

GEOFYZIKÁLNÍ METODY – ŠAMANSTVÍ, NEBO UŽITEČNÝ NÁSTROJ PRO GEOTECHNICKÉ PROJEKTOVÁNÍ?

Ivan POUL

Projekce iGEO s.r.o.

Zbyněk FOJT

Projekce iGEO s.r.o., Ústav hydrogeologie, inženýrské geologie a užitá geofyziky, PřF UK v Praze

Juraj ŠTETIAR

Projekce iGEO s.r.o., Ústav geotechniky, FAST VUT v Brně

Geophysical methods - shamanism or a useful tool for the geotechnical design?

In the Czech Republic, geophysical methods are an often neglected methodology due to negligence on the part of engineers. The combination of direct methods (boreholes) with CPTu, DPH, and geophysics is the basic pillar of successful design in Western countries, especially for construction and surveys on so-called brownfields and in places of undermining (tunnels, metro, sewers, and parking lots), where the use of drilling exploration is not possible. This article is written to show cooperation between geophysical methods, CPTs, and boreholes for the exact geotechnical design.

Klíčová slova: Mělká refrakční seismika (MRS), Elektrická odporová tomografie (ERT), velkoobjemová krabicová smyková zkouška, hlubinné založení, kotvy, poddolované území, statická penetrace

ÚVOD

Geofyzikální metody se v geotechnické, hydrogeologické a prospekční praxi spolehlivě užívají dlouhé desítky let. Naproti tomu v českém stavebnictví existuje pouze několik málo příkladů jejich zdařilé aplikace ve stavebnictví. Nedostatek stavebních parcel však tlačí investory na geologicky náročnější terény, prudké svahy, brownfieldy nebo na místa nebezpečně ovlivněná historickou těžbou. Bodové informace získané za pomoci geologických (vrt) a geotechnických sond (statická, dynamická penetrace) nemusí tedy být dostatečné. Klíčovými informacemi se tak stávají 2D a 3D data. Právě zde se ukrývá obrovský potenciál geofyziky. Při studiu získaných dat je však třeba mít na paměti jejich víceznačnost. Odvážný interpretátor dokáže bez průzkumných sond, jak se v praxi často děje, navrhnout sebedivočejší závěry (a nesmysly). Tento nešťastný postup pak přirozeně vede k zbytečnému předimenzování základových konstrukcí, tolik neoblíbenému zdražování a velkou nedůvěrou projektantů v geofyzikální metody.

1. SEZNÁMENÍ SE S TYPICKÝMI METODAMI

Pro inženýrskogeologickou praxi se nejčastěji používají metody elektrická odporová tomografie, mělká refrakční seismika a případně georadar, seizmická reflexe a seizmická tomografie. Těmito metodami lze rychle získat značné množství dat dobré kvality s dostatečným hloubkových dosahem. Velkou výhodou je také jejich nedestruktivní charakter. V následujících odstavcích jsou jednotlivé metody představeny.

1.1 Elektrická odporová tomografie (ERT)

Metoda je řazena do skupiny stejnosměrných odporových metod podobně jako vertikální elektrické sondování (VES). ERT podává informace o horizontální a vertikální změně měrného odporu prostředí. Měření probíhá pomocí řídicí jednotky například ARES připojené k multielektrodovému kabelu, který je v pravidelných intervalech vodivě spojen se zemí elektrodami.

Metoda používá pro měření dvou párů elektrod – proudového a potenčního. Pomocí proudových elektrod se do země zavádí elektrický proud, který vyvolává potenciál měřený na elektrodách potenčních. Podle Ohmová zákona se pak vypočte hodnota zdánlivého měrného odporu. Získaná hodnota pro daný pár elektrod se uloží do paměti řídicí jednotky systému. Řídicí jednotka systému pak postupně přepíná mezi všemi možnými kombinacemi párů elektrod připojených k multielektrodovému kabelu za účelem dosažení detailního rozlišení na všech hloubkových a horizontálních úrovních. Získané hodnoty se pomocí tomografické inverze přepočítají na hodnoty měrných odporů horninového prostředí a vzniká tzv. odporový řez.

Metoda se velmi dobře hodí pro studium prostředí, kde s kontrastující vodivostí zemin a hornin. Jako příklad lze uvést kontakt pískovce a jílu, či saturovaná a nesaturovaná zóna v pískovce a potom samozřejmě dutiny, stará ražba, kanalizace aj. Hloubka užitečného signálu je daná délkou měřeného pásu.

1.2 Mělká refrakční seismika

Metoda využívá měření času šíření lomené vlny horninovým prostředím, ze kterého počítá rychlost šíření seismické vlny. Příchod lomené vlny je v konkrétní vzdálenosti od zdroje seismického signálu zaznamenán jako čas prvního nasazení a vyneseno jako tzv. hodochrona. Posouváním pozice zdroje seismického signálu vzhledem ke snímačům je vytvořen soubor závislostí času šíření na vzdálenosti od zdroje.

Měření probíhá pomocí multikanálové řídicí jednotky, např. aparaturou Geode, která pro snímání seismického signálu používá soustavu geofonů rozmístěných v definovaných rozestupech. Jako zdroj seismického signálu bývá zpravidla využito kladivo, kterým se udeří do kovové či plastové desky. Deska i kladivo jsou vodivě napojeny k řídicí jednotce a při úderu dojde k sepnutí obvodu, čímž je definován čas, vzhledem ke kterému jsou měřeny časy příchodu P-vln na jednotlivé geofony. Za účelem zvýšení přesnosti jsou údery sumovány. Pro registraci seismického signálu z větších hloubek bývají využity tzv. přístřely, kdy je zdroj signálu usazen mimo vlastní geofonové roztažení.

Ze záznamů hodochron je možné interpretovat seismické řezy, tzv. rychlostní řezy, které ukazují na distribuci seismických rychlostí v podloží. Rychlost šíření signálu je přímo úměrná pevnosti hornin. V krystaliniku mohou rychlosti dosahovat až 6 000 m/s.

Výsledkem zpracování jsou 2D rychlostní řezy, udávající změny rozložení rychlosti šíření seismických vln s hloubkou podél profilu. Metoda velmi dobře umožňuje sledovat reliéf skalního podloží, rozlišit homogenitu a celistvost podložních hornin na základě jejich pevnosti nebo lokalizovat tektonické linie (míra podrcení, změna litologie).

1.2 Optimalizace geofyzikálních dat

Geofyzikální metody jsou zpravidla víceznačné, měrný odpor hornin i seismická rychlost jsou závislé na mnoha geologických a fyzikálních parametrech, například vlhkosti, minerálním složení, porositě, stupni zvětrání, měrné hmotnosti a zrnitostním složení [3]. Výsledky ovlivňuje také reliéf, který ovšem dokáží moderní výpočetní programy velmi dobře do výpočtu implementovat. Interval hodnot pro různá geologická prostředí se často překrývají, což komplikuje přímou klasifikaci. Pro úspěšnou interpretaci je tedy klíčové kombinovat získaná data s dalšími metodami, především s hmotnými vzorky.

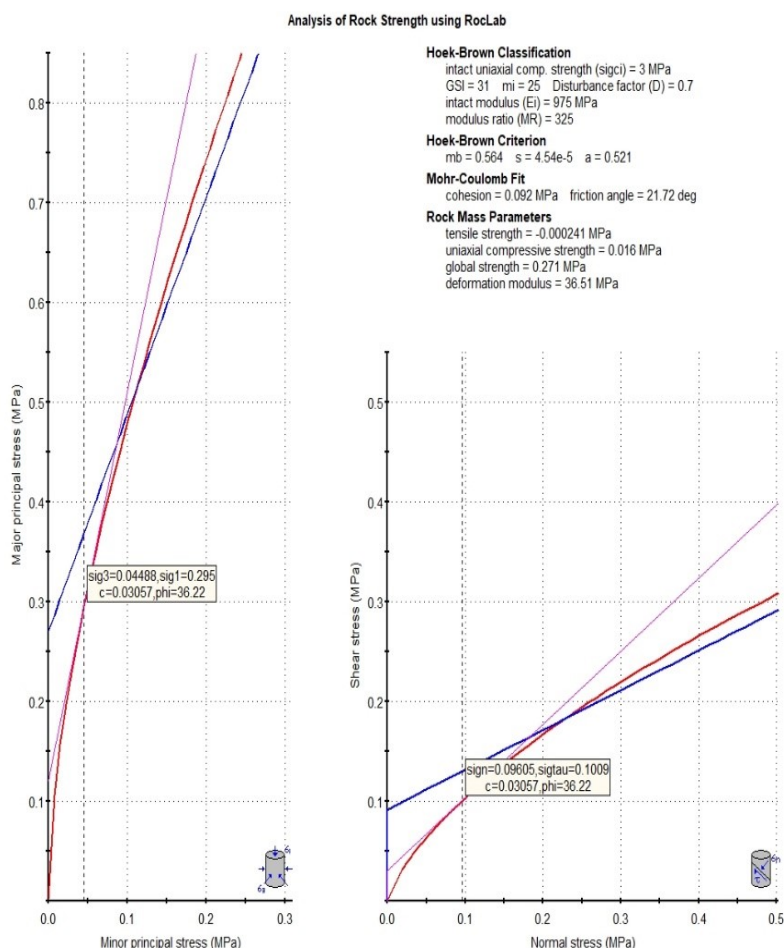
Přesnost získaných dat závisí na roztažení elektrod potažmo geofonů, hloubkový dosah měření je regulován celkovou délkou profilu. Metody ERT a MRS umožňují průzkum geologických poměrů do hloubky vyšších desítek metrů.

2. VYUŽITÍ GEOFYZIKÁLNÍHO PRŮZKUMU PRO PROJEKTOVÁNÍ ZAJIŠTĚNÍ STAVEBNÍ JÁMY BYTOVÉHO DOMU V BRNĚ NA ULICI LIBUŠINO ÚDOLÍ

IG průzkum byl zaměřen převážně na zjištění kvality skalního podloží a stability svahu. Na území se aktuálně nacházejí obytné objekty, které budou strženy. Geologická stavba je jednoduchá, komplikací jsou ovšem nízká pevnost hornin a porušení horniny četnými puklinami, statika stavby je mírně složitá. Na základě uvedeného se jedná o **III. geotechnickou kategorii**. (ČSN EN 1997-1 kap. 2). Dvůr a prostory, kde probíhal průzkum, jsou obtížně dostupné pro těžkou techniku. Z uvedeného důvodu byly realizovány vrty malou pásovou vrtnou soupravou s malým dosahem. Jako podpora byl proveden geofyzikální průzkum mělkou refrakční seismikou, elektrickou odporovou tomografií a dipólovým elektromagnetickým profilováním (bylo provedeno měření na 2 profilech). Na základě dostupných podkladů byly autorem průzkumu provedeny interpretace geofyzikálních dat a sestaveny inženýrskogeologické řezy^[4].

V softwaru *RocLab 1.0* byl sestaven model skalního svahu (obr. 1) podle metodiky Hoek-Brown^[1+2]. Na základě zkoušek v prostém tlaku, měření Schmidovým kladívkem a metodiky Hoek-Brown pro rozpukaný masiv (rozpadající se na jemný štěr) a jeho těžbu byla v krabicovém smykovém přístroji stanovena vrcholová smyková ($\varphi_{ef} = 28^\circ$ a $c_{ef} = 84$ kPa). Jednalo se o pevnost neodpovídající realitě a syntézou všech dat pro model Mohr-Coulomb byly použity následující vlastnosti $\varphi_{ef} = 36^\circ$ a $c_{ef} = 30$ kPa.

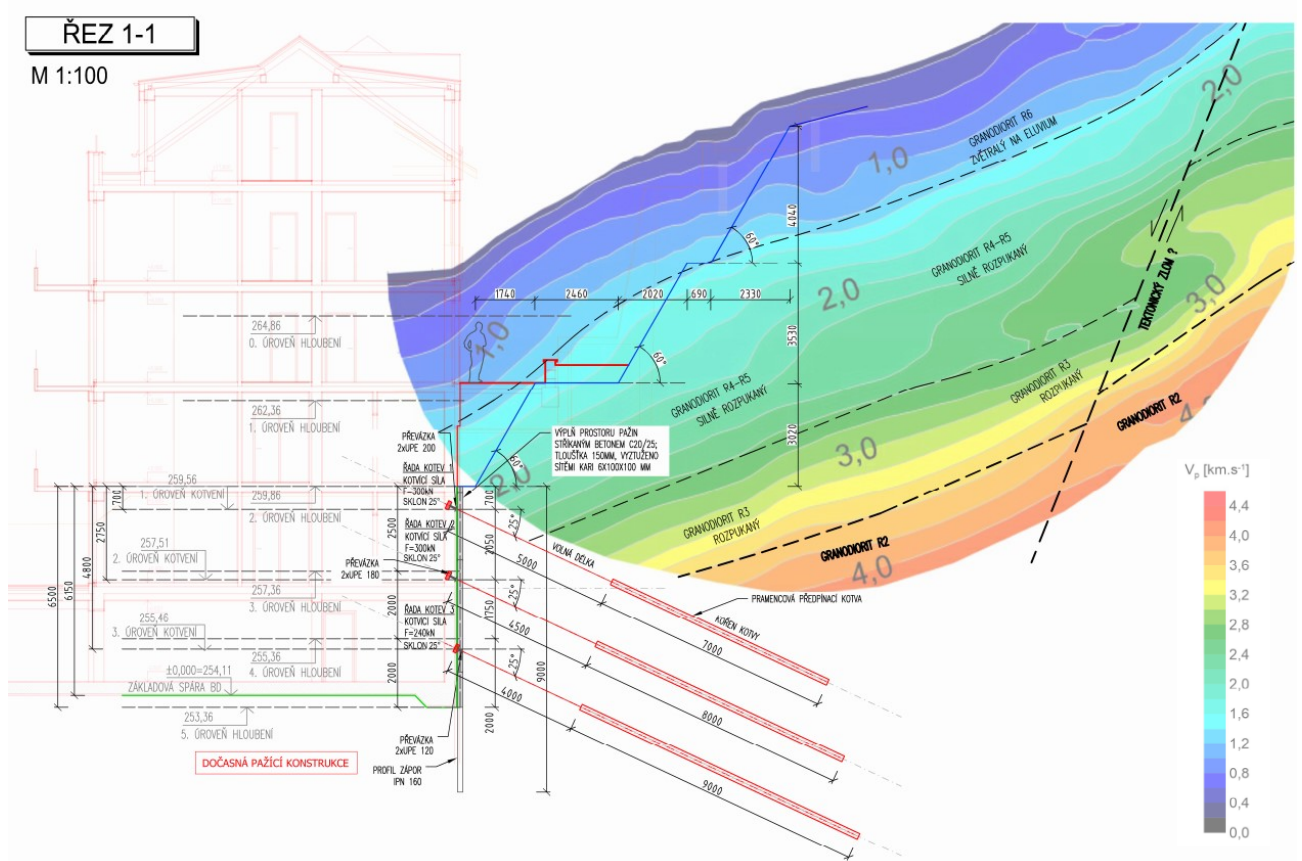
Mělká refrakční seismika byla měřena 24-kanálovou aparaturou Geode (Geometrics, Inc.). Pro registrování přichozích P-vln byly použity geofony s vlastní frekvencí 10 Hz. Jako zdroj seismické energie bylo použito seismické kladivo o hmotnosti 8 kg a vertikální úder do kovové destičky. Spínání elektrického obvodu o kovovou destičku sloužilo zároveň jako signál (tzv. trigger) pro spuštění seismického záznamu. Za účelem zlepšení poměru signál/šum (SNR, signal-to-noise ratio) byly úderu na jednotlivých bodech sumovány. Krok geofonů byl 4 m na profilech P1 a P2. Změřená data byla zpracována standardní metodikou – odečtením časů příchodu P-vln a následnou seismickou tomografií z povrchu. Pro vypočet tomografie byl použit programový balík Rayfract kanadské



Obr. 1.: Mohrova obálka smykové pevnosti získaná ze softwaru RocLab 1.0^[1]

programový balík Rayfract kanadské

firmy Intelligent-Resources, inc. Výhodou tohoto software je výpočet tomografie s přihlédnutím k Fresnelovým zónám[7], vypočtené rychlostní řezy tak lepe odpovídají změřeným záznamům. Výsledkem zpracování jsou 2D rychlostní řezy, udávající změny rozložení rychlosti šíření seismických vln s hloubkou podél profilu.



Obr. 2.: Schématický návrh kotveného mikrozáporového pažení stavební jámy v řezu 1-1 (s vloženou interpretací MRS)^[5]



Obr. 3.: Velkoformátová smyková zkouška v laboratořích GEOTest a.s.

Elektrická odporová tomografie, dipólové elektromagnetické profilování byly měřeny aparaturou ARES II (GF Instruments, Brno) a aktivními multielektrodovými kabelovými sekcemi. Měřeno bylo na stejných profilech (v identické stopě) jako u MRS, délka profilů se od seismických mírně odlišuje v důsledku metodických požadavků na počet připojených elektrod a s ohledem na prostorové možnosti. Pro metodu ERT byl zvolen rozestup elektrod 1 m na profilech P1 a P2, který zajišťuje detailní měření s dostatečným rozlišením i citlivostí.

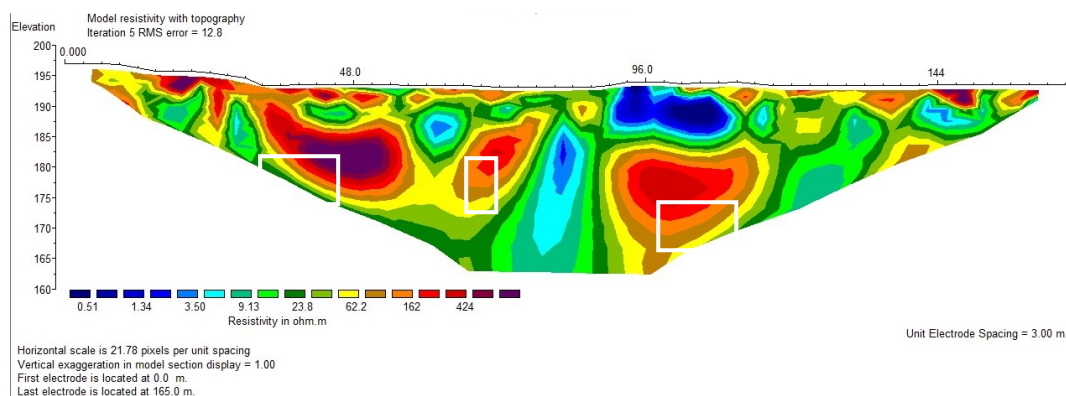
Na základě výsledků IG průzkumu byl proveden statickým výpočtem návrh kotveného mikrozáporového pažení stavební jámy.

Vlastnosti a do výpočtového modelu přímo importované úrovně rozhraní vychází z výsledků geofyzikálního průzkumu (obr. 2), který potvrdil úvahu, že kvalita horninového granodioritového masivu se s hloubkou výrazně zlepšuje. Mechanické vlastnosti prostředí budou také zlepšeny

účinkem samotného kotvení (předpětí zvýší normálové napětí), bylo uvažováno i s jevem dilatance, vytvořením schodovité (zazubené) smykové plochy (obr. 3, reference 5). Pro vyhotovení realizační dokumentace bylo doporučeno ověření výše uvedené úvahy pomocí velkoformátové smykové zkoušky. Tato zkouška (obr. 3) byla později provedena a výsledky (vrcholový úhel vnitřního tření $\varphi_p = 39,53^\circ$ a počáteční smyková pevnost $c_{0p} = 213$ kPa) umožnili navíc i pozdější ekonomickou optimalizaci návrhu, kdy bylo možné snížit množství kotev na 1/3 původního počtu.

3. HOSTOMICE U BÍLINY – PROJEKTOVÁNÍ HALY NA PODDOLOVANÉM ÚZEMÍ

V roky nevyužívaném areálu bývalé sklárny Kavalier, která se nacházela na záplavovém a poddolovaném území, byla plánována stavba skladovací haly o rozměru 96 x 108 m. Cílem geotechnického a geofyzikálního průzkumu v krátkém čase byla tedy vedle zjištění geologické situace na lokalitě také detekce diskontinuit a volných prostor v podloží plánované konstrukce. Za tímto účelem bylo navrženo měření kombinující mikrogravimetrii a elektrickou odporovou tomografii v síti profilů. Na lokalitě bylo realizováno celkem 8 geofyzikálních profilů uspořádaných do sítě, 14 statických penetrací, 6 bagrovaných sond a 200 mikrogravimetrických měření. ERT profily byly realizovány metodou Wenner-Schumberger HD s krokem 3 m s maximálním hloubkovým dosahem 33 m.

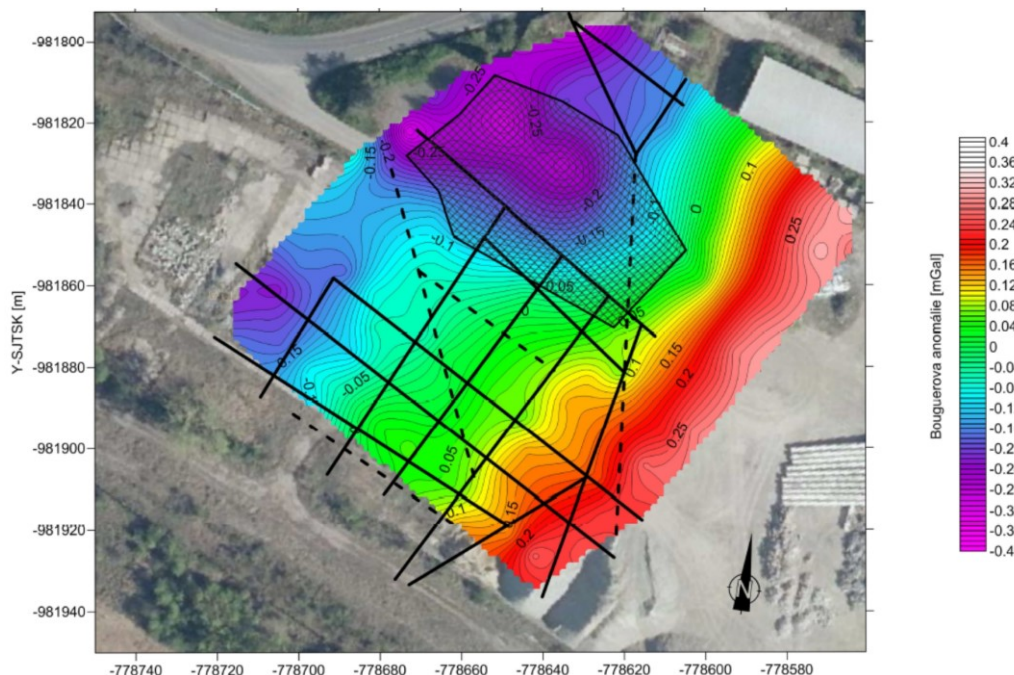


Obrázek 4: Interpretovaná poloha podzemních chodeb (bílé rámečky) na profilu P3. Vysoké hodnoty odporu při povrchu odpovídají zbytkům budov patřícím ke komplexu Kavalier.

Na prezentovaném odporovém řezu, viz obrázek 4, jsou patrné zóny s nápadně zvýšeným odporem (červeně až fialově) odpovídající prázdnému prostoru či kypré navážce. Tento výsledek podporují také Bouguerovy anomálie (obr. 5) odpovídající sníženému lokálnímu gravitačnímu zrychlení, tzn. objemové hmotnosti.

Vzhledem k omezenému času na realizaci průzkumných prací byly dále využity sondy statické penetrace, které prozkoumaly místa anomálií až na rostlý terén do hloubky až 25 m. Z bagrovaných sond byly odebírány neporušené vzorky pro průkazné laboratorní analýzy. Bylo realizováno větší množství statických penetračních sond (CPT). Ač to norma ČSN EN 1997-2 nevyžaduje, pomocí výsledků z laboratoře byly provedeny korekce křivek a výsledků CPT. Čímž byly získány reálné mechanické vlastnosti zemin na lokalitě. Interpretovat složitou geologickou stavbu protkanou spleť důlních chodeb a závalů se podařilo díky syntéze nepřímých metod s omezeným využitím malého počtu archivních sond.

Založení jsme vyprojektovali hlubinné. Významným výsledkem průzkumu bylo stanovení bezpečné úrovně, kde je možné opřít piloty. Pro typickou pilotu proběhl výpočet negativního plášťového tření od navážek, výsypek a zavalených chodeb. Použité výsledky bez zbytečného předimenzování byly získány díky podobné znalosti smykových vlastností zemin získaných interpretacemi statických penetrací mocností navážek. Při znalosti přitěžujících sil bylo již dimenzování pilot pomocí Masopustovy metody mezní zatěžovací křivky standartní záležitostí.



Obrázek 5: Gravimetrický záznam posuzované lokality – Bouguerovy anomálie – výrazné minimum (vyšrafované) zobrazuje propad, který byl zasypán kyprým nehomogenním materiálem. Přechod mezi zelenou a modrou způsobuje tektonický zlom, za který chodby nebyly raženy. Druhá fialová anomálie může být patrně bývalá úpadnice.

4. ZÁVĚR

Předložený text a zejména grafická a ústní prezentace poukazují na účelné využití nepřímých metod zaměřené zejména na gravimetrii, odporovou tomografii a statické penetrační sondy. Samotné geofyzikální metody se mohou zdát jako lehce slepé, ale kombinace penetračními sondami (ulehlost, konzistence, rozhraní) s vrty dokáží v rukou schopného interpretátora divy.

5. LITERATURA

- [1] HOEK, E. and BROWN, E.T. *Practical estimates of rock mass strength*. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Vol. 34, No. 8, pp. 1165-1186, 1995.
- [2] HOEK, E. *Reliability of Hoek-Brown estimates of rock mass properties and their impact on design*. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Vol. 35, No. 1, pp. 63- 68, 1998.
- [3] LOKE, M. H. (1997): *Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies. A practical guide to 2-D and 3-D surveys*. — Geotomo software.
- [4] POUL, I. *Inženýrskogeologický průzkum pro založení BD v Libušině údolí*. Brno, 2022. Projekce iGEO s. r. o.
- [5] POUL, I. ŠTETIAR J. *PD zajištění stavební jámy – Rezidence lesní vyhlídka, Libušino údolí, Brno*. Brno, 2022. Projekce iGEO s. r. o.
- [6] POUL, I. *Geotechnický a geofyzikální průzkum na akci „Panattoni Park Teplice South – Hostomice“*, Brno 2021. Projekce iGEO s.r.o.
- [7] SCHUSTER G.T. and Quintus-Bosz A. *Wavepath eikonal travelttime inversion; theory*. - Geophysics, 1993, 8, 9, 1314-1323.

RNDr. Mgr. Ivan POUL, Ph.D., GIPENZ
 Pracoviště: Projekce iGEO s.r.o., Nám 28. října 1899/11, 602 00 Brno
 E-mail adresa: ivan.poul@igeo.cz, Mobil: +420 608 022 443