

**MOŽNOSTI GEOFYZIKÁLNÍCH METOD PŘI OVĚŘOVÁNÍ  
NEJASNÝCH STRUKTURNĚ GEOLOGICKÝCH, POŘÍPADĚ  
JINÝCH VZTAHŮ NA LOKALITÁCH PŘI PRŮZKUMU A  
NÁPRAVĚ STARÝCH EKOLOGICKÝCH ZÁTĚŽÍ**

II. aktualizace metodické příručky

Metodický materiál byl zpracován odborem environmentálních rizik MŽP. Vedoucí odboru Ing. Karel Bláha, CSc. Odborný garant projektu RNDr. Jan Gruntorád, CSc. Odborný řešitel projektu RNDr. Jaroslav Bárta, CSc. Spoluřešitelé RNDr. Dušan Dostál, prof. RNDr. Miloš Karous, DrSc., RNDr. Martin Procházka, Mgr. Jaroslav Jirků. Odborný řešitel původní metodické příručky prof. RNDr. Miloš Karous, DrSc.

## **Obsah:**

<i>Přehled zkratk a jednotek</i>	5
<b>1. Úvod</b>	<b>6</b>
<b>2. Vymezení základních kritérií a zásad nutných pro přínosnou aplikaci geofyzikálních metod</b>	<b>7</b>
2.1. <i>Kritéria výběru vhodné geofyzikální metody</i>	7
2.1.1. Metodická vhodnost (M)	7
2.1.2. Ekonomická náročnost (E)	8
2.1.3. Technologická a metodologická náročnost (T)	8
2.2. <i>Zásady aplikace geofyzikálních metod</i>	8
2.2.1. Etapovitost	8
2.2.2. Komplexnost geofyzikálních prací	9
2.2.3. Rozsah a hustota geofyzikálních prací	9
2.3. <i>Limitující faktory aplikovatelnosti geofyziky</i>	10
2.3.1. Stupeň přístupnosti terénu	10
2.3.2. Negativní vliv fyzikálních šumů	11
2.3.3. Nehomogenita okolního prostředí	11
2.3.4. Přesnost měření	11
2.3.5. Labilita inverze	11
<b>3. Stručný přehled používaných geofyzikálních metod</b>	<b>12</b>
3.1. <i>Geoelektrické metody</i>	12
3.1.1. Stejnosměrné geoelektrické metody	13
3.1.1.1. Odporové profilování (OP)	13
3.1.1.2. Odporové sondování (VES)	15
3.1.1.3. Multielektrodová uspořádání	15
3.1.1.4. Spontánní polarizace (SP)	18
3.1.1.5. Metoda vyzvané polarizace	20
3.1.1.6. Metoda nabitého tělesa	20
3.1.2. Metody střídavých elektrických polí (Elektromagnetické metody)	20
3.1.2.1. Metoda velmi dlouhých vln	20
3.1.2.2. Profilové elektromagnetické metody	22
3.1.2.3. Elektromagnetická sondování pro průzkumy do větších hloubek	23
3.1.2.4. Georadar	24
3.1.2.5. Metoda pulsní reflektometrie (TDR – Time domain reflektometry)	25
3.2. <i>Mělká seismika (MS)</i>	25
3.2.1. Mělká refrakční seismika (MRS)	27
3.2.2. Mělká reflexní seismika (MRXS)	28
3.2.3. Seismická tomografie (ST)	29
3.2.4. Multikanálová analýza povrchových vln (MASW)	29
3.2.5. Metoda vertikálního seismického profilování.	30
3.3. <i>Magnetometrie</i>	31
3.4. <i>Gravimetrie</i>	32
3.5. <i>Termometrie</i>	33
3.6. <i>Radiometrie</i>	33
3.7. <i>Geofyzikální měření ve vrtech (karotáž)</i>	34
3.7.1. Metody pro ověřování litologie a charakteru pórového prostoru	35
3.7.2. Metody pro kontrolu technického stavu vrtu	37

3.7.3. Hydrokarotážní metody	37
3.7.4. Metody pro určení prvkového složení hornin tvořících stěnu vrtu	38
3.7.5. Metody pro určení stressu, tj. napěťových podmínek hornin v okolí vrtu i v jiných podmínkách.	38
3.8. <i>Letecké metody a dálkové snímkování</i>	38
<b>4. Použití geofyzikálních metod při řešení konkrétních otázek vlivu ekologických zátěží</b>	<b>40</b>
4.1. <i>Geologická, litologická a hydrogeologická charakteristika zájmového území</i>	40
4.1.1. Geologická stavba území	40
4.1.2. Hydrogeologický režim v pokryvu	43
4.1.3. Litologie podloží a jeho hydrogeologický režim	46
4.2. <i>Antropogenní zásahy do prostředí</i>	50
4.2.1. Vliv umělých zásahů do hydrogeologického režimu	50
4.2.2. Lokalizace a identifikace umělých podzemních objektů	51
4.2.4. Podzemní dutiny	52
4.2.5. Průzkum polohy a rozsahu skrytých ekologických zátěží	53
4.2.6. Rozsah a šíření kontaminantu	54
4.2.7. Monitoring důsledků sanačních prací	56
4.3 <i>Technické a jiné hraniční použití geofyzikálních</i>	58
4.3.1 Posuzování nebezpečí koroze	58
4.3.2 Propojení geofyzikálních metod s geochemií	61
4.3.3 Detekce inženýrských sítí a objektů umělého původu	61
<b>5. Příklady komplexních řešení vybraných problémů</b>	<b>62</b>
5.1. <i>Vymezení hřbetu pevného podloží a mapování tektonických linií pomocí odporového sondování</i>	62
5.2. <i>Vymezení hřbetu pevného podloží a mapování tektonických linií pomocí mělké refrakční seismiky</i>	63
5.3. <i>Určení směru a rychlosti proudění podzemní vody metodou nabitého tělesa</i>	65
5.4. <i>Určení mocnosti a složení antropogenních uloženin odporovým sondováním a mělkou refrakční seismikou</i>	66
5.5. <i>Detekce skryté munice detailní magnetometrií</i>	67
5.6. <i>Přesná detailní magnetometrie pro detekci zbytků podzemních konstrukcí, inženýrských sítí a kovového odpadu</i>	68
5.7. <i>Použití georadaru pro detekci potrubí, sledování reliéfu podloží a pro vymezení skládky</i>	68
5.8. <i>použití radaru a ERT při vyhledání struktur pod zpevněnými plochami</i>	70
5.9 <i>Mapování skládky odporovým profilováním se dvěma rozestupy elektrod</i>	71
5.10. <i>Mapování skládky komplexem geofyzikálních metod</i>	73
5.11. <i>Zjištění úniků skládkové vody do podloží pomocí odporových metod</i>	74
5.12. <i>Mapování rozsahu kontaminace podzemních vod elektromagnetickým profilováním</i>	75
5.13. <i>Průzkum rozsahu a šíření kontaminace</i>	76
5.14. <i>Kontaminovaná vrstva v odporovém řezu podle VES</i>	77
5.15. <i>Vyhodnocení litologie podle karotáže</i>	77
5.16. <i>Proudění podzemní vody ve vrtech v krystaliniku</i>	78
5.17. <i>Proudění podzemní vody ve vrtu v křídových sedimentech</i>	80
5.18. <i>Monitorování změn kontaminace podzemních vod pozemními odporovými metodami</i>	81
5.19. <i>Monitorování sanačních důsledků v monitorovacích vrtech indukční karotáží</i>	82

5.20. <i>Stabilní monitorovací systém</i>	83
5.21. <i>Detekce ropného znečištění pomocí seismického měření</i>	84
5.22. <i>Detekce dehtů pomocí gravimetrie</i>	85
5.23. <i>Detekce přítomnosti ropných zbytků ve skládkovém materiálu</i>	86
5.24. <i>Detekce přítomnosti bahenních usazenin na dně rybníka pomocí radaru</i>	87
5.25. <i>Vyhledání dutiny pomocí gravimetrie</i>	89
5.26. <i>Monitoring stavu poddolovaného území gravimetrickou metodou</i>	90
5.27 <i>Aplikace komplexu geofyzikálních metod pro přípravu a monitoring sanačních prací</i>	90
5.28 <i>Příklady těsné aplikace komplexu geofyzikálních metod s geochemickým průzkumem</i>	96
<b>6. Tabeleární přehled vhodnosti použití geofyzikálních metod při sanaci starých zátěží</b>	<b>99</b>
<b>7. legislativa, normy a standardy</b>	<b>101</b>
7.1. <i>Zákony a vyhlášky spojené s geofyzikálními aktivitami</i>	101
7.1.1. <i>Právní</i>	101
7.1.2. <i>Geologie a hornictví</i>	101
7.1.3. <i>Životní prostředí</i>	102
7.2. <i>Normy a standardy</i>	103
<b>8. Doporučená literatura</b>	<b>104</b>

## PŘEHLED ZKRATEK A JEDNOTEK

Zkratka	Typická fyzikální jednotka	význam
Cond	mS/m	konduktometrie
CPM	-	počet impulsů za minutu
CSAMT	count	audio frekvenční magnetotelurická aparatura s vlastním zdrojem ( <i>Controlled source audio frequency magnetotellurics</i> )
DEMP	Re, Im (%)	dipólové elektromagnetické profilování
DP	mV	difuzní potenciály
EM		elektromagnetický
FP	mV	filtrační potenciály
GK	CPM	gama karotáž
GPR	MHz	georadar
GPS	-	global positioning systém
Gra	$\mu\text{m/s}^2$ ; mGal	gravimetrie
HGR	-	hydrogeologický režim
ERT	-	elektrická odporová tomografie ( <i>electrical resistivity tomography</i> )
MS	m/s	mělká seismika
MRS	m/s	mělká refrakční seismika
MRXS	m/s	mělká reflexní seismika
MASW	m/s; Hz; m	multikanálová analýza povrchových vln <i>Multichannel Analysis of Surface Waves</i>
SASW	m/s; Hz; m	spektrální analýza povrchových vln <i>Spectral Analysis of Surface Waves</i>
MT		magnetotelurický
MTD	nT	magnetická detekce kovů
NT	V (mV)	metoda nabitého tělesa
OP	$\Omega\text{m}$	odporové profilování,
SOP	$\Omega\text{m}$	symetrické odporové profilování
KOP	$\Omega\text{m}$	kombinované odporové profilování
DOP	$\Omega\text{m}$	dipólové odporové profilování
ORP	mV	oxidačně-redukční potenciály
SG	$\Omega\text{m}$	metoda středového gradientu
SG	A (Bq)	spektrometrie gama
SP	mV	metoda spontánní polarizace
ST	m/s	seismická tomografie
TDEM		Elektromagnetická metoda v časové nebo přechodové doméně ( <i>Time domain or transient elctromagnetics</i> )
VDV	kHz	metoda velmi dlouhých vln
VDV-R	$\Omega\text{m}$	odporová varianta VDV
VES	$\Omega\text{m}$	vertikální odporové profilování
VP	%; ms	metoda vyzvané polarizace

## 1. ÚVOD

Problematika ochrany a tvorby životního prostředí se řadí mezi prioritní a nejsledovanější společenské úkoly jak ve světě, tak i v České republice. Tato problematika je velmi široká a dotýká se v té či oné míře veškerých aktivit lidstva

Na těchto úkolech se podílí také geologické vědní obory studiem stavu horninového prostředí. Velmi efektivně lze některé problémy řešit geofyzikálními metodami. V tomto materiálu je z širokého okruhu otázek týkajících se životního prostředí řešena pouze dílčí část – aplikace geofyziky při průzkumu a nápravě ekologických zátěží.

Předkládaný materiál je průvodcem po možnostech různých geofyzikálních metod a má sloužit jednak státní správě jako prvotní informace a dále pak jako inspirativní materiál projektantům a objednavatelům průzkumných prací v této oblasti. Z pohledu systematického zařazení je v tomto textu věnována pozornost hlavně tak zvané „mělké, přìpovrchové geofyzice“ pro kterou je v anglické odborné literatuře vyhrazen termín „near surface geophysics“.

Pro podrobné studium geofyzikálních metod jsou k dispozici doporučené geofyzikální učebnice (a další literatura), které jsou citovány v kapitole 8 a na ně lze případně zájemce z řad této uživatelské příručky dále odkázat. Rovněž zde uváděné příklady chápeme pouze jako příklady nejčastějšího použití jednotlivých geofyzikálních metod, demonstrované zde pro snazší dokreslení jejich možností.

Každé geofyzikální měření je třeba modifikovat dle specifických strukturně geologických, hydrogeologických či petrofyzikálních podmínek té které lokality a z téhož důvodu ani není možné připravit vyčerpávající manuál, podle něhož by mohli pracovníci bez hlubšího geofyzikálního vzdělání přímo geofyzikální měření projektovat, provádět či vyhodnocovat. Tyto práce přísluší certifikovaným odborníkům, geofyzikům, pro něž tento materiál bezprostředně určen není.

Geofyzikální metody podávají informace o studované oblasti nepřímo na základě analýzy fyzikálních polí a fyzikálních parametrů horninového prostředí. Patří většinou do skupiny tzv. nedestruktivních metod (kromě metod kartotážních a podzemních), to znamená, že nevyžadují otvírkové práce pro posouzení stavu horninového prostředí. Při průzkumu ekologických zátěží (sklárky, úložiště, úniky kontaminantů ze skladů a při transportu a další negativní důsledky průmyslové a jiné činnosti) se uplatňují významně kvůli své efektivitě s možností rychlého plošného průzkumu v okolí ekologických zátěží. Umožňují tak v první etapě průzkumu přispět k optimální lokalizaci dalších průzkumných prací (vrtů, odběru vzorků apod.) a v dalších etapách interpolovat a extrapolovat bodové informace z přímých metod ocenění vlivu ekologické zátěže. Metody geofyziky jsou rovněž aplikovány pro sledování důsledků sanačních prací.

V tomto materiálu jsou zmíněny i metody atmogeochemického průzkumu a spektrometrie odebraných vzorků zemin, přestože se nejedná o metody geofyzikální v pravém slova smyslu, ale o varianty geochemických metod. Geofyzika a geochemie jsou sousedící obory a je užitečné, když se při průzkumech vzájemně potkávají či prolínají.

Geofyzika při řešení ekologických zátěží je speciálním oborem, který se v průběhu doby stále vyvíjí. Tento vývoj je podmíněn jednak rozvojem geofyziky samé, která v návaznosti na pokroky v rozvoji slaboproudé techniky a výpočetních technologií může nabídnout lepší geofyzikální přístroje a rychlejší a přesnější zpracování naměřených dat. Komplex geofyzikálních metod, který je v průběhu doby pro průzkum ekologických zátěží postupně aktualizován, je však i odrazem společenské poptávky, která se postupně vyvíjí a rozšiřuje. Tak například v prvním vydání tohoto manuálu v roce 1999 ještě nebyly známy sanační procesy založené na nanotechnologiích, které do geofyzikou monitorovaného území zanášejí nanoželezo, tedy materiál, který z pohledu geoelektrických metod významně ovlivní zkoumané prostředí. Dnešní zadání pro některé lokality jsou velmi komplexní a zahrnují nejen klasické úkoly (např. zjištění směru proudění vody), ale nárokují i odpovědi na otázky spojené se stavem napadení podzemních objektů korozi, pyrotechnickou bezpečností či radioaktivitou. Prakticky během několika let musíme očekávat sofistikované otázky z řad odborné veřejnosti spojené s budováním podpovrchových či hlubinných úložišť nebezpečných odpadů (hlavně radioaktivních). Zde jistě již nevzniknou běžné problémy se zanedbáním povinností jak naložit s odpady, geofyzika však bude muset vypracovat postupy jak monitorovat procesy vzniku a následné kontroly takovýchto objektů.

## **2. VYMEZENÍ ZÁKLADNÍCH KRITÉRIÍ A ZÁSAD NUTNÝCH PRO PŘÍNOSNOU APLIKACI GEOFYZIKÁLNÍCH METOD**

### **2.1. KRITÉRIA VÝBĚRU VHODNÉ GEOFYZIKÁLNÍ METODY**

Kritéria výběru vhodné geofyzikální metody jsou dána její schopností přispět k řešení stanovené problematiky s přihlédnutím k ekonomické a technologické náročnosti.

#### **2.1.1. METODICKÁ VHODNOST (M)**

Metodická vhodnost M stanoví informativnost/informační přínosnost, tj. schopnost geofyzikální metody řešit požadovaný problém. Geofyzikální metody patří do skupiny nepřímých metod (výjimečně se jedná o přímý vztah) zjišťování charakteru a stavu prostředí. Měřené fyzikální veličiny (většinou na zemském povrchu, ale i ve vrtech a podzemních dílech a ve vzduchu) mají zprostředkovaný vztah k rozložení studovaných charakteristik prostředí. Proto je nutný

- dostatečný kontrast měřených fyzikálních vlastností prostředí,
- zjistitelný vztah mezi měřenými fyzikálními parametry a sledovanými charakteristikami prostředí
- vysoká míra jednoznačnosti a přesnosti informace, tj. získání požadované informace z naměřených dat.

Metodickou vhodnost lze charakterizovat množstvím užitečné informace k práci vynaložené na získání geofyzikálních dat.

### 2.1.2 EKONOMICKÁ NÁROČNOST (E)

Ekonomickou náročnost metody určují fakticky finanční náklady aplikace metody. Je dána např.

- nutným počtem pracovníků (operátorů, figurantů) a jejich požadovanou kvalifikací jak v procesu terénního měření, tak při zpracování a interpretaci dat,
- finanční dostupností přístrojového vybavení,
- náročností zpracovatelského softwaru apod.

Ekonomická náročnost je charakterizována cenou jednotky užitečné informace.

### 2.1.3 TECHNOLOGICKÁ A METODOLOGICKÁ NÁROČNOST (T)

Technologická a metodologická náročnost geofyzikální metody je dána stupněm technické obtížnosti získání hodnověrných dat v terénu. Zde se uplatňuje automatizace sběru (měření) dat použitou aparaturou, přístupnost terénu, mobilita použité aparatury v dané kategorii terénu apod. Nepříznivě také ovlivňuje efektivitu získání užitečné informace vliv různých šumů a další limitující vlivy (viz kap. 2.3). Technologickou a metodologickou náročnost lze charakterizovat dobou měření jednotky užitečné informace.

## 2.2 ZÁSADY APLIKACE GEOFYZIKÁLNÍCH METOD

Pro úspěšnou aplikaci geofyzikálních metod je nutno dodržovat určité zásady, které je možné rozdělit do několika skupin:

- časová návaznost (etapovitost) navrhovaných prací
- optimální komplex navrhovaných geofyzikálních metod (použití jedné metody není vesměs pro řešení úkolu dostatečné)
- nezbytný rozsah těchto metod ve vymezeném prostoru.

### 2.2.1 ETAPOVITOST

Geofyzikální metody podávají efektivně plošný fyzikální obraz zájmové oblasti v mapě a často i objemový (3D) model. Jsou to metody nepřímé a vyžadují pro jednoznačnou interpretaci opěrné geologické údaje. Je tedy účelné, aby průzkumné geologické a geochemické práce byly situovány v návaznosti s prováděnými geofyzikálními pracemi. Mezi geologickými, geochemickými pracemi a geofyzikálním průzkumem existuje vzájemně zpětná vazba a geofyzika by měla být aplikována v etapách podle uvedeného schématu:

- návrh komplexu metod na základě rešerše a zkušeností, účast geofyzikálního experta na prosazení návrhu
- parametrické ověření možností geofyzikálních metod, nejlépe měření v blízkosti vrtu, odběr vzorků apod.,
- předběžný geofyzikální průzkum a jeho předběžná interpretace,

- optimální situování geologických a geochemických prací na základě předběžného geofyzikálního průzkumu,
- reinterpretace geofyzikálních prací s využitím výsledku hydrogeologických, geologických a geochemických prací, ověření interpretačních modelů,
- případné doplnění geofyzikálního průzkumu pro ověření nových skutečností,
- společná geologická a geofyzikální interpretace výsledku všech průzkumných prací.

Etapy vzájemné vazby geologie a geofyziky se mohou cyklicky opakovat.

### 2.2.2 KOMPLEXNOST GEOFYZIKÁLNÍCH PRACÍ

Geofyzikálním průzkumem je prostředí charakterizováno různými fyzikálními vlastnostmi, které jen v určité omezené míře odrážejí složitost ekologické a geologické reality. Pro jednoznačnou interpretaci geologických aj. poměrů lokality je proto vhodné posoudit jejich projevy z většího počtu vstupujících fyzikálních vlastností, tj. aplikovat vždy optimální komplex několika geofyzikálních metod, např. kombinovat metodu seismickou s odporovou nebo gravimetrickou.



**Obr. 2.1:** Aplikace dvou geofyzikálních metod – gravimetrie a odporová metoda ERT

### 2.2.3 ROZSAH A HUSTOTA GEOFYZIKÁLNÍCH PRACÍ

Kromě vhodnosti použité metodiky je nutno také na základě velikosti sledovaných nehomogenit a hlavně rozsahu jejich anomální odezvy stanovit optimální hustotu geofyzikální sítě:

- volba vzdálenosti profilů (dle velikosti protažení objektů a místních podmínek),
- orientace profilů (příčně k protáhlým objektům, tektonickým liniím, atd.),
- volba kroku měření na profilech (velikost anomálního projevu).

Někdy je vhodné aplikovat pravidelnou čtvercovou nebo nepravidelnou síť o dané hustotě měřických bodů na jednotku plochy, zvláště v případech izometrických (nepravidelných) tvarů hledaných nehomogenit. Tyto anomální objekty pod povrchem země se projevují na povrchu geofyzikálními anomáliemi, které jsou prostředníkem jejich detekce. Anomálie mají

větší rozsah, než jsou rozměry vlastního zdroje anomálie, a to hlavně z důvodů pozvolného úbytku fyzikálního projevu tělesa se vzdáleností. Proto rozsah anomálie závisí na rychlosti tohoto úbytku se vzdáleností (je jiná pro různé druhy polí a zdrojů).

Většina interpretačních postupů vyžaduje znalost významné části anomálního projevu často do značných vzdáleností od zkoumaného objektu či jevu. Proto je vesměs nutné provádět geofyzikální měření nejen v rozsahu vlastní zájmové oblasti, ale i tam, kde se projevuje tzv. normální pole – pole neovlivněné sledovanými lokálními nehomogenitami. Tyto přesahy závisí na principu použité metody a rozměrech použitého uspořádání, rozměru detekovaných objektů a jejich hloubce. (Velmi zhruba lze říci, že geofyzikální měření by mělo mít nejméně přesah odpovídající hloubce sledovaných objektů).

Krok měření a vzdálenost profilů (hustota měření) může být pro každou geofyzikální metodu různá. Teoreticky se hustota stanoví tak, aby měřená anomálie byla reprodukovatelná z diskrétních bodů (zaznamenaných v mapě, nejlépe vytyčených v terénu) při použití metod interpolace. Prakticky to znamená, že anomálie musí být proměřena s takovou hustotou, aby byly zachyceny všechny její charakteristické body – extrémy, inflexe apod.

Kromě vhodnosti použité metodiky je nutno také na základě velikosti sledovaných nehomogenit a hlavně rozsahu jejich anomální odezvy stanovit optimální hustotu geofyzikální sítě:

- volba vzdálenosti profilů (dle velikosti protažení objektů a místních podmínek),
- orientace profilů (příčně k protáhlým objektům, tektonickým liniím, atd.),
- volba kroku měření na profilech (velikost anomálního projevu).

Někdy je vhodné aplikovat pravidelnou čtvercovou nebo nepravidelnou síť o dané hustotě měřických bodů na jednotku plochy, zvláště v případech izometrických (nepravidelných) tvarů hledaných nehomogenit. Tyto anomální objekty pod povrchem země se projevují na povrchu geofyzikálními anomáliemi, které jsou prostředníkem jejich detekce. Anomálie mají větší rozsah, než jsou rozměry vlastního zdroje anomálie, a to hlavně z důvodů pozvolného úbytku fyzikálního projevu tělesa se vzdáleností. Proto rozsah anomálie závisí na rychlosti tohoto úbytku se vzdáleností (je jiná pro různé druhy polí a zdrojů).

## **2.3 LIMITUJÍCÍ FAKTORY APLIKOVATELNOSTI GEOFYZIKY**

Při volbě vhodné metodiky a posouzení aplikovatelnosti geofyzikální metody významně rozhodují také limitující podmínky měření. Ty můžeme rozdělit do několika skupin – přístupnost v terénu, vliv šumů (fyzikálních a geologických), schopnost získání přesných dat a jednoznačnosti jejich interpretace.

### **2.3.1 STUPEŇ PŘÍSTUPNOSTI TERÉNU**

Průzkum ekologických zátěží se provádí velmi často v blízkosti stávajících průmyslových provozů s inženýrskými sítěmi a hustou zástavbou, pevným neprůrazným pokryvem apod. Zde se projevují nepříznivé limitující podmínky:

- rušivý fyzikální projev povrchových objektů (budov, plotů),
- nemožnost přístupu rozměrnější aparatury (od předmětů velikosti malé krabice po nákladní automobily) i operátorů,
- obtížné zaražení elektrod pro uzemnění či zapíchnutí geofonů,
- omezení vlivem neprostupných porostů a terenních překážek.

### 2.3.2 NEGATIVNÍ VLIV FYZIKÁLNÍCH ŠUMŮ

Existující fyzikální pole mohou nepříznivě ovlivnit jakost měřených veličin. Mezi tato pole patří:

- rušivá časově i prostorově chaoticky proměnná elektromagnetického pole způsobená uzemněním elektrických strojů a inženýrskými sítěmi (bludné proudy),
- vibrační seismické šumy (mechanický vliv pohyblivých částí strojů, dopravní činnost) apod.

Vliv fyzikálních šumů se nepříznivě projevuje jak ve fázi sběru dat (měření je obtížné), tak i ve fázi jejich interpretace (problémová interpretace).

### 2.3.3 NEHOMOGENITA OKOLNÍHO PROSTŘEDÍ

Významně se na volbě metodiky, hustoty a dalších parametrů měření také projevuje fyzikální homogenita zkoumaného území. Výrazná nehomogenita pokryvných uloženin (přírodních i antropogenních) i podložních hornin se nepříznivě projeví v možnostech detekce sledovaných anomálních objektů, které mají většinou menší nebo srovnatelné projevy jako nehomogenní okolí. Vliv nehomogenity prostředí (např. pokryvu) se často zařazuje do skupiny geologických šumů.

### 2.3.4 PŘESNOST MĚŘENÍ

Naprostá většina moderních geofyzikálních aparatur je schopna zajistit přesnost měření dat na vysoké úrovni. Problémem opakovatelnosti měřené veličiny proto častěji závisí na poměru  $I/N$  – složky nesoucí užitečnou informaci  $I$  ke složce obsahující vlivy různých šumů  $N$ . Struktura a relativní velikost šumu  $N$  vzhledem k velikosti anomální odezvy sledovaných objektů proto ovlivňuje schopnost geofyzikální metody detekovat tyto objekty. Mezi šumy z tohoto hlediska zařazujeme jak vlivy parazitních fyzikálních polí (2.3.2.), tak i vliv nehomogenity okolního prostředí (2.3.3.).

Jedním z úkolů zpracování dat je eliminace šumů v obecném a nejširším slova smyslu. Šumy vykazují variabilitu:

- *prostorovou* (hlavně vliv okolních nehledaných objektů, často mělčích s výraznějšími projevy než mají sledované objekty),
- *časovou* (vlivy variabilních časových polí), tzv. variace.

Z hlediska možnosti jejich eliminace je rozhodující jejich statistický časový i prostorový charakter. Oba vlivy se eliminují statistickým zpracováním dat prostorových (vyčlenění anomálií) a časových.

### 2.3.5 LABILITA INVERZE

V převážné většině případů odrážejí měřené geofyzikální veličiny zhlazující obraz skutečného rozložení fyzikálních parametrů. V bodě měření se projevuje vliv širšího okolí, přičemž blízké okolí ovlivňuje měřenou veličinu více než vzdálenější část prostoru. Výsledkem je integrální, často nelineární sumární odezva prostředí. To má jistou výhodu, protože geofyzikální metody z měření v určitém bodě získávají informace o stavu širšího okolí, což se pozitivně projevuje ve volbě kroku měření (viz kap. 2.2.3.).

*Pozn.: Snížení kroku měření může přesnost zvýšit, ale rovněž zpravidla zvýší i cenu měření.*

Interpretace skutečného rozložení parametrů (buť i zjednodušeného modelu) z měřených dat (tzv. inverzní úloha) je však limitována teoretickou labilitou inverze. Z tohoto důvodu interpretované modely na základě geofyzikálních měření jsou:

- *nejednoznačné* (v mezích požadované přesnosti vždy existuje skupina přijatelných modelů) a
- *zjednodušené* (malé nehomogenity se projevují v menší míře, než přísluší měřítkovému vztahu).

Vymezení reálného modelu vyžaduje proto vždy i využití doplňkových známých geologických a dalších opěrných údajů. Metody geofyziky jsou však přínosné i kvalitativně pro extrapolaci bodových údajů (vrtů, vzorků, resp. některých geochemických vlastností zkoumaných látek pomocí zjištění jejich fyzikálních parametrů).

### **3 STRUČNÝ PŘEHLED POUŽÍVANÝCH GEOFYZIKÁLNÍCH METOD**

Geofyzikální metody studují prostředí na základě kontrastu jeho fyzikálních vlastností, které ovlivňují měřená fyzikální pole. Charakter studovaného pole určuje metodu geofyzikálního průzkumu. Publikací věnovaných principům a aplikacím geofyzikálních metod je velké množství (viz kapitola 8), a proto se zde soustředíme pouze na stručnou charakteristiku nejpoužívanějších metod při studiu ekologických zátěží. Základní principy geofyzikálních metod lze dobře studovat z lit. Gruntorád (1987) nebo Mareš (1984). Problematika spojená s ohledem na environmentální otázky je zevrubně popsána v lit. Ward (1990), Montgomery (1990), Reynolds (2011) a Szabo (2012). Hlubší teoretický základ zpracování a vyhodnocení dat je popsán v lit. Butlter (2005). Geofyzika je založena na nedestruktivních principech a je v zásadě velmi rychlá a má k dispozici přenosné přístroje. Proto je předmětem zájmu i vojenských institucí (soustavně USA), které ji užívají jak pro problematiku geotechnickou, tak i environmentální (viz lit. Griffin (1995)). Při používání geofyzikální literatury je možno poznamenat, že starší literatura v určitém smyslu nestárne, protože nestárnou ani fyzikální zákony, které jsou v geofyzice využívány. Nová literatura pak přináší pokrok v prohlubování matematického aparátu, rozšiřují se možnosti přístrojové techniky a užitá geofyzika postupně získává zkušenosti a poznatky i z oblastí, které dříve nebyly předmětem zájmu (např. ekologie).

#### **3.1 GEOELEKTRICKÉ METODY**

Geoelektrické metody patří mezi nejrozmanitější a nejpoužívanější metody geofyzikálního průzkumu, protože využívají různých elektrických umělých i přirozených polí jak

stejnosemných, tak i obecně časově proměnných (elektromagnetických) ke studiu prostředí na základě celé soustavy jeho elektrických a elektromagnetických vlastností. Měří se zejména měrný odpor (rezistivita) či měrná vodivost (konduktivita, tj. převrácená hodnota odporu) hornin. Měrný odpor hornin úzce závisí na obsahu vody v jejich pórech a na kontaminaci porézní vody. Z tohoto důvodu mají odporové metody značný význam při oceňování hydrogeologických podmínek a stupně znečištění prostředí.

Další parametry, které je možné zjistit geoelektrickými metodami a mohou mít vztah k studovaným vlastnostem prostředí (litologii, hydrogeologickým parametrům a pod.) jsou elektrická permitivita, magnetická susceptibilita a různé projevy komplexních elektrochemických aktivit prostředí (polarizovatelnost spontánní či vyzvaná, oxidačně - redukční, filtrační a difúzní potenciály a pod.). Při studiu ekologických zátěží je dáвана přednost metodám, které jsou ekonomicky a technologicky méně náročné a mají vysokou informační schopnost.

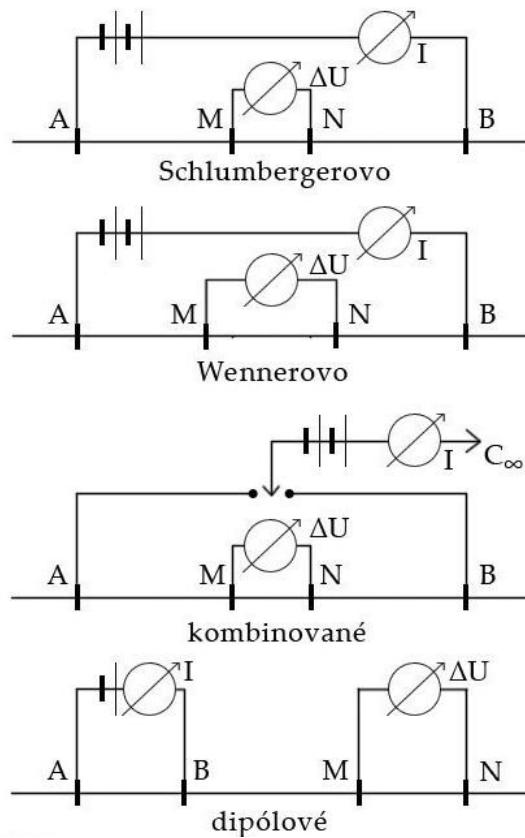
Pro geoelektrická měření je k dispozici rozsáhlá specializovaná odborná literatura, a to i v českém jazyku; např. lit. Karous (1989) se dotýká celé širší problematiky spojené s geoelektrickým průzkumem.

### 3.1.1 STEJNOSMĚRNÉ GEOELEKTRICKÉ METODY

#### 3.1.1.1 Odporové profilování (OP)

Je nejpoužívanější geofyzikální metodou při studiích životního prostředí, protože měrný odpor hornin závisí jednak na litologii a jednak odpor prostředí velmi citlivě odráží obsah a kvalitu vody v pórech horninového prostředí. V odporových metodách (profilování i sondování) se měří a určuje měrný odpor prostředí z měřených hodnot napětí a proudu stejnosměrného elektrického pole vřáněného do země. Přístrojové vybavení je ve srovnání s jinými technologiemi méně náročné. To je další důvod širokého využívání. Při odporovém profilování se sledují změny měrných odporů v horizontálním směru (v mapě), hloubkový dosah je řízen volbou rozměru uspořádání – rozložení zdrojových a měřících elektrod na povrchu země, který je charakterizován tzv. délkou uspořádání. Uspořádání elektrod se většinou pohybuje s pravidelným krokem podél profilů.

Charakter řešeného problému určuje typ uspořádání: např. pro mapování strmých tenkých vodivých poloh (vodivá tektonika, poruchové zóny) jsou nejvhodnější nesymetrická uspořádání (dipólové odporové profilování DOP, kombinované odporové profilování KOP, kombinovaný středový gradient KSG), zatímco obecné odporové mapování kontaktů hornin, sledování reliéfu podloží apod. lze efektivněji realizovat symetrickými uspořádáními (Wennerovo WOP či Schlumbergerovo odporové profilování SOP). Základní systémy měření viz obr. 3.1a, příklad měření v terénu viz obr. 3.1b.



Obr. 3.1a: Základní uspořádání elektrod pro odporová měření (dle Klanica 2012)



Obr. 3.1b: Měření metodou symetrického odporového profilování v terénu

### 3.1.1.2 Odporové sondování (VES)

Je principiálně stejné jako profilování, od něhož se liší tím, že sleduje odporové změny vertikálním směrem pod studovaným bodem tím způsobem, že se postupně zvětšuje délka uspořádání jednotlivých měřících elektrod. Sondování slouží k určení subhorizontálních rozhraní odporově kontrastních vrstev a poloh. Nejpoužívanějším sondážním uspořádáním je symetrické, pak se sondování nazývá vertikálním elektrickým sondováním (VES). Na obr. 3.2 je ilustrační záběr terénního měření.



**Obr. 3.2: Měření metodou vertikálního odporového sondování v terénu**

### 3.1.1.3 Multielektrodová uspořádání

Pro detailní průzkum vertikálního řezu pod studovaným profilem je možno z odporových metod užít kombinace odporového profilování a sondování. To se dříve provádělo buď profilováním s mnoha rozestupy elektrod nebo měřením VES v krátkých ekvidistantních krocích podél profilu. V obou případech dostaneme podél profilu odporové údaje v mnoha hloubkových dosazích, které umožňují detailní interpretaci vertikálního řezu.

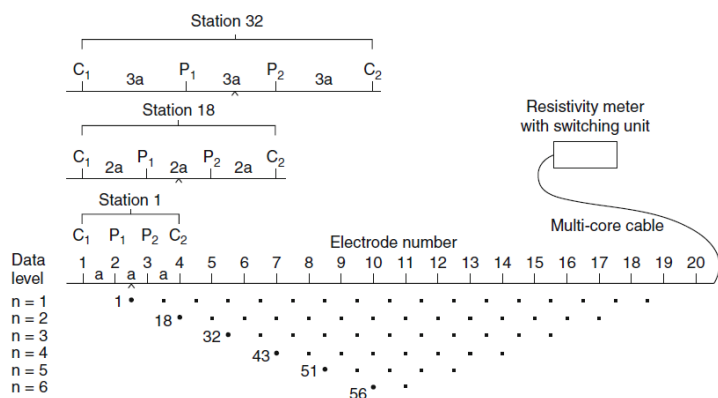
#### Metoda odporové tomografie

Multielektrodová uspořádání měření je nyní možné realizovat simultánně pomocí rozložení mnoha elektrod najednou a s využitím sofistikovaného výpočetního softwaru. Zapojování elektrod při měření je řízeno počítačem, takže systém může zapojit mnohem více uspořádání elektrod než je v praxi možné bez použití specializované multielektrodové aparatury. To vede k tomu, že dochází k překrývání informací z jednotlivých míst zkoumaného řezu, a proto můžeme hovořit o odporové tomografii; přičemž termín tomografie předpokládá, že může být aplikována matematická metoda nazývaná tomografická rekonstrukce. První pokusy matematického řešení u geoelektrických metod sahají již do čtyřicátých let minulého století (viz lit. Tichonov, 1949). V současné době je za všeobecný

mezinárodní standard pro odporová měření považován software Res2DInv (resp. Res3DInv, autor Loke, Geotomo Software).

I přes zásadní zpřesnění interpretace dat (přechod z 1D zpracování na zpracování 2D či 3D) je třeba upozornit na určitý problém s nejednoznačností interpretace všech geoelektrických odporových měření s ohledem na princip ekvivalence. Princip ekvivalence v podstatě říká, že máme-li naměřenou odporovou sondu s určitými hodnotami skutečných odporů a mocností vrstev, můžeme vhodnou změnou odporů a mocností dostat odporovou sondu prakticky stejnou (zvětším odpor na úkor velikosti vrstvy). Tomuto problému se ovšem zkušený interpretátor vyhne, protože startovací interpretační model nastaví na reálné poměry zkoumaného místa (využití archivních vrtů apod.) a v nabídce výsledných řešení vyloučí nereálné modely. Zkušenost interpretátora se musí vyrovnat i s dalšími překážkami, jako je směrová odporová anizotropie, lokální odporové nehomogenity apod. Z tohoto důvodu primitivní aplikace metody metody odporové tomografie (ERT), kdy měření a vyhodnocení provádí neoborník, a to pouze s využitím manuálů výrobce měřicího přístroje, nevede k žádoucím výsledkům.

Na obr. 3.3a je naznačen systém zapojení elektrod. V obr. 3.3b je záběr z terénního měření.



**Obr. 3.3a: Způsob zapojování elektrod v systému ERT. Elektrody zapojené jako C jsou elektrody v tuto chvíli proudové a elektrody P mají funkci elektrod potenciálních. Ilustrace převzata z otevřených internetových zdrojů.**

Rozvoj této metodiky v ČR je podporován dostatkem vhodných aparatur české produkce a dostupným interpretačním softwarem. Prezentace výsledků ve formě hloubkových odporových řezů se stala standardem hlavně při detailních pracích lokalizace kontaminovaných oblastí, kde při vhodném rozložení měřených profilů lze kromě klasických plošných 2D interpretací generovat i 3D prostorový obraz sledovaného území (např. kontaminačního mraku).



**Obr. 3.3b: Multielektrodová aparatura**

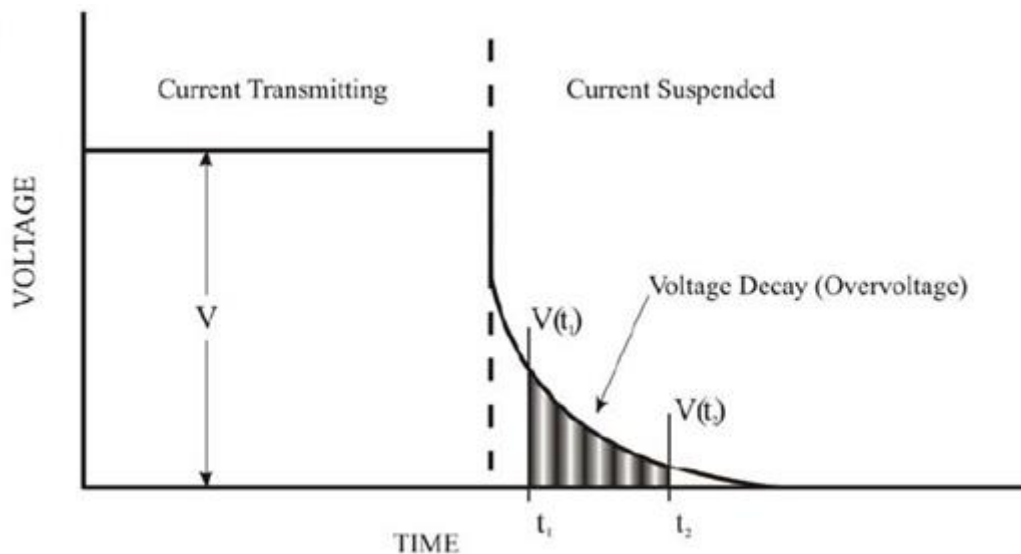
### Metoda tomografie ve variantě sledování vyzvané polarizace (IP tomography)

Společně s měřením elektrického odporu je možno s některými multielektrodovými systémy měřit i parametr vyzvané polarizace (symbol VP nebo IP). Tato metoda je spojená s elektrochemickými jevy v geologickém prostředí, kdy lze sledovat vznik pole VP především u rudních těles, nebo na kontaktech mezi tuhou fází (hornina) a kapalnou fází. Metoda VP

spočívá v zavedení proudového pulzu do prostředí a sledování odezvy podloží těsně po vypnutí zdroje proudu (v řádu ms). V tomto čase po vypnutí se sleduje tzv. vybíjení (vybíjecí křivka), tedy zhruba exponenciální tlumení proudu s časem. V závislosti na druhu materiálu je tento vybíjecí čas delší či kratší – např. z ložiskových průzkumů je známo, že rudní polohy jsou schopny relativně dlouho "udržet" vybíjecí proud. Výsledky se mohou prezentovat v procentech nebo v jednotce ms. Podrobněji o metodě vyzvané polarizace viz lit. Slater (2002) a Slater (2014).

Zásadní přínos metody vyzvané polarizace pro výzkum ekologických zátěží je ten, že zvýšenou polarizací se dá indikovat přítomnost ropných látek či jiných kontaminantů. Při aplikacích na lokalitách s ekologickou zátěží se většinou jedná o polarizaci vytvořenou v iontovém nikoliv elektrodovém prostředí, která vzniká na membránách v místech rozhraní s odlišnou koncentrací mineralizace podzemní (pórové) vody. Tento jev (iontová polarizace) je intenzivněji sledován v rámci geofyziky teprve v posledních letech a je velmi perspektivní pro jeho schopnost detekovat přímo kontaminované prostředí.

Na obr. 3.4 je zobrazena vybíjecí polarizační křivka. Elektroda nabitá na potenciál  $V$  po rozepnutí proudového okruhu postupně svůj potenciál ztrácí v čase  $t$ . Na obrázku je vyšrafovaná plocha mezi body  $V(t_1)$  a  $V(t_2)$ . Polaritu lze hodnotit jako poměr  $V/V(t)$  nebo podle vzorce, ve kterém hraje rozhodující roli délka zvoleného úseku mezi bodem  $t_1$  a  $t_2$ . V prvním případě hodnotíme polarizaci v % a v druhém v ms.



Obr. 3.4: Vybíjecí křivka polarizace po vypnutí zdroje proudu na elektrodě. Vyobrazení převzato z otevřených internetových zdrojů.

#### 3.1.1.4 Spontánní polarizace (SP)

Měření existujících přirozených elektrických stacionárních polí se většinou označuje jako metoda spontánní polarizace (SP). V této metodě bývá měřen potenciální rozdíl (napětí) elektrického pole mezi dvěma či více body na povrchu. Příčin vzniku přirozeného stacionárního elektrického pole v zemi je mnoho a tyto jevy jsou souborně označovány pojmem elektrochemická aktivita prostředí. Z přirozených polí lze jmenovat:

- *oxidačně – redukční potenciály* (ORP) v okolí vodivých rudních žil a kovových objektů, které se chovají jako elektroda v elektrolytu (podzemní voda) a zároveň zkrusují přirozený vertikální gradient potenciálu v zemi
- *difuzní* (DP) a *filtrační potenciály* (FP), vznikající difúzí iontů v podzemní vodě a filtrací podzemní vody (s nosiči elektrického náboje – ionty) průlinčným heterogenním geologickým prostředím.

Oba tyto typy polí mohou mít i antropogenní původ – ORP mohou být spojeny s místy koroze kovových produktovodů, potrubí, podzemních nádrží aj. objektů. FP mohou být vyvolány prolínáním vody místy porušení ochranných podzemních stěn, hrází, bariér apod. Velikost polí FP se v literatuře udává jako nízká (1 – 10 mV) a je často výrazně pod úrovní chaotických intenzivních šumů (bludných proudů – i přes 100 mV/m), které jsou generovány hlavně elektrifikací, a proto jejich měření je vysoce náročné. Často je nutno měřit opakovaně za různých podmínek. Nejvíce se osvědčuje synchronní simultánní monitorování pole SP celé zájmové plochy pomocí velkého souboru uzemněných nepolarizovatelných elektrod v opakovaných časech se statistickým zpracováním.

Metoda SP při měření na lokalitách s ekologickými zátěžemi může sloužit ke sledování pohybů podzemní vody, určení míst porušení těsnících hydrogeologických bariér, úniků z produktovodů apod..

Klíčová otázka pro úspěšné terénní měření SP je spojena se spolehlivou funkcí nepolarizovatelných elektrod, tedy elektrod se stabilní, nejlépe nulovou vlastní polarizací. Na obr. 3.5 je uveden snímek aparatury určené pro měření elektrických potenciálů a vlevo od přístroje je umístěna klasická nepolarizovatelná elektroda. Elektrodu tvoří průlinčitá porcelánová nádoba, ve které je umístěna měděná tyčka ponořená do přesyceného roztoku  $\text{Cu SO}_4$ . Pro některá měření, zejména monitorovací nebo při měření na vodní hladině, je nutno používat konstrukce elektrod, které vyžadují tyto komplikované podmínky. Přesycený roztok skalice je pak nahražován agarem (rozsolem) s  $\text{Cu SO}_4$ . Výzkum, např. viz lit. Bárta (2016), ukázal, že lze pracovat i s platinovými elektrodami nebo s kvalitní nerezovou ocelí bez přechodového roztoku umístěném v porézní nádobce.



Obr. 3.5: Měření přirozených elektrických stacionárních polí (metoda SP)

### 3.1.1.5. Metoda vyzvané polarizace

Elektrochemickou aktivitu prostředí je možné také vyvolat uměle zavedeným proudem do země - pak hovoříme o metodě vyzvané polarizace (VP). Po vypnutí budícího stacionárního elektrického pulzu (impulzní varianta metody VP) se měří vyvolané napětí na povrchu, které s časem vymizí (řádově v sekundách až minutách). Při klasických měřeních VP se používá vesměs malý počet elektrod; v zásadě jedna budící a druhá přijímací elektroda. Charakter ubývání pole (dynamika pole VP) závisí na chemických a fyzikálních podmínkách třífázového geologického prostředí a lze proto usuzovat na přítomnost určitých látek. Pole VP je možné registrovat i frekvenčně buzeným polem (frekvenční varianta metody VP). V současnosti začíná metoda VP mít značný význam i pro problematiku spojenou s ekologickou zátěží. Při tomto měření se však prakticky výhradně používá měření s multielektrodovým systémem, a proto tyto aplikace jsou podrobněji popsány v oddílu věnovanému tomografii, viz kap. 3.1.1.3.

### 3.1.1.6 Metoda nabitého tělesa

V metodě nabitého tělesa se měří potenciál či napětí uměle zavedeného elektrického pole na povrchu v okolí proudové elektrody, uzemněné do vodivě dotované (uměle vodivé - přesolené) zóny v podzemním kolektoru zastiženém vrtem. Dotovaná zóna je transportována pohybem podzemní vody, a proto monitorování pohybu dotované, vysoce vodivé, příp. elektricky nabitě zóny prostřednictvím změn elektrického pole na povrchu umožňuje určit v optimálních případech směr a rychlost proudění podzemní vody.

Úspěch metody NT závisí na přirozené mineralizaci podzemních vod (při malé mineralizaci je solnou dotací vytvářen vyšší vodivostní kontrast) a geoelektrických podmínkách v okolí vrtu (zvláště odporové homogenitě). Pohyb vodivé dotované zóny může být monitorován na povrchu i odporovými metodami nebo metodou vyzvané polarizace, dochází-li k výraznému vodivostnímu kontrastu.

## 3.1.2 METODY STRÍDAVÝCH ELEKTRICKÝCH POLÍ (ELEKTROMAGNETICKÉ METODY)

### 3.1.2.1 Metoda velmi dlouhých vln

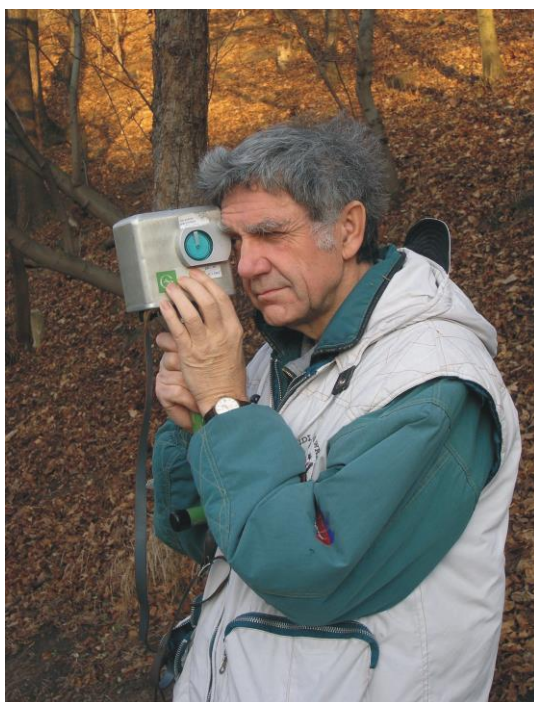
Metoda velmi dlouhých vln (VDV) využívá elektromagnetických polí navigačních radiostanic (10 – 30 kHz). Zkreslení (anomálie) těchto polí souvisí s výskytem vodivostních nehomogenit – vodivých hornin a vodonasycených porušených zón, ale i umělých vodičů (inž. sítě: produktovody, elektrická vedení apod.). Metoda VDV (v indukční variantě), v níž se měří pomocí indukčních cívek magnetické složky EM pole, patří mezi nejekonomičtější geofyzikální metody. Je efektivní např. při mapování průběhu vodivé tektoniky v podloží, zvláště nevodivého (např. vyvřeliny, karbonáty, pískovce). Poměrně vysoká frekvence pole zajišťuje mělký průzkum do hloubek až prvních desítek metrů v závislosti na vodivosti prostředí.

V měřených křivkách reálné složky  $Re$  se vodivé struktury (tektonické poruchy, rudní žíly) projevují jako gradient (spád) v místě inflexe. Proto je využíván přepočítání křivek reálné složky  $Re$  na tzv. Fraserovy gradienty (viz lit. Fraser 1969), které indikují vodiče svými lokálními maximy a jsou tak názornou prezentací polohy i významu geologických vodičů. Přepočítání sofistikovanějším filtrem KH, který je více využíván v zahraničí, umožňuje interpretovat i hloubkové poměry a sklony deskovitých vodičů ve 2D řezu (viz lit. Karous and Hjelt, 1983). Software na takové zpracování měl zabudován např. švédský přístroj ABEM WADI®.

V tzv. odporové variantě metody VDV (VDV-R) se měří pomocí cívky a uzemněných elektrod kromě magnetických i elektrické složky pole radiostanic. Z poměru obou složek se určuje měrný odpor prostředí. Metoda VDV-R je vhodná i pro mapování hornin a nahrazuje v jednodušší formě odporové profilování pro mělký průzkum do hloubek prvních desítek metrů. Tato odporová varianta není v současné době již příliš využívána a je nahrazena jinou efektivnější elektromagnetickou metodou - dipólovým odporovým profilováním, které má vlastní zdroj EM pole, a není tedy závislé na provozu navigačních radiostanic

Nevýhodou metody VDV je silný vliv umělých vodičů (např. elektrických vedení nebo kovových potrubí), které často vytváří rozsáhlé a velké anomálie, zastiňující projevy geologických vodičů (pro technické služby se ovšem ale naopak nabízí možnost vyhledávání umělých vodičů skrytých v zemi). Dalším problémem je nejasná perspektiva navigačních radiostanic, které jsou v poslední době masově nahrazovány družicovými navigačními systémy typu GPS (global positioning systém).

Příklad měření metodou VDV, viz obr. 3.6.



Obr. 3.6: Měření indukční variantou VDV

### 3.1.2.2 Profilové elektromagnetické metody

Profilové EM metody tvoří velmi rozsáhlou skupinu metod s vlastním zdrojem (proto aktivní) se střídavým polem (DEMP, konduktometrie atd.).

#### Dipólové elektromagnetické profilování (DEMP)

Metoda DEMP používá dvě cívky (antény) - zdrojovou a měřicí. Vzdálenost cívek (řádově 1 - n.10 m, cívky jsou spojeny kabelem stanovené délky) a frekvence zdrojového pole (100 Hz -10 kHz) určují hloubkový dosah. Orientace os cívek je volena podle charakteru sledované vodivostní nehomogenity (detekce strmých tektonických linií, mapování horninových rozhraní, sledování reliéfu vodivého či nevodivého podloží a pod.). Základním výstupem z přístroje je naměřená reálná a imaginární proudová složka (I, Q) a výpočet zdánlivého měrného odporu. Přístrojové vybavení pro metody DEMP je náročnější než u stejnosměrných odporových metod a ve vodivém prostředí mají při použití běžných proudových zdrojů značně limitovaný hloubkový dosah (podle typu od prvních metrů až desítek metrů). Kromě toho jsou často nepříznivě limitovány elektromagnetickými šумы. V příznivých podmínkách jsou používány právě pro svou schopnost identifikovat mělce uložené vodivé zóny (například mělké zvodně založené na strukturních prvcích), které mohou být transportními cestami šíření kontaminace.

Rozvoj těchto metod je kromě dostupnosti tuzemských aparatur dán i nástupem nové generace multifrekvenčních aparatur využívajících frekvenční syntézu generovaného signálu a dekonvoluční princip separace jednotlivých složek měřeného signálu. Aparatury pracují v širokém frekvenčním spektru od prvních stovek Hz do 50 kHz a umožňují simultánní měření více frekvencí při kontinuálním způsobu měření. Kromě klasických složek EM pole je výstupem přepočten na vodivost, resp. odpor pro jednotlivé frekvence, dalšími užitečnými parametry jsou magnetická susceptibilita a intenzita pole síťové frekvence 50 Hz. Tyto aparatury byly pozitivně testovány při monitorování stavu protipovodňových hrází v komplexu s dalšími geofyzikálními metodami. Elektromagnetická měření lze zařadit i do komplexu leteckých geofyzikálních metod.

Příklad měření s aparaturou pro metodu DEMP, která detekuje průběžně čtyři frekvence elektromagnetického pole, viz obr. 3.7.

V elektromagnetických metodách je řešení obrácené úlohy ještě složitější než v jiných (odporových) metodách a interpretace je většinou založena na zjednodušených modelech homogenního poloprostoru, což v některých případech může vést při laické interpretaci až k chybným závěrům.

S vývojem počítačové techniky a elektrotechniky se přístroje pro DEMP zmenšovaly a automatizovaly a tak jsou intenzivně používány v hydrogeologickém průzkumu na celém světě i pro hlubší průzkumy nerostných surovin a v hydrogeologii. Výsledky metody jsou v podstatě určeny hlavně odporovými (vodivostními) poměry prostředí. Výhodou oproti stejnosměrným odporovým metodám je bezkontaktní měření bez nutnosti uzemnění elektrod.



**Obr. 3.7: Příklad měření s elektromagnetickou aparaturou**

### Konduktometrie

Jsou-li výstupem aparatury hodnoty vodivosti prostředí, je metoda DEMP označována, zejména výrobci, jako konduktometrie, která efektivně nahrazuje odporové profilování pro mělké průzkumy. Konduktometry mají většinou malé vzdálenosti cívek (někdy i jen jednotky metrů), a tím mají i menší hloubkový dosah. Často jsou cívky (antény) konduktometrů spojeny pevně tyčí. Pokročilí výrobci jsou schopni dodat software, který umožňuje prezentovat výsledky v profilových křivkách měrných odporů, v 2D řezech pod měřeným profilem nebo dokonce v mapách odporů v různých hloubkách při měření na paralelních profilech.

### Detekce kovů (MTD)

Pro vyhledávání vodivých kovových objektů mělce uložených lze s úspěchem použít tzv. detektorů kovů (metaldetektor MTD), které byly vyvinuty původně pro vyhledávání skryté munice (minohledačky) a pokladů. Tyto detektory mají vysílací a přijímací antény a pracují buď na indukčním principu střídavého, nebo pulzního pole.

### 3.1.2.3. Elektromagnetická sondování pro průzkumy do větších hloubek

Elektromagnetické (EM) metody označují ty geofyzikální metody, které využívají časově proměnná EM pole, popsaná vzájemně vázanými složkami elektrickou  $E$  a magnetickou  $H$ . Jejich zdrojem mohou být přirozená existující zemská pole - např. magnetotelurické (MT) pole Země. To je využíváno v MT metodách pro studium planety Země do velkých hloubek až mnoha desítek km.

V případě průzkumů do hloubek ve stovkách metrů se většinou zdrojové pole do země zavádí vhodnými zdroji umělými. Ty se rozdělují na frekvenční, kdy zdrojem (smyčkou, kabelem) prochází proud střídavý – harmonický a přechodový (také pulzní, angl. transient), kdy se do země pouští elektrické pulzy. U frekvenčních metod je hloubkový dosah  $h_{ef}$  řízen změnou frekvence  $f$  (s klesající frekvencí, tj. s rostoucí periodou  $T$ , hloubka roste díky

skinefektu), u přechodových s časem  $t$  po ukončení pulzu hloubka roste. Velmi výrazně ovlivňuje hloubkový dosah i měrný odpor geologického prostředí.

Teoreticky jsou oba způsoby řízení hloubkového dosahu ekvivalentní a vzájemně transformovatelné (viz lit. Karous, 1977), technicky se však výrazně liší. V souladu s rozdíly v teoretických principech se dělí EM sondování na frekvenční (frequency) a přechodová (transient).

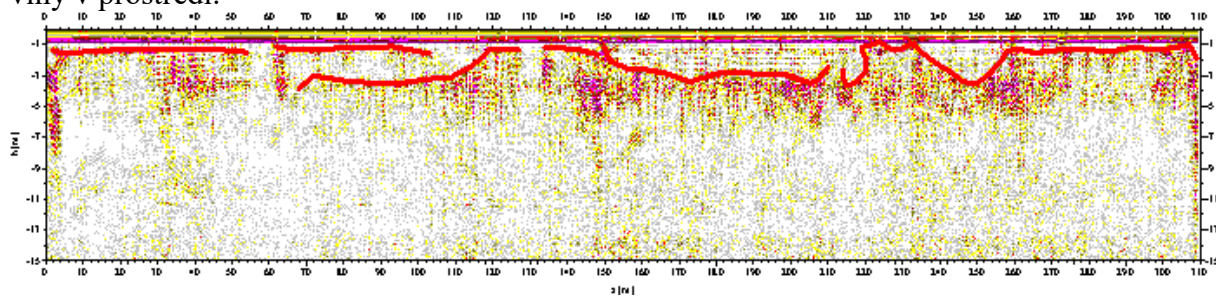
Frekvenční EM sondování využívá univerzálních aparatur pro měření všech složek magnetotelurického (MT) pole v širokém spektru frekvencí. Pro nepříliš hluboké dosahy (zhruba do 1 500 m) se užívá rozmezí vyšších audiofrekvencí; při měření se ale využívá vlastní proudový zdroj  $T$ . Pak se metoda označuje jako audiofrekvenční magnetotelurické sondování s vlastním zdrojem, angl. zkratkou CSAMT (controlled source audio-frequency magnetotellurics). Elektrický zdroj tvoří tři dipóly uzemnění, měří se EM pole v tzv. vzdálené zóně (několik až desítky km), aby primární pole odpovídalo rovinnému poli. Pak je možné měřená data interpretovat podobně jako měření magnetotelurická. Již z toho vyplývá, že metoda je terénním měřením velmi náročná, vyžaduje silný zdroj díky jeho vzdálenosti, ale interpretace není příliš obtížná, pomíneme-li anizotropii prostředí.

Existuje více komerčně dostupných aparatur na měření metodou MT. Tyto přístroje obsahují elektrické sensory - kabely s uzemněním, indukční cívky pro měření magnetických složek, GPS atd. Zdrojový okruh vyžaduje výkonný generátor na automobilu. Jedná se tedy o nákladná zařízení.

Přechodové sondování (angl. Time Domain or Transient Electromagnetics - TDEM) má jako za zdroj pole elektrické pulsy, po nichž se měří v blízké zóně časový spád elektrických a magnetických složek pole. Výhodou tohoto měření proti CSAMT je menší rozměr uspořádání zdroje a měřicích sensorů. Proto je měření na jednom bodě rychlejší a finančně méně náročné. V ČR nebyla ještě tato metoda použita. Rutinně je tato metoda využívána na kanadských geofyzikálních pracovištích.

#### 3.1.2.4 Georadar

Georadarová metoda nebo také georadar či radiolokační metoda (GPR-angl. ground penetrating radar) je založena na vyslání EM pulzů o vysoké vlastní frekvenci (20 – 2 000 MHz) pod povrch a registraci času příjmu po odrazu od podpovrchových reflexních rozhraní, které jsou projevem změny EM vlastností, hlavně elektrické permitivity. Současné aparatury umožňují prakticky spojitě sledování průběhu odrazných rozhraní do hloubek až mnoha metrů podél měřeného profilu ve formě tzv. georadarových řezů, v nichž je registrovaný čas odrazu transformován na hloubky reflexních ploch podle zjištěné či odhadnuté rychlosti šíření EM vlny v prostředí.



Obr. 3.8: Určování hloubky pevného pískovce pomocí geologického radaru

Pro určení této rychlosti se provádí v homogenních úsecích profilů tzv. sondážní měření, v němž jsou obě antény od sebe vzdalovány od středu. Hloubkový dosah je nepříznivě ovlivněn vodivostí prostředí. V prostředí o měrném odporu kolem stovek ohmm (obvyklé podmínky mělkého řezu v ČR) nelze očekávat větší hloubkový dosah než několik metrů a větší nabízený dosah je výjimečný. Georadar patří mezi nejpoužívanější metody mělkého průzkumu (zvláště v regionech s mělkým pokryvem či s výchozy nevodivých hornin). Na obr. 3.9 je snímek ilustrující práci s radarem. Na obr. 3.8 je ukázka radarogramu.



**Obr. 3.9: Příprava měření geologickým radarem**

#### 3.1.2.5 Metoda pulsní reflektometrie (TDR – Time domain reflektometry)

Tato metoda umožňuje přímé měření permitivity „in situ“ v prostředí mezi dvojicí, příp. trojicí uzemněných elektrod na základě měření dráhy odraženého napěťového impulsu. Protože permitivita půdního, resp. horninového prostředí je rozhodujícím způsobem ovlivňována přítomností vody, lze na základě řady experimentálních měření pomocí kalibračních vztahů jednoduše přepočítat naměřené hodnoty permitivit na objemovou vlhkost zkoumaného prostoru. Kromě toho je permitivita důležitým parametrem pro přesné stanovení rychlosti šíření EM signálu při georadarových měřeních, což je nezbytné pro korekci hloubkového měřítka na radarogramech.

Jedinou nevýhodou je skutečnost, že hloubkový dosah těchto měření je dán maximální hloubkou zaražení měřících elektrod, což je běžně do 1 – 2 m. Metoda TDR je vhodná např. pro monitorování infiltrace vody, případně kontaminantů v síti stabilních měřících elektrod.

### **3.2 MĚLKÁ SEISMIKA (MS)**

V souvislosti s rozvojem slaboproudé elektrotechniky a výpočetních postupů zaznamenáváme výrazný rozvoj využití seismických metod pro mělký seismický průzkum, tj. i pro problematiku životního prostředí. K základnímu standardu patří digitální aparatury, které umožňují záznam dat a vytváření databází, které lze následně na počítačích zpracovávat z více

hledisek. Dříve často používané jedno kanálové či šesti nebo dvanácti kanálové aparatury jsou nahrazovány aparaturami s dvaceti čtyřmi až čtyřicet osmi kanály (tj. seismickými snímači). Naměřená data jsou zpracovávána pomocí sofistikovaných výpočetních programů. Jednou z předností profesionálně dodávaných programů je jejich kompatibilita. To znamená, data lze předávat mezi jednotlivými pracovišti a slučovat databáze naměřené více aparaturami dohromady. Pro mělký průzkum má stále velký význam refrakční seismická metoda, nikoliv však pouze ona. Protože moderní interpretační software má většinou komplexní charakter, lze v případě potřeby zpracovat naměřená data i programem pro reflexní seismickou metodu, a tak rozšířit poznatky o studovaném prostředí. V poslední době se věnuje pozornost celému naměřenému vlnovému obrazu, a tak jsou při interpretaci středem pozornosti nejenom refragované a reflexní vlny, ale i vlny povrchové (metoda MASW) a někdy i difragované. Příklad moderní seismické aparatury při měření v terénu, viz obr. 3.10.



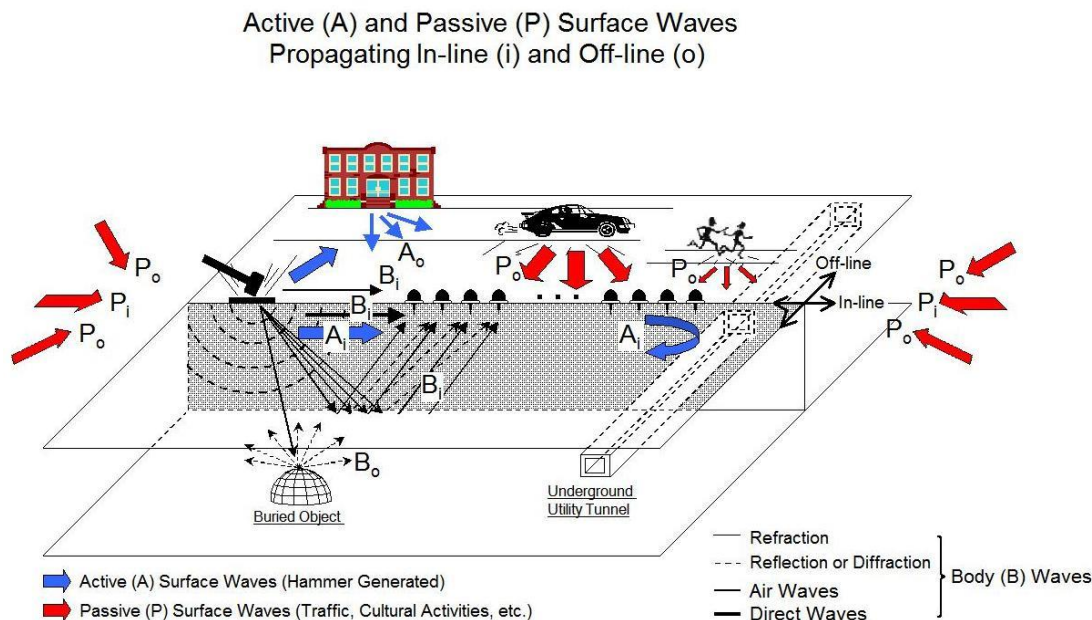
**Obr. 3.10: Měření se seismickou čtyřiceti osmi kanálovou aparaturou**

Dobré interpretační programy umožňují nejenom klasickou interpretaci, kdy se využívají seismické rozruhy situované v ose seismického roztahu. Sofistikované metody, které jsou vesměs založeny na postupech seismické tomografie, umožňují podrobně zpracovat i bočně umístěvané seismické rozruhy (například na paralelním profilu či ve vrtu). Výsledkem interpretace je pak plošný rychlostní obraz nebo rychlostní řez mezi dvěma vrty apod.

Při studiu životního prostředí se v případě seismiky klade většinou zadání sledovat mocnosti kvartérních sedimentů (resp. eluvia), a tak vyhledávat deprese, ve kterých se dají očekávat pasti obsahující větší nahromadění kontaminací těžších než voda. Pokud kontaminace naopak vytváří souvislou vrstvu na hladině podzemní vody, lze vycházet z předpokladu, že se bude měnit rychlost na seismickém rozhraní, popřípadě jeho odrazné vlastnosti. Ropné látky na hladině podzemní vody se projevují poklesem hraniční seismické rychlosti.

Součástí úkolů spadajících do seismiky pro životní prostředí je studium škodlivých otřesů jak přirozeného, tak zejména umělého původu. V komplexním pojetí se nejedná jenom o otřesy buzené v horninovém prostředí samém, ale i hluk šířený vzduchem a následně interferující se seismickými vlnami šířícími se horninou. Každá studie o životním prostředí by

měla zahrnout i riziko spojené s touto problematikou. Pro závěry spojené se seismicitou prostředí není jediným kritériem rychlost kmitání a frekvence v místech seismického zdroje (zdrojů). V závislosti na geologické stavbě je nutno posoudit i následnou cestu rušivých vln zkoumaným prostředím, možnost jejich koncentrace do určité struktury či jejich vzájemnou interferenci.



**Obr. 3.11:** Ilustrační snímek vysvětlující vznik složitých seismických obrazů vzniklých jako součet aktivních a pasivních seismických zdrojů. Převzato z otevřených internetových zdrojů.

Na obr. 3.11 je zobrazen úder seismického kladiva, který vytvořil vlnu přímou (direct wave) což mělo za následek i vznik relexních a refrakčních vln (viz vlny označené B). Úder kladiva vytvořil i povrchovou seismickou vlnu  $A_i$  a následně i  $A_o$ . V blízkém okolí vznikají lidskými aktivitami další vlny, označené jako P, které mají charakter povrchových vln a které lze je z pohledu klasické prospekční seismiky považovat za vlny pasivní (tj. vlny, které nevznikly záměrně v souvislosti s prospekčními aktivitami; někdy hovoříme o seismickém šumu). Celý složitý seismický vlnový obraz vypovídá o studovaném prostředí a moderní inženýrská seismika se snaží o komplexní využití tohoto celkového obrazu.

### 3.2.1 MĚLKÁ REFRAKČNÍ SEISMIKA (MRS)

Pro sledování stavu horninového masivu a jeho nadloží je u nás nejvíce využívána mělká refrakční seismika. Doba příchodu seismických signálů, které jsou většinou na povrchu generovány slabými náložemi nebo údery kladiva, je registrována ve vzdálených bodech, v nichž je pomocí geofonů transformován mechanický vzruch na elektrické napětí registrované seismografy. Seismické vlny procházejí geologickým prostředím, odrážejí se od seismických rozhraní a lámou se na nich a přinášejí informace o mělké stavbě, zvláště pak o reliéfu pevnějšího podloží s vyššími rychlostmi seismických vln (většinou přes 1000 m/s). Nezpevněné pokryvné uloženiny, podobně jako antropogenní uloženiny (např. skládkový materiál) mají nižší rychlosti (stovky m/s).

### 3.2.2 MĚLKÁ REFLEXNÍ SEISMIKA (MRXS)

Mělká reflexní seismika se zabývá registrací a analýzou vln odražených od rozhraní pod povrchem. Jedná se o metodu odvozenou od široce používané (hlubinné) reflexní seismiky, která je využívána pro studium naftových struktur či hlubokých vrstev zemské kůry. Mělká reflexní seismika (Near-Surface Seismic – Reflection Data) má v praxi řadu odlišností, které plynou zejména z toho, že měření probíhá v hloubkové oblasti prvních stovek metrů (max 1000 m), kde se setkáváme se složitým vlnovým obrazem (intenzivní zašumění). S ohledem na zavedenou, relativně nižší cenu projektů spojených s mělkou prospekci při srovnání s všeobecně přijímanými cenami projektů pro naftový průzkum, jsou náklady na mělkou reflexi nutně omezené. Seismický průzkum je prováděn vesměs se seismickými aparaturami s 24 či 48 kanály (tedy nikoliv stovkami kanálů) a za droj seismických rozruchů se používají kladiva či dopadová zařízení. Pro data processing a interpretaci je proto nutno využívat sofistikovaný software, který umožňuje interaktivní přístup, aby při zpracování mohla být maximálně využita i zkušenost interpretátora a jeho znalost místních geologicko-fyzikálních podmínek. Zavedeným standardem pro zpracování je software Reflex W (8). Seismické řezy z mělké reflexe, obdobně jako je tomu u radaru, jsou často vytvořeny s použitím jedné střední rychlosti. V případě radarového měření se pracuje s reprezentativní hodnotou střední permitivity. Tato praxe je oprávněná proto, že většinou nejsou k dispozici data ze seismokarotáže vrtů, případně, že cesta přes střední rychlost vede rychleji k praktickému cíli průzkumu. Podrobněji je problematika popsána v lit. Baker (1999). V České republice zaznamenala mělká reflexe rutinní využití teprve v posledních letech, díky požadavkům na některé hydrogeologické výzkumy regionálního charakteru.

Na obr. 3.12 je zobrazen seismický dopadový zdroj, jehož výkon povoluje seismické aparatury registrovat kvalitní záznamy a tím i jejich interpretaci do hloubek i stovek metrů a který používán i v ČR.



Obr. 3.12: Ilustrační snímek seismického dopadového zdroje

### 3.2.3 SEISMICKÁ TOMOGRAFIE (ST)

Prozařování horninového bloku mezi vrty či důlními díly a povrchem je možné pomocí seismické tomografie (ST). Seismický signál je generován v řadě bodů na jedné straně zkoumaného bloku a na jeho druhé straně jsou v mnoha bodech měřeny časy příchodu signálu. Jednoduché zpracování využívá předpokladu přímého šíření vln, složitější programy umožňují respektovat skutečné zakřivené dráhy šíření. Výsledkem je řez seismických rychlostí ve studovaném bloku. Metoda ST je využívána zvláště pro speciální a detailní výzkum stavu a porušení horninového masívu, příp. lokalizaci dutin. Zavedeným standardem pro zpracování je software Reflex W (8).

### 3.2.4 MULTIKANÁLOVÁ ANALÝZA POVRCHOVÝCH VLN (MASW)

Metodě MASW předcházela a ve stavebnictví se ještě někdy používá metoda SASW (spektrální analýza povrchových vln). V obou případech se jedná o tentýž metodický přístup pro analýzu povrchových vln. Metoda MASW však využívá dnes běžné mnohakanálové aparatury, metoda SASW používá vesměs pouze dva seismické kanály (což je provozně méně nákladné, ale nedostačující pro hlubší výzkum).

Pro povrchové vlny (vesměs Rayleighovy) platí zásada, že vlny vznikají na rozhraní mezi horninovým prostředím a vzduchem. Vlny mají schopnost pronikat do hloubky s tím, že s menší frekvencí vlny je schopnost pronikání vlnění do hloubky větší. Pro první orientaci lze předpokládat, že hloubka proniku vlny do prostředí odpovídá polovině její délky  $\lambda$ .

Z výše uvedeného lze konstatovat, že seismické vlny mají schopnost reagovat na rozhraní o rozdílných seismických rychlostech a hustotách prostředí. Z charakteru chování vln lze stanovit průběh různých seismických rozhraní. Na základě velikosti rychlosti šíření seismických vln lze v příznivých případech stanovit také modul pružnosti  $E_{\text{seis}}$ , smykový modul  $G_0$  a velikost Poissonova čísla  $\nu$ . V případě analýzy povrchových vln lze přibližně ocenit in situ i objemové hmotnosti (hustoty) zkoumaného prostředí  $\rho$ .

Na obr. 3.11 jsou zobrazeny všechny případy vlnění, se kterými se lze setkat v aplikovaném seismickém průzkumu. Výše zmiňovaná metoda MASW má tu výhodu, že v podstatě její algoritmus může využívat všechny zdroje vlnění, tj. i šumy, které v jiných případech zpracování jsou rušivým elementem.

Na obr. 3.13 je zobrazena seismická aparatura, seismické kladivo a roztah geofonů, v tomto případě připravených pro měření metodou MASW. Pro metodu je optimální přítomnost rovinného terénu. Pokud není cílem měření detekce nějaké lokální nehomogenity (dutina apod.), ale komplexní geotechnická a stratigrafická analýza prostředí, vyhovuje metodě MASW zejména studium subhorizontálně uložených sedimentárních vrstev. Hloubkový dosah metody je velký, v praxi stovky metrů s tím, že lze interpretaci i naopak soustředit na přepovrchové detaily.



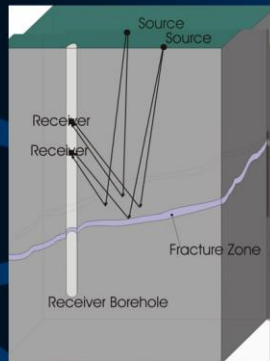
**Obr. 3.13: Seismické roztažení s aparaturou a kladivem při měření metodou MASW**

### 3.2.5 METODA VERTIKÁLNÍHO SEISMICKÉHO PROFILOVÁNÍ.

Metoda vertikálního seismického profilování patří mezi seismické, ale zároveň i vrtné geofyzikální metody. Při tomto měření jsou geofony umísťovány do stvolu vrtu a seismické rozruchy jsou naopak buzeny v relativně příznivém prostředí na povrchu terénu. Metoda ideálně doplňuje konkrétní poznatky z vrtu o informace v jeho blízkém i vzdálenějším okolí.

V současnosti je aktuální příprava výstavby hlubinného úložiště radioaktivních odpadů, které má zajistit bezpečné uložení vysoce radioaktivních odpadů ve speciálních kontejnerech ukládaných do hloubky 500 m, možná i 1000 m. Pro hlubinné úložiště je nutno vytipovat lokalitu minimálně porušenou tektonikou. V ČR se předpokládá, že hostujícím prostředím bude granit či jiná krystalická hornina. V současnosti probíhá v ČR průzkum lokalit převážně lehkými geofyzikálními metodami. Naopak ve Finsku (Olkiluoto) již testovací místa prošla i náročným hlubinným výzkumem, jehož rozhodující část byla prováděná seismicky, a to zejména vertikálním seismickým profilováním. Na obr. 3.14 je uveden jako příklad slajd z přednášky řešitele průzkumů ve Finsku (viz lit. Cosma 2010). Metoda Vertikálního seismického profilování (Vertical Seismic Profiling) zde rozšiřuje informace z vrtu s informacemi o stavbě horninového masivu v okolí.

## Vertical Seismic Profiling



- The source and the detectors can be placed within the bedrock. Receivers located close to targets. Avoids near-surface loss of resolution.
- Provides a favourable geometry for mapping both steeply and gently dipping features.
- Dense drilling not needed.
- Allow wave polarization to be used as an indication of the orientation of the reflectors.

VSP found to be an appropriate layout

Obr. 3.14: Vertikální seismické profilování. Převzato z přednášky Cosma 2010, Finsko, Olkiluoto.

### 3.3. MAGNETOMETRIE

Anomálie geomagnetického pole jsou způsobeny přítomností horninových typů a umělých objektů s kontrastními magnetickými vlastnostmi. Měření se provádí většinou protonovými magnetometry nebo přesnějšími atomovými (např. cesiovými) magnetometry. Magnetometrie nebo též (geo)magnetická měření slouží k detekci podzemních objektů s kontrastními magnetickými vlastnostmi – magnetickou permitivitou či susceptibilitou (z feromagnetických materiálů, hlavně železných a ocelových), pro mapování litologických typů se zvýšenou magnetickou susceptibilitou apod. (viz obr. 3.15). Poznáváme, že magnetickou susceptibilitu prostředí jsou schopny měřit, jako doplňující produkt, i některé přístroje pro měření metodou DEMP (viz přístroj na obr. 3.7.).



**Obr. 3.15: Protonový gradiometr PGM-1 při měření v terénu**

Vliv časových variací pole, regionálních anomálií a dalších rušivých účinků (inženýrských sítí, konstrukcí atd.) je možno minimalizovat tzv. gradientovým měřením (gradiometry – MGM). Magnetická měření se pro lokalizaci kovových podzemních objektů kombinují s měřením detektory kovů (metaldetektory MTD), které je vhodné pro vyhledání mělce uložených i menších obecně kovových objektů, zatímco magnetometrie se používá pro detekci větších a hlubších předmětů feromagnetických. Pro diferenciaci horninových typů (zvláště na vzorcích) je užitečná kapametrie, kterou je možné rychle zjistit magnetické vlastnosti (magnetickou susceptibilitu  $k$ ). Této vlastnosti lze využít i při orientačním vymezení znečištění půd, resp. zemin.

### **3.4. GRAVIMETRIE**

Gravimetrie je založená na měření tíhového pole pomocí vysoce přesných gravimetrů a interpretaci rozložení hustot geologického prostředí z tíhových anomálií. Na základě hustotních kontrastů je možné diferencovat různé litologické typy, vyhledávat porušené zóny – tektoniku, detekovat podzemní dutiny (umělé i přírodní, prázdné či zaplněné vodou), sledovat reliéf podloží s vyššími hustotami a mapovat rozložení a mocnosti pokryvu a antropogenních uloženin – např. skládek s menšími hustotami deponovaného materiálu. Snímek moderního gravimetru je uveden na obr. 3,13. V posledních třech desetiletích se přesnost komerčních gravimetrů zvýšila o dva řády, což znamená, že můžeme gravimetrii využívat i při detekci větších inženýrských sítí, sledovat kvalitu hutnění násypů apod. Z tohoto důvodu se někdy hovoří o gravimetrii (běžné práce pro geologický průzkum a geodézii) a o mikrogravimetrii (sledování drobných objektů či jevů při hustotě měření v síti jednotek metrů).



Obr. 3.16: Gravimetr CG-5 při měření v terénu

### 3.5. TERMOMETRIE

Tepelné pole Země je produkováno rozpadem radioaktivních prvků, teplo uvolňované při mechanických pohybech zemských ker apod. Lokálními zdroji teplotních anomálií při povrchu jsou jednak výstupové cesty podzemních vod (extrémní kontrasty u termálních vod), chemické procesy a hoření přirozené i v umělých deponiích. Měření se provádí kontaktními termistory nebo bezkontaktními termometry (infračervené snímače). Pro rozsáhlejší oblasti je možné využít i dálkového snímkování (letecky, družice) v intervalu infračerveného záření. Pozemní teplotní měření (Term) je účelné provádět za podmínek kontrastních klimatických změn, pod pokrývkou sněhu apod., kdy se méně projeví sezónní a hloubkové variace teplot.

### 3.6 RADIOMETRIE

Určení distribuce přirozených a umělých zdrojů radioaktivního záření umožňuje měření aktivity radiace – radiometrie (Rad) na povrchu, ve vrtech a ze vzduchu. Nejčastěji je radioaktivita detekována vhodnými aparaturami na základě svých ionizačních účinků. Regstruje se úhrnná aktivita nebo pomocí spektrometrů (spektrometrie gama – SG) se diferencují projevy s různou energií jaderného záření. V některých případech se užívá tzv. emanometrie (Em) – k detekci tektonických linií (měření ionizačních účinků radionuklidů v půdním vzduchu vyčerpaném do komory). Kromě rozlišení některých litologických typů slouží radiometrie k určení kontaminace prostředí radioaktivními látkami a ocenění jeho rizika. Při řešení starých ekologických zátěží je nutno počítat i s problematikou spojenou s uloženými radioaktivními odpady, jejichž bezpečné skladování je nutno monitorovat radiometrickým průzkumem. Ukázka gama spektrometru při měření v terénu, viz obr. 3.17.



Obr. 3.17: Gama spektrometr

### 3.7 GEOFYZIKÁLNÍ MĚŘENÍ VE VRTECH (KAROTÁŽ)

Skupina velmi rozmanitých geofyzikálních metod, které měřením ve vrtech stanoví stav a vlastnosti horninového prostředí v blízkém okolí vrtu (do vzdálenosti nejvýše 1 m), parametry kapaliny ve vrtu a geometrické podmínky vrtu anebo vrstev (sklon vrstev, průměr vrtu apod.), je označována často jako karotáž.

Podle principu je rozdělujeme na metody:

- elektrokarotážní,
- jaderné,
- akustické,
- technické.

Méně používaná jsou ve vrtech pro ekologické účely měření tíhová a magnetická jak z důvodů metodických a technologických, tak pro nedostatek a náročnost vhodných aparatur a senzorů.

Terénní práce vesměs vyžadují použití terénního vozidla, na kterém je umístěna karotážní souprava.



Obr. 3.18: Karotážní vozidlo na lokalitě

**Podle účelu aplikace se karotážní metody člení na:**

- metody pro ověřování litologie a pro stanovení kolektorských vlastností,
- metody pro kontrolu technického stavu vrtu,
- metody hydrokarotážní, které umožňují řešit poměrně detailní hydrogeologické podmínky v okolí vrtu na základě komplexní interpretace souboru dat jednak ze standardních, jednak ze speciálních měřicích postupů,
- metody pro určení prvkového složení hornin tvořících stěnu vrtu,
- metody pro určení stressu tj. napěťových podmínek hornin v okolí vrtu, pro zjišťování mechanických parametrů hornin in situ aj.

Pro nezpevněné materiály byly vyvinuty *penetrační soupravy* umístěné na speciálně karosovaných (někdy i pásových) vozidlech. Tyto soupravy sestávají jednak z penetrační tyče, která je vybavena snímači pro měření mechanického odporu na hrotu při jejím zatlačování a tzv. lokálního plášťového tření, jednak ze zatlačovacího zařízení pomocí úderů kladiva (dynamická verze) nebo hydraulickým tlakem (statická verze). Penetrační sondování lze pro zvýšení objektivitu průzkumu a rozšíření možností geotechnických výpočtů doplnit geofyzikálními měřeními ve stvolu po penetraci (penetrační karotáž). Toto měření spočívá v zatlačování karotážních sond penetračním soutyčím do otvoru vzniklém po penetračním sondování při průběžné registraci fyzikálních parametrů. Důvodem pro používání penetračních měření je fakt, že v málo zpevněných horninách je neekonomické hloubit vrty, ze kterých bývá špatný výnos jádra a klasická karotáž by byla zatížena velkými chybami. Penetrační měření jsou masivně uplatňována při sledování skládkového materiálu, při průzkumu výsypek apod.

### 3.7.1. METODY PRO OVĚŘOVÁNÍ LITOLOGIE A CHARAKTERU PÓROVÉHO PROSTORU

Komplex těchto metod zahrnuje metody ze souboru elektrických a/nebo

elektromagnetických metod (např. spontánní polarizace, odporové metody, indukční, příp. dielektrická karotáž), jaderné metody (gama, gama-gama, neutron-neutron) a akustické (měření rychlosti šíření akustických vln, případně útlumu energie akustické vlny v hornině).

- Elektrické metody jsou nejčastěji používané v nezapažených vrtech, indukční karotáž se používá i ve vrtech zapažených jinými než kovovými zárubnicemi. Metoda spontánní polarizace vyčlení propustné písčité horizonty od jílovitých, pokud je rozdílná mineralizace mezi výplachem a původní vodou v pórech hornin. Odporová elektrokarotáž (Ra) měří zdánlivý měrný odpor gradientovými nebo potenciálovými sondami o různých délkách (u potenciálových sond je dosah do stěn vrtu přibližně roven délce sondy), nyní také fokusovanými sondami buď odporovými (laterolog) anebo indukčními (indukční karotáž). Odporová karotáž slouží ke stanovení litologie v písčito-jílovitých profilech, vymezuje vodivé polohy (např. jíly, slíny, písky s mineralizovanou vodou, příp. polohy elektronově vodivých minerálů, pukliny v pevných horninách) od nevodivých (pevné horniny – vápence, krystalické horniny a také výskyt ropy nebo plynu v pórech hornin).
- Jaderné metody jsou používané v nezapažených i zapažených vrtech. Gama karotáž (GK) měří souhrnnou přirozenou radioaktivitu hornin scintilačním detektorem. Měřenou veličinou je počet impulzů za min. (CPS – counts per minute), po cejchování se udávají jednotky dávkového příkonu (nGy/h). Metoda slouží k litologické diferenciaci řezu (zejména podle obsahu draslíku), stanovení jílovitosti a také pro zjištění akumulace radioaktivních prvků. Neutron-neutron karotáž (NNK) registruje množství zpomalených neutronů po průchodu horninou od zdroje rychlých neutronů (např. Am-Be). Naměřené hodnoty v CPM jsou nepřímo úměrné množství atomárního vodíku, proto metoda měří vodíkový index. U nasycených nejílovitých hornin slouží metoda k pórovitosti P (%) po kalibraci sond. V krystaliniku metoda reaguje především na míru alterace i tektonického porušení hornin. Gama-gama karotáž (GGK) měří množství sekundárního záření gama generovaného ozařováním horniny izotopem Cs. Četnost detekovaného záření v CPM je nepřímo úměrné elektronové (objemové) hustotě v bezprostředním okolí, proto metoda s nakalibrovanými sondami udává přímo hustotu hornin. Metoda je často používána v zapažených vrtech pro kontrolu přítomnosti zaplášťových materiálů (cement, jíl, obsyp).
- Akustická (ultrazvuková, přesněji seismická) karotáž v modifikaci měření rychlosti elastických vln přispívá k určení pórovitosti. Především je však metoda v kombinaci s metodou gama gama karotáž používána pro zjišťování elastických geomechanických parametrů hornin in situ (Poissonovo číslo, smykový modul, objemový modul, Youngův modul pružnosti, pevnost v prostém tlaku). Akustická metoda v aplikaci akustický cementoměr (CBL) slouží v zapažených vrtech pro kontrolu kvality přilnutí cementové směsi k pažnicí. Zvláštní aplikací akustické karotážní metody je akustický televizor (akustický skener-ABI), který se používá pro detekci puklin a dalších ploch nespojitosti (foliace, vrstevnatost, prokřemelé polohy atd.). Slouží k určení prostorového průběhu jednotlivých ploch nespojitosti (úklon a směr úklonu) a k sestavení virtuálního orientovaného vrtného jádra. Parametr „hardness“, který je součástí výstupu, je oceněním míry tvrdosti horniny na základě odrazivosti seismického signálu. Akustický televizor se úspěšně používá především v nezapažených vrtech, ale s korekcemi i v některých vrtech vystrojených umělohmotnými pažnicemi.

### 3.7.2. METODY PRO KONTROLU TECHNICKÉHO STAVU VRTU

Kromě zaměření skutečného průběhu osy vrtu (inklinometrie IM) a dalších technických metod sem patří:

- Kavernometrie (KM), která slouží ke spojitému sledování průměru vrtu zpravidla tříramennou sondou. Zejména v nesoudržných a jílovitých horninách se tvoří kaverny. Metoda dobře indikuje rozpukané polohy v pevnějších horninách. Výsledky kavernometrie jsou také využívány k opravám dalších měření, které jsou změnami průměru vrtu nepříznivě ovlivněny.
- Již zmíněné metody gama-gama karotáž (GGK) a také akustický cementoměr (CBL) (případně i měření magnetické susceptibility – v nemagnetické výstroji) lze použít ke kontrole kvality zapažnicové cementace a ke zjišťování kaveren v zapažnicovém prostoru.
- Televizní kamera ve vrtu slouží k detailní vizuální inspekci stavu a charakteru vrtných stěn a/nebo výstroje vrtů. K detekci prasklin v pažnici slouží již zmíněný akustický televizor (ABI), případně optický skener (OBI).
- Inklinometrie (IM), která slouží ke spojitému sledování odklonu vrtu a azimutu odklonu.

### 3.7.3. HYDROKAROTÁŽNÍ METODY

Tento soubor metod měří hloubkově spojitě přímo některou vlastnost kapaliny ve vrtu (rychlost a směr pohybu, vodivost, teplotu, průzračnost, index pH, oxidačně redukční potenciál, procento ve vodě rozpuštěného kyslíku, příp. radioaktivitu) a jejich případnou zonalitu, a tak přispívá k řešení otázek hydrogeologie a životního prostředí, a proto následující ukázky se věnují tomuto tématu.

Rezistivimetrie (RM) měří měrný elektrický odpor, resp. vodivost vody ve vrtu. Pokud není přirozený kontrast ve vodivostech mezi vodami ve vrtu a v pórech okolní horniny, označujeme vodu ve vrtu solným roztokem a měřeními v čase zjišťujeme rychlost nahrazení slané vody ve vrtu vodou z obklopující horninové formace, a tak určujeme rychlost filtrace podzemní vody napříč vrtem nebo rychlost vertikálního proudění vody vrtem směrem nahoru či dolů (metoda ředění označené kapaliny). Speciálními postupy (čerpání, nálev označené kapaliny) změnou hydrostatického tlaku při snížení či zvýšení hladiny vyvoláme proudění i v těch propustných polohách, které se za přírodních poměrů neprojevily, neboť přirozená rychlost proudění vody je příliš pomalá na to, aby mohla být sledována v reálném čase. Tímto způsobem lze nejen identifikovat všechny propustné polohy zastížené vrtem, ale zároveň posoudit, zda vertikální proudění (pokud ve vrtu na základě metody ředění označené kapaliny bylo zjištěno) je pouhým přetékáním vody mezi propustnými polohami, anebo zda vrt způsobil hydraulický zkrat (propojení dvou či více kolektorů o různých výtlačných úrovních podzemní vody). Metoda čerpání/nálevu označené kapaliny umožní zjistit i poměrné vydatnosti jednotlivých propustných poloh. Při znalosti poklesu hladiny (v případě čerpání) nebo nárůstu hladiny (v případě nálevu) při známé vydatnosti čerpání/nálevu a při zjištěné mocnosti propustné polohy a její poměrné vydatnosti lze určit orientační hodnotu koeficientu filtrace vztaženého přímo na mocnost propustné polohy.

Pokud bylo na základě metody ředění označené kapaliny zjištěno proudění napříč vrtem, směr tohoto proudění je možno zjistit pomocí metody: detektoru směru horizontálního proudění.

Metodu ředění označené kapaliny lze aplikovat nejen pro měření na základě rezistivimetrie (RM), ale i na základě fotometrie (FM) - jako značkovadlo se používá barvivo.

Průtokometrie (PM) slouží ke zjišťování vertikálního proudění ve vrtech. Tato měření se s úspěchem používají tam, kde je proudění rychlé (vrty s přetokem, vrty, které propojily dva kolektory s různými výtlačnými úrovněmi a způsobily tak ve vrtu hydraulický zkrat a podobně).

#### 3.7.4. METODY PRO URČENÍ PRVKOVÉHO SLOŽENÍ HORNIN TVOŘÍCÍCH STĚNU VRTU

Moderní radionuklidové metody umožňují přímo ve vrtu určovat jednotlivé prvky. Jedná se jednak o rentgen-fluorescenční analýzu pro detekci prvků s protonovým číslem vyšším, než má železo ve štíhlých vrtech, nejlépe bez výplachu (v důlních vrtech), jednak o spektrální registraci gama kvant vzniklých v důsledku interakcí neutronů s horninovým prostředím ve stěně vrtu (zejména při použití generátorů neutronů jako zdroje neutronů), jedná se o neelastický rozptyl neutronů a/nebo radiační záchyt neutronů.

#### 3.7.5. METODY PRO URČENÍ STRESSU, TJ. NAPĚŤOVÝCH PODMÍNEK HORNIN V OKOLÍ VRTU I V JINÝCH PODMÍNKÁCH.

Základem takovýchto měření jsou modifikace akustické karotáže. Elastické parametry hornin je možné určit z výsledků současné registrace rychlosti šíření podélných a příčných elastických vln, současně s křivkou hustotní karotáže.

### 3.8. LETECKÉ METODY A DÁLKOVÉ SNÍMKOVÁNÍ

Pro ocenění rozsahu a vlivu skrytých ekologických zátěží je možné využít i vyhodnocení dostupného multispektrálního snímkování z výšky (z dronů, letadel, družic apod.), které je označováno jako dálkové snímkování. Většinou se provádí registrace či snímkování elektromagnetického záření odraženého nebo vyzařovaného povrchem Země. Pro rozsáhlejší průzkumné projekty je možné realizovat vlastní dálkový průzkum z helikoptér, které je možné spojit s fotogrammetrií.

Větší geologické jednotky a rozsáhlejší ekologické vlivy v regionálním měřítku lze někdy interpretovat z leteckých geofyzikálních (aerogeofyzikálních) map a dalších stávajících a dostupných regionálních map geofyzikálních indicií.

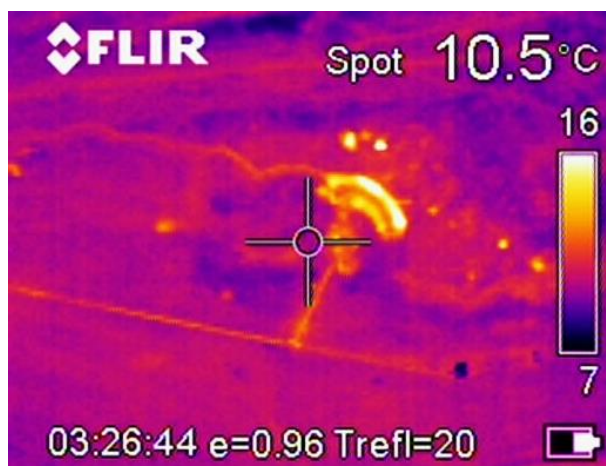
V r. 2003 byla u nás poprvé realizována letecká elektromagnetická měření (v komplexu s magnetickým a radiometrickým měřením) v rámci průzkumu lokalit pro hlubinná úložiště radioaktivního odpadu. Byla aplikována letecká varianta multifrekvenční aparatury DEMP v sedmimetrové gondole (viz obr. 3.19), zavěšené 30 m pod vrtulníkem, pracující na 4 frekvencích v rozsahu 880 – 34 133 Hz. Výsledné interpretační mapy dobře korelovaly s blokovou stavbou sledovaných žulových masívů včetně vymezení porušených zón zlomových linií. V roce 2017 došlo k reprocessingu nalétaných dat a jejich následné nové interpretaci. Za zásadní inovaci při novém zpracování lze považovat důsledné vyhodnocení pomocí primárně

naměřených veličin IP a Q (tak zvaná reálná a imaginární složka pole). Přepočet dat na zdánlivé měrné odpory byl proveden také, ale nebyl pro interpretaci zcela rozhodující. Ze složek IP a Q bylo možno lépe detekovat tenké či úzké vodivé polohy (tj. tektonickou stavbu). Obdobnou metodiku by bylo možné využít pro sledování větších ekologických havárií, zvláště v těžko dostupných terénech.



Obr. 3.19: Elektromagnetický systém zavěšený v konsoli pod helikoptérou

V současné době se kromě využití velkých leteckých dopravních prostředků uplatňují i malá, často i dálkově řízená letadla (drony). Tyto prostředky dovolují využít pouze menší geofyzikální aparatury. Jejich provoz je však laciný a lze je použít i při detailním průzkumu (například v zastavěném prostoru). Jako příklad uvádíme detekci záparů uhlí pomocí termokamery (viz obr. 3.16).



Obr. 3.20: Snímek z dálkového průzkumu záparů uhlí pomocí termokamery

## **4. POUŽITÍ GEOFYZIKÁLNÍCH METOD PŘI ŘEŠENÍ KONKRÉTNÍCH OTÁZEK Vlivu ekilogických zátěží**

### **4.1. GEOLOGICKÁ, LITOLOGICKÁ A HYDROGEOLOGICKÁ CHARAKTERISTIKA ZÁJMOVÉHO ÚZEMÍ**

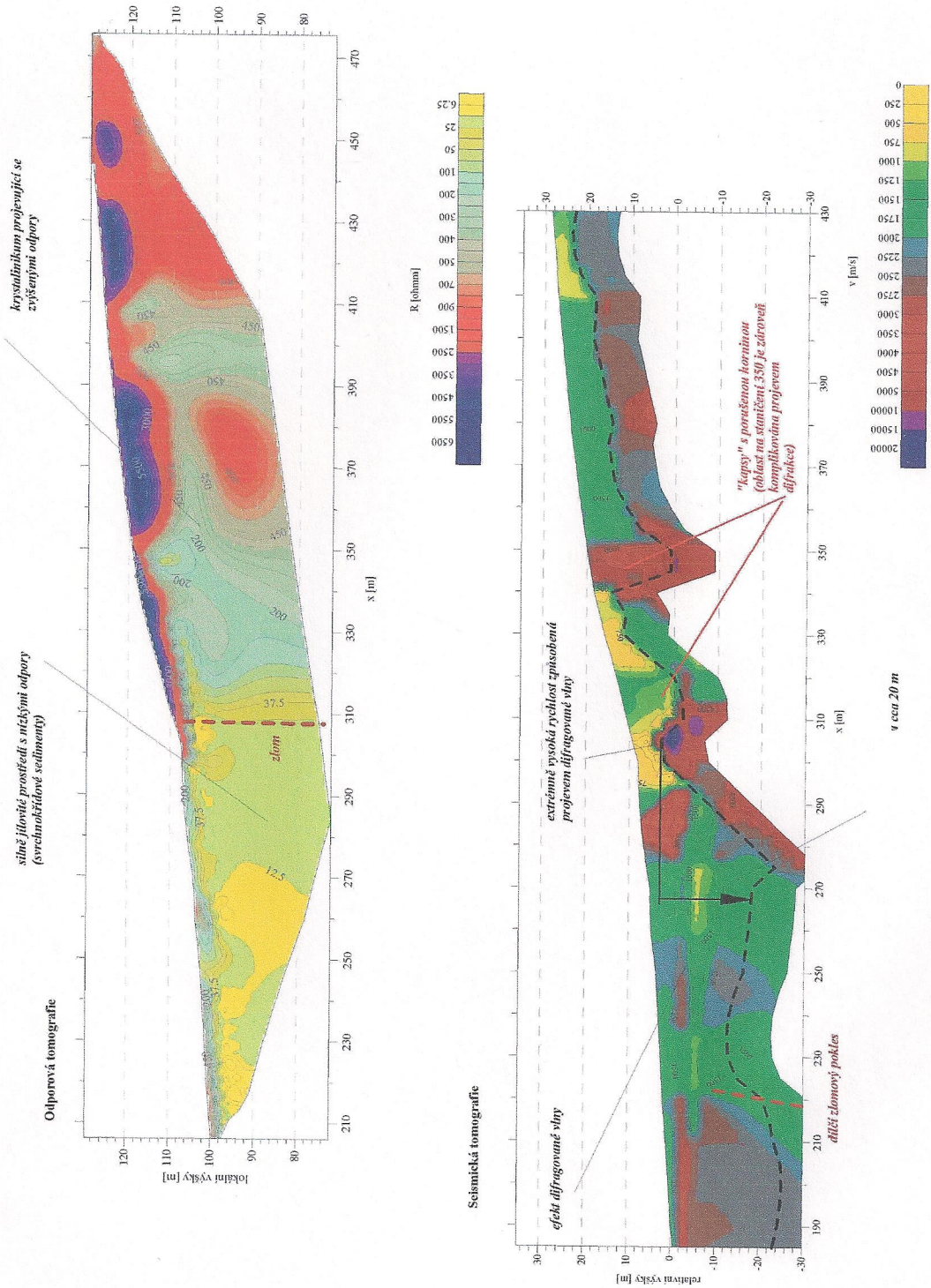
#### **4.1.1. GEOLOGICKÁ STAVBA ÚZEMÍ**

Znalost detailní geologické stavby zájmového území pomáhá určit potenciální možnosti vlivu a příp. šíření ekilogické zátěže a výběr optimálního souboru sanačních prací. Geofyzika může přispět k vymezení pokryvných útvarů, stanovení podložních hornin, určení charakteru a rozsahu litologických jednotek v mapě i ve vertikálním směru, sledování litofaciálních změn v pokryvu a podloží, vymezení prostorového rozsahu kolektorů a hydrogeologických izolátorů, případně i stanovení jejich hydrogeologických parametrů, mapování poruchových zón a pod.

#### *Geologické mapování*

Rozsah hornin se mapuje většinou profilovými metodami a měřením v pravidelných sítích. Uplatňují se hlavně metody, v nichž se mapované horniny projevují kontrastními fyzikálními vlastnostmi - měrným odporem, magnetickými vlastnostmi a někdy i přirozenou radioaktivitou: odporové a elektromagnetické profilování, méně pozemní magnetometrie a radiometrie. Geofyzikální profily musí přesahovat studovanou oblast nejméně o délku použitého uspořádání.

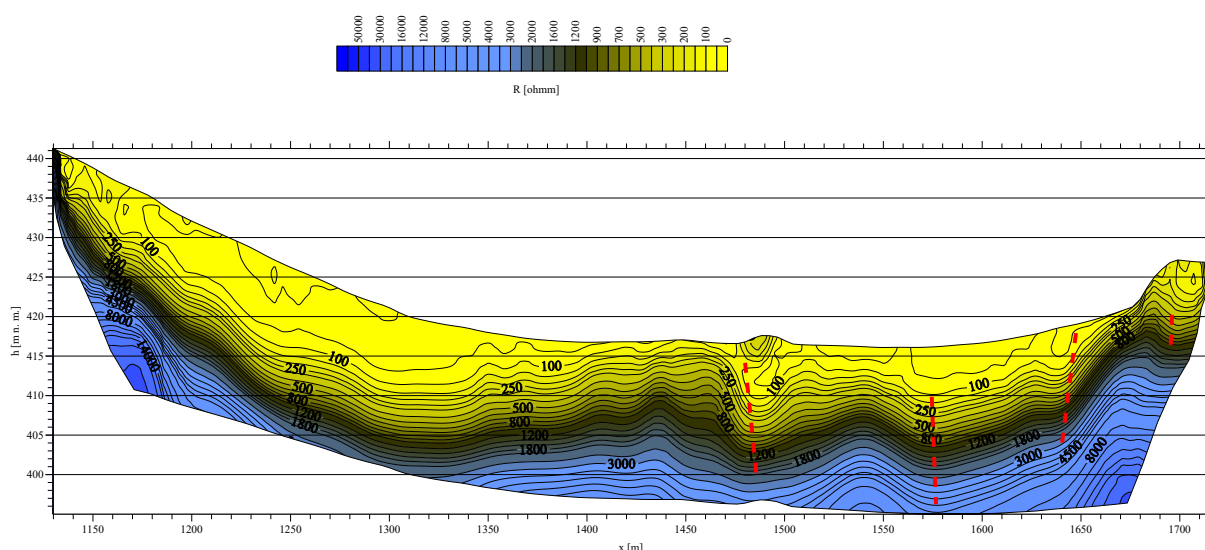
Na obr. 4.1 uvádíme geologické interpretace seismického a odporového řezu. Na obr. 4.2 je uveden příklad, jak interpretovat odporový řez v místech s kvartérním pokryvem nad skalním podložím. Příklad komplexního zpracování leteckých a pozemních geofyzikálních metod uvádíme v kapitole 4.2.7.



Obr. 4.1: Interpretace geologické stavby území na základě odporových a seismických měření

### Vertikální profily

Pro zjištění vertikálního litologického profilu v daných bodech se používají sondážní geofyzikální metody. V praxi je pro mělké úkoly používána metoda odporové tomografie (ERT) nebo metoda vertikálního elektrického sondování (VES) Tzv. hloubkový dosah  $h_{ef}$  (tj. maximální hloubka, z níž lze ještě získat informace) závisí i na odporových poměrech, ale zhruba platí  $h_{ef} = AB/4$  (AB - vzdálenost proudových elektrod). Přístupnost terénu musí proto umožnit roztažení lineárního uspořádání čtyřnásobné délky s přijatelnými podmínkami pro uzemnění. V případě možnosti využití vrtů je velmi přínosný komplex karotážních metod pro ověřování litologie (viz obr. 4.3). V zahraničí jsou používány i formy elektromagnetického sondování frekvenčního a přechodového, u kterých je uspořádání měřicího systému menší než u VES pro dosažení stejné hloubky.

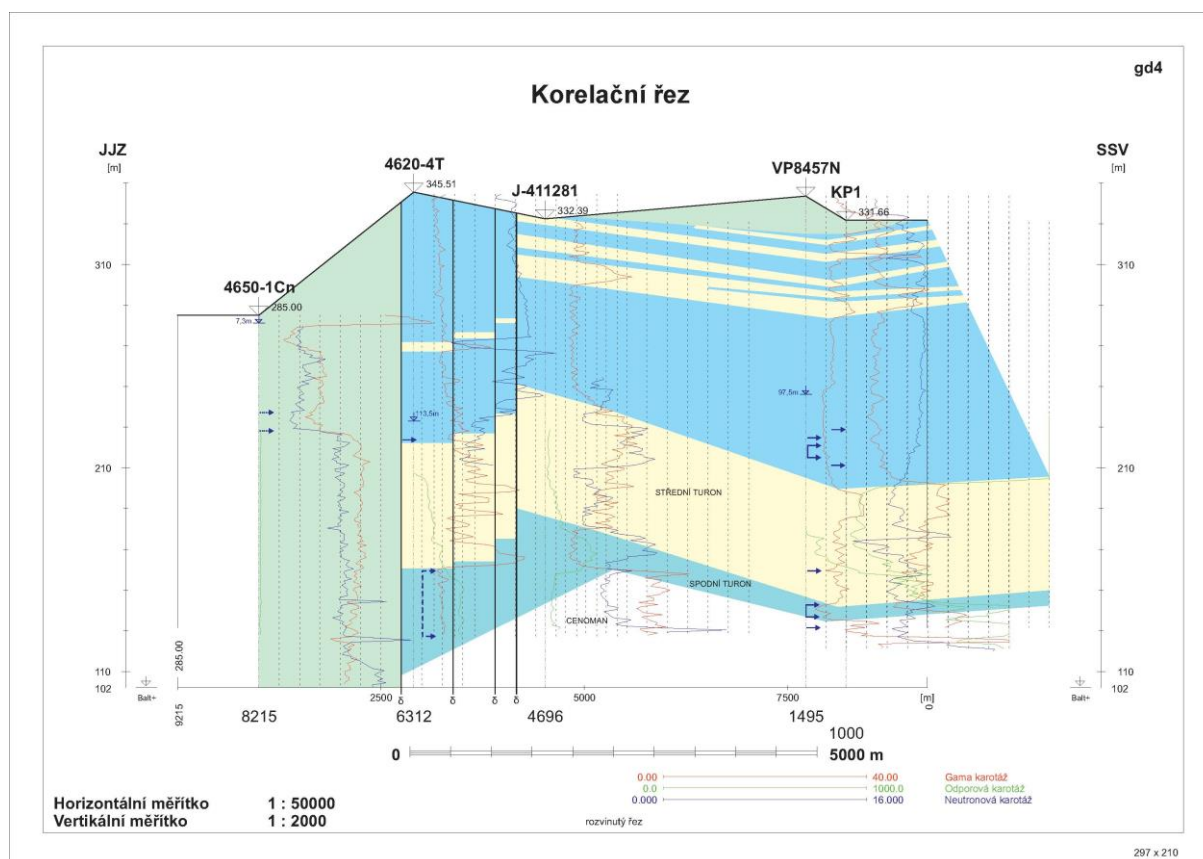


Obr. 4.2: Příklad vertikálního odporového řezu získaného pomocí metody odporové tomografie. Žluté odstíny barev odpovídají zeminám. Zeminy přecházejí do skalní horniny (modrá barva). Tektonika je naznačena čárkovanou linií.

### Studium geologického řezu podél profilů

Geofyzikálními metodami, které mají sondážní charakter a určitelný hloubkový dosah, lze sestavit geologicko - geofyzikální řez.

- pro sledování průběhu mnoha rozhraní v mělkém řezu (do několika metrů) se uplatňuje georadar
- pro sledování hlubších řezů se používá mělká refrakční seismika, dnes stále častěji i mělká reflexní seismika.
- pro detailní studium vertikálního řezu se používá metoda odporové tomografie (ERT), nebo podrobné vertikální elektrické sondování.
- pro geologickou interpretaci je dobrým podkladem řez sestavený podle karotážních křivek z vrtů, vytvářejících vhodný profil. Obr. 4.3 demonstruje zobrazení křídových sedimentů v profilu přes Mnichovohradišťskou pánev. Vymezení podloží, bazálního kolektoru a jeho charakteru (polohy čistých pískovců vs. střídavých písčitých a prachovitých poloh) a určení charakteru turonské sedimentace je zcela zřejmé.



Obr. 4.3: Interpretační profil sestavený z výsledků karotáže v okolí významných zlomových linií

#### 4.1.2. HYDROGEOLOGICKÝ REŽIM V POKRYVU

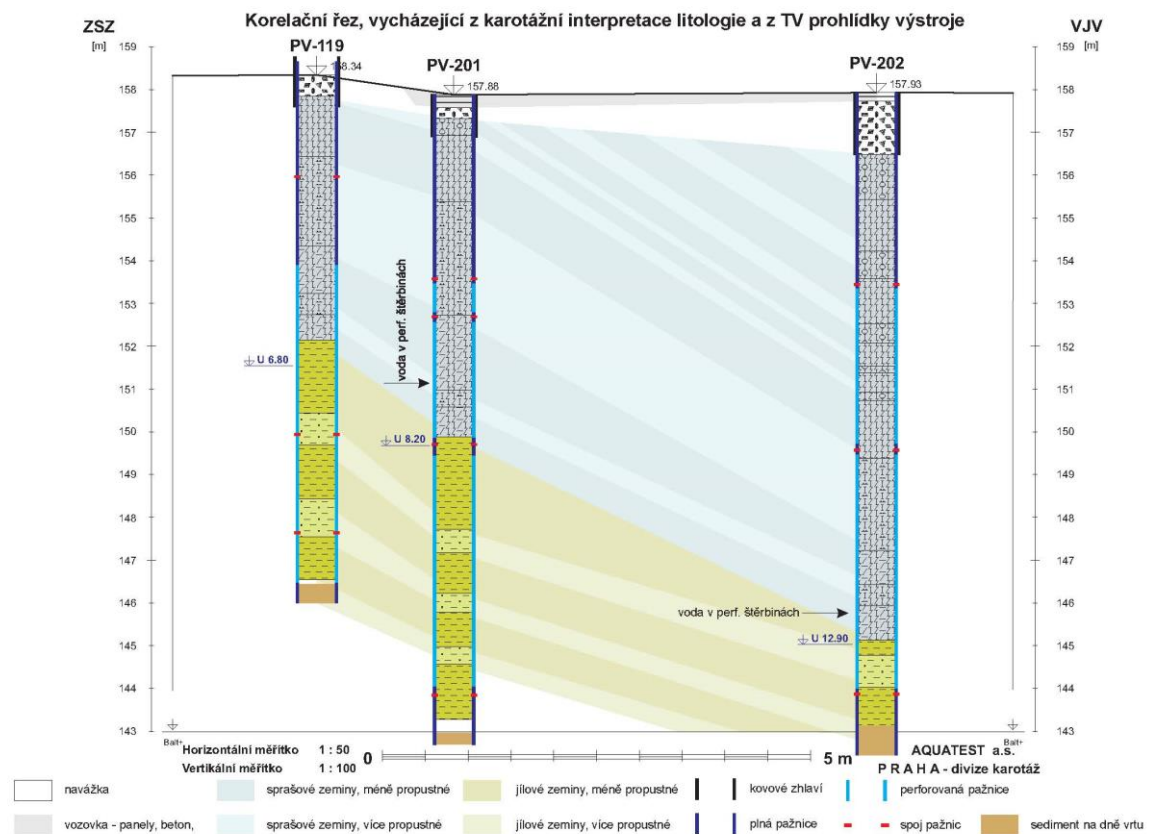
##### *Litologie a mocnost pokryvu*

Rozlišení litologických typů uloženin v pokryvu je důležité pro odlišení jejich hydrogeologické funkce. Nепropustné uloženiny s převládající jílovitou složkou bývají elektricky vodivé, hrubozrnné sedimenty s vysokou pórovitostí dosahují vyšší měrné odporu, pokud nejsou nasyceny silně mineralizovanou vodou.

Hydrogeologický režim v mělké části geologického prostředí je určován propustností zastoupených nezpevněných uloženin a eluviálního pokryvu v saturované zóně pod hladinou podzemní vody, které je závislé na litologii pokryvu, ve velké míře pak na zastoupení jílovitých a písčitých složek. Pro řešení těchto otázek se používají odporové a elektromagnetické metody, protože jílovité sedimenty mají díky vázané vodě velmi nízké měrné odporu. Prostorové rozmístění různých litofaciálních typů, např. propustných sedimentů, sklony, elevace a deprese nepropustného podloží se řeší opět převážně odporovými metodami, ale velmi významné místo pro sledování reliéfu podložních hornin (mocnosti pokryvu) má mělká refrakční seismika. Při jeho malých mocnostech pokryvu se uplatňuje i georadar.

Významnými opěrnými údaji bývají data z geofyzikálních měření ve vrtech, pokud jsou k dispozici. Ukázka interpretace karotáže v linii tří vrtů je na obr. 4.4. Vymezení relativně více

propustných spraší v nadloží a jen velmi málo propustných jíílů v podloží pomohlo k vysvětlení rozdílné výšky hladin a především k vysvětlení dynamiky proudění vody v dané oblasti. V rámci spraší i jíílů bylo na základě citlivých karotážních metod možno zjistit prostorový průběh jednotlivých vrstev těchto sedimentů.



**Obr. 4.4: Ukázka interpretace karotáže v linii tří vrtů**

### *Hladina podzemní vody*

Dvě základní hydrogeologické otázky jsou v pokryvu řešeny nejčastěji:

- hloubka hladiny a
- rychlost a směr proudění podzemní vody.

Oba tyto údaje zjistíme nejpřesněji ve vrtech přímým měřením a pomocí metod hydrokarotáže.

**Pro stanovení hladiny podzemní vody v nezpevněných uloženíích a sedimentech se využívá:**

- *vertikální elektrické sondování, (resp. odporová tomografie)*, je-li podzemní voda, resp. vodou nasycený kolektor výrazně vodivější (s vyšší mineralizací) než okolní prostředí,
- *mělká refrakční seismika* je úspěšná u nezpevněných uloženíích (rychlost seismických

vln nezpevněných uloženin je do 1 000 m/s, u uloženin plně nasycených podzemní vodou je kolem 1 500 m/s),

- *georadar* je nejvhodnější, avšak jen pro hloubky do jednotek metrů (hladina p.v. je díky vysoké permitivitě výrazně odrazným rozhraním radarových vln).

#### *Směr a rychlost proudění podzemní vody*

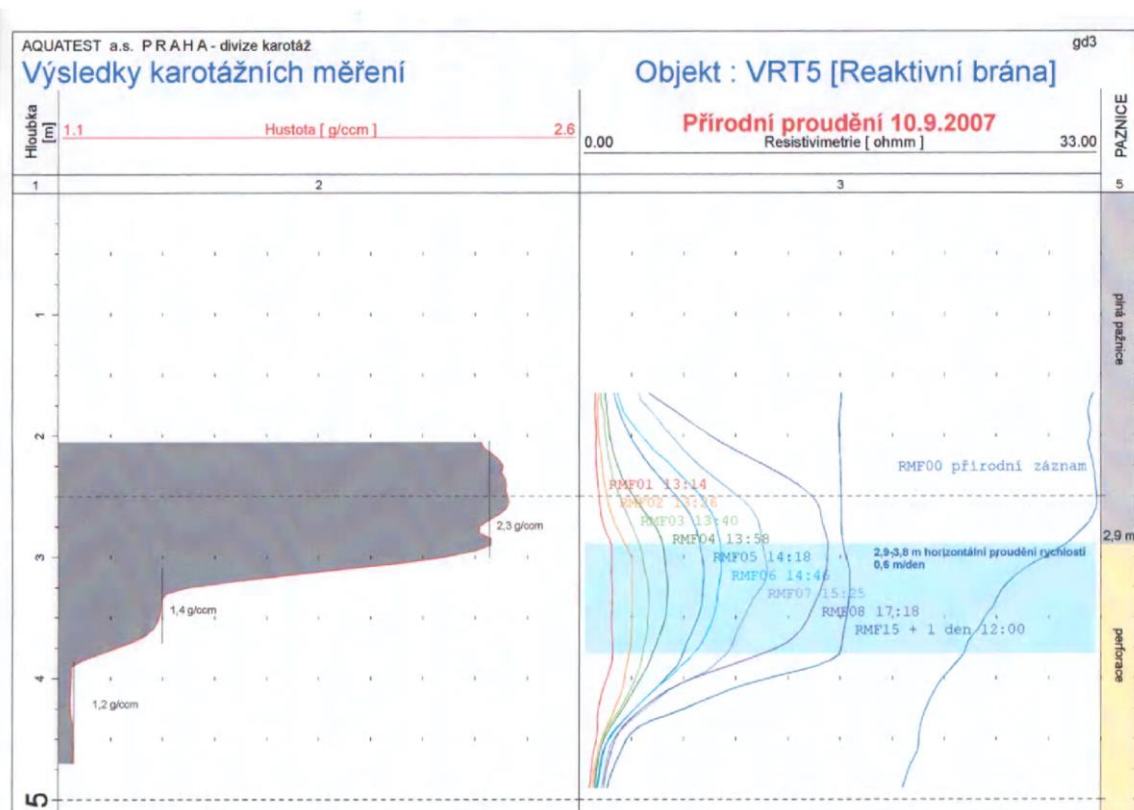
Rychlost horizontálního proudění ve vrtu se stanoví nejpřesněji karotážní metodou ředění označené kapaliny (nejčastější značkovací látkou je NaCl, ale také lze použít organická barviva, případně radioaktivní látky). Elektrolyt (roztok NaCl) sníží měrný odpor vody ve vrtu, monitorováním změny koncentrace soli s časem určujeme rychlost vyředování označované kapaliny. Toto monitorování probíhá tak, že pomocí rezistivimetru registrujeme změny rezistivity (nebo vodivosti) kapaliny ve vrtu postupně v různých časových intervalech. Příklad použití této metody uvádíme na obr. 4.5. Měření sloužilo k ověření funkčnosti reaktivní brány. Bylo prokázáno proudění vody z oblasti kontaminačního mraku skrz reaktivní bránu naplněnou železnými pilinami, které napomáhají chemickému rozkladu kontaminantu. Rychlost proudění vody v této reaktivní bráně dosahuje 0,6 m/den. Při existenci většího počtu vrtů se kapalina v jednom vrtu označuje a v dalších vrtech se monitoruje příchod čela označované vody.

U mělkých kolektorů (do jednotek metrů), zastižených alespoň jedním vrtem, lze použít i geoelektrické metody, monitorující pohyb vodivé zóny uměle vytvořené dotací NaCl v podzemní vodě. Pohyb vodivé zóny může být na povrchu monitorován buď

- *metodou nabitého tělesa* nebo
- *odporovými metodami*.

Dotací musí dojít k výraznému zvýšení vodivosti dotované zóny vůči původnímu stavu, a proto je metoda NT vhodná pouze pro sledování pohybu podzemních vod nepříliš vodivě kontaminovaných (obr. 5.3).

**Pro sledování směru (nikoli rychlosti) pohybu podzemní vody lze použít metodu spontánní polarizace**, která využívá vytvoření filtračních potenciálů (FP) při pohybu p.v. průlinčitém prostředí. Tato metoda má pouze kvalitativní charakter (absolutní velikost FP závisí kromě rychlosti proudění složitě na mnoha dalších často nezjistitelných podmínkách) a je přínosná pro mělké kolektory do hloubek několika metrů. Avšak i u předchozích metod se skutečná rychlost proudění p.v. může lišit od rychlostí filtračních, které jsou těmito metodami určeny, a je nutno zavádět určité korekce na okolní podmínky. Metoda SP může také pomoci stanovit charakter a asymetrii depresního kužele, neboť i zde dochází k slabým FP dynamikou p.v. při čerpání. Metoda SP se měří gradientově v síti bodů radiálními dipóly nebo potenciálově v pravidelné síti v ploše.



Obr. 4.5: Sledování rychlosti horizontálního proudění ve vrtu

#### 4.1.3. LITOLOGIE PODLOŽÍ A JEHO HYDROGEOLOGICKÝ REŽIM

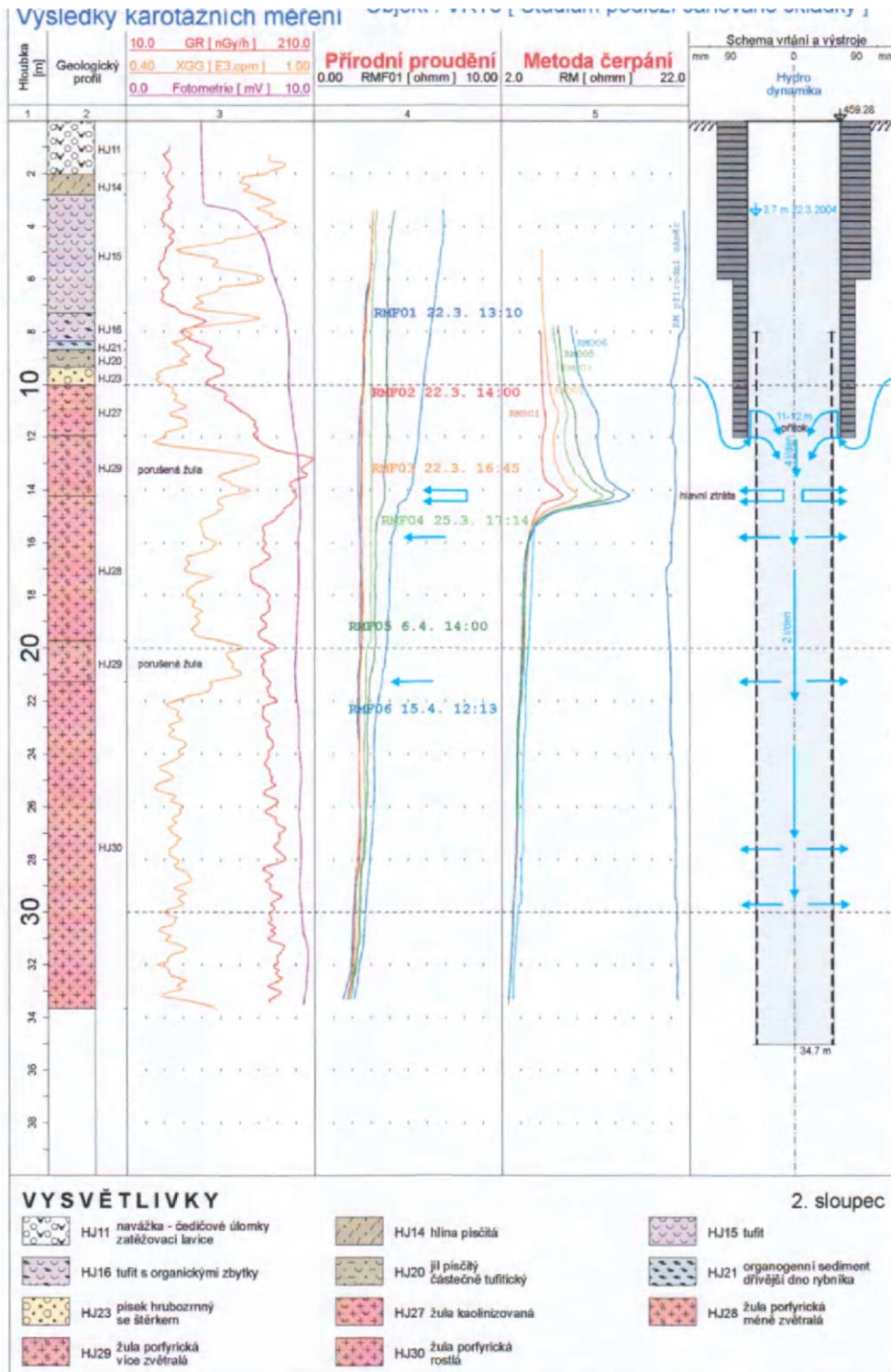
Při průzkumu podložních hornin je základním problémem určení typu hydrogeologické propustnosti prostředí. Ta souvisí jak s litologií, tak i stupněm porušení hornin. Jsou proto řešeny následující problematiky:

##### *Litologie podloží*

Zjištění typů podložních hornin je důležité zvláště z hlediska jejich hydrogeologických vlastností, které určuje potenciální možnost šíření příp. kontaminantů ze skládky podzemní vodou i ve větších hloubkách. Z hydrogeologického hlediska je rozhodující charakter propustnosti podložních hornin, který je závislý na litologickém typu. U sedimentů převládá průlinová propustnost, v krystalických horninách se jedná o puklinovou propustnost. Zvýšené propustnosti jsou vázány na oslabené zóny (tektonika, poruchy).

Zvláštní postavení mají oblasti neovulkanitů a krasu, kde se střídají různé typy propustnosti a pohyb vody ovlivňují otevřené dutiny. Metodika geofyzikálního průzkumu je výrazně závislá na geologickém charakteru podložních hornin. V regionálních měřících se uplatňuje dálkové snímkování a příp. i letecké metody. Pozemní geofyzika je aplikována stejně jako pro geologické mapování (kap. 4.1.1.). Opět lze konstatovat výhodnost vrtů s karotážním měřením, odkud získáme opěrné údaje jak o geologické (litologické) situaci podloží, tak o jeho fyzikálních vlastnostech. Ukázka karotážního měření a vyhodnocení (obr. 4.6) ověřuje krystalinické podloží skládky. Měření v různých místech skládky bylo

prokázáno prosakování kontaminované vody do hlubšího puklinového systému. V tomto vrtu se jedná o prosakování pomalé, v rádech prvních litrů za den.

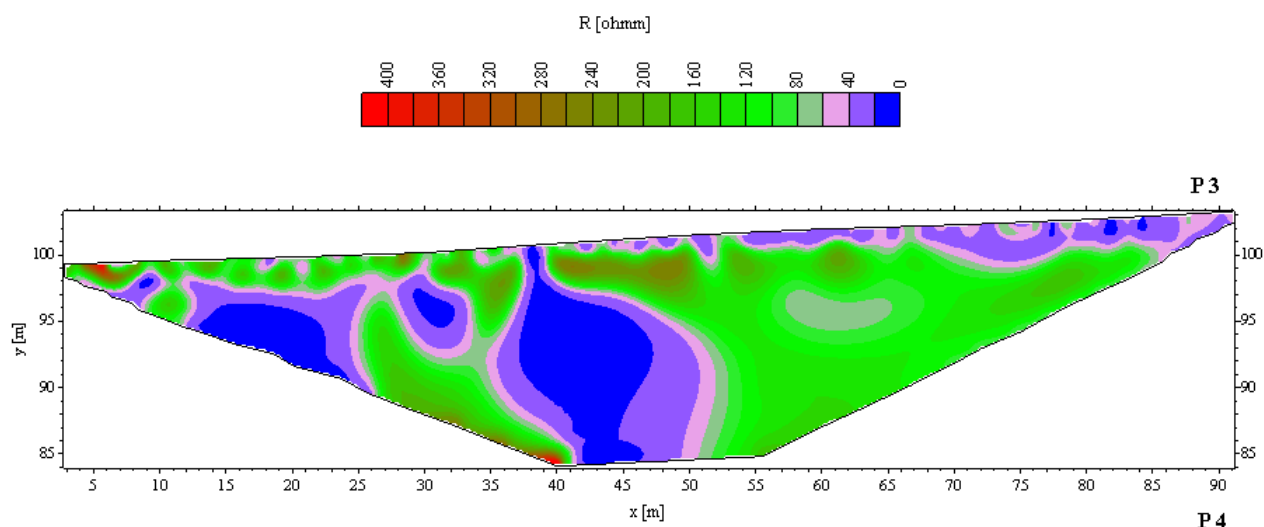


Obr. 4.6: Ukázka karotážního měření a vyhodnocení krystalinického podloží skládky.

## Mapování poruchových zón

Oslabené zóny se projevují výrazně vyšší pórovitostí, z hydrogeologického hlediska mají tedy vyšší propustnost a jsou preferenčními cestami pohybu p.v. v pevných podložních horninách, a tím i případného kontaminantu. Jejich lokalizace patří mezi nejčastěji řešené úkoly v krystalických oblastech. Viz obr. 4.7.

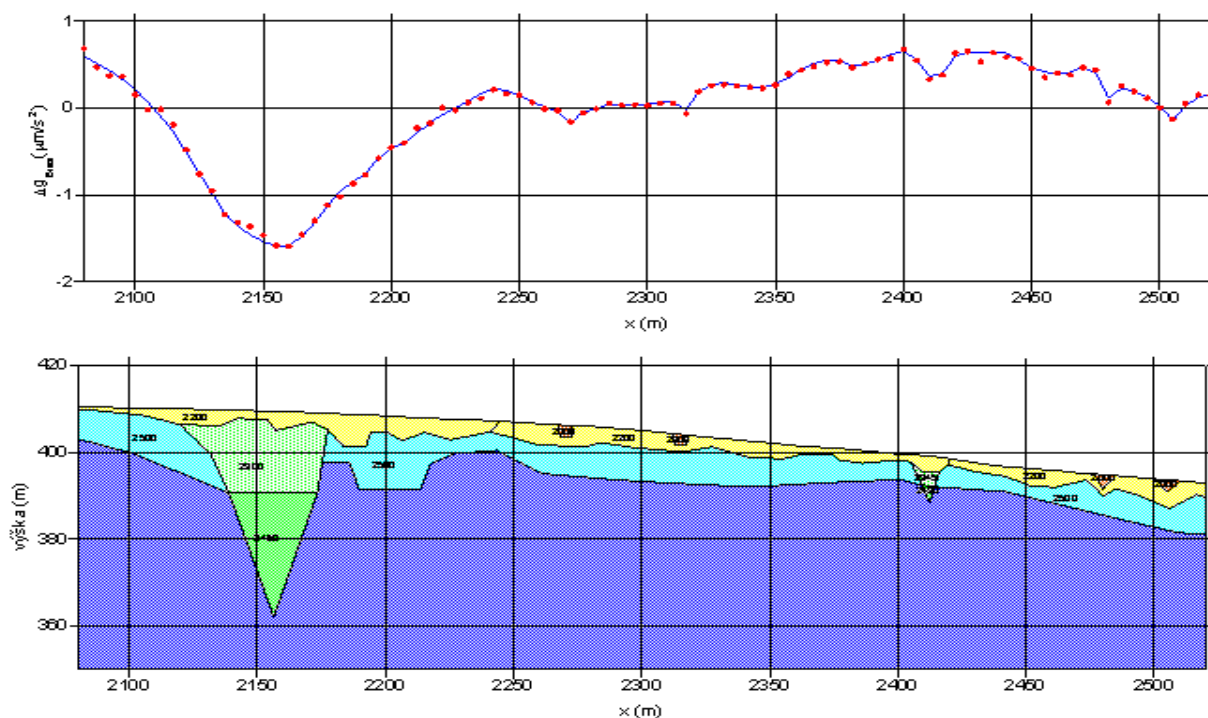
Na těchto zónách dochází k výraznému odporovému kontrastu rozpuštěné a porušené zóny s vysokou pórovitostí, nasycené vodivou podzemní vodou, a pevnými horninami s malým obsahem porézní vody, viz obr. 5.1, 5.4, 5.10). Významně se proto uplatňují odporové metody, metoda velmi dlouhých vln, elektromagnetické profilování a EM konduktometrie.



**Obr. 4.7: Příklad odporového řezu. Měřeno v sedimentech, jejichž systém byl v různé míře dotován mineralizovanou vodou (nízké odpory).**

U vodivých hornin (např. sedimentů s vyšší peliticko-jílovitou složkou: jílu, jílovců, slínovců apod.) není dostatečný kontrast odporů hornin (kolem  $10 \Omega\text{m}$ ) a vodivé porušené zóny (i vyšší jednotky  $\Omega\text{m}$ ). V tomto případě lze využít u zpevněných sedimentů mělkou refrakční nebo reflexní seismiku, která vymapuje porušené zóny na základě výrazně snížených rychlostí seismických vln.

V některých případech lze využít i hustotního kontrastu porušené zóny a okolních hornin pro mapování detailní gravimetrií. Tato měření jsou však technologicky náročnější než předchozí. Při lokalizaci zkrasovatělých zón a dutin v krasových oblastech je často gravimetrie nenahraditelná. Viz obr. 4.8.



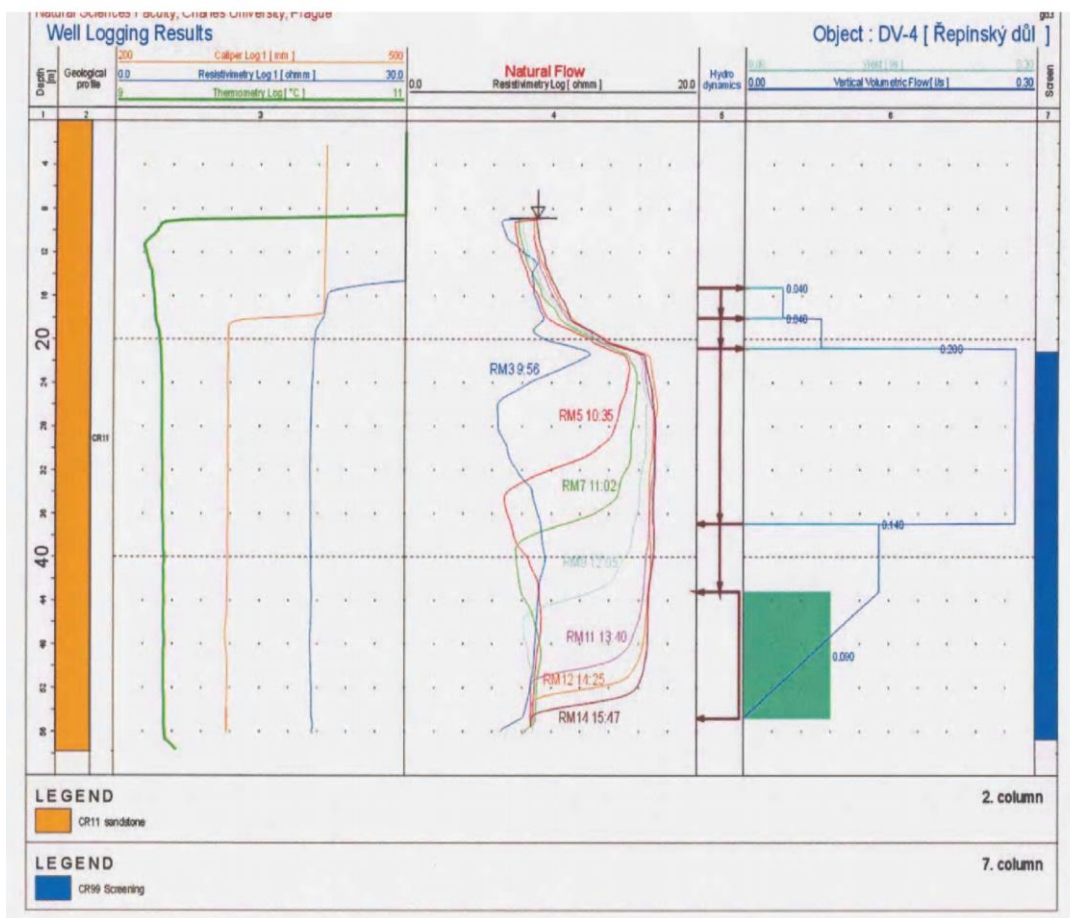
**Obr. 4.8: Příklad naměřených tíhových hodnot zpracovaných do formy Bouguerových anomálií (viz graf) a vypočtený tíhový model.**

Podél porušených zón dochází často k výronu kapalin (minerální a termální vody) a plynů z hlubších partií. Tyto elementy mohou mít velmi kontrastní fyzikální vlastnosti a anomální obsahy některých prvků. Kromě geochemických metod lze proto použít termometrii a na některých tektonických liniích zvýšené obsahy např. radonu mohou být indikovány např. radiometrickými metodami (emanometrií).

#### *Hydrogeologické parametry prostředí*

Zjišťování hydrogeologických parametrů prostředí, které určují hydrogeologický režim a rychlost a směry šíření případné kontaminace, je pomocí povrchových geofyzikálních metod úkol úspěšně řešitelný jen v komplexu s hydrogeologickým (zejména vrtným) průzkumem. Volby metod geofyziky závisí na charakteru hydrogeologického kolektoru, zvláště jeho propustnosti (průlinová, puklinová, krasová).

V první řadě se používají geoelektrické, a to zvláště odporové metody. Jimi lze odhadnout některé parametry, např. pórovitost a puklinatost, jílovitost, propustnost, součinitel filtrace, průtočnosti a netěsnosti, vlhkost a stupeň nasycení vodou, migrační parametry apod. Nejvhodnější pro taková zjištění jsou však metody hydrokarotáže, z povrchových metod mohou být někdy úspěšná i pozemní odporová měření. Hydrokarotážní metodika přímo určuje místa přítoků a/nebo ztrát vody do/z vrtu, objemy průtoků vody vrtem a pomocí změn hladiny vody ve vrtu (čerpáním, nálevy) lze určit i hydraulické parametry. Na obr. 4.9 metoda měření ředění označované kapaliny ve vrtu DV-4 určila přítok vody do vrtu u hladiny vody a následný průtok vody vrtem směrem ke dnu vrtu.



Obr. 4.9: Metoda ředění označované kapaliny. Vrt DV-4

Otázka mineralizace podzemních vod v přirozeném stavu je obdobná problematice jejich znečištění a je řešena v kap. 4.2.5.

## 4.2. ANTROPOGENNÍ ZÁSAHY DO PROSTŘEDÍ

### 4.2.1. VLIV UMĚLÝCH ZÁSAHŮ DO HYDROGEOLOGICKÉHO REŽIMU

Umělé zásahy do hydrogeologického režimu (HGR) mají většinou jen lokální charakter, pokud sem nezahrneme otázky kontaminace podzemních vod, které naopak mohou ovlivňovat velmi rozsáhlá území a mít dalekosáhlé důsledky. Změny HGR se umělými zásahy mohou projevit ve vytvoření nových preferenčních liniových cest proudění podzemní vody, např. umělými úmyslnými drenážemi, využíváním pohřbených koryt či zasypaných výkopů při pokládání inženýrských sítí, kanalizačních cest apod.

Pro mapování těchto linií, které se v důsledku vyšší pórovitosti a nasycení vodou (hlavně kontaminovanou) projevují jako mělké liniové elektrické vodiče, se používají mělké metody odporového a elektromagnetického profilování (DEMP) a konduktometrie, méně často se projevují i anomáliemi v metodě VDV. Velmi efektivně se uplatňuje i georadar nebo multielektroková metoda.

#### 4.2.2. LOKALIZACE A IDENTIFIKACE UMĚLÝCH PODZEMNÍCH OBJEKTŮ

Detekce podzemních objektů geofyzikálními metodami je silně závislá na jejich velikosti, hloubce a kontrastu ve fyzikálních parametrech vůči okolí. Z hlediska geofyziky lze rozdělit tyto objekty podle rozměrů na liniové a lokální. Podle fyzikálních projevů se dělí na

A) vodivé:

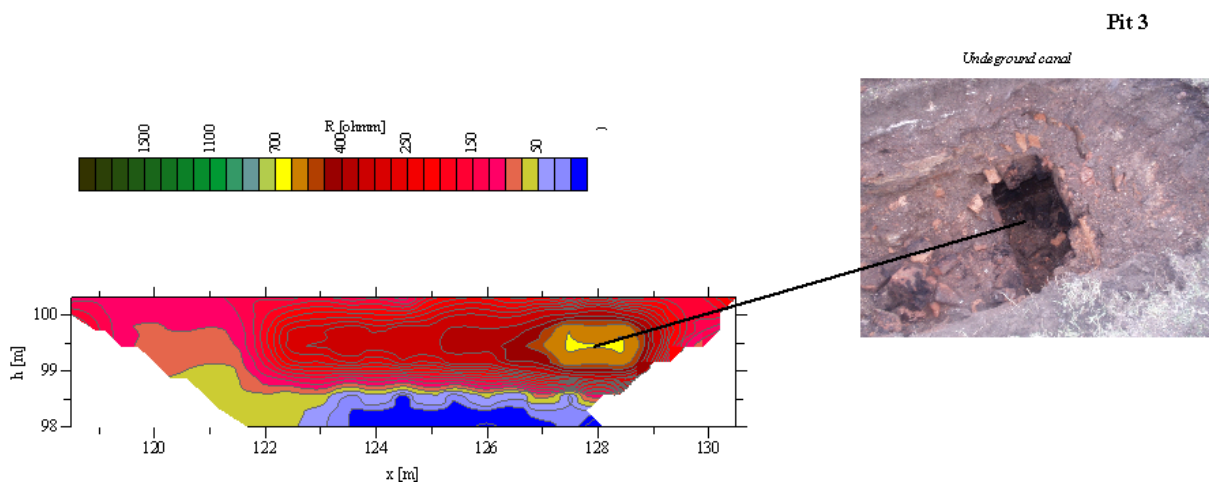
- vodivě propojeně se zemí nebo
- izolovaně (např. vodovodní řady, podzemní nádrže, barely, produktovody),
- aktivní elektrické vodiče pod napětím (inženýrské sítě, elektrická a telefonní vedení),

B) nevodivé (keramická potrubí a pod.).

C) zvláštní skupinu tvoří detekce skryté munice

U kovových předmětů je významné, zda se jedná o magneticky aktivní předměty (feromagnetické materiály) či nikoli. Podle typu nehomogenity se volí příslušná geofyzikální metoda, velikost a hloubka objektu rozhoduje o kroku či hustotě měření. Liniové objekty se vyhledávají většinou sítí paralelních profilů vedených kolmo k předpokládaným průběhům.

Detekce podzemních sítí a objektů (obr. 4.10) je důležitá nejen z hlediska jejich případného odstranění, ale i z hlediska situování vrtů a dalších otvírkových prací.



Obr. 4.10: Příklad vyhledání podzemní chodby pomocí varianty odporové metody ERT.

U všech objektů bez ohledu na jejich elektrickou vodivost či magnetické vlastnosti se významně do malých hloubek uplatňuje georadar, který vyhledává nehomogenity na základě komplexních elektromagnetických kontrastů (hl. vodivost a permitivita). Vodivě pasivní objekty jsou vyhledávány elektromagnetickým profilováním a konduktometrií, metodou VDV, do malých hloubek metaldetektory. Objekty z feromagnetických materiálů se vyhledávají detailní magnetometrií v husté síti bodů nebo podél profilů. Aktivní vodiče lze detekovat speciálními aparaturami s indukčními cívkami.

Prakticky ve všech uvedených případech jsou velmi limitujícím faktorem rozmístění podobných objektů na povrchu (železné a železobetonové konstrukce a panely, ploty, budovy, elektrická vedení), vysoká vodivost povrchové vrstvy a nehomogenita prostředí.

Většina podzemních nádrží a produktvodů je provedena z kovových (vodivých) ferromagnetických (ocelových) materiálů, které sice mají (nebo mají mít) protikorozní ochranu povrchovou izolací, která zároveň zajišťuje zamezení vodivého spojení s okolním geologickým prostředím, ale mechanická perforace a poškození ochrany postupným narušením stěn korozí znamená příp. následný únik nebezpečného kontaminantu. Určení místa perforace je velmi závažným úkolem, který může být řešen i geofyzikou, nejčastěji pomocí metody nabitého tělesa.

Místo úniku kontaminantu z produktvodů se pravděpodobně projeví jako místo s nejintenzivnější kontaminací okolního prostředí a lze pro ně použít metody sledování rozsahu kontaminace, popsané v kap. 4.2.5.

#### 4.2.4. PODZEMNÍ DUTINY

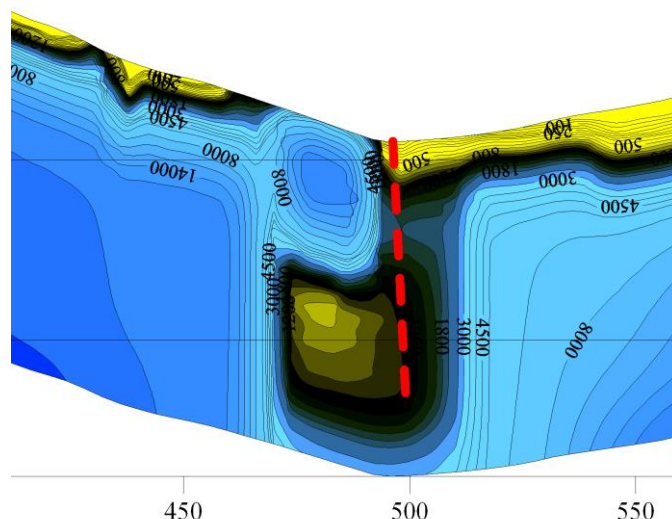
Jak přírodní (krasové ap.), tak i umělé dutiny (poddolování, sklepení, kanalizace) lze hledat geofyzikou jen za příhodných podmínek, v největší míře závisí detekovatelnost na poměru hloubky, rozměru a výplně dutin (vzduch, voda, uloženiny).

Dutina je detekovatelná přesnou detailní gravimetrií, je-li její hloubka srovnatelná s rozměry v řezu, jako záporný tíhový projev anomálního deficitu hmot. Větší hustotní rozdíl a tím větší anomální účinek se projevuje nad prázdnou dutinou, dutina zaplněná vodou má asi poloviční anomálie, zavalená dutina nebo vyplněná sedimentem se projevuje anomálii ještě méně znatelnou. Příklady použití gravimetrie viz obr. 5.25, 5.26.

Dutiny (zvláště ty, které jsou potenciálně nejvíce nebezpečné z hlediska možného propadu) se zpravidla dobře poznají podle zátrhového klínu, který se vytváří nad hledaným objektem často až k povrchu.

Georadarová metoda má (v případě detekce podzemních dutin) lepší pověst než schopnosti. Podzemní dutiny je možné vyhledávat touto metodou do hloubek nejvýše první metry za předpokladu homogenity okolního prostředí, protože odrazy od případné dutiny se snadno zakryjí projevy nehomogenit v okolí a při povrchu

Podzemní dutiny lze vyhledávat i pomocí odporových metod, konkrétně kombinovaným profilově sondážním odporovým měřením nebo pomocí multielektrodového uspořádání (viz obr. 4.12). V obou případech se jedná o komplexní měření napětí v sérii bodů při mnoha různých postaveních zdrojových elektrod, v prvním případě jsou veličiny měřeny postupně jednoduchými aparaturami, v druhém případě simultánně mnohakanálovými aparaturami.

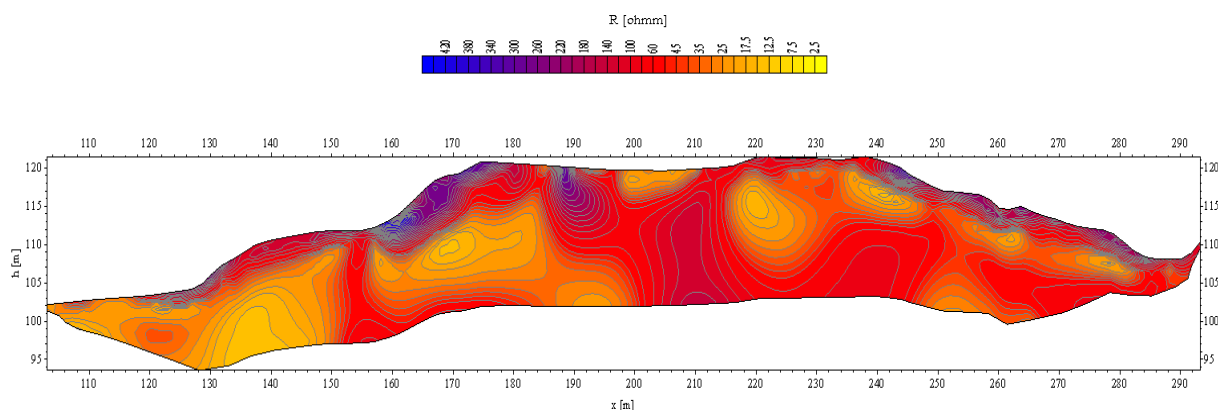


**Obr. 4.11:** Příklad realizačního výstupu odporového sondování metodou ERT. Oblast snížených odporů (kapkovitý útvar v centru obrázku kolem staničení 500) odpovídá částečně zavalené dutině krasového původu predisponované tektonicky. Tektonika je naznačena čárkovanou linií.

Ve vzácných případech, kdy se výplň dutiny projevuje i jen slabým kontrastem magnetických vlastností vůči okolnímu prostředí, je možné aplikovat i magnetometrii. Slabou negativní magnetickou anomálií se může projevovat i deficit magnetických hornin.

#### 4.2.5. PRŮZKUM POLOHY A ROZSAHU SKRYTÝCH EKOLOGICKÝCH ZÁTĚŽÍ

Různé typy skládek odpadu (komunálního, průmyslového) většinou vyplňují umělé deprese (vytvořené např. povrchovou těžbou surovin), přirozené deprese (např. údolí potoků), nebo jsou navrženy na původním terénu. Geofyzikální metody umožňují vyhledávání skládek zakrytých a v případě již povrchově sanovaných i průzkum v rozsahu skládky, kvality skládkového materiálu apod. Skládkované materiály jsou v přírodě vždy anomálním objektem a projevují se velmi často výraznými kontrasty fyzikálních vlastností nebo jejich plošnou či prostorovou variabilitou (viz obr. 5.9, 5.10).



**Obr. 4.12:** Příklad použití odporové tomografie. Zvýšené odpory v povrchové vrstvě (cca nad 200 ohmm) indikují komunální odpad ukládaný na skládku v relativně nedávné době. Hlouběji je skládka tvořena stavebním rumem (vesměs hlinité navážky a zbytky zdiva). Tato poloha je již konsolidována a pozvolna přechází do přirozeného kvartérního podloží.

Většinou jsou skládkované materiály nasycené mineralizovanou vodou, a pak se skládka projevuje jako vodivá. Často je patrná odporová stratifikace tělesa skládky podle toho, zda se materiál nachází nad nebo pod hladinou p.v. a její dynamikou. Např. v případě deponie stavebního odpadu bývají odpory vyšší. Odporový kontrast v obou případech bývá postačující pro vymapování rozsahu skládky odporovými metodami, které jsou aplikovány téměř vždy. Odporové metody nemusí být úspěšné v případě malého kontrastu odporů. Jílovité sedimenty horninového podloží a okolí skládky mohou mít stejně malé odpory jako skládkový materiál.

Roztroušené železné předměty jsou zjistitelné detailní *magnetometrií* a mapy anomálií totálního vektoru nebo vertikálního gradientu vykazují často vyšší chaotičnost (vysoký horizontální a vertikální gradient pole) nad tělesem skládky, obecně kovové předměty jsou lokalizovány v mělkém řezu metaldetektory, v hlubších částech elektromagnetickými metodami.

Malá slehlost deponovaného materiálu se projevuje nízkými rychlostmi seismických vln (kolem 500 m/s nad hladinou a asi 1 500 m/s pod hladinou p.v.) a malými objemovými hustotami (kolem 1 g/cm<sup>3</sup>). To předurčuje úspěšnost seismických metod a gravimetrie, které jsou však technologicky náročnější a aplikují se až v případě, kde odporové metody nemají předpoklady pro úspěch.

Skládkový materiál může mít slaběji vyšší radioaktivitu než podložní a okolní horniny nebo se naopak může projevit stíněním aktivnějšího podloží. Pak lze použít radiometrické metody (aktivita gama, gamaspektrometrie, méně část emanometrie).

V zahraničí je velmi často při průzkumu skládek používán georadar, hlavně pro detekci různorodých objektů v tělese skládky, určení mocnosti skládky, její stratifikace apod.

Problematika zjištění mocnosti skládek je obdobná určení mocnosti nezpevněných sedimentů a podobně jako otázka hloubky a charakteru geologického podloží byla již diskutována v předchozích kapitolách. V případě nesourodých skládkových materiálů je však průzkum litologie a porušení podloží značně problematický. Často jsou proto interpolovány údaje o geologickém prostředí zjištěné v okolí skládky.

Některé biochemické procesy (rozklad organických složek) a obecně chemické procesy (oxidace – hoření apod.) ve skládkovém materiálu, které vyvolávají nehomogenní teplotní anomálie, mohou být indikovány i termometrií.

#### 4.2.6. ROZSAH A ŠÍŘENÍ KONTAMINANTU

Zdrojem kontaminantu mohou být úniky z různých typů skládek, úložišť apod. (vyuhování atmosférickými srážkami), nadzemních i podzemních nádrží, odkališť, při transportu průmyslových látek a odpadů (produktovody, potrubí, nádrže, pozemní transport pevných i tekutých odpadů, ale i surovin rizikového charakteru). Podle velikosti se rozdělují zdroje kontaminace prostředí na bodové, omezené či lokální (např. skládky) a plošné (spady, hnojení), podle doby působení na jednorázové a déletrvajících. Geofyzikálním měřením detekovatelný kontaminant se většinou v prostředí šíří v podzemní vodě, která je nejvhodnějším nosným médiem. Z tohoto hlediska je rozhodující, zda kontaminující látky

(polutanty) jsou ve vodě rozpustné (kyseliny, louhy, solné roztoky) či nikoli. U nerozpustných (a částečně i u rozpustných) látek (některé organické kapaliny) závisí také na tom, zda jsou lehčí (benzín, ropa, nafta, olej) či těžší než voda (např. polychloretylen) – tedy plavou na hladině podzemní vody nebo se ukládají na bázi kolektoru.

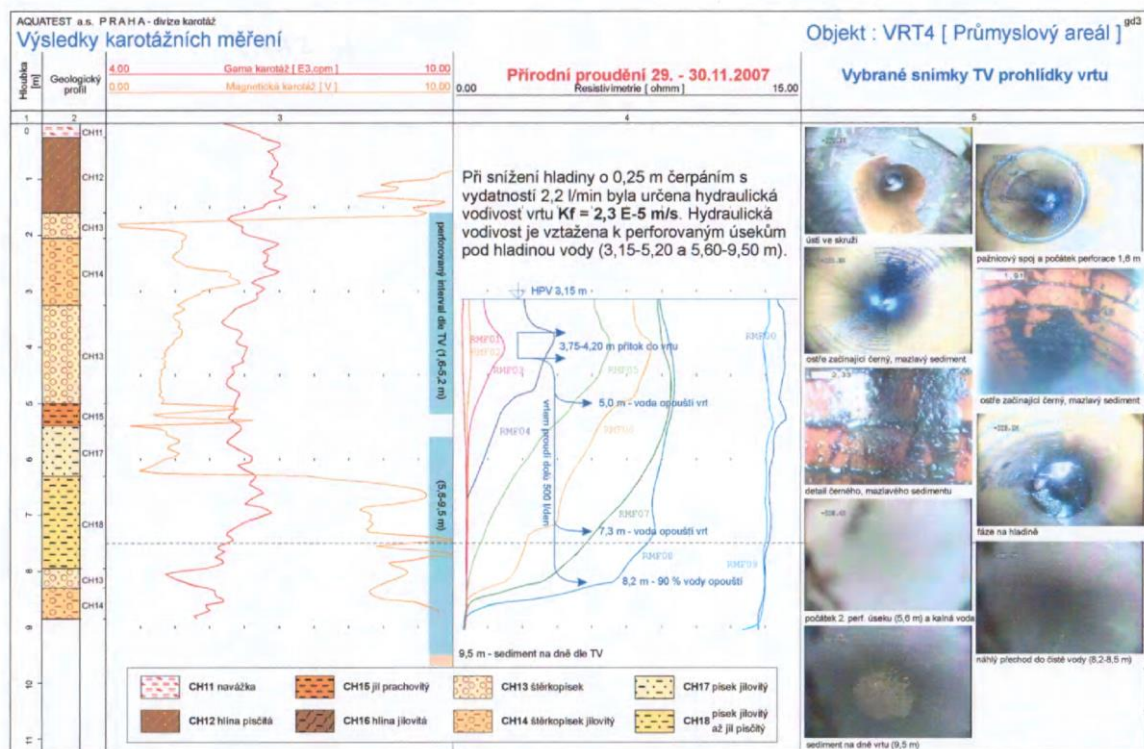
Geofyzikální metody přispívají k řešení rozsahu a charakteru kontaminace a predikce jeho šíření. Předpokladem jejich úspěšného použití je existence dostatečného kontrastu fyzikálních vlastností kontaminované a nezasazené zóny. Většina rozpustných polutantů vytváří v podzemní vodě elektrolyt s výrazným snížením měrného odporu díky vyšší koncentraci iontů a jimi způsobená kontaminace je detekovatelná odporovými metodami jako vodivostní anomálie.

Vymezení kontaminované zóny na základě odporového mapování je závislé na přirozené odporové homogenitě prostředí a vodivostním kontrastu. Obzvláště složitá interpretace odporových měření z hlediska rozšíření kontaminantu je v případě výskytu jílovitých poloh, které se rovněž projevují vodivě.

Uhlovodíková kontaminace je geofyzikálními metodami zjistitelná jen za velmi příhodných podmínek, protože nedochází k dostatečnému snížení odporu a ani u dalších fyzikálních vlastností (např. elektrická permitivita) se nevytváří dostatečný kontrast. Ve vzácných případech se mohou uplatnit metody odporové, georadar nebo seismika (obr. 5.21). Větší úspěchy může mít monitorování změn, zvláště jsou-li k dispozici měření stavu před kontaminací. Obtížné, nicméně nikoli nemožné je z povrchových měření zjištění tenké vrstvy lehkých ropných produktů na hladině p.v.

Jisté změny však mohou nastat u elektrochemických parametrů prostředí, a proto bývá někdy úspěšná metoda vyzvané polarizace, zvláště ve frekvenční variantě při měření spektrálních závislostí (dynamických charakteristik) na použité frekvenci pole.

V situovaných vrtech (průzkumných, monitorovacích či sanačních) je možné pomocí komplexu hydrokarotáže sledovat detailně charakter, rozsah a polohu kontaminace spolu s dalšími hydrogeologickými charakteristikami prostředí. Karotážní měření jsou pro taková zjištění jedinečná. Ukázka hydrokarotážního měření ve starším vrtu v průmyslovém areálu (obr. 4.13) se starou ekologickou zátěží potvrzuje výrazné zasakování přípovrchových kontaminovaných vod do spodních vrstev sedimentů (v daném místě až 500 l/den). Televize odhalila nárůsty olejnatého sedimentu na stěně pažnice i slabé mléčné zakalení vody v úseku, kde k zasakování dochází.



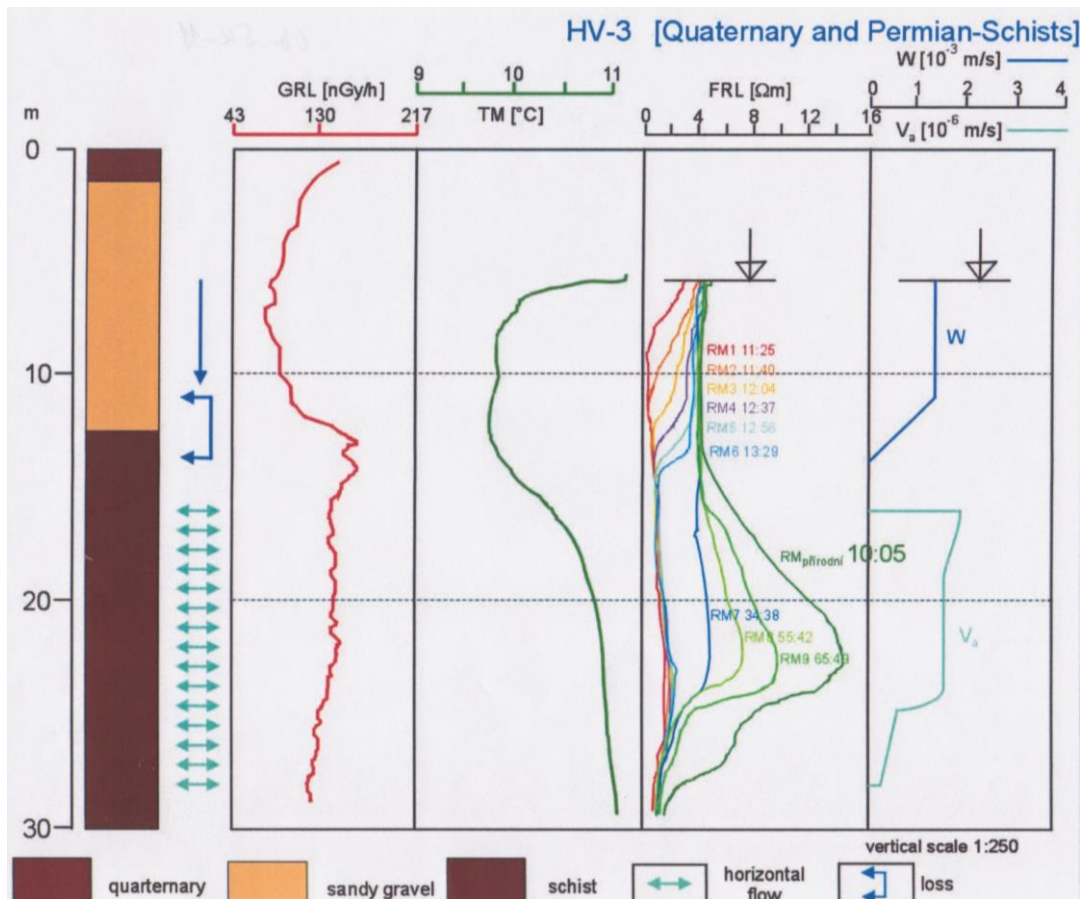
Obr. 4.13: Ukázka hydrokarotážního měření ve vrtu (starý průmyslový areál)

#### 4.2.7. MONITORING DŮSLEDKŮ SANACNÍCH PRACÍ

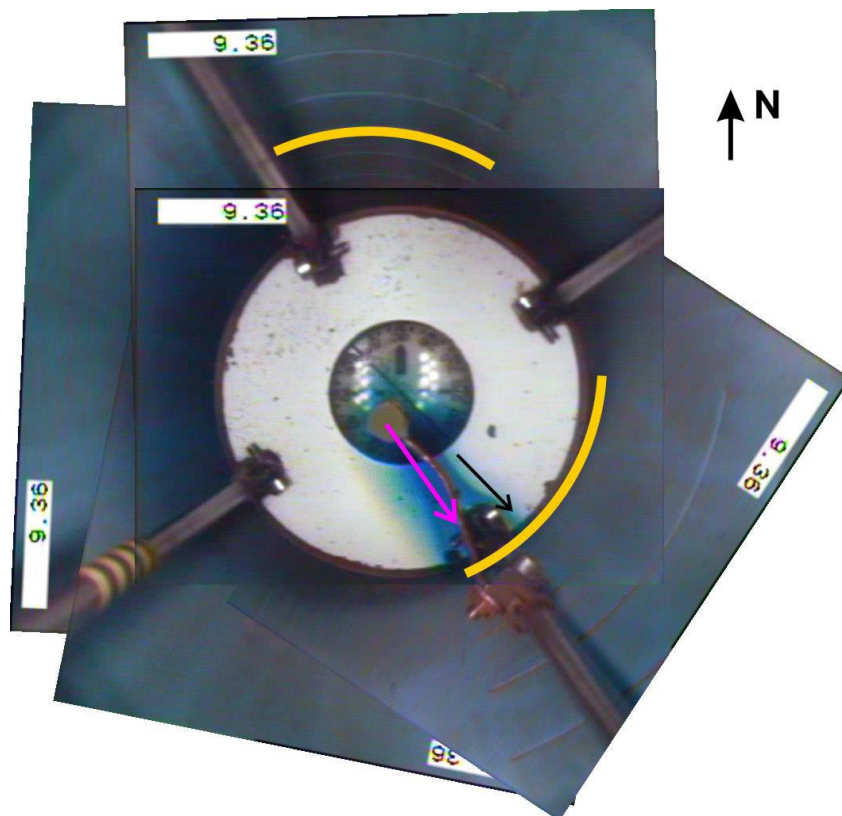
Sanační práce vedou k eliminaci jak zdrojů kontaminace, tak i vlastní kontaminace prostředí. Opakovaná geofyzikální měření metodami, v nichž se projevují tyto jevy, ukazují efektním způsobem změny fyzikálních parametrů (např. kontaminace spodní vody). Tato monitorovací měření se provádí nejčastěji odporovými metodami – profilováním i sondováním, na němž se projevují změny v měrných odporech a zprostředkovatelně změny v kvalitě a intenzitě kontaminace. Efektivněji lze mělké změny vodivosti zeminy sledovat konduktometrií nebo elektromagnetickým profilováním (např. obr. 5.12). Úspěšnost monitorování je méně závislá na nehomogenitě prostředí, protože jsou sledovány změny fyzikálních vlastností. Z tohoto hlediska jsou vždy výrazně přínosná data zjištěná v době přirozeného stavu prostředí.

Pro sledování postupu kontaminace nebo důsledků sanačních prací slouží také hydrokarotážní metody. Monitorování vrtu okolo skládky představuje obr. 4.14. Monitorovací vrt byl vyhlouben v kvartérních sedimentech v hloubkovém intervalu 0 – 12 m a níže v permských břidlicích. Hydrokarotážní měření metodou ředění označené kapaliny spolu s termometrií jednoznačně určilo dva samostatné oběhové systémy podzemní vody.

Směr horizontálního proudění vody se ve vrtech zjišťuje pomocí detektoru směru proudění (viz obr. 4.15).



Obr. 4.14: Příklad monitoringu v okolí vrtu.



Obr. 4.15: Sledování směru horizontálního proudění ve vrtu

U nových skládek je možné vybudovat před zavážením odpadů stabilní monitorovací systém pod izolační vrstvou v podloží skládky. U těchto systémů se většinou používá stabilní rovnoměrné sítě uzemnění, na nichž se projevují změny v uzemňovacích podmínkách

### 4.3 TECHNICKÉ A JINÉ HRANIČNÍ POUŽITÍ GEOFYZIKÁLNÍCH

Geofyzikální přístroje jsou na trhu dobře dostupné a objevují se proto ve výbavě pracovišť, které nemají s geologickým průzkumem mnoho společného. Geologické radary jsou například součástí složek záchranného systému (hasiči, policie), geofyzikální principy aplikované pro velmi mělká prostředí používají i zemědělské ústavy (detekce půdních horizontů a sledování jejich případné degradace) a podobně. V těchto případech je nutno připomenout, že mechanické přejímání metodiky měření, provozované bez tvůrčího přístupu podle manuálů výrobce, nevede často k cíli a může vytvářet ukvapené závěry o možnostech fyzikálních měření pro potřeby jiných oborů. Typickou oblastí, kde se geoelektrická měření úspěšně přizpůsobila technickému oboru je posuzování nebezpečí koroze, kde se střetává pohled elektrotechnika (inženýrské rozvodné sítě) se zkušenostmi geofyzika, který vidí danou problematiku spíše jako elektrické pole šířící se 3D prostorem. Studium koroze je důležité i z pohledu starých ekologických zátěží, protože staré skládky či jiné zanedbané prostory jsou vesměs kontaminovány i přítomností kovových objektů v různém stádiu degradace (tj. koroze).

#### 4.3.1 POSUZOVÁNÍ NEBEZPEČÍ KOROZE

Výchozím oborem pro protikorozi ochranu jsou základy elektrochemie. V zásadě jde o poznatek, že mezi dvěma elektrodami, které jsou propojeny elektrolytem, vznikají rozdíly elektrického napětí (rozdíly redox potenciálů) a ty vytvářejí proudový článek. Elektrody nemusejí být jenom z rozdílných kovů. Katoda a anoda mohou být tvořeny i například částmi potrubí různé kvality (rozdílný obsah uhlíku v oceli apod.) nebo potrubím pod různým mechanickým napětím. Dále elektrody mohou být stejného druhu a naopak elektrolyt může být proměnlivých vlastností. Tento případ je například tvořen přechodem z oxidační do redukční zóny (známe i u rudních ložisek) nebo změnou ve složení zemin (kontakt jílo-písek). Celá problematika je zásadně komplikována existencí bludných (parazitních) proudů, které pronikají do kovových objektů a vytvářejí anodické i katodické oblasti. Existence bludných proudů je podmíněna nechtěnými, neřízenými úniky proudových polí ze špatně ošetřených průmyslových zdrojů (elektrické generátory, elektrifikované tratě apod.). V zásadě je možno elektrickou korozi rozdělit na dva případy, a to na korozi bludnými proudy (tj. korozi podmíněnou přítomností bludných proudů) a půdní korozi (koroze nevyžaduje přítomnost bludných proudů). Pro orientaci uvádíme základní interpretační tabulku pro posuzování nebezpečí koroze dle ČSN 038372 (viz Tab. 1)

**Tab. 1:** Nebezpečí koroze dle ČSN 03 8372

Měrný odpor $\rho$ [ $\Omega\text{m}$ ]	Proudová hustota $J_p$ [mA/m <sup>2</sup> ]	Charakteristika korozivita	Stupeň korozivita
více jak 100	méně než 0,0001	velmi nízká	I
50 - 100	0,0001 – 0,003	střední	II
23 - 50	0,003 – 0,1	zvýšená	III
méně než 23	více než 0,1	velmi vysoká	IV

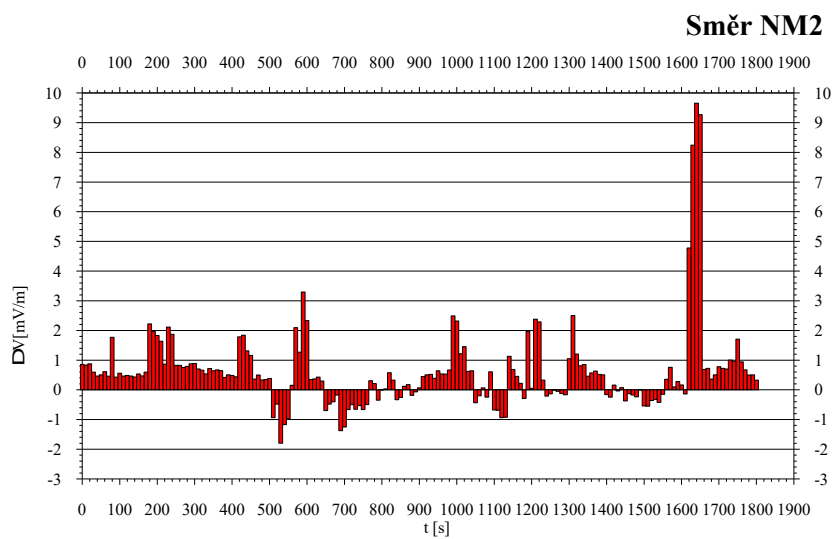
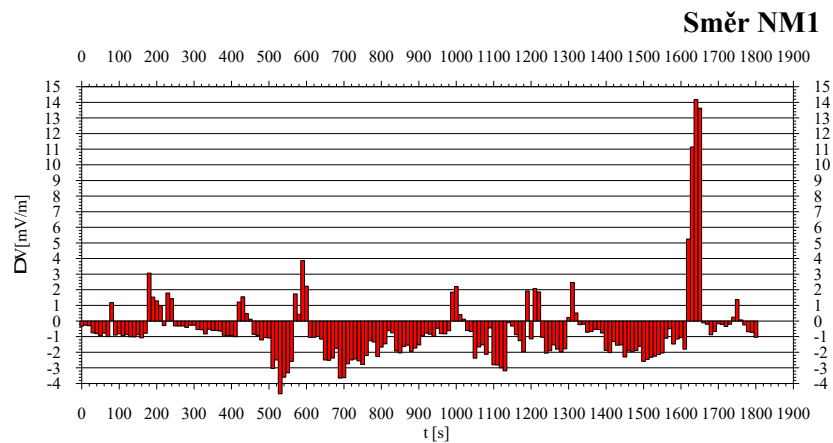
Při posuzování nebezpečí koroze se vychází ze zjištěné proudové hustoty pole bludných proudů  $J_p$  [mA/m<sup>2</sup>] a velikosti zjištěných měrných odporů [ $\Omega\text{m}$ ]. Vypočtené hodnoty se porovnávají s příslušnými standardy (ČSN).

Po vybudování nové podzemní stavební konstrukce (základy budovy) může nastat „sací efekt“ a stav elektrických polí se může značně změnit. Stavbu je tedy nutno i po stránce korozní ochrany zkolaudovat a její stav dále sledovat.

Měření pro úvodní etapu posuzení nebezpečí koroze se nazývá „Základní korozní průzkum“ a je prováděn na observačních stanicích, na kterých je sledována přítomnost bludných proudů. Měření bludných proudů probíhá tak, že jsou sledovány potenciální rozdíly mezi nepolarizovatelnými elektrodami N a M1, resp. N a M2. Vzdálenost elektrod od sebe doporučována 20 m. Směr dvojice nepolarizovatelných elektrod NM1 musí být vůči dvojici NM2 vždy kolmý. Měření velikosti bludných proudů doporučujeme provádět ve dvou vzorkovacích režimech, a to vesměs 1 s a 10 s. Délka observace závisí na okolnostech. Dolní časový limit je 30 minut. Hodnoty měrných se stanovují z výsledků interpretace vertikálních elektrických sond, nebo měření metodou ERT. Sondy VES jsou v optimálním případě prováděny tak, že na každém observačním bodě měříme vždy dvě sondy, navzájem kolmé. Tím by mělo být zajištěno, že bude zjištěna i případná odporová anizotropie prostředí.

Součástí Základního korozního průzkumu bývá někdy i požadavek objednatele na stanovení měrných odporů pro uzemnění. To je vysoce odborná, často podceňovaná činnost. Pro výpočty je nutné znát skutečné měrné odpory, nikoliv zdánlivé měrné odpory. Z toho důvodu je nutno problematiku řešit kvantitativní interpretací vertikálních elektrických sond nebo metodou odporové tomografie. Měření pro zemnicí soustavy jsou komplikované v tom, že je takovéto měření prováděno v místech se zástavbou, rušivým vlivem jiných sítí apod. Staré, zanedbané uzemňovací sítě se podílejí svou přítomností na ekologických zátěžích, kdy mohou měnit kvalitu přirozeného horninového prostředí.

Příklad záznamu bludných proudů viz obr. 4.16. Příklad koroze na vnitřní straně vodovodního potrubí viz obr. 4.17



**Obr. 4.16:** Příklad časového záznamu přítomnosti bludných proudů (potenciální rozdíl v mV/m) na trase vodovodního přivaděče.



**Obr. 4.17:** Snímek korozi napadeného vodovodního přivaděče

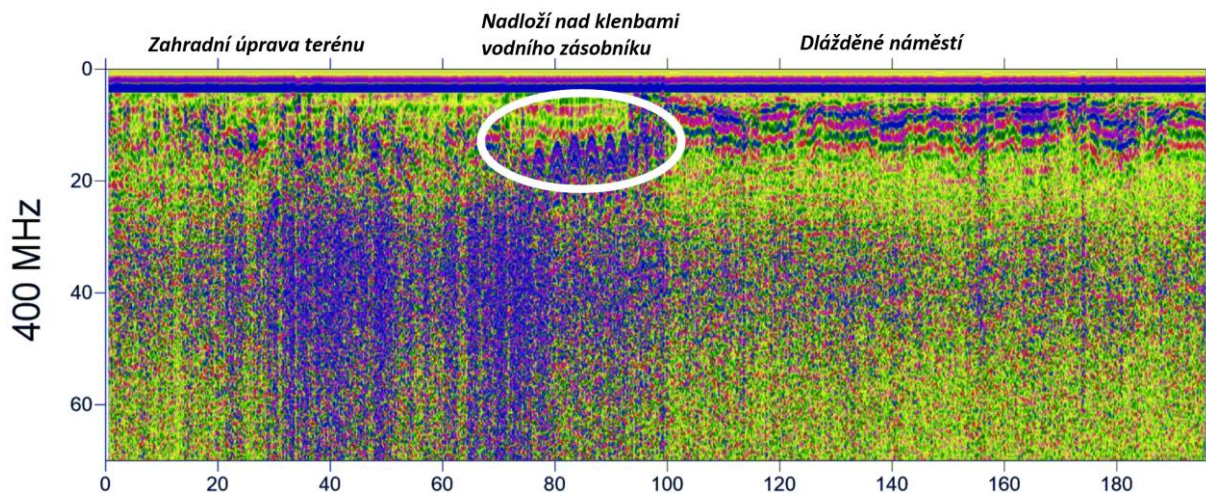
#### 4.3.2 PROPOJENÍ GEOFYZIKÁLNÍCH METOD S GEOCHEMIÍ

Za hraniční obory mezi geofyzikou a geochemií lze považovat všechny metody, kde výstupem geofyzikálních terénních měření je určení chemického složení zkoumaného prostoru. Mezi tyto metody nesporně patří většina radiometrických metod. Do této skupiny lze ještě zahrnout i metody založené na analýze půdního vzduchu, obecně označované jako *plynometrie*. Pokud při těchto metodách se v terénu pouze pomocí čerpadel odebírají, resp. sorbují vzorky a analýzy pak probíhají klasickými analytickými laboratorními metodami, bezesporu patří mezi geochemické metody. Jestliže však odebraný vzorek bezprostředně během terénních měření analyzujeme fyzikálními metodami, můžeme je přiřadit do geofyzikálních metod.

Geofyzikální metody mají mnoho společného s geochemií i v oblasti organizace prací či naopak komplexního vyhodnocení. Tak například přirozená geoelektrická pole vznikají v přirozeném horninovém prostředí na základě elektrochemických procesů. Detekce kontaminace ropných uhlovodíků pomocí vyzvané polarizace je proto možná na základě vzniku rozdílné koncentrace mineralizovaných roztoků v horninovém prostředí. Tradiční součástí geofyzikálních ložiskových měření v sedmdesátých letech bylo použití tak zvané merkurometrie, což byla detekce přítomnosti rtuti v horninách, které byly slibné např. pro nálezy polymetalických hydrotermálních ložisek. Měření původně probíhalo na základě rozboru půdního vzduchu, později se přešlo i na jiné metody. V padesátých a šedesátých letech minulého století byly široce využívány povrchové odběry vzorků zemin, které probíhaly souběžně s geofyzikálním (geoelektrickým) měřením. Následně byly vzorky analyzovány, nejčastěji na přítomnost mědi. Geofyzikální anomálie (detekce porušených vodivých struktur) tak byla doplňována přímou informací o možnostech zrudnění. V současné době se nabízí široká paleta aplikací, při kterých geofyzikální metody jsou doplňovány spektrometrií prováděnou buď in situ, nebo studiem vzorků v laboratoři. Geofyzikální měření tak lze dát do kontextu s informacemi o přítomnosti několika desítek prvků, zejména těch, které jsou považovány v dané situaci za kontaminaci prostředí. Podrobněji viz studie v lit. Jirků 2017 nebo v lit. Elijah 2013.

#### 4.3.3 DETEKCE INŽENÝRSKÝCH SÍTÍ A OBJEKTŮ UMĚLÉHO PŮVODU

Klasická detekce inženýrských sítí je problematika, kterou zajišťují technické skupiny vodohospodářů a podobných pracovišť. Tam kde nestačí použití rutinních postupů, lze využít i geofyzikálních metod. Součástí zanedbaných oblastí se skládkami jsou často nefunkční inženýrské sítě, jako jsou kabely, potrubí, odvodňovací stoky apod. V rámci evidence či jejich odstranění je možno použít některé geofyzikální metody. Metodou první volby je geologický radar nebo měření s přístroji pro metodu dipólového elektromagnetického profilování. Pro sledování sítí budovaných z Fe materiálů je možno využít magnetometrii. Pro objekty typu "odvodňovací stoky", které jsou často budovány z kameniva, jsou rozměrově větší (první metry) a jsou často uloženy hlouběji, lze často doporučit komplex odporové tomografie s mikrogravimetrií.



Obr. 4.18: Příklad detekce protipožární nádrže zakryté cca 3 m mocnou vrstvou navážky zahradní půdy. Vertikální škála v ns a horizontální v m.

## 5. PŘÍKLADY KOMPLEXNÍCH ŘEŠENÍ VYBRANÝCH PROBLÉMŮ

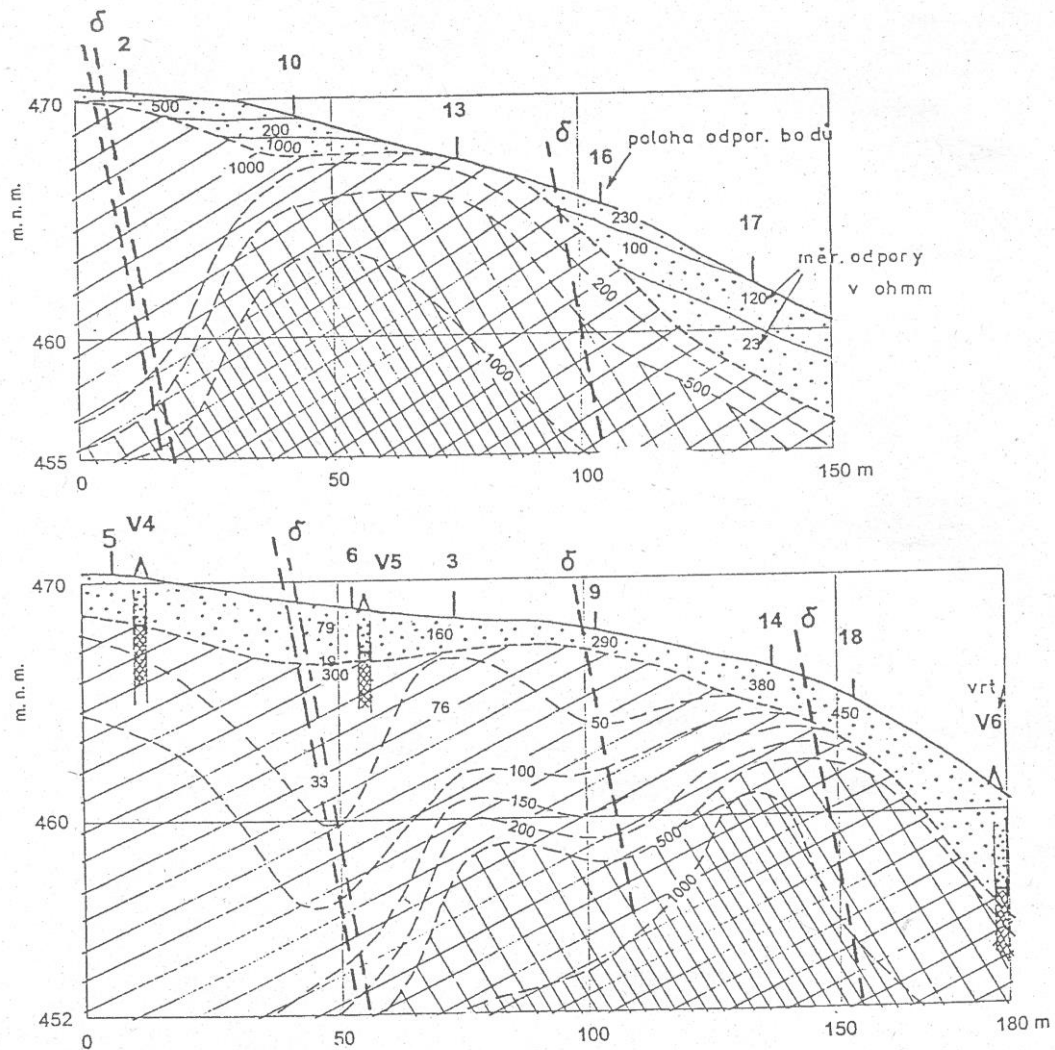
V literatuře uvedené v kap. 8 je uvedena řada úspěšných příkladů aplikace geofyzikálních metod při řešení obecných problémů ochrany životního prostředí. V této příručce jsou uvedeny další příklady použití geofyzikálních metod v konkrétních projektech průzkumu a nápravy starých ekologických zátěží v podmínkách České republiky. Uvedené příklady je nutno chápat jako obecnou ilustraci o možnostech geofyzikálních metod řešit velmi širokou škálu problémů z oblasti průzkumu a nápravy starých zátěží.

Příklady mají demonstrovat hlavně použitelnost a metodický postup geofyzikálních metod. Z tohoto důvodu nejsou, pokud to není pro lepší pochopení souvislostí nutné, uváděny názvy projektů ani jména lokalit. Geologické podmínky jsou uvedeny jen v rozsahu nezbytně nutném pro pochopení.

Každý příklad je ilustrován obrázkem, který má stejné číslo, jako je číslo příkladu.

### **5.1. VYMEZENÍ HŘBETU PEVNÉHO PODLOŽÍ A MAPOVÁNÍ TEKTONICKÝCH LINIÍ POMOCÍ ODPOROVÉHO SONDOVÁNÍ**

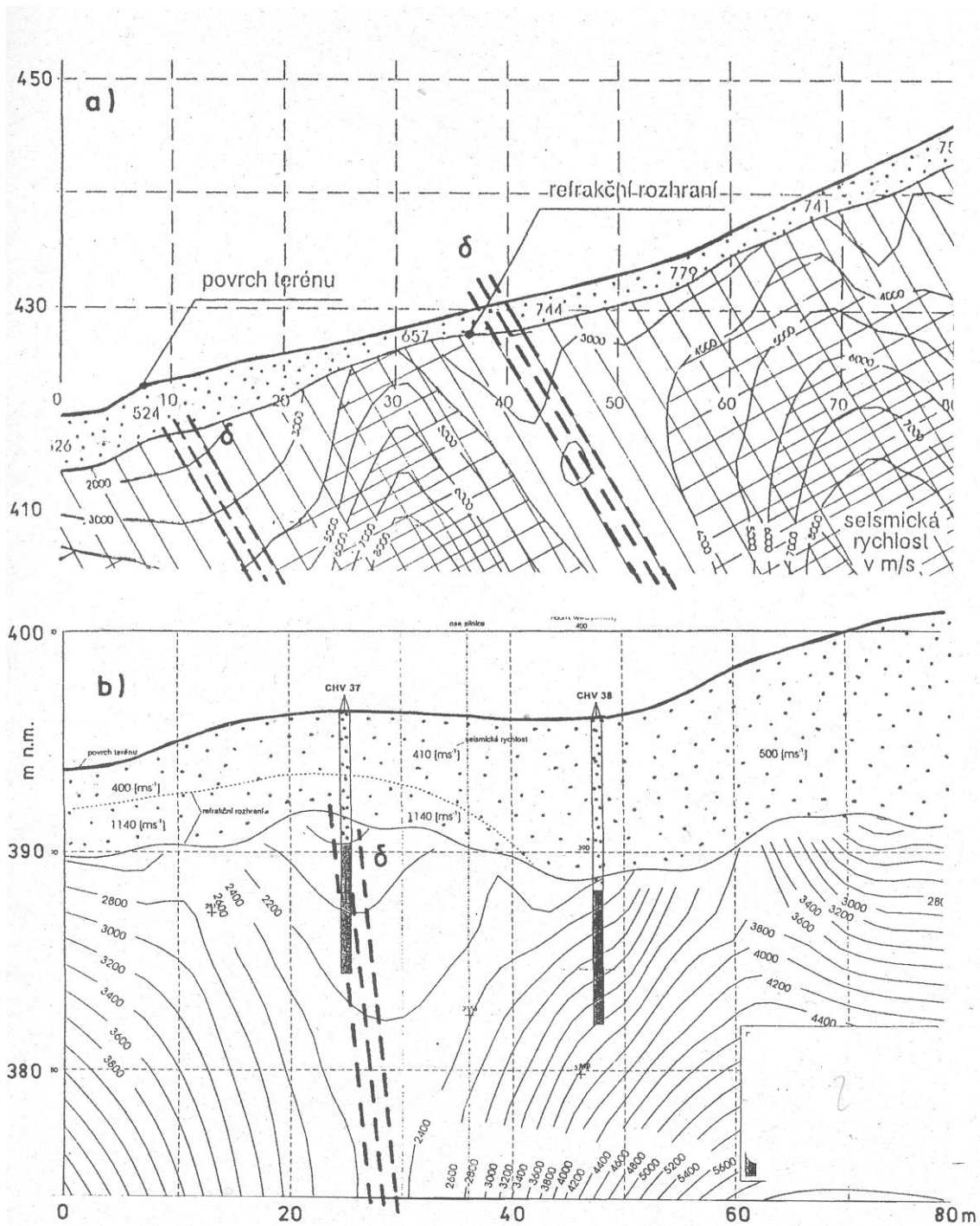
Vertikální elektrické sondování (odporové body VES označeny čísly) slouží k zjištění mocnosti pokryvných útvarů (mapování reliéfu podložních hornin) a lokalizaci porušených zón v pevných podložních horninách. Příklad odporových řezů na dvou paralelních profilech nad říčanskou žulou ukazuje elevaci (hřbet) kompaktních hornin o odporech přes 1 000  $\Omega\text{m}$ , pokryvné útvary mají nižší odpory (stovky  $\Omega\text{m}$ ) a mocnost 1 – 5 m. Snížené odpory v podloží lokalizují místa poruch – propustnějších zón, které jsou potenciálními cestami vyšších rychlostí proudění podzemních vod s příp. kontaminací. Interpretaci potvrdily následné vrtné práce (V4 – V6).



Obr. 5.1: Vymezení hřbetu pevného podloží a mapování tektonických linií pomocí odporového sondování

## 5.2. VYMEZENÍ HŘBETU PEVNÉHO PODLOŽÍ A MAPOVÁNÍ TEKTONICKÝCH LINIÍ POMOCÍ MĚLKÉ REFRAKČNÍ SEISMIKY

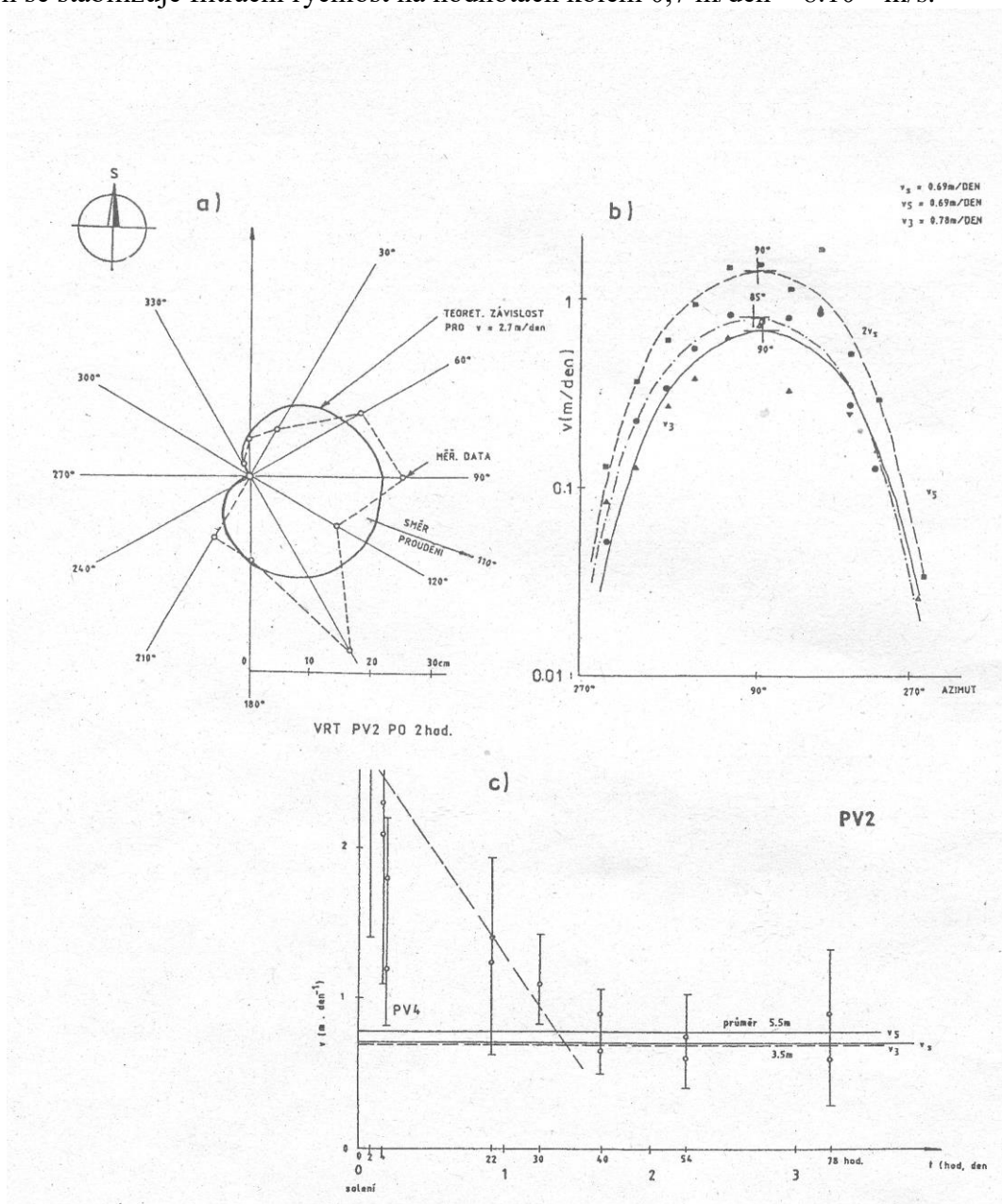
U odporově méně kontrastních prostředí se pro mapování poruch může aplikovat **MRS**, která zároveň sleduje průběh reliéfu pevného podloží pod kvartérními uloženinami a eluviem. Na obrázku jsou příklady seismických řezů ze dvou lokalit (a, b) středočeského plutonu. V podložních neporušených pevných horninách dosahují rychlosti seismických vln až 8 km/s, zatímco v porušených horninách klesají rychlosti pod 2 km/s. Pokryv (eluviální hlíny) má velmi nízké rychlosti ve stovkách m/s.



Obr. 5.2: Vymezení hřbetu pevného podloží a mapování tektonických linií pomocí mělké refrakční seismiky

### 5.3. URČENÍ SMĚRU A RYCHLOSTI PROUDĚNÍ PODZEMNÍ VODY METODOU NABITÉHO TĚLESA

V propustných fluviálních štěrkopiscích byla aplikována metoda NT pro určení parametrů dynamiky podzemní vody (p.v.). Ve vrtu PV2 byla zastižena v hloubce 4,5 m hladina p.v., která byla vrtem dotována roztokem 20 kg NaCl. V dotované zóně byla umístěna proudová elektroda a na povrchu byly měřeny tvary a časové posuny dvou ekvipotenciálních linií (e.l.) procházejících body vzdálenými 3,5 m a 5,5 m od ústí vrtu. Změny e.l. byly monitorovány po dobu 4 dnů. Posuny e.l. ukazují směr pohybu p.v. (a), rychlost je určena z max. posunu změn (b). Závislost rychlosti změn na čase měření ukazuje na rychlejší dynamiku p.v. v blízkosti vrtu (malé časy měření), způsobenou porušením prostředí v okolí vrtu při vrtání. Na větších časech se stabilizuje filtrační rychlost na hodnotách kolem  $0,7 \text{ m/den} = 8 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$ .

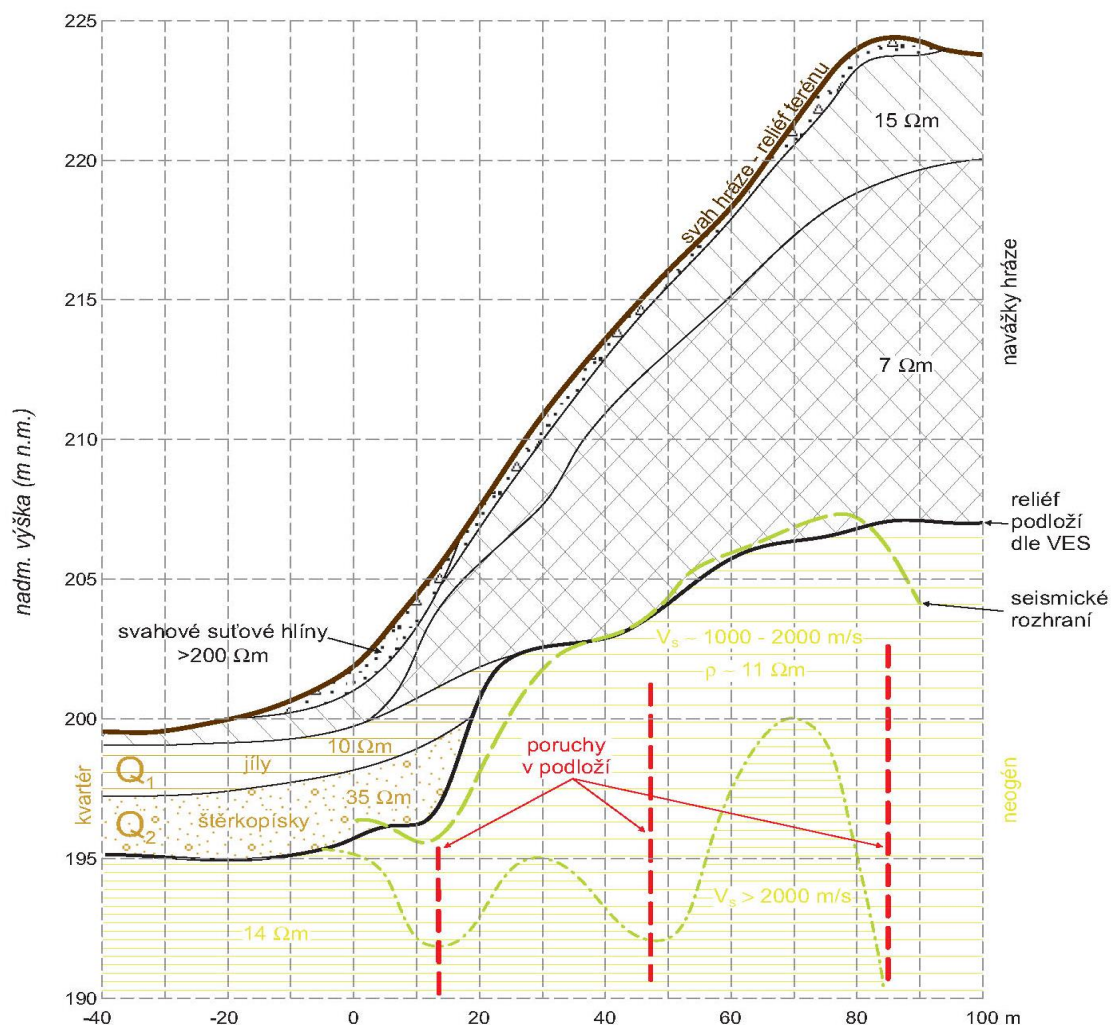


Obr. 5.3: Vymezení směru a rychlosti proudění podzemní vody metodou nabitého tělesa

## 5.4. URČENÍ MOCNOSTI A SLOŽENÍ ANTROPOGENNÍCH ULOŽENIN ODPOROVÝM SONDOVÁNÍM A MĚLKOU REFRAKČNÍ SEISMIKOU

Výřez z profilu vedeném přes antropogenní navážky (A) je příkladem aplikace komplexu odporových a seismických metod pro určení mocnosti navážky a sledování průběhu původního reliéfu neogenních jíílů. V podloží navážek jsou vymapovány relikty fluvialních jíílů (Q1) a štěrkopísků (Q2), které je možno diferencovat podle svých měrných odporů (10, resp. 30  $\Omega\text{m}$ ). Materiál skládky a navážek má velmi proměnné odpory (7 – 1 500  $\Omega\text{m}$ ). Reliéf podloží se projevuje jako výrazné seismické rozhraní mezi neslehlými materiály (asi 400 m/s) a pevným podložím (přes 1 km/s). Deprese rychlostí v podloží odpovídají porušeným zónám.

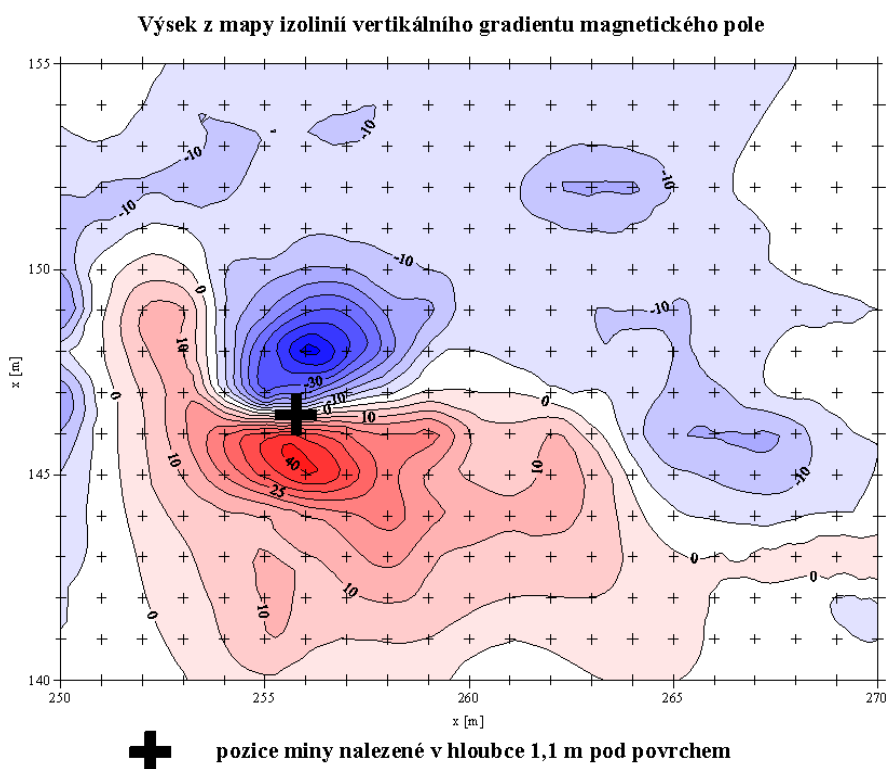
Interpretovaný geofyzikální řez podle VES a MRS



Obr. 5.4: Určení mocnosti a složení antropogenních uloženin odporovým sondováním a mělkou refrakční seismikou

## 5.5. DETEKCE SKRYTÉ MUNICE DETAILNÍ MAGNETOMETRIÍ

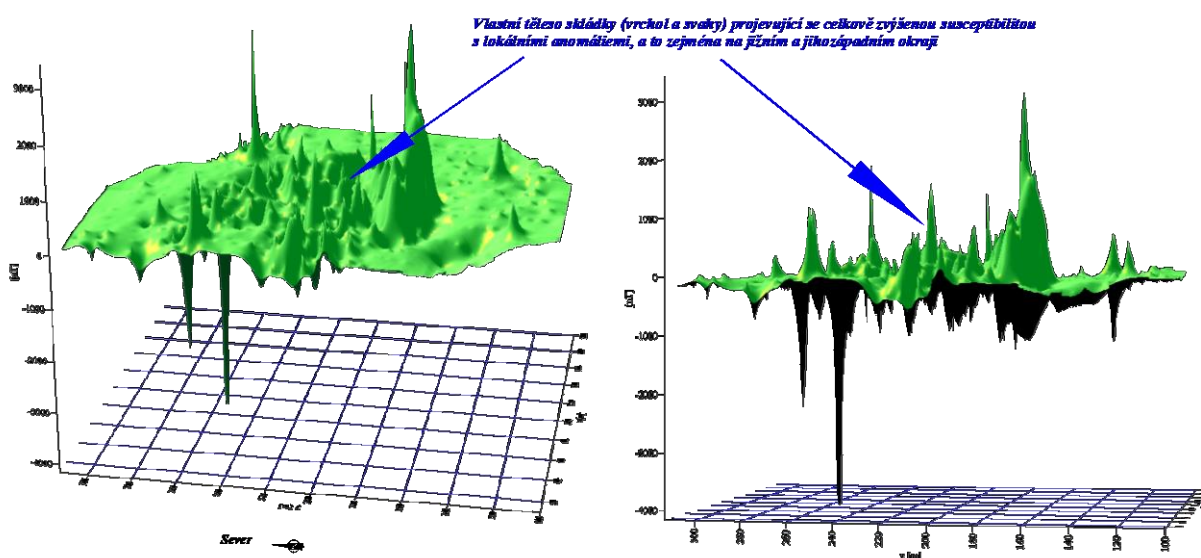
Přesná magnetická měření slouží k lokalizaci podzemních železných a ocelových objektů. Do hloubek až 10 m lze detekovat velké muniční předměty. Na obrázku je ukázka výseku mapy izoliníí vertikálního gradientu totálního zemského magnetického pole (anomálie v nT) měřená protonovým magnetometrem/gradiometrem v síti 1 x 1 m v dřívějším vojenském prostoru, která detekovala minu v hloubce 1,1 m. Dole jsou uvedeny ukázky detekované a zneškodněné munice (dýmové miny ráže 120 mm).



Obr. 5.5: Detekce skryté munice detailní magnetometrií a ukázka vykopané munice

## 5.6. PŘESNÁ DETAILNÍ MAGNETOMETRIE PRO DETEKCI ZBYTKŮ PODZEMNÍCH KONSTRUKCÍ, INŽENÝRSKÝCH SÍTÍ A KOVOVÉHO ODPADU

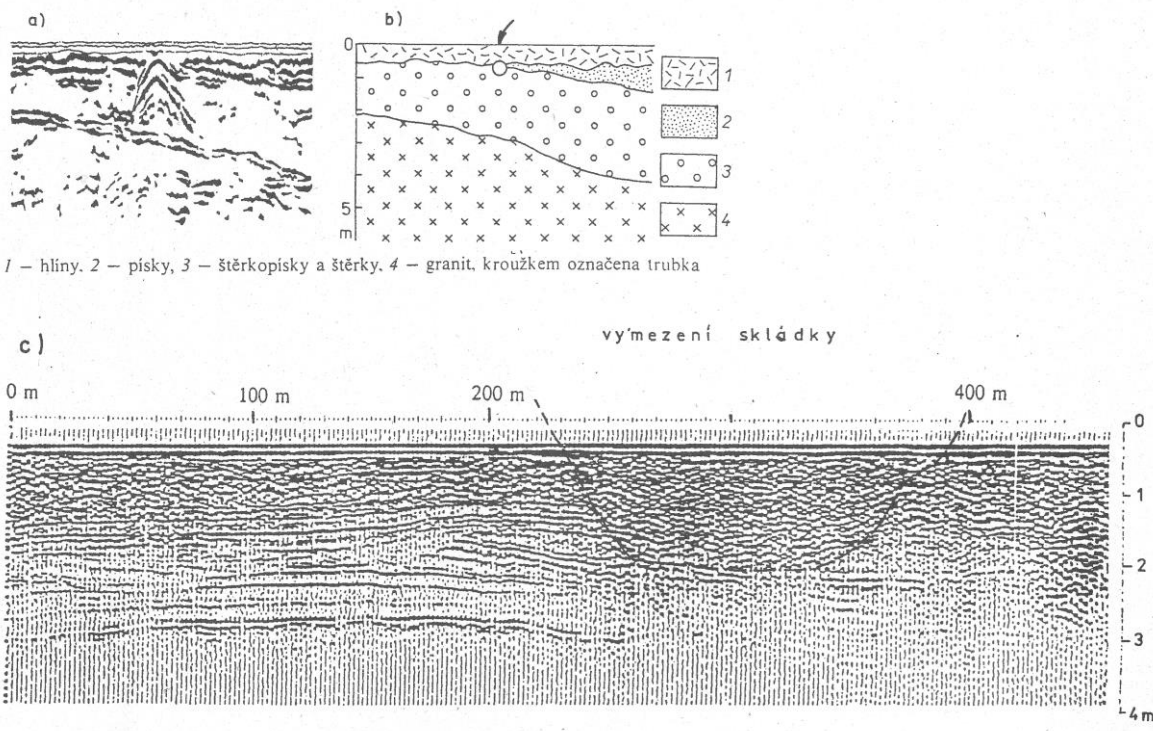
Necitlivě demolované dílenské provozy skrývají pod navážkami zbytky průmyslových objektů a zdrojů kontaminace podzemních vod. Detailní měření pomocí cesiových, resp. protonových magnetometrů/gradimetrů poskytují velmi dobrý obraz rozmístění železných a ocelových konstrukcí pod povrchem. Magnetometrie umožňuje detekovat také feromagnetický materiál ve skládkách, a tak blíže určit jejich charakter



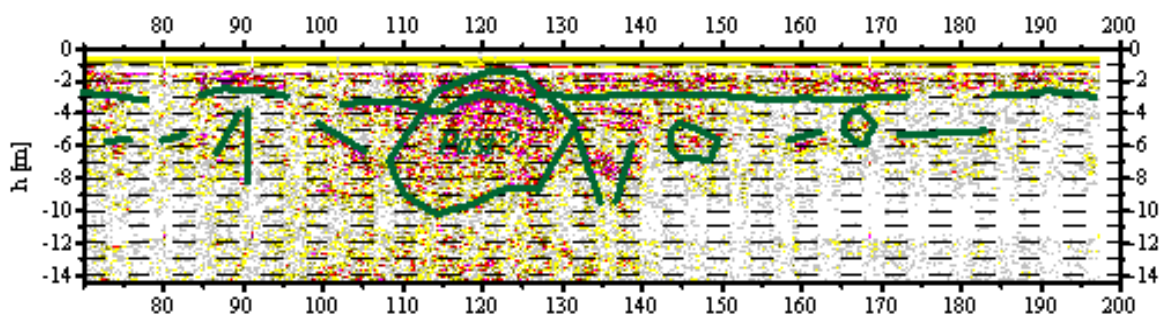
Obr. 5.6: Oblast skládky, na kterou byl vyvážen s komunálním odpadem i dílenský odpad se vymezuje výraznými magnetickými anomáliemi. 3D zobrazení ze dvou pohledů kamery.

## 5.7. POUŽITÍ GEORADARU PRO DETEKCI POTRUBÍ, SLEDOVÁNÍ RELIÉFU PODLOŽÍ A PRO VYMEZENÍ SKLÁDKY

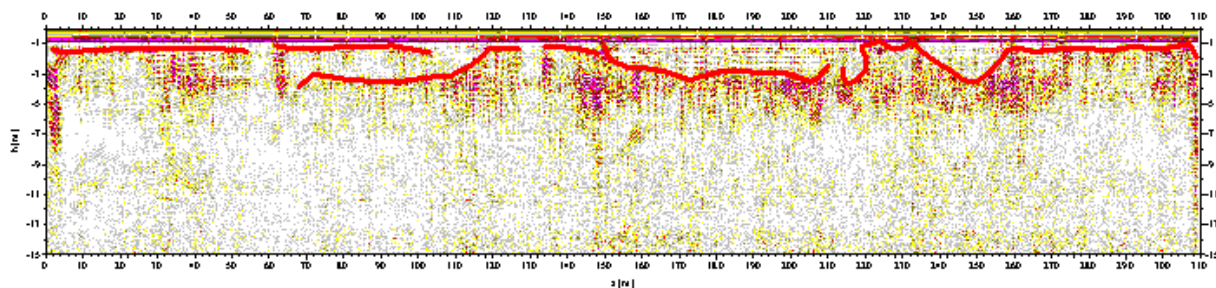
Georadarová metoda (GPR) patří mezi nejmodernější metody průzkumu mělkých nehomogenit. Slouží k detekci podpovrchových objektů (5.7a, b) a ke zjišťování stratifikace prostředí (5.7a, c). Na uvedených příkladech je ukázka černobílé varianty zobrazení georadarových řezů nad potrubím uloženém v eluviu žul (5.7a, b) a na profilu vedeném přes divokou skládku (5.7c), která vznikla zaplněním vytěženého prostoru pískovny v náplavových uloženinách Dunaje. Skládku se projevuje ztrátou korelace střídání vrstev jílovitých a písčitých sedimentů.



Obr. 5.7a, b, c: Použití georadaru pro vyhledání potrubí a pro vymezení skládky ve vytěžené jámě



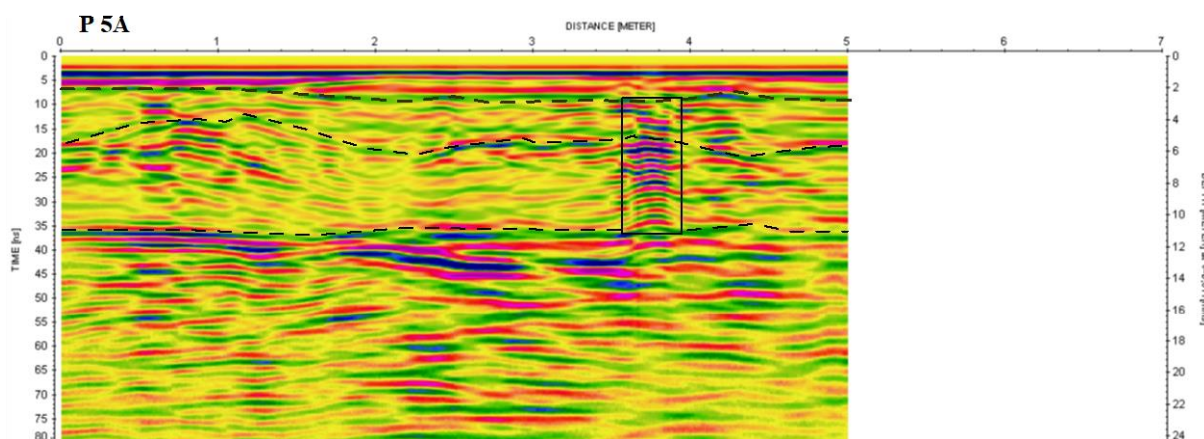
Obr. 5.7d: Příklad detekce kontaminovaného prostředí (benzen) pomocí radarové metody



Obr. 5.7e Určování hloubky pevného pískovce pomocí geologického radaru

## 5.8. POUŽITÍ RADARU A ERT PŘI VYHLEDÁNÍ STRUKTUR POD ZPEVNĚNÝMI PLOCHAMI

Pro průzkum terénu, který je zakryt zpevněným povrchem (asfalt, dřevěná podlaha apod.) je ideální použít radarové měření, které není závislé na kontaktu elektrod s povrchem zkoumaného prostředí. V poslední době existuje metodika prací založená na principu metody ERT, kdy měřicí elektrody vkládáme do malých vývrtů v podlaze zkoumaného místa. Radarové měření viz obr. 5.8a. Metoda ERT viz ilustrace na obr. 5.8b. Na obr. 5.8 uvádíme příklad interpretace radarogramu pořízeného ve sklepních prostorách v centru Prahy. Hlubší rozhraní v 11 m se shoduje s povrchem skalního podloží (břidlice) zakrytého říčními sedimenty. Na staničení 3,8 se pravděpodobně nachází starý zbytek zdiva.

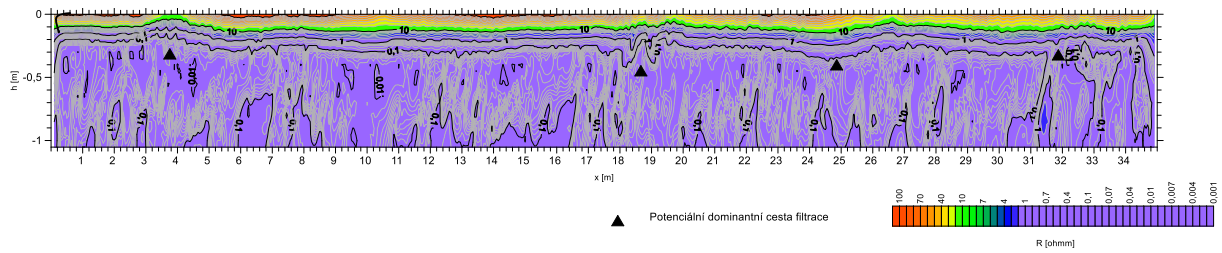


**Obr. 5.8a:** Použití georadaru při průzkumu pod zpevněnými podlahami. Jedná se o rozhraní mezi kvartérem a břidlicemi v hloubce kolem 11 m.

Na obr. 5.8b je uveden snímek z přípravy odporového měření při výzkumu podloží podzemní garáže. Na obr. 5.8c je pak odporový řez z téhož prostředí. Pod dvaceti cm pevné vrstvy je betonová mazanina silně mineralizována chloridy, jejichž nositelem je vlhkost naplňující póry podkladové vrstvy. K tomuto závěru vede zjištění extrémně nízkého odporu v podložní poloze.



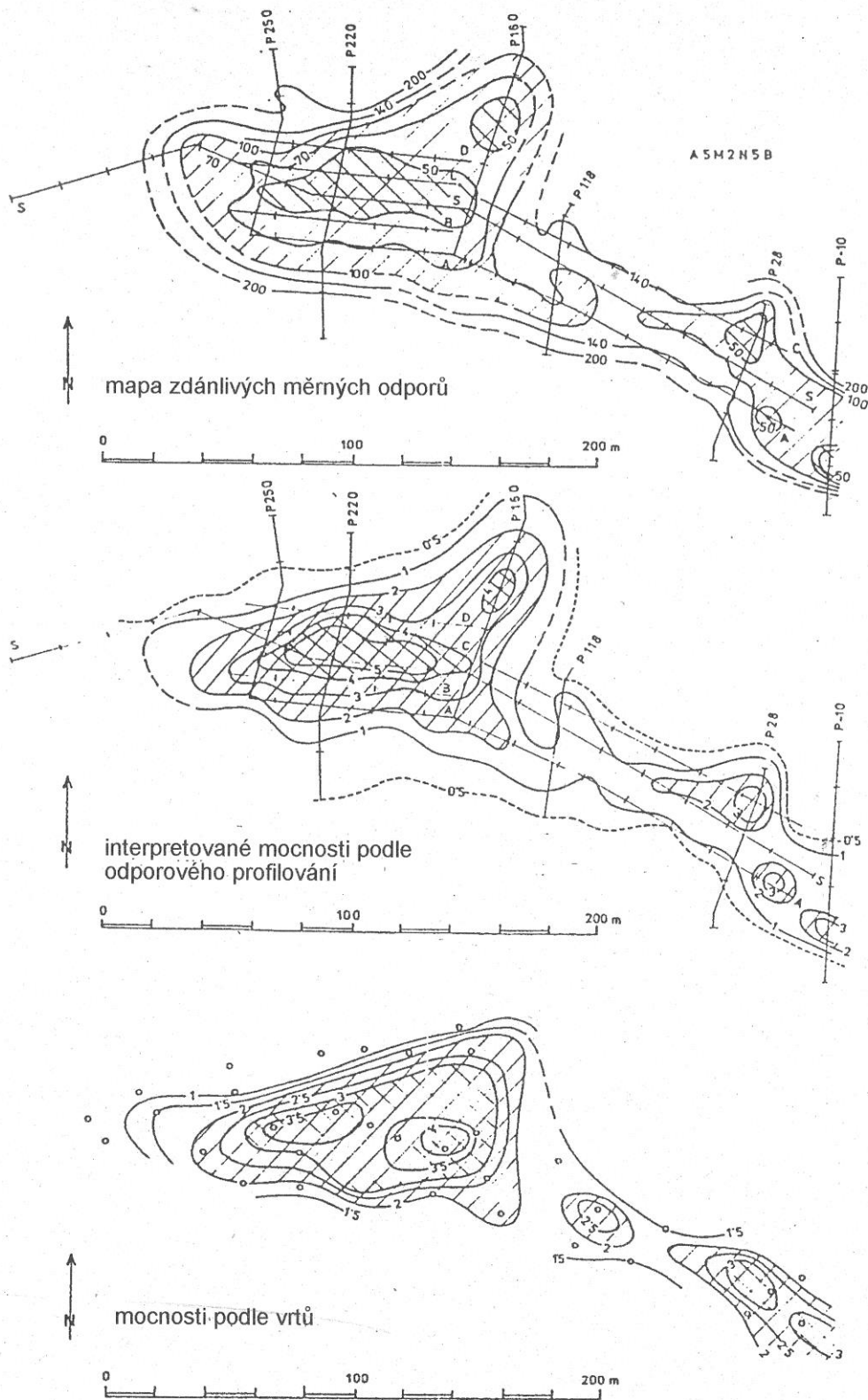
**Obr. 5.8b:** Příprava měření metodou ERT na podlaze podzemní garáže



**Obr. 5.8c: Odporový řez získaný z měření na podlaze podzemních garáží.**

## 5.9 MAPOVÁNÍ SKLÁDKY ODPOROVÝM PROFILOVÁNÍM SE DVĚMA ROZESTUPY ELEKTROD

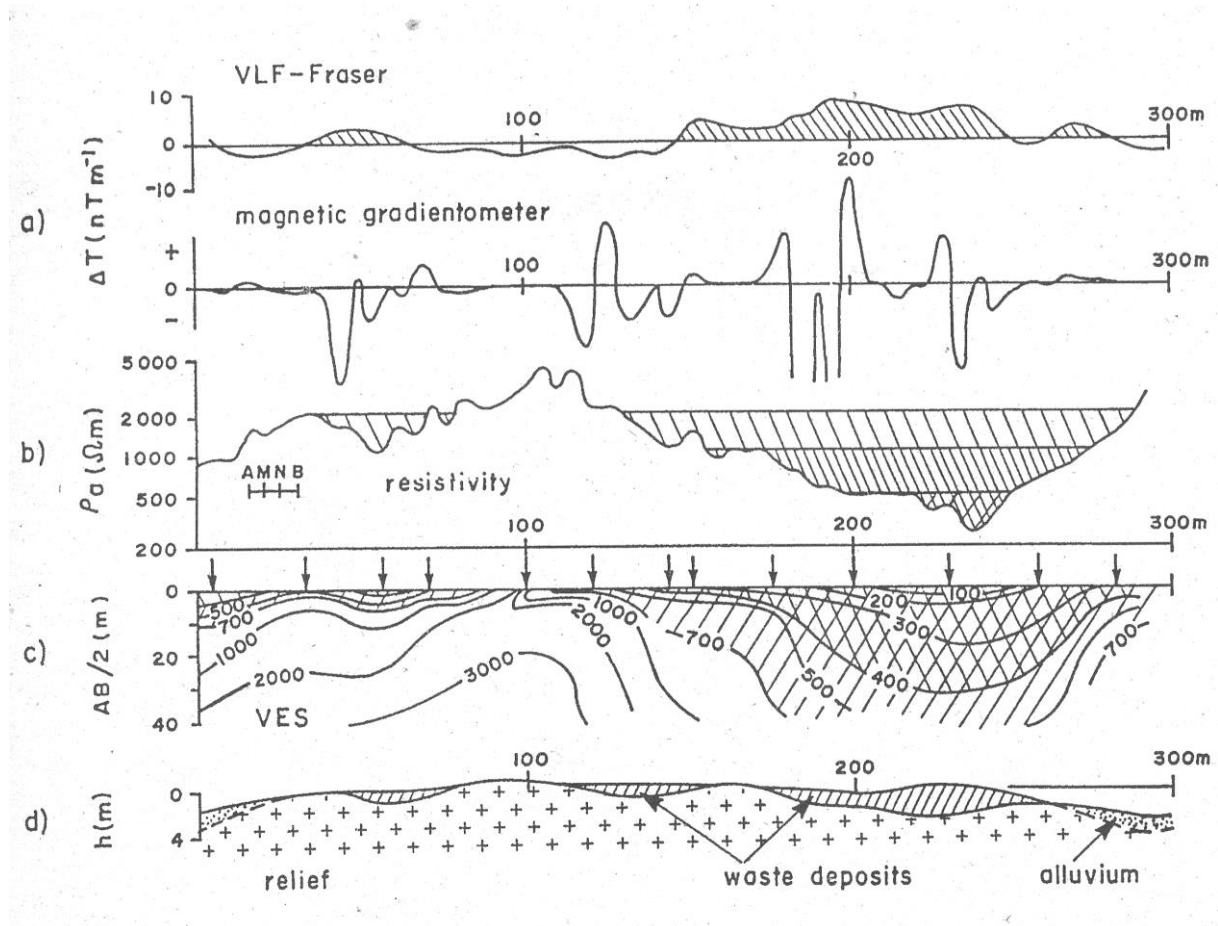
Mocnost skládky se určuje pomocí odporového sondování (ERT či VES) nebo seismické refrakce (MRS). Za určitých okolností lze tyto relativně obtížnější metody nahradit odporovým profilováním s různým rozestupem elektrod. Na obr. 5.9 je uveden příklad mapy izolinií odporů podle odporového profilování z jednoho z rozestupů elektrod, interpretovaná mocnost skládky podle odporového profilování a mapa mocnosti zjištěná podle následného vrtání. Hostujícím prostředím skládky jsou fluvialní sedimenty, pod nimiž v hloubce kolem 15 m leží neogenní jílovité sedimenty.



Obr. 5.9: Mapování skládky odporovým profilováním se dvěma rozestupy elektrod

## 5.10. MAPOVÁNÍ SKLÁDKY KOMPLEXEM GEOFYZIKÁLNÍCH METOD

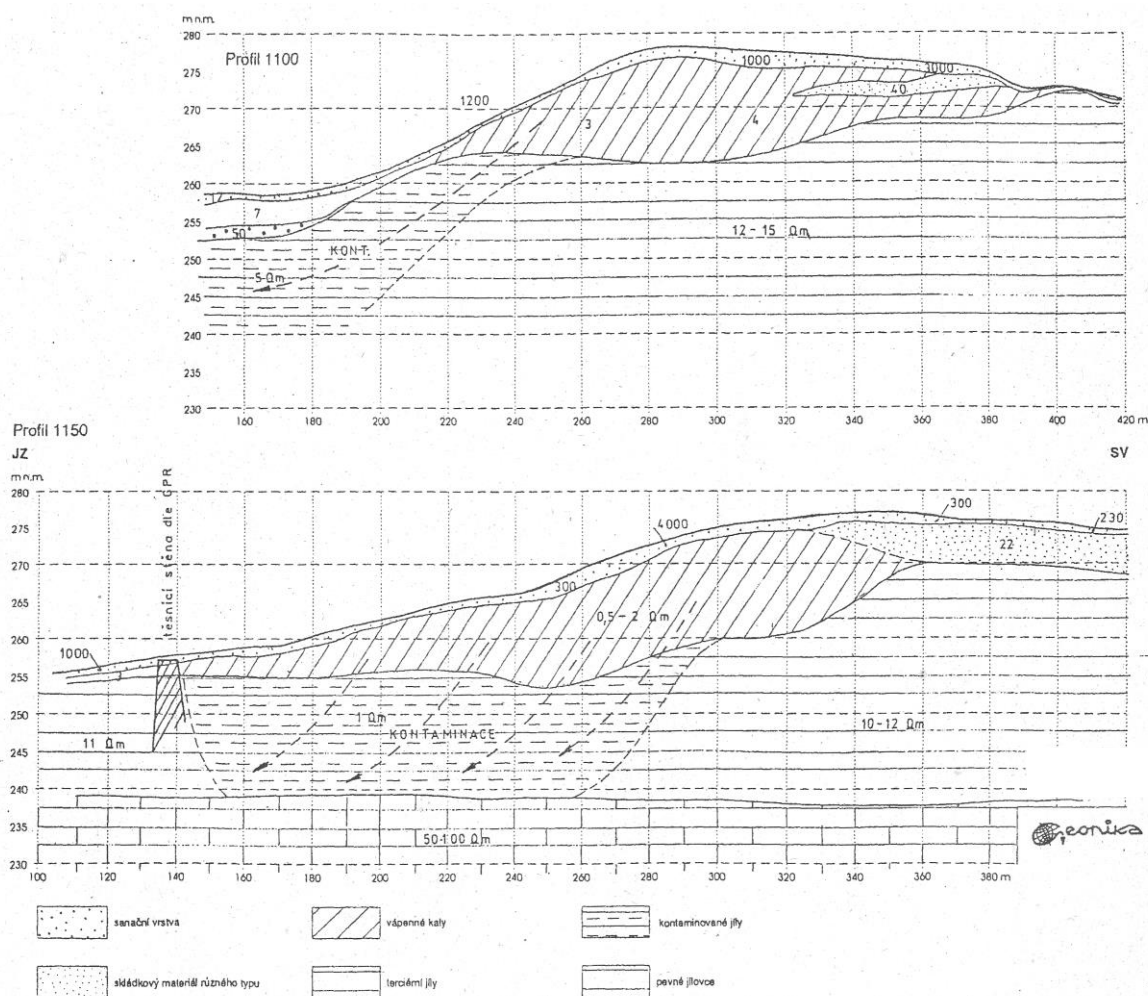
Příklad mapování rozsah a mocnosti tuhého komunálního odpadu (TKO) vršeného do mocnosti až 3 m volně na povrchu s využitím menších depresí ukazuje možnosti jednotlivých metod. Uložený materiál se na podložních horninách projevuje vodivě ve Wennerově odporovém profilování (c) a odporovém řezu podle VES (d). Kladné hodnoty VLF – Fraser v metodě VDV (a) naznačují místa tektonického porušení podložních hornin. Železné předměty a armování úlomků panelů vyvolávají magnetické anomálie (b).



Obr. 5.10: Mapování skládky geofyzikálním komplexem

## 5.11. ZJIŠTĚNÍ ÚNIKŮ SKLÁDKOVÉ VODY DO PODLOŽÍ POMOCÍ ODPOROVÝCH METOD

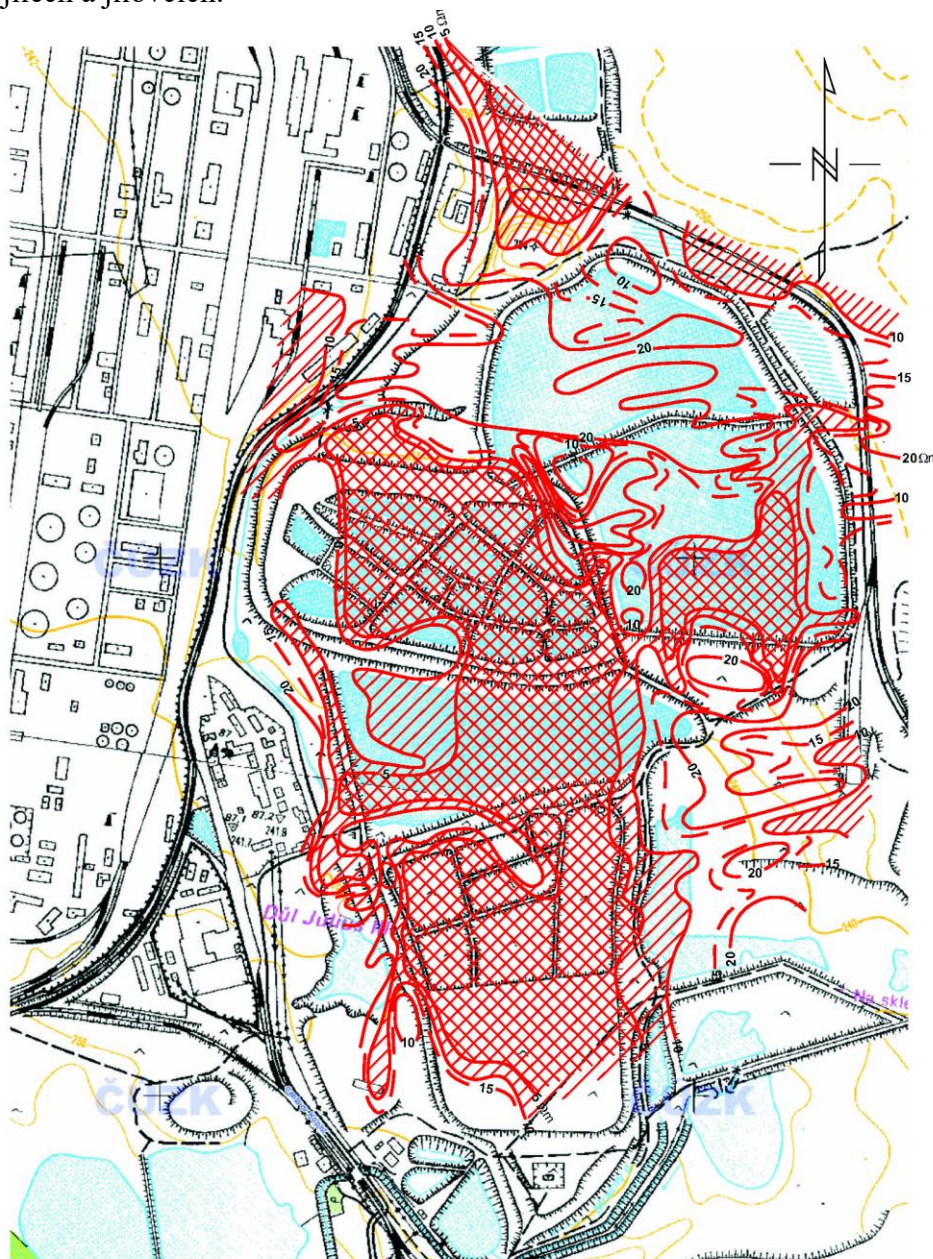
Vysoce vodivá voda unikající ze skládky vápenných kalů proniká do podložních neogenních jílovitých sedimentů a snižuje jejich měrný odpor (10 – 15  $\Omega\text{m}$ ) o více než řád (pod 1  $\Omega\text{m}$ ). Kontaminovaná voda v podloží je od SV vytlačována nekontaminovanou vodou, která nesnižuje měrný odpor sedimentů. Vlastní vápenné kaly mají odpory 0,5 – 3  $\Omega\text{m}$ . Kombinovaná odporová měření profilováním a sondováním ukazují rozsah a postup kontaminace. Podzemní těsnicí stěna brání šíření kontaminantu.



Obr. 5.11: Zjištění úniků skládkové vody do podloží pomocí odporových metod

## 5.12. MAPOVÁNÍ ROZSAHU KONTAMINACE PODZEMNÍCH VOD ELEKTROMAGNETICKÝM PROFILOVÁNÍM

Rozšíření podzemní vody s vysokým obsahem chemických látek (koncentrace v mg/l) vede k úměrnému snižování jejího měrného odporu a odporu kolektoru podle tzv. Archieho zákona. Takové vodivé prostředí lze snadno mapovat odporovými metodami nebo elektromagnetickým mapováním (DEMP). Příklad na obrázku uvádí aplikaci EM aparatury Geonics EM 34-3 pro zjištění rozsahu kontaminace podzemních vod v antropogenních uloženiích popílků, které jsou odpadním produktem chemické výroby a jsou ukládány na terciérních jílech a jílovcích.

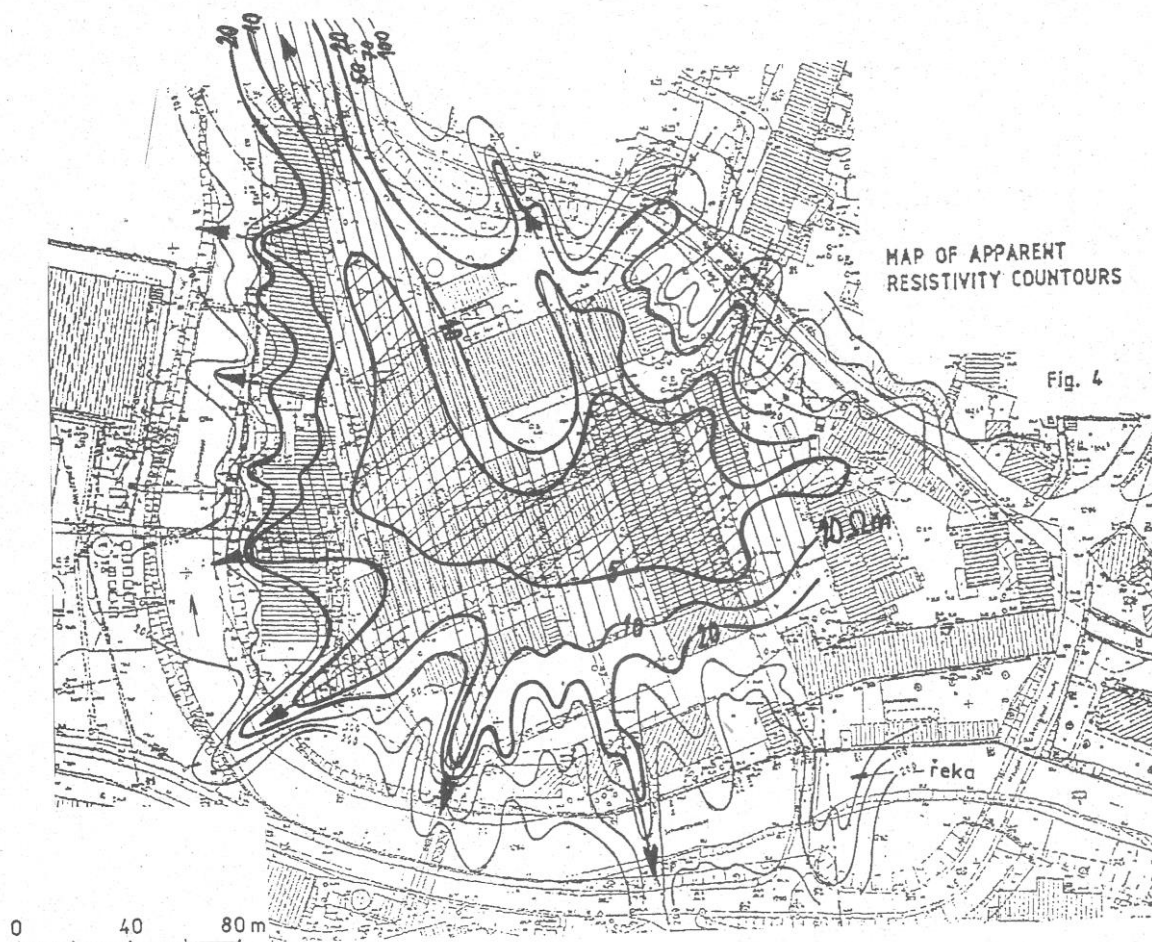


Mapa izoohm podle EM 34-3  
1 : 10 000

Obr. 5.12: Příklad aplikace EM aparatury pro detekci rozsahu kontaminovaných vod

### 5.13. PRŮZKUM ROZSAHU A ŠÍŘENÍ KONTAMINACE

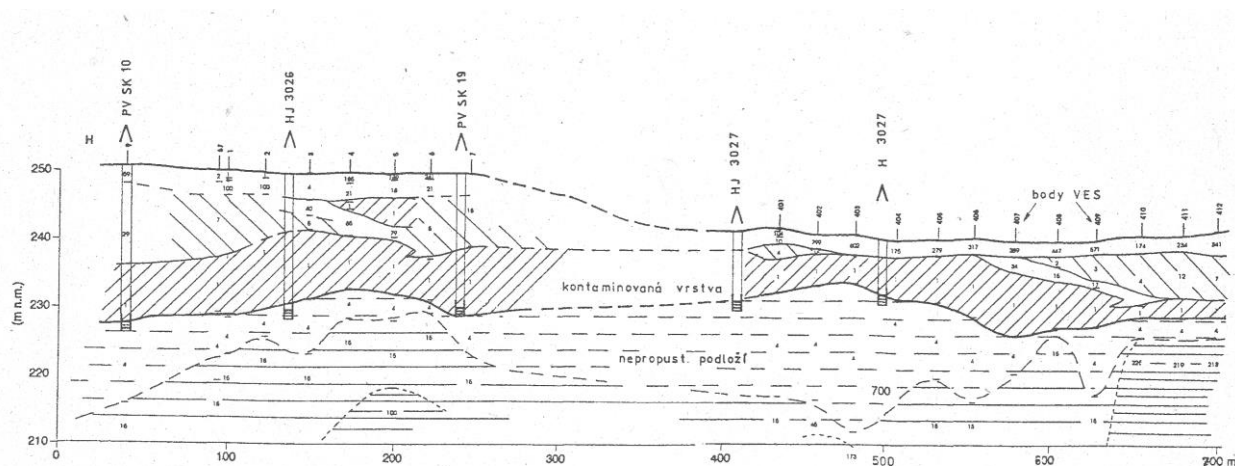
V průmyslových objektech existuje značné množství pozemních i podzemních kovových objektů a elektrických vedení, které znemožňují aplikaci elektromagnetických metod. Méně postižená jsou měření odporovými metodami stejnosměrným proudem, pokud povrchová úprava nebrání uzemnění elektrod. Často je nutno provádět nepravidelně rozmístěná měření v místech, kde tomu překážky nebrání. Příkladem je odporové měření v niklové huti, kde intenzivní kontaminace p.v. v prostoru závodu ohrožuje vody obtékající říčky. Z mapy izoohm je zřetelný rozsah kontaminace v podzemních vodách pod areálem závodu (vodivá plocha) a místa pravděpodobného šíření kontaminace do řeky (šipky).



Obr. 5.13: Průzkum rozsahu a šíření kontaminace

## 5.14. KONTAMINOVANÁ VRSTVA V ODPOROVÉM ŘEZU PODLE VES

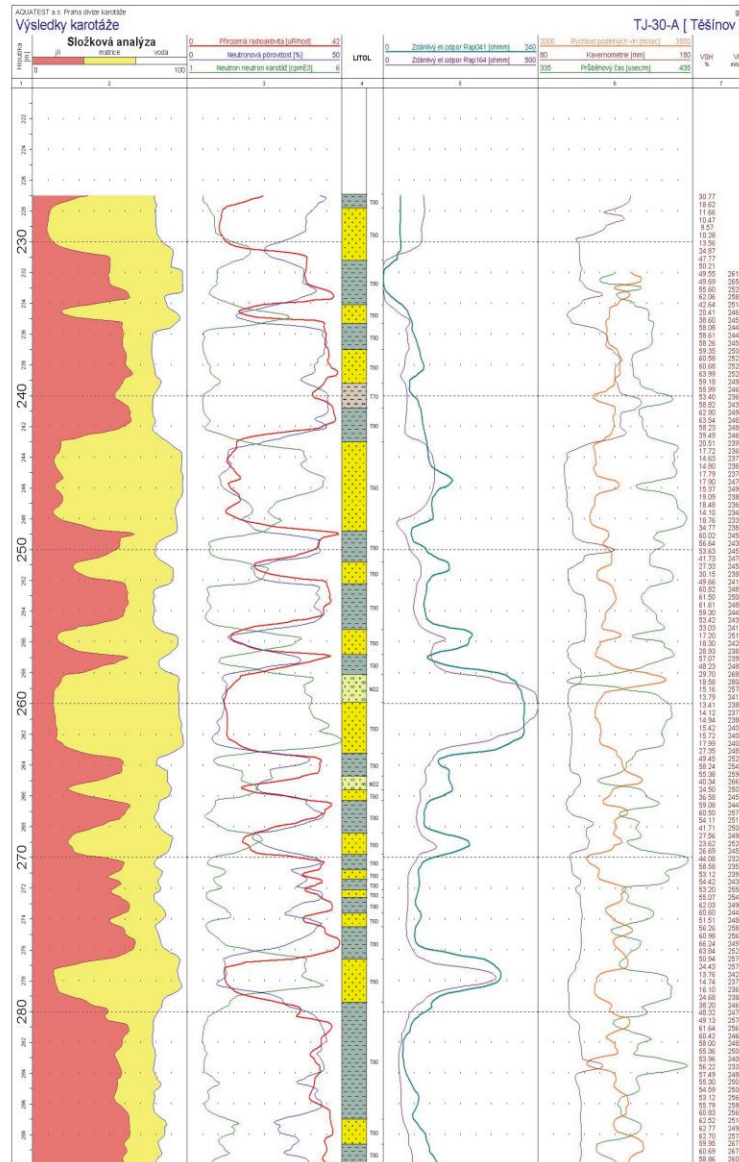
Kontaminace podzemních vod v kolektorech se nejčastěji projevuje vodivě a lze ji sledovat vertikálním odporovým sondováním (VES). To ukazuje odporový řez, v němž u mělkého kolektoru pod hladinou podzemní vody (p.v.) klesá měrný odpor i pod  $1 \Omega\text{m}$ , což svědčí při dané pórovitosti prostředí o měrném odporu pod  $0,1 \Omega\text{m}$  (pro srovnání pitná voda má kolem  $20 - 40 \Omega\text{m}$ ). Jedná se o extrémně kontaminované prostředí v blízkosti chemického závodu.



Obr. 5.14: Kontaminovaná vrstva v odporovém řezu podle VES

## 5.15. VYHODNOCENÍ LITOLOGIE PODLE KAROTÁŽE

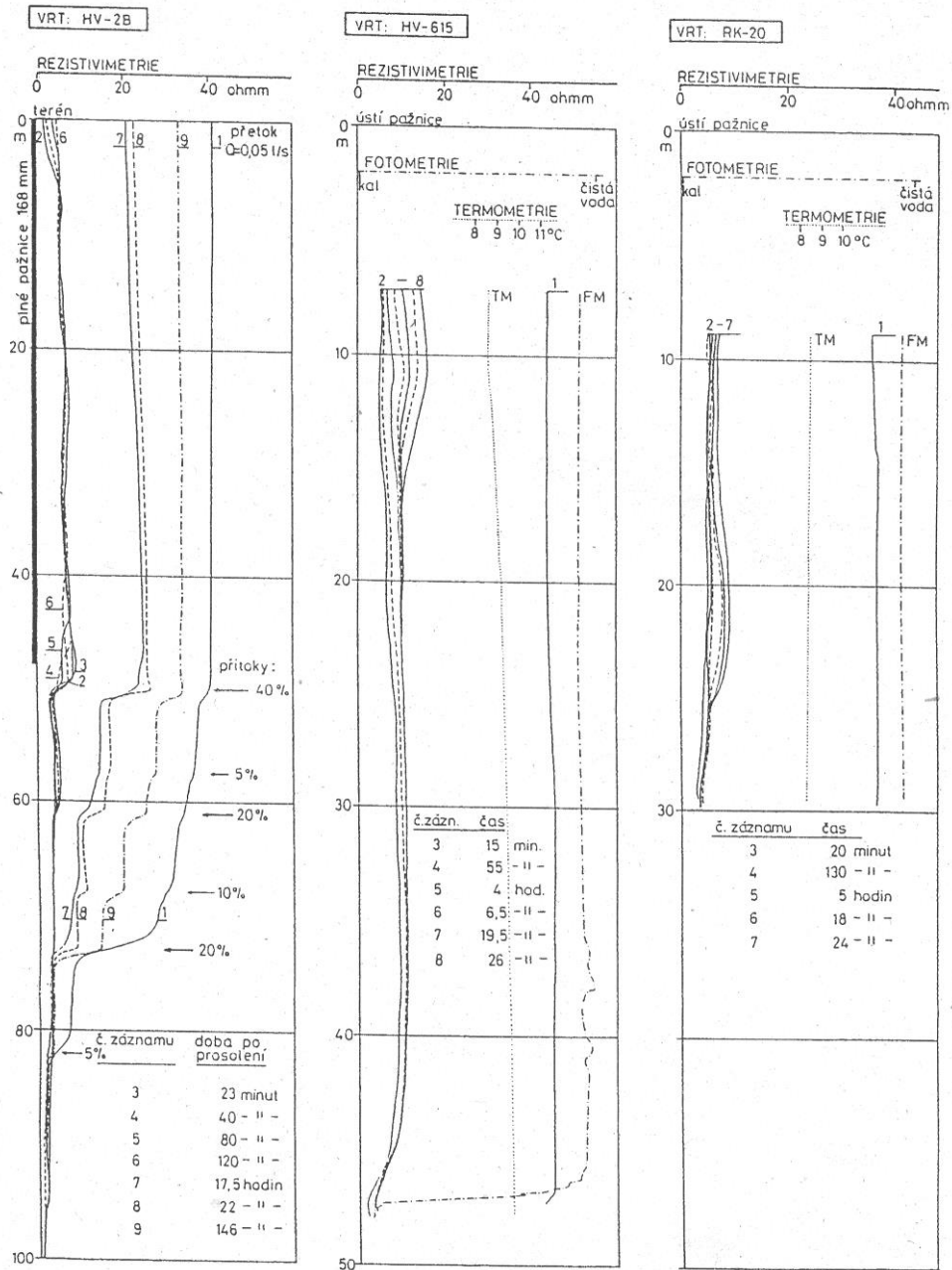
Z karotážních záznamů lze upřesnit litologii blízkého prostředí a litologická rozhraní. Na obrázku je uveden příklad zpracování karotážního měření z Třeboňské pánve. V 1. sloupci je výsledek složkové analýzy sedimentů ve formě procentuálního zastoupení jílu, písčité složky a pórovitosti. Ve 2. sloupci jsou křivky gama karotáže GK, neutron karotáže NK a pórovitosti podle NK, ve 3. sloupci je geologický a karotážní profil, 4. sloupec elektrokarotáž Rap 0,4 a 1,6 m, 5. sloupec je rychlost podélných akustických vln, průměr vrtu a průběhový čas podle akustické karotáže, 6. sl. – číselné hodnoty vybraných parametrů.



Obr. 5.15: Vyhodnocení litologie podle karotáže

## 5.16. PROUDĚNÍ PODZEMNÍ VODY VE VRTECH V KRYSTALINIKU

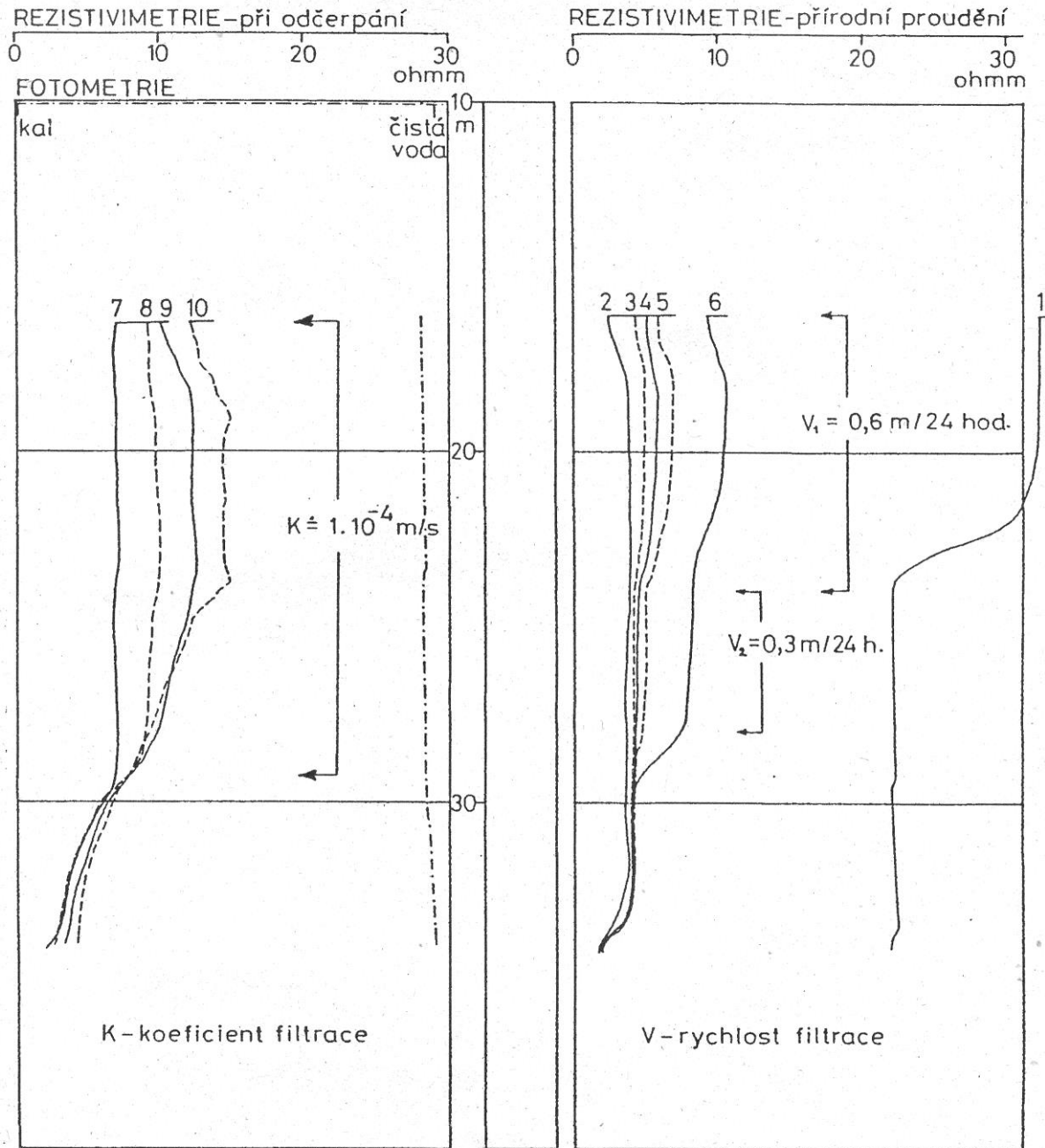
Rezistivitamií lze sledovat přírodní proudění podzemní vody (p.v.), dochází-li k diferencí v měrných odporech výplachu a podzemní vody. Na obrázku je příklad hydrokarotáže 3 vrtů z krystalinika. Na vrtu HV-28 slabý přetok o vydatnosti  $Q = 0,05$  l/s umožnil výpočet vydatnosti jednotlivých přítoků podle zvyšování měrného elektrického odporu vody v místech přítoků (voda ve vrtu je znečištěna, a proto má nižší odpory než p.v.). Na vrtu HV-615 je velmi malé horizontální proudění v úseku od hladiny p.v. do 11 m ( $v = 1,4 \cdot 10^{-6}$  m/s), současně i pomalé vertikální proudění od 11 m směrem k čelbě o vydatnosti 0,001 l/s. Na vrtu RK-20 je velmi malé horizontální proudění v intervalu 19 – 25 m,  $v_a = 1,2 \cdot 10^{-6}$  m/s.



Obr. 5.16: Proudění podzemní vody ve vrtech v krystaliniku

## 5.17. PROUDĚNÍ PODZEMNÍ VODY VE VRTU V KŘÍDOVÝCH SEDIMENTECH

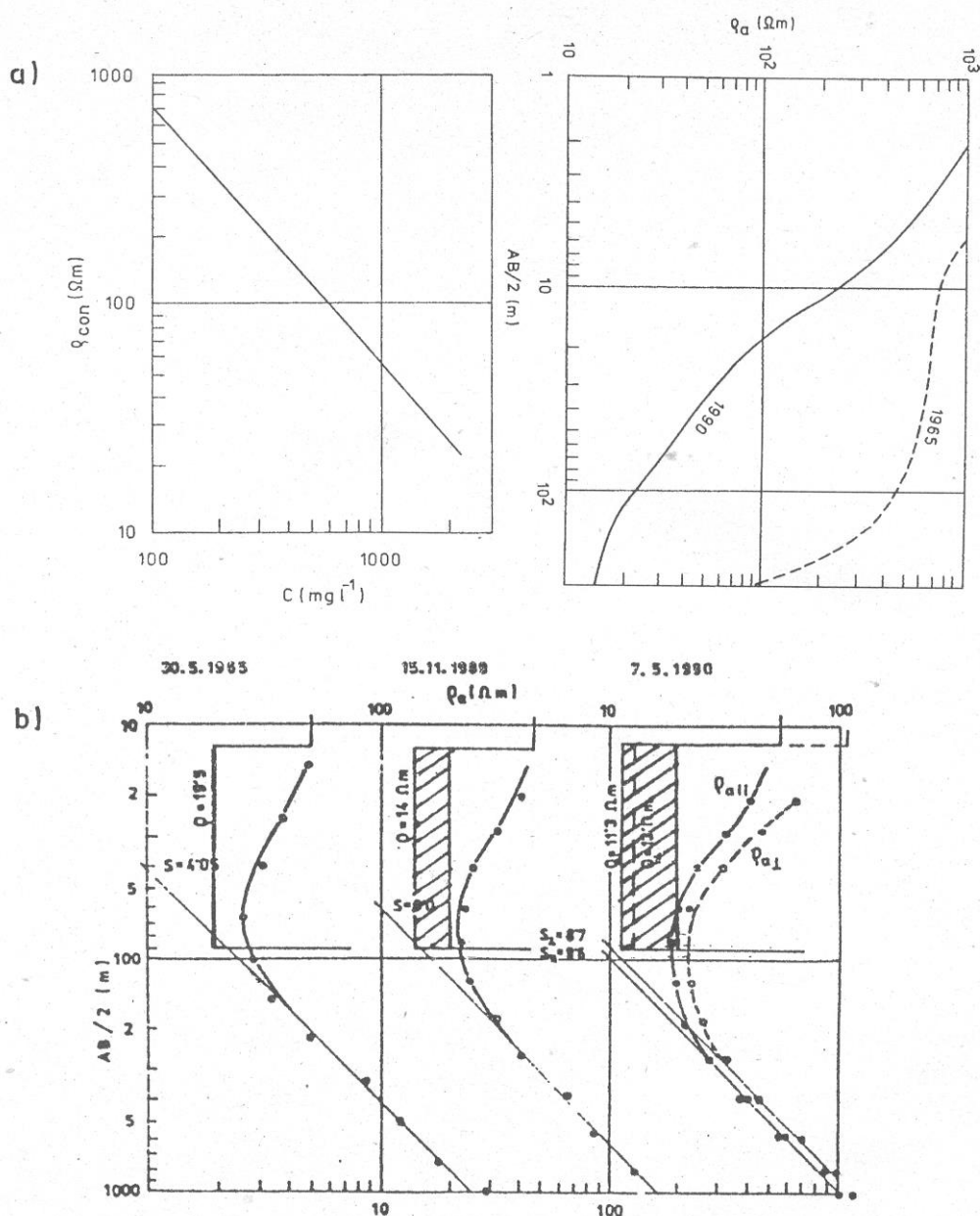
Ukázka přírodního proudění podzemní vody v sedimentech je typickým příkladem horizontálního proudění. V úseku od hladiny p.v. do 24 m je proudění výraznější a činí  $6,9 \cdot 10^{-6}$  m/s, v úseku 24 – 28 m klesá na  $3,5 \cdot 10^{-6}$  m/s. Průměrná hodnota koeficientu filtrace pro celý dostupný interval je  $K = 10^{-4}$  m/s.



Obr. 5.17: Proudění podzemní vody v křídových sedimentech

## 5.18. MONITOROVÁNÍ ZMĚN KONTAMINACE PODZEMNÍCH VOD POZEMNÍMI ODPOROVÝMI METODAMI

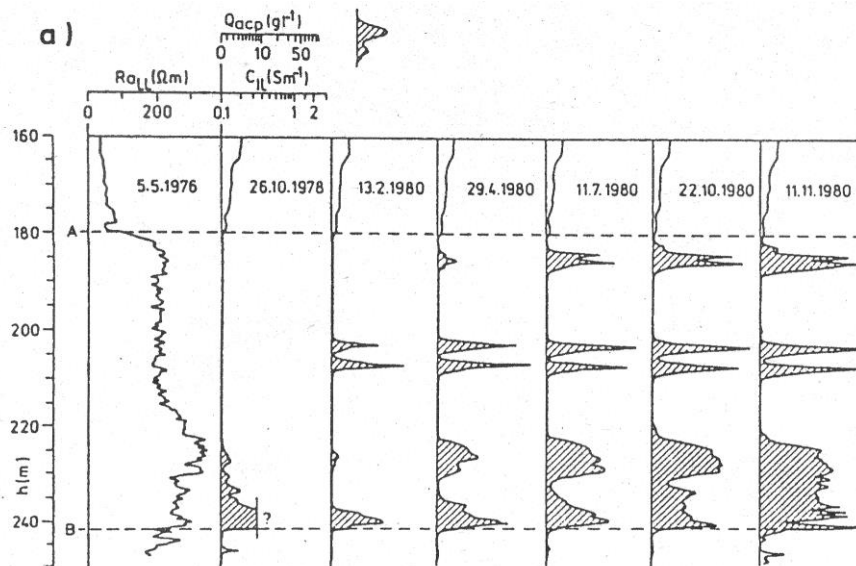
Kontaminace křídových pískovců v důsledku chemické těžby uranu v severočeské křídě se projevuje snížením jejich měrného odporu. Na obrázku (a) je uvedena teoretická závislost měrného odporu coniackých pískovců 100% nasycených kontaminovanou podzemní vodou na celkové koncentraci polutantu vyjádřeného v ekvivalentním obsahu NaCl a křivka VES změřená před zahájením těžby a po ní. Dole (b) jsou 3 sondážní křivky VES změřené před zahájením těžby (1965) a v letech 1989 a 1990, ukazující na kontaminaci turonského kolektoru. Snížení měrného odporu kolektoru a více než 40% znamená téměř dvojnásobné zvýšení obsahu polutantu.



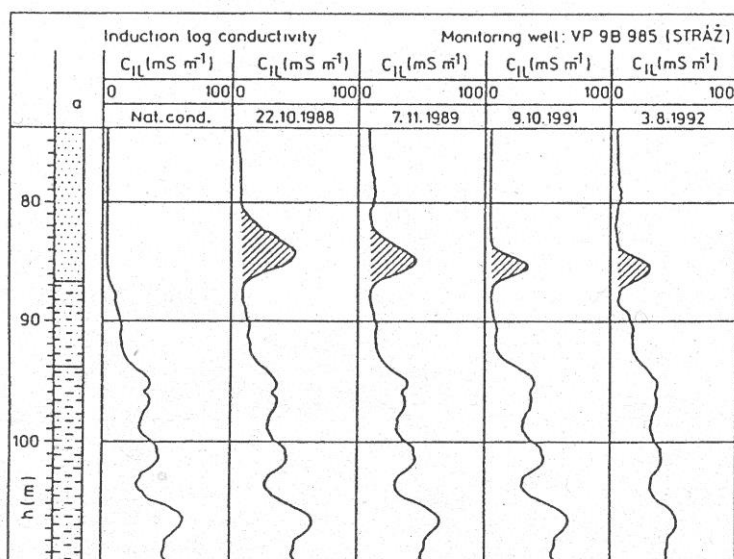
Obr. 5.18: Monitorování změn kontaminace podzemních vod odporovými metodami

## 5.19. MONITOROVÁNÍ SANAČNÍCH DŮSLEDKŮ V MONITOROVACÍCH VRTECH INDUKČNÍ KAROTÁŽÍ

Ve vrtech se změny odporu prostředí měří buď odporovou nebo indukční karotáží (IK). V metodě IK se měření představují ve formě karotážních křivek vodivosti, která je úměrná celkové koncentraci polutantu v podzemní vodě. V horní části obrázku (a) je uvedena změna vodivosti cenomanského kolektoru v důsledku jeho postupného znečišťování chemickými roztoky používanými při chemické těžbě uranu v severních Čechách. Naopak sanační práce vedou k pozvolnému čištění podzemních vod, jak ukazuje snižování vodivosti ve spodní části pískovců turonského kolektoru (b).



b)

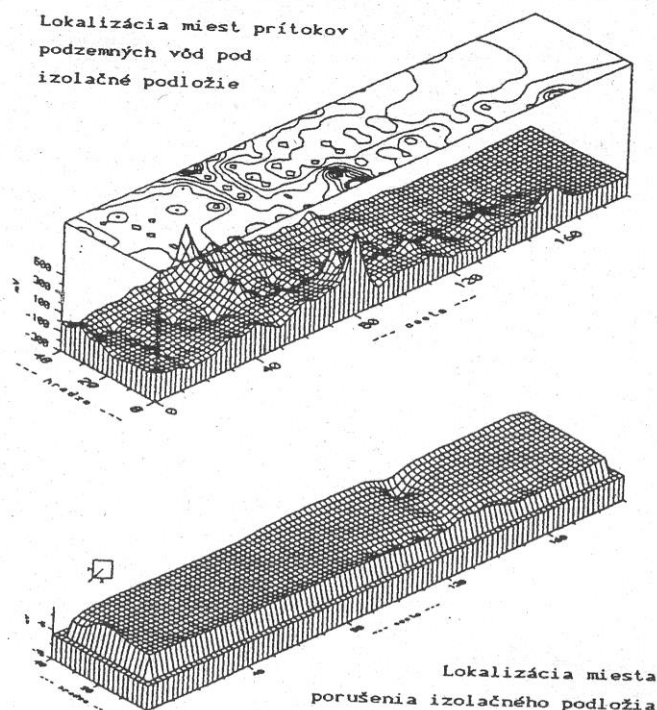


Obr. 5.19: Monitorování sanačních důsledků v testovacích vrtech indukční karotáží

## 5.20. STABILNÍ MONITOROVACÍ SYSTÉM

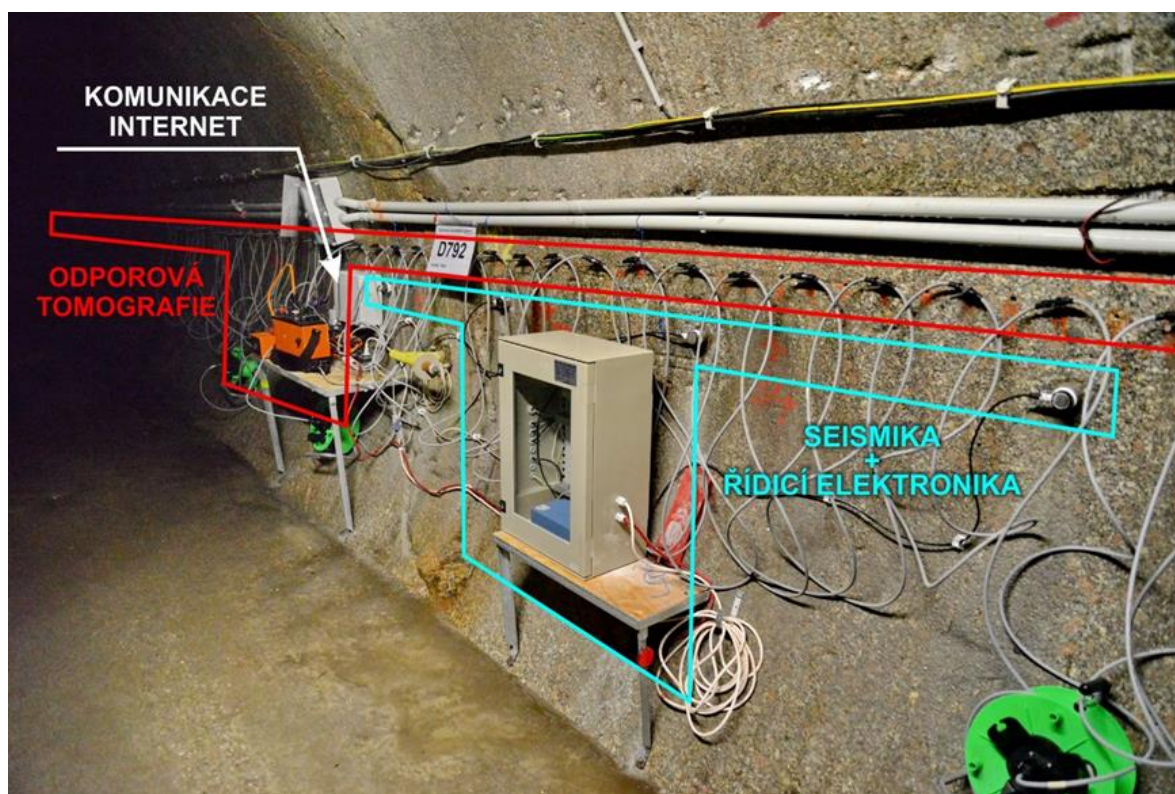
Z pozemních geofyzikálních metod se pro monitorování změn v okolí rizikových zátěží nejčastěji využívají metody odporové: jednak pro svou relativní jednoduchost, jednak z důvodů přímé závislosti sledovaného měrného odporu prostředí na koncentraci kontaminace. Opakovaná měření se provádí buď klasickým způsobem (např. opakovaná VES), nebo se měří s pomocí stabilně uzemněných systémů elektrod. Ty mohou ležet mimo sanovanou skládku ve směrech pravděpodobného pohybu kontaminované podzemní vody nebo se pokládají pod těsnicí vrstvy skládky nově budované.

**Komplexní měření** (při němž je registrováno široké spektrum elektrických veličin pasivních i aktivních s použitím stejnosměrného i střídavého proudu: variace měrného odporu prostředí a odporu uzemnění jednotlivých elektrod, polarizovatelnost prostředí, příp. i varianta metody nabitého tělesa při umístění zdrojové elektrody do tělesa skládky) **prakticky okamžitě signalizují únik kontaminantu a lokalizují místa perforace izolační vrstvy (folie)**. Tyto systémy se používají zvláště u kazet a nádrží s rizikovými chemickými odpady. Počítačové zpracování velkého souboru hodnot může určit stupeň pravděpodobnosti např. místa perforace ochranné folie (viz příklad na obrázku 5.20a).



Obr. 5.20a: Stabilní monitorovací systém

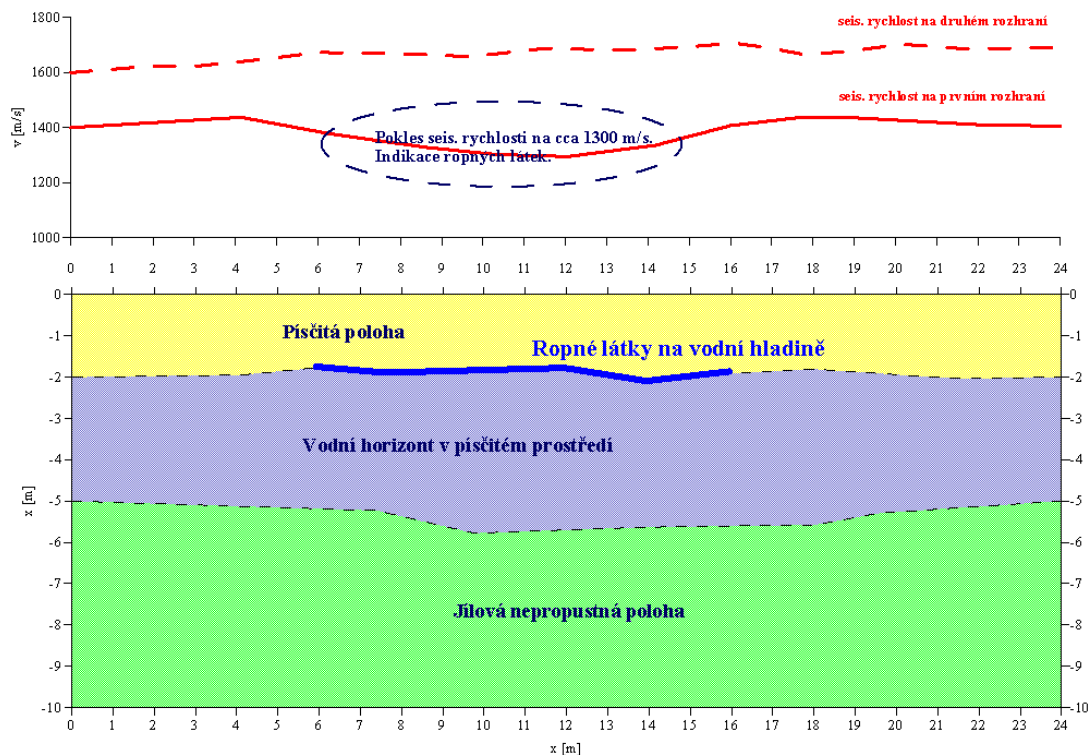
V současnosti je možno sestavovat monitorovací systémy, které jsou schopny nejenom provádět automatické spuštění měřících systémů, ale i ukládat naměřená data do paměti počítače, popřípadě data dále odesílat přes optické kabely a internet na vzdálená pracoviště. Na obr. 5.20b je uveden snímek monitorovacího systému SGI 1, který pravidelně měří odporové vlastnosti hornin (ERT) a zároveň sleduje změny v šíření vysokofrekvenčních seismických vln (kolem 1000 a více Hz). Snímek zobrazuje systém v poloprovozním režimu ve štolě Bedřichov v Jizerských horách, kde se testují některé metody a technologie, které budou v budoucnu kontrolovat bezpečnost hlubinného úložiště radioaktivních odpadů. Pro systém byla vydána Certifikovaná metodika pro obsluhu, měření, ukládání dat, odesílání dat a jejich vyhodnocení.



Obr. 5.20b Odporová a seismická monitorovací měření. Systém SGI 1.

## 5.21. DETEKCE ROPNÉHO ZNEČIŠTĚNÍ POMOCÍ SEISMICKÉHO MĚŘENÍ

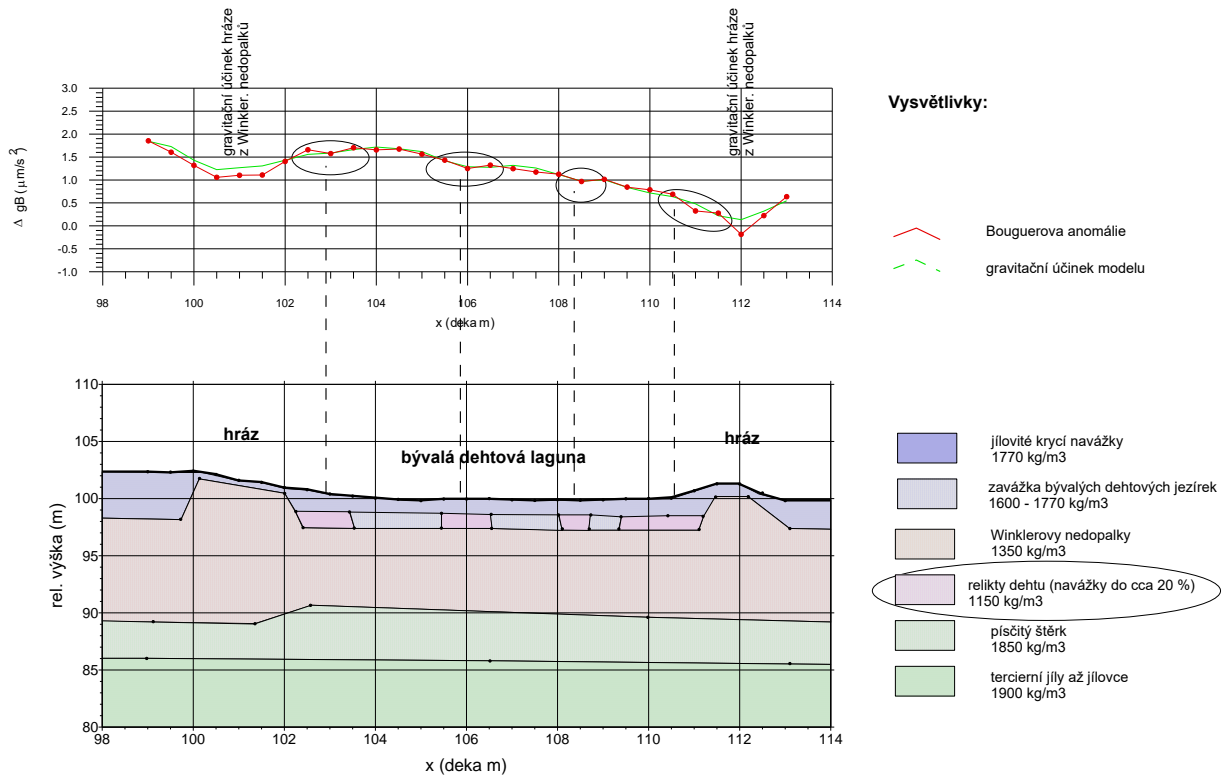
Čistě písčité prostředí, jehož póry jsou naplněny vodou, se vesměs vyznačuje seismickou rychlostí kolem 1 450 m/s. Pokud se na vodní hladině nachází vrstva ropných látek, dochází k mírnému poklesu rychlosti seismické vlny, která se na ropě odráží (refraguje). Rychlost klesne na cca 1 300 m/s. Výsledky měření byly ověřeny vrtnými pracemi.



Obr. 5.21: Detekce ropného znečištění pomocí seismického měření

## 5.22. DETEKCE DEHTŮ POMOCÍ GRAVIMETRIE

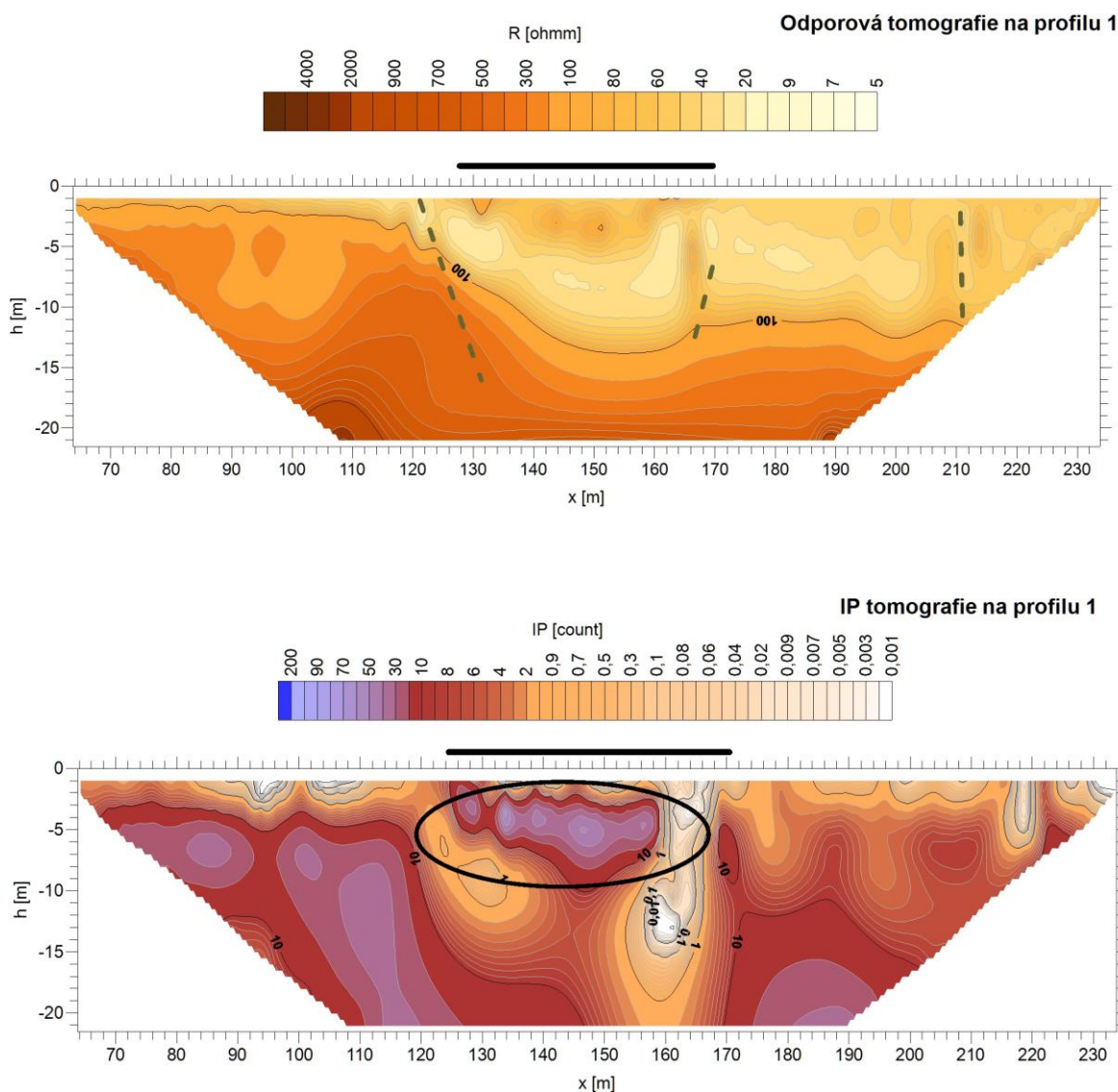
Gravimetrie byla využita pro hledání reliktnů dehtových lagun. Dehet má nízkou měrnou hmotnost a projevuje se lokálními minimy. Při modelování byly využity všechny dostupné informace o geologii podloží a historické prameny o průběhu hrází dehtových jezírek. Relikty dehtu bylo možno modelovat až po výpočtu účinků známých rozhraní (geologické prostředí hráze).



Obr. 6.22: Detekce dehtového znečištění pomocí mikrogravimetrie

### 5.23. DETEKCE PŘÍTOMNOSTI ROPNÝCH ZBYTKŮ VE SKLÁDKOVÉM MATERIÁLU

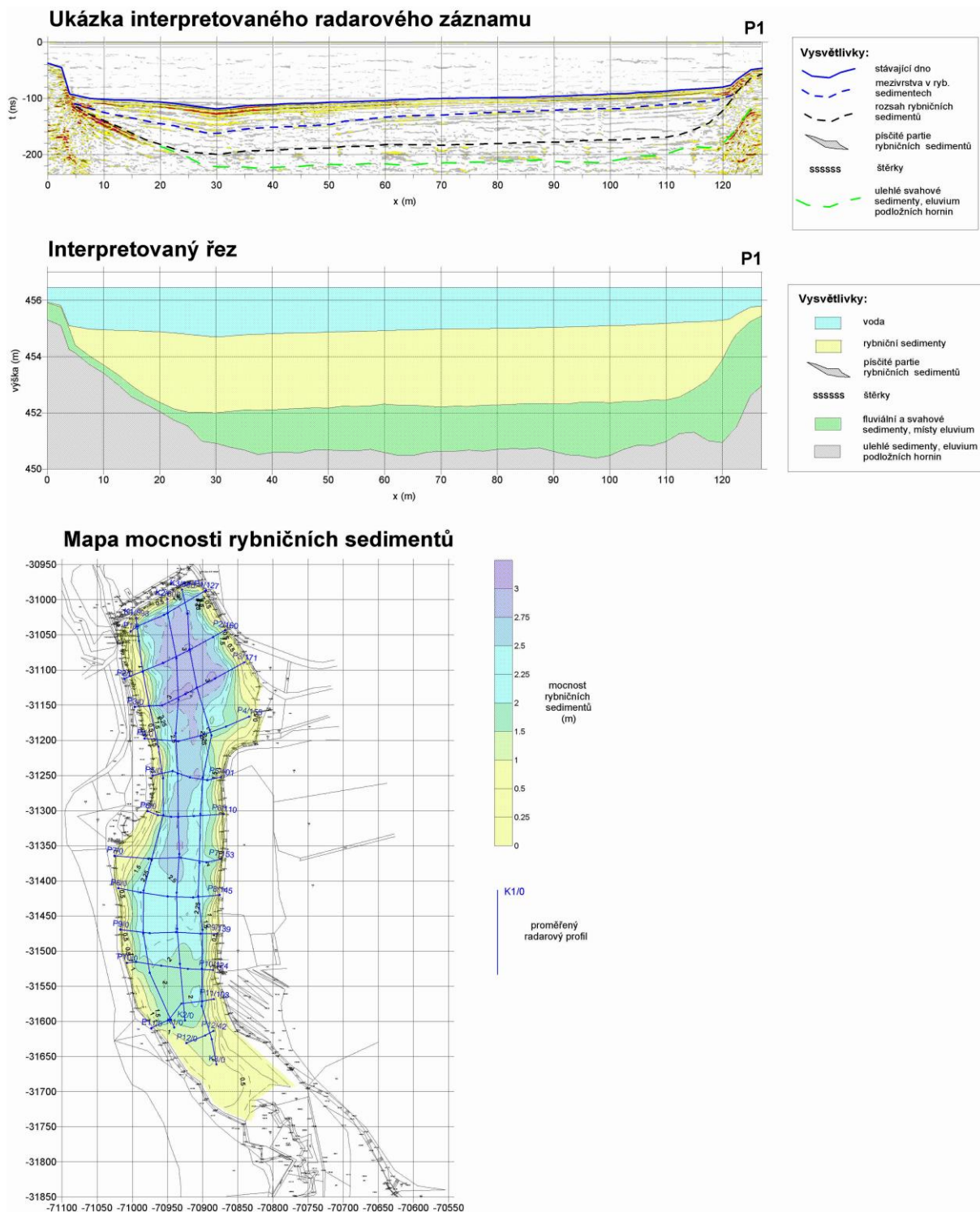
Příklad detekce ropných produktů pomocí metody vyzvané polarizace (anglická zpratika IP). V rokli (okres Tábor) zavezené odpadem bylo nutno posoudit možnou přítomnost pozůstatků ropných produktů. Metoda odporové tomografie (ERT) detekovala okraj rokle, která byla zavezena skládkou. Přítomnost nežádoucích ropných produktů se projevila zvýšenou polarizovatelností zkoumaného prostředí. Obdobné hodnoty polarizovatelnosti má i skalní podloží, které však lze snadno oddělit pomocí odporového řezu získaného odporovou tomografií. Zkušenosti s aplikací metody IP tomografie (tj. vyzvané polarizace) ukazují, že optimální pro spolehlivou interpretaci je souběžné provedení a vyhodnocení jak metody odporové, tak i IP tomografie.



**Obr. 5.23: Detekce ropných produktů v zavážce rokle skládkovým materiálem. Rozsah místa zavážky je dán černou silnou linií. Ropné produkty jsou vymezeny elipsou.**

## 5.24. DETEKCE PŘÍTOMNOSTI BAHENNÍCH USAZENIN NA DNĚ RYBNÍKA POMOCÍ RADARU

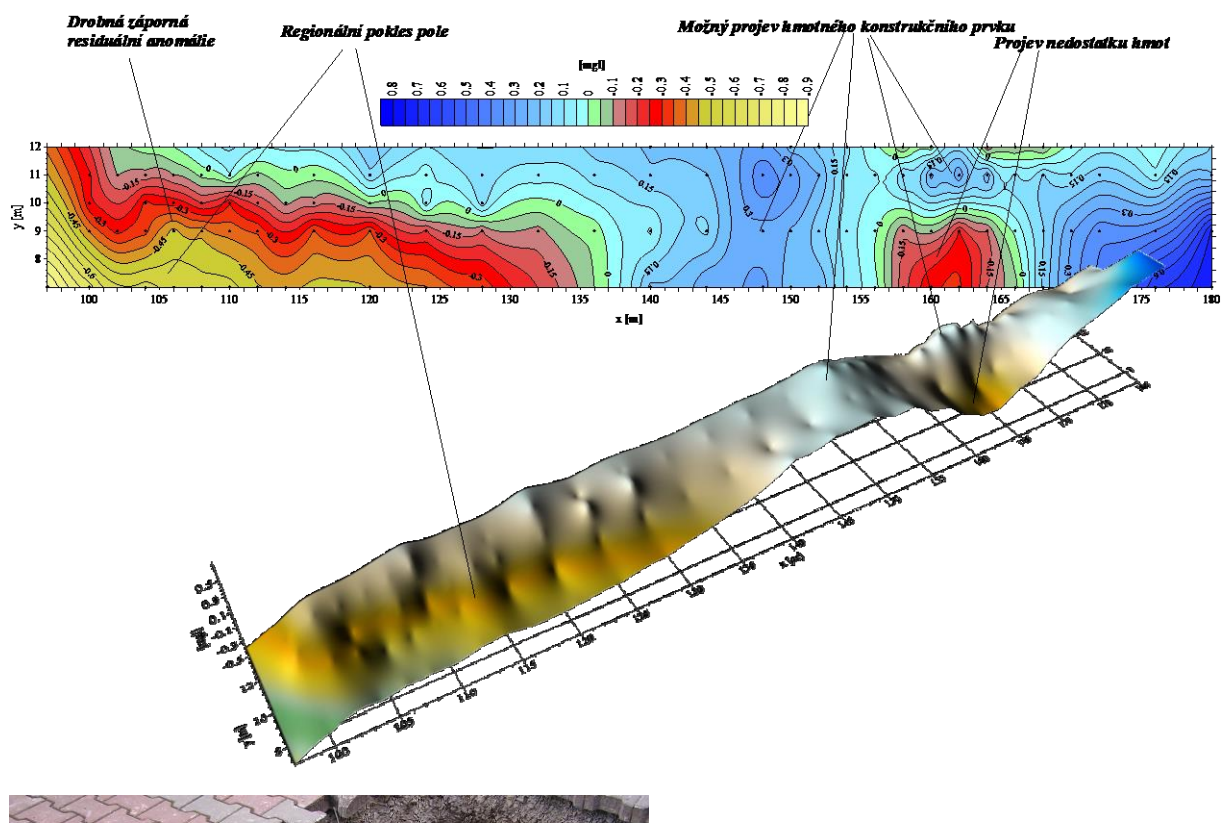
Častým úkolem, který je řešen pomocí geologického radaru, bývá zadání určit množství bahenních usazenin určených k odtěžení na dně jezera či rybníka. Pro průzkum radarem je nutno použít buď speciální nosič anténního systému (lodžky, resp. plavidlo pro pohyb pod vodou) nebo pracovat v zimě, v době zamrznutí vodní hladiny. Příklad měření a zpracování je uveden na obr. 5.24.



Obr. 5.24: Detekce přítomnosti bahenních usazenin na dně rybníka

## 5.25. VYHLEDÁNÍ DUTINY POMOCÍ GRAVIMETRIE

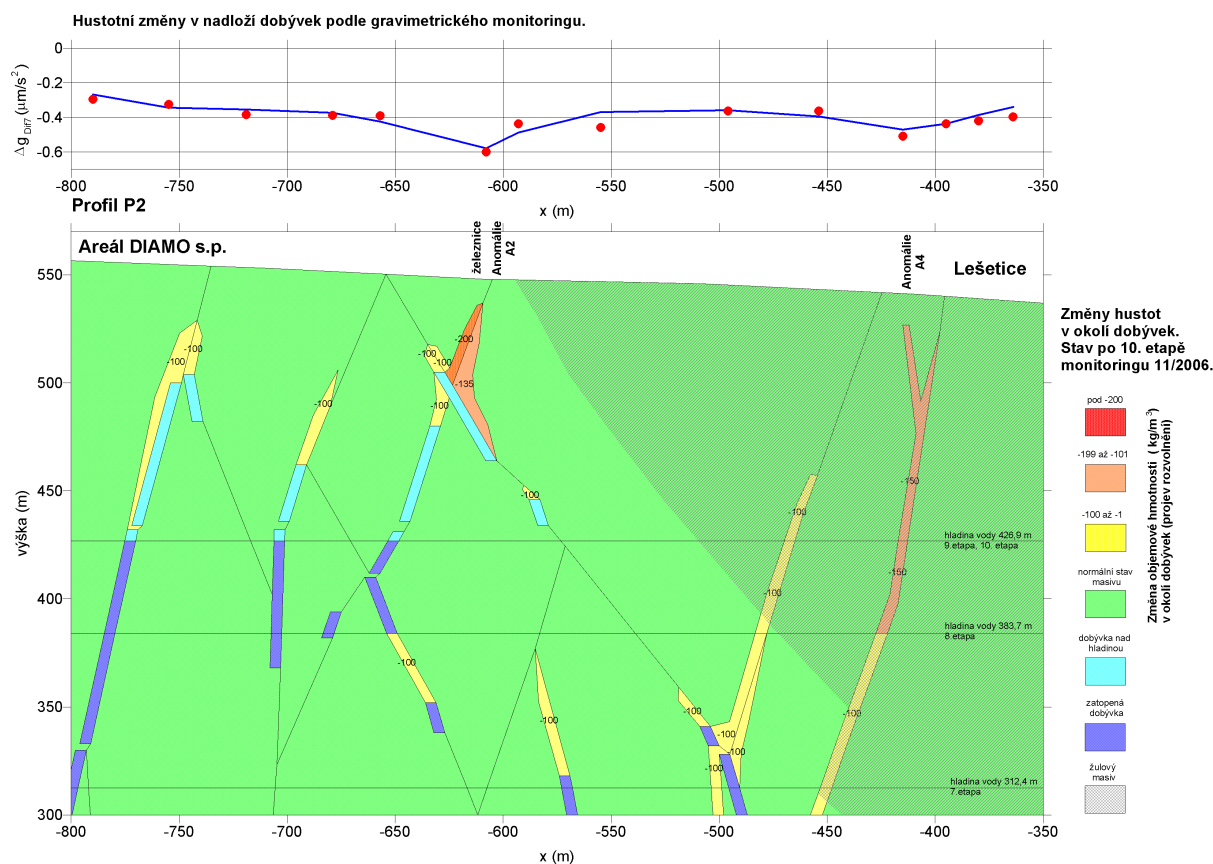
Při vyhledávání dutin, které mohou být i zaplněné odpadem nebo mohou hrozit propadem a jsou v současnosti zakryté zpevněnou vozovkou ať asfaltovou nebo betonovou, se nejlépe hodí podrobná gravimetrie. Zkušený geofyzik ze souvislostí dokáže oddělit regionální anomálii od lokálního projevu dutiny.



Obr. 5.25: Vyhledání staré jímky pod parkovištěm. 2D a 3D zobrazení tíhového měření a fotografie odhaleného vstupu do jímky.

## 5.26. MONITORING STAVU PODDOLOVANÉHO ÚZEMÍ GRAVIMETRICKOU METODOU

Na obr. 5.26 je uveden příklad monitorování postupné degradace stařin. Obrázek zachycuje výsledky tíhového měření v desáté etapě měření z listopadu 2004. Monitoring může, mimo jiné, včas avizovat zásadní změny, které by mohly ohrozit okolní prostředí a bezpečnost lidí.



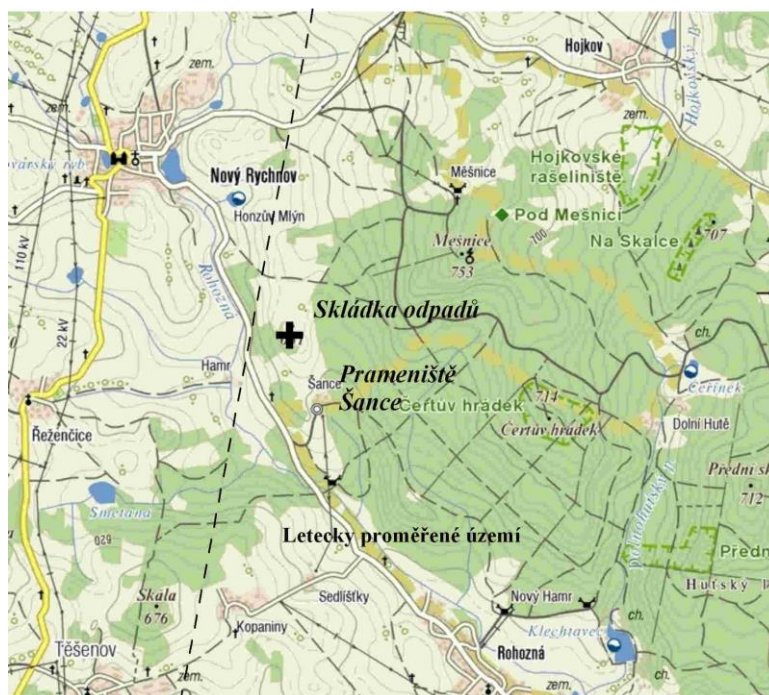
5.26. Monitoring stavu poddolaného území gravimetrickou metodou

## 5.27 APLIKACE KOMPLEXU GEOFYZIKÁLNÍCH METOD PRO PŘÍPRAVU A MONITORING SANAČNÍCH PRACÍ

Pro přípravu a následný monitoring sanačních prací je nutno zajistit solidní geologický průzkum, který umožní zvolit optimální sanační metodu, vyprojektovat optimální rozsah sanačních prací a navrhnout spolehlivý následný monitoring stavu zájmové lokality. Podcenění řádného geologického průzkumu vede často ke komplikacím či nesplnění požadovaných limitů určených pro čistotu horninového prostředí. Součástí komplexu

geologicko průzkumných metod mohou být i geofyzikální metody. Geofyzika je schopna pokrýt zájmovou plochu souvislejší sítí informací, než jak to můžeme očekávat od relativně řídké sítě průzkumných vrtů.

V roce 2007 vznikla příležitost zajistit podrobný geofyzikální průzkum pro sanaci skládky nebezpečných odpadů na lokalitě Nový Rychnov. Pro skladování odpadů byl využit opuštěný granitový lom v místě zvaném „Na Horách“, který se nachází v nezastavěném terénu mezi Novým Rychnovem (na severu) a Rohoznou (na jihu) v kraji Vysočina, viz obr. 5.27a. Skládku (lom) má rozměr cca 20 x 20 metrů a hloubku max. 5,5 metrů. Skládku byla v rámci rekultivace překryta fólií a zasypana asi dvoumetrovou vrstvou zeminy. Cílem geofyzikálního měření bylo zejména vysledování puklinového systému v okolí skládky, aby bylo možno upřesnit preferenční cesty podzemní vody horninou. Poznamenáváme, že skládka se nachází asi 600 metrů severně od prameniště Šance, které zásobuje vodou obec Dolní Cerekev



**Obr. 5.27a:** Situační mapa s vyznačeným zájmovým územím (skládkou). Východně od čárkované linie probíhal letecký průzkum.

Podrobnému průzkumu předcházela základní geofyzikální průzkum realizovaný v roce 2003. Základní průzkum byl soustředěn pouze do bezprostředního místa skládky a sestával z metod:

- *mělké refrakční seismiky,*
- *metody velmi dlouhých vln,*
- *dipólového elektromagnetického profilování.*

Měření potvrdilo ovlivnění zájmového místa tektonickou stavbou. Určité porušení hornin bylo zjištěno i v samém centru skládky, což bylo přesvědčivě indikováno zejména seismikou.

Nová, podrobná etapa prací byla zahájena rešeršní fází, ve které byly zejména využity podklady z leteckých geofyzikálních měření. Letecká geofyzika byla provedena v roce 2003 s cílem získat podklady pro optimální výběr míst vhodných pro pozemní průzkum lokalit perspektivních z hlediska vybudování hlubinného úložiště radioaktivních odpadů. Letecká

měření sestávala ze spektrální radiometrie (gama spektrometrie), magnetometrie a elektromagnetického měření. Letecká elektromagnetická měření byla realizována v České republice poprvé. Radiometrické měření zjistilo, že skládka byla vytvořena v lomu, kde se těžil granit s charakteristickou radioaktivitou. Kamenolom je situován v tělese o šířce asi 1000 metrů a délce nejméně 2000 metrů. Těleso má vůči okolí vyšší radioaktivitu. Magnetometrická měření nepřinesla pro potřeby sanačních prací nic zásadního. Výsledky tohoto měření poskytují hlavně poznatky o hlubší stavbě regionu. Letecké elektromagnetické měření poskytlo informaci o rozložení odporových poměrů v hloubce okolo 80 metrů. Metodika zpracování byla později ještě upravena a z nalétané plochy bylo možno soudit i na rozložení hlavních vodivých struktur, tj. tektoniky. Na obr. 5.27a je uvedena nalétaná plocha metodou letecké elektromagnetometrie, zpracovaná jako mapa izolinií složky I elektromagnetického pole (obdoba reálné složky pro metodu VDV), které bylo vysíláno ve frekvenci 6606 Hz. V jihozápadním rohu nalétané plochy se nachází místo sanované skládky. Z obr. 5.27b je zřejmé, že zájmové místo (okolí skládky) je porušeno vodivými strukturami. Z poznatků leteckého měření lze soudit, že kontaminant z odpadů uložených ve skládce má možnost komunikovat s okolím a v budoucnu ohrožovat okolí. Sanační zásah byl tedy nutný. Pro jeho projekční přípravu bylo potřebné dále upřesnit znalosti o geologické stavbě širšího okolí lomu. Podle leteckých podkladů lze očekávat, že potenciálně by mohlo být ohroženo prameniště Šance (zdroje pitné vody pro městys Dolní Cerekev). Za zásadní je však nutno považovat nebezpečí, že se kontaminant může šířit do širšího údolí tak zvaného Rohozenského potoka, který teče od Nového Rychnova k Rohozné. Situace jmenovaných obcí vůči tektonickým liniím je patrná z obr. 5.27a a 5.27b. Potok se nachází necelých 500 m jihozápadně od sanované skládky.

Letecké měření detekovalo pouze hlavní tektonicky podmíněné struktury. Podrobné posouzení tektonické stavby a posouzení jejího významu pro konkrétní hydrogeologickou situaci v okolí skládky vyžadovalo následný pozemní geofyzikální průzkum.

Pozemní geofyzikální práce probíhaly s využitím následujícího komplexu geofyzikálních metod:

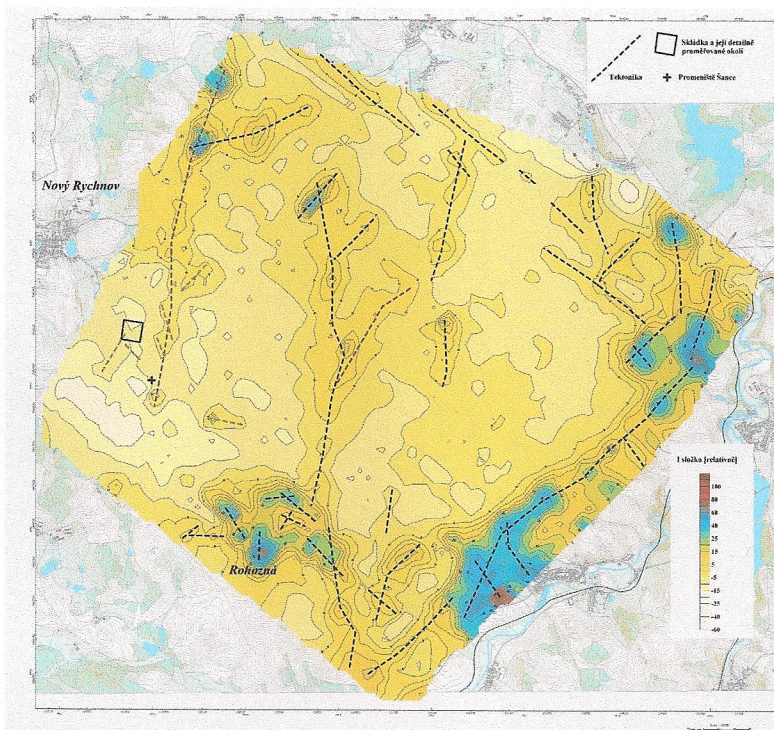
- kombinovaného odporového profilování (KOP) s rozstupem elektrod 40-10-40 [m],
- odporové tomografie (multielektrodová metoda),
- elektromagnetické metody realizované měřicím systémem GEM-2,
- vertikálního elektrického sondování (VES).

Podrobný průzkum skládky a jeho blízkého okolí byl realizován pomocí multielektrodové metody (odporové resistivimetrie).

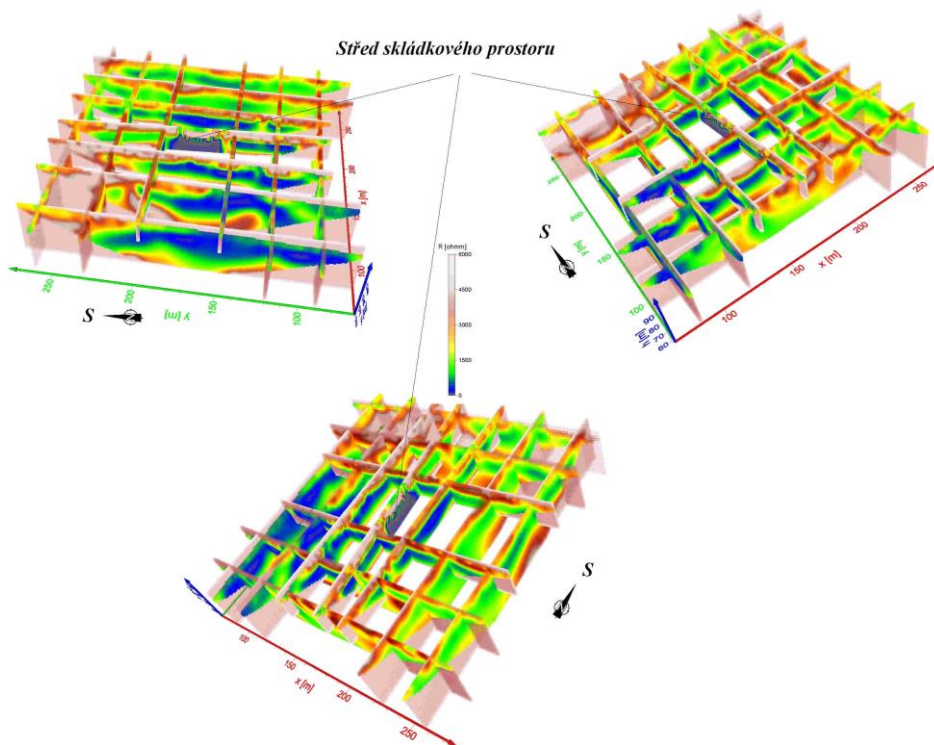
V obr. 5.27c je uveden výsledek měření v podobě odporových řezů. Odporové řezy jsou sestaveny do tvaru 3D zobrazení. Pro větší přehlednost je systém řezů zobrazen z několika směrů pohledu. Nejtmavější barvy odpovídají v řezech oblastem se sníženými odpory. Snížené odpory indikují oblasti se zvýšenou mineralizací půdní vlhkosti a dokazují, že chemické znečištění skládky proniká do okolí skládky. Zásadní směr pohybu znečištění lze dle obr. 5.26d očekávat směrem k údolí Rohozenského potoka.

Na obr. 5.27d je zobrazen výsledek detailního průzkumu metodou kombinovaného odporového profilování (KOP) situovaného v okolí skládky. Rozstup elektrod při měření byl

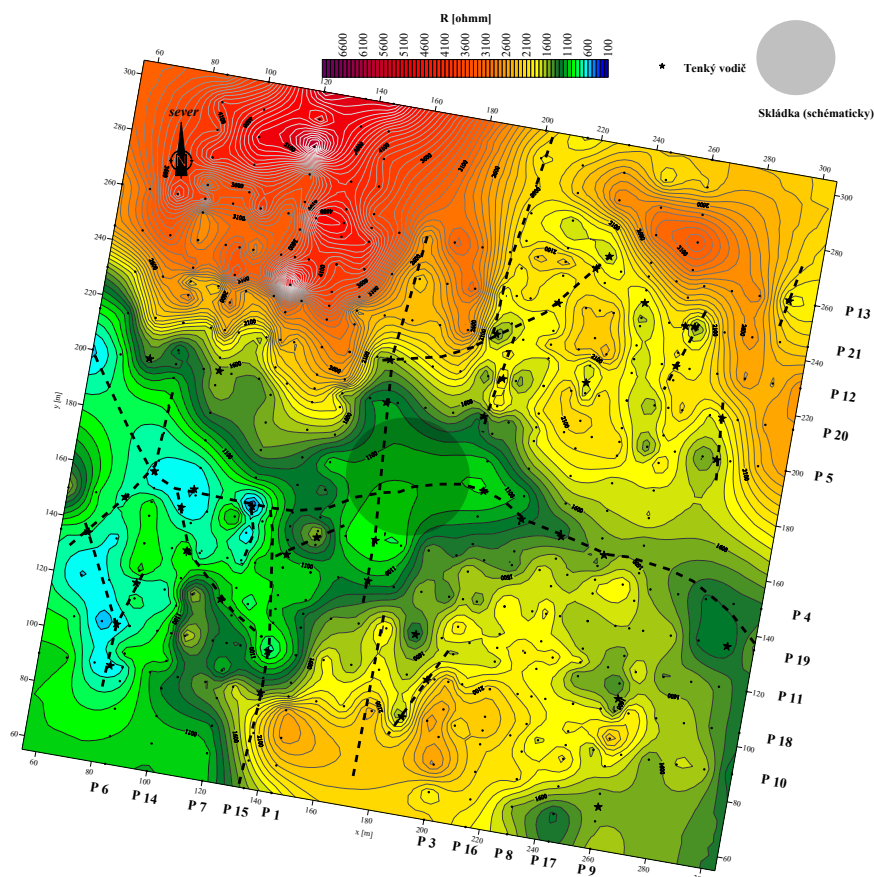
A40N10M40B  $C^{\infty}$  (v metrech). Metoda KOP je klasickou odporovou metodou zvláště upravenou pro detekci tenkých vodičů (tektoniky). V obr. 5.27d je uvedena jednak mapa izolinií zdánlivých měrných odporů, jednak je zobrazena interpretace vodivých linií (tektoniky). Tektonika je vyznačena v obr. 5.27d čárkovaně. Výsledek měření účelně doplňuje poznatky z měření multielektrodovým systémem. Opět se projevuje tektonická stavba umožňující významný postup kontaminace na západ od skládky (směrem k Rohozenskému potoku).



Obr. 5.27b: Snímek elektromagnetického měření 6606 Hz, složka I. Letecká měření, lokalita Rohozná. Malý čtvereček na západě označuje skládku a její bezprostřední okolí. Křížek odpovídá prameništi Šance.

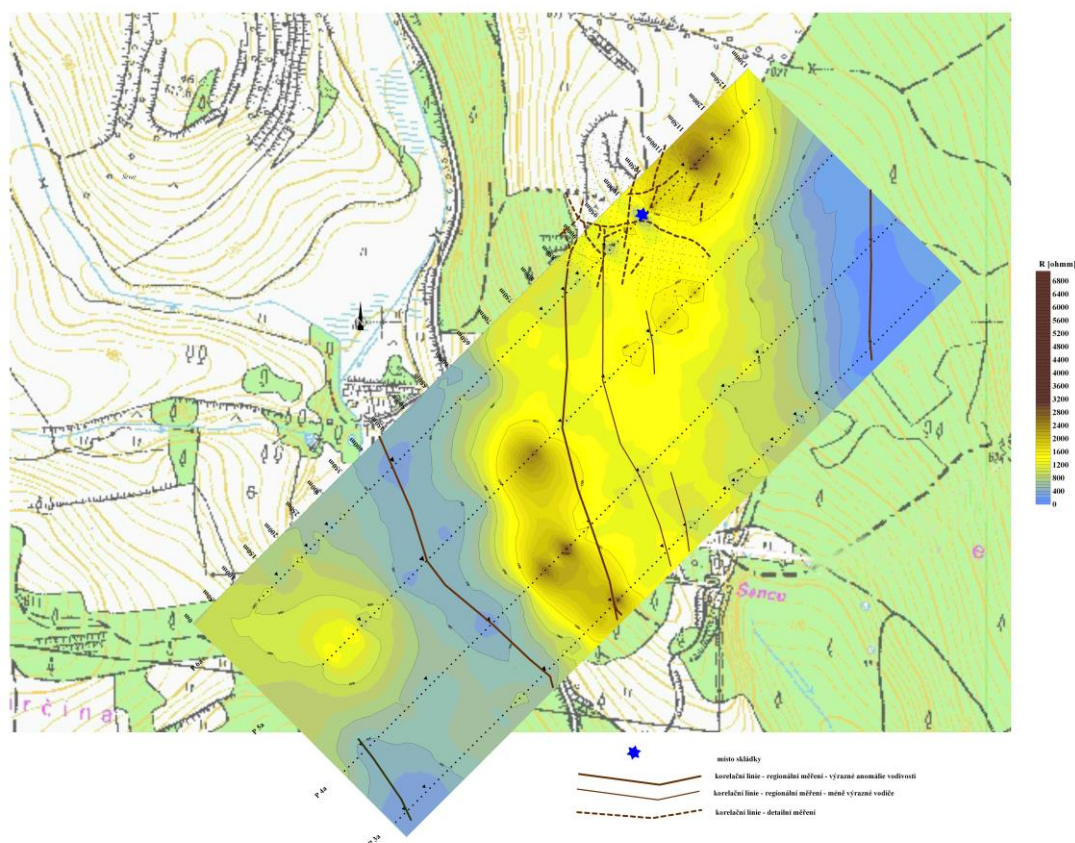


Obr. 5.27c: 3D zobrazení odporových řezů získaných metodou multielektrodevého měření. Detailní průřez skládky a jeho nejbližšího okolí.



Obr. 5.27d: Detailní průřez skládky a jejího nejbližšího okolí metodou KOP. Skládka je naznačena v podobě kruhu uprostřed obrázku.

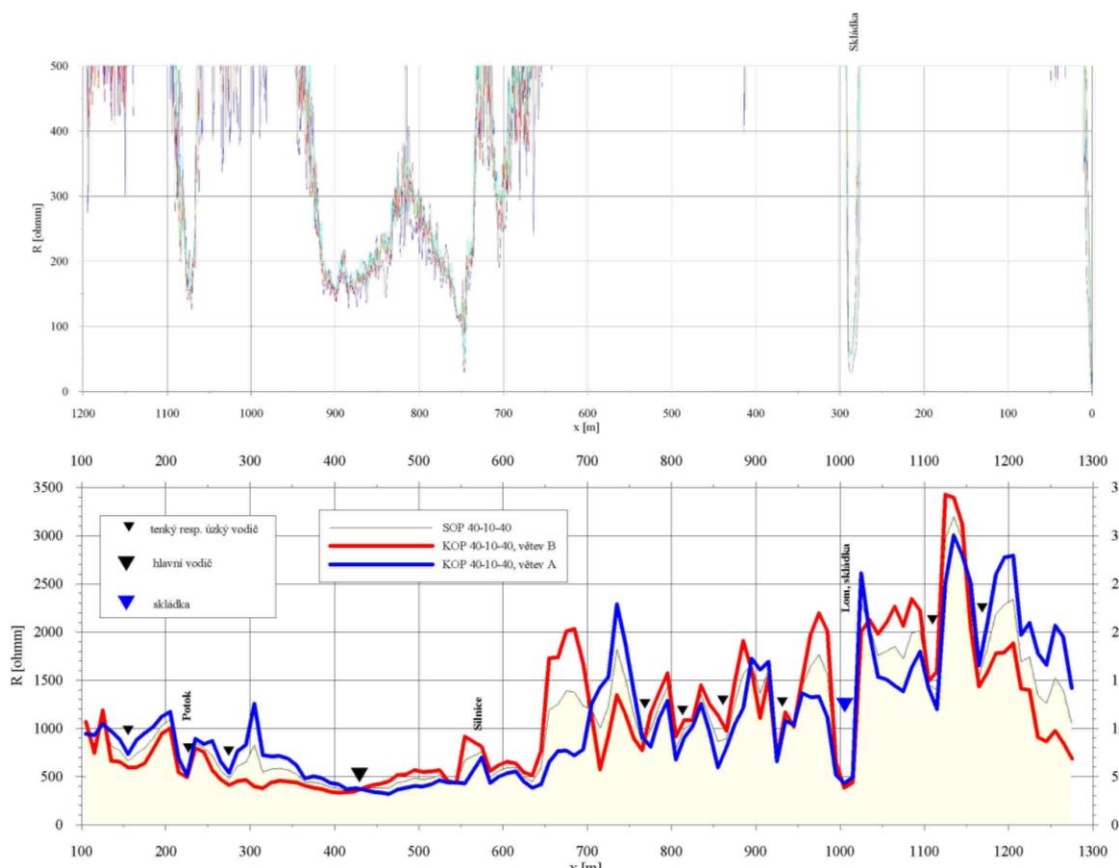
Na obr. 5.27e je uvedeno korelační schéma shrnující jak výsledky detailního měření metodou KOP provedeného v těsném okolí skládky, tak i z měření metodou KOP realizovaného na regionálních profilech, které zasahují i do údolí Rohozenského potoka a směrem k prameništi Šance. V obrázku 5.27d lze sledovat interpretovanou tektoniku a mapu izolinií zdánlivých měrných odporů sestavenou přepočtem z KOP. Slabě tečkované přímky vyjadřují na obrázku místa profilových linií. Silné nerovné linie upozorňují na tektoniku zjištěnou z regionálního měření. Čárkované linie odpovídají tektonice interpretované z měření detailních, situovaných v těsném okolí skládky. Z ilustrace plyne, že byla prokázána přítomnost tektonických linií, které umožňují, nikoliv potvrzují, komunikaci skládky s prameništěm Šance. Komunikaci s prameništěm Šance je značně ztížena morfologií terénu (prameniště Šance se nachází na odvrácené straně rozvodnice). Z tohoto důvodu geofyzika doporučila situovat mezi skládku a Šance monitorovací vrty, ale směr na Rohozenský potok považujeme za primární. Poznamenáváme, že údolí Rohozenského potoka se projevuje jako široká zóna snížených odporů (viz oblast západně od hlavní silnice). Plnou linii, která zde prochází středem pásma snížených odporů (linie jdoucí generelně od SZ k JV), nelze chápat jako zakres úzkého vodiče, ale jako osu širší vodivé zóny. Údolí Rohozenského potoka tedy není pravděpodobně založeno na ostře vymezené zlomové linii, ale jde spíše o širší poruchové pásmo s větší mocností zvětralin a kvartérních sedimentů, které vyplňují údolí vodoteče.



**Obr. 5.27e: Korelační tektonické schéma a mapa izolinií zdánlivých měrných odporů. Souhrn dat získaných z detailních i regionálních měření metodou KOP s rozstupem elektrod 40-10-40 (m).**

Na obr. 5.27f je uvedeno porovnání výsledku multifrekvenční elektromagnetické metody s výsledky stejnosměrné metody KOP, a to na regionálním profilu P6a. Přístroj GEM-2

pracuje s více frekvencemi, a tak je možno soudit i na hloubkový dosah naměřených hodnot. Nevýhodou u přístroje GEM-2 je, že takto připravený přístroj má úzký rozsah měřených hodnot (tj. v oblastech s odpory nad 500 ohmm poskytuje pouze informaci, že data jsou mimo rozsah). Přístroj tedy rychle poskytne informace o vodivých zónách nebo jej lze použít pro studium oblastí tvořených zeminami (spraše, jíly, hlíny, písky). Velkou výhodou přístroje je jeho mimořádně vysoká produktivita práce. Měření vyžaduje pouze jednoho zkušeného operátora. Poloha naměřených bodů je automaticky sledována zařízením GPS.



Obr. 5.27f: Porovnání elektromagnetického měření přístrojem GEM-2 s měřením metodou KOP na profilu P6a. Profil je veden od JZ k SV a na staničení 1010 kříží skládku odpadů.

## 5.28 PŘÍKLADY TĚSNÉ APLIKACE KOMPLEXU GEOFYZIKÁLNÍCH METOD S GEOCHEMICKÝM PRŮZKUMEM

Nejenom z odborného pohledu, ale i z organizačního hlediska terénních činností, je účelné někdy využívat v komplexu průzkumných metod souběžně geofyzikální a geochemické práce. Ideální je situace, kdy odběr geochemických vzorků probíhá s geofyzikou souběžně, na stejných profilových liniích. Tím je zajištěna možnost komplexního vyhodnocení naměřených dat a některé činnosti spojené s odběrem geochemických vzorků či odběru půdního vzduchu může zajišťovat skupina pomocníků, která pracuje i pro geofyzikální průzkum.

Na obr. 5.28a je ukázka z geofyzikálního a geochemického měření na opuštěném skládkovém terénu v městě Lagos (Nigeria). Terén byl proměřen metodou odporové a IP tomografie (tj. metodou ERT a metodou vyzvané polarizace). ERT bylo zpracováno jednak pomocí software

Res2DInv (Loke), částečně byla data využita i pro tvorbu reprezentativní vertikální elektrické sondy. Souběžně byly odebrány vzorky hornin pro spektrometrickou analýzu. Podrobněji je výzkum popsán v lit. Elijah (2018). Na obrázku 5.28a je uvedeno 3D souborné zobrazení, ze kterého lze sledovat rozsah zkoumané skládky a hlavní odporové řezy (ERT). Ve spodní části obrázku je část výpisu z výsledků spektrometrického rozboru odebraných vzorků zemin.

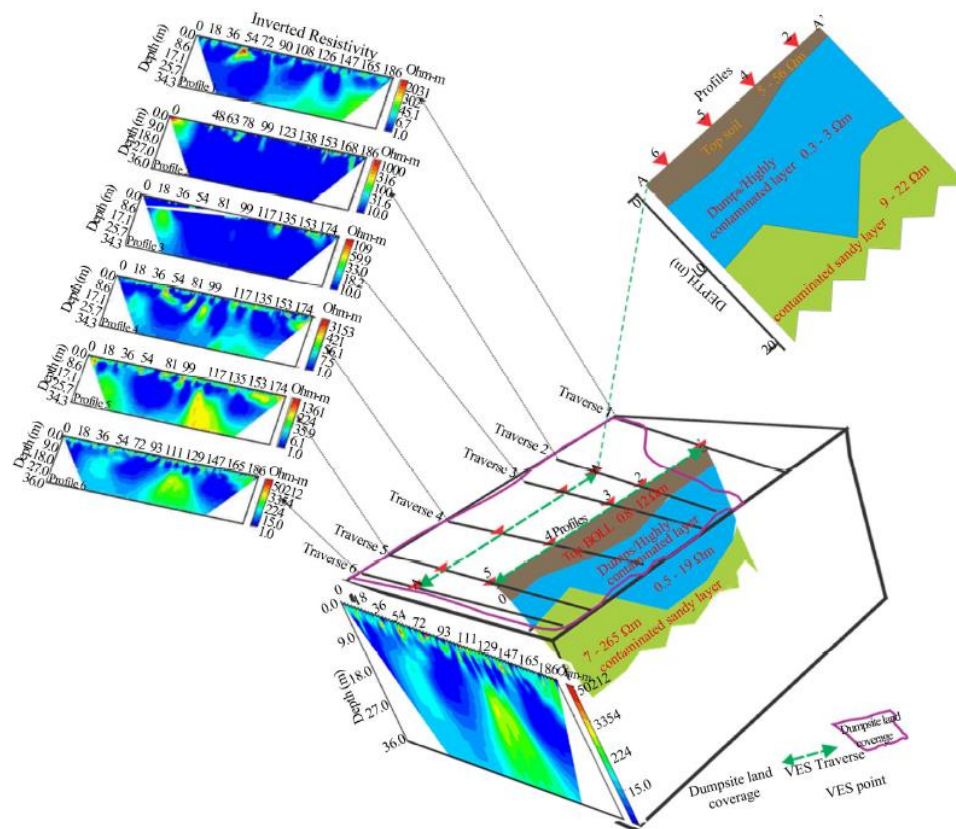


Figure 6. A 3-D block model of the dumpsite projected from ERT and cross-profile 1-D geoelectric sections.

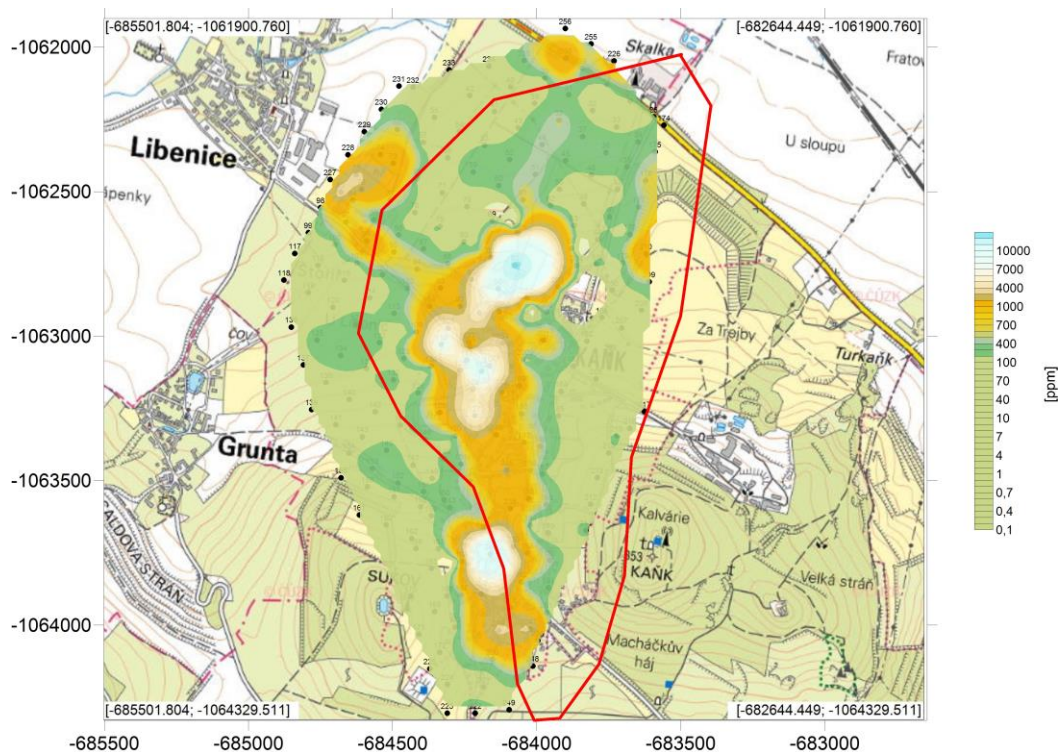
Table 1. pH, macroelements and Boron contents (mg/l) of water samples obtained from wells and boreholes around the dumpsite.

Samples	pH	Ca	Mg	K	Na	P	S	Al	B
W1	6.55	63.05	11.15	48.66	54.08	nd	16	0.001	0.343
W2	5.15	36.21	7.01	26.84	83.74	0.025	3	0.025	0.09
W3	6.35	80.74	10.31	36.54	83.54	nd	10	0.013	0.177
W4	6.26	93.94	9.64	32.87	62.28	nd	22	0.01	0.117
W5	6.59	48.84	7.13	30.5	161.1	nd	12	1.641	0.02
W6	6.17	61.6	10.83	57.03	81.64	0.326	19	0.013	0.149
W7	6.26	39.7	5.7	24.66	29.7	0.153	4	0.089	0.172
W8	6.25	48.95	14.85	76.41	104.3	nd	47	0.026	0.061
W9	6.89	56.78	50.52	118.2	58.62	nd	30	0.007	1.438
W10	6.17	82.2	43.38	286.7	175.5	0.089	12	0.018	2.063
Range	5.15 - 6.87	36.21 - 93.94	5.70 - 50.52	24.66 - 286.7	29.70 - 175.5	0.025 - 0.326	3.0 - 47	0.001 - 1.641	0.020 - 2.063
Mean	6.26	61.2	17.05	73.84	89.45	0.148	17.5	0.1843	0.463
ST	0.45	19.17	16.6	80.1	46.42	0.13	13.17	0.5124	0.67

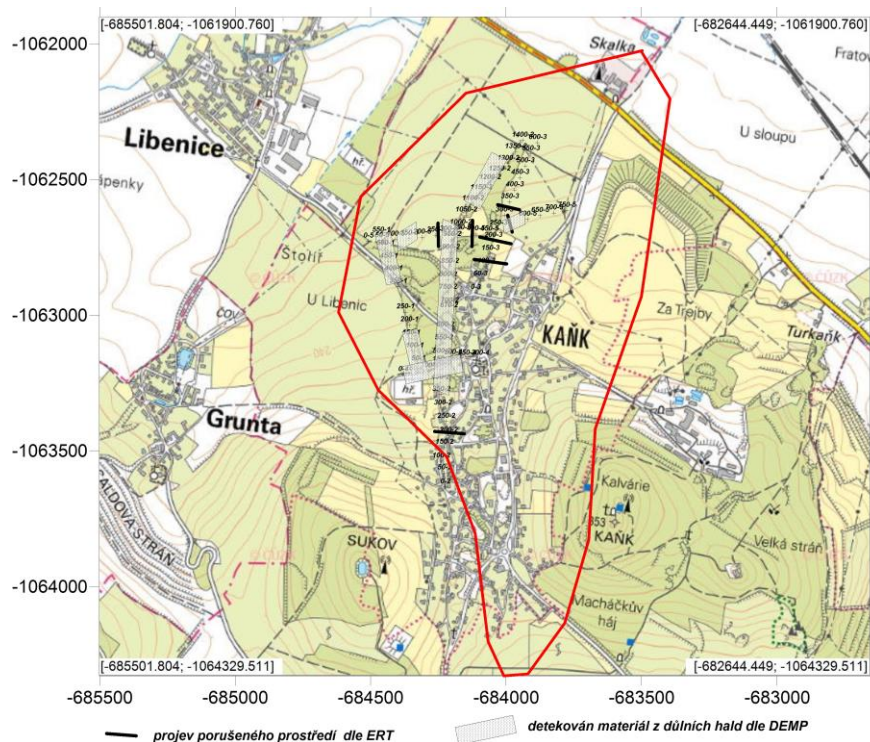
Obr. 5.28a: Ilustrace výsledků získaných z průřezu skládkovacího území v městě Lagos (Nigerie).

Na obr. 5.28b a 5.28c jsou příklady výsledků z výzkumu těžbou postižené oblasti části obce Kaňk u Kutné Hory, Na obr. 5.28a je zobrazen obsah arsenu. Jedná se o jeden z deseti prvků.,

kteře byly zkoumány metodou ED-XRF z odebraných vzorků zemin. Na obr. 5.28c je uvedeno svodné interpretační schéma geofyzikálních metod (metoda ERT, metoda DEMP). Anomální oblast s výskytem arsenu se zhruba shoduje s místy, kde geofyzika zachytila přítomnost tektoniky.



Obr. 5.28b: Mapa výskytu arsenu. Výsledek analýzy plošně odebraných vzorků zemi



Obr. 5.28c Mapa geofyzikálních profilů s interpretačními poznámkami.

## 6. TABELÁRNÍ PŘEHLED VHODNOSTI POUŽITÍ GEOFYZIKÁLNÍCH METOD PŘI SANACI STARÝCH ZÁTĚŽÍ

Řešená problematika průzkumu a nápravy starých ekologických zátěží	odporové metody OP, VES, OT	elektrochemické metody – SP, VP	Metoda nabitého tělesa	VDV	DEMP	georadar	detektory kovů	seismické metody	magnetometrie	gravimetrie	radiometrie	termometrie	hydrokarotáž	technická karotáž	letecké metody
Geologické mapování – vertikální profily	■	□	X	□	■	X	X	■	■	■	X	X	□	X	X
Geologické mapování – horizontální profily	■	□	X	■	■	□	X	□	■	■	■	□	□	X	■
Hydrogeologický režim pokryvu	■	■	■	■	■	■	X	■	□	□	□	■	■	X	□
Litologie a mocnost pokryvu	■	□	□	□	■	■	X	■	□	■	■	□	■	X	■
Mapování poruchových zón	■	□	X	■	■	■	X	□	□	■	■	■	■	X	■
Hladina podzemní vody	■	X	X	X	□	■	X	□	X	X	X	X	■	X	X
Směr a rychlost proudění podzemní vody	X	□	■	X	X	X	X	X	X	X	X	□	■	X	X
Litologie podloží	■	X	X	X	□	□	X	■	□	■	X	X	□	X	X
Hydrologické poměry prostředí	■	■	□	□	□	□	X	□	X	X	X	□	■	X	X
Lokalizace umělých podzemních objektů	■	□	■	□	■	■	■	□	■	■	X	□	X	■	X
Koroze, perforace, úniky produktvodů,	■	■	■	□	■	□	■	X	X	X	X	■	■	■	X
Lokalizace podzemních dutin	□	X	X	X	□	■	□	□	X	■	X	□	X	X	X
Lokalizace skrytých ekologických zátěží	■	■	□	□	■	■	■	■	■	■	■	■	■	X	□
Rozsah a šíření kontaminantů	■	■	■	□	■	□	X	X	X	□	□	■	■	X	□
Monitoring sanačních prací	■	■	■	□	■	■	X	□	□	□	■	■	■	□	X
Hlubkový dosah metody *)	Desítky i stovky m	Desítky (SP), první stovky (VP) m	Stovky m	První desítky m	První desítky m	Běžně do deseti m (***)	Jednotky m	Jednotky km (***)	Vyšší km	Vyšší km	Jednotky dm až m	Jednotky m	Jednotky dm (****)	Jednotky dm (****)	Podle metody **)

optimální       vhodné       podmíněčně vhodné       nevhodné

\*)

hloubkový dosah je udáván pro běžnou praxi, vždy existují i extrémní možnosti při aplikaci intenzivních zdrojů energie či naopak extrémně malých rozestupů elektrod apod.

\*\*)

radiometrie ..... jednotky decimetrů až metrů - záleží na tom, zda povrchová vrstva je autochtonní  
magnetometrie ..... rozsáhlé anomálie jsou odezvou i mnohakilometrových hloubek, úzké anomálie mají většinou připovrchový význam  
elektromagnetická měření ..... hloubkový dosah je závislý na frekvenci elmg. pole a vodivosti prostředí. V ČR byl dosažen hloubkový dosah až kolem 350 m.

\*\*\*)

Informace platí pro běžné prostředí v ČR (kvartérní pokryv). Ve skalním prostředí s vysokým měrným odporem či v promrzlém terénu jsou hloubkové dosahy pro speciální antény vysoké (až první stovky m, výjimečně i první km).

\*\*\*\*)

Hloubkový dosah je závislý na velikosti zdroje seismických rozruchů i na použité průzkumné metodě.

\*\*\*\*\*)

údaj platí pro dosah měření v okolí vrtného stvolu

## **7. LEGISLATIVA, NORMY A STANDARDY**

Pro přípravu geofyzikálního projektu a pro realizaci měření je nutno využít servisu odborné firmy (odborníka), která má prokazatelné oprávnění v potřebném oboru. Jedná se zejména oprávnění „Odborná způsobilost v geofyzice“ vydané MŽP ČR. (Viz Vyhláška MŽP ČR č. 206/2001 Sb. o osvědčení odborné způsobilosti projektovat, provádět a vyhodnocovat geologické práce v platném znění)

Pro řešení závažnějších úkolů spojených s korozí prostředí doporučujeme vyžadovat oprávnění „Způsobilost pro korozní průzkum na komunikacích“ vydané MD ČR.

Geofyzikální práce by měly zajišťovat firmy, které mají vypracovanou politiku jakosti dle platné normy ISO.

Připomínáme, že geofyzikální měření prováděná neodbornými firmami jsou z pohledu MŽP ČR nezákonná a hlavně bez zaručené kvality.

### **7.1. ZÁKONY A VYHLÁŠKY SPOJENÉ S GEOFYZIKÁLNÍMI AKTIVITAMI**

#### **7.1.1. PRÁVNÍ**

\* Zákon č. 89/2012 Sb., občanský zákoník, v platném znění,  
*doporučený internetový odkaz:* <https://business.center.cz/business/pravo/zakony/obcankzak/>

\* Zákon 90/2012 Sb., o obchodních korporacích, v platném znění,  
*Doporučený internetový odkaz:* <https://business.center.cz/business/pravo/zakony/obchodni-korporace/>

\* Zák. č. 505/1990 Sb. (novelizace č. 119/2000 Sb.) o metrologii, v platném znění,  
*doporučený internetový odkaz:* <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/1990-505/zneni-20170701>

\* Zák. č. 22/1977 o technických požadavcích na výrobky, v platném znění  
*doporučený internetový odkaz:* <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/1997-22/historie>

\* Zák. 134/2016 Sb. o zadávání veřejných zakázek, v platném znění  
*doporučený internetový odkaz:* <http://www.portal-vz.cz/getmedia/abd1a02e-3ef8-44a7-9a8c-a06037a6e007/ZZVZ-od-1-1-2018.pdf>

#### **7.1.2. GEOLOGIE A HORNICTVÍ**

\* Zák. č. 44/1988 Sb. o ochraně a využití nerostného bohatství (horní zákon), v platném znění, *Doporučený internetový odkaz internetová adresa:*  
<https://www.mzp.cz/www/platnalegislativa.nsf/>

\* Zák. č. 62/1988 Sb. o geologických pracích a o Českém geologickém úřadu, v platném znění, *doporučený internetový odkaz:* : <https://www.mzp.cz/www/platnalegislativa.nsf/>

\* Zák. č. 61/1988 Sb. o hornické činnosti, výbušninách a o státní báňské správě, v platném znění, *doporučený internetový odkaz:* <https://www.mzp.cz/www/platnalegislativa.nsf/>

\* Vyhláška MŽP ČR č. 206/2001 Sb. o osvědčení odborné způsobilosti projektovat, provádět a vyhodnocovat geologické práce), v platném znění, *doporučený internetový odkaz:* <https://www.mzp.cz/www/platnalegislativa.nsf/>

\* Vyhláška ČBÚ č. 298/2005 Sb. o požadavcích na kvalifikaci a odbornou způsobilost a o ověřování odborné způsobilosti pracovníků k hornické činnosti a činnosti prováděné hornickým způsobem, v platném znění, *doporučený internetový odkaz:* <https://zakony.judikaty.info/cz/prepis/vyhlaska-298/2005>

\* Vyhláška ČBÚ č. 299/2005 Sb., o hospodárném využívání výhradních ložisek, o povolování a ohlašování hornické činnosti a o ohlašování činnosti prováděné hornickým způsobem, v platném znění, *doporučený internetový odkaz:* <https://zakony.judikaty.info/cz/prepis/vyhlaska-298/2005>

\* Vyhláška MŽP ČR č. 206/2001 Sb. o osvědčení odborné způsobilosti projektovat, provádět a vyhodnocovat geologické práce, *doporučený internetový odkaz:* <https://www.mzp.cz/www/platnalegislativa.nsf/>

\* Vyhláška MŽP ČR č. 368/2004 Sb. o geologické dokumentaci, v platném znění, *doporučený internetový odkaz:* <https://www.mzp.cz/www/platnalegislativa.nsf/>

\* Vyhláška MŽP ČR č. 369/2004 Sb. o projektování, provádění a vyhodnocování geologických prací, oznamování rizikových geofaktorů a o postupu při výpočtu zásob výhradních ložisek, v platném znění, *doporučený internetový odkaz:* <https://www.mzp.cz/www/platnalegislativa.nsf/>

\* Vyhláška MŽP ČR č. 282/201 Sb. o evidenci geologických prací, v platném znění, *doporučený internetový odkaz:* <https://www.mzp.cz/www/platnalegislativa.nsf/>

### 7.1.3. ŽIVOTNÍ PROSTŘEDÍ

\* Zák. ČNR č. 244/1992 Sb., o posuzování vlivů na životní prostředí, v platném znění, *doporučený internetový odkaz:* <https://www.mzp.cz/www/platnalegislativa.nsf/>

\* Zák. ČNR č. 17/1992 Sb. o životním prostředí, v platném znění, *doporučený internetový odkaz:* <https://www.mzp.cz/www/platnalegislativa.nsf/>

\* Zák. č. 254/2001 Sb., o vodách (vodní zákon), v platném znění, *doporučený internetový odkaz:* <https://www.mzp.cz/www/platnalegislativa.nsf/>

\* Zák. č. 86/2002 Sb., o ochraně ovzduší před znečišťujícími látkami (zákon o ovzduší), v platném znění, *dopručený internetový odkaz:* <https://www.mzp.cz/www/platnalegislativa.nsf/>

\* Zák. č. 157/1998 Sb., o chemických látkách a chemických přípravcích, v platném znění, doporučený internetový odkaz: <https://www.mzp.cz/www/platnalegislativa.nsf/>

\* Zák. č. 185/2001 Sb., o odpadech, v platném znění, *doporučený internetový odkaz:* <https://www.mzp.cz/www/platnalegislativa.nsf/>

\* Zák. č. 477/2001 Sb., o obalech, v platném znění, *doporučený internetový odkaz:* <https://www.mzp.cz/www/platnalegislativa.nsf/>

\* Zák. ČNR č. 114/1992 Sb., o ochraně přírody a krajiny, v platném znění, *doporučený internetový odkaz:* <https://www.mzp.cz/www/platnalegislativa.nsf/>

\* Zák. č. 263/2016 Sb., o mírovém využívání jaderné energie a ionizujícího záření, v platném znění (atomový zákon), *doporučený internetový odkaz:* <https://www.sujb.cz/fileadmin/sujb/docs/legislativa/263-2016.pdf>

\* Vyhláška SÚJB č. 307/2002 Sb. o radiační ochraně, v platném znění, *doporučený internetový odkaz:* [https://www.sujb.cz/fileadmin/sujb/docs/legislativa/vyhlasky/v307\\_02.pdf](https://www.sujb.cz/fileadmin/sujb/docs/legislativa/vyhlasky/v307_02.pdf)

Přílohy ve znění vyhlášky 499/2005 Sb. v platném znění, *doporučený internetový odkaz:* [https://www.sujb.cz/fileadmin/sujb/docs/legislativa/vyhlasky/Vyhlaska\\_2002\\_307\\_ve\\_zneni\\_2\\_005\\_499\\_prilohy.pdf](https://www.sujb.cz/fileadmin/sujb/docs/legislativa/vyhlasky/Vyhlaska_2002_307_ve_zneni_2_005_499_prilohy.pdf)

## **7.2. NORMY A STANDARDY**

\* ČSN EN ISO 9000. Systémy managementu jakosti. Základy, zásady a slovník.

\* ČSN EN ISO 9001. Systémy managementu jakosti. Požadavky (ISO 9001:2016).

\* ČSN 03 8365. Zásady měření při protikorozní ochraně kovových zařízení uložených v zemi. Stanovení přítomnosti bludných proudů v zemi.

\* ČSN 03 8363. Zásady měření při protikorozní ochraně kovových zařízení uložených v zemi. Měření zdánlivého měrného odporu půdy Wennerovou metodou.

\* ČSN 03 8375. Ochrana kovových potrubí uložených v půdě nebo ve vodě proti korozi.

\* ČSN 03 8372. Zásady ochrany proti korozi nelineových zařízení uložených v zemi nebo ve vodě.

\* ČSN 73 0036. Seismická zatížení staveb.

\* ČSN 25 0100. Metrologie. Typové zkoušky a schvalování typů měřidel. Všeobecné požadavky.

\* ČSN EN 1997-1, Eurokód 7, Navrhování geotechnických konstrukcí

\* ČSN EN 1998-1 (730036), Eurokód 8. Navrhování konstrukcí odolných proti zemětřesení. Část 1: Obecná pravidla, seismická zatížení a pravidla pro pozemní stavby (včetně národní přílohy NA (informativní): Národně stanovené parametry a doplňující informace).

\* ČSN EN 50162 – Ochrana před korozí bludnými proudy ze stejnosměrných proudových soustav.

\* Metodický pokyn dokumentace elektrických a geofyzikálních měření betonových mostů pozemních komunikací. Vydalo Ministerstvo dopravy ČR, Praha 1995. (Dokonalé propracování tohoto pokynu umožňuje jeho využití i pro jiné pozemní stavby).

\* Služební rukověť SR 5/7 (S) „Ochrana železničních mostních objektů proti účinkům bludných proudů“, ČD, 1997.

\* TP 124 - Základní ochranná opatření pro omezení vlivu bludných proudů na mostní objekty a ostatní betonové konstrukce pozemních komunikací. Ministerstvo dopravy

## **8. DOPORUČENÁ LITERATURA**

**Baker G.S. (1999):** Processing Near Surface seismic-Reflection Data: A Primer, Society of Exploration Geophysicist.

**Barton, N. (2006):** Rock Quality, Seismic Velocity, Attenuation and Anisotropy. Taylor and Francis Group, London.

**Beneš, V., Tesař, M., Boukalová, Z. (2011):** Repeated geophysical measurement – the basic principle of the GMS methodology used to inspect the condition of flood control dikes, River Basin Management VI, Conference 25 - 27 May 2011, Riverside, California, USA, page 105 – 115, WIT Press, ISBN 978-1-84564-516-8.

**Benson, R. C., Glaccum, R. A., Noel M.R. (1982):** Geophysical techniques for sensing buried wastes and waste migration. U.S. Environmental Protection Agency, Las Vegas Nevada

**Bárta, J., Dostál, D. (2007):** Vliv geologického podloží na stabilitu domů a zdraví jejich uživatelů. Doporučený standard technický. Česká komora autorizovaných inženýrů.

**Bárta J. (2015):** Monitoring chování a optimalizace konstrukce měřících elektrod pro geoelektrická měření. Úkol technického rozvoje společnosti G IMPULS Praha s.r.o.

**Bárta J., Dostál D., Jirků J., Vilhelm V. (2016):** Metodika prací se systémem SG11 (Seismika, Geoelektrika, Internet). Certifikovaný výstup projektu TAČR TA 03020408

**Boganik G.N, Gurvič I.I. (2006):** Seismorazvedka. Russia, Tver AIS

- Butler, D.K. (2005):** Near-Surface Geophysics. Society of Exploration
- Cosma, C., Enescu N. (2010):** Two decades of evaluation of hardrock seismic imaging methods applied to nuclear waste disposal in Finland. EAGE 66<sup>th</sup> Conference, Paris
- Elijah, A.A., Adetayo, F.F. and Olusola, T.K. (2013):** Integrated Geophysical and Geochemical Methods for Environmental Assessment of Municipal Dumpsite System. International Journal of Geosciences, 2013, 4, 850-862
- Everett M. E. (2014):** Near-Surface Applied Geophysics, Springer Science + Business media Dordrecht
- Fraser, D.C. (1969):** Contouring of VLF-EM data., Geophysics, 34, 958-967
- Griffin R.H., commander (1995):** Geophysical Exploration for Engineering and Environmental Investigations, Engineer Manual, US Army Corps of Engineers
- Grinbaum I.I. (1965):** Geofizické metody opredelenija filtracionnyh svojstv gornych porod. Nedra, Moskva
- Gruntorád, J., et al. (1987):** Principy metod užité geofyziky. SNTL Praha, Alfa Bratislava
- Gruntorád, J. (1990):** Objektivizace vlivu lokálních geofaktorů na životní prostředí. MŽP ČR Praha
- Gruntorád, J. (1993):** Nové příležitosti uplatnění měření magnetické susceptibility v půdách. Geologický průzkum, 7-8/93
- Horský, O., Bláha P. (2008):** Inženýrskogeologický průzkum pro přehradu aneb „co nás také poučilo“. REPRONIS. Ostrava
- Jirků, J. (2017):** Lokalita Kaňk u Kutné Hory, závěrečná zpráva geofyzikálního měření. Projekt: Analýza rizik znečištění pocházejícího z těžebních odpadů v lokalitě Kaňk. G IMPULS Praha pro Greengas a.s.
- Karous, M. (1977):** Geoelektrické metody průzkumu II. Elektromagnetické metody. Skripta, Universita Karlova Praha
- Karous, M., Hjelt, S.E. (1983):** Linear filtering of VLF dip-angle measurements, Geophysical prospecting, Volume 31, Issue 5, October 1985, pages 782-794
- Karous, M., Mareš, S. (1988):** Geophysical methods in studying fracture aquifers. Charles University Prague
- Karous, M. (1989):** Geoelektrické metody průzkumu, SNTL/Alfa Praha
- Karous, M. (1992):** Geoelektrické metody průzkumu při zajišťování bezpečnosti skládek průmyslových a komunálních odpadů. Geologický průzkum 8/1992 Praha, str. 228-231

**Karous, M., et al., (Eds.: W.K. Kelly, S. Mareš) (1993):** Applied geophysics in hydrogeological and engineering practice. Elsevier Amsterdam

**Karous, M. (1993):** Application of ground geoelectrical methods to hydrogeological, engineering geological and environmental studies. Lectures, Ecole Polytechnique Montreal

**Karous, M. (1997):** (Geophysical methods for non-destructive detection of underground product ducts and tanks and their break. Workshop on environment monitoring and auditing. UNIDO, Prague

**Karous, M., Gürtler, R. (1997):** Použití georadaru při mělkém geotechnickém průzkumu. NO DIG, Zpravodaj C. spol. pro bezvýk. techn. roč. 3, č. 2, 14-20, Praha

**Knödel K., Lange G., Voigt H., J. (2009):** Environmental Geology, Handbook of Field Methods and Case Studies, ISBN 978-3-540-74669-0, Springer Berlin

**Mareš, S., et al. (1983):** Geofyzikální metody v hydrogeologii a inženýrské geologii. SNTL Praha, Alfa Bratislava

**Mareš, S., et al. (1984)** Introduction to applied geophysics. D. Reidel Dordrecht

**Mareš, S., et al. (1990):** Úvod do užití geofyziky. SNTL Praha

**Mareš, S., et al. (1996):** Geofyzikální metody v ochraně životního prostředí. VŠB - TU Ostrava

**Moldan, B. (Editor) (1990):** Životní prostředí České republiky. Academia Praha

**Montgomery, C. W. (1990):** Environmental geology. W.C. Brown Publishers Dubuque

**Ólafsdóttir E.Á. (2014):** Multichannel Analysis of Surface Waves. Methods for dispersion Analysis of Surface Wave Date, University of Iceland.

**Patnaik P. (2010):** Environmental Analysis: Chemical Pollutants in Air, Water, Soil, and solid Wastess, Second Edition. ISBN 978 1420065817, CRC Press

**Park Ch.B., Miller R.D., Xia J. (1999):** Multichannel analysis of surface waves, Geophysics volume 64, W.3

**Polák J. (2017):** Odolnost kovových a železobetonových liniových konstrukcí proti agresivitě prostředí a proti bludným proudům, Český plynárenský svaz

**Repsold, H. (1989):** Well logging groundwater development. Verlag H. Heise, Hannover

**Reynolds, J.M. (2011):** An Introduction to Applied and Environmental Geophysics, 2<sup>nd</sup> Edition, Wiley- Black Well

**Slater, L., Ntarlagiamis D. (2014):** Environmental Applications of the Induced Polarization Method, SAGEEP 2014, Boston

**Slater, L. and Lesmes, D. (2002):** The induced polarization method, New Jersey Geological Survey Open-File Report OFR 90-1, 160pp.

**Szabo, N. P. (201?):** Engineering and Environmental Geophysics, University of Miskolc, link na \*.pdf:  
<http://www.uni-miskolc.hu/~geofiz/Env-eng-geoph.pdf>

**Tichonov A.N. (1949):** O jedinstvennosti řešení zadané elektrorazvjeďky, Doklady akademii nauk SSSR, 69 (6): 797-800

**Vogelsand, D. (1994):** Environmental geophysics, A practical guide. Springer Verlag

**Ward, S.U. (Editor) (1990):** Geotechnical and environmental geophysics, Vol. 1 - III. SEG Tulsa Oklahoma

....., (2007): Introduction to Environmental Geophysics, Student manual, United States Environmental Protection Agency, Environmental Response Team Center, Cincinnati, Ohio, Link na \*.pdf  
<http://nepis.epa.gov/Exe/ZyPURL.cgi?Dockey=9100OXW8.TX>