



ROZBOR MOŽNOSTÍ POVRCHOVÉ GEOFYZIKY PRO PODZEMNÍ STAVITELSTVÍ
ANALYSIS OF THE POSSIBILITIES OF SURFACE GEOPHYSICS
FOR UNDERGROUND CONSTRUCTION

Pavel Bláha¹

Abstrakt

Horninový masiv je prostředí, se kterým by mělo být v souladu každé lidmi postavené stavební dílo. Nerespektování tohoto požadavku vede k haváriím takovýchto staveb, nežřídka pak s velmi neblahými důsledky. Je samozřejmé, že požadovaného stavu „souznění“ lze relativně snadno dosáhnout u malých staveb umístěných na zemském povrchu. Opačným pólem jsou podzemní stavby, a to jak stavby lini-ové, tak i stavby třídímenzionální. Podzemní stavby závisí na horninovém prostředí podstatně více než stavby povrchové. Jsou do horninového masivu vloženy a je nezbytné dosáhnout toho, aby stavba a horninové prostředí spolu souzněly jako jeden celek. Je samozřejmé, že k zajištění dokonalé shody mezi podzemní stavbou a horninovým masivem je potřebné zajistit odpovídající úroveň stavebních prací, včetně kvalitního projektu. To se samozřejmě týká i částí staveb realizovaných hornickým způsobem. Tento článek ukáže na možnosti povrchové geofyziky při řešení tohoto problému.

Abstract

The rock mass is an environment in which any man-made construction should be harmonious. Failure to respect this requirement leads to accidents of such structures, often with very unfortunate consequences. The desired state of 'harmony' is relatively easy to achieve for small structures located on the earth's surface. At the other pole are underground structures, both linear and three-dimensional. Underground structures are much more dependent on the rock environment than surface structures. They are embedded in the rock mass, and it is essential to achieve and it is essential to ensure that the building and the rock environment coexist as one. An appropriate level of construction work, including a good quality design, is needed to ensure a perfect match between the underground structure and the rock mass. This, of course, also applies to parts of structures constructed by mining. This paper will show the potential of surface geophysics in solving this problem.

Klíčová slova

Podzemní stavitelství, povrchová měření, odporová tomografie, seizmická tomografie, elektromagnetická měření

Keywords

Underground construction, surface measurements, resistance tomography, seismic tomography, electromagnetic measurements

1. Úvod

Geofyzikální metody již dnes patří neodmyslitelně do metod sloužících k poznání horninového masivu, jeho skladby a vlastností. Parametry každé části připravovaného díla jsou rozdílné, stejně jako je rozdílné přírodní prostředí, do něhož jsou zasazeny. Ani v rozsahu jedné stavby nelze považovat základové poměry díla za stejné, a proto každou část je třeba posuzovat individuálně. Geofyzikální metody poskytují vždy základní informaci o geologické stavbě zkoumaného území. Někdy je tato informace přesná a konkrétní, jindy se tohoto výsledku nepodaří zcela dosáhnout. V každém případě je možné získat data, která umožní rozmístění a vedení přímých průzkumných prací (vrtů, šachtic apod.) v dalších etapách průzkumu. Základním požadavkem kladeným na inženýrskogeologický průzkum podzemních staveb je jeho efektivnost, při udržování požadované kvality průzkumu. Při zachování této podmínky je třeba zajistit všechny podklady pro bezpečné projektování, výstavbu a provoz díla. Chyby v počátečních stádiích průzkumu se v pozdějších etapách vrací a jejich odstraňování je nesmírně náročné odborně, časově i finančně. Geofyzika, je schopna ve všech stádiích průzkumu přinést velké množství informací v rozumných ekonomických mezích. V některých případech dává i podklady, které jsou jinak prakticky nedostupné nebo je lze získat za značně vyšší částky.

Geofyzikální průzkum pro podzemní díla může podat informace v následujících okruzích:

- průzkum míst vlastní stavby;
- průzkum vybraných důležitých částí stavby (např. vstupní portály tunelů);
- průzkum pro stavební materiály;
- kontrolní měření při průzkumu a výstavbě;
- práce při provozu díla.

Při průzkumu podzemního díla se především určují základní litologické typy a jejich prostorové rozmístění ve zkoumaném území. Další okruh problémů představuje vymezení zón oslabení horninového masivu včetně určení tektonického porušení hornin. V neposlední řadě je vhodné zjistit základní fyzikální a mechanické vlastnosti hornin potřebných pro projektování díla. Nelze opomenout ani získávání údajů o podzemní vodě a jejích vlastnostech a režimu.

Z hlediska použití geofyzikálních metod pro podzemní stavitelství je podle způsobu měření možné geofyzikální měření rozdělit do pěti hlavních skupin:

- sledování geologické stavby z povrchu terénu;
- sledování geologické stavby v podzemí;

- sledování zón porušení za stěnou výrubu;
- sledování změn napětí a podkladů pro určování geotechnických vlastností.

Studium horninového masivu pro podzemní stavby je otázka složitá a vyžaduje znalosti z mnoha geologických i technických oborů. Nelze předpokládat, že jedinec zvládne všechny disciplíny excelentně. Proto je zapotřebí při průzkumu i výzkumu horninového masivu dávat značný důraz na mezioborovou spolupráci. Snad nejdůležitější je to v úvodních stádiích průzkumu, i když ani v pozdějších etapách není možné od ní ustoupit. Jak ukázaly výsledky používání geofyzikálních metod při průzkumu pro podzemní stavitelství, doma i v zahraničí, přináší geofyzika jako vědní disciplína velmi cenné poznatky. V posledních deseti, dvaceti letech výrazně stoupl počet geotechniků a inženýrských geologů používajících pro studium geologické stavby masivu, jeho vlastností a napěťodeformačního stavu geofyzikální metody. To bezesporu umožnily moderní aparatury, zobrazující geofyzikální obraz zkoumaného horninového prostředí a matematických a počítačových metod pro jejich zpracování.

2. Měření z povrchu

2.1 Karotážní metody

Karotážní měření se při výzkumu a průzkumu horninového masivu pro podzemní stavitelství používají mnohem méně než metody povrchové geofyziky, a to neplatí pouze u nás, ale totéž je možné najít i ve světové literatuře. Při tom karotáž, zejména ta moderní, přináší cenné poznatky, které lze při průzkumu a výzkumu horninového masivu úspěšně využít. Karotážně zjištěné hodnoty fyzikálních vlastností hornin jsou výborným podkladem pro další interpretaci povrchové geofyziky i pro sledování geotechnických vlastností hornin a horninového masivu. V této podkapitole bude ukázáno, jak se v jednotlivých úkolech průzkumu může měnit skladba používaných metod.

Správná a důkladná interpretace karotážních křivek poskytuje informace v následujících okruzích zkoumaných problémů:

- upřesnění litologického profilu vrtu;
- stanovení fyzikálních a mechanických vlastností hornin;
- určení úrovně hladiny podzemní vody a kapilární trásně;
- stanovení filtračních vlastností hornin a dynamiky podzemní vody;
- zjištění charakteru porušení hornin v okolí vrtu;
- určování polohy puklin a kaveren a jejich prostorovou orientaci a výplň;
- určení zón s koncentrovaným napětím;
- kontrola technického stavu vrtu a jeho vyzbrojení.

Použití karotážních měření a jeho aplikování je možné z hlediska požadavků geotechniků a inženýrských geologů na jedné straně, a na druhé straně z hlediska přístrojových možností a možností zpracování naměřených dat rozdělit do pěti základních celků:

- Litologická karotáž: upřesnění litologického složení hornin a popis základních prvků geologické stavby. K řešení těchto úkolů se používají: odporová karotáž – Rap, Rag a LL (potenciálové a gradientové sondy, krátký laterolog), gama karotáž – GK (intenzita přirozeného gama záření), gama gama karotáž – GGK (v hustotní, výjimečně selektivní verzi), neutronové karotáže – NNK (neutron neutron nebo neutron gama k určení pórovitosti), magnetická karotáž – MS (magnetická susceptibilita) a indukční karotáž – IK (určení elektrické vodivosti hornin) a rychlost podélných vln – Vp.
- Geotechnická karotáž: stanovení základních geotechnických vlastností hornin (z části měření, z části výpočty). Pro určení geotechnických vlastností se používají: AK – akustická karotáž s plným vlnovým obsahem (určování rychlostí podélných i příčných elastických vln a jejich útlumu) a gama gama karotáž.
- Hydrogeologická karotáž (hydrokarotáž): stanovení parametrů podzemní vody a její dynamiky: TM – termometrie (určování teploty podzemní vody), rezistivimetrie – RM (zjišťování měrného odporu kapaliny ve vrtu), fotometrie – FM (průhlednost vrtné kapaliny), metoda ředění – přirozené proudění podzemní vody, metoda čerpání (nebo nálevu) – určování koeficientu filtrace.
- Optická dokumentace vrtu: TV – průběžná kontrola stavu vrtu axiální kamerou, většinou před různými náročnými zkouškami a testy ve vrtu, ABI – sledování vrtné stěny akustickým televizorem. Účelem měření je dokonalá dokumentace vrtných stěn, průměr vrtu ve všech azimutech a údaj o pevnostní charakteristice zastižených hornin. Výsledkem je zjištění všech ploch nespojitosti podél osy vrtu, jejich rozměry včetně popisu výplně. OBI – prakticky totéž jako ABI jen s výhodou možnosti měření v suchých vrtech.
- Určování technického stavu vrtu: IM – stanovení prostorového průběhu vrtu, KM – měření průměru vrtu včetně vyhledávání poloh, kde dochází ke tvorbě kaveren, TV – případně kontrola stavu vrtu televizní kamerou.

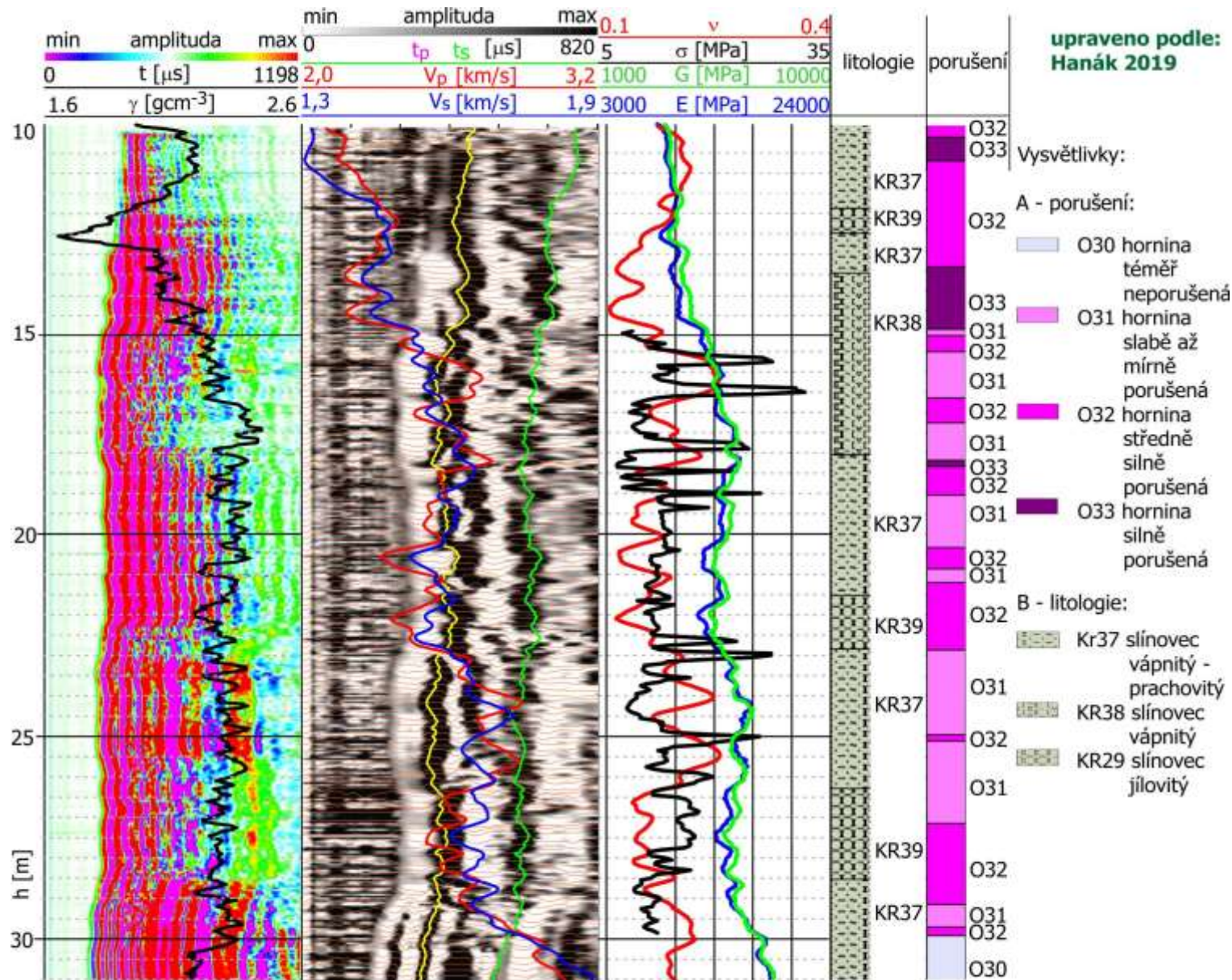
Základním úkolem standardní karotáže je popsat nebo upřesnit litologický popis vrtu sestavený geologem podle popisu vrtného jádra. Jak již bylo řečeno k tomuto účelu se používá relativně širokého souboru měřících metod. V současné době již prakticky všechna karotážní měření probíhají digitálně a následně jsou i digitálně předzpracována. Úkolem geofyzika, karotážníka, je celý vrtný profil patřičně litologicky rozčlenit, zejména pak v místech, kde byl získán slabý výnos vrtného jádra. Určení jednotlivých fyzikálních vlastností umožní karotážníkovi vyčlenit i polohy horniny, které nejsou opticky viditelné, například určení míst s vyšším obsahem jílových minerálů nebo vyšším obsahem vápnité složky. Již v tomto stádiu popisu karotážních měření je možné, a dokonce i nutné, popsat porušení horninového masivu a upozornit geologa na změny složení hornin, které mohou být prostým okem přehlédnutelné.

Grafické výstupy karotážních měření mají více méně standardní formu. Ve velké většině je do jednoho grafu zobrazeno několik výsledků různých metod. Kombinaci metod, či fyzikálních parametrů si zpravidla volí každé karotážní pracoviště podle svých potřeb a představ. Bývá pravidlem, že v jednom grafu bývá zobrazeno 2 až 4 různých výsledků, výjimečně jich bývá i více. Je samozřejmě výhodné, že pokud se do jednoho grafu vynášejí výsledky příbuzných metod, například u odporových metod, lze vynést do téhož grafu výsledky z měření různých typů sond, jejich různých délek, případně odporové grafy doplnit výsledky měření indukční karotáží.

První ukázka výsledků karotážních měření je z použití geomechanické karotáže je z vrtu J265 v blízkosti Vysokého Mýta. Z geomorfologického hlediska náleží území do celku Svitavské pahorkatiny, podcelku Loučeňské tabule a okrsku Vraclavský hřbet. Litologicky je území tvořeno prachovci s vápnitými konkracemi, šedými silně rozpadavými slínovci a šmouhovanými vápnitými prachovci až vápnitými

pískovci (Jezný, Krásný 2019). Ukázka použití jednotlivých karotážních metod pro geomechanické účely na obrázku 1 řadí výsledky do tří sloupců, po kterých předchází dva sloupce s interpretovanou litologií a dva sloupce se stanovením porušení (Hanák 2019). První sloupec karotážních metod ukazuje výsledky GGK přepočítané již na křivky objemové hmotnosti (černá křivka) a čas příchodu podélné vlny s průběhem kmitání masivu až do času 1189 μs (barevné pole). V tomto případě byla akustická karotáž měřena tříprvkovou sondou, akustický vysílač a dva přijímače. Barevné zobrazení znázorňuje amplitudu kmitání v daném čase.

Fialová barva představuje maximální zápornou hodnotu, červená pak maximální kladnou hodnotu. Střední karotážní grafy představují výsledky měření čtyřprvkovou sondou (jeden vysílač, tři přijímače). Pod těmito křivkami jsou opět znázorněny amplitudy kmitání, tentokrát v černobílém zobrazení. V posledním sloupci grafy zobrazují průběh mechanických parametrů vypočtených z karotážních měření, konkrétně z cejchované gama gama karotáže, rychlostí podélné a příčné vln a z útlumu amplitud podélné vlny. V tomto případě se jedná o velikost Poissonova čísla, pevnosti v prostém tlaku a střížného i Youngova modulu. V případě potřeby je možné



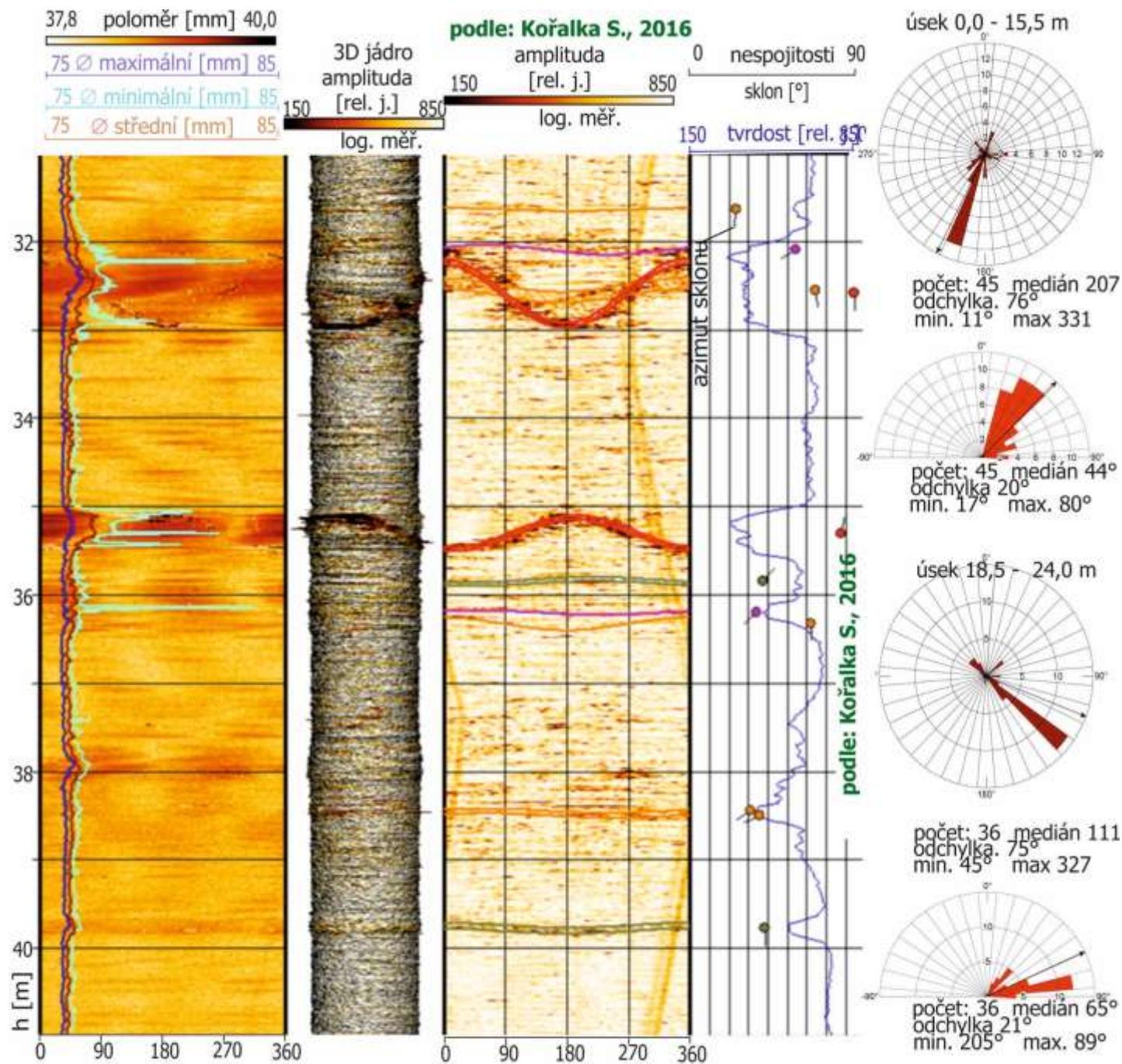
Obr. 1 „Geomechanická karotáž” v sedimentárním komplexu

Upraveno podle: Hanák 2019

na základě dalších vazeb mezi fyzikálními a mechanickými parametry vypočítat a znázornit i další veličiny. V pravé části grafu jsou pak zobrazeny interpretované výsledky litologického složení horninové masivu a jeho porušení. Tyto grafy byly určeny z jiných karotážních metod.

Velký pokrok v popisu horninového masivu zastiženém vrtnými pracemi přináší metody, které podrobně dokumentují stěnu vrtu. Tyto metody dnes pracují na třech různých principech. První je klasický pohled televizní kamerou orientovaný v ose vrtu. Doplňkové zařízení umožní kolmý pohled na malou část vrtné stěny. Druhou metodou je tak zvaný akustický televizor (acoustic borehole imaging – ABI), což je prohlídka vrtu, kdy je skenovaný záznam získáván odrazem ultrazvukového signálu od stěny vrtu přímo v sondě a jeho rozvinutím převeden na rovinnou plochu. Třetí metodou je systém OBI, který pohled do válce vrtu převede na rovinný obraz vrtné stěny. Poslední dva přístroje umožní získat představu o vrstevnatosti prostředí, foliaci a výskytu puklin včetně určení jejich směru a zapadání.

Ukázka na obrázku 2 ukazuje možnosti systému ABI. V nejlevějším sloupci je rozvinutý záznam poloměru vrtu, včetně křivek minimálního, maximálního a středního průměru vrtu. Druhý sloupec



Obr. 2 ABI dokumentace vrtu a tektonogramy

představuje vnější pohled na jádro se zobrazením síly odraženého akustického signálu od každého měřeného místa. V počítači je možné zobrazením otáčet a sledovat jeho tvar z kteréhokoli směru. Přiřazená barva napovídá o mechanických vlastnostech horniny. Čím je barva tmavší, tím je hornina více porušená. Dokonalejší popsání porušení spolu s vyznačením ploch jednotlivých diskontinuit je ve třetím sloupci, kde se každá plocha nespojitosti zobrazí jako sinusoida. Čím je diskontinuita strmější, tím má sinusoida větší amplitudu. V posledním sloupci je zobrazena křivka charakterizující mechanické parametry horniny. Měřítko křivky je v relativních jednotkách a je logaritmické. Mezi získaným parametrem, a pevnostními vlastnostmi hornin, není přímá korelace, ale určitý přehled o mechanických vlastnostech zkoumaného masivu lze získat. Mimo tuto křivku jsou v posledním sloupci i údaje o směru sklonů a jejich zapadání jednotlivých rovinných ploch. Každé barevně vyznačené diskontinuitě je ve třetím sloupci přiřazen barevný bod, jehož poloha udává sklon zapadání. Krátká úsečka u bodu znázorňuje směr zapadání s tím, že sever je nahoře a jih dole.

Úspěšné použití karotážních měření při výzkumu a průzkumu horninového masivu v místech projektovaných podzemních staveb nelze založit pouze na použití jedné metody. Je potřebné si uvědomit, že existují metody přímé dokumentace horninového masivu, a že jsou klasické karotážní metody, které porušení masivu dokumentují nepřímě. K získání úspěšných závěrů je nejvhodnější použít komplex karotážních měření, a to měření odporových, metod jaderné karotáže, karotáž akustickou a některou z metod dokumentujících stěnu vrtu. Dále je vhodné tyto metody doplňovat metodami netradiční karotáže, např. karotáží magnetické susceptibility. Při interpretaci karotážních měření je nutné důsledně využívat všech geologických údajů, které vrt poskytuje, tj. výnosu jádra, modifikovaného výnosu jádra (RQD), maximální délky úlomku, případně penetrace vrtného jádra kapesním penetrometrem. Dále je potřebné vycházet z dokonalé znalosti geologického popisu vrtu, přičemž nelze opomenout žádné údaje, které by se mohly zdát na první pohled nepodstatné. Jedině takovýto přístup k interpretaci karotážních měření může poskytnout při studiu horninového masivu úspěch.

Z karotážních metod dává velmi vhodné výsledky akustická karotáž, což je dáno tím, že fyzikální princip metody má nejbližší k mechanickým vlastnostem hornin. Nejlepší výsledky je možné získat komplexním studiem vlnového obrazu. I nejzákladnější parametr, který lze z akustické karotáže získat, tj. rychlost šíření podélných vln, dává dobré podklady k získání základních informací o horninovém masivu. Snížení rychlosti podélných vln se při porušení hornin pohybuje většinou ve stovkách metrů za sekundu. Analýzou rychlostí v horninovém masivu dojdeme k závěru, že závislost rychlosti na hloubce není nijak jednoznačná a rozhodně není z matematického hlediska monotónní. Velice často vidíme na křivkách rychlostí pozvolný nárůst rychlostí, mírné skoky v rychlostech, a dokonce i snížení rychlosti s hloubkou.

Další metodou, v pořadí vhodnosti ke zkoumání mechanických vlastností horninového masivu, je "hustotní" karotáž. Výsledky "hustotní" karotáže však nelze interpretovat bez kavernometrie. Tento problém je již odstraněn při použití moderních způsobů zpracování, kde jsou již výsledky gama gama karotáže opraveny o vliv průměru vrtu a jsou uváděny přímo v jednotkách objemové hmotnosti.

Metodami, které je také vhodné použít při studiu horninového masivu, lépe řečeno skupinou metod, jsou metody elektrické karotáže. Tyto metody jsou aplikovány prakticky při měření ve všech vrtech. Je to dáno v první řadě jejich jednoduchostí a jejich finanční výhodností. Z elektrických metod karotáže se nejčastěji používají metody odporové. Běžnými potenciálovými nebo gradientovými sondami je vybavena prakticky každá karotážní skupina. U metod odporové karotáže si již musíme být vědomi, že ne v každém případě je možné určit hledané rozhraní. Odporové metody je možné nahradit, zejména v suchých vrtech, indukční karotáží.

Metodou, přinášející zajímavé informace ke studiu horninového masivu, je i neutronová karotáž. Vzhledem k tomu, že tato metoda slouží zejména k určování jílovitosti a vlhkosti hornin, je možné z ní vyvozovat, jak dalece jsou horniny zvodnělé. Poslední z metod jaderné karotáže, gama karotáž, přináší informace o přítomnosti radioaktivních prvků. Nejčastěji se jí využívá ke stanovení jílovitosti klastických sedimentů.

Velký pokrok v poznávání horninového masivu přinesly metody optické dokumentace vrtu, ať už metoda ABI (akustický televizor), nebo metoda OBI (rozvinutý televizní obraz). Obě metody umožní ukázat na litologické rozdíly, ale především jsou neocenitelné v posuzování porušení horninového masivu. Jsou schopné nejen trhliny a pukliny detekovat, ale určit i jejich geometrické parametry. Ty pak lze statisticky zpracovávat, a to i v hloubkově oddělených blocích. Obě metody je vhodné kombinovat, protože metoda ABI poskytuje údaje ve vrtu zaplněném kapalinou (nezáleží na zakalení), ale nepodává informace v suchém vrtu. Metoda OBI zobrazí vrtné stěny velmi dobře v suchém vrtu, a i ve vrtu zaplněném čirou kapalinou. Při jejich současném požití lze lépe popsat texturu horninového masivu.

2.2 Seizmické metody

Seizmické metody představují rozsáhlý komplex geofyzikálních prací při průzkumu a výzkumu stavby a chování horninového masivu. Na naměřených veličinách seizmických rychlostí se litologie neprojevuje tak výrazně jako u geoelektrických a zejména odporových metod. Za předpokladu, že horninový masiv se neskládá z výrazně litologicky odlišných celků, jsou velikosti rychlostí elastických vln hlavně funkcí fyzikálně-mechanického a napětového stavu horninového masivu. Vždy při interpretaci seizmických měření je však potřebné brát ohled na horninové prostředí.

V posledních dekádách se rozvoj seizmických metod pro inženýrsko-geologické a geotechnické účely výrazně rozšiřuje. Tento rozvoj je dán komerční dostupností jednak nových snímačů seizmického chvění a jednak seizmických aparatur umožňujících sejmout a zpracovat seizmické vlnění ve větším frekvenčním a dynamickém rozsahu. Tento přístrojový rozvoj je samozřejmě doplněn, možno říci i vyvolán, novými matematickými postupy zpracování výsledků seizmických měření. Pokrok v matematickém řešení je prakticky okamžitě doplněn dostupností profesionálních programů ke zpracování seizmických dat.

V minulých desetiletích sortiment klasických seizmických měření (refrakční měření, refrakční sondování a seizmickou tomografií) tak doplnily metody nové, založené na sledování povrchových vln (Rayleigha a Loveho). Tyto metody mají relativně malý hloubkový dosah, a proto je vhodné je používat při průzkumu portálů tunelů a doplňkových staveb. Dvě nejběžnější metody nemají dosud české názvy a ve valné většině případů jsou uváděny pod různými zkratkami.

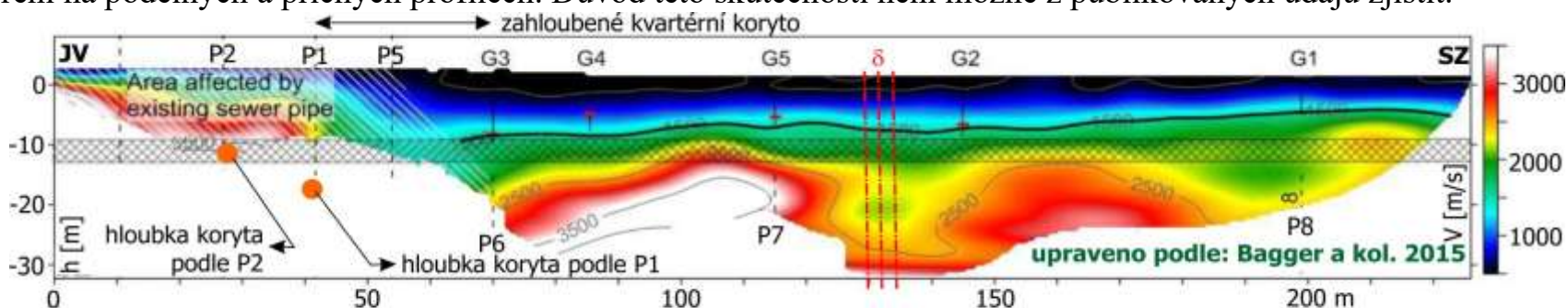
Jako první z těchto metod je potřebné zmínit metody „HVSR“ (horizontal to vertical spectral ratio) a HVNR (horizontal to vertical noise ratio). Obě metody jsou obdobného principu a počítají poměr spektra horizontálních složek rychlosti kmitání ke spektru vertikální složky rychlosti kmitání z naměřeného signálu v daném místě. Metoda HVSR zpracovává seizmický signál vybuzený uměle, kdežto metoda HNSR zpracovává záznam seizmického neklidu. Pro hodnocení rezonanční frekvence geologického podloží jsou tyto metody výhodné v místech, kde neexistuje referenční stanoviště v podobě skalního výchozu. Druhou metodou je metoda známá jak MASW „Multichannel Analysis of Surface Waves“, což je multikanálová analýza povrchových vln. Metoda vyhodnocuje vlastnosti horninového masivu pomocí

měření rychlosti příčných vlny. Různé geologické podmínky a různé typy projektů geotechnického inženýrství počítají většinou do hloubek okolo 30 metrů.

Nejčastěji používanou seizmickou metodou při inženýrskogeologických a geotechnických pracích je refrakční seizmika. Není podstatné, jaký zdroj je k vybuzení seizmických vln používán, důležitá je okolnost, že metoda dává informace o geologické stavbě zkoumaného území, ale i mechanických vlastnostech zastižených hornin. Pro získání vhodných údajů pro interpretaci seizmických měření se doporučuje, pokud to přírodní podmínky umožní, realizovat parametrická měření. Toto doporučené platí pro všechny geofyzikální metody.

Ukázka takovýchto seizmických měření na obrázku 3 je z průzkumu pro tunel v Kodani. V řezu je promítnutá poloha tunelu znázorněna šrafovou. Seizmická hranice 1,5 km/s od konce profilu ke staničení cca 130 m souhlasí s hranicí určenou karotáží ve vrtech G1 a G2. Od 130 do 75 metrů vychází z vrtů báze kvartéru z karotáže výše, na vrtu G4 o 3,5 m a na vrtu G5 o 1,5 m. Na vrtu G3 hranice opět souhlasí. Dále směrem k počátku profilu je seizmické měření zřejmě ovlivněno existující kanalizací. Podle měření na kolmých profilech je však patrné, že v těchto místech leží zahloubené kvartérní koryto. Jeho původ není možné z geofyzikálních měření určit. Zde je nutné konstatovat, že nesouhlasí výsledky měření na podélných a příčných profilech. Důvod této skutečnosti není možné z publikovaných údajů zjistit.

Zajímavý je průběh rychlostí podélných vln ve vápencích. Izolnie rychlostí vyšších než 2000 m/s nejsou rovnoběžné s povrchem, ale určují dvě místa, kde se kvalitní vápenec přibližuje k povrchu. První



Obr. 3 Kodaň, seizmický profil P3 podél trasy tunelu

místo se nejbliže k povrchu přibližuje ve 105 m, druhé ve 160 m. Ve staničení 135 m je možné najít místo oslabení horninového masivu, kde klesají rychlosti podélných vln až na 1600 m/s. (Bagger a kol. 2015). Určitý náznak porušení lze najít i ve 195 m. Je tedy možné předpokládat, že zahloubení kvartéru v metráži 50 je též vázáno na podobné místo oslabení horninového masivu jako v metráži 135. Autoři publikace uvádějí, že výsledkem seizmických prací bylo porozumění místní geologické stavbě. Vymapování povrchu vápence pomohlo vymezit objem štěrku, kterým musel tunelovací stroj projít, než znovu vstoupil do vápence. Pro zvýšení stability a snížení propustnosti bylo rozhodnuto použít sanací kvartérních sedimentů injektáží. Po injektáži mohlo vrtání tunelu pokračovat bez dalších problémů se stabilitou.

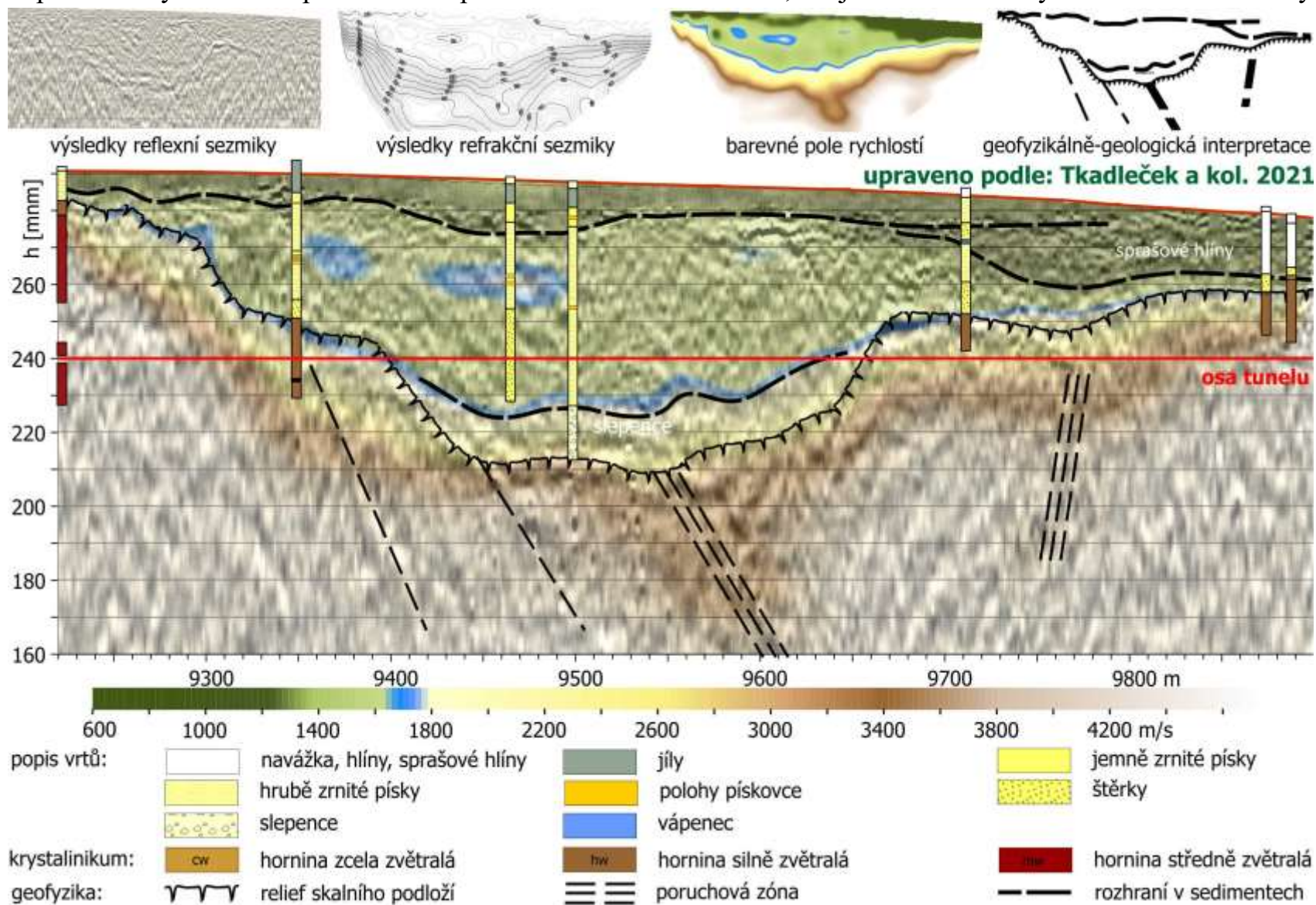
Použití reflexní seizmiky pro inženýrskogeologické a geotechnické účely má významnou výhodu při průzkumu do větších hloubek. Dalším přínosem je, že z aplikací reflexní seizmiky jsou v geologických vědách dlouholeté zkušenosti, zejména pak v průzkumu na ropu a plyn. To pro účely inženýrské geologie a geotechniky znamená, že v počátcích její aplikace pro inženýrské účely bylo k dispozici teoretické a programové řešení, jak tato měření zpracovávat. Rozvoj elektroniky znamenal i možnost upravit měřicí systémy tak, aby je bylo

možné použít ke zkoumání geologické složení masivu pomocí vyšších frekvencí a tím dosáhnout lepší rozlišovací schopnosti hardwaru i softwaru.

Ukázka z používání reflexní seizmiky pro průzkum v podzemním stavitelství je z průzkumu pro tunel „Vinohrady“ v Brně. Podle geologického členění oblast spadá do krystalinika a prevariského paleozoika Českého masívu, subjednotce brněnský masív. Mocnost zóny zvětrávání se pohybuje od metru až po deset metrů v závislosti na rychlosti odnosu zvětralin.

Mezozoické sedimenty jsou v sousedství lokality zastoupeny jurskými sedimenty v karbonátovém vývoji. V rámci současného průzkumu byly zastiženy pouze v jednom místě, a to jako sesutý materiál mesozoických vápenců (Vlček a kol. 2021). Terciární sedimenty jsou na lokalitě zastoupeny neogenními uloženinami, které přísluší miocenním sedimentům karpatské předhlubně.

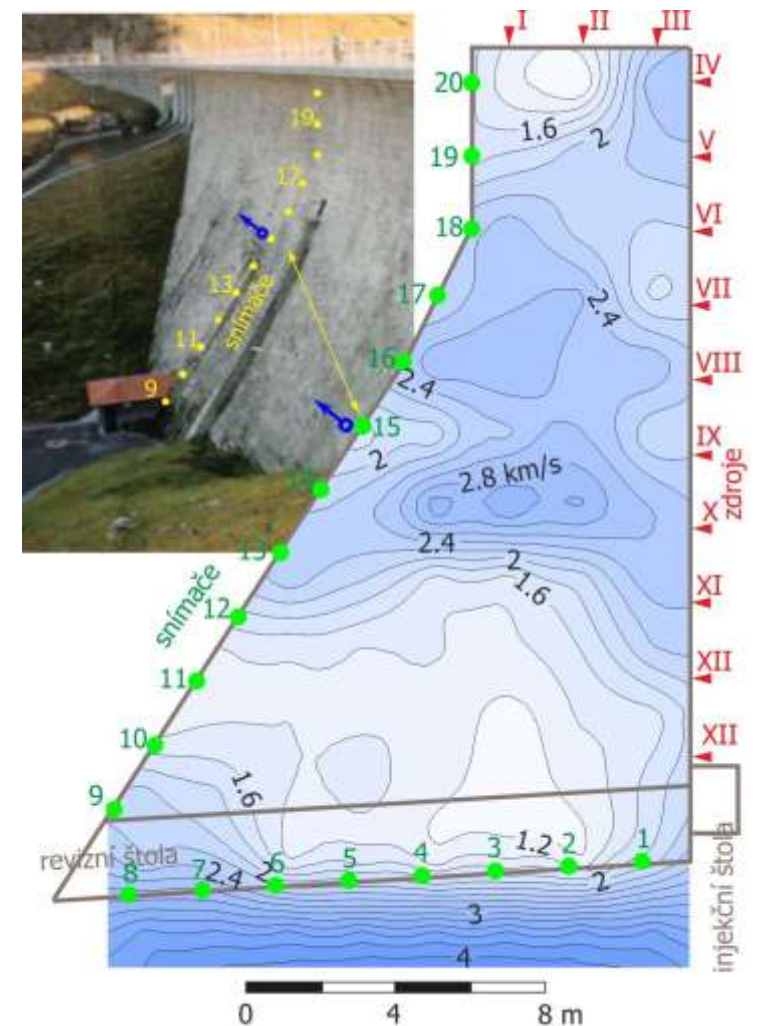
Úkolem seizmického měření na profilu GF1 bylo upřesnit geologickou stavbu v místě hluboké deprese v horninách předkřídového stáří. Existence zóny byla



Obr. 4 Seizmická měření pro tunel Brno - Vinohrady

indikována v dřívějších etapách průzkumu vrtanými sondami, odporovými řezy a refrakční seismikou. Reflexní řez na obrázku 4 je sestaven ze čtyř částí, z časového pole reflexní seismiky, z rychlostního pole podle refrakční tomografie jednak ve formě izolinií rychlostí podélných vln a jednak jejich barevného znázornění a posledním vstupem je vlastní geologicko-geofyzikální interpretace. Tyto základní podklady jsou na obrázku 4 ukázány v horní řadě s tím, že jednotlivé podklady, tak jak jsou zde popsány, jdou na obrázku zleva doprava. V celkovém řezu jsou všechny dílčí podklady sestaveny do jednoho svodného obrázku, kde nejpodstatnějším výstupem je výsledná interpretace získaná posouzením obou použitých metod (Tkadleček a kol. 2021). Získaná informace ze seismických měření je perfektní ukázkou, jak by měla být geofyzikální měření interpretována a předávána uživateli. Jen tak může výsledky geofyziky projektant dokonale použít pro svoji práci, ať už v dalších etapách průzkumu nebo i během výstavby podzemního díla.

Dalším způsobem seismických měření a jejich zpracování je seismická tomografie, která zaznamenala za posledních 30 let rozvoj nejen jako metoda pro geologický průzkum a výzkum, ale jako metoda velmi důležitá zejména pro inženýrskogeologické a geotechnické potřeby a zejména pro podzemní stavitelství. Seismická tomografie se začala používat s podmínkou uvažující přímkové šíření seismických paprsků. Geofyzici si byli vědomi, že tento přístup není stoprocentně správný, ale matematický a zejména výpočetní aparát nedovoloval jiné řešení. Rozmach seismické tomografie započal v momentu nasazení osobních počítačů do inženýrské praxe. V tentýž moment byl zaznamenán přechod od řešení přímkového k šíření seismického paprsku podél křivé dráhy. Obecně totiž platí, že seismický signál se dostane ke snímači v nejkratším čase ne po nejkratší dráze, ale po paprsku s časově nejkratším průběhem. Seismickou tomografií lze provozovat nejen v systému měření vrt – vrt, vrt – povrch a důlní dílo, ale dnes je již zvládnuta i pro čistě povrchová měření. Dnešní stav rozvoje techniky měření a zpracování seismické tomografie ji dovoluje aplikovat i na stavbách (např. přehradách). Následující ukázka použití seismické tomografie není z průzkumu horninového masivu, ale z kontroly zděné přehradní zdi Pontevedra ve Španělsku. Přehradní těleso hráze vysoké 27 metrů bylo vyžděno z různě navětralých žulových kvádrů a samotná přehrada je založena na žulovém masivu. Tomografický řez byl veden ve svislé rovině kolmo k dlouhé ose hráze. Umístění zdrojů seismického vlnění a seismických snímačů při tomografickém prozařování je na obrázku 5 (zdroje červeně, snímače zeleně). Izolinie rychlostí rozdělují těleso hráze a podzákladí do čtyř celků. Prvním z nich je zóna nízkých rychlostí těsně pod korunou hráze (zejména pod zdroji I a II). V tomto případě jde o projev diskontinuit v přehradním tělese pod plentou. Projev snižování rychlostí v plentě je ještě kombinován s namáháním



Obr. 5. Tomografická kontrola hráze Pontevedra

trojúhelníkového bloku nástavby na vzdušné straně hráze. Tahová napětí, kterým je tato část hráze vystavena mají za následek další snížení rychlostí. Proto dochází ke vzniku rychlostního rozdílu mezi buňkami pod zdrojem III a pod zdroji I + II. Horizontální gradient rychlostí mezi zdrojem III a II svědčí o největších tahových napětích v tomto místě. To se zřejmě odrazilo ve vzniku podélných puklin při rekonstrukci hráze (Bláha 1996).

V dalším úseku hráze, tj. v úrovni zdrojů V až VIII, se rychlosti podélných vln pohybují od 2,0 do 2,4 km/s, výjimečně až 2,6 km/s. V tomto případě je možné tyto rychlosti charakterizovat jako normální pole rychlostí podélných vln v hrázi. Třetím význačným jevem na průběhu izolinií je zóna vyšších rychlostí ve vodorovném pásu devátého a desátého zdroje. Tuto zónu je možné považovat za zónu s koncentrovaným napětím. Jedná se o klenbový efekt nad výrazným pásmem nízkých rychlostí v dolní třetině hráze. Důležité je však pásmo nízkých rychlostí mezi zdroji VIII a IX. Pokles rychlostí pod 2,0 km/s napovídá o tahovém nebo smykovém namáhání hráze. O významnosti tohoto namáhání se bylo možné přesvědčit při návštěvě již rekonstruované hráze. V létě 1994, více než jeden rok po rekonstrukci hrázového tělesa, v tomto místě byly dokumentovány průsaky vody hrázovým tělesem (viz foto na obrázku 5).

Následuje rozsáhlá zóna nízkých rychlostí od pásma zdrojů XI až k revizní štole. Rychlosti podélných vln jsou nad očekávání nízké. Na stavu zdiva vzdušné strany hráze je patrný rozdíl v kvalitě mezi spodní a horní částí hráze. I to dokumentuje, proč ve spodní části jsou nižší rychlosti. Lze důvodně předpokládat, že hráz se nebude lišit pouze kvalitou vnější obezdívky, ale i výplní hrázového tělesa. Průsaky hrázi a vyplavování spojovacího materiálu bylo ve spodní části hráze výraznější než v horní části. Poslední výraznou zónou je pás vysokých rychlostí v podzákladí hráze. Na první pohled je patrné, že žulový masiv má lepší vlastnosti než těleso hráze. Z absolutních hodnot rychlostí (3,6–3,7 km/s) je však zřejmé, že i žulový masiv je navětralý a že horniny v podzákladí nemají nijak dobré geotechnické vlastnosti.

Seizmické metody jsou nejdůležitější skupinou geofyzikálních metod při průzkumu horninového masivu v podzemním stavitelství. Jejich přínos lze rozdělit do dvou velkých oblastí. První z nich je určování jednotlivých fyzikálních rozhraní a z nich odvozených geologických rozhraní a struktur. Tyto aplikace jsou běžné při všech druzích průzkumu, nejen pro vlastní liniovou stavbu, ale i pro další přidružené objekty. Jedinou okolností, na kterou je potřebné znovu upozornit, je to, aby geofyzik byl znalý procesů, které mohou v horninovém masivu nastat a aby zákazníci alespoň částečně znali základy geofyziky. Základní metodou pro tyto účely je mělká refrakční seizmika, která se v současné době zpracovává pomocí programů, které umožňují i pronikání seizmických paprsků pod refrakční horizont. Tato metoda je v anglické literatuře citována častěji než elektrická odporová tomografie. Na druhé straně je potřebné konstatovat, že zmizel trend, který přetrvával zhruba do devadesátých let, kdy byla více využívána pouze mělká refrakční seizmika. Dnes je běžné, že seizmické metody jsou v inženýrské geofyzice často využívány společně s elektrickou tomografií. Je možné prohlásit, že původní styl práce se změnil ku prospěchu věci. Rozhodně nejlepší výsledky je možné získat kombinací obou základních geofyzikálních sondovacích metod.

Z reflexních metod se nejčastěji používají podélné vlny, ale existují pokusy i s příčnými vlnami. Obecně platí, že reflexní metody dávají nejlepší výsledky při vykreslování subhorizontálních rozhraní, ale dobře indikují i poruchová pásma uvnitř horninového masivu. Značnou výhodou reflexní seizmiky je okolnost, že při jejím měření není potřebné tolik prostoru, jak při měření s lomenými vlnami. Další výhodou je, že reflexní seizmika je schopna najít i rozhraní, kdy mezi zkoumanými prostředími existuje rychlostní inverze. Nevýhodou reflexní

seizmiky je ne příliš přesné určování rychlostí elastických vln. Tento nedostatek je často odstraňován překrytím výsledků reflexní seismiky a povrchové seismické tomografie.

Seismická tomografie dnes neslouží jen jako doplněk k reflexní seismice, ale je využívána jako plnohodnotná metoda. Pokud je používána i ve vrtné variantě, nebo ve variantě vrt-povrch není lepší způsob, jak poznat rozložení rychlostí elastických vln v horninovém masivu. I v jednovrtné variantě lze z výsledků seismické tomografie získat i 3D model geologické stavby. To se podaří otáčením proměřovaného trojúhelníku mezi vrtem a povrchovým profilem o 30 nebo 45°. Ve většině případů se navíc dosáhne větší hloubky, než je hloubka vrtu. To je umožněno obíháním (vyhýbáním se) částí masivu s nízkou rychlostí oblastmi s lepšími geotechnickými vlastnostmi. Zvýšení hloubkového dosahu bývá 5–10 %. Pokud se ze záznamů podaří identifikovat i příčné vlny, pak je toto měření plnohodnotným způsobem, jak určovat fyzikální a mechanické vlastnosti.

Velkou pozornost je potřebné věnovat při interpretaci seismických měření zjišťování rychlostí. Statistické hodnocení dává podklady pro další studium horninového masivu a pro studium dějů, které v něm proběhly a probíhají. Tato okolnost je však velice často geofyziky opomíjena. Takovéto studie mohou poskytnout cenné informace o dějích v masivu, o jeho stavbě, o porušování hornin, o rozložení napětí a podobně. O těchto aplikacích budou ještě zmínky v dalších kapitolách. Druhou skupinou aplikace seismických metod jsou možnosti studia napětíodeformačního stavu horninového masivu. Velmi zajímavé výsledky v tomto směru je možné získat seismickým profilováním.

2.3 Geoelektrické metody

Geoelektrické metody jsou v současné době druhou nejpoužívanější metodou při průzkumu a výzkumu horninového masivu v podzemním stavitelství. Geoelektrické metody jsou na základě teoretických rozborů velmi vhodné pro výzkum horninového masivu, protože vychází z velké variability elektrických vlastností hornin. Nejběžnější je využívání výrazných změn měrného odporu, který se u horniny mění přes několik řádů. Dalšími vhodnými vlastnostmi jsou permeabilita, permitivita a polarizovatelnost. Základním předpokladem pro jejich úspěšnou aplikaci je najít tu vlastnost, která pro daný účel poskytne nejnadějnější výsledky. Zároveň víme, že lze úspěšně využít skutečnosti, že existují příčinné souvislosti mezi elektrickými vlastnostmi a procesy porušování a zvětrávání horninového masivu různými geologickými procesy.

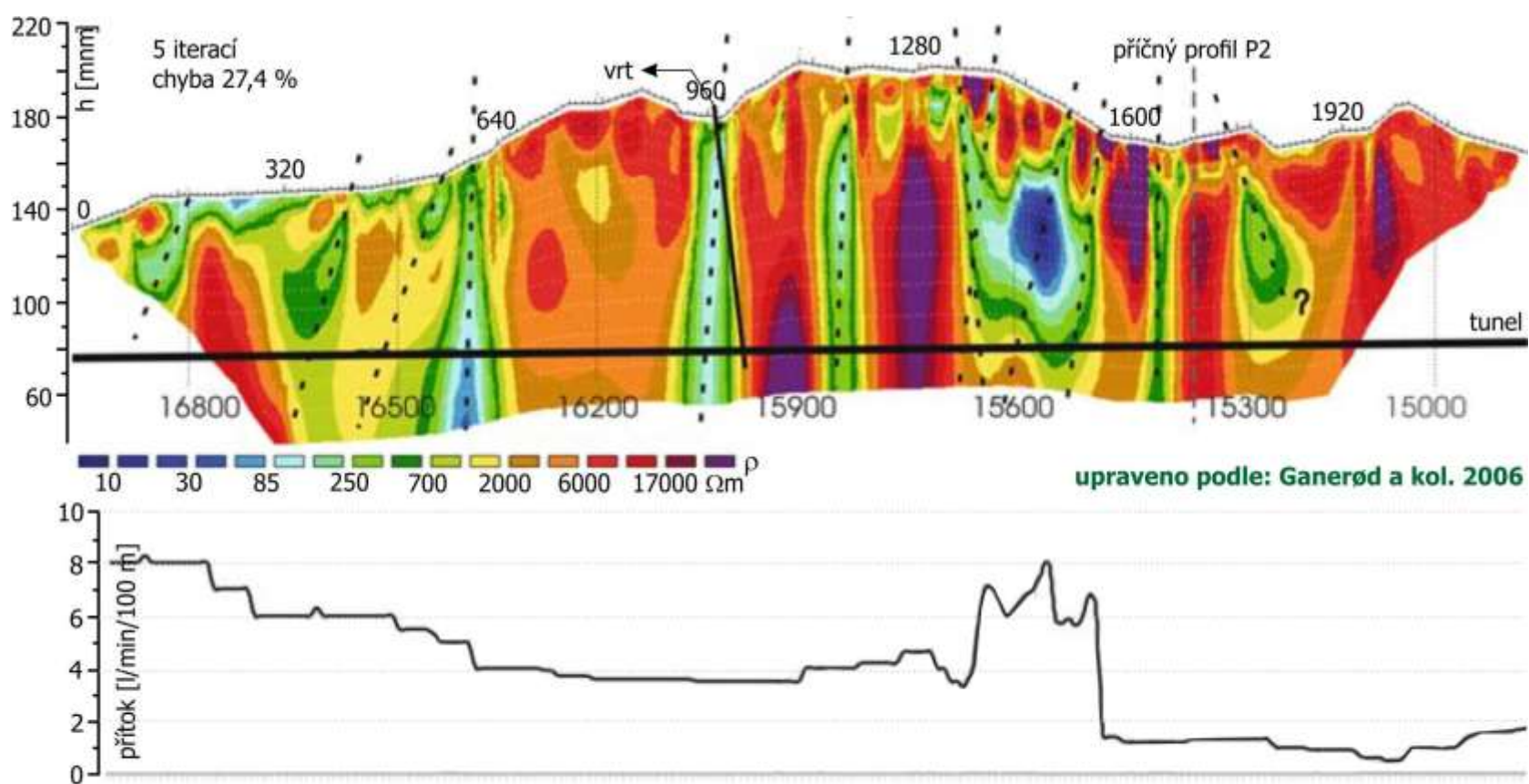
Aplikace geoelektrických metod při průzkumu pro podzemní stavitelství se dá rozdělit podle několika hledisek. Prvním je důvod studia, tzn., že je třeba rozlišovat, zda se jedná o pouhé určení geometrie geologické stavby, nebo o sledování změn fyzikálních vlastností, nebo o časovém vývoji změn v horninovém masivu. Ve všech případech se většinou používají metody stejnosměrného proudu. Podle toho, zda se studuje horizontální nebo vertikální stavba, se aplikuje metoda elektrické odporové tomografie a vertikálního elektrického sondování nebo metody profilovací, zejména pak metoda symetrického odporového profilování. Další geoelektrické metody jsou již aplikovány méně a v současné době mezi nimi převládá georadar a v posledních letech i metody elektromagnetické. Radar se používá pro sledování geologických podmínek v malých hloubkách, tj. jeho aplikace v tomto oboru je možná při průzkumu vyústění tunelů, doprovodných staveb a na stěnách podzemních staveb. Naopak elektromagnetické metody umožní svým principem využít jejich možného velkého hloubkového

dosahu a uplatnit se při průzkumu celé délky projektovaného tunelu, nebo při průzkumu pro různá úložiště. Tyto metody se většinou používají v raných stádiích průzkumu.

U zbývajících metod jejich použití má většinou charakter experimentální. Z těchto metod je nejdůležitější metoda nabitého tělesa (mise-a-la-masse). Té se využívá pro vyhledávání a zjišťování spojitosti různých vodivých struktur. Metoda spontánní polarizace, dává ve vhodných podmínkách dobrý obraz o režimu podzemní vody v horninovém masivu, nebo k vyhledávání hornin se zvýšeným obsahem elektronových vodičů.

Ukázka použití metody ERT z Norska. Jednalo se o průzkum v okolí jednoho z tunelů na silnici E 39, což je hlavní silniční spojení mezi střední a západní částí Norska, kde v zimě často dochází k nehodám a dopravním kalamitám. Silnice je dlouhá 22 km a tvoří ji šest tunelů a čtyři mosty. Ukázka je z práce na druhém nejdelším tunelu, 2 690 metrů dlouhém tunel Viggja. Po uvedení silnice do provozu se ukázalo, že vznikají problémy s jeho stabilitou související s poruchovou zónou, která prochází tunelem. Ve východní části tunelu probíhá subparalelně s tunelem porucha, která ho protíná v délce téměř 240 metrů. Porucha má charakter dva metry mocného zajílovaného pásma.

Tunel se nachází v komplexu středonorských kaledonid, které tvoří metamorfované zelené břidlice a amfibolity. V tunelu a nad nimi převládají hrubozrnné biotické ruly s laminami a vrstvami obohacenými křemenem a živcem. Mapování, dálkové snímání a topografický model určily dvě významné orientace oslabení horninového masivu: V–Z a S–J. Na výchozech a stěnách tunelu byly zjištěny zlomy a zlomové zóny s již zmíněnou orientací. Tam, kde jsou linie orientované V–Z, je vidět geologickou



Obr. 6 Metoda ERT jako součást průzkumu provozovaného tunelu

stavbu způsobenou plastickým deformováním hornin. Během výstavby tunelu byly zjišťovány netěsnosti hlavně podél směrů S–J. Přítok podzemní vody dosahoval hodnot až 20 l/min/100 m (Ganerød a kol. 2006). Problémy se stabilitou se vyskytly především ve V–Z zónách. Díky geologické dokumentaci při ražbě bylo zjištěno, že v jílovitých zlomových a puklinových zónách bylo přítomno obohacení pyritem a chalkopyritem.

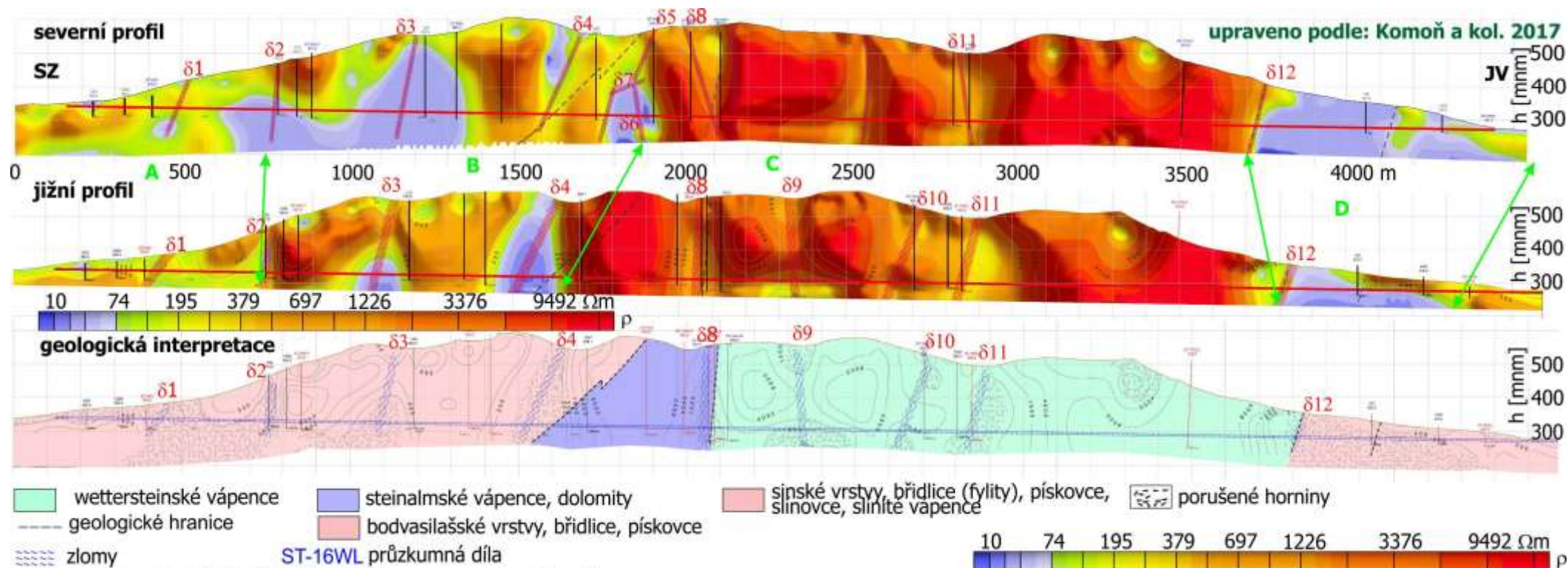
Ukázka norských výsledků na obrázku 6, která je z měření ERT na profilu P1. V poli měrných odporů jsou vyznačeny poruchy, tak jak je interpretovali norští specialisté. V profilu P1 je zřetelných několik strmě ukloněných zón s nízkým měrným odporem. Tyto zóny mají přibližně S–J směr. Většina těchto zón dobře koreluje se zónami pozorovanými v tunelu a v topografickém modelu. Výskyty netěsností v tunelu během výstavby dobře korelují s interpretovanými zónami z geofyzikálního měření na profilu P1. Přítok do tunelové roury nikdy nepřekročil schválenou úroveň 20 l/min/100 m; k největšímu úniku došlo mezi staničením 15500 až 15700 metrů (obr. 6 spodní část).

Metoda ERT na tunelu Viggja se podle názorů norských specialistů ukázala jako vhodná metoda pro identifikaci oslabených míst horninového masivu. ERT poskytuje nejlepší výsledek pro interpretaci geologických struktur směrem do nitra masivu. Podobné závěry byly v Norsku zjištěny i během průzkumu dalších tunelů. Sulfidy nebo jiné elektronově vodivé minerály mohou ovlivnit údaje o měrném odporu a komplikovat správnou interpretaci. Malé množství sulfidů by bylo možné identifikovat metodou vyzvané polarizace.

První ukázka z použití elektromagnetických metod je z aplikace magnetoteluriky z průzkumu pro silniční tunel na trase Košice – Rožňava. Území je geomorfologicky řazeno ke Slovenskému krasu a geologicky patří k Silickému příkrovu, který je horizontálně nebo subhorizontálně uložený na starších horninách. Nejspodnější část sedimentárního komplexu tvoří různé břidlice, pískovce s částečnou přítomností dolomitů a vápenců. Na nich leží další část sedimentárního komplexu, gutensteinské dolomity, tmavošedé vrstevnaté dolomity a dolomitické brekcie. Nejmladšími horninami jsou světle šedé organodetrické wettersteinské vápence. Mocnost tohoto sedimentárního komplexu je až 800 metrů.

Geofyzikální měření proběhlo metodou CSAMT se vzdáleností měřících bodů 75 metrů. Magnetotelurický signál byl vytvářen zdrojem TXM-22, Metronix a signál byl přijímán se dvěma přijímači ADU07e s magnetickými sondami MFS-07e, MFS-06e. Celkem byly proměřeny dva profily o délce 4500 metrů a jejich osová vzdálenost byla cca sto metrů. Dlouhé profily byly spojeny dvěma kolmými krátkými profily. Z geofyzikálního hlediska je možné území okolo magnetotelurických profilů rozdělit do čtyř bloků A až D (Komoň a kol. 2019). V originální zprávě jsou oba profily popisovány samostatně, a to ve třech celcích dlouhých cca 1700 metrů. Hranice bloků jsou interpretovány v různých metrážích a nejsou kolmé k profilům. V dalším textu bude omezení bloků označeno podle metráže na severním profilu a jejich průběh je patrný z obrázku 7.

Při popisování jednotlivých bloků jsou hodnoty měrného odporu nižší než 100 Ωm považovány za projev porušení horninového masivu, nikoli jako charakteristická vlastnost některého litologického typu. Blok A začíná na severozápadním portálu a končí v metráži cca 750 m. Blok je charakterizován měrnými odpory v rozmezí 10 až 100 Ωm , s extrémy až 700 Ωm . Měrné odpory pod 100 Ωm ve staničení cca 700 metrů jsou pravděpodobně projevem porušení horninového masivu, které sem zasahuje z bloku B. Litologicky se jedná o porušené sínské vrstvy, břidlice a slítné vápence (Komoň a kol. 2017). V tomto bloku byla zjištěna pouze jedna porucha $\delta 1$, která nemá výrazný vliv na mechanický stav horninového masivu. Blok B je od bloku A oddělen poruchou $\delta 2$ a sahá až do 1870 m. Jeho měrné odpory se mění



Obr. 7 Metoda CSAMT při průzkumu tunelu Soroška

v mezích mimo oblasti porušení od 300 do 3000 Ωm s extrémními hodnotami 5000 Ωm . Litologicky autoři na základě technických prací tento úsek popisují jako sinské vrstvy, třebaže mají v tomto bloku vyšší měrné odpory. V tomto bloku byly určeny dvě tektonické poruchy, a to $\delta 3$ $\delta 4$. Porucha $\delta 4$ se projevuje na obou profilech, při čemž na jižním profilu je výraznější. Poněkud složitější je podle geofyzikálního měření situace okolo poruchy $\delta 3$. Ta se v hloubce spojuje s poruchou $\delta 2$ (300 m n.m.). Je možné, že toto spojení je dáno další poruchou, která leží severněji od proměřovaných profilů. Jinak se zdá nepravděpodobné, že by během 300 metrů došlo mezi profily k tak výrazné změně jejich projevů.

Následující blok C sahá od 1900 do 2700 metrů a výrazně se odlišuje od okolního horninového prostředí. Zajímavý je též přechod bloku B do bloku C na severním profilu. Tam se mimo poruchy $\delta 4$ objevují poruchy $\delta 5$, $\delta 6$ a $\delta 7$. Je pravděpodobné, že se může jednat o podobný efekt, který byl popsán u poruchy $\delta 3$. Ve vlastním bloku C byly určeny čtyři poruchy $\delta 8$ až $\delta 11$. Na těchto poruchách nedochází k výraznému zmenšení měrného odporu, proto se dá předpokládat, že se pravděpodobně jedná o křehké porušení horninového masivu. Měrné odpory hornin v bloku C jsou relativně vysoké a pohybují se od 400 do 6000 Ωm , výjimečně do 10000 Ωm . Litologicky tento blok Komoň a kol. popisují jako wettersteinské vápence. Poslední blok sahá od 3700 m do konce profilu. Blok je charakteristický velmi nízkými odpory, které prakticky všude klesají pod 300 Ωm . Vyšší měrné odpory jsou výjimečné a podle jejich uložení je z části tvoří kvartérní

zeminy. Litologicky se pravděpodobně jedná o silně porušené sinské vrstvy. V bloku byla určena pouze porucha $\delta 12$, a jedná se pravděpodobně o místo kontaktu dvou různých horninových typů.

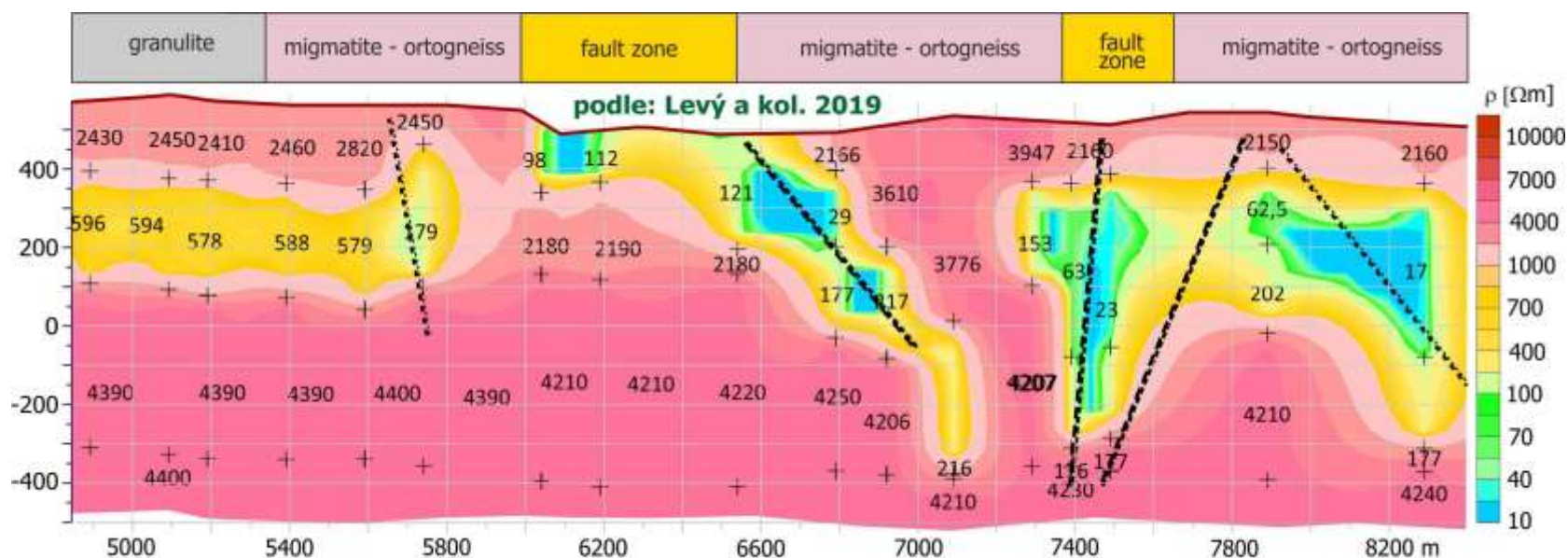
Další ukázka je z elektromagnetických metod, metody přechodových jevů (TEM), je z lokality Kraví Hora. Zájmové území tvoří metamorfované horniny strážeckého moldanubika a přilehlé části svrateckého krystalinika (Levý a kol. 2019). Severovýchodní část strážeckého moldanubika se skládá z masivu biotitických migmatitů s polohami dalších typů pararul a migmatitů o mocnosti v řádech desítek až stovek metrů. Na západním okraji se nacházejí částečně migmatizované amfibolické ruly a amfibolity. Ve střední části zájmového prostoru vystupuje těleso granulitů a granulitových rul označované jako drahonínský masiv.

Výsledky měření metodou TEM na lokalitě Kraví Hora jsou prezentovány způsobem obvyklým při měření VES. Na obrázku 8 v odporovém řezu znázorněny výsledky 1D interpretace výsledků měření na každém bodě. K prezentování byla vybrána nejzajímavější část profilu, kde byla vzdálenost jednotlivých bodů TEM přibližně stejná a nedocházelo k jejich vynechávání, tj. je zobrazen úsek profilu 4,9 až 8,3 km.

V této části profilu byly autory zprávy stanoveny dva základní litologické typy a dvě pásma porušení horninového masivu. Určení zlomů a jejich popis je opět přebrán z originální zprávy a zní následovně (Levý a kol. 2019):

- st. 4900–6000 m kvazihomogenní blok málo porušených hornin, na st. 5400 m málo výrazný projev tektoniky ID 11; případný horninový kontakt je zde nevýrazný; změna sklonu korelačních rozhraní od st. 5550 k východu;
- st. 6000–6600 m – výrazná širší poruchová zóna s projevy zlomů ID 180 a ID 160; směrem do hloubky se projevuje hlavní tektonika ve st. 6200 m;
- st. 6500 m, subvertikální porucha;
- st. 6800–6900 m – subvertikální porucha;
- st. 7500 m – výrazná poruchová hluboko oslabená zóna s úklonem k západu, ID 96 hranice svrateckého krystalinika;
- st. 8000 m málo výrazné diskontinuity.

Geoelektrické metody přinášejí nesmírně cenné poznatky při průzkumu a výzkumu horninového



Obr. 8 Metoda TEM na lokalitě Kraví Hora

masivu pro potřeby podzemního stavitelství nezávisle na tom, o jaký druh stavby se jedná. Při běžných inženýrskogeologických pracích se v převážné míře používají metody stejnosměrného proudu. V současné době zejména elektrická odporová tomografie a doplňkově vertikální elektrické sondování a odporové profilování. Kladem elektrické odporové tomografie je její systém zobrazování výsledků, tj. 2D rozložení měrných odporů, zdůrazněné jejich barevnou kresbou. V posledních letech se začíná výrazně využívat i systému 3D zobrazení. Jak dokumentují uvedené příklady lze její aplikací získat zajímavé výsledky. Při interpretaci ERT (Excavation Damage Zone, zóna porušení masivu) je vhodné využívat další možnosti zpracování jejích výsledků, například statistickým hodnocením nebo v kombinaci s jinou metodou.

V poslední době se začíná rychle rozvíjet používání elektromagnetických metod. Je to dáno dvěma skutečnostmi. První z nich je součástková základna pro konstrukci přístrojů, která dovoluje používat složitější systémy měření, a dokonce řízení měření počítačem, ať již zabudovaným v přístroji, nebo externím. Druhou skutečností je rozvoj matematických metod zpracování naměřených dat na základě nově odvozených teoretických vztahů. Elektromagnetické metody stále častěji přechází od klasických profilových měření k měření semileteckému. V tomto případě je budicí systém stále ještě ponechán na povrchu země, ale měřící systém je nesen letadlem, vrtulníkem nebo dokonce prostředkem UAV. Existují však i systémy, kdy oba okruhy nese vrtulník. V nejbližší budoucnosti lze očekávat, že používání dronů dozná výrazného rozšíření.

Po počátečním boomu používání geologického radaru, nastalo zmenšení jeho nasazování při řešení problémů podzemního stavitelství. Důvodem je jeho malý hloubkový dosah, který umožňuje najít jeho použití při řešení problémů malých hloubek (portály tunelů) nebo při průzkumu doprovodných staveb. Lze však předpokládat jeho nasazení i při sledování bezpečnosti skalních zářezů a při řešení problémů spojených s řešením problematiky EDZ. Ostatní geoelektrické metody se používají pouze výjimečně. Metoda spontánní polarizace i vyzvaná polarizace může poskytnout informace o přítomnosti minerálů s elektronovou vodivostí v horninovém masivu. Metody nabitého tělesa i spontánní polarizace mohou přinést cenné poznatky pro zkoumání problémů podzemní vody včetně její dynamiky.

2.4 Ostatní geofyzikální metody

Seizmické, geoelektrické metody a karotáž představují při geofyzikálním průzkumu pro podzemní stavitelství podstatnou část jejich nasazení. Dá se odhadnout, že finanční objem tří nejdůležitějších metod se bude pohybovat okolo 95 % z celkového objemu financí připadajících na geofyzikální průzkum. To ovšem neznamená, že gravimetrie, magnetometrie, termometrie a radioaktivní metody nemohou poskytnout zajímavé a potřebné informace pro posouzení kvality a stavu horninového masivu. Gravimetrie a magnetometrie jsou vhodnější při aplikaci pro hluboký průzkum, termometrie a radioaktivní metody podávají spíše poznatky o přípovrchových vrstvách horninového masivu.

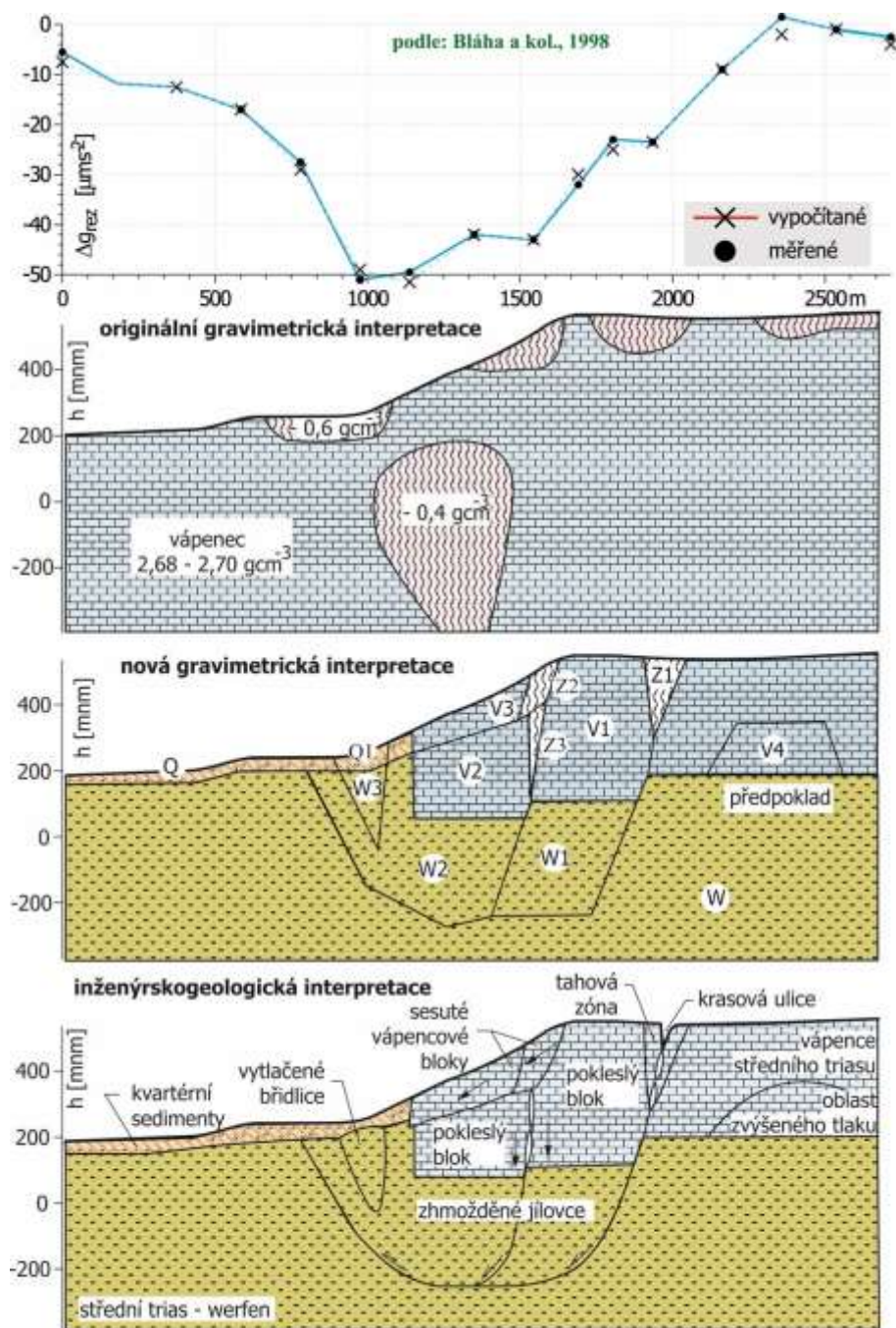
Gravimetrická měření mohou určovat nejen hlubokou geologickou stavbu, ale i zóny s převládajícím tahovým napětím. Ukázka takového způsobu použití gravimetrických měření je ze svahové deformace Hrhov – Dolný vrch. Zde je třeba připomenout, že toto gravimetrické měření nebylo realizováno jako měření pro inženýrský průzkum, ale že se jednalo o součást měření, jehož úkolem byl hydrogeologický průzkum vápencové struktury Dolního vrchu, a to jak na území Slovenské republiky, tak na území Maďarska (Bláha a kol. 1998).

Těmto původním účelům byl uzpůsoben i krok měření (200 metrů), který se však ukazuje pro běžné využití gravimetrie pro inženýrské účely jako příliš veliký. Jak nasvědčuje reinterpretace provedeného měření, byl i pro případ popsání této rozsáhlé svahové deformace tento krok dostačující.

Základní měření, které bylo v počátku interpretováno hydrogeology a gravimetricky, bylo při revizi zcela přehodnoceno. Ukázalo se, že původní předpoklad porušení svahu neodpovídá ani předpokladům o blokových svahových deformacích ani o geologii krasu. Proto byl sestaven nový model svahové deformace. Celá interpretace proběhla dvojstupňově. Po prvním kole výpočtu byl model dopraven a provedeno další zhodnocení. Úprava modelu se pouze týkala zvětšení klínů, které jsou na obr. 9 značeny jako Z3 a W3. Zároveň byl ještě doplněn blok V4. Na základě gravimetrických výpočtů bylo možné stanovit litologické typy s jejich podtypy, které charakterizují různé porušení hornin. Údaje o interpretovaných objemových hmotnostech byly též uvedeny tabelárně.

Z obrázku 9 je patrné, jak lze z gravimetrických měření vyřešit stavbu blokové deformace. Jediným rozhraním, které nelze spolehlivě určit, je rozhraní mezi neporušenými vápenci středního triasu a neporušenými werfenskými sedimenty. Rozdíl v objemové hmotnosti těchto dvou typů hornin je pouze $0,01 \text{ g/cm}^3$. V takovýchto případech není možné gravimetrickým měřením dosáhnout kvalitních výsledků. Když jsou horniny porušeny, je možné určovat jejich rozhraní a jejich objemové hmotnosti. Pro inženýrského geologa a geotechnika je nejpodstatnější skutečnost, že lze určit hloubku zaboření vápencových bloků do werfenu (viz báze bloků V1 a V2) a podstatný je i údaj o úbytku hmoty v tahových zónách. Zajímavý je i údaj o zvýšení objemové hmotnosti v bloku V4. Je zřejmě způsoben stlačením vápencové desky při jejím ohybu, kdy dochází v tomto místě k sevření původně rozevřených puklin. Ohyb vápencové desky je způsoben pohybem a třením bloků V1 a V2. Nárůst objemové hmotnosti o $0,1 \text{ g/cm}^3$ odpovídá nejen sevření trhlin, ale i snížení porozity o cca 4 %.

Z gravimetrických měření lze získat především údaje o geologické



Obr. 9 Vývoj interpretace gravimetrických měření

stavbě masivu. Je možné určit nejen subhorizontální stavbu, ale daří se i určovat zóny s deficitem hmoty, které mají především strmý sklon. Při bližším zkoumání naměřených křivek lze určit nejen zóny s deficitem hmoty, ale i oblasti, kde je relativně hmoty přebytek, tj. zóny kde převládá tlakové napětí. Velkým kladem gravimetrických měření je možnost podávat výsledky nejen ve formě kvalitativní, ale i kvantitativní. Může tedy podávat informace i o hloubkové stavbě horninového masivu v zájmovém území. Současný technický stav dovoluje interpretovat nejen relativní změny, ale je schopný podat řezy rozložení objemové hmotnosti v absolutních jednotkách.

Příspěvek klasických magnetometrických prací při studiu horninového masivu pro inženýrské stavitelství již není tak výrazný. Jejich neoddiskutovatelný význam je pouze při studiu litologie horninového masivu v případě, že v některých horninách jsou přítomny minerály se zvýšenou magnetickou susceptibilitou. Geotermická měření mohou přinést cenné poznatky o stavu horninového masivu. Při aplikaci termických měření je nutné počítat s tím, že informace mají výrazně sezónní charakter a jsou ve velké míře závislé na vodním režimu masivu. Je samozřejmé, že mnohem lepší výsledky přináší měření v ploše než měření na profilech.

Zcela nové možnosti použití geofyzikálních metod při průzkumu horninového masivu se odkrývají při jejich letecké aplikaci. Vývoje především hardwarového vybavení a s ním spojené i nové softwarové možnosti ukazují na možné použití leteckých metod při průzkumu rozsáhlých oblastí. Dnes již nastala doba, kdy je možné použít geofyzikální aparatury i na nosičích typu UAV. Tím se otevírá možnost snímání fyzikálních polí v relativně konstantní výšce, ale hlavně i na středně velkých až malých územích. Obrovskou výhodou leteckých metod je jejich plošný výstup. Při interpretaci tak geofyzici a inženýrství geologové nebudou vázáni na výsledky měření zjištěných na ojedinělých profilech.

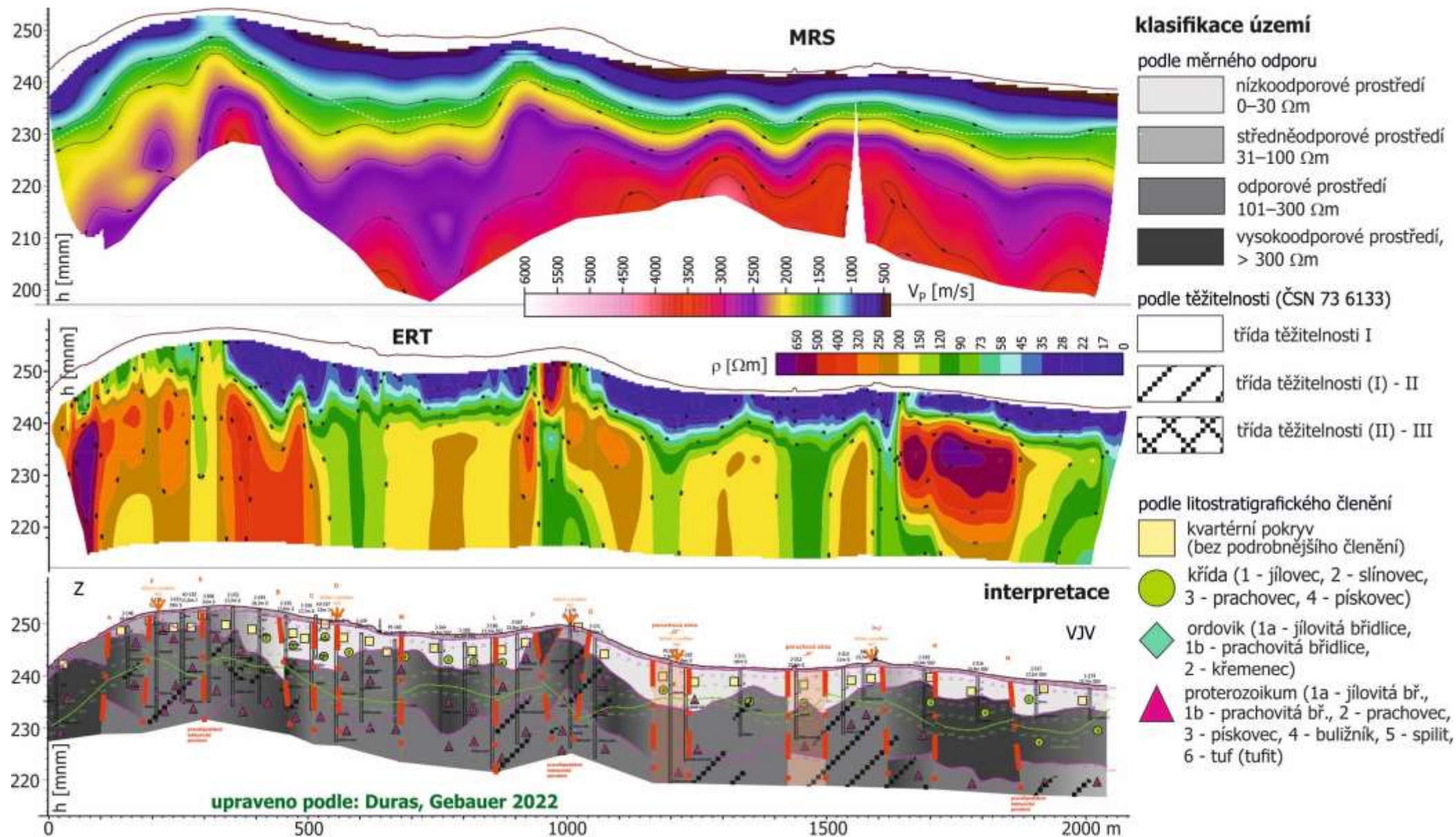
3 Komplexní interpretace

Dlouhodobá zkušenost s používáním geofyzikálních metod pro inženýrskogeologické a geotechnické účely praví, že použití jediné geofyzikální metody nepřináší dostatečně dobré výsledky. Je proto vždy při projektování prací potřebné vycházet z dosavadní znalosti geologických podmínek na lokalitě, fyzikálních a geotechnických vlastností hornin a ze znalostí získaných z archivních zpráv z měření realizovaných za obdobných podmínek. Teprve na takovém základě je možné sestavit kvalitní projekt geofyzikálního měření.

Při zpracování měření je nutné nejprve sestavit požadované geofyzikální řezy a další podklady získané z měření a sestavit z nich fyzikální model zájmového území. Pak je nutné takovýto model převést na model inženýrskogeologický, případně geotechnický. Takovouto interpretaci není schopen zpracovat sám geofyzik a ani inženýrský geolog nebo geotechnik. Komplexní interpretace musí proběhnout v úzké spolupráci geofyzika, inženýrského geologa a geotechnika a mnohdy je nutné přizvat i dalšího specialistu, nejčastěji hydrogeologa. Bez takovéto spolupráce není možné získat kvalitní výsledky, které nabízí geofyzikální měření. Měření zpracované odděleně různými specialisty ve většině znamená plýtvání finančními prostředky.

První ukázka je z lokality Veleň z průzkumu pro tunel na trase dálnice D0. Seizmická měření provedla společnost G-IMPLUS, geoelektrická měření a interpretaci společnost GEOtest. Geologicky je stavba okolí průzkumného profilu dosti pestrá. Kvartérní pokryv je tvořen sprašemi, sprašovými hlínami, jíly, písky a štěrky. Z hlediska měrných odporů se daly očekávat hodnoty od prvních desítek až k prvním

tisícům ohmmetrů. Křídové sedimenty představují různé druhy sedimentů jílovci počínaje a pískovci konče. Relativně často se v sedimentech vyskytuje vápnitá příměs. Měrné odpory křídových sedimentů se mohou pohybovat od cca čtyřiceti ohmmetrů do nižších stovek ohmmetrů. Ordovické sedimenty jsou zastoupeny jílovitými a prachovitými břidlicemi případně křemenci. Horniny mladšího proterozoika



Obr. 10 Souhrnná interpretace komplexního geofyzikálního měření na lokalitě Veleň

jsou zastoupeny jílovitými a prachovitými břidlicemi, prachovci, pískovci a buližníky. Jejich měrné odpory by měly sahat od prvních stovek až do prvních tisíc ohmmetrů. Mimo tyto základní horninové typy se v bližším okolí vyskytují i ordovické spility a černé břidlice. Jejich měrné odpory se pohybují okolo tisíce ohmmetrů.

Výsledky komplexního geofyzikálního měření a jeho souborné interpretace jsou na obrázku 10. Výsledkem interpretace jsou dva geofyzikální řezy a obrázek souborné interpretace (Duras, Gebaeur 2023). *Výsledky mělké refrakční seizmiky jsou znázorněny polem rychlostí podélných vln v rozsahu 1000–5000 m/s. Nejmarkantnějším prvkem na poli rychlostí je jejich snížení v metrů cca 750 metrů. Snížení rychlostí je patrné až do hloubky 50 metrů, což svědčí o významném porušení horninového masivu. Na poli měrných odporů je dobře znatelné vymezení kvartérních zemín, kde měrné odpory klesají až pod 40 Ωm . Další výraznou anomálií je snížení měrného odporu ve velkých hloubkách v metrů 650–900 metrů s poklesem měrných odporů pod 200 Ωm . Tento pokles měrných odporů dobře souhlasí s poklesem rychlostí podélných vln. V nejspodnějším obrázku je výsledná inženýrskogeologická interpretace. Určení těžitelnosti podle normy ČSN 73 6133 vychází především z velikosti rychlostí podélných vln. V tomto řezu jsou vkresleny i údaje o litologickém složení horninového masivu. Od povrchu jej tvoří kvartérní zeminy a v části profilu křídové sedimenty, břidlice a pískovce, ojediněle jílovce. Podél celého profilu byly ve větších hloubkách zjištěny horniny proterozoické jílovité a prachovité břidlice, ojediněle buližníky. Ve spodním obrázku jsou též vkresleny zóny oslabení horninového masivu – poruchy. Detailní interpretaci, vzhledem k výše popsaným problémům, je možné zjistit zvětšením obrázku, nebo vyžádáním dalších informací od autorů průzkumu.*

4 Závěr

Použití povrchových geofyzikálních metod pro potřeby podzemních stavitelství se neustále rozvíjí. Uvedené příklady v předchozích kapitolách jsou toho důkazem. Dnes si již nedovedeme představit průzkum pro inženýrské stavby bez použití karotážních měření v místech projektovaných podzemních staveb. To nelze realizovat pouze za použití jedné metody, ale je nutné používat jejich komplex. Dnešní karotáž by již vždy měla obsahovat i metody přímé dokumentace vrtných stěn (ABI, OBI) a bez metod, které zjišťují porušení masivu prakticky přímo (úplná akustická karotáž). Při interpretaci karotážních měření je nutné důsledně využívat všech geologických údajů získaných přímými průzkumnými pracemi.

Seizmické metody jsou nejdůležitější skupinou geofyzikálních metod při povrchovém průzkumu horninového masivu v podzemním stavitelství. Jejich přínos lze rozdělit do dvou velkých oblastí. První z nich je určování jednotlivých fyzikálních rozhraní a z nich určených geologických rozhraní a struktur a druhým odvození mechanických vlastností ze zjištěných rychlostí elastických vln. Tyto možnosti jsou běžné při všech druzích průzkumu, nejen pro vlastní liniovou stavbu, ale i pro další přidružené objekty i při průzkumu lokalit vhodných pro budování různých úložišť.

Geoelektrické metody přinášejí nesmírně cenné poznatky při průzkumu a výzkumu horninového masivu pro potřeby podzemního stavitelství nezávisle na tom, o jaký druh stavby se jedná. Při běžných inženýrskogeologických pracích se v převážné míře používají metody stejnosměrného proudu. V současné době zejména elektrická odporová tomografie a doplňkově méně již vertikální elektrické sondování

a odporové profilování. Velký rozvoj zažívá používání elektromagnetických metod, nejnověji pak v aplikaci leteckých měření, bez ohledu na to, jaký nosič geofyzikálních aparatur se používá.

Ostatní geofyzikální metody je třeba chápat jako podpůrné, ale na druhé straně je potřebné si uvědomovat, že tyto metody ve specifických případech mohou poskytnout neocenitelné údaje.

Jedinou okolností, na kterou je potřebné znova upozornit je to, aby geofyzik byl znalý procesů, které mohou v horninovém masivu nastat a aby zákazníci alespoň částečně znali základy geofyziky. Jen tak je možné docílit toho, že z naměřených materiálů se získají prakticky všechny informace, které přináší. Zanedbatelný není ani ekonomický efekt.

Značně podrobněji se touto problematikou zabývá kniha „Geofyzika pro podzemní stavitelství“ vydaná v tomto roce společně Stavební fakultou VŠB-TU Ostrava, Přírodovědeckou fakultou UK Bratislava a Geotestem (Bláha, 2023).

References

- BAGGER L.C., WISÉN R., JORGENSEN M., JENSEN M.: *Refraction seismic for mapping of limestone surface in a tunnel project in Copenhagen*, 17th Nordic Geotechnical Meeting Challenges in Nordic Geotechnic, NGM, Reykjavík, 2016, p. 1–8.
- BLÁHA P.: *Seismická tomografie.*, NIS, Geotest, Praha, Brno, 1996, s. 1–50.
- BLÁHA P., MRLINA J., NEŠVARA J.: *Gravimetric methods in the exploration of slope deformation.*, EGRSE, Praha, 1998, 1, s. 21–24.
- BLÁHA P.: *Ověřená technologie, Rozvoj geotechnických a geofyzikálních metod pro získání 2D a 3D obrazu geologické stavby*, GEOTest a.s., 2021, 80 s, MS.
- BLÁHA P.: *Geofyzika pro podzemní stavitelství*, Stavební fakulta VŠB-TU Ostrava, Přírodovědecká fakulta UK Bratislava, Geotest, ISBN 948-11-04705-04, ISBN 978-80-248-4732-0, 2023, 357 s.
- DURAS R., GEBAUER J.: *21 7736 – D0 520 Březiněves-Satalice, doplňkový GTP, Výsledky geofyzikálních měření Část A9*, Geotest, Brno, 2023, 50 s., MS.
- GANERØD G.V., RØNNING J.S., DALSEGG E., ELVEBAKK H., HOLMØY K., NILSEN B., BRAATHEN A.: *Comparison of geophysical methods for sub-surface mapping of faults and fracture zones in a section of the Viggja road tunnel, Norway*, Bulletin of Engineering Geology and the Environment. Bull. Eng. Geol. Env., 2006, 65, p. 231–243, doi 10.1007/s10064-006-0041-6.
- HANÁK D.: *Karotážní měření v pěti průzkumných vrtech v trase plánovaného tunelu u Homole pro rychlostní komunikaci*, Aquatest, a.s., Praha, 33+94 s., 2019, MS.
- JEZNÝ M., KRÁSNÝ O.: *D35 Ostrov – Vysoké Mýto, Podrobný geotechnický průzkum – Tunel Homole*, PRAGOPROJEKT, a. s., Praha, 2019, 71 s., MS.
- KOMOŇ J., KULTAN V., KUBIŠ M., KAMINSKY A.: *Geofyzikálne merania v oblasti plánovaného tunela Soroška*, Koral, Spišská Nová Ves, 2019, MS.
- LEVÝ O., HAISLOVÁ R., FILIPSKÝ D., ŠTAINBRUCH J., GRINČ N., LINHARTOVÁ R.: *Geofyzikální práce pro popis geologické stavby potenciálních lokalit HÚ v ČR, Zpráva o výsledcích geofyzikálních prací v oblasti Čertovka*, Etapová zpráva k 31.3.2019, Surao, Inset, Geonika, Praha, 2019, MS. 28 s., 9 př., A.
- KOŘALKA S.: *Karotážní měření na lokalitě Bukov*, Aquatest, Praha, 2016, MS.
- TKADLEČEK O., FILIPSKÝ D., CHABR T.: *I/42 Brno, VMO Vinohrady – doplnění předběžného GTP, Příloha B – geofyzikální průzkum*, INSET, Praha, 2021, 16 s. + 8 p.
- VLČEK P., RUPP D., ZAPLETAL A., MATOUŠOVÁ V., GAZDOVÁ A., POKORNÁ J.: *Závěrečná zpráva o doplnění předběžného geotechnického průzkumu stavby „I/42 Brno – VMO Vinohrady“*, Část A – Závěrečná zpráva o doplnění předběžného geotechnického průzkumu, Geotest, Brno, 2021, 61 s., 20 př. MS.

Autor

¹ doc. RNDr. Pavel Bláha, DrSc., Praha 10, Švehlova 26, Česká republika, babel@email.cz