

Kapitola 4

Geoelektrika

(Doc.RNDr.Vojtech Gajdoš,CSc., RNDr. René Putiška, PhD.)

4.1 ÚVOD	4-1
4.2 PRVÁ SKUPINA GEOELEKTRICKÝCH METÓD	4-2
4.2.1. ODPOROVÉ METÓDY	4-3
4.2.2. POTENCIÁLOVÉ METÓDY	4-5
4.2.3. METÓDA VYVOLANEJ POLARIZÁCIE	4-6
4.2.4. METÓDA MERANIA MAGNETICKÉHO POĽA STACIONÁRNEHO ELEKTRICKÉHO PRÚDU	4-8
4.3 DRUHÁ SKUPINA GEOELEKTRICKÝCH METÓD	4-9
4.3.1. METÓDA SPONTÁNEJ POLARIZÁCIE	4-10
4.4 TRETIA SKUPINA GEOELEKTRICKÝCH METÓD - INDUKČNÉ METÓDY	4-11
4.4.1 METÓDY BLÍZKEJ ZÓNY	4-11
4.4.2 METÓDY NA MERANIE VODIVOSTI HORNINOVÉHO PROSTREDIA	4-14
4.4.3 METÓDY VZDIALENEJ ZÓNY	4-17
4.4.4 GEORADAR	4-19
4.4.5 LITERATÚRA	4-20

4.1 Úvod

Geoelektrika skúma tú časť elektromagnetického poľa Zeme, ktorú neskúma magnetika. Ak sme uviedli, že magnetika skúma stacionárne magnetické pole Zeme, tak geoelektrika skúma stacionárne elektrické pole Zeme a celú oblasť nestacionárnych elektromagnetických polí. Hlavnú časť náplne geoelektriky však tvorí skúmanie reakcií horninového prostredia na umelé elektromagnetické polia. To znamená, že buď pomocou meracej aparatury vytvárame elektromagnetické pole (stacionárne elektrické, alebo nestacionárne elektromagnetické) alebo využívame polia iných (neaparaturných) zdrojov (napr. komunikačné vysieláče) a pomocou prijímacej časti meracej aparatury skúmame, ako horninové prostredie reaguje na toto umelé pole. Výsledkom je rozčlenenie horninového prostredia podľa jeho merného elektrického odporu, alebo vyčlenenie miest v ktorých dochádza k vzniku vysokých indukčných efektov, alebo lokalizácia miest s akumuláciou elektrického náboja v horninovom prostredí.

Prejavy a zdroje elektromagnetického poľa (prirodzeného i umelého) sú pestré, pri ich meraní je možné merať viaceré parametre a tak aj meracích metód je v geoelektrike zo všetkých geofyzikálnych metód najviac. To dovoľuje pomerne podrobne charakterizovať stav a štruktúru horninového prostredia, separátne sledovať jeho jednotlivé objekty a preto sa aj geoelektrické metódy často používajú hlavne pri riešení plytkých geologických úloh (zhruba do 100 m, zriedkavejšie do 500 m). Pre jednoduchosť možno geoelektrické metódy rozdeliť do niekoľkých skupín.

Do prvej skupiny možno zaradiť tzv. odporové metódy, ktoré skúmajú umelé stacionárne elektrické pole s cieľom zistiť priestorovú premenlivosť merného elektrického odporu a to buď priamo (odporové metódy), alebo sprostredkovane, keď sa využíva deformácia umelého elektrického poľa vyvolaná zmenami vodivosti horninového prostredia. Z výsledkov takéhoto merania možno lokalizovať odporové rozhrania oddelujúce jednotlivé geologické telesá a zostaviť priestorový štruktúrny model skúmaného horninového prostredia. Do tejto skupiny možno zaradiť tzv. potenciálové metódy, ktoré sa používajú na vyhľadávanie a zisťovanie tvaru vodivých (hlavne v rudnom prieskume), alebo nevodivých

geologických telies. Využívajú pri tom umelé elektrické pole ktoré sa vytvorí v okolí skúmaného telesa.

Druhú skupinu možno označiť ako elektrochemické metódy. Pomocou týchto metód sa skúmajú buď prirodzené akumulácie elektrického náboja (hlavne ióny v podzemnej vode, v menšej miere elektróny v horninovom materiály) v horninovom prostredí, alebo umelo vytvorené akumulácie elektrického náboja. Oba druhy akumulácií elektrického náboja vznikajú ako dôsledok elektrochemických dejov na kontakte podzemnej vody a pevnej fázy horninového prostredia (horninového materiálu). Prirodzené akumulácie vznikajú samovoľne pri reakciách podzemnej vody (ktorú možno považovať za slabý elektrolyt) a kovových minerálov (oxidačné a redukčné reakcie), pri pohybe podzemnej vody v póroch horninového prostredia (filtračné potenciály) a na kontakte rôzne mineralizovaných vôd hlavne v oblastiach minerálnych prameňov, ale aj v oblastiach výskytu znečisťujúcich látok (difúzne potenciály). Umelé akumulácie elektrického náboja sú vyvolané umelými stacionárnymi elektrickými poliami napr. pri odporových metódach. Najväčšie umelé akumulácie elektrického náboja možno pozorovať na rudných ložiskách, kde sa aj tieto metódy využívajú pri prieskume týchto ložísk. Elektrochemické metódy sa využívajú v hydrogeológii na zisťovanie smerov pohybu podzemnej vody, v environmentalistike na zisťovanie prítomnosti a pohybu rôznych druhov kontaminantov a v ložiskovej geológii na vyhľadávanie skúmanie ložísk kovových minerálov, hlavne sulfidov a ložísk železa.

Do tretej skupiny možno zaradiť metódy, ktoré skúmajú indukčné efekty vznikajúce v horninovom prostredí v dôsledku pôsobenia elektromagnetických polí generovaných prirodzenými, alebo umelými zdrojmi. K prirodzeným zdrojom rátame elektromagnetické polia vznikajúce v ionosfére a blesky (pri búrkach). Umelé zdroje sú vytvárané prevažne ako súčasť meracej aparatury, okrajovo sa využívajú aj iné zdroje ako komunikačné či rádiové vysieláče. Pri všetkých týchto metódach je cieľom merania zistiť prítomnosť a intenzitu indukovaných elektromagnetických polí, ktoré vznikajú vo vodivejších miestach horninového prostredia. Identifikáciou takýchto miest možno lokalizovať a vyčleniť prítomnosť vodivých telies. Medzi dobré vodiče okrem ložiskových telies kovových minerálov patria tiež zlomové štruktúry (obsahujú v úlomkovitom materiály podzemnú vodu a často jemnozrnné a ílové výplne), polohy ílovitých horní a tiež oblasti výskytu rôznych kontaminantov, hlavne v miestach skládok odpadu.

4.2 Prvá skupina geoelektrických metód

Základným prvkom metód v prvej skupine je elektródový systém (obr.1), ktorý

v základnej podobe obsahuje štyri elektródy rozložené zvyčajne na jednej línii. Dve z nich (prúdové) slúžia na vytváranie elektrického poľa v horninovom prostredí a ďalšie dve (potenciálové) na meranie napätia, ktoré prvé dve v horninovom prostredí vytvoria. Je to vlastne klasický merací systém používaný vo fyzike na meranie merného elektrického odporu. Prúdové elektródy sú napojené na zdroj elektrického prúdu a elektrické pole, ktoré vytvoria v horninovom prostredí

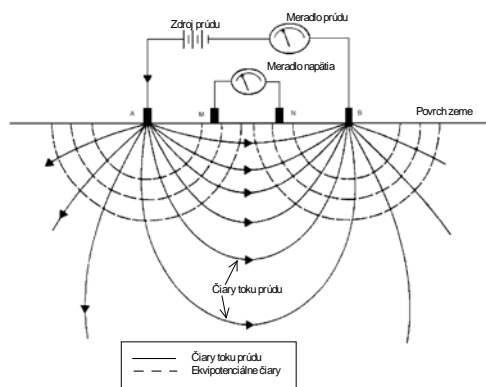


Schéma elektródového systému a elektrického poľa, ktoré v horninovom prostredí vytvára. Používa sa v metódach odporových, potenciálových, v metóde vyvolanej polarizácie a v metóde merania magnetického poľa elektrického prúdu.

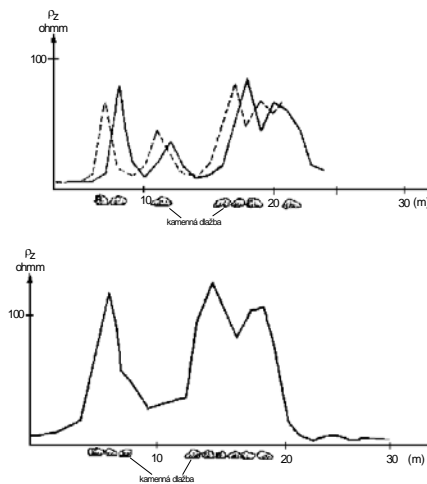
núti volné nosiče náboja (ióny a elektróny) pohybovať sa v smere prúdočiar k príslušnej elektróde. Zo zmeraného napätia a prúdu a za uváženia vzdialeností medzi elektródami je potom možné určiť merný elektrický odpor priestoru horninového prostredia medzi elektródami.

Tento elektródový systém sa používa na štyri druhy meraní: a) meranie priestorovej premenlivosti spomínaného merného elektrického odporu (odporové metódy), b) meranie priestorových deformácií vytvoreného elektrického poľa (potenciálové metódy), c) na meranie polohy a veľkosti akumulácií elektrického náboja, ktoré sa pod vplyvom vytvoreného elektrického poľa v horninovom prostredí vytvoria (metóda vyvolanej polarizácie) a d) na meranie magnetického poľa vyvolaného tokom elektrického prúdu v horninovom prostredí.

4.2.1. Odporové metódy

Na meranie priestorovej premenlivosti merného elektrického odporu sa používajú tzv. odporové metódy. Sú dve: metóda odporového profilovania (OP) a metóda vertikálneho elektrického sondovania (VES). Existencia týchto dvoch metód vyplýva z charakteru

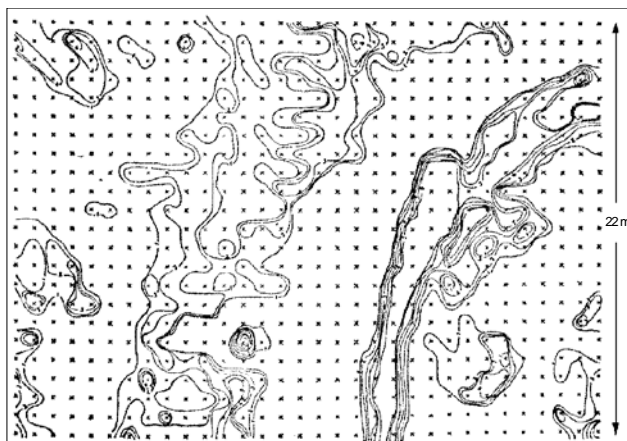
elektródového systému: je príliš veľký (niekedy aj niekoľko sto metrov) a teda sa s ním ťažko narába.



Obr.2. Príklad výsledku merania metódou odporového profilovania. Meranie bolo urobené pre potreby archeologického prieskumu pre lokalizáciu kamennej dlažby antického objektu. Materiál dlažby sa voči okolitej zemine prejavuje výrazným zvýšením merného elektrického odporu.

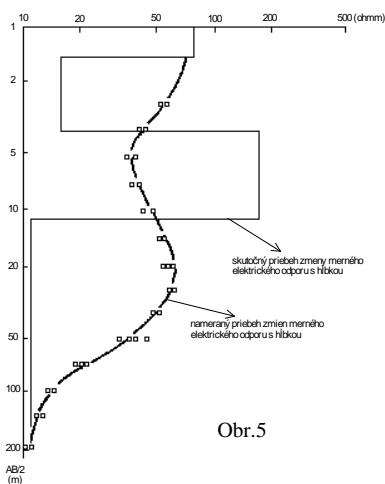
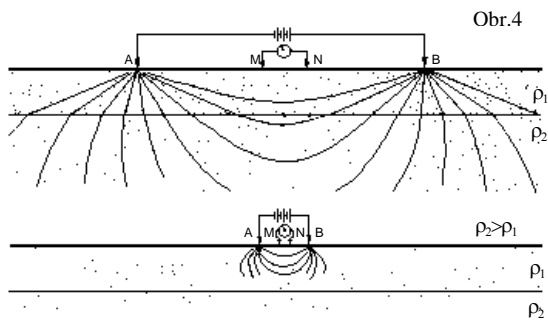
Metóda odporového profilovania

používa elektródy rozložené na jednej línii možno súčasne posúvať pozdĺž tejto línie s ľubovoľným krokom (pri zachovaní vzájomnej vzdialenosti elektród) a takto zisťovať premenlivosť merného elektrického odporu v horizontálnom smere. Hĺbkový dosah merania je daný veľkosťou elektródového systému a priamo závisí na jeho rozmeroch. Príklad takéhoto merania je na obr.2. Ak je odporové profilovanie urobené na sústave paralelných profilov, je možné z výsledkov takéhoto merania nakresliť plošnú mapu. Takáto mapa ukazuje plošnú premenlivosť merného elektrického odporu v prístupnej vrstve ktorej hrúbka odpovedá veľkosti použitého elektródového systému. Príklad je uvedený na obr.3.



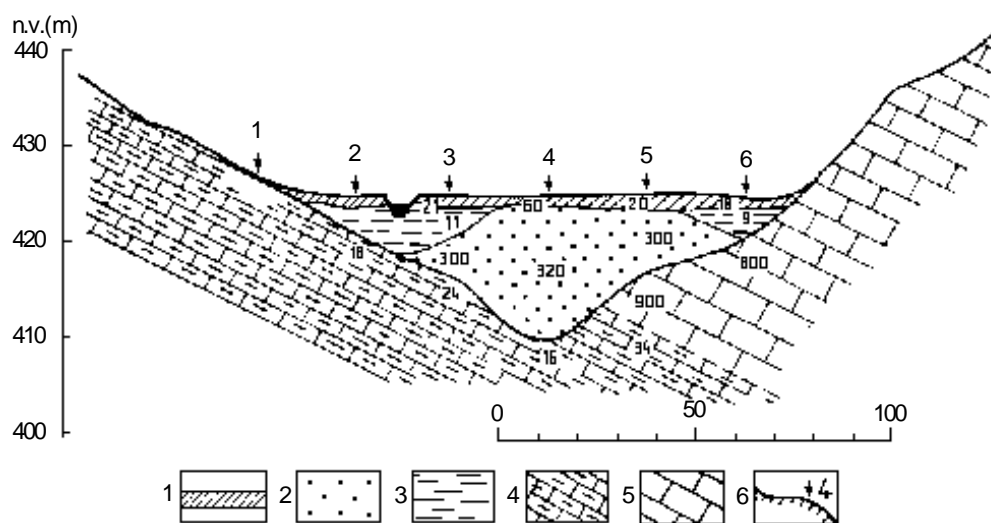
Obr.3. Mapa merných elektrických odporov zostrojená z profilových meraní vykonaných v pravidelnej sieti profilov. Meranie bolo urobené na archeologickej lokalite s cieľom zistiť polohu časti rímskej architektúry. Vidieť ju v pravej časti obrázku.

Metóda vertikálneho odporového sondovania sa používa na zisťovanie premenlivosti merného elektrického odporu smerom do hĺbky. Pri tom stred elektródového

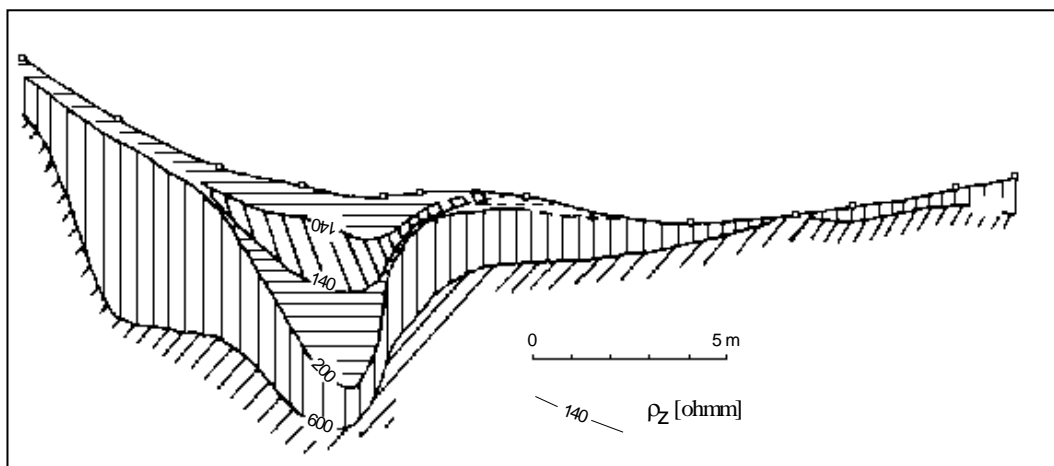


do ktorej chceme premenlivosť odporu zistiť. Z takto získaných meraní je možné zostaviť vertikálne rezy, ktoré môžu obsahovať buď polohu jednotlivých odporových rozhraní, ktoré zvyčajne odpovedajú výrazným geologickým vrstvám (obr.6), alebo je možné zostaviť mapu rozloženia odporu v ploche vertikálneho rezu (obr.7). Obe zobrazenia dovoľujú posúdiť charakter geologickej stavby na línii rezu a lokalizovať výrazné odporové nehomogenity, odpovedajúce výrazným geologickým objektom. Metóda VES je vhodná na vyhľadávanie horizontálnych rozhraní výrazných geologických vrstiev. Ak sú merania VES realizované na

paralelných profiloch, je možné z výsledkov týchto meraní zostaviť priestorový obraz o rozložení výrazných odporových rozhraní. Ideálne je kombinovať merania metódou odporového profilovania a merania metódou VES. Kombináciou výsledkov týchto meraní je možné zostaviť podrobné priestorové mapy a modely štruktúry horninového prostredia.



Obr.6. Geologický model vo forme vertikálneho rezu zostavený z výsledkov meraní metódou VES ako jeden z výsledkov meraní touto metódou. 1 – kvartérny pokryv; 2 – štrkopiesky; 3 – fly; 4 – sliene; 5 – vápence; 6 – poloha bodu merania VES.

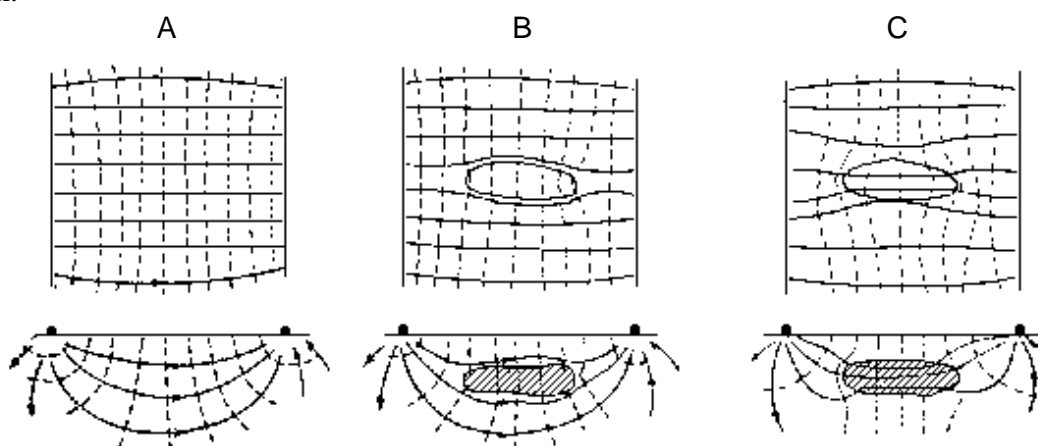


Obr.7. Tzv. izoohmický rez, ktorý zobrazuje premenlivosť merného elektrického odporu vo vertikálnom reze pozdĺž spravidla priamej línie. Rez je zostrojený z výsledkov meraní VES nad obrannou priekopou hradiska, ktorá bola pozdĺžšie vyplnená rôznym materiálom.

4.2.2. Potenciálové metódy

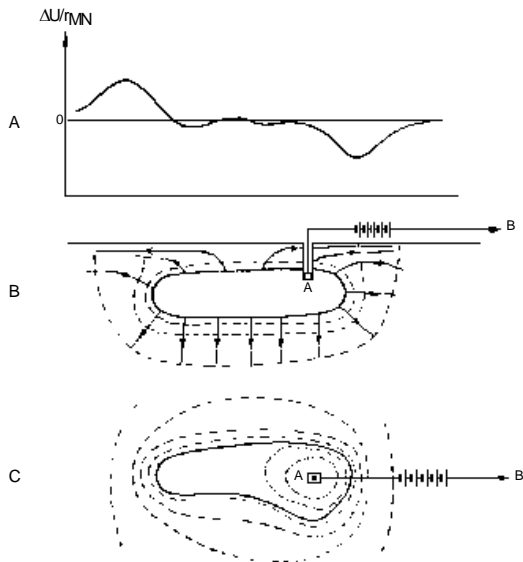
Tieto metódy používajú elektródový systém ale nie na meranie priestorových zmien elektrického odporu v horninovom prostredí, ale na zisťovanie deformácií elektrického poľa vytvoreného elektródovým systémom. Tieto deformácie vyvolávajú odporové nehomogenity v horninovom prostredí a takto je možné zistiť ich polohu a tvar. Množné číslo sa v názve používa preto, že poznáme dva druhy potenciálových metód: metódu líniových elektród a metódu nabitého telesa.

Metóda líniových elektród - jej princíp je uvedený na obr.7. Bodové prúdové elektródy sa tu modifikujú do podoby línií (je to kábel uzemnený elektródou s krokom okolo 5 m). Predmetom merania (pomocou bodových potenciálových elektród) sú ekvipotenciály a ich tvar, vytvorený v horninovom prostredí líniovými elektródami. Z obr.7 vidieť, ako sa tvar ekvipotenciál (a tiež prúdových čiar) deformuje vodivým a nevodivým telesom. Táto metóda sa používa hlavne na zisťovanie tvaru pripovrchových telies pre potreby prieskumu ložísk.



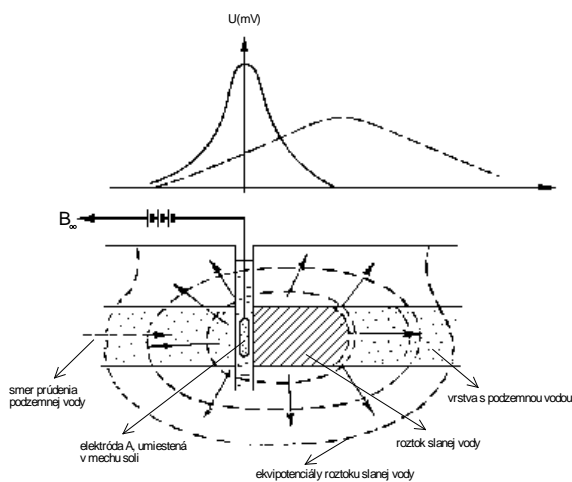
Obr.8. Elektrické pole líniových elektród v ploche a v reze. A – pole v homogénnom prostredí; B – pole v prítomnosti nevodivého geologického telesa; C – pole v prítomnosti vodivého geologického telesa.

Metóda nabitého telesa sa používa na skúmanie vodivých geologických objektov (zvyčajne sú to rudné telesá – vtedy hovoríme o rudnej variante metódy nabitého telesa). Na



Obr.9. Príklad výsledku merania v rudnej variante metódy nabitého telesa. A – graf gradientu potenciálu; B – prúdové a ekvipotenciálne línie v okolí nabitého telesa nakreslené v reze; C – ako B ale v ploche.

rozdiel od metódy líniových elektród používa bodové prúdové elektródy, pričom využíva existujúci vrt na to, aby do vyšetrovaného telesa zaviedla jednu bodovú elektródu. Týmto sa dosiahne, že celé teleso sa stáva elektródou a potom cieľom merania je zistiť tvar elektrického poľa, ktoré takáto „elektróda“ vytvorí. Príklad je uvedený na obr.9. Táto metóda sa používa aj v hydrogeológii (tzv. hydrogeologická variant metódy nabitého telesa). Telesom, do ktorého sa zavádza prúdová elektróda je v tomto prípade solný roztok, ktorý sa zavedie do vyšetrovaného kolektora podzemnej vody a cieľom merania je zisťovať, ako sa s časom mení tvar elektrického poľa oblaku slanej vody, ktorého rozmery sa menia v dôsledku prúdenia podzemnej vody. Z výsledkov merania je možné určiť smer a rýchlosť toku podzemnej vody v okolí vrtu. Príklad takéhoto merania je na obr.10.



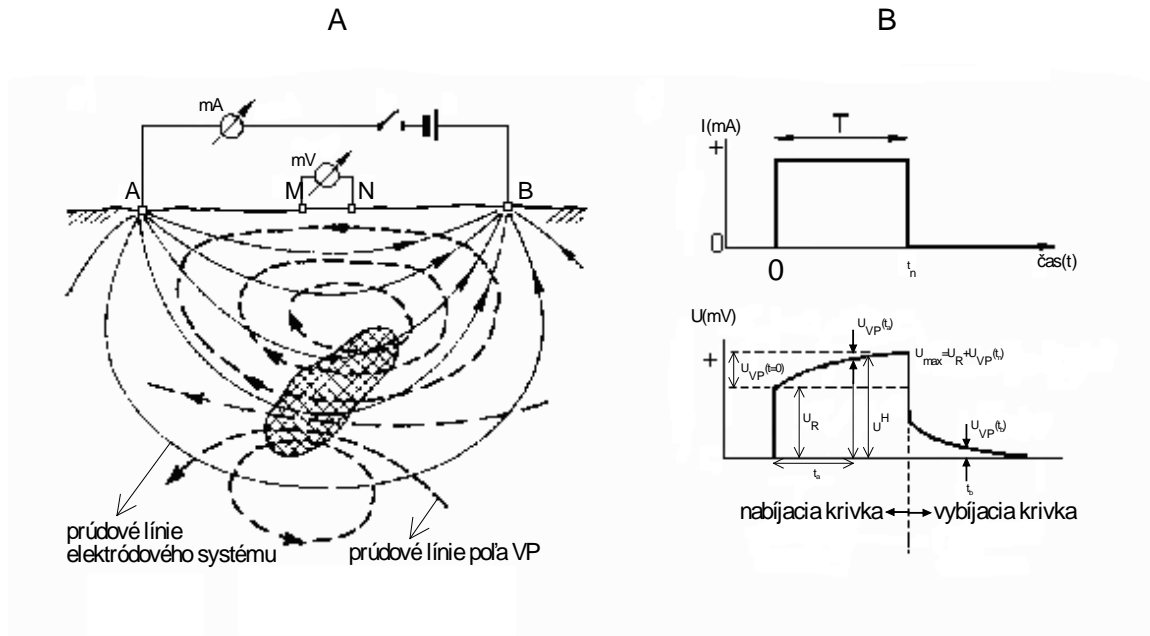
Obr.10. Hydrogeologický variant metódy nabitého telesa, využívaný na zisťovanie smeru a rýchlosti prúdenia podzemnej vody

4.2.3. Metóda vyvolanej polarizácie

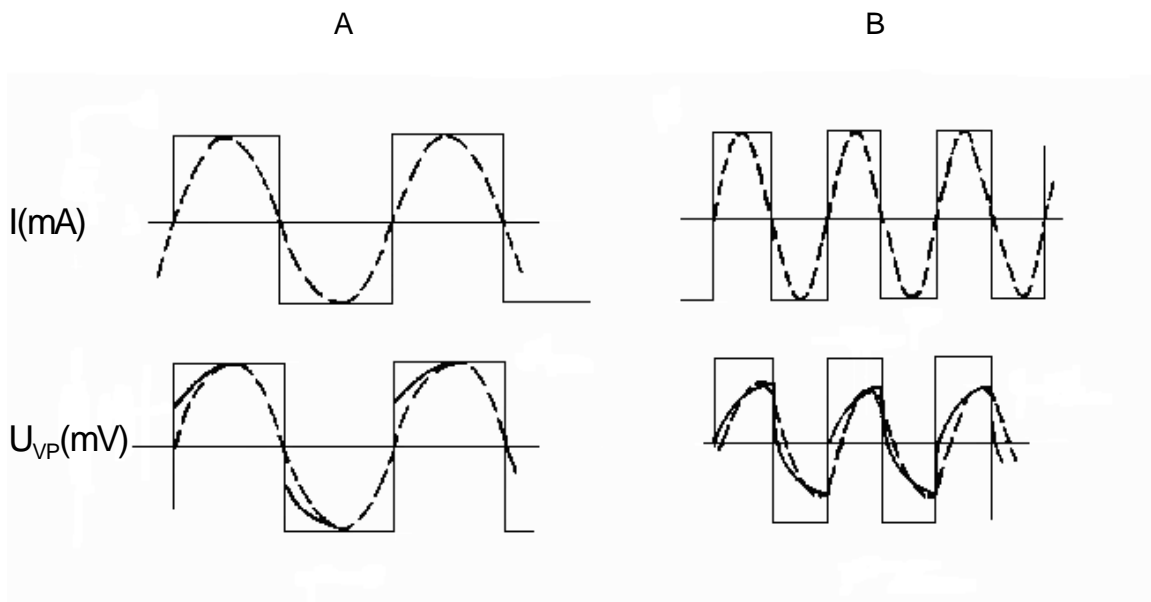
Táto metóda patrí k elektrochemickým metódam, ale vzhľadom na to, že nevyhnutne potrebuje elektródový systém, popíšeme ju na tomto mieste. Pri aplikácii elektródového systému používaného v odporových metódach sa voľné nosiče elektrického náboja (ióny a elektróny) v horninovom prostredí nepohybujú voľne, ale na ich putovaní sa stretávajú s rôznymi prekážkami (rudné minerály, ílové minerály, slepé a zúžené póry a i.), ktoré spôsobujú, že v okolí prekážok dochádza k vzniku akumulácií elektrického náboja. Tieto akumulácie sa stávajú zdrojom elektrických polí, pričítavajúcich sa k elektrickému poľu

vytváranému elektródovým systémom (obr.11). Cieľom metódy vyvolanej polarizácie je potom meranie elektrického poľa, vytváraného akumuláciami elektrického náboja. Je zrejmé, že čím viac je príčin, ktoré spôsobujú vznik akumulácií, tým väčšie bude ich elektrické pole. Medzi najväčšie takéto príčiny patria ložiská rudných minerálov, najmä sulfidických rúd, ale aj železných a z nevodivých sú to ložiská kamenného uhlia. Rozlíšiť však elektrické polia akumulácií a elektródového systému je problém a tak sa používajú dva spôsoby: a) meranie

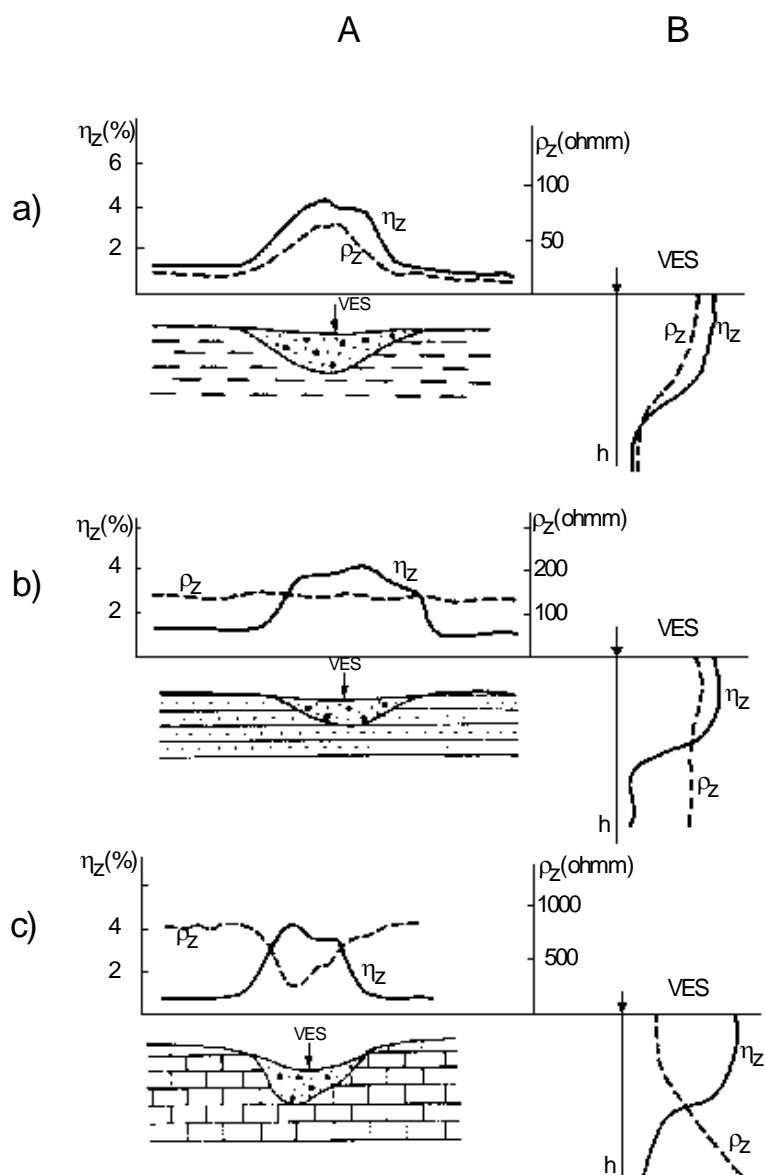
elektrického poľa po vypnutí prúdu v elektródovom systéme (asi po 0.5 sek) – meranie v časovej oblasti (obr.11) a b) meranie elektrického poľa pri dvoch nízkych frekvenciách (napr. 1 Hz a 0.1 Hz) prúdu zavádzaného do prúdových elektród – meranie vo frekvenčnej oblasti (obr.12). Pritom sa využíva závislosť veľkosti poľa akumulácií náboja na frekvencii. Príklad výsledku merania v časovej oblasti je na obr.13.



Obr.11. Princíp metódy vyvolanej polarizácie pri jej využití v rudnom prieskume. A – schéma terénneho merania; B – priebeh napätia pri prúdovom pulze.

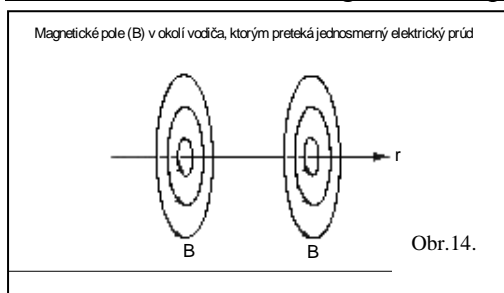


Obr.12. Priebeh prúdu a napätia pri rôznych frekvenciách použitých v elektródovom systéme. A – nižšia frekvencia; B – vyššia frekvencia. Z obr. je zrejmé, že pri vyššej frekvencii je merané napätie nižšie o účinok napätí procesov, ktoré pri vyššej frekvencii nemali čas prebehnúť.



Obr.13. Charakteristické profilové (A) a sondážne (B) krivky odporu ρ_z a polarizovateľnosti η_z nad nespvenými sedimentami; a) podložie je vodivejšie ako nezpvenné sedimenty; b) podložie má rádoovo rovnaké odpory ako sedimenty; c) podložie je menej vodivé ako sedimenty.

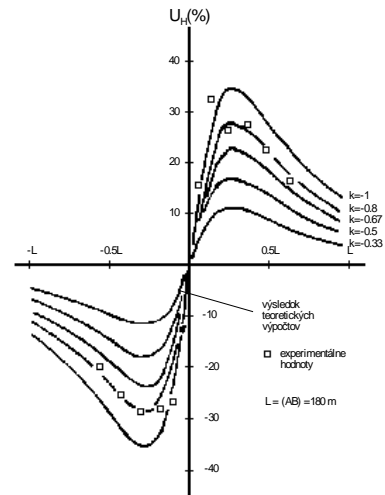
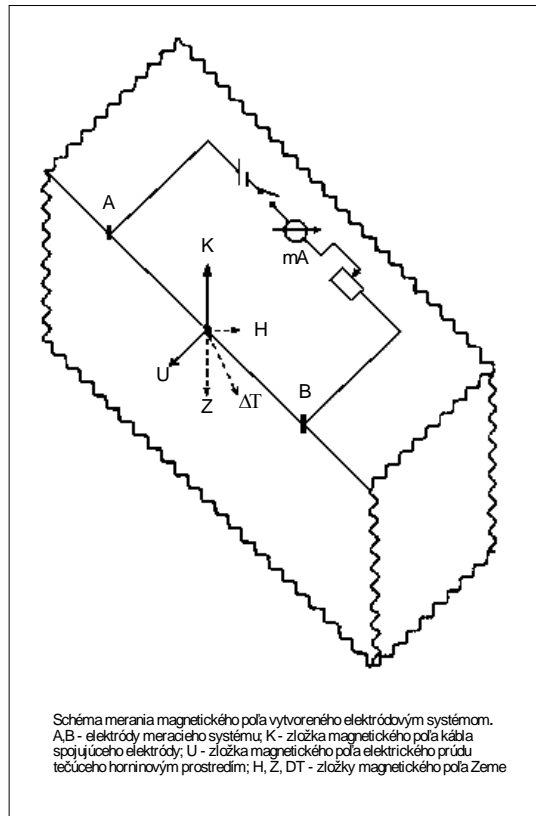
4.2.4. Metóda merania magnetického poľa stacionárneho elektrického prúdu



Z fyziky je známy pokus, keď na papier, ktorým kolmo prechádza elektrický vodič, sa roztrúsia železné piliny (obr.14). Po zapnutí jednosmerného prúdu do vodiča sa elektrické piliny zorientujú do kružníc okolo vodiča. Príčinou je magnetické pole, ktoré doprevádza tok elektrického prúdu vo vodiči. Podobný jav je možné pozorovať aj

pri tečení elektrického prúdu, zavedeného do horninového prostredia elektródovým systémom. Toto magnetické pole je deformované zmenami v tvare prúdočiar, vyvolanými rôzne vodivými telesami v horninovom prostredí. Metóda sa používa hlavne na vyšetovanie

hlbších geologických štruktúr (kontakty rôzne vodivých komplexov hornín), kde meranie elektrického poľa neprináša dostatočne výrazné výsledky. Príklad výsledku merania je uvedený na obr.15.



Obr.15. Porovnanie výsledku merania magnetického poľa elektrického prúdu zavedeného do horninového prostredia elektródovým systémom s výsledkom modelovania tohto poľa v prípade kontaktu dvoch odporovo odlišných geologických prostredí ($k = (\rho_2 - \rho_1) / (\rho_2 + \rho_1)$)

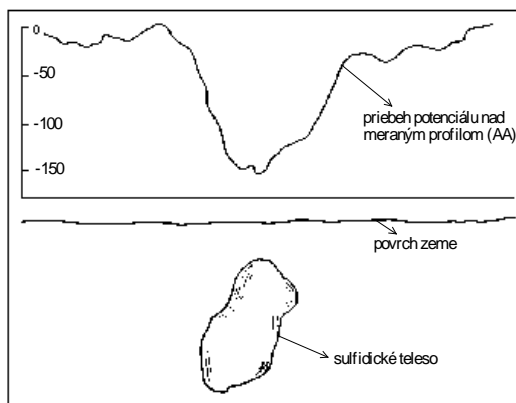
4. 3 Druhá skupina geoelektrických metód

Metódy druhej skupiny skúmajú elektrochemické polia vznikajúce v horninovom prostredí, ktoré, ako sme uviedli v úvode, je kombináciou horninového skeletu a elektrolytu vyplňajúceho pórový priestor v skelete. Vplyvom elektrochemických procesov na kontakte skelet elektrolyt, v dôsledku gravitačného, alebo hydraulického pohybu podzemnej vody a pod vplyvom pôsobenia prirodzených a umelých elektrických polí dochádza k pohybu voľného elektrického náboja v elektrolyte a pri tomto pohybe v miestach rôznych prekážok dochádza k vzniku akumulácií elektrického náboja. Akumulácie elektrického náboja sú rovnako zdrojom elektrických polí a metódy, ktoré skúmajú plošné rozloženie (tvar) týchto elektrických polí sa nazývajú elektrochemické metódy.

V geofyzikálnej praxi sa používajú dve elektrochemické metódy: metóda spontánnej polarizácie (skúma elektrické polia akumulácií elektrického náboja vzniknuté prírodnými procesmi) a metóda vyvolanej polarizácie (skúma elektrické polia akumulácií elektrického náboja vzniknuté pôsobením umelého elektrického poľa elektródového systému – spomínali sme ju v predchádzajúcej časti).

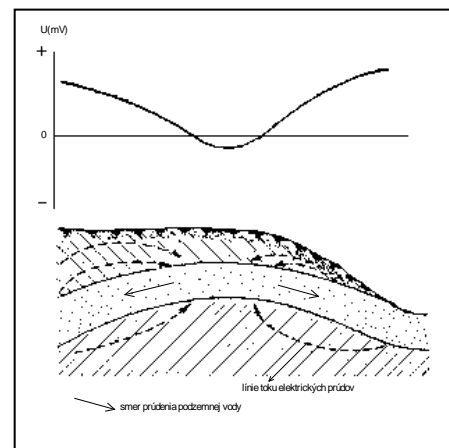
4.3.1. Metóda spontánnej polarizácie

Procesov, vyvolávajúcich vznik prirodzených akumulácií elektrického náboja v pórovom priestore horninového prostredia je veľa, avšak hlavné sú tri: filtračné potenciály (vznikajúce pri prúdení podzemnej vody), difúzne potenciály (vznikajúce zvýšeným pohybom iónov na kontakte rôzne mineralizovaných podzemných, ale aj kontaminovaných podzemných vôd) a oxidačno-redukčné potenciály (vznikajúce na kontakte podzemnej vody a kovových minerálov akumulovaných v ložiskách kovov, ale aj pri korózii). Všetky tieto procesy vytvárajú plošne rozsiahle (desiatky a stovky metrov) zvýšenej, alebo zníženej intenzity elektrického poľa a mapovaním týchto polí je možné lokalizovať ich zdroje, vyšetriť kde v horninovom prostredí takéto procesy prebiehajú, aký majú charakter, čo ich zapríčiňuje a pod. Sú to dôležité informácie pri vyhľadávaní niektorých ložísk kovov, pri skúmaní pohybu podzemnej vody a pri sledovaní miešania rôzne mineralizovaných vôd. Meranie v metóde spontánnej polarizácie je pomerne jednoduché, stačí mať k dispozícii z elektródového systému okruh na meranie napätia, t.j. dve elektródy a milivoltmeter. Elektródy však musia byť tzv. nepolarizovateľné, t.j. vhodnou konštrukciou treba zabezpečiť, aby sa ich potenciál pri umiestení do zeme nemenil. Meraním na profile je možné zistiť zmeny elektrického poľa SP pozdĺž profilu a meraním na sústave profilov je možné zistiť zmeny elektrického poľa na skúmanej ploche a takto zostaviť mapu elektrického poľa SP. Príklad výsledkov takéhoto merania je uvedený na obr.16 a 17.



Typický graf a mapa prirodzených potenciálov nad sulfidickým rudným telesom

Obr.16. Príklad použitia metódy SP v rudnom prieskume

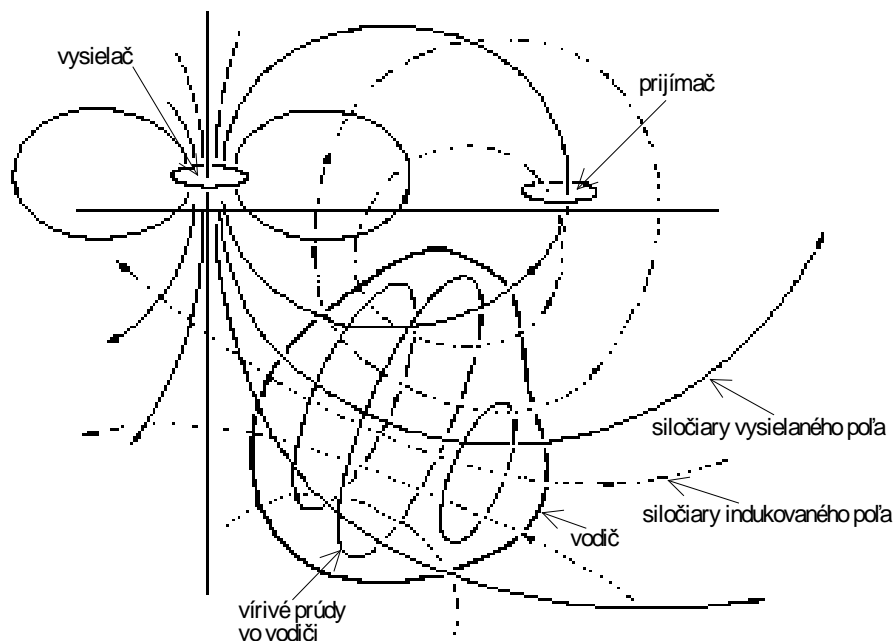


Obr.17. Príklad použitia metódy SP pri prieskume pohybu podzemnej vody

4.3.2. Metóda vyvolanej polarizácie (táto metóda je popísaná časti 4.2.3)

4.4 Tretia skupina geoelektrických metód - indukčné metódy

Tretia skupina geoelektrických metód je najpočetnejšia. Vyplýva to ako z rôznych možností vyvolávania indukovaných polí v horninovom prostredí, tak z veľa možností ako tieto indukované polia a ich parametre merať. Možností na usporiadanie týchto metód je veľa, v našom texte sme vybrali vzdialenosť medzi vysielacom a prijímačom. Podľa tohto kritéria je možné rozdeliť indukčné metódy na dve skupiny – na skupinu v ktorej budú metódy u ktorých je vzdialenosť vysieláč – prijímač relatívne malá – metódy blízkej a kvázi blízkej zóny (rádovo desiatky až prvé stovky metrov) a na skupinu, kde je táto vzdialenosť rádovo kilometre až tisíce kilometrov – metódy vzdialenej zóny. Zovšeobecnený náčrt vzniku indukovaného elektromagnetického poľa v geologickom vodiči je uvedený na obr.18.

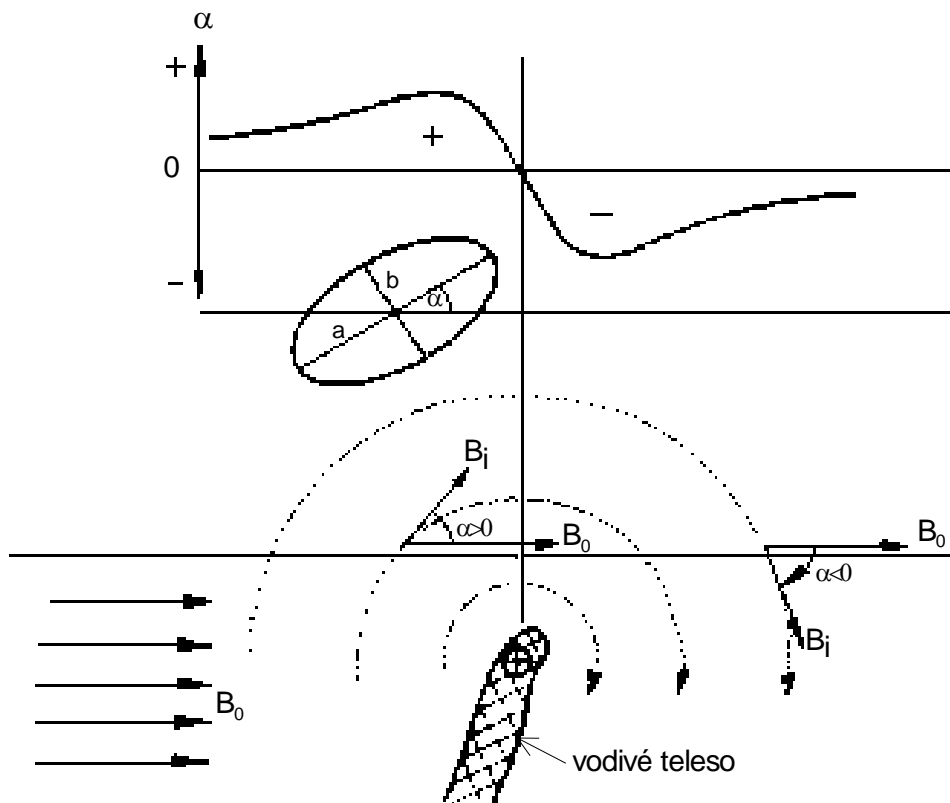


Obr.18. Zovšeobecnený náčrt vzniku indukovaného elektromagnetického poľa v geologickom vodiči.

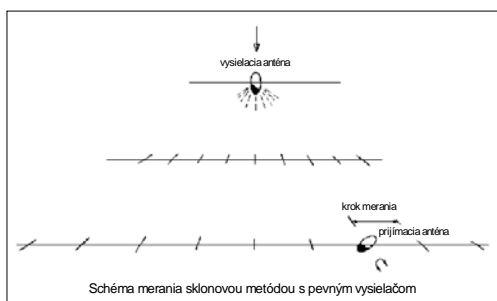
4.4.1 Metódy blízkej zóny

V tejto skupine metód bolo rozpracovaných a používaných veľa metód, na tomto mieste uvedieme tri z nich:

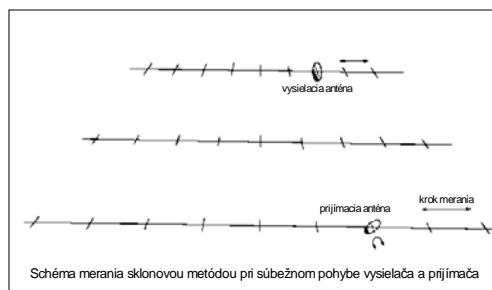
Sklonová metóda je určená na meranie jedného z parametrov indukovaných polí, je to konkrétne sklon vektora magnetickej zložky indukovaného poľa voči horizontálnej rovine. Ako to vidno z obr.19, indukované pole v okolí svojho zdroja má tvar kružníc a keď nad takým to poľom prechádzame meracou aparátúrou sklon vektora (ktorý je v bode merania dotyčnicou k siločiarom) ukazuje polohu zdroja poľa. Merania sa robia buď tak, že zdrojová anténa je umiestená na jednom mieste a meracia aparátúra sa pohybuje po profiloch (obr.20), alebo tak, že aj zdrojová anténa aj prijímač sa súčasne pohybujú po paralelných profiloch (obr.21). Výsledok takéhoto merania je uvedený na obr.22. Nameraná krivka sa nazýva gradientová a nad zdrojom indukovaného poľa má krivky tzv. inflexný bod (je to tá časť krivky, ktorá má najväčší sklon medzi dvomi extrémami).



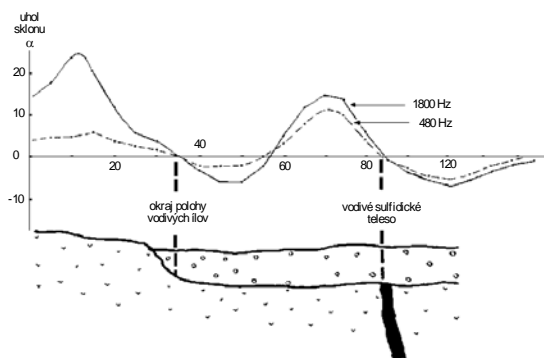
Obr.19. Zmena uhlu sklonu vektora indukovaného magnetického poľa nad strmým vodivým telesom. B_0 – magnetická zložka zdrojového poľa; B_i – magnetická zložka indukovaného poľa



Obr.20.

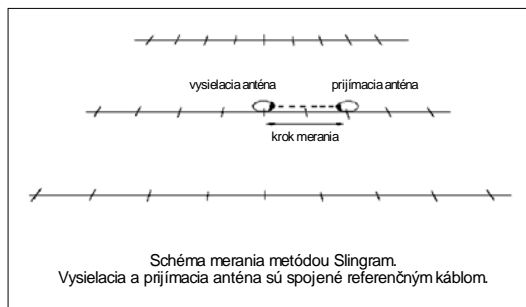


Obr.21.



Obr.22. Príklad výsledku merania sklonovou metódou

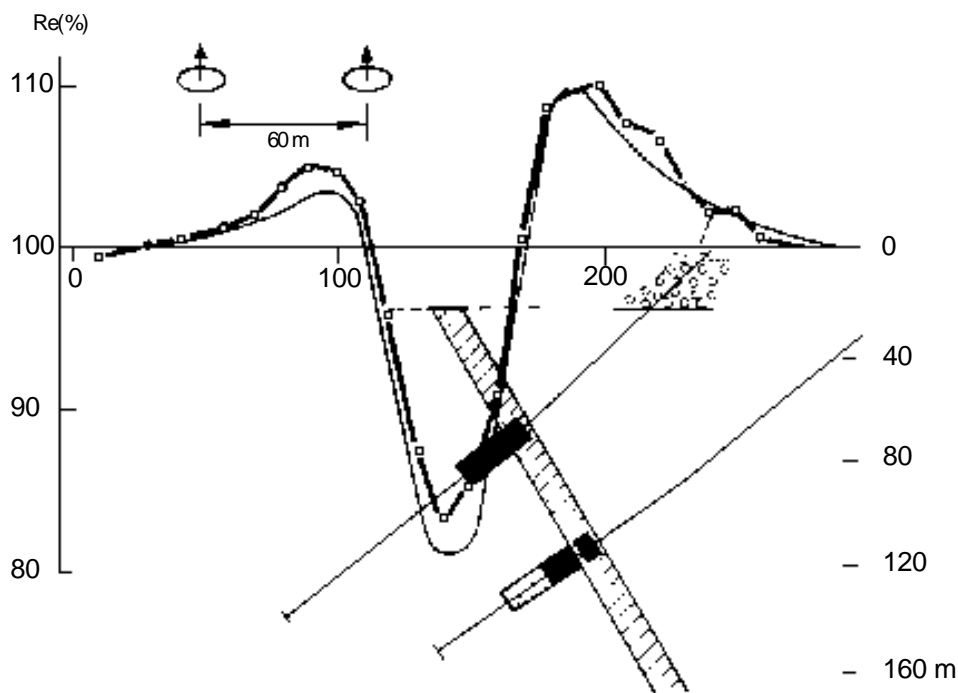
Metóda Slingram (názov pochádza od pôvodného švédskeho výrobcu aparatúry) sa používa na fázové meranie parametrov indukovaného poľa, pričom sa v aparátúre porovnáva fáza signálu v prijímacej anténe (vertikálna magnetická zložka indukovaného poľa) s fázou signálu vo vysielačnej anténe a určuje sa tá časť prijímaného signálu, ktorá je vo väze s vysielačným signálom (označovaná ako reálna zložka - Re) a tá



Obr.23

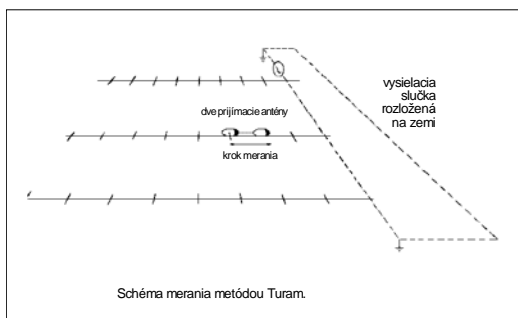
časť, ktorá je fázovo voči vysielanému signálu posunutá o 90° (označuje sa ako imaginárna zložka – Im). Meranie sa robí tak, že vysielateľ aj prijímač, konštantne od seba vzdialené, spojené referenčným káblom (na zabezpečenie fázového porovnania), sa súčasne pohybujú po profile a na každom meracom bode sa zmeria hodnota Re a Im (obr.23). Nad zdrojom indukovaného poľa možno získať priebeh Re a Im zložky podobný, ako sú uvedené na obr.24. Z porovnania

maximálnych hodnôt Re a Im zložky možno posúdiť vodivosť zdroja indukovaného poľa, jeho hĺbku a horizontálnu šírku.



Obr.24. Príklad výsledku merania metódou SLINGRAM nad doskovitým telesom rudnou mineralizáciou. V profile sú uvedené namerané údaje a výsledky modelových výpočtov

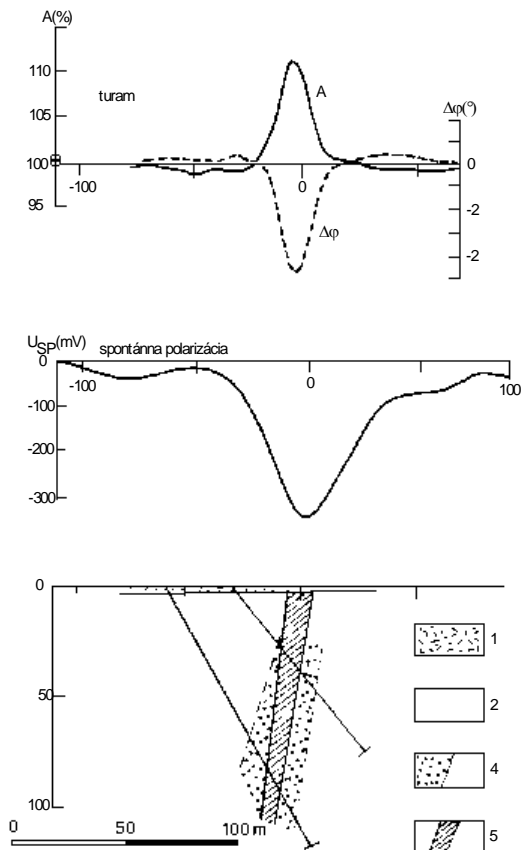
Metóda Turam



Obr.25

(vo švédčine to znamená dva rámy) je určená na vyhľadávanie vodivých geologických telies uložených hlbšie ako pri predošlých metódach (cca prvé desiatky metrov). Ako zdroj poľa sa používa buď dlhý uzemnený kábel (niekoľko jednotiek až desiatok kilometrov). Indukované pole, ktoré je takýmto zdrojom vyvolané sa hodnotí pomocou dvoch prijímacích antén konštantne od seba vzdialených (obr.25). Antény meraní vertikálne magnetické zložky v dvoch blízkych bodoch meracej siete. Dva signály zistené na meracom bode sa navzájom

porovnávajú a zisťuje sa pomer amplitúd týchto signálov a ich fázový posuv. Výsledok takéhoto merania je uvedený na obr.26. Z obrázku vidíme, že takéto meranie je vhodné na zistenie polohy zdroja indukovaného poľa a z pomeru maxím oboch parametrov je možné zistiť podobné údaje ako pri metóde Slingram.



Obr.26. Príklad použitia metódy TURAM (spolu s SP) pri prieskume vodivých geologických telies. 1 – pokryv; 2 – kvarcitické horniny; 3 – pyritová impregnácia; 4 – pyritová rudná žila.

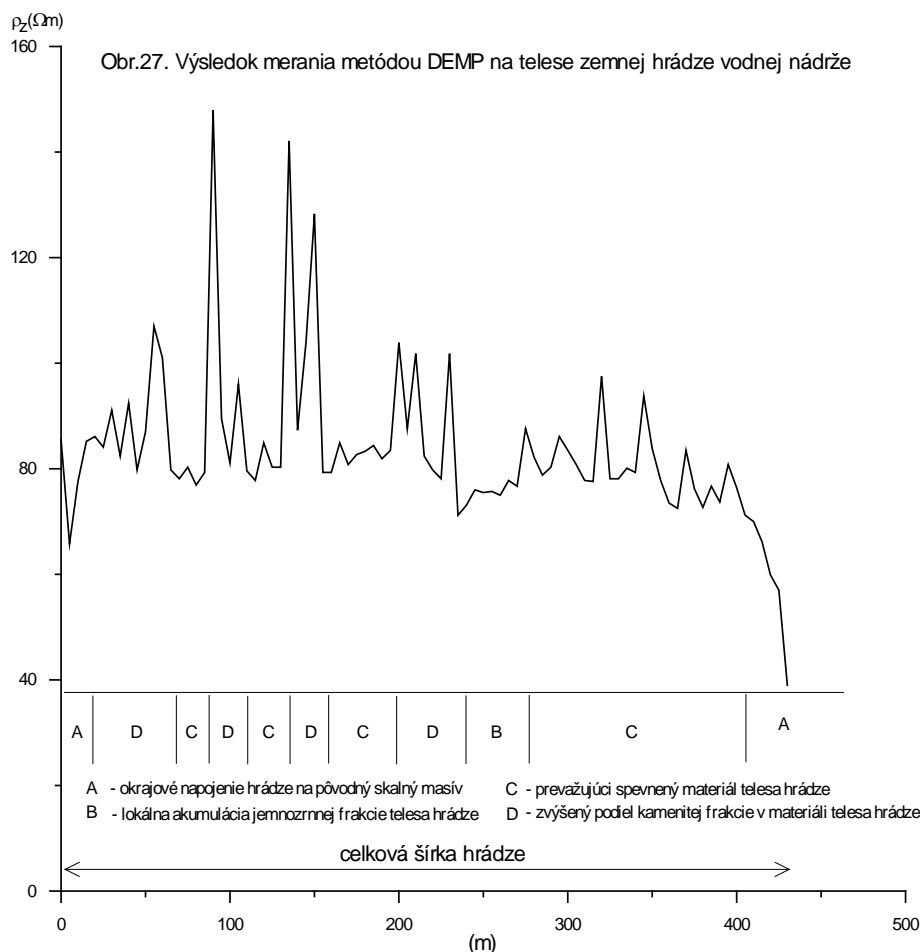
2 až 40 m. Výsledok takéhoto profilového merania je na obr.27 a pri pokrytí plochy sústavou profilov na obr.28.

Elektromagnetické sondovanie sa robí vďaka skin efektu. Je to vlastnosť procesu indukcie, ktorá vyjadruje fakt, že indukované prúdy tečú v priereze vodiča v určitej vrstve od povrchu vodiča a ktorej hrúbka závisí na frekvencii elektromagnetického poľa, ktoré indukciu vo vodiči vyvoláva. Táto závislosť hrúbky skin vrstvy na frekvencii je nepriama, to znamená, že čím je vyššia frekvencia, tým je skin vrstva tenšia. Na tomto princípe pracujú aj elektromagnetické sondážne metódy, pričom ako vodič tu je horninové prostredie a teda čím je menšia frekvencia zdrojového poľa, tým je mocnejšia skin vrstva a do väčšej hĺbky je možno zisťovať elektrickú vodivosť horninového prostredia. V reálnych aplikáciách sú prieskumné hĺbky rádovo stovky metrov až prvé kilometre. Pritom sa využívajú ako umelé (vysielacie antény v podobe slučiek rôznych rozmerov rozložených na zemi), tak prirodzené zdroje elektromagnetického poľa (vírivé prúdy v ionosfére). Príkladom takéhoto sondážneho merania sú výsledky z prieskumu podložia sedimentov v prériách západne od skalistých hôr v USA (obr.37).

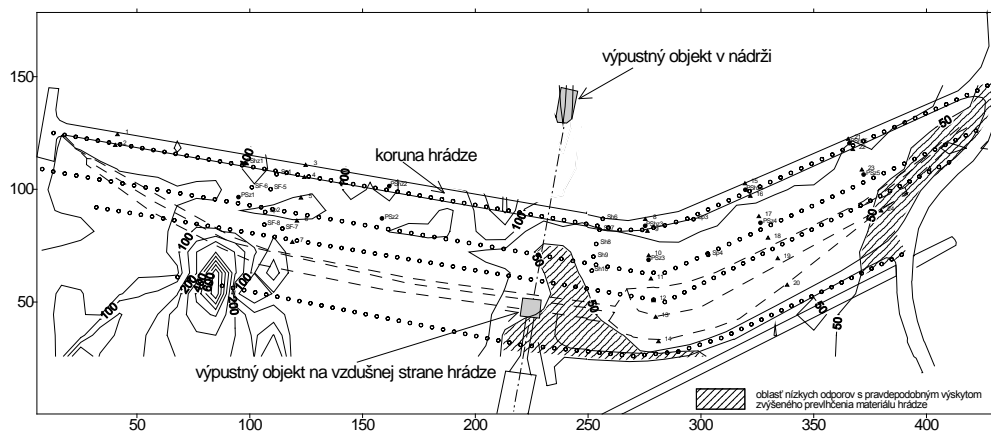
4.4.2 Metódy na meranie vodivosti horninového prostredia

Metódy v predošlej časti sa používajú na zistenie prítomnosti a polohy vodivých geologických telies, v ktorých vznikajú indukované elektrické prúdy. Ďalšia skupina metód sa používa na mapovanie priestorového rozloženia elektrickej vodivosti v horninovom prostredí. Podobne ako pri odporových metódach ich môžeme rozdeliť na dve skupiny: a) profilové metódy na zisťovanie plošných zmien elektrickej vodivosti a b) sondážne metódy na zisťovanie vertikálnych zmien elektrickej vodivosti.

DEMP – dipólové elektromagnetické profilovanie. Tento názov sa používa pre skupinu metód ktoré používajú vysielaciu a prijímaciu anténu podobne ako pri metóde Slingram, avšak parametre aparatury (frekvencia, vzdialenosť vysielač – prijímač a i.) sú nastavené tak, aby zmeny nameraných hodnôt boli závislé iba na zmenách vodivosti horninového prostredia. Určené sú na plytký prieskum do hĺbok

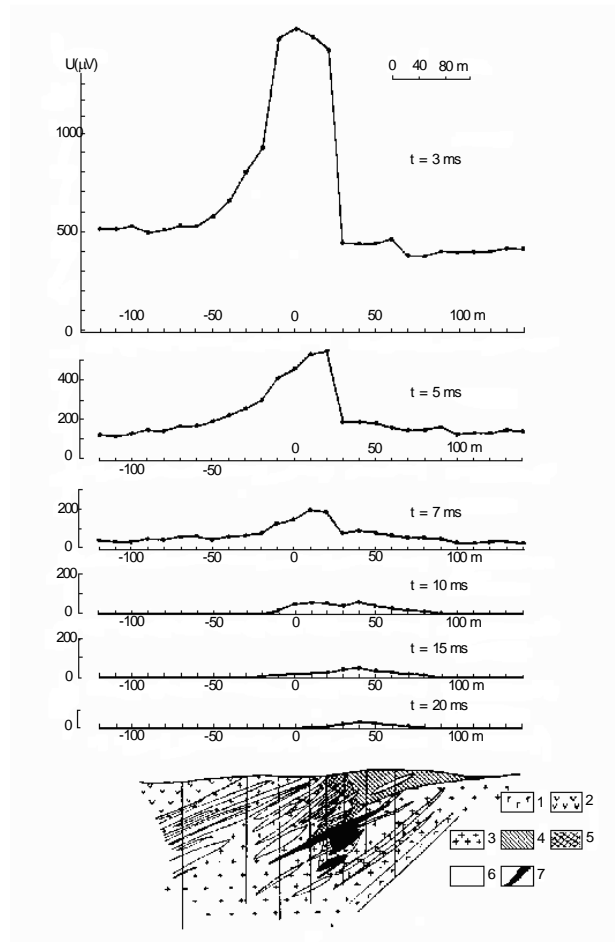


Obr.28. Mapa merných elektrických odporov zostrojená na základe výsledkov merania metódou DEMP
Meranie bolo vykonané na vzdušnej strane hrádze vodnej nádrže

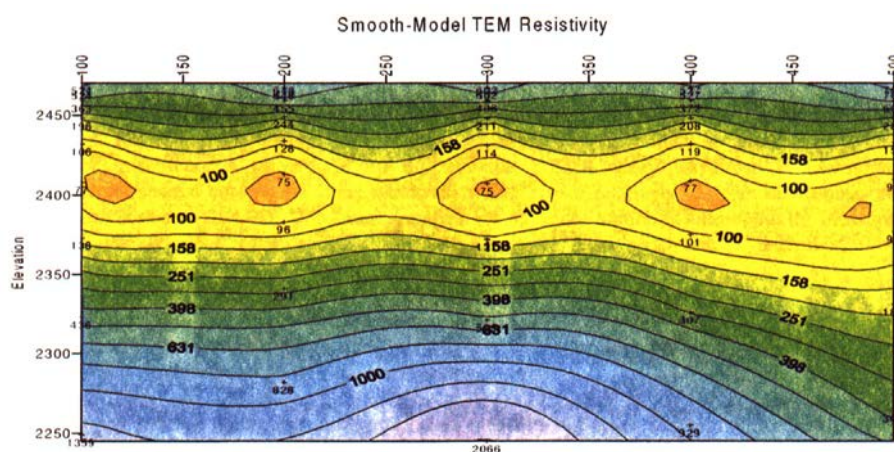


Prechodové metódy. Zvláštnym prípadom merania vodivosti horninového prostredia sú metódy, ktoré ako zdroj elektromagnetického poľa využívajú tzv. prechodný jav, ktorý vzniká v elektrickom obvode pri zapnutí a vypnutí jednosmerného elektrického prúdu. Tento prechodný jav sa prejavuje tak, že elektrický prúd pri zapnutí, alebo vypnutí sa nemení skokovo hneď, ale najprv zakmitá. Celý jav trvá krátko (do 0.5 sek), ale zakmitanie vytvára elektromagnetickú vlnu, ktorá spôsobuje v okolitých vodičoch vznik indukovaných prúdov a teda aj indukovaných polí. Ich intenzita závisí na vodivosti vodiča. Metóda prechodových javov teda slúži na zisťovanie zmien vodivosti horninového prostredia pričom na vyvolávanie indukovaných polí využíva prechodné procesy. Metóda sa používa v profilovej a sondážnej

verzii. Prvá sa používa na vyhľadávanie dobrých vodičov, druhá na určovanie vertikálnych štruktúrnych rezov horninového prostredia. Príklad výsledku profilových meraní je na obr.29, príklad výsledku sondážnych meraní na obr.30.



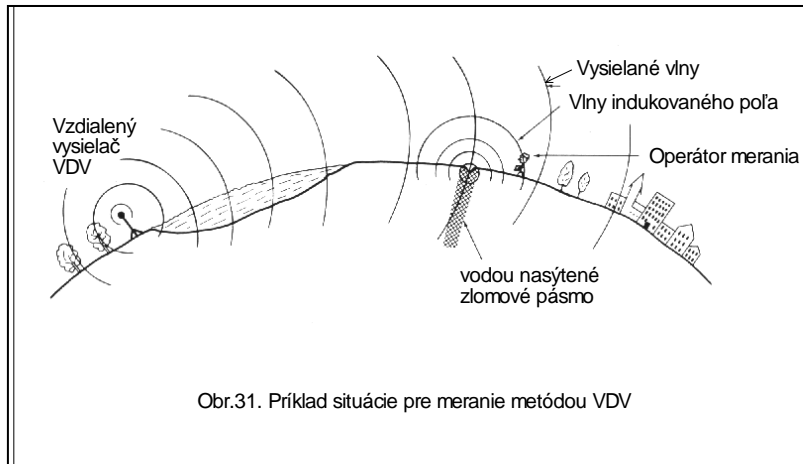
Obr.29. Príklad použitia metódy *prechodných javov* na prieskum rudného ložiska (vodič). V grafoch sú uvedené hodnoty zmeraného napätia pre rôzne dlhé časové intervaly po vypnutí zdrojového prúdového impulzu. Posun maxima pre pozdejšie časové hodnoty znamená so zväčšovaním hĺbky posuv centra vodivosti doprava. 1 – spility; 2 – spilitové porfýry; 3 – efuzívne kremité keratofýry; 4 – vybielené efuzívne kremité keratofýry; 5 – ako 4 a premenené; 6 – pieskovce; 7 – medený kyz.



Obr 30. Príklad výsledku sondovania metódou *prechodných javov*. Na obrázku je uvedený odporový rez horninovým prostredím, pričom v oblasti výšky 2400 sa ťahne pásma znížených odporov, ktoré predstavuje vodivú vrstvu zvetralín na kryštalickom podloží.

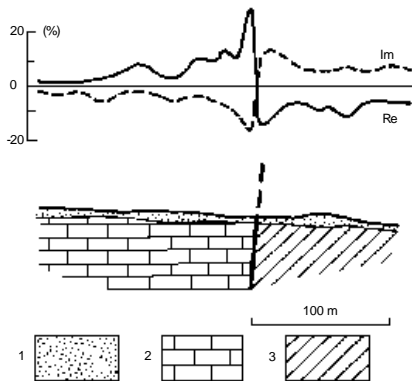
4.4.3 Metódy vzdialenej zóny

Ako sme spomenuli, sú to metódy, pri ktorých je vysielač vzdialený od prijímača niekoľko desiatok až tisíce kilometrov. Preto zvyčajne vysielač nie je súčasťou meracej aparatury a využívajú sa iné zdroje, ako sú komunikačné vysielače, alebo prirodzené zdroje ako blesky a vírivé prúdy v ionosfére.



Obr.31. Príklad situácie pre meranie metódou VDV

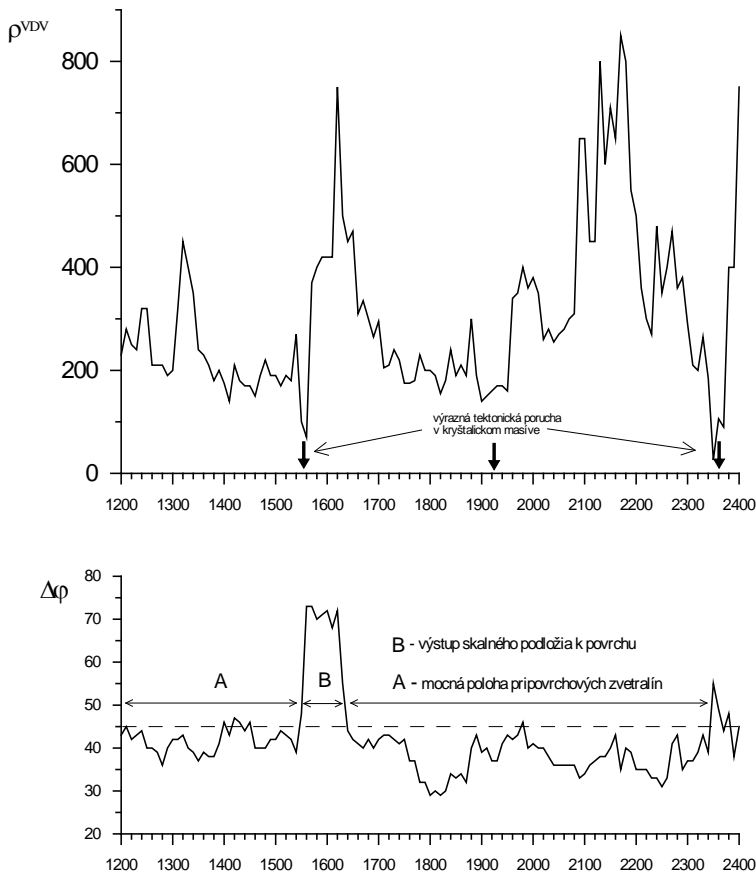
Metóda VDV. (metóda veľmi dlhých vln). Táto metóda sa používa podobne ako metóda sklonová na zisťovanie prítomnosti a polohy dobrých geologických vodičov (rudné telesá, zvodnené tektonické poruchy a i.) meraním magnetickej zložky indukovaného elektromagnetického poľa vznikajúceho v týchto vodičoch. Využíva elektromagnetické pole komunikačných vysielačov (frekvencie 10 až 45 kHz) (obr.31). Ak sa súčasne zmeria aj elektrická zložka indukovaného poľa, tak pomocou hodnoty elektrickej a magnetickej zložky sa dá vypočítať hodnota charakterizujúca vodivosť horninového prostredia v mieste merania. Takto je potom možné zisťovať okrem polohy geologických vodičov aj plošné zmeny vodivosti horninového prostredia. Výsledky merania magnetickej zložky sú uvedené na obr.32 a výsledky merania aj elektrickej zložky na



Obr.32. Príklad výsledku merania metódou VDV nad zvodnenou tektonickou líniou. 1 – pokrýv; 2 – vápence; 3 – bridlice.

obr.33. V tomto výsledku sú uvedené aj výsledky merania fázového posuvu medzi magnetickou a elektrickou zložkou, ktoré sa dajú využiť na posúdenie toho, či pri povrchu je vodivejšia vrstva a pod ňou odporovejšia, alebo naopak.

Metóda AFMAG (audio magnetic frequency method) je metóda podobná metóde VDV avšak ako zdroj elektromagnetického poľa sa tu využívajú blesky pri búrkach. Pri blesku tečú silné elektrické prúdy (stovky ampér), takže ich pole dosahuje do vzdialeností niekoľko tisíc kilometrov. Na druhej strane sú to impulzné zdroje a ich poloha sa neustále mení. Preto sa pri tejto metóde meria iba magnetická zložka (obr.34) a zisťuje sa prítomnosť silných indukovaných poli vznikajúcich vo dobrých geologických vodičoch. Príklad výsledku takéhoto merania je na obr.35.

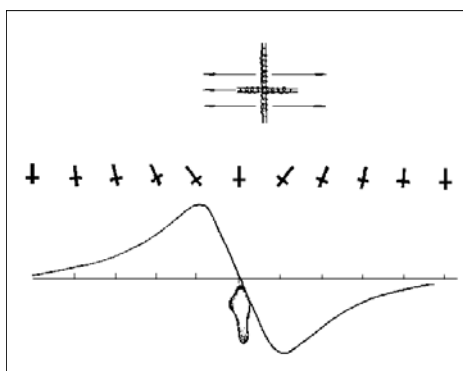


Obr.33. Príklad výsledku merania merného elektrického odporu a fázového posuvu v metóde VDV pri skúmaní štruktúry kryštalinika.

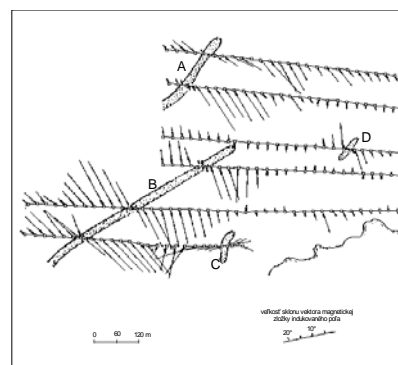
Magnetotelurické metódy.

Je to skupina metód, ktoré využívajú ako zdroj elektromagnetického poľa vírivé prúdy v ionosfére. Frekvencia týchto polí je veľmi nízka (desatiny, stotiny a menej Hz) a teda indukované polia, ktoré tieto zdroje vyvolávajú zasahujú do veľkých hĺbok zemskej kôry (jednotky a desiatky kilometrov). Preto sa tieto metódy využívajú hlavne na štúdium štruktúry zemskej kôry. Magneto telurických metód je viac. Z nich sa používajú hlavne *metóda telurických prúdov* (slovo

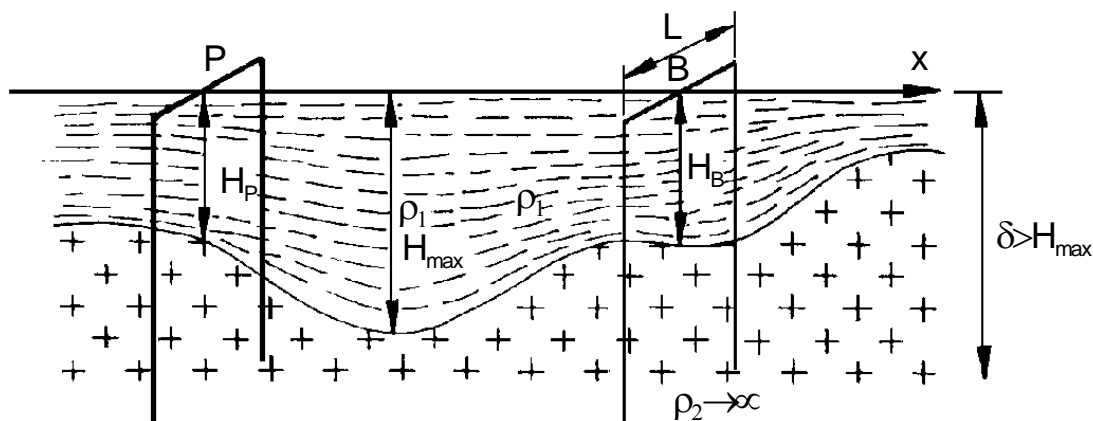
tellus pochádza z gréčtiny a znamená zem) skúma plošné rozloženie elektrickej zložky indukovaných prúdov a používa sa na zisťovanie zmien mocnosti sedimentárnych komplexov, pretože tieto majú vyššiu vodivosť ako podložné kryštalinikum a teda indukované prúdy tečú predovšetkým v sedimentoch (obr.36). Ďalšou často používanou metódou je *magnetotelurické sondovanie*, ktoré sa používa na zisťovanie štruktúry zemskej kôry. Príklad takéhoto merania je uvedený na obr.37.



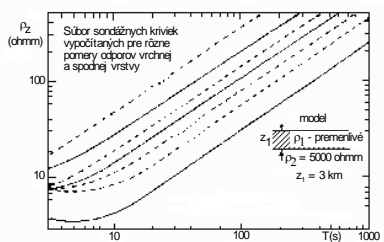
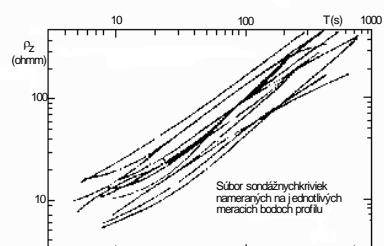
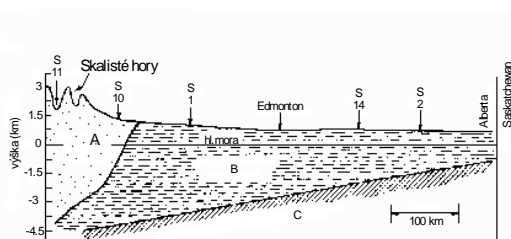
Obr.34. Príklad výsledku merania metódou AFMAG nad vodivým geologickým telesom. Meraný prejav je rovnaký ako v metóde VDV, alebo v sklonovej metóde.



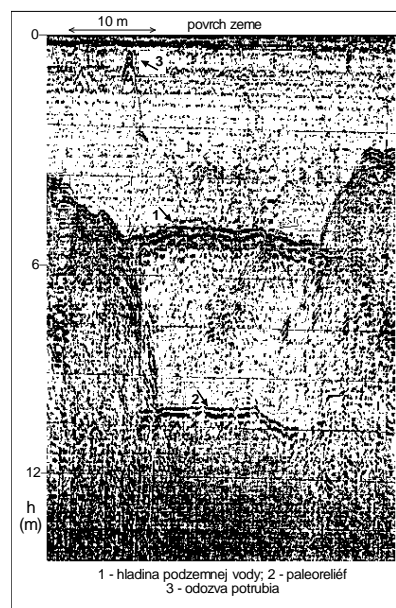
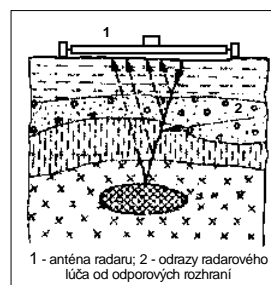
Obr.35. Príklad výsledku mapovania vodivých telies. V zobrazení sú pomocou šípiek ukázané sklony aj smery vektora magnetickej zložky. A, B, C, D – poloha zistených geologických vodičov.



Obr.36. Ukážka zmien hustoty telurických prúdov spôsobená zmenou mocnosti vodivých sedimentov na nevodivom kryštalickom podloží. Z porovnania zmien zistenej hustoty telurických prúdov v bodoch P a B je možné posúdiť aj zmeny mocnosti sedimentárneho komplexu.



Obr.37. Príklad výsledku magnetotelurického sondovania v centrálnej Alberte. A – prekambričné a staršie sedimenty; B – sedimenty Centrálnej alberty; C – prekambričné vyvreté a metamorfované sedimenty



Obr.38. Princíp práce georadaru a príklad výsledku jeho použitia

4.4.4 Georadar

Poslednou geoelektrickou metódou, ktorú tu chceme spomenúť je georadar. Je to metóda ktorá nezisťuje ani rozloženie vodivosti v horninovom prostredí, ani stav indukovaných polí, ale využíva odraz vysokofrekvenčných elektromagnetických vln (rádovo GHz) od rozhraní geologických vrstiev s odlišnou vodivosťou a permitivitou. To dovoľuje

zostrojíte spojitý obraz štruktúry horninového prostredia pozdĺž rezu na ktorom sa tieto merania robia. Princíp georadarového merania a príklad jeho výsledku sú uvedené na obr.38.

4.4.5 Literatúra

Karous,M., 1989: Geoelektrické metódy průzkumu. SNTL/Alfa, Praha 1989.

Mareš,S. a kol., 1979: Úvod do užité geofyziky, SNTL Praha.

Mareš,S. a kol., 1983: Geofyzikální metody v hydrogeologii a inženýrské geologii. SNTL Praha.

Telford a kol., 1976: Applied geophysics. Canbridge Univ.

Bezvoda,V., Gruntorád,J., Knez,J., 1968: Geoelektrika. PrifUK, Praha

Svetov,B.,S. a kol., 1966: Elektromagneitnyje metody razvedky v rudnoj geofizike. Nedra, Moskva.

Jakubovskij,J.V.,Ljachov,L.L., 1956: Elektrorazvedka. Gosgeoltechizdat, Moskva.

ABEM, prospekt

CRONE, prospekt

Zonge,K.L., 1992: Introduction to TEM

Otázky k Elektrickým metódam

1. aké jednosmerne odporové metódy poznáme
2. koľko elektród používame pri odporových metódach
3. nakreslite základnú schému merania pri odporových metódach
4. napíšte aspoň päť príkladov využitia elektrických metód
5. aký fyzikálny parameter meriame v odporových metódach, a ako ho vypočítame
6. napíšte, aké tri komponenty obsahuje typický GPR systém
7. od akých fyzikálnych vlastností závisí šírenie GPR impulzu (elektro-magnetickéj vlny) v horninovom prostredí (materiály)
8. aké typy GPR antény poznáte a od čoho závisí ich hĺbkový dosah
9. čo je difragovaná vlna
10. napíšte hlavné oblasti použitia georadaru