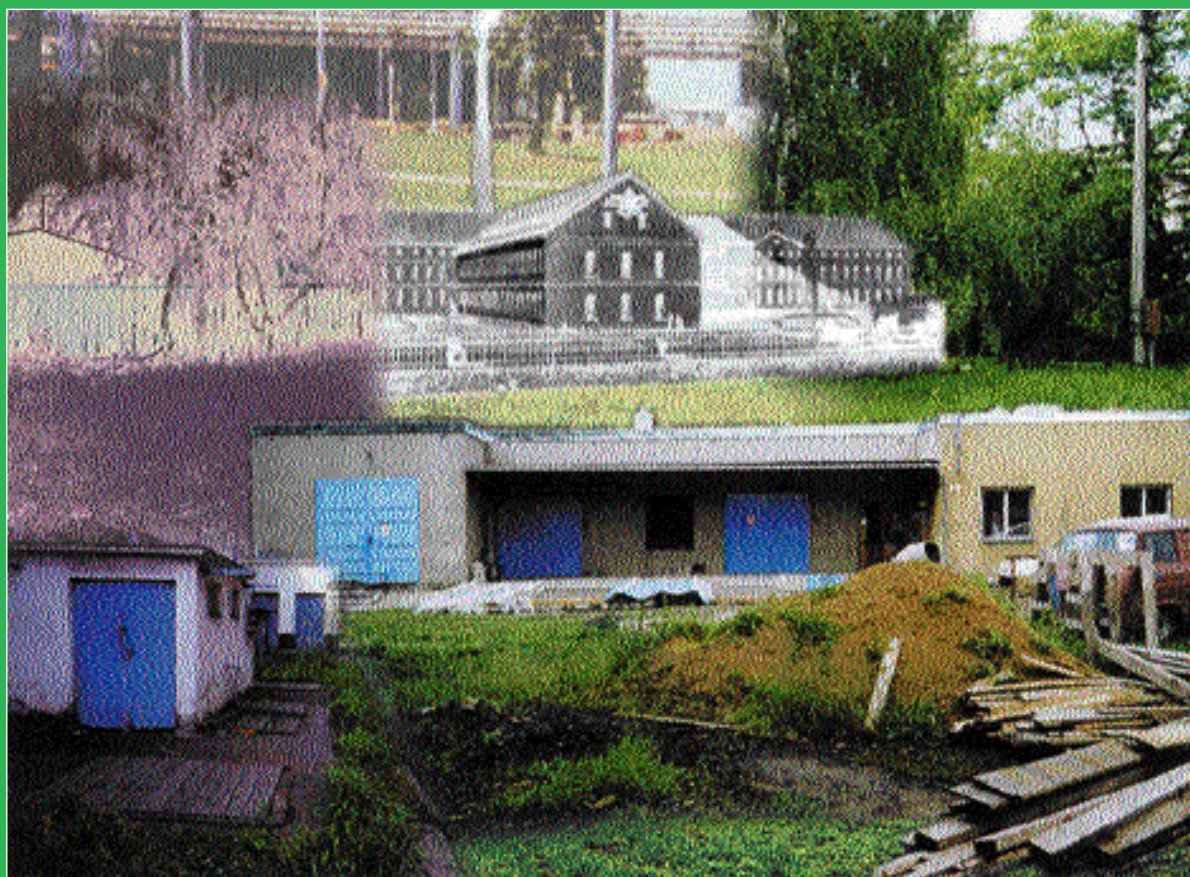


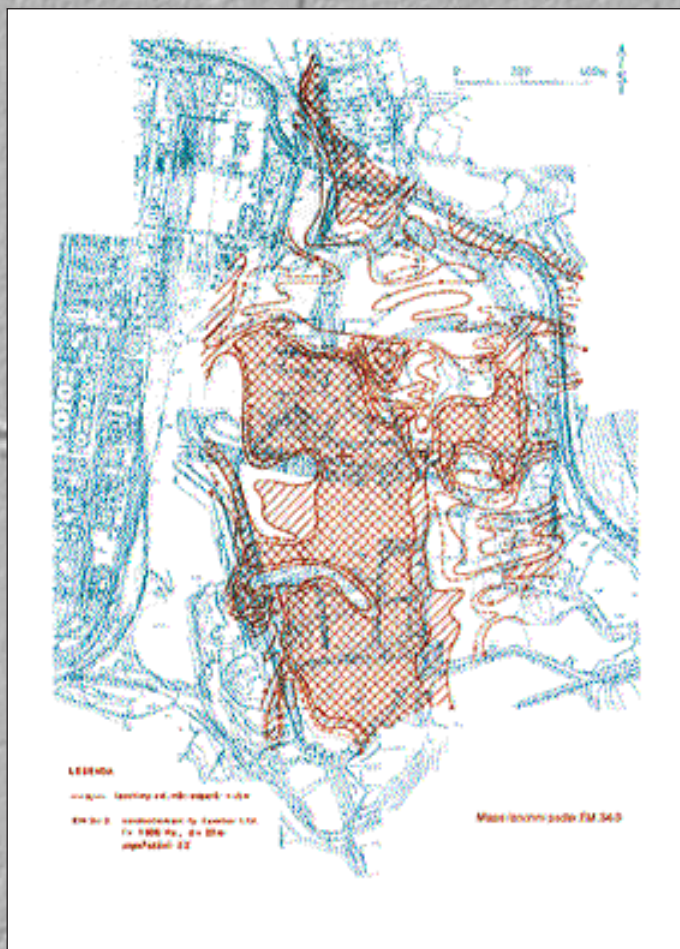


MOŽNOSTI POUŽITÍ GEOFYZIKÁLNÍCH METOD

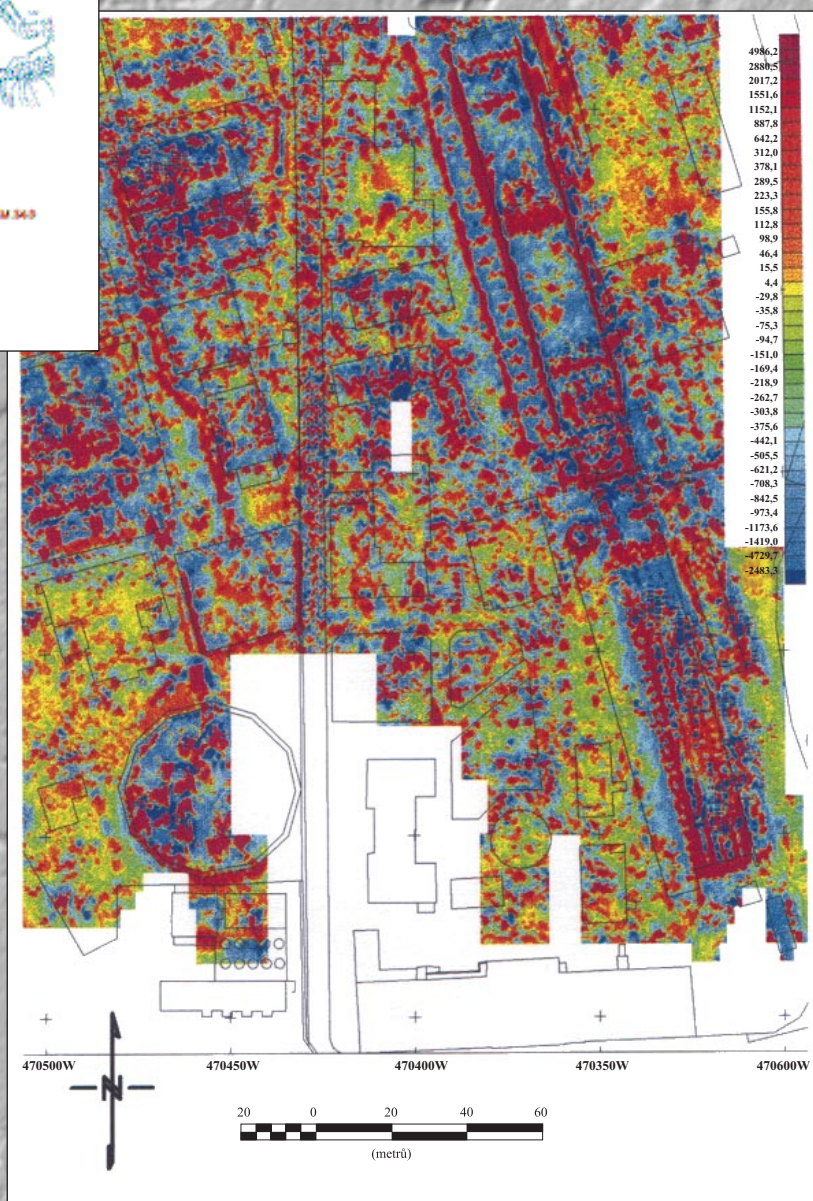
při ověřování nejasných strukturně geologických,
popř. jiných vztahů na lokalitách při
průzkumu a nápravě starých ekologických zátěží

Planeta '99





Obr. 6. 12. Mapování rozsahu kontaminace podzemních vod elektromagnetickým profilováním



Obr. 6. 6. Přesná detailní magnetometrie pro detekci zbytků podzemních a inž. sítí

MOŽNOSTI POUŽITÍ GEOFYZIKÁLNÍCH METOD

při ověřování nejasných strukturně geologických,
popř. jiných vztahů na lokalitách při
průzkumu a nápravě starých ekologických zátěží

Metodický materiál byl zpracován odborem ekologických škod MŽP v rámci projektu PPŽP/550/1/97 pod vedením ředitelky odboru Ing. Hany Kroové, CSc. Odborným garantem projektu byl RNDr. Jan Gruntorád, CSc. Odborným řešitelem projektu byl Prof. RNDr. Miloš Karous, CSc.

Zpracovatelé příručky děkují za odborné a metodické připomínky zejména Ing. Evě Tylové, RNDr. Janu Hronovi, RNDr. Bohumilu Píchovi, CSc., RNDr. Františku Pastuszkovi, Ing. Václavu Vučkovi, CSc., RNDr. Josafu Datlovi, doc. RNDr. Jiřímu Krásnému, CSc., Ing. Jaroslavu Šťastnému a RNDr. Michalu Tesařovi.

edice **PLANETA '99**

Ročník VII, číslo 1/99

**Ministerstvo životního prostředí
září 1999**

Odbor ekologických škod

**Vršovická 65, 100 10 Praha 10, tel. 02/6731 0443, fax: 02/67311496
ISSN 1210-4124**

Tištěno na recyklovaném papíře.

© MŽP, 1999

OBSAH

1. Úvod.....	5
2. Kriteria vhodnosti a zásady aplikace geofyzikálních metod....	5
2.1. Kriteria výběru vhodné geofyzikální metody	5
2.1.1. Metodická vhodnost (M)	5
2.1.2. Ekonomická náročnost (E)	5
2.1.3. Technologická a metodologická náročnost (T)	5
2.2. Zásady aplikace geofyzikálních metod.....	6
2.2.1. Etapovitost	6
2.2.2. Komplexnost geofyzikálních prací.....	6
2.2.3. Rozsah a hustota geofyzikálních prací.....	6
2.3. Limitující faktory aplikovatelnosti geofyziky fyzikálních šumů ..	6
2.3.3. Nehomogenita okolního prostředí.....	6
2.3.4. Přesnost měření	7
2.3.5. Labilita inverze	7
3. Přehled používaných geofyzikálních metod	7
3.1. Geoelektrické metody	7
3.1.1. Odporové profilování (OP)	7
3.1.2. Odporové sondování (VES)	7
3.1.3. Elektrická tomografie (ET) a multielektrodové uspořádání (MEU).....	8
3.1.4. Měření přirozených a umělých elektrických polí	8
3.1.5. Metoda velmi dlouhých vln (VDV).....	8
3.1.6. Aktivní elektromagnetické metody	8
3.1.7. Georadar	9
3.2. Mělká seismika	9
3.2.1. Mělká refrakční seismika (MRS)	9
3.2.2. Mělká reflexní seismika (RXS)	9
3.2.3. Seismická tomografie (ST)	9
3.3. Magnetometrie	9
3.4. Gravimetrie	11
3.5. Termometrie	10
3.6. Radiometrie	10
3.7. Geofyzikální měření ve vrtech (karotáž)	10
3.7.1. Metody pro ověřování litologie	10
3.7.2. Metody pro kontrolu technického stavu vrtu	10
3.7.3. Hydrokarotážní metody	11
3.8. Letecké metody a dálkové snímkování	11
3.9. Tabulární přehled nejpoužívanějších geofyzikálních metod	11
4. Normy a literatura	11
5. Použití geofyzikálních metod při řešení konkrétních otázek vlivu ekologických zátěží.....	12
5.1. Geologická, litologická a hydrogeologická charakteristika zájmového území.....	12
5.1.1. Geologická stavba území	12
5.1.2. Hydrogeologický režim v pokryvu	12
5.1.3. Litologie podloží a jeho hydrogeologický režim	13
5.2. Antropogenní zásahy do prostředí.....	13
5.2.1. Vliv umělých zásahů do hydrogeologického režimu	13
5.2.2. Lokalizace a identifikace umělých podzemních objektů	14
5.2.3. Koroze a perforace nádrží a produktovodů, úniky obsahu.....	14
5.2.4. Podzemní dutiny	14
5.2.5. Průzkum polohy a rozsahu skrytých ekologických zátěží	14
5.2.6. Rozsah a šíření kontaminantu.....	15
5.2.7. Monitoring důsledků sanačních prací.....	15
6. Příklady komplexního řešení vybraných problémů	16
6.1. Vymezení hřbetu pevného podloží a mapování tektonických linií pomocí odporového sondování.....	16
6.2. Vymezení hřbetu pevného podloží a mapování tektonických linií pomocí mělké refrakční seismiky	16
6.3. Určení směru a rychlosti proudění podzemní vody metodou nabitého tělesa	16
6.4. Určení mocnosti a složení antropogenních uloženin odporovým sondováním a mělkou refrakční seismikou	16
6.5. Detekce skryté munice detailní magnetometrií	16
6.6. Přesná detailní magnetometrie pro detekci zbytků podzemních konstrukcí a inženýrských sítí.....	16
6.7. Použití georadaru pro vymezení skládky ve vytěžené jámě	17
6.8. Přeceněný hloubkový dosah georadarového řezu.....	17
6.9. Mapování skládky odporovým profilováním se dvěma rozestupy elektrod.....	17
6.10. Mapování skládky geofyzikálním komplexem	17
6.11. Zjištění úniků skládkové vody do podloží pomocí odporových metod.....	17
6.12. Mapování rozsahu kontaminace podzemních vod elektromagnetickým profilováním	17
6.13. Průzkum rozsahu a šíření kontaminace.....	17
6.14. Kontaminovaná vrstva v odporovém řezu podle VES	17
6.15. Vyhodnocení litologie podle karotáže	17
6.16. Proudění podzemní vody ve vrtu v krystaliniku	18
6.17. Proudění podzemní vody ve vrtech v křídových sedimentech	18
6.18. Monitorování změn kontaminace podzemních vod pozemními odporovými metodami	18
6.19. Monitorování sanačních důsledků v monitorovacích vrtech indukční karotáží.....	18
6.20. Stabilní monitorovací systém	18
6.21. Detekce ropného znečištění pomocí seismického měření.....	18
6.22. Použití gravimetrie při vyhledávání speciální kontaminace.....	18
6.23. Detekce dehtů pomocí gravimetrie.....	18
Tabulární přehled použití geofyzikálních metod při sanaci ekologických zátěží.....	19
Obrazová příloha	20
Přehled zkratk a jednotek.....	36

1. Úvod

Problematika *ochrany a tvorby životního prostředí* se řadí v posledních letech 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, protože v některých oblastech se blíží otázce jeho přežití.

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 starých ekologických zátěží.**

Předkládaný materiál je průvodcem po možnostech různých geofyzikálních metod v této úzce vymezené oblasti a má sloužit jednak státní správě jako prvotní informace a dále pak jako inspirativní materiál projektantům a objednavatelům průzkumných prací v této oblasti. V žádném případě nesmí být považován za metodiku, která má být dodržována, a ani za učebnici, či manuál.

Geofyzikálních učebnic je citováno velké množství (viz kapitola 4) a na ně lze případně zájemce z řad uživatelů této příručky odkázat. Rovněž zde uváděné příklady chápeme skutečně pouze jako příklady nejčastějšího použití jednotlivých geofyzikálních metod, demonstrováné zde pro snazší dokreslení jejich možností.

V žádném případě nelze tyto příklady zobecňovat, neboť každé geofyzikální měření je třeba modifikovat výhradně dle specifických strukturně geologických, hydrogeologických či petrofyzikálních podmínek té které lokality a z téhož důvodu ani není možné připravit manuál, podle něhož by mohli pracovníci státní správy geofyzikální měření kontrolovat nebo dokonce projektovat či interpretovat. Tyto práce přísluší odborníkům, geofyzikům, pro něž tento materiál 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 karotážních a podzemních), tzn. že nevyžadují otvírkové práce pro posouzení stavu horninového prostředí. Při průzkumu starých i nových 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 a pod.) 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.

Do tohoto materiálu nejsou zařazeny metody *atmogeochemického průzkumu*, protože se nejedná o metodu geofyzikální v pravém slova smyslu, ale o variantu geochemických metod.

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 a ekonomickou a technologickou náročností jednotlivé metody pro získání požadovaných informací:

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 zjišťování charakteru a stavu prostředí. Měření 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 a
- vysoká míra jednoznačnosti a přesnosti interpretace, tj. získání požadované informace z měřených dat.

Metodickou vhodnost lze charakterizovat množstvím užitečné informace na výkon pro 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 a pod.

Ekonomická náročnost je charakterizována cenou jednotky užitečné informace.

2.1.3. Technologická a metodologická náročnost (T)

Technologická a metodologická náročnost geofyzikálních metod je dána stupněm technické obtížnosti získání hodnověrných dat v terénu. Zde se uplatňuje automatizace sběru (měření) dat použitou aparaturou, přístupnost terénu charakterizovaná kategoriemi I – IV, mobilita použité aparatury v dané kategorii terénu ap. 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.

Pozn.:

Uvedená tři kritéria (M, E, T) jsou u aplikací jednotlivých metod pro řešení konkrétních úloh v souhrnné tabulce v kap. 5. 3. hodnocena stupněm 0 (naprosto nevyhovující) až 5 (nejlepší hodnocení). Toto hodnocení má subjektivní charakter, přesto však může dát přehled o aplikovatelnosti metody a v této příručce může být pro její uživatele (pro státní správu) signálním ukazatelem při ověřování, zda jsou předkládané projekty geofyzikálního průzkumu připraveny podle požadavků zadavatele, či zda by nebylo k vyřešení konkrétního úkolu ekonomičtější a efektivnější přizvat raději geofyziky než zadávat tradiční (a mnohem dražší hydrogeologický průzkum).

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
- 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 (3–D) model. Jsou to metody nepřímé a vyžadují pro jednoznačnou interpretaci opěrné geologické údaje. Je tedy účelné, aby průzkumné geologické a geochemické práce byly situovány na základě v předstihu provedených geofyzikálních prací. Proto existuje mezi geologickými, geochemickými pracemi a geofyzikálním průzkumem 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 vrtů, odběr vzorků a pod.
- předběžný geofyzikální průzkum a jeho předběžná interpretace
- optimální situování geologických a geochemických prací na základě předběžného geofyzikálního průzkumu
- reinterpretační geofyzikálních prací s využitím výsledků hydrogeologických, geologických a geochemických prací, ověření interpretačních modelů,
- případné doplnění geofyzikálního průzkumu pro ověření nových skutečností
- společná geologická a geofyzikální interpretace výsledků všech průzkumných prací.

Etapy vzájemné vazby geologie a geofyziky se mohou cyklicky opakovat.

2.2.2. Komplexnost geofyzikálních prací

Geofyzikálním průzkumem je prostředí charakterizováno na základě konečného počtu fyzikálních vlastností, které jen v určité omezené míře odrážejí složitost ekologické a geologické reality. Pro jednoznačnou interpretaci geologických a j. poměrů lokality je proto vhodné posoudit jejich projevy z většího počtu vstupujících fyzikálních vlastností, tj. aplikovat vždy optimální komplex několika geofyzikálních metod.

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 někdy nutné provádět geofyzikální měření nejen v rozsahu zájmové oblasti, ale v širší oblasti, 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 diskretních 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 a pod.

2. 3. Limitující faktory aplikovatelnosti geofyziky

Při volbě vhodné metodiky a posouzení aplikovatelnosti geofyzikálních metod významně rozhodují také *limitující podmínky měření*. Ty můžeme rozdělit do několika skupin – přístupnost 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 a pod. Zde se projevují nepříznivé limitující podmínky:

- rušivý fyzikální projev povrchových objektů (budov, plotů)
- možnost přístupu rozměrnější aparatury (od předmětů velikosti malé krabice po nákladní automobily) i operátorů
- možnost zaražení elektrod pro uzemnění či zapíchnutí geofonů
- omezení vlivem neprostupných porostů a terénních 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 (měření je obtížné) dat, tak i ve fázi jejich interpretace (problematická 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 povrchových uloženin* (přirozených 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 šumů N vzhledem k velikosti anomální odezvy sledovaných objektů proto ovlivňuje schopnost geofyzikální metody detekovat tyto objekty. Mezi šумы z tohoto hlediska zařazujeme jak vlivy parazitních fyzikálních polí (2.3.3.), tak i vliv nehomogenity okolního prostředí (2. 3. 3.).

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

- *prostorou* (hlavně vliv okolních nehledaných objektů, často mělkých 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 obrazy 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 zvýší i cenu měření.

Interpretace skutečného rozložení parametrů (byť 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 široká 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 operních údajů. Metody geofyziky jsou však přínosné i kvalitativně pro extrapolaci bodových údajů (vrty, vzorky, 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 4), a proto se zde soustředíme pouze na stručnou charakteristiku nejpoužívanějších metod při studiu ekologických zátěží.

3. 1. Geoelektrické metody

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

Dalšími parametry, které je možné zjistit geoelektrickými metodami a mohou mít vztah k studovaným vlastnostem prostředí (litologii, hydrogeologickým parametrům a pod.), jsou elektrická permitivita a 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 dáována přednost metodám, které jsou ekonomicky a technologicky méně náročné a mají vysokou informační schopnost.

3.1.1. Odporové profilování (OP)

Je nejpoužívanější geofyzikální metodou při studiu 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 vhněného do země. Přístrojové vybavení je nenáročné.** 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 profilu.

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 (viz příklad 6. 9) a pod. lze efektivněji realizovat symetrickými uspořádáními (Wennerovo WOP či Schlumbergerovo odporové profilování SOP).

3.1.2. 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 odporové kontrastních vrstev a poloh.

Nejpoužívanějším sondážním uspořádáním je symetrické, pak se sondování nazývá vertikálním elektrickým sondováním (VES).

3.1.3. Elektrická tomografie (ET) a multielektroodové uspořádání (MEU)

Pro detailní průzkum vertikálního řezu pod studovaným profilem je možno z odporových metod užít kombinace odporového profilování a sondování. To se provádí 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 velmi detailní interpretaci vertikálního řezu. Taková měření se někdy označují ne zcela přesně jako *elektrická tomografie* (ET). ET v užším slova smyslu vyžaduje měření mezi elektrodami umístěnými nejen na povrchu, ale i ve vrtech či pod zemí. Kombinovaná *profilové sondážní odporové měření* je také možné realizovat simultánně pomocí rozložení mnoha elektrod (*multielektroodové uspořádání* MEU – většinou v ekvidistantních bodech profilu), které jsou střídavě používány jako zdrojové a měřicí a jsou napojeny na automatickou multikanálovou odporovou aparaturu. Tato měření jsou nadbytečně náročná a výsledky interpretace málokdy dosahují očekávání.

3.1.4. Měření přirozených a umělých elektrických polí

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 které 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 zkreslují přirozený vertikální gradient potenciálu v zemi a
- *difúzní* (DP) a *filtrační potenciály* (FP), vznikající difúzí iontů v podzemní vodě a filtrací podzemní vody (s nosiči el. náboje – ionty) průlnitým heterogenním geologickým prostředím.

Oba tyto typy polí mohou mít i antropogenní původ – ORP mohou být spojeny s místy koroze kovových produktovodů, potrubí, podzemních nádrží a j. objektů, FP mohou být vyvolány prolínáním vody místy porušení ochranných podzemních stěn, hrází, bariér a pod. Velikost polí FP (1 – n.10 mV) 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 slouží ke sledování pohybů podzemní vody, určení míst porušení těsnících hydrogeologických bariér, úniků z produktovodů a pod., kde je využíváno vzniku filtračního potenciálu. Vzácně se metoda SP uplatnila při detekci míst koroze produktovodů, kde vznikají slabá pole ORP.

Metoda vyzvané polarizace (VP)

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). Charakter ubývání pole (dynamika pole VP) závisí na chemických a fyzikálních podmínkách třířázového geologického prostředí a lze proto usuzovat na přítomnost určitých látek. Pole VP je možné registrovat i frekvenčně buzeným polem (*frekvenční varianta metody VP*). Při řešení vlivů starých zátěží je využívána metoda VP jen zřídka, zvláště proto, že vztah sledovaných složek kontaminace (spec. různých ropných produktů) a pole VP je složitý a nejednoznačný.

Metoda nabitého tělesa (NT)

V *metodě nabitého tělesa* se měří potenciál či napětí uměle zavedeného elektrického pole na povrchu v okolí proudové elektrody, uzemněné do vodivé dotované (uměle vodivé – prosolené) 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, dochází-li k výraznému vodivostnímu kontrastu.

3.1.5. Metoda velmi dlouhých vln (VDV)

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

V tzv. *odporové variantě metody VDV* (VDV–R) se měří pomocí cívk a uzemněných elektrod kromě magnetických i elektrické složky pole radiostanic elektrod. 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.

Nevýhodou metody VDV je silný vliv umělých vodičů (hlavně vysokonapětových vedení), které často vytváří rozsáhlé a velké anomálie, zastiňující projevy geologických vodičů. Dalším problémem je nejasná perspektiva navigačních radiostanic, které v poslední době jsou nahrazovány družicovými navigačními systémy typu GPS (global positioning system).

3.1.6. Aktivní elektromagnetické metody

Dipólové elektromagnetické profilování (DEMP)

Aktivní EM metody tvoří velmi rozsáhlou skupinu metod s vlastním zdrojem (proto aktivní) se střídavým polem (DEMP, konduktometrie atd.) nebo pulzním (přechodové sondování).

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 Hz) určují hloubkový dosah. Moderní aparatury jsou multifrekvenční (měří na několika frekvencích a při různých vzdálenostech antén). 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.). **Přístrojové vybavení pro EM metody je náročnější než u odporových metod a ve vodivém prostředí mají limitovaný hloubkový dosah (cca 10 m). Kromě toho jsou často nepříznivě limitovány elektromagnetickými šumy. V zahraničí jsou používány velmi často právě pro svou schopnost identifikovat mělce uložené vodivé zóny (například mělké zvodně založené na strukturních prvcích), které mohou být transportními cestami šíření kontaminace.**

Konduktometrie (Kond)

Jsou-li výstupem aparatury hodnoty vodivosti prostředí, označujeme metodu jako *konduktometrii*, která efektivně nahrazuje odporové profilování pro velmi mělké průzkumy. Konduktometry mají většinou menší vzdálenost cívek než u DEMP (někdy i jen jednotky metrů) a tím mají i menší hloubkový dosah. Často jsou cívky (antény) konduktometrů pevně propojeny tyčí.

Přechodové sondování (PS)

Přechodové sondování (PS), které nahrazuje metodu VES, není u nás (bohužel) využíváno pro nedostatek vhodných aparatur. Využívá se pulzních (přechodových) EM polí. Rozměry uspořádání (velikost zdrojových a měřicích cívek na povrchu země) pro zajištění požadovaného hloubkového dosahu je ve srovnání s metodou VES menší a terénní měření je méně náročné.

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.

3.1.7. Georadar

Georadarová metoda nebo také georadar či radiolokační metoda (GPR – angl. ground penetrating radar) je založena na vyslání EM pulzů o vysoké vlastní frekvenci (50 – 1 000 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 je transformován na hloubky reflexních ploch podle zjištěné či odhadnuté rychlosti šíření EM vlny v prostředí (příklady 6.7 a 6.8).**

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

projevem nesolidnosti prováděcí firmy. Georadar patří mezi nejpopulárnější metody mělkého průzkumu v zahraničí (zvláště v regionech s mělkým pokryvem či s výchozy nevodivých hornin).

3. 2. Mělká seismika

3.2.1. Mělká refrakční seismika (MRS)

Pro sledování stavu horninového masívu a jeho nadloží je u nás nejvíce využívána *mělká refrakční seismika (MRS)*. 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 přes km/s. Nežpevněné pokryvné uloženiny, podobně jako antropogenní uloženiny (např. skládkový materiál), mají malé rychlosti ve stovkách m/s. Příklady aplikace seismických metod jsou uvedeny v 6.2.**

3.2.2. Mělká reflexní seismika (RXS)

Mělká reflexní seismika (RXS) se zabývá registrací a analýzou vln odražených od rozhraní pod povrchem. U nás zatím kvůli nedostatku cenově přístupného přístrojového vybavení a zpracovatelského softwaru **není příliš používána**. Jedná se o metodu široce používanou pro hluboký průzkum naftových ložisek (díky čemuž je vybavena nejvyšší kvalitou softwaru), je však velmi perspektivní i v mělkém průzkumu.

3.2.3. Seismická tomografie (ST)

Prozařování horninového bloku mezi vrty či důlními díly a povrchem je možné pomocí seismické tomografie. 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 jen velmi vzácně pro speciální a detailní výzkum stavu a porušení horninového masívu, příp. lokalizaci dutin.**

3. 3. Magnetometrie

Anomálie geomagnetického pole jsou způsobeny přítomností horninových typů a umělých objektů s kontrastními magnetickými vlastnostmi. Měření se provádí většinou protonovými magnetometry, někdy přesnějšími atomovými (např. cesiovými) magnetometry. *Magnetometrie* nebo též *(geo)magnetická měření (Mag)* slouží k detekci podzemních objektů s kontrastními magnetickými vlastnostmi – magnetickou permitivitou či susceptibilitou (z feromagnetických materiálů, hlavně železných a ocelových), pro mapování magneticky kontrastních litologických typů a pod.

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 detektorů kovů (metaldetektorů

MTD), které je vhodné pro vyhledání mělce uložených i menších obecně kovových objektů, zatímco Mag 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 kapa). Těto vlastnosti lze využít i při orientačním vymezení znečištění půd resp. zemin.

3. 4. Gravimetrie

Gravimetrie (Gra) je založena 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.**

3. 5. Termometrie

Tepelné pole Země je produkováno rozpadem radioaktivních prvků, teplo uvolňované při mechanických pohybech zemských ker a p. **Lokálními zdroji teplotních anomálií při povrchu jsou jednak výstupové cesty podzemních vod (extrémní kontrasty u termálních vod) a chemické procesy a hoření přirozené i v umělých deponiích.** Měření se provádí kontaktními (termistory) nebo bezkontaktními termometry (infračervené snímáče). Pro rozsáhlejší oblasti je možné využít i dálkového snímání (letecky, družice) v intervalu infračerveného záření. Pozemní teplotní měření (Term) je účelné provádět za podmínek kontrastních klimatických změn, pod pokryvkou sněhu a pod., kdy se méně projevují 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. Registruje se úhrnná aktivita nebo pomocí spektrometrů (*spektrometrie gama* – SG) se diferencují projevy s různou energií jaderného záření. **Zřídka se používá 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.

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 vzdáleností nejvýše 1 m), kapaliny ve vrtu a geometrické parametry vrtu (sklon, průměr a p.), je označována často jako *karotáž*.

Podle *principu* je rozděluje na metody

- elektrokarotážní,
- jaderné,

- akustické
- technické.

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

Podle *účelu aplikace* se karotážní metody člení na

- metody pro ověřování litologie,
- metody pro kontrolu technického stavu vrtu,
- metody hydrokarotážní, které řeší poměrně detailní hydrogeologické podmínky v okolí vrtu na základě komplexní interpretace souboru dat.

3. 7. 1. Metody pro ověřování litologie

Komplex těchto metod (viz příklad 6.15) zahrnuje odporovou elektrokarotážní metodu a jaderné metody (gama, neutron neutron, gama gama):

– *Odporová elektrokarotáž* (Ra) měří zdánlivý měrný odpor potenciálovými sondami o délkách např. 0.1 a 0.4 m. Dosah do stěn vrtu je roven asi délce použité sondy. **Metoda slouží ke stanovení litologie, vymezení vodivých poloh** (např. puklinových zón či kolektorů s kontaminovanou či vysoce mineralizovanou podzemní vodou a pod.).

– *Gama karotáž* (GK) měří souhrnnou přirozenou radioaktivitu hornin scintilačním detektorem. Měřenou veličinou je počet impulzů za min (CPM – counts per minute). **Metoda slouží k litologické diferenciaci řezu, stanovení jílovitosti a také pro určení přirozené radioaktivity prostředí.**

– *Neutron neutron karotáž* (NNK) registruje množství zpomalených neutronů prošlých horninou ze zdroje rychlých neutronů (např. Am–Be). Naměřené hodnoty v CPM jsou nepřímo úměrné množství atomárního vodíku v dosahu do asi 0.5 m a odráží množství vodíku ve vodě i vázaného v jílových minerálech (vodíkový index). **U nasycených hornin slouží metoda k určení pórovitosti P(%).**

– *Gama gama karotáž* (GGK) měří množství sekundárního záření gama generovaného ozařováním horniny izotopem Cs¹³⁷. **Četnost detekovaného záření v CPM je nepřímo úměrná hustotě hornin v bezprostředním okolí** (proto také hustotní karotáž – výsledky v jednotkách hustoty g.cm⁻³).

3. 7. 2. Metody pro kontrolu technického stavu vrtu

Kromě zaměření odklonu osy vrtu (*inklinometrie IM*) a dalších geometrických parametrů sem patří:

– *Kavernometrie* (KM), která slouží k spojitému sledování skutečného průměru vrtu tříramennou sondou. Zejména v nesoudržných a jílovitých horninách se tvoří kaverny. **Metodou se dobře indikují rozpukané polohy v pevnějších horninách. Výsledky kavernometrie jsou také využívány k opravám dalších měření, které jsou změnami průměru nepříznivě ovlivněny.**

– Již zmíněnou *gama gama karotáž* (GGK) a také *akustický cementoměr* (AC) 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.

3. 7. 3. Hydrokarotážní metody

Metody přispívající k řešení otázek hydrogeologie jsou (viz příklady 6.16, 6.17, 6.18 a 6.19):

– **Rezistivimetrie (RM)** měří měrný elektrický odpor vody ve vrtu, který je nepřímo úměrný její celkové mineralizaci. Po označení vody ve vrtu solným roztokem se používá metoda ke zjišťování propustných poloh (místa přítoků do vrtu) a jejich hydrogeologických parametrů.

– **Metodou ředění označené kapaliny lze určit horizontální proudění ve vrtu na základě ředění dotované vody ve vrtu přirozeným přítokem z horninového prostředí.** Pokud neexistuje pohyb vody ve vrtu, je možno zjistit propustné polohy metodou odčerpání, příp. nálevu. Dosáhne-li se v těchto metodách vyrovnaného stavu (čerpání či nálev vody do vrtu o konstantní vydatnosti), lze spočítat hodnotu koeficientu filtrace propustných poloh.

– **Odporové metody (Ra) makro– i mikroodporové (s malým uspořádáním) se používají pro litologické členění ve vrtu, vymezení puklinových zón a propustných poloh, určení kontaminace podzemních vod.**

– **Metoda spontánní polarizace vymezuje propustné polohy a určuje jílovitost.**

– **Termometrie měří skutečnou teplotu vody ve vrtu, přispívá k zjištění pohybu (dynamiky) vody ve vrtu, určení teploty horninového prostředí, skládkového materiálu a p.**

– **Fotometrie měří optickou čírost vody ve vrtu, slouží zejména ke kontrole vyčištění vrtu od výplachu či příp. rozvrtných jílovitých hornin.**

– **Pro zjišťování pohybu vody ve vrtu se používají různé typy průtokoměrů.**

– **Akustická (ultrazvuková, přesněji seismická) karotáž přispívá k určení pórovitosti a puklinatosti.**

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 letadel, družic a p.), které je označováno jako *dálkové snímkování*. Většinou se provádí registrace či snímkování elektromagnetického záření odraženého nebo vyzařovaného povrchem Země. Pro rozsáhlejší projekty je možné realizovat vlastní dálkový průzkum z balónů či helikoptér, který 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.

4. Normy a literatura

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

ČSN 038375, 038360, 038361, 038363

Grinbaum, I.I., 1965: Geofizické metody opredelenija filtracionnyh svoystv gornych porod. Nedra, Moskva

Gruntorád, J., et al., 1985: 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

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

Karous, M., Mareš, S., 1988: Geophysical methods in studying fracture aquifers. Charles University Prague

Karous, M., 1992: Geoelektrické metody průzkumu při zajišťování bezpečnosti skládek průmyslových a komunálních odpadů. Geologický průzkum 8/1992 Praha, str. 228–231

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 Č. spol. pro bezvýk. techn. roč. 3, č. 2, 14–20, Praha

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 užité 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

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

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

Ward, S.H. (Editor), 1990: Geotechnical and environmental geophysics, Vol. I – III. SEG Tulsa Oklahoma

5. Použití geofyzikálních metod při řešení konkrétních otázek vlivu ekologických zátěží

5. 1. Geologická, litologická a hydrogeologická charakteristika zájmového území

5.1.1. Geologická stavba území

Znalost detailní geologické stavby zájmového území pomáhá určit potenciální možnosti vlivu a příp. šíření ekologické 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.

Vertikální profily

Pro zjištění vertikálního litologického profilu v daných bodech se používají sondážní geofyzikální metody, u nás převážně odporové sondování. 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.

V zahraničí jsou používány i formy elektromagnetického sondování frekvenčního a přechodového, u kterých je uspořádání menší než u VES pro dosažení stejné hloubky.

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*, méně často i *mělká reflexní seismika*. Sondážní geofyzikální průzkum je určen také k odlišení nepevných uloženin pokryvných útvarů a podložních hornin

– pro detailní studium vertikálního řezu se také používá odporového sondování v ekvidistančních bodech profilů nebo

profilování s několika rozestupy. Automatizovaná simultánní měření obou typů se provádí tzv. multi Elektrodovým uspořádáním.

5.1.2. Hydrogeologický režim v pokryvu

Litologie a mocnost pokryvu

Rozlišení litologických typů uloženin v pokryvu je důležité pro odlišení jejich hydrogeologické funkce. Nepropustné 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 nepevných 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.

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 nepevných uloženinách a sedimentech se využívá:

- *vertikální elektrické sondování*, je-li podzemní voda, resp. vodou nasycený kolektor výrazně vodivější (s vyšší mineralizací) než okolní prostředí,
- *mělká refrakční seismika* je úspěšná u nepevných uloženin (rychlost seism. vln do 1 000 m/s) nasycených plně podzemní vodou (kolem 1 500 m/s),
- *georadar* je nevhodnější, 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 organická barviva, radioaktivní látky). Elektrolyt (roztok NaCl) snižuje měrný odpor vody ve vrtu, monitorováním změny koncentrace soli s časem tzv. rezistivimetrií. Při existenci většího počtu vrtů se p.v. 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* (NT – viz příklad 6.3) 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 nepřilíš vodivě kontaminovaných.

Pro sledování směru (nikoli rychlosti) pohybu podzemní vody (p.v.) lze použít metodu spontánní polarizace, která využívá vytvoření filtračních potenciálů (FP) při pohybu p.v. průlinčtým prostředím. 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 několik 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.

5.1.3. Litologie podloží a jeho hydrogeologický režim

Při průzkumu podloží 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 – viz příklad 6.1 a 6.2).

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. 5.1.1.).

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.

Na těchto zónách dochází k výraznému odporovému kontrastu rozpukané a porušené zóny s vysokou pórovitostí, nasycené vodivou podzemní vodou, a pevnými horninami s malým obsahem porézní vody. **Významně se proto uplatňují odporové metody, metoda velmi dlouhých vln, elektromagnetické profilování a EM konduktometrie (viz příklad 6.1).**

U vodivých hornin (např. sedimentů s vyšší pelitickou – jílovitou složkou: jíly, jílovců, slínovců ap.) není dostatečný

kontrast odporů hornin (kolem deseti ohm) a vodivé porušené zóny (i vyšší jednotky ohm). V tomto případě lze využít u zpevněných sedimentů *mělkou refrakční nebo reflexní seismiku*, která vymapuje porušené zóny na základě výrazně snížených rychlostí seismických vln (viz příklad 6.2).

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

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 průzkumem. Volba metod geofyziky závisí na charakteru hydrogeologického kolektoru, zvláště jeho propustnosti (průlinová, puklinová, krasová).

V první řadě se používají geoelektrické a zvláště odporové metody. Jimi lze odhadnout některé parametry, např. pórovitost a puklinatost, jílovitost, propustnost, součinitel filtrace, průtočností a netěsnosti, vlhkost a stupeň nasycení vodou, migrační parametry a pod. Nejvhodnější pro taková zjištění jsou však *metody hydrokarotáže*, z povrchových metod mohou být (vzácně) úspěšná i pozemní odporová měření. Interpretace hydrogeologických parametrů z povrchových geofyzikálních měření je složitá a nejednoznačná a vyžaduje hlubší studium vzájemných vztahů mezi měřenými fyzikálními vlastnostmi a sledovanými parametry a často má pouze výzkumný význam.

Otázka mineralizace podzemních vod v přirozeném stavu je obdobná problematice jejich znečištění a je řešena v kap. 5.2.5.

5. 2. Antropogenní zásahy do prostředí

5.2.1. 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 mít ovlivňovat velmi rozsáhlá území a mít dalekosáhlé důsledky. Změny HGR se umělými zásahy mohou projevit ve vytvoření nových preferenčních linií cest proudění podzemní vody, např. umělými úmyslnými drenážemi, využíváním pohřbených koryt či zasypaných výkopů při pokládání inženýrských sítí, kanalizačních cest a pod.

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

5.2.2. Lokalizace a indentifikace 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:

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

B) nevodivé (keramická potrubí a pod.).

C) Zvláštní skupinu tvoří detekce skryté munice (příklad 6.5).

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 je důležitá nejen z hlediska jejich případného odstranění, ale i z hlediska situování vrtů a dalších otvirkových prací.

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). Viz kap. 6.7. Vodivé 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 (příklad 6.6). 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.

5.2.3. Koroze a perforace nádrží a produktovodů, úniky obsahu

Většina podzemních nádrží a produktovodů je provedena z kovových (vodivých) feromagnetických (ocelových) materiálů, které mají (nebo mají mít) protikorozi ochranu povrchovou izolací, která zároveň zajišťuje zamezení vodivého spojení s okolním geologickým prostředím. 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.

Existují tři skupiny metod, které mohou indikovat porušení stěn nádrží a produktovodů:

- a) detekcí vlastních korozních účinků, které se projevují vznikem slabých oxidačně-redukčních elektrických potenciálů (ORP),
- b) detekcí místa vodivého propojení obsahu objektu s okolním prostředím a
- c) indikací zdroje (centra či maxima šíření) kontaminace látkou unikající porušeným místem.

K detekci ORP lze použít metodu *spontánní polarizace*, většinou

však vyvolané anomálie jsou příliš malé, nedetekovatelné. Místa vodivého propojení obsahu produktovodu s okolím lze vyhledávat *metodou nabitého tělesa* se zdrojovou elektrodou umístěnou uvnitř, vývěr kontaminantu je zároveň pak místem vývěru proudového pole, které lze na povrchu detekovat měřením potenciálu. Místo úniku kontaminantu z produktovodu se pravděpodobně projeví jako místo s nejintenzivnější kontaminací okolního prostředí a lze pro ně použít metody sledování rozsahu kontaminace, popsané v kap. 5.2.5.

Vliv na korozi podzemních objektů má agresivita podzemních vod, korozivita prostředí, účinky bludných proudů a pod. Tato problematika je řešena tzv. korozním průzkumem, který zahrnuje rozbory vzorků půd a podzemní vody a měření měrného odporu prostředí a velikosti bludných proudů. Tento průzkum nebývá součástí studia starých zátěží, je prováděn pro stanovení ochranných opatření při stavbě nových stavebních objektů.

5.2.4. 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, uloženy). 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 je tímto postupem prakticky nezjistitelná.**

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 (příklad 6.8).

Podobné omezení se vztahuje i na odporové metody, které vyhledávají podzemní dutiny *kombinovaným profilově sondážním odporovým měřením* nebo pomocí *multielektrodového uspořádání*. 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.

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.

5.2.5. 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 příp. již povrchově sanovaných i průzkum rozsahu skládky, kvality skládkového materiálu a pod.**

Skládkované materiály jsou v přírodě vždy anomálním objektem a projevují se velmi často výraznými kontrasty fyzikálních vlastností nebo jejich plošnou či prostorovou variabilitou.

Většinou jsou skládkované materiály nasycené (díky chemickým reakcím vodivou) 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. V případě např. deponie stavebního odpadu bývají odpory vyšší. Odporový kontrast v obou případech bývá postačující pro vymapování rozsahu skládky *odporovými metodami*, které jsou proto 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 (příklady v kap. 6.9).

Roztroušené železné předměty jsou zjištělné detailní *magnetometrií* a mapy anomálií totálního vektoru nebo vertikálního gradientu vykazují často vyšší chaotičnost (vysoký horizontální i 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/cm³). To předurčuje úspěšnost *seismických metod* a *gravimetrie*, které jsou však technologicky náročnější a aplikují se až v případech, kde odporové metody nemají předpoklady pro úspěch.

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

V zahraničí je velmi často při průzkumu skládek používán *georadar*, hlavně pro detekci různorodých objektů v tělese skládky, určení mocnosti skládky, její stratifikace a pod. (příklad 6.7).

Problematika zjištění *mocnosti skládky* je obdobná určení mocnosti nepevných sedimentů, a podobně jako otázka hloubky a charakteru geologického podloží byla již diskutována v kap. 5.1.2. 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 a pod.) ve skládkovém materiálu, které vyvolávají nehomogenní teplotní anomálie, mohou být indikovány i *termometrií*.

5.2.6. Rozsah a šíření kontaminantu

Zdrojem kontaminantu mohou být úniky z různých typů skládek, úložišť a p. (vyluhování atmosférickými srážkami), nadzemních a 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 rozděluje zdroje kontaminace prostředí na bodové, omezené či lokální (např. skládky) a plošné (spady, hnojení), podle doby působení na jednorázové a déletrvající. 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 jejího 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 (viz příklad 6.19) 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 (viz příklady 6.11, 6.12, 6.13). 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 zjištělná 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*. Větší úspěchy může mít monitorování změn, zvláště jsou-li k dispozici měření stavu před kontaminací. Prakticky nemožné je z povrchových měření zjištění tenké vrstvy lehkých ropných produktů na hladině p.v. Využití stínícího efektu této vrstvy pomocí tzv. ponořené elektrody umístěné pod touto vrstvou vyžaduje jednak vrt pro uzemnění elektrody, jednak je úspěšné jen velmi vzácně.

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.

5.2.7. Monitoring důsledků sanačních 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 efektivním způsobem změny fyzikálních parametrů a zprostředkovaně změny sledovaných parametrů (např. kontaminace podzemní vody). Tato monitorovací měření se provádí nejčastěji *odporovými metodami* – *profilováním* i *sondováním*, na němž se projevují změny v měrných odporech a zprostředkovaně změny v kvalitě a intenzitě kontaminace (příklady 6.11, 6.13, 6.14, 6.18). Efektivněji lze mělké změny vodivosti zeminy sledovat konduktometrií nebo elektromagnetickým profilováním (příklad 6.12). 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* (příklady 6.18 a 9.19).

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 síť uzemnění, na nichž se projevují změny v uzemňovacích podmínkách, např. změny vodivosti bezprostředního okolí

způsobené únikem skládkových kapalin při perforaci ochranné fólie. Lze také aktivně sledovat změny odporů prostředí spojené s úniky skládkové vody ochrannými izolacemi a pohybem kontaminovaných výluhů ze skládky (příklad 6.20).

6. Příklady komplexních řešení vybraných problémů

V literatuře uvedené v kap. 4 je uvedena řada úspěšných příkladů aplikace geofyzikálních metod při řešení obecných problémů ochrany životního prostředí. Řada těchto příkladů, zvláště těch metodicky ilustračních, se objevuje opakovaně v naší i zahraniční literatuře (např. *Benson, Glaccum a Noel 1982, Karous 1993, Karous et al. 1993, Mareš et al. 1983, Mareš et al. 1990, Vogelsand 1994*). V této příručce jsou uvedeny další příklady použití geofyzikálních metod v konkrétních projektech průzkumu a nápravy starých ekologických zátěží v podmínkách České republiky, na nichž jsou demonstrovány jejich možnosti. Na rozdíl od zvyklostí jsou uvedeny i některé příklady nevhodné aplikace či interpretace geofyzikálních metod.

Uvedené příklady je nutno chápat jako obecnou ilustraci o možnostech geofyzikálních metod řešit velmi širokou škálu problémů z oblasti průzkumu a nápravy starých zátěží.

Pozn.:

Příklady mají demonstrovat hlavně použitelnost, přínosnost a metodický postup geofyzikálních metod. Z tohoto důvodu nejsou uvedeny ani názvy projektů ani jména lokality. Geologické podmínky jsou uvedeny jen v rozsahu nezbytně nutném pro pochopení.

Každý příklad je ilustrován obrázkem, který má stejné číslo jako je číslo příkladu (např. 6. 1).

6. 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 Ωm , pokryvné útvary mají nižší odpory (stovky Ωm) a mocnost 1 – 5 m. Snížené odpory v podloží lokalizují místa poruch (o) – propustnějších zón, které jsou potenciálními cestami vyšších rychlostí proudění podzemních vod s příp. kontaminací. Interpretaci potvrdily následné vrtné práce (V4 – V6).

6. 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 odpory pod 2 km/s. Pokryv (eluvialní hlíny) má velmi nízké rychlosti ve stovkách m/s.

6. 3. Určení směru a rychlosti proudění podzemní vody metodou nabitého tělesa:

V propustných fluvialních 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 m/den = $8 \cdot 10^{-6}$ m/s.

6. 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 jílů. V podloží navážek jsou vymapovány reliktu fluvialních jílů (Q1) a štěrkopísků (Q2), které je možno diferencovat podle svých měrných odporů (10, resp. 35 Ωm). Materiál skládky a navážek má velmi proměnné odpory 7 – 1 500 Ωm . 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.

6. 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 izolinií 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).

pozn.: obrázek umístěn na obálce

6. 6. Přesná detailní magnetometrie pro detekci zbytků podzemních konstrukcí a inženýrských sítí:

Necitlivě demolovaná oblast průmyslových a těžebních továren skrývá dosud pod navážkami zbytky průmyslových objektů a zdrojů kontaminace podzemních vod. Velice přesná a detailní měření pomocí cesiových magnetometrů poskytují velmi dobrý obraz rozmístění železných a ocelových konstrukcí pod povrchem. Další skryté objekty byly na této lokalitě mapovány georadarem, prázdné podzemní prostory detailní gravimetrií a průběh nevodivého podloží antropogenní vrstvy byl sledován seismikou.

pozn.: obrázek umístěn na obálce

6. 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 (a, b) a ke zjišťování stratifikace prostředí (a, c). Na uvedených příkladech je ukázka georadarových řezů (černobílé kopie barevných řezů) nad potrubím uloženým v eluviu žul (a, b) a na profilu vedeném přes divokou skládku (c), která vznikla zaplněním vytěženého prostoru pískovny v náplavových uloženinách Dunaje. Skládky se projevují ztrátou korelace střídání vrstev jílovitých a písčitých sedimentů.

6. 8. Přeceněný hloubkový dosah georadarového řezu:

Velmi často jsou přeceňovány jak detekční schopnosti georadaru, tak i jeho hloubkový dosah (v našich odporových podmínkách nejvýše do 10 m). Nevhodným zesílením signálů na větších časech (násobné odrazy od mělkých nehomogenit a vlastních antén) vzniká falešná odrazná plocha ve velkých hloubkách, již je přisuzován geologický význam. Příkladem je řez na obrázku, kde jsou se skloněným povrchem rovnoběžná "rozhraní" interpretována jako zvrstvení neogenních sedimentů (ve skutečnosti horizontální vrstvy o odporech kolem 5 Ωm) do hloubek až 35 m (!). Tato skloněná "rozhraní" jsou navíc zesílena ruční kresbou do řezů. V hloubce 30 m jsou dokonce interpretovány vytěžené prostory (šrafované), které nebyly ani jedním vrtem potvrzeny a ani se neprojevují v původním řezu. Reálný hloubkový dosah je asi do 4 m, v němž se projevují horizontální vrstvy neogenu.

6. 9. Mapování skládky odporovým profilováním se dvěma rozestupy elektrod:

Mocnost skládky se určuje vertikálním odporovým sondováním (VES) a seismickou refrakcí (MRS). Za příznivých podmínek lze nahradit obtížnější sondování dvěma profilováními (OPx2) s různými rozestupy. Na obr. je uveden příklad mapy izoliní odporů podle jednoho z profilování, interpretovaná mocnost skládky podle OPx2 a mapa mocností zjištěná podle následného vrtání. Hostujícím prostředím skládky jsou fluvialní sedimenty, pod nimiž v hloubce kolem 15 m leží neogenní jílovité sedimenty.

6. 10. Mapování skládky komplexem geofyzikálních metod:

Příklad mapování rozsahu a mocnosti tuhého komunálního odpadu (TKO) vršeného do mocností až 3 m volně na povrchu s využitím menších depresí ukazuje možnosti jednotlivých metod. Materiál se na podložních horninách projevuje vodivě v metodě VDV (a) i ve Wennerově odporovém profilování (c) a odporovým řezem podle VES (d). Železné předměty a armované úlomky panelů vyvolávají magnetické anomálie (b).

6. 11. Zjištění úniků skládkové vody do podloží pomocí odporových metod:

Vysoce vodivá voda unikající se skládky vápenných kalů proniká do podložních neogenních jílovitých sedimentů a snižuje

jejich měrný odpor (10 – 15 Ωm) o více než řád (pod 1 Wm). Kontaminovaná voda v podloží je od SV vytlačována nekontaminovanou vodou, která nesnižuje měrný odpor sedimentů. Vlastní vápenné kaly mají odpory 0.5 – 3 Ωm . Kombinovaná odporová měření profilováním a sondováním ukazují rozsah a postup kontaminace. Podzemní těsnicí stěna brání šíření kontaminantu.

6. 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 profilováním (DEMP). Příklad na obrázku uvádí aplikaci EM aparatury Geonics EM 34–3 pro zjištění rozsahu kontaminace podzemních vod v antropogenních uloženinách popílků, které jsou odpadním produktem chemické výroby a jsou ukládány na terciérních jílech a jílovcích.

6. 13. Průzkum rozsahu a šíření kontaminace:

V průmyslových objektech existuje značné množství podzemních 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).

6. 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 Ωm , což svědčí při dané pórovitosti prostředí o měrném odporu p.v. pod 0.1 Ωm (pro srovnání pitná voda má kolem 20 – 40 Ωm). Jedná se o extrémně kontaminované prostředí v blízkosti chemického závodu.

6. 15. Vyhodnocení litologie podle karotáže:

Z karotážních záznamů lze upřesnit litologii blízkého prostředí a litologická rozhraní. Na obrázku je uveden příklad moderního zpracování karotážních měření. V 1. sloupci je výsledek složkové analýzy sedimentů ve formě procentuálního zastoupení jílu, písčité složky a pórovitosti. Ve 2. sl. jsou křivky gama karotáže GK, neutron karotáže NK a pórovitosti podle NK, ve 3. sl. je geologický a karotážní profil, 4. sl. elektrokarotáž Rap 0.4 a 1.6 m, 5. sl. – rychlost podélných akustických vln, průměr vrtu a průběhový čas

podle akustické karotáže, 6. sl. – výsledný litologický profil a 7. sl. – číselné hodnoty vybraných parametrů.

6. 16. Proudění podzemní vody ve vrtech v krystaliniku:

Rezistivimetrií lze sledovat přírodní proudění podzemní vody (p.v.), dochází-li k diferencí v měrných odporech výplachu a podzemní vody. Na obrázku je příklad hydrokarotáže tří vrtů z krystalinika. Na vrtu HV28 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 HV615 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 RK20 je velmi malé horizont. proudění v intervalu 19 – 25 m, $V_a = 1,2 \cdot 10^{-6}$ m/s.

6. 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 prostupný interval je $K = 10^{-4}$ m/s.

6. 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 koniacích 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 tři sondážní křivky VES změřené před zahájením těžby (1965) a v letech 1989 a 1990, ukazující na kontaminaci turonského kolektoru. Snížení měrného odporu kolektoru o více než 40 % znamená téměř dvojnásobné zvýšení obsahu polutantů.

6.19. 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).

6. 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 těsnící 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).

6. 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 (refrakuje). Rychlost klesne na cca 1 300 m/s. Výsledky měření byly ověřeny vrtnými pracemi.

6. 22. Použití gravimetrie při vyhledávání speciální kontaminace:

Gravimetrie byla aplikována pro vyhledání masivního znečištění rtuť (Hg). Při modelování byly využity všechny dostupné informace o geologii podloží, charakteru navážek (kvarteru) a konstrukce objektu ve kterém bylo měření provedeno. Prostor s masivním znečištěním Hg zvýšenou měrnou hmotností a projevuje se drobnými lokálními maximy.

6. 23. Detekce dehtů pomocí gravimetrie:

Gravimetrie byla využita pro vyhledání reliktů 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).

pozn.: obrázky 6.21. – 6.23. jsou umístěny na obálce

5.3.A. Tabelární přehled použití geofyzikálních metod při sanaci starých zátěží (kvantitativní hodnocení)

Řešená problematika průzkumu a nápravy starých ekol. zátěží	Geofyzikální metoda																				
	odporové profilování	odporové sondování	metoda nabitého tělesa	spontánní polarizace	vyzvaná polarizace	metoda VDV	EMP konduktometrie	detektory kovů	georadar	refrakční a reflexní seismika	magnetometrie	gravimetrie	termometrie	radiometrie	hydrokarotážní metody	litologická karotáž	technický stav vrtu	letecké metody a dálkové snímání			
	E	T	M	E	T	M	E	T	M	E	T	M	E	T	M	E	T	M	E	T	M
geologické mapování	4	4	5	2	3	4	0	0	0	2	2	1	1	1	0	5	5	5	5	4	5
vertikální řez	2	2	2	4	4	5	1	1	1	0	1	1	2	2	1	2	4	2	2	2	0
hydrogeologický režim v pokryvu	4	4	5	4	4	5	4	3	5	4	4	4	3	3	2	5	5	2	5	4	5
hydrogeologický režim v podloží	4	4	5	3	4	4	2	3	3	1	2	4	1	2	3	5	5	5	2	3	4
hydrogeologická charakteristika prostředí	4	4	5	4	4	4	3	3	4	4	4	4	2	2	3	3	3	4	4	4	0
umělé drenáže	4	4	5	4	4	4	1	1	2	2	2	4	1	1	3	4	5	3	4	4	5
vodivé produktovody a nádrže	3	4	5	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	5	5	5	5	4	4	5
korozí a perforace úniky	3	4	3	2	2	1	3	3	4	4	4	4	3	3	4	3	5	5	4	4	2
podzemní dutiny	3	3	3	3	3	2	1	1	2	1	1	1	2	1	1	2	3	2	4	3	3
stav a šíření kontaminované zóny	4	5	5	4	4	5	3	3	4	4	5	4	3	3	4	2	2	1	5	5	0
vyhledávání a průzkum starých ekol. zátěží	5	5	5	4	4	4	2	2	1	3	3	3	2	1	2	4	4	2	5	5	5
monitoring	4	4	5	4	4	5	1	2	1	1	1	0	0	0	0	2	2	0	4	4	5

E - ekonomická náročnost, T - technologická náročnost, M - metodická vhodnost

5 - neoptimálnější, 0 - nejméně vhodné

5.3.B. Tabelární přehled použití geofyzikálních metod při sanaci starých zátěží (přehledné hodnocení)

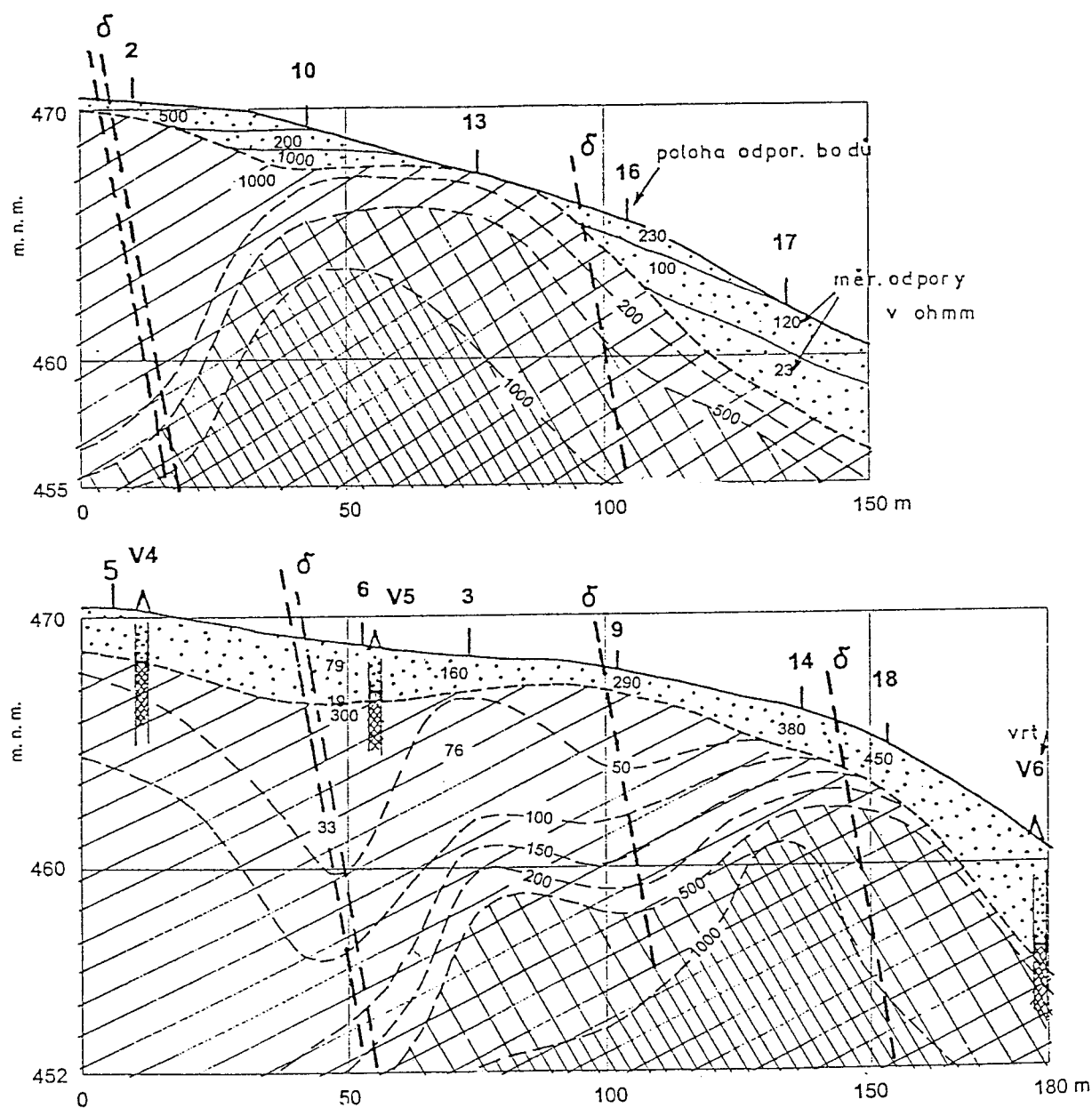
Řešená problematika průzkumu a nápravy starých ekol. zátěží	Geofyzikální metoda																	
	odporové profilování	odporové sondování	metoda nabitého tělesa	spontánní polarizace	vyzvaná polarizace	metoda VDV	EMP, konduktometrie	detektory kovů	georadar	refrakční a reflexní seismika	magnetometrie	gravimetrie	termometrie	radiometrie	hydrokarotážní metody	litologická karotáž	technický stav vrtu	letecké metody a dálkové snímkování
geologické mapování	●	○	×	○	×	●	●	○	●	○	●	○	○	●	○	○	×	○
vertikální řez	○	●	○	×	○	○	○	×	●	●	○	○	×	×	●	●	○	×
hydrogeologický režim v pokryvu	●	●	●	●	○	○	●	○	○	○	○	○	○	○	●	●	○	○
hydrogeologický režim v podloží	●	●	○	○	○	●	○	×	○	○	○	○	○	○	●	●	○	○
hydrogeologická charakteristika prostředí	●	●	○	●	○	○	●	○	○	○	×	○	○	○	●	○	×	○
umělé drenáže	●	●	○	○	○	●	●	○	●	○	○	○	○	○	×	×	×	×
vodivé produktovody a nádrže	●	○	○	○	○	●	●	●	●	○	●	○	○	○	×	×	×	○
korozí a perforace korozivita	○	○	○	●	○	●	○	●	●	×	○	×	●	○	×	×	×	○
podzemní dutiny	○	○	○	○	○	○	○	○	●	●	○	●	○	○	×	×	○	×
stav a šíření kontaminované zóny	●	●	○	●	○	○	●	×	○	○	○	○	○	○	●	○	×	○
vyhledávání a průzkum starých ekol. zátěží	●	●	○	○	○	○	●	●	●	●	●	○	●	●	○	○	×	○
monitoring	●	●	○	○	×	○	●	×	○	○	○	×	○	●	●	○	×	○

● optimální

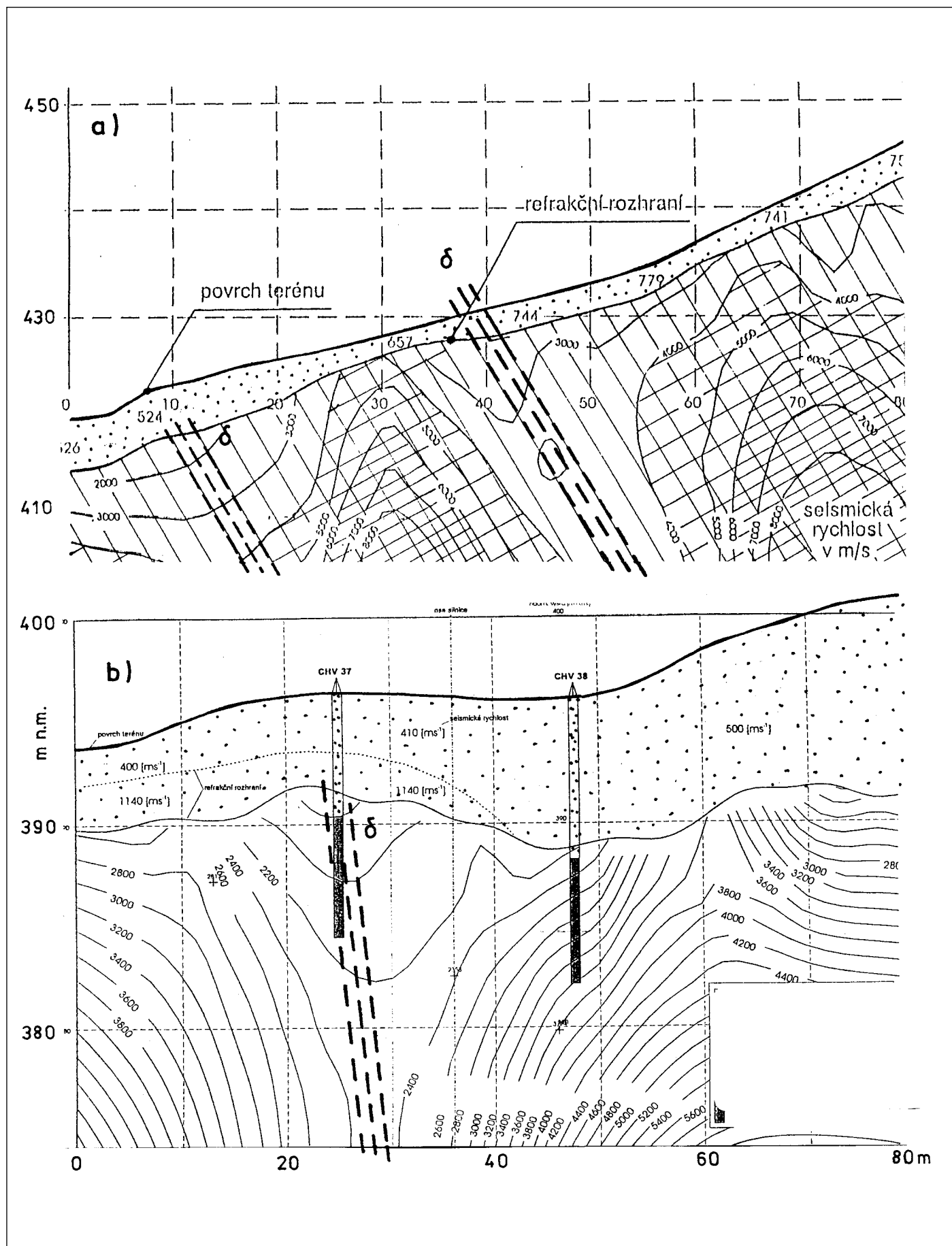
○ vhodné

○ vhodné za určitých podmínek

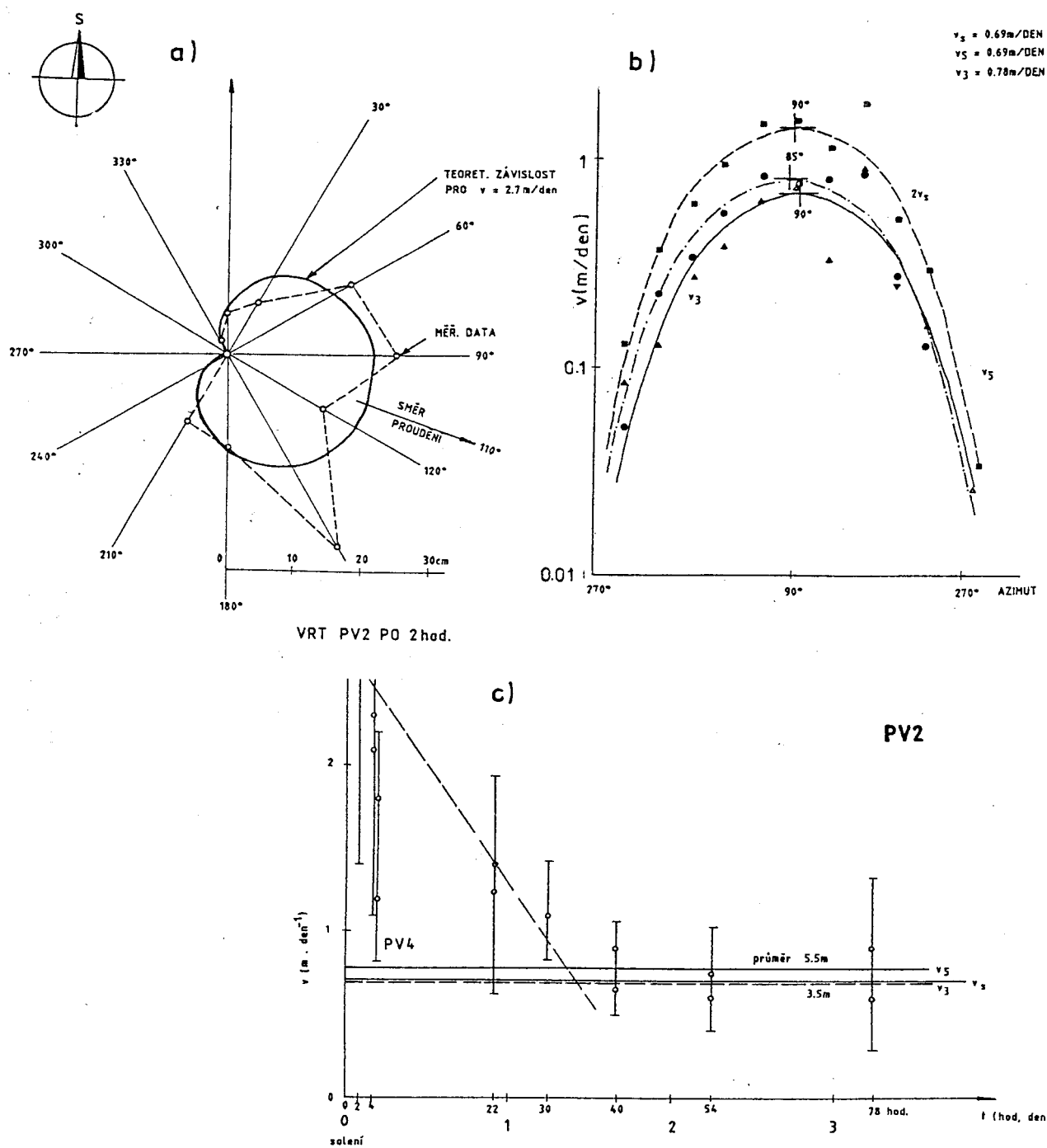
× nevhodné



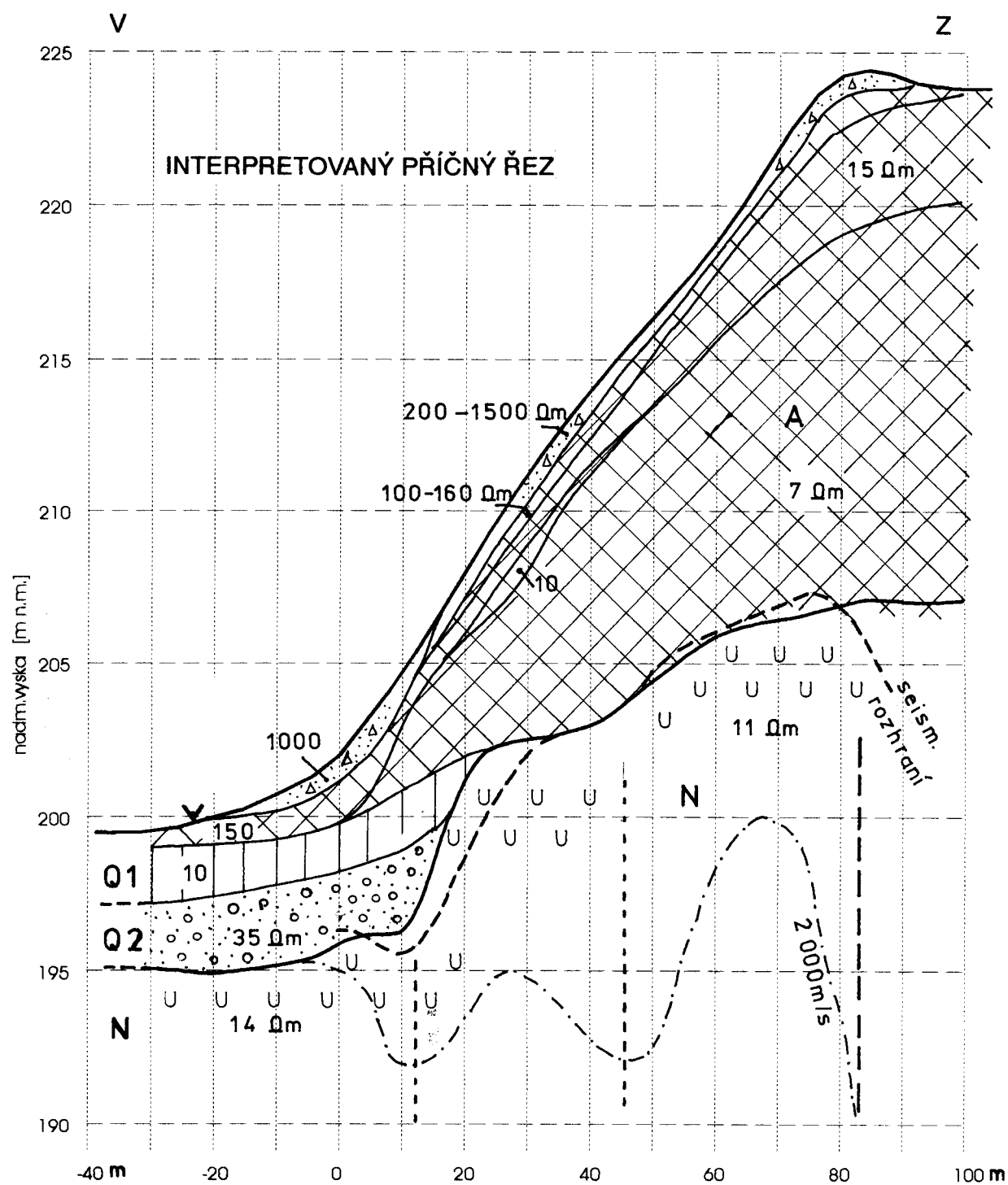
Obr. 6. 1. Vymezení hřbetu pevného podloží a mapování tektonických linií pomocí odporového sondování



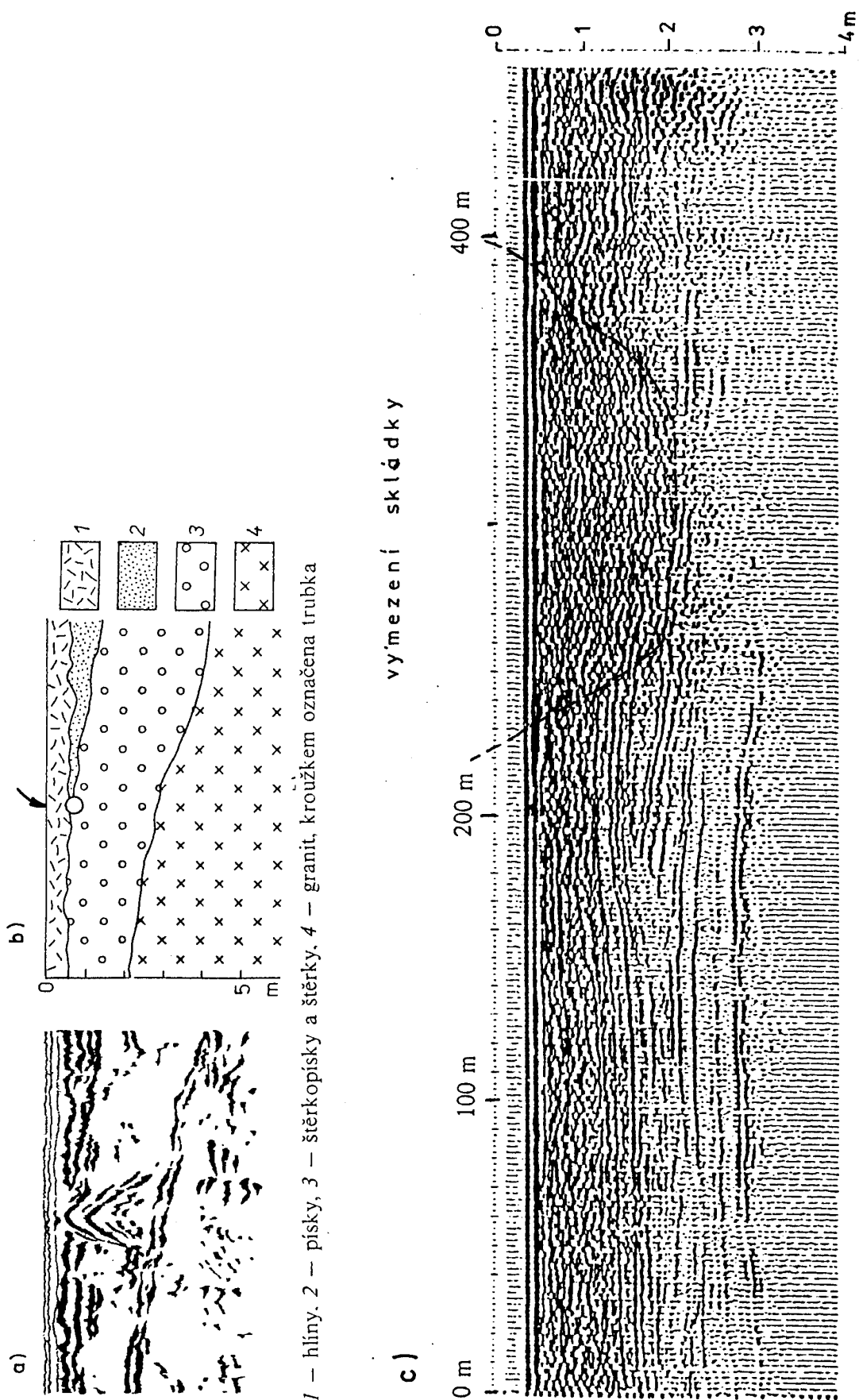
Obr. 6. 2. Vymezení hřbetu pevného podloží a mapování tektonických linií pomocí mělké refrakční seismiky



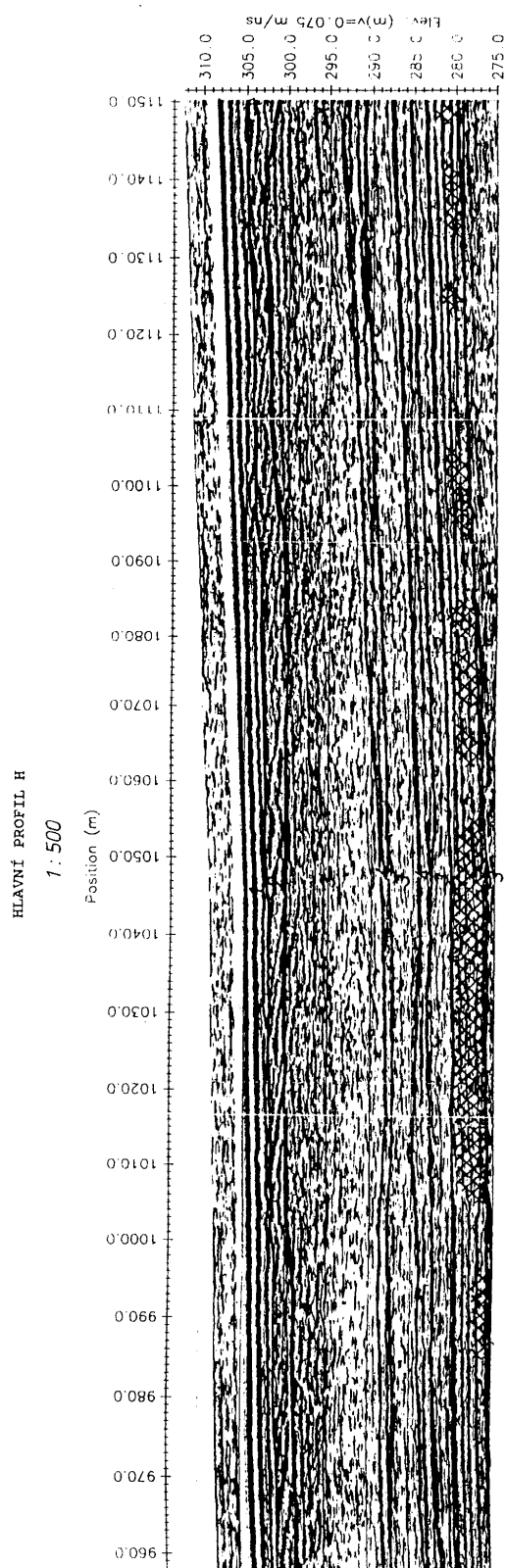
Obr. 6. 3. Vymezení směru a rychlosti proudění podzemní vody metodou nabitého tělesa



Obr. 6. 3. Určení mocnosti a složení antropogenních uloženin odporovým sondováním a mělkou refrakční seismikou

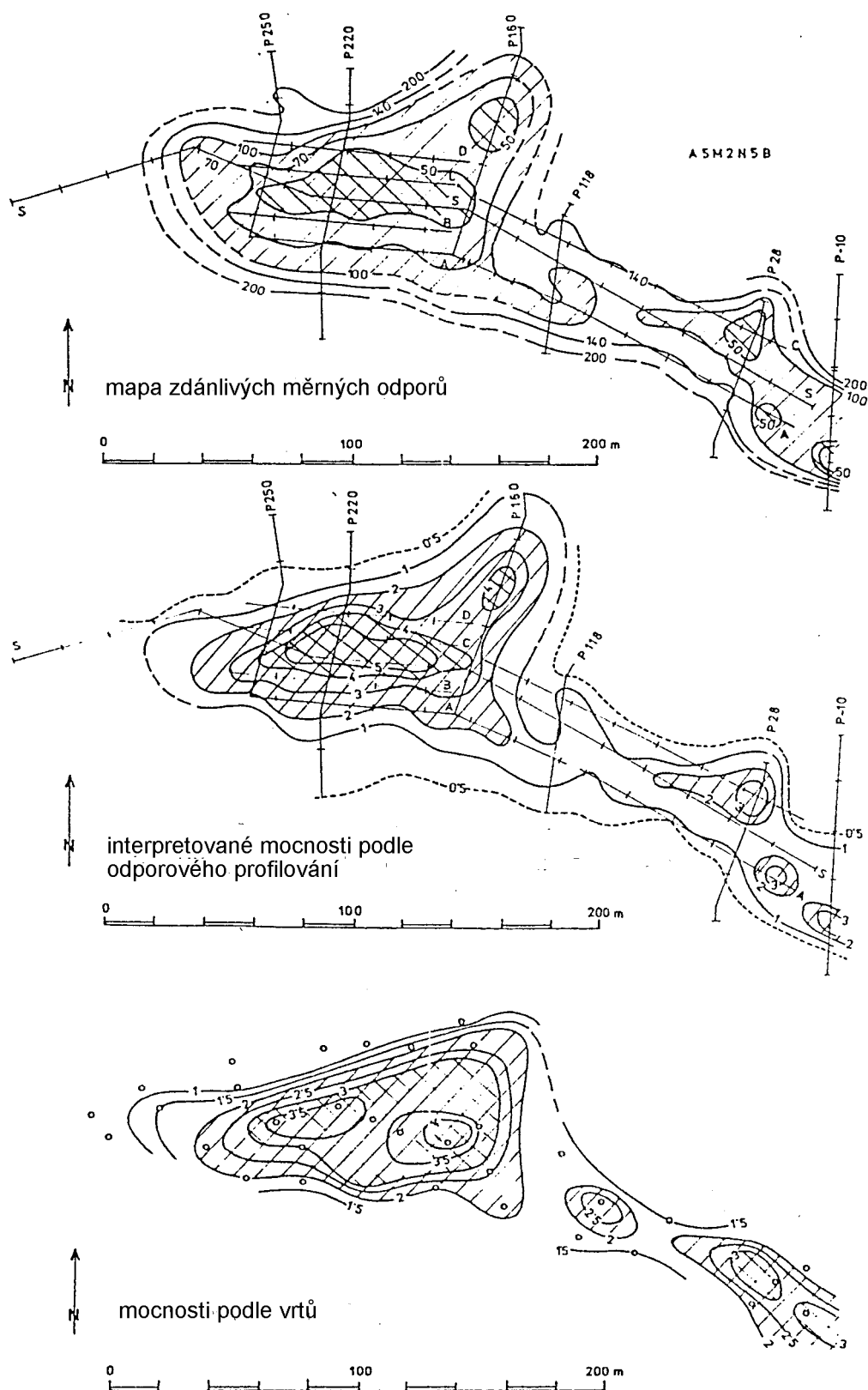


Obr. 6. 7. Použití georadru pro vymezení skládky ve vytěžené jámě

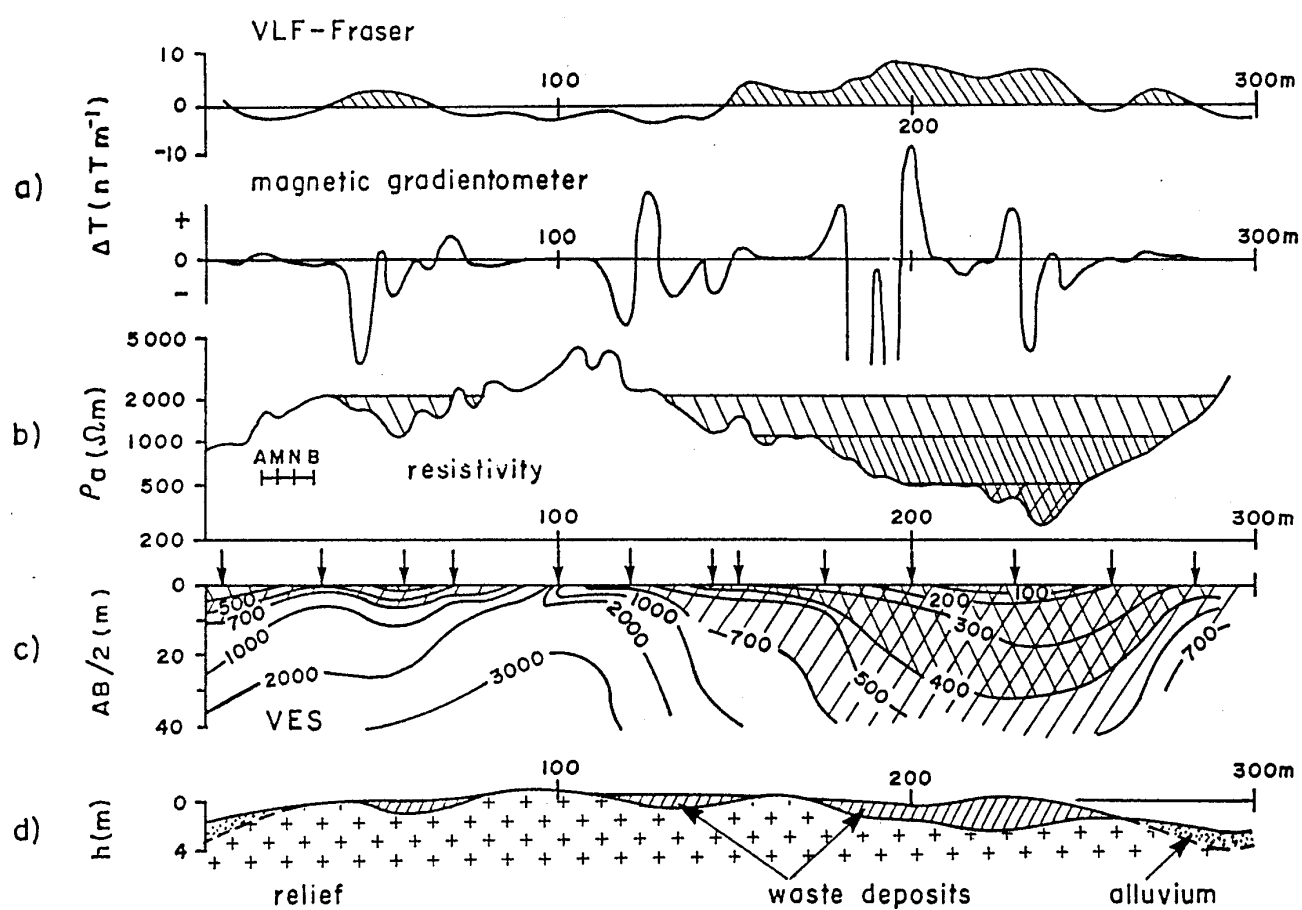


PŘÍKLAD VERTIKÁLNÍHO ŘEZU
Z METODY GPR

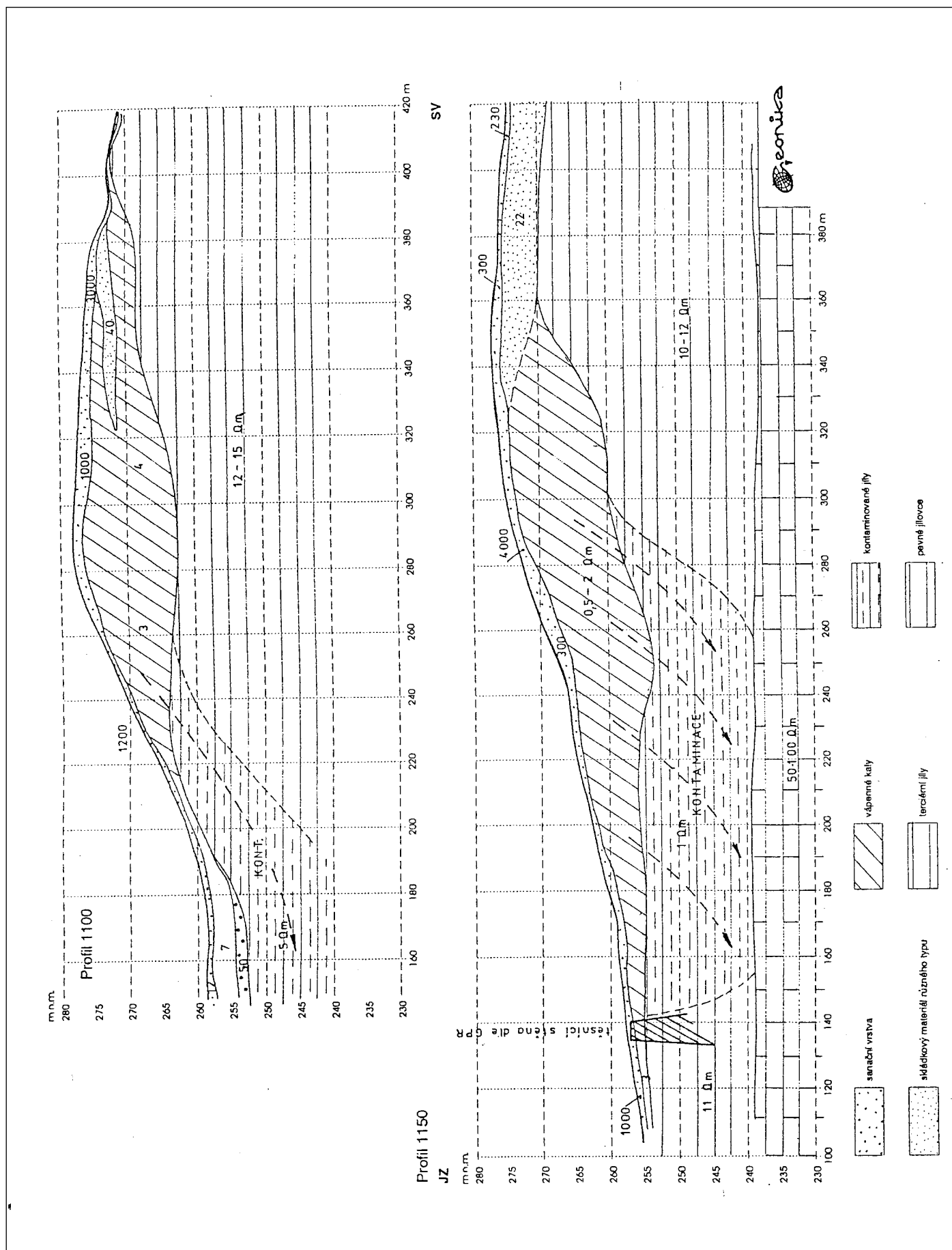
Obr. 6. 8. Přeceněný hloubkový dosah georadarového řezu



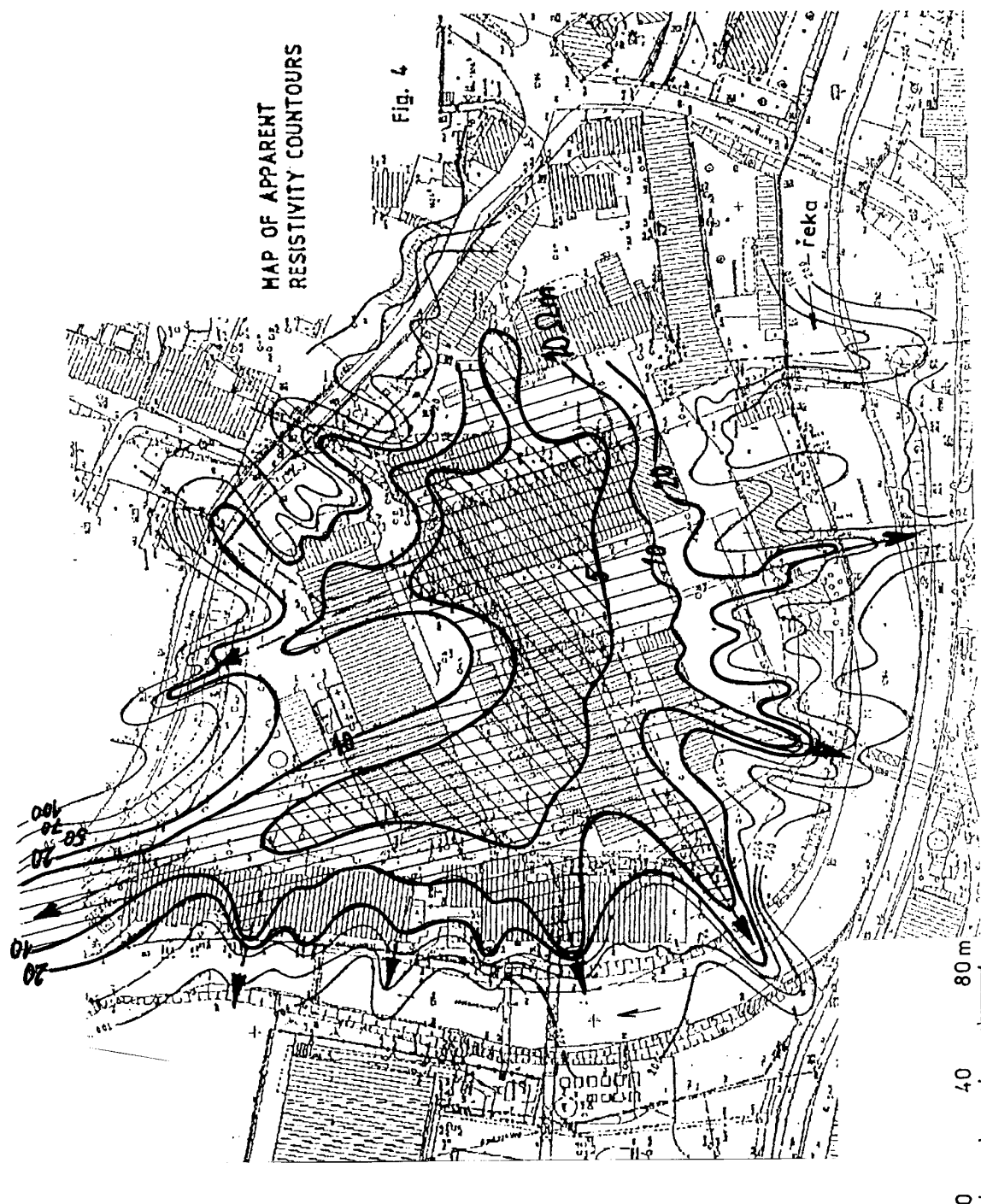
Obr. 6. 9. Mapování skládky odporovým profilováním se dvěma rozestupy elektrod



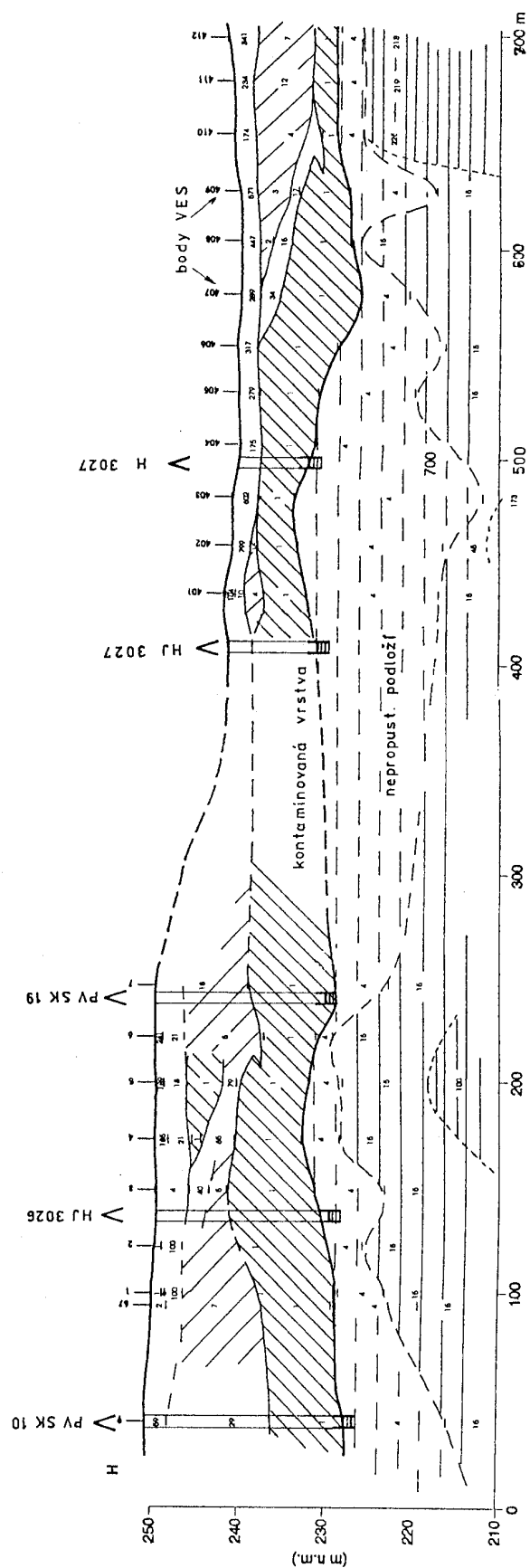
Obr. 6. 10. Mapování skládky geofyzikálním komplexem



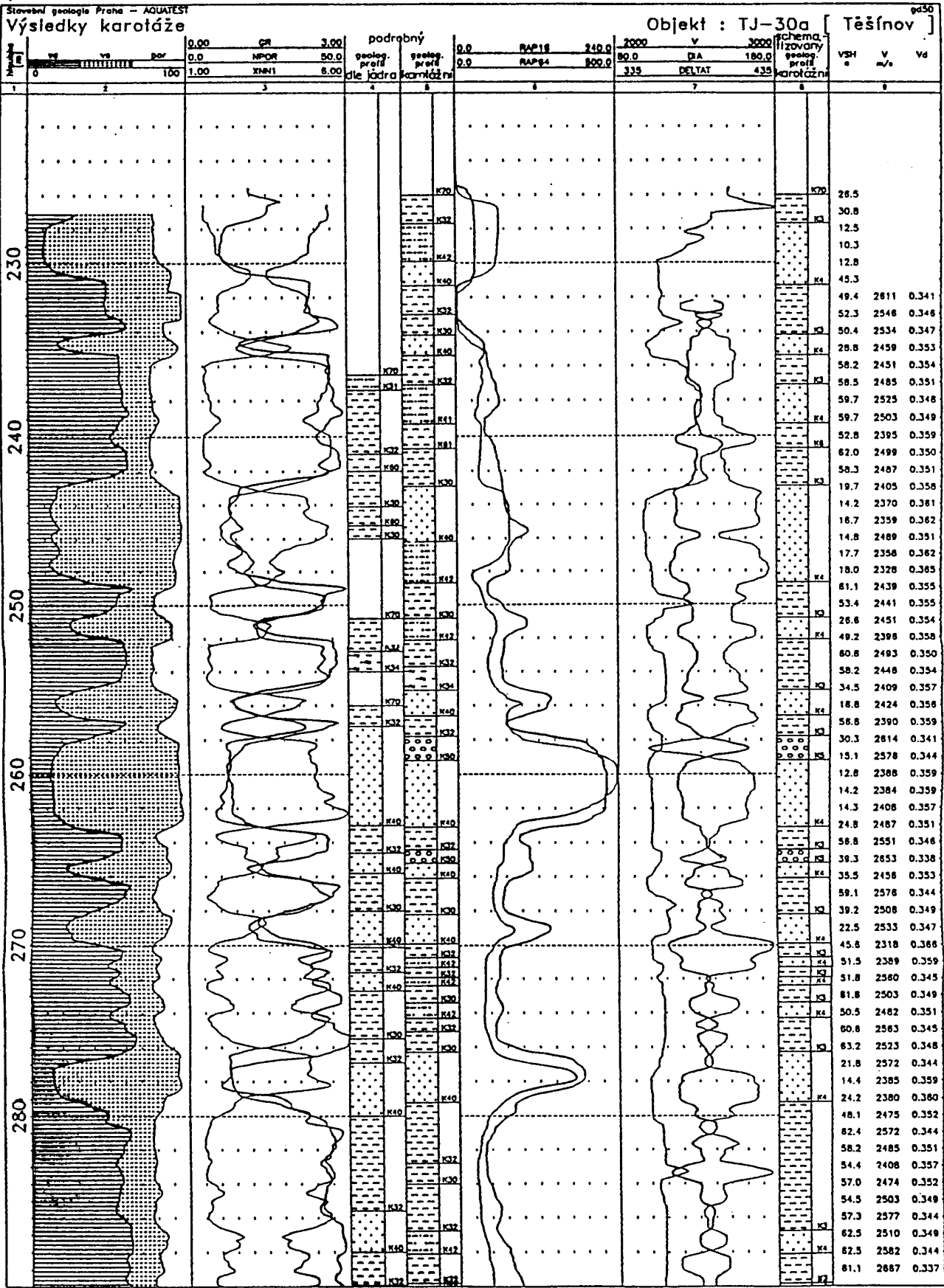
Obr. 6. 11. Zjištění úniků skládkové vody do podloží pomocí odporových metod



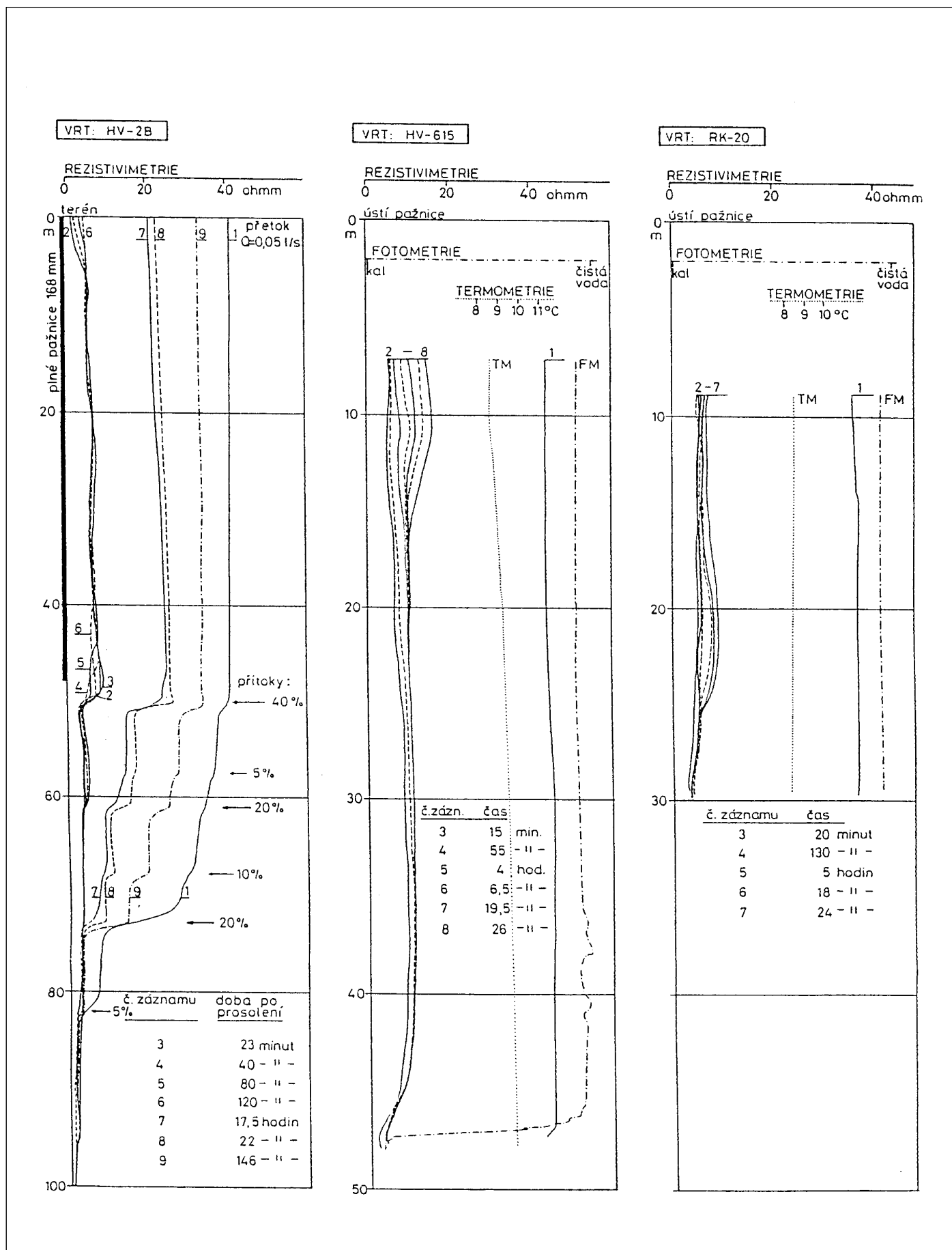
Obr. 6. 13. Průzkum rozsahu a šíření kontaminace



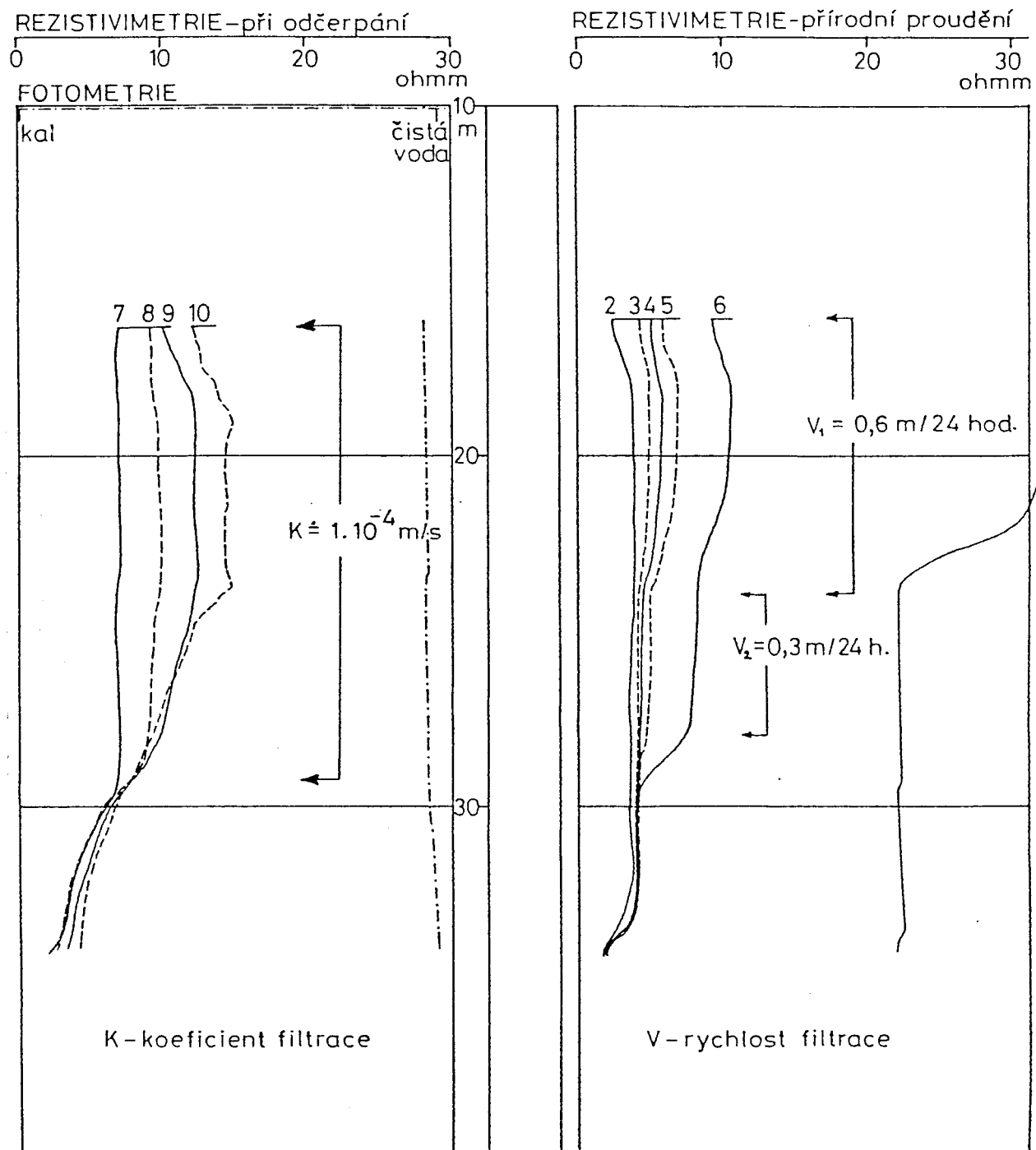
Obr. 6. 14. Kontaminovaná vrstva v odporovém řezu podle VES



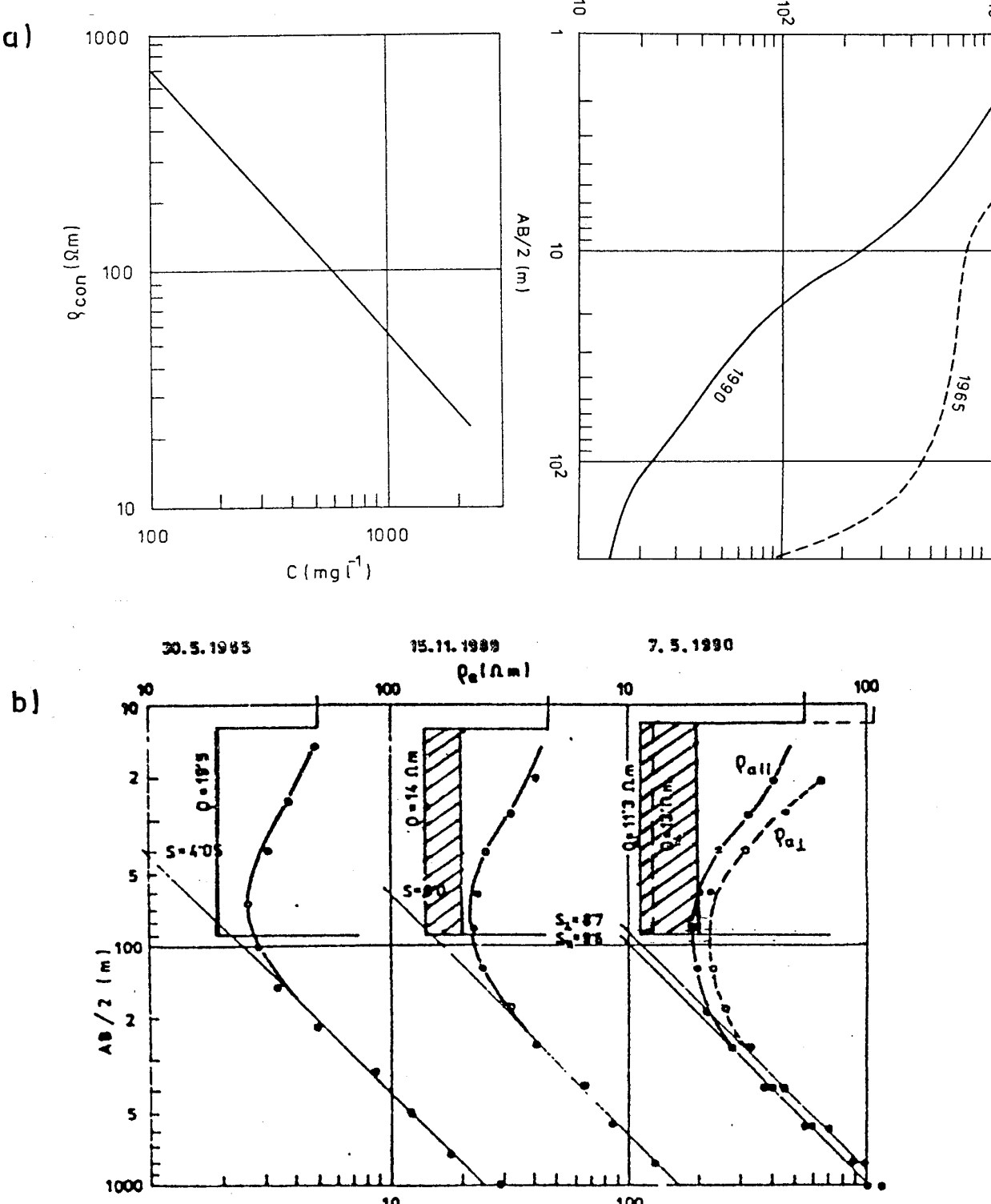
Obr. 6. 15. Vyhodnocení litologie podle karotáže



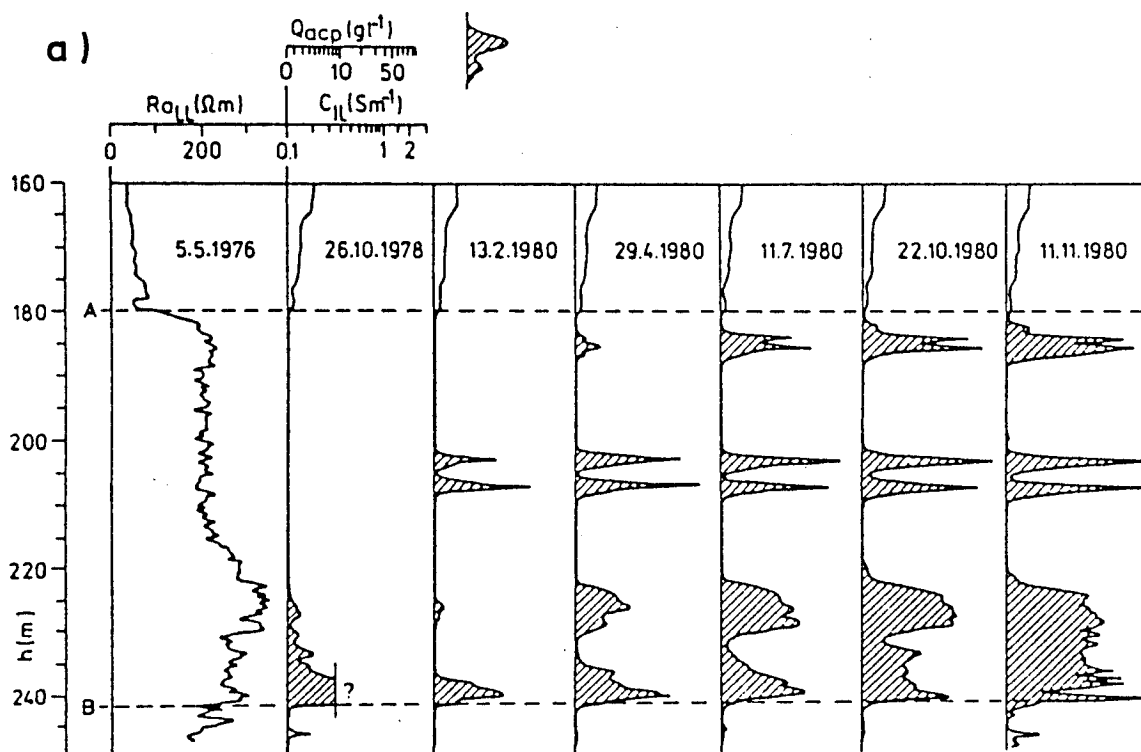
Obr. 6. 16. Proudění podzemní vody ve vrtech v krystaliniku



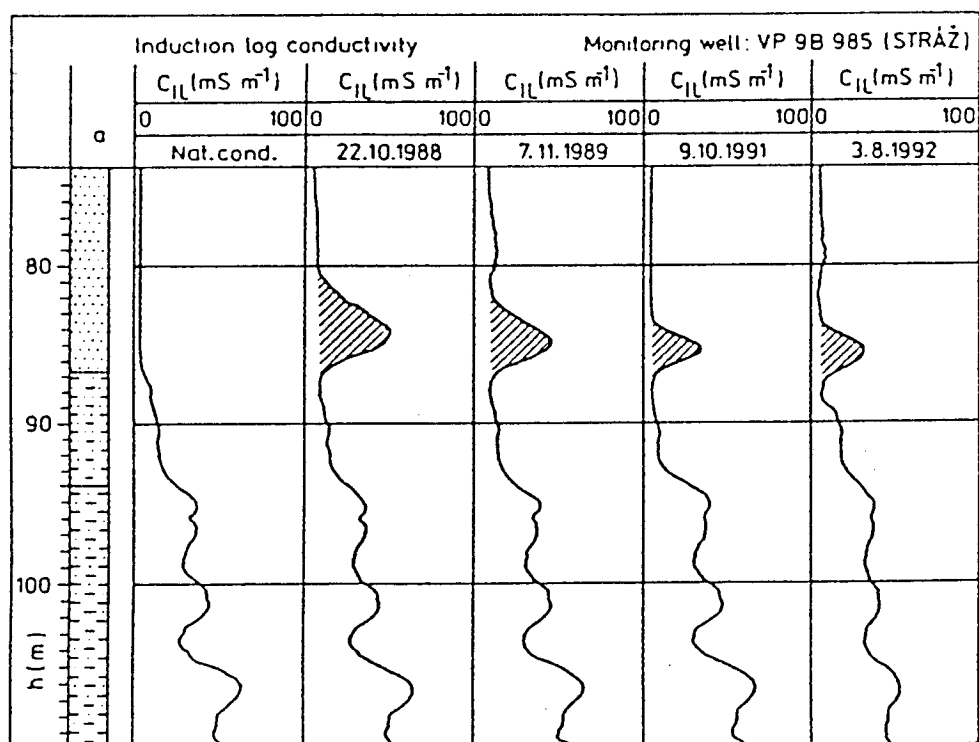
Obr. 6. 17. Proudění podzemní vody ve vrtech v křídových sedimentech



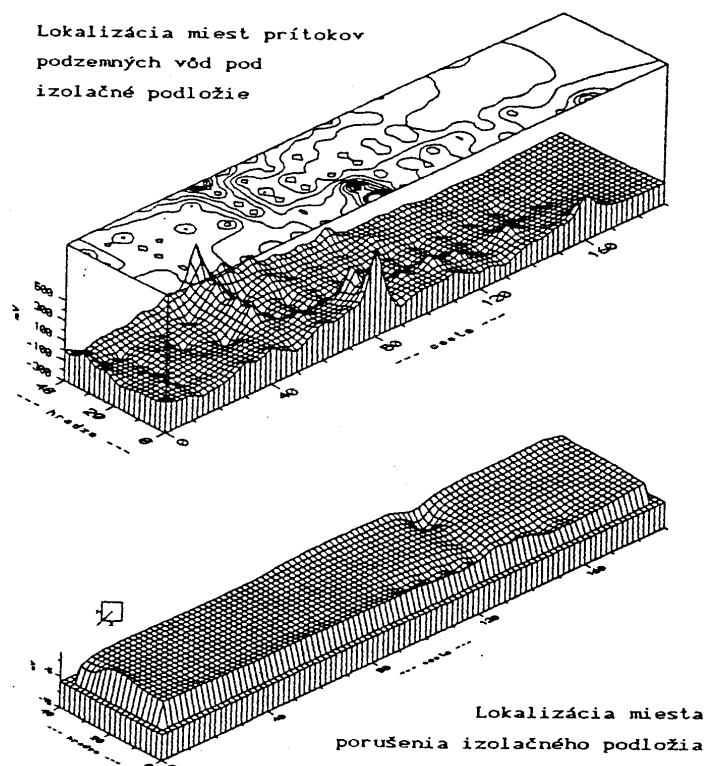
Obr. 6. 18. Monitorování změn kontaminace podzemních vod podzemními odporovými metodami



b)



Obr. 6. 19. Monitorování sanačních důsledků v monitorovacích vrtech indukční karotáží

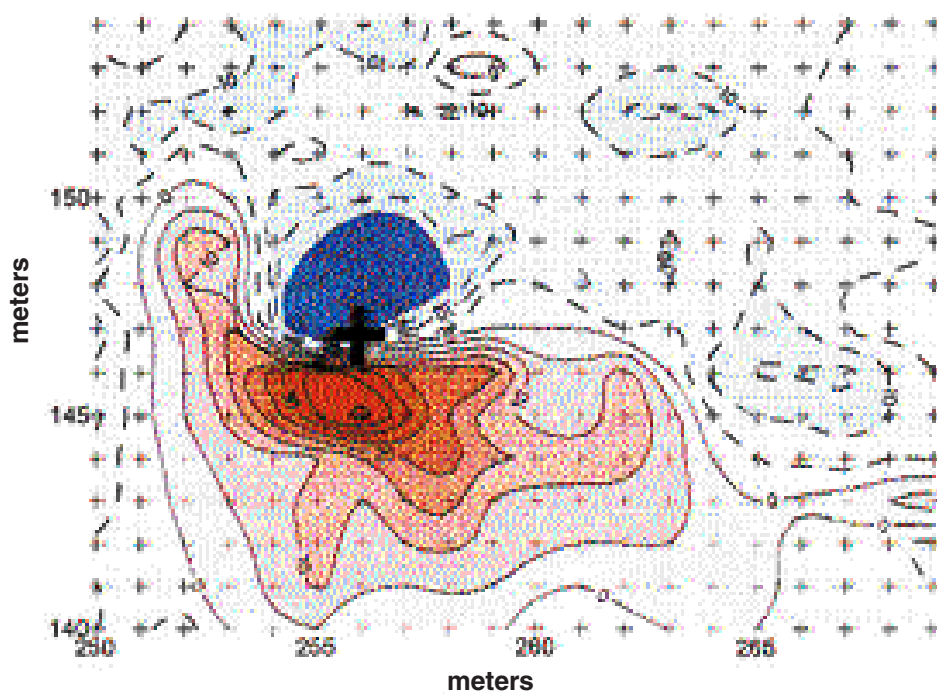


Obr. 6. 20. Stabilní monitorovací systém

Přehled zkratk a jednotek

Zkratka	Jednotka	Význam	Zkratka	Jednotka	Význam
Cond	mS/m	konduktometrie	MTD	nT	detekce kovů
CPM	–	počet impulsů za minutu (counts per minute)	NT	V(mV)	metoda nabitého tělesa
DEMP	Re, Im(%)	dipólové elektromagnetické profilování	nT	–	nanotesla
DP	mV	difuzní potenciály	OP	Ω m	odporové profilování
E	–	ekonomická náročnost	ORP	–	oxidačně –redukční potenciály
EM	–	elektromagnetický	PS	Ω m	přechodové sondování
ET	Ω m	elektrická tomografie	RXS	km/s	mělká reflexní seismika
FP	mV	filtrační potenciály	SG	A(Bq), CPM	spektrometrie gama
GK	CPM	gama karotáž	SP	VSP(mV)	metoda spontánní polarizace
GPR	MHz	georadar (ground penetrating radar)	ST	m/s	seismická tomografie
GPS	–	global positioning systém	T	–	technologická a metodologická náročnost
Gra	μ m/s ²	gravimetrie	VDV	kHz	metoda velmi dlouhých vln
HGR	–	hydrogeologický režim	VDV–R	–	odporová varianta VDV
M	–	metodická vhodnost	VES	Ω m	vertikální odporové sondování
MEU	–	multielektrodové uspořádání	VP	η (%), $\rho(\omega)$	metoda vyzvané polarizace
MRS	m/s	mělká refrakční seismika	3–D	–	trojrozměrný model

Výsek z mapy izolinií vertikálního gradientu magnetického pole

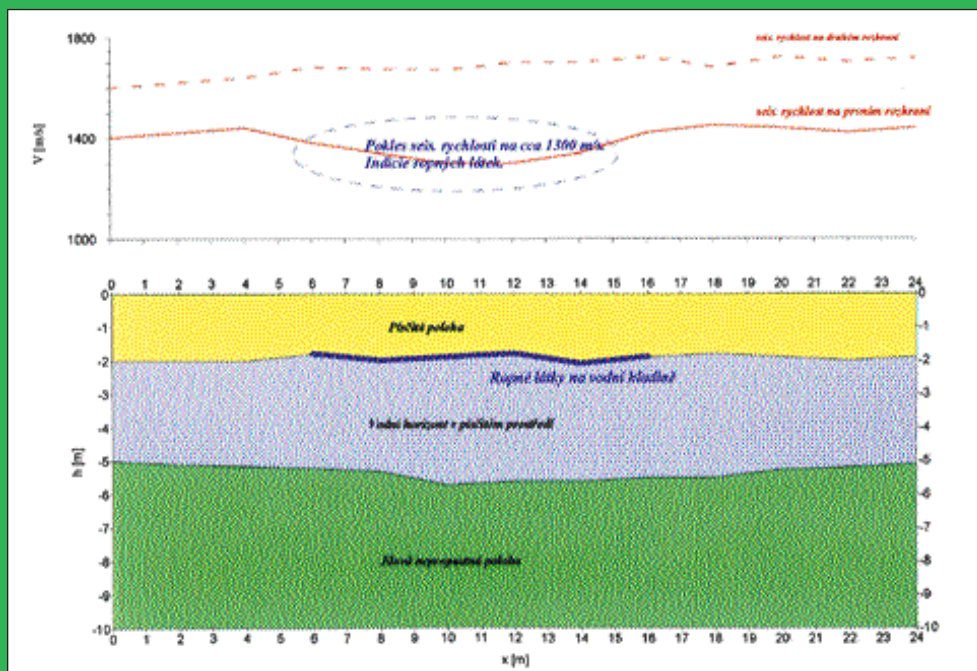


+ pozice miny nalzené v hloubce 1,1 m pod povrchem

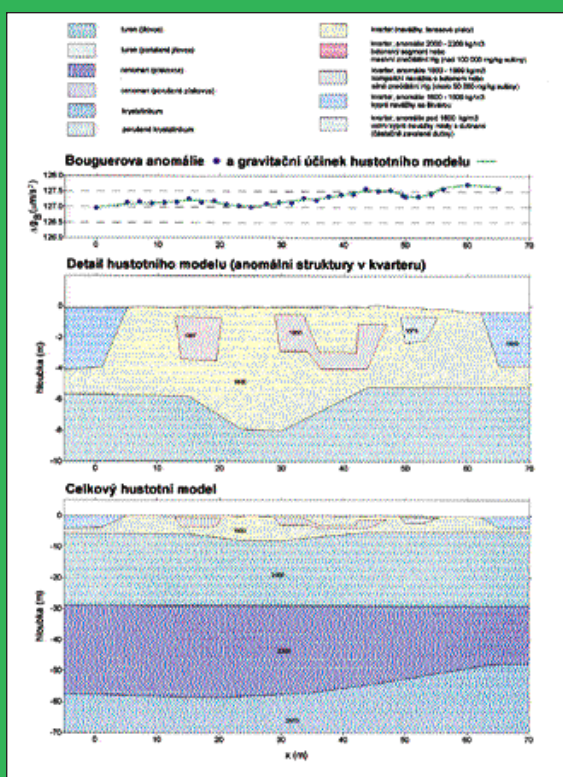
Obr. 6. 5. Detekce skryté munice detailní magnetometrií

Ukázka detekované a vykopané munice

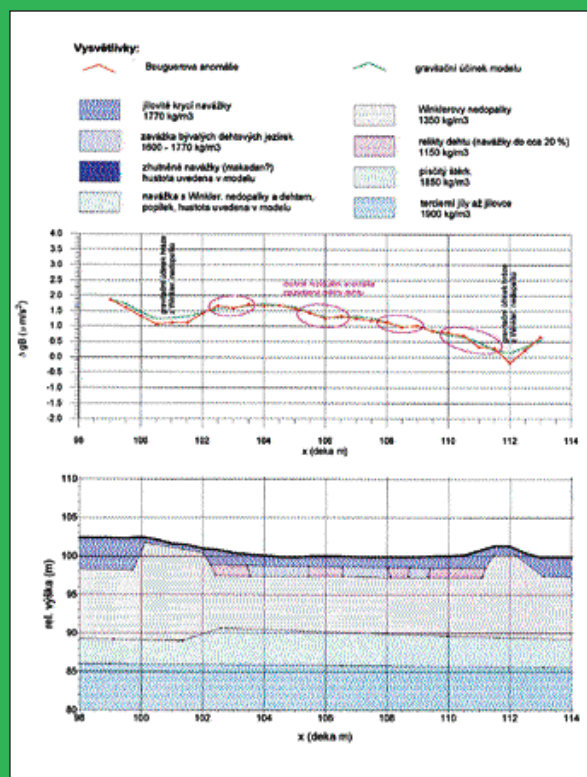




6. 21. Detekce ropného znečištění pomocí seismického měření



6. 22. Použití gravimetrie při vyhledávání speciální kontaminace



6.23. Detekce dehtů pomocí gravimetrie