



## **VYUŽITÍ GEOFYZIKÁLNÍCH MĚŘENÍ PRO ZPŘESNĚNÍ INŽENÝRSKOGEOLOGICKÉHO MODELU**

### **APPLICATION OF GEOPHYSICAL MEASUREMENTS TO REFINE ENGINEERING GEOLOGICAL MODEL**

*Pavel Pospíšil<sup>1</sup>, Aleš Poláček<sup>2</sup>*

#### **Abstrakt**

Článek popisuje aplikaci vhodně zvolených geofyzikálních měření zpřesňujících geometrický tvar kvazihomogenních celků jak přirozeného, tak i antropogenního původu v inženýrskogeologickém modelu zájmové oblasti Opava-Kateřinky. Zvolenými geofyzikálními metodami byly elektrická rezistivní tomografie a povrchové georadarové měření. Kombinací metod, aplikovaných ve formě profilových měření, byly potvrzeny struktury a dedukovány procesy ovlivňující stabilitu přípovrchových vrstev využitých jako základová půda pro liniovou stavbu severního obchvatu Opavy.

#### **Abstract**

The article describes the application of appropriately selected geophysical measurements specifying the geometric shape of quasi-homogeneous units of both natural and anthropogenic origin in the engineering geological model of the area of interest of Opava Kateřinky. The selected geophysical methods were electrical resistivity tomography and surface georadar measurements. The combination of methods applied in the form of profile measurements confirmed the structures and deduced the processes influencing the stability of the subsurface layers used as a foundation soil for the line construction of the northern bypass of the Opava.

#### **Klíčová slova**

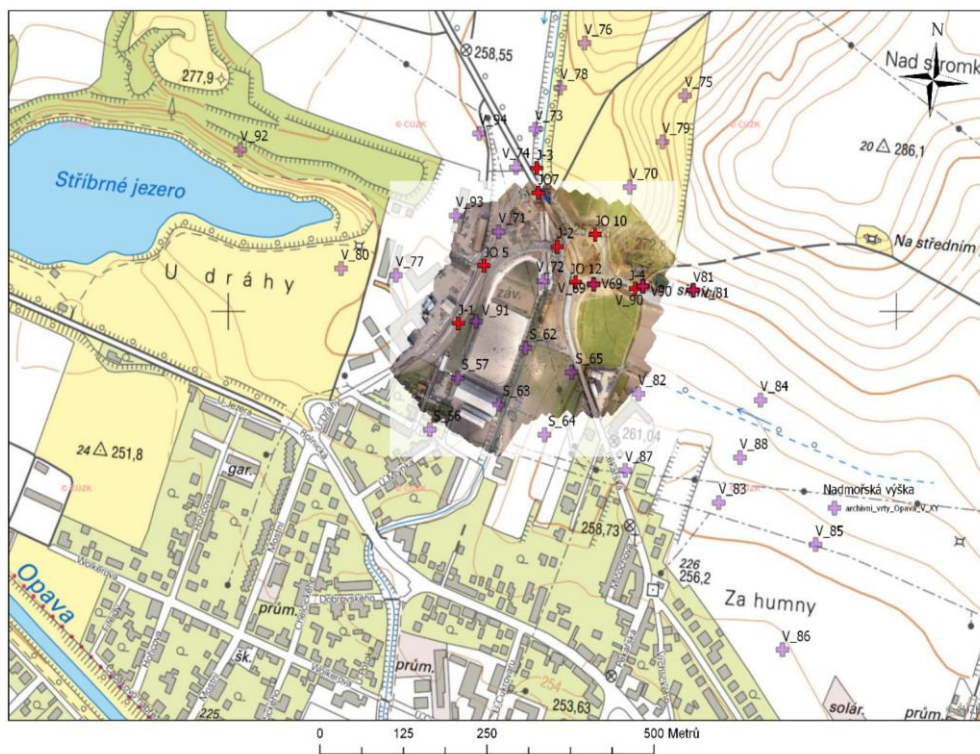
*Elektrická rezistivní tomografie ERT, Georadarové měření GPR, Inženýrskogeologický model*

## Keywords

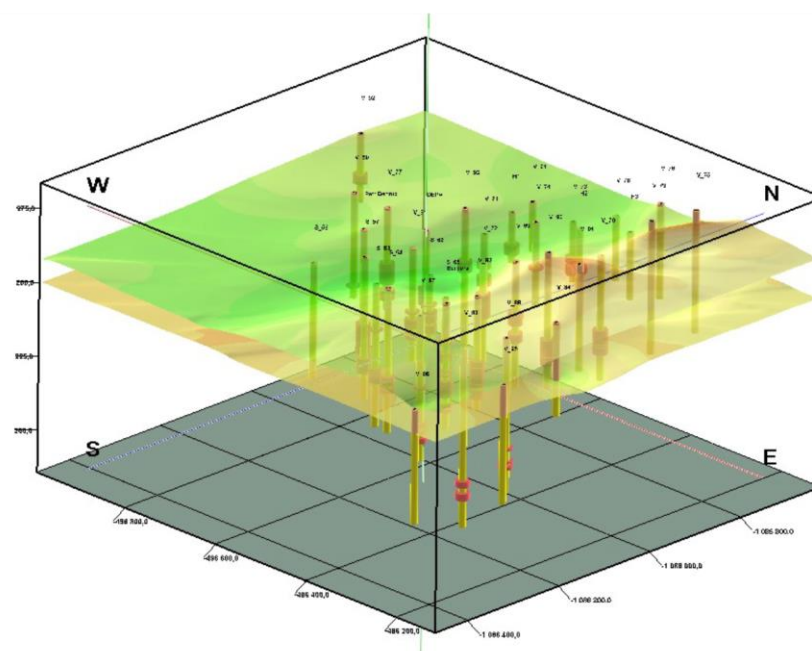
*Electrical resistivity tomography ERT, ground penetration radar GPR, engineering geological model*

## 1. Úvod

Problém tvorby geologického modelu popisuje celá řada prací (např. Fookes, 1997, Parry et al., 2014, de Freitas, 2020, Norbury, 2020). Z pohledu inženýrské geologie je zapotřebí soustředit pozornost na takové struktury v horninovém prostředí, které zásadně ovlivňují chování té části horninového masivu, která interaguje s inženýrským dílem (Fookes et al., 2018, Baynes et al., 2020). V případě měření provedeného v zájmové oblasti Opavě-Kateřinkách se jednalo o kvarterní horizont aluviálních sedimentů a svrchní část terciérní formace s vrstvami sádrovce, který byl hlubinně dobýván. Pravděpodobné lokální zhroucení důlních chodeb či rozpouštění sádrovce drénujícími podzemními vodami způsobilo na několika místech tvorbu lokálních propadů terénu, což ohrožovalo stavbu silničního severního obchvatu Opavy. Nově provedená geofyzikální měření korelovaná s archivními daty přinesla zpřesnění inženýrskogeologického a hydrogeologického modelu zájmové oblasti.



**Obr. 1** Zájmová oblast s vyznačenými archivními vrty

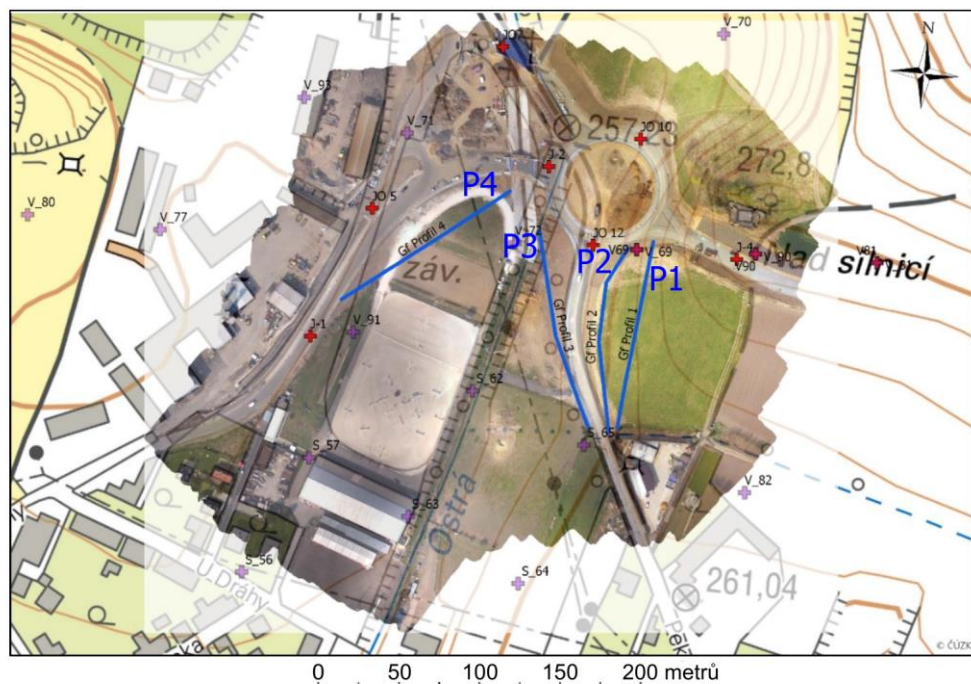


**Obr. 2** Povrch kvarterní a terciérní formace s archivními vrty

## 2. Metodika

Proces zpřesnění inženýrskogeologického modelu zájmové oblasti bylo nutné zahájit tvorbou přesného aktuálního digitálního modelu terénu s využitím dronu, neboť stavebními pracemi byla niveleta výrazně pozměněna.

Digitální model území (obr. 3 až 6) bylo nutné sestavit pro přesnou interpretaci jednotlivých litologických a stratigrafických rozhraní dokumentovaných jako anomálie v průběhu geofyzikálních měření, protože ty probíhaly v terénu upraveném stavebními pracemi a bylo nutné je korelovat výškově s výsledky předchozích etap průzkumu. Kromě digitálního modelu terénu byl pořízen také georeferencovaný letecký snímek sloužící k ověření přesné lokace měřených profilů a orientaci v terénu upraveném stavbou ve srovnání s terénem původním.



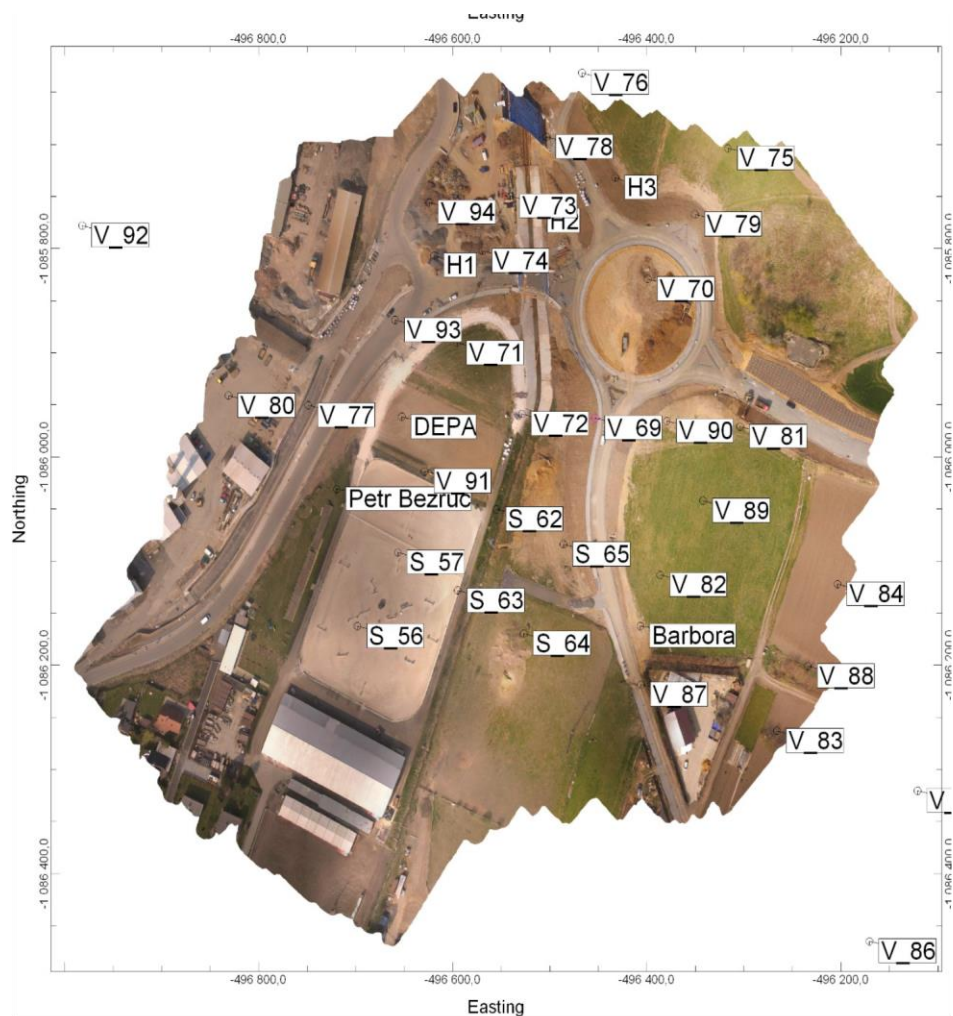
**Obr. 3 Situace geofyzikálních profilů ERT a GPR P1 až P4**



**Obr. 4 Situace geofyzikálních profilů P1 až P3 na 3D terénu**

Pro vlastní geofyzikální měření byla zvolena kombinace metody elektrické rezistivní tomografie (ERT) a povrchového georadaru. Při ERT měření použita byla aparatura ARES s multielektrodovým systémem MCS. Metodika multielektrodového odporového měření při použití uvedené aparatury umožňuje získat velký počet hodnot zdánlivého měrného odporu (zdánlivé rezistivity) ze symetrických čtyřbodových uspořádání a umožnit tak vymezení odporově odlišných kvazihomogenních částí proměřovaného prostředí.

Délka profilů byla podmíněna jednak zvolenou metodikou měření a také požadavkem na dosažení optimálního hloubkového dosahu vzhledem k předpokládané hloubce lokalizovaného podzemního objektu. Situace proměřených profilů je znázorněna na obr. 3 a 4.



**Obr. 5 Georeferencovaný letecký snímek s archivními vrty**

Měření zahrnovalo čtyři profily s délkou 126 m, přičemž první 3 profily byly vedeny ve směru přibližně od jihu k severu a čtvrtý profil byl veden cca od jihozápadu k severovýchodu. Nejdříve byly změřeny profily P1 a P2 v prodloužení ulice Pekařská východně od násypu. Následně pak byly doměřeny dva profily P3 západně od násypu prodloužení ulice Pekařská a P4 v prodloužení ulice Mostní na severním okraji pozemku jezdeckého klubu. Získané výsledky byly zpracovány ve formě vertikálních odporových řezů.



**Obr. 6 3-D digitální model terénu pořízený pro přesnou nivelaci nových geofyzikálních měření a korelaci se staršími průzkumnými díly**

Naměřený i interpretovaný soubor dat jsou soubory typu lognormálního rozložení a tato skutečnost je zohledněna při volbě logaritmického měřítka – volbě kroku intervalu izolinií na interpretovaných vertikálních izoohmických řezech. Reálný hloubkový dosah měření při použitém systému zvoleného počtu elektrod a použité metodice měření a vzdálenosti elektrod od sebe 2 m byl u profilů P1 až P4 cca 20 m. Odpovídal tak předpokládané hloubce výskytu podzemních objektů. Takto jsou i vyneseny výsledky interpretace na jednotlivých profilech. Využitím interpretačního postupu RES2Dinv byly získány 2D rezistivitní (odporové) modely zkoumaného prostředí ve formě vertikálních řezů.

#### Metoda GPR

Výsledky měření aparaturou Mala GeoScience AB byly operativně hodnoceny přímo v terénu na monitoru aparatury. Zobrazení geofyzikálního obrazu přímo v terénu však není v mnoha případech relevantní. Je zapotřebí provést interpretaci pomocí např. software RadExplorer, což byl případ tohoto měření. Měření GPR bylo provedeno po měření ERT a profily byly předběžně interpretovány již v terénu na terénním monitoru.

Měření bylo provedeno nestíněnou anténou 50 MHz na vyznačených profilech. Jednotlivé profily byly vytyčeny zpracovateli průzkumu přímo v terénu s číselným označením 1 až 4 viz obr. 3. Měření bylo provedeno v profilech P1, P2, P3 a P4 srovnatelných s profily měřenými metodou ERT. Pro přesnější interpretaci byly profily měřeny vždy i v reverzním směru a v průběhu interpretace byla data srovnávána.

Z dalších geofyzikálních metod bylo uvažováno o aplikaci gravimetrické metody, ale tato byla nakonec vyloučena, neboť dle koncepčního modelu se předpokládalo, že důlní chodby (chodbice) pro těžbu sádrovce budou pravděpodobně zavalené a jejich identifikace touto metodou by byla nejistá. Navíc i terén na staveništi nebyl příznivý.

### 3. Výsledky měření

#### 3.1 Metoda elektrické rezistivitní tomografie ERT

##### Profil P1

Profil P1 byl měřen ve směru cca J-S viz obr. 3 a 4. Profil byl měřen s roztečí elektrod 2 m. Výsledky s použitím uspořádání WSCH. Na základě získaného odporového obrazu bylo možné vymežit dvě oblasti, které mohou svým charakterem odpovídat oblasti zvýšené saturace pórového systému horninového materiálu vodou. Rozdíly v geofyzikálním obrazu jsou způsobeny heterogenitou horninových hmot v kvarterní formaci a jejich rozdílnému nasycení vodou. obr. 7.

##### Profil P2

Měření bylo ve směru cca J-S viz obr. 3 a 4. Profil byl měřen s roztečí elektrod 2 m. Na základě získaného odporového obrazu lze vymežit oblast, která může svým charakterem odpovídat oblasti zvýšené saturace pórového systému materiálu podzákladí vodou (modrá barva). Jedná se o obdobnou situaci jako profilu 1, rozdíly měrného odporu jsou dány heterogenitou prostředí a rozdílnou saturací pórového systému vodou viz obr. 9.

### **Profil P3**

Měřeno bylo ve směru cca JJV-SSZ viz obr. 3 a 4. Profil byl měřen s roztečí elektrod 2 m. Výsledky s použitím uspořádání WSCH jsou znázorněny na obr. 7. Na základě získaného odporového obrazu lze v tomto profilu naopak velmi dobře vymezit oblasti, která může svým charakterem odpovídat oblasti snížené saturace pórového systému materiálu vodou (červená barva). Zřetelně se tak např. v začátku profilu projevuje v metráži 22 až 32 upravené a více propustné podloží vedlejší cesty, přes kterou byl profil veden. Dále lze přesně vymezit méně saturovaný materiál násypu v metráži 34 až 76. Ze srovnání s interpretovaným záznamem z GPR měření lze za anomálii dokumentující důlní dílo považovat oblast elipsoidního tvaru v metráži 66 až 80 v hloubce cca 13 m pod povrchem terénu. Tady se shodují interpretace obou metod. obr. 10.

### **Profil P4**

Měřeno bylo ve směru cca JZ-SV viz obr. 3. Profil byl měřen s roztečí elektrod 2 m. Na základě získaného odporového obrazu lze vymezit oblast, která může svým charakterem odpovídat oblasti zvýšené saturace pórového systému materiálu vodou (modrá barva) v mělké zóně na konci profilu. Jedná se o oblast v metráži 80 m až 110 m do hloubky cca 7 m, která odpovídá pravděpodobně fluviálním sedimentům potoka Ostrá (Plštský potok). Dále pak byla zjištěna oblast s vyššími hodnotami rezistivity v mělké zóně horninového prostředí do 10 m, s maximem v metráži 36 až 52. Jedná se o pravděpodobně o odvodněné propustnější prostředí šterků a písků. Na základě srovnání s interpretovaným GPR profilem, lze soudit na možnou existenci bludného balvanu v tomto místě. obr. 12.

## **3.2 Metoda povrchového georadaru GPR**

Z výsledků měření vyplynulo, že použití aparatury s 50 MHz nestíněnou anténou zachytilo kvarterní horizont a nejsvrchnější část terciérní formace horninového prostředí. Na jednotlivých profilech byla prokazatelně identifikována heterogenita hmot v kvarterních vrstvách. V profilu P1 byla anomálie v radargramu na začátku profilu interpretována jako povrch terciéru. Profil P2 nebyl vzhledem k problémům s originálním datovým souborem interpretován. Indicie existence případné důlní chodby v materiálu terciérní formace byla po interpretaci potvrzena v geofyzikálním obrazu profilu P3. V profilu P4 byla anomálie v blízkosti mostu interpretována jako povrch sádrovcového horizontu v terciérní formaci.

### **Profil P1**

Délka profilu byla 124 m, měřeno bylo ve směru od výchozího bodu na okraji silnice na západní opěru mostu (cca JZ-SV směr) i reverzně, viz obr. 5 a 6. Kvarterní formace o mocnosti 6 až 7 m je dokumentována v radargramu v celém profilu. Na základě získaného geofyzikálního obrazu lze vymezit oblast, která dokumentuje povrch sádrovcového horizontu. Jedná se o oblast v metráži 5 m až 75 m v hloubce od cca 14 m do 20 m pod terénem. obr. 8.

### **Profil P2**

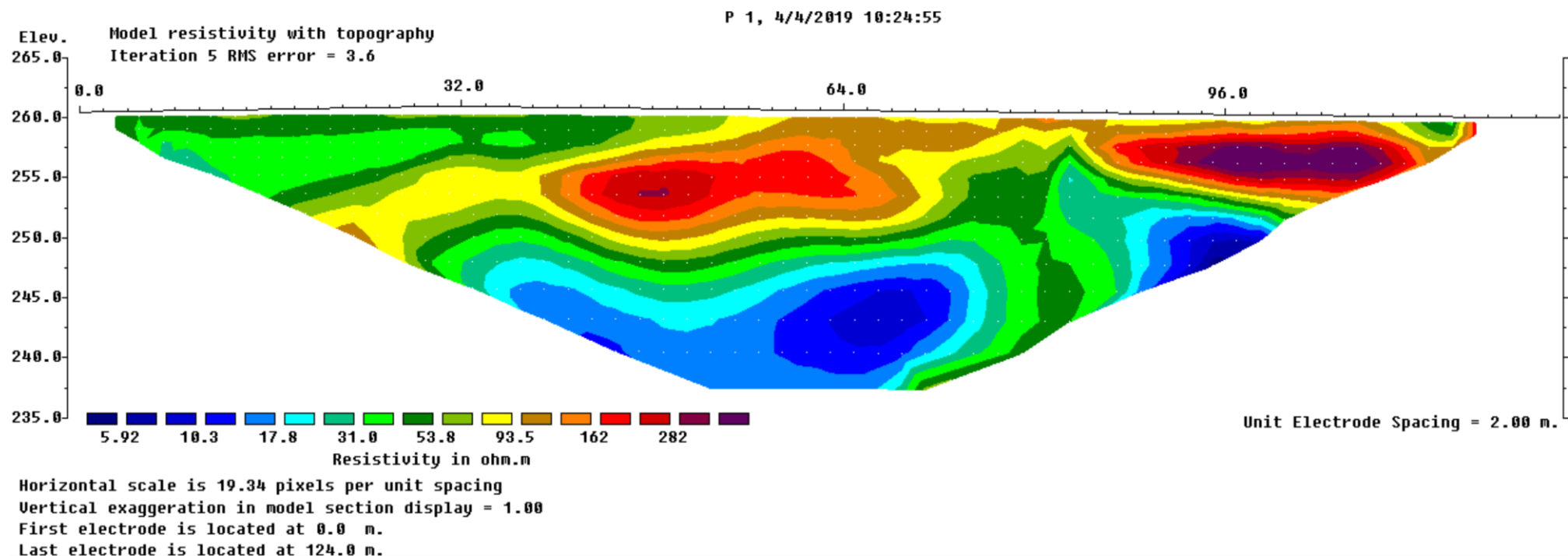
Délka profilu byla 126 m. Záznam dat nebyl vhodný pro další interpretaci.

### Profil P3

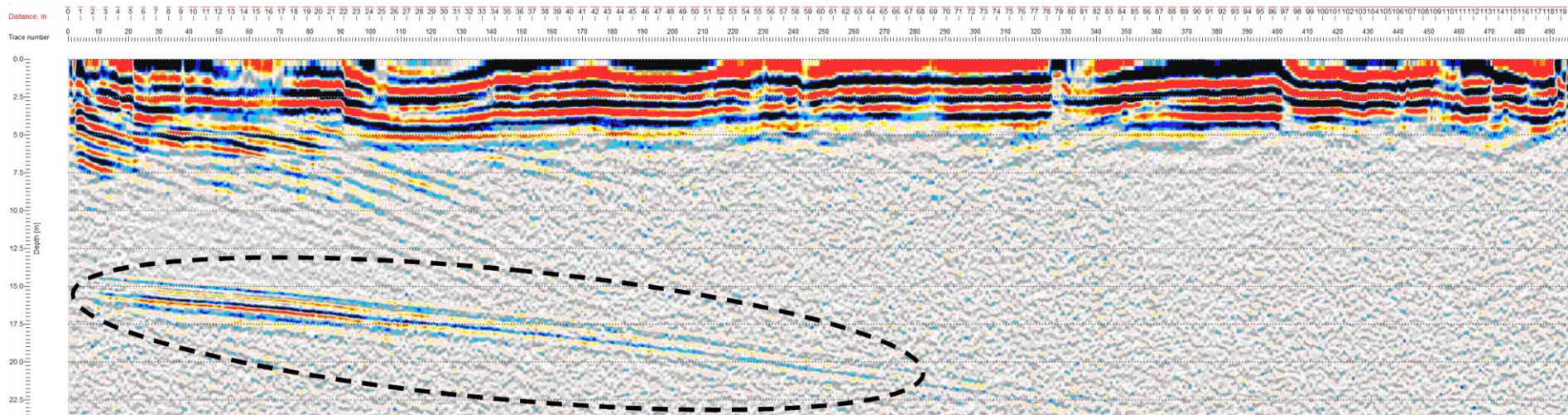
Délka profilu byla 126 m. Měřeno západně od násypu silnice v prodloužení ulice Pekařská (směr cca JJV-SSZ). Profil byl taktéž měřen i reverzně, viz obr. 5 a 6. Geofyzikální obraz poskytl indicie, podle kterých by bylo možno vymezit oblast, která může svým charakterem odpovídat podzemnímu objektu v metrů 64 až 71 m v hloubce cca 14 m. Dále bylo v radargramu interpretováno rozhraní kvartér – terciér v celé délce profilu v hloubce cca 5 až 6 m a povrch sádrovcového horizontu v hloubce 10 až 12 m. obr. 11.

### Profil P4

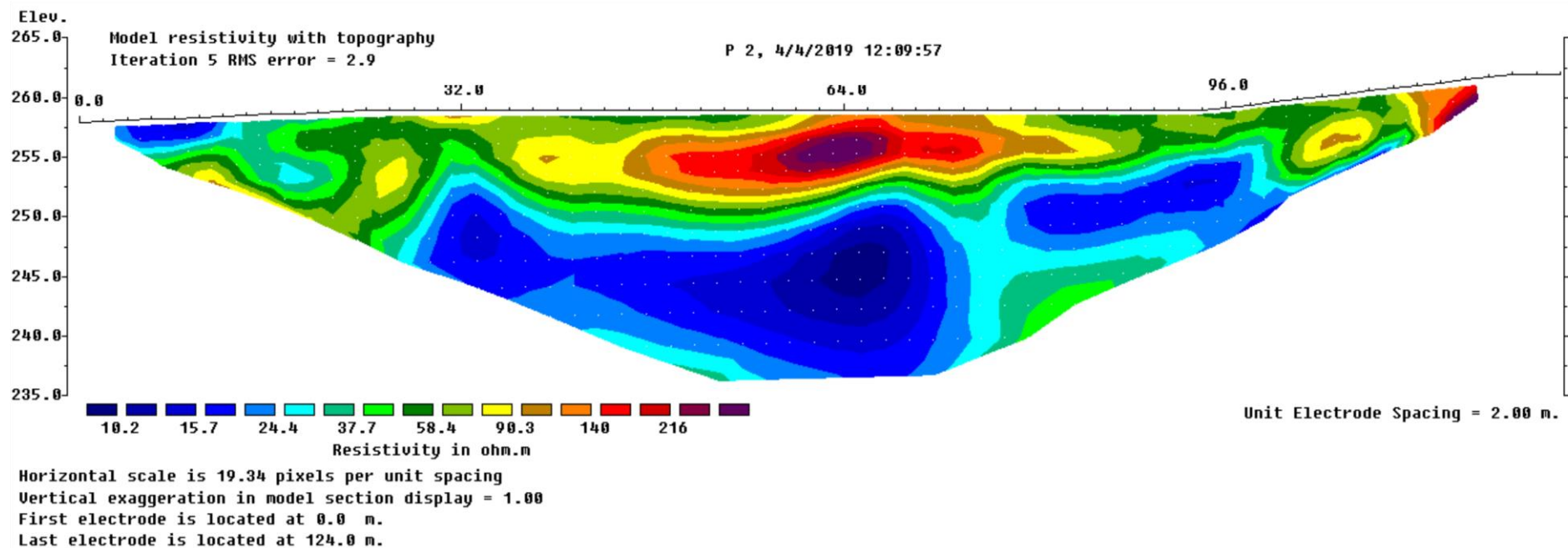
Délka profilu byla 124 m, měřeno bylo ve směru od výchozího bodu na okraji silnice na západní opěru mostu (cca JZ-SV směr) i reverzně, viz obr. 3. Mocnost kvartérní formace je interpretována 5 až 6 m v celé délce profilu, což radargram zřetelně dokumentuje. V metrů 60 až 123 m je interpretován povrch sádrovcového horizontu. Nejasná je interpretace slabé anomálie v metrů 35 až 40, která by mohla odpovídat nějakému objektu např. bludnému balvanu, jako součásti kvarterních sedimentů. obr. 13.



**Obr. 7 P1 - Interpretovaný profil ERT. Anomální oblasti dokumentující sníženou saturaci kvarterní formace – červená oblast či zvýšené saturace pórového systému terciérní formace vodou – modrá barva. Uspořádání WSCH**

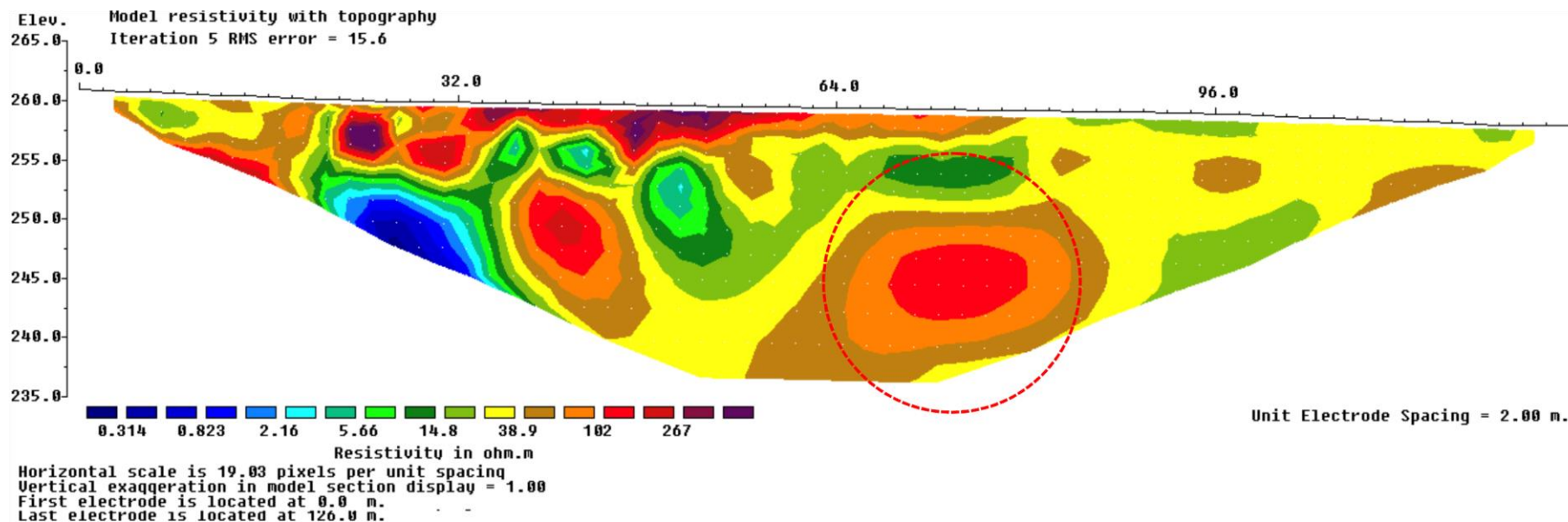


**Obr. 8 Výsledky GPR na profilu P1. Čárkovaně vyznačená anomální oblast naznačující povrch sádrovcové polohy. Délka profilu 120 m, výška 23 m**

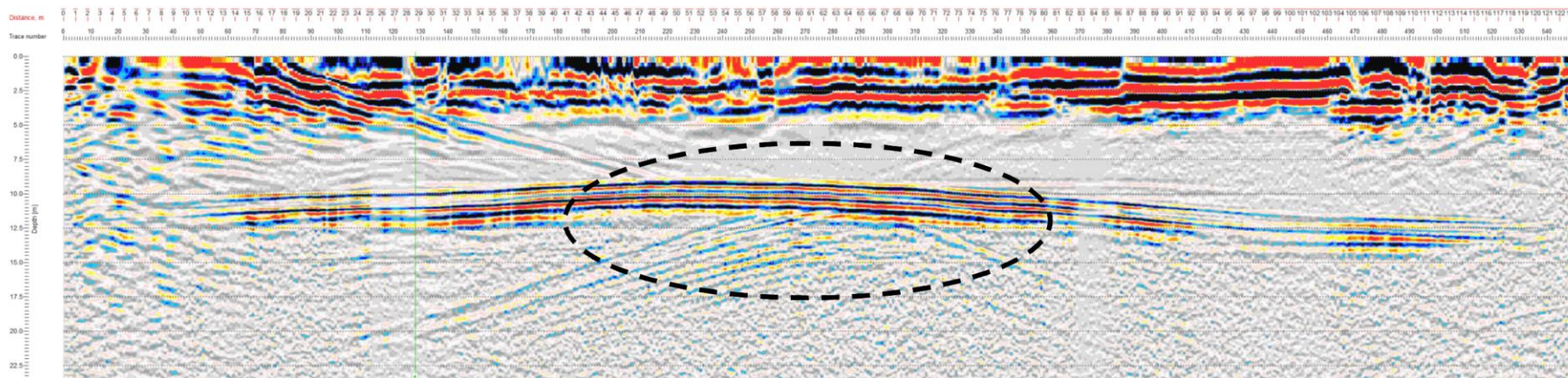


**Obr. 9 P2 - Interpretovaný profil ERT. Anomální oblasti – červená oblast označuje mělkou kvarterní zónu se sníženou saturací vodou. Zvýšené saturace pórového systému materiálu vodou jsou označeny modrou barvou. Uspořádání WSCH**

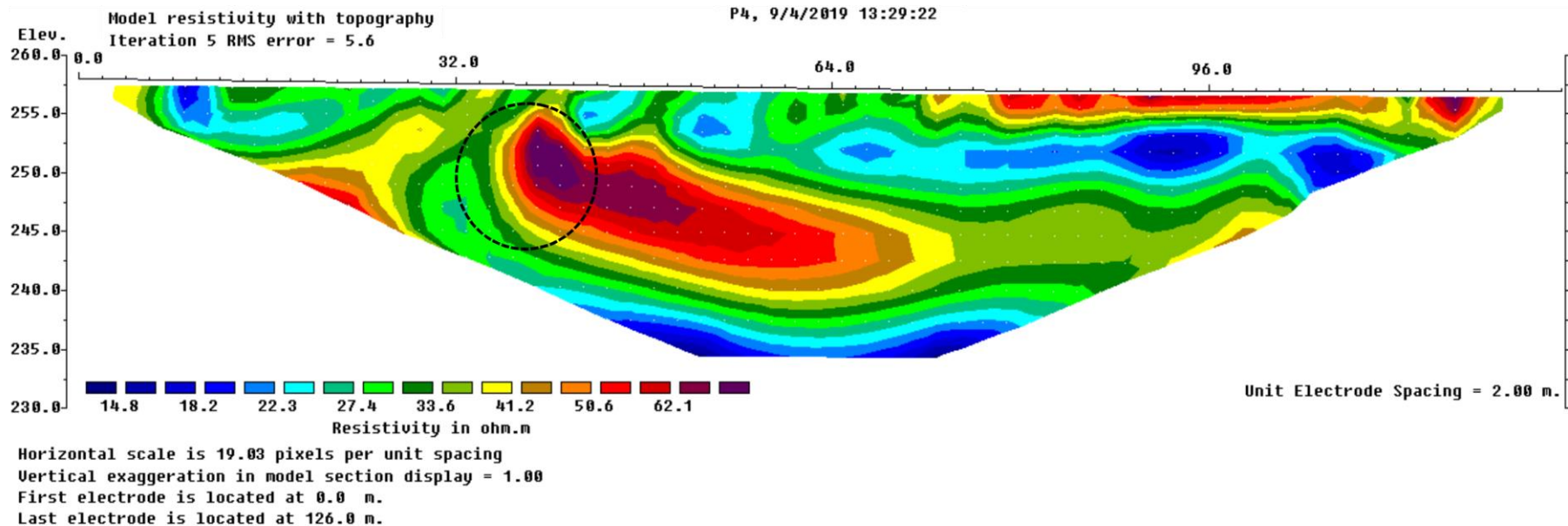
Profil P2 GPR – záznam dat nebyl vhodný pro další interpretaci. Nejprůkaznějším interpretovaným profilem byl profil P3, který dokumentoval jak litologické a stratigrafické rozhraní, tak i snížení saturace horninového prostředí vodou kombinací obou metod. obr. 10 a 11.



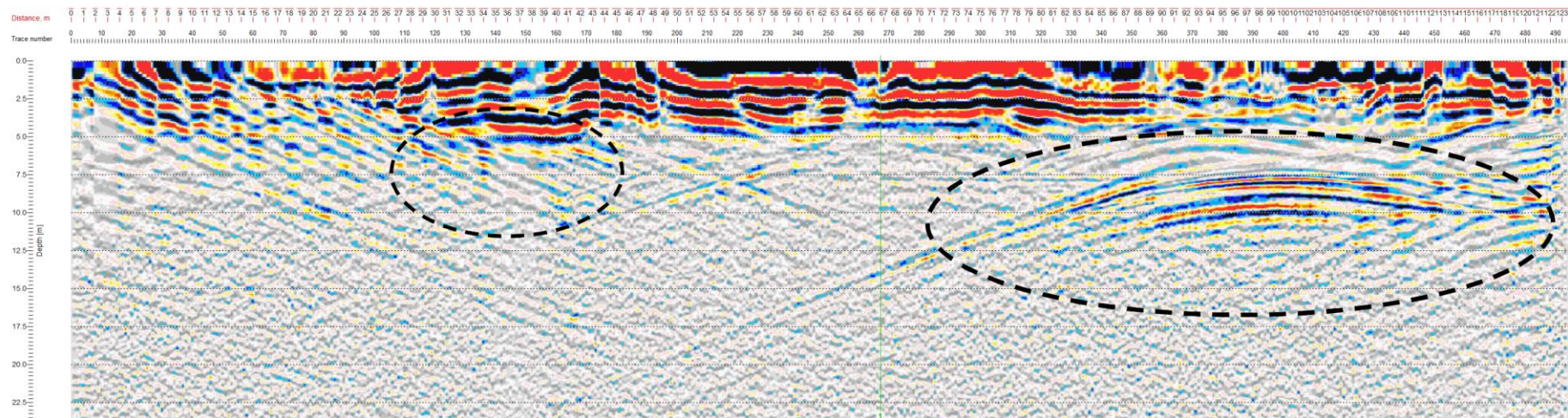
**Obr. 10 P3 - Interpretovaný profil ERT. Červená anomální oblast v metrůži 66 až 80 m naznačuje případnou existenci drénovaného horninového prostředí s podzemním objektem – štolou**



**Obr. 11 Interpretovaný radargram z měření GPR na profilu P3 s reflexí na sádrovcové poloze a patrným hyperbolickým odrazem pravděpodobné důlní chodby. Délka profilu 123 m, výška 23 m**



**Obr. 12 P4 - Interpretovaný profil ERT. Čárkovane vyznačené anomální oblasti naznačující případnou existenci podzemního objektu – bludného balvanu? – červená oblast s nižší saturací vodou. Uspořádání WSCH**



**Obr. 13 Výsledky GPR na profilu P 4. Čárkovane vyznačené anomální oblasti naznačující případnou existenci podzemního objektu – bludného balvanu? – menší elipsa vlevo a povrch sádrovcové polohy – větší elipsa vpravo. Délka profilu 123 m, výška 23 m**

## 4. Diskuse

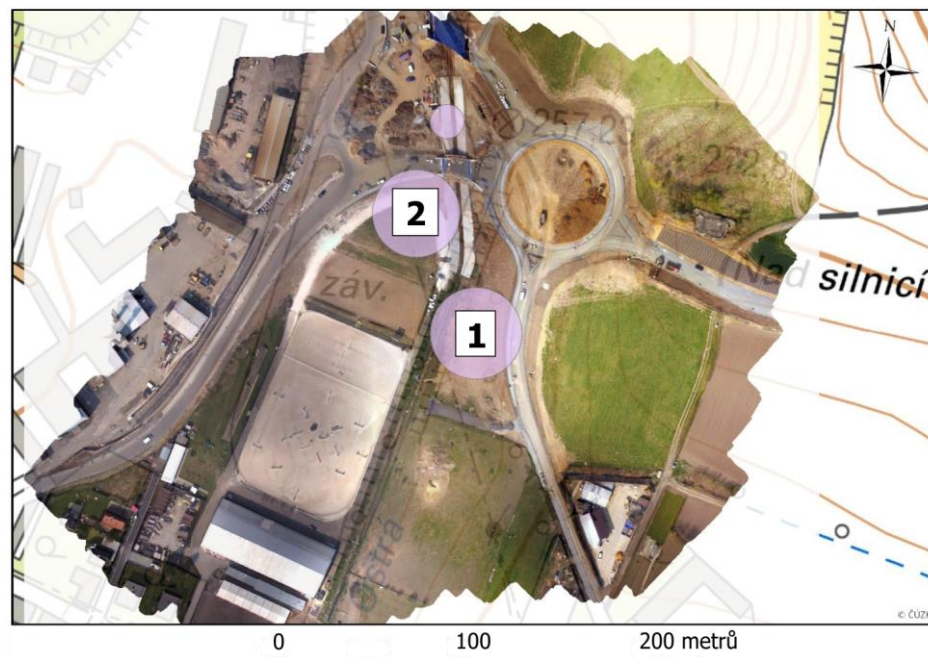
Na základě vlastních zkušeností autorů článku lze v takto litologicky komplikovaných a antropogenně přepracovaných horninových prostředích, zejména postižených povrchovou či hlubinnou těžbou nerostných surovin zpřesnit inženýrskogeologický model zájmové kubatury pro inženýrské aktivity spojené např. s výstavbou liniových staveb pouze v kombinaci kvalitní a kritické rešerše dostupných archivních dat spolu s detailním geomorfologickým studiem reliéfu terénu v čase a také vhodně volenými geofyzikálními měřeními, která jsou korelována s výsledky přímého průzkumu. Podobné závěry lze najít i v literatuře např. Dearman et al., 1978.

## 5. Závěr

Na základě všech analyzovaných dat, jak z archivních průzkumných prací, tak z nově provedených měření, lze konstatovat, že v zájmové oblasti se vyskytují 3 místa s potenciální nestabilním povrchem terénu a mělkou zónou horninového prostředí prezentované na obr. 14, která byla určena na základě zpřesněného inženýrskogeologického modelu s využitím geofyzikálních metod.

Místa reprezentovaná polygony s větším průměrem lze označit i vzhledem ke stavebním objektům v okolí jako místa hodná zřetele v budoucím monitoringu.

Místo značení číslem 1 je místo, kde došlo k opakovanému propadu terénu „trychtýřového“ tvaru s rozšiřováním směrem do hloubky. Průměr propadu terénu byl cca 1 m. Stalo se tak při pojezdu těžké techniky v daném místě. Toto místo se dle mapové dokumentace nachází na okraji prostoru vydobytého těžbou sádrovce technologií chodbicování a v těsné blízkosti dokumentované přístupové důlní chodby. Také se jedná o místo terciérní elevace, tzn. že sádrovcové polohy se nacházejí v hloubce cca 10 m pod povrchem terénu. Vzhledem k drenážní schopnosti starých důlních děl a pravděpodobnému rozpouštění sádrovce doloženému hydrogeochemickým modelováním, vycházejícím z chemických analýz podzemní vody lze konstatovat, že tento velmi dlouhodobý proces bude pokračovat i nadále. Také lze soudit, že technická seismická ohrožující stabilitu hornin v mělké zóně již nebude v budoucnu výrazná. Prodloužení ulice Pekařská nebude pravděpodobně systematicky zatíženo pojezdem těžkých nákladních automobilů. Na tento fakt je potřeba pamatovat při plánování objízdných tras. Vzhledem k uvedeným skutečnostem je doporučeno pokračovat, po skončení výstavby, v periodickém sledování nivelety komunikace měřené geodeticky ve 4 bodech na křížení komunikace s důlní chodbou a také satelitní interferometrií.



**Obr. 14** Potenciálně nestabilní místa vymezená na základě tvorby zpřesněného inženýrskogeologického modelu s využitím geofyzikálních metod průzkumu

Místo označené číslem 2 se nachází taktéž v místě terciérní elevace s mělce uloženými sádrovcovými vrstvami, u nichž platí tvrzení dlouhodobého geologického vývoje prezentované v předchozím textu. Toto místo potenciálně ohrožuje přechodovou oblast blízkého mostu.

Závěrem je nutno konstatovat, že výsledky měření jsou vždy do určité míry ovlivněny konkrétním tvarem a materiálem podzemního objektu. Dále je měření ovlivněno trajektorií zvoleného profilu. Při použití metody elektrické rezistivní tomografie je vyhodnocovanou veličinou měrný odpor. Vzhledem k faktu, že podzemní objekt (jeho vertikální průřez) lze nahradit modelem tělesa představujícího dutý horizontální válec, jehož průměr dosahuje velikosti  $n \times 100$  m je možné předpokládat, že přítomnost takovýchto těles se bude projevovat výraznými odporovými maximy (vysoké hodnoty měrného odporu). Tvar těchto maxim bude cca kruhový až eliptický a bude záviset i na odporové charakteristice okolních hornin a také na případné dodatečné výplni těchto objektů (napadávkou v různé mocnosti na počtvě každého objektu). V případě, že je toto těleso zaplněné vodou, jeho projev však může být opačný. V případě, že je v místě procházejícího profilu dílo zavaleno, pak může být projev až nulový a nijak výrazně se neodlišuje od jeho blízkého okolí. Se všemi těmito variantami je nutno počítat při správné interpretaci geofyzikálních měření pro tvorbu inženýrskogeologického modelu využitelného pro predikci chování horninového masivu v aktivní zóně interakce se stavební konstrukcí.

## Literatura:

- BAYNES, F. J., PARRY, S. a NOVOTNÝ, J. Engineering geological models, projects and geotechnical risk. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology* [online], qjagh2020-080, 2020, Dostupné z: doi:10.1144/qjagh2020-080.
- DE FREITAS, Michael H. Future developments for ground models. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology* [online], qjagh2020-034, 2020, Dostupné z: doi:10.1144/qjagh2020-034.
- FOOKES, P. G. Geology for engineers: The geological model, prediction and performance. *Quarterly Journal of Engineering Geology* [online], ISSN 04812085, 1997, Dostupné z: doi:10.1144/GSL.QJEG.1997.030.P4.
- FOOKES, P. G., BAYNES, F. J. a HUTCHINSON, J. N. Total geological history: A model approach to the anticipation, observation and understanding of site conditions. *In: ISRM International Symposium 2000, IS 2000*, 2018.
- NORBURY, D. Ground models; a brief overview. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology* [online]. qjagh2020-018, 2020, Dostupné z: doi:10.1144/qjagh2020-018.
- PARRY, S., BAYNES, F. J., CULSHAW, M. G., EGGERS, M., KEATON, J. F., LENTFER, K., NOVOTNY, J. a PAUL, D. Engineering geological models: An introduction: IAEG commission 25. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* [online], ISSN 14359529, 2014, Dostupné z: doi:10.1007/s10064-014-0576-x.

---

## Autoři:

<sup>1</sup> doc. RNDr. Pavel Pospíšil, Ph.D. – VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta stavební, [pavel.pospisil@vsb.cz](mailto:pavel.pospisil@vsb.cz)

<sup>2</sup> Ing. Aleš Poláček, CSc. - [polacek.al@gmail.com](mailto:polacek.al@gmail.com)