

GEOFYZIKÁLNÍ METODY V KENOZOICKÝCH HYDROGEOLOGICKÝCH STRUKTURÁCH

GEOPHYSICAL METHODS IN THE CENOZOIC HYDROGEOLOGICAL STRUCTURES

Zuzana Skácelová¹, Jan Vít², Tomáš Hroch³, Miloš Karous⁴, Pavel Nikl⁵, Milan Hrutka⁶, Robert Votoček⁷

Abstrakt

V rámci projektu České geologické služby „Rebalance zásob podzemních vod ve vybraných oblastech České republiky“ byly komplexem geofyzikálních metod proměřeny vybrané lokality pro nalezení či ověření hydrogeologických struktur. Pro lokality Káraný, Budiměř a Štěpánovice byla aplikována měření, která měla zjistit mocnosti kenozoických sedimentů, jejich charakter, tektonické poruchy popř. pohřbená paleokoryta do hloubek cca 100 m. Hlavními metodami komplexu geofyzikálních metod byla geoelektrická odporová a seismická měření vhodně doplněná elektromagnetickou metodou. Dobře zvolená metodika zajistila jednoznačné výsledky, které bylo možné využít pro sestavení finálního geologického koncepčního modelu.

Abstract

The complex of the geophysical methods were used for the hydrogeological survey in the selected localities in the frame of the project „Groundwater balance in the selected area of the Czech Republic “ led by Czech Geological Survey. Geophysical measurements on the Káraný, Budiměřice and Štěpánovice localities had to find out the thickness of the Cenozoic sediments, its character, faults eventually buried stream channel to the depth about 100 m. The principal methods were electrical (resistivity) and seismic survey suitably add an electromagnetic method. Well-chosen methodology provide unambiguous results, which were used for the final geological conceptual model.

Klíčová slova

Geofyzikální metody, geoelektrika, seismika, hydrogeologická struktura, kenozoické sedimenty, geologický model, Káraný, Budiměřice, Štěpánovice

Keywords

Geophysical methods, resistivity, seismic, hydrogeological structure, Cenozoic sediments, geological model, Káraný, Budiměřice, Štěpánovice

1 Úvod

Geofyzika je jednou z vůdčích metodik při řešení geologických struktur v prostorovém obraze. Projekt České geologické služby v letech 2011 – 2015 „Rebilance zásob podzemních vod ve vybraných oblastech České republiky“ (dále jen „Rebilance“) měl za úkol přepočítat zásoby podzemních vod ve vybraných hydrogeologických rajónech na základě průzkumu hydrogeologických struktur a přehodnocení podle současného kvantitativního a chemického stavu pro stanovení udržitelného odběru. V rámci tohoto projektu byl proto také geofyzikální průzkum aplikován na vybraných lokalitách kvartérních i základních hydrogeologických rajónů pro řešení koncepčních hydrogeologických modelů kenozoických sedimentů (Hrutka – Votoček 2015, Karous – Nikl 2015a, 2015b). Úkolem bylo zjistit mocnost kenozoických štěrků a štěrkopísků, průběh tektonických poruch v podloží, popř. existenci starých (pohřbených, přehloubených) říčních koryt. Jako základní metody geofyzikálního průzkumu byly zvoleny odporové sondování a profilování a seismika, které reflektují kontrasty v měrných odporech a seismických rychlostech sedimentů a jejich křídového popř. krystalinického podloží. Detailní komplexní geofyzikální měření na lokálních plochách bylo koncipováno tak, aby jednotlivé zvolené geofyzikální metody mohly nalézt lokální hydrogeologické struktury do hloubek v rozsahu 10 až 500 m. Tato data byla propojena s informacemi archivních i nově realizovaných vrtných prací, která umožnila přesnou korelaci výsledků. Geofyzikální průzkum byl rozdělen do několika kategorií v závislosti na hloubkovém dosahu. Mělká měření ověřila rozsah, hloubku a charakter sedimentů např. kvartéru Labe (lokalita Káraný), urbanické brázdy (lokalita Budiměřice) a kenozoických sedimentů kuřimské kotliny (lokalita Štěpánovice). Středně hluboká a hluboká měření lokalizovala především tektonické poruchy a sedimentární deprese křídových kolektorů v Čechách a kenozoických sedimentů na Moravě.

Plošná geofyzikální měření byla často situována na plochu jímacího území. Např. pro plochy Káraný a Budiměřice byly výsledky geofyzikálních měření využity jak pro sestavení modelu hydrogeologické struktury v kvartérních sedimentech jednotlivých teras, tak i pro hlubší křídový kolektor.

2 Použité metody

Kenozoický pokryv je tvořen většinou nezpevněnými kvartérními říčními a jezerními sedimenty, sprašovými hlínami, a směrem do hloubky přechází do zvětralinového pláště, tzv. eluvia. Z hlediska propustnosti bývají sedimenty díky vysoké porózitě dobrým kolektorem podzemní vody (kromě jílovitých hlín a velmi jemných pelitických sedimentů – spraše, jíly). Eluvium krystalických hornin (vyvřeliny, metamorfity) v případě mechanického zvětrávání je písčité a propustné, leckde i ve značné mocnosti. Tyto mělké rozsáhlé zvodně ve zvětralinách bývají propojeny s podzemními vodami v puklinových systémech podložních hornin. V případě chemického zvětrávání díky kaolinizaci živců však vznikají jílové minerály a pokryvné útvary (případně i eluvium) mají malou propustnost a vyšší vodivost. Pro odlišení litologických vrstev, které v jednotlivých lokalitách dosahovaly mocnosti od několika až po stovky metrů, byly v rámci projektu „Rebilance“ realizovány tyto metody povrchové geofyziky:

- metody geoelektrické (VES – vertikální elektrické sondování, OP – odporové profilování popř. při detailních měřeních ERT – odporová tomografie (electrical resistivity tomography),

- metody seismické (refrakční a reflexní seismické měření),
- gravimetrie (plošná i profilová),
- metody elektromagnetické (VDV – metoda velmi dlouhých vln, DEMP – dipólové elektromagnetické profilování) a pro vymezení rozsahu mělkých přípovrchových kolektorů georadar.

3 Výsledky měření

Lokalita Káraný (povodí Labe)

Významnou hydrogeologickou strukturu představuje na soutoku Jizery a Labe velmi rozsáhlý a mocný fluviální kužel mezi Starou Boleslaví a Lysou nad Labem, o kterém se zmiňuje jako o jizerské deltě již Žebera (1949). Povrch akumulace mezi Otradovicemi a Dvorci leží ve výšce 185 – 187 m n. m. nad nivou Jizery, zatímco v úrovni soutoku obou řek, mezi Káraným a z. okrajem Lysé nad Labem spočívá 180 – 181 m n. m. Mocnost zmíněného kuželu je velmi variabilní, lokálně v místech přehloubených koryt dosahuje více jak 20 m. Akumulaci tvoří světle hnědé, výrazně zvrstvené písky se štěrkem a písčité štěrky. Nejspíše jde o sedimenty ukládané v prostředí divočího toku nebo na povrchu velmi plochého výplavového kuželu, který se formoval v důsledku náhlého zmírnění gradientu původní řeky (Jizery) v místě vyústění do ploché oblasti labské nivy a to na přechodu ze středního do svrchního pleistocénu. Tento kužel začíná v údolí Jizery zhruba při jz. okraji obce Tuřice a poměrně rychle se široce rozevírá směrem k vlastnímu soutoku. Na hranici s labskou nivou, nebo s jeho nejmladšími fluviálními stupni, dosahuje mezi sz. okolím Staré Boleslavi, Káraným a Lysou nad Labem šířky asi 11 km. Celistvost této mohutné akumulace porušila ve směru S-J, teprve pozdější eroze Jizery. Povrch i báze fluviálního kužele zvolna klesá od S k J směrem

k toku Labe. Pod kvartérem vystupují křídové platformní sedimenty o mocnosti do 100 m (z toho cca 20 m cenomanské pískovce kolektoru A), v podloží křídý jsou horniny staršího paleozoika. Okrajovou podmínku pro kvartérní hydrogeologické rajony představuje předpokládaný průběh tzv. labského lineamentu probíhajícího v korytě Labe.

Geofyzikální měření byla situována mezi Káraným, Brandýsem nad Labem, Starou Boleslaví a Hlavencem (obr. 1). Na území byly proměřeny 3 profily o celkové délce 13,5 km. Použity byly geoelektrické metody (odporové profilování v symetrickém uspořádání Wennerově s uspořádáním A20M20N20B, VES s interpretovaným odporovým řezem do hloubek 40 m a na vybraných úsecích profilů metoda ERT) a mělká refrakční seismika. Odporů kvartérních sedimentů ležely ve velmi široké škále od desítek Ωm pro jílovité hlíny až po vyšší tisíce Ωm pro suché čistě kvarcitické písky. Stejný široký rozsah měly i křídové sedimenty (turonské jílovce, slínovce 16 – 20 Ωm , střídání cenomanských jílovců, pískovců a slepenců 50 – 60 Ωm). Krystalinikum bylo zde zastoupeno paleozoickou břidlicí s odporů 50 – 100 Ωm .

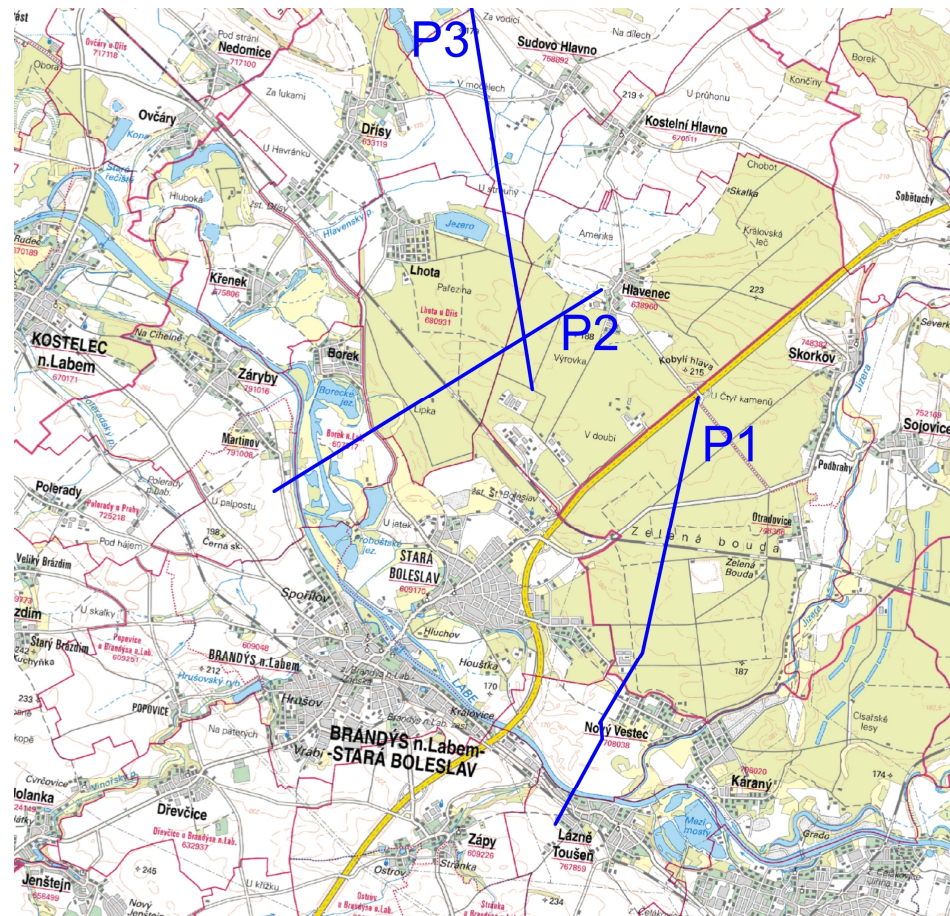
Pokud vlhké hlíny o nižších odporech leží nad čistými písky, je snadné měření realizovat (uzemnění proudových elektrod je příznivé, dostatečné zdrojové proudy). V případě, že suché písky s vysokým odporem vycházejí na povrch, pak tato vrstva nepříznivě ovlivňuje

hloubkový dosah metody VES i ERT, kdy je obtížné překonat měrný odpor povrchové vrstvy a dosáhnout požadované hloubky pro dané roztažení proudových elektrod.

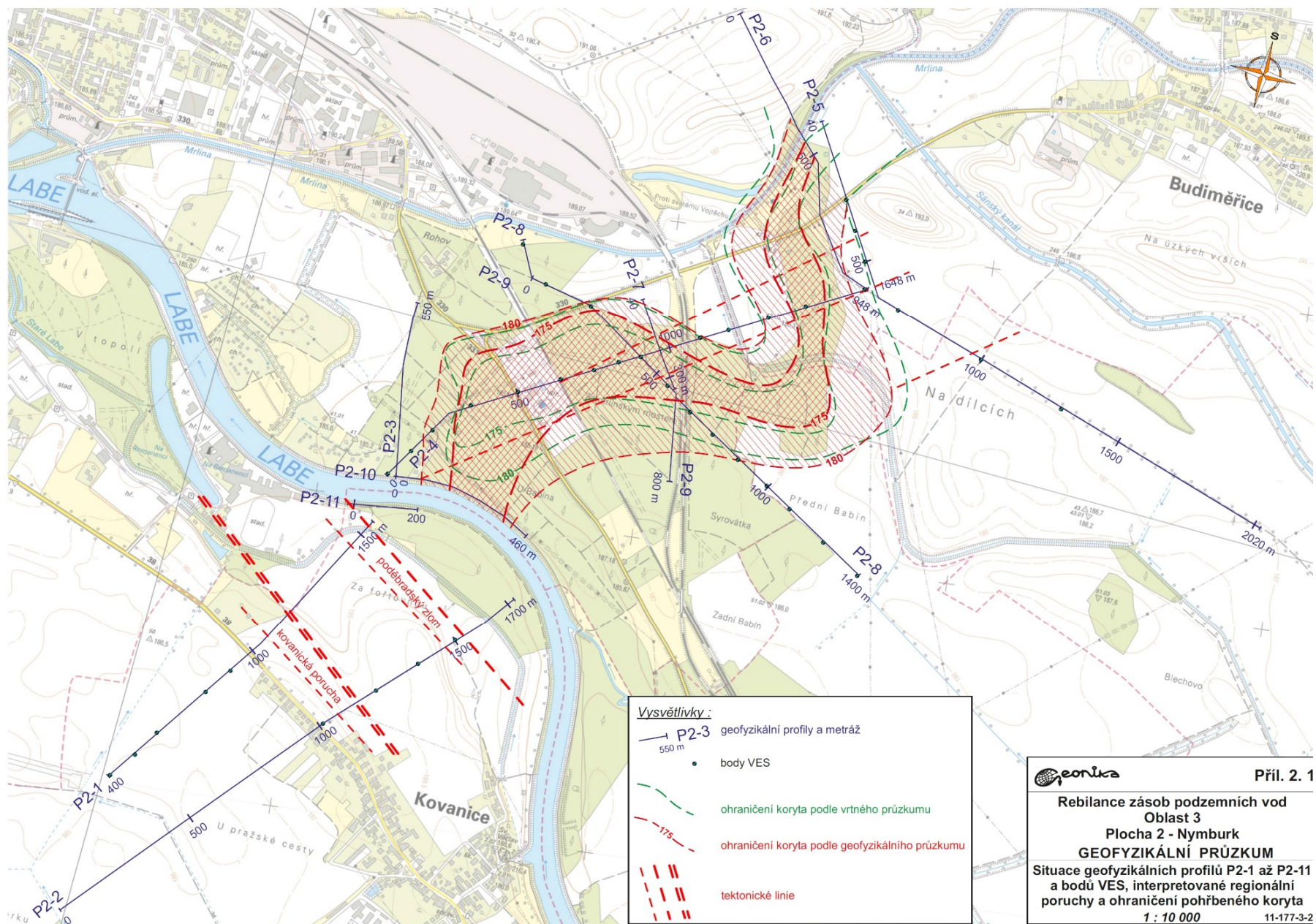
Základní informace o litologii kvartéru na profilech přineslo kontinuální odporové profilování. Na profilu P1 (obr. 2) byla metodou OP a VES interpretována jednotlivá litologická a geologická rozhraní až do hloubky 100 m. Podle interpretace VES se zde mění mocnost kvartéru v rozmezí 14 – 24 m. Na základě odporů byly rozlišeny dvě sedimentace; jemnozrnnější s větším podílem jílovité složky a čisté kvarcitické písky. Podloží kvartéru tvoří od počátku profilu turonské slínovce, které směrem k jihu vyklíňují a v podloží k povrchu vystupují cenomanské pískovce spolu s elevací paleozoických metamorfovaných hornin. V korytě Labe je celý sled porušen zlomem. Asi uprostřed profilu P1 se na křivce OP projevilo snížením odporů o více než řád široké vodivé pásmo. Metoda ERT ukázala (obr. 3), že se jedná o přerušení poloh mělkých kvartérních štěrkopísků (červená až hnědá barva, odpovídající vysokým měrným odporům indukujících hrubozrnné sedimenty). V tomto intervalu vychází na povrch křídové jílovce. Interpretací geofyzikálních měření byl upřesněn průběh báze kvartéru a podle měrných odporů byly vymezeny vrstvy s podobnou litologií sedimentů, která je dána zrnitostí a čistotou kvarcitické složky a nasycením vodou:

- a) suché čisté kvarcitické štěrkopísky (odpory kolem 1 000 Ωm),
- b) písky s nižším (odpory 500 Ωm) či vyšším jílovitým podílem (100 Ωm)

V rámci fluviálního kužele jsou zřetelná paleokoryta, ve kterých se mocnost štěrkopískových sedimentů pohybuje až okolo 20 m. Pruh větších mocností kvartéru a hlavně o vyšších odporech (suché čisté písky až štěrkopísky) probíhá v šířce asi 2 km západním směrem do oblasti mezi Starou Boleslav a Hlavenec. Od dnešního toku Labe je oddělena křídovou elevací, která byla zjištěna severně od Nového Vestce. Podle odporových řezů byla potvrzena existence tektoniky labského lineamentu a tato porucha byla přesně lokalizována. Další paralelní porucha byla vymapována asi 400 až 500 m severovýchodně od labského lineamentu.



Obr. 1 Mapa lokality Káraný s vyznačením měřených profilů



Obr. 4 Mapa lokality Budiměřice s vyznačením měřených profilů, interpretovanou pozicí paleokoryta řeky Mrliny a tektonickými poruchami ve směru SZ-JV – kovanický a poděbradský zlom (Karous – Nikl 2015b)

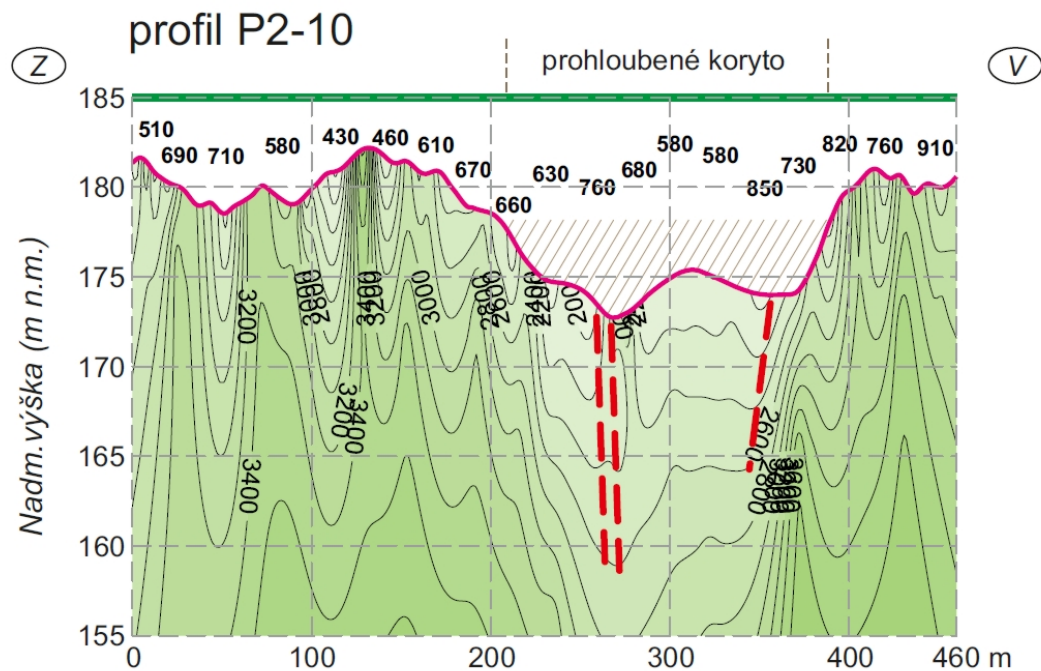
Lokalita Budiměřice (povodí Labe)

V 70. letech min. stol. byla mělkým vrtným průzkumem zjištěna anomální akumulace kvartérních šterkopískových uloženin při soutoku Mrliny a Labe. Nárůst mocnosti sedimentů představuje zahluobené (pohřbené) paleokoryto Mrliny. V této akumulaci, která je v ose koryta mocná až 12 m, je založeno jímací území. Podle vrtného průzkumu nebylo jasné, zda paleokoryto pokračuje, protože esovitý charakter koryta byl ukončen hrází (pravděpodobně kvůli nepřesnému údaji v jednom archivním vrtu). Křídové sedimenty, vystupující v podloží kvartérních sedimentů, jsou porušeny významnou tektonickou zónou – poděbradským zlomem, který je sz. pokračováním železnohorského zlomu – zlomu 1. řádu. Na tuto tektonickou zónu jsou geneticky vázány minerální vody poděbradské balneologické struktury.

Na lokalitě bylo vytyčeno 11 profilů o celkové délce 10,8 km (obr. 4). Z geoelektrických metod byly použity stejnosměrné odporové metody v profilové (DOP) a sondážní verzi (VES). Metoda VES s maximálním roztažením proudových elektrod $AB_{\max} = 720$ m zajistilo maximální hloubkový dosah cca 200 m. Seismická měření byla provedena ve dvou variantách: a) mělké refrakční seismiky MRS a v hlubší variantě metodou b) reflexní seismiky (RXS).

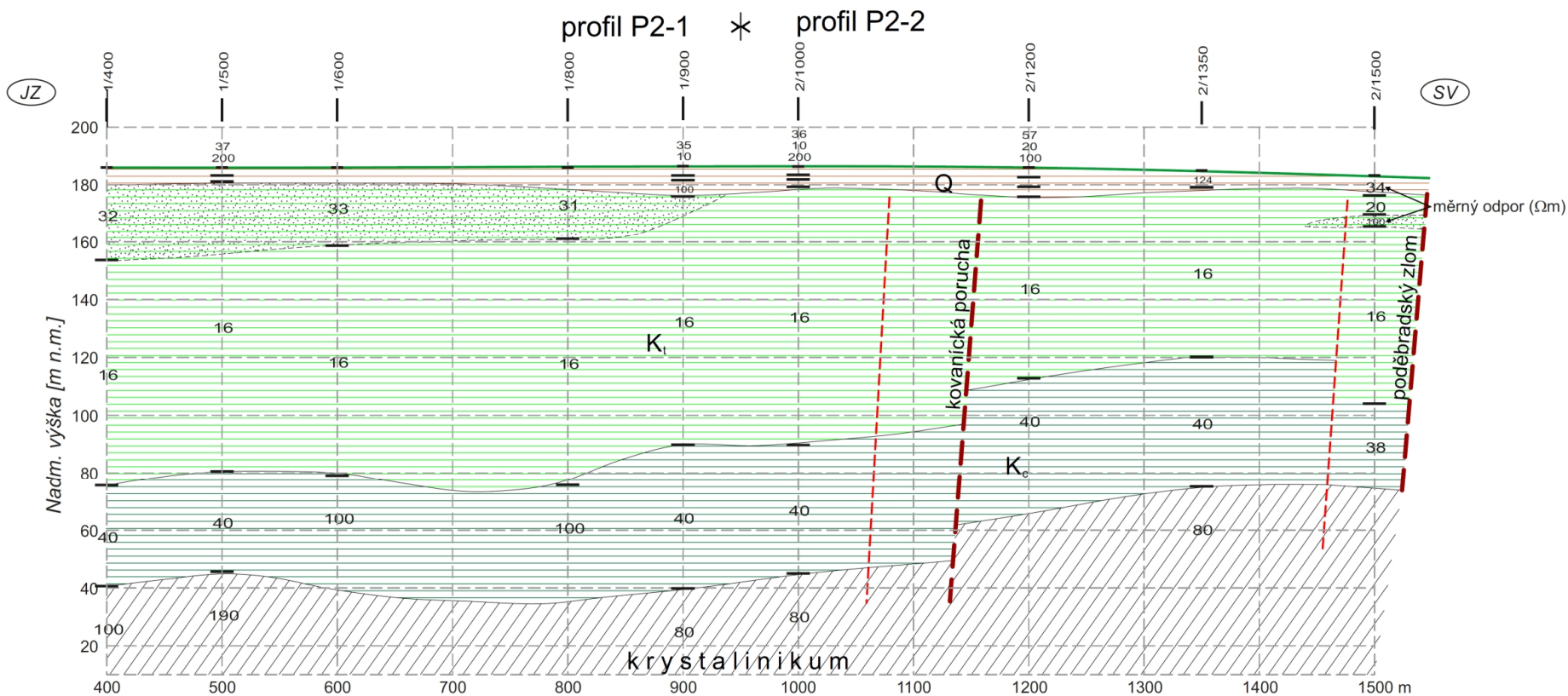
Interpretace geofyzikálního měření přinesla zásadní informace o pozici a pokračování zahloubeného (pohřbeného) paleokoryta řeky Mrliny jižně od Nymburka (obr. 4). V odporovém profilování se koryto projevuje jen mírně zvýšenými zdánlivými měrnými odpory nad 30 Ωm . Protože lze předpokládat, že paleokoryto je vyplněno hrubozrnnějšími fluvialními sedimenty s vyššími odpory výrazně přesahujícími 50 Ωm až ke 200 Ωm , byla aplikována sondážní verze odporových metod – metoda VES, která je více citlivá na změny mocností sedimentární vrstvy. V této metodě se přehloubené koryto projevilo zřetelněji. Velmi dobře je vidět přehloubené koryto v seismických řezech MRS (obr. 5). Mladé kvartérní fluvialní sedimenty mají menší seismické rychlosti (kolem 500 ms^{-1}) než starší křídové slínovce (slinité jílovce) s rychlostmi přes 2 000 ms^{-1} . Výrazný kontrast rychlostí vytváří jasné seismické rozhraní na reliéfu podložních jílovců.

V původních geologických pracích toto koryto nebylo propojeno na současné koryto Labe, teprve až geofyzikální průzkum potvrdil pokračování této struktury k jz.



Obr. 5 Výsledky a interpretace refrakční seismiky (nalezené paleokoryto řeky Mrliny) na profilu 10 (Karous – Nikl 2015b)

Metodou DOP se podařilo vyhledat místa s vodivostními anomáliemi, které pravděpodobně odpovídají hlubším tektonickým poruchám s vyšší porózitou a vyšším obsahem porézní vody. Byly vymapovány dva pruhy tektonik SZ – JV směru. Severnější odpovídá poděbradskému zlomu, jižnější paralelní projev je označen jako kovanická porucha. V odporovém řezu se rovněž obě poruchy projevují, tentokrát skokem ve vrstvách křídových sedimentů i jejího krystalinického podloží (obr. 6). Na vzdálenosti asi 500 m má skok amplitudu asi 40 m, podloží křídý na jedné straně podle VES je v hloubkové úrovni asi 80 m n. m., na jz. okraji profilu pak už asi 40 m n. m.

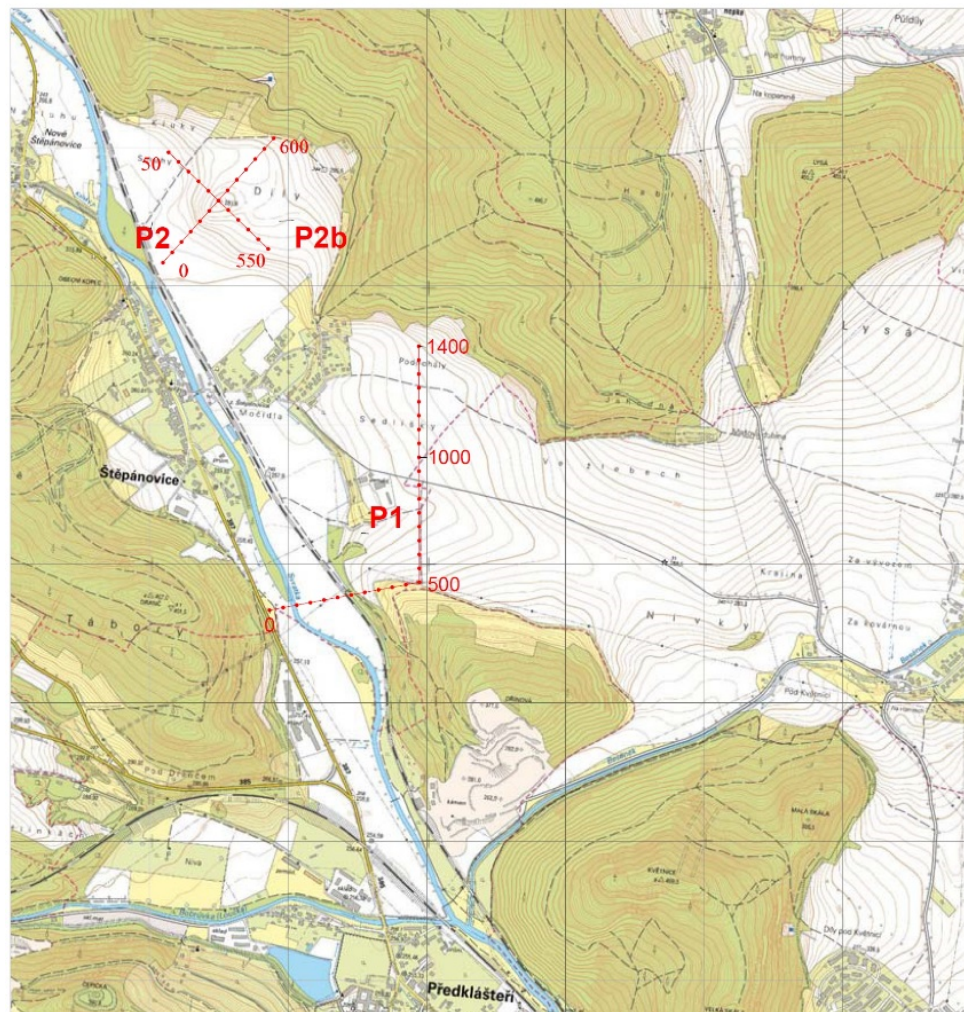


Obr. 6 Výsledky a interpretace metody VES profilu 1 a 2 (Karous – Nikl 2015b)

Lokalita Štěpánovice u Tišnova (povodí Moravy)

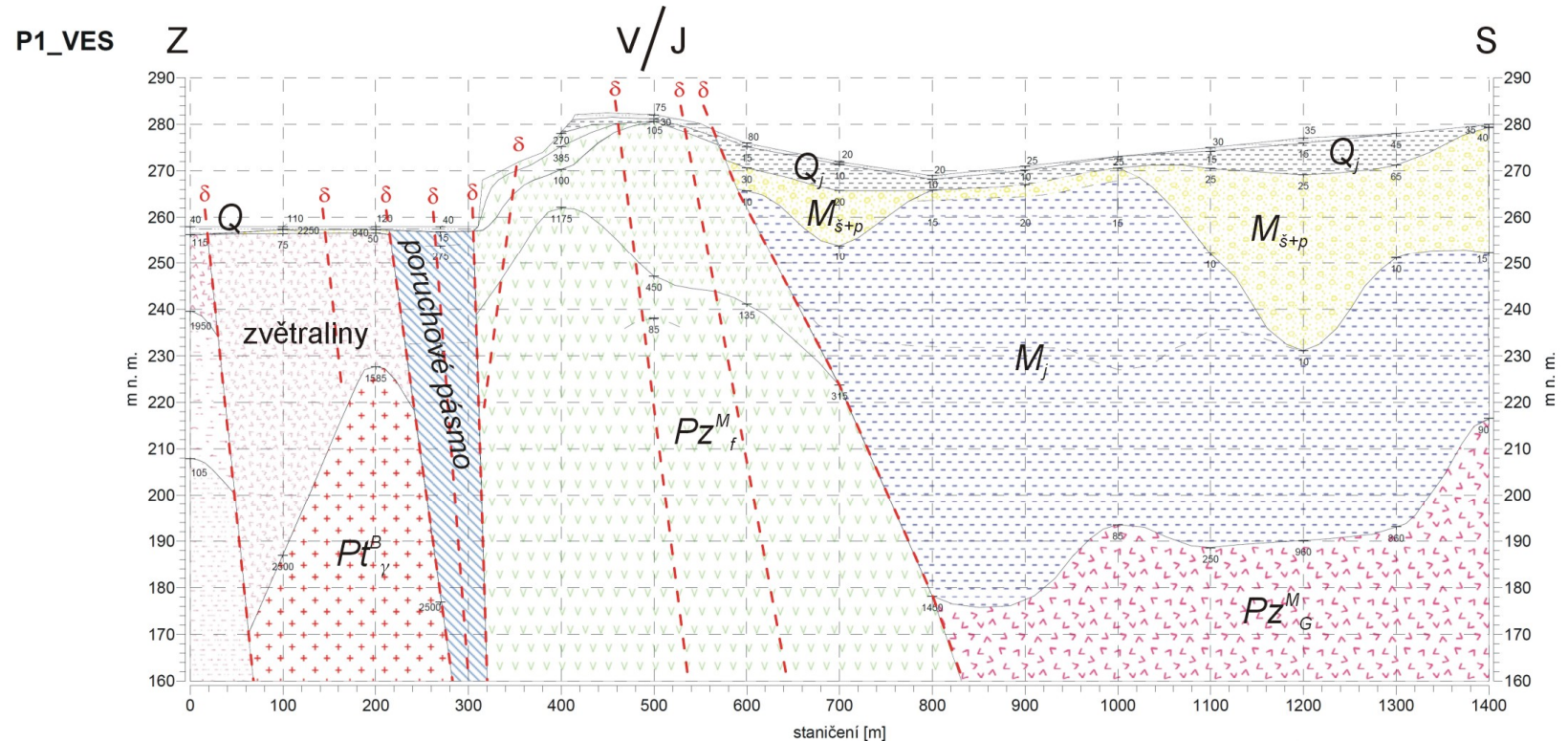
Kuřimská kotlina představuje silně tektonicky postižené území, rozčleněné na řadu úzkých, místy hluboce zařízlých údolí, dnes vyplněných miocenními sedimenty s různou úrovní denudace. Jejich podloží tvoří horniny paleozoika (moravikum) a proterozoika (brunovistulikum). Výrazné údolí, vyplněné několika desítkami metrů mocných miocenních sedimentů, nalézáme také v oblasti Štěpánovic u Tišnova. Paleoúdolí je vyplněno miocenními bazálními klastiky, které přechází v pelity (jíly a vápnité jíly). Miocenní sedimenty jsou překryty kvartérními sedimenty (fluviálními a eolickými) pleistocénu a terasami řeky Svatky.

Na lokalitě byly vytyčeny dva geofyzikální profily o celkové délce 2,5 km (obr. 7). Byly proměřeny geoelektrickými metodami (DOP a VES, na vybraném úseku metodou ERT), elektromagnetickým profilováním (DEMP) a seismickou metodou (MRS). Výsledky DOP umožnilo vymapování tektonických poruch (jak vodivých – jílovitých, tak i nevodivých – vyplněných např. štěrkopískem) s hloubkovým dosahem kolem 15 m až 20 m. Metoda DEMP byla realizována ve třech hloubkových úrovních (2,2 m, 4,2 m a 6,7 m). Byla měřena měrná vodivost, která dává dobrou představu o elektrických vlastnostech hornin v přípovrchové vrstvě. Výrazné snížení měrné vodivosti na profilových křivkách pravděpodobně zachycuje podložní skalní horniny. Metoda VES prezentovaná ve formě izoohmického „pseudo“ řezu dává dobrou představu o rozložení odporových poměrů v celém proměřovaném profilu. Na obou řezech je dobře patrný kontrast naměřených měrných odporů, kde vyšší naměřené měrné odpory odpovídají horninám skalního masivu (ortorula, fylit, granit) a nižší měrné odpory odpovídají převážně sedimentární výplni. Na seismických řezech je zřetelná nízkorychlostní vrstva (seismické rychlosti $v_p = 340 \text{ ms}^{-1} - 1300 \text{ ms}^{-1}$), která má mocnosti od 1,5 m až do 12 m. Tato vrstva zachycuje především horniny silně porušené, které mohou odpovídat sedimentárním horninám kvartéru. Seismické rychlosti do $v_{\max} < 2000 \text{ ms}^{-1}$ převážně zachycují horniny méně uhlé a více porušené.



Obr. 7 Mapa lokality Štěpánovice s vyznačením měřených profilů

V zájmové lokalitě jde především o sedimentární horniny miocénu. Oproti tomu horniny kompaktnější (ortorula, fylit, granit) mají rychlosti přesahující $v_{\max} > 2000 \text{ ms}^{-1}$ a projevují se v podloží sedimentární výplně a na elevacích s. a jv. od Štěpánovic. Na základě inverzního modelování dat VES a srovnáním s výsledky DOP a seismickými řezy byly získány informace o mocnostech jednotlivých rozhraní. Na geofyzikálních (geologických) interpretovaných řezech (obr. 8) je patrné rozčlenění hornin podle výsledných vypočtených odporů. Pod přípovrchovou hlinitojílovitou vrstvou se projevila vrstva štěrkopísků, pod kterou nastupuje mocná vrstva jílovitých hornin. Tato jílovitá vrstva může obsahovat jak jílovito-písčité sedimenty, jílovito-štěrkopískové sedimenty tak i polohu zcela rozvětrálního skalního masivu – eluvia. Kompaktní skalní masiv se projevil až ve značných hloubkách, jeho báze je zachycena od 215 m n. m. do cca 175 m n. m., kde se zvyšují vypočtené měrné odpory. Geofyzikálními metodami byl zde ověřen průběh paleoúdolí mezi Štěpánovicemi a Lomničkou s hloubkou okolo 80 až 90 m, vyplněné sedimenty badenu a kvartéru. Byl ověřen zlom v současném korytě Svatky.



Obr. 8 Výsledky a interpretace metody VES profilu 1 (Hrutka – Votoček 2015). Q – současná kvartérní terasa Svatky, Q_j – jílovité sedimenty kvartéru (paleoúdolí), M_{s+p} – miocenní štěrky a písky (baden), M_j – miocenní jíly (baden), Pz^M_f a Pz^M_G – paleozoikum, fylity a ortoruly moravika, Pt^B_γ – proterozoikum, granity brunovistulika

4 Závěr

Pro průzkum lokálních hydrogeologických struktur na menších územích popř. jímacích územích byla v rámci projektu „Rebilance“ zvolena metodika geofyzikálních prací, která využívala komplex metod, především geoelektrických a seismických. Získaná data byla využita pro interpretaci dané hydrogeologické struktury společně s interpretací vrtů a geologickým mapováním. Především bylo nutné zvolit vhodnou metodu, popř. doplnit další metodou nebo změnou hloubkového dosahu, pokud bylo zjištěno, že se struktura nalézá hlouběji, než se předpokládalo. Pro vyhledávání a ověření hydrogeologických struktur v kenozoických sedimentech byly většinou použity metody s hloubkovým dosahem do 50 – 100 m. Výsledky na lokalitách Káraný, Budiměřice a Štěpánovice přispěly ke stanovení mocnosti a charakteru kenozoických sedimentů popř. pohřbených (přehloubených) říčních koryt (paleokoryt). Zvolená metodika jednoznačně prokázala nutnost aplikace komplexu metod pro správnou geologickou interpretaci a tím i přesnější koncepční model daných hydrogeologických struktur.

Literatura

- HRUTKA, M., VOTOČEK, R. Zpráva o geofyzikálním měření. Díl 4/1: Lokalita Štěpánovice. In Bárta et al.: Závěrečná zpráva za úkol Geofyzikální měření pro verifikaci vybraných hydrogeologických modelů v oblasti I. Česká geologická služba, 2015, MS.
- KAROUS, M., NIKL, P. Rebilance zásob podzemních vod. Oblast 3. Plocha 1: Brandýs – Stará Boleslav. In Karous et al. Závěrečná zpráva za úkol Plošné komplexní geofyzikální měření ve vybraných hydrogeologických rajónech oblast 3. Česká geologická služba, 2015a, MS.
- KAROUS, M., NIKL, P. Rebilance zásob podzemních vod. Oblast 3. Plocha 2: Nymburk. In Karous et al. Závěrečná zpráva za úkol Plošné komplexní geofyzikální měření ve vybraných hydrogeologických rajónech oblast 3. Česká geologická služba, 2015b, MS.
- ŽEBERA, K. K současnému výzkumu kvartéru v oblasti Českého masivu. Sbor. St. geol. Úst. Čs. Republ., 16, Praha, 1949.

Autoři:

- ¹ RNDr. Zuzana Skácelová, Česká geologická služba, Erbenova 348, 790 01 Jeseník, zuzana.skacelova@geology.cz
- ² Mgr. Jan Vít, Dr., Česká geologická služba, Leitnerova 22, 602 00 Brno, jan.vit@geology.cz
- ³ RNDr. Tomáš Hroch, Česká geologická služba, Klárov 3, 118 21 Praha 1, tomas.hroch@geology.cz
- ⁴ Prof. RNDr. Miloš Karous, DrSc., GEONIKA s.r.o., Svatoplukova 15, 128 00 Praha 2, karous@geonika.com
- ⁵ RNDr. Pavel Nikl, GEONIKA s.r.o., Svatoplukova 15, 128 00 Praha 2, nikl@geonika.com
- ⁶ Mgr. Milan Hrutka, ARCADIS Geotechnika a.s., Geologická 988/4, 152 00 Praha 5, hrutka@arcadisgt.cz
- ⁶ RNDr. Robert Votoček, ARCADIS Geotechnika a.s., Geologická 988/4, 152 00 Praha 5, votocek@arcadisgt.cz