



"LEHKÉ" GEOFYZIKÁLNÍ METODY PŘI PRŮZKUMU PODZEMÍCH DĚL
"LIGHT" GEOPHYSICAL METHODS IN EXPLORATION OF UNDERGROUND WORKS

Pavel Bláha¹, Roman Duras², Jan Gebauer³

Abstrakt

Počátek používání geofyzikálních metod pro dokumentaci horninového masivu je v Československu potřebné hledat na konci šedesátých let minulého století (Müller, 1987; Horský a Bláha, 2014). Postupně se jednoduchý soubor metod (symetrické odporové profilování, magnetická susceptibilita a úderová refrakční seizmika) rozšiřoval o další metody. Vrcholné použití tohoto postupu dokumentace horninového masivu nastal při průzkumu pro PVE Dlouhé Stráně (Müller a kol., 1987). Po této éře následoval útlum této aplikace geofyzikálních měření. S rozvojem stavebnictví v ČR, zejména staveb zasahujících do větších hloubek, začíná nový rozvoj sledování stavu horninového masivu v podzemí geofyzikálními metodami. Současným stavem tohoto používání geofyziky se zabývá tento článek.

Abstract

The origin of using the geophysical methods for documentation of rock massive in the Czechoslovakia is needed to be found at the beginning of the sixties of last century (Müller, 1987; Horský a Bláha, 2014). The simple complex of the methods (symmetric resistivity profiling, magnetic susceptibility, seismic refraction) was extended by other methods. The peak of the usage of this type of documentation of the rock massive occurred by the research for PHPP Dlouhé Stráně (Müller a kol., 1987). This era was followed by outage of this application of geophysical measurements. The new development of the monitoring rock massive in the underground by geophysical methods started by growth of construction industry in the Czech Republic. This article is focused on the usage of geophysics in current status.

Klíčová slova

Měření v masivu, rychlost, měrný odpor, 3D interpretace

Keywords

Measurement into the massif, velocity, resistivity, 3D interpretation

1. Úvod

Pojem „lehké geofyzikální metody“ není běžný termín používaný v obecné geofyzikální literatuře, ale termín zahrnující geofyzikální měření s jednoduchými přístroji. Jejich aplikace umožní získat první představu o fyzikálním stavu horninového masivu a velmi často vede i k upřesnění geologického popisu stěn báňského díla. Tato měření nevyžadují ani náročné vybavení k vlastnímu terénnímu měření a ani složité softwarové nástroje k jeho interpretaci. V nutných případech je takovéto měření zvládnutelné i jedním pracovníkem. V tomto příspěvku ukážeme výsledky měření teploty, magnetické susceptibility a dávkového příkonu, které jsou v některých případech doplněny výsledky geotechnické dokumentace povrchu stěn podzemních děl.

2. Historie dokumentace báňských děl geofyzikálními metodami

První použití geofyzikálních metod pro dokumentaci průzkumných inženýrskogeologických děl spadá na našem území do šedesátých let. Velká pozornost této formě geofyzikálních prací byla od šedesátých let minulého století věnována na Ústavu geofyziky na Vysoké škole báňské v Ostravě. Další pracoviště byla ve státních podnicích Geotest Brno, Stavební geologie Praha a Geoindustrie Praha. Shrnující práce, která zhodnotila stav v používání geofyzikálních prací v podzemí, publikoval Müller (1987) ve své doktorské práci. Ukázka způsobu dokumentace průzkumné štoly ze sedmdesátých let je z lokality Malá Vieska (Horský a Bláha, 2014). Na obrázku 1 jsou patrné výsledky použití následujících metod: symetrického odporového profilování, magnetické susceptibility, mělké refrakční seizmiky, teploty, dávkového příkonu a geoakustiky. Tato geofyzikální měření byla doplněna měřením odskoku Schmidtova kladívka.

Geologickou dokumentací štoly mohl být vymezen blok dolomitů (do 210 m) a blok vápenců (zbylá část štoly). Na základě komplexní dokumentace štoly byl horninový masiv v jejím okolí rozčleněn do tří základních bloků: A (0 až 115 m), B (115 až 210 m) a C (210 m až do konce štoly), čili dva bloky náleží k dolomitickým horninám, jeden k vápencovým. Detailnějším rozborem všech naměřených veličin pak bylo možné vymezit dílčí podbloky A1 až C4. Z takto získaných podkladů byla určena místa geotechnických zkoušek a pomocí výpočtů bylo možné získat z geofyzikálních měření další odvozené parametry (Poissonovo číslo, moduly pružnosti apod.). Zajímavá je geoakustická anomálie v okolí 150 metrů. Protože tato anomálie neměla přímé geologické vysvětlení, toto měření bylo opakováno zhruba po sedmi týdnech s jinou aparaturou. Existence anomálie se plně potvrdila a její původ spatřujeme v zóně koncentrovaného napětí nad přesmykovou plochou, po které došlo k násunu dolomitů na vápence.

3. Plošné měření

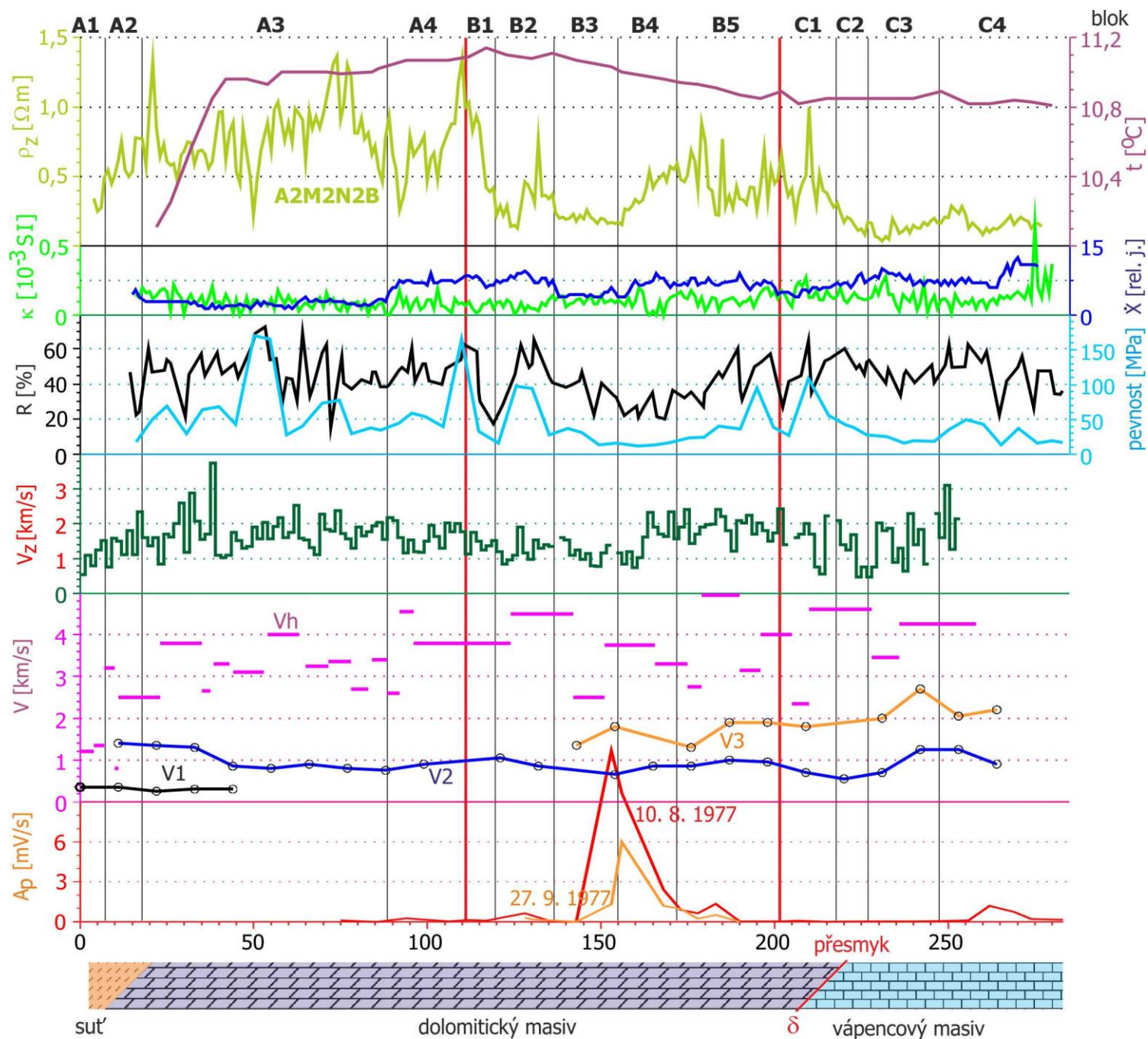
3.1 Měření magnetické susceptibility

Testovací měření magnetické susceptibility bylo realizováno na lokalitě PVP Bukov ve zkušební komoře ZK-2 na čtvercové síti měřených bodů A1 až K11, kdy oko sítě bylo zvoleno 20 cm. Při měření se na každém bodě měřilo dvakrát a postupovalo se po řádcích zleva doprava a postupně shora dolů, tj. A1 až A11, následně B1 až B11 atd. Ukázalo se, že je vhodné měřit na každém bodu minimálně dvakrát a vždy mezi měřeními nulovat kapametr alespoň 0,5 metru od stěny báňského díla. Zjišťování magnetické susceptibility hornin

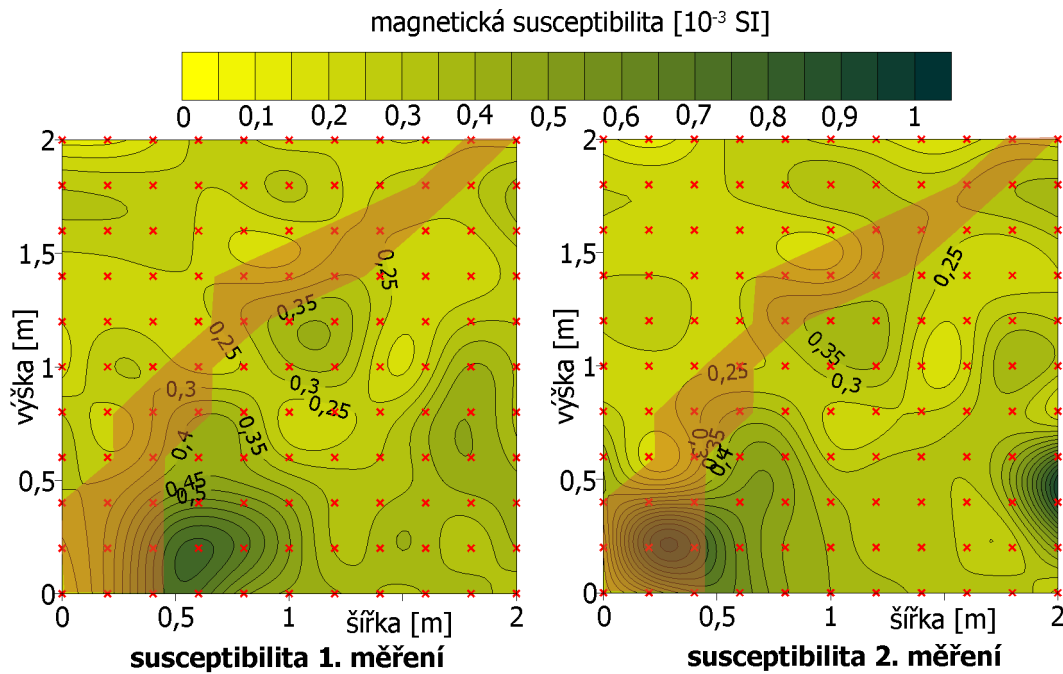
bylo realizováno pomocí přenosného kapametru KT-5. Práce probíhaly v manuálním režimu, kdy se měření spouštělo ručně po přiložení přístroje ke stěně důlního díla. Hodnoty magnetické susceptibility byly odečítány s přesností $0,01 \times 10^{-3}$ SI.

Z naměřených hodnot byly sestrojeny izolinie magnetické susceptibility zvláště pro každé opakované měření (Obr. 2). Výsledky obou měření dávají jednoznačně opakovatelné výsledky, zejména co se týká rozložení anomálií. Na obou měřeních je možné identifikovat čtyři anomálie. Průměrná hodnota naměřené magnetické susceptibility při prvním měření byla $0,321 \times 10^{-3}$ SI, u druhého potom $0,319 \times 10^{-3}$ SI. Podle těchto hodnot je možné prohlásit, že měření magnetické susceptibility bylo korektní a není potřebné ve zvolené metodice měření pro další aplikaci metody provádět jakékoli změny.

Následně byl z obou měření vypočítán průměr. Jeho směrodatná odchylka byla $0,081 \times 10^{-3}$ SI. Za pravděpodobnou anomální hodnotu lze tedy považovat veličinu $0,24 \times 10^{-3}$ SI. Na obou měřeních (Obr. 2) a také na průměrných hodnotách (Obr. 3) je možné identifikovat čtyři anomálie.



Obr. 1 Dokumentace štoly Tereza

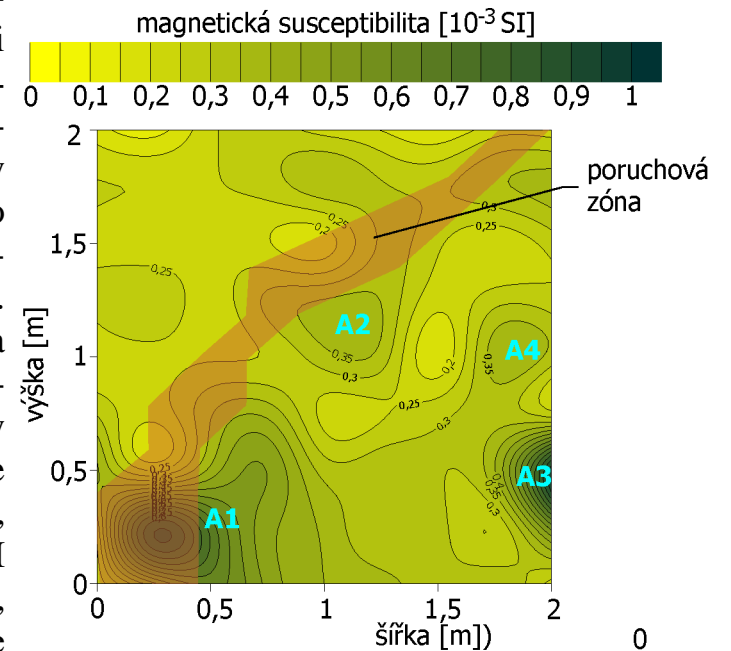


Obr. 2 Opakované měření magnetické susceptibilitity

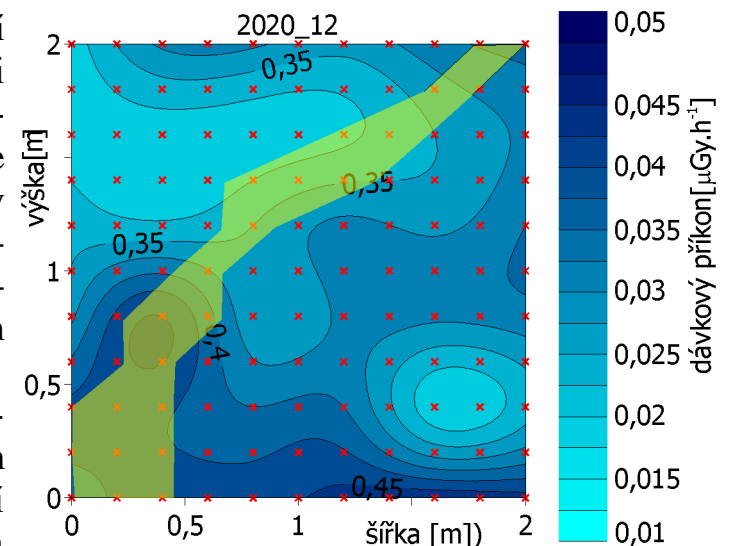
poruchovou zónou je možné určit čtyři anomálie se zvýšenou susceptibilitou. Anomálie A1 má střed u počvy komory těsně pod poruchou na pozici 0,3/0,2 a vyznačuje se maximální hodnotou sledované veličiny $0,93 \times 10^{-3}$ SI. Anomálie A2 leží cca ve středu měřené oblasti a s maximem na pozici 1,1/1,1 s maximem cca $0,38 \times 10^{-3}$ SI. Třetí anomálie A3 má maximum v místě 2,0/0,45 a dosahuje maximální hodnoty na měřené ploše $0,94 \times 10^{-3}$ SI. Je velmi pravděpodobné, že mimo tuto plochu překročí hodnota magnetické susceptibilitity velikost $1,0 \times 10^{-3}$ SI. Čtvrtá anomálie A4 má maximum v místě 1,9/1,05 a dosahuje maximální hodnoty cca $0,4 \times 10^{-3}$ SI. Určování příčiny vzniku anomálií magnetické susceptibilitity by vyžadovalo ještě měření s menším krokem s následným odběrem vzorků a jejich mineralogickým a chemickým rozbořem.

Zvýšené hodnoty susceptibilitity hornin ve zkoumaném masivu jsou bezesporu způsobeny přítomností minerálů se zvýšenou magnetickou susceptibilitou. Není však úkolem geofyziky jako vědní disciplíny, aby její specialisté určovali, které minerály to jsou. Určení původců anomálií je možné pouze společnou interpretací řešícího geologa, mineraloga a geofyzika.

Na obrázcích 2 i 3 je velmi dobře patrné rozdělení pole magnetické susceptibilitity na dvě části, a to nad a pod poruchovou zónou. Průměrná hodnota naměřené magnetické susceptibilitity nad poruchou je $0,24 \times 10^{-3}$ SI, proti $0,36 \times 10^{-3}$ SI pod poruchou, a v samotné poruše $0,31 \times 10^{-3}$ SI. Pod



Obr. 3 Interpretace magnetické susceptibilitity



Obr. 4 Pole dávkového příkonu, prosinec 2020

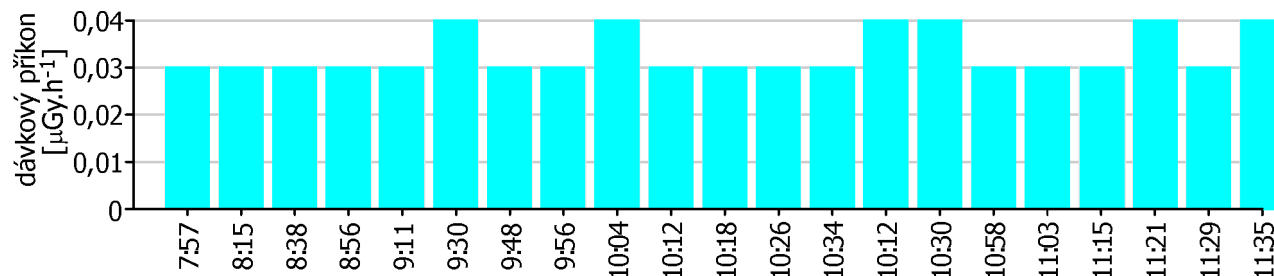
3.2 Měření dávkového příkonu

Další „lehkou metodou“ aplikovanou ve zkušební komoře ZK-2 bylo měření radioaktivity – dávkového příkonu záření gama. Pro měření byl použit přenosný přístroj D300 spojený s mikropočítačem Psion Organiser II. Měřicí rozsah přístroje je 0,1 až 300 $\mu\text{Gy/h}$, přesnost $\pm 15\%$ z měřené hodnoty, doba odezvy v rozsahu 1 až 60 s. Měření radioaktivity proběhlo s jediným odečtem na každém měřeném bodu.

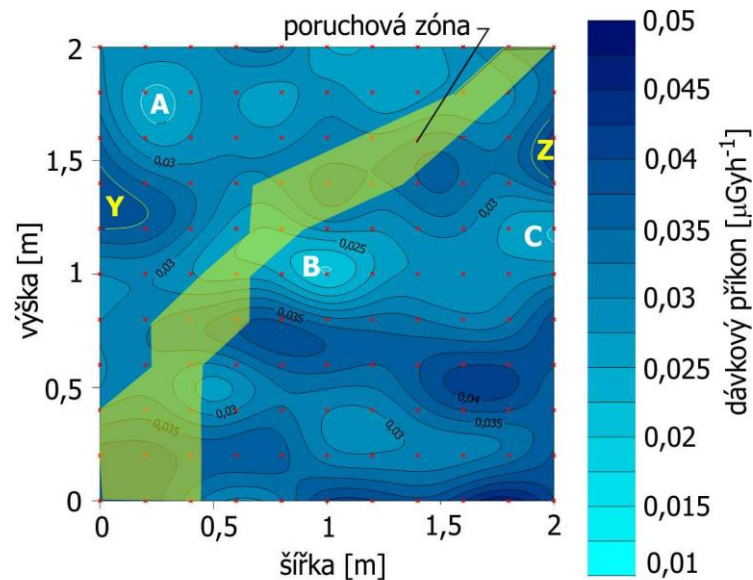
Testovací měření dávkového příkonu gama záření z prosince 2020 dalo z lehkých metod nejméně informací. Naměřené hodnoty vytvořily na poli radioaktivity anomálie rovnoběžné se směrem měření (Obr. 4). Nezdálo se pravděpodobné, že by tato skutečnost souvisela jakýmkoli způsobem s geologickou stavbou, litologickým složením nebo s geotechnickými podmínkami na lokalitě.

V další etapě polních prací v květnu 2021 bylo nezbytné měření dávkového příkonu realizovat s jinou metodikou. Proto byly práce druhé etapy upraveny, a to tak, že měření bylo opakováno dvakrát a vždy bylo měřeno po řadách (A, B, ...K). Při měření byl sledován chod přístroje měřením na opěrném bodě A1. Opakovaná měření na opěrném bodě ukázala, že chod přístroje byl během celého měření prakticky nulový (Obr. 5). Střední kvadratická chyba jednoho měření u opakovaných měření na opěrném bodě vychází 0,0046 $\mu\text{Gy/h}$. Za anomálie lze tedy požadovat místo, které se od normálního pole liší o trojnásobek chyby, tedy od 0,014 $\mu\text{Gy/h}$. Při průměrné naměřené hodnotě dávkového příkonu na zkušební ploše 0,032 $\mu\text{Gy/h}$ lze za anomální místa považovat části plochy, kde hodnoty dávkového příkonu klesají pod 0,018 $\mu\text{Gy/h}$ nebo rostou nad 0,046 $\mu\text{Gy/h}$.

Výsledky měření v květnu 2021 ukázaly v absolutních hodnotách stejné pole jako měření v roce 2020, avšak poloha anomálií je jiná. Celkové zhodnocení měření dávkového příkonu ve zkušební komoře ZK-2 je na obrázku 6. Z pohledu na obrázek je možné konstatovat, že opět existují určité náznaky existence vodorovných anomálií. Stejně jako u předešlého měření platí, že vzhledem ke své velikosti nemají větší význam. Jejich vodorovné uspořádání neodpovídá geologické stavbě, jak je patrné při pohledu na stěnu zkušební komory. Nebyl zjištěn ani rozdíl v dávkovém příkonu masivu nad a pod poruchou a ani uvnitř poruchy. Průměrná hodnota dávkového příkonu nad poruchou je 0,030 $\mu\text{Gy/h}$, pod poruchou a v poruše je to pak 0,033 $\mu\text{Gy/h}$. Pokud bychom hodnotili pole dávkového příkonu podle kritéria trojnásobku pro anomální hodnotu, pak můžeme najít jediné místo, kde část proměřené plochy tyto hraniční hodnoty



Obr. 5 Chod přístroje D300 při měření dávkového příkonu na ploše ve ZK-2



Obr. 6 Pole dávkového příkonu, květen 2021

překračuje. Je to anomálie Z, kde naměřené hodnoty jsou vyšší než 0,05 $\mu\text{Gy/h}$. U anomálií A, B a C mohou hodnoty pole poklesnout pod 0,018 $\mu\text{Gy/h}$, a naopak u anomálie Y narůst přes 0,046 $\mu\text{Gy/h}$.

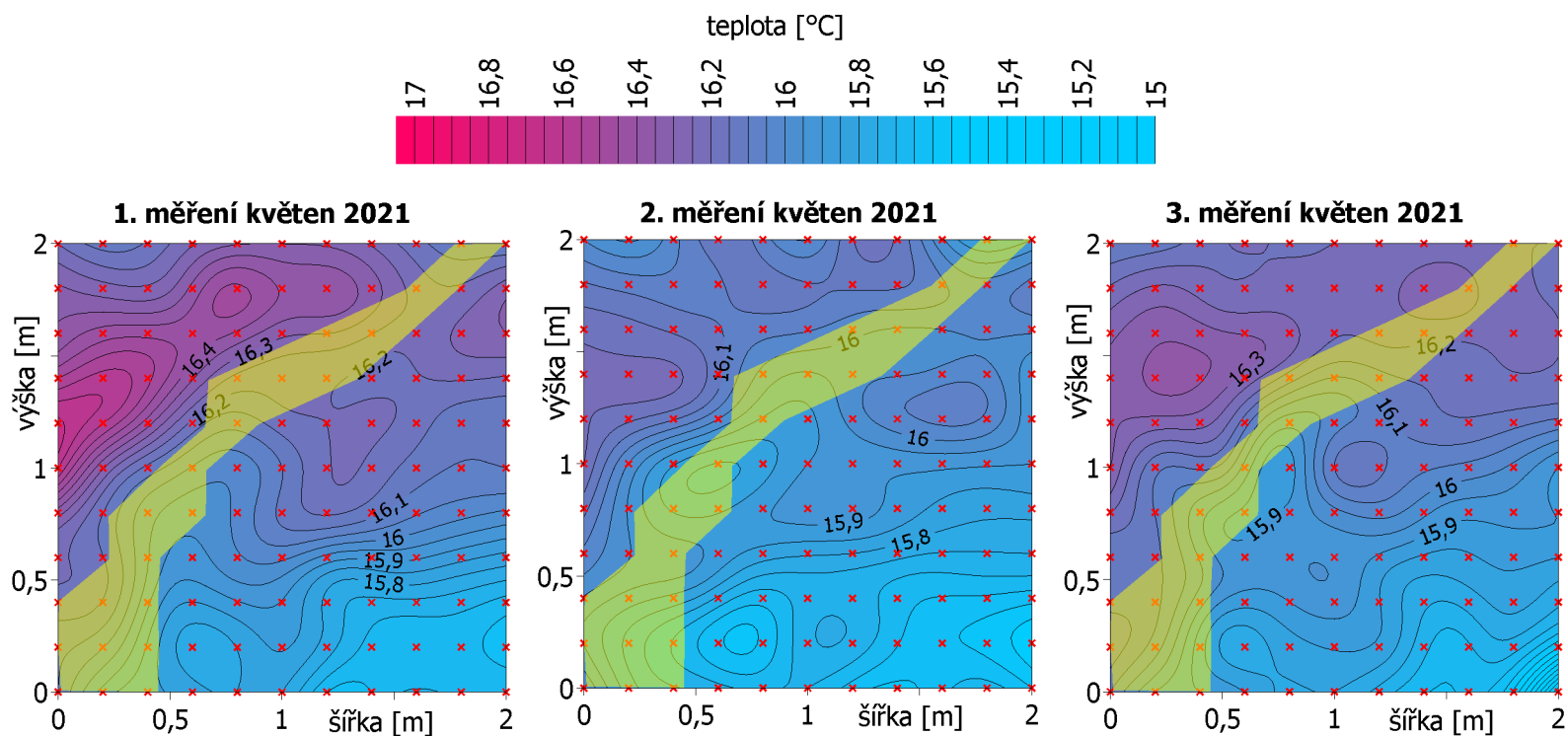
3.3 Měření teploty horninového masivu

Při teplotních měřeních v prosinci 2020 na povrchu západní stěny ZK-2 se ukázalo, že na tomto poli je možné najít změny teploty horninového masivu, nikoli však výrazné anomálie. Měření v květnu 2021 byla zjištěna poměrně neočekávaná fakta. Jednoznačně se

ukázalo, že teplotní pole povrchu skalního masivu je členité a jsou na něm patrné dvě základní skutečnosti (Obr. 7). Teplota na jih od poruchy (nad poruchou) je vyšší než teplota na sever od poruchy (pod poruchou). Tato skutečnost je patrná na všech třech květnových měřeních. Zajímavým se ukázal i fakt, že průměrná teplota na ploše se v čase mění. Průměrná teplota celé plochy byla při prvním měření v roce 2021 16,10 °C, při druhém 15,91 °C a při třetím 16,05 °C. Snad největší změny v čase byly sledovány v oblasti nad poruchou mezi prvním a druhým a podobně mezi druhým a třetím měřením.

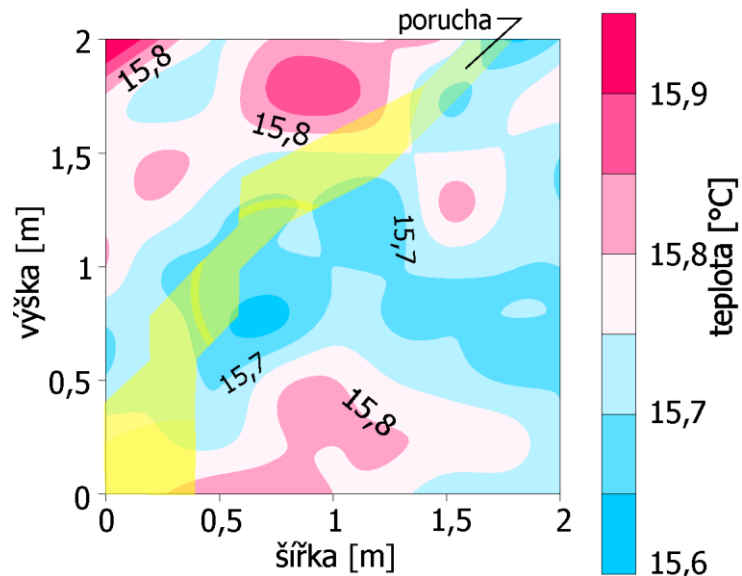
Z realizovaných prací se nepodařilo odhalit geologickou nebo geotechnickou příčinu těchto teplotních změn. Bezsporně určitý vliv na naměřenou teplotu bude mít systém větrání důlního díla. Ten by však neměl mít tak nahodilý charakter. Dá se tedy předpokládat, že vliv na květnová měření měl provoz vrtné soupravy při hloubení nového vrtu na levém boku komory ZK-2 u jejího konce. Přesto, že pohon vrtné soupravy byl elektrický, chlazení vrtné soupravy směrem na pravou stěnu komory bezsporně teplotu stěny horninového masivu zvýšilo.

Z důvodu antropogenního ovlivnění teplotních měření v květnu 2021 jsme teplotní měření opakovali ještě jednou, a to v červnu 2021. Při tomto měření byla teplota na každém bodu měřena pouze jedenkrát. Její průměrná hodnota dosáhla veličiny 15,75 °C, minimum

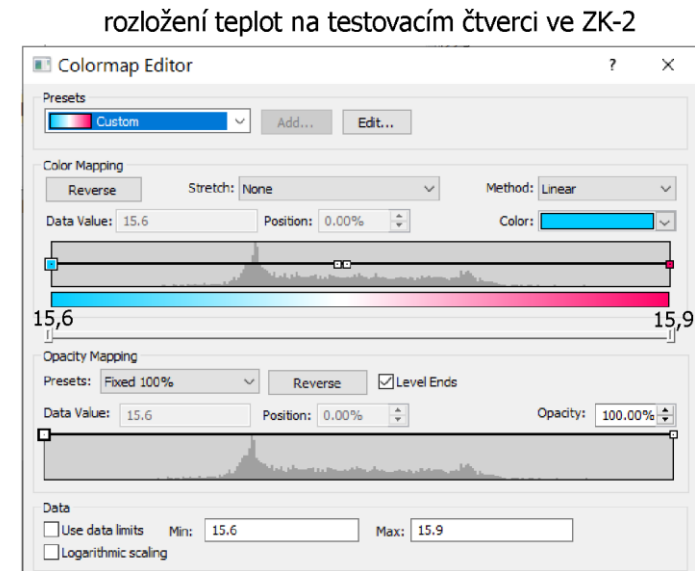


Obr. 7 Teplotní pole testovacího čtverce v ZK-2 v květnu 2021

bylo 15,60 °C a maximum 15,90 °C. Výsledky měření jsou na obrázku 8. Celková interpretace teplotního pole na testovací ploše ve zkušební komoře ZK-2 je znázorněna na obrázku 8. V porovnání s prosincem 2020 se průměrná teplota v červnu 2021 na ploše zvýšila o cca 0,16 °C, z hodnoty 15,59 °C klesla na 15,75 °C. Přitom směrodatná odchylka průměru byla 0,07 °C. V případě Gaussova rozdělení a teorie trojnásobné chyby by za anomální hodnoty bylo možné pokládat hodnoty menší než 15,54 °C nebo větší než 15,96 °C. Na obrázku 8 jsou anomální místa plochy s červenou barvou. Zpracování naměřených hodnot programem SURFER ukázalo, že naměřená data zdaleka neodpovídají Gaussovu rozdělení (viz pravá část obrázku 8). Z tohoto důvodu je možné prohlásit, že na proměřované ploše nebyly zjištěny žádné teplotní anomálie.



Obr. 8 Teplotní pole v ZK-2 v červnu 2021



Teplotní měření na povrchu skalního masivu bylo prověřováno měřením teploty v krátkých vývrtech o průměru 4 mm a hloubce 10 cm. V těchto vývrtech byla následně měřena teplota uvnitř masivu spolu se zjišťováním tepelné vodivosti hornin. Tato měření prováděl doc. Pospíšil z VŠB TU v Ostravě. Jejich zpracování a další měření nebylo ještě dokončeno, avšak předběžné výsledky nasvědčují tomu, že žádné teplotní anomálie zde také nebyly zjištěny.

4. Profilová měření

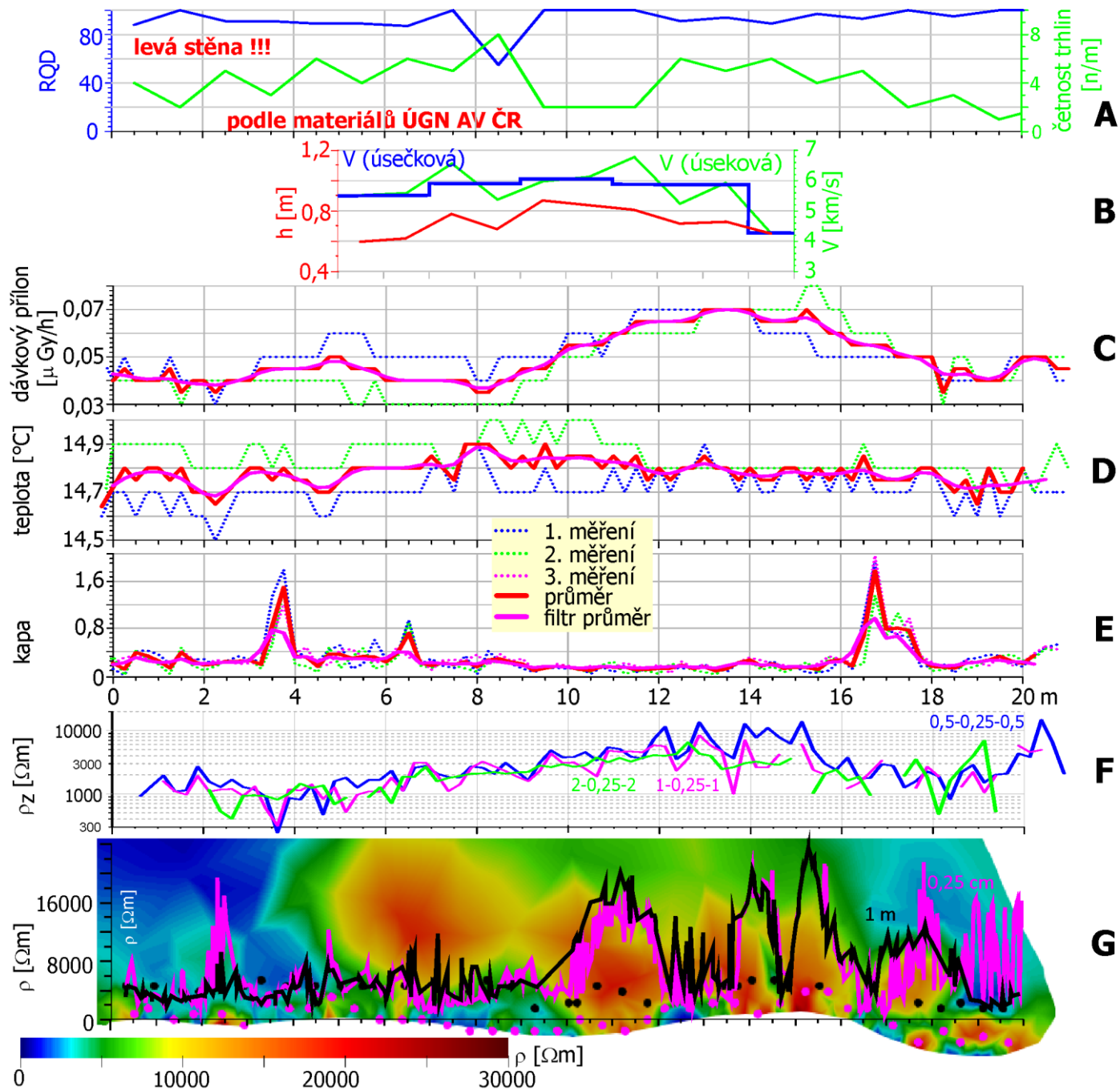
Jedním z dílčích cílů projektu „Rozvoj geotechnických a geofyzikálních metod pro získání 2D a 3D obrazu geologické stavby“ bylo otestování používaných metod na lokalitách s různými základními typy hornin, tj. v horninách uložených, vyvřelých i přeměněných. To platilo pro všechny práce řešené v projektu, a tedy i pro aplikaci „lehkých“ geofyzikálních metod v podzemí. Většina pokusných geofyzikálních prací v rámci tohoto úkolu byla realizována na podzemním výzkumném pracovišti PVP Bukov soustředěných na XII. Patro do zkušební komory ZK-1. Další geofyzikální i geotechnické práce byly realizovány ve štole Josef na lokalitě Čelina a v Modré štole na lokalitě Čermná ve Slezsku.

4.1 Lokalita PVP Bukov, XII. patro

Nejrozsáhlejší komplet „lehkých“ geofyzikálních metod byl testován na pravém boku zkušební komory ZK-1 ve výšce cca 1,2 metru. Výsledky lehkých geofyzikálních metod zde byly doplněny o výsledky mělké refrakční seizmiky a 3D elektrické odporové tomografie. Další doplnění představují výsledky vybraných geotechnických prací, které realizovali pracovníci ÚGN AV ČR.

Na obrázku 9 přinášíme výsledky všech 2D a 3D geofyzikálních a geotechnických měření realizovaných v tomto místě. První graf **A** shora představuje graf koeficientu RQD. Další graf uvádí četnost výskytu trhlin na jednotku vzdálenosti. Koeficient RQD vyjadřuje kvalitu horniny a obvykle se určuje na vrtných jádrech. Geomechanici ÚGN AV ČR vyvinuli postupy stanovení RQD z měření na povrchu báňských děl. Při pohledu na tvar křivek je zřejmé, že kvalita proměřovaných hornin je generálně dobrá až výborná. Výjimku tvoří úsek ve staničení cca 7,5 až 9,5 m, kdy hodnota RQD klesá z cca 95–100 % na cca 55 %, tzn. Kvalita hornin je klasifikována středním stupněm. Uvedená skutečnost pravděpodobně indikuje existenci strukturních nespojitostí. Hodnotu RQD 55 % doprovází vyšší četnost trhlin (puklin).

Dalším grafem (**B**) jsou křivky interpretovaných seizmických rychlostí a hloubek rozhraní. Rozsah měření je



Obr. 9 Výsledky „lehkých“ geofyzikálních metod na pravém boku ZK-1

v porovnání s ostatními metodami relativně malý, což je však dáno metodikou měření, zejména polohou bodů „výbuchu“ vůči instalovaným snímačům. Vzhledem k délce ZK-1 cca 20 m nelze získat rozsáhlejší soubor. Při pohledu na křivky rychlostí si můžeme všimnout, že v předchozím odstavci komentovaná zóna nižší kvality hornin má svůj odraz také ve výsledcích seizmických měření. Uvedená anomálie se projevuje formou snížení rychlostí šíření mechanických vln prostředím z cca 6,2 na cca 5,5 km/s (zelená křivka). Na modré křivce získané určením rychlostí na pravidelném dvoumetrovém intervalu žádný pokles rychlostí nebyl nalezen. Také interpretovaná hloubka prvního refrakčního horizontu (červená křivka) se v uvedeném úseku kolem staničení cca 8 m dočasně snižuje. Další snížení rychlostí bylo zaznamenáno od staničení cca 12 m směrem ke konci seizmického profilu. Uvedené zjištění má podporu v anomálii četnosti trhlín, kdy se však množství trhlín na jednotku délky proti teoretickému předpokladu nezvyšuje, ale naopak snižuje. Pro rozklíčování uvedených zjištění a pochopení souvislostí je zapotřebí více informací, zejména strukturně petrografických atd. (Bláha a kol., 2021)

Pod seizmickým výstupem na obr. 9 jsou postupně prezentovány grafy výsledků měření „lehkými“ metodami, tj. měření teploty, radioaktivity a magnetické susceptibility. Výsledky „lehkých“ metod poskytují cenné poznatky, a to zejména v konfrontaci s dalšími měřeními, např. odporovými. Na křivkách dávkového příkonu je patrné určité zvýšení hodnot lokalizované ve staničení cca 9–18 m, které má významnou podporu v křivkách SOP z ERT a samotného 3D ERT řezu (grafy **F** a **B**). Rozsah „radioaktivní“ anomálie je velmi blízký rozsahu odporové anomálie. Zajímavou se jeví skutečnost, že v inflexním bodě odporové elevace (staničení cca 13,5 m) došlo k lokálnímu výraznému snížení hodnot interpretovaného měrného odporu. Další zajímavostí je korelace magnetické susceptibility s ERT ve staničích cca 3,5 a 17 m, která má odezvu v odporových minimech na křivkách měření ERT. Zatímco geomagnetické anomálie jsou poměrně úzké, pokles zdánlivých měrných odporů je pozvolnější a v měřené linii rozsáhlejší. Je možné, že se jedná projev lokálních litologických změn (žíly pronikající mateřskou horninou?), pro objasnění je však opět zapotřebí více informací negeofyzikálního rázu.

Na předposledním grafu na obrázku 9 jsou zobrazeny již zmíněné průběhy odporových měření (**F**). Konkrétně se jedná o profilovací křivky rozestupů A0,5M0,25N0,5B; A1M0,25N1B; A2M0,25N2B. Data byla extrahována ze souboru hodnot pořízeného metodou ERT, jenž byla provedena s podrobným krokem (0,25 m) a v dostatečném rozsahu (cca 22 m). Křivky odporového profilování umožňují vymezit základní kvazihomogenní bloky, charakterizované rozsahem a hodnotou zdánlivého měrného odporu. Odporové křivky jsou svým charakterem podobné křivkám z měření dávkového příkonu, kdy drobný rozdíl byl zaznamenán pouze v úvodní části profilu – lokální minimum ve staničení cca 2,5 m na křivce dávkového příkonu má na odporových křivkách ekvivalent posunut do staničení cca 3,5 m. Tento rozdíl je pravděpodobně dán kosým průběhem desky (žíly), která anomálii vyvolává. Je potřebné si uvědomit, že dávkový příkon charakterizuje prostor teoreticky do hloubky 0,5 metru, ale ve skutečnosti ještě méně. Dosah geoelektrického měření může být násobně vyšší. Zbývající úseky spolu velmi dobře korelují.

Posledním grafem je odporový řez konstruovaný z výstupu programu Genie (**G**), vyvinutý za účelem výpočtu 3D modelů horninového prostředí v podzemí. Řez je lokalizován do pravého boku komory ZK-1 ve výšce cca 1,6 m nad počvou. Pro „čtení“ výstupu jsou podstatné dvě skutečnosti: probarvení izolinií do modra znamená nízké měrné odpory, a tedy zvýšenou vlhkost, která se přednostně distribuje polohami o nižší mechanické pevnosti a vyšší porozity než v případě hornin kompaktních, neporušených. Naopak probarvení izolinií měrných odporů směrem k červené znamená vysoké měrné odpory, tj. horniny kompaktní, neporušené, s minimální pórovitostí,

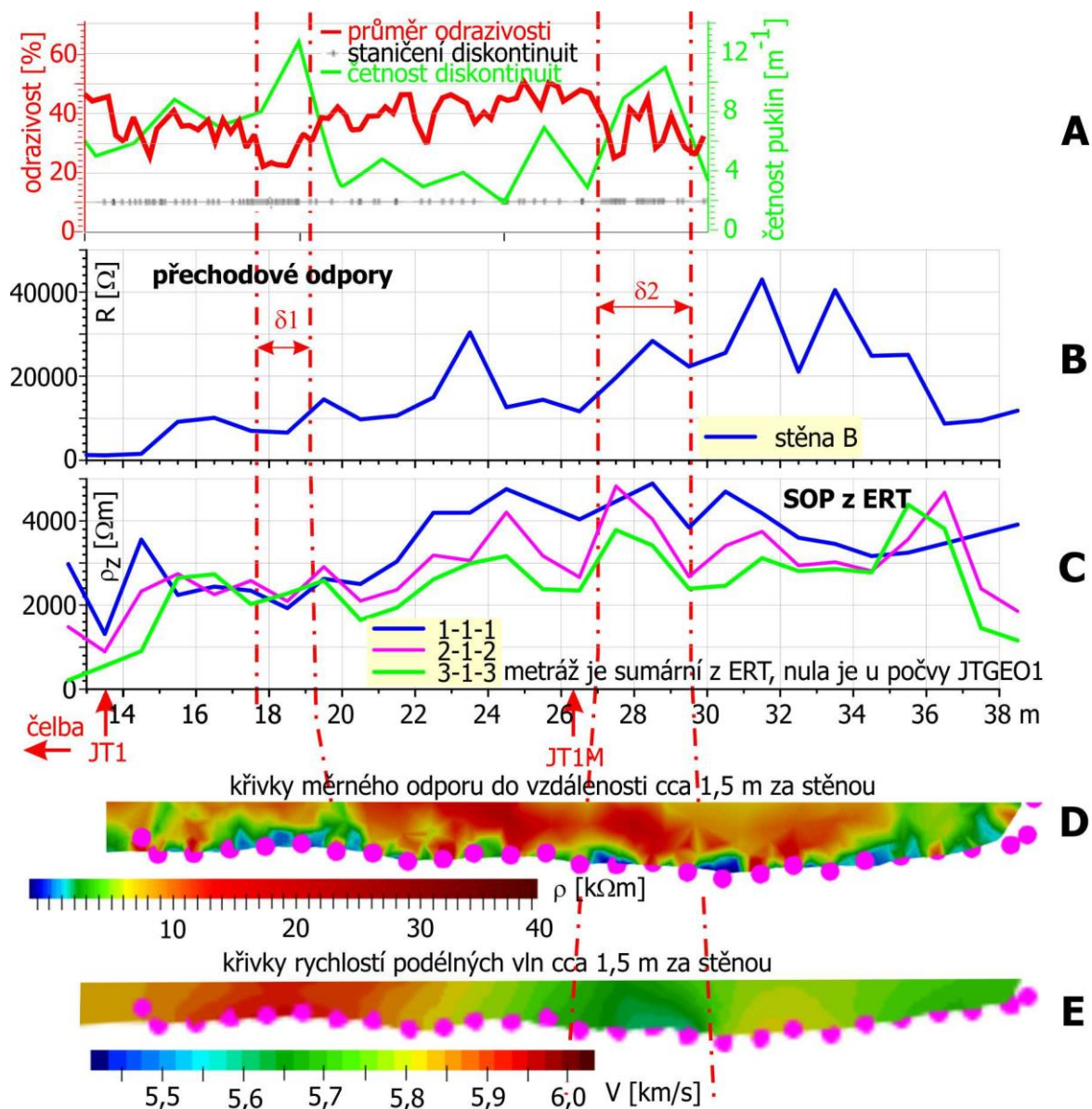
případně lišící se složením od hornin z opačného konce barevného spektra odporové škály. Z výstupu je patrné, že horniny vyznačující se nejvyšším měrným odporem jsou soustředěny v centrální části měřeného úseku, zatímco u čelby a v prostoru napojení na hlavní chodbu (překop BZ-XIII) jsou indikovány horniny vyznačující se relativně nízkými hodnotami měrného odporu, tj. pravděpodobně více porušenými nebo litologicky odlišnými. Hlavní blok vysokoodporových hornin je lokalizován do staničení 4 až 17 m a jeho okraje jsou velmi zřetelné např. na křivkách magnetické susceptibility. V uvedeném staničení byla také zaznamenána mírně zvýšená teplota povrchu skalního masívu.

V odporovém řezu jsou také vyneseny dvě křivky měrného odporu získané 3D interpretací ERT a vyextrahované ze souboru měření. Každá křivka je z jiné hloubkové úrovně / hladiny, kde indikuje předpokládaný stav horninového prostředí. Fialová křivka odráží odporové poměry na hladině do 0,25 m za stěnou díla a černá křivka do 1 m za stěnou díla. Uvedené hloubkové hodnoty jsou ovšem pouze orientační, jelikož určujícími parametry jsou velikost a tvar buněk z 3D modelu, které nejsou stejné. Pro orientaci a základní prezentaci rozložení hodnot měrného odporu podél stěny díla jsou však zobrazována data dostatečně reprezentativní.

4.2 Čelina, štola Josef

Podzemní výzkumný komplex, který vznikl v místě dřívějšího průzkumu ložiska zlata, je v současné době ve správě ČVUT Praha. Rozsáhlá síť podzemních chodeb umožňuje tuzemským i zahraničním vědeckým a výzkumným pracovištím realizovat různé projekty, které se zabývají mnoha oblastmi využití horninového prostředí pro nejrůznější potřeby lidské společnosti.

Okolí prostoru štoly Josef je tvořeno vulkanickosedimentárním komplexem hornin jílovského pásma v kontaktně



Obr. 10 Výsledky „lehkých“ geofyzikálních metod ve štole Josef

metamorfovaném tufitickém souvrství kyselých až bazických láv, v těsném sousedství vulkanického souvrství. V hlubších částech vulkanickosedimentárního souvrství byla zjištěna existence skrytého tělesa albitických žul. Všechny typy jílovského pásma byly postiženy retrográdní metamorfózou kadomského stáří a variskou kontaktní metamorfózou. V nejbližším okolí štoly Josef se vyskytují kyselé tufy a tufity a kyselé vulkanity a metabazity. V okolí podzemních chodeb, ve kterém bylo realizováno naše testovací měření, se vyskytují i poruchová pásma, a to ve směru SSV-JJZ a Z-V.

Výsledky aplikace „lehkých geofyzikálních metod“ jsou zobrazeny na obrázku 10. Na obrázku jsou od shora dolů prezentovány grafy četnosti diskontinuit a odrazivosti (zpracováno pracovníkem Ústavu geoniky AV ČR), křivky přechodových odporů, křivky symetrického odporového profilování sestaveného z měření elektrické odporové tomografie, pole měrných odporů do vzdálenosti cca 1,5 m za profila pásma rychlostí ze seizmické tomografie ze stejné hloubkové úrovně.

Na první pohled v relativně litologicky homogenním masivu nebyly zaznamenány jednoznačné vazby mezi jednotlivými druhy měření. Podařilo se však vyčlenit dvě zóny oslabení horninového masivu. První leží ve staničení 17 až 19,5 metru. Zvýšená četnost puklin je doprovázená sníženou odrazivostí a dále mírným poklesem přechodových odporů a zdánlivých měrných odporů stanovených transformací měření ERT. Na pásu měrných odporů z ERT je patrný pouze pravý okraj pásma. Na seizmických rychlostech se pásma neprojevuje. Jestliže vezmeme v potaz hloubkový dosah jednotlivých měření, pak toto porušené pásma směřuje do vyšších metrů pod úhlem cca 45–60°.

Druhé pásma je ve staničení 27 až 29,5 metrů a má opět zvýšenou četnost puklin a pokles odrazivosti na krajích této zóny. Další indicii představuje čočka vysokých měrných odporů určených z elektrické odporové tomografie. Zdá se překvapující, že pásma s vysokou puklinatostí má vysoký měrný odpor. Důvodem je pravděpodobně otevření těchto trhlin a minimální vlhkost horninového masivu v tomto místě. Toto pásma se projevuje poklesem rychlostí ze seizmické tomografie asi o hodnotu 1,0 km/s (Bláha, 2021).

4.3 Černá ve Slezsku, Modrá štola

Zájmové území patří do geomorfologického celku Nízký Jeseník, který je tvořen v převážné míře kulmskými sedimentárními horninami. Během třetihor byly sedimentární horniny v některých místech prostoupeny mladými vulkanickými horninami. Studované území náleží kulmským horninám, které se zde nacházejí ve dvou typech, drobách a břidlicích. Studované území je tvořeno převážně břidlicovým komplexem, ve kterém se však nalézají pruhy drob. Komplex jílovitých bituminózních břidlic je slabě metamorfován, což způsobuje dobrou štěpnost podle původních vrstevních ploch. Sedimentace původního materiálu probíhala v nevětraném moři, a proto je v horninách dokumentována přítomnost pyritu.

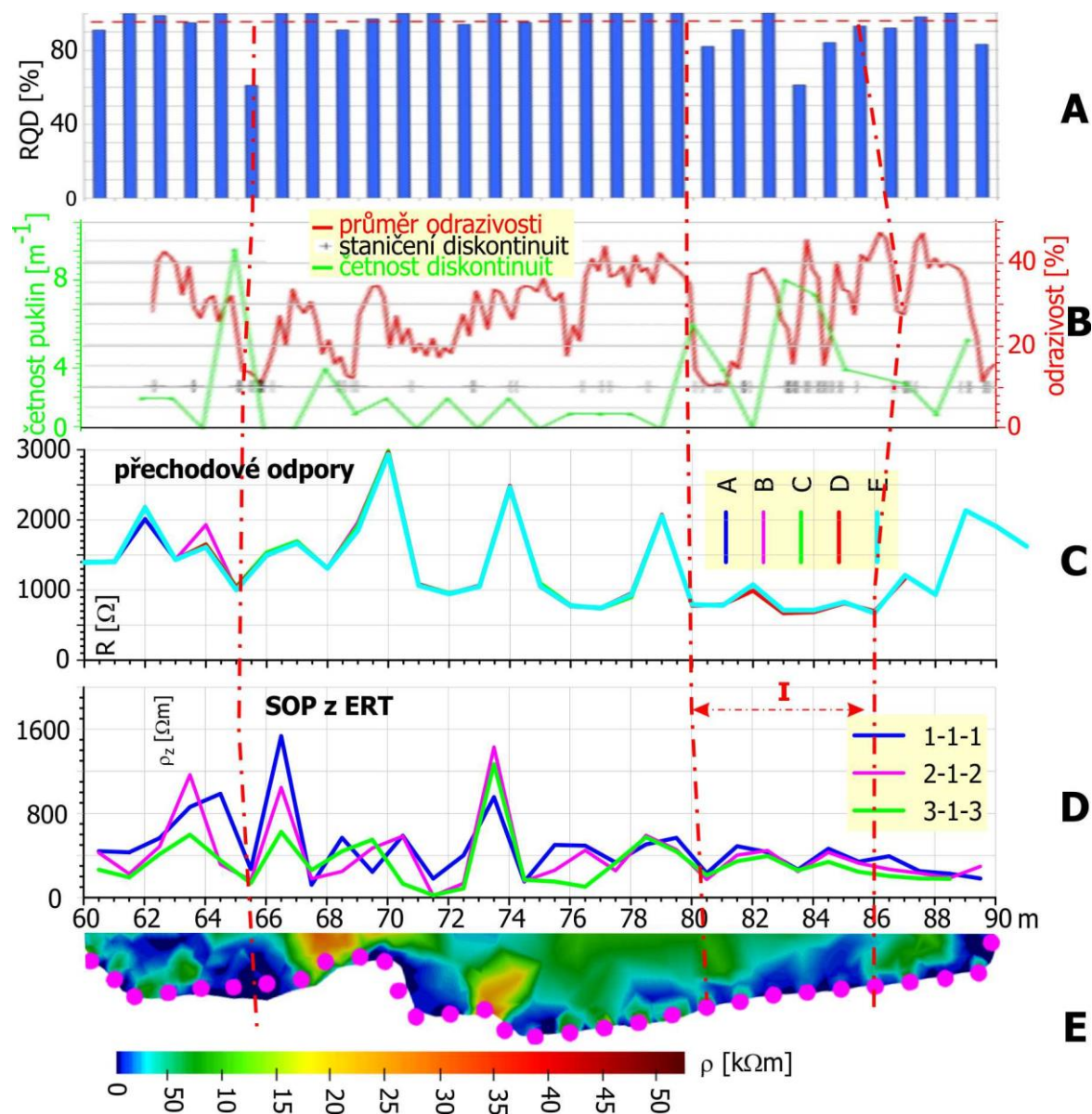
V Modré štolě jsme měli k dispozici k hodnocení horninového masivu nejen údaje geofyzikální, ale i geologické a geotechnické. Stejně jako předešlé dvě lokality, i zde provedli geotechnické hodnocení pracovníci Ústavu geoniky AV ČR. Konkrétně se jednalo o povrchovou verzi RQD, koeficientu odrazivosti Schmidtova kladívka a četnosti diskontinuit s vynesáním přesné polohy jednotlivých trhlin. Z geofyzikálních metod jsou k dispozici křivky přechodových odporů, křivky symetrického odporového profilování sestaveného z měření elektrické odporové tomografie (A1M1N1B, A2N1N2B a A3M1N3B) a pole měrných odporů do vzdálenosti cca 1,5 m za profil (Obr. 11).

Nejvýznamnější korelovatelné pásmo leží ve staničení 65–66 m. Toto pásmo se projevuje snížením RQD na hodnotu 60 %, nárůstem četnosti diskontinuit na veličinu cca 12 puklin na metr a poklesem odrazivosti na 10 %. Z geofyzikálních veličin zde klesají přechodové odpory na 1 000 Ω a zdánlivé měrné odpory ze SOP (ERT) na 150 až 300 Ω m. Podle velikosti přechodových odporů a zdánlivých měrných odporů se zdá pravděpodobným, že zjištěná porucha je zvodnělá. Zvýšení zdánlivých měrných odporů ve staničení 66,5 m může reprezentovat otevřenou a suchou trhlinu, která byla geotechnicky dokumentována v 66,2 m. Tato porucha je patrná i na poli měrných odporů z elektrické odporové tomografie. Z rozdílných staničení jednotlivých projevů poruchy je možné odvodit, že trhlinu je ukloněna do vyšších staničení. Vysoké zdánlivé měrné odpory mohou souviset se zvýšením přechodových odporů ve staničení 74 m a se zdvojenou trhlinou ve stejné metráži.

V pásmu označeném jako „I“ dochází ke změně všech parametrů, nasvědčujících porušení horninového masivu. Nejde o monolitní poruchové pásmo, ale o soustavu dílčích porušení. Ty se vyznačují poklesem RQD až na 60 %, nárůstem počtu trhlin na 11/m a místními poklesy odrazivosti k hladině 10 %. V tomto pásmu klesá měrný odpor na 700 Ω m a zdánlivý měrný odpor ze SOP osciluje okolo 400 Ω m. Pásmo „I“ se projevuje i na výsledcích elektrické odporové tomografie poklesem měrných odporů. Měrné odpory se však ve vzdálenostech přes jeden metr začínají od stěny štoly zvyšovat. To platí zejména na straně poruchy v nízkém staničení. Naopak ve vysokém staničení měrné odpory neklesají, to znamená, že porušení hornin pokračuje do větších hloubek.

5. Závěr

Na počátku hodnocení přínosu „lehkých geofyzikálních metod“ pro lepší poznání geologické stavby musíme konstatovat skutečnost, že metodika byla testována



Obr. 11 Výsledky „lehkých“ geofyzikálních metod v Modré štole

na všech lokalitách v relativně jednoduchých litologických podmínkách. Prakticky ve všech podzemních dílech jsme se vždy pohybovali v monolitologickém horninovém masivu, a to jak v sedimentárních (Modrá štola), tak magmatických horninách (štola Josef), tak i metamorfitech (PVP Bukov). Ani tektonické významnější porušení nebylo v jednotlivých lokalitách zaznamenáno.

Geofyzikální měření přesto prokázalo drobné litologické změny podél stěny důlního díla, stejně tak jako tektonické porušení, nebo významné změny mechanického napětí. V tomto směru se podařilo dokázat, že navržený soubor přináší zajímavé poznatky. Důkazem může být profilové měření ve zkušební komoře ZK-1 (Obr. 9) a měření na mikroplochách ve zkušební komoře ZK-2 (např. Obr. 3). Oba výsledky ukazují, že takovýmto způsobem geofyzikálního měření je možné získat zajímavé informace. Toto tvrzení je prokázáno i výsledky geofyzikálního měření a jeho interpretace ve štole Josef (Obr. 10).

Poděkování

Výzkumné práce, z nichž vychází tento článek, byly součástí projektu „Rozvoj geotechnických a geofyzikálních metod pro získání 2D a 3D obrazu geologické stavby“, který byl podporován z rozpočtu MPO. Chtěli bychom MPO poděkovat za možnost tyto výzkumné práce realizovat. Terénní práce byly realizovány z velké části v podzemním výzkumném pracovišti PVP Bukov a ve štole Josef. Tato díla vybuodovala a provozuje Správa úložišť radioaktivních odpadů SÚRAO a ČVUT Praha. Realizace jakýchkoliv činností v prostorách hlubinného dolu je poměrně nákladná, složitá a vyžaduje souhru mnoha profesí a činností (zázemí, technická podpora atd.). Díky součinnosti s oběma organizacemi se podařilo výzkumné práce úspěšně dokončit. Za to patří SÚRAO a ČVUT naše uznání a dík.

Literatura

- BLÁHA P. *Ověřená technologie, Rozvoj geotechnických a geofyzikálních metod pro získání 2D a 3D obrazu geologické stavby*, GEOTest a.s., 2021, 80 s.
- BLÁHA P., DURAS R., GEBAUER J., STAŠ L., WACLAWIK P., KRÁLOVCOVÁ J., BŘEZINA J., SRB R. *FV20294 Rozvoj geotechnických a geofyzikálních metod pro získání 2D a 3D obrazu geologické stavby*, Závěrečná zpráva, GEOTest a.s., 2021, 53 s.
- HORSKÝ O., BLÁHA P. *Inženýrskogeologický průzkum pro přehrady*, VŠB–TU Ostrava, 2014, ISBN 978-80-248-3437-5, p. 1–292, on CD.
- MÜLLER K., BLÁHA P., NEŠVARA J. *Geofyzikální dokumentace průzkumných štol.*, In: Zborník: Geotechnický prieskum pre tunely a navrhovanie tunelových ostení, ČSVTS Vysoké Tatry, Dům techniky Košice, 1978, s. 211–219.
- MÜLLER, K. *Metodologie inženýrskogeofyzikálního výzkumu horninového masivu*, Doktorská dizertační práce, Ostrava, VŠB, 1987.

Autoři:

¹ doc. RNDr. Pavel Bláha, DrSc., GEOTest, a.s., Kapitolní 13, Ostrava 700 30, Česká republika, blaha@geotest.cz

² Ing. Roman Duras, GEOTest, a.s., Kapitolní 13, Ostrava 700 30, Česká republika, duras@geotest.cz

³ Ing. Jan Gebauer, GEOTest, a.s., Kapitolní 13, Ostrava 700 30, Česká republika, gebauer@geotest.cz