

APLIKACE GEOFYZIKÁLNÍCH METOD PŘI OCHRANĚ VODNÍCH ZDROJŮ

Metodická příručka MŽP

2010

Metodická příručka byla zpracována na Sekci technické ochrany životního prostředí vedené PhDr. Ivo Hlaváčem. Odborem ekologických škod MŽP pod vedením RNDr. Pavly Kačabové, ředitelky odboru. Odborným garantem byl RNDr. Jan Gruntorád, CSc.

Podklady k této příručce byly zpracovány týmem expertů, jejichž koordinátorem byl Prof. RNDr. Miloš Karous, DrSc. Podklady připravili: RNDr. Jaroslav Bárta, CSc., RNDr. Dušan Dostál, RNDr. Richard Gürtler, RNDr. Tomáš Charvát, Prof. RNDr. Miloš Karous, DrSc., Bc. Magda Karousová, Doc. RNDr. Jaroslav Kněz, RNDr. Miroslav Kobr, CSc., RNDr. Pavel Nikl. Konstruktivním oponentem byl RNDr. Josef V. Datel.

Zpracovatelé příručky děkují za odborné a metodické připomínky zejména RNDr. Pavle Kačabové, Ladislavu Bížovi, RNDr. Jiřímu Čížkovi, RNDr. Renatě Kadlecové, RNDr. Jiřímu Kesslovi, RNDr. Karlovi Luskovi, Mgr. Lence Rukavičkové, Ph.D.

O B S A H

1. Úvod	3
1.1. Účel příručky	3
1.2. Jímání vody a jeho ochrana	3
1.2.1. Základní pojmy	3
1.2.2. Jímací území	4
1.2.3. Ochranná pásma vodních zdrojů	5
1.3. Problematika kontaminace v ochranných pásmech vodních zdrojů	8
1.3.1. Specifika řešení znečištění vod v ochranných pásmech vodních zdrojů	8
1.3.2. Znečišťující látky v ochranných pásmech	9
2. Metody používané při průzkumu a sanaci kontaminovaných podzemních vod	11
2.1. Metody hydrogeologického průzkumu	11
2.1.1. Přípravná etapa hydrogeologického průzkumu	11
2.1.2. Hydrogeologické mapování	12
2.1.3. Hydrologické metody	12
2.1.4. Sondážní metody	13
2.1.5. Hydrochemické metody	13
2.1.6. Hydrodynamické zkoušky v hydrogeologických vrtech	14
2.1.7. Metody modelování	15
2.2. Geofyzikální metody	15
2.2.1. Geoelektrické metody	15
2.2.2. Seismické metody	19
2.2.3. Karotážní metody	19
2.2.4. Ostatní pozemní geofyzikální metody	21
3. Aplikace geofyzikálních průzkumných, sanačních a monitorovacích metod	22
3.1. Geologická charakteristika okolí zájmové plochy	22
3.1.1. Upřesnění geologické stavby geofyzikálním průzkumem	22
3.1.2. Mocnost a charakter pokryvu, eluvium	24
3.1.3. Podložní horniny, tektonické poruchy	25
3.2. Hydrogeologický režim	27
3.2.1. Charakter hydrogeologické propustnosti hornin	27
3.2.2. Hladina podzemní vody, směr a rychlost jejího pohybu	27
3.2.3. Nezpevněné sedimenty a sedimentární pánve	28
3.2.4. Hydrogeologický režim v krystaliniku	29
3.2.5. Hydrogeologický režim v krasových oblastech	32
3.2.6. Oblasti neovulkanických hornin	33
3.3. Hydrogeologické a hydraulické parametry horninového prostředí	33
3.3.1. Litologie a jílovitost	33
3.3.2. Pórovitost, puklinatost, vlhkost a stupeň nasycení	33
3.3.3. Hydraulické parametry kolektorů	35
3.3.4. Chemizmus, mineralizace a kontaminace podzemních vod	35
3.4. Účelový hydrogeologický průzkum	37
3.4.1. Vyhledávání zdrojů podzemní vody	37
3.4.2. Minerální a termální vody	37
3.4.3. Ochrana zdrojů podzemní vody	37
3.4.4. Prolínání vody ochrannými bariérami a hrázemi	37
4. Závěr	39
Seznam zkratk	39
Citovaná literatura	40

1. ÚVOD

1.1. ÚČEL PŘÍRUČKY

Tato příručka **Aplikace geofyzikálních metod při ochraně vodních zdrojů** je vydávána Odborem ekologických škod Ministerstva životního prostředí ČR. Jedná se o další ze série příruček určených pro usnadnění rozhodování odpovědných pracovníků státní správy a fyzických a právnických osob oprávněných s povolením příslušného vodoprávního úřadu provádět správu a nakládání s vodami podle zákona č. 254/2001 Sb. (zákona o vodách) při ochraně vodních poměrů a vodních zdrojů (hlava V zákona o vodách) před potenciální kontaminací, a zjišťování rozsahu kontaminace v případě, že k ní již došlo.

Tato příručka přímo navazuje na text příručky **Základní principy hydrogeologie** (*Kolektiv autorů 2010*), která byla vydávána stejným odborem MŽP a na kterou se tato příručka odkazuje. Už z jejího názvu je patrné, že stručným ale výstižným způsobem popisuje hydrogeologické metody, které se v nejvyšší míře podílí na průzkumu případné kontaminace podzemních vod a jejich sanaci.

Předkládaná příručka přináší informace o specifické skupině **geofyzikálních metod**, které jsou využívány v hydrogeologickém průzkumu a při ochraně podzemních vod, ale pracují na fyzikálních principech, které nepřímo na základě měřených vlastností hornin a horninového prostředí i vlastností podzemních vod významně přispívají k řešení úkolů hydrogeologie, a to i z hlediska finančních nákladů. Určitý přehled geofyzikálních metod, i když z hlediska jejich aplikace v jiné oblasti, podává i dřívější příručka MŽP z roku 2008: *Možnosti geofyzikálních metod při ověřování nejasných strukturně geologických, popřípadě jiných vztahů na lokalitách při průzkumu a nápravě starých ekologických zátěží*, na kterou můžeme rovněž odkázat čtenáře (*Kolektiv autorů 2008*). Detailnější informace o geofyzikálních metodách najde čtenář ve vysokoškolských učebnicích a odborných monografiích (např. *Gruntorád a kol. 1985, Karous a Mareš 1988, Karous 1989, Mareš a kol. 1983, Mareš a kol. 1990*).

1.2. JÍMÁNÍ VODY A JEHO OCHRANA

Zajištění ochrany vodních zdrojů začíná u ochrany jímacích území. Z technického pohledu je jímací území rizikovým místem pro využívaný vodní útvar, jsou zde umístěna různá technická zařízení, pohybují se zde osoby a dopravní prostředky, může se manipulovat s různými chemickými látkami v rámci úpravy vody apod. Využívaný útvar povrchových vod je v bezprostřední blízkosti těchto mnohdy rizikových aktivit. Útvar podzemních vod je zde prostřednictvím jímacích objektů (vrty, studny apod.) otevřen a je tedy opět vystaven riziku přímého znečištění s povrchu terénu.

1.2.1. Základní pojmy

V rozsahu nezbytném pro potřebu této příručky jsou dále uvedeny některé relevantní hydrogeologické pojmy, jejichž úplnější a podrobnější výklad je součástí dříve zmíněné již příručky MŽP *Základní principy hydrogeologie* (*Kolektiv autorů 2010*), příp. i (*Homola a Grmela 1987*):

Jímací území

- ohraničené území s jímacími objekty a jímacími zařízeními, kde probíhají jen činnosti spojené s odběrem vody a její ochranou. Obvykle je oplocené a často se ztotožňuje s ochranným pásmem I. stupně.

Ochranné pásmo vodního zdroje, přírodního léčivého zdroje nebo zdroje přírodní minerální vody

- území vyhlášené podle zákona (č. 164/2001 Sb. v platném znění), které má zajistit ochranu vydatnosti, jakosti a zdravotní nezávadnosti chráněného zdroje vody, přírodního léčivého zdroje nebo zdroje přírodní minerální vody. Obvykle se vyhláší jako ochranné pásmo I. a II. stupně. Ochranná pásma vyhlášená podle předchozích právních norem mohou být tříступňová.

Jímací objekt

- stavba (vodní dílo) se zabudovaným jímacím zařízením (vrtaná či kopaná studna, pramenní jámka, jímací zářez, odběrové místo povrchové vody aj.).

Jímací zařízení

- technické zařízení určené k odběru vody (čerpadlo se sacím a výtlačným potrubím, odtokový drenážní systém, násoska apod.)

1.2.2. Jímací území

Jímací území můžeme rozlišovat podle několika hledisek:

1. podle druhu jímané vody

- jímací území povrchových vod
- jímací území podzemních vod

2. podle velikosti odběru

- odběry vody nad 10 000 m³ ročně podle § 30 zákona č. 254/2001 Sb. o vodách musí mít vodní zdroje s využívaným nebo využitelným odběrem nad touto hranicí stanovena ochranná pásma
- odběry vody pod 10 000 m³ ročně (pro individuální zásobování) – povinnost mít vyhlášená ochranná pásma se na ně nevztahuje

3. podle typu jímacího objektu

- odběry povrchových vod z hladiny nádrže
- odběry povrchových vod z toku vzdutého jezem
- odběry povrchových vod z běžného toku
- odběry podzemních vod ze studní (vrtaných či kopaných)
- odběry podzemních vod ze zachycených pramenů
- odběry podzemních vod z jímacích zářezů
- odběry podzemních vod z galerií (štol) a dalších hornických děl

4. podle struktury odběru

- odběr z jednoho odběrného místa
- skupinový odběr z více odběrných míst v rámci jednoho jímacího území (typické zvláště pro odběr podzemních vod)

5. podle požadavků na jakost odebírané vody

- odběr surových vod pro úpravu na vodu pitnou (Vyhláška MZem č. 428/2001 Sb.) nebo výrobu vod balených (ČSN 56 7858 Kojenecká voda, ČSN 56 7859 Stolní voda, ČSN 86 8000 Přírodní minerální stolní a léčivá voda, PN 56 7860 Sodová voda, Vyhláška 252/2004 Sb.)
- odběr užitkové vody pro průmyslové či zemědělské účely
- odběr přírodních léčivých vod pro léčebné účely v lázních

6. podle zajištěné ochrany

- s vyhlášenými ochrannými pásmy (odběr pitné vody pro hromadné zásobování)
- bez vyhlášených ochranných pásem (individuální zásobování pitnou vodou a odběr vody pro nepitné účely)

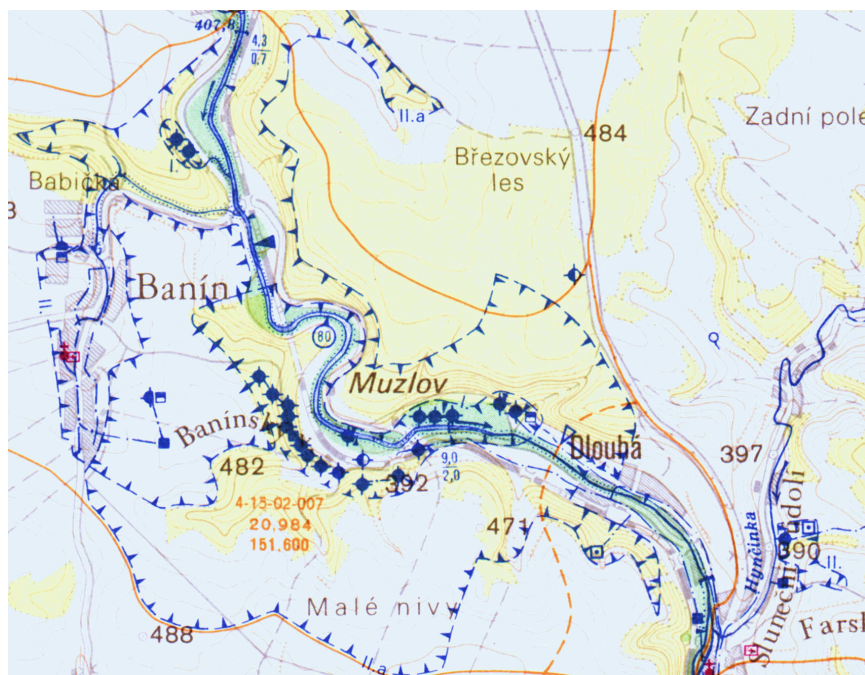


***Obr.1.1. Ochranné pásmo I. stupně jímání podzemních vod**
(nadzemní manipulační šachtice nad studnou v oploceném jímacím území - archiv S. Šeda)*

1.2.3. Ochranná pásma vodního zdroje

K ochraně využívaných vodních zdrojů a jímacích území slouží ochranná pásma. Je třeba zdůraznit, že ochranná pásma se vyhláší jen na ochranu zdrojů pitné vody s odběrem nad 10 tis. m³ vody ročně, a dále na ochranu přírodních léčivých zdrojů a zdrojů přírodních minerálních vod. Návrh ochranných pásem zpracovává oprávněná osoba – držitel osvědčení odborné způsobilosti pro geologické práce v oboru hydrogeologie.

Ochranná pásma vodních zdrojů jsou stanovována na základě zákona č. 254/2001 Sb. v platném znění (paragraf 30) o vodách, a mají sloužit k ochraně vydatnosti, jakosti a zdravotní nezávadnosti zdrojů podzemních nebo povrchových, které jsou využívány nebo využitelné k zásobování pitnou vodou a mají průměrný roční odběr přes 10 000 m³. **Ochranná pásma přírodních léčivých zdrojů** a zdrojů léčivých minerálních vod se vyhláší podle lázeňského zákona č. 164/2001 Sb. v platném znění (§ 21-24). Slouží k ochraně přírodního léčivého zdroje před činnostmi, které mohou nepříznivě ovlivnit jeho chemické, fyzikální a mikrobiologické vlastnosti, jeho zdravotní nezávadnost, jakož i zásoby a vydatnost. Ochranná pásma se dělí na ochranná pásma I. a II. stupně.



Obr.1.2. Výřez státní vodohospodářské mapy (Výzkumný ústav vodohospodářský TGM Praha)

Na obr. 1.2. jsou vyznačena ochranná pásma II. stupně kolem jímacího území podzemních vod. Pásmo II. stupně je možné členit na zóny s různým stupněm ochrany. Rozsah ochranného pásma by měl být dostatečný na to, aby zajistil ochranu vodního zdroje v potřebné míře. Požadavky na nerealizaci ochranného pásma II. stupně je třeba důkladně zvážit a odborně zdůvodnit, mj. i na základě řádného průzkumu za použití komplexu průzkumných metod, včetně geofyzikálních.

Z předchozího textu však plyne, že existují vodní zdroje a jejich jímací území, které obvykle nejsou chráněny ochrannými pásmy (**studny pro individuální zásobování** pitnou vodou, tedy s ročním odběrem menším než 10 000 m³, odběry povrchových a podzemních vod nesloužící pro zásobování pitnou vodou – odběry užitkové vody. Ochrana studní pro individuální zásobování je řešena ve vyhlášce č. 269/2009 Sb. ve znění změny č. 22/2010 Sb., která uvádí požadovanou vzdálenost studny od možných zdrojů znečištění podle velikosti propustnosti prostředí. **Odběry vody pro jiné než pitné účely** obvykle nejsou chráněny vůbec, pokud to neřeší vydané vodoprávní povolení k nakládání s vodami. Protože i na tyto vodní zdroje jsou kladeny určité kvalitativní nároky (technologická voda pro průmysl, voda pro zavlažování apod.), je vhodné i pro tyto objekty stanovit systém ochrany, i když to platné předpisy nevyžadují. Vhodným způsobem může být např. jejich formulace v rámci podmínek povolení k nakládání s vodami.

Ochranné pásmo I. stupně vodního zdroje nebo přírodního léčivého zdroje a jeho vymezení

Ochranné pásmo I. stupně má zajišťovat přímou ochranu vodního zdroje v bezprostředním okolí jímacího nebo odběrného zařízení. Stanovuje se:

- u vodárenských nádrží (seznam je ve vyhlášce č. 137/1999) a nádrží, které slouží výhradně pro zásobování pitnou vodou, je stanoveno minimálně pro celou plochu hladiny nádrže při maximálním vzduť,
- u ostatních nádrží s vodárenským využitím je stanoveno jako souvislé území na hladině nádrže s minimální vzdáleností 100 m od odběrného zařízení,

- u vodních toků s jezovým vzduťm je ochranné pásmo 15 m široké, na břehu sahá nad místem odběru do vzdálenosti minimálně 200 m proti proudu, po proudu 100 m; ve vodním toku musí zahrnovat minimálně polovinu jeho šířky v místě odběru,
- u vodních toků bez jezového vzduťm je ochranné pásmo 15 m široké, na břehu sahá nad místem odběru do vzdálenosti minimálně 200 m proti proudu, po proudu 50 m; ve vodním toku musí zahrnovat minimálně třetinu jeho šířky v místě odběru,
- u zdrojů podzemní vody je stanoveno jako souvislé území do vzdálenosti minimálně 10 m od odběrného zařízení,
- u přírodního léčivého zdroje nebo zdroje přírodní minerální vody se stanovuje v bezprostředním okolí (obvykle v okruhu 50 m, v němž se ještě může vymezit tzv. pásmo fyzické ochrany zdroje 10 x 10 m),
- v odůvodněných případech může být stanoven rozsah menší.



Obr. 1.3. Domovní studna s klasickou ruční pumpou

Domovní a obecní studny jsou zdrojem individuálního zásobování vodou, obvykle nejsou chráněny ochrannými pásmy vodních zdrojů a je plně na odpovědnosti vlastníka studny, aby si zajistil její potřebnou ochranu, především v umístování aktivit souvisejících s rizikovými látkami (chemikálie, hnojiva, odpady, splaškové vody, atd.) co nejdál od vlastní studny a zabránil jejich úniku do využívané povrchové nebo podzemní vody.

Ochranné pásmo II. stupně a jeho vymezení

Ochranné pásmo II. stupně se stanoví k ochraně zdroje, popřípadě infiltračního území nebo povodí zdroje nebo jeho části. V rámci ochranného pásma II. stupně lze vymezit dílčí pásma s rozdílným stupněm ochrany. V ochranném pásmu II. stupně je zakázáno provádět činnosti, které mohou negativně ovlivnit chemické, fyzikální a mikrobiologické vlastnosti zdroje a jeho zdravotní nezávadnost, jakož i zásoby a vydatnost zdroje. Může být souvislé nebo tvořené více od

sebe navzájem oddělenými územními zónami v rámci hydrogeologického rajónu nebo hydrologického povodí.

Opatření v ochranných pásmech

V ochranném pásmu I. stupně jsou povoleny jen činnosti spojené s ochranou a využitím vodního nebo přírodního léčivého zdroje. Z území ochranného pásma se odstraní všechny zdroje možného znečištění zdroje a provedou se další potřebné technické úpravy území, aby ochranné pásmo I. stupně mohlo plnit svůj účel.

Vodní zákon nepředepisuje žádná konkrétní omezení v ochranném pásmu II. stupně. Toto u vodních zdrojů podle vodního zákona stanovuje příslušný vodoprávní úřad ve svém rozhodnutí nebo v případě zdrojů podle lázeňského zákona ministerstvo zdravotnictví svou vyhláškou. Možná omezení se týkají např. vstupu fyzických osob, používání a skladování látek škodlivých vodám, provádění stavební činnosti, terénních úprav, zemních a vrtných prací, umísťování staveb, aplikace různých ochranných a dalších chemických prostředků, úprava či omezení zemědělského využívání pozemků (pěstované plodiny, způsob obdělávání pozemků, způsob aplikace hnojiv a ochranných prostředků), způsobu údržby komunikací, provozování rekreace, táboření, stanování a vodních sportů, zákaz vjezdu vozidel dopravujících náklad, který může způsobit ohrožení nebo zhoršení jakosti vody, zákaz přeletu letadel nad volnou vodní plochou apod.

Možné technické úpravy v ochranných pásmech se týkají hlavně ochranných pásem I. stupně a obsahují např. vyznačení hranice a oplocení ochranného pásma, úpravy komunikací u vodárenské nádrže (nepropustné příkopy, záchytné jímky), protierozní opatření (např. úprava svahů, zasakovací a sedimentační pásy, úprava vegetačního krytu – keře, stromy), protipovodňová opatření (zatrubnění nebo přeložení vodního toku, vyspádování terénu směrem od jímácích objektů, výstavba ochranných nadzemních šachtic apod.).

Náklady na ochranná opatření v ochranných pásmech a na jejich monitoring je věcí vlastníka (správce) vodárenského zdroje, jakož i hrazení újmy vzniklé vlastníkům pozemků vyhlášenými omezujícími opatřeními v ochranných pásmech.

1.3. PROBLEMATIKA KONTAMINACE V OCHRANNÝCH PÁSMECH VODNÍCH ZDROJŮ

1.3.1. Specifika řešení znečištění vod v ochranných pásmech vodních zdrojů

Lze definovat následující specifika ochrany vodních zdrojů před znečištěním v jímacích územích a ochranných pásmech vodních zdrojů (díl 3, par. 30 zákona o vodách):

- možnost bezprostředního nebo velmi rychlého znečištění konkrétního vodního zdroje
- nutnost velmi rychlých nápravných opatření včetně zajištění náhradního zásobování pitnou vodou
- v rámci manipulačních a provozních řádů jímacího území jsou pro případ kontaminace obvykle stanoveny předem konkrétní postupy a jsou vytipována nejzranitelnější místa
- v rámci režimu vyhlášených ochranných pásem jsou vyhlášena konkrétní omezující opatření týkající se nejrizikovějších aktivit - pokud jsou tato omezení správně nastavena, znečištění mohlo vzniknout jen jejich porušením

- jsou k dispozici podrobné průzkumné informace o území (hydrologické, geologické, hydrogeologické, chemické) z dříve provedených průzkumů a průběžně prováděného monitoringu dle zákona, které mohou značně usnadnit rozhodnutí o řešení vzniklé kontaminace
- přímo v jímacích územích se může cíleně manipulovat s chemikáliemi v rámci vodohospodářských aktivit (látky na chemickou a biologickou úpravu vody, na údržbu technických zařízení, na regeneraci a čištění studní a vrtů apod.)
- zjištěná kontaminace v ochranných pásmech obvykle znamená větší ochotu než jinde ke spolupráci a k rychlému řešení situace všemi zainteresovanými stranami (vodoprávní úřad, majitel a provozovatel zdroje, Česká inspekce životního prostředí, příslušná obec atd.).

V některých případech mohou být ochranná pásma stanovena nesprávně v nedostatečném rozsahu. V takovém případě je na individuálním posouzení, zda v režimu havarijního sanačního zásahu řešit i kontaminační situace v blízkosti jímacích území mimo vyhlášená ochranná pásma. Tato problematika je pak řešena s příslušným vodoprávním úřadem po projednání s dotčenými orgány státní správy (par. 30 zákona o vodách).

1.3.2. Znečišťující látky v ochranných pásmech

Je na místě konstatovat, že ačkoliv jsou v rámci vyhlášených ochranných pásem vyhlášena i různá ochranná a omezující opatření, hlavně z hlediska výskytu a manipulace látek škodlivých vodám, nebezpečí kontaminace se může týkat celého spektra vyskytujících se kontaminantů, jako kdekoliv jinde. V daném případě jde vždy totiž o porušení platných předpisů a nelze dopředu předjímat, kdo a jakým způsobem (s jakou chemickou látkou) tyto předpisy poruší. Vyhlášená ochrana vodního zdroje by tak pouze měla snížit riziko (pravděpodobnost) vzniku této kontaminace (viz závadné látky, par. 39 zákona o vodách).

Z hlediska typu a druhu kontaminace je proto třeba počítat s celou škálou situací. **Znečištění vod** můžeme rozlišovat podle různých kritérií:

podle způsobu vzniku

- jednorázové havarijní úniky – nejčastější případy kontaminace v ochranných pásmech
- dlouhodobě působící kontaminace s postupnou akumulací znečišťujících látek v prostředí – tyto případy by se v dobře vyhlášených a dobře spravovaných ochranných pásmech neměly vyskytnout
- podle doby trvání
- ekologické havárie v současnosti (viz par. 40 zákona o vodách) – náhlá havárie, proti níž je prevence nejobtížnější a nejméně účinná, nutno s ní počítat a mít předem stanovené rámcové postupy jejího řešení (např. havarijní plány)
- stará ekologická zátěž – pokud se v blízkosti vodního zdroje vyskytne, měla by být odstraněna před začátkem využívání vodního zdroje

podle plošného rozsahu

- bodová kontaminace (plošně omezený únik znečišťujících látek)
- liniová kontaminace (podél liniového prvku – silnice, produktovod apod.)
- difúzní kontaminace (území s větším počtem drobných zdrojů kontaminace, obtížně přesně identifikovatelných – např. obce bez kanalizace)
- plošná kontaminace (vlivem znečištění ovzduší, plošná aplikace hnojiv či ochranných prostředků s regionálním dosahem)

podle druhu znečišťující látky a jejich vlastností

- kontaminace anorganickými, organickými a radioaktivními látkami, mikrobiologické zhoršení jakosti vody apod.
- hledisko toxikologické nebezpečnosti (látky akutně a chronicky toxické, prudké jedy, látky s karcinogenním účinkem)
- migrační hledisko – uplatnění různých transportních parametrů podle druhů znečišťující látky (např. adsorpční procesy, biodegradace, distribuce mezi fázemi aj.)
- Většina výše uvedených zdrojů kontaminace (s výjimkou havarijní jednorázové bodové kontaminace) se - pokud nebyly předem odstraněny - nachází trvale v zájmovém území a lze je tak označit jako potenciální zdroje. Měly být v rámci správy jímacího území a ochranných pásem (stanovený režim v ochranných pásmech, provozní a havarijní řád) zmapovány a pravidelně monitorovány, ohrožení vodního zdroje by tak mělo být relativně včas zachyceno.

Zájemce o problematiku znečišťujících látek ve vodách v podrobnější verzi lze odkázat na literaturu (např. Pitter 2009), protože zaměření i rozsah této metodiky neumožňuje se věnovat kontaminačním otázkám podrobněji.



Obr. 1.4. Vodní nádrž Souš – jímání povrchových vod (archív P. Maršalko)

I v ochranných pásmech povrchových vod je důležité poznání geologických a hydrogeologických poměrů; vlastnosti horninového prostředí a vzájemná souvislost povrchových a podzemních vod hrají podstatnou roli v ochraně využívaných útvarů povrchových vod a nastavení správných ochranných a omezujících opatření v ochranných pásmech.

V případě řešení havárie v ochranných pásmech vodních zdrojů, nebo dokonce v těsné blízkosti jímacích objektů obvykle není kvůli nebezpečí z prodlení a vzniku dalších návazných škod čas na standardní metodické postupy (průzkum kontaminace, zpracování analýzy rizika, studie proveditelnosti, stanovení optimálního sanačního zásahu atd.), které jsou obvykle dopracovávány až v průběhu prací. Je proto velkou odpovědností všech zainteresovaných orgánů, a v první řadě příslušného vodoprávního úřadu, příp. České inspekce životního prostředí (ČIŽP), aby rozhodo-

valy rychle, ale s odbornou erudicí, znalostí věci, ve vzájemné shodě a s dobrou organizací práce všech zasahujících složek. I sanační zásah v časové tísni musí ale vycházet ze zhodnocení situace a alespoň z odhadu škod, které hrozí. Tomuto základnímu zhodnocení situace musí odpovídat rozsah a způsob havarijního (primárního) sanačního zásahu.

2. PŘEHLED POUŽÍVANÝCH METOD PŘI PRŮZKUMU A SANACI KONTAMINOVANÝCH PODZEMNÍCH VOD

Při hydrogeologickém průzkumu jsou využívány jednak přímé hydrogeologické metody, jednak i geofyzikální metody, které jsou označovány jako nepřímé. Je to z toho důvodu, že tyto metody nesledují přímo hydrogeologické parametry prostředí, ale odvozují je z měření dalších vztažných fyzikálních parametrů prostředí, navíc měřených (kromě vrtných) na povrchu země.

2. 1. METODY HYDROGEOLOGICKÉHO PRŮZKUMU

V dalším textu je uveden stručný přehled hydrogeologických metod, které se využívají při průzkumu kontaminace v jímacích územích podzemních vod pro hromadné zásobování pitnou vodou. Podrobnější popis metod hydrogeologie je uveden např. v příručce Základní principy hydrogeologie (*Kolektiv autorů 2010*).

Zjišťování a hodnocení stavu (tj. množství a jakosti) podzemních vod slouží k doplnění podkladů pro vodoprávní úřady pro výkon veřejné správy, plánování a poskytování informací veřejnosti v oblasti vod (zákon o vodách, hlava III). Ochranou vodních zdrojů se pak zabývá hlava V téhož zákona, par. 29. Nejvýznamnějšími metodami hodnocení stavu podzemních vod jsou metody hydrogeologické, jejichž nedílnou součástí jsou geofyzikální metody. Obě tyto metody jsou popsány v dalších kapitolách.

2.1.1. Přípravná etapa hydrogeologického průzkumu

Vlastnímu průzkumu vždy předchází rešerše, tj. shromáždění, studium a přehodnocení všech materiálů týkajících se vlastní problematiky, tedy ekologické zátěže v daném území. Podkladem pro zpracování rešerše jsou především následující činnosti:

- shromáždění archivních materiálů geologických, hydrogeologických, geofyzikálních, geochemických, kontaminačních a dalších podkladů ze všech dostupných zdrojů
- podrobná odborná rekognoskace terénu, provedení aktuálního geologického mapování a fotodokumentace
- u jímacích území podzemních vod pro hromadné zásobování pitnou vodou je nezbytné získat data týkající se především jímacích objektů (druh, konstrukce, jímané množství), včetně provozních a manipulačních řádů, vodoprávních rozhodnutí a výsledků monitoringu kvality jímané vody, [0]hodnocení vývoje chemismu vod v čase a popis ochranných pásem,
- ověření majetkoprávních vztahů v zájmové lokalitě, aktuální výpis z katastru nemovitostí.

2.1.2. Hydrogeologické mapování

Hydrogeologické mapování je základní metodou hydrogeologického průzkumu. Tyto práce zahrnují terénní rekognoskaci, popis dokumentačních bodů, sondážní a měřické práce v terénu a odběry vzorků pro laboratorní zkoušky. Spolu s archívními údaji z hydrogeologických průzkumů a starších mapovacích prací jsou pak všechny tyto informace využity pro vypracování základní či účelové hydrogeologické mapy daného území. Hydrogeologické mapy znázorňují hydrogeologické poměry určitého území. Je z nich zřejmý oběh a režim podzemní vody v hydrogeologických strukturách, rozšíření a zonálnost podzemní vody ve vztahu k hydrografii a hydrologii, geomorfologii, geologii a tektonice. Tyto mapy jsou doplněny informacemi o lokálních kontaminacích. Podrobněji se danou problematikou zabývá příručka *Základní principy hydrogeologie (Kolektiv autorů 2010)*.

2.1.3. Hydrologické metody

Hydrologické metody jsou nedílnou součástí hydrogeologického průzkumu. Mezi tyto metody patří zvláště zpracování bilance podzemních vod, měření srážek a výparu, stanovení odtoku (povrchového, hypodermického, podzemního), měření vydatností pramenů a vodních stavů (průtoky, hladiny podzemní vody).



Obr. 2.1. Průzkumný hydrogeologický vrt

Úspěšnost hydrogeologického průzkumu je dána správnou konstrukcí průzkumných vrtů a jejich kvalitním provedením. Důležité je zajistit i řádné uzavření zhlaví vrtu (zvláště vrtů dlouhodobě umístěných v ochranných pásmech vodních zdrojů, které slouží např. pro monitoring), aby nemohlo dojít k přímé kontaminaci podzemní vody vrtným stvolem s povrchu (vtok znečištěné povrchové vody, úmyslné nalití chemikálie apod.). Důležité je zajistit i jejich řádné označení, aby v případě potřeby bylo možné dohledat vlastníka vrtu či parametry vrtu nebo data z něho získaná.

2.1.4. Sondážní metody

Vrt nebo sonda umožňují studovat podzemní vodu, která není z povrchu terénu volně přístupná. V jeho rámci zpravidla dochází k odběru vzorků zemin a podzemní vody na příslušné analýzy, k terénním měřením fyzikálně-chemických parametrů, k záměrům hladiny podzemní vody, k provádění hydrodynamických zkoušek, ke stopovacím zkouškám, k dlouhodobějšímu monitoringu a po ukončení průzkumných prací mohou sloužit k sanačnímu čerpání či k zasakování vyčištěné vody. K vrtání se používá různých vrtných technologií (vrtání jádrové, rotačně příklepové, nárazovotočivé, náběrové, šnekové, vibrační, drapákové, atd.).

Parametry vrtu (tzn. hloubka, vrtný průměr, použitá vrtná technologie, způsob vystrojení vrtu, interval perforace výstroje, obsyp a těsnění výstroje) se odvíjejí od charakteru geologického prostředí (např. zpevněné, nezpevněné horniny), podle určení průzkumného díla (jednorázový odběr vzorků, dlouhodobější monitoring, potenciální využití jako sanační objekt, atd.) i podle vlastností polutantů, které se v podzemní vodě očekávají.



Obr.2.2. Mobilní vrtná souprava Wirth B1A

Veškeré vrtné práce i další pozemní průzkumné práce v ochranných pásmech vodních zdrojů jsou vázány na povolení vodoprávního orgánu, který tato ochranná pásma vyhlásil, a na splnění podmínek jím stanovených (zákon 254/2001 Sb. o vodách).

Zásadní je správná interpretace získaných výsledků a jejich skloubení s výsledky ostatních hydrogeologických a geofyzikálních metod.

2.1.5. Hydrochemické metody

Pro komplexní vyhodnocení hydrogeologického průzkumu jsou zásadní znalosti o fyzikálně-chemických vlastnostech vody. V praxi se odebírají vzorky podzemních vod a v případě potřeby i vzorky povrchových a srážkových vod. Rozsah analytických prací vychází ze zadání průzkumu (může se jednat o průzkum zdrojů podzemní vody pro pitné účely, zjištění kontamina-

ce, průzkum pro stavební účely, atd.). Základním předpokladem získání spolehlivých údajů o chemickém složení vody je správné odebrání vzorku vody na chemickou analýzu. Protože některé výsledky analýz by převozem do laboratoře byly znehodnoceny, musí se některá měření uskutečnit přímo v terénu (např. teplota, pH, oxidačně-redoxní potenciál, rozpuštěný kyslík aj.).

K chemickým analýzám vody je využívána celá řada analytických metod. Z nejrozšířenějších metod lze jmenovat např. spektrofotometrii, atomovou absorpční spektrometrii (AAS), atomovou emisní spektrometrii (AES), hmotnostní spektrometrii, infračervenou spektroskopii, potenciometrická stanovení s využitím iontově selektivních elektrod nebo vysokoúčinnou kapalinovou chromatografii (HPLC).

2.1.6. Hydrodynamické zkoušky v hydrogeologických vrtech

K určování hydraulických parametrů zvodněného horninového prostředí slouží různé hydrodynamické zkoušky. Nejčastěji se používají čerpací a stoupací zkoušky, dále např. zkoušky nálevové, vtláčecí apod. Z výstupů hydrodynamických zkoušek se stanovují obvykle základní hydraulické parametry – koeficient hydraulické vodivosti **K** (ukazatel míry propustnosti horninového prostředí za podmínky jeho 100% saturace vodou), koeficient transmisivity **T** (charakterizuje míru schopnosti horninového tělesa propouštět vodu), a koeficient storativity **S** (charakterizuje množství vody, které lze odebrat z hydrogeologického kolektoru), efektivní pórovitost **e_f** (podíl pórového prostoru k celkovému objemu horniny, ve kterém dochází ke skutečnému proudění tekutin vlivem gravitace), a specifická vydatnost **q** (podíl vydatnosti **Q** odebírané z hydro-geologického objektu čerpáním nebo vypouštěním přelivu a velikosti odpovídajícího ustáleného snížení hladiny).



Obr. 2.3. Záchytné nepropustné příkopy zaústěné do záchytné jímky (foto P. Maršalko)

Záchytné jímky (lapoly) podél silnice (obr. 2.3) procházející ochranným pásmem vodního zdroje jsou jedním z častých preventivních opatření proti kontaminaci podzemních vod.

2.1.7. Metody modelování

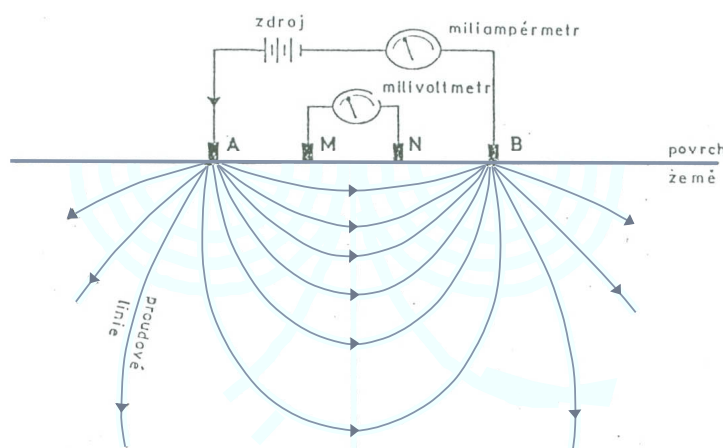
Matematické modelování umožňuje lepší pochopení procesů probíhajících v horninovém prostředí a následnou simulaci navržených sanačních zásahů. Na základě známých vstupních údajů se vytváří koncepční model, který zobrazuje reálné přírodní prostředí ve zjednodušeném modelovém systému, který je řešen na PC. Modelové řešení proudění podzemní vody je založeno na syntéze informací z oblasti geologie, hydrogeologie, hydrologie, klimatologie a geografie.

2.2. GEOFYZIKÁLNÍ METODY

Geofyzikální metody (též metody užité geofyziky) zkoumají geologické prostředí a hydrogeologický režim pod povrchem země měřením fyzikálních parametrů daného prostředí z povrchu země, pak se jedná o povrchové metody, nebo ve vrtech - nazývané jako karotáž či karotážní měření. Metody se rozděluje podle toho, jaké fyzikální veličiny se měří: elektrické, elektromagnetické, magnetické, tíhové, seismické a pod (např. Mareš a kol. 1983, Gruntorád a kol. 1985, Karous 1989, Mareš a kol. 1990).

2.2.1. Geoelektrické metody

Geoelektrické metody patří mezi nejpoužívanější a nejrozmanitější pozemní geofyzikální metody aplikované v hydrogeologickém průzkumu. V nich se uplatňuje zejména *měrný odpor neboli rezistivita prostředí* ρ (Ωm) či *měrná vodivost (konduktivita)* $\sigma = \rho^{-1}$, tj. převrácená hodnota odporu v S/m), které jsou úzce závislé na hydrogeologických parametrech horninového prostředí (viz kap. 3.2).

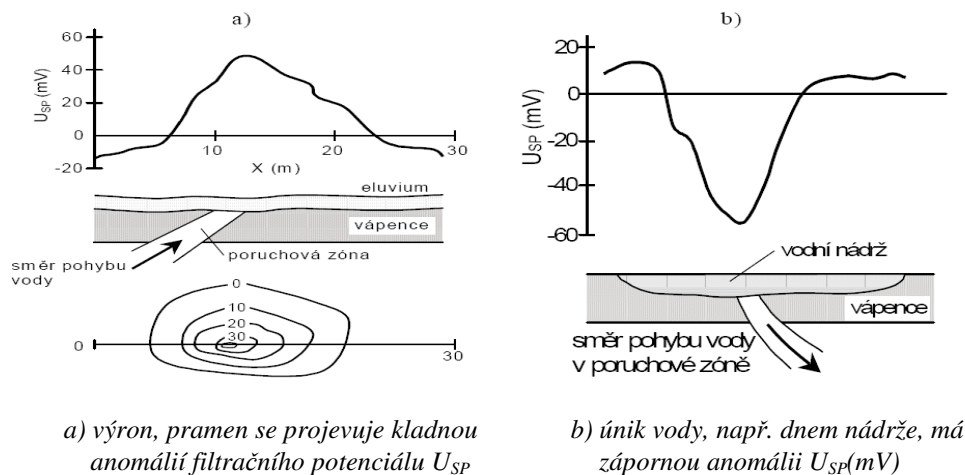


Obr. 2.4. Princip odporových metod

(A, B - proudové elektrody, M, N - měřicí elektrody)

Měrný odpor hornin se zjišťuje tzv. **odporovými metodami** podobně, jako na vzorcích materiálu v laboratoři (obr. 2.4): Do země se uzemněnými proudovými elektrodami A(+ pól) a B(- pól) vhání proud I měřený miliampérmetrem a mezi měřicími elektrodami M a N se měří napětí U milivoltmetrem. Zdrojem proudu jsou baterie nebo generátory. Podle Ohmova zákona se pak určí odpor hornin ρ v okolí měřicího systému ze vztahu $\rho = k \cdot U/I$. Konstanta k je závislá na vzdálenostech jednotlivých elektrod.

Měření existujících přirozených elektrických stacionárních polí se většinou označuje jako **metoda spontánní polarizace** nebo *spontánních potenciálů* (SP). Existence přirozeného stacionárního elektrického pole v zemi má svůj původ v elektrochemických reakcích prostředí, které jsou souborně označovány jako *elektrochemická aktivita prostředí*. Z těchto polí jsou pro hydrogeologické aplikace nejdůležitější *filtrační spontánní potenciály* (FSP), vznikající při *filtraci* podzemní vody (s nosiči el. náboje - ionty - tvoří slabý elektrolyt) průlinovým prostředím. Směr pohybu kladných iontů je totožný s pohybem podzemní vody. Měřením slabých napětí (v milivoltech mV) na povrchu tak zjistíme pohyb podzemní vody jako směr kladného napětí. V místě výronu vody z podzemí (obr. 2.6a) se vytváří kladné napětí U_{SP} , v místě vsaku naopak napětí záporné (obr. 2.6 b - vpravo).



Obr. 2.6. Příklad metody spontánní polarizace FSP pro sledování pohybu podzemních vod

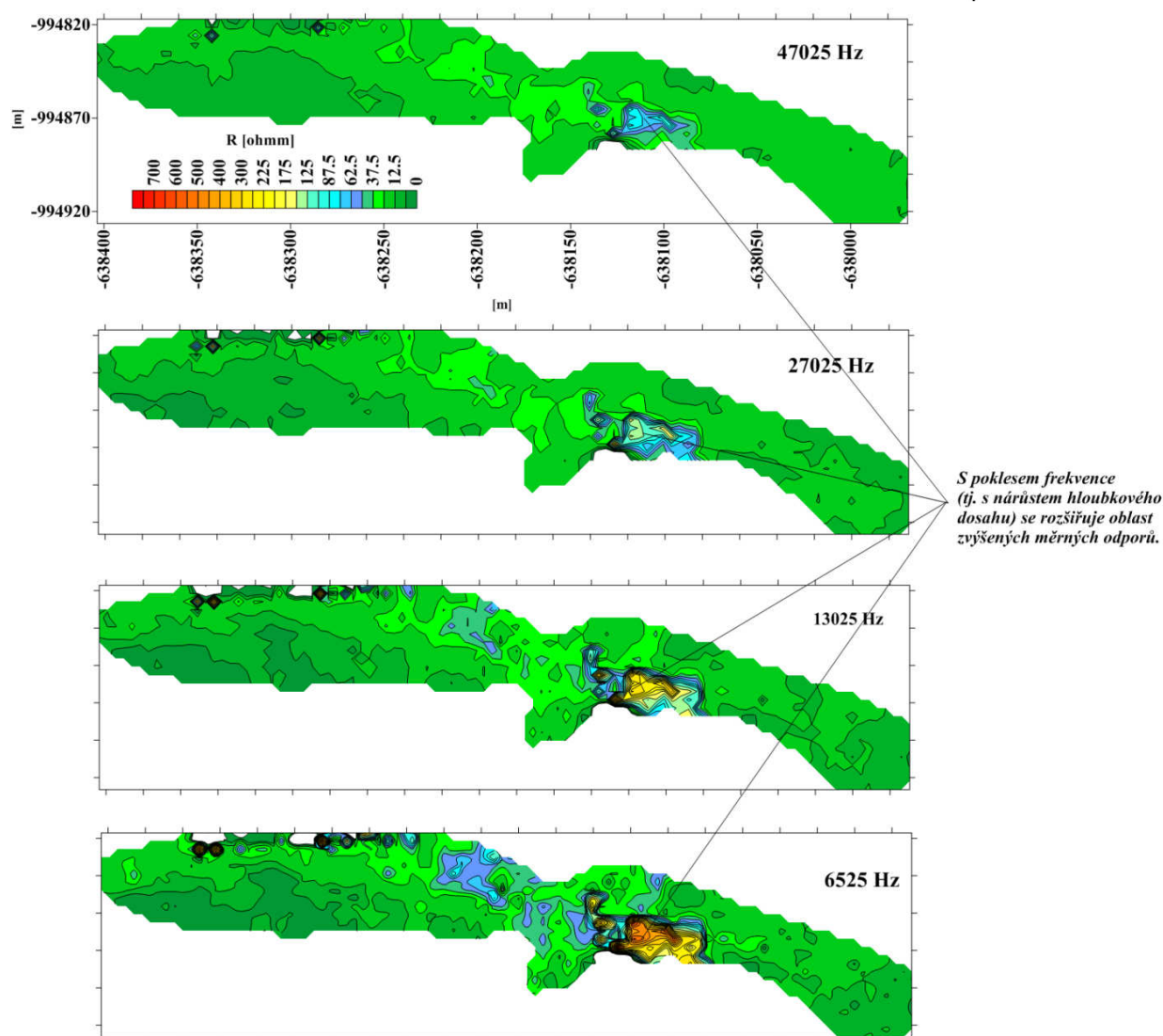
Metoda FSP slouží:

- ke sledování pohybů podzemní vody,
- vyhledání míst vsaků a skrytých výronů podzemní vody (obr. 2.6),
- určení míst porušení těsnících a izolačních hydrologických bariér (podzemních stěn, ochranných fólií, hrází),
- detekci úniků z produktovodů a
- lokalizaci dalších míst, kde vznikají filtrační potenciály prouděním podzemní vody průlinovým prostředím.

Elektromagnetické metody tvoří velmi rozsáhlou skupinu metod a jsou využívány hlavně v mělkém průzkumu do několika desítek metrů pro sledování měrných odporů prostředí podobně jako metody odporové. Induktivní elektromagnetické jevy jsou nejintenzivnější ve vodivých prostředích a proto slouží hlavně pro mapování geologických vodičů:

- porušených hornin s vyšší porózitou a proto i s vyšším obsahem porézních vodivých vod,
- mapování sedimentů s vyšším obsahem jílovitých minerálů (které jsou elektricky vodivé díky vyššímu obsahu vázané vody), které se projevují jako hydrologické izolátory.

Nejčastěji je využívána tzv. metoda *dipólového elektromagnetického profilování* (**DEMP** - viz obr. 2.7). Jejich zdrojem jsou antény napájené střídavým proudem různých frekvencí (zdrojový dipól), měří se přijímací anténou anomálie indukované ve vodivém zemském prostředí. Změnou frekvence zdrojového pole se mění hloubkový dosah, čehož využívají metody *elektromagnetického* (frekvenčního nebo přechodového) *sondování* - čím vyšší frekvence, tím menší hloubkový dosah. Hloubkový dosah se rovněž zvětšuje s rostoucí vzdáleností obou dipólů.



Obr. 2.7. Mapy izoliní měrných odporů DEMP pro 4 různé frekvence zdrojového EM pole

Na obr. 2.7. jsou mapy měřených měrných odporů podle DEMP téhož geologického prostředí pro různé frekvence, tedy pro různé hloubkové zásahy (do cca 10 m pro nejnižší frekvence, zde 6 525 Hz). Pokryv má velmi nízké odpory (menší než 25 Ωm - zelené plochy odpovídající jílovitým hlínám). Hřbet podložních hornin s vyššími odpory se postupně se zvyšujícím se hloubkovým dosahem projevuje výrazněji (žlutohnědá anomálie ve 2/3 území zleva).

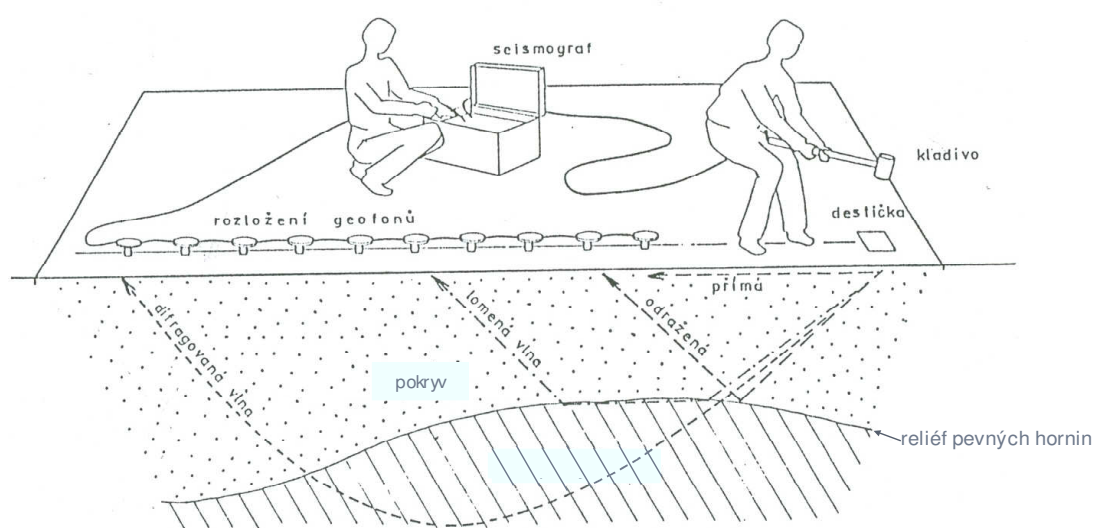
Z dalších elektromagnetických metod se uplatňuje metodicky nenáročná a finančně efektivní *metoda velmi dlouhých vln* (VDV), která využívá pole navigačních radiostanic pracujících v rozsahu VDV vln - desítky kHz. Tato metoda mapuje vodivé tektonické poruchy, které se prozrazují vznikem v nich indukovaných vířivých proudů (anomáliemi).

Moderní *georadarová metoda* (zkratka GPR z angl. Ground Penetrating Radar) je založena na vyslání EM pulzů/signálů o vysoké vlastní frekvenci (řádově 50 - 1 000 MHz) pod povrch a registraci času příjmu signálu po odrazu od podpovrchových reflexních rozhraní do hloubek mnoha metrů. Georadarové řezy dávají velmi detailní obraz mělkého geologického řezu, nemají však dostatečnou možnost klasifikovat prostředí podle fyzikálních či jiných parametrů.

2.2.2. Seismické metody

Pro sledování stavu horninového masívu a jeho nadloží je u nás nejvíce využívána **mělká refrakční seismika** (MRS, obr. 2.8). Seismický signál je generován slabými náložemi nebo častěji údery kladiva na destičku. ten se šíří jak v pomalejším pokryvu a v pevném podloží, ale zároveň se odráží, lomí a difraguje od reliéfu pevných hornin směrem k povrchu. Doba příchodu seismických vln, lomených a odražených z hloubek, je registrována seismografem pomocí ekvidistantně rozložených *geofonů*, které převádí seismické vlnění na povrchu země na elektrické napětí. Tyto odražené vlny přinášejí informace o mělké geologické stavbě pod měřeným profilem.

Metodu MRS je možné použít pro vymapování poruch (které se projevují jako místa malých seismických rychlostí), sledování hladiny podzemní vody (odrazné rozhraní) a pro řešení široké škály mělkých strukturních geologických otázek.



Obr. 2.8. Princip seismické refrakční metody

2.2.3. Karotážní metody

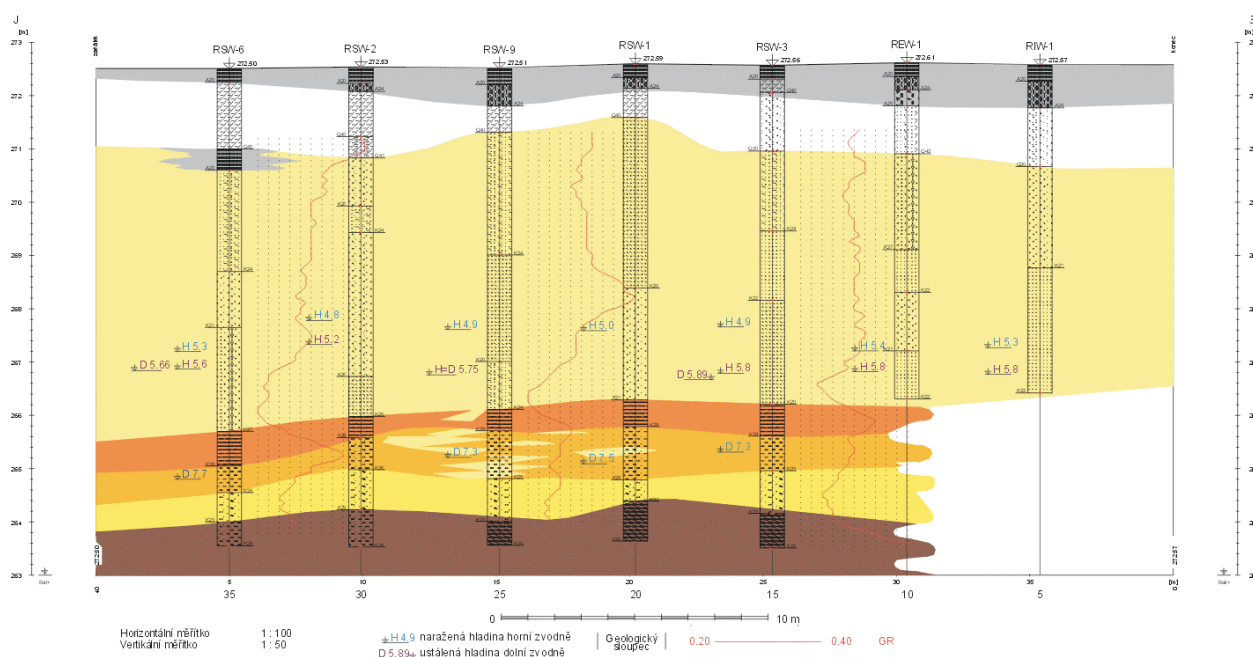
Tímto termínem označujeme soubor geofyzikálních měření ve vrtech, které stanovují fyzikální vlastnosti hornin ve vrtném profilu a v jeho blízkém okolí. Další metody sledují i technický stav vrtů, např. průměr, odklon od vertikály a směr (azimut) tohoto odklonu, stav výstroje apod. Jednotlivé karotážní metody jsou určitými variantami povrchových geofyzikálních metod, mají tedy společné teoretické principy. Rozdíl je ve způsobu měření a zpracování dat. Měřená veličina se zaznamenává při vzestupném pohybu měřicí sondy vrtem. Výhodou karotážních měření je téměř přímý styk měřicího systému s proměřovaným prostředím. Proto jsou měřené údaje velmi spolehlivé. Nepříznivě působí změny průměru vrtu, existence výplachu ve vrtu, a pod., které se eliminují v procesu interpretace nebo přímo při měření vhodným technickým či softwarovým systémem.

A) Souborem geofyzikálních metod měřených ve vrtech lze určit horninový typ - **litologické členění**, vymežit propustné a nepropustné horniny, stanovit jejich jílovitost, pórovitost, příp. rozpukanost, stupeň nasycení horniny kapalinou, charakter nasycující kapaliny (různé znečištění, sladká vs. slaná voda, kontaminant) prostřednictvím měření měrného odporu (rezistivity) nebo vodivosti, spontánní polarizace, hustoty, přirozené gama aktivity, vodíkového indexu měřením sekundárního neutronového pole ve vrtech, rychlosti šíření elastických vln aj.

B) Druhý okruh řešených otázek umožňuje stanovit **kvalitu a dynamiku podzemní vody ve vrtu**, např. místa přítoku vody do vrtu, směr pohybu vody vrtem, vydatnost jednotlivých přítoků, přítomnost teplých a/nebo mineralizovaných vod apod. Tyto otázky řešíme tím, že měříme přímo parametry vody ve vrtech: rychlost pohybu vody průtokoměry, dále vodivost vody ve vrtu, teplotu, zákal (průzračnost), příp. radioaktivitu. Pokud není dostatečný kontrast mezi vodou přitékající z horniny do vrtu a vodou ve vrtu, pak tento kontrast uměle vytvoříme pomocí značkovačů (soli).

Přímo lze detekovat místa přítoků a rychlost pohybu podzemní vody *průtokoměry* pouze v případech rychlého proudění a proto se jich využívá u vrtů s přetokem a u nichž došlo k hydraulickému propojení mezi dvěma horizonty o výrazně rozdílných výtlačných úrovních atp.

U pomalejších rychlostí filtrace se používají nepřímé metody pohybu podzemní vody ve vrtech, které jsou založeny na sledování pohybu fyzikálního rozhraní ve vodě vyplňující vrt (výplach). Fyzikální rozhraní je uměle vytvářeno pomocí značkovačů, měnících některou z vlastností vody. Touto může být měrný odpor, optická čistota, případně teplota. Značkuje se spojitě nebo bodově voda ve vrtu, případně se značkovačem upraví voda nalévaná. Pro sledování pohybu rozhraní se využívá časové série některé ze tří detekčních metod, rezistivimetrie, fotometrie, nebo termometrie. Mez citlivosti určení rychlosti je mnohem nižší než u vrtulkového průtokoměru a dovoluje odhalit i velmi pomalá proudění řádu 10^{-2} m/den. Z těchto tří metod se v drtivé většině používá rezistivimetrie spolu se značením pomocí kuchyňské soli. Důvodem je nejspíš a nejdokonalejší označení celého vodního sloupce, jednoduchost detekční sondy a celková efektivita této metody. Pouze ve speciálních případech, kdy nelze rezistivimetrii použít, se přikročí k některé z jiných nepřímých metod.



Karotáž detailně *člení vrtný profil* podle jednotlivého měřeného parametru, snadno sleduje dynamické děje ve vrtu (tj. proudění podzemní vody v čase) a podává informace o rozložení propustných poloh a jejich hydraulických vlastnostech. Rozlišuje přítoky prosté vody, vody minerální a často také horizonty s vodou kontaminovanou. Kvalitní karotážní měření zabrání nesprávným technickým řešením, opakovaná revizní měření po delším čase umožní rozhodnout, zda změny vydatnosti jsou způsobeny změnou v režimu podzemní vody, nebo změnami technického stavu vrtu.

Měřicí systém karotážních sond má zpravidla dosah několika cm od stěny vrtu, málokdy přesáhne prvé desítky cm. Pro zvýšení dosahu pro detekci objektů nezastižených vrtem, používáme **prosvěcování (tomografii) mezi blízkými vrty**. Výsledkem je tzv. tomogram - rozložení měřeného parametru v řezu mezi vrty: rychlost šíření a/nebo pohlcení elastických vln, rezistivita hornin, doba příchodu a zeslabení radarového signálu. Detekce dutin, větších poruchových zón atd. může být určena za příznivých podmínek i při vzdálenosti mezi vrty až 50 m, jinak je menší.

Pro průzkum nezpevněných materiálů (skládkový materiál, výsypky, propustný povrch a pod.) byly vyvinuty **penetrační soupravy** umístěné na speciálních vozidlech. Sestávají jednak z penetrační tyče, která je vybavena snímači pro měření mechanického odporu na hrotu při jejím zatlačování a tzv. lokálního plášťového tření, jednak ze zatlačovacího zařízení pomocí úderů kladiva (dynamická verze) nebo hydraulickým tlakem (statická verze). Tímto způsobem se určí pevnost hornin ve vertikálním směru. Penetrační sondování lze pro zvýšení objektivitu průzkumu a rozšíření možností geotechnických výpočtů doplnit průběžnou registrací fyzikálních parametrů hornin ve stvolu penetrační sondy (**penetrační karotáž**). Penetrační měření jsou masivně uplatňována při sledování.

2.2.4. Ostatní pozemní geofyzikální metody

Gravimetrie 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 - např. cesty podzemních toků a prostory v krasových oblastech), sledovat reliéf skalního podloží s vyššími hustotami a mapovat rozložení a mocnosti povrchu a antropogenních uloženin.

Radionuklidové metody využívají radioaktivního záření k určení distribuce přirozených a umělých zdrojů radioaktivního záření měřením aktivity radiace na povrchu, ve vrtech a ze vzduchu. V hydrogeologických projektech se používají k monitorování pohybu uměle zavedených slabých radioaktivních stopovačů při určování pohybu podzemních vod hlavně v karotáži.

Termometrie se využívá v hydrogeologii hlavně pro zjišťování skrytých výronů podzemních vod nejlépe v době vysokého kontrastu jejich teploty vzhledem k povrchovým meteorologickým podmínkám. Nejčastější je využití termometrie v karotážních aplikacích, kde slouží ke zjišťování přítoků vod do vrtů, které se liší teplotně od výplachu. Význam termometrie je popsán v kap. 2.2.3. o karotážních metodách.

Malé využití v hydrogeologii má **magnetometrie**, pokud neslouží k mapování různých hornin (odlišení kyselých a bazických vyvřelin) a jejich kontaktů, např. ve vulkanických oblastech.

3. APLIKACE GEOFYZIKÁLNÍCH PRŮZKUMNÝCH A SANAČNÍCH METOD

Geologické podmínky v zájmové oblasti jsou většinou vzhledem k detailní prozkoumanosti území ČR dobře známy již z rešerše dosavadních geologických a hydrogeologických prací i v širším okolí zkoumané oblasti realizovaných v rámci základního výzkumu i průzkumu pro jiné či specifické účely a výsledků vrtných údajů. Proto je při zahájení hydrogeologického projektu uskutečnit v první řadě podrobnou **rešerši** dosavadních geologických znalostí o zájmovém území.

Dodatečné detailní informace požadované pro provádění dalších hydrogeologických prací se provádí nejprve ekonomicky méně náročnějším **geofyzikálním průzkumem**, který efektivně přispívá k lokalizaci dalších hydrologických a vrtných prací. V dalším textu se proto soustředíme na přínos a možnosti geofyzikálních metod splnit cíle průzkumu detailní lokality. Hydrogeologické metody jsou podrobně popsány v paralelně vydávané příručce MŽP „Základní principy hydrogeologie“ (*Kolektiv autorů 2010*), na kterou lze zájemce odkázat. Detailněji je možné se seznámit s možnostmi geofyzikálních metod v hydrogeologii také v publikacích (*Stenzel a Szymanko 1973, Mareš a kol. 1983, Karous a Mareš 1988, Ward ed. 1990, Kelly, Mareš (ed) a kol. 1993, Vogelsag 1994* atd.).

3.1. GEOLOGICKÁ CHARAKTERISTIKA OKOLÍ ZÁJMOVÉ PLOCHY

3.1.1. Upřesnění geologické stavby geofyzikálním průzkumem

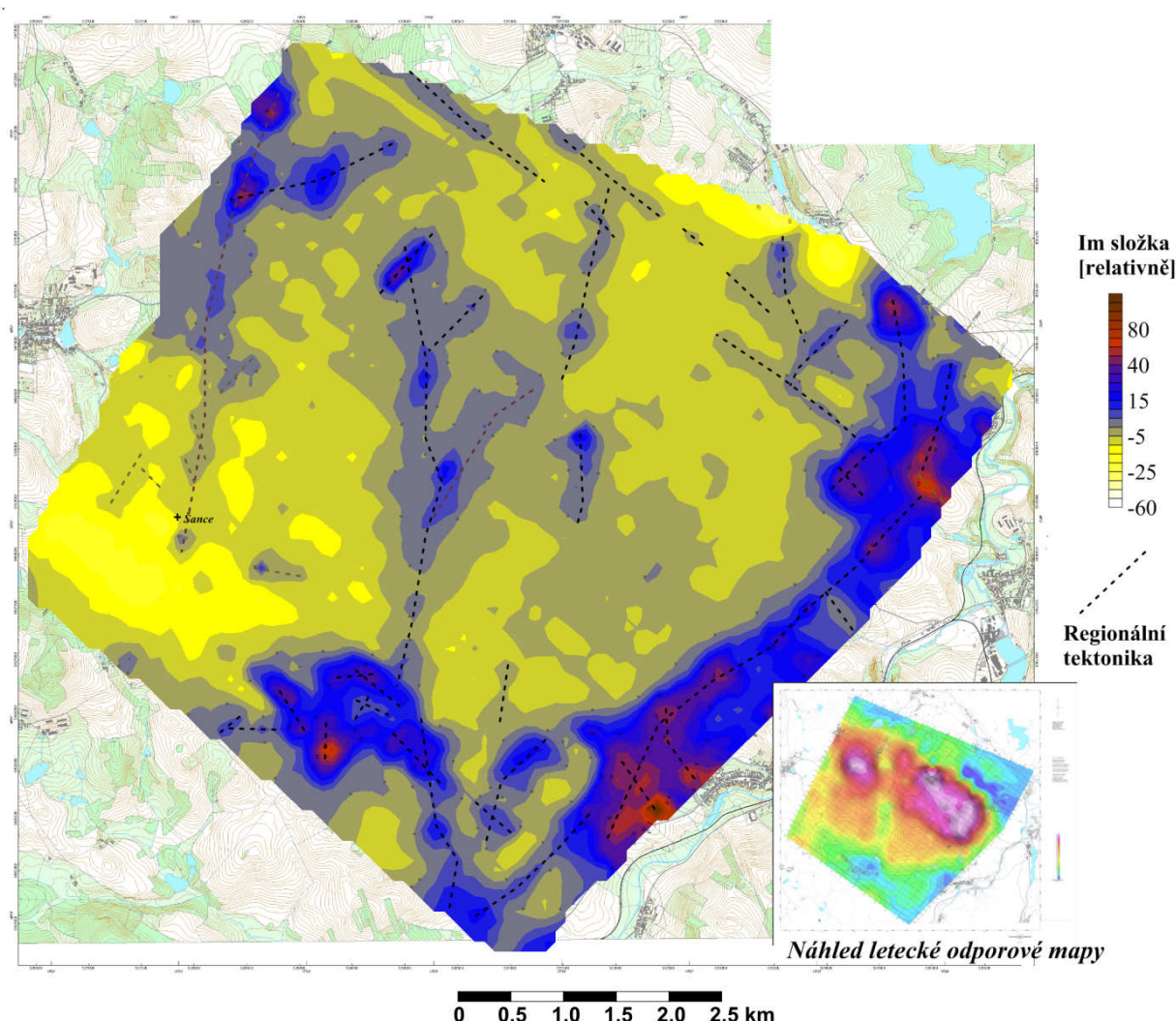
Pro celkové hodnocení zájmové oblasti z hlediska hydrogeologického režimu je zásadní znalost detailní geologické stavby v širším okolí. V našich podmínkách většinou postačují rešerše dosavadních geologických, hydrogeologických, geofyzikálních a dalších relevantních prací, prováděných i pro jiné účely, a studium regionálních geofyzikálních podkladů, které jsou prováděny Českou geologickou službou (ČGS), Ministerstvem životního prostředí (MŽP) a dalšími institucemi v rámci základního výzkumu. Upřesňují se pouze detailní geologické struktury a charakteristiky, hlavně tektonická stavba území.

Úkolem geofyziky je přispět k prostorovému vymezení pokryvných útvarů a jejich litologie, stanovení hloubky a tvaru skalního podloží, určení charakteru a rozsahu litologických jednotek v mapě i ve vertikálním směru, sledování litofaciálních změn v pokryvu a podloží, mapování poruchových zón, vymezení prostorového rozsahu hydrogeologických kolektorů a izolátorů, případně i stanovení jejich hydrogeologických parametrů apod. Geofyzikální průzkum se provádí etapovitě v cyklické návaznosti (**zpětná vazba**) na prováděné geologické práce.

Geologické mapování

Rozsah hornin se mapuje většinou efektivními nákladově nenáročnými profilovými geofyzikálními metodami v pravidelných sítích měřických bodů a profilů. Uplatňují se metody, v nichž se mapované horniny projevují kontrastními fyzikálními vlastnostmi - měrným odporem, magnetickými vlastnostmi a někdy i přirozenou radioaktivitou, tj. *odporové a elektromagnetické profilování, pozemní magnetometrie a radiometrie*. Geofyzikální průzkum vždy lehce přesahuje zájmové území, aby byly zastíženy i účinky okolních hornin.

Z hlediska hydrogeologického režimu zájmové oblasti jsou důležité porušené linie, které se často stávají preferenčními cestami pohybu podzemních vod a tedy i šíření případného kontaminantu. Při rozsáhlém (regionálním) průzkumu je výhodné vymapovat porušené zóny, které se projevují jako vodivé, leteckým elektromagnetickým (AEM) průzkumem, které je obdobné pozemnímu dipólovému elektromagnetickému profilování (DEMP - kap. 2.2.1), ale zdroj i měřicí anténa jsou nesený v gondole pod vrtulníkem (obr. 3.1).



Obr. 3.1. Mapa vodivosti hornin podle AEM indikujícího tektonické linie

(vyšší hodnoty vodivosti modře až červeně, tektonické linie přerušovanou černou čarou)

Vertikální hydrogeologické a geologické řezy

Pro zjištění vertikálního litologického profilu v daných bodech se používají sondážní metody, u nás převážně stejnosměrné *vertikální odporové sondování* (VES). Tzv. hloubkový dosah h_{ef} (tj. maximální hloubka, z níž lze ještě získat informace) závisí i na odporových poměrech, ale zhruba platí $h_{ef} = AB/4$ (AB - vzdálenost proudových elektrod). V zahraničí jsou používány i formy elektromagnetického *sondování frekvenčního a přechodového*, u kterých je uspořádání pro zajištění stejného hloubkového dosahu menší než u VES. V případě možnosti využití vrtů je velmi přínosný komplex *karotážních metod pro ověřování litologie*.

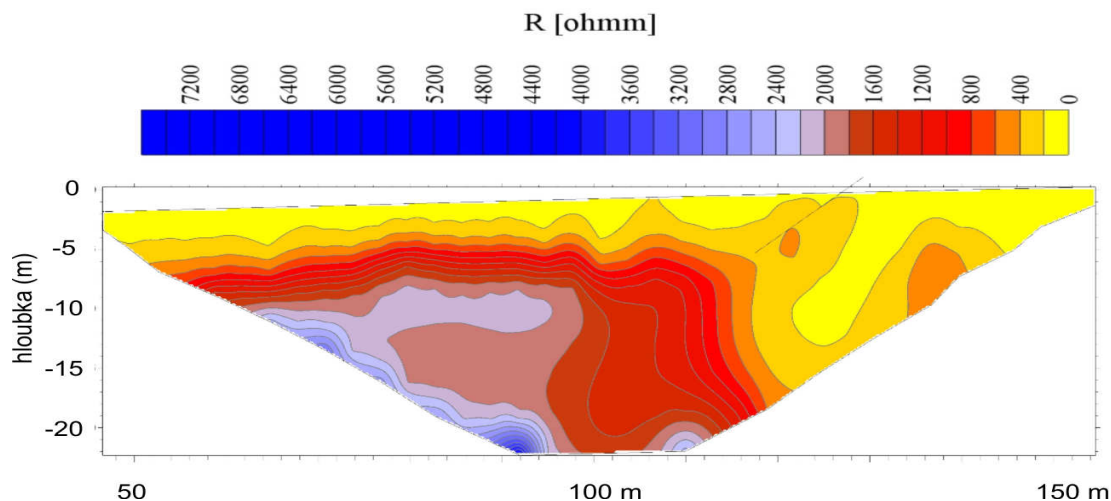
Studium geologického řezu podél profilů

Pomocí sondážních geofyzikálních metod (s proměnným a říditelným hloubkový dosahem), lze sestavit *geologicko geofyzikální řez*:

- Pro sledování průběhu geologických rozhraní v mělkém řezu (do několika metrů) a detekci různých umělých i přirozených nehomogenit a objektů se významně uplatňuje **georadar**.
- Pro sledování hlubších geologických řezů se používá **mělká refrakční seismika** (MRS), méně často i **mělká reflexní seismika** (MXS). Sondážní geofyzikální průzkum je určen také k odlišení nezpevněných uloženin pokryvných útvarů a podložních hornin.
- Pro detailní studium vertikálního řezu se používá **odporové sondování** v ekvidistantních bodech profilů nebo **odporové profilování s několika rozestupy** (s několika hloubkovými dosahy). Automatizovaná simultánní měření profilování a sondování se provádí tzv. **multielektrodotým uspořádáním** (MEU) - viz např. obr. 3.2.

3.1.2. Mocnost a charakter pokryvu, eluvium

Pokryv je tvořen většinou nezpevněnými kvartérními říčními a jezerními uloženinami, sprašovými hlínami, a směrem do hloubky přechází do zvětralinového pláště, eluvia. Z hlediska propustnosti bývají pokryvné uloženiny díky vysoké porózitě dobrým kolektorem podzemní vody (kromě jílovitých hlín a velmi jemných pelitických uloženin (spraše, jíly). Pro odlišení jílového a písčitého kvartéru jsou vhodné *odporové metody* (viz níže). Pokryvné útvary však tvoří mělké aquifery, jejichž vydatnost je silně závislá na atmosférických srážkách a které bývají kontaminovány spadem, zemědělskými hnojivy, úniky z různých skládek apod., a proto nejsou kvalitními zdroji vody.



Obr. 3.2. Odporový řez stanovený multielektrodotým uspořádáním při průzkumu mocnosti propustných fluvialních sedimentů

(mocnost pokryvu žlutá až béžová barva s odpory R do 400 ohmm (Ωm) je asi 5 m, kolem metráže 130 m se zřetelně projevuje prohloubené koryto v depresi reliéfu nevodivých podložních hornin)

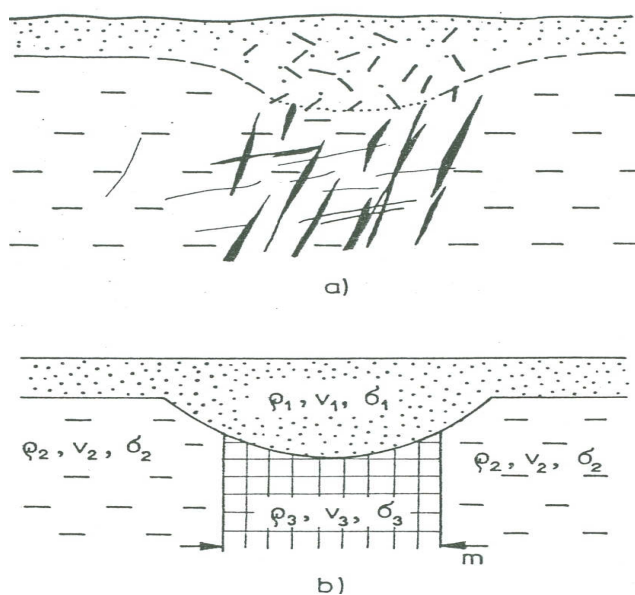
Eluvium krystalických hornin (vyvřeliny, metamorfity) v případě mechanického zvětrávání je písčité a propustné, leckde i značné mocnosti. Tyto mělké rozsáhlé zvodně ve zvětralinách bývají propojeny s podzemními vodami v puklinových systémech podložních hornin. Mocnost

písčitých eluvií lze sledovat *seismikou* a v případě nasycení vodou se projevují jako vodivý povrch v *odporových metodách*. Penetrační metody, tj. měření odporu penetrační sondy (tyče) při jejím zatlačování nebo zarážení do horniny pro nepřímé zjišťování jejích technických vlastností (pevnost, únosnost, úlehlost), mají úspěch, pokud se v eluviu nevyskytují větší rozvolněné balvany skalního podkladu.

V případě chemického zvětrávání díky kaolinizaci živců však vznikají jílové minerály a pokryvné útvary (případně i eluvium) mají malou propustnost. Splachováním jílových minerálů do puklin v podloží dochází ke snižování propustnosti a vydatnosti podložních puklinových kolektorů. Mocnost eluvia, vodivého díky jílovým minerálům, se efektivně mapuje *odporovými metodami* - sondováním nebo profilováním se dvěma rozestupy. Empiricky je nutno svázat interpretované mocnosti se skutečnými (podle vrtů). Často je rozhraní eluvia a skalního podloží pozvolné s postupnými přechody fyzikálních parametrů (většinou elektrické odpory a seismické rychlosti narůstají s hloubkou - tento typ se nazývá *gradientové prostředí* a vyžaduje specifický přístup k interpretaci jak u odporových, tak i seismických metod).

3.1.3. Podložní horniny, tektonické poruchy

U podložních hornin závisí jejich hydrogeologická funkce na jejich litologii a stavu porušení. Krystalinické horniny mají zvýšenou propustnost v tektonicky porušených puklinových zónách o malých mocnostech či šířkách (na obr. 3.3 a jsou pukliny v horninách označeny protáhlými černými ččkami), ale obvykle značné směrové rozlehlosti. Na povrchu se projevují jako poruchová pásma či puklinové zóny.



Obr. 3.3. Puklinová zóna (a) a její geofyzikální model (b)

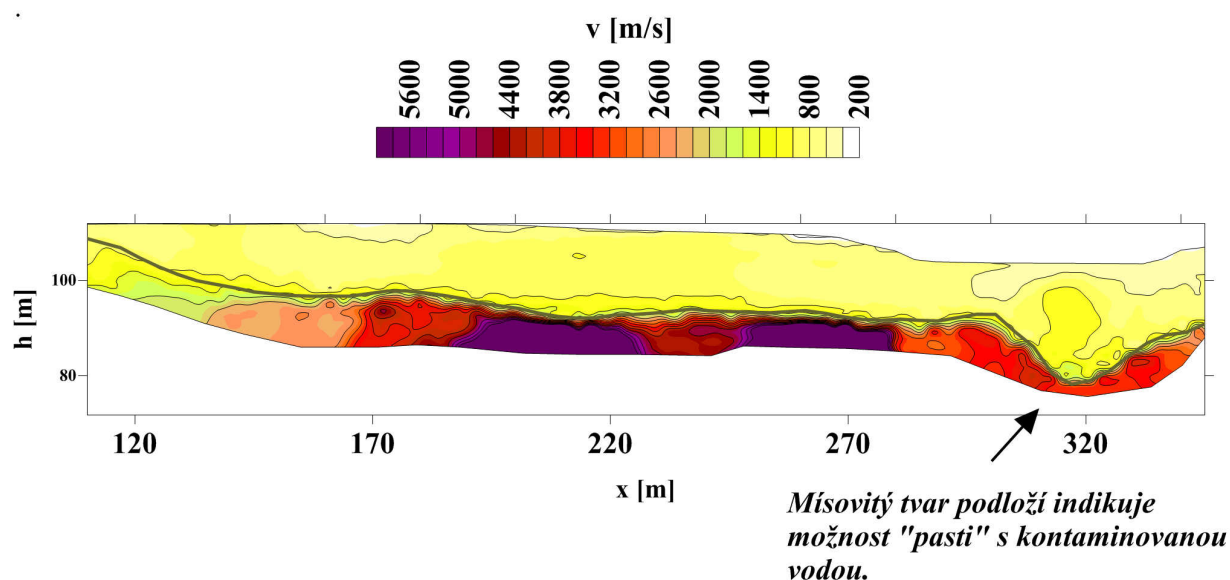
Jejich *pórovitost* je výraznější než u okolních hornin a vytváří dostatečné kontrasty geofyzikálních parametrů. Póry jsou buď prázdné (zaplněné vzduchem v zóně aerace) nebo jsou plně nasycené vodou (pod hladinou podzemní vody). Jsou-li póry poruch nasyceny vodou, projevují se jako výrazné elektrické vodiče a lze je mapovat všemi geoelektrickými metodami. Poruchy (puklinové zóny) se obvykle projevují sníženými hustotami ρ_3 , zvýšenou vodivostí σ_3 , či sníženými seismickými rychlostmi v_3 ve srovnání s ekvivalentními parametry okolních hornin (index 2) a povrchu (index 1). Je zřejmé, že se na vzniku anomálií podílí také větší hloubka zvětrání, která vytváří mocnější povrch a eluvia nad poruchou (tečkovaně na obr. 3.3).

Fyzikální projevy jejich zjednodušených teoretických modelů (obr. 3.3b) lze řešit fyzikálním nebo matematickým modelováním na počítačích.

Mapování strmých puklinových (porušených, tektonických) zón, linií či pásem jejich výchozů, se používají geoelektrická profilování, efektivně hlavně *metodou VDV a odporovým profilováním*. Zatímco u mocných porušených pásem, které nejsou překryty mocnějším vodivým pokryvem, se lze spokojit s kvalitativní interpretací, u úzkých je vhodné aplikovat některé korelační a statistické metody a při terénním měření postačí jednodušší uspořádání elektrod.

Pelitické sedimenty (jíly, spraše, jílovce, slínovce) mají velmi nízkou přirozenou pórovitost (v neporušeném stavu jsou to v písčítých sedimentech relativní hydrogeologické izolátory). Puklinové zóny (poruchy) v nich mohou však být kolektory vody, ale odporovými metodami se vyhledávají obtížně z důvodu malého odporového kontrastu mezi poruchami (kolem 10 Ωm) a vlastními sedimenty (10 - 20 Ωm). Pečlivá interpretace matematickou filtrací šumů může však zdůraznit vodivostní indicie, prezentovat je v ilustrativnější formě a tak zvýšit přínosnost odporových metod.

Je vhodné potvrdit tyto zóny seismickým měřením. Horniny s větší pórovitostí (puklinatostí) mají nižší měrnou hmotnost a s tím jsou spojeny i nižší rychlosti seismických vln v . Tato porušená pásma se proto vyhledávají mělkou seismikou jako místa snížených seismických rychlostí, gravimetrií podle tíhových depresí apod.



Obr. 3.4. Sledování deprese nepropustného podloží mělkou refrakční seismikou
(žlutě - nízké rychlosti pokryvu, barevně - vyšší rychlosti v podložních horninách)

Ve vrtech se uplatňují metody neutron-neutron a gama-gama (hustotní) karotáže, v nichž se porušená pásma projevují snížením hustot hornin. U bazických hornin, které se obvykle projevují vyšší magnetizací než kyselé vyvřeliny, se může porušené pásmo projevovat nevelkými zápornými magnetickými anomáliemi. Zvláštní funkci mají porušené zóny v krasových oblastech, kde rozměr dutin je často značný (podzemní jeskyně). Akumulace a pohyb podzemních vod se řídí tvarem, propojeností a rozměry podzemních kanálů. I zde se uplatňují výše zmíněné metody odporové a seismické a gravimetrie pro mapování porušených zón (podrobněji v kapitole 3.2.6 o hydrogeologii v krasových oblastech).

Protože zvláště tektonické poruchy založené v hloubce jsou často přírodními preferenčními cestami z hlubin Země vynášených elementů (plynů, par, iontů, radionuklidů atd.) a energií (např. zvýšené teploty), lze mapovat poruchy indikací zvýšených koncentrací těchto elementů - uplatní se atmogeochemické metody, radiometrická spektrometrie a emanometrie, termometrie, dálkové snímkování v infraskopu a pod.

3.2. HYDROGEOLOGICKÝ REŽIM

3.2.1. Charakter hydrogeologické propustnosti hornin

Hydrogeologický kolektor (horninové prostředí schopné akumulovat a vést vodu) a **hydrogeologický izolátor** (prostředí bránící pohybu) jsou pojmy relativní a charakterizují jejich hydrogeologickou funkci vůči okolnímu prostředí. Jílovitá vrstva v písčitéch sedimentech se chová jako izolátor, zatímco např. rozpukané jílovce jsou kolektory vody v jinak neporušených jílovcích.

Charakter hydrogeologické propustnosti (schopnosti hornin propouštět vodu) různých typů hornin se mění podle litologie, struktury, textury a hlavně podle stavu horniny - zvětrání, porušení apod. Je v největší míře závislá na relativním objemu otevřených pórů - pórovitosti. Ta je větší v rozpukaných, zvětralých a porušených horninách. Na velikosti propustnosti se podílí nejen absolutní objem pórů, ale i jejich absolutní velikost. Propustnost charakterizuje koeficient hydraulické vodivosti **K**, který udává vztah rychlosti proudění podzemní vody při daném sklonu proudění a mění se ve velmi širokých mezích - od 10^{-8} m/s (pro málo propustné jíly) do 10^2 m/s (pro čisté balvanité šterky).

Pro klastické sedimenty je odhad jejich hydrogeologické funkce a koeficientů filtrace možný na základě jejich měrného elektrického odporu z odporového sondování, protože nepropustné jíly mají velmi nízké odpory a propustné šterkopisky naopak velmi vysoké (viz kap. 4.3.3). Rovněž u krystalických hornin se používají odporové metody (kolektory nasycené vodou mají nižší měrné odpory), seismika (porézní a puklinové horniny mají nízké rychlosti), nákladnější je gravimetrie (nižší hustoty). Ve vrtech se uplatňuje efektivně celý komplex hydrokarotáže.

3.2.2. Hladina podzemní vody, směr a rychlost jejího pohybu

Určení hloubky a průběhu *hladiny podzemní vody*, která nebyla naražena vrtem, je možné pomocí geofyzikálních metod pouze do malých hloubek a v prostředích nezpevněných sedimentů. Lze použít odporové sondování a mělkou refrakční seismiku. V odporovém sondování vytváří hladina podzemní vody kontrast mezi nevodivějším sušším provzdušnělým pásmem (zónou aerace) a vodivým zvodnělým pásmem pod hladinou podzemní vody. Určitý problém někdy vytváří mocnější kapilární traseň, která se projevuje jako vodivá a zdánlivě tak zvedá hladinu podzemní vody. Rovněž jílovité vložky zkreslují interpretaci.

Jednoznačnější je měření seismické: Hladina vytváří v nezpevněných sedimentech dobré odrazné rozhraní (nezpevněné sedimenty nasycené podzemní vodou mají seismické rychlosti v kolem 1 500 m/s, zatímco sedimenty nenasyčené pod 800 m/s).

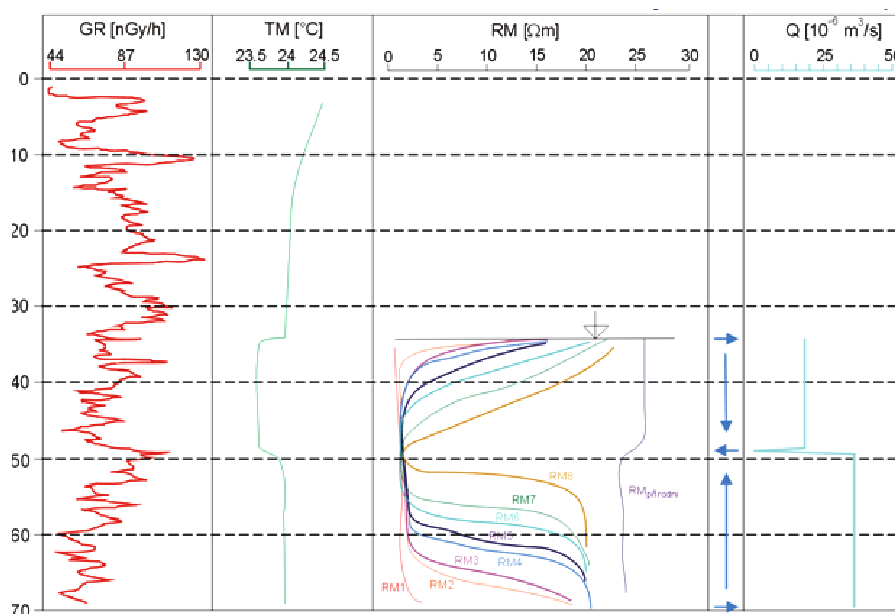
Pro jednoznačnější rozlišení od jiných odrazných rozhraní (např. sedimentační stratifikace) lze uplatnit kombinované měření příčných P-vln a podélných S-vln. Protože se S-vlny nešíří vodou, jejich rychlost nezávisí příliš na obsahu vody v nezpevněných sedimentech. Naopak rychlost P-vln se dramaticky mění pro suchá a zvodnělá aluvia. Kombinace registrací P-vln a

S-vln proto přispívá k odlišení odrazů na hladině podzemní vody od jiných geologických rozhraní.

Směr proudění podzemní vody je dán směrem spádnice (sklonem) hladiny podzemní vody a je možné tedy stanovit směr podle známého průběhu hladiny hydrogeologické metody určení vektoru proudění sledováním stopovacích látek = stopovačů (barviva, radionuklidy, chemické, fluorescenční a biologické látky), které vyžadují více vrtů.

Geofyzikální metody řeší tuto úlohu:

- měřením vznikajících filtračních spontánních potenciálů (FSP) při proudění podzemní vody průlinovým prostředím a
- monitorováním pohybu vodivého "mraku", který vznikl dotací vodivého (nejčastěji solného) roztoku do podzemní vody a jehož čelo se pohybuje s podzemní vodou stejnou rychlostí.



Obr. 3.5. Stratifikace dvou systémů oběhu podzemních vod, vzestupné i sestupné proudění podle karotáže

Karotážní měření ve vrtu (obr. 3.5) velmi výrazně přispívá ke zjištění přítoků (šipky doprava), případně ztrát (šipky doleva) do vrtu v různých úrovních (stratifikace) na základě měření odporu výplachu (RM) a jeho teplotě (TM). Chladnější přítok snižuje teplotu a zároveň se s čistou podzemní vodou snižuje i odpor výplachu. Při ztrátě vody jsou změny opačné. Přesná měření umožňují i určení množství vody přítoku a odtoku.

3.2.3. Nezpevněné sedimenty a sedimentární pánve

Mezi **mladé nezpevněné uloženiny** patří říční a jezerní uloženiny, delty řek, přímořské pobřeží, z hlediska podobných fyzikálních vlastností k nim lze řadit i zeminy zvětralinového pláště (eluvium) a pod. Hydrogeologické kolektory v pokryvných kvartérních útvech mají většinou sice malé mocnosti, ale jsou jako zdroj podzemní vody příhodné zvláště pro malé odběratele. Vydutnosti zjištěných zdrojů závisí na propustnosti sedimentů a eluvií, která je většinou *průlinová*. Ta je větší pro písčité a šterkové sedimenty a výrazně klesá s rostoucím obsahem jílu.

Pro průzkum mocností těchto sedimentů jsou nejhodnější *odporové metody*, hlavně odporové sondování (VES). V některých případech je možné nahradit metodu VES dvojím odporovým profilováním se dvěma optimálními rozestupy proudových elektrod AB, jejichž rozměry se pro danou lokalitu určí z měření VES u vrtů nebo v místech známé mocnosti. Odporové metody také mohou přispět k litologickému určení, hlavně dokáží určit relativní zastoupení nepropustných jíílů a propustných písků a štěrků. Mocnosti kvartérních uloženin a eluvií mapuje úspěšně také *mělká refrakční seismika*, která v optimálních případech může stanovit i hloubku hladiny podzemní vody. Pro zjištění směru proudění podzemní vody se používá *metoda nabitého tělesa* a *spontánní polarizace*. První z obou metod lze také určit rychlost proudění, druhá metoda posuzuje rychlost proudění pouze kvalitativně.

Sedimentární pánve: Zpevněné sedimenty mohou mít jak prŕlinovou, tak i puklinovou propustnost. Její velikost závisí na typu pŕrů, velikosti pŕrů, množství a charakteru tmelu (cementace). Zpevněné pelitické sedimenty (jílovce, slínovce) mají velmi malou propustnost a v souvrstvích s příhodnějšími sedimenty tvoří většinou izolátory. Jejich polohy se mapují *odporovým sondováním* (VES). Větší propustnost se vyskytuje v puklinových systémech, které se mapují *odporovým profilováním*, protože se projevují jako elektrické vodiče. Někdy bohužel není vytvořen dostatečný odporový kontrast vodivých puklinových systémů (vyšší jednotky Ωm) a okolních hornin, zvláště jílovitých (kolem $10\ \Omega\text{m}$) a tak odporové metody i metody elektromagnetické (nejpoužívanější je *metoda VDV*, dále *dipólové EM profilování* DEMP) nemusí vykazovat zřetelné anomálie. DEMP navíc má ve vodivých sedimentech malý hloubkový dosah. Detekované vodivé struktury je proto vhodné ověřit aspoň někde *mělkou refrakční seismikou*.

Zpevněné psamity a psefity (slepence, brekcie, pískovce, arkózy, droby) mívají proměnnou pórovitost (1 - 30 %) a mají většinou vyšší měrný odpor, který klesá s přibývajícím obsahem vody v pórech. *Odporové metody* tedy řeší nejen otázku jejich prostorového rozšíření, ale přispívají i k určení hydraulických parametrů zvodní. Prŕlinová propustnost závisí na zrnitosti a složení a množství tmelu. Stmelením ubývá na pórovitosti, rovněž jílové minerály vznikající větráním zaplňují původně volné póry mezi většími zrny hornin. Hrubozrnné porézní sedimenty nasycené mineralizovanou vodou mohou mít velmi nízké odpory. V sedimentárních souvrstvích se střídáním pelitických a psamitických sedimentů může podle odporových měření dojít k jejich záměně za pelitické jílovité sedimenty, které hrají roli hydrogeologického izolátoru. K podobné nejistotě může dojít i u nezpevněných sedimentů. Při převládající puklinové propustnosti jsou zpevněné sedimenty puklinovými kolektory a geofyzikální metody jejich výzkumu jsou obdobné jako pro krystalinické horniny (viz dále).

Strukturně geologické podmínky v sedimentárních pánvích a jeho podloží jsou řešeny *sondážními metodami*: (odporové vertikální elektrické sondování VES, elektromagnetické sondování frekvenční či přechodové, reflexní seismika, gravimetrie apod. Těmito metodami se určí stratifikace a litologie sedimentárních vrstev, hloubka a reliéf podloží, jeho elevace a deprese. Tektonická stavba pánevní oblasti se zpravidla řeší geofyzikálními *metodami profilovými* (hlavně odporovým profilováním s vhodným uspořádáním i rozměry, v případě výskytu neovulkanitů i magnetometrií, metodou VDV jsou efektivně lokalizovány zvodnělé zlomy).

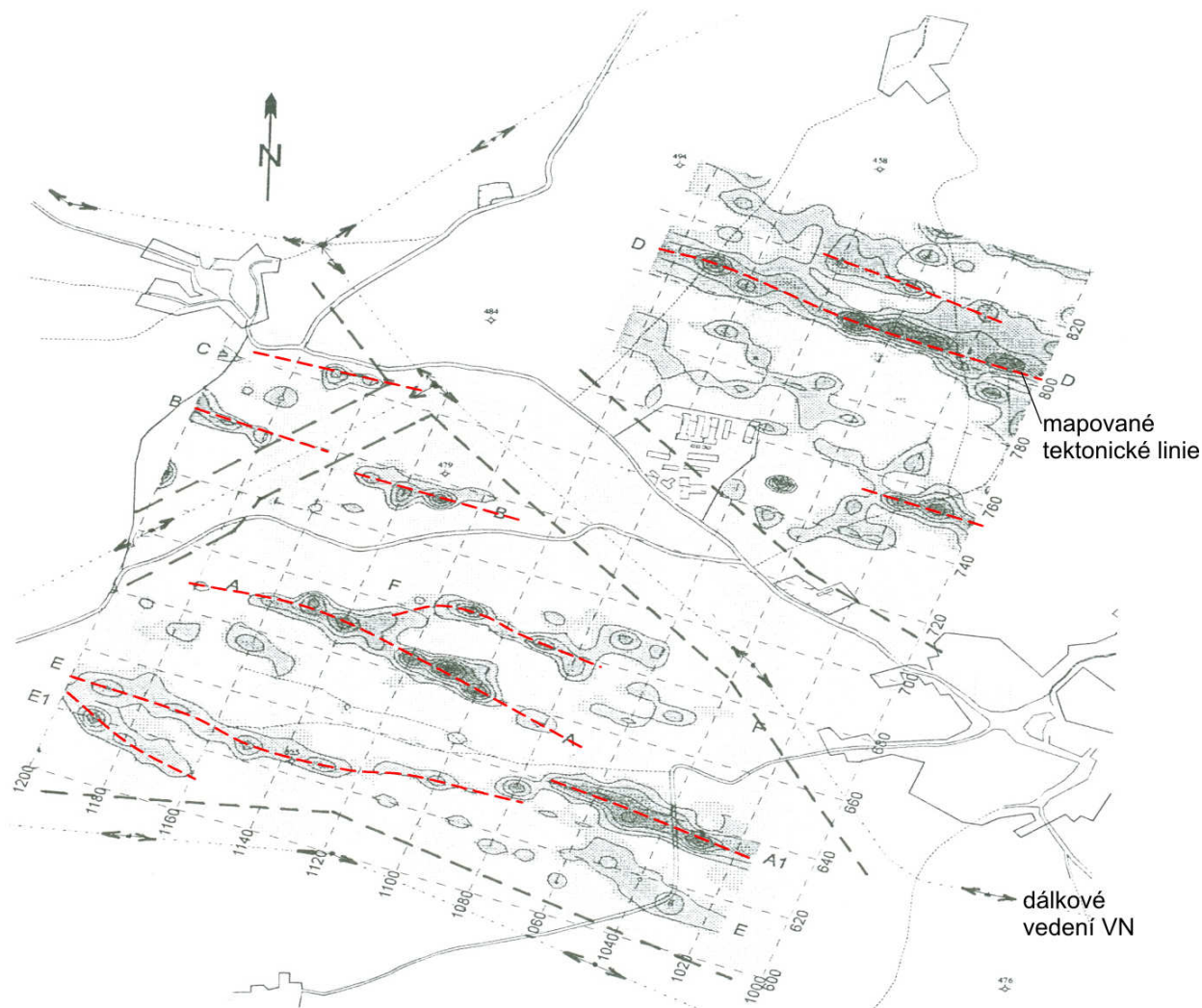
3.2.4. Hydrogeologický režim v krystaliniku

Magmatické a metamorfované horniny krystalinika většinou vykazují vyšší propustnosti v rozpukaných pásmech (**puklinové kolektory**), souvisejících s tektonickým porušením hornin.

Výjimku tvoří krystalické vápence a další karbonátové horniny, v nichž dochází k chemickému rozpouštění (viz dále krasové oblasti). Pohyb a kumulace vody jsou podmíněny existencí

otevřených puklin, jichž ubývá s hloubkou, neboť rostoucí tlak způsobuje jejich uzavírání. Naopak při povrchu v pásmu rozvolnění bývají pukliny promyty vodou a jsou dobře propustné. V některých případech však puklinové hydrogeologické struktury sahají i do značných hloubek a pak lze při takovém hlubinném proudění očekávat mineralizované a termální vody.

Vyhledání porušených zón je díky jejich zvýšené vodivosti (při nasycení podzemní vodou) poměrně jednoduchou úlohou pro *odporové profilování metody*. Pro rekognoskační průzkum jsou vhodné i elektromagnetické metody - hlavně *metoda velmi dlouhých vln* a *dipólové elektromagnetické profilování*. Jako vodivé se však projevují i pukliny zaplněné vodivými jílovými minerály spláchnutými do nich ze zvětralin. Takové puklinové systémy mají jen malou propustnost, i když značnou elektrickou vodivost. Je proto nutné hydrogeologickou funkci poruch ověřit.

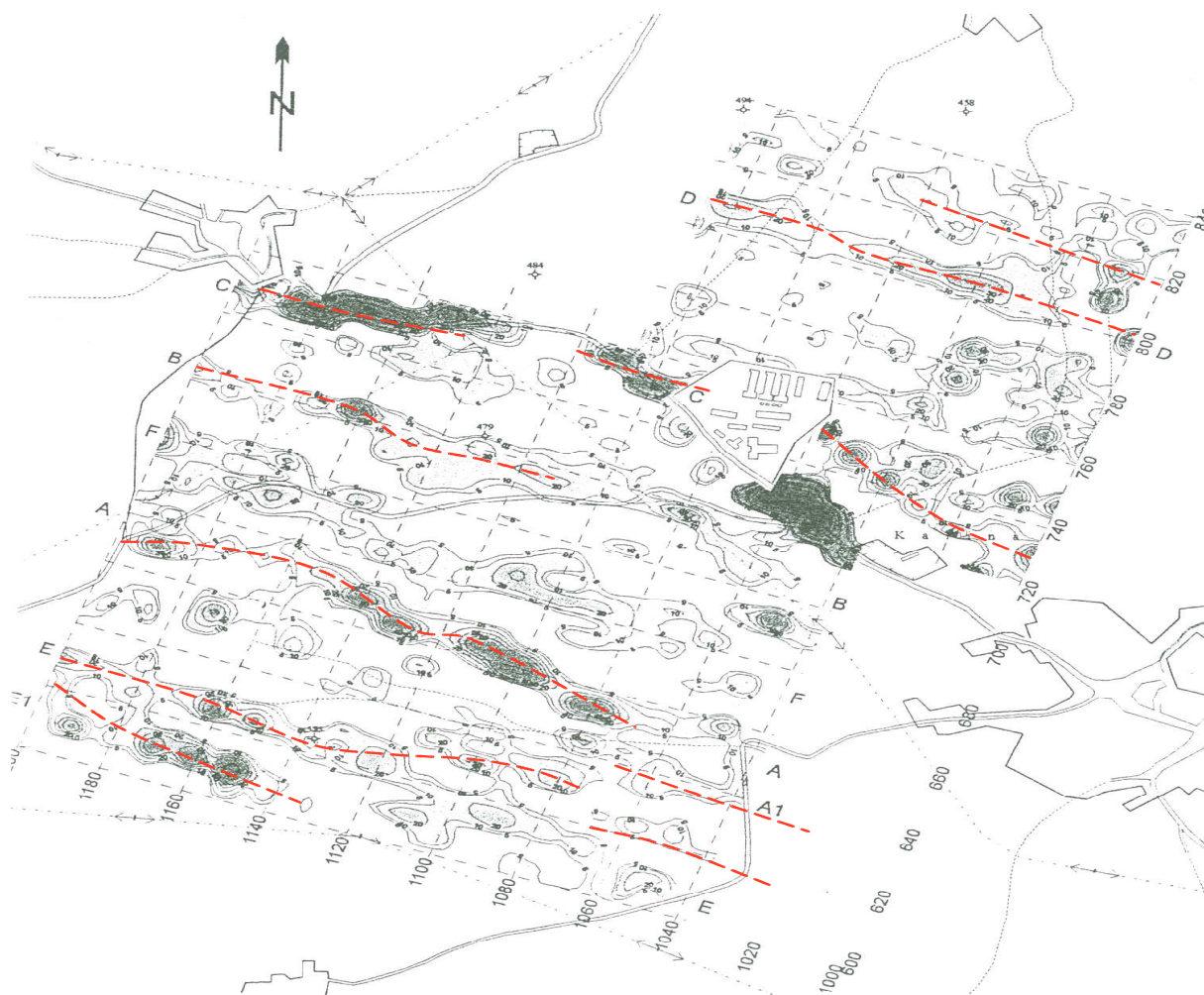


Obr. 3.5. Mapa vodivostních indicií tektonických poruch z metody velmi dlouhých vln

Vzhledem k velkému významu tektonického porušení pro hydrogeologický režim v krystaliku je účelné v první etapě studovat tektonickou stavbu celé oblasti z regionálního hlediska. Zde se uplatňují geofyzikální *metody regionálního měřítka* - gravimetrie, hlubinná seismika, odporové a elektromagnetické profilování (metoda VDV) na regionálních profilech, odporové sondování, letecké (aero) metody (aeromagnetické, aeroradiometrické a aroelektromagnetické metody), dálkové snímkování apod.

Elektromagnetická *metoda velmi dlouhých vln* patří mezi nejvhodnější metody mapování vodivých tektonických (poruchových, puklinových) linií. Fraserovy gradienty mapují svými maximy přímo polohu vodivé zóny. Na obr. 3.6 je příklad mapování tektoniky zhruba z-v směru s-j. profily na detailu melechovského granitového masívu. Elektrická vedení a kabely podél silnic vytváří však intenzivní vlastní anomálie, které zastírají subtilní projevy příp. geologických vodičů v širokých pruzích kolem nich.

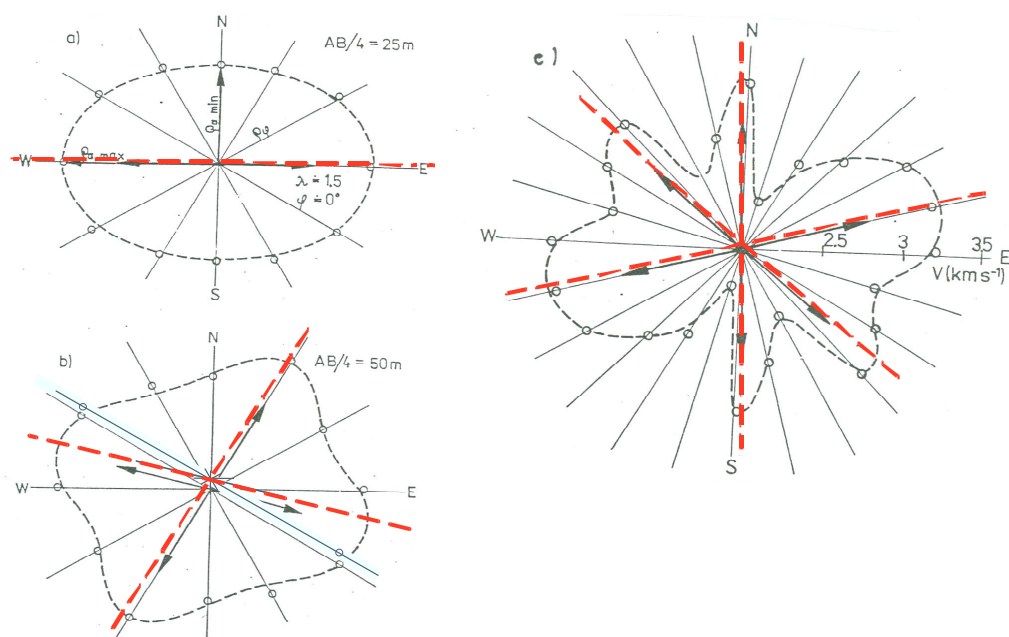
Odporové profilování je pro mapování geologických vodičů velmi spolehlivé (je méně postiženo umělými vodiči než např. elektromagnetické profilování), je však při terénním měření mnohem náročnější (pětičlenná skupina, dlouhá kabeláž) než např. metoda VDV. V příkladu na obr. 3.6 je použito odporového profilování pro mapování vodivé tektoniky na melechovském masívu (granitové těleso tvořící vrch Melechov jižně od Ledče nad Sázavou). Pro zdůraznění vodivostních indicií poruch byla použita filtrace odporových dat a jejich transformace na hodnoty vodivosti - jejich pozitivní amplitudy charakterizují polohu vodiče jednoznačněji (tmavší šrafu-ra).



Obr. 3.7. Mapování tektonických linií odporovým profilováním

Jednoduchý puklinový systém se projevuje odporovou i seismickou anizotropií prostředí. To znamená, že ve směru poruch jsou naměřeny jiné hodnoty než ve směru příčném. To se může zjišťovat měřením některých fyzikálních parametrů na radiálních profilech v různých směrech a vynesení vektorových diagramů měřených parametrů (obr. 3.8). Vyšší zdánlivé měrné odpory

(obr. 3.8 a, b) a vyšší seismické rychlosti (c) jsou zjištěny ve směru puklin. U složitějších puklinových systémů (b, c) se každý směr puklin projeví vlastním maximem.



Obr. 3.8. Zjištění směru puklinatosti odporovým (a, b) a seismickým (c) radiálním měřením (směr tektoniky je zakreslen červenými přerušovanými čarami: a) prostředí s jedním převládajícím směrem poruch, b) se dvěma, c) se třemi směry)

3.2.5. Hydrogeologický režim v krasových oblastech

Rozpustnost karbonátových hornin (hlavně vápenců, méně dolomitů ap.) vede ke krasování (chemickému rozpouštění a větrání) a vytváření velkých dutin a podzemních prostor, které jsou pak hlavními cestami pohybu podzemní vody a místy akumulace. Úkolem hydrogeologického průzkumu, na kterém se podílí i geofyzikální metody, je stanovit strukturně tektonickou pozici vápenců vůči podloží a vymezení zón krasování.

Krasové útvary (závrty, prohlubně, podzemní kaverny a toky) se projevují jako vodivé díky jílovité výplni, která je produktem chemického rozpouštění vápnatých sedimentů. V první řadě se proto aplikují *odporové sondování a profilování*.

Jednoduchý puklinový systém se projevuje odporovou i seismickou anizotropií prostředí - vyšší zdánlivé měrné odpory a seismické rychlosti jsou ve směru puklin (a). Provádí se proto měření na radiálních profilech a vynášejí se vektorové diagramy měřených parametrů. U složitějších puklinových systémů (b, c) se každý směr puklin projeví vlastním maximem (obr. 3.8 b, c).

Podzemní dutiny se vyhledávají *gravimetrií*, v níž se projevují tíhovými minimy v důsledku deficitu hmot ve vodou zaplněných dutinách nebo dokonce dutinách prázdných. Pro vymezení pevných homogenních bloků se aplikuje *seismika* v některé své variantě. Ke sledování podzemních toků se využívá metoda *nabitého tělesa*, příp. speciální metody monitorující prostorově trasu pohybu vpuštěného zařízení (např. seismickým měřením, pokud vydává zařízení pravidelné mechanické otřesy nebo zvukové rány). Případné propojení objevených prostor lze provádět na základě sledování pohybu různých značkovacích (stopovačů). Termometrie a spontánní polarizace pomohou určit skrytá místa vsaků a výronů podzemní vody.

3.2.6. Oblasti neovulkanických hornin

I když neovulkanické oblasti nepatří geologicky do sedimentárních pánví, mají s nimi mnoho společného. Hydrogeologické kolektory jsou v nich totiž vázány na tufy, tufity, lávové proudy a pod., které mají podobnost se sedimenty a geofyzikální metody zde používané jsou prakticky stejné jako pro studium sedimentů. Vulkanická tělesa s puklinami naopak mají podobnost s hydrogeologickými podmínkami v krystaliniku. Vzhledem k vyšším magnetickým susceptibilitám vulkanogenních bazaltických hornin se pro vymapování jejich rozlohy osvědčuje *magnetometrie*. Vulkanity jsou často při povrchu silně zvětralé až rozložené do jílu. Proto se projevují vodivě, zatímco masivní a pevné vulkanity jsou nevodivé.

3.3. HYDROGEOLOGICKÉ A HYDRAULICKÉ PARAMETRY HORNINOVÉHO PROSTŘEDÍ PODLE GEOFYZIKÁLNÍHO MĚŘENÍ

Hydrogeologa zajímá především propustnost hornin, která je charakterizována a kvantifikována hydraulickými parametry. Ty závisí na litologii horniny a jejím stavu.

3.3.1. Litologie a jílovitost

Komplex geofyzikálních metod může někdy přispět k určení *litologie*, většinou však geofyzikální metody slouží k mapování rozsahu zastoupených známých litologických jednotek, zastížených výchozí, odkryvy a vrty. V místech známého rozšíření se ověří, zda aplikované metody reflektují výraznými kontrasty fyzikálních parametrů daný typ horniny. Používají se jednoduché mapovací metody - odporové (klasifikace podle měrného elektrického odporu), elektromagnetické (dle odporu, částečně dle elektrické permitivity), magnetometrie (dle magnetické susceptibility), radiometrie (obsahy běžných radionuklidů Th, K, U).

Geofyzikální metody mají možnost zjišťovat (s určitou nejistotou) rozšíření horninových typů i do hloubky, tj. v 3-D modelu horninového prostředí. Zde se také uplatňují sondážní metody (u nás hlavně VES a MRS) a karotáž ve vrtech. Metody statistické a matematické korelace fyzikálních parametrů (z geofyzikálních měření) a horninových typů naráží na labilitu a neurčité zadání úlohy: na značných rozptylech fyzikálních parametrů v rámci téhož litologického typu, mnohem menším počtu registrovaných fyzikálních parametrů, než je počet litologických typů ap. Často je však pro řešení dané hydrogeologické problematiky významnější poznání hydraulických vlastností prostředí (např. propustnost) než znalost přesné litologie (podobně jako v inženýrsko geologickém a geotechnickém průzkumu, kde je hlavním kritériem pevnost jakkoli charakterizovaná).

Z hlediska propustnosti je významný u klastických písčito-jílovitých sedimentů podíl jílové (pelitické) složky - *jílovitost*. Protože existuje značný kontrast mezi měrným elektrickým odporem jílových minerálů (kolem jednotek Ωm) a čistých vyplavených křemenných písků (jsou-li suché, mají i přes desítky tisíc Ωm), jsou vhodná pro stanovení jílovitosti odporová měření, nejvhodněji vertikální elektrické sondování (VES).

3.3.2. Pórovitost, puklinatost, vlhkost a stupeň nasycení

Póry zaplněné vodou či prázdné snižují *hustotu hornin* podle jednoduchého vztahu

$$\rho_h = (1 - v) \rho_s + v \cdot \rho_p,$$

kde ρ_h je měrná hmotnost (hustota) rozpukané horniny, ρ_s je hustota kompaktní neporušené horniny a ρ_p je hustota výplně puklin (pro vodu $\rho_p = 1 \text{ g/cm}^3$, pro vzduch $\rho_p = 0$), v je puklinatost (relativní poměr objemu pórů k celkovému objemu vzorku).

V horninách nasycených vodou se pórovitost stanovuje podle příspěvku vody v otevřených (přístupných) pórech k celkové elektrické vodivosti horniny. Určení pórovitosti sedimentů podle odporových metod znesnadňuje obsah jílové složky, která je rovněž vodivá.

Měrný elektrický odpor ρ_e nasyceného kolektoru je dán vztahem

$$\rho_e = (\rho_s^{-1} + P_o^m / a \cdot \rho_w)^{-1},$$

kde ρ_s je odpor horninové matrice (uplatňuje se hlavně vodivost jílové složky), ρ_w je odpor vody v pórech, P_o je otevřená pórovitost, $a = 0.6 - 1.2$ je strukturní koeficient a $m = 1.6 - 2.3$ je cementační exponent, které závisí na struktuře, textuře a litologii.

V hrubozrnných štěrkopískových sedimentech se zanedbatelnou jílovou složkou má tvar *Archieho zákona*

$$\rho_e = a \cdot \rho_w / P_o^m = F \cdot \rho_w.$$

Koeficient

$$F = a / P_o^m$$

se nazývá *formační faktor* a je charakteristický pro danou horninu dané porózity. Podle předchozích vztahů jej zřejmě určíme z poměru zjištěného odporu horniny ρ_e a odporu porézní vody ρ_w .

Odpor klesá nepřímo úměrně s rostoucí pórovitostí. Lze tedy říci, že odporové metody jsou velmi vhodné pro detekci porušených zón, protože v hornině se elektrický proud přednostně šíří vodou nasycenými póry a puklinami.

Naopak šíření seismických vln preferuje pevný horninový skelet mezi puklinami a jen nepříznivé usměrnění puklin vůči směru šíření může výrazněji ovlivnit střední seismická rychlost, pokud jsou pórovitosti malé. Seismické metody začínají rozlišovat prostředí podle pórovitosti až tehdy, kdy elektrické metody již ztrácí svou citlivost, protože další zvyšování odporového kontrastu již nezpůsobuje nárůst elektrických anomálií (dochází ke stavu tzv. saturace).

Puklinatost se stanoví obdobně jako pórovitost průlinových kolektorů. Puklinové kolektory s převládající orientací puklin (jednosystémové pukliny) se projevují často jako anizotropní z hlediska odporových vlastností (odpor ρ) i šíření seismických vln (rychlost v). Vyšší hodnoty ρ a v jsou zjišťovány v rovinách puklinatosti, menší ve směru kolmém k puklinám. U odporových metod platí paradox anizotropie, podle kterého jsou (na rozdíl od skutečných odporů) zdánlivé měrné odpory (měřené povrchovým elektrodovým uspořádáním) ve směru kolmém k puklinatosti naopak menší. U kolektorů s několika puklinovými systémy různých směrů indikují směry maxim rychlostí ve vektorovém diagramu seismických rychlostí směry puklinatosti.

3.3.3. Hydraulické parametry kolektorů

Některé *hydraulické parametry* kolektorů se in situ pomocí geofyzikálních metod zjistí nejlépe pomocí *hydrokarotážních metod* v hydrogeologických vrtech. Pro průlinové kolektory se užívá měření vlastních potenciálů SP, odporové měření mikrokarotáže a potenciálovými sondami různých délek, kavernometrie, gamakarotáž, které jsou automaticky zpracovány do grafů jílovitosti V_{sh} a pórovitosti P na základě Archieho vztahu a dalších závislostí. Pro puklinové kolektory se využívá kromě SP, odporových měření a KM i gama-gama a neutron-neutron karotáže.

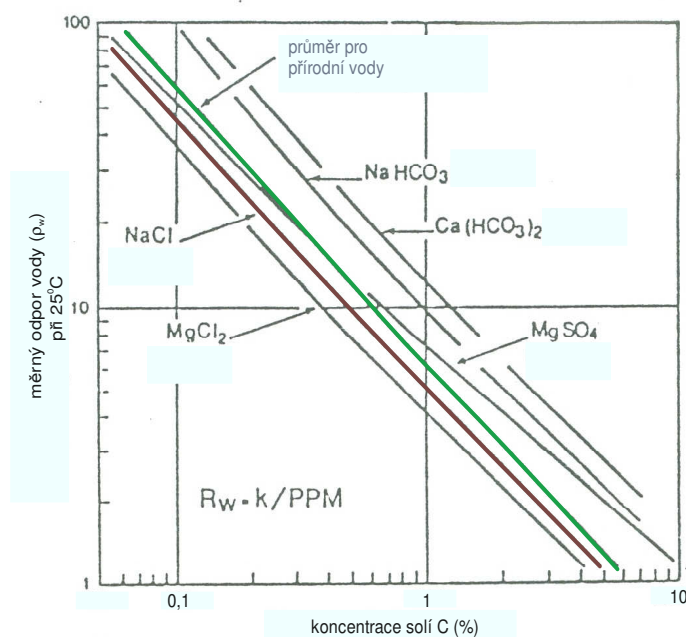
Komplex hydrokarotáže (odporová karotáž, gama karotáž, termometrie, rezistivimetrie) je vhodné použít i pro stanovení hydraulické vodivosti hornin. Na základě monitorování změn teplot a odporu výplachu podél osy vrtu při konstantním snížení (metoda čerpání) či zvýšení hladiny podzemní vody (metoda nálevu) lze místa a dílčí vydatnost přítoků do vrtu (příp. vsaků).

Vzácně lze použít pro stanovení hydraulických parametrů i *povrchové metody*, hlavně odporové metody a metody spontánní a vyzvané polarizace (SP a VP). V těchto případech se hledají korelační vztahy mezi měřenými geofyzikálními parametry a hydraulickými parametry mělkých kolektorů (hlavně v mladých nezpevněných sedimentech). Chyba v určení však bývá větší než u karotážních metod. Uvedené pozemní metody jsou proto využívány hlavně pro kvalitativní odhad propustnosti kolektorů a odlišení hydrogeologických kolektorů a izolátorů.

3.3.4. Chemismus, mineralizace a kontaminace podzemních vod

Přirozená mineralizace podzemních vod (obsah minerálních látek ve vodě rozpuštěných) má často podobné fyzikální odezvy jako kontaminace podzemních vod rozpuštěnými chemickými polutanty (zvláště anorganickými). Zvýšené obsahy látek rozpuštěných v podzemní vodě, často v iontové podobě, vytvářejí z podzemní vody slabý elektrolyt, se projevují úměrným zvyšováním její elektrické vodivosti.

Zdrojem kontaminace podzemních vod bývají úniky z různých typů skládek, úložišť (výluhy), nadzemních a podzemních nádrží, odkališť (viz také kap. 1.3.1), při transportu průmyslových látek a odpadů (produktovody, potrubí, nádrže, pozemní transport pevných i tekutých odpadů, ale i surovin a dalších látek rizikového charakteru). Kontaminant se většinou v prostředí šíří v podzemní vodě, která je nejvhodnějším nosným médiem. Z tohoto hlediska je rozhodující, zda kontaminující látky jsou ve vodě rozpustné (kyseliny, louhy, solné roztoky) či nikoli. U nerozpustných (a částečně i u rozpustných) látek závisí také na tom, zda jsou lehčí (benzín, ropa, nafta, olej) či těžší než voda (např. polychloreteny) – tedy zda plavou na hladině podzemní vody nebo klesají na bázi kolektoru.



Obr. 3.9. Závislost odporu podzemní vody na celkové mineralizaci a pórovitosti

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 a jimi způsobená kontaminace je detekovatelná *odporovými metodami* jako vodivostní anomálie.

Měrný elektrický odpor ρ klesá nepřímo úměrně s koncentrací C rozpuštěných solí (obr. 3.9):

$$\rho = K/C,$$

kde koeficient K je závislý na druhu soli. Při přepočtu na ekvivalentní koncentraci C_{NaCl} soli NaCl je koeficient K závislý na teplotě. Podle Archieho zákona klesá měrný odpor porézního kolektoru s rostoucí mineralizací p.v. C , ale i s pórovitostí P , která při plném nasycení určuje množství vody v hornině. Vymezení kontaminované zóny na základě odporového mapování je závislé na přirozené odporové homogenitě prostředí a vodivostním kontrastu. Složitější interpretace odporových měření z hlediska rozšíření kontaminantu nastává v případě výskytu jílovitých poloh, které se rovněž projevují vodivě.

Uhlovodíková kontaminace je geofyzikálními metodami zjiitelná jen za velmi příhodných podmínek, protože nedochází k dostatečnému kontrastu v odporech (ropná kontaminace leží na hladině podzemní vody a má vyšší odpor než voda sama, látky se z ní uvolňující způsobují však pokles měrného odporu vody). Ani u dalších fyzikálních vlastností (např. elektrická permisivita) se nevytváří dostatečný kontrast. V příznivých případech se mohou být přínosné *metody odporové* a *georadar*, vzácně se uplatňuje i *gravimetrie*. Větší úspěchy může mít časové monitorování změn, zvláště jsou-li k dispozici ekvivalentní geofyzikální měření stavu před kontaminací. Prakticky nemožné je z povrchových měření zjištění tenké vrstvy lehkých ropných produktů na hladině podzemní vody. Úspěšná mohou být v případě opakovaného měření např. i tíhová měření, u nichž se využívá rozdílu hustot ropné vrstvy nad hladinou podzemní vody. Využití stínícího efektu této vrstvy pomocí tzv. *ponořené elektrody* umístěné pod ní vrstvou vyžaduje jednak vrt, jednak je úspěšné jen 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 hloubkovou polohu kontaminace spolu s dalšími hydrogeologickými charakteristikami prostředí. Karotážní měření jsou pro taková zjišťování jedinečná.

3.4. ÚČELOVÝ HYDROGEOLOGICKÝ PRŮZKUM

3.4.1. Vyhledávání zdrojů podzemní vody

Vyhledávání zdrojů podzemní vody je jedním ze základních hydrogeologických úkolů. Při hledání zdroje podzemní vody pro malé spotřebitele se většinou soustřeďuje průzkum na mělké kolektory v kvartérních sedimentech a puklinové kolektory v krystalinickém podloží. V tomto případě se aplikují odporové metody (profilování a sondování) a metoda velmi dlouhých vln i jiné EM nebo seismické metody.

Hydrogeologický průzkum pro potřeby větších celků se provádí v etapách (průzkum vyhledávací, předběžný a podrobný), je zaměřen na hlubší zdroje a zahrnuje komplexní hydrogeologickou regionální studii. Metodika geofyzikálního průzkumu závisí na geologických a hydrogeologických podmínkách zájmové oblasti. Je účelné nejprve řešit geologickou stavbu a litologické a tektonické podmínky, kterými je režim podzemních vod určen.

3.4.2. Minerální a termální vody

Vyhledávání a ochrana termálních a minerálních vod má určitá specifika, která jsou dána jednak vyšším zájmem o tyto vody, dále jejich vzácnějším výskytem a z geofyzikálního hlediska jejich kontrastními fyzikálními vlastnostmi. V odporových metodách se zvodnělé struktury, zvláště pak mineralizovanou vodou, projevují výrazně vodivě.

Termální vody lze vyhledávat pochopitelně termometrií a dálkovým termálním snímkováním. Geofyzikální metody jsou doplňovány různými atmogeochemickými metodami (zvýšený obsah CO₂), které detekují rozsahy plynných aureol nad poruchovými strukturami s výstupem minerálních a termálních vod.

3.4.3. Ochrana zdrojů podzemní vody

Tzv. **vodní zákon** (254/2001 Sb. Zákon o vodách) ukládá všem uživatelům ochranu zdrojů povrchových i podzemních vod jak z hlediska jejich kvality, tak i kvantity. Geofyzikální metody se používají hlavně pro souvislé monitorování změn elektrického odporu prostředí v celé zájmové ploše, které jsou spojeny se změnou kvality vod. Tato otázka je podrobněji řešena v kap. 3.3.4 o kontaminaci podzemních vod. Otázky kolísání hladiny podzemní vody jsou řešeny přímým pozorováním v monitorovacích vrtech. S otázkou ochrany souvisí také vymezení ochranných pásem, kde problematika průzkumu je obdobná problematice průzkumu zdrojů prostých podzemních vod.

3.4.4. Prolínání vody ochrannými bariérami a hrázemi

Podobně jako při sledování přirozeného pohybu podzemní vody průlinovým prostředím (písčitémi sedimenty) lze i v případě prolínání (pomalého proudění) vody hrázemi a ochrannými bariérami využít vznikajících *filtračních potenciálů* (FP) *metodou spontánní polarizace* (FSP) ke sledování míst intenzivnějších úniků. Pole FP je ve srovnání s velmi chaotickými parazitními elektrickými poli (bludné proudy) velmi slabé. Musí se proto provádět velmi přesná měření (speciální nepolarizovatelné elektrody musí být teplotně i jinak stabilní) opakovaná a statisticky zpracovaná.

Nejvíce se osvědčuje *synchronní simultánní monitorování* pole SP celé zájmové plochy pomocí velkého souboru uzemněných nepolarizovatelných elektrod v opakovaných časech, při kterých lze eliminovat časově proměnná, ale prostorově poměrně homogenní pole bludných proudů. Místa zvýšených filtračních potenciálů jsou pak místa pravděpodobně zvýšené filtrace (úniků) podzemní vody. Metoda FSP slouží k určení míst prolínání hrázemi, porušení těsnících hydrogeologických bariér, úniků z produktovodů a pod.

Místa prolínání jsou také většinou vodivější, a proto se uplatňují také i odporové metody, které je lokalizují vodivostními anomáliemi. Někdy se na hráze a v okolí dalších hydraulických bariér (např. podzemní *milánské stěny*) zabudují *stabilní elektrodové systémy*, v nichž lze monitorovat změny měrných odporů prostředí, spojené s případnými průniky vod, a variace různých

potenciálů (filtračních v prostředí a kontaktních na elektrodách), které také indikují proniknutí vody za izolaci.



Obr. 3.10. Lokalizace míst prolínání vody hrázemi podle filtračních potenciálů
(šikmou šedou šrafovou - stěny hráze, červené přerušované linie - místa prolínání hrázemi)

Skládka vápenného kalu z chemické výroby podniku Chemopetrol Litvínov v sz. Čechách byla založena ve svahu hrází podkovovitého tvaru (na obr. 3.10 šrafovaně). Geofyzikální průzkum určil na základě odporového měření a měření filtračních potenciálů metodou spontánní polarizace (FSP) místa, kde pravděpodobně dochází k prolínání skládkové vody. Opakovaným radiálním měřením FSP na bodech ve svahu hrází a pod nimi (kroužky) byly statistickým zpracováním určeny vektory FSP, které ukazují na místo, směr a relativní intenzitu prolínání skládkové vody hrázemi. To souhlasí i s místy snížených odporů (čárkovaně).

4. ZÁVĚR

Tato metodika uvádí použití geofyzikálních metod při řešení problémů, vznikajících při kontaminaci podzemních vod v místech určených jako zdroje pro pitnou nebo jinak vymezenou vodu (léčivou, minerální, užitkovou a pod.). Nejedná se v žádném případě o závaznou metodiku a technologii aplikace geofyziky. Výrazná různorodost přírodních podmínek, různý stupeň antropogenního ovlivnění, charakter vodního zdroje a dalších faktorů si vždy vynutí aplikaci nejvhodnějších metod i konkrétních postupů pro dané podmínky. Rozsah metodiky si vynutila stručnost a autoři se snažili, aby tato hutnost textu neomezila příliš její komplexnost a přehlednost.

Uvedené příklady mají za účel naznačit možnosti geofyziky při řešení konkrétní problematiky a nejsou a ni nemohou být zcela vyčerpávající. Jsou proto na konci této metodiky uvedeny další zdroje informací v odborné literatuře české i zahraniční, které by mohly pomoci těm, kteří

nejsou z geofyzikálními metodami detailně obeznámeni, ale v jejich profesi by mohly tyto specifické metody pomoci.

Hlavním účelem je však obrátit pozornost odborníků ve vodohospodářství, odpovědným pracovníkům ve státních vodoprávních úřadech a hydrogeologům řešících problematiku kontaminace podzemních vod k možnosti využití geofyzikálních metod, které patří mezi finančně nejefektivnější metody hydrogeologického průzkumu.

K orientačnímu seznámení s možnostmi uplatnění geofyzikálních metod v procesu odstraňování starých ekologických zátěží je věnovaná samostatná metodická příručka MŽP, vydaná v roce 2009 pod názvem „Možnosti geofyzikálních metod při ověřování nejasných strukturně geologických, popřípadě jiných vztahů na lokalitách při průzkumu a nápravě starých ekologických zátěží“.

SEZNAM ZKRATEK A SYMBOLŮ

použitých v textu

a	strukturní koeficient
A	kladná proudová elektroda v odporovém uspořádání
AAS	atomová absorpční spektrometrie
AES	atomová emisní spektrometrie
B	záporná proudová elektroda v odporovém uspořádání
C	měřicí elektroda v odporovém uspořádání
ČIŽP	Česká inspekce životního prostředí
DEMP	dipólové elektromagnetické profilování
e_f	efektivní pórovitost
f	frekvence
F	formační faktor
GPS	satelitní navigační systém
GPR	georadarová měření, georadar
GR	radioaktivní karotáž
EM	elektromagnetický
F	formační faktor
FSP	filtrační spontánní polarizace
HPLC	kapalinová chromatografie
I	elektrický proud (mezi elektrodami A, B)
k	konstanta odporového uspořádání
K	koeficient hydraulické vodivosti
D	měřicí elektroda v odporovém uspořádání
m	cementační faktor
MEU	multielektrodové uspořádání (odporová metoda)
MRS	mělká refrakční seismika
MXS	mělká reflexní seismika
MŽP, MŽP ČR	Ministerstvo životního prostředí České republiky
N	měřicí elektroda v odporovém uspořádání
P, P_0	pórovitost, otevřená pórovitost

P-vlna	primární seismická vlna
RM	odporová karotáž
S	koeficient storativity
Sb.	Sbírka zákonů
SP	spontánní polarizace
S-vlna	sekundární seismická vlna
T	koeficient transmisivity
TM	teplotní karotáž
U	elektrické napětí (mezi elektrodami M, N)
U _{SP}	napětí pole spontánní polarizace
v	seismická rychlost
VDV	metoda velmi dlouhých vln
VES	vertikální elektrické sondování (odporové)
VN	vysoké napětí
VP	metoda vyzvané polarizace
VÚV TGM	Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka
ρ	měrný elektrický odpor, rezistivita, hustota
σ	elektrická vodivost, konduktivita
v	puklinatost

LITERATURA

- Gruntorád, J., a kol., 1985:* Principy metod užitě geofyziky. SNTL Praha, Alfa Bratislava
- Homola, V., Grmela, A., 1987:* Hydrogeologie - 1. díl. VŠB Ostrava
- Karous, M., Mareš, S., 1988:* Geophysical methods in studying fracture aquifers. Vyd. UK Praha
- Karous, M., 1989:* Geoelektrické metody průzkumu. SNTL Praha, Alfa Bratislava
- Kelly, W.E., Mareš, S. (Eds.) a kol., 1993:* Applied geophysics in hydrogeological and engineering practice. Elsevier Amsterdam
- Kolektiv autorů, 2009:* Možnosti geofyzikálních metod při ověřování nejasných strukturně geologických, popřípadě jiných vztahů na lokalitách při průzkumu a nápravě starých ekologických zátěží. MŽP Praha
- Kolektiv autorů, 2010:* Základní principy hydrogeologie. Příručka pro státní správu v procesu odstraňování starých ekologických zátěží a managementu kontaminovaných míst. MŽP
- Mareš, S., a kol., 1983:* Geofyzikální metody v hydrogeologii a inženýrské geologii. SNTL Praha
- Mareš, S., a kol., 1990:* Úvod do užitě geofyziky. SNTL Praha
- Pitter P., 2009:* Hydrochemie. VŠCHT Praha.
- Stenzel, P., Szymanko, J., 1973:* Metody geofizyczne w badaniach hydrogeologicznych i geologicznoinżynierskich. Wydav. geol., Warszawa
- Šilar, J., 1992:* Všeobecná hydrogeologie. Vyd. UK Praha
- Vogelsang, D., 1994:* Environmental geophysics. A practical guide. Springer Verlag
- Ward, S.H. (Editor), 1990:* Geotechnical and environmental geophysics, Vol. I - III. SEG Tulsa Oklahoma