

ZÁVĚREČNÁ ZPRÁVA O POZNATCÍCH Z GEOFYZIKÁLNÍCH MĚŘENÍ NA PVP BUKOV

Autoři:

RNDr. Jaroslav Bárta, CSc.,

Ing. Lubomír Slavík, Ph.D.

Doc. RNDr. Jan Vilhelm, CSc.

a kolektiv

Tato zpráva byla zpracována v projektu financovaném SÚRAO. Presentovaná stanoviska a dosažené závěry jsou názory autora (autorů) a nemusí nutně představovat názory SÚRAO.

NÁZEV ZPRÁVY: Závěrečná zpráva o poznatcích z geofyzikálních měření na PVP Bukov

NÁZEV PROJEKTU: Dlouhodobé monitorování horninového masivu v PVP Bukov nedestruktivními geofyzikálními metodami

IDENTIFIKACE V RÁMCI PROJEKTU:

Závěrečná zpráva

ČÍSLO SMLOUVY: SO2018-075

Bibliografický zápis:

BÁRTA J., SLAVÍK L., VILHELM J. (2022): Závěrečná zpráva o poznatcích z geofyzikálních měření na PVP Bukov – Etapa 1-4 – Technická zpráva TZ 636/2022, MS SÚRAO, Praha.

ŘEŠITELÉ:

Technická univerzita v Liberci¹, G IMPULS Praha spol. s r.o.², Přírodovědecká fakulta Univerzity Karlovy³

AUTORSKÝ KOLEKTIV: Bárta J.², Slavík L.¹, Vilhelm J.³

Jméno Příjmení

Jozef Urík (SÚRAO)

31. 8. 2022

Jméno Příjmení

Lubomír Slavík (TUL)

31. 8. 2022

Obsah

1	Úvod	7
1.1	Popis projektu	7
1.2	Stručný popis systému SGI 1	9
1.2.1	Průmyslový počítač	11
1.2.2	System pro ERT	11
1.2.3	Seismická aparatura	13
1.2.4	Blokové schéma SGI 1	16
1.3	Umístění systému SGI 1	18
2	Hodnocení 1. - 4. etapy projektu	22
2.1	Aktivní seismika	22
2.2	Pasivní seismika	32
2.3	Odporová tomografie	36
2.3.1	Týdenní periodičita v datech aktivní seismiky a ERT	46
2.3.2	Souvislost výstupů monitoringu pomocí SGI 1 s pracovní aktivitou v PVP	57
2.4	Pravidelná ručně prováděná parametrická měření na pravé straně chodby BZ1-XII 60	
2.4.1	Měření metodou ERT	62
2.4.2	Seismická měření	67
2.4.3	Pokusná měření a další možnosti výzkumů	71
2.5	Bilance 4. etapy projektu	73
3	Celkové hodnocení výsledků projektu	75
4	Závěrečné doporučení	79
5	Literatura	80
6	Přílohy	82
6.1	Velkoobrazová příloha 1	82
6.2	Velkoobrazová příloha 2	83

Seznam příloh

1. Velkoobrazová příloha 1 - Přehled detailních výřezů ze seismických záznamů v oblasti P1P
2. Velkoobrazová příloha 2 - Přehled odporových řezů v oblasti P1P

Seznam použitých zkratk:

ČSN	česká státní norma
EDZ	excavation damaged zone
EdZ	excavation disturbed zone
EN	evropská norma
ERT	elektrická odporová tomografie
PVP	Podzemní výzkumné pracoviště
SIG 1	monitorovací systém (Seismika, Geoelektrika, Internet, verze 1)
SÚRAO	Správa úložišť radioaktivních odpadů
TP	technický pokyn
TUL	Technická univerzita v Liberci

Abstrakt

Zpráva popisuje práce k 31. 8. 2022 dle plánovaného harmonogramu pro celé období projektu. Popis činností v období 2021/2022 v PVP Bukov je zahrnut v celkové bilanci. Ve 4. etapě pokračovala rutinní činnost, tedy automatické měření pomocí odporové tomografie a aktivní seismiky se vzdáleným sběrem dat (systém SGI 1) a ručně prováděná pravidelná parametrická měření. Dále byly sledovány signály z čidel pro pasivní seismiku a data byla průběžně vyhodnocována. Zpráva má 3 kapitoly a obsahuje výsledky měření, závěry z výzkumů a celkové hodnocení projektu.

Klíčová slova

Geofyzika, seismická měření, geoelektrické metody, monitoring, PVP Bukov

Abstract

The report describes the work as of 31 August 2022 according to the planned schedule for the entire project period. A description of activities in the period 2021/2022 at the PVP Bukov URF is included in the overall balance sheet. In the 4th stage, routine activity continued, i.e. automatic measurements using resistivity tomography and active seismic with remote data collection (SGI 1 system) and manual regular parametric measurements. Signals from passive seismic sensors were also monitored and the data was continuously evaluated. The report has 3 chapters and contains measurement results, research conclusions and an overall assessment of the project.

Keywords

Geophysics, seismic measurement, geoelectrical measurement, monitoring, Bukov URF

1 Úvod

1.1 Popis projektu

Na základě smlouvy (č. TUL-340956, SO2018-075 ze dne 3. 9. 2018) mezi Správou uložišť radioaktivních odpadů se sídlem Dlážděná 6, Praha 1 (objednatel) a Technickou univerzitou v Liberci, Ústavem pro nanomateriály, pokročilé technologie a inovace se sídlem Studentská 2, Liberec 1 (zhotovitel), byly prováděny plánované činnosti na úkolu „Dlouhodobé monitorování horninového masivu v PVP Bukov nedestruktivními geofyzikálními metodami“.

Předmětem plnění dle této smlouvy je zhotovení díla spočívající v provedení instalace monitorovacího systému SGI 1 a provedení dlouhodobého monitorování horninového masivu nedestruktivními geofyzikálními metodami v Podzemním výzkumném pracovišti (PVP) Bukov. Systém SGI1 využívá geoelektrické a seismické vlastnosti masivu a zajišťuje dlouhodobé monitorování změn těchto vlastností v bezprostřední okolí díla. Nepřetržitým monitorováním fyzikálních vlastností horninového prostředí je možné včas vyhodnotit změny geotechnických poměrů zkoumaného místa, např. signalizovat počínající vznik puklin, které jsou v případě SÚRAO nežádoucím projevem při ražbě báňského díla.

Realizace díla byla rozdělena do následujících etap viz Tabulka 1.

Tabulka 1: Harmonogram průběhu projektu

Etapa č.	Období	Popis činností
1.	9-12/2018	a) Parametrická měření na připravované základně, zejména seismické a elektrické metody.
	1-8/2018	b) Instalace systému SGI 1 v PVP Bukov, adjustace systému na místě, napojení SGI 1 na internet, zkušební provoz. Nákup a instalace seismických snímačů (pasivní seismika). Doladování měřicích technologií. Dílčí hodnotící (etapová) zpráva.
2.	9/2019–8/2020	c) Rutinní měření a jeho průběžný data processing. Doladování měřicích technologií. Dílčí hodnotící (etapová) zpráva.
3.	9/2020–8/2021	d) Rutinní měření a jeho průběžný data processing. Dílčí hodnotící (etapová) zpráva.
4.	9/2021–8/2022	e) Rutinní měření a jeho průběžný data processing. f) Zpracování závěrečné zprávy o provedení díla.

Monitorovací systém horninového masivu nedestruktivními geofyzikálními metodami – SGI 1 – byl primárně vyvíjen a konstruován pro problematiku hlubinného úložiště radioaktivních odpadů, především pro účely monitorování změn napjatostního stavu a pro monitorování

procesu vzniku mikrotrhlin až trhlin v blízké zóně výrubu (zahrnující obě zóny EDZ a EdZ). Všechny uvedené změny horninového masivu jsou důležité jak z hlediska technické proveditelnosti a technické stability podzemního díla.

Projekt, jak již bylo uvedeno, předpokládal instalaci monitorovacího systému SGI 1, který byl vyvinut zejména v rámci výzkumných prací, které byly prováděny ve štole situované v Bedřichově v Jizerských horách (Hokr et al. 2018). Monitorovací systém je výsledkem státního výzkumného úkolu TA03020408 Technologické agentury České republiky. Systém je provozován podle Certifikované metodiky (schváleno autoritou MŽP, číslo jednací 66382/ENV/16,1696/660/16) a je chráněn Užitným vzorem 30076.

Zde předkládaná zpráva navazuje na předchozí technické zprávy (Bárta et al. 2019a, Bárta et al. 2019b, Bárta et al. 2020, Bárta et al. 2021), ve kterých byla popsána parametrická měření a zkušební provoz systému SGI 1 v PVP Bukov.

1.2 Stručný popis systému SGI 1

Monitorovací systém SGI 1 je založen na originální myšlence současného monitoringu elektrických odporových vlastností a mechanických vlastností horninového masivu v okolí podzemního výrubu, typicky v málo porušených krystalických horninách. Protože elektrické a mechanické vlastnosti spolu přímo nesouvisí, lze na základě pozorování změn obou těchto parametrů v čase charakterizovat velikost a podstatu změn stavu horninového masivu. Obě metody jsou citlivé na přítomnost porušení horninového masivu trhlinami. Elektrická odporová tomografie v prostředí krystalických hornin s trhlinami silně reaguje na změny spojené se stupněm nasycení a propojením/nepropojením trhlinových systémů vodou. Při plném nasycení může odporová tomografie reagovat na změny vodivosti puklinové vody, například v důsledku pohybu vody v trhlinách ve srovnání se stavem bez pohybu vody. Seismické metody mohou reagovat na změny sevřenosti trhlin, ale i na změny stupně nasycení vodou. Změny v průchodu seismických vln masivem jsou v případě nepatrných změn napětí nebo nasycení velmi malé a nemusí být reálné tyto změny postihnout měření změn rychlosti průchodu seismických vln. Naproti tomu tyto změny mohou významně ovlivnit útlum horninového masivu, a ten může být s velkou citlivostí měřen pomocí monitorování změn amplitud a frekvencí vysokofrekvenčního seismického prozařování.

Vysoká citlivost monitorování je potřebná s ohledem na to, že očekávaným místem použití monitorovacího systému jsou například úložiště radioaktivního odpadu. Úložiště budou nepochybně umísťována do prostředí hornin s minimálním porušením, a tak je pro monitoring nutné volit metody s výjimečnou citlivostí. Pro monitoring v těchto případech tedy nelze uvažovat s využitím například sofistikovaných metod monitoringu velikosti a orientace posunu na pre-existujících trhlinách, protože v místě budoucího úložiště by takové trhliny vůbec neměly být.

Dlouhodobý monitoring podzemních prostor pomocí SGI 1 je unikátním měřením, které v podobném rozsahu nebylo zatím popsáno v autorům dostupných informačních zdrojích.

Měřicí aparatura je sestavena ze tří základních bloků:

- 1) řídicí počítač (dále jen PC) + switch LAN
- 2) sestava pro elektrickou odporovou tomografii ERT (Electrical Resistivity Tomography)
- 3) řídicí elektronika včetně sestavy pro seismická měření a napájecí zdroje

Řídicí počítač, napájecí zdroje a řídicí elektronika jsou umístěny v rozvaděči – viz Obr. 1.



Obr. 1: Rozváděč s průmyslovým PC, řídicí elektronikou a budícím zdrojem

Celá řídicí elektronika je umístěna do rozváděče Schneider Thalassa PLM s průhlednými dveřmi. Mozkem celého systému je průmyslový PC Advantech ARK 1503, řízený procesorem Intel Atom. V rozváděči jsou dále umístěny následující komponenty:

- zdroje napájení
- jištění
- elektronika seismické aparatury
- pulser-receiver Olympus 5077PR
- switch LAN
- rozvodné kanály pro kabeláž

Celý systém je napájen napětím 230 V / 50 Hz.

1.2.1 Průmyslový počítač

Hlavním řídicím prvkem celé sestavy je průmyslový počítač PC ARK1503 (viz Obr. 2).

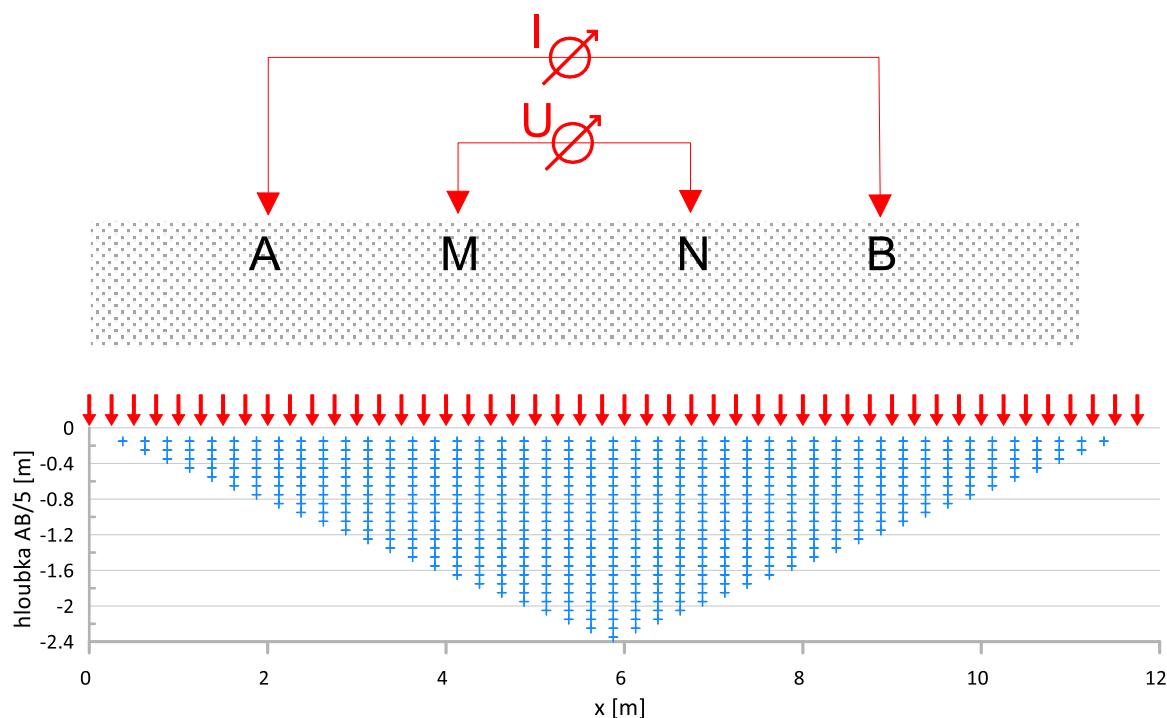
Počítač pomocí speciálního software řídí časování celého systému, tedy jednak měření metodou odporové tomografie, jednak seismických měření. Dále pak sbírá data z těchto systémů, ukládá je na místní disk, kde je umístěn ftp server, přístupný vzdálenému sběru dat.



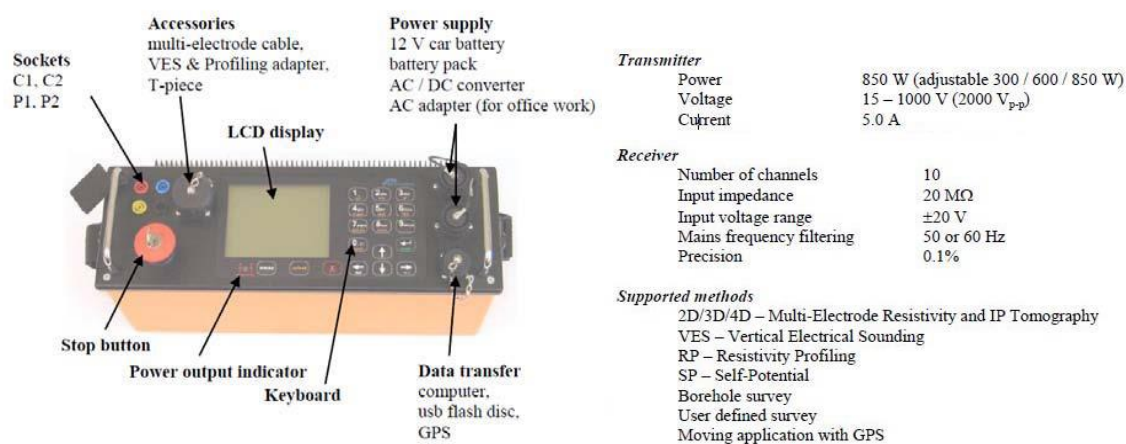
Obr. 2: Průmyslový počítač ARK 503

1.2.2 Systém pro ERT

Systém pro odporovou tomografii ERT (Obr. 3) využívá aparaturu ARES II firmy Gf Instruments, s.r.o. (Obr. 4) a měří pomocí 48 elektrod E1 až E48 zdánlivé odpory proměřovaného horninového prostředí. Systém ERT předává data nadřazenému počítači pomocí sériové sběrnice (USB / RS232). Aparatura ARES II je navíc upravena od výrobce, má navýšený vstupní odpor 40 M Ω místo standardních 20 M Ω kvůli očekávanému měření v podmínkách možných vysokých přechodových odporů.



Obr. 3: Principiální schéma čtyřelektrodeového uspořádání a přehled bodů řezu, k nimž jsou přiřazovány měřené zdánlivé odpory. Pro hloubkovou osu zvolen vztah $h = \frac{AB}{5}$



Obr. 4: Aparatura ARES II pro elektrickou odporovou tomografii

Elektrody jsou rozmístěny s krokem 0,25 m na horizontálním profilu na stěně výrubu (viz Obr. 5), cca 1,5 m nad počvu chodby. To by mělo zajistit dostatečnou vzdálenost elektrod od betonové výztuže v části podlahy. Celková délka profilu je 11,75 m, a tak by ani pro největší rozestupy proudových elektrod nemělo být měření zdánlivých odporů zásadně ovlivněno vodivou kovovou výztuží v betonové podlaze chodby.



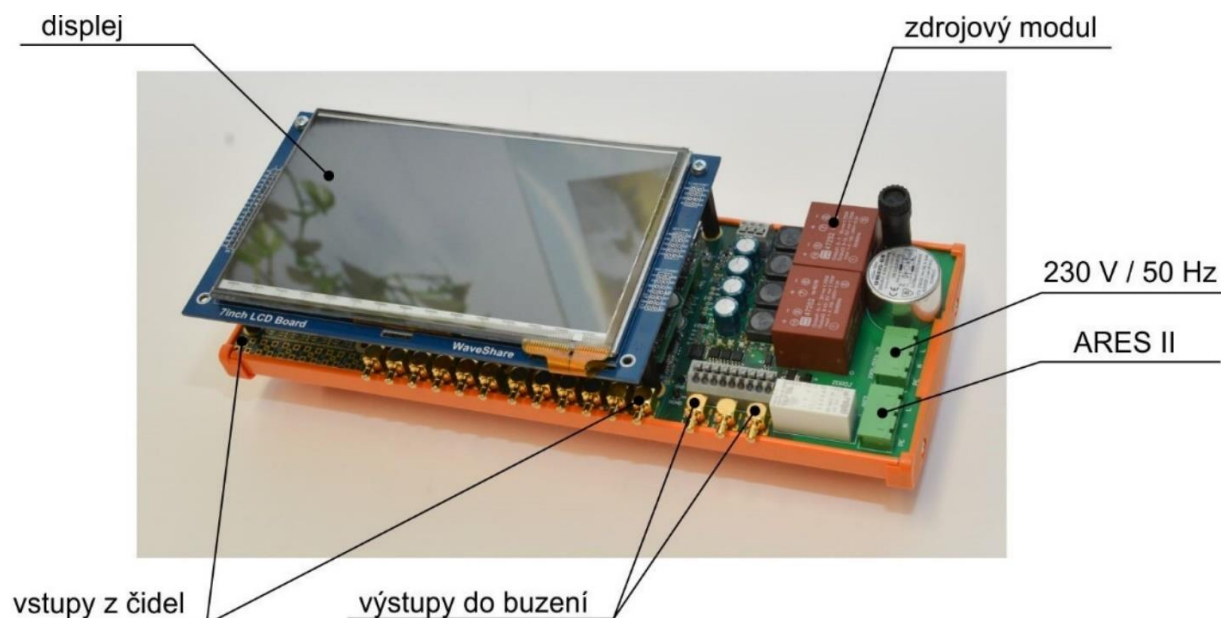
Obr. 5: Rozmístění elektrod pro elektrickou odporovou tomografii

Při měření metodou elektrické odporové tomografie (ERT) se využívá 23 různých čtyřelektrodových uspořádání Wenner – Schlumberger s postupným zvětšováním vzdáleností elektrod. Schéma měřeného řezu zdánlivých odporů pro tento případ měření je na Obr. 3.

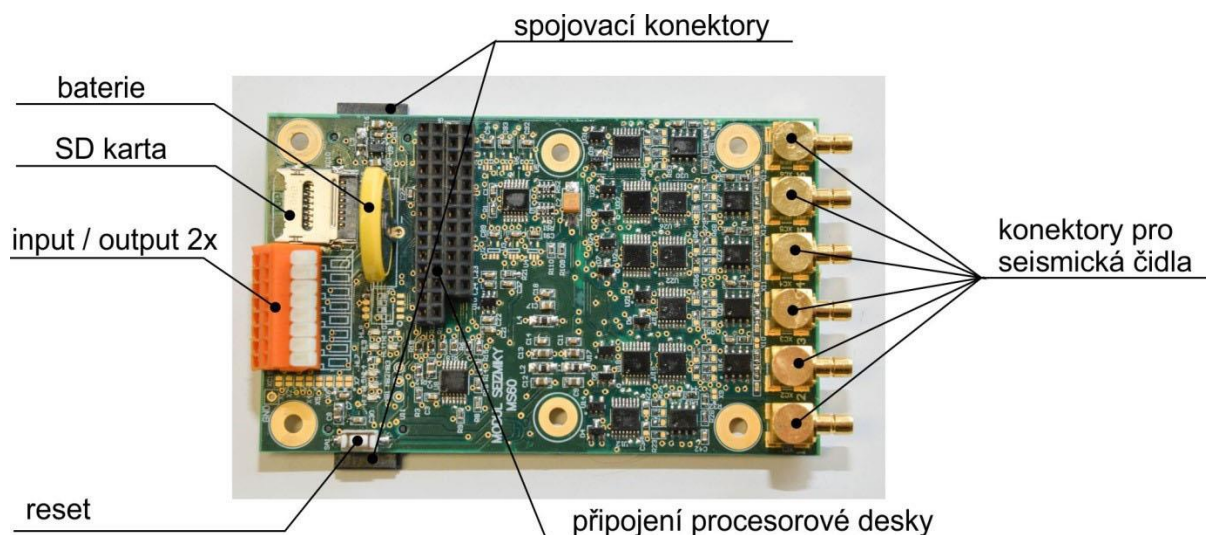
1.2.3 Seismická aparatura

Seismická aparatura sestává z řídicí elektroniky (Obr. 6), pulzního generátoru (Obr. 8) a systému seismických čidel T1 a R1 až R3 (viz Obr. 9).

Řídicí elektronika je koncipována modulárně, přičemž každý modul umožňuje připojit 6 čidel s analogovým výstupem (viz Obr. 7). Aparatura SGI 1 v PVP Bukov využívá pouze dva moduly – jeden na aktivní seismiku, druhý na pasivní seismiku. Na každé desce je každý kanál zesílen a signál zpracován 12bitovým analogově-digitálním převodníkem rychlostí 1 MS/s.



Obr. 6: Řídicí elektronika systému SGI 1



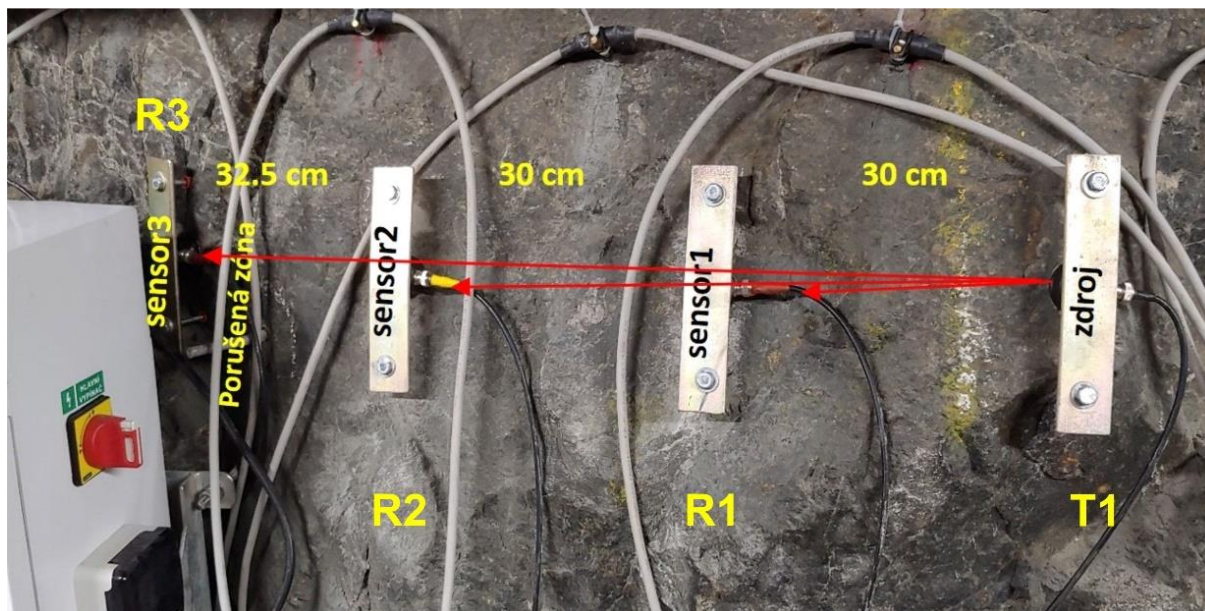
Obr. 7: Modul pro 6 seismických čidel



Obr. 8: Budicí pulzní generátory Olympus (5077 vpravo dole)

Pro vysílání i příjem podélných vln byla použita čidla určená pro příčné S-vlny. To souvisí s geometrií aktivního seismického měření a orientací seismických čidel, kdy čidla pro S-vlny vykazují optimální vyzářovací charakteristiku pro P-vlnu ve směru měřícího profilu. Na pokyn PC pulzní generátor vyše budicí pulz (amplituda řádově ve stovkách volt, šířka pulzu v jednotkách mikrosekund) do vysílacího elektromechanického čidla T1, které generuje mechanické vlnění (zdroj příčných i podélných vln). Po průchodu horninovým prostředím je

pomocí přijímacích čidel R1 – R3 toto vlnění registrováno. Digitalizované vlnové obrazy jsou ukládány v řídicím PC.



Obr. 9: Rozmístění čidel pro aktivní seismiku

Vysílací i přijímací čidla jsou umístěna v jedné linii, zhruba ve stejných pravidelných vzdálenostech (viz Obr. 9). Pro aktivní seismiku byly použita piezoelektrická čidla Olympus V1548, jež jsou určena jak pro příjem signálu, tak pro injektáž signálu do zkoumané horniny. V případě PVP Bukov byla čidla umístěna v rozestupu 30 cm, přičemž budicí čidlo T1 bylo umístěno nejdál od pukliny, dvě přijímací čidla byla před puklinou a poslední čidlo R3 bylo umístěno za puklinou.

Pro pasivní seismiku byla nejprve použita čidla Olympus V1548, ale během doby projektu bylo zjištěno, že stejnou službu vykonají i levnější elektromechanická čidla ST-2A, takže poslední etapa projektu probíhala již s těmito čidly.

Pro aktivní seismiku slouží čidla č. 1, 2, 3 a pro pasivní seismiku slouží čidla č. 4, 5 a 6. Jelikož i čidla pro aktivní seismiku dobře slouží i k monitoringu pasivní seismiky, byla v případě SGI 1 v PVP Bukov pro pasivní seismiku použita všechna čidla 1-6.

Umístění čidel je znázorněno na Obr. 10.



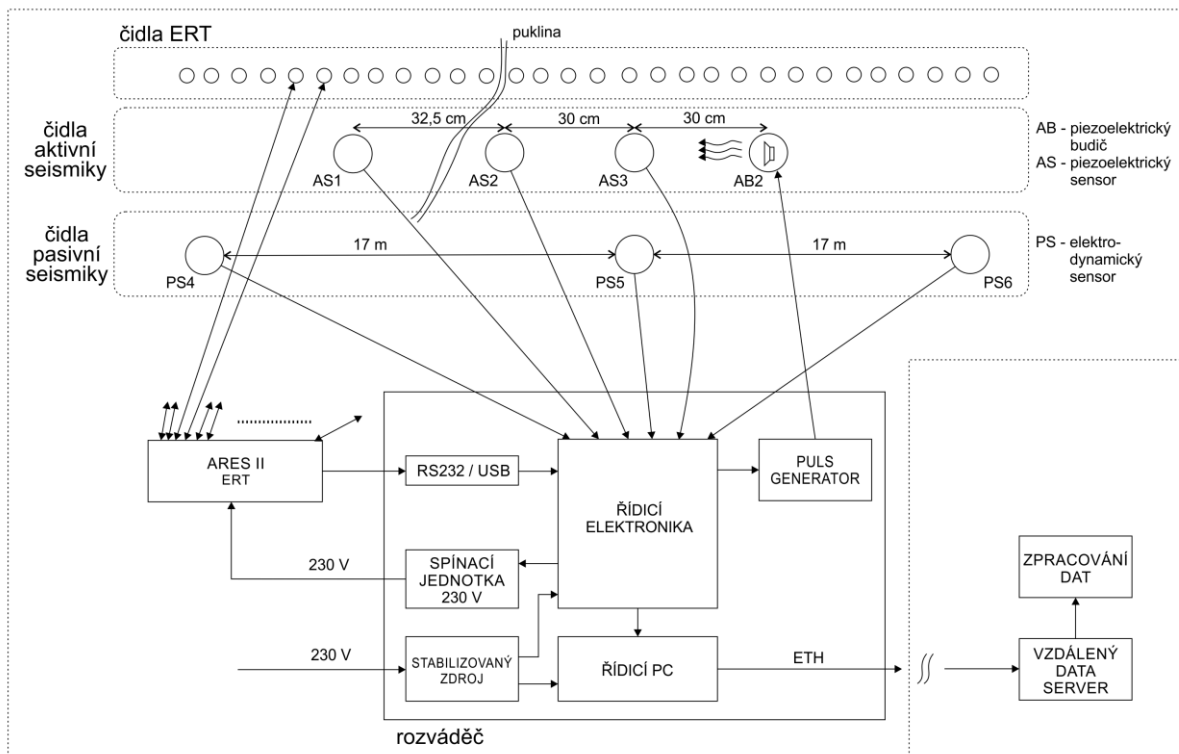
Obr. 10: Umístění čidel pro seismiku

1.2.4 Blokové schéma SGI 1

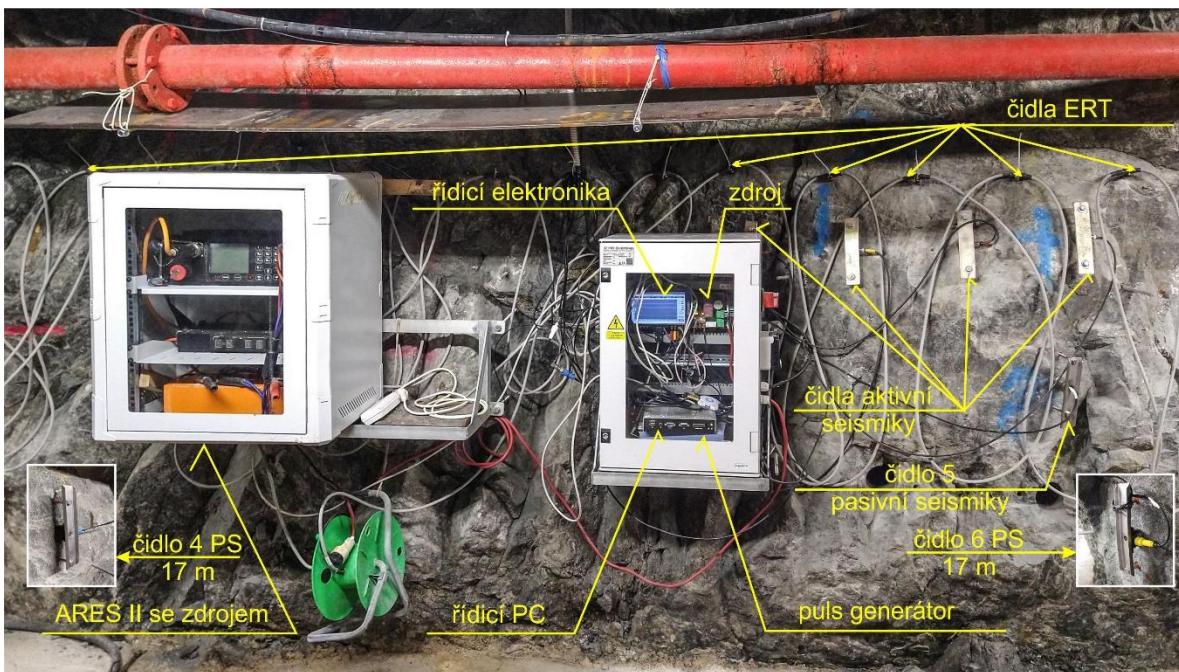
Na Obr. 11 je znázorněno blokové schéma celého systému SGI 1, praktické provedení je pak zobrazeno na Obr. 12.

Řídicí elektronika zpracovává signály ze seismických čidel a posílá je do PC, kde jsou ukládány a k dispozici na ftp serveru. Dále pak řídí časování veškeré činnosti.

Průmyslový PC pak sbírá data z aparatury ARES II, která průběžně monitoruje horninu pomocí ERT. V době seismických měření musí být aparatura ARES II vypnuta, neboť její chod ovlivňuje parazitním elektromagnetickým rušením signál registrovaný seismickými čidly. Proto je v systému zapojena spínací jednotka, která zapojí systém ERT jenom po nezbytnou dobu měření pomocí odporové tomografie a v této době se neprovádí seismické měření.



Obr. 11: Blokové schéma systému SGI 1



Obr. 12: Zapojení systému SGI 1 v PVP Bukov

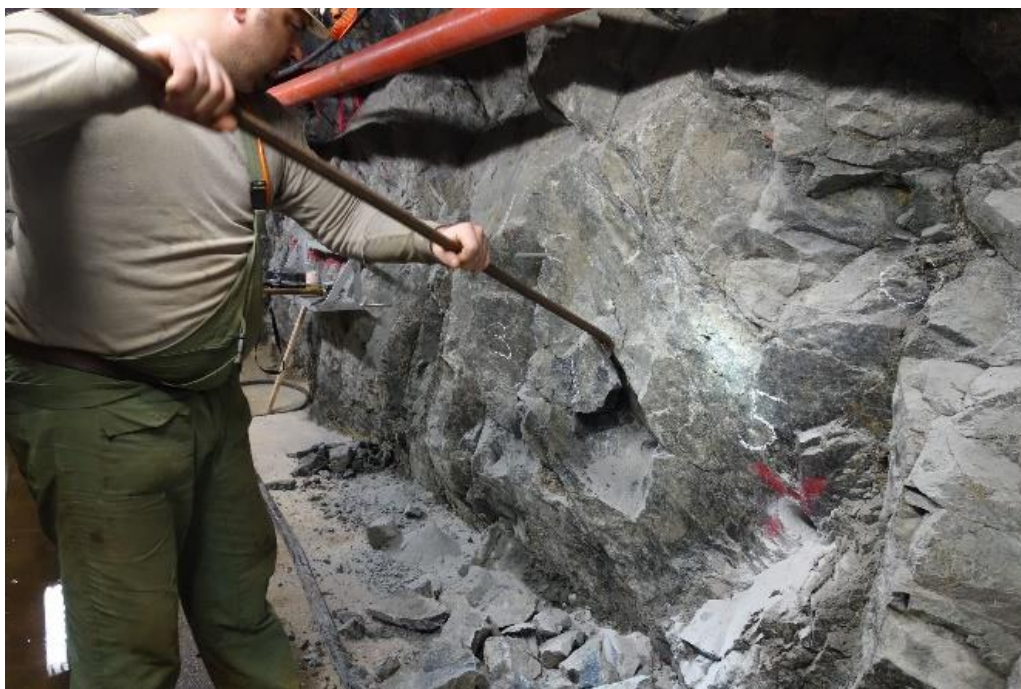
Seismická aparatura umožňuje volit minimální časový interval mezi měřeními řádově v sekundách, ale doporučuje se interval mezi měřeními volit několik hodin, což postačí pro zachycení změn v horninovém masivu o periodě cca. 1/4 dne a delší.

Doba potřebná k měření odporové tomografie je závislá na počtu zapojených elektrod a jedno měření nyní při zapojení 48 elektrod trvá 20 minut. V počátečním období měření byla frekvence opakování 8× denně, což souviselo se snahou zachytit i případné změny v souvislosti s pracemi, které v místě měření probíhají a mají periodu jeden den, nebo kratší. V současnosti je nastaven počet opakování 1x denně. Výhodou je úspora prostoru pro ukládání dat.

Data jsou ukládána na průmyslovém PC přímo ve štole a pro vzdálený přístup jsou pak k dispozici na serveru ftp, který běží přímo na tomto PC.

1.3 Umístění systému SGI 1

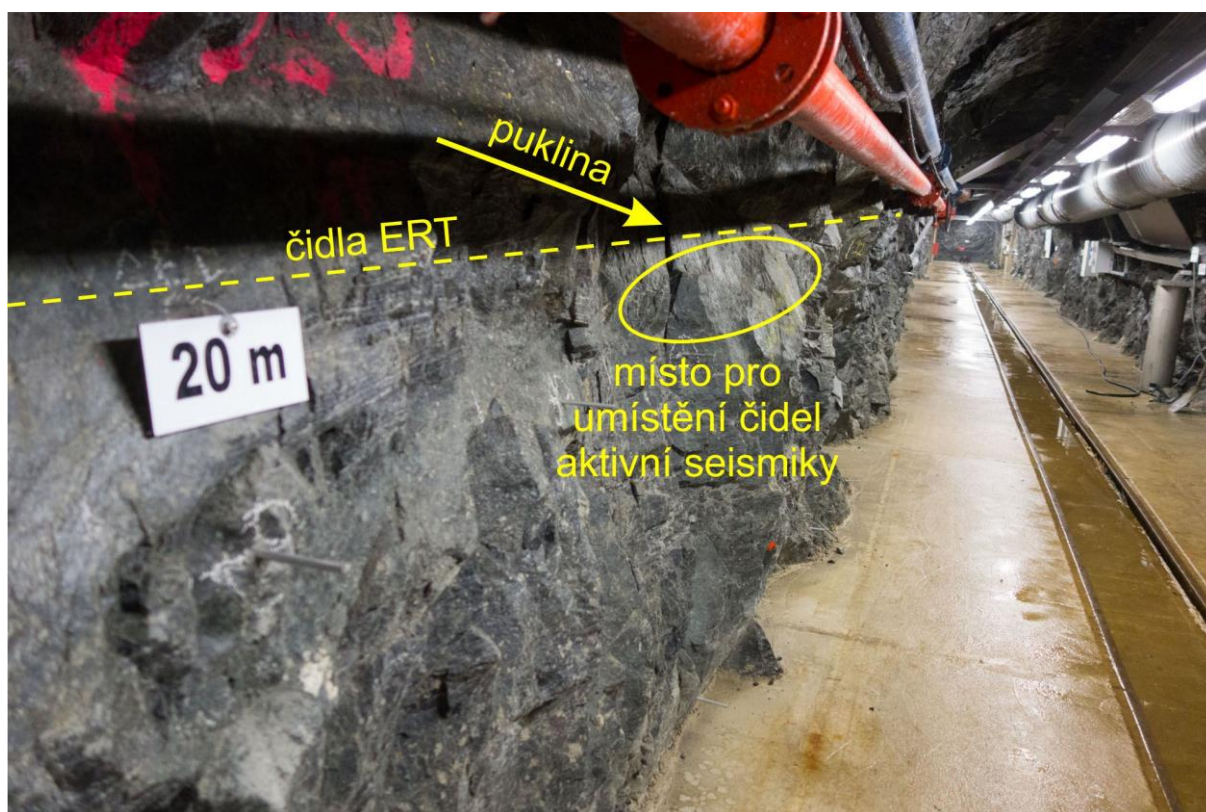
Na počátku projektu byla značná pozornost věnována výběru umístění aparatury SGI 1 v PVP Bukov. Hornina v chodbě BZ₁-XII je značně narušena soustavou velkého množství mikrotrhlin, které vznikly pravděpodobně vlivem použitého typu ražby. Tato skutečnost se projevila již při úpravě povrchu horniny při přípravě místa pro umístění čidel. Horninu bylo možné bez větší síly lámat podél množství puklin – viz Obr. 13.



Obr. 13: Úprava povrchu horniny v místě umístění seismických čidel

Bylo poměrně náročné najít místo, kde by se nacházela puklina, jejíž vlastnosti by mohly být sledovány a zároveň v okolí byla hornina dostatečně pevná k monitoringu pomocí aktivní seismiky. Nakonec byla vytipována lokalita po levé straně chodby BZ₁-XII – viz Obr. 14. Na metrů cca 20 m byla vyhledána výrazná puklina, která posloužila pro měření a testy.

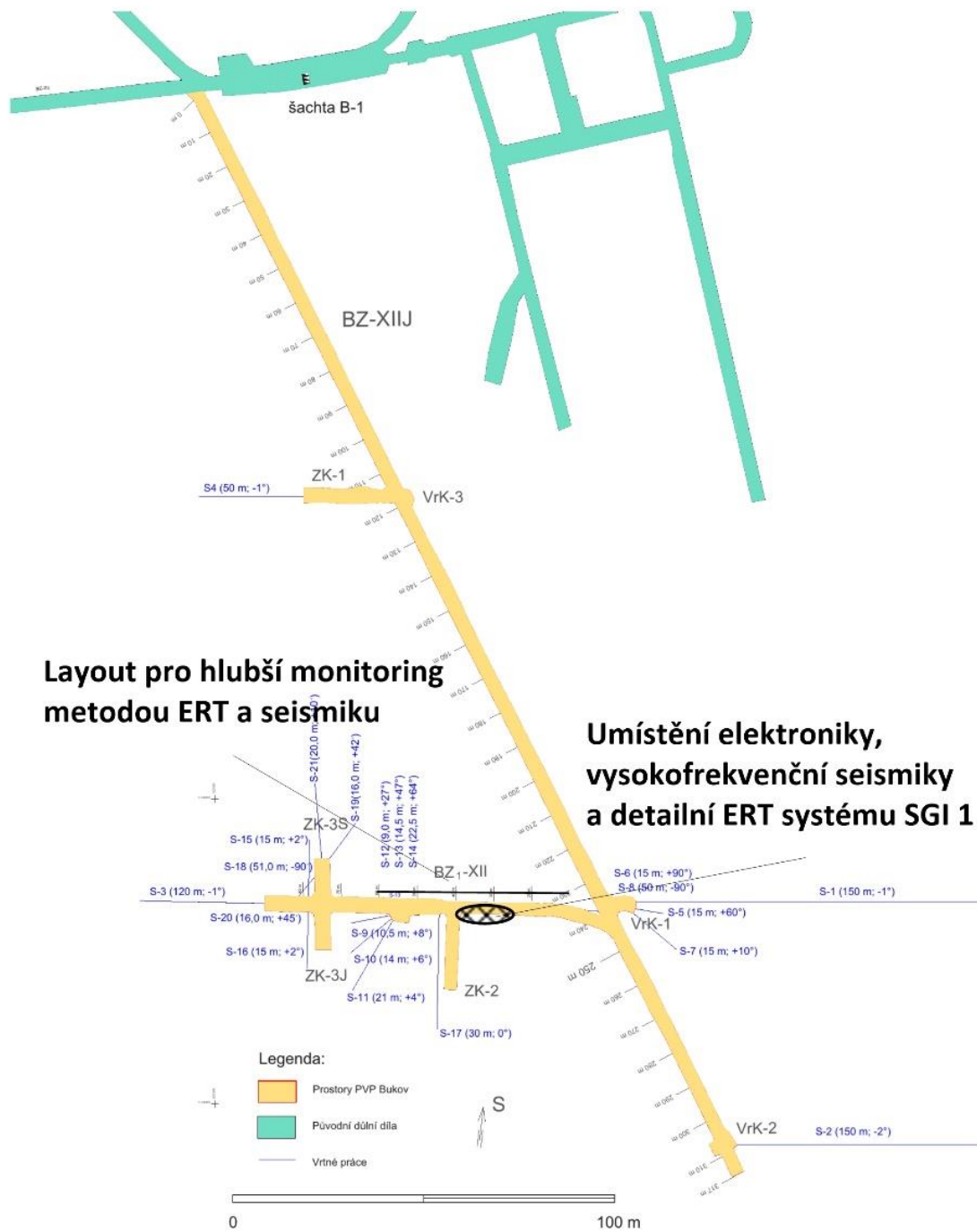
Čidla aktivní seismiky byla nejdříve rozmístěna v rozteči 1 m, ale to se ukázalo jako nevhodné, neboť signál procházející horninou velmi rychle ztrácel svoji intenzitu. Posléze byla vyzkoušena rozteč 0,5 m s tím, že čidla byla zapuštěna 8–20 cm hluboko do horniny tak, aby ležela v jedné rovině. Bohužel, ani tento způsob se neukázal jako vhodný z hlediska úrovně signálu. Nakonec byla čidla umístěna cca 1 m nad počvou na povrchu horniny, a to v rozteči 30 cm – viz Obr. 14, přičemž nejvíce napravo od pukliny umístěno budící čidlo, následovala dvě čidla před puklinou a poslední čidlo bylo umístěno za puklinou. Tento systém se ukázal jako funkční a bylo tak možné pomocí aktivní seismiky detekovat změny stavu horniny včetně pukliny velmi citlivě.



Obr. 14: Místo pro aparaturu SGI 1

Elektrody pro ERT byly umístěny v jedné linii 120 cm nad počvou v rozteči 25 cm. Z celkových 48 elektrod pak bylo 25 elektrod umístěno vlevo, ostatní pak vpravo od sledované pukliny.

Systém SGI 1 je tedy umístěn v PVP Bukov v chodbě BZ₁-XII po levé straně chodby – viz Obr. 15 a Obr. 16.



Obr. 15: Umístění systému v PVP Bukov



Obr. 16: Systém SGI 1 na pracovišti v PVP Bukov při pravidelné kontrole systému

Místo instalace SGI 1 na levé stěně chodby BZ₁-XII je po geologické stránce popsáno ve zprávě Bukovská et al. (2017), Elektronická příloha číslo 13 "Petrologická dokumentace podzemních prostor PVP Bukov". Pro dokumentovaný úsek ZK2, který je v blízkosti instalace SGI 1, citovaná zpráva udává jako horninový typ amfibolit migmatitizovaný, s biotitem, alterace chloritová. Zrnitost je 1-2 mm, místy se vyskytují až 10 cm mocné polohy a čočky amfibolitu a hornblenditu. V Příloze 7 "Strukturní mapa rozrážky ZK-2, přilehlé části BZ₁-XII a přilehlé části překopu BZ-XIIJ: foliace" zprávy Bukovská et al. (2017) jsou uvedeny orientace metamorfnní foliace na chodbě BZ₁-XII. Z hlediska měření pomocí SGI 1 jsou ale významnější příloha 8 "Strukturní mapa rozrážky ZK-2, přilehlé části BZ₁-XII a přilehlé části překopu BZ-XIIJ: pukliny" a příloha 9 "Strukturní mapa rozrážky ZK-2, přilehlé části BZ₁-XII a přilehlé části překopu BZ-XIIJ: zlomy". Z těchto příloh je patrné, že stěna chodby je značně porušená puklinami. Puklina, na které je usazena seismická část SGI 1 a která prochází mezi přijímacími senzory 2 a 3 (Obr.9) je součástí předpokládané zlomové zóny vyznačené na zmíněné strukturní mapě zlomů. Na pravé straně chodby BZ₁-XII je projev této zlomové zóny dokumentován jako ověřený, zatímco na levé straně je zlomové pásmo označeno jen jako předpokládaný průběh.

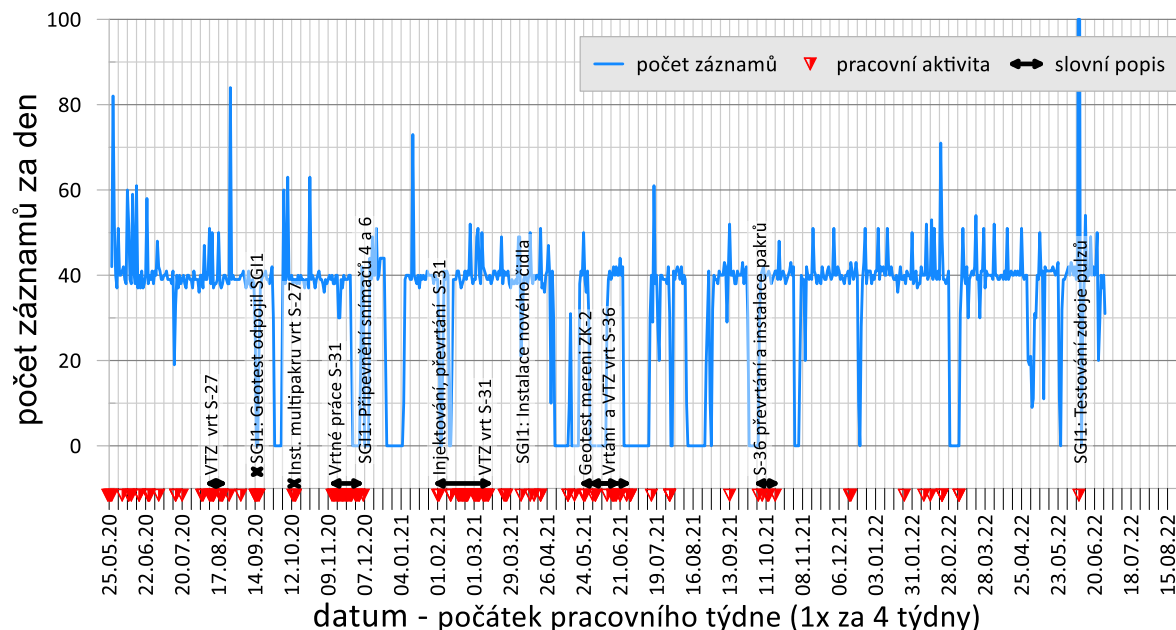
2 Hodnocení 1. - 4. etapy projektu

V této kapitole je hodnoceno celé období provozu aparatury SGI 1 od začátku projektu až do konce 4. etapy. V období 4. etapy, tedy od 9/2021 do 8/2022 probíhalo měření pomocí SGI 1 standardním způsobem, přičemž tato fáze je vyhodnocena v rámci hodnocení průběhu celého projektu. Terénní práce byly ukončeny 28.6.2022 a bylo přikročeno k závěrečnému zpracování databází a jejich předání do správy objednatele.

2.1 Aktivní seismika

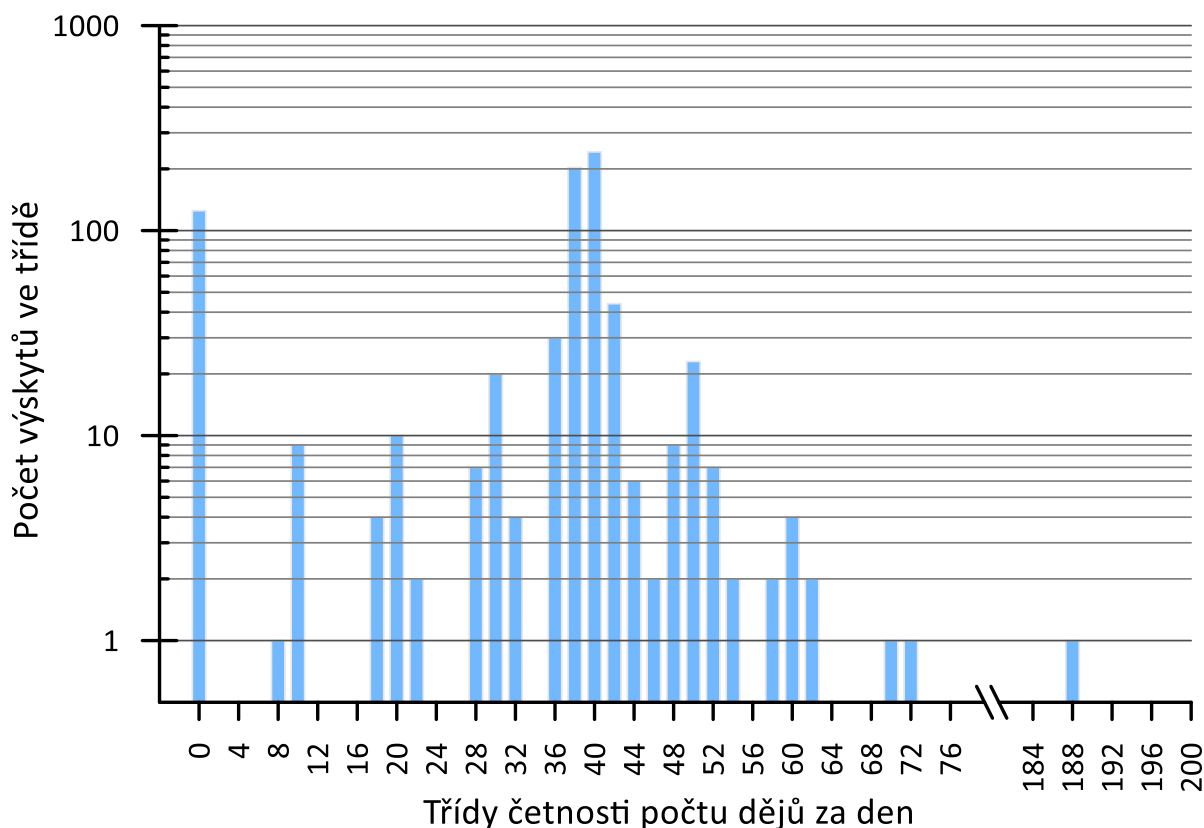
Měření aktivní seismikou probíhalo stejným způsobem, jako v předchozí etapě. To znamená, že měření bylo nastaveno tak, aby během každého dne proběhlo prozáření 4× (tj. po šesti hodinách). Pro možnost vylepšení poměru mezi signálem a šumem průměrováním, se v každém čase prozáření provedlo prozařování celkem 10×. V praxi, kdy postačuje srovnávat vlastnosti signálů s krokem 1 den, lze získat průměrováním všech 40 záznamů za den jeden průměrný denní signál.

Přehled provozu prozařování je patrný z grafu na Obr. 17, kde je zobrazen graf počtu realizovaných prozařování za jeden den. Graf ukazuje přehled pro celé období provádění monitoringu. V průběhu celého provozu jednoznačně převládají dny, v nichž bylo provedeno nastavených celkem 40 prozáření za den. Realizace výrazně vyššího počtu prozáření za den se vyskytuje obvykle ve dnech, kdy probíhala údržba zařízení a byla tak testována funkčnost systému prozařování. Období s nulovým počtem prozáření pak ukazují na intervaly nefunkčnosti zařízení v důsledku závady, výpadku napájení apod. V grafu jsou zobrazeny značkou dny, v nichž se v provozním deníku PVP Bukov uvádí provádění prací v místě umístění SGI1.



Obr. 17: Přehled provozu aktivní seismiky za celé období monitoringu

Celkový přehled je realizován i pomocí histogramu četnosti aktivních prozáření za jeden den na Obr. 18. Pro analýzu byla zvolena šířka tříd četnosti 2 prozáření za den. Graf ukazuje, že za celé období od 27.5.2020 do 28.6.2022 (to odpovídá délce 762 dní) nebylo prozařováno v 125 dnech. Zcela převládá provedení cca 40 prozáření za den. Podružná maxima kolem počtů 10, 20, 30, 50 a 60 ukazují na dny, kdy došlo k výpadku prozáření v jednom nebo více časech prozařování během dne, případně bylo naopak měření v jednom nebo dvou časech provedeno opakovaně. Jiné typy porušení pravidelnosti zvoleného nastavení prozařování se prakticky nevyskytují.



Obr. 18: Přehled provozu aktivní seismiky za celé období monitoringu – histogram četnosti počtu prozáření za 1 den

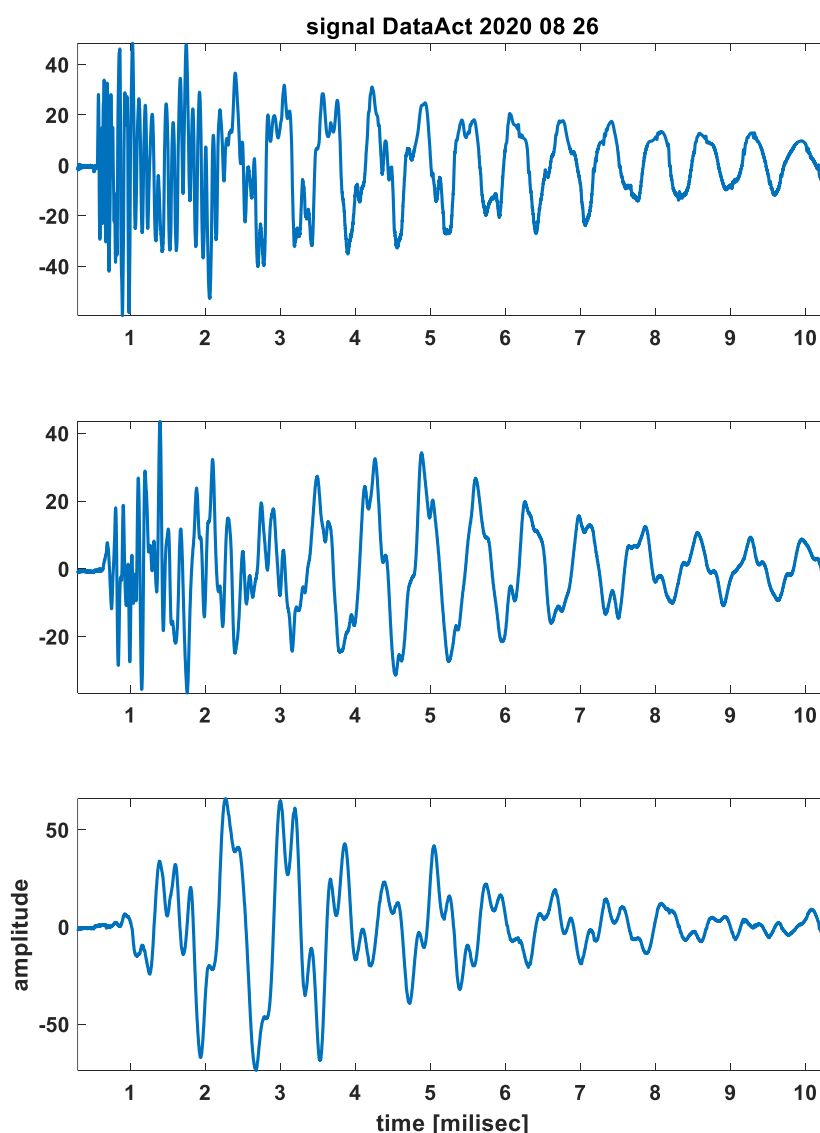
Proces zpracování naměřených dat seismického prozařování sestával z několika základních kroků. Naměřené signály seismického prozařování byly vždy nejprve převedeny z původního formátu „comma separated values“ – soubory „*.csv“ - do binárního formátu MATLABu – soubory „*.mat“. Smyslem této transformace je to, že při zpracování jsou soubory záznamů vlnových obrazů signálů opakovaně načítány a jejich načtení z binárního formátu MATLABu je několikanásobně rychlejší ve srovnání se čtením původních souborů.

Originální datové soubory jsou tvořeny celkem sedmi sloupci o délce 10 000 bodů. První sloupec obsahuje čas měřený od počátku záznamu v mikrosekundách, s krokem 1 mikrosekunda. Šest následujících sloupců obsahuje jednotlivé amplitudy signálů. V současně používané verzi monitoringu se používají pouze prvé tři sloupce, které obsahují měřené signály ze tří používaných senzorů. Zbylé tři sloupce jsou připraveny pro další možnost připojení tří senzorů. V současnosti obsahují tyto sloupce data, která mají vlastnosti šumu. Při převodu do binárního formátu MATLABu nejsou tato data načítána.

S ohledem na to, že se jedná o aktivní seismické měření, kdy je v určitém okamžiku aktivován seismický zdroj, registrace probíhá tak, že je ukládána i určitá část měřených signálů v čase před vysláním zdrojového signálu. Čas inicializace zdroje odpovídá zpoždění 200 μ s od počátku záznamu. Osa času je ale hardwarově nedefinovaná tak, že na počátku záznamu je uvedena hodnota 300 μ s a na jeho konci má poslední zaznamenaný vzorek záznamu čas

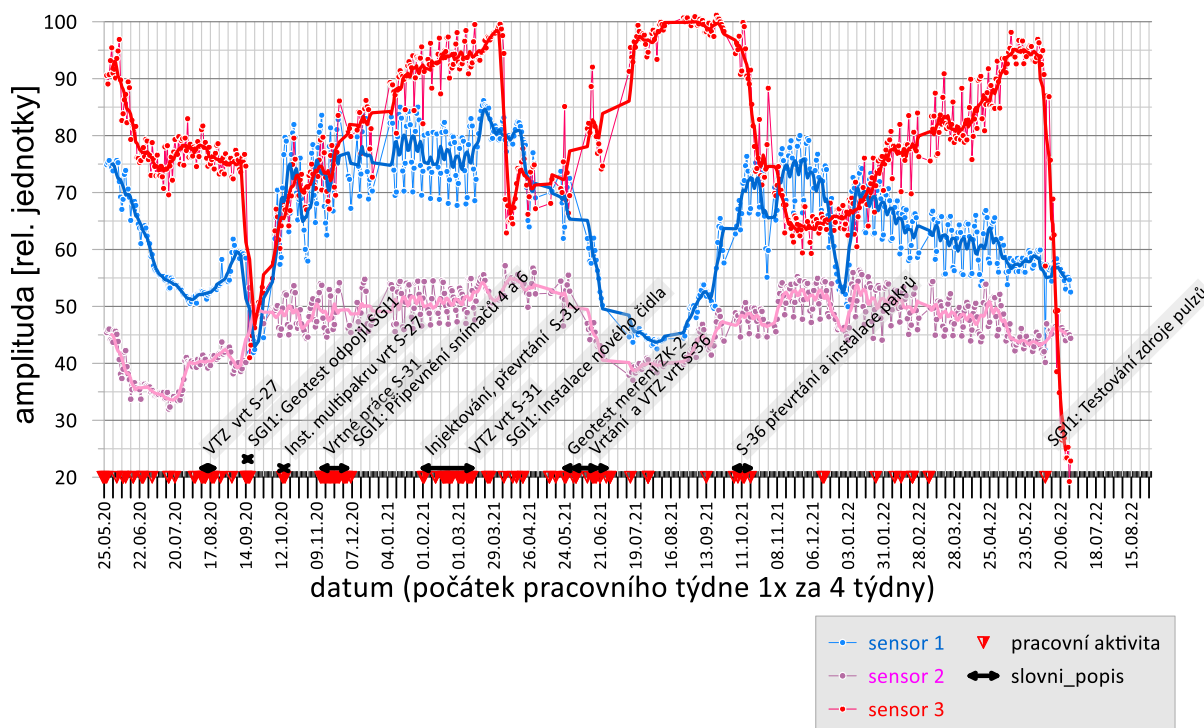
10 299 μs . S využitím této časové osy tedy čas vyslání zdrojového pulsu odpovídá času 500 μs .

Dalším krokem zpracování byl výpočet průměrného signálu v daném dni. To je realizováno výpočtem aritmetického průměru ze všech dostupných prozáření v daném dni, realizuje se zvlášť pro všechny tři snímače. Vyhodnocení pak pracuje s těmito průměrnými denními signály. Výhodou tohoto postupu je to, že dojde k výraznému zlepšení poměru mezi signálem a šumem. Vyhodnocení průměrných denních signálů se zaměřilo na analýzu změn amplitud, frekvencí a dále byly analyzovány vzájemné časové posuny mezi signály v průběhu monitoringu. Ukázka průměrných denních signálů vysokofrekvenčního prozařování je na Obr. 19.



Obr. 19: Ukázka průměrovaného denního signálu aktivní seismiky. Popis osy času používá HW definici počátečního času $300 \mu\text{s} = 0.3 \text{ ms}$.

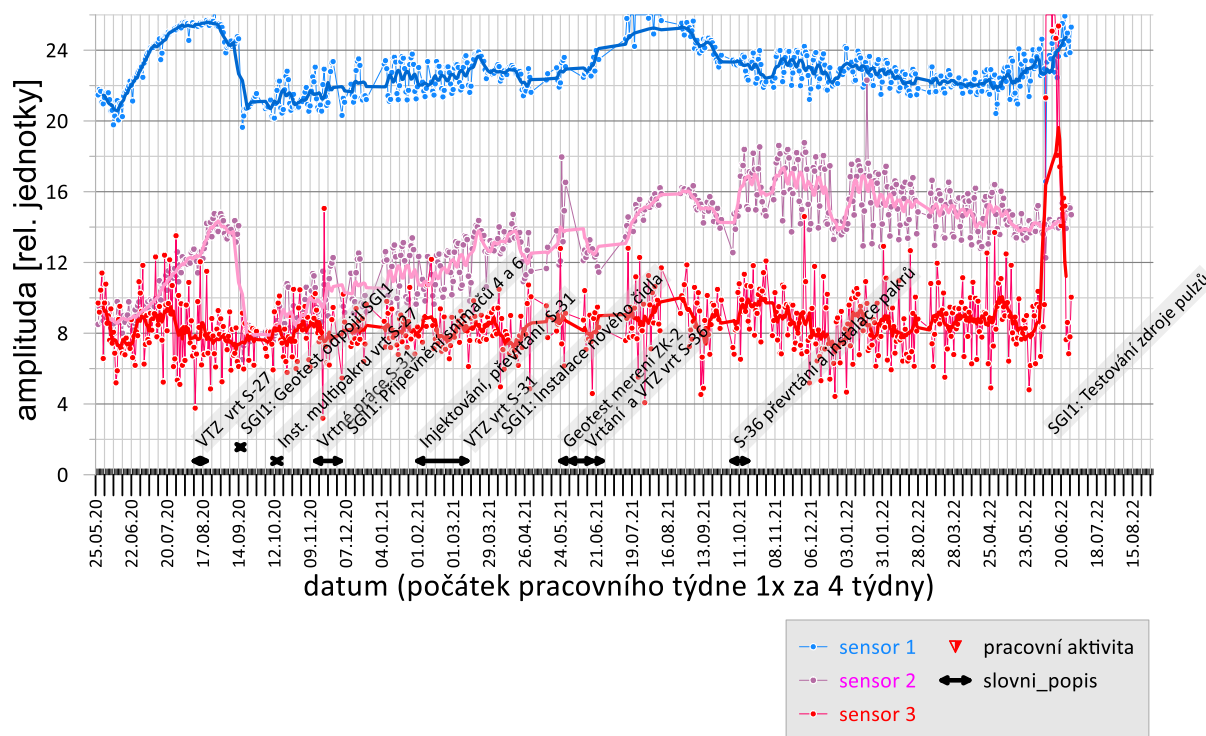
Pokud jde o analýzu amplitud, bylo hledáno maximum absolutních hodnot signálu, a to jednak z celého signálu a dále z počáteční části signálu. Průběh změn amplitud z celých zaznamenaných signálů je na Obr. 20.



Obr. 20: Časový průběh změn maxima absolutní hodnoty průměrovaného denního signálu aktivní seismiky. Slabou čarou původní denní data, silnou čarou vyhlazený průběh v okně délky 9 dní.

Maximum absolutní hodnoty amplitudy signálu stanovené z kompletního záznamu signálu prozařování obvykle nastává až na časech, které odpovídají příchodu nějaké pozdější fáze signálu (viz. Obr. 20). Jedná se o nějaký typ interferenční vlny, jejíž konkrétní průběh bývá méně stabilní, ve srovnání s průběhem vlny v blízkosti příchodu P nebo S vlny v prvním vstupu. Absolutní hodnoty amplitud signálu nejsou mezi senzory 1, 2 a 3 přímo srovnatelné, protože je použito odlišné zesílení. Průběh maxim vyhlazený 9denním oknem je hladší oproti původnímu průběhu, nicméně je patrný jakýsi sezónní trend, který je zejména na senzoru 3 doprovázen ještě náhlými skokovými změnami, které mohou souviset s vyšším zesílením tohoto signálu v porovnání se senzory 1 a 2. Sensor 3 je totiž umístěn za makroskopicky viditelnou poruchou a signál od zdroje je bez zesílení výrazně slabší, než na senzorech 1 a 2.

Maximum absolutních hodnot signálu je možné určovat i pouze z počátečních částí signálů, které odpovídají příchodu přímé P a S vln. Konkrétně pro sensor 1 použijeme signál z intervalu 100-300 μs , pro sensor 2: 200-500 μs a pro sensor 3: 400-700 μs od počátku signálu. To odpovídá v případě použití HW časové osy (viz Obr. 19) intervalům 400-600 μs , 500-800 μs a 700-1000 μs . V takovém případě dostaneme graf časového průběhu maxim absolutních hodnot, který je na Obr. 21.

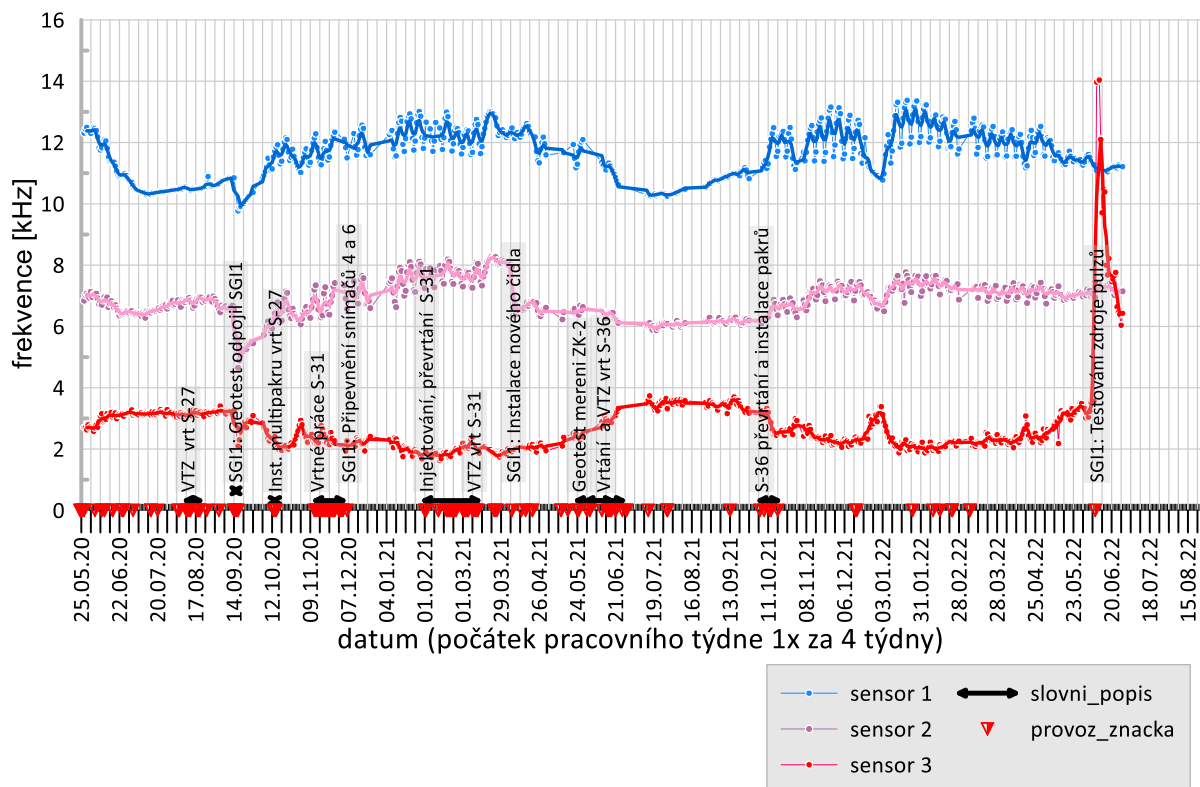


Obr. 21: Časový průběh změn maxima absolutní hodnoty počáteční části průměrovaného denního signálu aktivní seismiky. Slabou čarou původní denní data, silnou čarou vyhlazený průběh v okně délky 9 dní.

Změny amplitud počáteční části signálu jsou výrazně menší než změny amplitud celých signálů. To se týká jak dlouhodobých, tak krátkodobých změn – lze to zjistit i pouhým srovnáním grafů na Obr. 20 a Obr. 21. Změny amplitud počáteční části signálů prozařování reflektují hlavně vlastnosti přímé P a S vlny. Ukazuje se, že tyto změny jsou výrazně menší než změny později přicházejících vln. Tyto vlny odpovídají tzv. kódě vlnění. Jedná se o interferenční vlny, které vznikají rozptylem na nehomogenitách v okolí seismického zdroje a přijímače. Lze uvažovat o tom, že ze všech bodů určité oblasti prostoru, kam vlnění dospělo, mohou se vlny vracet ke snímači. Provedením frekvenční analýzy řad změn amplitud lze zjistit, že jednou z výrazných složek je týdenní perioda. Zřetelněji je tento fakt patrný při analýze změn amplitudy celých signálů, tj. při analýze S-kódy seismického vlnění.

Vedle frekvenční analýzy časových řad denních maximálních amplitud na signálu lze provádět i frekvenční analýzu jednotlivých průměrných denních signálů. Jednou z možností, jak charakterizovat frekvenční obsah signálu je využití tzv. převládající frekvence a volba určité části signálu, ze které je převládající frekvence počítána. Na obrázku Obr. 22 jsou zobrazeny tyto převládající frekvence spočítané z počátečních úseků průměrných denních signálů o délce 2000 bodů, tj. o délce trvání 2 ms od počátků signálů. Převládající frekvence je počítána pomocí speciální funkce MATLABu, která hledá frekvence amplitudově nejvýznamnějších harmonických komponent v signálu. Pokud je takových komponent se srovnatelnou amplitudou více, je převládající frekvence spočtena jako vážený průměr těchto komponent. Výsledná převládající frekvence tedy nemusí být frekvencí frekvenční

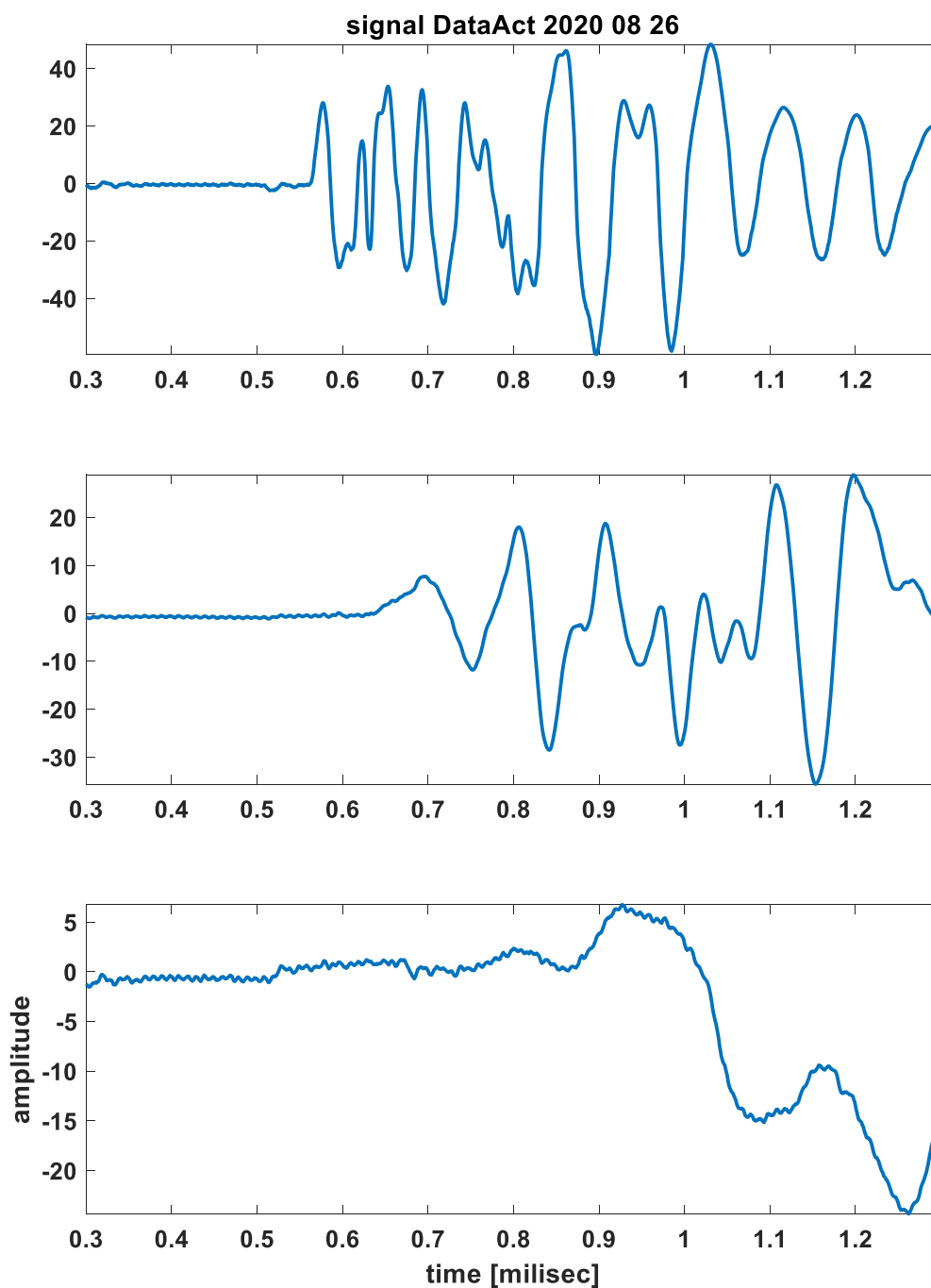
komponenty přímo obsažené v signálu, nicméně jedná se o parametr, který dovede spojitě hodnotit v čase se měnící frekvenční obsah signálů.



Obr. 22: Časový průběh změn převládající frekvence počáteční části průměrovaného denního signálu aktivní seismiky. Slabou čarou původní denní data, silnou čarou vyhlazený průběh v okně délky 5 dní.

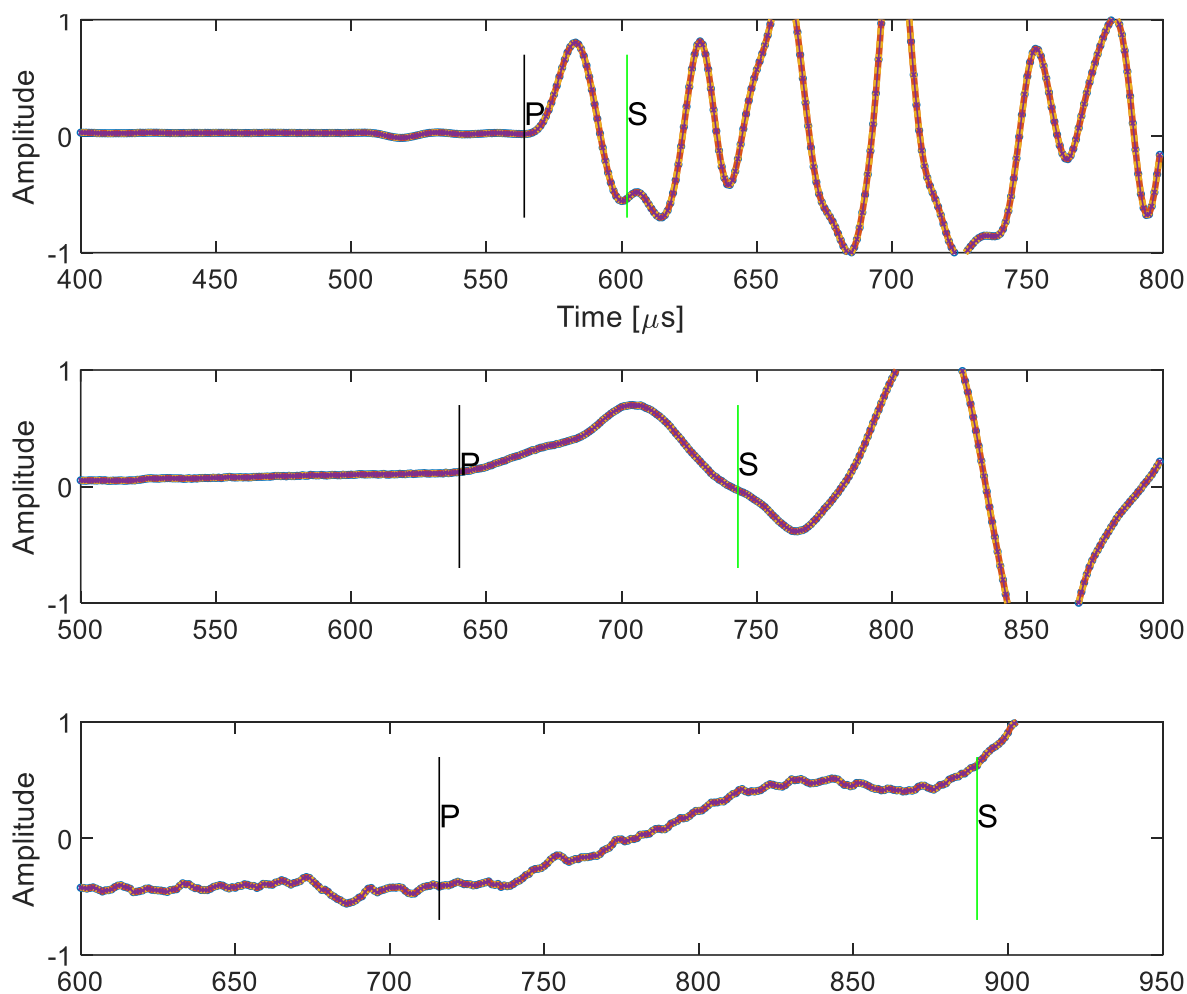
Časový průběh frekvencí na obrázku Obr. 22 ukazuje, že frekvence signálů jednotlivých senzorů se příliš v čase nemění. Výjimkou je poslední období záznamu na senzoru číslo 3, jedná se ale o vliv manipulace se snímačem. V soulase s rychlejším útlumem vysokých frekvencí se ukazuje, že nejvyšší frekvence (kolem 12 kHz) zachycuje senzor 1, který je nejbližší zdroji. Na senzorech 2 a 3 se frekvence ve srovnání se senzorem 1 postupně snižují (kolem 7 kHz na senzoru 2 a kolem 3 kHz na senzoru 3). Časové průběhy změn převládající frekvence opět vykazují pozvolnější sezónní trend a dále v některých obdobích výrazný týdenní trend.

Signály vysokofrekvenčního prozařování lze rovněž využít k analýze toho, zda se v čase mění rychlost šíření seismických vln mezi vysílacím a přijímacím senzorem. Nabízí se možnost analyzovat časy prvních nasazení jednotlivých typů vln, typicky přímé P a S vlny. Zaznamenané průběhy signálů se však nevyznačují nijak výrazným prvním nasazením ani u P vln v prvním vstupu, natož pak u S vln, které přicházejí v zadním vstupu, společně s dalšími typy vln – viz příklad na Obr. 23.



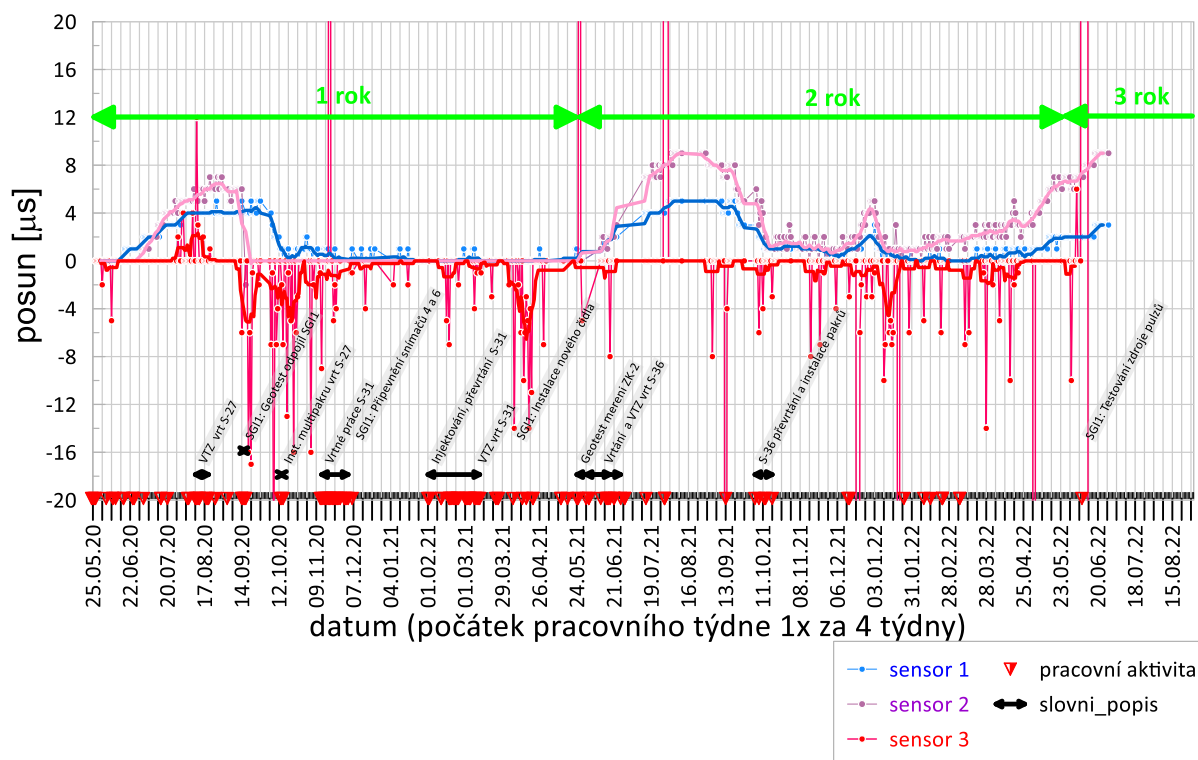
Obr. 23: Ukázka detailu počáteční části průměrovaného denního signálu aktivní seismiky. Detail podle Obr. 19. Popis osy času používá HW definici počátečního času. Čas vyslání zdrojového signálu 0.5 ms.

Jiná ukázka detailu počátků signálů prozařování průměrovaných za jeden den včetně vyznačených očekávaných časů příchodu P a S vln je na obrázku Obr. 24.



Obr. 24: Jiný příklad detailu počáteční části průměrovaných denních signálů aktivní seismiky s vyznačením časů příchodů P a S vln. Čas vyslání zdrojového signálu odpovídá času $500 \mu\text{s}$.

Pro stanovení vzájemného časového posunu mezi průměrnými denními signály tak obvykle nelze využít přímo odečet časů prvních příchodů P a S vln na zaznamenaném seismogramu. Místo toho je využíván výpočet funkce vzájemné korelace. Ten využívá vhodně zvolenou část zaznamenaného signálu a může být realizován automaticky. Každý naměřený signál je postupně korelován s prvním naměřeným signálem. Z polohy maxim funkce vzájemné korelace se pak určuje vzájemný časový posun mezi prvním záznamem a záznamem v daném dni. Výsledný graf identifikovaných časových posunů počáteční části signálů prozařování je na Obr. 25.



Obr. 25: Časové posuny signálů monitorování aktivní seismikou. Časové posuny hledány v počáteční části signálů, kde se předpokládá příchod přímé P vlny. Tlustou čarou provedeno vyhlazení klouzajícím průměrem v okně délky 9 dní.

Graf časového průběhu vzájemných posunů mezi průměrem signálů za jeden den a prvním zaznamenaným signálem na Obr. 25 na senzorech 1 a 2 vykazuje sezónní variaci. Senzor 3, který je umístěn za poruchou, v oblasti příchodu P vlny neposkytl natolik kvalitní signály, aby bylo možné uvedenou analýzu interpretovat. Velikost časových posunů na senzoru 2 je ve srovnání se senzorem 1 alespoň místy zhruba dvojnásobná, což koresponduje s jeho dvojnásobnou vzdáleností od zdroje ve srovnání se senzorem 1. Na rozdíl od výše popsaných časových závislostech amplitud a převládajících frekvencí, průběh časových posunů vykazuje jen sezónní variaci, týdenní periodicitu zřetelná není.

Poznámka: Na grafu časových posunů na Obr. 25 na senzorech 1 a 2 jsou patrná dvě období většího zpoždění signálů. První období je cca od první poloviny června 2020 do konce září (senzor 2) až poloviny října 2020 (senzor 1) a druhé období od cca 21.6.2021 do cca 11.10.2021. Na grafu vlhkosti (Obr. 25) se jedná o období, kdy je zjevně nejmenší týdenní rozkmit vlhkosti – reálně to znamená, že dochází k menšímu snížení vysoké vlhkosti než v jiných obdobích.

Tento závěr potvrzuje známou skutečnost, že změny amplitud seismických signálů v důsledku změn vlastností prostředí, kterým se vlny šíří, bývají výraznější než změny rychlostí. Při běžných terénních seismických měřeních ale bývá obtížné dosáhnout opakovatelnosti při měření amplitud, zatímco opakovatelnosti měření času průchodu lze dosáhnout snáze. Jde o to, že při opakovaném umístění snímačů lze s požadovanou přesností zachovat jejich geometrii (vzájemnou vzdálenost), ale nebývá obvykle možné zachovat stejné podmínky kontaktu senzoru s horninovým prostředím. Při běžném měření na povrchu země jde například

o odlišné zatlačení geofonu do vrstvy hlíny, při měření na skalním podkladu by bylo nutné například použít stabilní kotvy a snímače k nim uchycovat například s kontrolovanou velikostí přtlaku. Změněné kontaktní podmínky mají vliv na amplitudy a frekvenční obsah signálu, zatímco na dobu šíření signálu od zdroje k přijímači kontaktní podmínky obvykle žádný vliv nemají. Podobná je situace i s opakovaným buzením seismických vln: u úderu například kladivem, nelze zajistit opakovatelnou amplitudu, i když lze zaručit velkou přesnost místa buzení. Elektro-mechanický zdroj, trvale připevněný ke skalní hornině bude zaručovat vysokou opakovatelnost jak amplitudy, tak frekvenčního obsahu signálu.

2.2 Pasivní seismika

V průběhu sledovaného období byla seismická čidla zapojena stejně jako v předchozí etapě, avšak čidlo 6 bylo 22. 2. 2022 přemístěno o 3 m blíže k ústředně z důvodu vybudování ochranné betonové stěny na rozhraní chodeb BZ-XII a ZK-2.

Následující přehled ukazuje typy a použité zesílení jednotlivých očíslovaných geofonů:

1. Olympus V1548 - v místě aparatury SGI 1, zesílení 1000
2. Olympus V1548 - v místě aparatury SGI 1, zesílení 1000
3. Olympus V1548 - v místě aparatury SGI 1, zesílení 1000
4. ST-2A - 17 m vlevo od umístění aparatury SGI 1, zesílení 5000
5. ST-2A - elektrodynamický geofon v místě aparatury SGI 1, upevněn horizontálně, zesílení 5000
6. ST-2A - 14 m (do 22. 2. 2022 původní umístění na 17 m) vpravo od umístění aparatury SGI 1, zesílení 5000

Umístění jednotlivých snímačů na stěně chodby v místě měření ukazuje Tabulka 1, která umístění popisuje ve vztahu ke středu systému měření (staničení 20 m), kde je lokalizováno aktivní seismické prozařování.

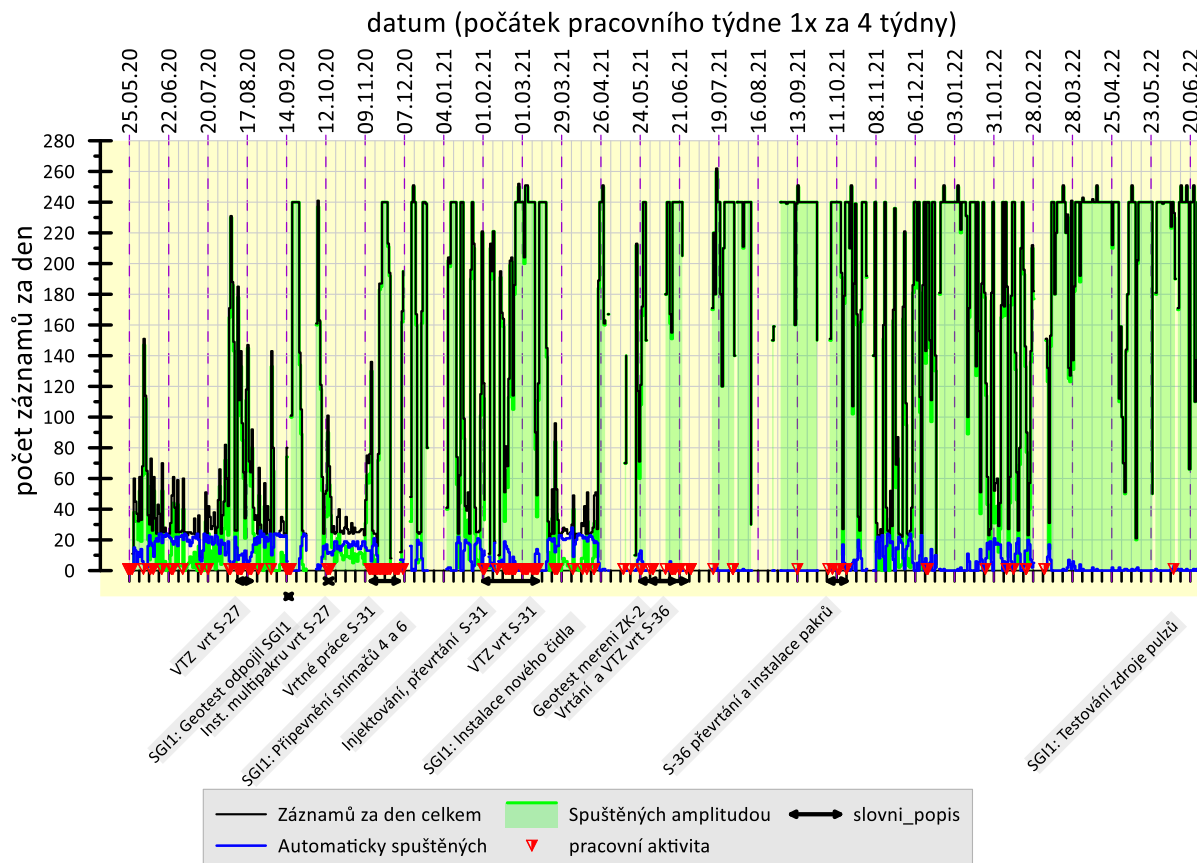
Tab. 1: Rozmístění jednotlivých čidel.

Čidlo	umístění	zesílení č.	zesílení
1	střed	10	1000
2	střed	10	1000
3	střed	10	1000
4	17 m vlevo	12	5000
5	střed	12	5000
6	14 (17) m vpravo	12	5000

Záznamy jsou prováděny o délce trvání 5 sec se vzorkováním vzorkovací frekvencí 10 kHz (krok vzorkování 100 μ s).

Dle poznatků z minulé etapy byl do aparatury SGI 1 zapojen, ve spolupráci s panem Habrdou z firmy Kocman envimonitoring s.r.o., vodič indukující aktivitu sklopek a proveden pokus o eliminaci registrace signálů v době aktivity sklopek.

V následujícím grafu (Obr. 26) je provedena rekapitulace provozu monitoringu pasivní seismiky v období do 30. 6. 2022. Spouštění amplitudou bylo omezeno na maximálně deset záznamů v každé hodině. V období klidu (žádné spuštění amplitudou) byl spuštěn jeden kontrolní záznam automaticky na počátku každé hodiny.



Obr. 26: Rekapitulace provozu monitoringu pasivní seismiky v období do 06/2022

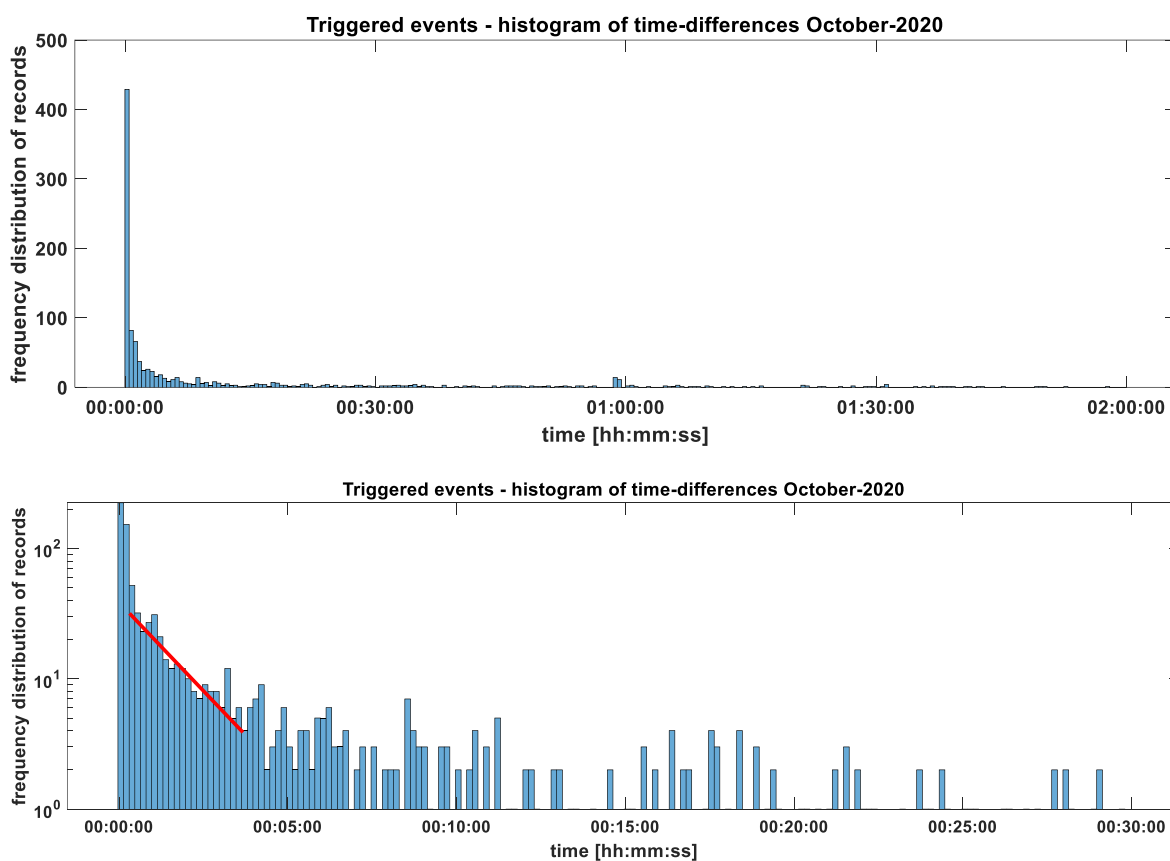
Uvedený graf ukazuje, že monitoring pasivní seismiky v počátečním období monitoringu vykazoval malou citlivost k registraci seismických dějů. To je vidět jednak nižšími počty záznamů za den celkem a dále i vysokým počtem automaticky spuštěných záznamů. Tyto automaticky spouštěné záznamy jsou prováděny na počátku každé hodiny, pokud v předchozí hodině nedošlo ani jednou k zaznamenání seismického děje (spuštěného amplitudou). Automaticky spouštěné záznamy jsou prostředkem kontroly funkčnosti záznamu a pokud by nebyla žádná seismická aktivita, aparatura by tuto kontrolu provedla 24krát za den. To je tedy horní limit počtu automaticky spuštěných záznamů za den.

Ke konci období registrace pasivní seismiky se naopak setkáváme s opačným stavem, kdy nastavená citlivost zařízení způsobuje nepřetržitou registraci dějů pasivní seismiky ihned po jejím spuštění. Systém je limitován, co se týká počtu zaznamenaných seismických dějů spuštěných amplitudou signálu tak, že v každé hodině zaznamená maximálně 10 těchto dějů. Na začátku každé hodiny je tedy systém připraven zaregistrovat maximálně 10 dějů spuštěných amplitudou signálu. Při citlivosti spuštění registrace, nastavené ke konci celého období monitoringu, se díky seismické aktivitě v místě instalace na počátku každé celé hodiny ihned zaregistruje 10 dějů pasivní seismiky, a tím se registrace na zbytek hodiny přerušuje.

Celkový počet záznamů spuštěných amplitudou za jeden den je tak v tomto posledním období obvykle na svém maximu, tj. 240 dějů. To je doprovázeno obvykle nulovým počtem automaticky spuštěných dějů.

Problémem registrace je vliv rušení zařízeními pro monitoring množství vody vytékající z horninového prostředí. K tomu se používá výše zmíněných sklopek, jejichž signál je registrován systémem pasivní seismiky. Technické řešení je výše uvedeno, bohužel ale v dostupných datech období testování tohoto systému zahrnuté není.

Za zajímavá data pasivní seismiky lze považovat ukázkou dat za měsíc říjen 2020. V tomto období nedocházelo k zahlcování ději spuštěnými amplitudou v počátku každé hodiny, nýbrž časy spuštění se jevily jako nahodilé. Na Obr. 27 je zobrazen histogram četnosti intervalů mezi záznamy spuštěnými amplitudou.



Obr. 27: Histogram četnosti časových intervalů mezi záznamy pasivní seismiky spuštěnými amplitudou v období říjen 2020. Nahoře: celkový histogram v lineárních osách. Dole: detail počáteční části histogramu s logaritmickou osou četnosti. Červená přímka indikuje exponenciální pokles.

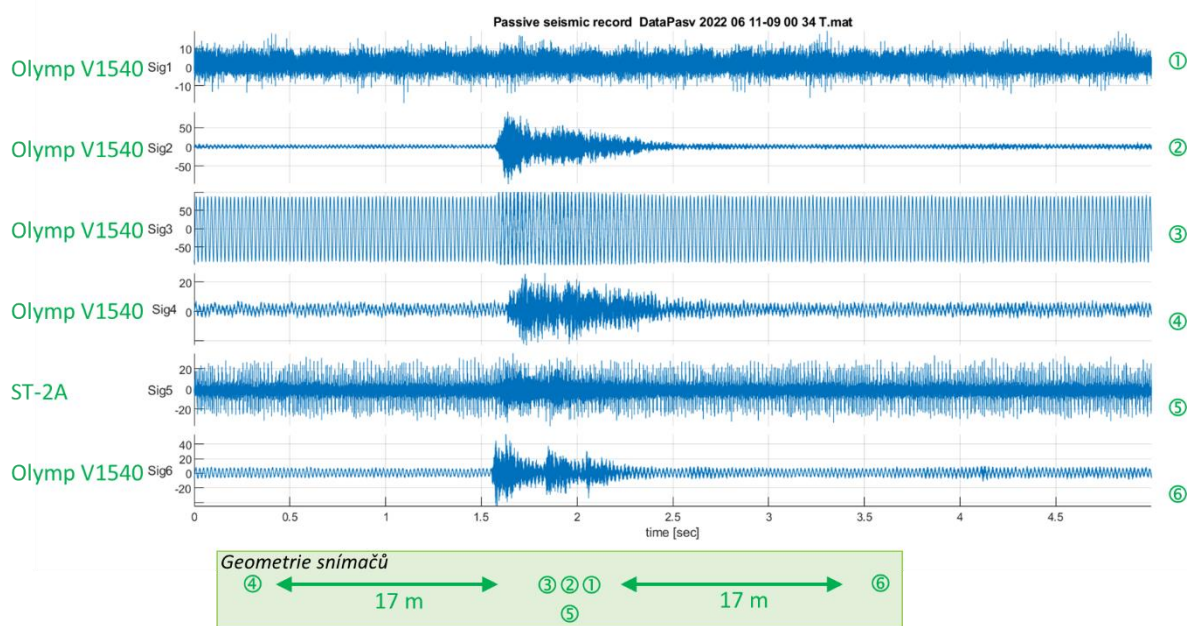
Z grafu je vidět, že poměrně velké množství dějů vznikalo s časovým odstupem minut až desítek minut. Zachycený počáteční exponenciální pokles četností je překvapující, odpovídal by běžně pozorovanému úbytku aktivity po silnějším ději, což se běžně označuje jako

„dotřesová série“. V pozdějších obdobích tento jev již pozorován nebyl, což ale souvisí zejména s nastavenou příliš velkou citlivostí spouštění.

V průběhu registrace pasivní seismiky (Obr. 26) se objevují i mezery, kdy registrace z důvodu závady neběžela. Přehled provozu systému formou tabulky je uveden v části 2.3 Odporová tomografie – Tabulka 2.

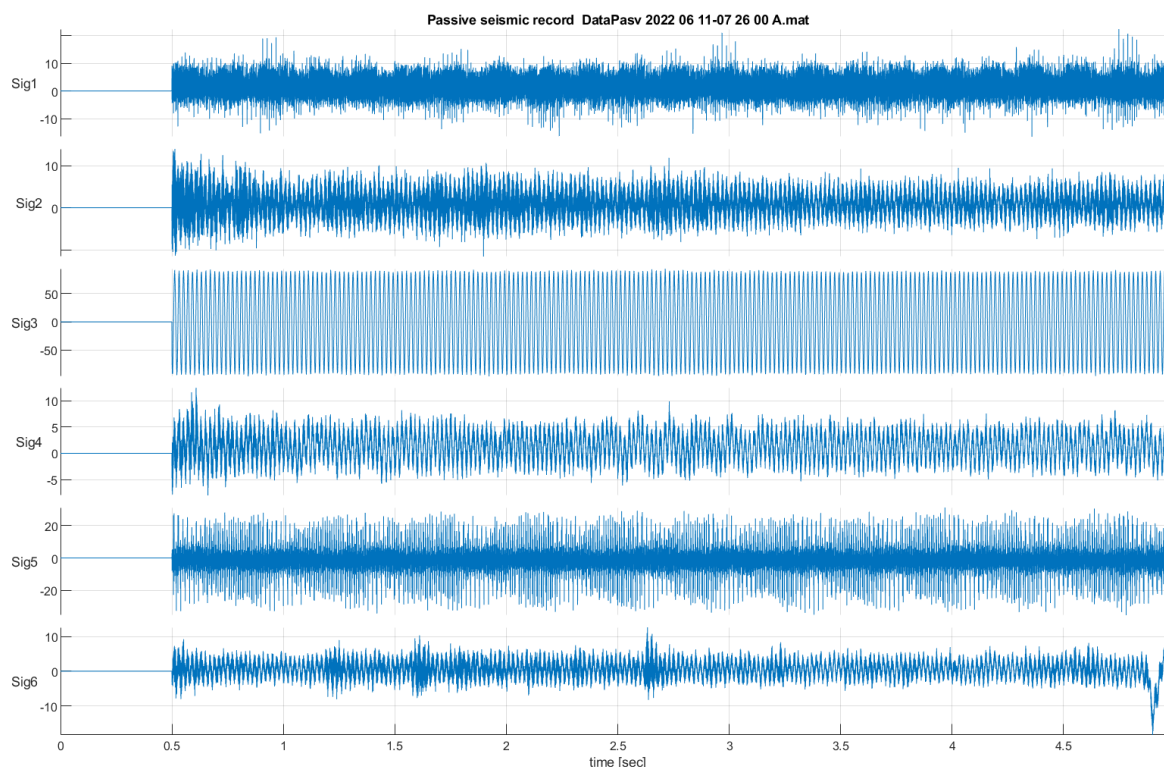
Jako příklad záznamu spuštěného amplitudou signálu je na Obr. 28 uvedena ukázka záznamu, který byl odhadnut jako odezva na činnost průtokoměru (sklopka). Bylo nalezeno množství záznamů, na nichž se vyskytuje podobný průběh signálu děje s vysokou frekvencí vlnění. Z této opakovatelnosti soudíme na to, že se jedná právě o odezvu na funkci sklopky poblíž místa měření.

Spuštění amplitudou v daném případě ovšem neznamená, že byl záznam spuštěn činností sklopky, ale ke spuštění dochází zřejmě i vlivem velmi vysoké hladiny rušení na snímači číslo 3. Proto na různých záznamech signál sklopky přichází v různém čase od začátku záznamu. To právě svědčí o tom, že ke spuštění záznamu nedošlo vlivem signálu sklopky, ale vlivem vysoké úrovně rušení.



Obr. 28: Ukázka šesti kanálového záznamu seismického děje spuštěného amplitudou.

Na Obr. 29 je pro ilustraci uveden šesti kanálový záznam automaticky spuštěný. Jedná se o záznam šumu, není na něm patrný žádný seismický děj.



Obr. 29: Ukázka šesti kanálového záznamu seismického děje spuštěného automaticky.

Automaticky zaznamenané děje se vyznačují tím, že prvních 0,5 s je nahrazeno nulami.

Pokud jde o možnost lokalizování seismických dějů, to zatím testováno nebylo. Pasivní seismika využívala sice celkem šest snímačů, ale čtyři z nich byly umístěny prakticky v jednom místě (skupina čtyř snímačů zaujímá úsek profilu o celkové délce cca 1 metr) a všech šest snímačů je umístěno na jednom zhruba přímkovém profilu. To principiálně neumožňuje provádět lokalizaci ohniska děje. Data lze využít maximálně k tomu, že je možné alespoň v některých případech určit, ke kterému z registračních míst přišla vlna jako první. Prvá nasazení dějů jsou však značně pozvolná a spolehlivé určení prvních příchodů prakticky možné není. To souvisí s poměrně nízkou dynamikou záznamů. V současnosti ale nejsou žádné informace o tom, že by v daném místě měření nebo v jeho blízkém okolí docházelo ke vzniku seismických (mikroseismických, akustických) dějů. Proto se nelze přímo vyjádřit k tomu, jak by vypadaly seismogramy skutečného vysokofrekvenčního seismoakustického děje.

2.3 Odporová tomografie

Elektrická odporová tomografie (ERT) umožňuje získávat odporový profil v místě měření a opakování měření (monitoring) umožňuje sledovat změny odporů s časem. Měření metodou odporové tomografie probíhalo v období 27.5.2020 – 5.10.2020 v režimu 8 měření za den, tj. po 3 hodinách (0:00, 3:00, 6:00, 9:00, 12:00, 15:00, 18:00, 21:00). Jednalo se o počáteční fázi

měření, kdy šlo o zjištění, jakou rychlost změn zdánlivých odporů lze očekávat. V další fázi měření, tj. od 6.10.2020 bylo prováděno měření jedenkrát za 24 hodin, což bylo motivováno omezením objemu zaznamenaných dat.

V kontinuální řadě monitoringu se vyskytuje i několik mezer, způsobených poruchami – viz Tabulka 2.

Při porovnání překryvu chybějících dat měření mezi seismickým měřením a odporovým měřením pomocí ARES II bylo zjištěno, že někdy se intervaly nefunkčnosti překrývají, jindy nikoliv. Současně se v minulosti ukazovalo, že některá data z aparatury ARES II, která se nepřenese na ftp server automaticky bylo možné později ručně stáhnout z kopie ve vnitřní paměti přístroje ARES II.

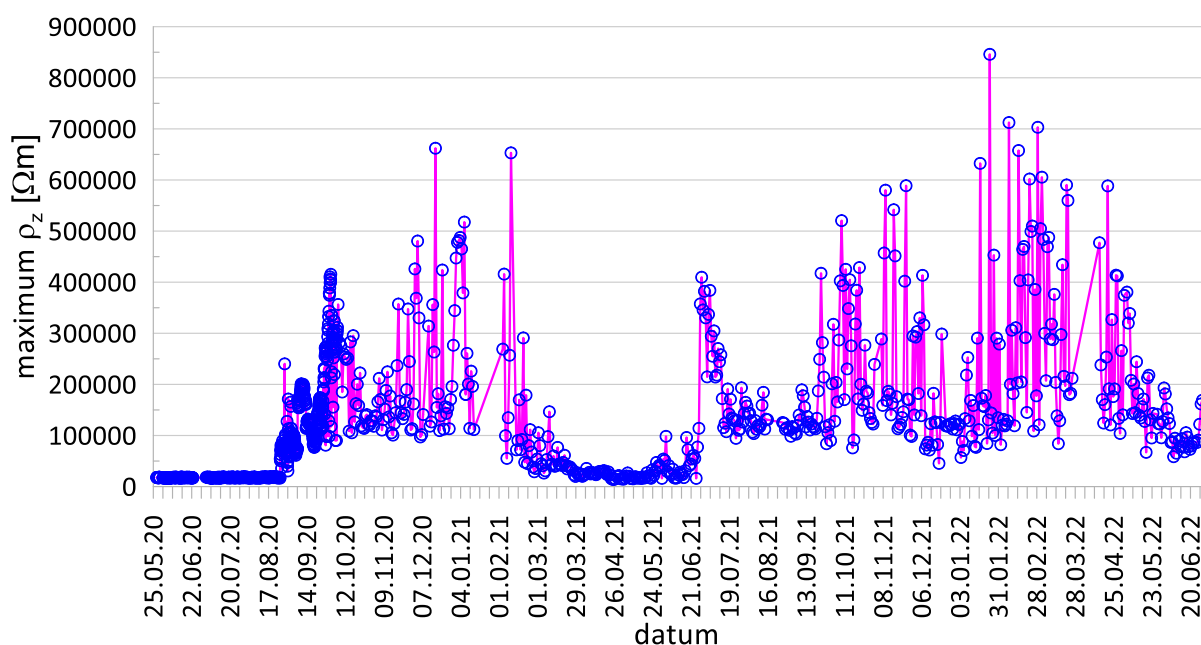
Tabulka 2: Porovnání intervalů nefunkčnosti monitoringu odporů a seismiky

ARES II - ERT	Počet dní	Seismika	Počet dní
23.6.20 - 2.7.20	10		
		15.9.20 – 16.9.20	2
		29.9.20 – 4.10.20	6
		28.11.20 – 3.12.20	6
		7.12.20 – 10.12.20	4
		24.12.20 – 5.1.21	13
14.1.21 – 2.2.21	20		
		3.2.21 – 4.2.21	2
		10.2.21 – 11.2.21	2
		2.5.21 – 12.5.21	11
		15.5.21 – 20.5.21	6
		29.5.21 – 10.6.21	13
		24.6.21 – 13.7.21	20
29.7.21-31.7.21	3		
		30.7.21 – 31.7.21	2
		12.8.21-25.8.21	14
17.8.21-25.8.21	8		
		30.8.2021	1
		28.9.21-5.10.21	8
2.11.21-5.11.21	4	2.11.21-5.11.21	4
21.12.21-22.12.21	2	22.12.21	1
		29.2.22-8.3.22	8
26.3.22-13.4.22	18		
3.5.22	1		
24.5.22-25.5.22	2	25.5.2022	1
		10.6.22	1
29.6.22	konec	29.6.22	konec
Celkem	68		125

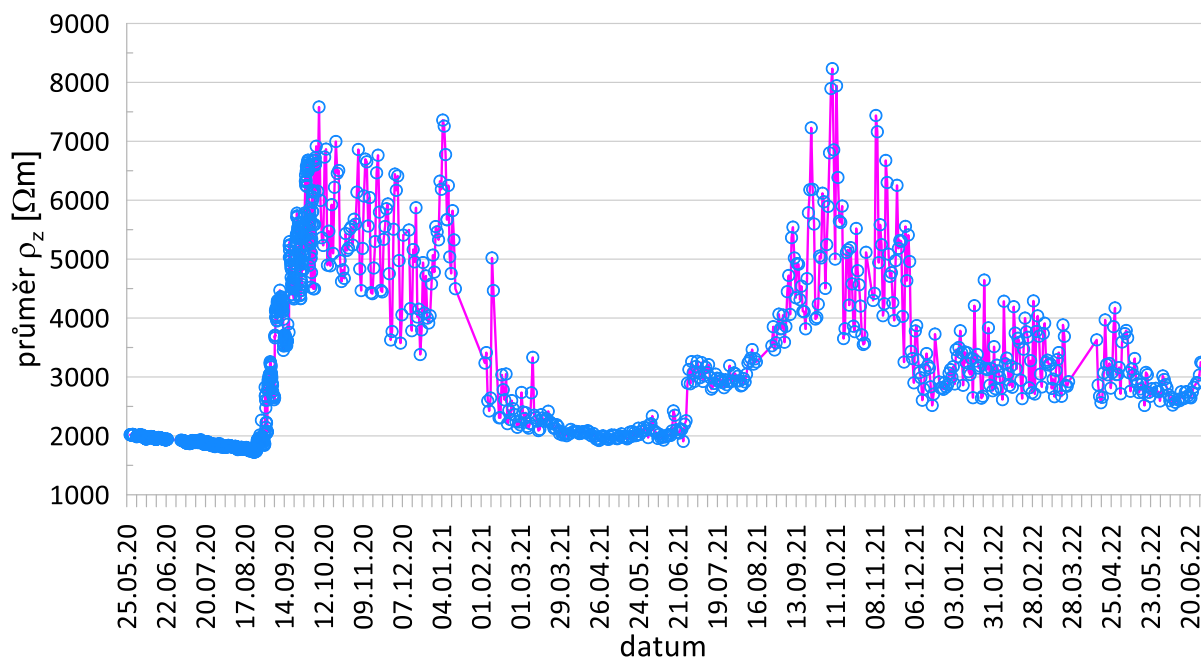
Při porovnání překryvu chybějících dat měření mezi seismickým měřením a odporovým měřením pomocí ARES II bylo zjištěno, že někdy se intervaly nefunkčnosti překrývají, jindy nikoliv. Současně se v minulosti ukazovalo, že některá data z aparatury ARES II, která se nepřenese na ftp server automaticky, bylo možné později ručně stáhnout z kopie ve vnitřní paměti přístroje ARES II.

Za celou dobu provádění monitoringu bylo zaznamenáno 1498 záznamů řezů zdánlivých odporů. Každý z řezů je tvořen celkem 529 hodnotami zdánlivých měrných odporů.

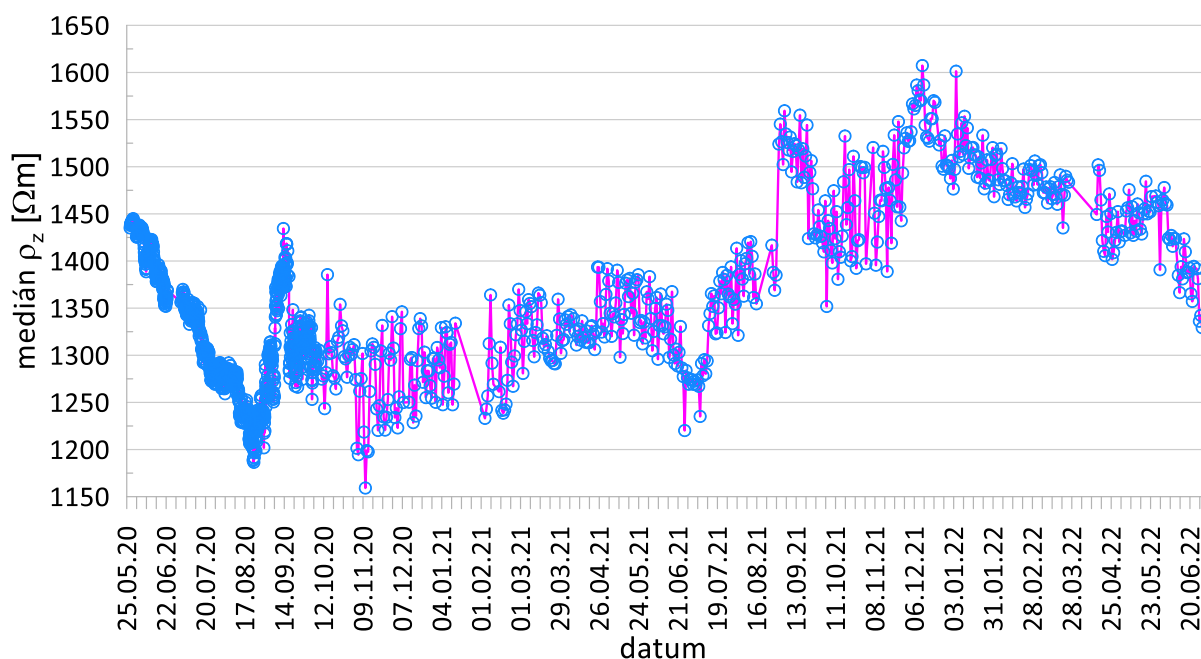
Pro celkovou představu o variabilitě naměřených zdánlivých odporů bylo konstruováno několik základních přehledových grafů. Prvním je graf časového průběhu maximálních hodnot zdánlivých měrných odporů na naměřených řezech – viz Obr. 30. Dále je na Obr. 31 graf časového průběhu průměrných hodnot zdánlivého měrného odporu na jednotlivých řezech. Posledním informativním grafem je časový průběh mediánu zdánlivého měrného odporu, opět spočítaný po jednotlivých řezech – viz Obr. 32.



Obr. 30: Časový průběh maximálních hodnot zdánlivých odporů na jednotlivých pořizovaných řezech



Obr. 31: Časový průběh průměrné hodnoty zdánlivých odporů na jednotlivých pořizovaných řezech.



Obr. 32: Časový průběh mediánů zdánlivých odporů na jednotlivých pořizovaných řezech.

Srovnání grafů časového průběhu maxim, průměrů a mediánů především ukazuje na významný rozdíl intervalu hodnot na odpovídajících osách zdánlivých odporů. Maximální hodnoty na grafu maxim se blíží k 900 kΩm, což jsou extrémně vysoké hodnoty. Průměrné hodnoty spadají do intervalu o několik řádů užšího: od cca 1800 Ωm do 8200 Ωm. Hodnoty

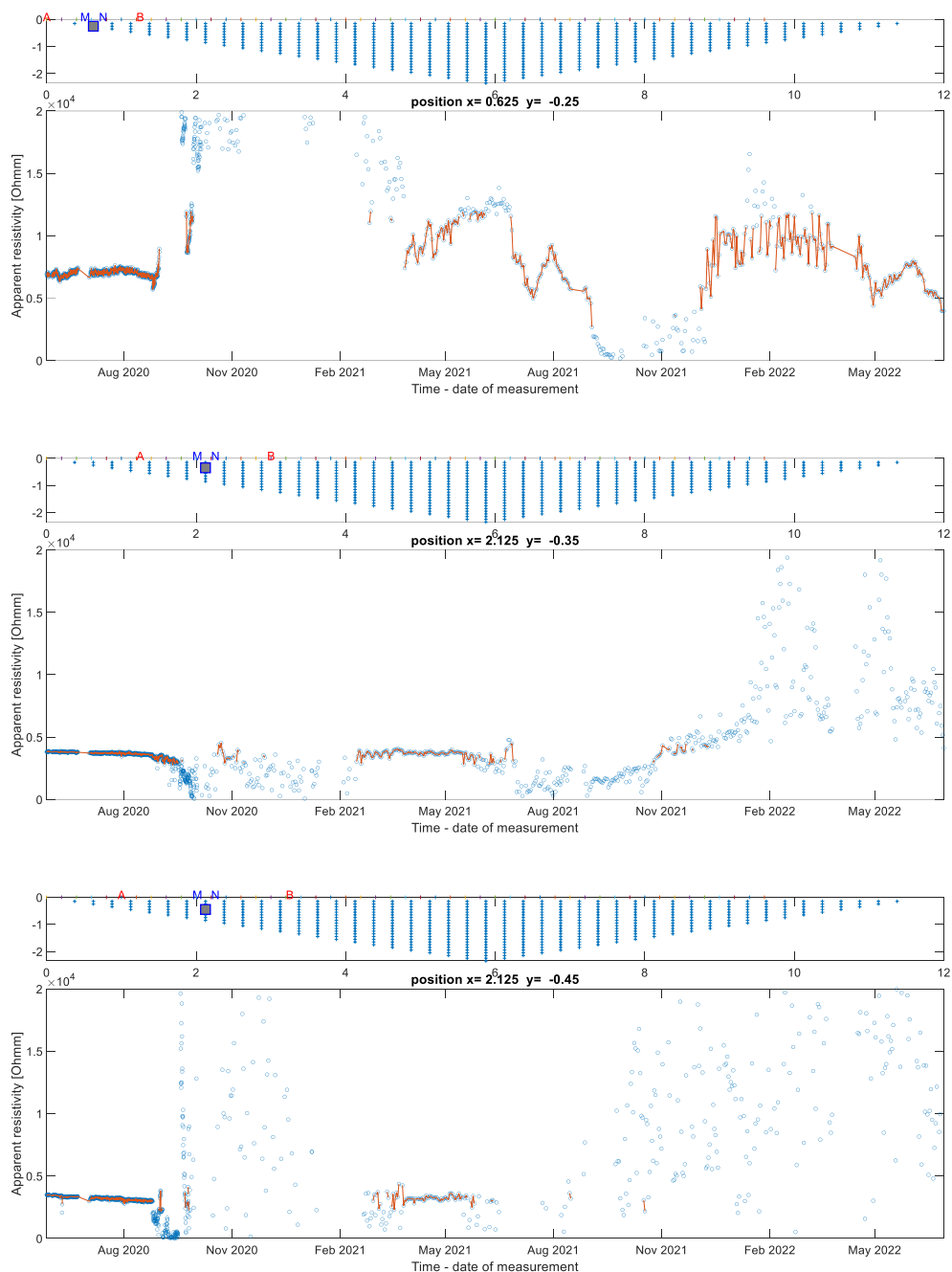
mediánu zdánlivých měrných odporů se pak omezí ještě na výrazně užší interval, a to od 1150 Ωm do 1600 Ωm . Tyto údaje hovoří o extrémně vysokém rozptylu měřených zdánlivých odporů. Výjimkou je ale počáteční období měření, kdy do cca srpna 2020 se maximální zdánlivé odpory drží na hodnotách pod 20 k Ωm .

U časové závislosti aritmetických průměrů se zdá, že nastává určitý sezónní trend. Zajímavou vlastností aritmetických průměrů je, že v období od srpna do počátku následujícího roku jsou aritmetické průměry zdánlivých odporů vyšší, zatímco ve zbylém období jsou nižší.

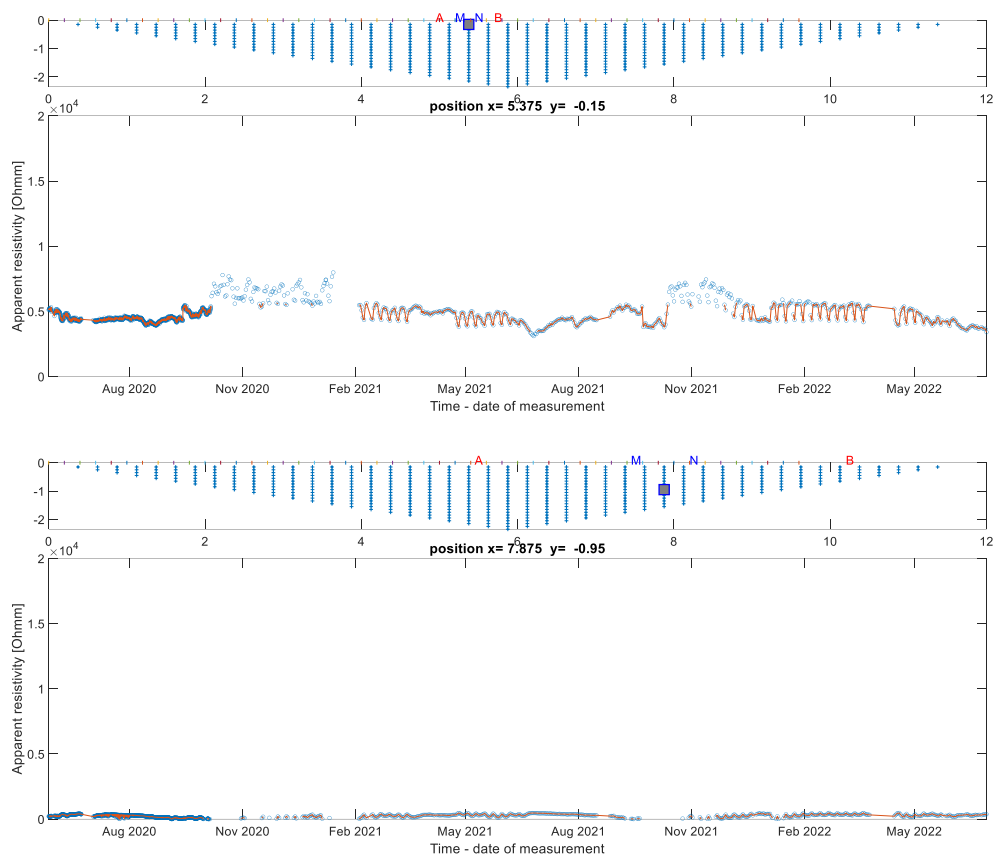
Hodnocení pomocí těchto celkových parametrů ale ve skutečnosti koresponduje pouze s vlastnostmi těch částí řezu zdánlivých odporů, kde probíhají velké časové změny. Ty části řezu, kde jsou hodnoty zdánlivých odporů víceméně stabilní takovouto sumární analýzou neovlivní a výsledky této analýzy ani neodpovídají chování těchto stabilnějších částí řezu.

Časový průběh měřeného zdánlivého měrného odporu lze konstruovat pro libovolný z 529 bodů řezu. Tento časový průběh je v některých bodech řezu klidný, jinde se dramaticky mění. V případě bodů s klidnějším průběhem lze v datech časových průběhů zdánlivého odporu identifikovat týdenní periodicitu. Na Obr. 33 je ukázka několika průběhů zdánlivých měrných odporů v bodech, kde dochází v čase k dramatickým změnám. Pro zobrazení jsou z původních dat odstraněny nulové zdánlivé měrné odpory, které aparatura ARES II ukládá v případě, že se měření zdánlivého odporu pro danou polohu a velikost čtyř elektrodového uspořádání nepodařilo. ARES II kontroluje každé měření tak, že měření napětí a proudu na elektrodách opakuje. Pokud se opakovaně stanovené zdánlivé měrné odpory významně odlišují, měření v daném bodě se nezdařilo a je uložena výsledná hodnota ρ_z v tomto místě souboru rovná nule. Tato data jsou na grafech v Obr. 33 zobrazena modrým kolečkem. Pro lepší srovnatelnost mezi jednotlivými body odporového řezu je navíc nastaven horní limit osy zdánlivých měrných odporů na 20 k Ωm . To vede k tomu, že extrémně vysoké hodnoty zdánlivých odporů jsou ze zobrazení vyloučeny.

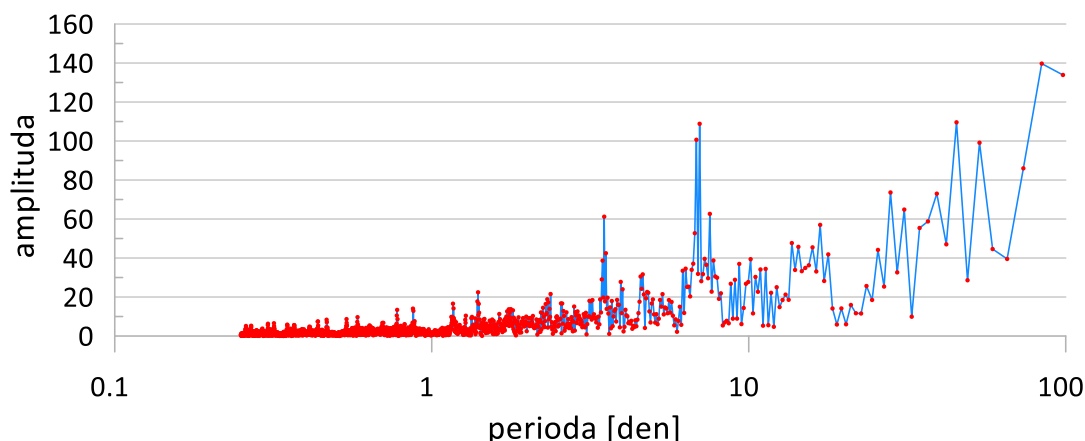
Navíc jsou pomocí červené čáry propojeny jen ty hodnoty zdánlivých měrných odporů, které nejsou tzv. odlehlé hodnoty. Odlehlé hodnoty překračují trojnásobek rozdílu mezi mediánem řady a tzv. absolutním měřítkovým rozptylem mediánu, který je definován jako $c * \text{median}(|A_i - \text{median}(A)|)$, přitom konstanta c se určí podle vztahu $c = -1/(\text{sqrt}(2) * \text{erfcinv}(3/2)) = 1.4826$ a $i=1, 2, \dots, N$, kde N je počet prvků řady. Červená čára je tak často nespojitá, ale může reprezentovat „spolehlivá data“ – tj. ta, která jsou více podobná ostatním hodnotám v řadě.



Obr. 33: Ukázka časových průběhů zdánlivého odporů ve zvolených třech bodech řezu. V horních částech je zobrazena pozice použitých elektrod a bod řezu, kam hodnotu zdánlivého odporu přiřazujeme. V daném případě se jedná o ukázkou bodů řezu, kde dochází k významným změnám zdánlivého odporů v čase.



Obr. 34: Ukázka časových průběhů zdánlivého odporů ve zvolených třech bodech řezu. V horních částech je zobrazena pozice použitých elektrod a bod řezu, kam hodnotu zdánlivého odporu přiřazujeme. V daném případě se jedná o ukázkou bodů řezu, kde dochází k významným změnám zdánlivých odporů v čase.

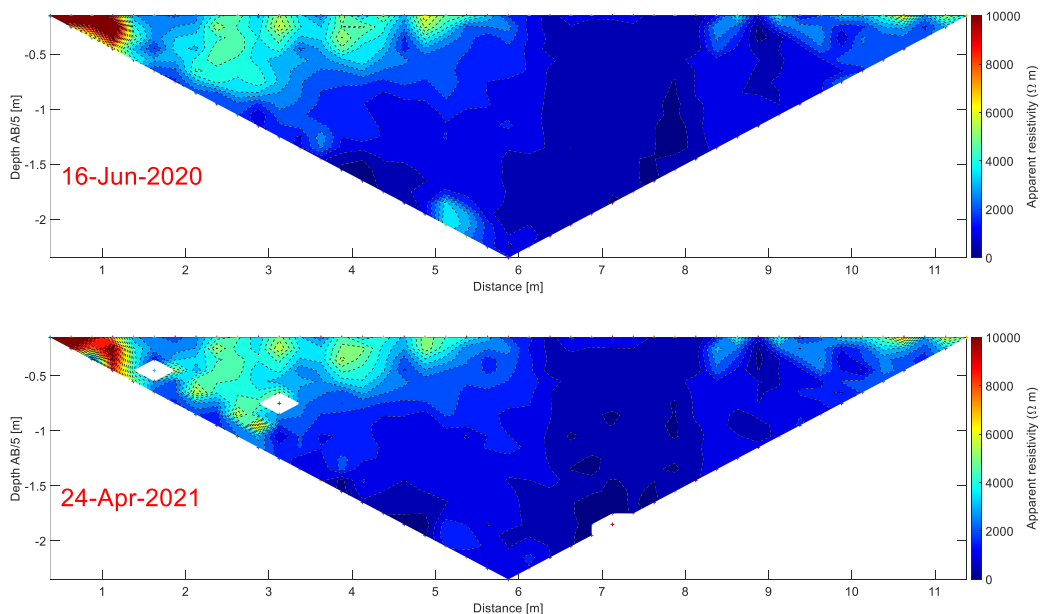


Obr. 35: Frekvenční spektrum časových řad zdánlivých odporů. Jedná se o průměr ze všech 529 bodů řezu. Osa frekvencí je vyjádřena pomocí periody vyjádřené ve dnech. Spektrum vykazuje významnou amplitudu odpovídající týdenní periodicitě.

Obr. 34 představuje ukázkou časových průběhů zdánlivých měrných odporů v bodech řezu s relativně klidným průběhem, na kterých je alespoň v některých časových intervalech patrná týdenní periodicitá.

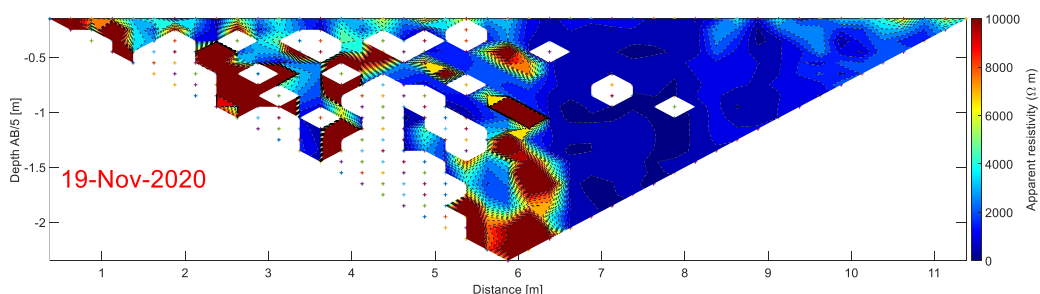
Pro úplnost je na Obr. 35 zobrazeno průměrné spektrum, spočítané ze časových průběhů ve všech 529 bodech řezu. Pro tento výpočet byly časové průběhy převzorkovány na jednotnou vzorkovací frekvenci 8 měření za den a doplněna byla data do chybějících intervalů měření. Tato interpolace byla provedena pouhým zopakováním posledních dostupných dat v každé řadě. Průměrné spektrum vykazuje významnou amplitudu na frekvenci 7 dní.

Zdánlivé měrné odpory bývá zvykem při použití metody ERT zobrazovat v podobě řezů zdánlivých měrných odporů a ty je možné přepočítat řešením obrácené úlohy na model rozložení skutečných měrných odporů, které mají stejný projev na řezu zdánlivých odporů. Řešení obrácené úlohy ale není jednoznačné, a tak se v případě použití ERT k monitorování příliš nehodí provádět interpretaci časových změn na invertovaných odporových řezech, ale spolehlivější je srovnávat mezi sebou řezy zdánlivých měrných odporů. Ukázka takového srovnání je na Obr. 36.



Obr. 36: Porovnání řezů zdánlivého odporu 16. 6. 2020 a 24. 4. 2021 – podobnost řezů ukazuje, že pokud dochází v čase ke změnám zdánlivých odporů, tyto změny jsou zřejmě vratné

Srovnání dvou řezů zdánlivých měrných odporů na Obr. 36 porovnává řезы naměřené s odstupem 312 dní. Rozložení zdánlivých měrných odporů se mezi oběma řезы mírně odlišuje, ale s ohledem na jinak velmi dramatický časový vývoj rozložení měrných odporů v období mezi časy pořízení prvního a druhého řезы, lze tyto řезы pokládat za prakticky identické. Oba zobrazené řезы spadají do období, kdy jsou hodnoty zdánlivých odporů poměrně stabilní – to lze srovnat s Obr. 32, kde data 16.6.2020 a 24.4.2021 spadají do úseků stabilních průběhů průměrné hodnoty zdánlivého měrného odporu na řезы. Jak velké jsou změny řезů v mezilehlém období dokumentuje řез na Obr. 37. Ten je vytvořen z dat pro den 19.11.2020, což je datum odpovídající polovině intervalu mezi daty řезů z Obr. 36. Na Obr. 32 spadá toto datum do intervalu značně proměnlivého a v absolutní hodnotě významně vyššího průměru hodnot zdánlivých měrných odporů na řезы.

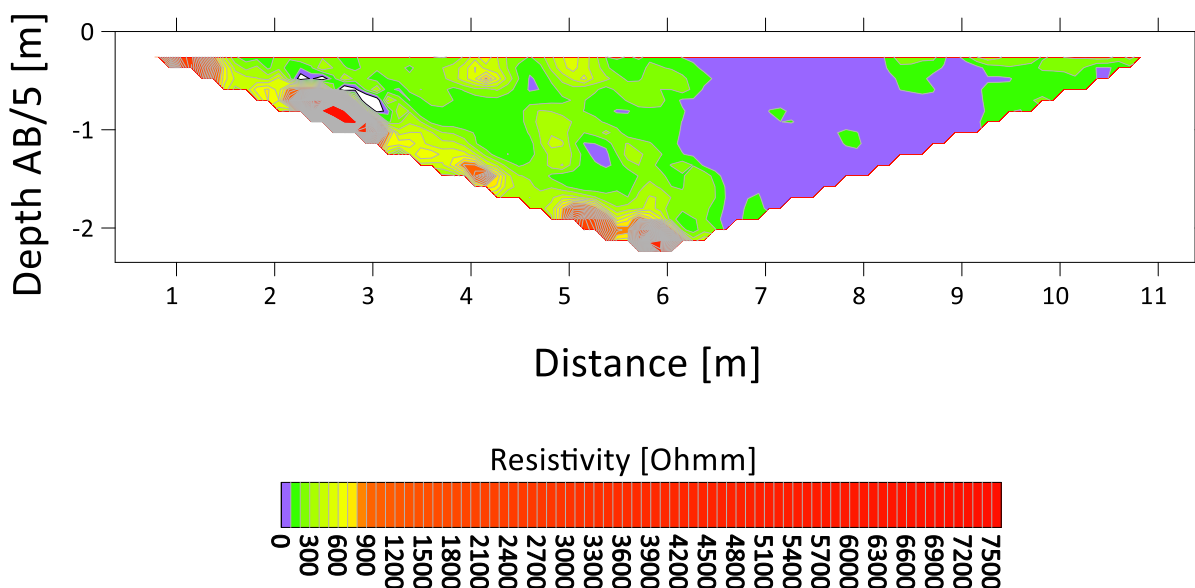


Obr. 37: Ukázka řезы zdánlivého odporu z období vyšších absolutních hodnot odporů a vyšší variability průměrů na řезы (viz obr. 2). Místa řезы bez barevné výplně odpovídají bodům, kde ARES II zdánlivý měrný odpor nenašel.

Pro rychlé kvalitativní posouzení časových změn řezů zdánlivých měrných odporů byl celý soubor jednotlivých řezů sestaven do video souboru, kde každý snímek videa představuje jednotlivý řez. Tento typ zobrazení byl realizován jednak ve formě přehledu všech naměřených dat, kdy jsou v počátečním období měřeny řezy 8x denně a později jen 1x denně. Pokud v nějakém dni nebo období registrace neběžela, nebo jsou data poškozená, chybějící řezy nejsou nijak doplňovány. Protože takto konstruované video nezachovává představu o dynamice změn, bylo vytvořeno i alternativní zobrazení, kdy je ve videu pro každý den vytvořen jeden snímek řezu. Ve dnech s více měřeními je spočítán průměrný řez, dny bez měřených dat jsou doplněny posledním známým řezem. Videosoubory byly odevzdány spolu s dalšími datovými soubory objednateli.

Zobrazení řezů s pomocí videa umožňuje kvalitativní hodnocení řezů z hlediska stability nebo naopak proměnlivosti hodnot zdánlivých měrných odporů. Ukázalo se, že zhruba polovina řezu v nízkých metrážích vykazuje výraznou časovou proměnlivost. Naproti tomu zhruba od metráže 6,5 m směrem k vyšším metrážím po metráž cca 9,5 m jsou zdánlivé měrné odpory poměrně v čase stabilní.

Kvantitativně lze variabilitu hodnot zdánlivých měrných odporů v jednotlivých bodech řezu vyjádřit pomocí standartní odchylky časové řady naměřených hodnot v jednotlivém bodu řezu (standartní odchylka je odmocnina ze sumy čtverců rozdílů jednotlivých hodnot od průměru dělené počtem bodů). V jednotlivých 529 bodech řezu tak získáme stejný počet standartních odchylek a ty pak zobrazíme formou vybarvených izolinií – viz Obr. 38.



Obr. 38: Rozložení velikosti standartních odchylek zdánlivých měrných odporů v jednotlivých bodech odporových řezů, zpracováno pro celé období monitoringu, tj. pro všechny dostupné řezy.

Rozložení standartních odchylek na Obr. 38 přesvědčivě dokumentuje stabilní chování zdánlivých měrných odporů na řezu v úseku metráží od 6,5 do 9,5 m. Extrémní hodnoty standartních odchylek se projevují na spodním šikmém okraji řezu směrem do nízkých

metráží. To by mohlo souviset s podmínkami v okolí elektrody/elektrod na úplném počátku profilu. Stabilní úsek řezu sousedí na straně nízkých metráží s puklinovou zónou, která je makroskopicky viditelná mezi elektrodami na metrážích 6 a 6,25 metru. Tato puklinová zóna tak zřejmě odděluje dvě části stěny, z nichž jedna má odporově stabilní chování a druhá se vyznačuje v čase výrazně proměnlivými zdánlivými odpory.

2.3.1 Týdenní periodicitu v datech aktivní seismiky a ERT

Jak bylo zmíněno výše, naměřená data aktivní seismiky i časové změny zdánlivých měrných odporů vykazovala týdenní periodicitu. Tato periodicitu je specifická tím, že potvrzuje svůj původ v lidské činnosti. Přírodní děje tuto periodicitu nevykazují. Proto bylo při hledání původu těchto změn hledáno něco, co souvisí s pracovní činností ve spojitosti s podzemními prostory dolu Rožná a PVP Bukov. Jedním z takových zcela pravidelných procesů s týdenní periodicitou je důlní větrání.

Podle Kubici a Kroula (2013) v OKD platí, že teplota větrů v místě dostatečně vzdáleném od jejich vtahu do dolu je celoročně stálá a je rovná teplotě okolních hornin. Dostatečně vzdálené místo je označené vzdáleností asi 2 000 m od vtahu. Asi lze předpokládat, že obdobná je i situace v PVP Bukov.

Protože v PVP Bukov probíhá v souvislosti s jinými experimenty měření teploty, poskytlo nám SURAO, Ing. Smutek, data z měření teplot a vlhkosti vzduchu a informace o provozu důlního větrání. Konkrétně se jednalo o tato data:

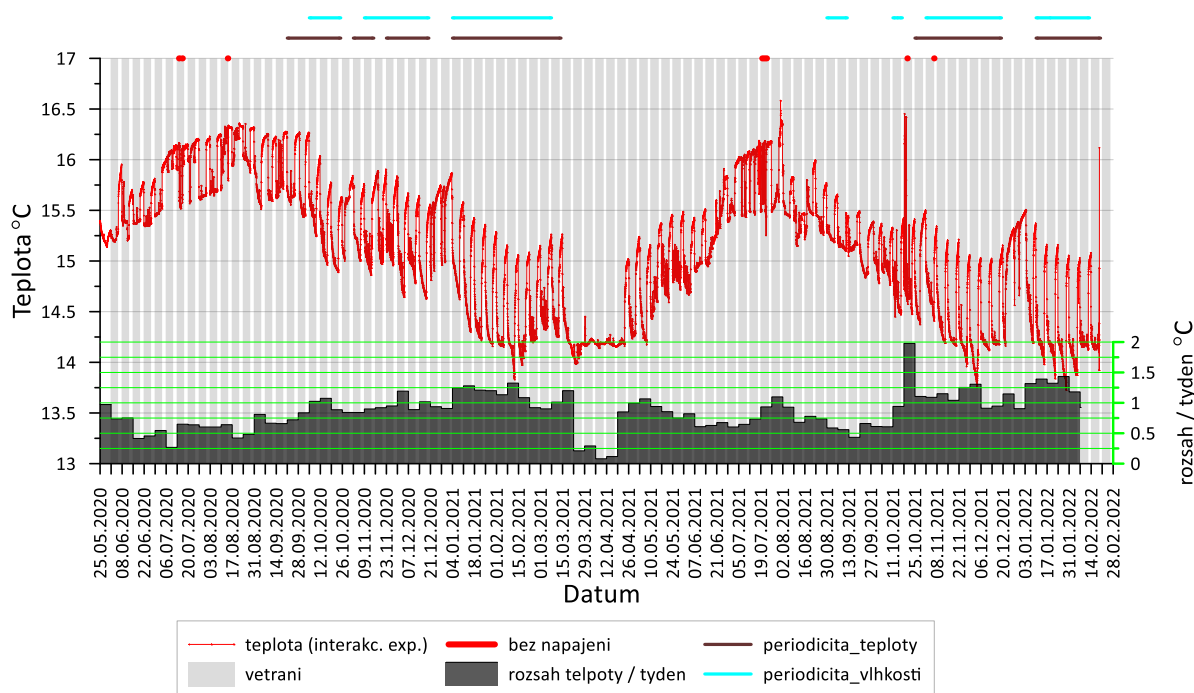
1. teploty a vlhkosti z interakčního experimentu
Místo měření: ZK – 3S, na stěně chodby nad tepelným experimentem
Data: od února 2019 do února 2022
Čas: používají UTC
Jde o datové soubory:
 - a. teploměry v rozrážce – teploty s krokem v čase většinou 1 minuta,
 - b. teploty u vlhkoměru - vlhkoměru teploty s krokem většinou po 5 minutách
 - c. vlhkosti vzduchu – data po 5 minutách
2. teploty z Hydro-monitoringu
Období: rok 2020
Krok: 1 den – tj. 365 hodnot
Data: většina dat jsou odtoky z konkrétních vrtů, měření teploty jen výjimečně na těchto místech:
 - a. BK18
 - b. BZ-XIIJ – jen část roku, měřena i vlhkost
 - c. VrK-1 – jen část roku, měřena i vlhkost
 - d. ZK-3S – jen část roku, měřena i vlhkost
3. Informace o důlním větrání – pravidelná funkce větrání:
 - a. 2019 a 2020:
 - i. zapnutí hlavní: v neděli v 19 hodin

- ii. zapnutí separátní: v neděli ve 21 hodin
- iii. vypnutí hlavní i separátní: pátek ve 14 hodin
- b. 2021:
 - i. zapnutí hlavní: v neděli v 19 hodin
 - ii. zapnutí separátní: v neděli ve 21 hodin
 - iii. vypnutí hlavní: sobota v 5:40 hodin
 - iv. vypnutí separátní: sobota v 5:10 hodin

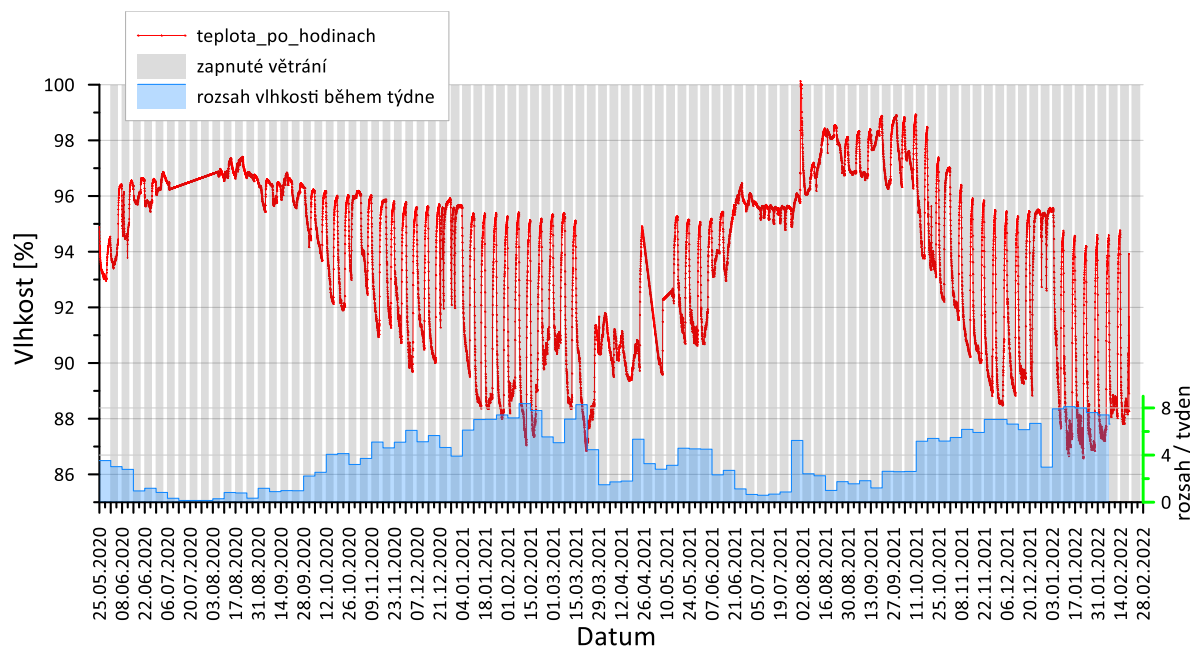
Došlo také k několika plánovaným přerušením napájení, které způsobily krátkodobé přerušení pravidelného cyklu větrání.

Z dat o teplotách jsme využili teploty a vlhkosti z interakčních experimentů a omezili jsme se na období od 25. 5. 2020, kdy začalo pravidelné monitorování pomocí SGI1.

Graf teplot měřených v rozrážce ZK-3S, kde byl realizován interakční experiment je na Obr. 39. Ze stejného místa je i graf průběhu relativní vlhkosti na Obr. 40.

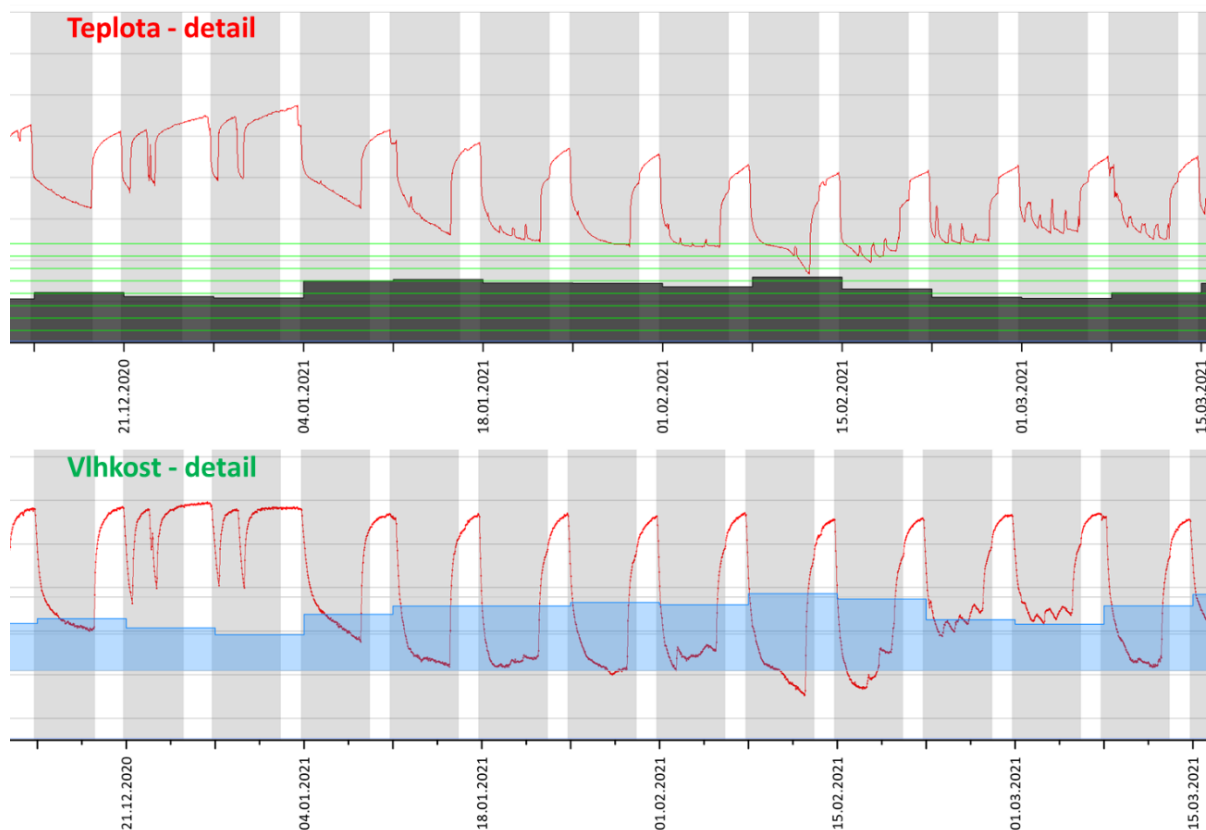


Obr. 39: Časový průběh teplot v rozrážce ZK-3S z měření v rámci projektu Interakční experimenty. Teploty – převzorkování na interval po 1 hodině. Světle šedé podbarvení indikuje interval funkčního důlního větrání. Tmavě šedý sloupcový graf indikuje změny rozsahu teploty (rozdíl mezi maximem a minimem) během jednoho pracovního týdne



Obr. 40: Časový průběh relativní vlhkosti v rozrážce ZK-3S z měření v rámci projektu Interakční experimenty. Světle šedé podbarvení indikuje interval funkčního důlního větrání. Modrý sloupcový graf indikuje změny rozsahu vlhkosti během jednoho týdne

Grafy změn teploty a vlhkosti v čase z PVP Bukov ukazují, že teplota se mění v souvislosti s činností důlního větrání. Větrání má týdenní cyklus, kdy přes víkend je vypnuté a během pracovního týdne zapnuté. Pro větší názornost je na Obr. 41 krátká ukázka detailního průběhu změn teploty a vlhkosti.



Obr. 41: Ukázka detailu časového průběhu teploty a relativní vlhkosti z Obr. 40. Graf dokumentuje období změny důlního větrání na přelomu let 2020 a 2021 – rozdíl je v postupném vypínání v roce 2021, ve srovnání s jediným časem vypnutí v roce 2020.

Pokud dojde k zapnutí větrání, skokově poklesne teplota i vlhkost. Tento jev je značně komplexní, protože při pouhém snížení teploty, při zachování stejného objemu vody ve vzduchu by došlo ke zvýšení relativní vlhkosti. Zde ale dochází ke snížení teploty výměnou vzduchu větráním. Navíc se relativní vlhkost pohybuje blízko svého maxima, a tak lze očekávat, že při poklesu teploty může dojít ke kondenzaci vody.

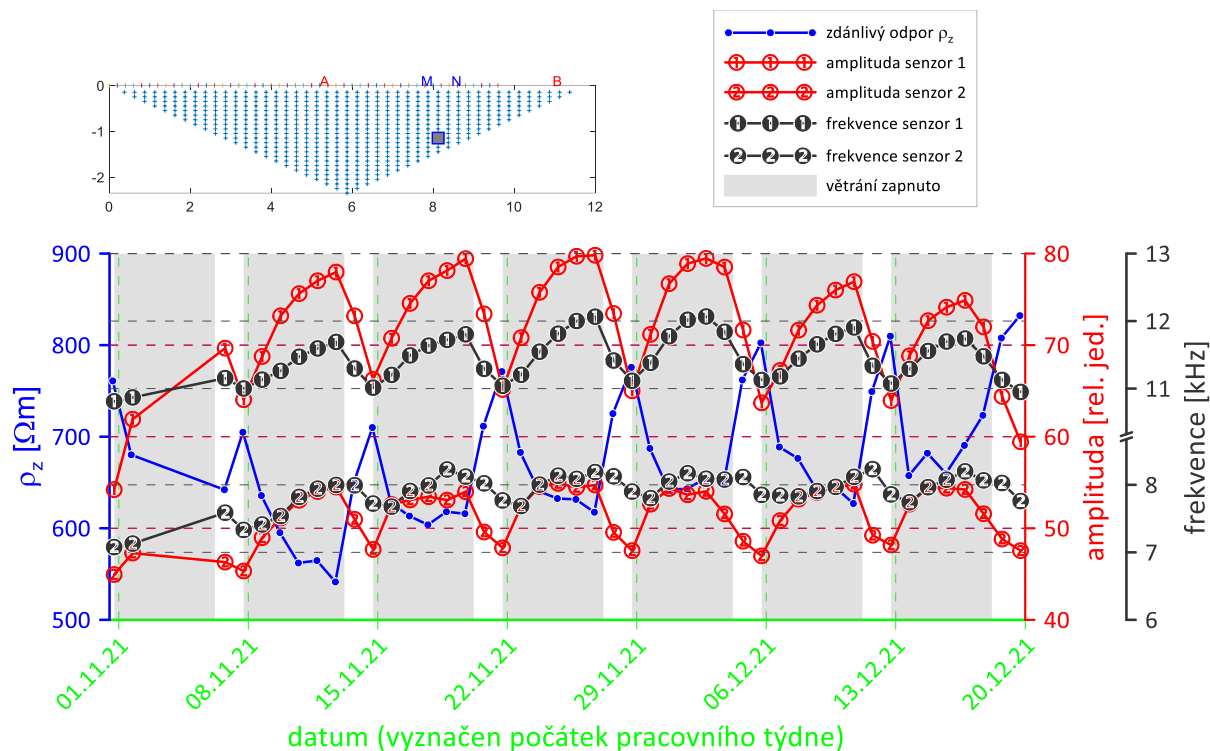
Amplituda poklesu teploty po zapnutí větrání se během roku nepravidelně mění, maximálně dosáhne cca 1 °C, obvykle je to méně. Při zapnutém větrání dochází k dalšímu pozvolnému poklesu teploty. Tento pokles je poměrně často značně nepravidelný (vykazuje rozptyl). Spíše výjimečně probíhá pokles pravidelně a má někdy lineární charakter, někdy se koncem pracovního týdne rychlost poklesu teploty snižuje. Po vypnutí větrání dochází ke skokovému zvýšení teploty. V letech 2019–2020, kdy bylo v jeden okamžik odpojené hlavní i separátní větrání, je skokové zvýšení jedno a odpovídá času vypnutí větrání. Od roku 2021, kdy se postupně vypíná nejprve separátní větrání a až potom hlavní větrání, někdy se tento skokový nárůst rozděluje na dva skoky (viz Obr. 39 a Obr. 40). To bylo patrné zejména v první polovině roku 2021, od druhé poloviny roku 2021 to pozorovatelné není. Během intervalu bez větrání pak pokračuje pomalý nárůst teploty. Minimální a maximální teploty v tomto týdenním cyklu se během roku mění v rozmezí cca 3°C.

Na průběhu teplot jsou vidět i různé nepravidelnosti. Pokud mají skokový charakter, mohlo by se jednat o jiný čas vypnutí/zapnutí větrání. Řada změn má malou amplitudu, a tak mají možná náhodný charakter. Graf časového průběhu vlhkosti vykazuje mírně menší náhodný rozptyl než teplota, ukazuje ale podobnou týdenní periodicitu v závislosti na důlním větrání. Při zapnutí větrání dochází ke skokovému poklesu vlhkosti. V průběhu větrání během pracovního týdne pak vlhkost ještě klesá. Při vypnutí větrání vlhkost velmi rychle stoupne a v období bez větrání pak ještě roste, ale pomaleji. Amplituda týdenní periody je až 8 %, rozsah vlhkostí za celé období měření je cca 86–99 %, což je relativní vlhkost velmi blízká kondenzaci.

Jak průběhy teplot, tak vlhkostí ukazují, že vypínání a zapínání větrání neprobíhalo vždy v plánovaných časech. Šlo by to zřejmě v případě potřeby dohledat v Knize o výkonu inspekční služby.

Grafy časového průběhu monitoringu teploty a vlhkosti na Obr. 39 a Obr. 40 ukazují, že amplituda periodických změn se v čase mění. Existují časové intervaly, kdy je amplituda periodického děje velká v porovnání s jinými intervaly, kdy je tato amplituda malá.

Týdenní periodicitu z dat monitoringu seismického prozařování a z monitoringu ERT, zmíněná v předchozích částech, rovněž ukazuje, že amplitudy periodického děje se v čase mění. Dokonce se ukazuje, že týdenní periodicitu je v některých intervalech nepozorovatelná. Na Obr. 42 je pro vybraný časový interval od 1.11.2021 – 20.12.2021, kdy mají projevy periodicity vyšší amplitudy, uvedena ukázka časového průběhu zdánlivých měrných odporů v jednom konkrétním bodě odporového řezu a dále periodicitu vybraných parametrů, odvozených z aktivního seismického monitoringu.

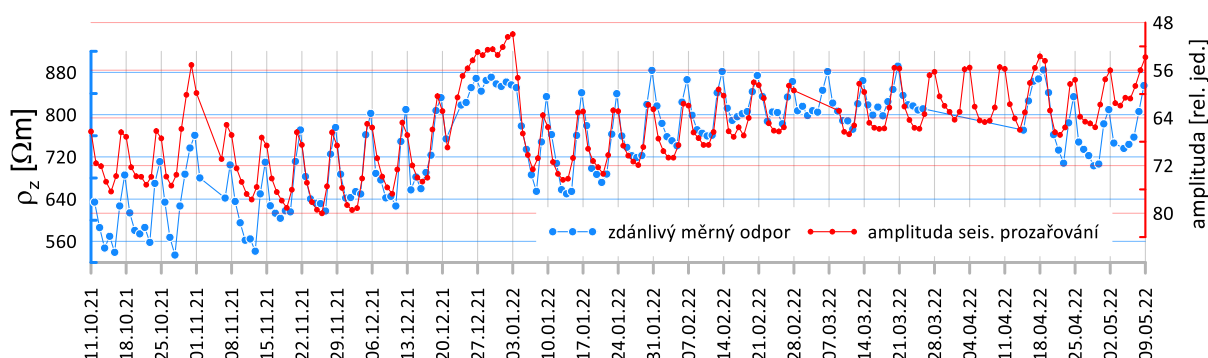


Obr. 42: Ukázka detailu časového průběhu zdánlivého měrného odporu, amplitud signálů prozařování a jejich frekvencí (část signálu odpovídající S1-kódě). Vybrán časový interval s výraznou periodicitou. Zdánlivý měrný odpor odpovídá poloze elektrod uvedené na vloženém schématu nahoře. Proveden výpočet denních průměrů seismických parametrů k času 18:00, v tomto čase jsou denní hodnoty vynášeny. Zdánlivé měrné odpory jsou vynášeny v čase měření, tj. v cca. 17:00.

Časový průběh uvedených veličin ve vztahu k jejich týdenní periodicitě vede k několika zobecněním. Poznamenejme, že jde o analýzu týdenních průběhů zdánlivých měrných odporů a veličin odvozených z aktivního seismického prozařování, a to v intervalech, kde je týdenní periodičita zjevná.

1. Amplitudy signálů seismického prozařování (S1-kóda – vysvětlení je v další části textu) na senzorech 1, 2 a 3 mají minima v neděli. Na senzoru 3 je minimum méně zřetelné (na grafu Obr. 42 není křivka amplitud pro senzor 3 uváděna). Týdenní maximum je na senzorech 1 a 2 většinou v pátek, ale maximum je méně ostré než minimum. Časový průběh na senzoru 3 má zjevnou týdenní periodicitu, ale jeho průběh je více ovlivněn šumem. Rozsah mezi amplitudovým minimem a maximem je na senzoru 1 do cca 20 rel. jednotek, na senzoru 2 je cca do 10 rel. jednotek.
2. Frekvence nejvýznamnější komponenty spektra signálu seismického prozařování má vizuálně patrnou periodicitu jen na záznamech ze senzorů 1 a 2. Minima frekvencí nastávají na senzoru 1 většinou v neděli. Periodičita na senzoru 2 je méně výrazná, minimum obvykle nastává v podělí. Na senzoru 3 je periodičita málo zřetelná.

- Maximální hodnoty zdánlivých měrných odporů nastávají v neděli. Rozdíl mezi ρ_z ve všední den a o víkendu je v období na Obr. 42 odhadem ve vyšších desítkách až prvních stovkách Ohmm.
- Mezi průběhem zdánlivých měrných odporů a amplitudou signálů prozařování (S1-kóda) je velmi dobrá záporná korelace. Graf na Obr. 43 je ukázkou podobnosti týdenní periodicity obou veličin. Na tomto obrázku je do jednoho grafu zobrazen časový průběh zdánlivých měrných odporů a záporně vzaté maximální amplitudy signálu prozařování S1-kódy na senzoru 1. Měřítko obou veličin a vzájemný posun vertikálních os jsou ručně nastaveny tak, aby v určitých částech signálu byl zřetelný jejich velmi podobný časový průběh.



Obr. 43: Ukázková korelace mezi časovým průběhem zdánlivého měrného odporu a záporně vzatými amplitudami signálů prozařování (S1- kóda).

Celkovou informaci o periodicitě shrnuje následující Tabulka 3:

Tabulka 3: Týdenní periodičita

	teplota	vlhkost	ρ_z	seis. amplituda (senzor 1)	seis. frekvence (senzor 1)
neděle			max	min	min
neděle – před zapnutím větrání	max	max			
pátek			min	max	max
pátek nebo sobota těsně před vypnutím větrání	min	min			

Poznámka: Cyklus důlního větrání neděle-pátek spočívá ve vypnutí větrání v pátek ve 14 hodin. Při cyklu větrání neděle-sobota je větrání vypojeno v sobotu v 5:40. Zapínání větrání je prováděno v neděli večer. Seismická prozařování se realizují 4krát denně: 0:00, 6:00, 12:00 a 18:00. Měření ERT se realizuje jednou denně v 17 hodin. Aby bylo možné lépe porovnávat vliv větrání a měřené parametry, byly pro účely srovnání periodicit počítány denní průměry seismických signálů výpočtem průměru z časů měření v 6:00, 12:00, 18:00, 0:00 a 6:00 hodin.

Pokud srovnáme periodicitu teploty a vlhkosti vzduchu s průběhem změn zdánlivých měrných odporů, ukazuje se, že nejvyšší teploty i vlhkosti jsou v neděli večer před zapnutím větrání. Zdánlivé odpory v tuto chvíli nabývají svého maxima. Od nedělního maxima teplota i vlhkost prudce klesají a klesá i zdánlivý měrný odpor. Prudký pokles teploty, vlhkosti i odporů se odehraje v počátku týdne, pak se už teplota, vlhkost ani odpor příliš nemění, někdy lze pozorovat stálý pomalý pokles odporu, méně teploty a vlhkosti. Po vypnutí větrání teplota i vlhkost rychle rostou a současně roste i zdánlivý měrný odpor.

Na seismických datech pozorujeme maxima amplitud a frekvencí v pátek (odpovídá to nižší úrovni útlumu) a během období bez větrání dojde k rychlému poklesu k minimu amplitud a frekvencí (což odpovídá zvýšenému útlumu) v neděli.

Jednou z možností, jak toto chování vysvětlit je to, že ve fázi zahájení větrání dochází díky poklesu teploty vzduchu ke kondenzaci vody. Ta může zaplnit pórový prostor v trhlinách, a tak zmenšit útlum seismických vln. Přesto, že kondenzující voda má vlastnosti destilované vody, dojde ke snížení elektrického odporu, protože v puklinovém prostředí voda propojí trhliny, které při menším obsahu vody nebyly propojené. Po vypnutí větrání se voda začne odpařovat, a tak se zvětší seismický útlum a stoupne elektrický měrný odpor.

Tyto výsledky dokumentují důležitost kombinace seismických a elektrických odporových metod. Snižování seismického útlumu by mohlo být interpretováno jako důsledek rostoucího napětí v hornině, které by vedlo k sevření trhlin. Protože je ale tento jev doprovázen snížením měrných odporů, musí být snížení seismického útlumu interpretováno jako důsledek zaplnění puklinového systému vodou, nikoliv sevřením puklin.

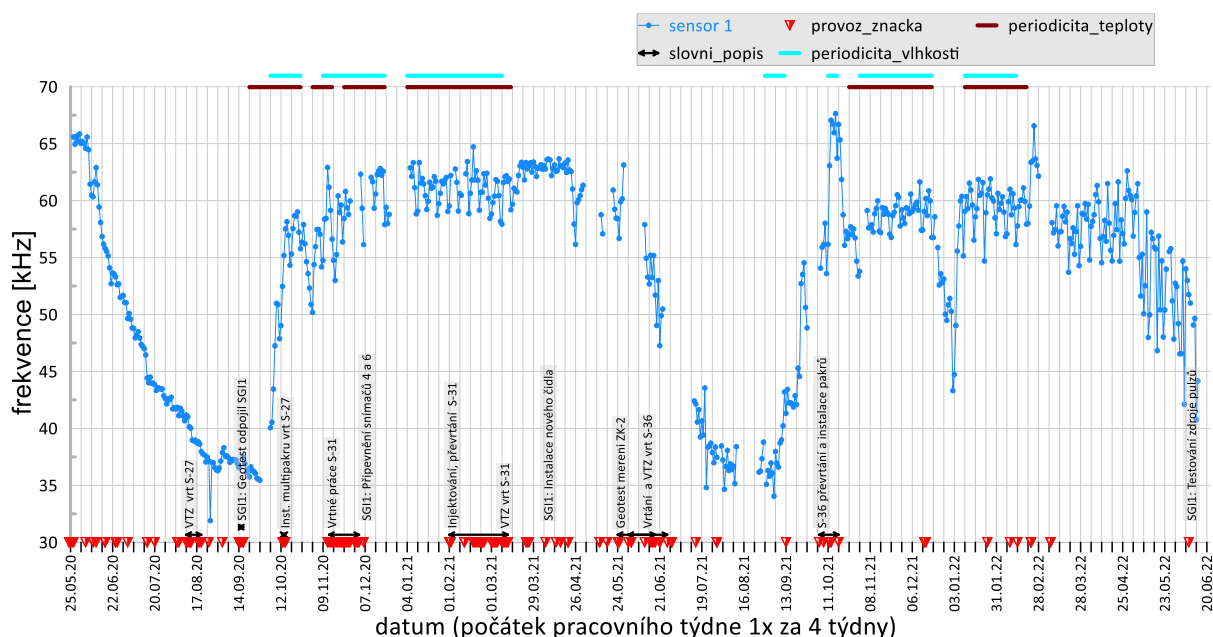
Odhad hloubkového rozsahu periodických změn

Na základě konkrétní velikosti uspořádání elektrod pro odporové měření lze odhadnout, že pozorované periodické změny zdánlivých měrných odporů by mohly zasahovat až do hloubky cca 1 m od stěny chodby. V případě metody ERT je ale nutné počítat s tím, že na měřené zdánlivé měrné odpory má vždy největší vliv prostředí v těsném okolí elektrod, tedy bezprostředně pod povrchem stěny důlní chodby. Při zvětšování velikosti uspořádání elektrod se do měřeného zdánlivého měrného odporu promítají i odporové vlastnosti hlubšího prostředí, ale vliv těchto hlubších partií se pouze přidává k vlivu mělkého prostředí. Vliv odporových vlastností hlubších částí řezu je vždy výrazně slabší než vliv přípovrchového prostředí. Obecně tak z metody ERT nelze přímo odvodit, do jaké hloubky pronikají změny odporu způsobené vlivem důlního větrání.

Hloubkový dosah seismického prozařování je možné odhadovat jednak na základě vlnové délky elastických vln, použitých k prozařování, a dále je možné pokusit se provést analýzu kódy vlnění.

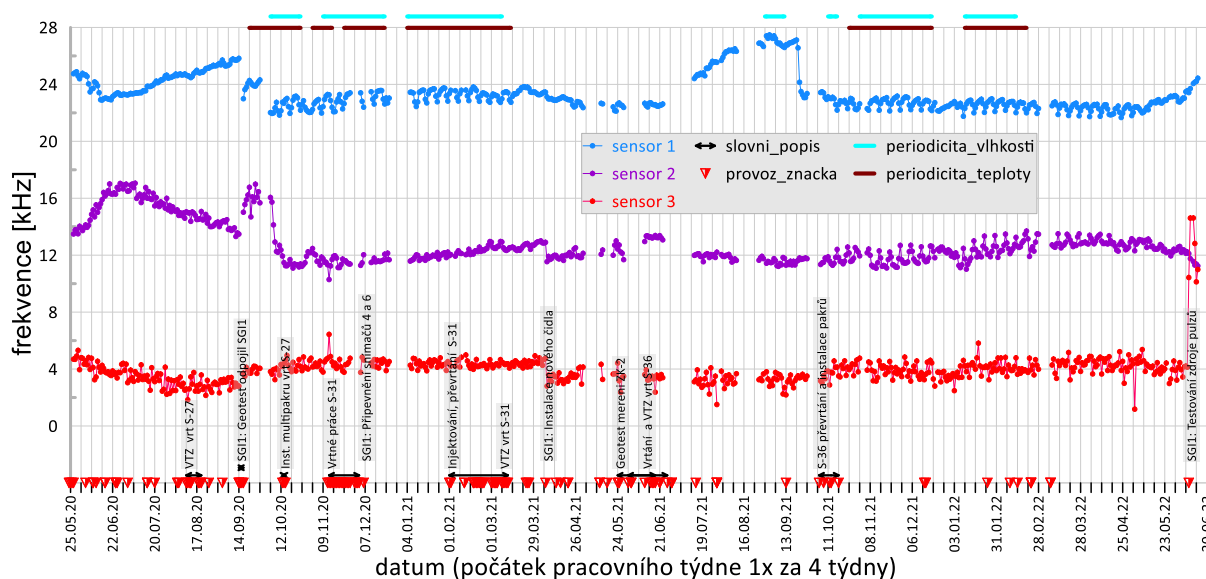
Pokud jde o odhad pomocí vlnové délky, přibližně lze shrnout, že pro snímač nejbližší ke zdroji je frekvence počáteční části signálu cca 60 kHz. Při výše zmíněné rychlosti P vln cca 4200 m/s vychází vlnová délka 7 cm. Protože lze pozorovat týdenní periodicitu frekvence P vlny (alespoň v určitých časových intervalech, viz Obr. 44), musí být minimálně vrstva o mocnosti

srovnatelné s délkou vlny ovlivněna týdenní periodicitou. Proto lze uvažovat o minimální tloušťce ovlivněné vrstvy cca 10 cm. Příchod P vln na další dva senzory je výrazně poznamenán malou amplitudou přímé P vlny a nelze spolehlivě určovat vlastnosti této vlny.



Obr. 44: Průběh frekvence nejvýznamnější frekvenční komponenty P vlny (aktivní seismické prozařování, počáteční část signálu – kolem příchodu P vlny) na senzoru 1.

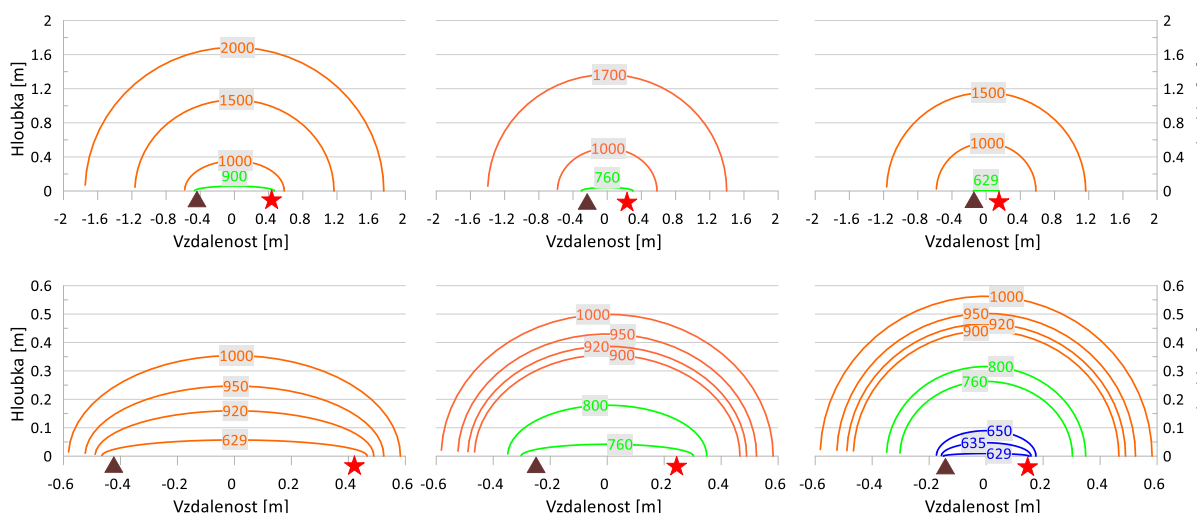
Pokud provedeme analýzu frekvenčního obsahu přímé S vlny, lze spolehlivě zjistit periodicitu na senzorech 1 a 2 (viz Obr. 45). Frekvence na senzorech jsou kolem 22 a 12 kHz. S uvažováním rychlosti S vln cca 2300 m/s by vycházela vlnová délka kolem 10 a 20 cm, a to odpovídá i možnému rozsahu ovlivnění prostředí.





Obr. 45: Průběh frekvence nejvýznamnější komponenty S vlny (aktivní seismické prozařování) na senzorech 1, 2 a 3).

K odhadu velikosti oblasti ovlivněné periodickými týdenními změnami teploty a vlhkosti lze využít i analýzu S-kódy (Bachura 2013). Jako S-kódu označujeme interferenční vlnění, které je amplitudově nejvýznamnější částí vlnových záznamů a přichází po S vlnách. Jestliže například pro první senzor uvažujeme, že na zaznamenaném seismogramu S vlny končí někde v čase kolem 150 μ s po vyslání zdrojového pulzu, pak za S-kódu považujeme zbylé vlnění, v našem případě do konce záznamu o celkové délce cca. 10 ms. Lze si představit, že vlnění, které se šíří od seismického zdroje se na nehomogenitách prostředí rozptýluje a pak se šíří všemi směry, tedy i k registračnímu senzoru. Když uvažujeme o velikosti oblasti, ze které se do daného času t_{\max} mohou dostat rozptýlené vlny k registračnímu senzoru, platí, že součet časů od zdroje do místa rozptýlu a odsud zpět k registračnímu senzoru musí být menší nebo roven t_{\max} . Tato oblast má podobu elipsoidu s ohnisky ve zdrojovém a přijímacím senzoru. Pokud tedy zvolíme signál kódy do času t_{\max} , lze uvažovat o tom, že odpovídající elipsoid představuje největší možnou oblast, která má vliv na registrované vlnění kódy. Když se hovoří o S-kóde, při stanovení velikosti elipsoidu použijeme rychlost S-vln.

Jako ukázkou využití analýzy S-kódy již byl uveden příklad analýzy maximálních amplitud S-kódy zvolené délky trvání 1 ms, kterou označujeme S1-kóda – viz Obr. 42. Pro ilustraci objemu prostředí, ze kterého pocházejí analyzované vlny je na Obr. 46 uvedena trojice schémat, které ukazují velikost elipsoidu, který představuje zdrojovou oblast vlnění S1-kódy pro tři přijímací senzory v různých vzdálenostech od zdroje, v soulase s geometrií realizace prozařování v PVP Bukov.



Obr. 46: Ukázka objemu prostředí, který odpovídá zdrojové oblasti S1-kódy. Vysílací senzor , přijímač , zobrazeny 3 grafy pro 3 vzdálenosti vysílač – přijímač podle terénní geometrie v PVP Bukov. Popis u křivek je čas v μs , přitom čas vyslání zdrojového pulsu je $500\mu\text{s}$.

Nahore: celkový přehled rozsahu objemu S1-kódy; dole: detail horního obrázku s omezením času na $1000\mu\text{s}$.

Obrázek Obr. 46 ukazuje pro všechny tři vzdálenosti mezi vysílacím senzorem a přijímačmi senzory oblast, ze které přicházejí vlny od jednotlivých zdrojů disperze k přijímačmu senzoru v čase, který odpovídá popisu jednotlivých elips na obrázcích. Přitom se uvažuje, že čas vyslání zdrojového impulsu je $500\mu\text{s}$ (použitý způsob popisu osy času SGI 1). Přímá S vlna od zdroje by přišla k senzoru 1 za cca. $129\mu\text{s}$, tedy v čase $629\mu\text{s}$. Proto je objem elipsoidu s kótou 629 na pravém obrázku minimální, pro tento čas nemohou S vlny do senzoru 1 přijít jinak, než po zhruba přímé dráze od zdroje. Elipsoid se tak redukuje prakticky na úsečku mezi zdrojem a senzorem 1 – viz dolní část Obr. 46, vpravo. Tak, jak se prodlužuje čas šíření, zvětšuje se objem prostředí, odkud mohou do senzoru 1 dorazit vlny, rozptýlené od nehomogenit prostředí. Pro vyšší časy t_{max} se tvar elipsoidu blíží kružnici, a to tím rychleji, čím jsou vysílač a přijímač blíže k sobě. Zvolená varianta kódy označovaná jako S1-kóda odpovídá tomu, že za kódu bereme vlnění zaznamenané za přímou S vlnou, o trvání $1000\mu\text{s}$.

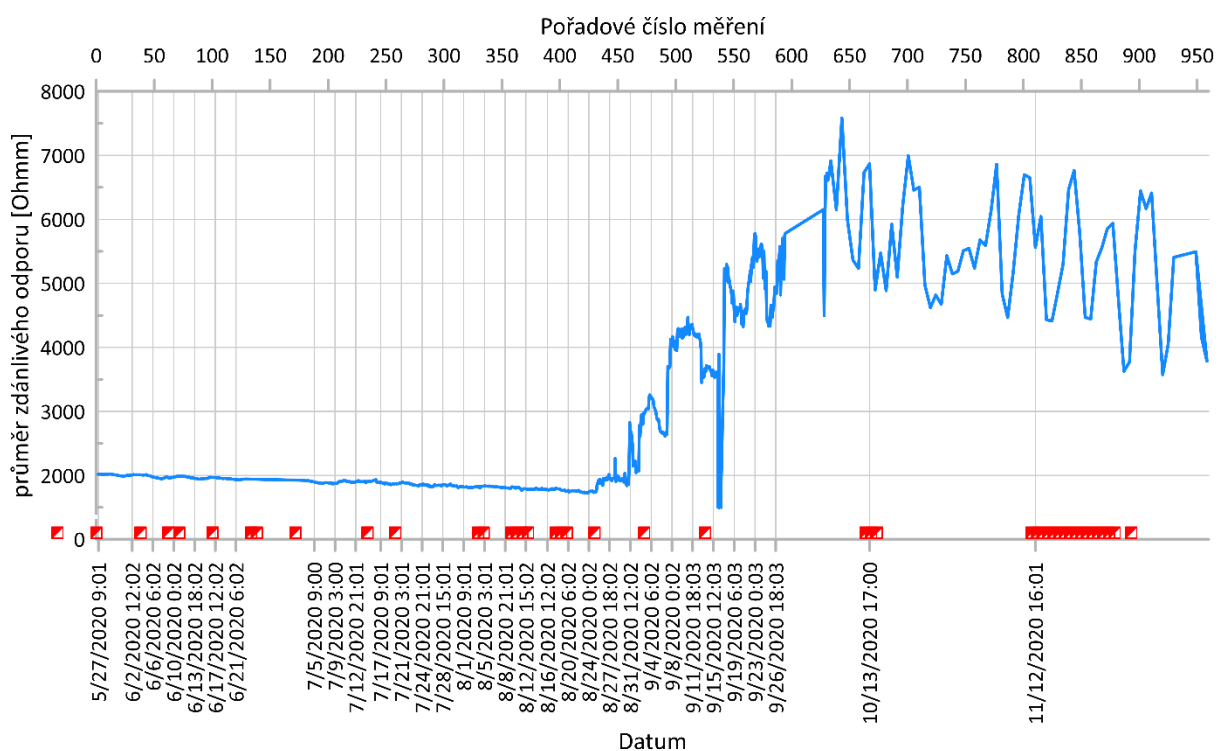
V tomto případě se ukázalo, že vlnění zaregistrované na všech třech snímačích je ovlivněno týdenní periodicitou měnících se vlastností horninového masivu v důsledku periodicity důlního větrání (viz předchozí analýza týdenní periodicity). Kdybychom v daném případě stanovili parametry elipsoidů, které odpovídají zvolené délce S1-kódy, zasahovaly by v případě senzoru 3 do hloubky až 1,6 metrů. Jedná se pouze o odhad maximální možné hloubky ovlivnění vlastností prostředí, skutečná hloubka ovlivnění může být i menší. Bylo zjištěno, že při dalším prodloužení použité části signálu použité pro stanovení vlastností S-kódy se pro senzory 1 a 2 amplituda periodické změny již nezvyšuje. Naproti tomu pro senzor 3 se amplituda periodických změn ještě zvýšila.

2.3.2 Souvislost výstupů monitoringu pomocí SGI 1 s pracovní aktivitou v PVP

Vedle zmíněné analýzy změn, souvisejících s týdenní periodicitou větrání, systém SGI 1 zaregistroval i řadu změn monitorovaných parametrů, které jsou často amplitudově výraznější než výše popisovaná týdenní periodicitu.

Zjištěny byly například amplitudově velmi výrazné změny zdánlivých měrných odporů, které pravděpodobně souvisejí se změnami sycení puklinových kolektorů vodou. Specifikem puklinového kolektoru z hlediska jeho odporových vlastností je to, že měřené odpory mohou být ovlivňovány vzájemným propojováním anebo přerušením propojení mezi puklinami nebo puklinovými systémy. Takové změny mohou mít mnohem rychlejší průběh, než kdyby se jednalo o postupnou změnu sycení propustného prostředí. Současně mohou dosahovat velmi vysokých amplitud změn.

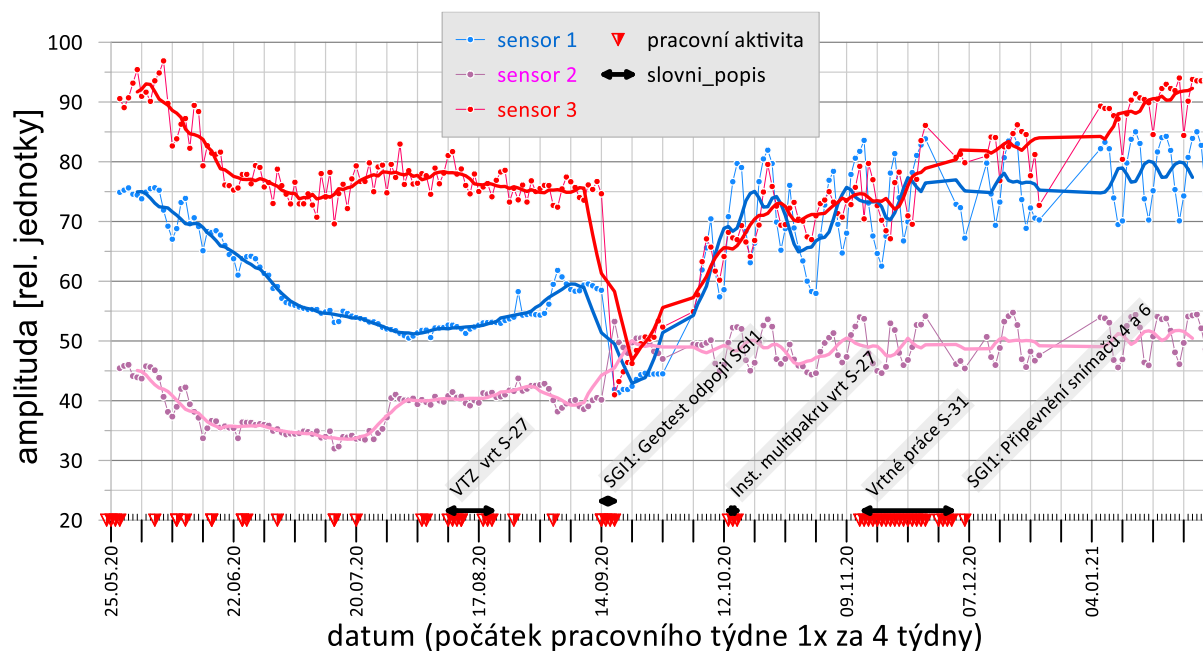
Mezi pozorované jevy patří například pozorovaná náhlá změna průměrných zdánlivých měrných odporů na řezech ERT, která nastala 25. 8. 2020 – viz Obr. 47.



Obr. 47: Průměrná hodnota zdánlivých měrných odporů na řezu ERT k danému času měření. Dne 25.8.2020 došlo k trvalé změně stabilního chování průměru ve značně nepravidelné chování v pozdějším období

V uvedeném období probíhaly vodní tlakové zkoušky (VTZ) na vrtu S-27. Přitom podle výsledků sledování puklinové konektivity (viz Zuna et al. 2021) je prokázáno, že jedna

puklinová zóna propojuje vrt S-27 se stěnou, na které je instalováno SGI 1. VTZ probíhaly v termínu od 10. 8. do 20. 8. 2021. Protože došlo ke zvětšení hodnot zdánlivých odporů, je možné, že došlo k propláchnutí puklinového systému vodou, při kterém byla původně vysoce mineralizovaná voda nahrazena vodou s nižší mineralizací. Současně mohlo dojít k propláchnutí trhlin a ke zvýšení jejich propustnosti oproti původnímu stavu, což by v důsledku mohlo vést k pozorovanému výrazně proměnlivějšímu chování v celém dalším období monitoringu. Pokud zobrazíme amplitudy signálů vysokofrekvenčního prozařování v tomto období (viz. Obr. 48), lze pozorovat pouze zvýšení rozptylu hodnot amplitud na senzorech 1 a 2 ve srovnání s předcházejícím obdobím.

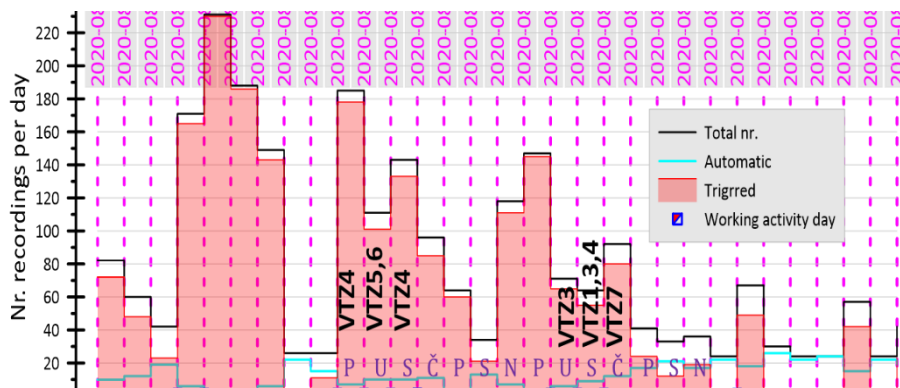


Obr. 48: Detail průběhu maximálních amplitud na záznamech aktivního prozařování. Na senzorech 1 a 2 je patrné, že v období po VTZ na vrtu S-27 vykazují průběhy vyšší rozptyl. Body vyznačují denní hodnoty, silnou čarou klouzavý průměr v okně 1 týden.

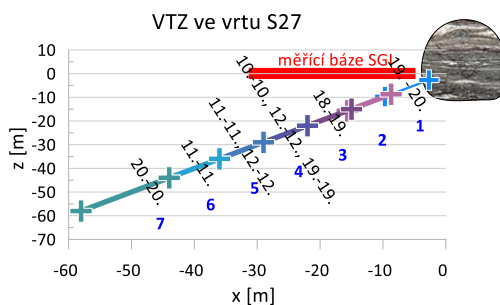
Pro informaci je dále na Obr. 49 schéma průběhu VTZ na vrtu S-27. Schéma ukazuje komplikovaný časový a prostorový průběh zkoušek. Nebyl zjištěn žádný přímý vztah k počtu zaregistrovaných dějů pasivní seismiky. To souvisí s tím, že během tlakování nedocházelo k žádnému porušování horniny, a tak počty pasivních dějů indikují spíše probíhající technické práce v okolí měřicí báze.

Rovněž nebylo možné identifikovat přímou odezvu zdánlivých měrných odporů nebo seismických parametrů na jednotlivé kroky VTZ. Přesto se zdá, že v porušené části odporového řezu, identifikované například na Obr. 38, od doby realizace VTZ pozorujeme zvýšení zdánlivých měrných odporů a významnou časovou variabilitu jejich velikostí.

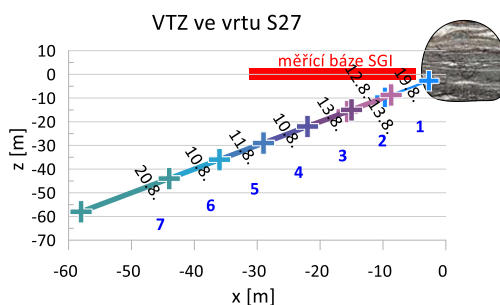
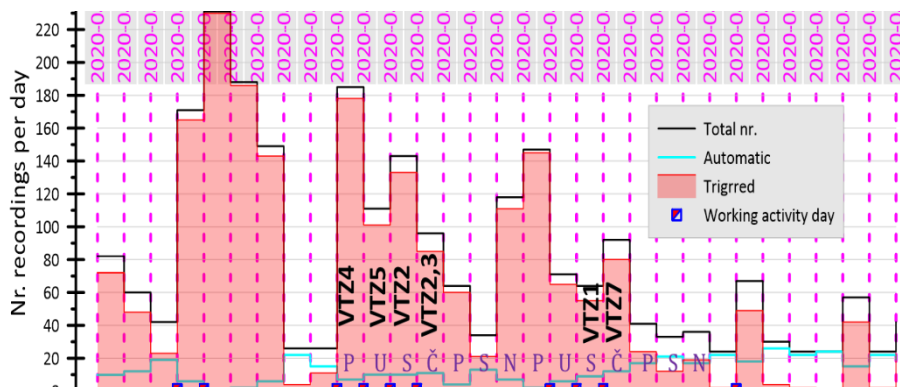
Tlakové zkoušky



zkouška	konstantní tlak
VTZ1	x
VTZ2	x
VTZ3	x
VTZ4	3 bar
VTZ5	6 bar
VTZ6	6 bar
VTZ7	6 bar



Pulzní zkoušky



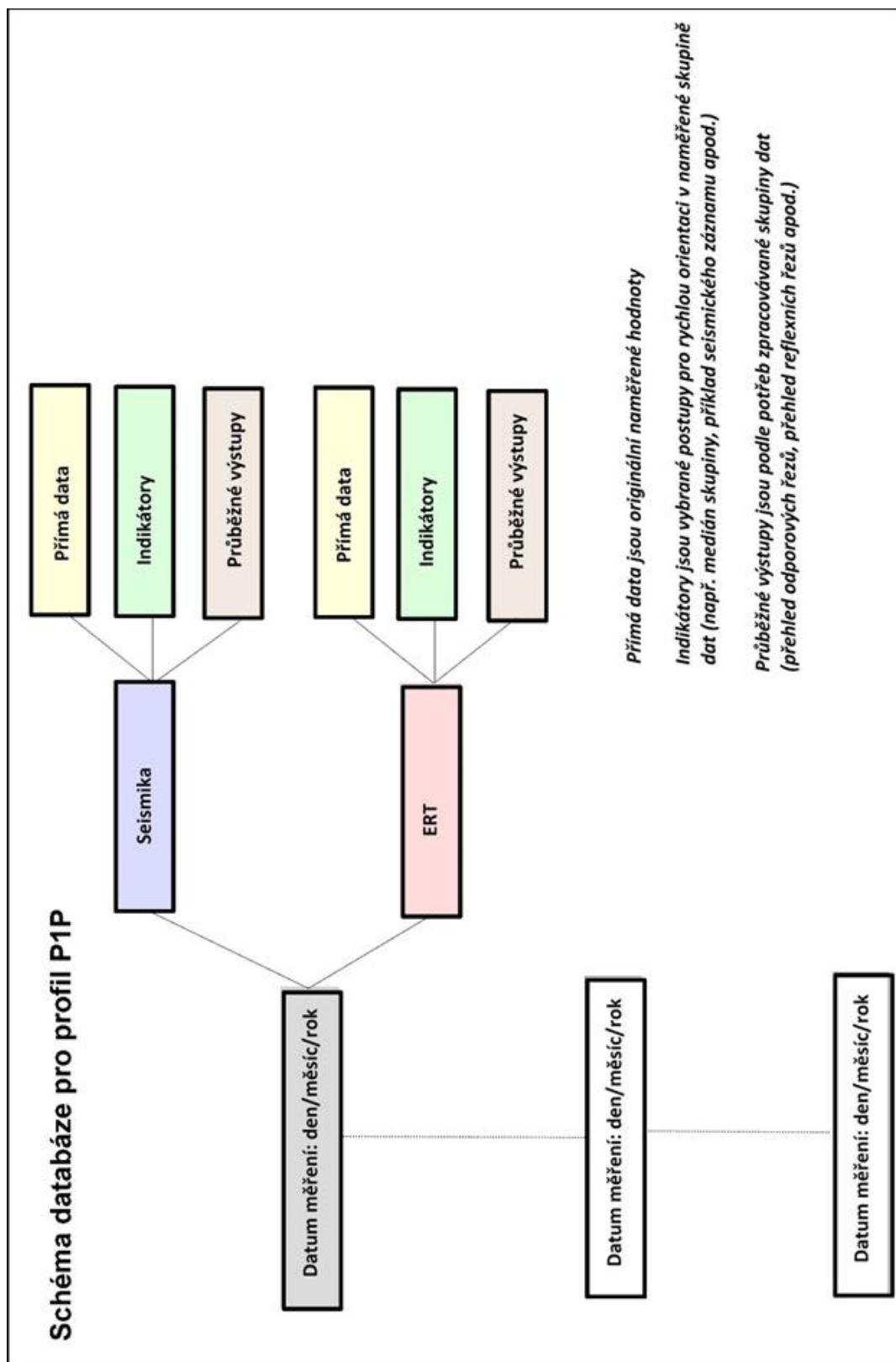
Obr. 49: Schéma k průběhu VTZ na vrtu S-27 (viz Zuna a kol, 2021).

2.4 Pravidelná ručně prováděná parametrická měření na pravé straně chodby BZ1-XII

Výzkumné práce, které jsou popisovány v této kapitole, byly realizovány na dvanáctém patře v oblasti štoly BZ1-XII v hloubce 550 m. Při vstupu do štoly BZ1-XII je umístěn na pravé straně (severní straně) layout (profil) označovaný jako P1P, a to cca 1,5 m nad počvou. Od začátku roku 2019 do konce června 2022 zde bylo prováděno měření metodou ERT a seismickou metodou (celkem bylo provedeno 25 společných měření). Cílem tohoto měření bylo zejména proniknout do hlubších částí horninového masivu, čehož nebylo možno dosáhnout detailním měřením se systémem SGI 1. Měření na levé straně (jižní strana), kde je umístěn systém SGI 1, se tak s intervalovým měřením na profilu P1P navzájem doplňovaly. Systém SGI 1 má hloubkový dosah do cca 3 m, měření na profilu P1P přinášelo i informace z hloubek vyšších jednotek metrů (cca do 10 m). Porovnáním informací ze stanoviště SGI1 a P1P tedy bylo možno zjistit, které poznatky získané automatickým měřením mají pouze význam pro povrchový režim ve štole a které lze naopak přisoudit i vlastnostem v nitru horninového masivu.

Naměřená seismická a odporová data získaná na profilu P1P byla ukládána do databáze. Data byla průběžně kontrolována, aby splňovala nároky na čitelnost a možnost jejich dalšího zpracování. Postupně byly hledány metody, jak naměřená data sledovat a hodnotit tak, aby bylo možno rychle indikovat případnou významnou změnu v daném souboru a upozornit, že dané měření si zasluhuje zvýšenou pozornost interpretátora. Vytvářela se databáze složená jednak z bloků naměřených přímých dat, bloků indikátorů a bloků průběžně připravovaných výstupů. Rozvrh databáze, do které přibližně každý měsíc přišla nová dávka dat, je zřejmý z následujícího obrázku Obr. 50.

Data ukládaná do bloku „Přímá data“ byla ukládána v zásadě jako soubory, které jsou použitelné (otvíratelné) pro každé odborné pracoviště, a to i v dlouhodobém horizontu. Jedná se o soubory *.seg2 pro seismiku, *.dem a *.dat pro odporovou tomografii a *.DZT pro radarová měření. Do bloku byly podle úvahy správce databáze volitelně ukládány i další podklady, jako mohou být kopie poznámek ze zápisníků, charakteristická vyobrazení apod. Do bloku „Indikátory“ byly ukládány vybrané informace, které sloužily pro rychlé ohodnocení naměřených souborů. Indikátory tedy umožňovaly zjistit tendence, jak se naměřené soubory vyvíjely, a tak správci dat mohli rychle rozhodnout, která měření vyžadovala hlubší interpretaci. Klíčové výstupy v bloku Indikátory jsou prezentovány v obrazovém formátu *.jpeg, *.srf či tabulkovém *.xlsx. Tak, jak postupně rostla délka časové řady, získávali jsme poznatky, které umožňovaly rozhodnout, co bylo z naměřených dat podstatné, jak naměřená data zpracovávat a jak je hodnotit. Naměřená data jsou k dispozici i pro další základní i aplikovaný výzkum. Do bloku 04_výstupy_zz/03_zprávy byly i v rámci následného využití dat ukládány odborné zprávy, články a další texty, určené pro hodnocení výsledků širší odbornou veřejností.



Obr. 50: Schéma postupně budované databáze pro měření na profilu P1P.

2.4.1 Měření metodou ERT

Měření probíhá na layoutu dlouhém 48 m. Vzdálenost mezi elektrodami činí 1 m. Elektrody byly trvale zapuštěny do horniny. Měření probíhalo v systému uspořádání Wenner-Schlumberger s využitím multielektrodové aparatury ARES II (výrobek GF Instruments s.r.o.). Při zobrazování dat je využíván program Res 2Dinv. Zmíněný program je schopen vytvořit řezy sestavené ze „skutečných“ měrných odporů; pro vzájemné porovnávání obrazů z různých časových období je však vhodnější pracovat s řezy vytvořenými z přímých dat (zdánlivé měrné odpory). Tyto řezy nejsou ovlivňovány subjektivním nastavením okrajových podmínek při výpočtu skutečných odporů a tvorbě izolinií.

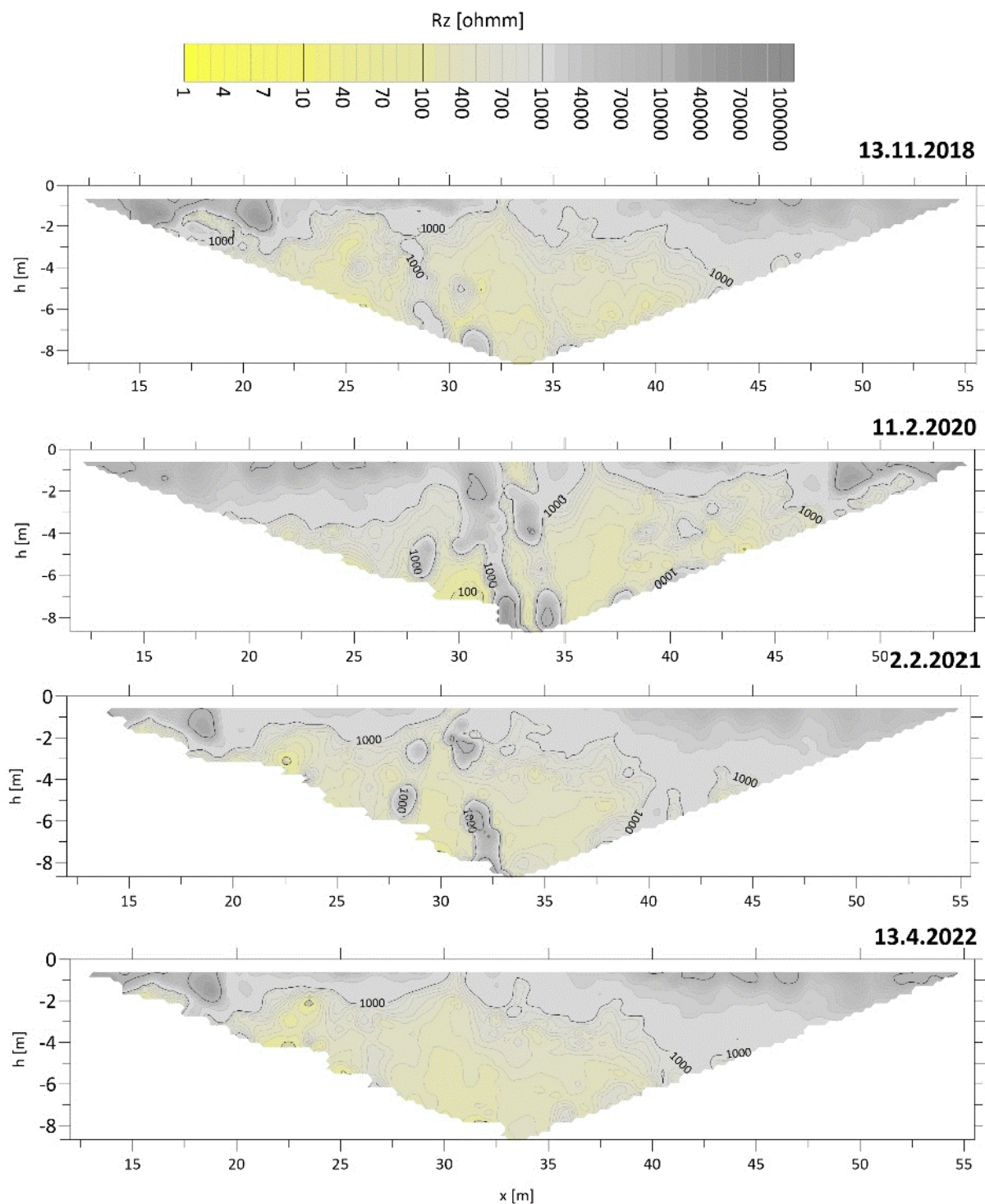
Na Obr. 51 je uveden snímek části stěny, která je předmětem výzkumů. Bílá tabulka označuje průběžné staničení v chodbě. Horninové prostředí je tvořeno amfibolitem, pararulou a migmatitem. Odběr vzorků dokládá vysoký obsah rudních minerálů.



Obr. 51: Část stěny zkoumané chodby, staničení 20 m.

Na Obr. 52 je vyobrazen výběr odporových řezů (zdánlivé měrné odpory) z období 13. 11. 2018 až 13. 4. 2022. Z přehledu je zřejmé, že naměřená data se v čase mění. Zvláště patrná je tato skutečnost kolem staničení 32,5, kde byla potvrzena tektonická linie (Bukovská et al. 2017). Celkový přehled o naměřených datech lze získat z kompletního přehledu naměřených odporových řezů (kromě výjimečných případů, kdy odporový řez nebylo možno z naměřených dat sestavit pro přítomnost bludných proudů), který je k závěrečné zprávě přiložen jako

zvláštní příloha na paměťovém médiu. Hrubý náhled obrázku je k dispozici také jako příloha (Velkoobrazová příloha 2) na konci této zprávy.



Obr. 52: Porovnání vybraných odporových řezů (zdánlivé měrné odpory).

Protože, jak již bylo uvedeno výše, naměřených dat rychle přibývalo, bylo zvoleno několik indikátorů, pomocí kterých je rychle orientačně ohodnocen každý daný geoelektrický soubor. Správce databáze tak může rychle posoudit, zda naměřený soubor je něčím anomální, či že se pravděpodobně řadí do normálu. Z každého souboru jsou stanoveny následující statistické údaje:

Počet naměřených hodnot

Maximální naměřená hodnota

Minimální naměřená hodnota

Aritmetický průměr

Medián

První kvartil

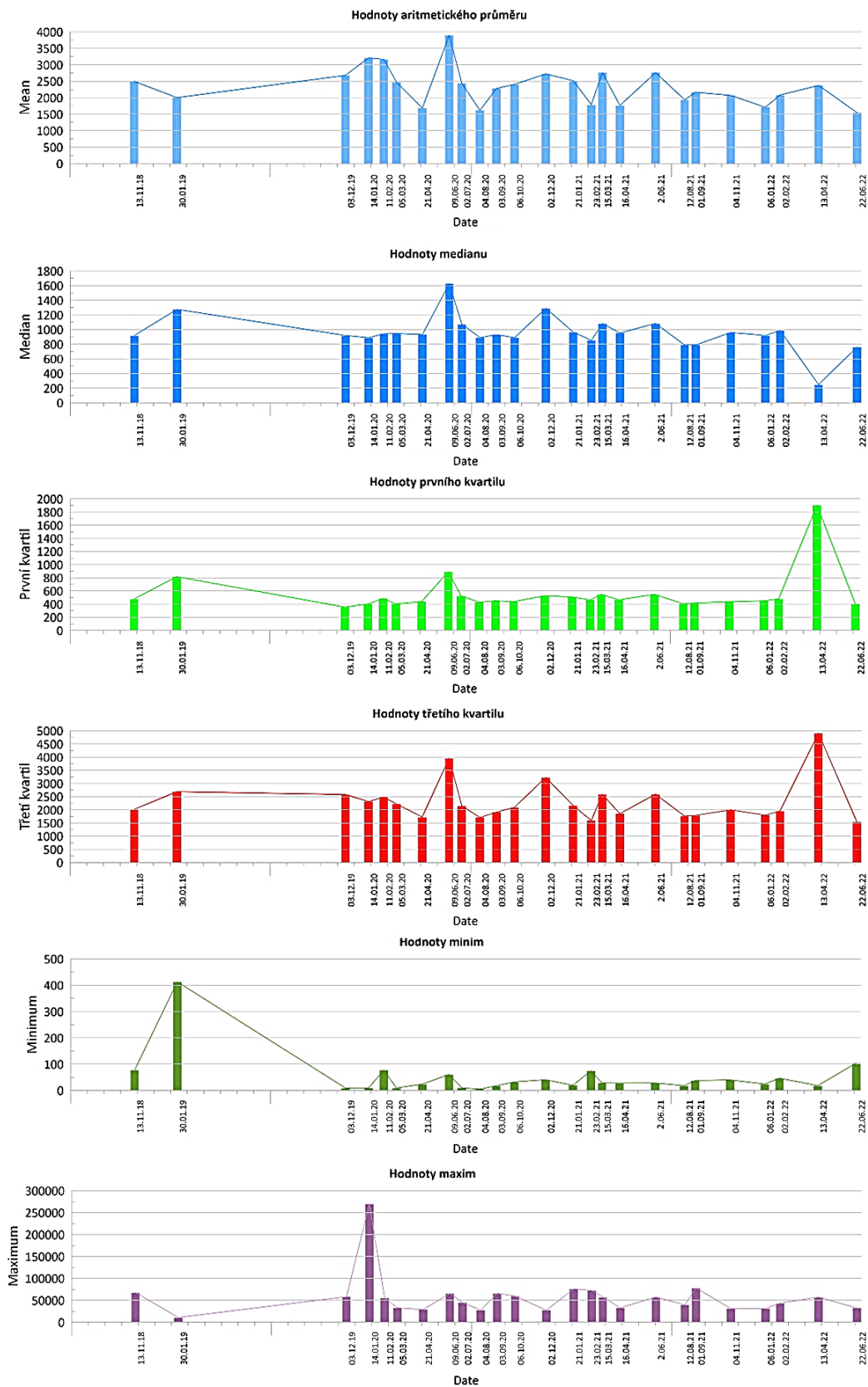
Třetí kvartil

Výše uvedená sestava statistických parametrů byla zvolena na základě analýzy současných naměřených dat i na základě některých dřívějších poznatků s monitorovacím odporovým měřením ve skalních horninách. V zásadě bylo možno v takovémto prostředí očekávat, že může docházet ke změně vlhkosti horniny, a způsobovat změny ve vodivosti některých částí naměřeného souboru. Následně bylo možno očekávat, že se tyto změny projeví (v případě zásadních změn v chování horniny) i v některém z parametrů (maximální či minimální hodnota, průměr, medián či kvartil).

Příklad: Na Obr. 52 lze sledovat ke dni 13.4.2022 výraznější útlum vysokých odporů kolem staničení 30–35. Tento útlum se shoduje s poklesem mediánu a hodnoty minima, naopak výrazně vzrostl první a třetí kvartil; viz Obr. 53.

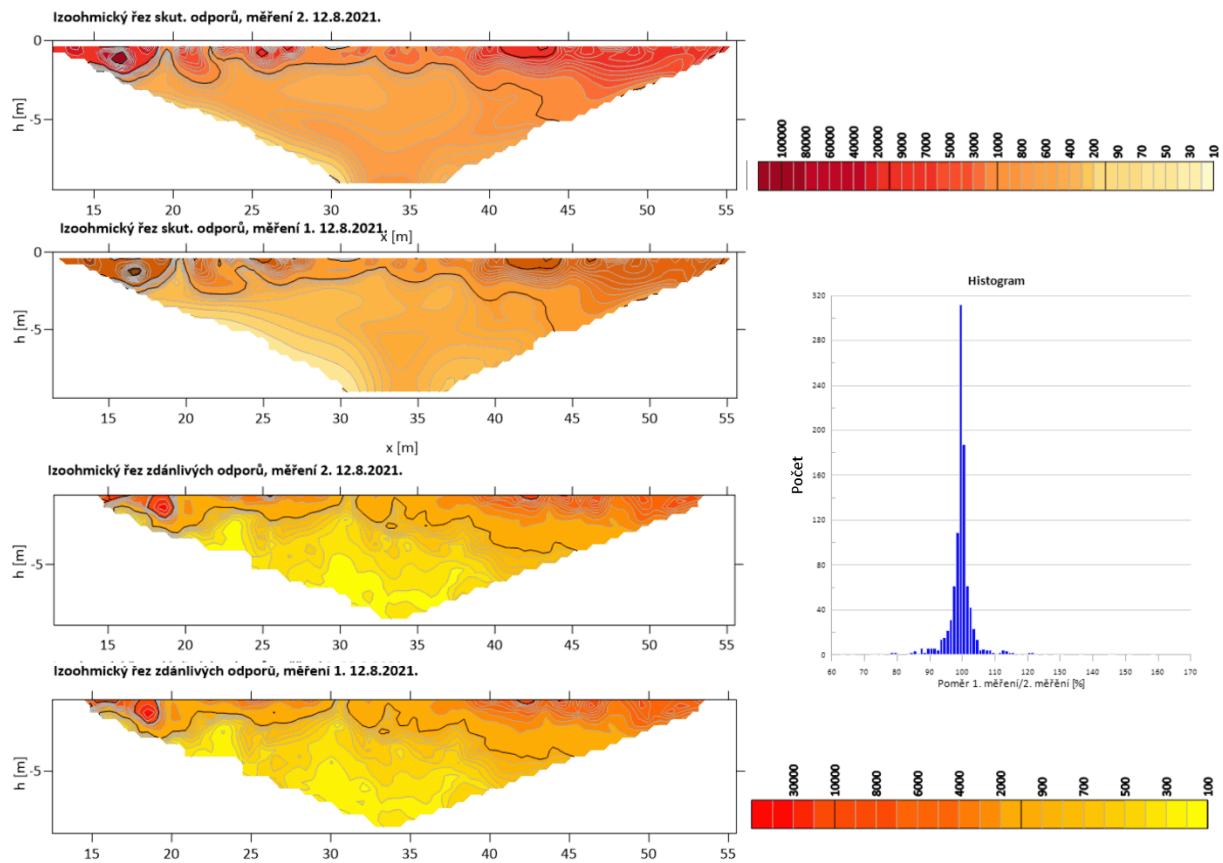
Na Obr. 53 je přehled grafů statistického zpracování souborů; konkrétně uvádíme graf aritmetických průměrů, mediánů naměřených odporových dat, grafy hodnot prvního a třetího kvartilu a minimálních a maximálních hodnot. Na grafech lze jasně sledovat, že hodnoty odporových databází se v čase mění, což lze pak podrobněji studovat na přehledu odporových řezů zobrazených ve zvláštní příloze závěrečné zprávy, přičemž hrubý náhled obrázku je k dispozici také jako příloha na konci této zprávy (Velkoobrazová příloha 1).

V průběhu výzkumných prací vždy vzniká otázka reprodukovatelnosti naměřených dat. Z tohoto důvodu byl proveden experiment, při kterém byly porovnávány přímo naměřené hodnoty, jejichž dva soubory byly vždy získány rychle za sebou (cca 30 min. měření jednoho souboru a ihned opakování téhož). Tím byly prakticky odstraněny vlivy reálných vyobrazení jsou prakticky totožná a opakovaná měření nemají většinou chybu větší než $\pm 5\%$.



Obr. 53: Grafy aritmetických průměrů, mediánů a třetích kvartilů

Při porovnání řezů skutečných měrných odporů je sledovatelný pouze velmi mírný rozptyl v tvaru izoliní, což plyne z principů zpracovatelského programu (viz Obr. 54).



Obr. 54: Porovnání dvojic odporových řezů (přímá data) naměřených bezprostředně za sebou.

2.4.2 Seismická měření

Seismické měření probíhalo s geofony, které mají od sebe vzdálenost 1 m (shodné pozice jako při ERT). Geofony byly pro každé měření na profilu instalovány znovu, ovšem přesně do stejných vývrtů. Používané geofony měřily složku Z (vertikální geofony), byly však zasazovány kolmo do stěny chodby. Zdrojem seismických rozruchů byly údery seismického kladívka. Seismické rozruchy byly prováděny mezi všemi geofony; dále byly prováděny přístřely. Pro měření byla k dispozici seismická aparatura Terraloc Mark6 a Terraloc Pro 2 (zakoupená v roce 2020). Obě aparatury pracovaly se 48 seismickými kanály. Pro rychlou orientaci v datech byly sledovány následující indikátory:

- rychlá analýza vybraných seismických záznamů (záznam z levého a pravého kraje layoutu, záznam z bodu mezi 24 a 25 geofonem *),
- graf sum amplitud z jednotlivých seismických tras,
- detailní výřez seismických tras mezi staničením 10 až 25 **).

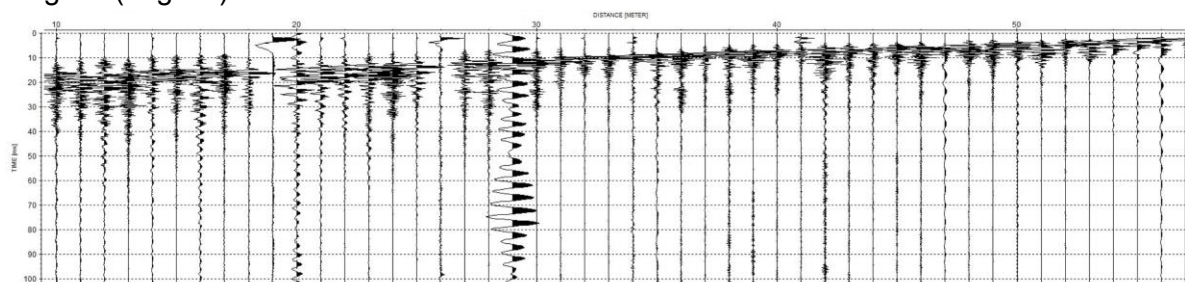
**) Záznamy z krajních pozic layoutů a středu layoutů většinou nesou hlavní informace o geologických poměrech zkoumaného prostředí.*

****) Oblast geofonů mezi staničením 10 až 25 nese v čase časté změny a byla proto vybrána jako reprezentativní.*

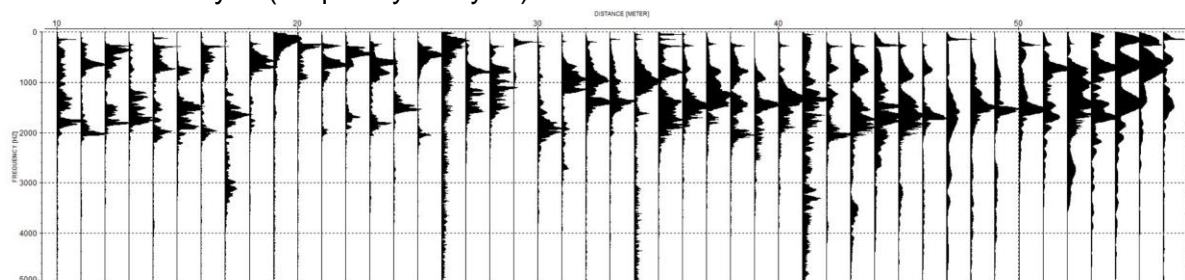
Na Obr. 55 je uveden charakteristický příklad rychlého posouzení seismického záznamu. Pro účely databáze je záznam zobrazen jako celek. Dále je zobrazena jeho vybraná (kratší) část. Záznam je podle potřeby mírně zesílen a filtrován. Dále jsou určeny rychlosti charakteristických vln a je zobrazeno také frekvenční spektrum jednotlivých stop. Zesílení a filtrace jsou provedeny pouze v nejnútnejším rozsahu, aby nebyly setřeny charakteristické rysy záznamu. Příklad záznamu potvrzuje, že zájmová místa jsou částečně rušena seismickými šumy. Při podrobnějším studiu je také patrný rušivý vliv přítomnosti bludných proudů. Za reprezentativní lze považovat projev podélné vlny s rychlostmi kolem 5500 m/s a příčné vlny s rychlostí kolem 3300 m/s. Nasazení příčné vlny je výrazné. Nasazení podélné vlny je často obtížně sledovatelné.

Seismická data jsou primárně zpracovávána a vyhodnocována pomocí programu Reflex W (K. H. Sandmeier).

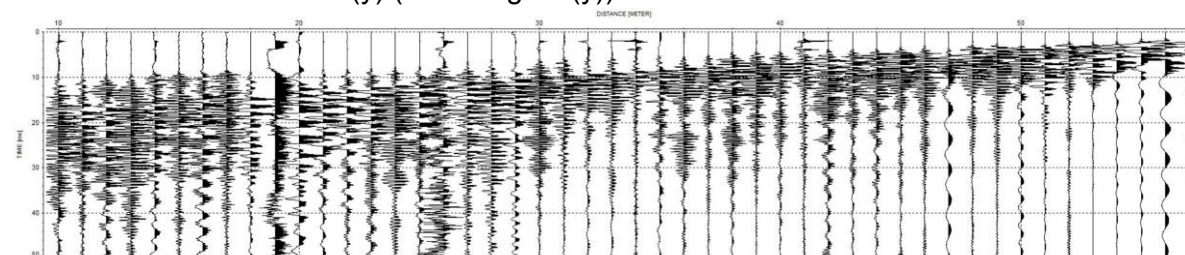
Originál (original):



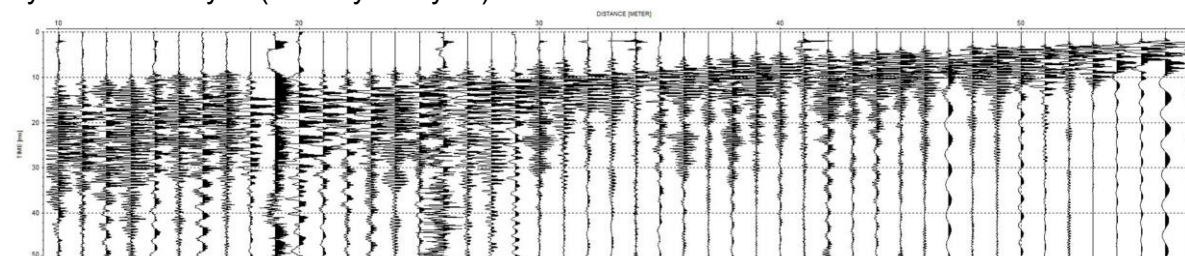
Frekvenční analýza (frequency analysis):



Ručně stanovené zesílení (y) (Manual gain (y)):



Rychlostní analýza (velocity analysis):

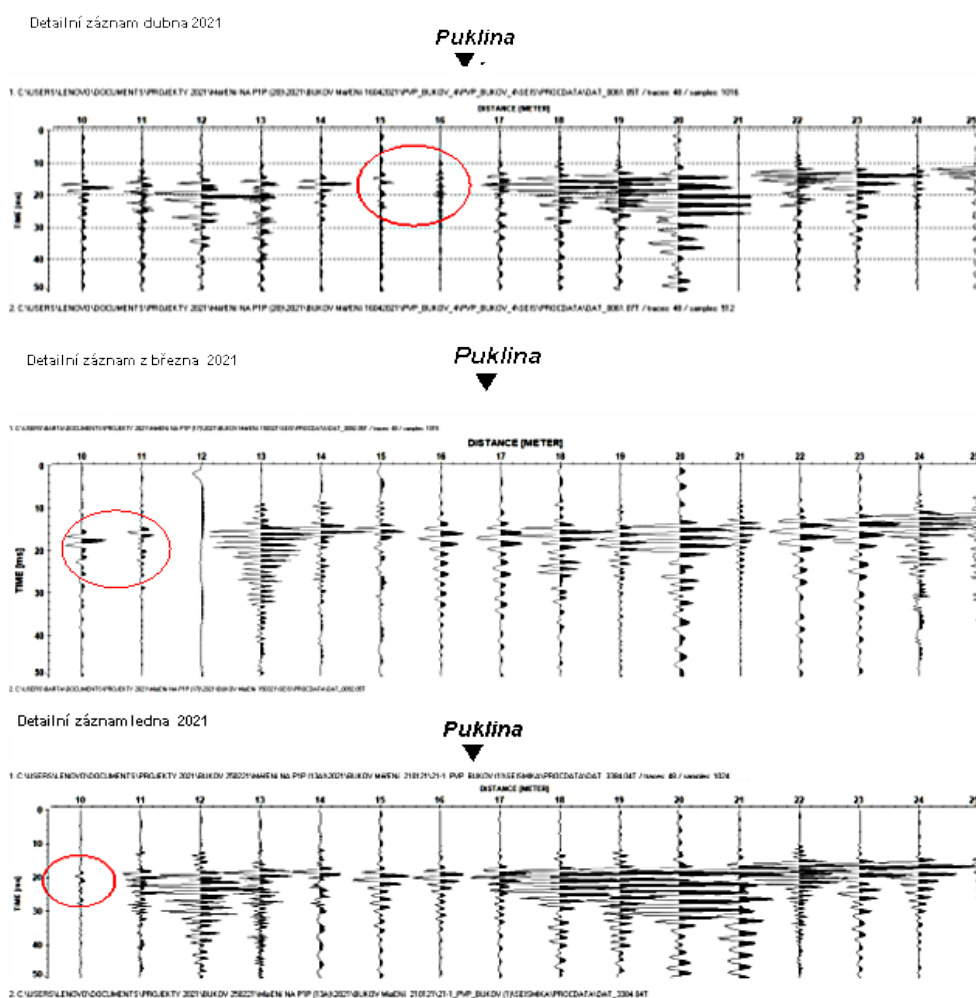


Obr. 55: Rychlá analýza záznamu 2628 z bodu 56,5

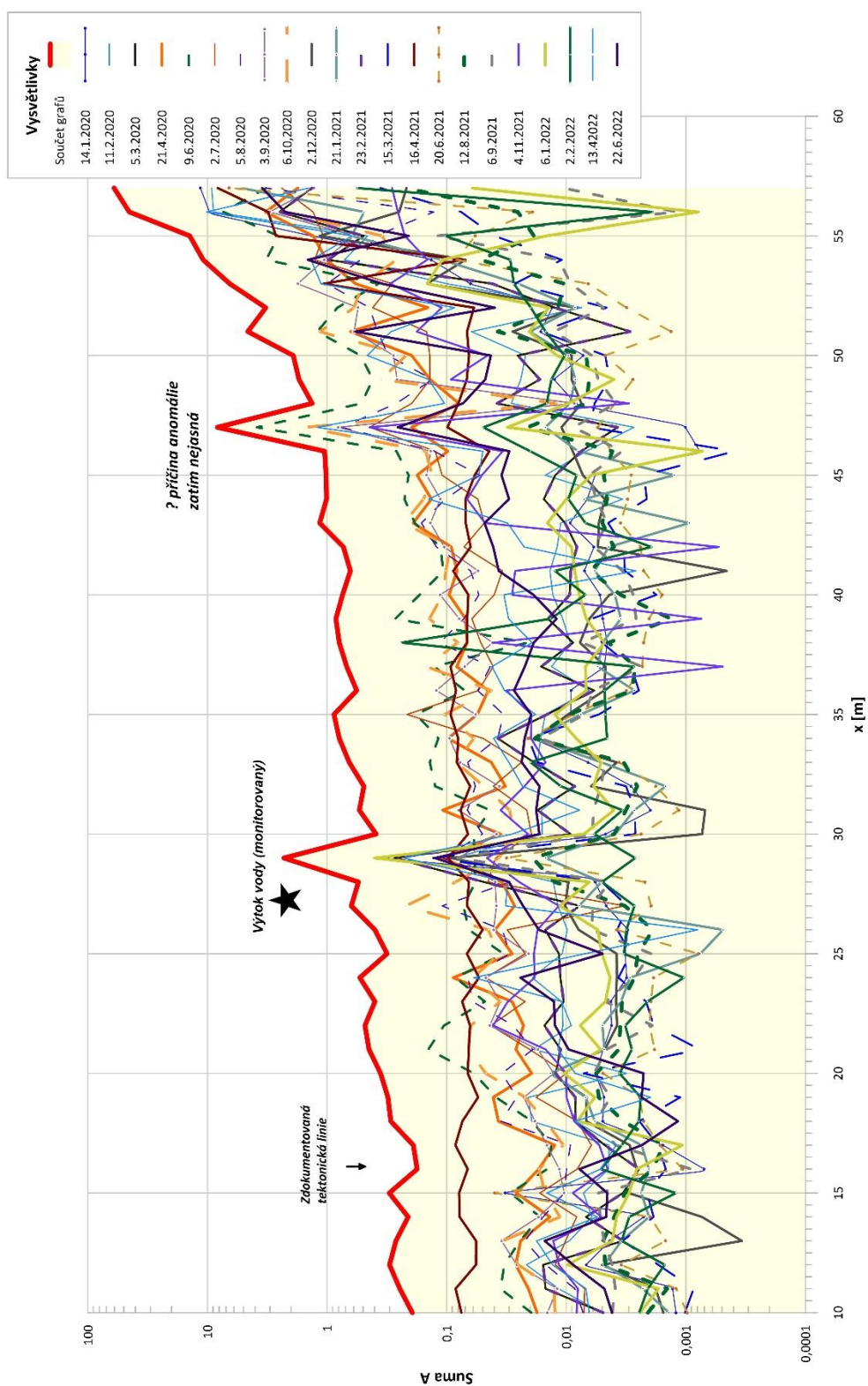
Ukázka rozboru detailního úseku ze staničení 10 až 25 (seismické rozruchy byly buzeny na staničení 56) je uvedena na Obr. 56. Z porovnání vybraných záznamů je zřetelné, že v průběhu monitorování dochází ke změnám v dynamickém i kinetickém chování některých seismických stop (tras). Na Obr. 56 jsou červenými ovály označeny výrazné anomální změny.

Celkový přehled o detailních výřezech (až na výjimečné případy, kdy výřez byl silně ovlivněn šumy) je zobrazen ve zvláštní příloze závěrečné zprávy, přičemž hrubý náhled obrázku je k dispozici také jako příloha na konci této zprávy (Velkoobrazová příloha 1). Původní rozměr přílohy je nevhodný ke klasickému tisku do zprávy formátu A4.

Na Obr. 57 jsou grafy sum amplitud (přesněji jejich absolutních hodnot) záznamů získaných od seismických rozruchů prováděných na staničení 56,5. Každá křivka představuje součty jednotlivých seismických tras (tj. geofonů 1 až 48) jednoho seismického záznamu. Všechny dílčí grafy jsou nakonec zahrnuty do finálního součtového grafu (viz silná linie v olivově zelené barvě). Dílčí sumační grafy se v čase výrazně a z prvního pohledu neorganizovaně mění. Výsledný součtový graf však poskytuje anomální místa, která lze dále interpretovat. Na součtovém grafu na Obr. 57 se hlavní anomálie (staničení 29) nachází u místa monitorovaného výtoku podzemní vody. (staničení 27). Kolem staničení 16 se nachází tektonická zóna. Výrazné maximum na staničení 47 je zřejmě projevem úzké horninové nehomogenity, která ale nevystupuje přímo na povrch stěny.



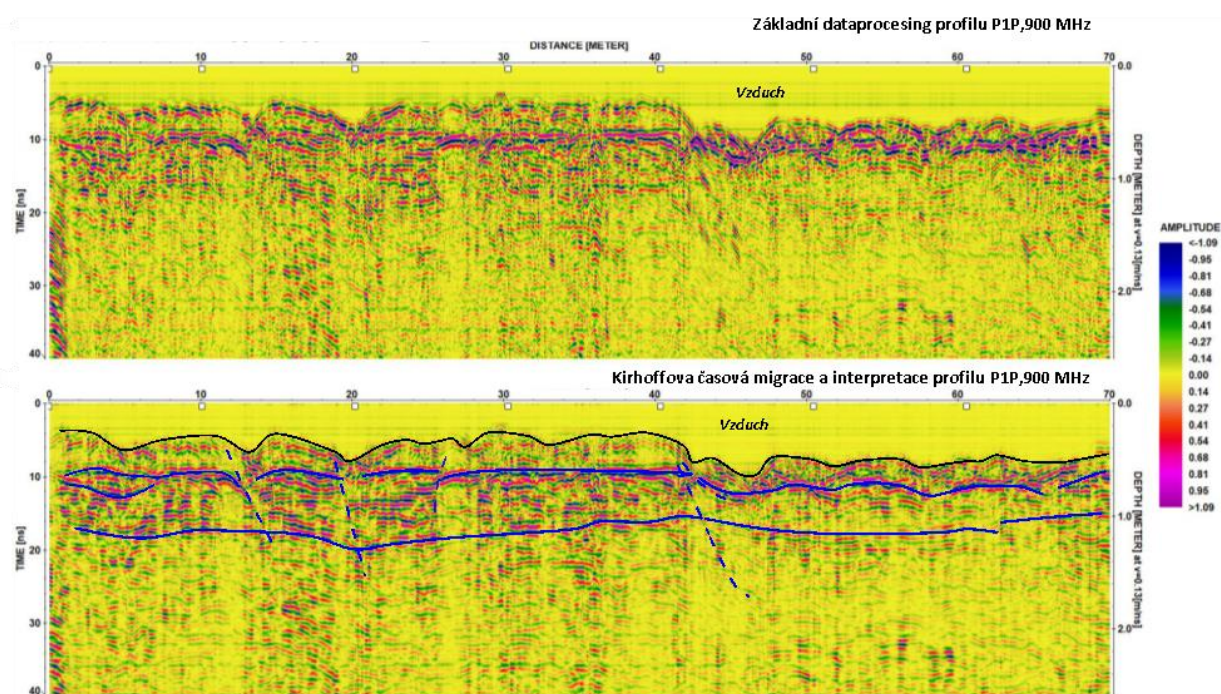
Obr. 56: Příklad porovnávání detailních výřezů z provedených záznamů (leden, březen, duben 2021). Červeně jsou označeny anomální změny v časové ose.



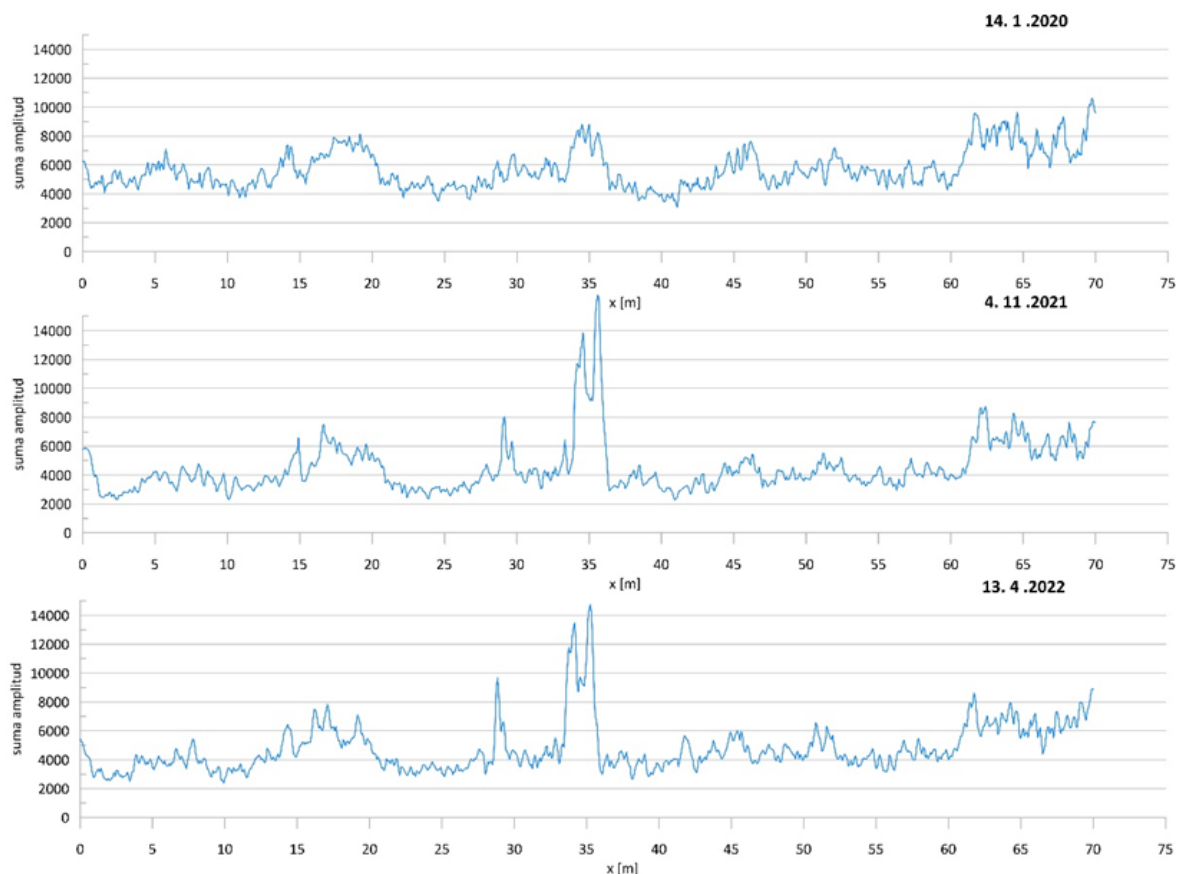
Obr. 57: Grafy sum amplitud jednotlivých seismických stop (tras) a finální součtová křivka všech dílčích grafů.

2.4.3 Pokusná měření a další možnosti výzkumů

V průběhu plnění monitorovacích měření byly prováděny i některé pokusné, doplňující práce, které měly za cíl zjistit možnosti rozšíření monitoringu o další užitečné informace. Na profilu P1P to bylo jmenovitě ověřování možností radarového měření. Na Obr. 58 je uveden příklad radarového měření s anténou 900 MHz z dubna 2022. Vlevo je na obrázcích uvedena časová osa v ns. Napravo je přepočít časů na hloubky uváděné v m (pro rychlost 0,13 m/ns). Na Obr. 59 jsou pak sumační grafy z jednotlivých tras radarového měření. Měřeno bylo s anténou pro 400 MHz, porovnávaná data jsou z ledna 2020, listopadu 2021 a dubna 2022. Měření prokázala, že základní komplex metod (seismika, ERT) je užitečné doplnit vysokofrekvenční metodou, která má schopnost detailního rozlišení strukturních prvků v nejmělkých částech zkoumaného řezu. Experiment se sumačními grafy pak ukázal, že metoda rychlého orientačního posouzení seismických záznamů je užitečná i pro radar.

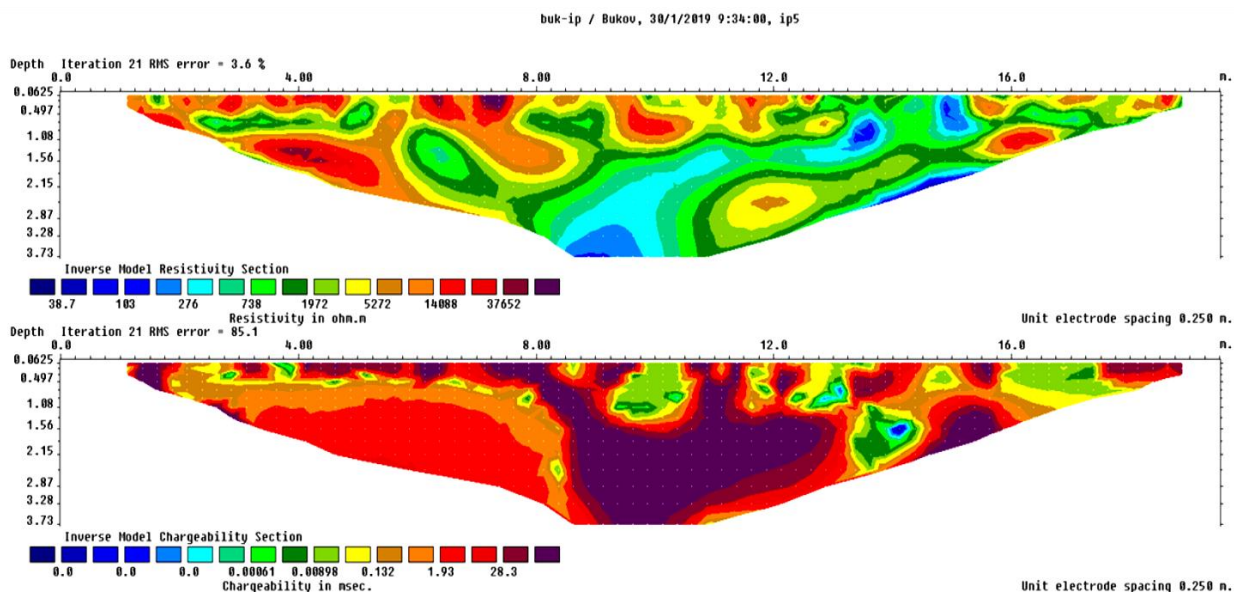


Obr. 58: Data processing a interpretace radarových dat z profilu P1P, anténa 400 MHz, 13. dubna 2022



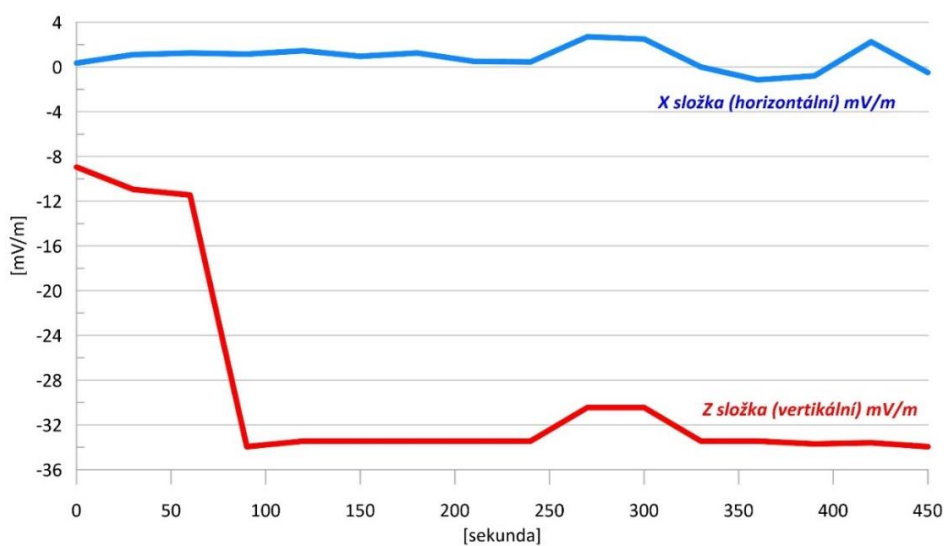
Obr. 59: Sumační grafy z jednotlivých tras radarového měření. Profil P1P, anténa 400 MHz, měření z ledna 2020, listopadu 2021 a dubna 2022

V průběhu výzkumů na pracovišti PVP Bukov byly také provedena pokusná měření ověřující možnost a užitečnost aplikace metody vyzvané polarizace. V podmínkách Bukova jde o kombinaci polarizace elektronové (viz prokázaná přítomnost barevných kovů) a polarizace vzniklé na membránách rozdělujících roztoky s různou mineralizací. Naměřená data prokázala možnost polarizovat prostředí. Měření zřejmě detekovalo přítomnost membránové polarizace. Pokračování výzkumů by mohlo přinést zajímavé poznatky o procesu mineralizace podzemních vod a rozložení metalizace v horninovém prostředí. Metalizace, z meritů věci, se zřejmě váže na tektonickou stavbu a lze tedy očekávat, že její studium má význam i pro interpretaci geotechnických vlastností masivu. Na Obr. 60 je porovnán odporový řez (resistivity) s řezem polarizovatelnosti (chargeability). Měření proběhlo na jižní straně stoly.



Obr. 60: Experimentální měření metodou vyzvané polarizace (IP). Horní obr. představuje odporový řez a dolní výsledek měření metodou vyzvané polarizace.

V průběhu terénních měření byla detekována přítomnost bludných (parazitních) proudů – viz např. diskuse k Obr. 55 (seismický záznam), nebo graf bludných proudů na Obr. 61.



Obr. 61: Krátký výřez z monitorování bludných proudů. Měření z ledna 2019 v místě profilu P1P.

Bludné proudy jednak částečně komplikují geofyzikální měření, ale mohou být v budoucnu i zdrojem koroze ohrožující podzemní konstrukce a ochranné schránky odpadů. Doporučujeme v budoucnu realizovat podrobnější monitoring bludných proudů ve smyslu ČSN 038372 a ČSN EN 50162. Na Obr. 61 je krátký výřez z časového měření. V grafu jsou sledovány gradienty potenciálů naměřené na stěně štoly ve směru x (totožné s polohou profilu P1P) a ve směru Z (směr vertikální k počvě štoly).

2.5 Bilance 4. etapy projektu

Plnění úkolů:

- 1) Parametrická měření, prováděná na profilu P1P, zejména seismické a elektrické metody, průběžně pokračují opakovanými každoměsíčními testy – splněno.
- 2) Rutinní měření a jeho průběžný data processing – dlouhodobě běžela měření aktivní i pasivní seismiky i rezistivní tomografie. Data byla ukládána na server ftp přímo na PC PVP – splněno.

Ve 4. etapě projektu byla prováděna pravidelná měření seismických a elektrických (odporových) parametrů horninového masivu pomocí monitorovacího systému SGI 1, který je umístěn na jižní stěně chodby BZ1-XII (geofyzikální profil P1L). Kromě této základní výzkumné činnosti byla prováděna také každoměsíční parametrická seismická a odporová měření na geofyzikálním profilu P1P, umístěném na severní stěně chodby BZ1-XII.

V rámci dalšího rozvoje možností využití systému SGI 1 se pokračovalo i v poloprovozních testech s využitím sledování pasivních seismických signálů (blízké seismické zdroje) a data byla následně ukládána do paměti systému. V rámci podrobnějšího poznání chování horninového prostředí byla opět pokusně aplikována metoda radarová, byla studována aktivita bludných proudů a byla opět potvrzena schopnost vlastní polarizace.

Výsledky všech měření prokázaly užitečnost studia horninového prostředí geofyzikálními metodami a plnou funkčnost monitorovacího systému SGI 1.

Aktivní seismika zachytila týdenní periodicitu ve změnách monitorovaných parametrů. Bylo ověřeno, že změny v parametrech jsou způsobeny změnou režimu větracího systému – vypnutím, nebo změnou směru větrání. Systém je tedy schopen vyhodnotit změnu větrání na PVP Bukov.

Došlo také ke změně typu čidla pasivní seismiky (z piezoelektrického principu na elektromagnetický) a jeho posunu o 3 metry blíže k vyhodnocovací jednotce – první záznamy dávají naději, že čidlo je dostatečně citlivé a mohlo by být vhodné pro tento účel.

3 Celkové hodnocení výsledků projektu

Předmětem plnění smlouvy o dílo (č. TUL-340956, SO2018-075 ze dne 3. 9. 2018) mezi TUL a SÚRAO bylo zhotovení díla spočívající v provedení instalace monitorovacího systému SGI1 a provedení dlouhodobého monitorování horninového masivu nedestruktivními geofyzikálními metodami v Podzemním Výzkumném Pracovišti (PVP) Bukov.

Realizace díla spočívala zejména v následujících úkonech:

- 1) Úvodní parametrická měření na připravované základně, zejména seismické a geoelektrické metody.
- 2) Instalace systému SGI 1 v PVP Bukov, adjustace systému na místě, napojení SGI 1 na internet, zkušební provoz. Vybudování profilu P1P na severní straně chodby BZ₁-XII (odvrácená strana chodby BZ₁-XII vůči SGI 1) a zahájení pravidelných ručních porovnávacích (parametrických) měření na tomto profilu. O postupu a provedení těchto činností byla zhotovitelem zpracována každý rok dílčí hodnotící (etapová) zpráva.
- 3) Rutinní měření a jejich průběžný data processing. Doladování měřících technologií. Nákup a instalace seismických snímačů (pasivní seismika) a dalších elektronických součástí. O postupu a provedení těchto činností byla zhotovitelem na konci každé etapy zpracována dílčí hodnotící (etapová) zpráva v českém jazyce.
- 4) Zpracování závěrečné zprávy o provedení díla.

Řádné plnění realizace díla bylo kontrolováno objednatelem, a to formou řádných kontrolních dnů, konaných v průměru 3× za rok. Z každého kontrolního dne byl proveden zápis podepsaný oprávněnými zástupci smluvních stran, tedy TUL a SÚRAO. V rámci kontrolních dnů proběhla také kontrola průběhu realizace díla a ověření výsledků závěrečné zprávy dle podmínek stanovených touto smlouvou, a to formou kontrolního dne, konaného nad rámec pravidelných kontrolních dní.

Vlastnické právo k částem díla a ke zhotovenému dílu včetně práva zveřejnění čistopisů zpráv nebo jejich částí přešlo na objednatele zaplacením ceny díla. Objednatel uložil výsledky měření na svůj server i s výsledným hodnocením naměřených dat.

Zhotovitel i objednatel potvrzují, že výstupy z realizace díla mohou být prezentovány a diskutovány na mezinárodním odborném fóru.

Zhotovitel potvrzuje, že v rámci realizace díla vstupoval do tzv. Kontrolovaného pásma, vymezeného v souladu s vyhláškou č. 422/2016 Sb., o radiační ochraně a zabezpečení radionuklidového zdroje a choval se dle pokynů Bezpečnostní dohody (viz příloha č. 2 smlouvy o dílo č. TUL-340956, SO2018-075 ze dne 3. 9. 2018).

Zhotovitel předal dílo bez závad a v plné činnosti.

Během projektu bylo nutné systém SGI 1 upravit tak, aby byl schopen měřit a vyhodnocovat data i v prostoru PVP Bukov. Ukázalo se totiž, že hornina v tomto prostoru je odlišná od

horniny v tunelu v Bedřichově, kde byl systém při vývoji odzkoušen. Na rozdíl od Bedřichova, kde je hornina v místech měření kompaktní a stejnorodá, v prostoru PVP Bukov je hornina tektonicky postižená, petrograficky proměnlivá a vyznačuje se vysokým množstvím mikrotrhlin, což způsobilo horší přenos budicího signálu při měření tzv. aktivní seismiky. Bylo tedy nutné upravit hardware (vstupní obvody, zesílení apod.) a posléze i software pro použití na tomto pracovišti. Bylo také nutné zmenšit původně plánovanou vzdálenost 1 m mezi seismickými senzory na vzdálenost 0,3 m.

Automatická měření prováděná každý den prokázala funkčnost trvalého monitoringu v prostoru PVP Bukov. Výsledky měření aktivního seismického prozařování spolu s odporovou tomografií potvrdily schopnost monitorovacího systému zachytit subtilní změny probíhající v horninovém masivu. Identifikovány byly dlouhoperiodické (sezónní) změny, které mohou souviset se změnami napětí horninového masivu, se změnou nasycení nebo vlivem pokračujícího procesu zvětrávání porušeného horninového prostředí v blízkosti výrubu. Vedle toho byla prokázána týdenní periodicitu změn mechanických (seismických) a odporových (geoelektrických) vlastností horninového masivu. Tyto změny souvisí s týdenní periodicitou větrání v prostoru PVP. Předpokládáme, že jsou důsledkem změn vlhkosti přípoверхové části horninového masivu v blízkosti stěn výrubu. Z hlediska hlubinného úložiště je zásadním zjištěním, že takováto zóna v okolí výrubu existuje a že je propustná. Doplňkové měření pasivní seismikou do určité míry monitorovalo provoz v prostoru PVP, ale zásadní rušivý vliv na měření mají sklopné průtokoměry. S ohledem na to, že se jedná o téměř spojitý druh rušení s vysokou frekvencí opakování, je většina zaznamenaných jevů pasivní seismiky právě tohoto původu.

Rutinní provoz aktivní seismické části SGI 1 ukázal, že soustavné sledování seismických a elektrických (odporových) vlastností horninového prostředí podává základní charakteristiky o chování zkoumaného prostředí, které významně doplňují znalosti o geotechnických vlastnostech horninového masivu. Monitorovací systém umožňuje vytvořit v podstatě souvislou časovou řadu pozorování, která může zaznamenat i neočekávané, náhlé změny v chování masivu (například projevy spojené s haváriemi, násilným zásahem do zkoumaného prostředí apod.).

Parametrická ruční měření prováděná jednou měsíčně na profilu P1P (odvrácená strana chodby BZ1-XII vůči SGI 1) jsou v souladu s poznatky získanými se systémem SGI 1. Systém SGI 1 monitoruje horninové prostředí s denní až hodinovou frekvencí. Měření na profilu P1P je naopak prováděno s přibližně měsíční frekvencí a jeho hloubkový dosah je větší (kolem 10 m i více). Měření metodou odporové tomografie (ERT) bylo zpracováno statistickými metodami a mimo jiné pomocí software Res2DInv (Loke). Naměřené hodnoty měrných odporů se v čase částečně mění. Příčinu změn lze spatřovat ve změnách obsahu a mineralizace vody (viz lit. Butler 2005, Barton 2007, Griffin 1979), která proniká do puklinového systému. Změny v hydrologických poměrech prostředí lze nejspíše přisuzovat drobným napjatostním změnám horninového masivu, což vede ke svírání či naopak rozvírání puklin. Změny ve vlhkosti však mohou mít i další příčiny, například změny v provozu větracího systému štol, roční změny venkovního klimatu apod. Seismická měření na profilu P1P zejména zjistila, že někdy dochází na některých seismických stopách a v některých časových úsecích ke změnám ve vývoji amplitudového obrazu, což lze pravděpodobně vysvětlit tím, že v masivu dochází k drobným změnám napjatosti v čase. Při rozboru seismických dat nebyla prokázána jasná přítomnost

přirozené klenby (zóna zvýšeného napětí, resp. zvýšených seismických rychlostí), viz. Barton 2007, Bárta a kol. 2022.

Na základě výsledků měření projektu a doplňujících experimentálních prací (metodika podrobného zpracování dat) by bylo nanejvýše vhodné v projektu pokračovat, a navíc rozšířit monitoring prostředí v PVP Bukov o další měření (radar, vyzvaná polarizace, bludné proudy), a zejména pak zkvalitnit měření pasivní seismiky, které by umožňovalo lokalizaci vzniku seismického vzruchu. To však vyžaduje rozšíření stávajícího vybavení a další finanční náklady na inovaci elektroniky a software.

Dosud provedené výzkumné práce jednoznačně prokázaly, že soustavné monitorování horninového masivu na principu SGI 1 je schopno v budoucím hlubinném úložišti včas, tj. již při vzniku prvních náznaků změn v horninovém masivu (změny v napjatosti, vznik vlasových trhlin), upozornit na potenciálně nebezpečný vývoj geotechnických poměrů místa. Blíže je obecně tato možnost predikce probrána v Certifikované metodice (Bárta, Vilhelm, Jirků, výsledek výzkumného úkolu TA 03020408, Technologická agentura ČR). Takováto situace může v budoucnu nastat např. při potížích s ražbou důlního díla, nebo i později při konsolidaci báňského díla v průběhu provozu podzemního úložiště. Naměřené datové soubory přinášejí i poznatky v rovině základního výzkumu, tj. potvrzují, že horninový masiv i v hloubkách stovek metrů má schopnost dalšího vývoje odvozeného od lidské činnosti ale i regionálních přírodních vlivů (tektonika, klimatické vlivy, v dlouhodobém časovém horizontu i vliv eroze zemského povrchu). Jako nevhodné a odborně škodlivé by bylo přerušení kontinuity současných měření, protože by to znamenalo následné obtíže při pozdějším obnovování činností (rozpad zkušeného týmu, znovuvybudování měřicí základny (případně základen), přerušená časová řada apod.

Za celou dobu řešení úkolu bylo získáno značné množství primárních dat. Jejich objem udává následující Tabulka 4.

Tabulka 4: Přehled objemu primárních dat měřených aparaturou SGI1 a v rámci měření na P1P

	Období	Počet souborů	Celkový objem
Aktivní seismika	09/2019-06/2022	37 032	20.22 GB
Pasivní seismika	06/2020-06/2022	91 515	278.59 GB
Odporová měření	09/2019-06/2022	1 739	57.6 MB
Parametrická měření (profil P1P)	011/2018-06/2022	2 500	7 GB
Celkem	011/2018-06/2022	132 786	363,41 GB

V průběhu řešení projektu vzniklo několik publikací, které mají vztah k řešené problematice:

- SLAVÍK L., BÁRTA J., VILHELM J., BELOV T., JIRKŮ J., BUCHTA, J. (2022): Měřicí aparatura pro trvalý monitoring chování puklinových systémů horninového masivu. Příspěvek na HGIG konferenci, Ústí nad Labem, 6. – 9. září 2022.
- VILHELM J., BÁRTA J., SLAVÍK L., BELOV T., BUCHTA J., JIRKŮ J. (2022): Dlouhodobé monitorování pomocí ERT a seismického vysokofrekvenčního prozařování v PVP Bukov. Příspěvek na HGIG konferenci, Ústí nad Labem, 6. – 9. září 2022.
- BÁRTA J., BELOV T., BUCHTA J., JIRKŮ J., SLAVÍK L., VILHELM, J. (2022): Dlouhodobé monitorování pomocí geofyzikálních metod v oblasti severní stěny štoly BZ1 – XII v PVP Bukov. Příspěvek na HGIG konferenci, Ústí nad Labem, 6. – 9. září 2022.
- VILHELM J., FISCHER T., ALEXA M., VALENTA J. (2022): Non-Linear Stacking of Signals Using Generalized Average of Complex Numbers. Measurement 202, <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2022.111821>.
- BÁRTA J., BELOV T., JIRKŮ J., SLAVÍK L., VILHELM J. (2020): První zkušenosti s monitorovacím geofyzikálním systémem SGI1 na podzemním výzkumném pracovišti Bukov. Časopis EGRSE

Naměřená data byla využita při vypracování doktorské práce:

- JIRKŮ J. (2021): 4D charakteristika elektrických odporů a elastických parametrů krystalického horninového masivu. Přírodovědecká fakulta UK.

4 Závěrečné doporučení

Monitorovací systém SGI 1, založený na unikátní myšlence současného monitoringu elektrických odporových vlastností a seismických vlastností horninového masivu, prokázal opodstatněnost této nové metody. Nová metoda je vysoce citlivá na změny horninového masivu, což je při použití v prostředí úložiště radioaktivního odpadu nanejvýše žádoucí.

Dosud provedené práce s aparaturou SGI 1 prokazují, že získané poznatky rozšiřují naše znalosti v oblasti základního výzkumu (zjištění, které změny hydrogeologických, geotechnických, a teplotních charakteristik horninového masivu nacházejí odezvu v detailním monitorovacím seismickém měření a geoelektrickém odporovém měření). Tyto poznatky vedou, mimo jiné, k poznání, že lze detekovat vznik a chování puklinových systémů. Tento závěr lze využít i pro praktický realizační výstup při ražbě hlubinného úložiště: monitorovací stanice založené na systému SGI 1 jsou schopny sledovat, zda při ražbě báňského díla nedochází při necitlivé ražbě k oživování dříve nezmapovaných puklinových zón (což umožní zavčas ražbu upravit) a tyto stanice také mohou i dlouhodobě sledovat již vybudovaná důlní díla úložiště. Z tohoto důvodu doporučujeme pokračovat v provozu stávající stanice, zajistit vývoj pokročilejšího modelu SGI 2 a postupně osadit i více monitorovacích bodů, aby tak bylo možno získat i zkušenosti s interpretací prostorově rozmístěných dat (vybudování prostorové sítě).

Tak jak bude narůstat časová osa monitoringu bude možno i podrobněji porozumět změnám v chování dat. Tak bude možno nejenom provádět včasnou detekci změn v horninovém masivu (což se již děje), ale pokusit se i o určitou predikci v procesu vývoje puklinových systémů.

5 Literatura

Knihy, články, mapy, kapitoly:

- BACHURA M. (2013): Analýza seismické cody západočeských zemětřesení. Doktorská disertační práce, Přírodovědecká fakulta UK, Praha.
- BÁRTA J., VILHELM J., JIRKŮ J., VILHELM J. (2016): Metodika prací se systémem SGI 1 (Seismika, geoelektrika, internet). – Výstup projektu TAČR Ta 03020408.
- BÁRTA J., SLAVÍK L., VILHELM J., BELOV T., JIRKŮ J. (2019a): Průběžná zpráva o poznatcích z geofyzikálních měření na PVP Bukov – Etapa 1a. – Technická zpráva TZ 392/2019, MS SÚRAO, Praha.
- BÁRTA J., SLAVÍK L., VILHELM J., BELOV T., JIRKŮ J. (2019b): Průběžná zpráva o poznatcích z geofyzikálních měření na PVP Bukov – Etapa 1b. – Technická zpráva TZ 414/2019, MS SÚRAO, Praha.
- BÁRTA J., SLAVÍK L., VILHELM J., BELOV T., JIRKŮ J. (2020): Průběžná zpráva o poznatcích z geofyzikálních měření na PVP Bukov – Etapa 2. – Technická zpráva TZ 527/2020, MS SÚRAO, Praha.
- BÁRTA J., SLAVÍK L., VILHELM J., BELOV T., JIRKŮ J. (2021): Průběžná zpráva o poznatcích z geofyzikálních měření na PVP Bukov – Etapa 3. – Technická zpráva TZ 569/2021, MS SÚRAO, Praha.
- BARTON N. (2007): Rock quality, seismic velocity, attenuation and anisotropy, (Taylor & Francis Group, London).
- BUKOVSKÁ Z., VERNER K., BRÁZDA L., BURIÁNEK D., DOBEŠ P., DUDÍKOVÁ SCHULMANNOVÁ B., ERBAN V., FRANĚK J., HALODOVÁ P., HANÁK J., HAVLOVÁ V., HOLEČEK J., JAČKOVÁ I., JELÉNEK J., KAŠPAR V., KOLOMÁ K., KOPAČKOVÁ V., KOUCKÁ L., KUČERA P., LAUFEK F., LNĚNIČKOVÁ Z., KOČERGINA J., KUČERA P., MYŠKA O., NAHODILOVÁ R., NOVOTNÁ I., PERTOLDOVÁ J., RUKAVIČKOVÁ L., SOEJONO I., ŠVAGERA O., TOMEK F., VESELOVSKÝ F., ZUNA M. (2017): Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov. – Závěrečná zpráva 191/2017, MS SÚRAO, Praha.
- BUTLER D.K. (2005): Near-Surface Geophysics. – Society of Exploration Geophysicists, 2005.
- GRIFFIN R.H. (1979): Geophysical Exploration for Engineering and Environmental Investigations. – US Army Corps of Engineers.
- HOKR M., RUKAVIČKOVÁ L., HAVLOVÁ V., BALVÍN A., BÁRTA J., DĚDEČEK P., HOFMANOVÁ E., HOLEČEK J., MÁLEK J., MARTÍ X., PETRUŽÁLEK M., RÁLEK P., ROWBERRY M. D., ŠAFANDA J., ŽANDA L. (2018): Vývoj a ověřování metodik pro charakterizaci horninového prostředí – výsledky monitoringu v přivaděči Bedřichov. – TZ 289/2018, MS Archiv SÚRAO.
- KUBICA J., KROUL J. (2013): Geotechnika 2, Dobývání ložisek nerostů. Učební texty pro předmět geotechnika, střední průmyslová škola, Karviná, příspěvková organizace, centrální vzdělávací středisko OKD, a.s., 318 stran.

PARK CH. B., MILLER R. D., XIA J. (1999): Multichannel analysis of surface waves. – Geophysics volume 64, W.3.

SLAVÍK L., SVOBODA I., BUCHTA J., KOPECKÝ V. (2016): Užitený vzor 30076.

VILHELM J. (2017): Studie proveditelnosti pasivní seismiky blízkých zdrojů. - G IMPULS Praha s.r.o. za finančního sponzoringu SIC (Středočeské inovační centrum).

ZUNA M., HAVLOVÁ V., JANKOVSKÝ F., ŠVAGERA O., SOSNA K., GVOŽDÍK L., HOLEČEK J., ŘIHOŠEK J., HOFMANOVÁ E., KOČAN K., KRYL J., ZELINKOVÁ T., KOŘALKA S. (2021): Výzkum puklinové konektivity v PVP Bukov – Průběžná zpráva č. 3. TZ 551/2021, SÚRAO, Praha.

Vybrané technické normy a standardy **související s řešenou problematikou:**

ČSN EN ISO 94 88 (ČSN 73 0300). Solární energie – Slovník. Praha: Český normalizační institut. 2001. 44 s.

ČSN 73 1001: Základová půda pod plošnými základy (neplatná norma, dosud však používaná zejména pro zatřídění hornin)

European Standard (2015): Draft prEN 16907-2 ISCS 13.080.99;93.020, English Version Earthworks – Part 2: Classification of materials

ČSN 03 8375 – Ochrana kovových potrubí uložených v půdě nebo ve vodě proti korozi.

ČSN 03 8372 – Zásady ochrany proti korozi nelineových zařízení uložených v zemi nebo ve vodě.

ČSN 03 8365 – Stanovení přítomnosti bludných proudů v zemi.

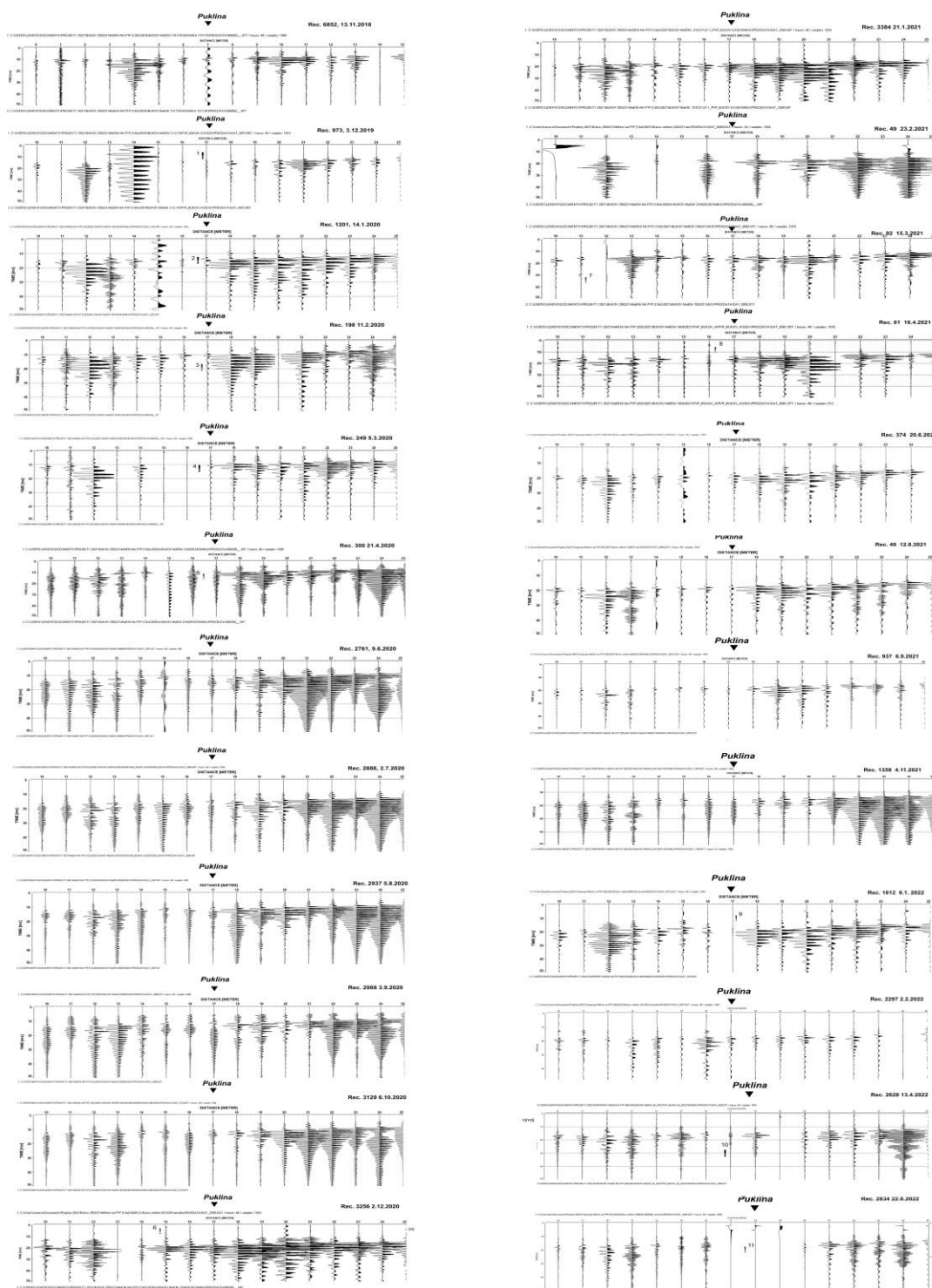
ČSN EN 50162 – Ochrana před korozi bludnými proudy ze stejnosměrných proudových soustav.

Technické podmínky TP124 (vydalo Ministerstvo dopravy)

6 Přílohy

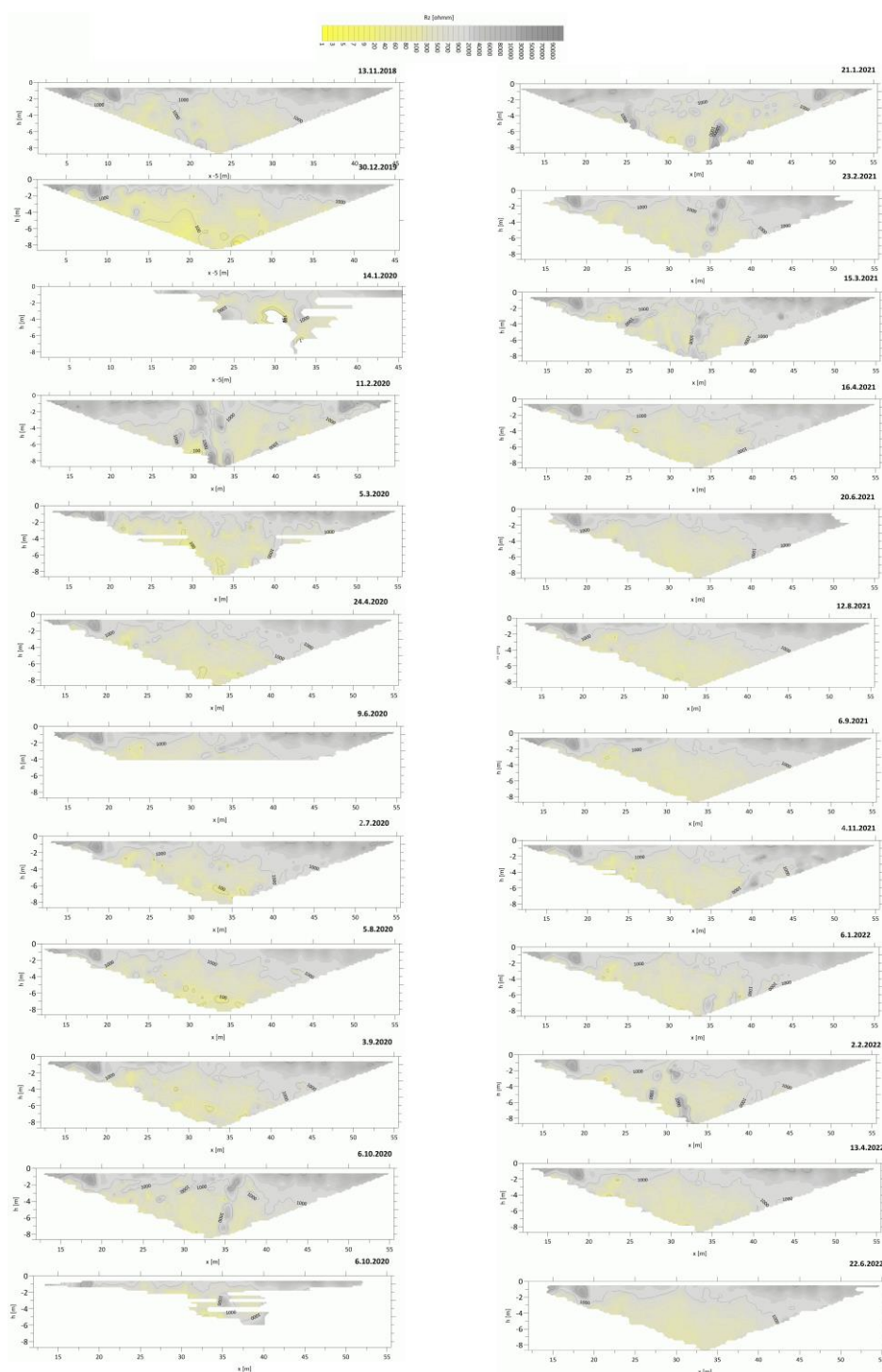
6.1 Velkoobrazová příloha 1

Přehled detailních výřezů ze seismických záznamů



6.2 Velkoobrazová příloha 2

Přehled odporových řezů (přímá data)



Velkoplošné přílohy jsou ve vysokém rozlišení zobrazeny ve zvláštní samostatné příloze závěrečné zprávy.



SÚRAO

SPRÁVA ÚLOŽIŠŤ
RADIOAKTIVNÍCH
ODPADŮ

NAŠE
BEZPEČNÁ
BUDOUCNOST