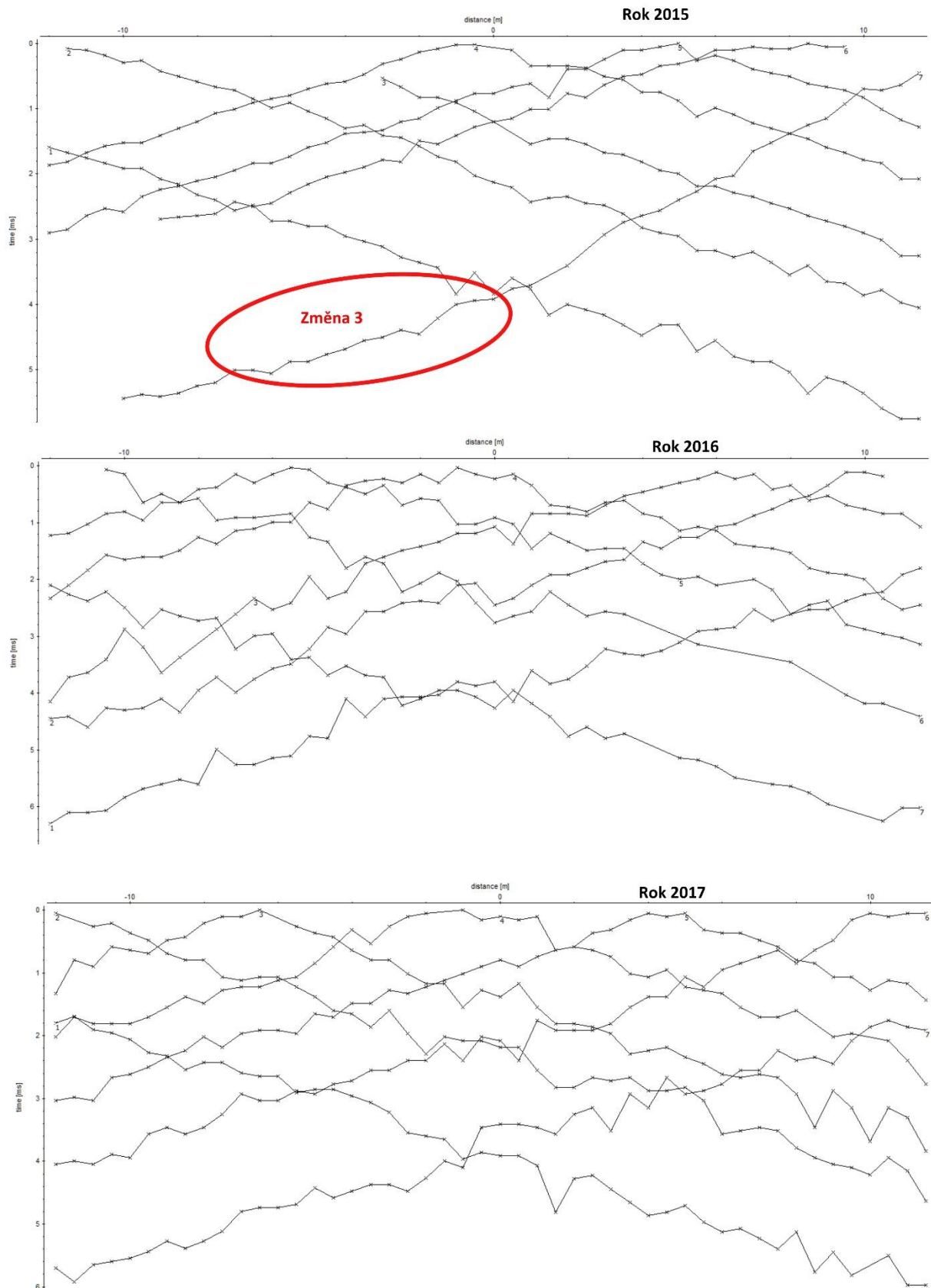
Vybrané změny v průběhu hodochron, na které je v obrázcích upozorněno elipsou, jsou takového rázu, že je nelze vysvětlit např. tím, že interpretátor zaměnil fázi vlny, nebo že došlo k drobné nepřesnosti při odečtu tak zvané „nuly“, tj. začátku seismického záznamu. Definitivní vysvětlení těchto změn předpokládá další výzkum. Lze ovšem vyslovit hypotézu, spojenou s klasickou geotechnickou představou, že v okolí výrubu se vytváří zóna sníženého napětí (resp. i snížených seismických rychlostí). Zóna sníženého napětí je zakončena přirozenou klenbou zvýšeného napětí (resp. i zvýšených seismických rychlostí), za kterou je masiv již z pohledu baňských prací neporušený. V některých případech zřejmě dochází k uvolňování či změnám napjatosti v oblasti sníženého napětí, kdy může docházet i k mírnému dotvarování profilu důlního díla, drobným změnám v chování puklinových systémů apod. Tyto poznatky jsou známy z ražby důlních děl v prostředí jílovců, oslabených pískovců apod., nebyly však popsány v místech s pevným granitem.

Na Obr. 92 je uvedeno porovnání seismických záznamů buzených ze stejného místa v roce 2015, 2016 a 2017. Porovnání obrázků naznačuje, že vlnový obraz se v rozhodujících parametrech nemění.

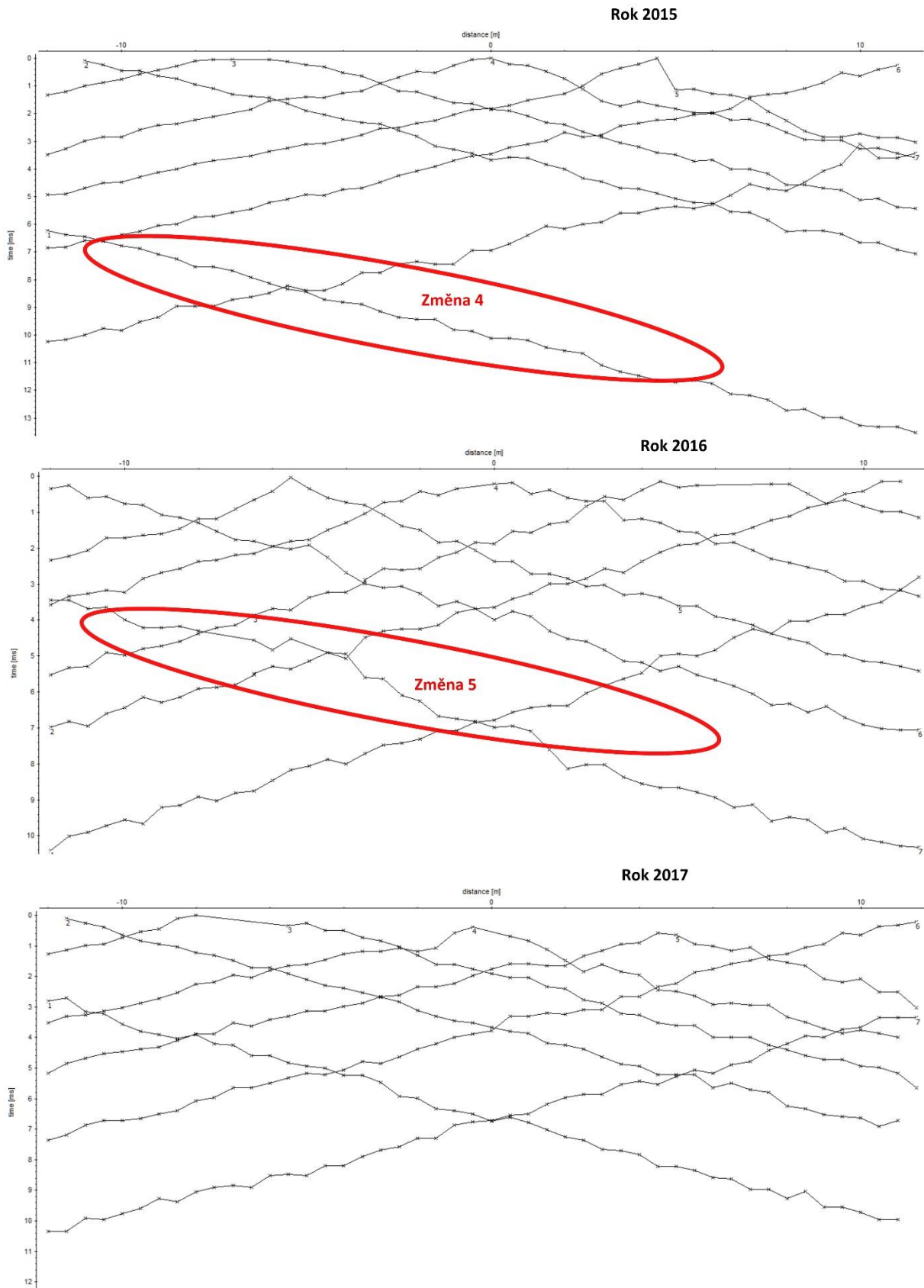
Na Obr. 93 je provedena dispersní analýza vln, opět pro roky 2015, 2016 a 2017. Z analýzy je zřejmé, že chování disperse vln se mění v čase. Příčnu tohoto jevu zatím neznáme. Klasické povrchové vlny se v daném prostředí vyskytují jako slabé.



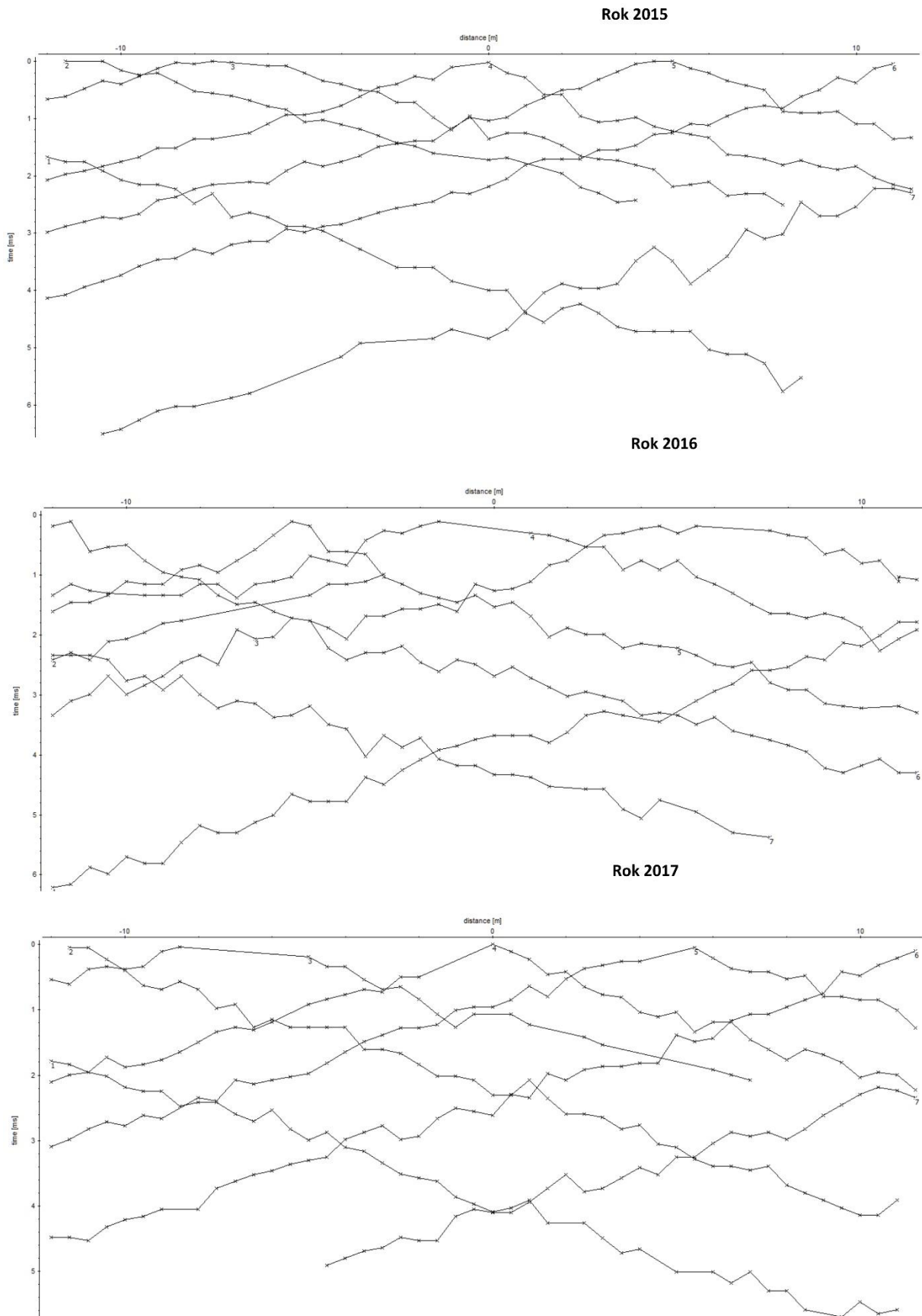
Obr. 88: Porovnání hodochron (čas příchodu vlny versus poloha geofonu). Profil P3, typ vlny S.



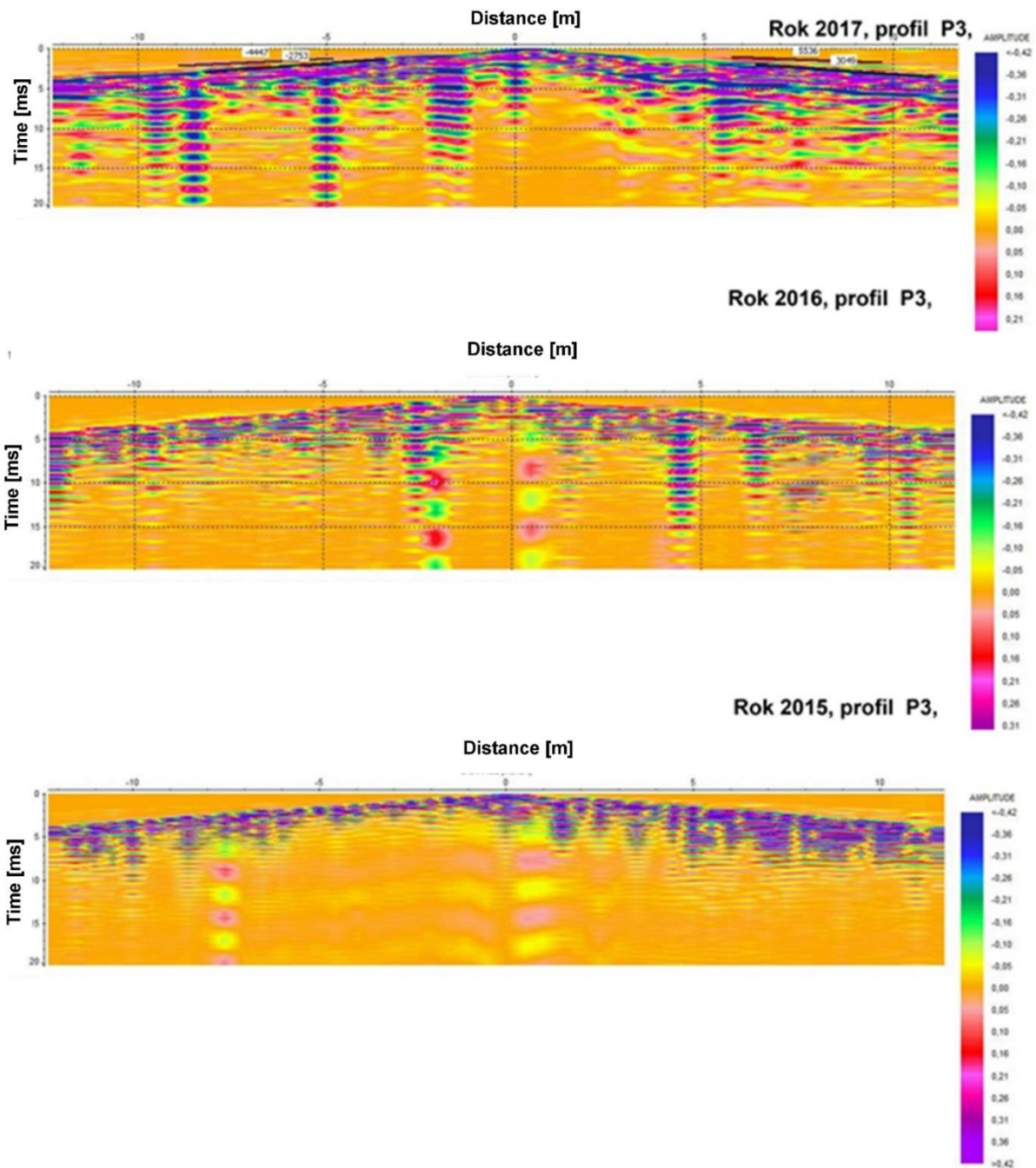
Obr. 89 Porovnání hodochron (čas příchodu vlny versus poloha geofonu). Profil P3, typ vlny P.



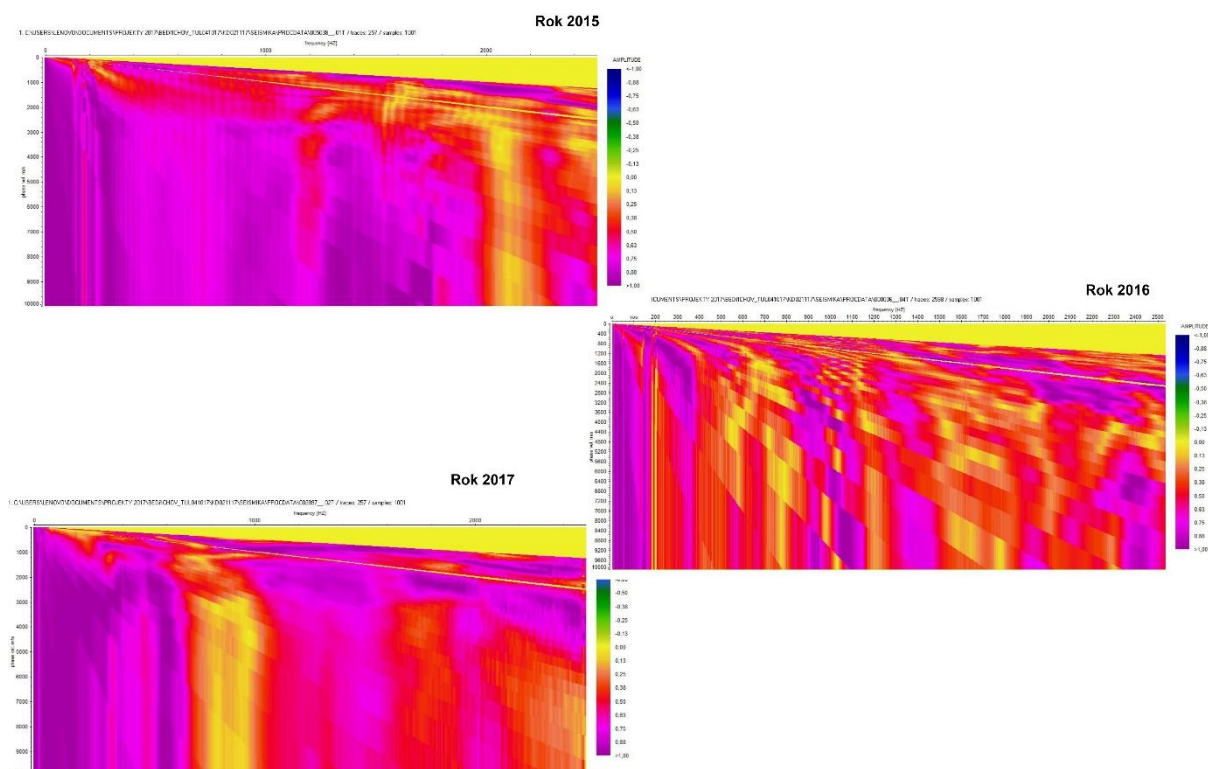
Obr. 90 Porovnání hodochron (čas příchodu vlny versus poloha geofonu). Profil P0, typ vlny S.



Obr. 91 Porovnání hodochron (čas příchodu vlny versus poloha geofonu). Profil P0, typ vlny P.



Obr. 92 Přehled vybraných seismických záznamů z profilu P3 z roků 2015, 2016, 2017



Obr. 93 Porovnání disperzních křivek (fázová rychlost/frekvence). Rok 2015 až 2017. Seismický zdroj umístěn na profilu P3, staničení 0,25.

Ze získaných poznatků pro seismická měření za roky 2015 až 2017 je pravděpodobně zásadní zjištění, které je ilustrováno na Obr. 88 až Obr. 91. Na těchto obrázcích jsou vykresleny vybrané seismické hodochrony. Dosud pro charakteristiku seismických vln platily následující zásady:

- v daném prostředí se vyskytuje méně výrazná vlna, o které předpokládáme, že se jedná o vlnu P, a výrazná vlna, o které předpokládáme, že je vlnou S.
- seismické rychlosti se v daném místě, kde testy probíhají, prakticky v čase nemění. Pro vysoké frekvence se ale mění koeficient útlumu.
- skalní prostředí je v podrobném pohledu anizotropní, a tedy hodnotit reprodukovatelnost seismických záznamů v čase je obtížné.

Při podrobném studiu, viz Obr. 88 až Obr. 91, však byly zjištěny v průběhu monitorování změny v charakteru tvaru některých naměřených hodochron, které lze i při velmi kritickém hodnocení považovat za reálný projev změn seismických rychlostí či vzniku nějaké odrazné plochy. Toto hodnocení je umožněno paradoxně tím, že měření bylo prováděno v řídké frekvenci (ročně) a poznatek nebyl zastřen velkým množstvím šumů. Dále svou roli sehrála metodika použití metody „picking“ bez vlivu automatické interpretace. Získaný poznatek je zatím prvotní, oprávnjuje však vytvořit hypotézu:

V blízkém okolí výrubu (jednotky až první desítky metrů) mohou v granitovém masivu vznikat i zanikat odrazné plochy (související s otevíráním a zavíráním či také zavodňováním nebo odvodňováním puklinových systémů) což je (překvapivě) detekovatelné i v pásmu desítek či prvních stovek Hz.


Pro hlubší studium výše uvedeného poznatku doporučujeme podrobně analyzovat data z let 2004 až 2013 a pokračovat i v monitoringu v následujících letech (2018 a další), a prodloužit tak monitorovací řadu.

V příloze 9 (jako samostatný výstup) je uveden návrh metodického postupu, jak pokračovat v Bedřichově (či obdobných lokalitách) :

Metodika geofyzikálního monitorování granitového masivu v systému čtvrtletních až ročních časových intervalů.

Navržená metodika má následující obsah:

- Úvod
- Geomechanická a geofyzikální charakteristika zkoumaného krystalického prostředí
- Monitorovací komplex složený ze seismického a elektrického měření na testovací bázi
- Technologický postup monitorovacích prací, jejich řízení a ukládání dat
- Základní zpracování naměřených dat
- Doporučené doplňkové geofyzikální výzkumy.
- Příklady měření
- Závěry, doporučení, kontakty na konzultanty

 SÚRAO	Vývoj a ověřování metodik pro charakterizaci horninového prostředí – výsledky monitoringu v přivaděči Bedřichov	Evidenční označení:
		SÚRAO TZ 289/2018

7 Měření migračních parametrů na vzorcích

Autoři: E. Hofmanová, M. Petružálek a V. Havlová

7.1 Přehled studovaných vzorků

Vzorky libereckého granitu byly odebrány pracovníky Laboratoře fyzikálních vlastností hornin Geologického ústavu AV ČR (GLÚ) ze stěny tunelu Bedřichov ve dvou kampaních:

1. odebrané v roce 2011 (metráž 255, 904, 1706 a 2160 m)


Na těchto vzorcích byly změřeny anizotropie rychlosti ultrazvukové vlny a propustnosti ve směru maxima rychlostí (v letech 2012-2013; v projektu MPO TIP FR-TI1/362 – Hokr et al., 2013 a Petružálek et al., 2012). Tato data budou v následujícím textu použita pro interpretaci v kontextu nových dat z dalších míst v tunelu a z různých technik.

2. odebrané v roce 2013 (metráž 640, 1231 a 1986 m)

Nové vzorky odebrané v roce 2013 pro budoucí řešení tohoto projektu. V návaznosti na předchozí měření byly na kulových vzorcích změřeny anizotropie rychlosti ultrazvukové vlny (UZ). Dále byly připraveny tři vzorky o tloušťce ~ 5 cm a průměru ~ 5 cm na stanovení hydraulické vodivosti (k_{r10}) a efektivního difúzního koeficientu pomocí elektromigrační techniky (EM). Dále bylo připraveno osm vzorků o tloušťce ~ 1 cm a průměru ~ 5 cm pro průnikové difúzní experimenty s tritiovanou vodou (TD z *through-diffusion*).

Celkově byly vzorky vybrány tak, aby reprezentovaly úseky tunelu s různým typem ražby a různé hloubky tunelu pod povrchem. Seznam vzorků a stanovení je shrnut v Tab. 12.

Během řešení projektu se ukázalo, že by bylo vhodné rozšířit počet studovaných vzorků na difuzivitu, zejména na ta odběrová místa, kde jsou k dispozici i jiná data (např. seismika, apod.) K třem odběrovým místům z 2. kampaně (jedno odběrové místo ve vrtané části tunelu (TBM) a dvě ve střílené části tunelu (NRTM)) byly z první kampaně vybrány metráže tunelu 255 m a 1706 m. V roce 2017 byly připraveny dva vzorky o tloušťce ~ 5 cm a průměru ~ 5 cm. Po změření hydraulické vodivosti a porozity na GLÚ (viz kap. 7.4 byly vzorky rozřezány na 1cm disky, které byly použity pro průnikové difúzní a elektromigrační experimenty v ÚJV (viz kap. 7.5-7.6).

	Vývoj a ověřování metodik pro charakterizaci horninového prostředí – výsledky monitoringu v přivaděči Bedřichov	Evidenční označení:
		SÚRAO TZ 289/2018

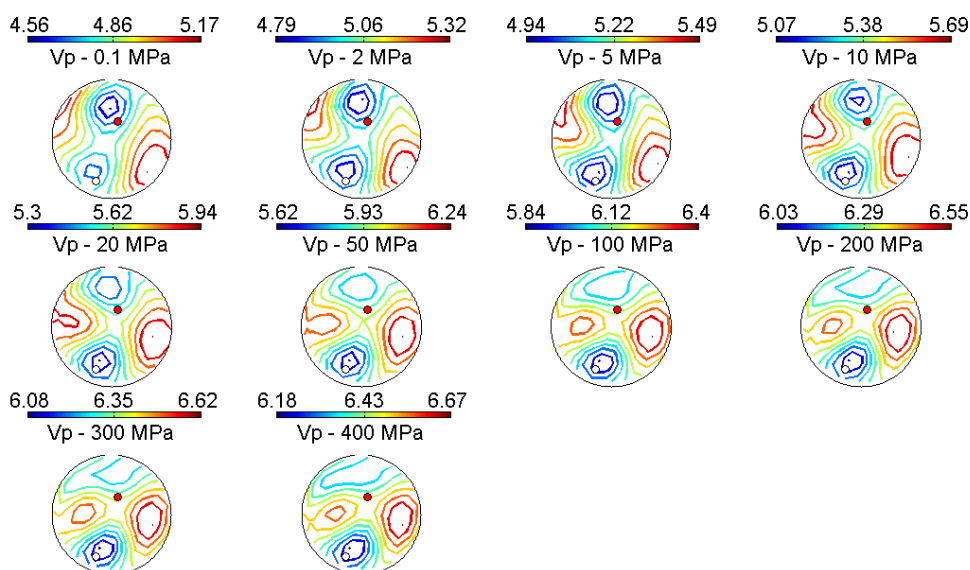
Tab. 12 Seznam všech vzorků libereckého granitu ze dvou kampaní odběrů pracovníky GLÚ AV ČR, značení vzorků a provedená stanovení (k_{f10} hydraulická vodivost, ε porozita, UZ ultrazvuk, EM elektromigrace, TD průniková difúze)

metráž [m]	typ ražby	datum odběru	GLÚ značení vzorků	GLÚ stanovení	ÚJV značení vzorků	ÚJV stanovení	přibližná tloušťka [cm]	reference
255	vrtáno	11/2011	LIB6	k_{f10} , ε , UZ	-	-	5	FR-TI1/362 (Hokr et al., 2013)
					717, 817	ε , $\varepsilon_{\text{osychání}}$, EM, TD	1	
640	vrtáno	5/2013	LIB7	k_{f10} , ε , UZ	1015	ε , EM	5	Průběžná zpráva (Hokr et al., 2016)
					1115, 1215, 1315	ε , $\varepsilon_{\text{osychání}}$, EM, TD	1	
904	stříleno	11/2011	LIB4	k_{f10} , ε , UZ	-	-	5	FR-TI1/362 (Hokr et al., 2013)
1231	stříleno	5/2013	LIB8	k_{f10} , ε , UZ	1415	ε , EM	5	Průběžná zpráva (Hokr et al., 2016)
					1515, 1615, 1715	ε , $\varepsilon_{\text{osychání}}$, EM, TD	1	
1706	stříleno	11/2011	LIB3	k_{f10} , ε , UZ	-	-	5	FR-TI1/362 (Hokr et al., 2013)
					917, 1017	ε , $\varepsilon_{\text{osychání}}$, EM, TD	1	
1986	stříleno	5/2013	LIB11	k_{f10} , ε , UZ	1815	ε , EM	5	Průběžná zpráva (Hokr et al., 2016)
					1915, 2015	ε , $\varepsilon_{\text{osychání}}$, EM, TD	1	
2160	stříleno	11/2011	LIB1	k_{f10} , ε , UZ	-	-	5	FR-TI1/362 (Hokr et al., 2013)

Nezávisle na řešení projektu došlo k vrtání jádrového vrtu firmou INSET s.r.o. na požadavek provozovatele tunelu SČVK a.s. v metrži 607 m. Zadavateli projektu byla navržena možnost stanovit dosah EDZ pomocí ultrazvukového prozařování pokud by byl k dispozici i jádrový vrt ze střílené části tunelu (odvrtaný stejným způsobem). V roce 2017 byl proto v rámci rozšíření projektu odvrtán jádrový vrt v 1250 m. Stanovení EDZ popisuje kap. 7.7.

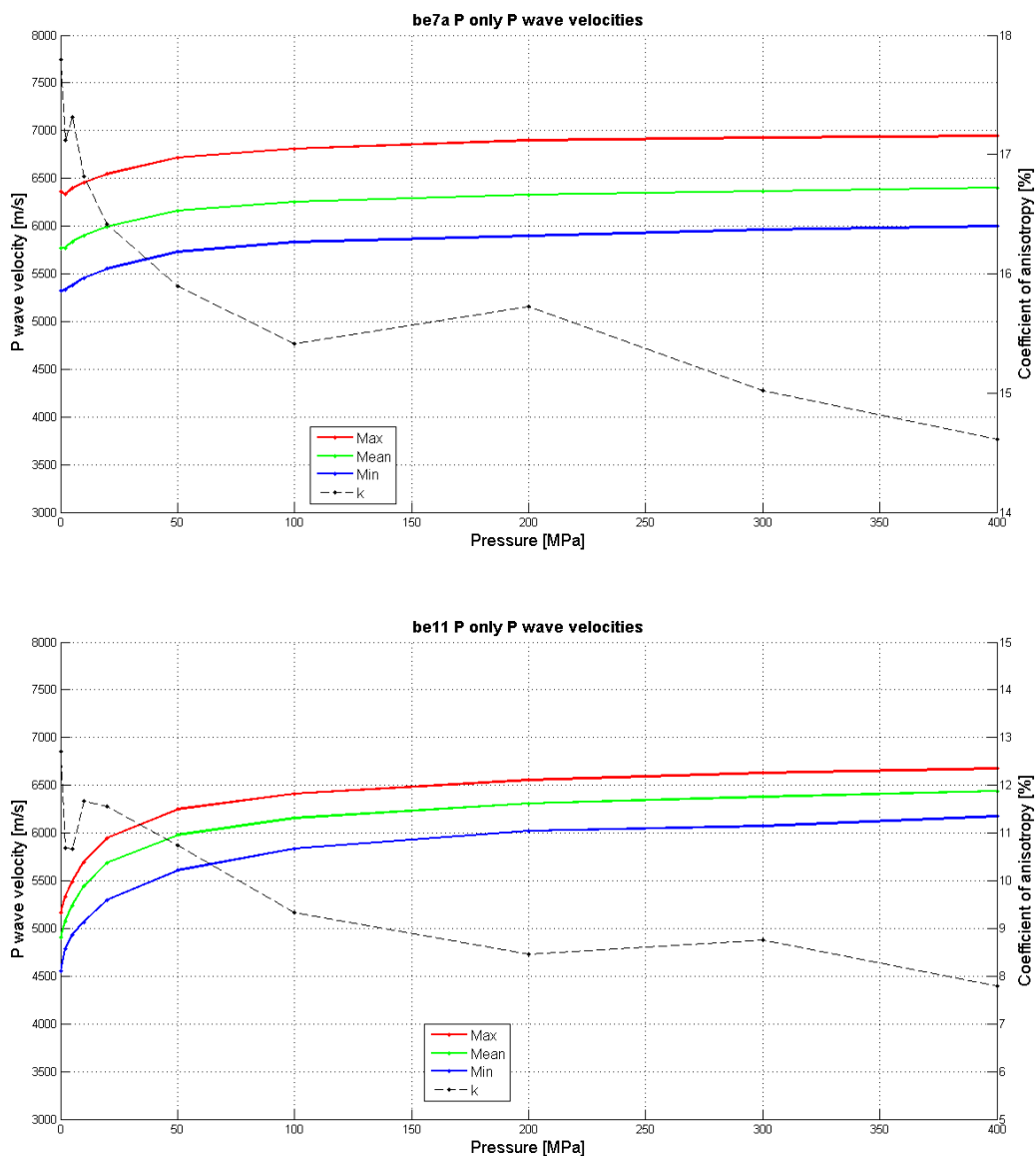
7.2 Ultrazvukové prozařování kulových vzorků

Pro stanovení míry mikroporušení a jeho preferenční orientace bylo využito detailní ultrazvukové prozařování podélnými vlnami. Každý experiment byl složen z měření podélných vln při deseti úrovních komorového tlaku: 0.1, 2, 5, 10, 20, 35, 50, 100, 200, 300, 400 MPa. Při každé tlakové úrovni bylo na kouli o průměru 5 cm prováděno ultrazvukové měření v 132 nezávislých směrech v pravidelné síti rovnoběžek a poledníku po 15° (Pros et al., 1998). V každém ze 132 směrů byl vzorek prozářen podélnou vlnou o frekvenci 2 MHz a zaznamenán vlnový obraz registrovaného signálu. Při frekvenci 2 MHz a rychlostech v intervalu 4 - 6 km/s byla vlnová délka použitých vln 2 - 3 mm. Ukázka měření rychlostní anizotropie pro vzorek LIB11 je zobrazena na Obr. 94.




Obr. 94 Isolinie elastických rychlostí P vln v Schmidově stereografické projekci do spodní polokoule; vzorek LIB11

Ze závislosti rychlostí na komorovém tlaku je možné určit míru mikroporušení a jeho preferenční orientaci. Při nízkých hodnotách komorového tlaku jsou mikrotrhliny otevřené a orientace rychlostní anizotropie je jimi silně ovlivněna. Naopak, při vysokých hodnotách komorového tlaku, jsou trhliny uzavřeny a neovlivňují měřené rychlosti. Na Obr. 95 je demonstrována závislost rychlostí na komorovém tlaku, která vypovídá o míře mikroporušení. Vzorek ze střílené části tunelu (LIB11) ukazuje nižší hodnoty rychlosti než vzorek LIB7 z vrtané části tunelu. Z toho vyplývá větší míra mikroporušení pro vzorek LIB11.



Obr. 95 Průběh koeficientu anizotropie a minimální, střední a maximální rychlosti s působícím všesměrným tlakem; nahoře vzorek LIB7, dole vzorek LIB11

Rozdíl v rychlostech nezatíženého vzorku a vzorku pod tlakem 300 MPa (ΔV_{mean}) vypovídá o míře mikro-porušení. Pokud se jedná o jeho preferenční orientaci, můžeme si zjednodušeně představit, že mikrotrhliny kolmé ke směru šíření, nejvíce snižují hodnotu měřené rychlosti (šířící se vlna jimi musí projít) a naopak mikrotrhliny paralelní se směrem šíření, prakticky neovlivňují měřenou rychlost (šířící se vlna prochází horninou). Vycházíme-li z těchto předpokladů, představuje poloha minima rychlostní anizotropie normálu k dominantnímu systému mikrotrhlin. Maximální hodnota rychlosti v ploše určené touto normálou odpovídá směru protažení mikrotrhlin, ve kterém by měla být hornina nejpropustnější. To, jak je rychlostní anizotropie ovlivněná mikrotrhlinami, je možné odhadnout z parametru Δk , který je rozdílem koeficientů anizotropie při tlaku 300 MPa a 0 MPa. Tabulka Tab. 13 obsahuje souhrn měřených UZ parametrů pro vzorky LIB7, LIB8 a LIB11 s doplněním vzorků LIB1, LIB2, LIB4 a LIB6 studovaných stejným způsobem v průběhu projektu FR-TI1/362 (Hokr et al., 2013, Petružálek et al., 2012). Výrazně nižší hodnoty parametr ΔV_{mean} pro vzorky z vrtné části tunelu (LIB6, LIB7) vypovídají o menší míře mikroporušení při tomto typu ražby. Při použití

 SÚRAO	Vývoj a ověřování metodik pro charakterizaci horninového prostředí – výsledky monitoringu v přívaděči Bedřichov	Evidenční označení:
		TZ SÚRAO 289/2018

NRTM, dochází vlivem střílení k většímu porušení horniny, které může ukazovat i preferenční orientaci (parametr Δk , vzorky LIB1 a LIB8).

Tab. 13 Maximální, průměrná a minimální rychlost při tlaku 0 MPa a 300 MPa spolu s parametry ΔV_{mean} a Δk pro jednotlivé měřené vzorky, doplněno o vzorky LIB1-LIB6 z projektu FR-T11/362

vzorek	způsob ražby	metráž tunelu, m	0 MPa			300 MPa			ΔV_{mean} (km/s)	Δk (%)
			V_{min} (km/s)	V_{mean} (km/s)	V_{max} (km/s)	V_{min} (km/s)	V_{mean} (km/s)	V_{max} (km/s)		
LIB1	stříleno	2160	3,585	4,114	4,793	6,224	6,364	6,547	2,249	24,3
LIB3	stříleno	1706	4,669	4,988	5,439	6,167	6,495	6,787	1,507	5,9
LIB4	stříleno	904	5,048	5,282	5,457	6,223	6,333	6,501	1,051	3,4
LIB6	vrtáno	255	5,471	5,566	5,695	6,206	6,295	6,400	0,729	0,9
LIB7	vrtáno	640	5,256	5,579	5,743	6,252	6,348	6,441	0,769	6,1
LIB8	stříleno	1231	3,751	4,198	4,922	6,184	6,352	6,613	2,154	20,7
LIB11	stříleno	1986	4,561	4,864	5,168	6,082	6,349	6,617	1,485	4,9

7.3 Stanovení koeficientu hydraulické vodivosti

V současnosti není platná norma pro stanovení koeficientu hydraulické vodivosti na horninových vzorcích. Jako pracovní postup byla využita norma ČSN CEN ISO/TS 17892-11 (2005).

Válcové vzorky (LIB7 LIB8 a LIB11) o průměru a výšce 5 cm byly odvrtny ve směru předpokládané maximální propustnosti určené z detailního ultrazvukového prozařování kulových vzorků (viz kap. 7.2), které byly osazeny do triaxiální komory *Ergotech* (Obr. 96) a zatíženy axiálním napětím a komorovým tlakem 3 MPa. Při sytícím tlaku 2 MPa byly vzorky nasyceny. Po nasycení byl stanovený koeficient hydraulické vodivosti při tlakové diferenci 1 MPa (horní drenáž 2 MPa, dolní drenáž 1 MPa. Pro syčení a propuštění vzorku destilovanou vodou byl použitý propustoměr Quizix C-5000 (Obr. 96).

Z rozměrů vzorků (výška zkušební vzorku před zkouškou L , m; průřezová plocha zkušební vzorku A , m²) a z objemu proteklé vody (V , m³) za časový interval měření (t , s) byl vypočten koeficient hydraulické vodivosti k_f , m·s⁻¹ podle vztahu:

$$k_f = V \cdot L / (A \cdot H \cdot t) \quad (7.1)$$

kde H , m značí rozdíl tlakových výšek hladin.



Obr. 96 Fotografie komory pro měření hydraulické vodivosti (nahore) a permeamtru Quizix 5000 (dole).

Stanovený koeficient hydraulické vodivosti, měřený při konstantní teplotě 18 °C, byl podle normy ČSN CEN ISO/TS 17892-11 (2005) přepočten na koeficient filtrace při teplotě vody 10 °C. Naměřené hodnoty pro vzorky LIB7, LIB8, LIB11 jsou uvedeny v souhrnné tabulce Tab. 14 spolu s měřeními provedenými pro vzorky LIB1-LIB6 (Petružálek et al., 2012). Tato měření byla provedena na propustoměru určenému primárně pro měření zemin. Z toho důvodu byl použitý nízký komorový tlak (240 kPa) a tlaková diference (224 kPa), která odpovídá hydraulickému gradientu 22,9. V rámci ověření přesnosti těchto hodnot, byly vzorky LIB3 a LIB6 v roce 2017 přeměřeny na velmi přesném permeamtru Quizix 5000 při hydraulickém gradientu 51 (tlaková diference 500 kPa). Za předpokladu laminárního proudění, je koeficient filtrace nezávislý na hydraulickém gradientu.


Tab. 14 Souhrn hodnot koeficientů filtrace spolu s experimentálními podmínkami. LIB3*, LIB6* představují opakovaná měření v roce 2017

vzorek	komorový tlak, MPa	tlaková diference, MPa	hydraulický gradient, m/m	T, °C	$k_f \cdot 10^{12}$, m·s ⁻¹	$k_{f10} \cdot 10^{12}$, m·s ⁻¹
LIB7	3	1	102,1	24,5	11,9	8,26
LIB8	3	1	102,1	24,5	21,9	15,2
LIB11	3	1	102,1	24,5	3,99	2,77
LIB1	0,24	0,224	22,9	25	74,3	51,0
LIB3	0,24	0,224	22,9	25	32,1	22,0
LIB4	0,24	0,224	22,9	25	20,4	14,0
LIB6	0,24	0,224	22,9	25	4,08	2,80
LIB3*	3	0,5	51,0	18	19,3	15,6
LIB6*	3	0,5	51,0	18	4,58	3,71

Tab. 14 shrnuje měřené hodnoty koeficientů hydraulické vodivosti z let 2013, 2015 a 2017. Obecně lze říci, že hydraulická vodivost v řádu 10⁻¹² m·s⁻¹ odpovídá vrtané části tunelu, v řádu 10⁻¹¹ m·s⁻¹ pak střílené části tunelu. Výjimkou je metráž 1986 m, kde byla stanovena hydraulická vodivost menší než ve vrtané části tunelu, což může odpovídat kompaktnější části tunelu nebo testovacího tělíska.

7.4 Stanovení porozity vzorků

Obě instituce stanovovaly porozitu vzorků. GLÚ stanovovalo porozitu na 5cm vzorcích nasycených vodou po stanovení hydraulické vodivosti. V ÚJV byly vzorky nasyceny podtlakově po dobu nejméně dvou týdnů. 1cm vzorky byly syceny podzemní vodou odebranou v tunelu (W142), 5cm vzorky byly syceny 0,1 mol/l NaCl. Z rozměru vzorků, hmotnosti vysušených vzorků do konstantní hmotnosti a hmotnosti nasycených vzorků byla vypočtena porozita:

 SÚRAO	Vývoj a ověřování metodik pro charakterizaci horninového prostředí – výsledky monitoringu v přivaděči Bedřichov	Evidenční označení:
		TZ SÚRAO 289/2018

$$\varepsilon = (m_{\text{nasyčený}} - m_{\text{vysušený}}) \cdot \rho / V_{\text{vzorku}} \quad (7.2)$$

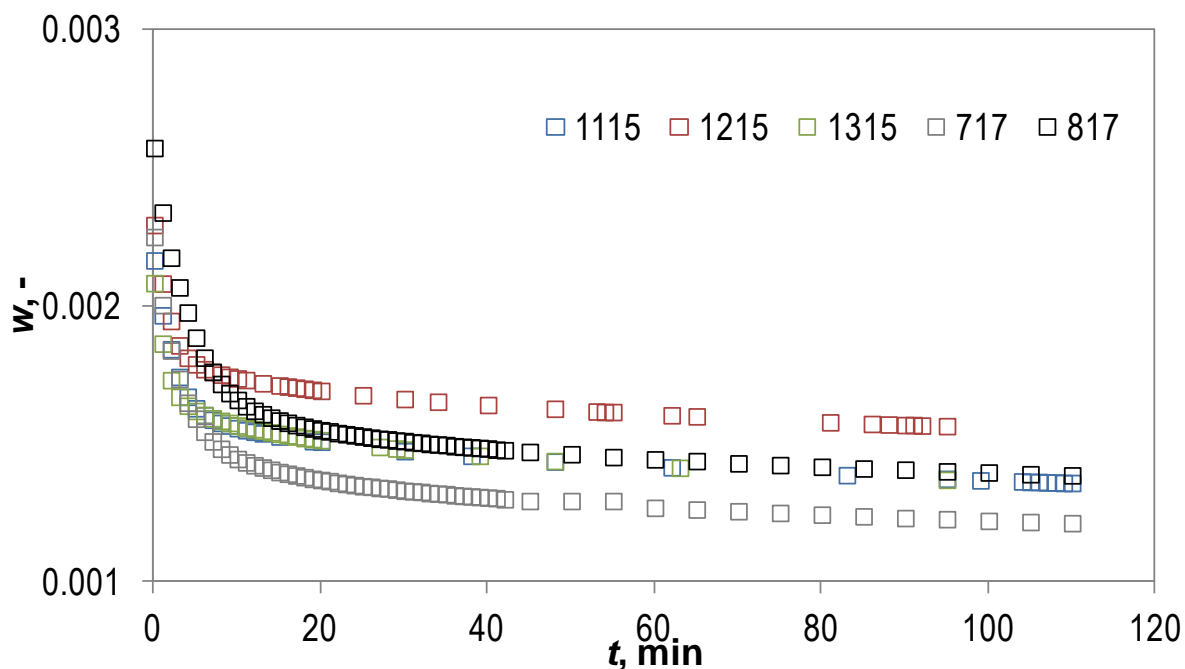
Za hustotu sytící kapaliny ρ byla použita hodnota $1 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$. V ÚJV byla porozita stanovena také podle metodického postupu PP2402.07, kdy je zaznamenáváno postupné osychání vzorků. Součástí stanovení je i vážení nasycených vzorků pod hladinou kapaliny. Takto stanovená hodnota porozity je označována jako $\varepsilon_{\text{osychání}}$.

V tabulce Tab. 15 jsou prezentovány stanovené hodnoty porozity na 5cm vzorcích oběma institucemi. Lze říci, že hodnoty obou institucí se shodují. U některých vzorků bylo stanovení provedeno dvakrát během řešení projektu. Variabilita opakovaných měření ukazuje na nejistotu tohoto stanovení (pocházející patrně z nejistoty určení hodnoty $m_{\text{nasyčený}}$). Nutno podotknout, že vzorek 1815 byl uštíplý, nelze jednoduše určit V_{vzorku} .

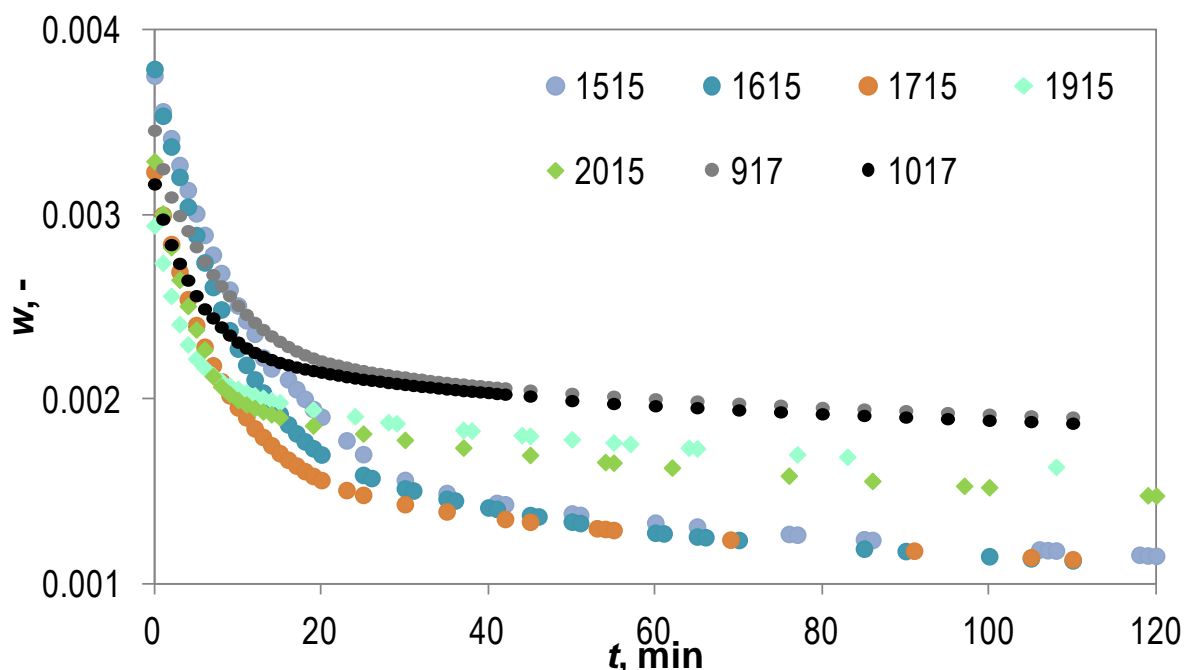
Tab. 15 Stanovené hodnoty porozity na 5cm vzorcích dle vztahu (7.2)

Vzorky GLÚ značení	Vzorky ÚJV značení	ε (%) GLÚ	ε (%) ÚJV
LIB6	-	0,34 0,55	-
LIB7	1015	0,37	0,54 0,42
LIB4	-	0,72	-
LIB8	1415	0,69	0,69 0,73
LIB3	-	0,95 0,84	
LIB11	1815	0,36	0,62 0,27
LIB1	-	0,91	

Následující Obr. 97 a Obr. 98 prezentují průběh vlhkosti $w = (m_{\text{nasyčený}} - m_{\text{vysušený}}) / m_{\text{vysušený}}$ během osychání 1cm vzorků z vrтанé a střílené části tunelu. Porovnáním obou obrázků je vidět, že počáteční vlhkost vzorků z vrтанé části tunelu je menší než ze střílené části tunelu. Také průběh osychání je rozdílný. Nejrychleji oschnul povrch vzorků z vrтанé části tunelu, poté vzorky ze střílené části tunelu z metráže 1986 m, poté 1706 m. Nejpomaleji osychaly vzorky z 1231 m (vzorky 1515, 1615, 1715 ÚJV), což ukazuje na největší porušení vzorků.

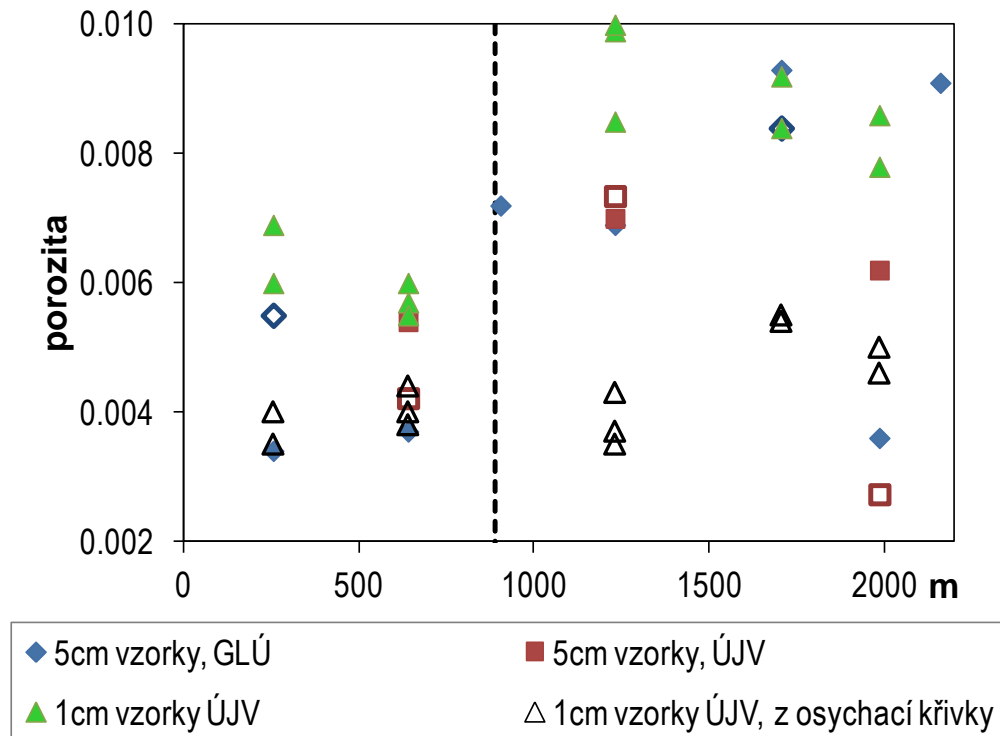


Obr. 97 Křivky osychání 1cm vzorků z vrtané části tunelu



Obr. 98 Křivky osychání 1cm vzorků ze střílené části tunelu

Stanovené hodnoty porozity z osychací křivky byly velmi podobné, v rozmezí 0,35 - 0,50 %, ačkoliv bylo pozorováno rozdílné osychání vzorků. Následující Obr. 99 shrnuje stanovené hodnoty pomocí obou postupů. Hodnoty porozity stanovené dle vztahu (7.2) na 1cm vzorcích kopírují trend hodnot z 5cm vzorků. V některých případech jsou srovnatelné, v některých vyšší. Hodnoty porozit určených z osychací křivky jsou však vždy celkově nižší. Z těchto dat nelze pozorovat významný rozdíl mezi vrtanou a střílenou částí tunelu, avšak z hodnot získaných dle vztahu (7.2) ano. Individuální hodnoty porozit jsou uvedeny v následující kapitole o difúzi, neboť porozita je jedním z parametrů určující velikost efektivního difúzního koeficientu D_e .













Obr. 99 Stanovené hodnoty porozity studovaných vzorků - mezilaboratorní srovnání, vliv měřítka a metodik















7.5 Průnikové difúzní experimenty s HTO

Průnikové experimenty byly provedeny a vyhodnoceny dle Havlová a Vopálka (2010). Objemová aktivita HTO nebyla udržována konstantní ve zdrojovém rezervoáru. Efektivní difúzní koeficient byl stanoven z dat nárůstu objemové aktivity HTO v cílovém rezervoáru pomocí numerického modelování v difúzním modulu vytvořeném v prostředí softwaru GoldSim. Vstupními parametry při fitování byly: rozměry vzorku (délka, průměr), objemy rezervoárů, nekonstantní zdroj, distribuční koeficient $0 \text{ l} \cdot \text{kg}^{-1}$, referenční difuzivita tritia $D_w = 2,27 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, poločas přeměny $\tau_{1/2} = 12,32 \text{ let}$. Dále byla předpokládána konstantní hodnota porozity podél difúzní dráhy; byla nastavena hodnota $\varepsilon_{\text{osychání}}$. Možnost nehomogenity porozity podél difúzní dráhy je okrajově řešena v závěru této kapitoly (tato možnost přispívá do nejistot stanovení D_e). Jediným neznámým parametrem byl tedy geometrický faktor G (-). Efektivní difúzní koeficient byl vypočten ze vztahu: $D_e = \varepsilon \cdot G \cdot D_w$. Následující tabulky Tab. 16 a Tab. 17 shrnují stanovené efektivní difúzní koeficienty HTO. Nejistota D_e je v případě užití homogenní porozity velmi nízká, jak je patrné z Tab. 18. Avšak nejistoty v tabulkách Tab. 16 a Tab. 17 jsou zpracovány multiplikačním modelem výpočtu nejistot. Zde nejvýznamněji přispívá neurčitost hodnoty porozity, která byla brána jako polovina intervalu hodnot porozity ε a $\varepsilon_{\text{osychání}}$. U vzorků ze střílené části tunelu je neurčitost porozity velmi významná, což se odráží v nejistotě D_e .

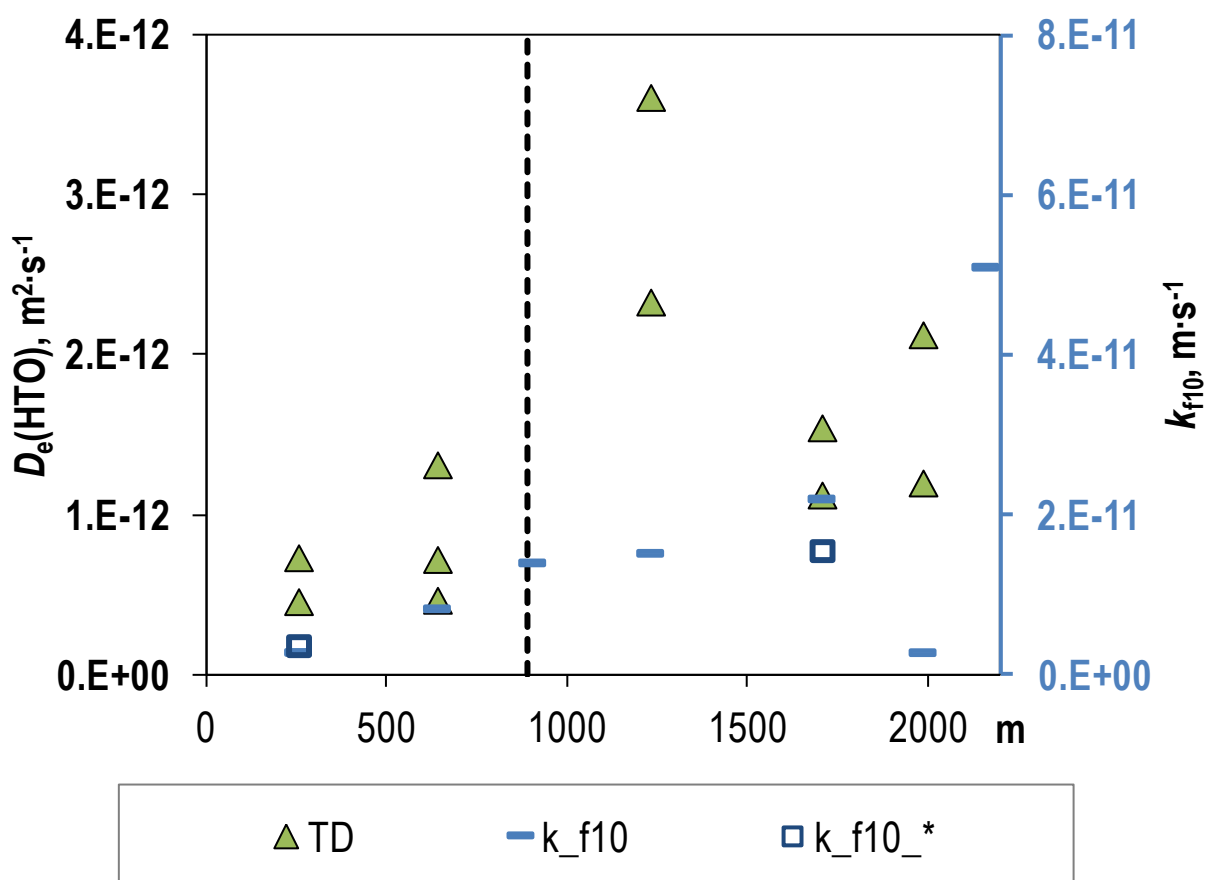
Tab. 16 Výsledky HTO difúzních experimentů na vzorcích z vrtné části tunelu Bedřichov

vzorek	717	817	1115	1215	1315	$\bar{x} \pm s$
						
						
$\epsilon_{\text{osychání}}$, %	0,35	0,40	0,38	0,44	0,40	0,39 ± 0,03
ϵ , %	0,60	0,69	0,57	0,60	0,55	0,60 ± 0,05
$D_e \cdot 10^{13}$, ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)	4,6 ± 1,7	7,4 ± 2,7	7,2 ± 1,8	4,7 ± 0,9	13,2 ± 0,2	

Tab. 17 Výsledky HTO difúzních experimentů na vzorcích ze střílené části tunelu Bedřichov

vzorek	1515	1615	1715	917	1017	1915	2015	$\bar{x} \pm s$
								
								
$\epsilon_{\text{osychání}}$, %	0,43	0,37	0,35	0,55	0,54	0,50	0,46	0,46 ± 0,07
ϵ , %	0,99	1,00	0,86	0,92	0,84	0,78	0,86	0,89 ± 0,08
$D_e \cdot 10^{12}$, ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)	-	2,3 ± 2,0	3,6 ± 2,6	1,55 ± 0,52	1,13 ± 0,31	1,20 ± 0,34	2,13 ± 0,92	

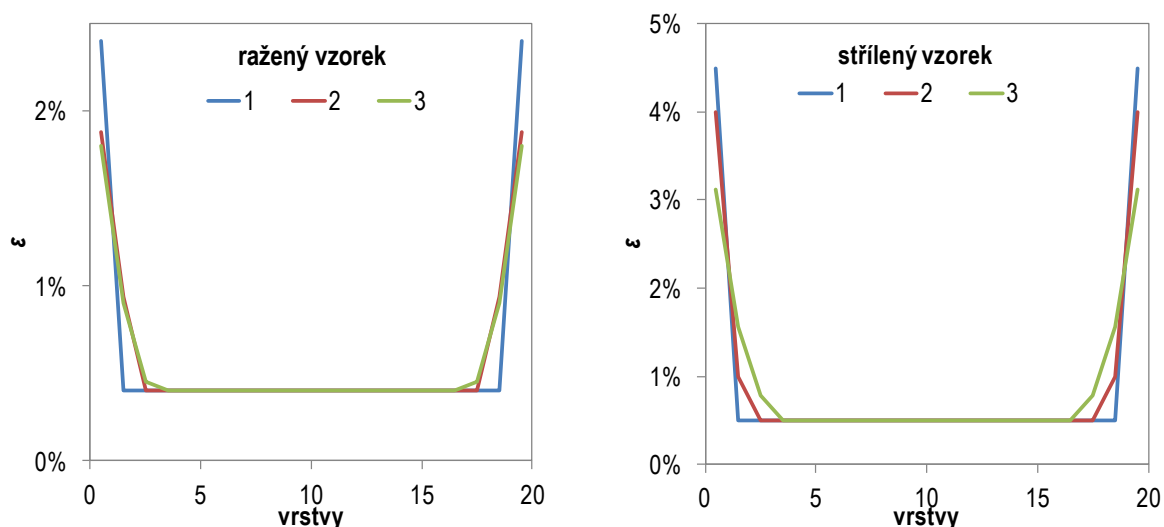
Z výsledků je vidět, že efektivní difúzní koeficienty naměřených na vzorcích z vrтанé části tunelu jsou menší než ze střílené části tunelu, viz Obr. 100. Srovnáním s výsledky stanovení koeficientů hydraulické vodivosti jsou D_e v souladu, až na metráž 1231 m a 1986 m. Domníváme se, že to bylo pravděpodobně způsobené vlivem měřítka, např. nereprezentativností vzorku nebo otevřením některých pórů rozřezáním na 1cm disky. Z Obr. 100 je také vidět variabilita výsledků v rámci jednoho odběrového místa. Například porovnáním vzorků a výsledků D_e z metráže 255 m, lze vyšší D_e u vzorku 817 přisoudit přítomnosti vyhojené pukliny. Dále u vzorků z metráže 640 m lze nejvyšší D_e u vzorku 1315 přisoudit přítomnosti dvou velkých zrn živce. Vysoké D_e (pro HTO i pro jodid - viz kap. 7.6) u vzorků z 1231 m (1515-1715) lze přisuzovat nepřítomnosti velkých zrn živce nebo mezizrnné propustnosti mezi okrajovým zrnem živce. Srovnáním vzorků a výsledků D_e z metráže 1986 m lze vyšší D_e u vzorku 2015 přisoudit přítomnosti praskliny. Z těchto interpretací je patrné, že bez znalosti detailního vlivu faktorů jako je měřítkový efekt, struktura vzorku (hrubo/jemnozrnnost, přítomnost mikrotrhlin a puklin) nelze vyvozovat závěry.



Obr. 100 Srovnání efektivních difúzních koeficientů HTO a koeficientů hydraulické vodivosti

Také dále dosud není jasné, která z metod stanovení porozity poskytuje správnější data. Při vyhodnocování byla použita hodnota $\varepsilon_{osychání}$, průměrný geometrický faktor všech vzorků odpovídal $G = 0,15 \pm 0,12$. Protože hodnota $\varepsilon_{osychání}$ byla stanovena téměř shodná pro vzorky z obou částí tunelu, znamenalo by to, že rozdílné D_e jsou způsobeny rozdílnou difúzní dráhou v těchto vzorcích. Přikláníme se ale k interpretaci, že rozdíl v D_e je způsoben rozdílnou porozitou, jak indikují hodnoty porozity stanovené dle vztahu (7.2). Užší interval geometrického faktoru všech vzorků $G = 0,080 \pm 0,043$, vypočtený z hodnot porozity stanovené dle vztahu (7.2), tomu nasvědčuje.

Dosud jsme ale uvažovali homogenní izotropní prostředí, tedy konstantnost porozity podél difúzní dráhy. Ve skutečnosti se nemusí jednat o homogenní izotropní prostředí. Lze předpokládat, že profil porozity není ve vzorku homogenní. Porozita na krajích vzorku je patrně zvýšená vlivem řezání horniny na 1cm disky. Testovali jsme, jaký by měl hypotetický nehomogenní profil porozity vliv na výsledné hodnoty D_e , pomocí modelování v difúzním modulu umožňující nastavit i heterogenní profil porozity. Stávající verze difúzního modulu rozděluje vzorek na 20 dílčích vrstev. Byl nastaven profil porozity tak, aby oblast uvnitř vzorku odpovídala porozitě z osychání (vrtané vzorky 0,4 % a střílené vzorky 0,5 %). Poté byly zvoleny tři případy zvýšené porozity na hranicích vzorku: první krajní vrstvy (případ1), krajní dvě vrstvy (případ2) a krajní tři vrstvy (případ3), tak aby průměrná porozita odpovídala hodnotě porozity stanovené dle vztahu (7.2) (vrtané vzorky 0,6 % a střílené vzorky 0,9 %). Takto navržené profily porozity jsou zobrazeny na Obr. 101.



Obr. 101 Tři testované případy profilů porozity pro 1cm vzorky z vrtané a střílené části tunelu s průměrnou porozitou odpovídající hodnotě stanovené dle vztahu (7.2)

Toto testování bylo provedeno na vzorku 1115 (vrtaný) a 1615 (střílený). Fitováním průnikové křivky byly získány geometrické faktory pro dané případy. Tab. 18 ilustruje vliv heterogenity vzorku na výsledné efektivní a zdánlivé difúzní koeficienty. V případě použití homogenního profilu porozity vycházejí identické efektivní difúzní koeficienty nezávisle na použité hodnotě porozity (což je jasné z definice D_e). Pokud se však při modelování zohlednila nehomogenita porozity uvnitř vzorku, byly fitováním získány vyšší geometrické faktory. Takto získané geometrické faktory představují průměrný geometrický faktor přes celý vzorek, z kterého byly vypočteny průměrné zdánlivé a efektivní difúzní koeficienty, viz Tab. 18. Je evidentní, že při heterogenním profilu porozity jsou v každé dílčí vrstvě vzorku rozdílné hodnoty D_a a D_e . Vliv porušené okrajové zóny (BDZ, jako *boundary disturbed zone*) je detailněji diskutován níže.

Tab. 18 Výsledky testování HTO difúzních experimentů na vzorcích 1115 a 1615 z tunelu Bedřichov

profil porozity	1115			1615		
	$D_a \cdot 10^{10}$ ($m^2 \cdot s^{-1}$)	$D_e \cdot 10^{12}$ ($m^2 \cdot s^{-1}$)	$\epsilon_{\text{průměrná}}$	$D_a \cdot 10^{10}$ ($m^2 \cdot s^{-1}$)	$D_e \cdot 10^{12}$ ($m^2 \cdot s^{-1}$)	$\epsilon_{\text{průměrná}}$
homogenní	1,80	0,73	0,004	4,68	2,34	0,005

homogenní	1,23	0,74	0,006	2,63	2,37	0,009
heterogenní případ1	1,63	0,98	0,006	4,27	3,84	0,009
heterogenní případ2	1,54	0,93	0,006	4,04	3,64	0,009
heterogenní případ3	1,54	0,93	0,006	3,81	3,43	0,009

7.6 Elektromigrační experimenty s jodidem

Metodika elektromigračních (EM) experimentů byla podrobně popsána v průběžné zprávě (Hokr et al., 2016), Löfgren et al. (2009). Pro elektromigrační experimenty byly původně zvoleny tři vzorky o délce ~ 5 cm (1015 z vrtné části tunelu, 1415 a 1815 ze střílené části tunelu, viz Tab. 12). Jak již bylo uvedeno výše, tyto horninové vzorky byly pro potřeby elektromigračního experimentu nasyceny roztokem NaCl o koncentraci 0,1 mol/l. V elektromigračních experimentech byl jako stopovač použit jodidový aniont ve formě jodidu sodného o koncentraci 0,01 mol/l. K detekci jodidového aniontu a stanovení jeho koncentrací byla používána jodidová iontově selektivní elektroda. Na vzorku 1015 nebyl pomocí této detekce možné stanovit průnik jodidu do cílového rezervoáru, a tedy stanovit efektivní difúzní koeficient (Hokr et al., 2016). Proto byla vyvinuta metodika stanovení jodidu pomocí jiné analytické techniky - spektrofotometrie. Jodid absorbuje záření v UV oblasti elektromagnetického spektra. Pro spektrofotometrická měření byla zvolena vlnová délka 226 nm. Kalibrační roztoky byly připraveny ve stejném elektrolytu, v kterém probíhaly EM experimenty. V pravidelných intervalech byl odebírán vzorek z cílového rezervoáru do křemenné kyvety, po změření absorbance byl vzorek vrácen zpět do EM cely.

Na přelomu 2017 a 2018 byly znovu změřeny vzorky 1015, 1415 a 1815 s detekcí jodidu pomocí UV absorpční spektrometrie. Získaná data efektivních difúzních koeficientů jsou shrnuta v Tab. 19. Je vidět, že $D_e(\text{EM_NaCl})$ jsou konzistentní s daty $D_e(\text{TD_HTO})$; nejvyšší pro 1231 m a nejnižší pro 640 m. Detailněji interpretovat tyto výsledky nelze, dokud nebude experimentálně ověřeno:

- 1) vliv velikosti vzorku – srovnání $D_e(\text{EM_NaCl})$ stanoveného na 5cm a 1cm vzorku

Efektivní difúzní koeficient je z definice nezávislý na velikosti vzorku. Hodnoty $D_e(\text{EM_NaCl})$ by měly být pro oba případy shodné. Avšak u 1cm vzorků hrozí nereprezentativnost kvůli velkým zrnům libereckého granitu, tedy $D_e(\text{EM_NaCl})$ se nemusí rovnat. V případě nerovnosti efektivních difúzních koeficientů může být vysvětlením i vznik porušené okrajové zóny (BDZ, jako *boundary disturbed zone*) při přípravě disků či válečků řezáním, viz výše. Je evidentní, že pokud BDZ vzniká, pak bude hrát významnější roli na tenkých vzorcích.

- 2) vliv použité techniky - srovnání $D_e(\text{EM})$ a $D_e(\text{TD})$ na jedné velikosti vzorku

Obě migrační techniky by měly poskytovat stejné výsledky.

- 3) vliv studovaného stopovače - srovnání $D_e(\text{HTO_GW})$ a $D_e(\text{I_NaCl})$

Rozdíl v efektivním difúzním koeficientu HTO a jodidu je jednak v referenční difuzivitě ($D_w(\text{HTO_GW})$ vs. $D_w(\text{I_NaCl})$) a v přístupné porozitě. Zatímco HTO vstupuje do celkového pórového prostoru, jodid vstupuje pouze do části pórového prostoru z důvodu elektrostatických interakcí aniontu a záporně nabitých povrchů minerálů (tzv. aniontová exkluze). Efektivní porozita jodidu je závislá na iontové síle kapalné fáze. S rostoucí iontovou silou roste efektivní porozita. Lze pouze předpokládat, že při maximální iontové síle kapalné fáze je efektivní porozita rovna celkové porozitě.

Poměr $D_e(\text{HTO_GW})$ ku $D_e(\text{I_NaCl})$ představuje číslo zahrnující vliv aniontové exkluze, vliv migrační dráhy neutrálního a záporně nabitého stopovače a také vliv rozdílných referenčních difuzivit:

$$\frac{D_e(\text{HTO_GW})}{D_e(\text{I_NaCl})} = \frac{\varepsilon_{\text{total}}}{\varepsilon_{\text{eff}}} \cdot \frac{G_{\text{HTO}}}{G_{\text{I}}} \cdot \frac{D_w(\text{HTO_GW})}{D_w(\text{I_NaCl})} \quad (7.3)$$

4) vliv iontové síly na migraci

Efektivní difúzní koeficienty za salinity 0,1 mol/l z EM experimentů nelze jednoduše aplikovat při hodnocení českých lokalit, kde salinita vod je o dva řády nižší. Vedle standardně používaného roztoku 0,1 mol/l NaCl na EM experimenty v ÚJV Řež, a. s. byly provedeny i EM experimenty v prostředí podzemní vody z tunelu Bedřichov (odebrané z W142), viz níže. Za této salinity byl otestován i bod 2).

Tab. 19 Výsledné hodnoty efektivního difúzního koeficientu $D_e \cdot 10^{13} \text{ (m}^2 \cdot \text{s}^{-1}\text{)}$ získané za rozdílných elektrických gradientů a technik detekce jodidu (ISE jodidová selektivní elektroda, UV spektrofotometrie)

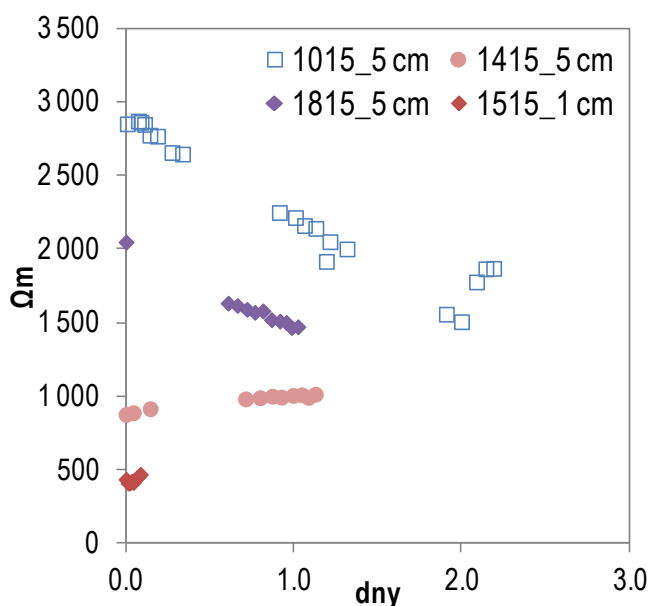
detekce jodidu	vložené napětí, (V)	1015	1415	1815
		640 m	1231 m	1986 m
ISE	50	-	-	0,58
ISE	100	-	1,31	0,71
ISE	200	-	1,44	0,87
UV	25	2,20	8,74	4,70

Bod 4) byl zkoumán v rámci rozšíření projektu v 2017. Avšak ověřování bodů 1) - 3) nebylo v zadání tohoto projektu. Přesto zde chceme dané experimenty prezentovat z důvodu jejich významnosti a dopadů pro budoucí experimentální práce na vzorcích z lokalit plánovaných pro HÚ v ČR. Výsledky těchto experimentů posilují závěry vyvozené pouze z $D_e(\text{TD_HTO_GW_1cm})$ a $D_e(\text{EM_I_NaCl_5cm})$, jež byly předmětem řešení tohoto projektu.

7.6.1 Vliv velikosti vzorku – srovnání $D_e(\text{EM_NaCl})$ stanoveného na 5cm a 1cm vzorku

Obr. 102 prezentuje vývoj rezistivit během EM experimentů v 0,1 mol/l NaCl. Z 5cm vzorků měl největší měrný elektrický odpor vzorek 1015 z vrtané části tunelu, zatímco nejmenší měrný elektrický odpor měl vzorek 1415 z metráže 1231 m (střílená část), což je v souladu s výše prezentovanými

výsledky. Je vidět, že měrný elektrický odpor 1cm vzorku je menší než pro 5cm vzorky. To by potvrdzovalo hypotézu o přítomnosti BDZ. Celkem byly provedeny tři EM experimenty na 1cm vzorcích, výsledky viz Tab. 20.



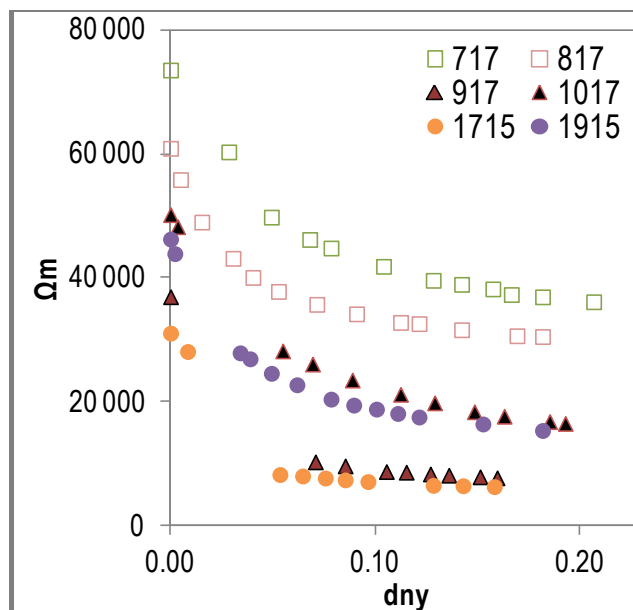
Obr. 102 Vývoj rezistivit vzorků v průběhu EM experimentu po injekci jodidu do zdrojového rezervoáru

Tab. 20 Výsledné hodnoty efektivního difúzního koeficientu $D_e \cdot 10^{12}$ ($m^2 \cdot s^{-1}$) získané EM experimenty v 0,1 mol/l NaCl na 1cm vzorcích

detekce jodidu	vložené napětí, (V)	1315 640 m	1515 1231 m	1615 1231 m
UV	25	1,1	2,6	1,5

7.6.2 Vliv iontové síly na migraci – srovnání EM za různých salinit

Celkem bylo provedeno šest EM experimentů na 1cm vzorcích v prostředí podzemní vody z tunelu Bedřichov. Z vývoje rezistivit, viz Obr. 103, lze opět pozorovat konzistentní výsledky. Největší měrný odpor měly vzorky z vrтанé části tunelu, metráž 255 m (717 a 817). Vodivější byly vzorky ze střílené části tunelu, zejména vzorky 1715 (1231 m) a 917 (1706 m). Získané hodnoty efektivních difúzních koeficientů jsou shrnuty v Tab. 21. Nutno podotknout, že injekcí NaI do zdrojového rezervoáru došlo ke změně salinity. Pro stanovení difúzních koeficientů za relevantních podmínek HÚ by bylo vhodnější použít stopovou koncentraci jodidu značeného radioizotopem s radiometrickou detekcí.



Obr. 103 Vývoj rezistivit vzorků v průběhu EM experimentu po injekci jodidu do zdrojového rezervoáru

 Tab. 21 Výsledné hodnoty efektivního difúzního koeficientu $D_e \cdot 10^{13}$ ($m^2 \cdot s^{-1}$) získané EM experimenty v podzemní vodě z tunelu Bedřichov na 1cm vzorcích

detekce jodidu	vložené napětí, (V)	717 255 m	817 255 m	1715 1231 m	917 1706 m	1017 1706 m	1915 1986 m
UV	25	1,1	1,4	15	8,5	3,0	3,4

7.6.3 Vliv použité techniky

Pomocí několika průnikových experimentů za obou salinit jsme testovali, zda jsou efektivní difúzní koeficienty jodidu z obou technik (TD a EM) srovnatelné. Pro průnikové experimenty byl použit jodid sodný o koncentraci $1 \cdot 10^{-5}$ mol/l označený ^{125}I . Jak je vidět z tabulky Tab. 22, průniková difúze jodidu je v souladu s prezentovanými výsledky; největší D_e byl stanoven na vzorcích z metráže 1231 m.

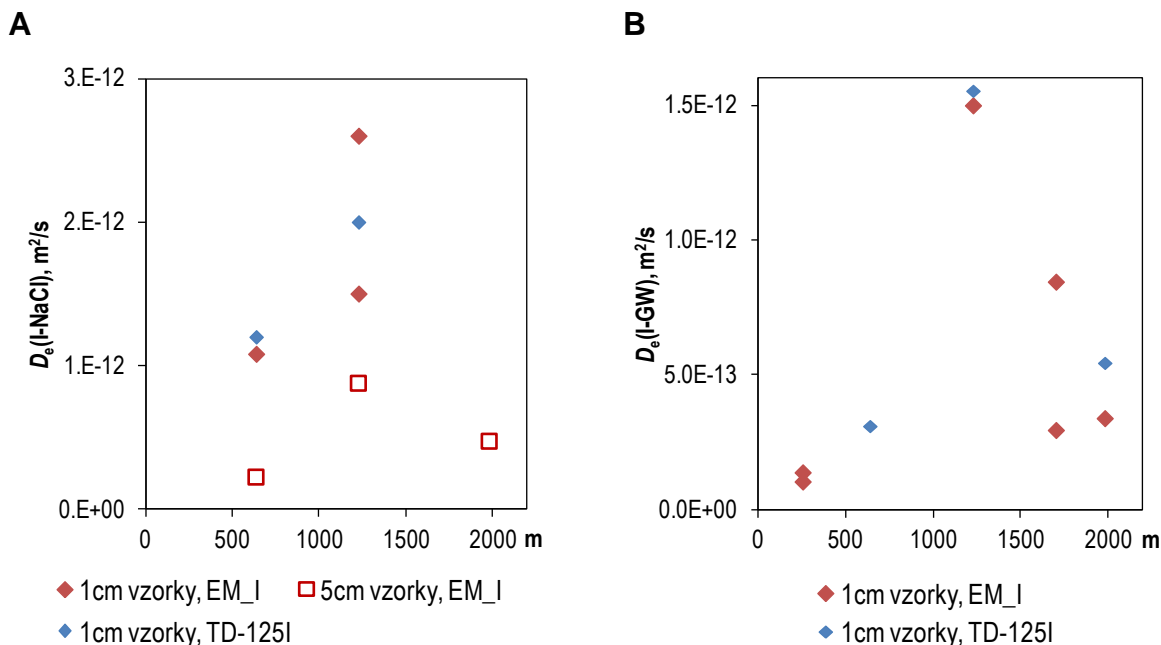
 Tab. 22 Výsledné hodnoty efektivního difúzního koeficientu $D_e \cdot 10^{13}$ ($m^2 \cdot s^{-1}$) získané za rozdílných salinit pomocí průnikové difúzní metody

vzorek	$D_e(\text{TD}_{^{125}\text{I}}\text{GW})$	vzorek	$D_e(\text{TD}_{^{125}\text{I}}\text{NaCl})$
1115	3,1	1315	12,0
1615	15,5	1615	20,0
1915	5,5	-	-

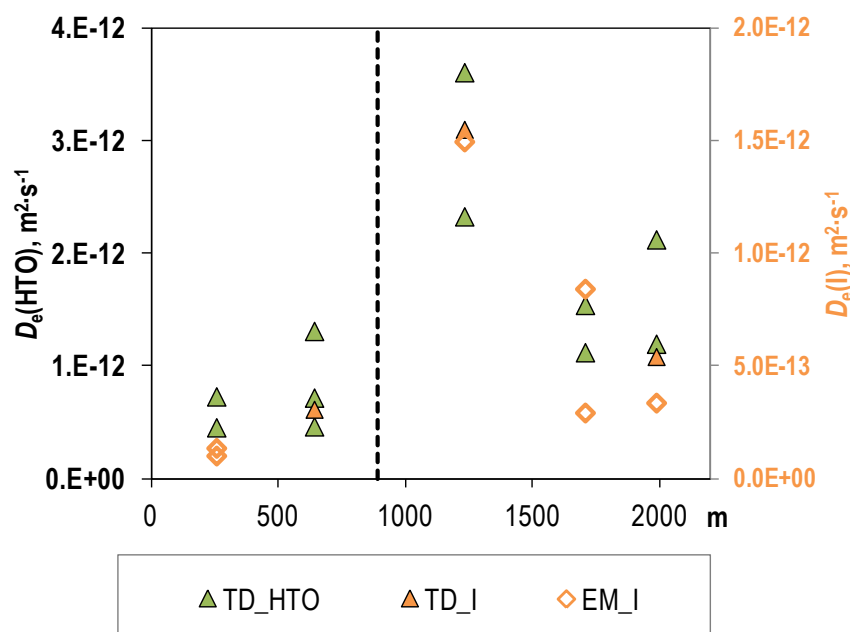
7.6.4 Shrnutí migrace jodidu

Výsledky migrace jodidu za obou salinit stanovených na dvou velikostech vzorku pomocí obou technik je zobrazeno na Obr. 104. Je vidět, že v obou kapalných fázích byly D_e z elektromigrační a průnikové difúzní metody ve velmi dobré shodě. Na Obr. 104A je patrný vliv velikosti vzorku, D_e

stanovené na 5cm vzorcích byly menší než v případě 1cm vzorků. Zda to bylo způsobeno hrubozrnností libereckého granitu nebo větším vlivem porušené okrajové zóny v případě 1cm vzorků nelze z těchto několika experimentů a získaných dat vyvozovat. Další porovnání zahrnující i difuzi tritia je provedeno na Obr. 105. Je vidět jasná souvislost mezi oběma stopovači, což potvrzuje rozdílnost vzorků horniny z různých pozic.



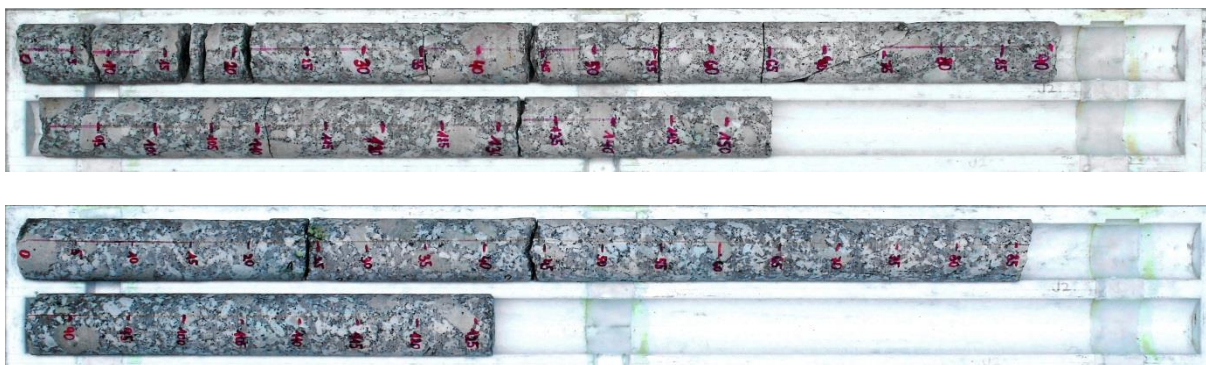
Obr. 104 Získané efektivní difúzní koeficienty jodidu (A) v prostředí 0,1 mol/l NaCl (B) v prostředí podzemní vody z tunelu Bedřichov



Obr. 105 Porovnání difúzních koeficientů tritia a jodidu (z dvou různých metod), vynesená v závislosti na poloze vzorků žuly v tunelu

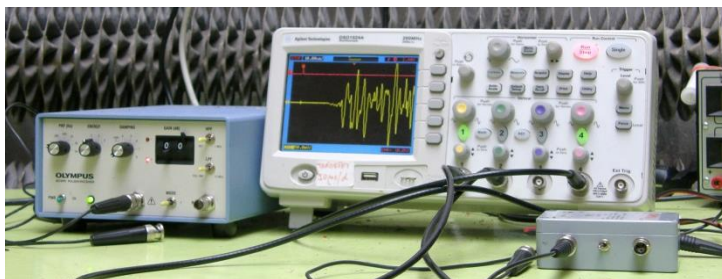
7.7 Stanovení hloubkového dosahu EDZ

Stanovení hloubkového rozložení bylo provedeno na vrtných jádrech libereckého granitu, viz Obr. 106. Hloubkový dosah EDZ byl stanovený z ultrazvukového prozařování podélnými vlnami přes průměr vrtného jádra, které bylo provedeno s krokem 5 centimetrů. Vzorky byly prozařovány ve stavu přirozené vlhkosti. V současnosti není platná norma pro měření rychlostí seismických vln a stanovení dynamických modulů z ultrazvukového prozařování. Pracovní postup vycházel z kapitoly 3 Zaoral (1987).



Obr. 106 Vrtná jádra, nahoře z metráže 1250 (střílená část), dole jádro z metráže 607 (vrtaná část)

Pro výpočet dynamických elastických modulů byla jádra prozářena také příčnými vlnami. Využito bylo snímačů PANAMETRICS V150 (podélné vlny) a PANAMETRICS V153 (příčné vlny), zesilovače Sedlak PA31, pulzního zdroje Olympus 5072PR a osciloskopu Agilent Technologies, DSO1024A (Obr. 107).



Obr. 107 Ultrazvukové prozařování horninových vzorků, vlevo: pulzní zdroj, osciloskop a zesilovač; vpravo: testovaný vzorek osazený mezi ultrazvukovými snímači

Podle vztahů (7.4)-(7.7) byly z naměřených rychlostí (v_p rychlost podélné vlny, v_s rychlost příčné vlny) a objemové hmotnosti (ρ) spočteny dynamické elastické parametry: Youngův modul E_d , smykový modul μ_d , objemový modul K_d a poissonův poměr ν_d .

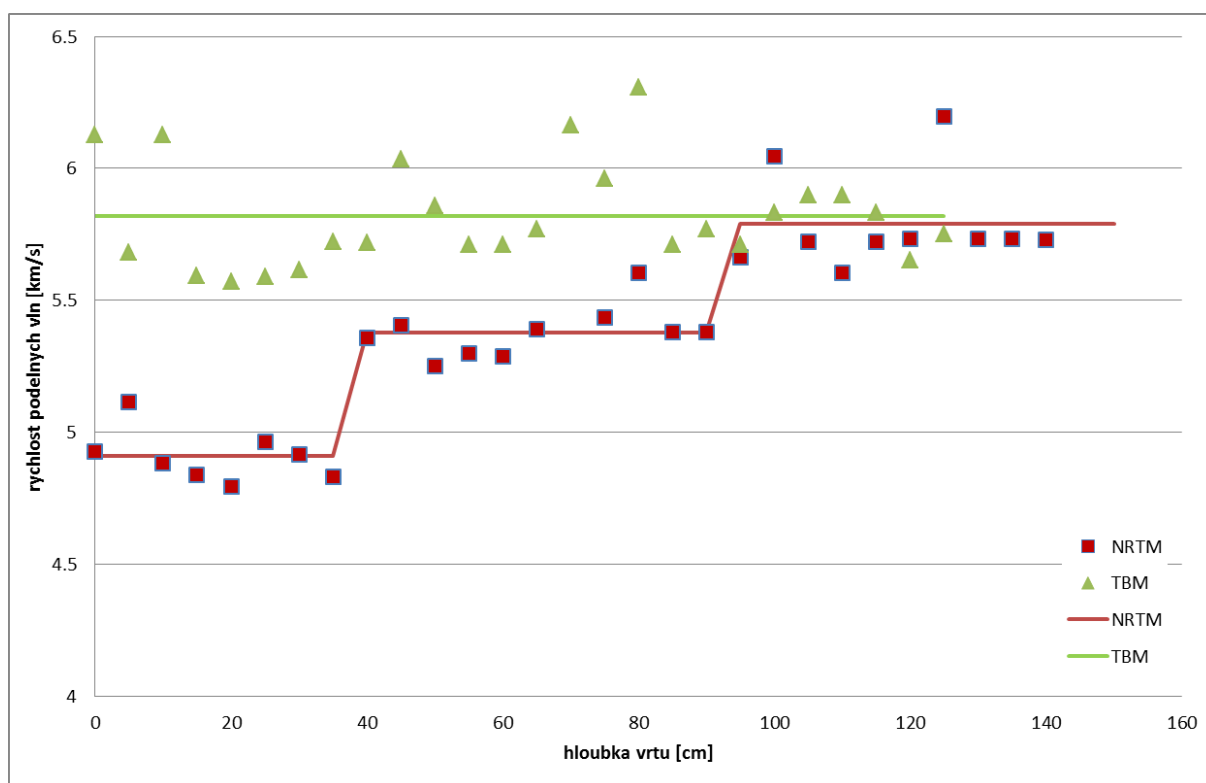
$$E_d = \frac{\rho v_s^2 (3v_p^2 - 4v_s^2)}{v_p^2 - v_s^2} \quad (7.4)$$

$$v_d = \frac{v_p^2 - 2v_s^2}{2(v_p^2 - v_s^2)} \quad (7.5)$$

$$\mu_d = \rho v_s^2 \quad (7.6)$$

$$K_d = \rho_{dry} \cdot (v_p^2 - 4/3v_s^2) \quad (7.7)$$

Všechny elastické parametry, dynamické i statické, uvedené v této zprávě, jsou počítány za předpokladu, že testovaná hornina představuje homogenní izotropní prostředí – měření bylo provedeno na celistvých částech jádra v dostatečné vzdálenosti od lomových ploch. Naměřené hodnoty rychlosti podélných vln jsou zachyceny na Obr. 108. Je patrné, že při vrtání prakticky nedochází k poškození ostění tunelu. Střílená ražba se projevila zónou snížených rychlostí do hloubky 95 centimetrů. Tato zóna byla rozdělena na tři úseky, viz Tab. 23. Snížené rychlosti podélných vln jsou důsledkem výrazně nižších elastických konstant (např. cca 25 % pro E_d) zejména do hloubky 35 centimetrů.



Obr. 108 Ultrazvukové prozařování horninových vrtných jader ilustrující hloubkový dosah EDZ způsobený dvěma typy ražeb

Tab. 23 Vyhodnocené rychlosti seismických vln a dynamických elastických konstant

způsob ražby	hloubka (cm)		v_P (km/s)	v_S (km/s)	ρ (g/cm ³)	E_d (GPa)	μ_d (GPa)	ν_d -	K_d (GPa)
střílená (NRTM)	0 - 35	- x	4,908	3,060	2,648	58,6	24,8	0,183	31,2
		s	0,100	0,113	0	2,9	1,8	0,041	3,7
	40 - 90	- x	5,379	3,333	2,648	71,1	29,5	0,209	41,5
		s	0,098	0,157	0	4,9	2,8	0,050	7,5
	95 - 140	- x	5,788	3,412	2,648	76,2	30,8	0,236	49,0
		s	0,183	0,088	0	2,8	1,6	0,036	7,0
vrtaná (TBM)	0 - 120	- x	5,832	3,351	2,648	74,0	29,8	0,245	49,8
		s	0,198	0,113	0	3,0	2,0	0,042	8,7

8 Závěry

Výsledkem projektu jsou dle zadání jednak tzv. **metodiky**, tj. pracovní postupy zahrnující zkušenosti a doporučení, týkající se různých typů měření v horninovém prostředí v podzemí (přesnější vymezení ve vztahu k významu pojmu je uvedeno níže), jednak **vyhodnocení získaných dat** za období řešení v kontextu předcházejících dlouhodobých řad měření. Metodiky jsou zpracované jako jednotlivé samostatné výstupy (dokumenty, které jsou přílohami této zprávy) a tato zpráva shrnuje výsledky projektu jako celku – hlavním obsahem jsou prezentace a vyhodnocení získaných dat, a v návaznosti na to jsou prezentovány zkušenosti s různými typy měření, případně shrnující popis použitých inovací. Výše uvedená struktura výsledků se týká terénního měření (přivaděč Bedřichov a okolí), které je dominantní částí projektu a v návaznosti na něj bylo dále provedeno stanovení migračních parametrů vzorků horniny laboratorně, s postupy a výsledky uvedenými pouze v této zprávě v příslušné kapitole.


V rámci závěru je provedeno shrnutí výsledků a to zejména ve vztahu k potřebám programu hlubinného úložiště – typicky jde o (1) nové postupy měření nebo jejich přizpůsobení specifickým podmínkám podzemí a typu hostitelské horniny, (2) poznatky o procesech v hornině relevantních pro bezpečnost HÚ, případně postupy získání potřebných parametrů z nepřímých měření, (3) dílčí hodnocení přenositelnosti dat napříč lokalitami, tj. na konkrétních případech vztahu dat mezi lokalitami nebo vztahu parametrů mezi sebou. Jednotlivé kapitoly obsahují shrnutí výsledků dílčích tematických oblastí v podrobnější podobě.

Celkově lze konstatovat, že monitoring v přivaděči Bedřichov poskytl velké množství dat a zkušeností pro potřeby hodnocení horninového prostředí, za obecných podmínek podzemních prostor v žulovém masivu, a aplikace postupů na jiných zájmových lokalitách pro přípravu HÚ.

Proudění vody

Měření průsaků charakterizovalo jak jejich časový vývoj, tak prostorové rozložení. Obecně vydatnost průsaku umožňuje charakterizovat hydraulické podmínky (tlaky, propustnosti) v okolí tunelu, např. i s využitím numerických modelů ve 3D. Míra kolísání vydatnosti klesá s hloubkou pod povrchem (relativní podíl kolísání hladiny proti zbylému sloupci vody nad tunelem), rozhraní přímo pozorovatelného efektu reakce na srážky je cca 200-250 m na straně u vstupu (hloubka cca 50 m), ale na straně u nádrže není jednoznačné, protože se snižující hloubkou zároveň narůstá hydraulický vliv nádrže. U vývěrů v hlubší části se efekt změny infiltrace pravděpodobně projevuje dlouhodobě (pokles V2, V3), ale i s výskytem rychlejších změn (W930). Vliv bohužel nelze plně vyhodnotit bez dostupných údajů o hladině podzemní vody. Vyhodnocení částečně komplikují také problematické případy odlišení přirozených jevů v měřítku masivu od artefaktů efektu tunelu v malém měřítku (odpařování, zavzdušnění puklin/hadic).

Pozorování efektu srážek na vydatnost vývěrů do tunelu se sice může zdát na první pohled elementární, ale souvislost různého charakteru průběhu s hloubkou a s typem vývěru má význam dalšího indikátoru charakteru podzemní vody i ve větších hloubkách a pro hodnocení stability podmínek v podzemí bez i s ovlivněním důlním dílem. I pro studium pohybu vody ve větších hloubkách je „napojení“ na povrch nezbytné.

 SÚRAO	Vývoj a ověřování metodik pro charakterizaci horninového prostředí – výsledky monitoringu v přivaděči Bedřichov	Evidenční označení:
		SÚRAO TZ 289/2018

Datování vody (přirozené stopovače)

Zjištěné doby zdržení (stáří) podzemní vody z různých typů stopovačů na sebe navazují: Freony vymezují jen hrubý interval a data dalších stopovačů, pokud je lze aplikovat, do něj konzistentně spadají a pokrývají celý rozsah intervalu. Hlavní nejistota zůstává v případě velmi slabých vývěrů (kapajících) v hlubší části tunelu (pod cca 30-40 m hloubky), neboť je nelze vzorkovat bez kontaktu s atmosférou, což je podmínka dostupných typů přirozených stopovačů pro stáří vyšších jednotek a prvních desítek let, kromě tritia, které ale stejně v tomto rozmezí a v aktuální době vzorkování neposkytuje jednoznačné výsledky.

Z výsledků měření stopovačů a interpretace dat pomocí modelů je patrné, že je nutné uvažovat model rozložení dob zdržení a tedy chápat vodu jako směs vod s různým stářím. Rozptyl dob zdržení může být poměrně výrazný, díky nehomogenitě (puklin, matrice) a kombinaci subhorizontálního toku v přívodové zóně a vertikálního toku v nespojitostech pevného granitu. Z dostupných dat sice tento jev či parametr nelze dobře kvantifikovat, ale obecně míra mísení může být v kontextu bezpečnosti úložiště významná, v podobě vlivu na ředění roztoků a změny koncentrací radionuklidů při migraci.

Chemismus vody


Podzemní vody přitékající do přivaděče jsou převážně hydrochemického typu Ca-HCO₃ s typickým zastoupením kationtů - Ca 70 meq%, Na a Mg kolem 15 meq%. Převažují podzemní vody s neutrální nebo mírně zásaditou reakcí, nízké mineralizované. Vody jsou v převážné většině silně oksyložené. V případě přítoků s pravidelným vzorkováním (V5, W1565 a V07/W2210) nebyl u většiny složek a parametrů podzemní vody zjištěn žádný prokazatelný trend vývoje, nedocházelo k trvalému poklesu nebo nárůstu obsahu složek podzemních vod, hodnoty spíše oscilovaly kolem průměrné hodnoty. Velmi slabý trend nárůstu obsahů v desetínách mg/l za rok byl zaznamenán u obsahů síranů, nejvýraznější nárůst byl u přítoku W1565. Obsah hydrogenuhlíčanů a celkový obsah rozpuštěných látek ve vodách naopak velmi slabě klesal.

Terénní měření měrné elektrické vodivosti se v homogenním geologickém prostředí a v hloubkách do 150 m pod zemským povrchem ukázala jako velmi dobrý indikátor doby zdržení (hloubky oběhu) podzemní vody v horninovém prostředí včetně možnosti lokalizace přítoku po zlomu. Přítoky s delší dobou zdržení vod v masivu měly výrazně vyšší měrnou elektrickou vodivost.

Složení podzemních vod a jeho vývoj na lokalitě Bedřichov odpovídá relativně homogennímu prostředí jizerského granitu bez výrazných alterací a akcesorických minerálů (sulfidy). Chemické změny podzemních vod v krátkodobém i dlouhodobém měřítku (37 let) jsou malé, nedochází k významnému nárůstu nebo poklesu obsahů jednotlivých složek. Je možné předpokládat, že pokud bude HÚ situováno do obdobného prostředí, stabilita chemického složení vod bude vysoká.

Seismicita

Po dílčích méně úspěšných testech různých komponent monitorovacího systému (geofony, A/D převodníky) se podařilo sestavit a přiměřeně dlouhým provozem ověřit sestavu splňující potřebné požadavky na monitoring seismicity v podzemí. Podstatnou vlastností je vysoká citlivost na velmi slabé jevy (předpokládá se poloha studovaných lokalit v seismicky klidných oblastech), zároveň s odolností při překročení měřicího rozsahu rychlostí, tj. např. vlivem prací v okolí měření. Tunel v Bedřichově se ukazuje jako vhodná lokalita pro ověření provozu takového zařízení – je zároveň

 SÚRAO	Vývoj a ověřování metodik pro charakterizaci horninového prostředí – výsledky monitoringu v přivaděči Bedřichov	Evidenční označení:
		SÚRAO TZ 289/2018

bez silných jevů a zároveň se v něm vyskytují pravidelné slabší, které zajistí otestování funkce a vlastností. Řešitelé tak doporučují v případě budoucího výběru (případných jiných) komponent pro monitoring seismicity pro nasazení v zájmových lokalitách předchozí ověření sestavy v podmínkách Bedřichova.

Zpracovaná metodika obsahuje kombinaci obecných doporučení pro seismický monitoring v podzemí a hodnocení aplikace konkrétního typu seismometru, který je na základě zkušeností získaných mimo i v rámci projektu doporučen jako vhodný.

Posuny puklin


Chování puklin je v kontextu hlubinných úložišť důležité v tom, že otevírání a zavírání puklin vytváří podmínky pro procesy transportu látek, zatímco horizontální a vertikální smykové pohyby poskytují důkazy, které naznačují, zda nějaké aktivní tektonické procesy se vyskytují v horninovém prostředí, které je požadováno jako stabilní. Mezi lety 2015 a 2018 přímá experimentální pozorování získaná ze čtyř míst v Bedřichově ukazují, že velikost otevření a zavření puklin je přibližně třikrát větší než velikost zaznamenaných horizontálních a vertikálních smykových pohybů. Otevírání a zavírání dosahuje maximální sezónní amplitudy 0,0598 mm na pozici D235, 0,0032 mm na D278, 0,0560 mm na D795 a 0,0476 mm na D881. Na rozdíl od studií provedených v podzemí ventilovaných jílovců ve Francii nenacházíme žádný důkaz vlivu denních nebo půldenních jevů v žádné časové řadě posunutí nebo rotace. Metoda sledování puklin použitá v generické podzemní laboratoři Bedřichova by mohla být použita v každé konkrétní URL, která disponuje síťovým napájecím zdrojem a stabilní datovou linkou. Vzhledem k nedostatku přímých experimentálních pozorování puklinového chování v jiných podzemních výzkumných laboratořích je stále mnoho nezodpovězených otázek. Dosud se velká část výzkumu v tunelu Bedřichov soustředila na souvislost mezi chováním puklin a tektonickými procesy. Na základě zde popsaných experimentálních zjištění by však další zkoumání souvislosti mezi chováním puklin a procesy transportu látek mohlo poskytnout větší škálu výsledků, které by pomohly prokázat bezpečnou likvidaci budoucího radioaktivního odpadu v souladu s předpisy týkajícími se jaderné bezpečnosti, ochrany člověka a ochrany životního prostředí.

Teploty

V prostředí bedřichovského tunelu byl vyvinut a ověřen způsob teplotního monitoringu uvnitř horninového masivu. Zejména způsob osazení vrtů teplotními čidly se ukázal jako velice spolehlivý a nedocházelo k přenosu tepla mezi jednotlivými čidly mimo horninový masiv. Byl také ověřen způsob kontroly teplotního řetězce, aniž by byl vyjmut z vrtu. V podmínkách HU, kde budou čidla pravděpodobně natrvalo zabetonována a nebude možné jejich vyjmutí, bude nalezení systému jejich kontroly velice důležité. Nebyl otestován monitoring pomocí optického vlákna (DTS), což ale ani nebylo náplní projektu a bylo by to výrazně nad rámec jeho finančních možností. Nicméně v rámci jiného projektu byla geotermickým oddělením GFU zakoupena jednotka a optický kabel pro měření metodou DTS a je naplánován experiment porovnávající monitoring metodou DTS a Pt čidly.

Geofyzika

Geofyzikální měření splnilo zadané cíle, tj. zejména prodloužilo časovou osu monitoringu od roku 2004 do dneška. Metoda odporové tomografie znovu potvrdila, že měrné odpory se v čase mění.

 SÚRAO	Vývoj a ověřování metodik pro charakterizaci horninového prostředí – výsledky monitoringu v přivaděči Bedřichov	Evidenční označení:
		SÚRAO TZ 289/2018

Jediným reálným důvodem pro změny v naměřených hodnotách mohou být změny obsahu vody (vlhkosti) v puklinovém systému hornin a případné změny mineralizace vody s časem (základní popis vztahu vlhkost/odpor viz např. Barton, 2006). Změny obsahu vody v puklinách mohou souviset i s tím, že se mikrotrhliny v hornině zavírají či otvírají v závislosti na napjatosti horninového masivu.

V oblasti při povrchu terénu (při povrchu štoly) vypadávají některé měřicí body (tj. nejsou měřitelné). Jsou to místa, kde elektrické pole má obrácenou polaritu, než je očekáváno při klasickém zpracování elektrických potenciálních polí. Jevy spojené s obrácenou polarizací jdou nejspíše vysvětlit pomocí Kirchhoffových zákonů (elektrické sítě). Toto pozorování tedy otevírá možnosti nového směru výzkumu, nyní je však teprve na začátku odborného studia řešitelů.

Při podrobném studiu seismického měření v roce 2016 a 2017 byly zjištěny v průběhu monitorování změny v charakteru tvaru některých naměřených hodochron, které vedly k revizi dosud uplatňovaných zásad při charakterizaci seismických vln. Byla formulována hypotéza, že v blízkém okolí výrubu (jednotky až první desítky metrů) v granitovém masivu mohou vznikat odrazné plochy nebo se zde může měnit napjatost prostředí s efektem na změny seismických rychlostí, což lze detekovat pomocí seismických metod i v pásmu desítek či prvních stovek Hz. Pro hlubší studium tohoto poznatku řešitelé doporučují podrobně analyzovat data z let 2004 až 2013 a pokračovat i v monitoringu v následujících letech.

Laboratorní měření vzorků

Na vybraných vzorcích z tunelu Bedřichov, reprezentující úseky s různým typem ražby a různé hloubky tunelu pod povrchem, byla provedena řada stanovení zahrnující ultrazvukové prozařování, stanovení porozity, hydraulické vodivosti a efektivního difúzního koeficientu.


Z výsledků migračních testů s tritiovanou vodou a jodidem byl patrný vliv velikosti vzorků. Na vzorcích o délce 5 cm byly naměřeny nižší hodnoty efektivního difúzního koeficientu jodidu než u vzorků o délce 1 cm. Experimentálně bylo dokázáno, že to nebylo způsobené použitím rozdílných migračních technik. Obě použité migrační techniky (průniková difúzní metoda a průniková elektromigrační metoda) poskytovaly srovnatelné výsledky. Pravděpodobným vysvětlením je buď nereprezentativnost 1cm vzorků hrubozrného libereckého granitu a/nebo vznikem porušené krajové zóny při přípravě vzorků, která bude hrát významnější roli na tenkých vzorcích.

Celkově lze shrnout, že získaná data ze všech stanovení na vzorcích jsou konzistentní. Na vzorcích ze střílené části tunelu byly naměřeny větší hodnoty porozit, hydraulických vodivostí a efektivních koeficientů než na vzorcích z ražené části tunelu.

V budoucích pracech zaměřující se na stanovování migračních parametrů hornin by bylo vhodné zjistit míru porušení vzorku jeho přípravou. Tuto nehomogenitu v rámci vzorku poté zahrnout do vyhodnocování migračních parametrů a odhadovat migrační parametry pro neporušenou horninu. Dalším východiskem je měření migračních parametrů na větších vzorcích, avšak v současnosti jsou rutinně zavedeny pouze průnikové elektromigrační experimenty.

Metodiky

Je nutné upozornit, že vzhledem k rozsahu zadání projektu, nepředstavují zpracované metodiky komplexní rešerši měřících metod nebo odbornou příručku v daných oblastech, ale shrnutí zkušeností a doporučení řešitelů k metodám, se kterými přímo pracovali, mají osobní zkušenost z Bedřichova (v rámci řešení projektu), nebo z jiných lokalit v podmínkách relevantních pro HÚ.


 SÚRAO	Vývoj a ověřování metodik pro charakterizaci horninového prostředí – výsledky monitoringu v přivaděči Bedřichov	Evidenční označení:
		<i>SÚRAO TZ 289/2018</i>

Výstupy lze tedy charakterizovat jako „metodické poznatky“ nebo „metodická doporučení“, limitovaná na konkrétní podmínky a použité metody.


Typicky jde o případy vycházející ze standardně známých metod, které jsou v některých případech konkrétně upraveny nebo vyladěny, případně výběr specifické konfigurace v rámci volitelných možností, vždy vedoucí k hodnocení praktické použitelnosti v daných podmínkách a v předpokládaných podmínkách dalších lokalit v programu výzkumu SÚRAO. Jsou ale zahrnuty i příklady zcela nových vlastních metod a přístrojů, vyvinutých řešitelskými týmy v rámci dalších projektů, ale s motivací vyplývající mimo jiné z předchozích zkušeností v tunelu v Bedřichově – měrný válec ČGS, automatická analýza snímků dilatometrů ÚSMH, geofyzikální monitorovací systém SG11 (výstup grantu Technologické agentury ČR). Na tyto výsledky se dokumenty metodik odkazují.

9 Reference

- AMIDROR I. (2009): The Theory of the Moire Phenomenon: Periodic Layers. Springer, London, 529 pp.
- BAILLY D., MATRAY J-M., ABABOU R. (2014): Temporal behaviour of a ventilated claystone at the Tournemire URL. – Eng. Geol., 183, 137–158.
- BÁRTA J., JIRKŮ, J., DOSTÁL, D., KNĚZ, J., KONEČNÁ, A., KOPECKÝ, V., SLAVÍK, L., VILHELM, J. (2016): Odborná zpráva o postupu prací a dosažených výsledcích za rok 2013. Příloha k průběžné zprávě za rok 2016. Číslo projektu: TA03020408, Název projektu: Monitoring chování puklinových systémů horninového masivu geofyzikálními metodami.
- BÁRTA, J. (2010): Hypotetická lokalita hlubinného úložiště, část geofyzika, zóna blízkých interakcí. Studie pro komplexní zprávu „Hypotetická lokalita“ vypracovanou ČGS pro SÚRAO.
- BÁRTA, J. (2010): The comparison of certain classical geotechnical terms for underground structures with terminology for deep radioactive waste repositories. A geophysicist's view. Mezinárodní konference Podzemní stavby, Praha.
- BÁRTA, J. (2014): Geofyzikální část zprávy Tunel 2011. Kapitola komplexní zprávy Tunel 2011 vypracované TUL pro SÚRAO.
- BÁRTA, J. (v Pačes, T., Mikšová, J., editoři) (2013): Far Field of the Geological Repository in the Bohemian Massif, Czech Geological Survey and Radioactive Waste Repository Authority
- BÁRTA, J., JIRKŮ, J., DOSTÁL, D., KNĚZ, J., SLAVÍK, L., VILHELM, J. (2014): Monitoring chování puklinových systémů horninového masivu geofyzikálními metodami - Informace o probíhajícím úkolu TA 03020408. Hydrogeologická a Inženýrskogeologická konference, Liberec.
- BÁRTA, J., KOPECKÝ, P., BUDINSKÝ, V., BENEŠ, V., ŠPAČEK, K. (2008): Model chování vyrubané komory
- BARTON, N. (2006): Rock quality, seismic velocity, attenuation and anisotropy. Taylor and Francis Group, London.
- BLAHŮT J., BAROŇ I., SOKOL L., MELETLIDIS S., KLIMEŠ J., ROWBERRY M., MELICHAR R., GARCÍA-CAÑADA L., MARTÍ X. (2018): Large landslide stress states calculated following extreme climatic and tectonic events on El Hierro, Canary Islands. – Landslides, doi: 10.1007/s10346-018-0993-1.
- BUTLER, D.K. (2005): Near-Surface Geophysics. Society of Exploration Geophysicists.
- ČSN CEN ISO/TS 17892-11. *Geotechnický průzkum a zkoušení – Laboratorní zkoušky zemin – Část 11: Stanovení propustnosti zemin při konstantním a proměnném spádu*. Praha: Český normalizační institut. 2005. 20 s.
- ČERMÁK V., M.KRÁL, M.KREŠL, J.KUBÍK, AND J.ŠAFANDA (1991): Heat flow, regional geophysics and lithosphere structure in Czechoslovakia and adjacent part of Central Europe. In: V.Čermák and L.Rybach (Eds), *Terrestrial Heat Flow and the Lithosphere Structure*. Springer Verlag, Berlin etc., 1991, pp.133-165.
- GOODRICH L.E. (1982): The influence of snow cover on the ground thermal regime. *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.19, 1982, pp.421-432.
- HAVLOVÁ V., VOPÁLKA D. (2010): HTO as a conservative tracer used for characterization of contaminant migration in porous rock environment. – *J Radioanal Nucl Chem*, 286, 785–791.
- HOKR M., P. RÁLEK, M. HERNYCH, L. SLAVÍK, A.BALVÍN, L. BERAN, R.ŠPÁNEK, T. PLUHAŘ (2013), Výzkum vlastností materiálů pro bezpečné ukládání radioaktivních odpadů a vývoj postupů jejich hodnocení, Etapová zpráva 5.4.: Zavedení metodiky kontinuálního sběru dat z reálného prostředí krystalických hornin a jejich interpretace, MPO FR-T11/362.

 SÚRAO	Vývoj a ověřování metodik pro charakterizaci horninového prostředí – výsledky monitoringu v přivaděči Bedřichov	Evidenční označení:
		SÚRAO TZ 289/2018

- HOKR, M. ET AL. (2014) Tunel 2011, Závěrečná zpráva, SÚRAO, 2014, 166 s.
- HOKR, M. ET AL. (2015), Vývoj a ověřování metodik pro charakterizaci horninového prostředí – Upřesnění koncepce a rozvrhu prací, Průběžná zpráva, SÚRAO, 54 s.
- HOKR, M. ET AL. (2016), Vývoj a ověřování metodik pro charakterizaci horninového prostředí – První etapa monitoringu v přivaděči Bedřichov, Průběžná zpráva, SÚRAO, 95 s.
- IAEA/WMO (2015): Global Network of Isotopes in Precipitation. The GNIP Database. Accessible at: <http://isohis.iaea.org>.
- JIRKŮ, J. (2011): Geoelektrický a seismický výzkum pro posouzení horninového masivu v blízkém okolí ražené štoly. Diplomová práce. Univerzita Karlova v Praze / Přírodovědecká fakulta.
- JIRKŮ, J., BARTA J, KNĚZ J., VILHELM J. (2014): Monitoring of joint systems time-lapse behaviour via ERT. Výroční konference SEG, Denver
- JIRKŮ, J., BARTA, J. (2014): Monitoring of joint systems time-lapse behavior via ERT. Environmental and Engineering Geophysical Society, SAGEEP 2014, Boston, Session E1-Electrical –RES, IP, Self Potential, accepted for oral presentation and proceedings.
- KLETETSCHKA, G., T. FISCHER, J. MLS, AND P. DĚDEČEK (2013), Temperature fluctuations underneath the ice in Diamond Lake, Hennepin County, Minnesota, Water Resour. Res., 49, doi:10.1002/wrcr.20261.
- KLIMEŠ J., ROWBERRY M., BLAHŮT J., BRIESTENSKÝ M., HARTVICH F., KOŠŤÁK B., RYBÁŘ J., STEMBERK J., ŠTĚPANČÍKOVÁ P. (2012): The monitoring of slow moving landslides and assessment of stabilisation measures using an optical-mechanical crack gauge. – Landslides, 9, 407–415.
- KLOMÍNSKÝ J., BURDA J., DOBEŠ P., GABAŠOVÁ A., DRÁBEK M., HAVÍŘ J., JAČKOVÁ I., LYSENKO V., SCHOVÁNEK P., VESELOVSKÝ F., MALEC J., KOPAČKOVÁ V., ŽÁK J., VONDROVIC L., VERNER K., PUFFR M., ŠTEMBERK J., KOŠŤÁK B., MÁLEK J., BROŽ M., JARCHOVSKÝ T., BARTA J., BĚLOHRADSKÝ V. (2008): Studium dynamiky puklinové sítě granitoidů ve vodárenském tunelu Bedřichov v Jizerských horách. - Závěrečná zpráva, 171 s. MS SÚRAO, Archiv ČGS, ČGS-Geofond.
- KLOMÍNSKÝ J. (2009): Architecture of Krkonoše-Jizera composite massif granites and recent activity of their tectonic network in the Bedřichov Tunnel in Jizerské hory Mts. – Geosci. Res. Rep., 42, 154–158.
- KLOMÍNSKÝ J., DOBEŠ P., ŠKODA R., JAČKOVÁ I. (2012): Fracture carbonates in granites of the Bedřichov water supply tunnel in the Jizera Mts. – Geosci. Res. Rep., 45, 173–176.
- KOŠŤÁK B. (1969): A new device for in situ movement detection and measurement. – Exp. Mech., 9, 374–379.
- KOŠŤÁK B. (1991): Combined indicator using moiré technique. – In: Sorum G. (ed.), Field Measurements in Geomechanics. Balkema, Rotterdam, 53–60.
- KUBÍK J. (1990): Subsurface temperature field of the Bohemian Massif. Stud. Geophys. Geod., 34, 1990, pp.111-128.
- LÖFGREN M., VEČERNÍK P., HAVLOVÁ V. (2009): R-09-57 Studying the influence of pore water electrical conductivity on the formation factor, as estimated based on electrical methods, SKB.
- MALOSZEWSKI, P., & ZUBER, A. (1996). Lumped parameter models for the interpretation of environmental tracer data (IAEA-TECDOC--910). International Atomic Energy Agency (IAEA)
- MARTÍ X., ROWBERRY M., BLAHŮT J. (2013): A MATLAB code for counting the moiré interference fringes recorded by the optical mechanical crack gauge TM-71. – Comput. Geosci., 52, 164–167.
- MELNYK T. W., SKEET A. (1986): An improved technique for determination of rock porosity.- Can. J. Earth Sci. 23, 1068 - 1074.
- MUURINEN A., LEHIKONEN J. (1995): Evaluation of phenomena affecting diffusion of cations in compacted bentonite. - Report YJT-95-05, Nuclear Waste Commission of Finnish Power Companies, Helsinki, 59 p.

 SÚRAO	Vývoj a ověřování metodik pro charakterizaci horninového prostředí – výsledky monitoringu v přivaděči Bedřichov	Evidenční označení:
		SÚRAO TZ 289/2018

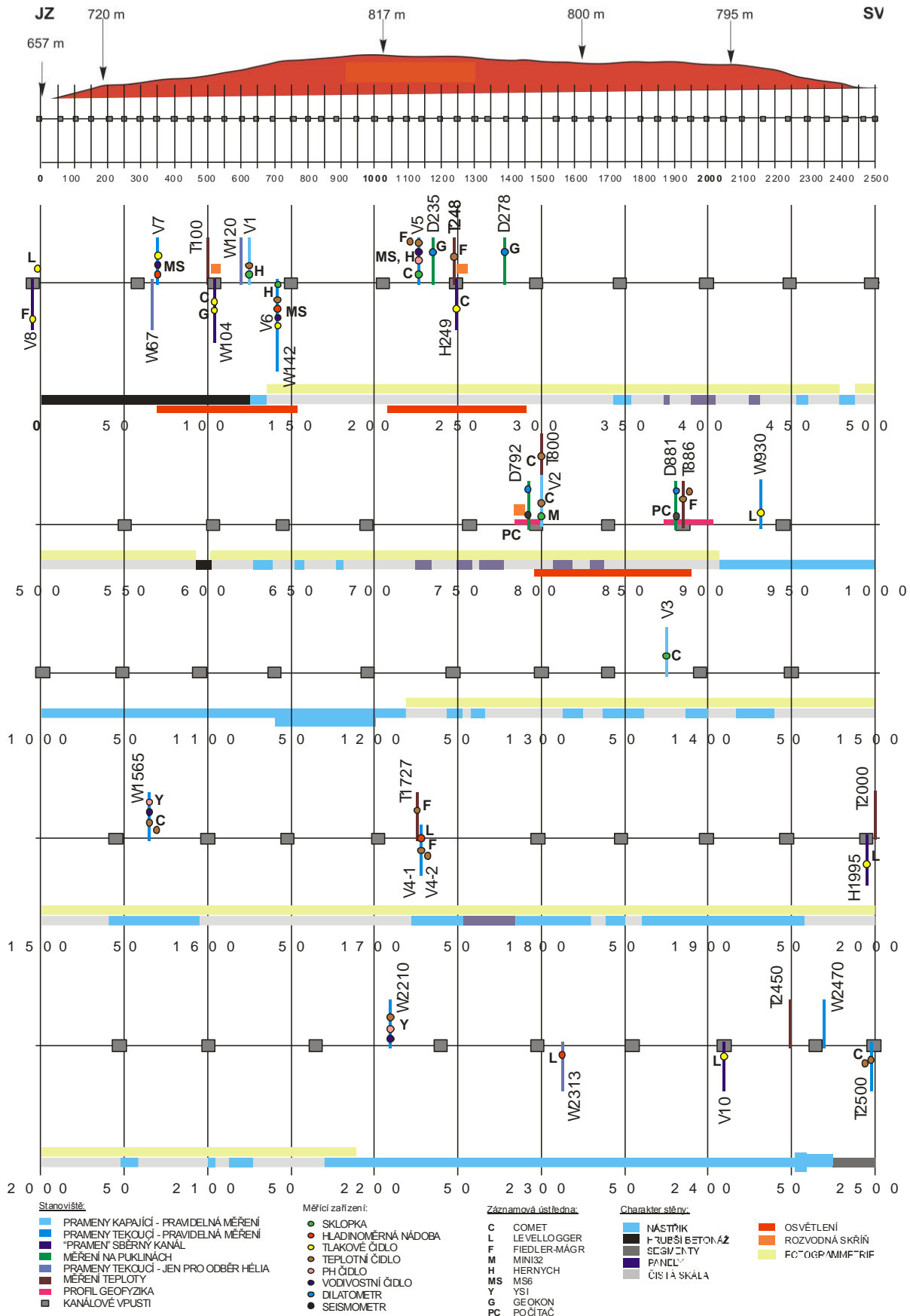
- PEARSON JR. F. J. (1983): Isotope techniques in the hydrological assessment of potential sites for the disposal of high-level radioactive wastes: Technical report series no. 228. International Atomic Energy Agency (IAEA), Vienna, 1983.
- PETROVIČ Š A KOL. (1969): Podnebí Československé socialistické republiky – Souborná studie, Hydrometeorologický ústav, Praha 1969.
- PETRUŽÁLEK, M., LOKAJÍČEK T., SVITEK T., FILLER T., ERDINGEROVÁ J., NEMEJOVSKÝ V. (2012) Měření fyzikálních vlastností horninových vzorků, Závěrečná zpráva zakázky č. 7447, Geologický ústav AV
- PETRUŽÁLEK, M., VILHELM, J., RUDAJEV, V., LOKAJÍČEK, T., SVITEK, T., (2013): Determination of the anisotropy of elastic waves monitored by a sparse sensor network, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 60, 208-216.
- PROS Z., T. LOKAJÍČEK, R. PŘIKRYL, A. ŠPIČÁK, K. KLÍMA (1998) Elastic Parameters of West Bohemian Granites under Hydrostatic Pressure, Pure and Applied Geophysics, 151(2):631-646.
- RINALDI-MONTES N., ROWBERRY M., FRONTERA C., GARCÉS J., BAROŇ I., BLAHŮT J., PÉREZ-LÓPEZ R., PENNOS C., MARTÍ X. (2017): A contactless positioning system for monitoring discontinuities in three dimensions with geological and geotechnical applications. – Rev. Sci. Instrum., 88, Art. No. 074501.
- ROWBERRY M., KRIEGNER D., HOLÝ V., FRONTERA C., LLULL M., OLEJNÍK K., MARTÍ X. (2016): The instrumental resolution of a moire extensometer in light of its recent automatisisation. – Measurement, 91, 258–265.
- ROZSYPAL, A. (2001): Kontrolní sledování a rizika v geotechnice. Jaga group v.s.o. Bratislava.
- STEMBERK J., KOŠŤÁK B. (2008): Recent tectonic microdisplacements registered in Bedřichov Tunnel 'A' in the Jizerské hory Mts. (N Bohemia). – Acta Geodyn. Geomater., 5, 377–388.
- ŠANDA, M., VITVAR, T., KULASOVÁ, A., JANKOVEC, J. AND CÍSLEROVÁ, M. (2013), Run-off formation in a humid, temperate headwater catchment using a combined hydrological, hydrochemical and isotopic approach (Jizera Mountains, Czech Republic). Hydrol. Process.. doi: 10.1002/hyp.9847
- ŠANDA, M. (edit.) (2013): Assessment of recharge dynamics in sedimentary and fractured granitic structures of catchments in the northern Czech Republic, using the Tritium-Helium-3 Dating Technique, Progress Report for the Research Contract-16335 (Dec 11th 2012 – Dec 10th 2013), 2013.
- VILHELM, J., RUDAJEV, V., LOKAJÍČEK, T., ŽIVOR, R., (2013): Velocity dispersion in fractured rocks in a wide frequency range, Journal of Applied Geophysics, 90, 138-146.
- VILHELM, J., RUDAJEV, V., ŽIVOR, R., LOKAJÍČEK, (2012): Seismic Measurement on a rock massif surface at short distances, Acta Geodynamica et Geomaterialia, 9 (2), 143-153.
- VILHELM, J., SLAVÍK, L. (2015): High frequency measurement of P- and S-wave velocities on crystalline rock massif surface - methodology of measurement. European Geosciences Union, General Assably 2014, Vienna.
- ZAORAL J. (1987): Metodiky laboratorních zkoušek v mechanice zemin a hornin. – Kapitola 13. Rychlost šíření podélných a příčných vln, dynamický modul pružnosti. Český geologický úřad. Praha.
- ŽIVOR, R., VILHELM, J., RUDAJEV, V., LOKAJÍČEK, T., (2011): Measurement of P- and S-wave velocities in a rock massif and its use in estimating elastic moduli, Acta Geodynamica et Geomaterialia, 8 (2), 157-167.

Přílohy

Příloha č.1 Aktuální přehled kontinuálně měřených fyzikálních veličin, způsob a frekvence měření a odběrů vzorků na jednotlivých pramenech či místech ve sběrných kanálech; F – ústředna Fiedler-Mágr M4016, FM – datalogger Fiedler-Mágr řady Minilog T, C – datalogger Comet řady S, MS – datalogger Comet řady MS6, L – Levelogger model 3001, M – MicroLog ER, HN Hernych TUL, Ysi – Ysi sonda řady 6000, G - Geokon.

vývěr, kanál	[m] od portálu, strana	popis	automatické měření, perioda záznamu [min]				perioda [měsíc]		
			průtok	teplota	pH	kond.	ruč. měř.	odběr vzorků	
V1	125 L	žlábek v puklině	sklopný člunek HN 5					1	1
V2	798,5 L	dva žláby na dvou různých drobných puklinách (vzdálenější V2-1; blíže k portálu ve vzdálenosti 30 cm a o něco níže ve stěně V2-2)	lapač srážek se sklopným člunkem M každé sklopení					1	3
V3	1375,5 L	žlábek umístěný v puklině	sklopný člunek C 10					1	3
V4-1	1728,5 P	dvě hadice v místech zabetonované rozpukané horniny ve stropě (V4-1 je umístěn výše ve stropě a V4-2 o něco níže)		tepl. čidla – voda, vzduch FM 15				1	3
V4-2			hladinoměrná nádoba L 15	teplotní čidlo – voda					
V5	226,4 L	ze stěny tryskající pramen, zjištěný r. 2006; r. 2007 po poklesu jeho výtoky byl opatřen žlábkem	sklopný člunek C 5	tepl. čidlo – voda, vzduch HN 5	sonda theta90 MS 10	sonda Greis. HN 5	sonda Greis. MS 10	1	3+1
V6	142 P	výtok ze starší železné roury boku štoly	sklopný člunek HN 5	hladinoměrná nádoba MS 10	teplotní čidlo – voda		sonda Greis. MS 10	1	1
V7	76,5 L	hadice - v daném místě je to směrem od portálu v pořadí čtvrtá hadice z pěti, která má vždy nejsilnější výtok z okolních hadic	hladinoměrná nádoba MS 10					1	1
W142	142 P	hadička ústící z navrtané pukliny (vedle V6)						1	
W930	930 strop	igelitová plachta zachycující průsak ze stropu štoly na ploše cca 1,5 m ²	plachta + měrný válec L 15	teplotní čidlo – voda					
W1565	1565 L	přehrazení výlomu ve výšce asi 1,8m boku štoly; pro odběr vzorků bez přístupu vzduchu slouží další hadička zapuštěná dovnitř skály		teplotní čidla – voda, vzduch C 15		Ysi 15		1	3+1
W2210	2210 L	do žlabu svedený výtok z upraveného otvoru v betonovém nástřiku na dolním boku štoly; odběr bez přístupu vzduchu je opět realizován hadičkou zapuštěnou do vnitřku masivu				Ysi 15		1	3+1
W2313	2313 P	hadice v místě zabetonované pukliny	hladinoměrná nádoba L 15	teplotní čidlo – voda				1	3
W2470	2470 L	výtok ze staré železné roury vboku štoly						1	
W2500	2491 P	výtok ze spáry mezi betonovými skružemi		tepl. čidla – voda, vzduch C 15					
V8	0 šachta	celkový výtok z potrubí sběrného kanálu, sbírajícího vodu z celého tunelu, na jeho konci u portálu tunelu	měrný žlab UZ čidlo UF1200 F 15	teplotní čidlo – voda				1	1
V10	2420 šachta	průtok ve sběrném kanálu	měrná clona L 15	tepl. čidla – voda, vzduch				1	1
W104	104 šachta	průtok ve sběrném kanálu	měrná clona BD sonda válec+struna C 15 G 15			Ysi 15		1	
H249	249 šachta	průtok ve sběrném kanálu v metráži 249m	přeliv – výška hladiny BD sonda C 15					1	
H1995	1995 šachta	průtok ve sběrném kanálu v metráži 1995m	měrná clona L 15	teplotní čidlo – voda				1	

Příloha č.2 Schématický řez štolou s rozmístěním měřicích stanic.
Bedřichovský tunel - úsek A



Příloha č.3 Tabulka předávaných datových souborů.

Pracoviště	Krycí list	Datové soubory
TUL	Bedrichov_TUL_VydatnostiVyveru_2010-2018_KL.xlsx	Bedrichov_TUL_VydatnostiVyveru_2010-2018.xlsx
	Bedrichov_TUL_CelkovyPrusak_2012-2018_KL.xlsx	Bedrichov_TUL_CelkovyPrusak_2012-2018.xlsx
	Bedrichov_TUL_TeplotyVody_2010-2018_KL.xlsx	Bedrichov_TUL_TeplotyVody_2010-2018.xlsx
	Bedrichov_TUL_PrirozeneStopovace_2010-2018_KL.xlsx	Bedrichov_TUL_PrirozeneStopovace_2010-2018.xlsx
	Bedrichov_TUL_Meteorologicka_Data_2011-2018_KL.xlsx	Bedrichov_TUL_Meteorologicka_Data_2011-2018.xlsx
	Bedrichov_TUL_DataPovodiLabe_2010-2018_KL.xlsx	Bedrichov_TUL_DataPovodiLabe_2010-2018.xlsx
ČGS	Bedrichov_CGS_AnalyzyVod_2015-2018_KL.xlsx	Bedrichov_CGS_AnalyzyVod_2015-2018.xlsx
	Bedrichov_TUL_HydrochemickaData_2012-2018_KL.xlsx	Bedrichov_TUL_HydrochemickaData_2012-2018.xlsx
ÚJV	Bedrichov_UJV_Vzorky_KL.xlsx	Bedrichov_UJV_Vzorky.xlsx
ÚSMH	Bedrichov_USMH_PosunyTM71_2015-2018_KL.xlsx	Bedrichov_USMH_PosunyTM71_2015-2018.xlsx
	Bedrichov_USMH_SeismickaData_2010-2018_KL.xlsx	Disk
	Bedrichov_USMH_SeismickaData_NovySeismometr_2018_KL.xlsx	Disk
GFU	Bedrichov_GFU_TeplotaHornina250m_2008-2012_KL.xlsx	Bedrichov_GFU_TeplotaHornina250m_2008-2012.xlsx
	Bedrichov_GFU_TeplotaHornina250m_2013-2018_KL.xlsx	Bedrichov_GFU_TeplotaHornina250m_2013-2018.xlsx
	Bedrichov_GFU_TeplotaHornina880m_2012-2018_KL.xlsx	Bedrichov_GFU_TeplotaHornina880m_2012-2018.xlsx
	Bedrichov_GFU_TeplotaHornina1700m_2013-2018_KL.xlsx	Bedrichov_GFU_TeplotaHornina1700m_2013-2018.xlsx
	Bedrichov_GFU_TeplotaLesLouka_2012-2018_KL.xlsx	Bedrichov_GFU_TeplotaLesLouka_2012-2018.xlsx
	Bedrichov_GFU_TeplotaPrehrada_2012-2018_KL.xlsx	Bedrichov_GFU_TeplotaPrehrada_2012-2018.xlsx
G IMPULS	Bedrichov_GIMPULS_seismika_2015-2018_KL.xlsx	Bedrichov_GIMPULS_seismika_2015-2018.zip
	Bedřichov_GIMPULS_ERT_2015-2018.zip_KL.xlsx	Bedřichov_GIMPULS_ERT_2015-2018.zip

NAŠE BEZPEČNÁ BUDOUCNOST



SÚRAO

Správa úložišť radioaktivních odpadů

Dlážděná 6, 110 00 Praha 1

Tel.: 221 421 511, E-mail: info@surao.cz

www.surao.cz