



**PRVNÍ ZKUŠENOSTI S MONITOROVACÍM GEOFYZIKÁLNÍM SYSTÉMEM SGI 1 NA
PODZEMNÍM VÝZKUMNÉM PRACOVIŠTI BUKOV**

**FIRST EXPERIENCE WITH MONITORING GEOPHYSICAL SYSTEM SGI 1 AT BUKOV
UNDERGROUND RESEARCH SITE**

Jaroslav Bárta¹, Tomáš Belov², Jaroslav Jirků³, Lubomír Slavík⁴, Jan Vilhelm⁵

Abstrakt

Na uranovém dole v Dolní Rožince, kde byla skončena těžba, vzniklo podzemní výzkumné pracoviště PVP Bukov Správy úložišť radioaktivních odpadů (SÚRAO). Na tomto pracovišti se postupně instalují či připravují experimenty, které mají usnadnit realizaci plánovaného hlubinného úložiště radioaktivních odpadů v České republice. V září 2018 zde byla zahájena příprava instalace geofyzikálního monitorovacího systému SGI 1. V roce 2019 byla instalace systému dokončena a v období od srpna 2019 do srpna 2020 probíhá první etapa rutinních měření s tímto systémem. Zkratka SGI 1 vyjadřuje termíny seismika, geoelektrika, internet, verse 1. Systém sleduje chování seismických vln a změny ve velikostech měrných odporů hornin. Naměřená data jsou ukládána do paměti počítače a následně jsou naměřená data pomocí internetu rozváděna na odborná pracoviště k dalšímu zpracování. Zde předkládaný článek přináší první poznatky z provozu monitorovacího systému.

Abstract

An Underground Research Centre PVP Bukov of the Radioactive Waste Repository Authority (SÚRAO) was established at the uranium mine in Dolní Rožinka, where the mining was closed. Experiments are being gradually installed or prepared at this site to facilitate the implementation of the planned underground radioactive waste repository in the Czech Republic. In September 2018, preparations for the installation of the geophysical monitoring system SGI 1 were started here. In 2019, the installation of the system was completed and between August 2019 and August 2020 the first stage of routine measurements with this system takes place. The abbreviation SGI 1 expresses the terms seismics, geoelectrics, internet, verse 1. The system monitors the behavior of seismic waves and changes in the sizes

of specific rock resistances. The measured data is stored in the computer's memory and then the measured data is transferred over the Internet to specialized workplaces for further processing. The article presented here provides the first findings from the operation of the monitoring system.

Klíčová slova

Seismika, geoelektrika, měrný odpor, rychlost, hornina, podzemní úložiště, monitoring

Keywords

Seismic measurement, geoelectrical measurement, resistivity, velocity, rock, underground deposit, monitoring

1. Úvod a základní charakteristika systému

V rámci úkolu Technologické agentury ČR, č. úkolu TA 03020408, byla vypracována certifikovaná metodika a užitiný vzor pro monitorování změn v chování horninového prostředí, a to metodou seismickou a pomocí měření měrného odporu hornin. Výsledný geofyzikální systém dostal označení SGI 1 a po pokusném umístění ve štole v Bedřichově v Jizerských horách byl v roce 2018 trvale umístěn na výzkumném podzemním pracovišti v Dolní Rožince (pracoviště PVP Bukov).

Geofyzikální systém je sestaven ze tří základních bloků:

- 1) řídicí počítač (dále jen PC) + switch LAN
- 2) sestava pro elektrickou odporovou tomografii (anglicky Electrical Resistivity Tomography, dále jen ERT)
- 3) sestava pro seismická měření (dále jen SM)

Hlavním řídicím prvkem celé sestavy je průmyslový počítač PC ARK1503. 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 a posílá pomocí sítě ethernet na vzdálený server ftp.

Systém pro odporovou tomografii ERT změří pomocí elektrod E1 až En zdánlivé odpory proměřovaného horninového prostředí. Elektrod může být až 72. Systém ERT předává data nadřazenému počítači pomocí sériové sběrnice (USB / RS232). Vlastní odporová měření provádí aparatura ARES II (GF Instruments s.r.o.), která je zařazena do systému.

Seismická aparatura sestává z řídicí elektroniky, pulzních generátorů a systému seismických čidel R1 až Rn. Pro vysílání i příjem podélných vln byla použita čidla určená pro příčné S-vlny. To souvisí s geometrií měření a orientací seismických čidel, kdy čidla pro S-vlny vykazují optimální vyzařovací charakteristiku pro P-vlnu ve směru měřicího 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 Rx (v počtu až 6 kusů) toto vlnění registrováno. Digitalizované vlnové obrazy jsou ukládány v řídicím PC.

Vysílací i přijímací seismická čidla jsou umístěna v jedné linii, ve stejných pravidelných vzdálenostech. Počet budicích čidel i počet přijímacích čidel není omezen, ale vzhledem k výraznému úbytku signálu se vzdáleností je doporučena maximální vzdálenost mezi budicím a přijímacím čidlem cca. 4 m. V sestavě musí být minimálně jedno budicí čidlo, ale jsou doporučena čidla dvě, z důvodu prozáření z obou směrů. Pokud se v místě měření vyskytuje porušení trhlinou v horninovém masivu, je možné umístěním čidla za trhlinu zajistit možnost monitorování chování pukliny.

V době seismických měření musí být aparatura ERT 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.

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 4x denně a delší.

Doba potřebná k měření odporové tomografie je závislá na počtu zapojených elektrod a odporových poměrů zkoumaného prostředí. Jedno měření vyžaduje nyní cca 20 minut.

Data jsou k dispozici na serveru ftp na průmyslovém PC přímo v laboratorní chodbě.

Celý systém je napájen napětím 230 V / 50 Hz.

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

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

2. Popis lokality a instalace SGI 1 v prostředí PVP Bukov

V prostředí PVP Bukov se vyskytují horniny severovýchodního okraje strážeckého moldanubika. Z pohledu regionálního členění je toto území řazeno do gföhlské skupiny moldanubika. Z pohledu litologického složení se jedná především o cordierit-biotitické a amfibol-biotitické pararuly a amfibolity v různé míře částečného tavení (migmatitizace). Tyto horniny obsahují polohy pestrých horninových vložek – amfibolitů, mramorů, eklogitů a metamorfovaných vápenato-silikátových hornin. Při východním okraji této jednotky v oblasti styku se svrateckým krystalinikem pak vystupuje rozsáhlejší těleso světlých granulitů s drobnými polohami serpentinizovaných peridotitů a ortorulových hornin. Do komplexu těchto hornin byly vmístěny amfibol-biotitické melagranity až melasyenity (durbachity) náležící tělesu drahonínského plutonu. Zpracováno dle lit. Bukovská et al., 2017. Na obr. 1a je zobrazena širší mapová situace se vstupem do PVP Bukov, které se nachází v hloubce 500 m pod povrchem terénu. Na obr. 1b je pohled na těžní věž, která zajišťuje vstup na výzkumné pracoviště.

Měřicí systém SGI 1 byl umístěn na jižní část laboratorní chodby BZ₁-XII do linie profilu P1L, viz mapový podklad na obr. 2. Pro metodu ERT bylo použito celkem 48 elektrod vzdálených od sebe 25 cm. Pro seismická měření bylo zapojeno jedno zdrojové čidlo a tři čidla přijímací. Nejvzdálenější přijímací seismické čidlo bylo situováno za úzkou porušenou strukturou o šířce jednotek cm. Seismická čidla jsou mezi sebou vzdálená 30 až 32,5 cm. Velmi malá vzdálenost elektrod mezi sebou byla zvolena zejména proto, že záměrem projektu je získat zejména poznatky o vzniku mikropuklin či o jejich změnách. Dalším důvodem ale také bylo, že při malém rozestupu elektrod se logicky vytvářejí takové měřicí sestavy, které jsou méně citlivé (v praxi necitlivé) na vliv bludných (parazitních) proudů. Záměr studovat vliv tenkých struktur na chování seismických vln vedlo také logicky k aplikaci seismických vln o vysokých frekvencích (stovky až první jednotky tisíc Hz). Vysoké frekvence se v daném horninovém prostředí projevují jako vlny šířící se s velkým útlumem signálu. Proto i rozstup seismických snímačů musel být snížen na třicet cm.

Celkový pohled na testovací stanici je uveden na obr. 3a. Stanici tvoří dvě skříně s přístrojovými technologiemi a do stěny štoly jsou fixovány měřicí elektrody, seismická čidla, vše je propojeno příslušnou kabeláží. Na obr. 3b se nachází výřez s podrobnějším pohledem na přístrojové skříně. Detailní záběr na rozmístění seismických čidel zafixovaných na stěně štoly je uveden na obr. 4a, detailní záběr na způsob uspořádání měřících elektrod je na obr. 4b (obr. 4b je pro lepší názornost převzat z lokality Bedřichov). Na obr. 5 je uveden příklad realizačního výstupu s izoohmickým řezem (zdánlivé měrné odpory), v tomto případě z dat naměřených 4.6.2020 ve 12 hodin. Kolem staničení 7 je zřetelný pokles odporů (porušená zóna?). Na obr. 6 je příklad seismického záznamu. Rychlost šíření P vlny byla stanovena na 4843 m/s a S vlny na 2811 m/s. Na kanálu 3, který je situován za poruchou, je zřetelný pokles signálu. Záznam byl sestaven jako průměr z desetidenního monitorovacího měření v daném místě.



Obr. 1 Mapa s lokalizací vstupu na PVP Bukov (a) a snímek těžní věže (b) vedoucí do výzkumného pracoviště (12. patro, hloubka 500 m)

Na obr. 4a, detailní záběr na způsob uspořádání měřících elektrod je na obr. 4b (obr. 4b je pro lepší názornost převzat z lokality Bedřichov). Na obr. 5 je uveden příklad realizačního výstupu s izoohmickým řezem (zdánlivé měrné odpory), v tomto případě z dat naměřených 4.6.2020 ve 12 hodin. Kolem staničení 7 je zřetelný pokles odporů (porušená zóna?). Na obr. 6 je příklad seismického záznamu. Rychlost šíření P vlny byla stanovena na 4843 m/s a S vlny na 2811 m/s. Na kanálu 3, který je situován za poruchou, je zřetelný pokles signálu. Záznam byl sestaven jako průměr z desetidenního monitorovacího měření v daném místě.



Obr. 2 Mapové schéma PVP Bukov. Geofyzikální profily P1L, P1P a P2L jsou vyjádřeny silnými černými liniemi

Současně s instalací systému SGI 1 na PVP Bukov jsou prováděna také další měření s cílem monitorovací komplex ještě rozšířit o další výzkumné činnosti. V této souvislosti byl vytvořen na odvrácené stěně štoly vůči SGI 1 další profil označený jako P1P (viz situace na obr. 2). Na profilu je každý měsíc provedeno komplexní seismické měření (refrakce, reflexe) při kroku geofonů po 1 m; celkem je použito 48 geofonů. Se stejným rozestupem a počtem elektrod je měřena také metoda ERT. Toto měření má poskytnout hlavně poznatky o hlubších zónách horninového masivu, zejména v hloubkách kolem 10 až 15 m, kde by se mohly objevit náznaky přirozené klenby zvýšených napětí (resp. seismických rychlostí) vzniká kolem výrubu baňského díla a její chování je ovlivněno geomechanickým stavem daného prostředí (jak poprvé popsal Tarzaghi, 1943, současné shrnutí znalostí viz Barton, 2007).

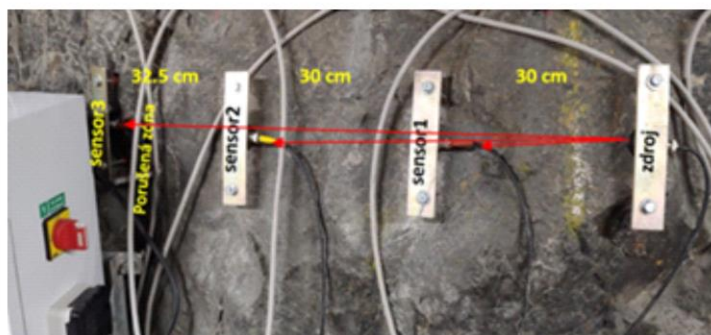
Systém SGI 1 je koncipován tak, že umožňuje využít volnou kapacitu seismických kanálů pro napojení seismických čidel, které mohou souvisle pasivně detekovat seismický šum v blízkém okolí. Systém pasivní seismiky je v tuto dobu úspěšně testován. Smyslem rozšířit aktivní seismická měření o pasivní sledování seismických signálů není nahrazovat velké seismologické systémy sledující vzdálené zdroje (zejména zemětřesení), ale naopak doplnit poznání o blízké zdroje, pro které je charakteristické, že se projevují při detekci vysokými frekvencemi (stovky až tisíce Hz, v literatuře často spojováno s termínem rock noise či seismic noise, viz např. Arosio et al., 2017).



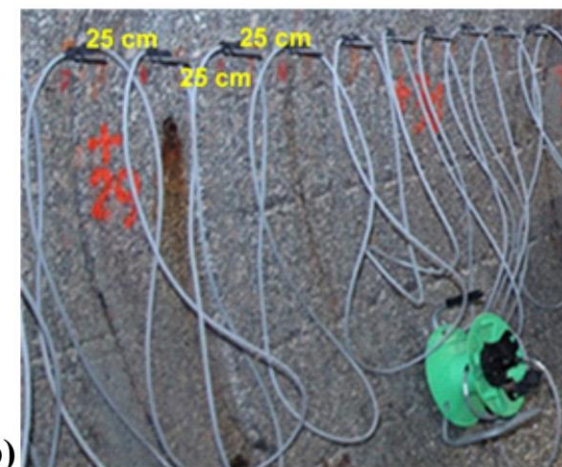
a)

b)

Obr. 3 Celkový pohled na soustavu SGI 1 umístěnou v PVP Bukov (a), výřez se skříněmi pro přístrojovou techniku, vlevo geoelektrická a vpravo seismická část (b)



a)



b)

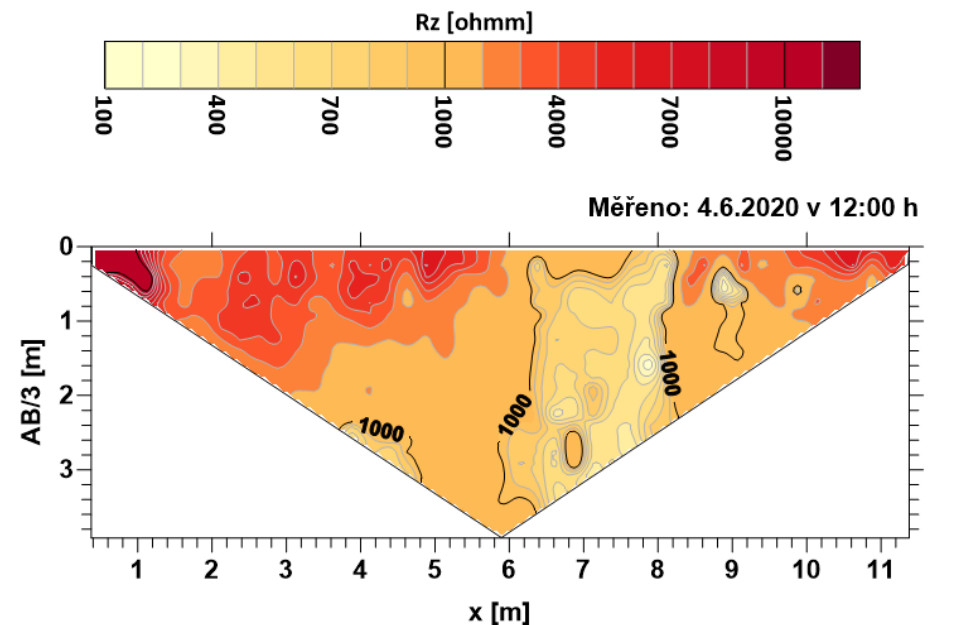
Obr. 4 Detailní záběr na soustavu seismických čidel (a), pohled na způsob uspořádání měřících elektrod propojených kabely (b)

V rámci komplexního posouzení charakteru zkoumaného prostředí byla testována také metoda vyzvané polarizace. Byla prokázána polarizovatelnost zkoumaných hornin. V místě podzemního pracoviště byla také zjištěna přítomnost bludných proudů. Zkušební měření radarovou metodou prokázalo, že anténa 400 MHz, nejlépe doplněná měřením s anténou 900 MHz, poskytují radarogramy s velkou vypovídací hodnotou o daném prostředí. Bylo doporučeno zařadit radarové měření do standardního komplexu metod.

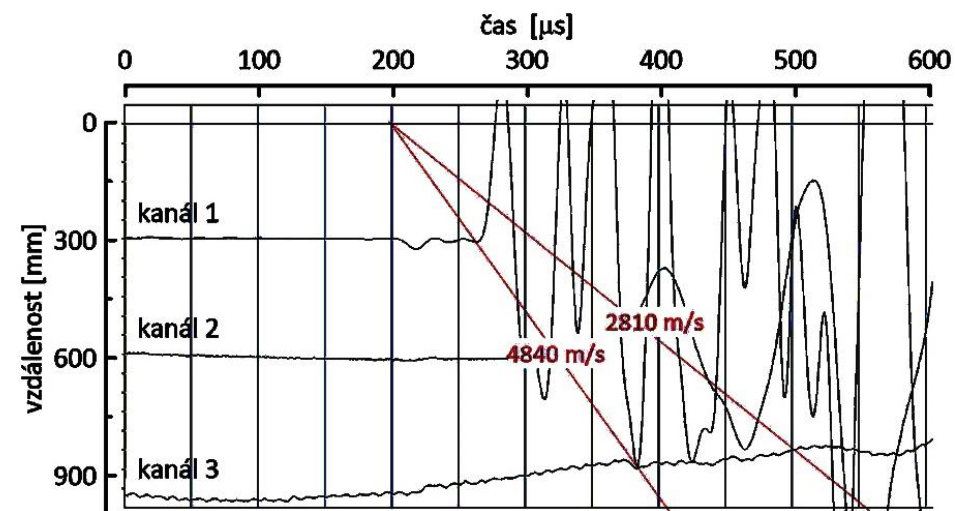
Shrneme-li dosavadní poznatky, lze konstatovat, že základní monitorovací systém SGI 1 je schopen dalšího technického rozvoje, případně navázání na další výsledky geofyzikálních měření. Současná rutinní měření prováděná v PVP Bukov pokrývají svým dosahem nejenom zónu EDZ (Excavation Damaged Zone), která leží při povrchu výrubu a zasahuje většinou do hloubky až cca 1 m, ale je sledována i problematika přirozené klenby zvýšeného napětí, která se v podmínkách PVP Bukov dá předpokládat v hloubce kolem 10 m. Pro problematiku spojenou s šířením radionuklidů v porušeném prostředí je aktuální zejména mocnost a vlastnosti EDZ, pro realizaci vlastního báňského díla budou při plánování ražby důležité zejména informace o charakteru zóny snížených seismických rychlostí přecházející do klenby o zvýšeném napětí. Podrobněji viz lit. Bárta, 2010.

3. První poznatky o geofyzikálních (geotechnických) vlastnostech zkoumaného horninového prostředí

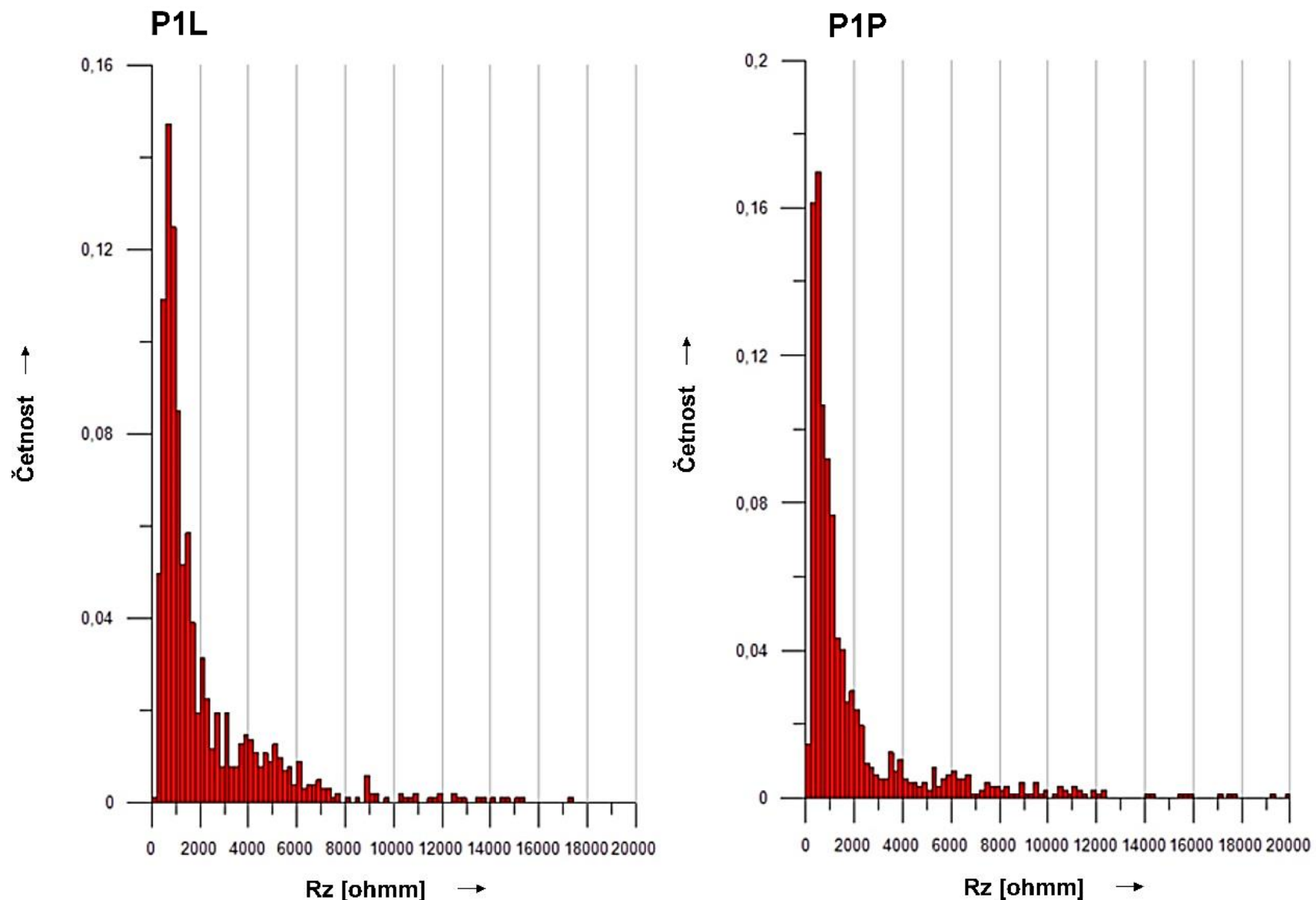
Na obr. 5 je zobrazen izoohmický řez (zdánlivé měrné odpory) naměřený 4.6.2020 ve 12 hod. Obdobné hodnoty získáváme i při zpracování ostatních datových souborů. Hodnoty měrných odporů se hlavně pohybují ve stovkách až jednotkách tisíců ohmm, vzácnější je výskyt hodnot v prvních desítkách ohmm. Na srovnávacím analogonu, tj. v Bedřichově, byl výskyt odporů v hodnotách vyšších tisíců až desítkách tisíc ohmm výrazně častější. Rozložení odporů podrobněji ilustrují histogramy na obr. 7.



Obr. 5 Příklad realizačního výstupu. Izoohmický řez (zdánlivé měrné odpory) Měřeno 4. 6. 2020 ve 12 hod.



Obr. 6 Příklad výstupu se seismickým záznamem. Rychlost šíření P vlny byla stanovena na 4843 m/s a S vlny na 2811 m/s.



Obr. 7 Histogramy naměřených zdánlivých měrných odporů. Odvozeno z dat ERT pro profil P1L a P1P

Relativně nižší měrné odpory mohou souviset se dvěma příčinami, a to

- Zkoumaná hornina je relativně více narušena ve srovnání s granity ve štole v Bedřichově.
- Zkoumaná hornina má často příměs kovových minerálů (chalkopyrit a další). Viz. lit. Bukovská et al., 2017.

Z makroskopického pohledu i z naměřených dat je možno očekávat, že hornina zřejmě podléhala tlakům, které komplikovaly její geotechnické vlastnosti. Jinými slovy hornina se nejeví jako velké bloky s přibližně stejnorodými vlastnostmi, ale spíše jako hornina tlakově postižená s rychlým střídáním pevnějších partií s partiemi až značně porušenými.

Na obr. 8 jsou zobrazeny histogramy seismických rychlostí podélných a příčných vln získaných z měření na profilu P1P. Seismické rychlosti (viz histogramy) svými mediány v podstatě odpovídají předpokladům, mají však značný rozptyl. Pro pevné krystalické (skalní) horniny lze očekávat rychlost šíření příčných vln kolem 3000 m/s a podélných vln kolem 5000 až 5500 m/s. Překvapivě vychází velikost Poissonova čísla; při výpočtu byl dosažen medián kolem 0,3. Dokonale pevné, homogenní skalní horniny se vyznačují číslem kolem 0,2 i méně. První výsledky zpracování seismických dat tedy naznačují značnou proměnlivost stupně narušení zkoumaných hornin.

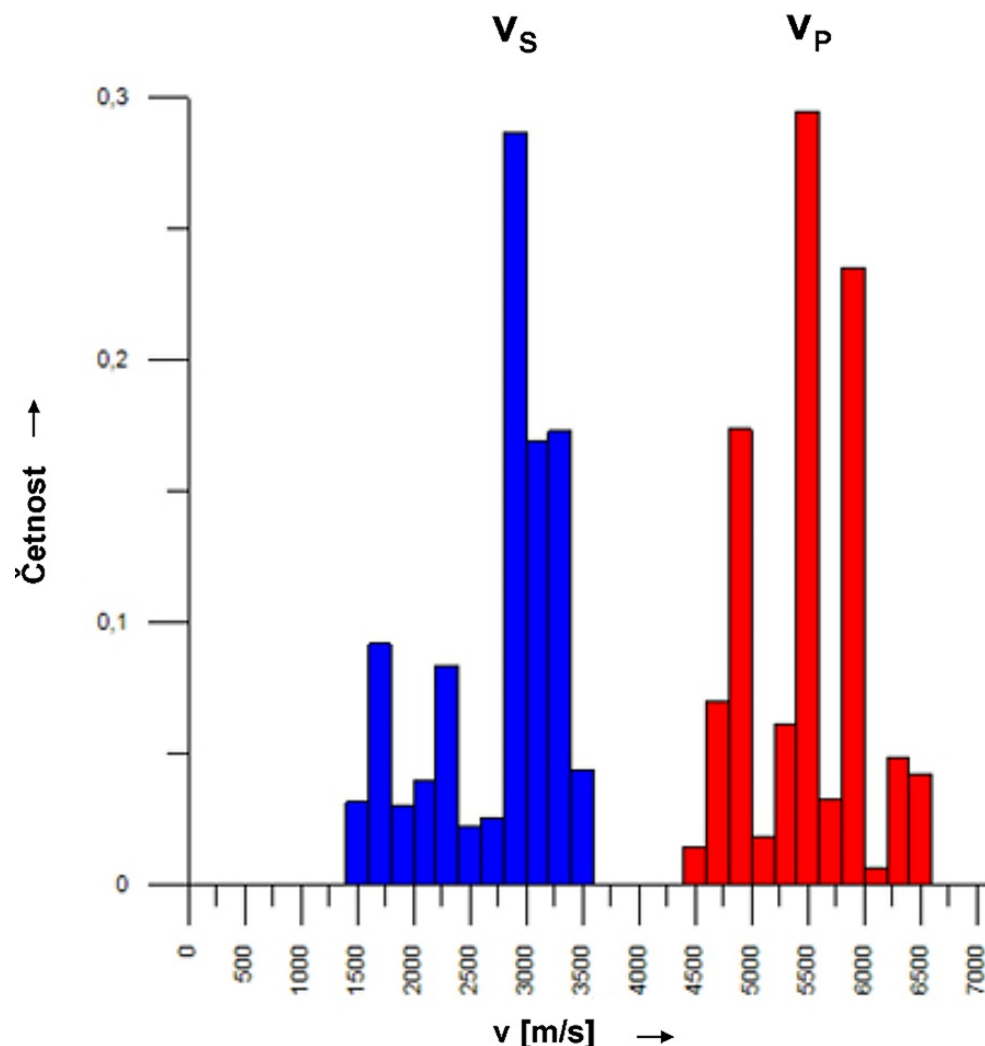
Zde předkládaný článek je pouze úvodní informací o provozu monitorovací geofyzikální stanice na PVP Bukov. Již rutinně a pravidelně získávaná data jsou postupně ukládána do databáze Správy úložišť radioaktivních odpadů a postupně je optimalizována metodika jejich zpracování. Řešitelský tým předpokládá, že podrobnější zpráva o způsobu zpracování a interpretaci naměřených dat může být tématem pro příspěvek v příštím ročníku časopisu EGRSE.

Poděkování

Řešitelský tým děkuje Správě úložišť radioaktivních odpadů (SÚRAO) za umožnění podílet se na práci v Podzemním výzkumném pracovišti Bukov (PVP Bukov).

Literatura

BUKOVSKÁ, Z., VERNER, K. a kol.: *Závěrečná zpráva dílčího projektu: Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov. Název projektu: Výzkumná podpora pro bezpečnostní hodnocení hlubinného úložiště. ČGS a spoluřešitelé pro SÚRAO, 2017.*



Obr. 8 Histogramy seismických rychlostí z měření na profilu P11

TARZAGHI, K.: *Theoretical Soil Mechanics*, John Willey and Sons, New York, 1943.

BARTON, N.: *Rock Quality, Seismic Velocity, Attenuation and Anisotropy*, Taylor and Francis Group, London, 2007.

AROSIO, D., CORSINI, A., GIUSTI, R., ZANZI, L.: *Seismic Noise Measurements on Unstable Rock Blocks: The Case of Bismantova Rock Cliff*, Springer International Publishing, 2017.

BÁRTA, J.: The Comparison of Certain Classical Geotechnical Terms for Underground Structures with Terminology for Deep Radioactive Waste Repositories. A Geophysicist's View. *International Conference Underground Construction*, Prague, 2010.

Autoři:

¹ RNDr. Jaroslav Bárta, CSc., G IMPULS Praha spol. s r.o., Přístavní 24, Praha 7, 170 00, barta@gimpuls.cz

² Mgr. Tomáš Belov, G IMPULS Praha spol. s r.o., Přístavní 24, Praha 7, 170 00, belov@gimpuls.cz

³ Mgr. Jaroslav Jirků, G IMPULS Praha spol. s r.o., Přístavní 24, Praha 7, 170 00, jirku@gimpuls.cz

⁴ Ing. Lubomír Slavík, Ph.D., Technická univerzita v Liberci, Studentská 2, 461 17 Liberec, lubomir.slavik@tul.cz

⁵ Doc. RNDr. Jan Vilhelm, CSc., Přírodovědecká fakulta UK, Albertov 6, Praha 2, vilhelm@natur.cuni.cz