

HLUBINNÉ ÚLOŽIŠTĚ RADIOAKTIVNÍCH ODPADŮ – VÝZVA PRO ČESKÉ GEOFYZIKY

DEEP REPOSITORY OF NUCLEAR WASTE – CHALLENGE OF CZECH GEOPHYSICISTS

Jaroslav Bárta¹, Jaroslav Jirků²

Abstrakt

V České republice se plánuje výstavba hlubinného úložiště radioaktivních odpadů. Článek popisuje rozsah dosud provedených prací a informuje o obdobných aktivitách v zahraničí. Součástí příprav na výstavbu úložiště jsou i výzkumné geofyzikální práce. V České republice byl již použit například komplex leteckých metod (gama spektrometrie, magnetometrie a elektromagnetické měření), které bylo realizováno na šesti vybraných lokalitách. Pozornost je také dlouhodobě soustředěna na výzkum fyzikálních vlastností granitového masivu ve štolě Bedřichov v Jizerských horách. V blízké budoucnosti lze očekávat zadání pro komplexní pozemní geofyzikální průzkum vybraných lokalit. Na každé z lokalit bude zejména úkolem geofyzikálního měření vybrat vhodné místo pro situování průzkumného vrtu do hloubky cca 1 km. Pozornost je také věnována možnosti monitorování geomechanického stavu horninového masivu, porušeného hlubinnou ražbou.

Abstract

In the Czech Republic, construction of a deep radioactive waste repository is planned. The article describes the scope of work performed so far and informs about similar activities abroad. The preparation for development of a deep radioactive waste repository also includes geophysical research. In the Czech Republic, there was already used, for example, a complex of airborne methods (gamma spectrometry, magnetic survey and electromagnetic measurements) that were conducted at the six selected sites. Long-term attention is also paid to the research of physical properties of the granite massif in the Bedřichov gallery in the Jizerské hory Mountains. In the near future, a task for complex ground geophysical survey of the selected sites can be expected. At each of the sites, the aim of the geophysical measurement will mainly be to select an appropriate location for drilling an exploratory borehole to reach a depth of approx. 1,000 metres. Attention is also paid to the possibility of monitoring the geomechanical state of the rock massif, disturbed by deep mining.

Klíčová slova

hlubinné úložiště, jaderný odpad, skalní horniny, krystalické horniny, granit, seismika, odporová tomografie (ERT)

Keywords

deep repository, nuclear waste, hard-rocks, crystalline rocks, granite, seismics, ERT (electrical resistivity tomography)

provozní pracoviště včetně manipulačních ploch a provozu železniční vlečky. Plocha provozu na povrchu bude zabírat plochu kolem 15 až 20 ha. Koncept úložiště ilustruje *Obr. 2*. Technologické řešení samotného uložení kontejnerů předpokládá multi-bariérový systém izolace kovových kontejnerů s odpadem. Tyto kontejnery by měly být bezprostředně obklopeny těsnícím materiálem (tzv. bufferem), který bude pravděpodobně tvořen bentonitem. Za touto výplní již bude samotný horninový masiv, který by měl být v čase (samotné úložiště by mělo fungovat až po dobu 100 000 let) dostatečně stabilní a dostatečně odolný, např. proti nenadálému zemětřesení.

2 Zkušenosti ze zahraničí

Technologické řešení a výběr vhodné hostitelské horniny se ve světě značně liší podle geologické stavby konkrétní země. Obecně se dá říci, že převažují granitoidní horniny těsně následované jílovými horninami. V Německu byl jako vhodné prostředí vybrán solný dóm u Gorlebenu, ale během přípravy vyvstaly různé problémy, např. (navzdory předpokladům) průniky podzemní vody. Na povrchu u dolu samotného stojí mezisklad, kam se vozí kontejnery s odpadem z podniku na přepracování paliva ve francouzském Le Hague (obvykle za mohutných protestů německé veřejnosti). Co se týče ostatních států, proces budování úložiště je v různých fázích. V USA se při výstavbě úložiště v Yucca Mountain (na okraji nevadské jaderné střelnice) objevily geologické a technologické problémy, které přípravu zpožďovaly a prodražovaly. Oblast Yucca Mountain je umístěna v prostředí tvořeném vulkanickými tufy (ty by měly sloužit jako přírodní ochrana před radiologickými riziky). Nyní se však hledá jiná, vhodnější lokalita.

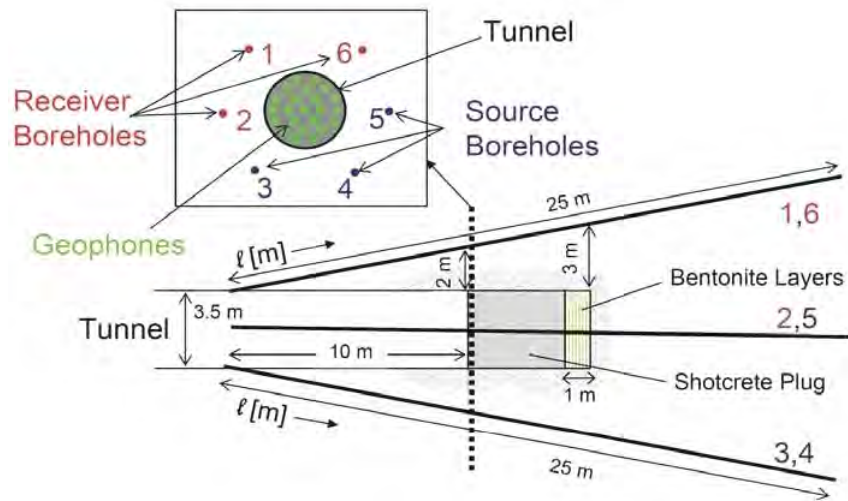
Nejdále s výstavbou hlubinného úložiště jsou ve Finsku a ve Švédsku (geologicky se jedná o Baltský štít, s krystalickými horninami prekambričského stáří). Ve finské lokalitě Olkiluoto (viz *Obr. 3*) je budována soustava podzemních děl pro podzemní laboratoř – v současnosti dosahuje délky téměř 4 kilometrů a hloubky přes 400 metrů. Na konci roku 2012 požádala finská strana o povolení výstavby samotného úložiště, jako první země na světě vůbec. V místech lokality Olkiluoto se nachází atomová elektrárna a staví se i další (francouzská firma AREVA). Finové evidentně účelně koncentrují do jedné lokality více objektů souvisejících s jadernou problematikou, což může být i inspirací pro nás. Ve Švédsku v oblasti Oskarshamn je už řadu let v provozu výzkumná podzemní laboratoř v lokalitě



Obr. 3 Projekt Olkiluoto , vlevo koncept úložiště a vpravo jaderné elektrárny (dle www.posiva.fi)

Äspö, kde se realizuje rozsáhlý mezinárodní program výzkumu i za české účasti. V roce 2009 byla vybrána pro budoucí hlubinné úložiště lokalita Forsmark. Zajímavé je, že právě Švédsko a Finsko se rozhodly pro přímé ukládání vyhořelého jaderného paliva, přičemž vlády obou zemí úspěšně přesvědčily své občany, resp. obce, ve vhodných lokalitách o umístění a vybudování hlubinného úložiště použitého jaderného paliva.

Výstavbě úložiště předchází delší etapa výzkumu, v rámci kterého jsou zkoumány, mimo jiné, geotechnické vlastnosti zvoleného hostitelského horninového prostředí, reakce této hostitelské horniny na ražbu důlních děl, chování horniny vůči tlumícím materiálům a výplním (hornicky základka), které se budou nacházet mezi kontejnery a stěnou štoly apod. Bez tohoto výzkumu by nebylo možno získat objektivní poznatky o tom, jaké požadavky je nutno klást na hostitelské horninové prostředí či jaké jsou jeho limity. Jakožto ukázkou geofyzikálního výzkumu probíhajícího v zahraničí uveďme zkoumání tlumící bentonitové vrstvy mezi kontejnerem a štolou ze švýcarské laboratoře Grimsel (dle Spillmann et al. (2010)). Zde (Obr. 4) je sledována situace, jak se bude chovat bentonitová výplň mezi kontejnerem a stěnou štoly. Výplň bude bobtnat v důsledku přijímané vlhkosti a bude i tepelně namáhána.



Obr. 4 Zkoumání chování bentonitu pomocí seismické tomografie – lokalita Grimsel dle Spillmann et al. (2010).

Vrstva bentonitu je zde zakryta torkretovým nástřikem a okolo tohoto prostředí bylo vyraženo šest ukloněných vrtů. Ve vrtech 1, 2 a 6 byly umístěny přijímače, ve zbývajících třech byly umístěny zdroje seismické energie. Přímou na stěně torkretové zátky byla navíc umístěna skupina geofonů. Pro buzení seismických rozruchů je užíván sparker. Ve vrtech byly jako snímače použity hydrofony a vrty byly naplněny vodou. Ve štolu byly osazeny vertikální geofony 100 Hz. Příklad dokladuje jednu z otázek, kterou si je nutno klást i pro studium chování českých granitů. Dosud totiž podrobněji neznáme geomechanickou reakci granitových hornin na teplem namáhanou a vlhkostí dotovanou vrstvu bentonitu. Zároveň je nutno připomenout, že mezi skalní horninou a bentonitem pravděpodobně vznikne výrazný rozdíl ve velikostech měrných odporů, což zvyšuje pravděpodobnost vzniku elektrických článků, které jsou následně příčinou nebezpečí koroze kovových objektů (viz lit. Bárta a kol. 2010).

Zahraniční zkušenosti jsou rozsáhlé a většinou poučné i pro český projekt. Po stránce geologické jsme do určité míry kompatibilní s lokalitami ve Skandinávii, které jsou budovány tvrdými krystalinickými horninami. Geologické podmínky skandinávského štítu jsou ovšem mnohem příhodnější než jak je tomu ve střední Evropě. V hlubších partiích horninového masivu jsou projevy tektoniky ve Skandinávském štítu výrazně menší než v střední Evropě. Maximální hodnoty seismických rychlostí v blocích kompaktních hornin jsou však obdobné (v Jirků 2011 dle měření Bárta 2008). Výzkumy v zahraničí řeší jak geotechnickou problematiku chování horninového masivu v bezprostředním okolí kontejnerů s radioaktivním odpadem, tak ale i stavbu celého horninového bloku určeného k ražbě úložiště. V termi-

nologii projektu úložiště hovoříme o vzdálené a blízké zóně interakcí. Blízká zóna je oblastí bezprostředního okolí kolem kontejnerů a vzdálená zóna je vlastní horninový masiv až k povrchu terénu.

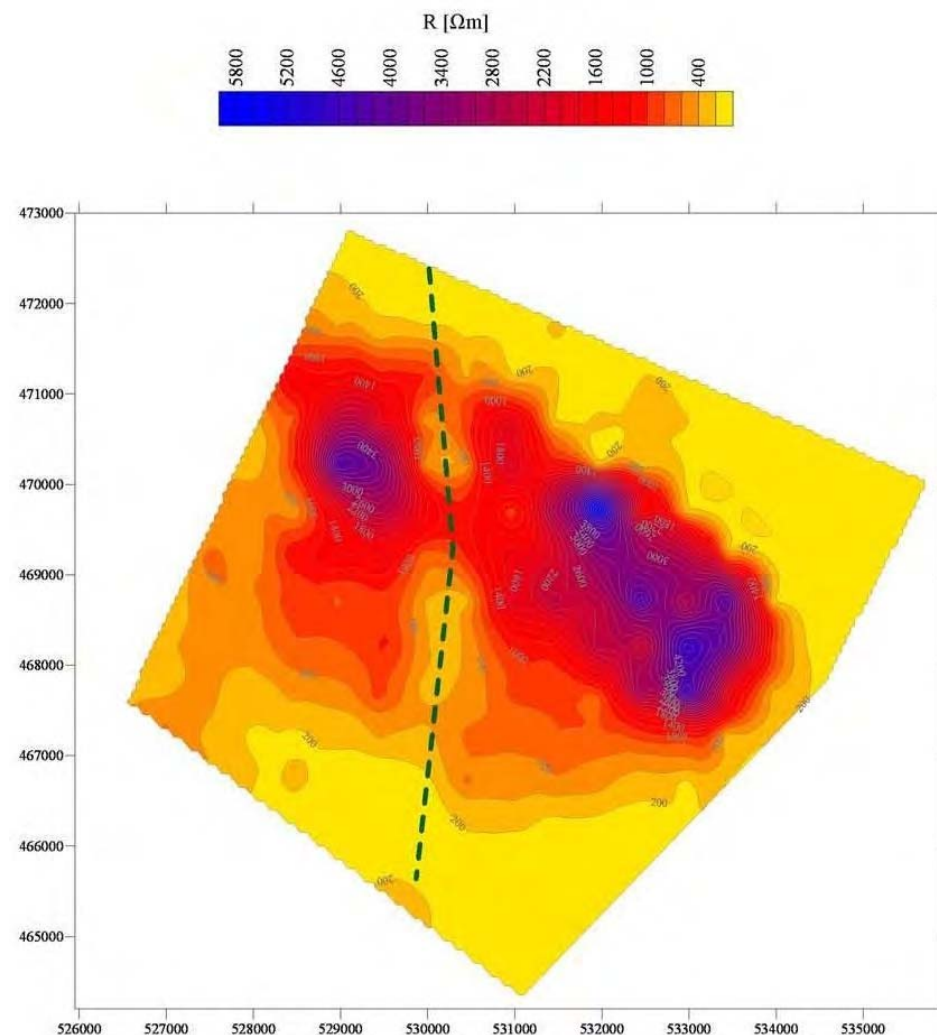
Za zásadní poznatek považujeme výsledky výzkumů publikovaných v článku Cosma (2004). Obdobnou tematiku přednesl prof. Cosma i na své pražské přednášce v roce 2006. Prof. Cosma akcentuje význam vrtných geofyzikálních metod, zejména seismického vertikálního profilování. Tato metoda zajišťuje spolehlivé prozkoumání bezprostředního i vzdálenějšího horninového prostředí kolem vrtů. Odstraňuje se tak částečně problém povrchových geofyzikálních metod, které jenom těžko budou získávat podrobné informace až do hloubek 1 km.

3 Geofyzikální práce provedené v České republice

V České republice byla již vykonána řada výzkumných prací včetně geofyzikálních. Z geologických (resp. geofyzikálních) je možno vyjmenovat zejména:

- Výzkumy na Melechovském masivu (viz například Woller, 2004 a Procházka, 2006).
- Soustavné monitorování granitového masivu ve štole přivádějící vodu z Vodního díla Josefův důl do úpravny vody v Bedřichově u Liberce (viz např. lit. Bárta a kol., 2010, Klominský a kol., 2008, 2010).
- Studium chování vyrubaných komor v granitových lomech Ruprechtice a Hraničná (viz Bárta a kol., 2008).
- Monitoring chování puklinových systémů horninového masivu geofyzikálními metodami (statní grant TA03020408 zahájený 2013).
- Letecké geofyzikální mapování šesti vybraných lokalit (viz Bárta in Skořepa, 2005)

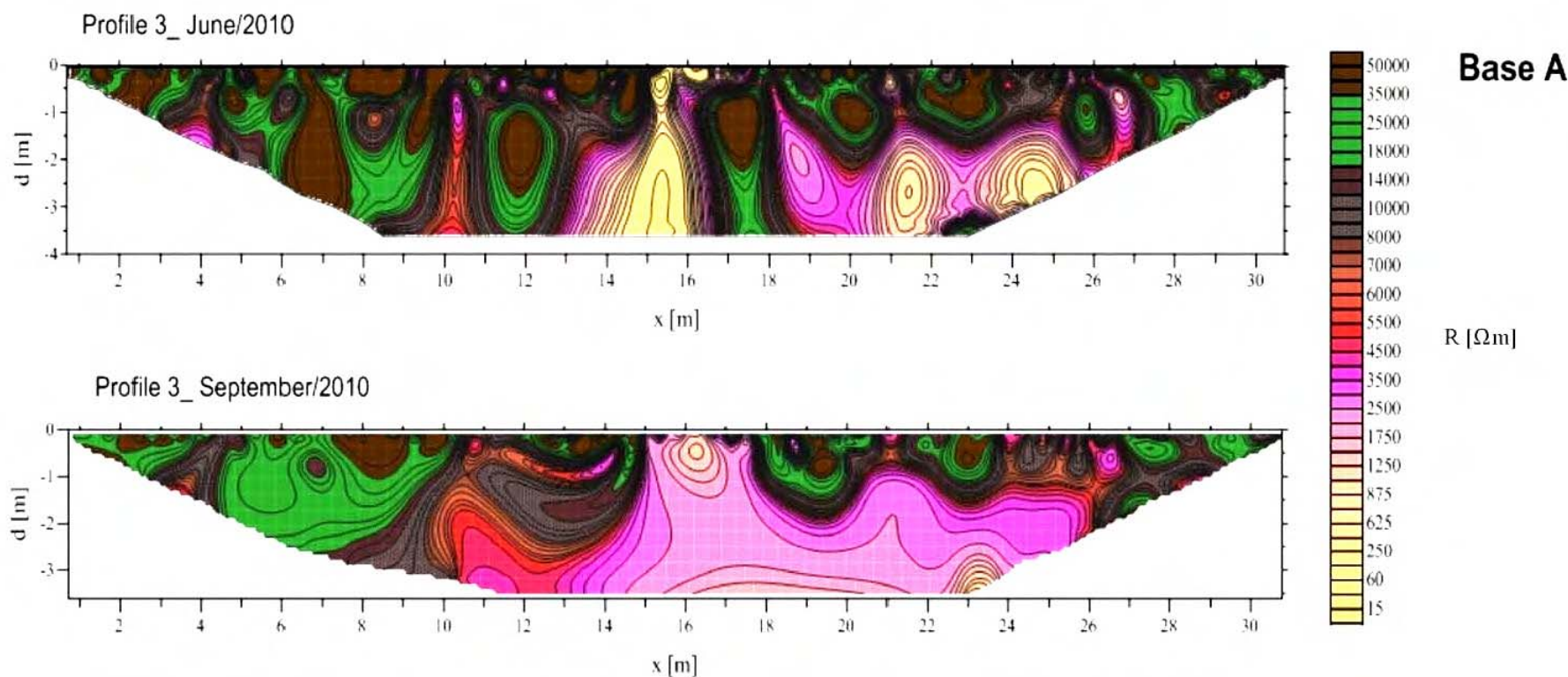
Z odborného pohledu je užitečné upozornit na letecké geofyzikální mapování, které bylo provedeno s nejmodernějšími přístroji a kdy poprvé byla v komplexu geofyzikálních metod použita také elektromagnetická metoda, a to se značným přínosem pro studium tektonické stavby. Letecké mapování umožnilo v nalétaných oblastech vymezit nadějná místa, u kterých můžeme očekávat sníženou přítomnost tektonického porušení granitového masivu. Na Obr. 5 je znázorněn, jako příklad, výsledek leteckého elektromagnetického měření z lokality



Obr. 5 Mapa izolinií měrného odporu – lokalita Rohožná (letecký průzkum) Souřadnice v JTSK. Dle Bárta, Andersen (2005)

Rohozná (kraj Vysočina). Na mapě zdánlivých měrných odporů lze dobře sledovat dvě etapy intruze granitu. Výsledky tohoto projektu jsou shrnuty v závěrečné zprávě Bárta, Andersen (2005) a v Bárta in Skořepa (2005).

Soustavné výzkumy v Bedřichovské štole (prováděné od roku 2004) přinesly dosud v odborné literatuře nepopisované (nebo případně jenom okrajově zmiňované) nové poznatky z oblasti elektrických odporových měření. Monitoring puklinových pásem metodou odporové tomografie ve štole v Bedřichově (viz příklad na *Obr. 6*) totiž prokázal drobné časové změny v chování měrných odporů, které evidentně souvisejí s obsahem vody v puklinách (tj. s průběžným otvíráním a zavíráním puklinových systémů v důsledku změn v napjatosti horninového masivu). Na *Obr. 6* je možné sledovat porovnání výsledků dvou etap odporové tomografie, naměřené na profilech nacházející se v ražené části štoly (druhá část tohoto důlního díla byla ražena pomocí trhavin). Výsledek demonstruje, jak již bylo uvedeno, časové změny v odporovém obraze, které lze pravděpodobně interpretovat pomocí změn v nasycení puklinového systému podzemní vodou. Více informací o geofyzikální části projektu Bedřichov lze nalézt v článku Bárta a kol. (2010) nebo diplomové práci Jirků (2011); nebo komplexněji v Klominský a kol. (2010). Experimentálně je ve štole testováno i použití metody TDR (Time Domain Reflectometry), která sledu-



Obr. 6 Lokalita Bedřichov, odporová tomografie (střed obrázku se vztahuje ke staničení 893 štoly).
Dle probíhajících výzkumů Bárta a kol.

je změny permitivity (resp. vlhkosti) v připovrchové vrstvě kolem výrubu. Seismika měřená ve štole Bedřichov charakterizovala základní geotechnické parametry granitů Jizerského granitového masivu a umožnila tak definovat fyzikální standard granitových hornin s minimálním či nulovým porušením puklinovým systémem.

Za významný poznatek lze považovat zjištění, že skalními horninami v Bedřichově procházejí parazitní (bludné) proudy v rozsahu, který by mohl nepříznivě narušovat kovové objekty v budoucím úložišti (viz *Obr. 7*). Oblast budoucího úložiště je tedy nutno chránit před vlivem parazitních proudů rušivých proudových zdrojů (blízká elektrická vedení, elektrické dopravníky, přirozená elektrická pole). Na *Obr. 7* je uveden geoelektrický model ve štole Bedřichov a v jeho okolí. Jedná se o popis vyjadřující odporové poměry a tím i ovlivněné chování parazitních (bludných) proudů. Model je založen na výsledcích monitoringu elektrických potenciálů, vertikálním elektrickém sondování a měření metodou VDV. Velikost proudových hustot J_p je zásadní informací o výši nebezpečí koroze způsobené bludnými proudy (viz zejména ČSN 03 8375, ČSN EN 50162). Úvod do této problematiky je více popsán např. v lit. Bárta a kol., 2010, nebo v Bárta a kol., 2007.

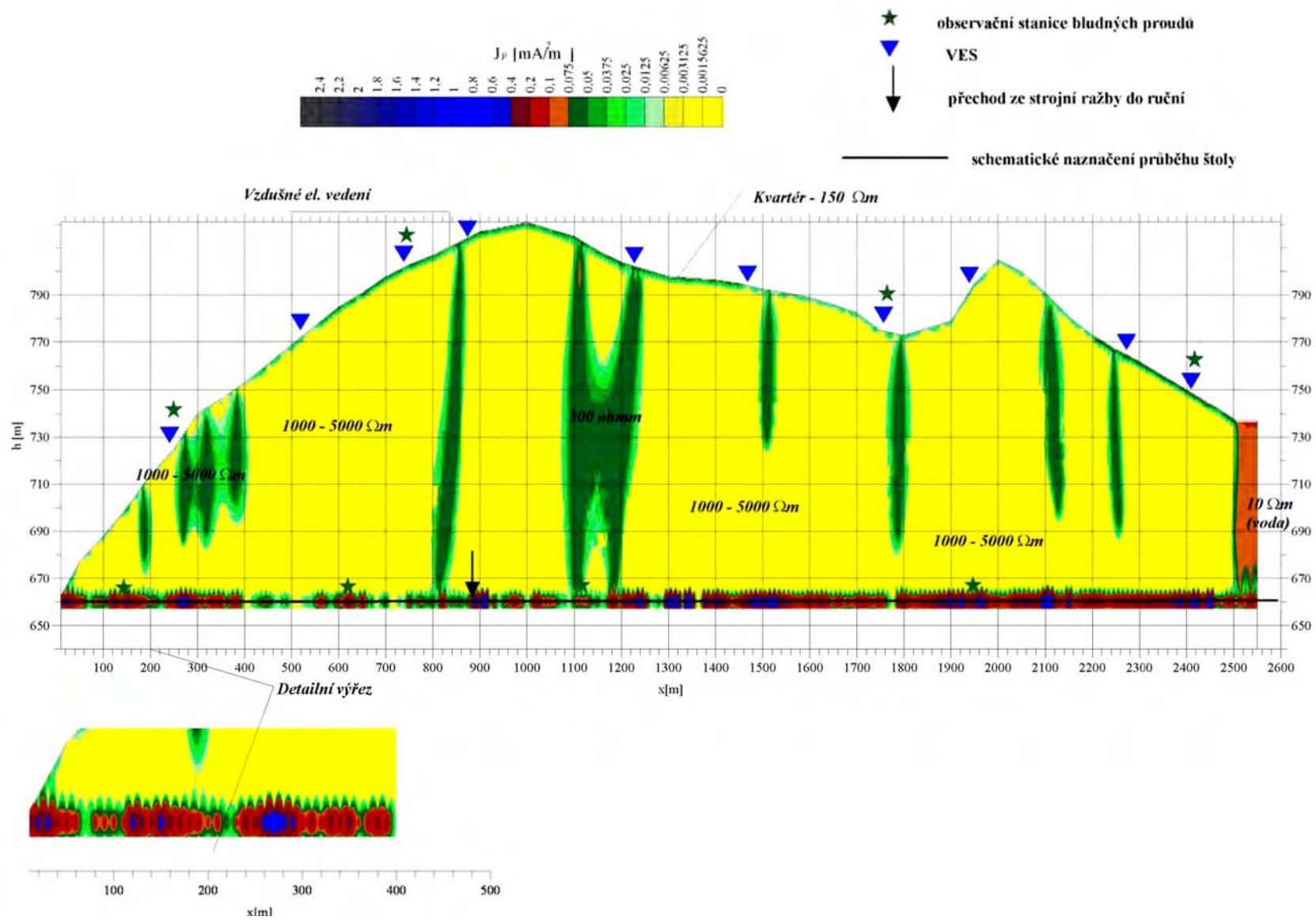
4 Závěry a shrnutí – výhled do budoucna

V současné době lze říci, že před českou geofyzikální obcí leží zásadní úkol, tj. vyprojektovat a realizovat za přiměřených nákladů efektivní komplexní geofyzikální průzkum, který umožní, v komplexu s dalšími průzkumnými metodami, interpretovat na vybraných lokalitách horninový masiv tak, aby mohla být posouzena vhodnost jednotlivých vybraných lokalit pro umístění hlubinného úložiště. Tím geofyzika nakonec přispěje k vybrání dvou nejvhodnějších míst (hlavní a záložní lokality) určených pro detailní průzkum a následnou realizaci úložiště. Z pohledu možností geofyziky se můžeme soustředit zejména na následující, pro geofyziku reálné úkoly:

- vymezit na zkoumaných lokalitách quasihomogenní horninové bloky vhodné pro situování nejméně jednoho průzkumného hlubinného vrtu (hloubka maximálně 1 km).
- účelně využít realizované vrty pro vrtné geofyzikální metody (karotáž vrtu, vertikální seismické profilování, up hole shooting).
- zavčas zajistit soustavný geofyzikální monitoring chování horninového masivu ovlivněného ražbou a kontaminovaného možnými parazitními (bludnými) proudy.

Velký problém, který před geofyzikou stojí, spočívá v tom, že je nutno poskytnout relativně podrobné informace do hloubek kolem 1000 m. Evidentně je tedy nutno počítat, mimo jiné, se seismickou reflexí ve verzi near-surface seismics, s vyhodnocením povrchových seismických vln a s použitím některé z variant elektromagnetického sondování (pravděpodobně metoda CSAMT). Půjde tedy i o aplikace metod, jejichž použití není v Česku časté či je zcela nové.

Shrneme-li předchozí informace, lze konstatovat, že před geologickou obcí se rýsuje rozsáhlé zadání, které ovlivní v následujících letech pracovní náplň řady geofyzikálních odborníků. Tento úkol nemá pouze odbornou stránku, ale má také svou stránku manažerskou a zároveň ekonomickou, na které se je nutno také včas dobře připravit.



Obr. 7 Lokalita Bedřichov, model geoelektrických poměrů z oblasti štoly Bedřichov. Dle Bárta a kol. (2010)

Seznam literatury

- ANDERSEN, H. T. *Final Report on Helicopter-borne EM/Magnetic/Gammaray Spectrometer Survey over Six Blocks in the Czech Republic*. McPhar Geosurveys Ltd. for G IMPULS Praha spol. s r.o., 2004
- BÁRTA, J., KNĚZ, J., BUDINSKÝ, V., JIRKŮ, J. *Seven years of experience in experimental testing of granite rocks in the gallery serving as water conduit from the Josefův Důl hydraulic structure to treatment plant in Bedřichov (Northern Bohemia)*. EGRSE, No 2, ISSN 1803-1447, 2010
- BÁRTA, J., KOPECKÝ, P., BUDINSKÝ, V., BENEŠ, V., ŠPAČEK, K. *Model chování vyrubané komory na základě studia fyzikálních poměrů v okolí jámových lomů*. G IMPULS Praha s.r.o., 2008
- BÁRTA, J. a kol. *Bedřichovský tunel. 3. etapa geofyzikálních prací. Zpráva G IMPULS Praha pro ČGS*, 2007
- BÁRTA J., ANDERSEN H. T. *Závěrečná zpráva o leteckém geofyzikálním měření na šesti lokalitách v České republice*. G IMPULS Praha s.r.o., 2005
- COSMA, C. *Two decades of evolution of hardrock seismic imaging methods applied to nuclear waste disposal in Finland*. In EAGE 66th Conference & Exhibition — Paris, France, 7 - 10 June 2004
- JIRKŮ, J. *Geoelektrický a seismický výzkum pro posouzení horninového masivu v blízkém okolí ražené štoly*. Diplomová práce. Karlova universita v Praze / Přírodovědecká fakulta, 2011
- KLOMÍNSKÝ, J., BÁRTA, J., DRÁBEK, M., HAVÍŘ, J. *Situační zpráva o plnění projektu. Studium dynamiky puklinové sítě granitoidů ve vodárenském tunelu Bedřichov v Jizerských horách - etapa duben 2006 - červen 2008*. Česká geologická služba, 2008
- KLOMÍNSKÝ, J., WOLLER, F., editoři *Geological studies in the Bedřichov water supply tunnel. SÚRAO Technical Report 02/2010*. Česká geologická služba. Praha. ISBN 978-80-7075-760-4, 2010
- PROCHÁZKA, J. *Druhá etapa komplexního geologického výzkumu testovací lokality Melechov v období 2004-2006. Zprávy o geologických výzkumech, rok 2006*. Česká geologická služba, 2007
- SKOŘEPA, J. *Zpráva o řešení a výsledcích projektu. Svazek A – Souhrnná zpráva pro úkol „Provedení geologických a dalších prací pro hodnocení a zúžení lokality pro umístění hlubinného úložiště“*. Sdružení Geobariera, 2005
- SPILLMANN, T., BLÜMING, P., MANUKYAN, E., MARELLI, S., MAURER, H. R., GREEN, A. G. *Geophysics applied to nuclear waste disposal investigations in Switzerland*. First Break, Vol. 28, Issue 8, August 2010, 39-50, ISSN 0263-5046
- WOLLER, F. a kol. *Základní informace o testovací lokalitě Melechovský masív*. Správa úložišť radioaktivních odpadů, 2004

Autoři

¹ RNDr. Jaroslav Bárta, CSc., G IMPULS Praha spol. s r.o., barta@seznam.cz

² Mgr. Jaroslav Jirků, UK v Praze, Přírodovědecká fakulta, jaroslav.jirku@natur.cuni.cz