

Abstract

These days, geotechnicians often ask geophysicists for necessary data about technical properties of material under research, mainly for purpose of mathematical modeling. Geotechnicians have to use either table values or values, coming from small number of laboratory or terrain tests. We want to summarize our knowledge of possibilities to get requested geotechnical properties and their reliability from geophysical measurements.

Keywords: mechanical properties, geophysical measurement, velocity, resistivity

Úvod

Geofyzikální měření vzhledem ke svému charakteru zkoumá horninový masív mnohem více prostorově než je to možné u zkoumání geologického a zejména geotechnického. Na základě geofyzikálního měření je možné rozšířit platnost geotechnických údajů do většího prostoru. Podmínkou pro věrohodné použití geofyzikálních dat pro geotechnické účely je zjištění vztahů mezi mechanickými vlastnostmi a vlastnostmi fyzikálními, které však mohou být značně komplikované.

Vztahy mezi mechanickými a fyzikálními vlastnostmi mohou být rozděleny do následujících skupin:

- kvalitativní posouzení
- kvantitativní určení
 - přímý výpočet
 - příčinné závislosti
 - statistické závislosti

V tištěném textu tohoto článku jsou publikované obrázky pouze schematické – černobílé. Plná verze článku i s barevnými obrázky je na přiloženém CD.

Kvalitativní vztahy

Jedním z důležitých úkolů inženýrskogeologického průzkumu horninového masívu je posouzení porušenosti zkoumaného masívu. K tomuto posouzení se využívá většinou parametru RQD (redukovaného výnosu jádra), určovaného v každém jádrovaném vrtu. Naše poznatky z rozsáhlých průzkumných prací ukázaly, že tento parametr velmi dobře koreluje s velikostí rychlostí šíření vln v , určených jak ve vrtu, při povrchovém průzkumu tak ze seizmického prozařování.

Koeficient porušení K_p ze seizmických měření se obvykle definuje dvojím způsobem. První způsob určování je dán rovnicí:

$$a) \quad K_p = 100 \cdot (V_{\max} - V_{is}) / (V_{\max} - V_{\min}) \quad (1)$$

kde $V_{\max}$ respektive $V_{\min}$ jsou extrémy naměřených rychlostí šíření podélných vln v zkoumané části horninového masívu jednoho petrografického typu, V_{is} hodnota rychlostí vln v posuzovaném místě masívu. Druhý způsob určení vychází ze vztahu:

$$b) \quad K_p = 100 \cdot V_{is} / V_{lab}, \quad (2)$$

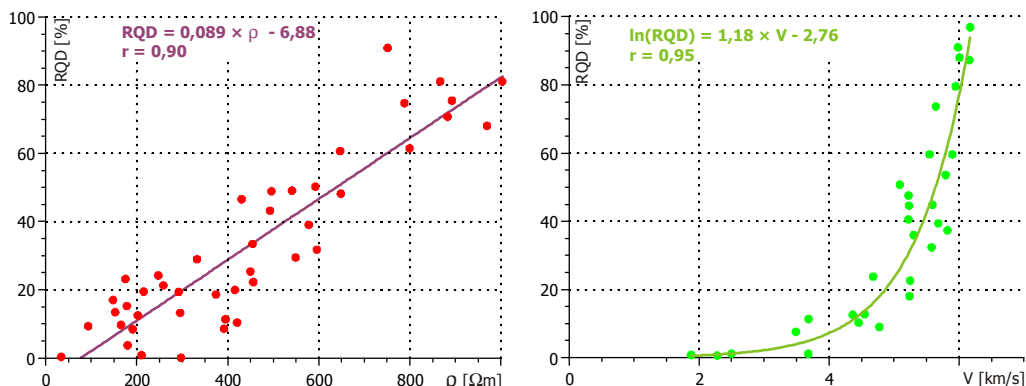
kde V_{lab} je laboratorně naměřená hodnota rychlostí vln na kompaktním nebo relativně neporušeném vzorku hornin odebraného z vrtu.

¹ Doc. RNDr. DrSc., GEOTest Brno, a.s., 28. října 287, 709 00 Ostrava, blaha@geotest.cz

² Prof. Ing. DrSc., ÚGN AV ČR, v.v.i., Studentská 1768, 708 00 Ostrava, muller@ugn.cas.cz

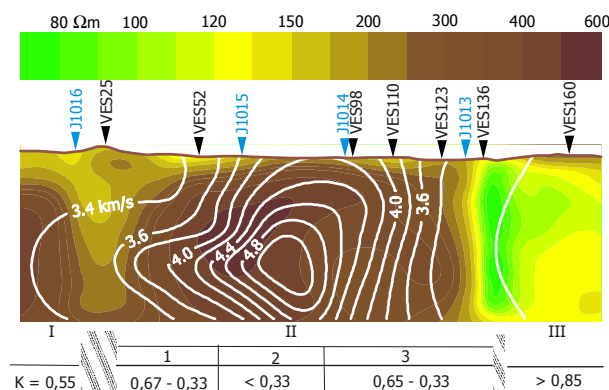
³ Ing. CSc., GEOTest Brno, a.s., Břenkova 28, 631 00 Brno, horsky@horsky.org

Vedle seizmických měření lze v některých případech využít k posouzení porušenosti horninového masívu i výsledky odporových měření. Na obr. 1 jsou grafické závislosti mezi rychlostmi vln V, zdánlivým měrným odporem ρ_z a parametrem RQD pro granulity s přehradního profilu vodního díla Dalešice. V tomto případě je patrné, že určité vztahy existují a je možné je v průzkumné praxi použít.



Obr. 1 Vztah měrného odporu, rychlosti podélných vln a RQD

Na obr. 2 pak ukázka kvalitativního posouzení části přehradního profilu a jeho rozdělení do tří



Obr. 2 Koeficient porušení a rozložení rychlostí a zdánlivých měrných odporů

nemyslitelné takovéto měření zpracovávat tomograficky. V nejspodnější části obrázku jsou uvedeny hodnoty koeficientu porušení, vyčísleného podle vztahu (1).

Vedle kvalitativního posouzení porušenosti horninového masívu lze výsledky seizmického měření využít i pro posouzení napjatosti na obr. 3 je průměrná hodnota rychlostí z pěti vrtů na přehradním profilu Dalešice (V_1) průběh rychlostí ze seizmického prozařování mezi vrtů (V_2), vertikální průběh parametru RQD a výsledky vodních tlakových zkoušek (Q). Tyto parametry spolu dobře korelují přímo nebo inverzně a umožnili interpretovat zóny různého napětí ve vertikálním směru.



V1 průměrná "karotážní" rychlost z pěti vrtů V2 rychlost z prozařování

Obr. 3 Průběh RQD, VTZ a V ve vrtu v Dalešicích

pokládáme fakt, že se nám podařilo identifikovat nejen zónu koncentrovaného napětí vyvolanou vysokými svahy údolí, ale i zónu, která je dána tíhou nadloží.

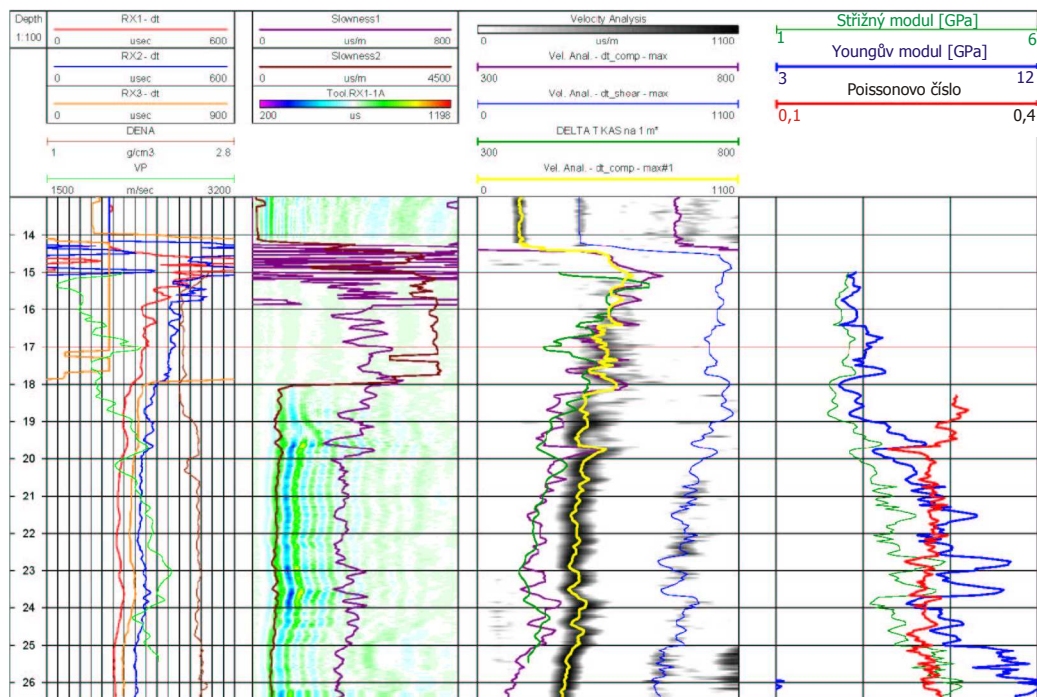
Při porovnávání výsledků měření rychlostí různými způsoby se vždy dostáváme k problému, které absolutní hodnoty rychlostí jsou správné. Jsou případy, kdy jsou vyšší rychlosti ze seizmického prozařování a opačně, známe lokality, kde je vyšší rychlost zjištěna karotážními měřeními. Jeden z takovýchto případů je zobrazen i na tomto obrázku. V tomto případě bychom hledali vysvětlení v použití cementace během vrtání a vodních tlakových zkoušek. Pro posuzování vlastností masivu je lépe vycházet z rychlostí zjištěných ze seizmického prozařování. V tomto případě seizmický paprsek prochází celým horninovým masivem, nejen těsným okolím vrtu.

Koeficient porušení K_p ze seizmických měření je tedy velmi významným parametrem při posuzování stavu zkoumaného horninového masivu. Navíc umožňuje transformaci laboratorně určených geotechnických vlastností na neporušených nebo slabě porušených vzorcích do jednotlivých částí zkoumaného horninového masivu podle stupně porušení těchto částí.

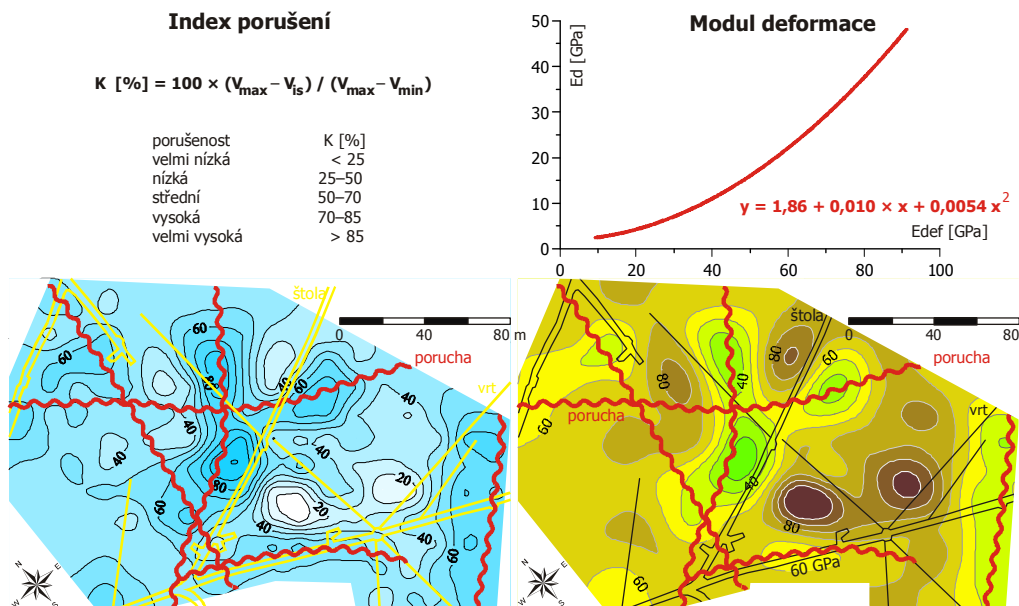
Kvantitativně určené vlastnosti výpočtem z geofyzikálních měření

Do této skupiny patří především určování modulů a Poissonova čísla ze seizmických měření. Tyto hodnoty se v současné době nejčastěji získávají z karotážních měření, kdy moderní aparatury umožňují zjistit jak průběh rychlostí podélných vln V_p , tak příčných vln V_s . Na obr. 4 je ukázka karotáže pro geotechnické účely, měřené firmou Aquatest. Při stanovení hodnot V_p a V_s se pak určí hodnota dynamického modulu pružnosti E_d ze vztahu:

$$E_d = \frac{\rho(3v_p^2 - 4v_s^2)}{\left(\frac{v_p}{v_s}\right)^2 - 1} \quad (3)$$



Obr. 4 Průběh strizného a Youngova modulu a Poissonova čísla podél osy vrtu (podle Aquatestu)



Obr. 6 Rozložení koeficientu porušení a modulů deformace na lokalitě Ipel'

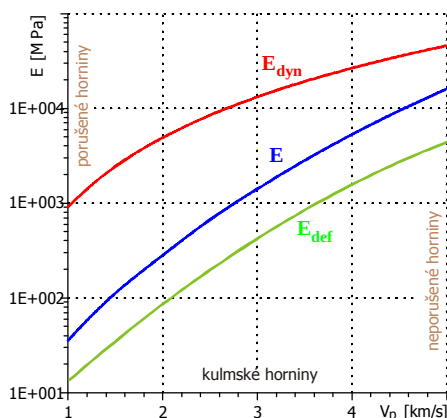
Další skutečností, kterou bychom měli při hodnocení vazeb brát v úvahu, je okolnost, že místní geotechnické a geofyzikální zkoušky není identické. U seizmických měření dochází k pronikání paprsku do prostředí o „lepší“ vlastnostech, čímž se seizmicky určené moduly zvyšují. To platí nejen u zkoušek na povrchu skalního podloží, ale též u všech ostatních měření. Současná přístrojová technika umožňuje měřit časy příchodu vln s dostatečnou přesností, takže je geofyzikálně možné zkoumat horninový masív řádově stejných rozměrů jako u geotechnických zkoušek. Měření chování hráze po dokončení její výstavby v četných případech ukázala, že moduly ze seizmických měření jsou blíže skutečnosti než moduly zjištěné klasickými geotechnickými postupy.

Další možný rozdíl mezi statickými a seizmickými (dynamickými) moduly pružnosti je potřebné hledat v časovém průběhu zkoušek. U seizmických měření je doba trvání zkoušky řádově ve zlomcích vteřiny a při zkoušce působí na horninový materiál nejen tlakové zatížení, ale i zatížení tahové a u příčných vln i zatížení sřížné. U geotechnických zkoušek je časový průběh zkoušky delší o několik řádů a na zkoušený materiál působí jen zatížení tlakové. Navíc při tlakovém zatížení v řádu hodin a vyčkání k ustálení deformací může nastat dotvarovávání materiálu, čímž dojde k eliminaci, alespoň částečné, vlivu porušení horniny. Dokonce i u zcela kompaktních materiálů byly při těchto typech zkoušek zjištěny několikaprocentní rozdíly. Tento efekt lze podobně jako u geoakustické metody vysvětlit měřítkem pozorování.

Rozdíl mezi geotechnickými zkouškami a seizmickým měřením je potřebné hledat i v používaných napětích. U seizmických měření jsou použita napětí v řádech 0,1 kPa, kdežto u geotechnických zkoušek je to o tři až čtyři řády více. Obdobné rozdíly jsou i v deformacích, u seizmických měření jsou to mikrometry, u geotechnických zkoušek v horninách milimetry, rozdíl se tedy pohybuje okolo tří řádů. Z teoretických rozborů je známo, že moduly pružnosti zjišťované při malých deformacích jsou vyšší než při deformacích velkých.

Svůj vliv hrají i plochy diskontinuity, případně výplně trhlin. Běžné trhliny nepředstavují pro seizmický signál, alespoň co se týče rychlosti, závažnější vliv. Jiná by byla situace při sledování útlumu, ale ten nemá na výpočet modulů vliv. Při řádově menších objemech geotechnických zkoušek hraje dotlačení trhlin svoji úlohu a jejich uzavírání zvětšuje deformace.

Rozdíly mezi E_{dyn} a E_s mohou být značné. Různí autoři uvádějí rozdíly mezi oběma typy měření značně odlišně. Např. Link (1962) publikoval, že u hornin jsou seizmické moduly 3-12x vyšší než moduly deformace zjištěné klasickými testy. Naproti tomu Savič (1969) uvádí vztah statického

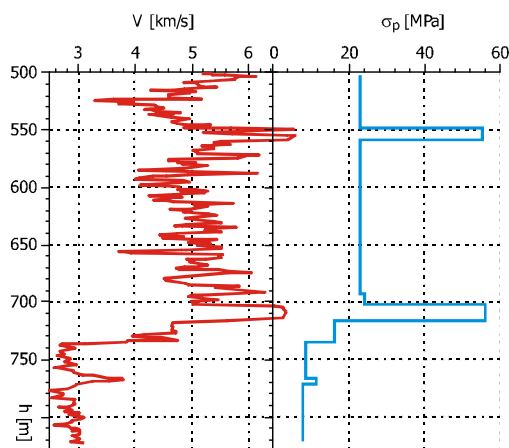


Obr. 7 Vazba V a E na Slezské Hartě
(upraveno podle Mjuller, Novosad, 1986)

a dynamického modulu, kdy dynamický modul je jen nevýrazně vyšší než statický modul (obr.6). Tento obrázek je značně zavádějící, ve skutečnosti jsou dynamické moduly značně vyšší než statické, zejména u porušených hornin. Na obr. 7 jsou vazby mezi dynamickými modul, statickými moduly a moduly deformace pro kulmské horniny z oblasti vodního díla Slezská Harta (Mjuller, Novosad, 1986). Závislost sahá od porušených hornin až k zcela neporušeným horninám. Vztahy byly určeny porovnáním geotechnických zkoušek a výsledků geofyzikálních měření a to jak laboratorních tak in situ. Z obr. je patrné, že zatím co E_{def} proti E_{dyn} je pro neporušené horniny nižší cca o jeden řád, pro silně porušené horniny je nižší až o dva řády. Z příkladu vyplývá, že přepočty dynamických modulů na statické a přetvárné je možné jen po důkladném zjištění korelačních vztahů na stejných vzorcích a ve stejných místech horninového masívu.

Příčinné závislosti mezi geofyzikálními a geotechnickými vlastnostmi

Do této skupiny vztahů patří ty vlastnosti, které jsou ovlivněny stejnými příčinami, jako je napjatost, porušení, pevnost atd. Na obr. 6 jsou výsledky seizmického prozařování na lokalitě Ipel', které umožnilo převést rozložení rychlostí na kvalitativní posouzení porušenosti podle koeficientu K_p . Dále bylo možné posoudit horizontální napětí, dynamické moduly E_{dyn} a moduly deformace E_{def} . Do zmíněného obrázku jsou vepsány i rovnice a vkreslen graf, podle kterého byli uvedené příslušné parametry počítány.



Obr. 8 Vztah rychlosti a pevnosti

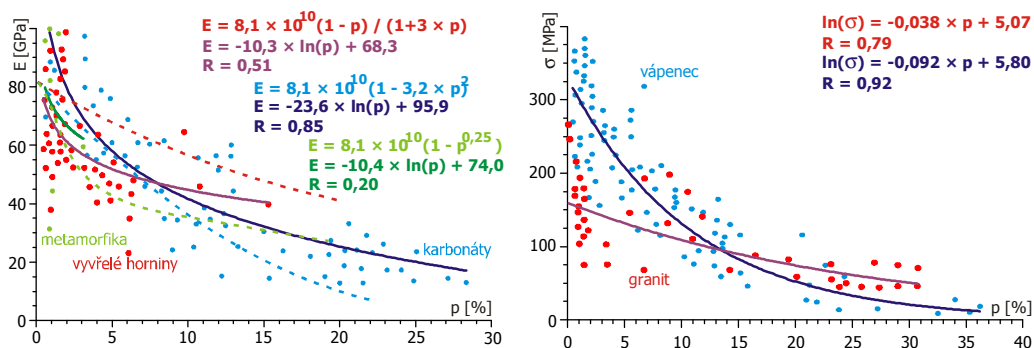
Za vhodných podmínek lze ze seizmických měření odvodit i hodnoty pevnosti. Na obr.8 jsou výsledky akustické karotáže v části vrtu NP 818 v oblasti Frenštát – Trojanovice, kde byl odvozen vztah mezi pevností v tlaku prostém σ a rychlostí vln prostřednictvím výsledku mechanické karotáže, kdy prostředníkem mezi V_p a σ byla rychlost vrtání V_0 . Pro horniny slezské a podslezské jednotky byl odvozen vztah:

$$\sigma_p = 7.624 \cdot 10^{-6} V_p^3 - 3.57 \cdot 10^{-6} V_p^2 + 7.59 \cdot 10^{-3} V_p \quad (5)$$

V literatuře jsme sledovali, zda některý autor uvádí příčinnou závislost mezi rychlostí vln a kohezí C. Jediný vztah uvádí Zinčenko (2005) $C = 0,038 G + 0,087$, kde G značí smykový modul odvozený ze seizmických měření. Vztah má platit pro G v rozmezí 0,01 – 0,15 MPa. Tato korelace nebyla zatím v našich podmínkách ověřena.

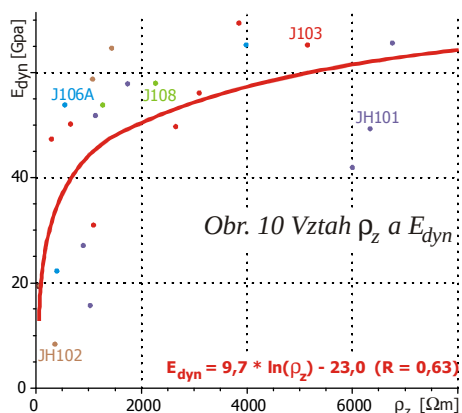
Statistické závislosti mezi geofyzikálními a geotechnickými vlastnostmi

V této skupině je možné nalézt v literatuře nepřehledné množství vztahů a závislostí jednak v grafické formě, jednak ve formě matematických vyjádření. V některých případech se zdá, že jde o zkoumání nelogických vazeb (např. mezi dielektrickou konstantou, útlumem seizmických vln a vydatností vrt). Z tohoto důvodu ukážeme pouze na zkoumání, která jsme v našich průzkumech přímo použili nebo je jejich charakterem pokládáme za zajímavá. Na obr. 9 můžeme sledovat vazby

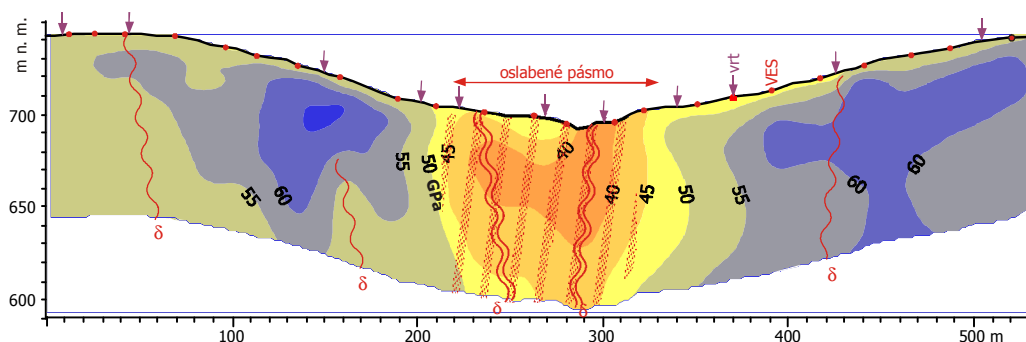


Obr. 9 Vztah porovitost a modulu pružnosti a pevnosti (podle Zinčenko, Kozak, 2005)

mezi porovitou, modulem pružnosti a pevností. U korelačních rovnic jsou v levé části obrázku mimo korelace zjištěné autory pomocí programu GRAPHER uvedeny i původní rovnice (vždy na prvním řádku). Z obou obrázků je patrné, že prakticky neexistují sledovatelné závislosti pro metamorfované horniny. Pro vyvřelé horniny lze uvažovat pouze o přibližné korelaci mezi porovitou a pevností při porositách nižších než pět procent. Těsnější vazby vycházejí u vápenců, respektive karbonátů. I zde je však potřebné hledat takový matematický vztah, který bude mít co nejtěsnější vazbu.



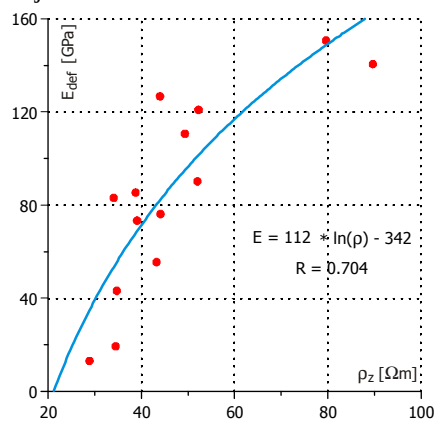
Při orientačním průzkumu pro vodní dílo Josefův důl, kdy bylo využíváno ve větší míře geoelektrických metod než seizmických. Příčina byla v tehdejší přístrojové vybavení geofyzikálních skupin. Na lokalitě byl sledován vztah mezi zdánlivým měrným odporem a dynamickým modulem pružnosti, určeným ultrazvukovým měřením na upravených vrtných jádrech. Korelační graf $E_{dyn} = f(\rho_z)$ pro granitické horniny v přehradním profilu této lokality je na obr. 10. Přestože korelační koeficient není nijak vysoký, bylo závislosti použito pro vytvoření první představy o rozložení modulů v předhradním profilu. Tento postup umožnil inženýrským geologům a geofyzikům předat projektantům první představu o modulech pružnosti ve zkoumaném žulovém masivu. (obr.11).



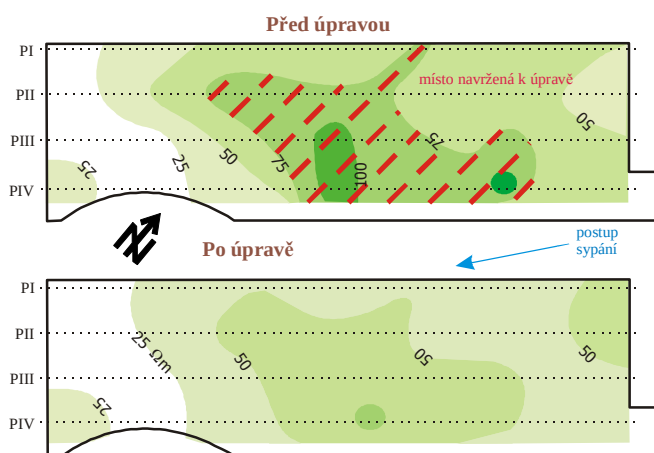
Obr. 11 Rozložení dynamických modulů pružnosti v přehradním profilu Josefův Důl

Obdobně byla vazba mezi E_{def} a zdánlivým měrným odporem sledována při průzkumu homogenity hutněného velkoplošného násypu při stavbě anilínového bloku MCHZ v Ostravě. Každá základová spára byla proměřená mikroodporovým profilováním a v některých místech byl určován modul deformace zatěžovací deskou. Na obr.12 je vzájemná vazba mezi E_{def} a ρ_z . Místa s odchýlnými měrnými odpory (nad 75 ohmmetrů) byla navrhována k úpravě. Touto metodikou byla všechna

stavební místa proměřena a metodika se ukázala jako plně vyhovující pro posouzení nehomogenity základů stavebních objektů (obr.13). Za dobu dlouhé řady let nedošlo k nerovnoměrnému sedání objektů.



Obr. 12 E_{dyn} a ρ_z v násypu



Obr. 13 Kontrola násypu

Závěr

Jak vyplývá z uvedených ukázek, lze výsledky geofyzikálních měření, zejména seizmických, ale i geoelektrických využít k posouzení fyzikálního stavu horninového masivu a určení jeho mechanických vlastností. Jde zejména o kvalitativní posouzení stupně porušení jednotlivých částí masivu a vymezení zón různého napětí při použití koeficientu porušení K_p , určeného z různých druhů seizmických metod. Pokud jde o kvantitativní stanovení potřebných geotechnických vlastností, lze stanovit objemovou hmotnost z hustotní karotáže a Poissonova číslo z komplexní akustické karotáže při registraci rychlostí jak podélných tak příčných vln a obdobným způsobem i z povrchových měření. Pokud jde o určení statických a přetvárných modulů, je možné je věrohodně stanovit jen po důkladném zjištění korelačních vztahů k dynamickému modulu jak na stejných vzorcích, tak ve stejných místech horninového masivu.

Literatura

- BIENAWSKI, Z. T. Rock Mass Classification in Rock Engineering, In *Symposium Exploration in Rock Engineering*, Johannesburg, 1975.
- BLÁHA, P. *Seismická tomografie*, Praha/Brno: NIS Geofond/Geotest, 1996, s. 1 – 50.
- BLÁHA, P. – VLASTNÍK, M. *Využití metody pronikání při zpracování mělké refrakční seizmiky pro účely inženýrské geologie*, Geologický průzkum, 1992, 6, s. 169 – 171.
- BLÁHA, P. et al. Závěrečná zpráva o geofyzikálním měření v trase dálnice Vyškov – Chropyně v kilometráži 33.5 – 35.4, In KLÍMEK L., et al. *Dálnice D1 – Vyškov – Mořice, stavba 0133, podrobný geotechnický průzkum*, Brno: Geotest, 1997, MS.
- DVOŘÁK, A. *Základy inženýrské seizmiky*, Skripta PS, Praha: PřFUK, 1969.
- GORJAJNOV, N. N. – LJACHOVICKIJ, F. M. *Seismičeskije metody v inženernoj geologii*, Moskva: Nedra, 1979.
- HORSKÝ, O. Využití RQD pro inženýrskogeologické hodnocení horninového prostředí, In *Inžiniersko-geologické sympóziu*, Bratislava, 1984, s. 222 – 234.
- HORSKÝ, O. Stanovení korelačních vztahů mezi dynamickými moduly pružnosti a deformačními moduly v základech horní hráze přečerpávací elektrárny Centro Cuba, In *Geotechnické problémy energetickej výstavby*, Vysoké Tatry: ČSVTS, 1990, s. 41 – 44..
- JEROFEEV, L. J. et al. *Fizika gornych porod*, Tomsk: ITPU, 2006..
- KOŘALKA S. ústní sdělení.

- LINK, H. *Über die Unterschiede statisch, dynamisch und seismisch ermittelten Elastizitätsmodulen von Gestein und Gebirge*. Wien: Geologie und Bauwesen, Jg. 27, H.3-4, 1962.
- LJACHOVICKIJ, P. M. – CHMELEVSKOJ, V. K. – JAŠČENKO, Z. G. *Inženernaja geofyzika*, Moskva: Nedra, 1989, s. 1 – 145.
- MJULER, K. – NOVOSAD, S. Metodika i ocena elastičnih svojstv gornych porod na plotinnom profile Slezská Garta, In *Proceedings of XXXI IGS*, I, Gdańsk, 1986, s. 29 – 37.
- MÜLLER, K : Assessment of rock mechanical properties of superficial deposits in upper silesian basin through a complex of drill technological and loggin data., *Acta montana IRSM AC CR*, A,16,125-129,2000.
- MÜLLER,K , HOFRICHTEROVÁ,L , MÜLLEROVÁ, J : Engineering geophysical investigations of rock fill bodies made out coal mine waste materials., of the int. *Conf. on environment, Energy, and society*, Carbondale, USA, 94-98, 1994.
- RŽEVSKIJ, V. V. – NOVIK, G. J. *Osnovy fiziky gornych porod*, Moskva: Nedra, 1978.
- SAVIČ, A. I. *Seismoakustičeskije metody izučeniya masivov skalnych porod*, Moskva: Nedra, 1969.
- SAVICH, A. I. et al. Seismic Survey of the Ingouri arch dam pit, In *Third Congress of Rock Mechanics*, Vol. II, Part B, Denver, 1974.
- ZINČENKO, V. S. – KOZAK, N. M. *Osnovy geofyzičeskich metodob issledovanij*, Moskva: RGGU, 2005.
- ZINČENKO, V. S. *Petrofizičeskije osnovy gidrogeologičeskoj i inženernogeologičeskoj interpretacii geofyzičeskich dannyh*, Moskva: RGGU, 2005.