



GEOFYZIKÁLNÍ VÝZKUM NA KONTAKTU STRÁŽECKÉHO MOLDANUBIKA A SVRATECKÉHO KRYSTALINIKA

GEOPHYSICAL SURVEY AT THE CONTACT OF STRAZEK AND SVRATKA UNITS

Zuzana Skácelová¹, Kryštof Verner², Jaroslav Jirků³, Oldřich Levý⁴

Abstrakt

V rámci projektu SÚRAO „Geofyzikální práce pro popis geologické stavby potenciálních lokalit HÚ v ČR“ byla komplexem geofyzikálních metod proměřena v jv. části Českého masívu lokalita Kraví hora, mezi nimiž byly i geoelektrické odporové metody, seismická reflexní a elektromagnetická měření a gamaspektrometrie. Pro zjištění regionální stavby byl klíčový páteřní profil KRH01 ve směru Z-V, který postupně protínal strážecké moldanubikum, svratecké krystalinikum a moravsko-slezskou zónu (svrateckou klenbu). Použité metody zajistily výsledky, které bylo možné využít pro sestavení strukturního geologického modelu. Odporové profilování a gamaspektrometrie poskytly data pro vymapování litologických kontaktů a zlomů na povrchu, elektromagnetická metoda TDEM spolu s reflexní seismikou informace o tektonickém porušení až do hloubky 1 km.

Abstract

In the frame of the SÚRAO project "Geophysical works to describe the geological structures of potential DGR localities" the Kraví hora site in the southeast part of the Bohemian massif was surveyed using a complex of geophysical methods. Methods also included geoelectrical resistivity methods, seismic and electromagnetic measurements, and gamma-ray spectrometry. Key to establishing the regional structure was the profile KRH01 in the W-E direction, which intersected the Strážek Moldanubian, Svatka Crystalline Complex and the Moravian-Silesian Zone. The used methods provided results that could be used for the construction of a structural geological model. Resistivity profiling and gamma-ray spectrometry provided data for the indication lithological boundaries and faults on the surface, and electromagnetic TDEM method together with reflection seismic method for the tectonics up to a depth of 1 km.

Klíčová slova

Strážecké moldanubikum, svratecké krystalinikum, gamaspektrometrie, odporové profilování, reflexní seismika, TDEM

Keywords

Strážek Unit, Svatka Crystalline Unit, gamma-ray spectrometry, resistivity profiling, reflection seismic, TDEM

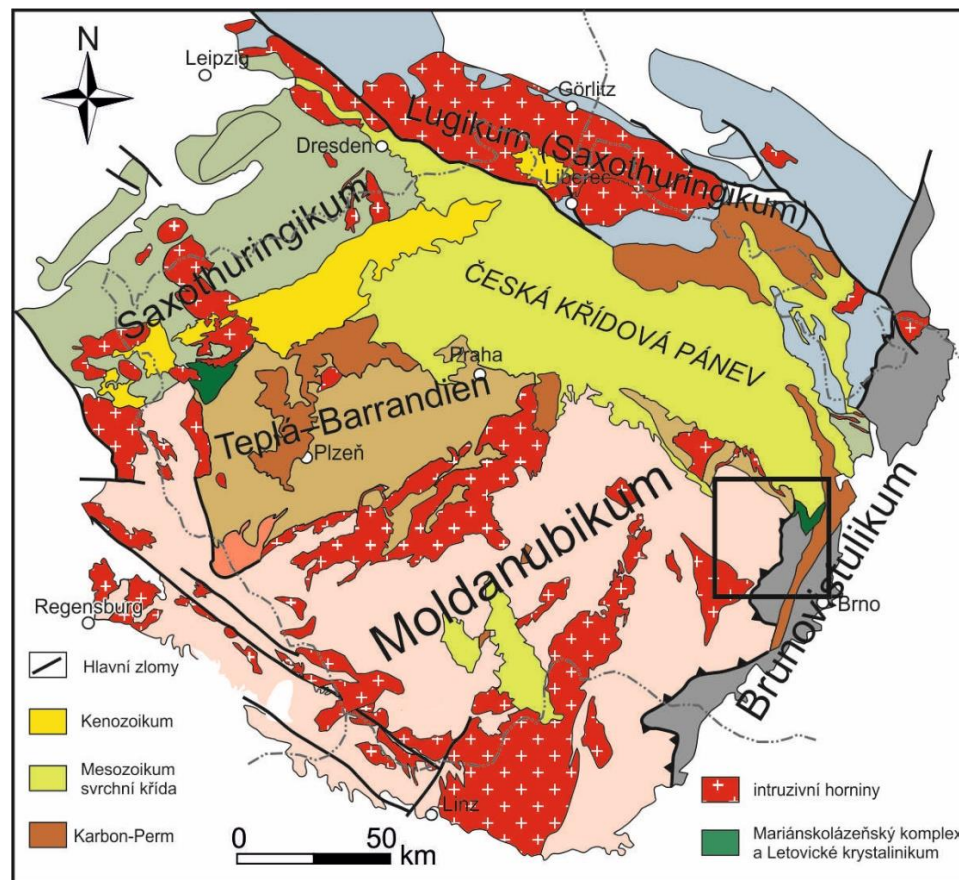
1. Úvod

V rámci geologického a geofyzikálního výzkumu pro nalezení potenciálních lokalit hlubinného úložiště radioaktivních odpadů byla v letech 2018-2020 na lokalitě Kraví hora realizována řada geofyzikálních měření pro vytvoření 3D strukturně geologického modelu. Cílem bylo ověřit geologickou stavbu v okolí drahonínského masívu a jeho pozici vůči regionálním jednotkám.

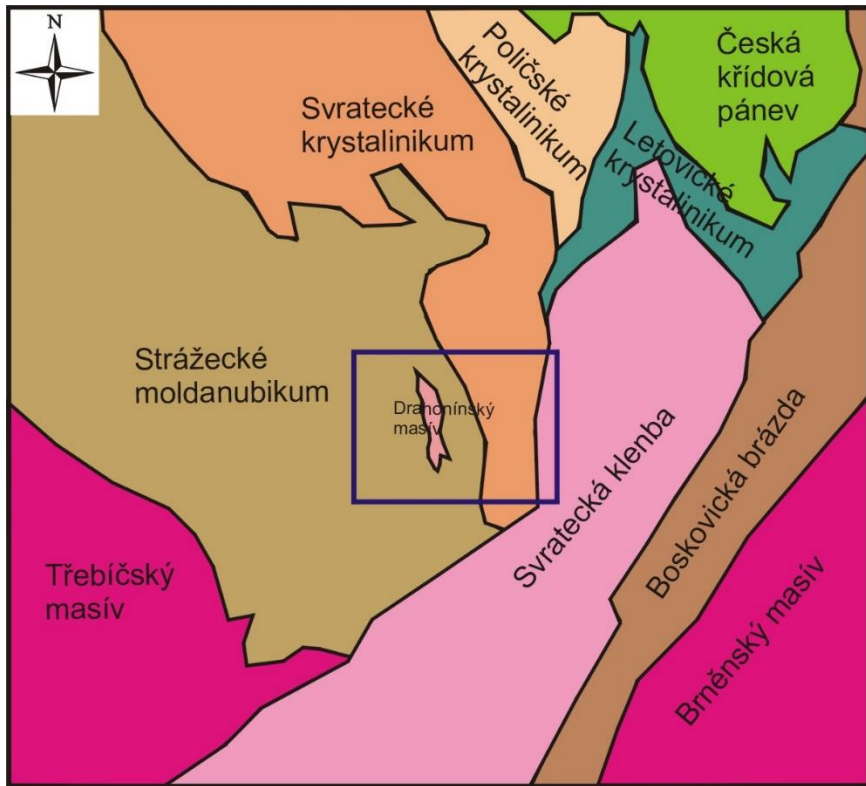
2. Geologická charakteristika

Lokalita Kraví hora leží v jv. části Českého masívu na východním okraji moldanubika (obr. 1). Převážnou část území tvoří vysoce metamorfované horniny, které náleží severovýchodní části strážeckého moldanubika a přilehlé části svrateckého krystalinika (obr. 2). Podél východního okraje vystupují horniny jednotky svratecké klenby (moravsko-slezská zóna).

Z pohledu litologického složení je zájmové území pestré. Severovýchodní okraj strážeckého moldanubika dominantně tvoří komplex biotitických migmatitů s hojnými polohami leukokratických až nebulitických migmatitů, migmatitizovaných pararul, silimanit-biotitických pararul, migmatitizovaných amfibolických rul a amfibolitů o mocnosti v řádech desítek až stovek metrů. V komplexu těchto hornin se v protažení ve směru SSZ–JJV vyskytuje těleso felsických granulitů a granulitových rul označované jako drahonínský masiv (obr. 2). Komplex migmatitů a granulitů obsahuje drobná tělíska serpentinizovaných peridotitů a serpentinitů o rozměrech desítek až stovek metrů. Hranice jednotlivých typů metamorfovaných hornin jsou definovány zejména průběhem regionální metamorfní foliace strmé



Obr. 1 Geologická situace – vymezení studované oblasti (detail na obr. 2) v rámci Českého masívu



Obr. 2 Schéma geologické situace studované oblasti s vyznačením plochy geofyzikálního měření

doplněny profily KRH-06A a 06B o metody mělké seismické reflexe a multielektrodového odporového měření ERT. Dále byly vytyčeny 3 nové geofyzikální profily KRH-09, KRH-10 a KRH-11. Páteří profil KRH01 procházel přes celou lokalitu ve směru Z-V a kromě měření mělce uložených struktur byl klíčovým profilem i pro hluboké měření elektromagnetickou metodou TDEM a reflexní seismiku s vibračním zdrojem. Z důvodů průchodnosti terénu byly tyto metody realizovány jižněji od profilu KRH01 na slalom-line profilu KRH01 vib.

Zaměření pozice bodů bylo provedeno stanicí GPS (přístroje Trimble R8s nebo Garmin 64st). Výškopis těchto bodů byl určen pomocí přesné GPS, v místech ztráty signálu byla výška bodu zjištěna pomocí nivelace na lať. Geoelektrická měření na profilech byla realizována metodou dipólového odporového profilování (DOP) v uspořádání A20B80M20N pomocí přístroje MIMI/GEVI, vertikální elektrické sondování (VES) s krokem 25 m a roztažením proudových elektrod AB 100 m a elektrická odporová tomografie (ERT) v uspořádání Schlumberger. K měření ERT byla použita aparatura ARES II (GF Instruments). Výsledkem byly profilové křivky měrného odporu (DOP) a řezy zdánlivých měrných odporů (VES, ERT).

orientace v průběhu SSZ–JJV, která byla místy převrátněna či střížně refoviována do ploch středního až mírného sklonu k JZ(ZJZ).

Ve východní části lokality Kraví hora se nachází jednotka svrateckého krystalinika. Hlavním horninovým typem v jednotce svrateckého krystalinika jsou polymetamorfované, často leukokratní dvojslídne migmatity a ortoruly s polohami pararul a svorů, kvarcitů, vápenato-silikátových hornin, skarnů a mramorů (Verner et al., 2009; Pertoldová et al., 2010).

Z důvodu podobnosti v litologické stavbě a společných znaků tektonometamorfního vývoje jednotek strážeckého moldanubika a svrateckého krystalinika je vymezení jejich hranice problematické. Zlomové struktury na území zájmové lokality a jejího blízkého okolí mají převažující průběh ve směru SSZ(S)–JJV(J) a v podřízené formě v průběhu VSV(V)–ZJZ(Z).

Svratecká klenba, která je součástí moravsko-slezské zóny na východě je tvořena muskovit-biotitickými pararulami s vložkami mramorů, kvarcitů a amfibolitů a bítešskou ortorulou.

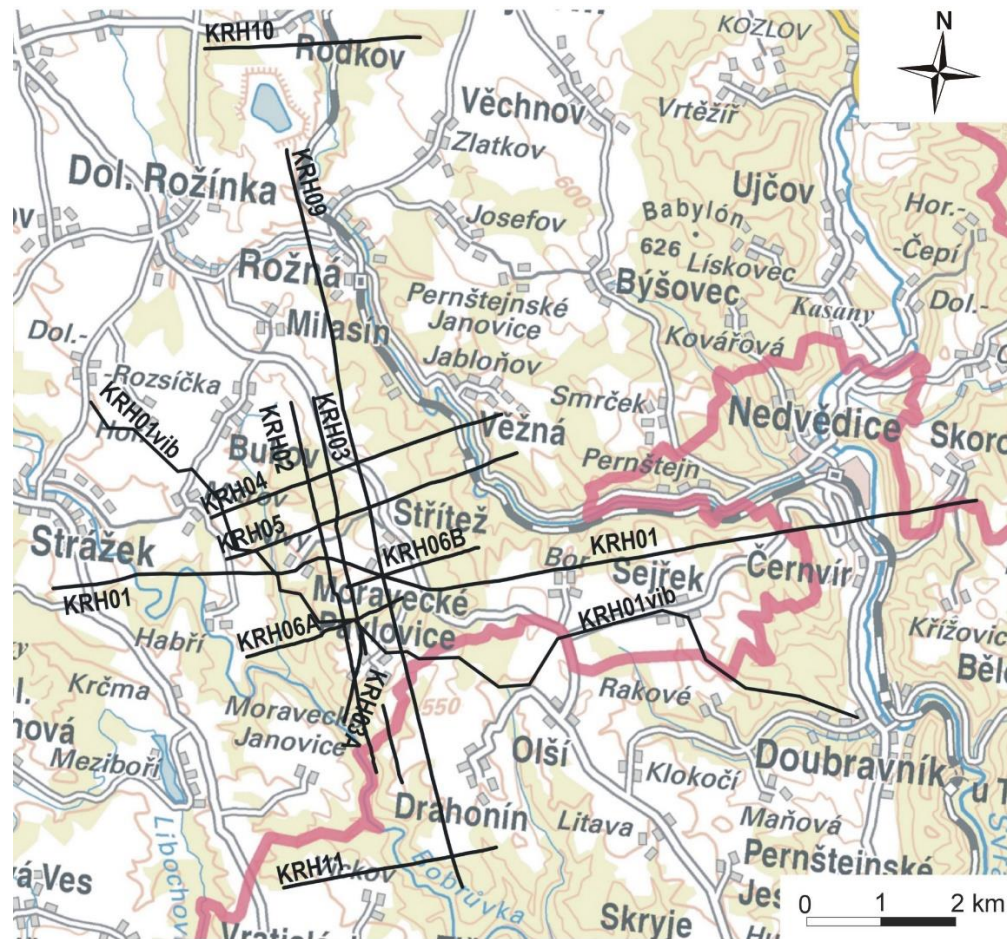
3. Metodika měření

V první etapě prací (2017-2018) byly na lokalitě proměřeny celkem 3 geofyzikální profily: KRH-03, KRH-04 a KRH-05 (obr. 3). V rámci druhé etapy (2018-2019) byly proměřeny další 4 geofyzikální profily (KRH-01, KRH-02, KRH-06A a KRH-06B). V rámci 3. etapy prací (2019) byly

Pro výzkum hlubší stavby byla využita metoda TDEM (Time-Domain Elektromagnetic Method) a reflexní seismika s vibračním zdrojem. TDEM je elektromagnetická metoda, která využívá časovou doménu elektromagnetického pole, tzn. sleduje změnu elektromagnetického pole v čase (metoda přechodových jevů). Podle Faradayova zákona primární magnetické pole indukuje v zemi (ve vodičích) sekundární elektrické pole (vířivé proudy) a charakter horninového prostředí můžeme určit zaznamenáním sekundárního magnetického pole těchto elektrických proudů. Aparatura sestává ze dvou částí – vysílače generujícího elektromagnetické pole s definovaným pulsem (silný proudový impuls o dané amplitudě a délce) a přijímačem.

Vysílač i přijímač mají zpravidla tvar smyčky a mohou být použity v několika variantách daných velikostí vysílací a přijímací cívky a jejich vzájemnou polohou. Sledována je časová změna indukovaného magnetického pole v horninovém prostředí bezprostředně po vypnutí proudu jako změna indukovaného napětí v přijímači. Indukované napětí s rychlou vybíjecí křivkou indikuje nevodivé prostředí (vysoký odpor), naopak vodivější polohy (nízký odpor) jsou charakteristické pomalejším poklesem indukovaného napětí. Terénní měření byla realizována aparaturou Abem WalkTEM s vysílací cívkou 100 x 100 m a měřicími cívkami 10 x 10 m a 0,5 x 0,5 m. Data byla zpracována za pomoci programu SPIA, který je vyvíjen v dánské společnosti Aarhus GeoSoftware a zobrazena v programu Surfer (Levý et al., 2019).

Seismická měření byla prováděna ve variantě reflexní seismiky, která umožňuje sledovat jednotlivé subhorizontální reflexy a vymežit rozhraní litologických vrstev v pánevních sedimentárních strukturách, okraje homogenních masívů a silně porušené tektonické násunové plochy. Jako zdroj byl použit systém SIST (swept impact seismic technique) v modifikaci firmy Vibrometric Oy pod označením VIBSIST-100. Jedná se o konvenční bourací kladivo s kinetickou energií 1000 J/impuls regulované hydraulickým blokem, který je schopen reagovat na instrukce programovatelné řídicí jednotky. Měření bylo prováděno 24-bitovou seismickou aparaturou SEISMIC INSTRUMENTS U*node se 192 digitálními snímači SMG osazenými měřicími elementy SM-24HS. Jedná se o distribuovaný nodální systém, kdy je ke každému registračnímu (a současně napájecímu) uzlu připojeno 24 kanálů. Data z registračních uzlů jsou do řídicího



Obr. 3 Pozice profilů geofyzikálního měření

počítače přenášena bezdrátově. Synchronizace jednotlivých uzlů a řídicího počítače je prováděna na základě času GPS (každý časový vzorek záznamu je opatřen časem v průběhu registrace). Měření na všech profilech bylo provedeno v nesymetrickém středovém uspořádání s krokem snímačů 5 m a krokem zdrojů 10 m. Registrováno bylo na 168 – 192 aktivních snímačích, v ojedinělých případech překonávání komunikací byl počet aktivních kanálů snížen na omezení počtu snímačů v rámci překážku křížícího registračního uzlu. Při tomto uspořádání je dosaženo 36-48násobného překrytí v případě 168 aktivních geofonů, resp. 48násobné překrytí pro 192 aktivních geofonů. Zpracování seismických řezů bylo provedeno programovým balíkem GLOBE Claritas standardními postupy pro 2D reflexní seismiku.

Pozemní gamaspektrometrická měření byla realizována na všech profilech aparaturou GT-40 (Georadis s.r.o.). Spektrometr (1024 kanálový) s rozlišovací schopností 200 ns byl vybaven vysoce citlivým detektorem NaI(Tl) a na celé délce profilů byl registrován kontinuální záznam (v režimu survey) úhrnné aktivity gama ($\text{imp}\cdot\text{s}^{-1}$) a s krokem 200 m bodové měření obsahu přirozených radioaktivních prvků K (%), eTh (ppm) a eU (ppm). Celkem bylo odměřeno 294 bodů. Aparatura GT-40 je vybavena přesným GPS záznamem, takže každý bod měření obsahuje údaje o poloze. Pro interpretaci pozemního měření byla využita archivní data měření na horninových vzorcích z databáze ČGS, nová laboratorní měření (Hanák et al., 2017) a měření „in situ“ na výchozech v terénu shodnou aparaturou GT-40.

4. Výsledky měření

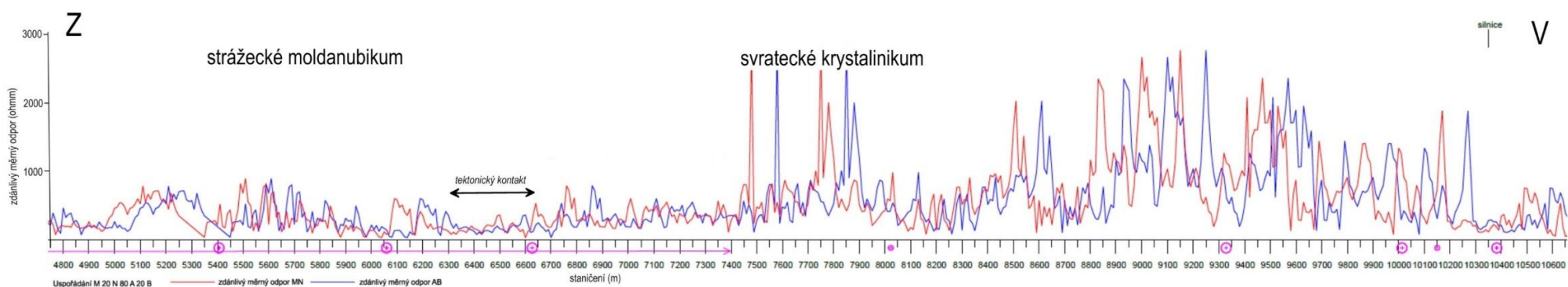
Pro sledování regionální geologické stavby a kontaktu jednotlivých jednotek bylo určeno geofyzikální měření na páteřním profilu KRH01. Metoda DOP poskytla údaje (s ohledem na použité roztažení) do hloubky přibližně 30 metrů. Zjištěné měrné odpory jsou v obecném pohledu překvapivě nízké, typicky se pohybují kolem 500 Ωm (fialová šipka na ose x v obr. 4), což je hodnota pod předpokládanými tabulkovými hodnotami pro krystalinické horniny. Tento fakt může být způsoben např. hluboce porušeným horninovým masivem již od prvních metrů. Strážecké moldanubikum se projevuje relativně nízkými odpory s hodnotami 300-500 Ωm . Alespoň částečně vysokoodporové (> 1 000 Ωm) se jeví pouze migmatity svrateckého krystalinika (obr. 4 mezi metráži 7500-10300).

Hranice mezi strážeckým moldanubikem a svrateckým krystalinikem (obr. 4) se projevuje mezi metráži 6300-6700 jako nízkoodporová zóna nad tektonicky porušenými amfibol-biotitickými pararulami s amfibolity (ověřené pozemní magnetometrií) strážeckého moldanubika a ortorulami svrateckého krystalinika. Jedná se o cca 350 metrů široké pásmo, kde amfibolity i ortoruly mají měrné odpory do 200 Ωm (oproti ortorulám na metráži 10400-11100, kde jsou hodnoty 500-700 Ωm). Odpory s hodnotou okolo 500 Ωm byly naměřeny také na západním okraji svrateckého krystalinika v metráži 6700-7400, což odpovídá spíše ortorulám než podle geologického mapování migmatitům.

Metody pro sledování hluboké geologické stavby (TDEM a reflexní seismika) byly realizovány na slalom-line profilu KRH01vib, který v úseku metráží 3000-10000 byl víceméně jižněji lokalizovaným souběžným profilem s KRH01 (obr. 3). Část časového seismického řezu KRH01vib (metráž 4900-8400) s vyznačenými interpretovanými hloubkami proměnnými podél profilu a odporový řez TDEM (s vyznačenými odpory) je prezentována na obr. 5. Interpretace, pro kterou bylo využito geologické mapování na povrchu, ukazuje, že granulitové těleso drahonínského masívu je z východu ohraničeno tektonicky mezi metráži 5600-5700. V hloubce 200-400 m existuje subhorizontální vrstva s nižšími odpory 500-600 Ωm (deformační zóna?). Od metráže 6000 až 7300 následuje široká zóna výrazných nehomogenit projevujících se jak v seismice tak i metodě TDEM. Výrazné subhorizontální reflexy (červená tečkovaná čára v obr. 5) do hloubek

300 m by mohly odpovídat silně porušené přípovrchové vrstvě. V metrů 6000-6600 se pravděpodobně jedná o silně zvětralou (příp. jílovitou) vrstvu, což může indikovat amfibolity, při povrchu jílovitě zvětrávající. Kontakt strážeckého moldanubika s východněji situovanou jednotkou svrateckého krystalinika zastižený na staničení 6600 až 7300 se projevuje řadou subvertikálně porušených reflexů (červená čárkovaná čára v obr. 5) a širokou nízkoodporovou zónou (200 Ω m). Na hranici obou jednotek zapadá řada indikací tektonických poruch pod strmými úhly k ZJZ a k VSV, což by naznačovalo, že se jedná o složitou tektonickou a deformační zónu.

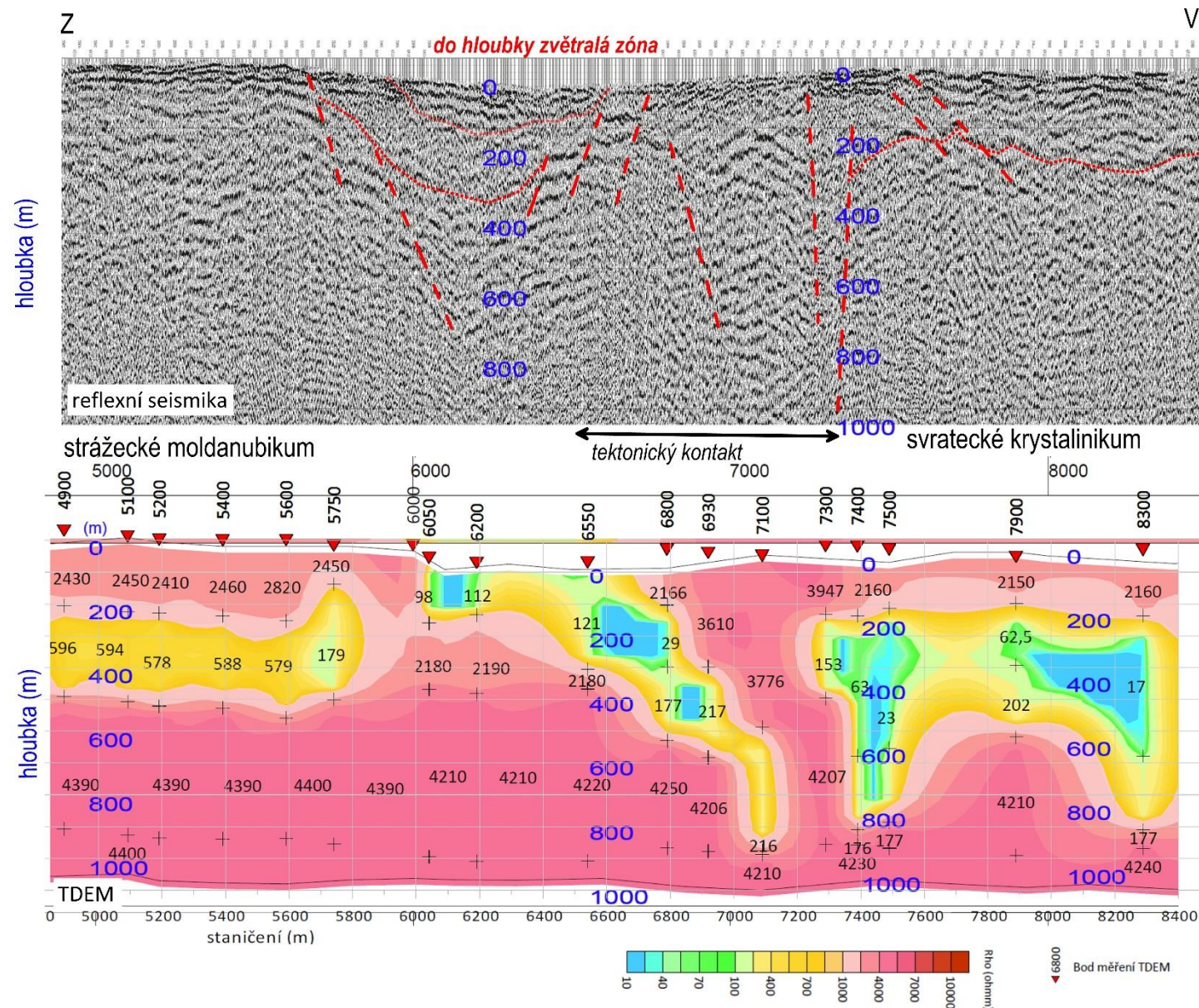
Vysoká četnost těles kontrastních litologií v pararulách (amfibolity) a migmatitech (ortoruly) vymapovaná na povrchu indikuje jejich pravděpodobně vysokou četnost také v hlubších částech horninového masivu. Vzhledem k jejich relativně malé mocnosti, výrazné a superponované deformaci (vrásové stavbě) a kontrastním reologickým vlastnostem hornin je však velmi obtížné odhadovat dosah, mocnost a přesnou lokalizaci kontrastních litologií ve vertikálním měřítku.



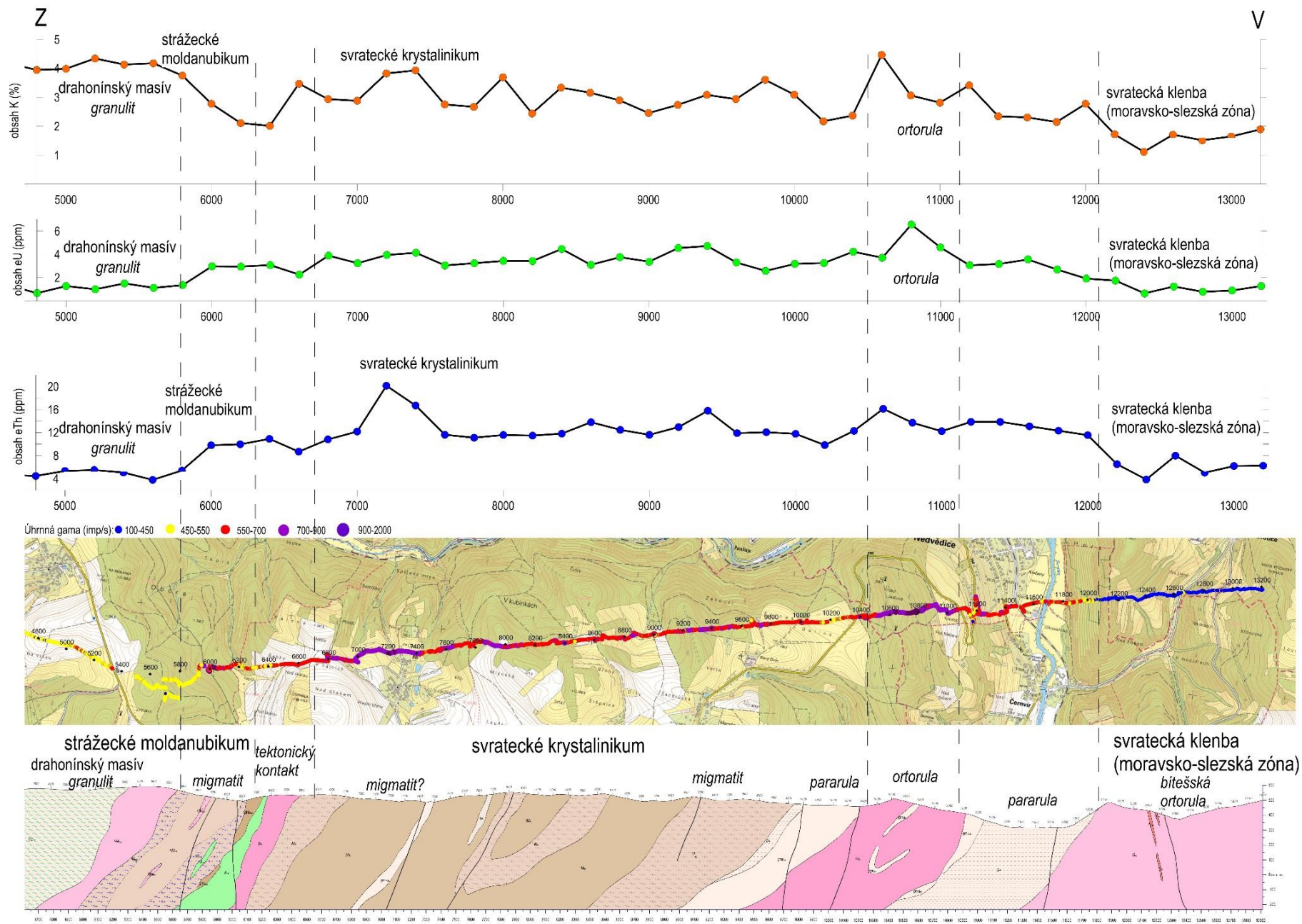
Obr. 4 Výsledky měření DOP na profilu KRH01 (indikace tektoniky – fialové kroužky)

Měření pozemní gamaspektrometrie přineslo v zájmové oblasti velmi dobré výsledky pro vymapování jednotlivých horninových typů na povrchu. Z archívních informací, laboratorních měření na vzorcích i na výchozech v terénu jsou dobře známy obsahy přirozených radioaktivních prvků v jednotlivých litologiích. Durbachity v jižní části studované oblasti mají nejvyšší radioaktivitu s obsahy 4-5 % K, 10 ppm eU, 30-45 ppm eTh. Vyšší radioaktivitu mají také ortoruly strážeckého moldanubika (2,5-3 % K, 3-4 ppm eU, 14-16 ppm eTh) i ortoruly v rámci svrateckého krystalinika (2-2,5 % K, 3-4 ppm eU, 12-16 ppm eTh). Migmatity mají průměrné hodnoty obsahů K okolo 3 %, eU 5 ppm a eTh v intervalu 10-14 ppm. Felsické granulity jsou charakteristické nižšími hodnotami radioaktivity, především eTh (do 8 ppm) a eU (1 ppm). Velmi nízké hodnoty mají bazické horniny, amfibolity (1 % K, 0,5-1 ppm eU, 1-3,5 ppm eTh) a serpentinizované peridotity (0,01 % K, 1,5 ppm eU, 0,1 ppm eTh).

Páteční profil KRH-01, který procházel ve směru V-Z přes celé zájmové území z hornin strážeckého moldanubika do svrateckého krystalinika a na konci i do svratecké klenby moravsko-slezské zóny, ukazuje litologickou variabilitu území. Pro strážecké moldanubikum na západě je typické střídání relativně monotónních hodnot okolo 2-2,5 % K, 3 ppm eU a 10-13 ppm eTh, které lze přiřadit k migmatitům, a nízkých hodnot odpovídajících amfibolitu (1 % K, 1 ppm eU a 4 ppm eTh). Jeho východní část (od granulitů drahonínského masívu až po ortoruly svratecké klenby) je variabilnější a je prezentována na obr. 6. Od staničení 4500 se projevují až do staničení 5800 nízkými hodnotami eTh (4-6 ppm) a vysokými hodnotami K (4 %) felsické granulity. Dál k východu se hodnoty eTh a eU mírně zvyšují a obsahy K snižují na 2 %, což odpovídá migmatitům strážeckého moldanubika (nízkými hodnotami úhrnné aktivity gama na staničení 6200-6400 jsou indikovány patrně amfibolity). Na kontaktu s horninami svrateckého krystalinika, od staničení 6600 dochází ke zvýšení obsahu draslíku (nad 3 %). Mezi staničením 7000 a 7400 dochází



Obr. 5 Výsledky měření reflexní seismiky a TDEM na profilu KRH01



Obr. 6 Výsledky gamaspektrometrického měření na profilu KRH01

také k nárůstu eTh až na 20 ppm, 4 ppm eU a 3,5 % K, což by mohlo odpovídat ortorulám svrateckého krystalinika. Tento nárůst radioaktivity je vidět také v kontinuálním měření celkové radioaktivity v režimu survey. Od staničení 7600 jsou průměrné hodnoty K (2,5 %), eU (3-4 ppm) a eTh (12 ppm) odpovídající migmatitům porušovány pouze nárůstem hodnot v místech ortorul (staničení 9400, 10600). Prudká změna nastává od staničení 12100, kdy radioaktivita prudce klesá na hodnoty 1,5 % K, 1 ppm eU a 6 ppm eTh. Takto výrazný kontakt je mezi svrateckým krystalinikem a moravsko-slezskou zónou (svratecká klenba) reprezentovanou bítešskou ortorulou.

Pro srovnání s vymapovanou geologickou situací na povrchu je v obr. 5 prezentován i předpokládaný geologický řez podél východní části profilu KRH-01. Pro metráž 7000-7400, která je charakteristická zvýšenými hodnotami přirozené radioaktivity, je patrné, že geologické mapování neodpovídá naměřeným údajům. Jedná se o údolí a zastavěnou oblast (obce Bor), lze tedy předpokládat, že zde chybí výchozy a geologické mapování nemá informace o horninovém podloží. Gamaspektrometrické měření se tak stává klíčovou metodou pro rychlé a efektivní stanovení charakteru horninového prostředí. Stejná situace je i pro metráže 9400 a 10600.

5. Závěr

Geofyzikální měření na lokalitě Kraví hora umožnilo ověřit vhodné metody pro odlišení kontaktu dvou jednotek, které jsou tvořeny podobnou litologickou stavbou a společným tektonometamorfním vývojem a tedy z hlediska geologického mapování je vymezení jejich hranice problematické.

Jako nejefektivnější se jeví metoda pozemní gamaspektrometrie, která poukázala na nejednoznačné výsledky geologického mapování. Velmi dobře odlišila ortoruly ve svrateckém krystaliniku (vysoké obsahy eTh), vymapovala úzké polohy amfibolitů ve strážeckém moldanubiku a omezila těleso granulitu drahonínského masivu (nízký obsah K).

Odporová metoda dipólového profilování potvrdila tektonický kontakt strážeckého moldanubika a svrateckého krystalinika jako širokou tektonicky porušenou zónu.

Nové poznatky přinesly metody s hlubokým dosahem – elektromagnetická metoda TDEM a reflexní seismika. Vymapovaly kontakt obou jednotek do hloubky cca 1 km jako širokou tektonicky postiženou zónu se strmým úklonem k ZJZ a VSV a dílčími deformacemi. Především v metodě TDEM se ukázala zajímavá informace ohledně vrstvy snížených odporů v hloubkách 200 – 400 m pod drahonínským masívem, kterou nelze z dosud známých informací jednoznačně interpretovat.

Poděkování

Příspěvek byl zpracován za podpory projektu SÚRAO „Výzkumná podpora pro bezpečnostní hodnocení hlubinného úložiště“ a prací České geologické služby v rámci Zadávacího listu: „Geologická interpretace terénních geofyzikálních dat pro aktualizaci 3D strukturně-geologických modelů potenciálních lokalit HÚ“, a dále v rámci projektu ČGS č. 310940 (Strategický výzkumný plán DKRVO/ČGS 2018–2022).

Literatura

- HANÁK, J., CHLUPÁČOVÁ, M., ONDRA, P., HROUDA, F., SOSNA, K., ŽIŽKA, J., KAŠPAREC, I., DĚDEČEK, P. *Stanovení petrofyzikálních charakteristik horninového prostředí pro území potenciálních lokalit HÚ. ZZ 103/2017, MS SÚRAO, Praha 2017 MS*
- LEVÝ, O., FILIPSKÝ, D., GRINČ, M. *Geofyzikální výzkum hlubokých struktur s geometrie horninového masívu. Závěrečná zpráva. TZ 440/2019, MS SÚRAO, Praha 2019 MS*
- VERNER, K., BURIÁNEK, D., VRÁNA, S., VONDROVIC, L., PERTOLDOVÁ, J., HANŽL, P., NAHODILOVÁ, R. Tectonometamorphic features of geological units along the northern periphery of the Moldanubian Zone (Bohemian Massif). *Journal of Geosciences*, 54, 87–100. 2009
- PERTOLDOVÁ, J., VERNER, K., VRÁNA, S., BURIÁNEK, D., ŠTĚDRÁ, V., VONDROVIC, L. Comparison of lithology and tectonometamorphic evolution of units at northern margin of the Moldanubian Zone: implications for geodynamic evolution in the northeastern part of the Bohemian Massif. *J. Geosciences* 55, 299–319. 2010
-

Autoři:

¹ RNDr. Zuzana Skácelová, Česká geologická služba, Erbenova 348, 790 01 Jeseník, zuzana.skacelova@geology.cz

² RNDr. Kryštof Verner Ph.D., Česká geologická služba, Klárov 3, 118 21 Praha 1, krystof.verner@geology.cz

³ Mgr. Jaroslav Jirků Ph.D., G IMPULS s.r.o., Přístavní 24, 170 00 Praha 1, jirku@gimpuls.cz

⁴ RNDr. Oldřich Levý, INSET s.r.o., Lucemburská 1170/7, 130 00 Praha 3, levy.oldrich@inset.com