

O čem je kniha “Geofyzika pro podzemní stavitelství”?

What is the book Geophysics for Underground Construction about?

Pavel Bláha

důchodce, Praha 10, Švehlova 26, babel@email.cz

Abstrakt: Kniha popisuje možnosti použití geofyzikálních metod pro průzkum podzemních staveb. Text i příklady v knize ukazují, že je možné použít širokou škálu geofyzikálních metod od běžných (seismiky, odporové metody, karotážní měření) až po metody méně obvyklé (magnetotelurika, letecká magnetika). Samostatné kapitoly jsou věnovány rozboru fyzikálních vlastností a komplexní interpretaci naměřených hodnot. Kniha ukazuje i důležitost geologické a geotechnické interpretace geofyzikálních měření pomocí společné interpretace inženýrských geologů, geotechniků a geofyziků.

Abstract: The book describes the application of geophysical methods to the investigation and construction of underground engineering works. Both the text and the case studies demonstrate that a wide range of geophysical techniques can be employed, from conventional methods (such as seismic surveys, electrical resistivity methods, and borehole logging) to less commonly used techniques (including magnetotellurics and airborne magnetic surveys). Separate chapters are devoted to the analysis of the physical properties of rocks and soils and to the integrated interpretation of geophysical data. The book also emphasizes the importance of combining geological, geotechnical, and geophysical information through the joint interpretation of measurements by engineering geologists, geotechnical engineers, and geophysicists.

Klíčová slova: geofyzikální metody, podzemní stavitelství, komplexní interpretace, geologické zhodnocení

Key words: geophysical methods; underground engineering; integrated interpretation; geological assessment

1. Úvod

Kniha vznikla jako odezva na rozvíjející se používání geofyzikálních metod jak při průzkumu z povrchu, tak i při měření v podzemí. Zásadní úkol jejich nasazení je co nejdokonalejší poznání geologické stavby horninového masivu. Týká se to nejen stádia projektování, ale i v období bezprostředně před začátkem výstavby velkých podzemních inženýrských děl. Další rozsáhlé nasazení geofyziky je i v období stavby podzemního díla, zejména při stavbě tunelů. V tomto případě je úkolem geofyziky doplnit poznání geologické stavby před čelbou tunelu.



Kniha je rozčleněna do následujících deseti kapitol:

1. Úvod
2. Podzemní stavitelství
3. Fyzikální vlastnosti
4. Hornická geofyzika
5. Povrchový geofyzikální průzkum
6. Geofyzikální zkoumání geologické stavby v podzemí
7. Geofyzikální zkoumání napěťo-deformačního stavu horninového masivu
8. Vztahy fyzikálních a geotechnických vlastností horninového masivu
9. Geofyzikální monitoring
10. Závěr

Kniha byla vydána v květnu 2024 v nákladu 500 výtisků.

2. O čem je kniha „Geofyzika pro podzemní stavitelství“

Geofyzika a podzemní stavitelství, nebo aplikovaná geofyzika, tunely a úložiště? Ať to беру z kterékoli stránky, tak jsou to jevy, nebo problematika, nebo fenomén, nebo úkazy, nebo záhady anebo koníček (můj případ) a je to velmi zajímavé téma. V knize jsem se pokusil popsat své zkušenosti za období delší než šedesát let. Překládám nejen své zkušenosti, ale snažil jsem se využít i poznatků, které je možné získat studiem literatury, ať vědeckých článků, nebo „jen“ čtením různých závěrečných zpráv, ať již inženýrskogeologických, geotechnických nebo geofyzikálních. Kniha

je výsledkem práce a zkušeností geofyzika, který byl celý svůj odborný život neustále v kontaktu s vynikajícími českými i zahraničními geology a geofyziky.

Popisovaná publikace je určena zájemcům o problematiku použití geofyzikálních metod při průzkumu do větších hloubek nebo průzkumu v podzemí při stavbě tunelů nebo velkých kaveren. Monografie může dobře sloužit ke vzájemnému pochopení a dorozumění mezi geofyziky, geotechniky, inženýrskými geology, stavebními inženýry a případně i dalšími specialisty, kteří se zajímají o tento obor. Další skupinou, kterou jsem chtěl oslovit, jsou pracovníci organizací, kteří z titulu své funkce se touto problematikou musí zabývat, nebo je pro ně tato problematika zajímavá jako jedna ze stránek soužití člověka s přírodou. Stejně tak může kniha posloužit jako učební text pro studium na vysokých školách. V úvodu je popsán současný stav problematiky a je konstatováno, že geofyzikální metody při průzkumu pro podzemní stavitelství zaujímají čím dál významnější místo. Je dokumentován i stav v zahraničí. Druhá kapitola je spíše věnována geofyzikům než specialistům z jiných oborů. Uvádím v ní etapy průzkumu pro podzemní stavby a postavení geofyziky v této problematice. V druhé části této kapitoly je ukázáno, jaký je účel, přínos, a jaké výhody přináší aplikace geofyzikálních metod v tomto oboru a jaké jsou možnosti jednotlivých geofyzikálních metod.

Následující kapitola je věnována rozporu fyzikálních vlastností hornin a horninového masivu. Pozornost je věnována zejména těm vlastnostem, které mají významný vliv na geofyzikální měření a výběr geofyzikálních metod. Na konci kapitoly následuje doporučení, jak lze získat co nejlepší představu o fyzikálních vlastnostech hornin a horninového masivu na zájmové lokalitě. Čtvrtá kapitola se věnuje krátkému popisu „hornické geofyziky“, kterou lze pokládat za předchůdkyni oboru, kterému je věnována tato publikace.

Pátá kapitola je první ze zásadních kapitol knihy. Je věnována geofyzikálnímu průzkumu horninového masivu, ve kterém má být podzemní dílo vybudováno, a to průzkumem ze zemského povrchu. Největší pozornost je věnována třem nejdůležitějším metodám, seismickým a geoelektrickým. Netradičně se začíná karotáží, která je v knize de facto považována za přímou metodu průzkumu. V jednotlivých podkapitolách jsou popsány jak klasické metody, tak i metody využívající možnosti, které poskytuje poslední vývoj v přístrojové i zpracovatelské technice. To platí i o přechodu od průzkumu bodového, přes průzkum v rovině (2D) až k průzkumu v prostoru (3D). V závěru kapitoly jsou ukázky možností, které poskytují i „netradiční“ geofyzikální metody. Kapitola je uzavřena rozбором, který popisuje výhody komplexní interpretace geofyzikálních měření.

Šestá kapitola je věnována průzkumu horninového masivu z podzemí, ať již z průzkumných nebo z technických děl. Postup rozboru možností jednotlivých geofyzikálních metod je prakticky totožný, jako při popisu povrchového průzkumu. Zvláštní pozornost je věnována metodě, která podává informace o geologické stavbě horninového masivu a jeho vlastnostem před čelbou raženého podzemního díla. Ukazují se i možnosti geofyzikálních metod při dělení horninového masivu do kvazihomogenních celků a tím získání výhod při možnosti vhodně rozmístit geotechnické zkoušky a testy, případně určit jejich prostorovou platnost.

Sedmá kapitola se věnuje zkoumání horninového masivu těsně za stěnou báňského díla. Prezentuje možnosti geofyzikálních metod při stanovení hranic a určení vlastností jednotlivých zón, které vznikají po vyrazení podzemního díla. V této kapitole se popisuje, jak se mění vhodnost jednotlivých geofyzikálních metod při řešení této problematiky, kdy nabírají největší váhu seismické metody na vysokých frekvencích (někdy nazývané akustické nebo ultrazvukové) a metody radarové. Dále jsou ukázány i možnosti, jak posoudit změny napětí v horninovém masivu, i jak určit místa uvolnění napětí nebo naopak místa jeho koncentrace.

Osmá kapitola je věnována vztahům a vazbám fyzikálních a geomechanických vlastností a možnosti jejich využití při popisu charakteru horninového masivu. Jsou uvedeny příklady, jak je možné z jedné vlastnosti odvodit vlastnost jinou, a jak toho využít k získání znalostí k lepšímu popisu zájmového horninového masivu. Devátá kapitola je věnována geofyzikálnímu monitoringu. Kapitola navrhuje rozdělení takovýchto měření do dvou kategorií, a to do kategorie opakovaných měření, tj. měření s delším časovým odstupem a do spojitého monitoringu, kdy se měření opakují v trvale osazeném měřicím systému s přesně definovaným časovým odstupem (time lapse).

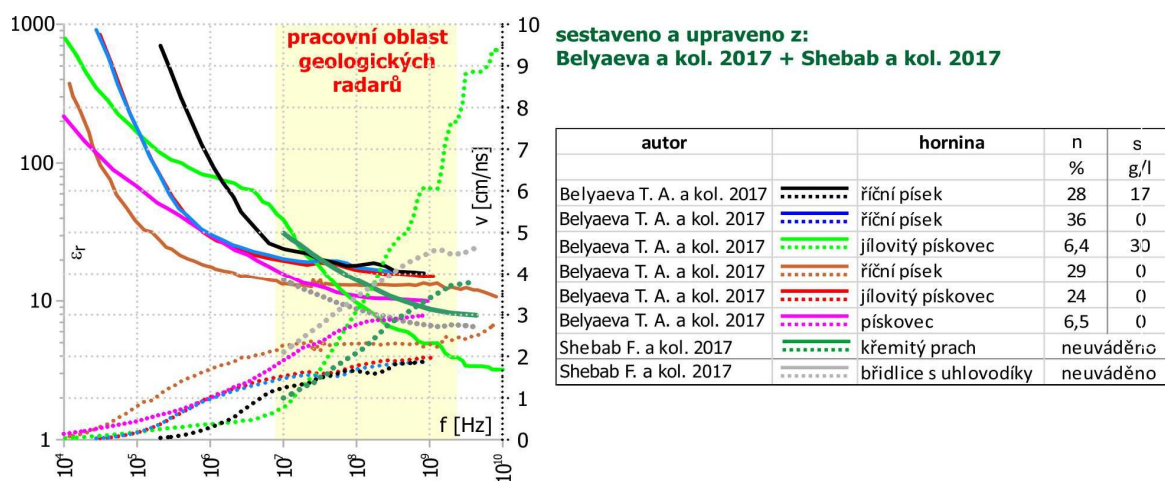
Knihy je ukončena závěrem, který hodnotí možnosti jednotlivých geofyzikálních metod, ale i geofyziky jako celku, při průzkumu a výzkumu horninového masivu při podzemním stavitelství. Je zdůrazňováno, jak důležitý je společný přístup odborníků všech spřízněných oborů při inženýrskogeologické a geotechnické interpretaci geofyzikálního měření. Právě v této skutečnosti byla síla tohoto oboru u nás.

V celé knize jsem se snažil vše ukazovat na konkrétních případech. Kniha tak obsahuje více než tři sta příkladů průzkumu z našich i zahraničních lokalit. Nestanovil jsem si za úkol věnovat se teoretickým rozborům, poučkám a normám, ale vše jsem se snažil dokumentovat na konkrétních příkladech.

3. Ukázka grafické stránky knihy

Celou problematiku použití geofyzikálních metod pro podzemní stavitelství jsem se snažil dokumentovat nejen v textových popisech a rozborech, ale i graficky. Kniha obsahuje 357 obrázků, na kterých jsou ukazovány výsledky různých

geofyzikálního měření, ale zobrazuje i jejich geologickou a geotechnickou interpretaci, a to jak z domova, tak i ze zahraničí. Zde bude ukázáno pět příkladů ze zásadních kapitol knihy. Účelem je ukázat styl obrázků a jejich vypovídací schopnost. K danému příkladu bude vždy doplněn i jeho krátký popis. Z kapitoly o fyzikálních vlastnostech, je to ukázka, jak se mění permitivita a rychlost elektromagnetických vln s jejich frekvencí (obr. 1). Je možné sledovat, že rychlost elektromagnetických vln při radarových měřeních není konstanta, ale že se mění, a v některých případech dost významně, v jednom případě i v násobcích. Ukazuje se, že na to, jak se rychlosti mění, nemá vliv složení horniny a její geneze. V obrázku je to dobře vidět na příkladu jílovitých pískovců. V jednom případě se rychlost v pásmu radarových měření mění cca pětkrát, v druhém případě je změna cca 30 %. Někteří autoři (Belyaeva a kol. 2017 a Shebab a kol. 2017) uvádí, že změny rychlostí mohou být způsobeny polarizací na rozhraní voda-vzduch. Při snížení saturace roztoku na 40–80 % z plné saturace se reálná permitivita v širokém frekvenčním pásmu zvyšuje. Frekvenční pásmo, ve kterém se projevuje vliv tohoto fenoménu na permitivitu, závisí na velikosti částic a koncentraci roztoku a jeho složení. Tento jev však neprobíhá vždy, důvodem může být snížení volnosti orientace vázaných molekul vody v hornině.

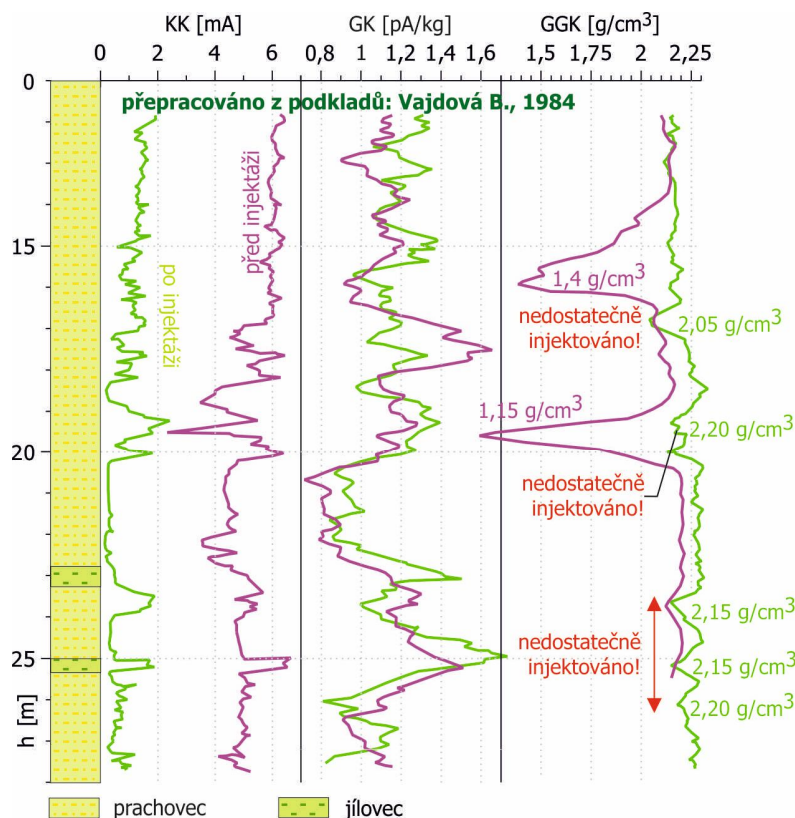


Obr. 1 Změny permitivity a emg. rychlosti na frekvenci

Fig. 1. Changes in permittivity and electromagnetic wave velocity with frequency

I některé starší aplikace karotážních měření ukazují, jak lze některé fyzikální principy používat využívat v širokém časovém rozpětí. Následující ukázka je z karotážních měření, která byla aplikována v roce 2005. Karotážními metodami je možné kontrolovat i kvalitu inžektážních prací, respektive prací jejichž úkolem bylo zlepšit vlastnosti horninového masivu v zájmovém území. Ukázka je z konsolidace flyšového masivu pod TV vysílačem na Lysé hoře (obr. 2). Otevřené trhliny v pískovcích vzniklé ploužením byly pro stavbu televizního vysílače nebezpečné, proto byly zality cementovou směsí s následnou inžektáží. Kontrola provedených inžektážních prací byla svěřena karotážním měřením. Ke kontrole bylo použito měření GK, GGK a metody klouzavých kontaktů (KK) a to před a po inžektáži. Na křivkách GK je zcela jednoznačně patrné, že nepřináší žádný jednoznačný průkazný důkaz o vlivu cementace na horninový masiv v okolí vrtu. Z měření GGK bylo možné vyčíslit vliv inžektáže na zlepšení fyzikálních vlastností hornin, konkrétně objemové hmotnosti (Vajdová a kol. 1984). I když tyto práce požadují určité předpoklady pro odhady změn fyzikálních vlastností, mohou dát inženýrskému geologovi a geotechnikovi kvantitativní odhad změn, které v horninovém masivu nastaly po fortifikační inžektáži. Výrazný rozdíl je patrný nejen na křivkách "hustotní" karotáže, ale i na křivkách klouzajících kontaktů (Vajdová a kol. 1984). Po inžektáži došlo ke snížení anomálií "hustotní" karotáže nebo respektive k jejich úplnému potlačení. V obrázku jsou u jednotlivých anomálií připsány odhadované hodnoty zvýšení objemové hmotnosti z GGK. Je třeba si uvědomit, že výrazné nárůsty objemové hmotnosti, i když jsou vedeny v absolutních jednotkách, nemusejí být zcela správné. Zejména určování objemové hmotnosti ve významných anomálních zónách (například v 19 m) nedává zcela přesné hodnoty. Zvýšení objemové hmotnosti zjištěné v jednotlivých trhlínách dosahuje hodnoty dokonce přes 1,0 gcm⁻³. I když je tato hodnota orientační, je možné zcela jednoznačně prokázat, že došlo k výraznému zlepšení mechanických vlastností horninového masivu. V místech, kde se zvýšila objemová hmotnost, došlo k obrácení anomálie u křivek klouzavých kontaktů. V místech, kde byly zaznamenány zvýšené hodnoty proudu před fortifikační inžektáží, došlo po zainjektování k jeho snížení (viz anomálie v 19 m). To je způsobeno tím, že dřívější vodivá jílovitá výplň trhlín byla nahrazena výplní nevodivou – cementovou. Dalším rozbohem karotážních křivek je možné ukázat místa, kde inžektováním nebylo dosaženo prakticky žádného zlepšení, tj.

nedošlo k vniknutí injektážní směsi do trhlin. To je vysvětlitelné tím, že trhliny byly zcela zaplněny jílovitou výplní a provozní tlak injektáže byl malý na to, aby původní jílovitá výplň byla z trhlin vytlačena. Tento předpoklad je možné potvrdit stejnými anomáliemi proudu KK před a po injektáži. Ukázkou jsou anomálie ve 23,5 metrech a 25 metrech. Je samozřejmé, že ve skutečnosti mezi oběma typy trhlin mohou existovat přechody a navíc, že existují trhliny, které jsou vyplněny pískovcovou drtí. To všechno komplikuje jednoznačnost interpretace, ale i tak karotážní měření dalo podklady k tomu, že bylo možné prohlásit, že mechanické vlastnosti horninového masívu v podzákladí televizního vysílače byly po injektáži výrazně zlepšeny a byly vyhovující pro stavbu TV vysílače.

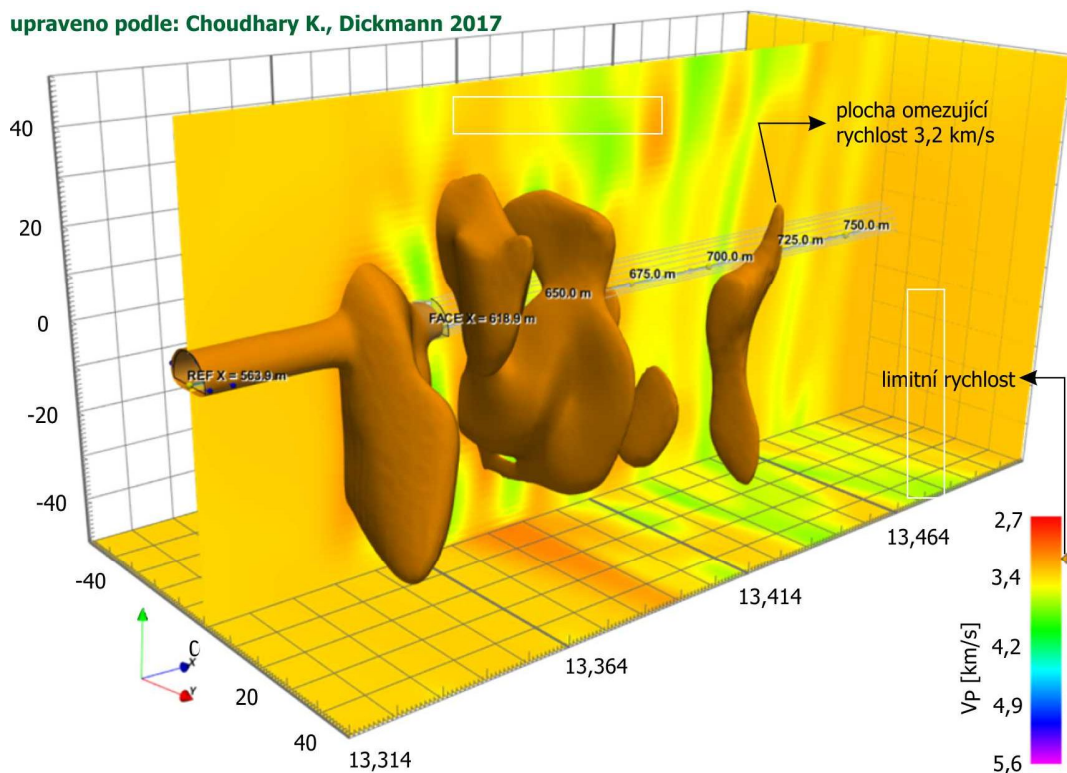


Obr. 2 Kontrolní karotážní měření na Lysé hoře

Fig. 2. Control borehole logging measurements at Lysá hora

V posledních letech se stále více při ražbě tunelů začíná používat metoda „Tunelová seizmická predikce“ (Tunnel Seismic Prediction - TSP). Metoda je založena na použití principu reflexní seizmiky během ražby tunelu. TSP dokáže poskytnout předpověď o geologické stavbě horninového masívu na vzdálenost sto metrů před čelbou tunelu, v pevných horninách až do 150 metrů. Kromě toho tato metoda poskytuje predikci o významných změnách v horninovém masívu, a to jak před čelbou tunelu, tak i kolem jeho osy. Výsledky hodnocení poskytují 2D nebo 3D grafy předpovídající litologické změny, porušení horninového masívu, jeho oslabené zóny, změny pevnosti hornin, krasové jevy, intenzivně zvodnělé části masívu a případně i další geologické nehomogenity. Metoda se začala používat v devadesátých letech a jedním z jejích propagátorů začala být od roku 1994 švýcarská forma Amberg (The Pioneer TSP 202). Její vývoj zatím končí typem „TSP Impakt“, který již nepotřebuje používání trhavin. Výsledkem měření je určení rychlostí podélných i příčných vln okolo tubusu tunelu včetně prostoru, kterým bude tunel následně procházet. Z rychlostí seizmických vln se pak odvozují potřebné moduly, Poissonovo číslo a prostory oslabených míst horninového masívu. Zpracovatelský program též umožňuje sestavit 3D model rozložení rychlosti podélné i příčné vlny. 3D rozložení rychlosti P-vlny na obrázku 3. Na obrázku je vyznačena již vyražená tunelová trouba a její pokračování dále do horninového masívu a celá proměřená oblast. Máme-li definovanou rychlost, která odpovídá porušeným horninám, pak je možné tyto oblasti v okolí tubusu tunely vyznačit. Přesnou orientaci hranic oslabených zón s libovolně zvolenou rychlostí (v tomto případě 3,2 km/s) lze zkoumat pomocí 3D prohlížeče (obr. 3). Kromě hodnot rychlostí byly na lokalitě určeny i hodnoty objemové hmotnosti, které byly vypočteny empirickým vzorcem s použitím hodnot VP a VS. Odvozené hodnoty objemové hmotnosti pro tento případ leží mezi 2,20 a 2,32 gcm⁻³ (Choudhary a Dickmann 2017). Tyto hodnoty

upraveno podle: Choudhary K., Dickmann 2017



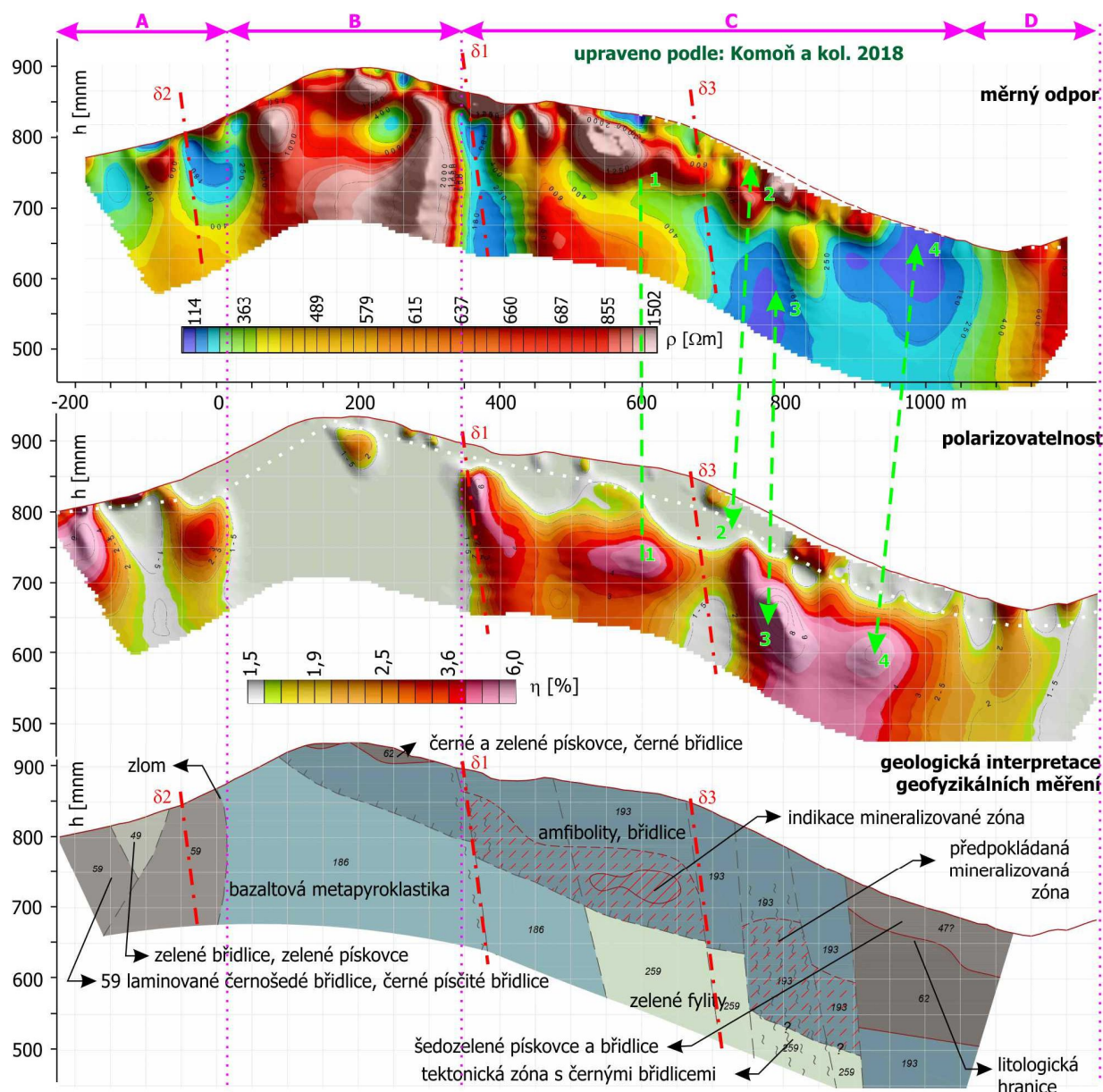
Obr. 3 Vymezení oblastí s nízkými rychlostmi podélných vln
Fig. 3. Delineation of zones with low P-wave velocities

představují průměrnou objemovou hmotnost v daném horninovém masivu v jeho přirozeném stavu a neměly by být brány jako absolutní.

Další ukázka je z hlubokého geologického průzkumu do velkých hloubek (cca 500 m) vedeného kombinací odporové tomografie a tomografie vyzvané polarizace. U té byl jako parametr vybrán koeficient polarizace. Ukázka je z měření na slovenské lokalitě Dobšiná. Vlastní průzkum těmito metodami nesloužil pro žádnou podzemní stavbu, ale jednalo se o průzkum ložiskový, pro vyhledávání nikl-kobaltových rud. Přesto lze na jeho výsledcích ukázat možnosti, které poskytuje souběžné měření měrného odporu a polarizovatelnosti, a jak mohou být využity i pro průzkumy v podzemním stavitelství. Pokud bude v horninovém masivu poloha nebo blok, který bude mít zvýšený obsah minerálů s elektronovou vodivostí, lze vždy očekávat dobré možnosti v rozeznávání a prostorovém omezení takovýchto typů hornin. Týká se to zejména hornin s vyšším obsahem grafitu. Určité možnosti má tato kombinace metod i při řešení hydrogeologických problémů.

Nejstaršími horninami na lokalitě jsou horniny spodního paleozoika, čedičová pyroklastika, amfibolity, ruly a zelené fylity. Mladší jsou paleozoické horniny dobšinské skupiny karbonského stáří: šedozelené pískovce a břidlice, zelené pískovce, břidlice, černé a šedé pískovce a černé břidlice, laminované černozeleňými břidlicemi, černými písčitými břidlicemi a drobami. Celé území je postiženo četnými přesmyky a zlomy. Černé břidlice jsou často postiženy porušením.

Horninový masiv podél profilu P09 lze v horizontální členění rozdělit do čtyř bloků A až D. První blok v metráži -220 až 20 metrů je převážně tvořen horninami Dobšinské skupiny (různě barevnými břidlicemi, pískovci a drobami). Měrné hodnoty těchto hornin se mění od 100 do 700 Ωm a polarizovatelnost se pohybuje okolo 4 %, výjimečně více (Komoň a kol. 2018). Blok B od 20 do 350 metrů, je nápadný svojí nízkou polarizovatelností, která nepřesahuje 2 %. Naopak měrné odpory se mění v mezích od 100 do 900 Ωm . Geologicky odpovídají spodně paleozoickým horninám (čedičovým pyroklastikům, amfibolitům a rulám). Blok C (350 až 1060 metrů) je tvořen obdobnými horninami, přibývají jen ve větších hloubkách zelené fylity. Podle velikosti polarizovatelnosti je možné prohlásit, že v tomto bloku se dá očekávat největší zrudnění (polarizovatelnost 1,5–6 %). Měrné odpory jsou také značně proměnné, prakticky stejně jako v bloku B. Je však nutné konstatovat, že v místech s vysokou polarizovatelností měrný odpor hornin se významně



Obr. 4 Tomografické měření měrného odporu a polarizovatelnosti
Fig. 4 Electrical resistivity and induced polarization tomography

sníží a jeho hodnoty nad 300 Ωm jsou výjimečné (Komoň a kol. 2018). Je možné vyslovit předpoklad, že u těchto hornin začínají minerály s elektronovou vodivostí vytvářet vodivou síť. Horniny tohoto bloku jsou prakticky stejné jako horniny v bloku B. Poslední blok, blok D, je zřejmě přechodem do „jalových“ hornin, protože do vyšších metrů klesá polarizovatelnost a narůstá měrný odpor. V tomto bloku se v hloubkách do 180 metrů začínají opět objevovat horniny Dobšinské skupiny.

Podle výsledků geofyzikálního měření bylo možné v profilu P09 určit tři porušená místa horninového masivu, v obřázku označená jako $\delta 1$, $\delta 2$ a $\delta 3$ (červené čerchované čáry). Zlom $\delta 1$ je charakteristický významným poklesem měrného odporu (pokles až na 120 Ωm) a výrazným zvýšením polarizovatelnosti (až na 5 %). Zlom $\delta 2$ má opět snížený měrný odpor, ale prochází na boku zvýšené anomálií polarizovatelnosti. Zlom $\delta 3$ leží na okraji nízkoodporové anomálie a prochází dvěma polohami nízké polarizovatelnosti. Další vysvětlování odlišných projevů zlomů by bylo bez důkladné znalosti geologických podmínek lokality již spekulativní. Na uvedeném obrázku je i naznačeno spojení čtyř nejvýznamnějších anomálií jak měrného odporu, tak i polarizovatelnosti (zelené čáry).

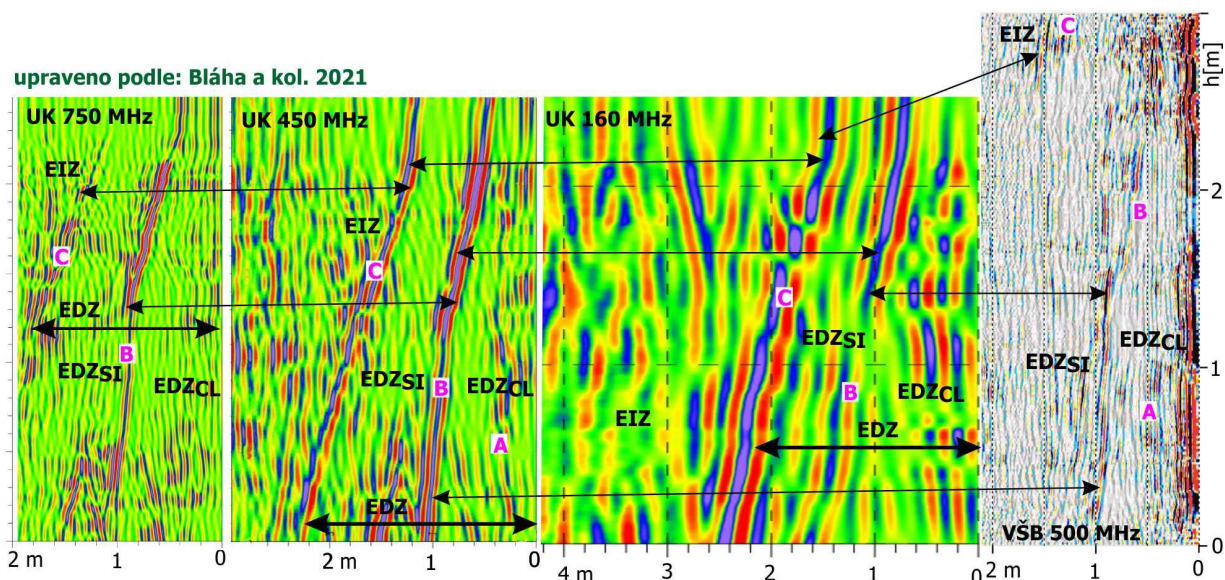
Ve zkoumaném řezu bylo určeno i jedno subhorizontální rozhraní, které v určité míře kopíruje tvar terénu. S největší pravděpodobností zahrnuje vrstvu pokryvných kvartérních zemin a navětralou vrstvu starších hornin. Jeho litologické složení se bude dost významně měnit. K jeho stanovení by však bylo potřebné geofyzikální měření realizovat s menší vzdáleností elektrod a případným doplněním dalšími geofyzikálními metodami, s největší pravděpodobností mělkou refrakční seizmikou.

Poslední ukázka je z požití geofyziky pro řešení geotechnických úkolů. Konkrétně se jedná o použití georadaru pro sledování ploch nespojitosti za stěnou důlního díla. Profilová měření byla realizována dvěma aparaturami RAMAC výrobce Mala, které se odlišovaly datem výroby. Starší komplex označovaný jako VŠB se skládal z operačního modulu ProEx, s řídicím počítačem a monitorem Monitor XV11 a stíněnými anténami o frekvencích 100 MHz, 250 MHz a 500 MHz. Novější aparatura MALA GX s kontrolérem a displejem s uhlopříčkou 10,4" je označovaná jako UK. Tato aparatura byla řízena procesorem 1,6 GHz Intel Atom s operačním systémem Linux. S touto aparaturou byl spojen nový typ antén HDR.

Při grafické interpretaci radargramů nebyl zájmový odraz v počítačové grafice obtažen obvyklou barevnou čarou. Tou se totiž částečně zakryje vlastní projev odrazného rozhraní. Použitý způsob zobrazení u radargramů s více frekvencemi spojuje interpretovaná rozhraní šipkou, v případě jednoho záznamu je k rozhraní vedena šipka s popisem mimo odraznou plochu (obr. 5). Výhoda tohoto systému spočívá v tom, že každý, kdo dále s výsledky radarových měření pracuje, si může udělat svoji interpretaci, která může s prvotní interpretací souhlasit, nebo interpretátor může dojít k jinému řešení (Bláha a kol. 2021). Tímto způsobem se dá při interpretaci odstranit subjektivní vliv prvního interpretátora.

Měření geologickým radarem ve zkušební komoře ZK-2 na lokalitě Bukov bylo realizováno na svislém profilu ve staničení osm metrů na levé stěně komory. Na obrázku 5 jsou radargramy ze čtyř měření. První z pravé strany je měření s radarem VŠB o frekvenci 500 MHz. Poté následují měření s radarem Mala GX s anténami o frekvencích 160, 450 a 750 MHz.

Ze čtyř radargramů, je i zde patrné, že záznamy na jednotlivých frekvencích se liší a nejpodrobnější záznam je možné získat z antény 750 MHz případně 450 MHz (Bláha a kol. 2021). Na interpretovaných radargramech byla vyčleněna tři rozhraní, reprezentující pravděpodobné diskontinuity ve skalním masivu, označené A až C. Rozhraní A, probíhající na starých radargramech od počvy až do výšky cca 1,5 metru maximálně v hloubce 0,4 m, pravděpodobně reprezentuje hranici uvnitř zóny EDZCL, případně hranici mezi EDZCL a HDZ. Je překvapující, že toto rozhraní bylo novým typem radarové aparatury identifikováno jen na frekvenci 450 MHz. Rozhraní B pravděpodobně dělí zónu EDZ na podzóny EDZCL a EDZSI. Tuto hranici je možné sledovat na všech čtyřech frekvencích. Nejlépe je interpretovatelná na záznamu z antény UK 450 MHz. Na radargramech VŠB 500 MHz, UK 450 MHz a UK 750 MHz leží u počvy ZK-2 v hloubce jeden metr a postupně ke stropu díla se hloubka snižuje na cca 0,5 metru. Zajímavé je přerušení průběžnosti rozhraní na frekvenci 160 MHz ve výšce 1,2 metru. Radarová měření nedala odpověď na otázku, čím je to přerušení způsobeno. Rozhraní C je u počvy ZK-2 v hloubce lehce přes dva metry. Podobně jako u hranice B hloubka hranice C



Obr. 5 Bukov, GPR měření na svislém profilu komory ZK-2

Fig. 5. Bukov: GPR survey along the vertical profile of the ZK-2 chamber

se směrem ke stropu snižuje až na 1,2 až 1,4 metru. Diferenci v určení hloubky na radargramech různých frekvencí

nelze podle dosavadních znalostí spolehlivě vysvětlit. Za hranicí C je již možné interpretovat neporušený horninový masiv označovaný v literatuře jako EIZ.

4. Závěr

Činnost člověka představuje dnes podstatně výraznější zásah do přírodního prostředí, než bylo ještě nedávno myslitelné. Z tohoto důvodu je bezpodmínečně nutné věnovat co nejvyšší pozornost horninovému masivu a jeho poznání. K řešení problémů souvisejících s průzkumem pro podzemní stavitelství lze s výhodou využít i geofyzikální metody. Práce spojené s geofyzikálním měřením jsou samy o sobě šetrné k okolnímu životnímu prostředí. Platí to zejména v případech, kdy není pro buzení seizmických vln použito trhavin. K realizaci geofyzikálního měření není potřebné budovat žádné přístupové cesty, ani upravovat terén pro instalaci těžkých strojů ani nijak jinak zasahovat do přírodního prostředí. A i omezení přímých průzkumných prací při vhodné aplikaci geofyzikálních metod vede i k menšímu poškození přírodního prostředí.

Tato práce popisuje některé aspekty použití geofyzikálních metod. Práce je postavena tak, že možnosti geofyzikálních metod při průzkumu horninového masivu pro podzemní stavitelství jsou posuzovány z hlediska geofyzika. K tomu vede jednak moje profese a jednak i snaha soustředit se hlavně na rozbor možností geofyzikálních metod. Je samozřejmé, že tento přístup je diskutabilní, ale záměrně jsem se snažil ukázat předpoklady nasazení jednotlivých geofyzikálních metod, a teprve následně pak demonstrovalo jejich použití a komplexní řešení.

Kvalita informací získaných z geofyzikálních měření závisí na dobrém projektu geofyzikálního průzkumu a dobré kvalitě měření. Nejpodstatnější je však zkušenost a znalosti geofyzika – interpretátora. Nelze ovšem zapomenout ani na nutnost dobré spolupráce mezi geofyzikem a geotechnikem, inženýrským geologem a ostatními specialisty zkoumání horninového masivu. U nich se též předpokládá lepší znalost geofyziky, než bývá obvyklé a u geofyzika naopak lepší znalost inženýrské geologie a geotechniky. Je totiž nezbytné nutné, aby všichni specialisté našli společnou řeč, a aby jejich spolupráce byla skutečně na vysoké úrovni. Spolupráce specialistů různých oborů je snad nejdůležitější požadavek současné doby. S její absencí se setkáváme nejen u nás, ale i ve světové literatuře.

V problematice aplikace inženýrské geofyziky při výzkumu horninového masivu výzkumné práce nejsou ukončeny a pravděpodobně nikdy nebudou. Zároveň však není možné opominout rozvoj jednotlivých geofyzikálních metod, v tomto případě hlavně metod sondovacích, které ke svému měření potřebují minimální prostor (reflexní seizmika a elektromagnetické sondování).

Velmi důležité je použití geofyzikálních metod při sledování a popisu horninového masivu za stěnou důlního díla. Určování mocnosti EDZ zóny, její změny, změny v napěťo-deformačním stavu horninového masivu v širším okolí báňského díla, si již bez geofyzikálního zkoumání nelze představit. Poněkud omezené je současné použití geofyzikálních metod v monitorování horninového masivu v podzemí. Je však nutné konstatovat, že v současné době se rozvíjejí výzkumné práce i v tomto směru.

Zásadní otázkou, která dnes hraje a jistě i v blízké budoucnosti bude hrát významnou roli, je cena informací, které lze získat na základě geofyzikálních měření. Poměrně jednoduchá je možnost aplikace geofyzikálních měření tam, kde výsledky není možné získat jinou cestou (viz metoda TSP). Geofyzikálním měřením je možné získat informace v ploše nebo i v prostoru, kdežto přímými průzkumnými díly jsou informace soustředěny na body či linie. Přesto však je i v tomto ohledu oproti minulým létům ve světě patrný pokrok.

Dnes lze prohlásit, že bez geofyziky nelze kvalitní průzkum horninového masivu pro podzemní stavitelství provést. V neposlední řadě je třeba si uvědomit, že kvalitně provedený geofyzikální průzkum přináší i značné finanční úspory při průzkumu. Na základě dokonalého poznání zkoumané části horninového masivu je možné použít nižších koeficientů bezpečnosti než při řešení, které vychází pouze z odhadů. Za optimální je možné považovat postup, kdy po parametrických geofyzikálních měřeních následuje plošné nasazení povrchových geofyzikálních metod. Po interpretaci a sestavení fyzikálního modelu následuje jeho geotechnické a inženýrskogeologické zhodnocení. Tím je fyzikální model převeden na inženýrskogeologickou představu o masivu. Poté následuje návrh přímých průzkumných prací. V další etapě průzkumných prací jsou vrty karotovány a povrchová geofyzika doplněna o nutná měření vyplývající z průběžného zpracovávání. Právě zde je nezbytně nutná již zmíněná úzká spolupráce specialistů všech oborů. Takový postup geologických průzkumných prací přináší nejen nejlevnější a nejefektivnější průzkum, ale i průzkum s nejvyšším možným ziskem informací.

Poděkování: Některé geofyzikální práce uváděné v tomto článku byly realizovány v podzemním výzkumném pracovišti PVP Bukov. To vybudovala a provozuje Správa úložišť radioaktivních odpadů SÚRAO. Za tuto možnost autor článku konstatuje, že za to patří SÚRAO uznání a dík.

Seznam literatury

- Belyaeva T.A., Bobrov P.P., Kroshka E.S., Repin A.V., 2017: Complex Dielectric Permittivity of Saline Soils and Rocks at Frequencies from 10 kHz to 8GHz, Progress In Electromagnetics Research Symposium — Spring (PIERS), p. 3046–3051, St Petersburg.
- Bláha P., Duras R., Gebauer J., 2021: Rozvoj geotechnických a geofyzikálních metod pro získání 2D a 3D obrazu geologické stavby FV20294, Závěrečná zpráva etapy B, Výzkum použití geofyzikálních metod. Geotest, s. 331, Brno, MS.
- Bláha P.: Geofyzika pro podzemní stavitelství, 2024, Geotest a.s., Univerzita Komenského, VŠB-TU, Brno, Bratislava, Ostrava, 357 s.
- Choudhary K., Dickmann T., 2017: Perceiving geological risk using Tunnel Seismic Prediction during tunnelling in weak sedimentary rocks, In: INDOROCK, Seventh Indian Rock Conference, 2017.
- Komoň J., Kaminsky A., Bartalský B., Kultán V., Hojnoš M., Daniel S., Bašista J., 2018: Dobšiná Zemberg geophysical prospection, Koral, 2018, Spišská Nová Ves, MS.
- Shehab F., Myers T.M., Ott H., Dolan S., Dietderich J., and Bayazitoglu Y.: 2017: Uniaxial Complex Relative Permittivity Tensor Measurement of Rocks From 40 Hz to 4.5 GHz, in IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 55, no. 2, p. 1125–1139, doi: 10.1109/TGRS.2016.2620078.
- Vajdová B. 1984: Karotážní zpráva z vrtu JK-9 Lysá Hora, Geologický průzkum, Ostrava, MS.