

Elektromagnetika

Electromagnetic methods

- ▶ Princíp
- ▶ Aplikovateľnosť
- ▶ Meranie
- ▶ Aparatúry
- ▶ Interpretácia
- ▶ Príklady

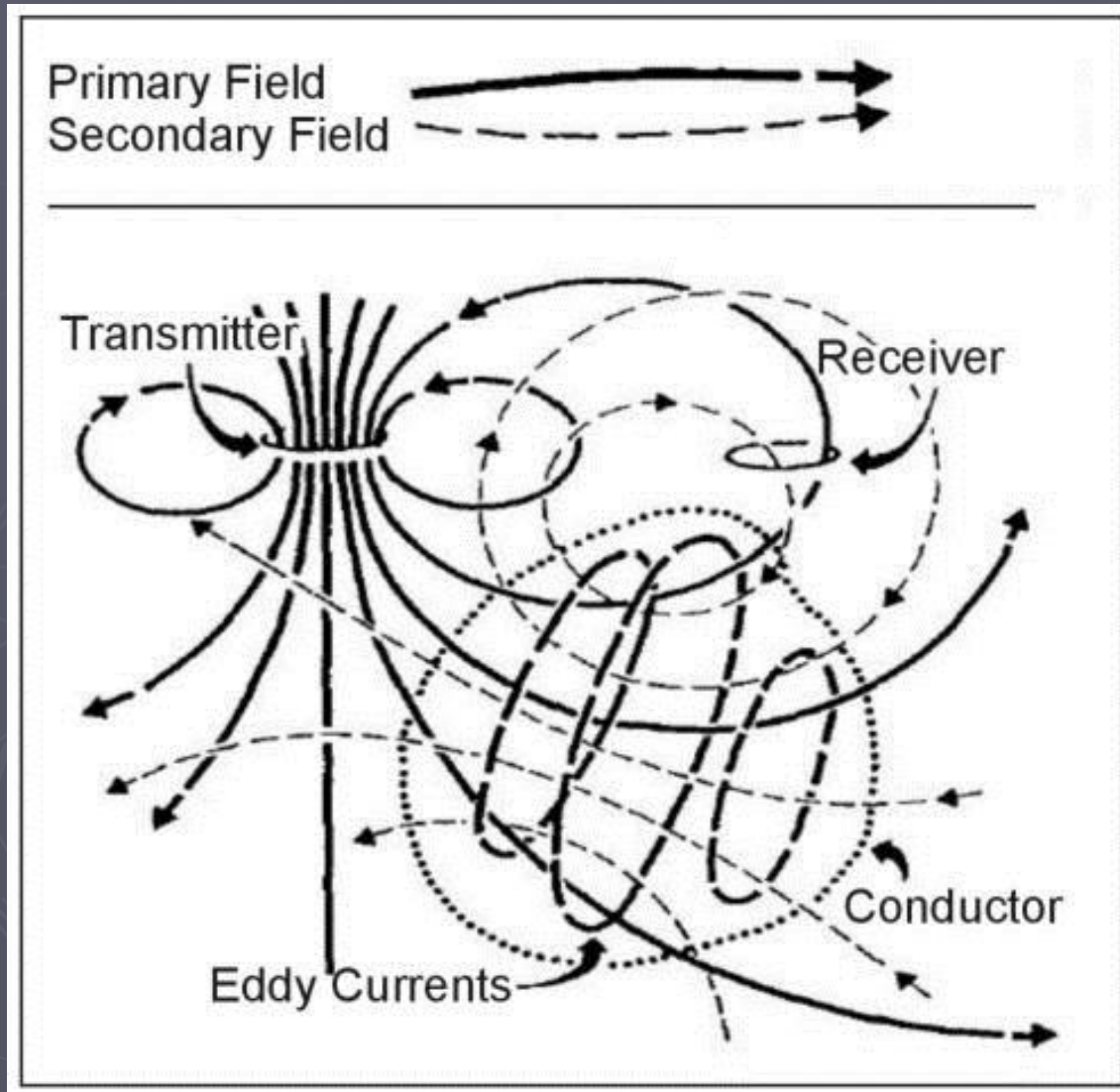
Literatúra

- S.Mareš a kol., Úvod do užité geofyziky,
- Telford at al., Applied geophysics.
- Karous M., Geoelektrické metódy prieskumu

Elektromagnetické metódy

- ▶ najväčšia a najrozmanitejšia skupina geoelektrických metód
- ▶ používajú prirodzené, alebo umelé časovo premenné EM pole
- ▶ hĺbkový dosah je od niekoľko 10 cm do 100viek metrov
- ▶ pre dosiahnutie väčších hĺbok používame nižšie frekvencie
- ▶ pri profilovaní s viacerými frekvenciami je možné interpretovať zmeny odporu v horizontálnom aj vertikálnom smere

Elektromagnetická indukcia



Aplikácia

- ▶ podzemné železné objekty
- ▶ kontajnery, sudy, líniové stavby
- ▶ smetiská a výkopy
- ▶ nevybuchnutá munícia
- ▶ kontaminančné mraky
- ▶ zlomové štruktúry
- ▶ bane a ložiská
- ▶ archeológia

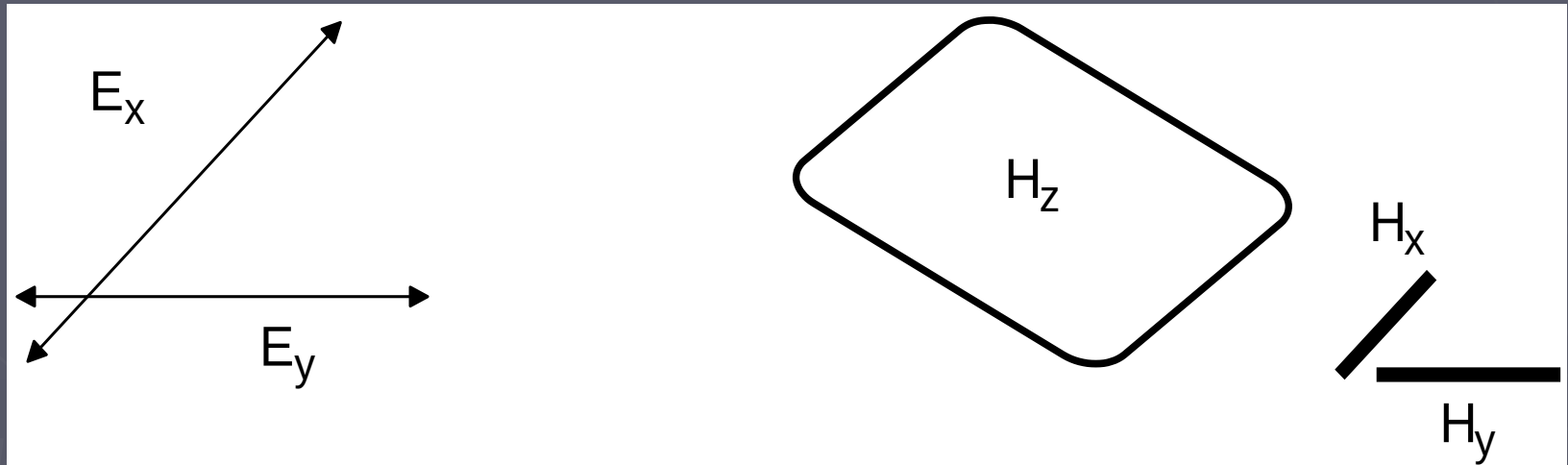
Základný prehľad metód

- ▶ **Magnetotelurické metódy**
- ▶ **CSAMT**
- ▶ **AFMAG**
- ▶ **VDV**
- ▶ **Slingram**
- ▶ **Turam**
- ▶ **DEMP**
- ▶ **TEM (PJ)**
- ▶ **TDEM**
- ▶ **Georadar**

Magnetotelurika

- ▶ patrí k prvým metódam využívajúcich ionosféru ako zdroj EM polí využiteľných pre geofyzikálny prieskum.
- ▶ meriame parametre horizontálnej zložky elektrickej časti magnetotelurického poľa
- ▶ pole je generované vírivými prúdmi nabitých častíc v ionosfére a indukovanými prúdmi

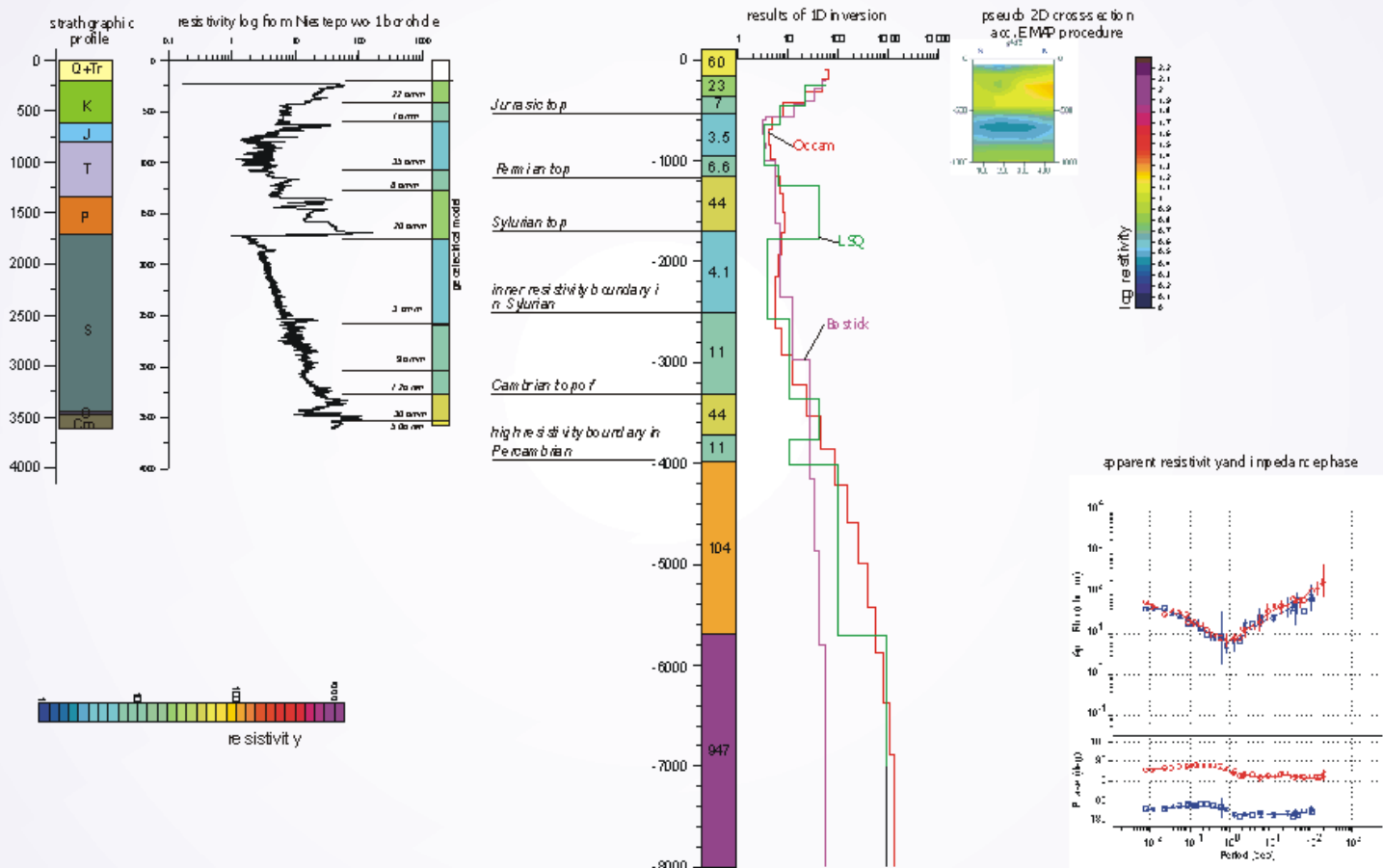
Magnetotelurické sondovanie



pri MT sondovaní sa používajú dve súpravy snímacích antén: jedna na **bázovom** bode, druhá na **putovnom** bode. S touto druhou sa chodí po bodoch meracej siete, ktorá v prípade sondovania je zvyčajne tvorená profilom, na ktorom chceme zostaviť vertikálny rez horninovým prostredím

Magnetotelurické sondovanie

PARAMETRIC MT SOUNDING DATA INTERPRETATION - site GK16, borehole Niestepowo-1



CSAMT - úvod

Metóda CSAMT sa zaraďuje v medzi geofyzikálne geoelektrické metódy. Jej využitie predpokladá **odporový kontrast v horninovom prostredí**. Metóda mapuje vodivostné pomery v širokom hĺbkovom rozsahu.

Metóda CSAMT patrí medzi magnetotelurické metódy, čo sú metódy zaraďované k frekvenčným metódam (frequency domain), kde **hĺbka dosahu metódy je určená použitou frekvenciou elektromagnetického signálu**.

Magnetotelurické metódy (MT, AMT) s prirodzeným zdrojom využívajú prirodzené variácie elektromagnetického poľa zeme v širokom frekvenčnom rozsahu. Široký frekvenčný rozsah umožňuje dosahovať veľkú hĺbku penetrácie.

Magnetotelurický signál je generovaný aj búrkami a solárnym vetrom v ionosfére. Jeho intenzita sa mení v čase.

Úvod k metóde

Magnetotelurické signál podľa **frekvencií** môžeme rozdeliť na:

Magnetotelurické pole (MT) $f < 1\text{Hz}$

Audiomagnetotelurické pole (AMT) $f = 1\text{-}10000\text{ Hz}$

Radiomagnetotelurické pole (RMT) $f = 10000\text{-}30000\text{ Hz}$

CSAMT používa umelý zdroj elektromagnetického signálu, uzemnený dipól alebo horizontálnu slučku.

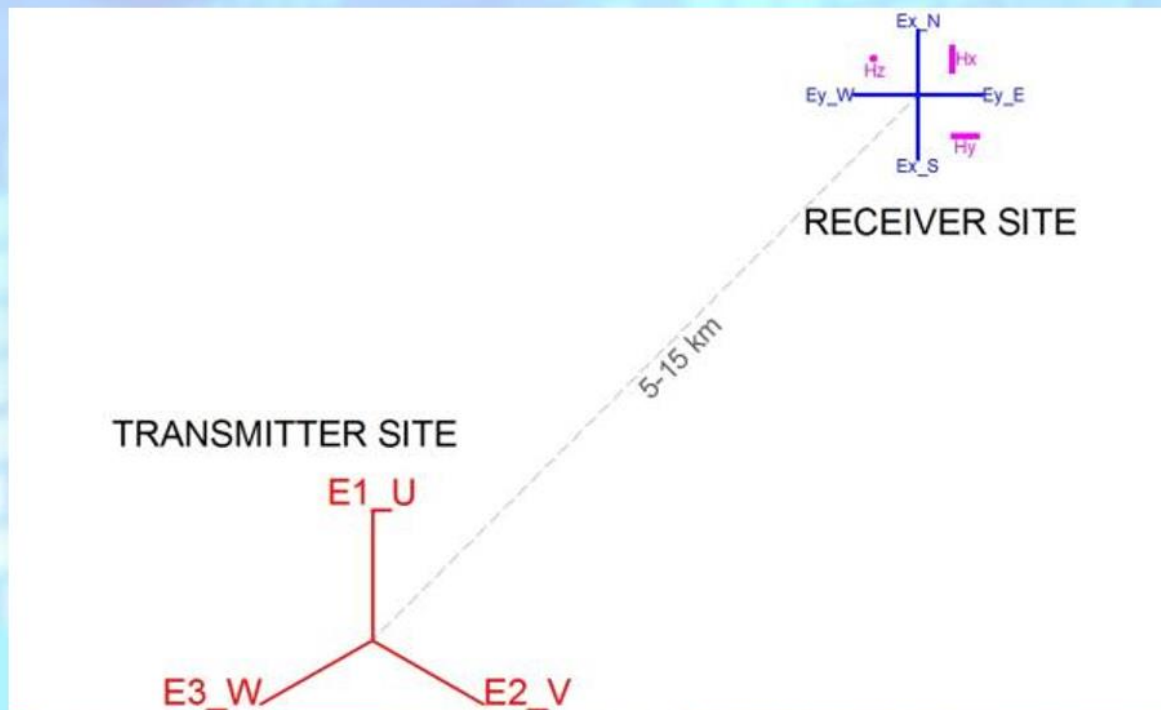
Zdroj poskytuje *stabilný, nezávislý signál*. Využívaný signál je v rozsahu AMT (1Hz – 8192Hz).

Efektívna hĺbka použitia metódy je do 1.5 km (maximálne 2km).

Význam metódy za posledné roky stúpa pre jej vysokokvalitné údaje, dobré rozlíšenie, finančnú nenáročnosť a relatívne jednoduchú interpretáciu.

Popis meódy

Metóda CSAMT vyžaduje transmisiu kontrolovaného elektromagnetického signálu vhodných frekvencií na strane vysieláča (transmitter) a meranie elektrického a magnetického poľa v meranej ploche na strane prijímača (receiver).



*Transmitter je statický, počas jednej etapy merania zostáva na tom istom mieste.
Receiver sa pohybuje po meracích bodoch.*

Popis metódy

- Spracovanie CSAMT signálu vychádza z metodiky spracovania MT poľa, kde máme zdroj prakticky v nekonečne oproti meranému tenzoru.
- V prípade CSAMT je zdroj v konečnej vzdialenosti.
- Aby meranie nebolo ovplyvnené zdrojom, zdroj musí byť v dostatočnej vzdialenosti od prijímacej časti.

Vzdialenosť zdroja od prijímača môžeme zaradiť do 3 kategórií:

Blízka zóna (near field)

Prechodná zóna (transition field)

Vzdialená zóna (far field)

Našou snahou je dosiahnuť to, aby sa prijímač nachádzal vo „vzdialenej zóne“, čím je zabezpečená ortogonalita CSAMT merania.

Interpretačné postupy sú spracované len pre far zónu. V poslednom čase sú publikované matematické postupy pre interpretáciu v near zóne. V tomto prípade sa musí brať do úvahy i orientácia vysielača a vysiellané prúdy. Postupy interpretácie sú však zatiaľ len v teoretickom štádiu a nie sú integrované v spracovateľských software.

Popis metódy

Ideálna **vzdialenosť medzi vysielačom a prijímačom** musí byť minimálne **4 x skin depth**.

Skin depth

$$d = 503 * \sqrt{\rho / f}$$

d - skin depth

ρ – odpor

f – frekvencia signálu

Minimálna vzdialenosť medzi prijímačom a vysielačom $4d = 2012 * \sqrt{\rho / f}$

Minimálna vzdialenosť závisí od **frekvencií** ako aj od **odporu** horninového prostredia

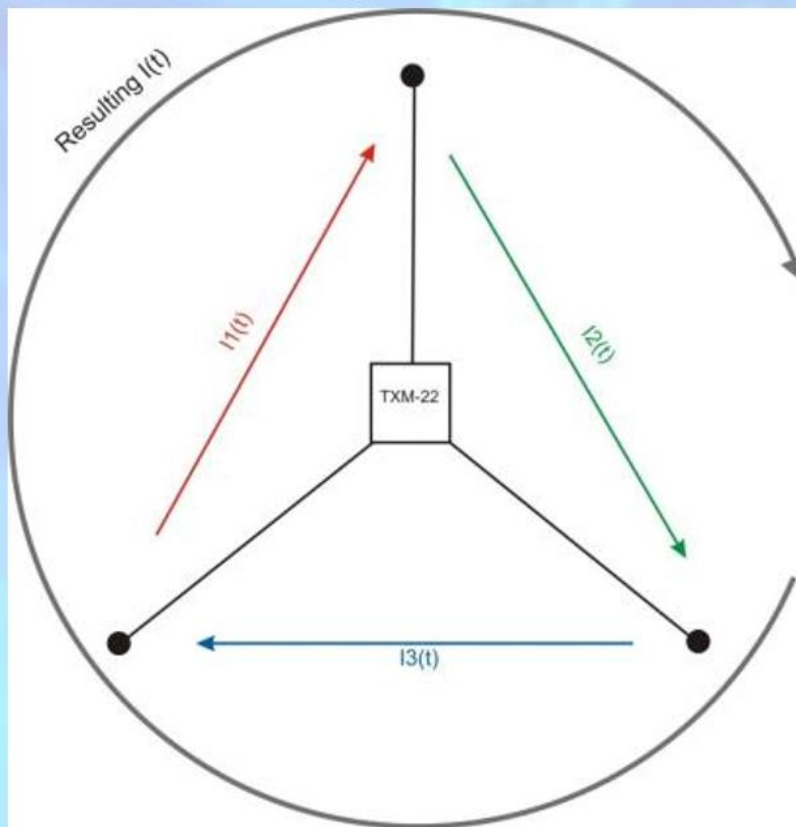
Maximálna vzdialenosť je daná **utlmením signálu** hlavne vyšších frekvencií

Meranie môžu byť vykonávané v rozsahu 0.1 Hz do 10 kHz.

Najčastejšie používané frekvencie sú 1Hz, 2 Hz, 4Hz, 8Hz, 16Hz, 32Hz, 64Hz, 128Hz, 256Hz, 512Hz, 1024Hz, 2048Hz, 4096Hz, 8192Hz.

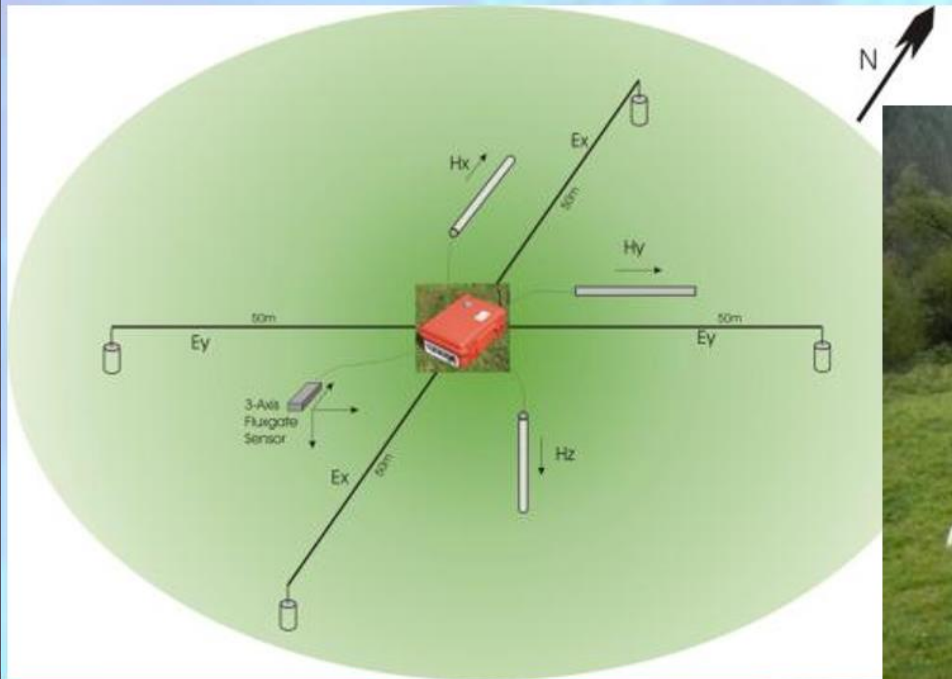
Popis metódy

Na strane transmittera používame miesto uzemneného dipólu **uzemnený tripól**. To nám umožňuje ľubovoľne rotovať prúdový vektor podľa potreby bez nutnosti meniť polohu uzemnenia elektród. **Dĺžka každej vetvy tripólu je od 500 do 1000m.** Maximálny prúd vysielacej zostavy je 40A.



Popis metódy

Na strane receivera magnitúda a fáza môžu byť merané od 2 do 5 elektrických a magnetických komponentov E_x , E_y , H_x , H_y , H_z .
 E_x , E_y sú navzájom kolmé elektrické dipóly. H_x , H_y , H_z sú magnetické komponenty.
Veľkosť meracieho elektrického dipólu je od 25 do 50m.



Popis metódy

Pomer elektrickej a magnetickej zložky (kolmých na seba) ako aj rozdiel ich fáz sú charakteristické pre elektrické vlastnosti hornín:

$$Z = \mathbf{E}/\mathbf{H}$$

Z- impedancia je definovaná ako pomer kolmých zložiek elektrického a magnetického poľa

Zdanlivý odpor pre magnetotellurické meranie vo vzdialenej zóne popisuje **Cagniardov vzorec**:

$$\rho_z = \frac{1}{\omega\mu} * \left| \frac{E_x}{H_y} \right|^2 \text{ (Ohmm)}$$

$$\rho_z = \frac{1}{5f} * \left| \frac{E_x}{H_y} \right|^2 \text{ (Ohmm)}$$

ρ_z – zdanlivý odpor

ω – uhlová frekvencia

μ – magnetická permeabilita

f – frekvencia

Fázový posun – je posun medzi navzájom kolmými zložkami elektrického a magnetického poľa

$$\Phi = \Phi_{E_x} - \Phi_{H_y}$$

Φ – fázový posun

Popis metódy

Hĺbka informácie je nepriamo úmerná použitej frekvencii. Vyššie frekvencie poskytujú informácie z malých hĺbok. Nižšie frekvencie z veľkých hĺbok.

Hĺbka prieskumu je približne rovná (v prípade far field)

$$h = 356 * \sqrt{\rho / f}$$

Vidíme, že dosiahnutá hĺbka prieskumu závisí od dvoch parametrov, odporu hornín a použitej frekvencie.

S klesajúcim odporom a stúpajúcou frekvenciou je hĺbka prieskumu plytšia. So stúpajúcim odporom a klesajúcou frekvenciou je hĺbka prieskumu väčšia. Zmenou frekvencie signálu získame krivku vertikálnej sondáže.

Možnosti a obmedzenie metódy

Výhodou metódy je veľký hĺbkový dosah – bežne 1.5 km, v optimálnych prípadoch i 2 km.

Okrem CSAMT je možné merať i klasickú magnetoteluriku s hĺbkovým dosahom v kilometroch.

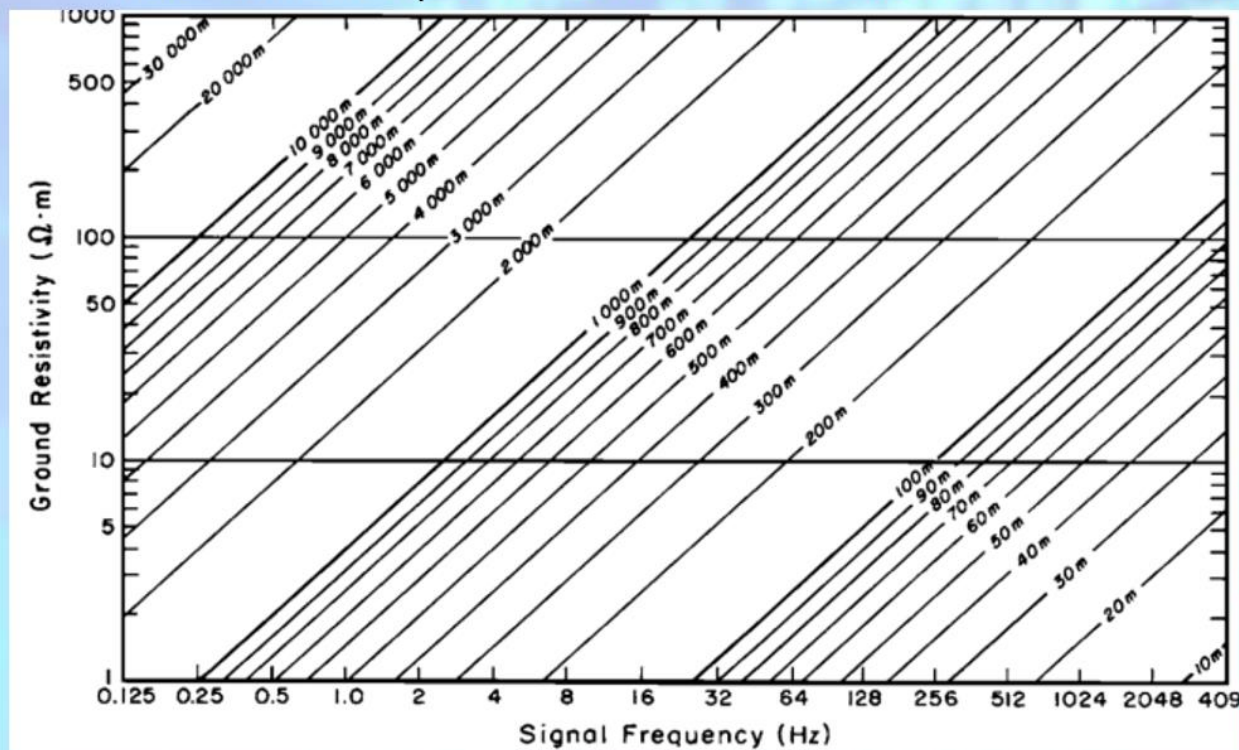
Nevýhodou je zvýšená logistická náročnosť je pri budovaní zdroja.

Z logistického hľadiska metóda vyžaduje pri vysielaní najmenej 5 osôb (3 na stráženie elektród), pri prijímači 3 osoby.

- Pri väčšom objeme prác je s jedným sýtiacim zdrojom možno nezávisle použiť viac prijímačov, čím sa zvýši efektivita prác.
- Pri kroku do 50 m je možno efektivitu zvýšiť i pridaním 2 rozširujúcich boxov, ktoré zabezpečia meranie elektrickej zložky signálu.

Možnosti a obmedzenie metódy

- Obmedzenie je aj v minimálnej hĺbke dosahu metódy. Bežný limit merania je okolo 10 metrov v závislosti na odpore pripovrchových vrstiev.
- Pri plytkých cieľoch sú výhodnejšie iné elektrické a elektromagnetické metódy.
- Obmedzenie je dané i tým, že merania musia byť vykonané vo vzdialenej zóne, ktorú sa nemusí podariť dosiahnuť vzhľadom na urbanistickú situáciu ap.



SKIN DEPTH

Spracovanie nameraných údajov



- Pre konverziu meraných výsledkov do rezov meraný odpor / hĺbka sa používajú 1-D a 2-D modelovacie programy.
- Vyhladený model matematickej inverzie zobrazuje umiestnenie, veľkosť a hĺbku rozdielných odporových zdrojov.
- 2D model na rozdiel od 1D modelu používa pre modelovanie i informácie zo susediacich meraných staníc.

Výsledky môžu byť prezentované ako :

- **blokový model pre každú sondu**
- **vertikálny rez**
- **horizontálny rez pre danú hĺbku**
- **3D model**

Aplikácie metódy

Využívame pri potrebe prieskumu v hĺbkach väčších ako 100m. (do hĺbky 100m sú k dispozícii jednoduchšie a rýchlejšie druhy prieskumu)

Hlavnou výhodou oproti iným elektrickým metódam (VES, TEM) je kvalitnejšia informácia, násobne vyššia produkcia, možnosť dosiahnuť väčšie hĺbky, nepotrebnosť veľkého priestoru. Oproti seizmike ma CSAMT výhodu výrazne nižšej ceny.

Ložiskový geologický prieskum (rudy a nerudy)

-vymapovanie geologických štruktúr, zóny impregnácie, litológia - ohraničenie ložiskového telesa, homogenita horninových celkov

Hydrogeologický a geotermálny prieskum

-litológia – vymedzenie geologických celkov a ich morfológia, mineralizácia a salinita

Inžinierskogeologický prieskum

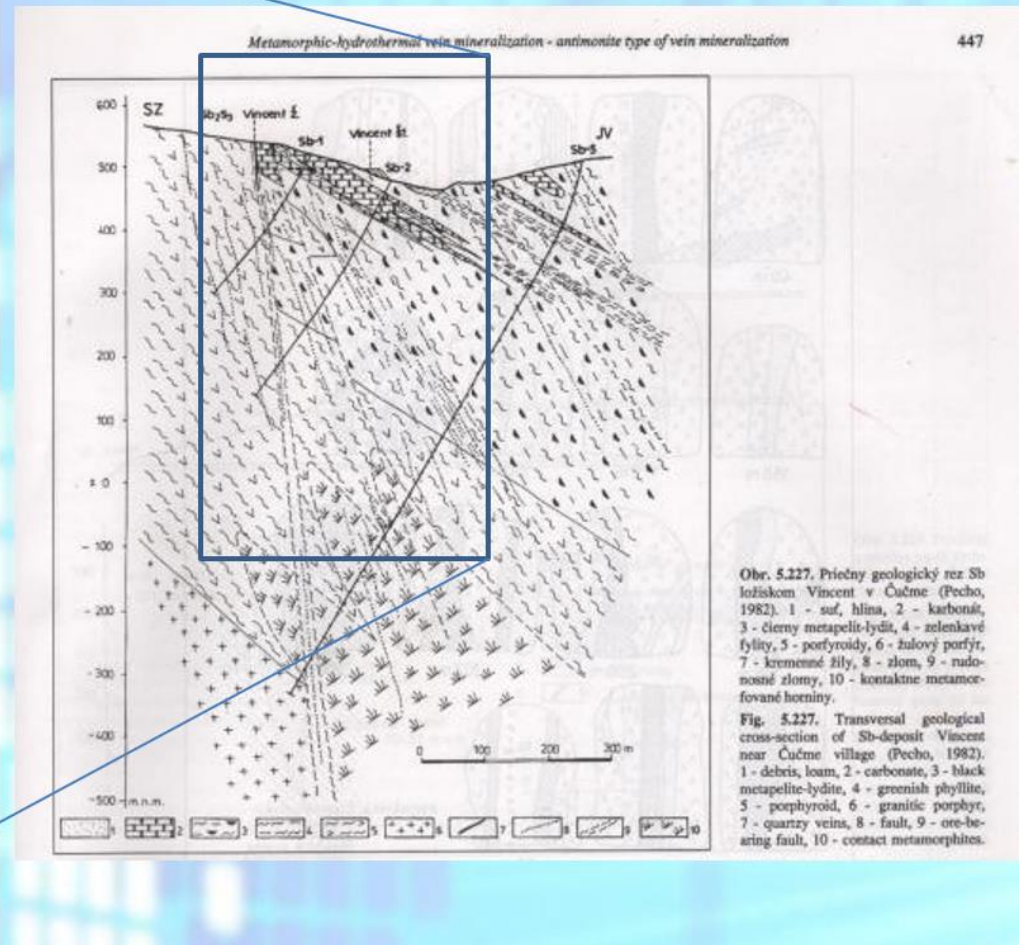
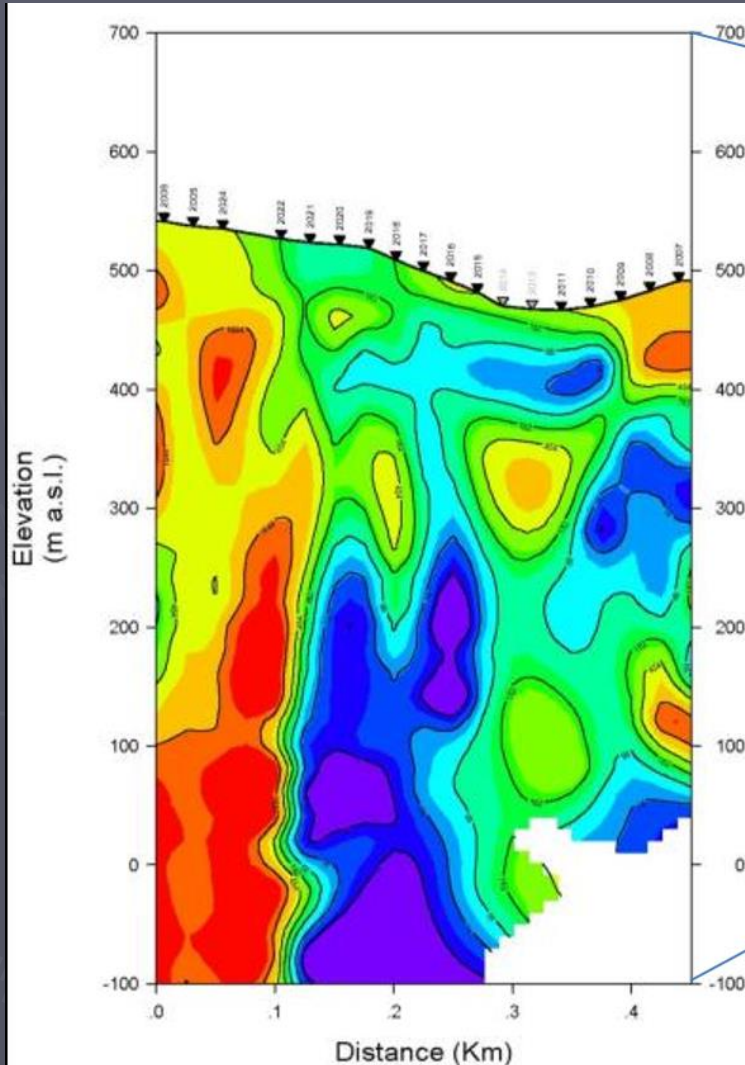
-hĺbkový IG prieskum (tunely)

Prieskum na uhľovodíky a iné druhy prieskumu

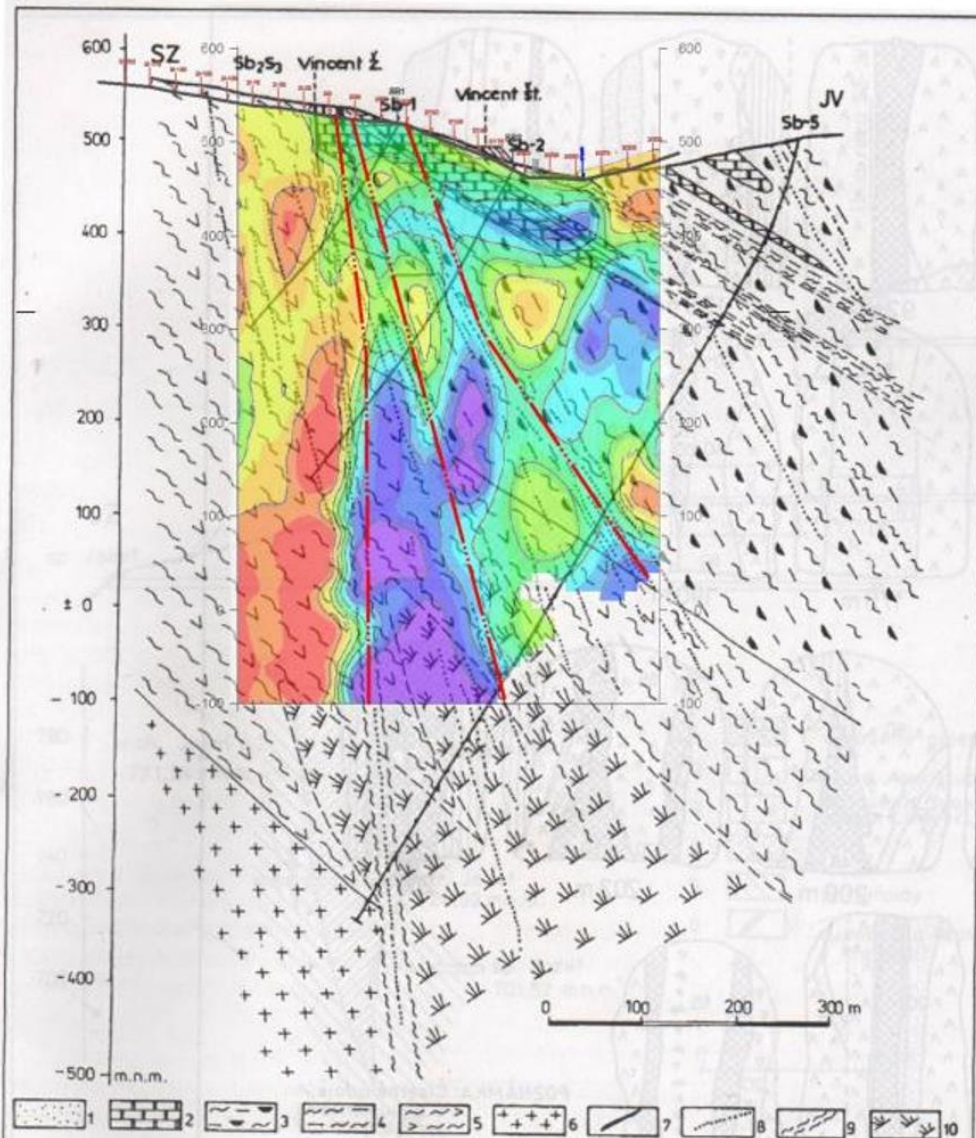
-úložiská rádioaktívneho odpadu, špecifický prieskum vo väčších hĺbkach

Aplikácie metódy

Žilné štruktúry



Aplikácie metódy



Obr. 5.227. Priečný geologický rez Sb ložiskom Vincent v Čučme (Pecho, 1982). 1 - suť, hlina, 2 - karbonát, 3 - čierny metapelit-lydit, 4 - zelenkavé fylity, 5 - porfyroidy, 6 - žulový porfýr, 7 - kremenné žily, 8 - zlom, 9 - rudonosné zlomy, 10 - kontaktne metamorfované horniny.

Fig. 5.227. Transversal geological cross-section of Sb-deposit Vincent near Čučme village (Pecho, 1982). 1 - debris, loam, 2 - carbonate, 3 - black metapelite-lydite, 4 - greenish phyllite, 5 - porphyroid, 6 - granitic porphyr, 7 - quartz veins, 8 - fault, 9 - ore-bearing fault, 10 - contact metamorphites.

Aplikácie metódy

Hydrogeologický a geotermálny prieskum

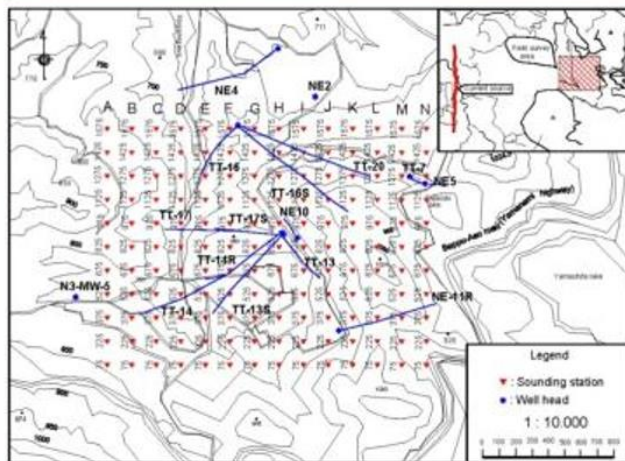


Figure 2: The location map of CSAMT measurements in Takigami area.

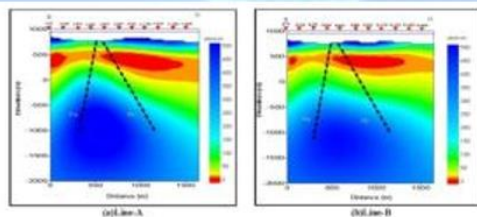


Figure 3: Resistivity profiles (N-S) direction based on 2-D inversion of CSAMT data with electrical discontinuities F_a and F_b .

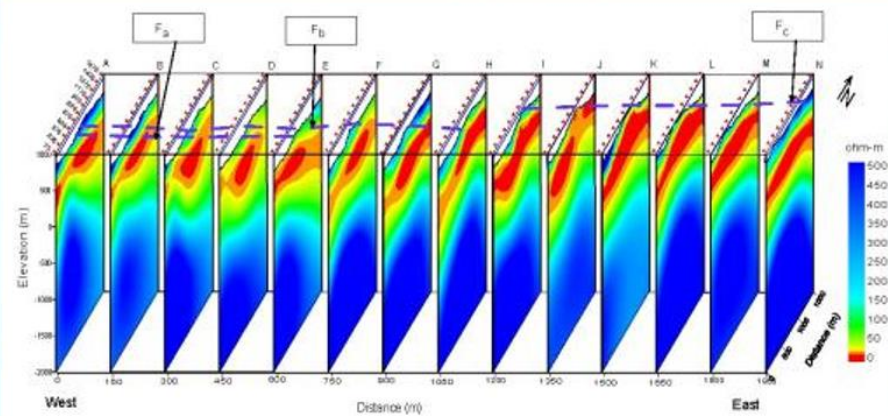
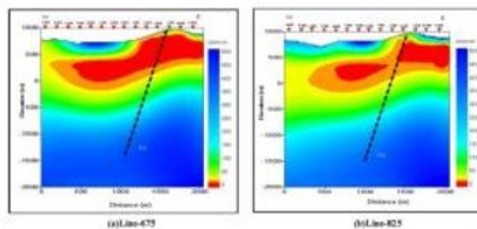


Figure 7: Resistivity sections of 2-D inversion results (W to E direction).

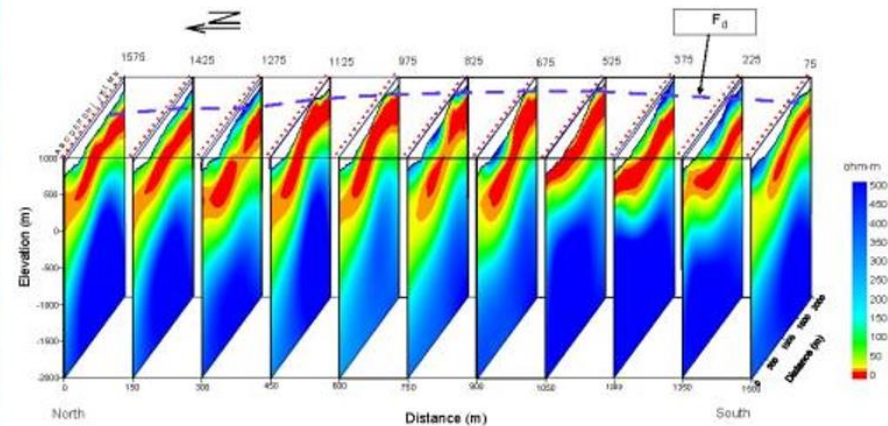
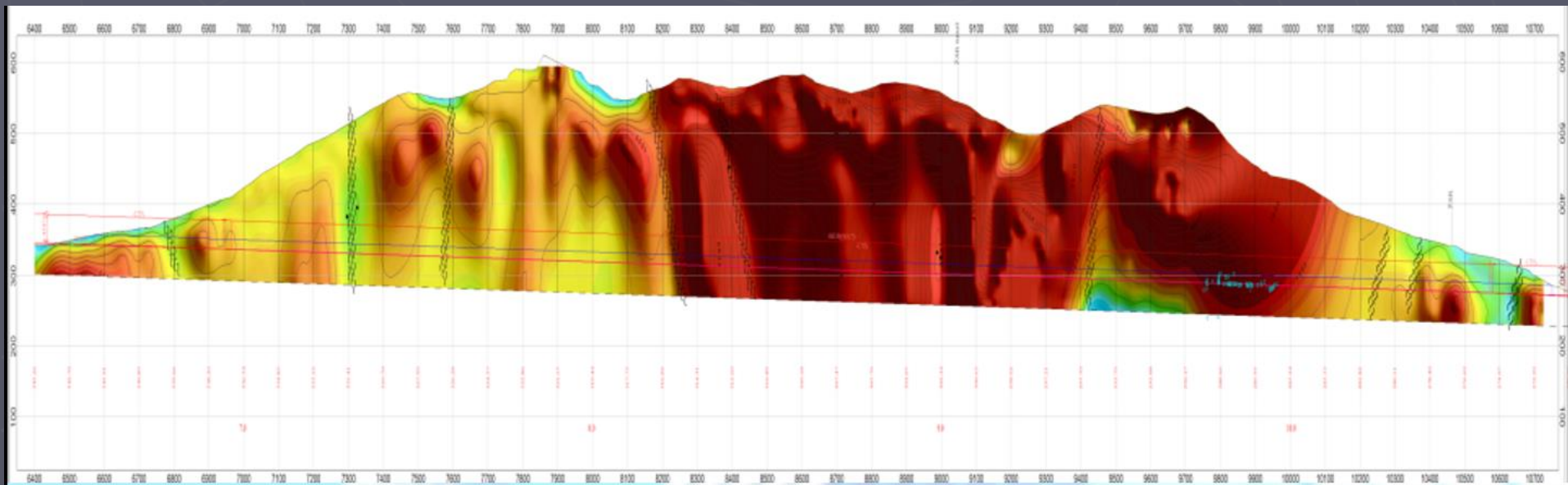


Figure 8: Resistivity sections of 2-D inversion results (N to S direction).

Aplikácie metódy

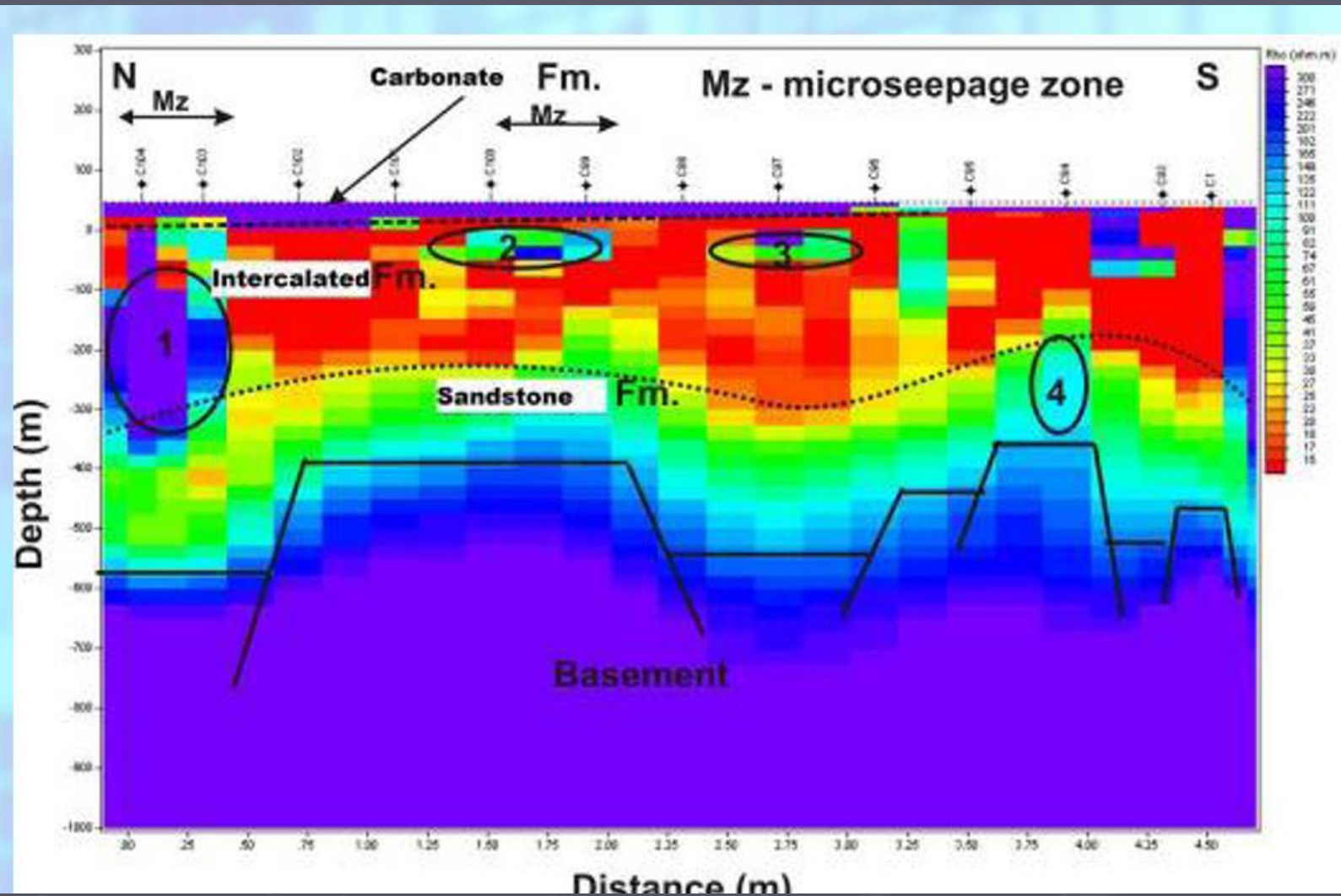
Inžinierskogeologický prieskum



Príklad využitia CSAMT pri prieskume na tunelovú konštrukciu. Kombinácia CSAMT a VES.

Aplikácie metódy

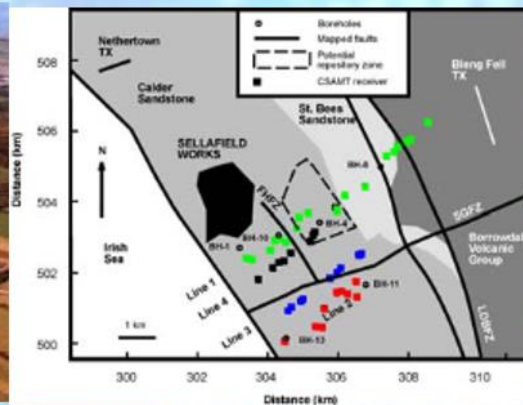
Prieskum na uhľovodíky



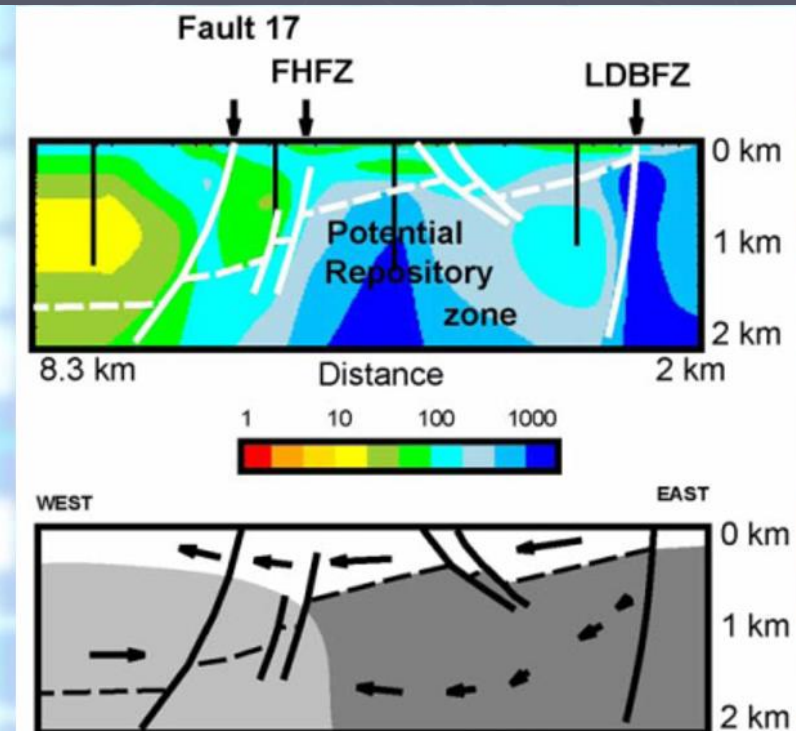
Aplikácie metódy

POTENCIONÁLNE ÚLOŽISKO RÁDIOAKTÍVNEHO ODPADU

CSAMT bol použité pre charakteristiku pomerov potenciálneho úložiska rádioaktívneho odpadu



Pri modelovaní prúdenia podzemnej vody sa ukázalo, že zmeny v prípade dažďov môžu posúvať salinitu až 2 km do oblasti potenciálneho úložiska. Nasledovali ďalšie štúdie – vrty a nakoniec oblasť nebola vybraná ako vhodné úložisko rádioaktívneho odpadu.



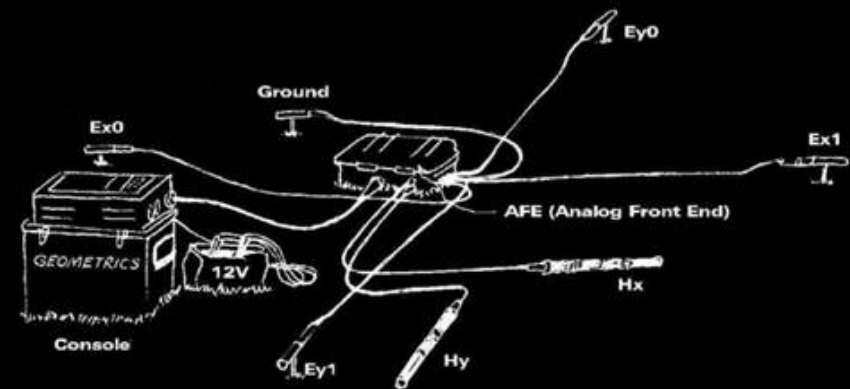
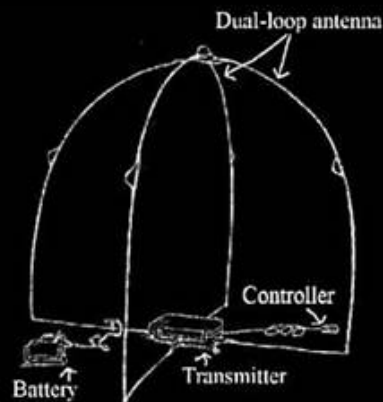
Natural & Controlled Source TensorMT

- ▶ Táto metóda bola rozpracovaná ako doplnok k metóde MT sondovanie
- ▶ Na získanie informácií aj o hĺbkach menších ako 500 m, kombinuje sa meranie MT poľa s meraním poľa umelého zdroja EM poľa
- ▶ Umelé pole je generované zdrojom s elektrickými (elektrický dipól), alebo magnetickými anténami (rámové cievky)

Natural & Controlled Source TensorMT

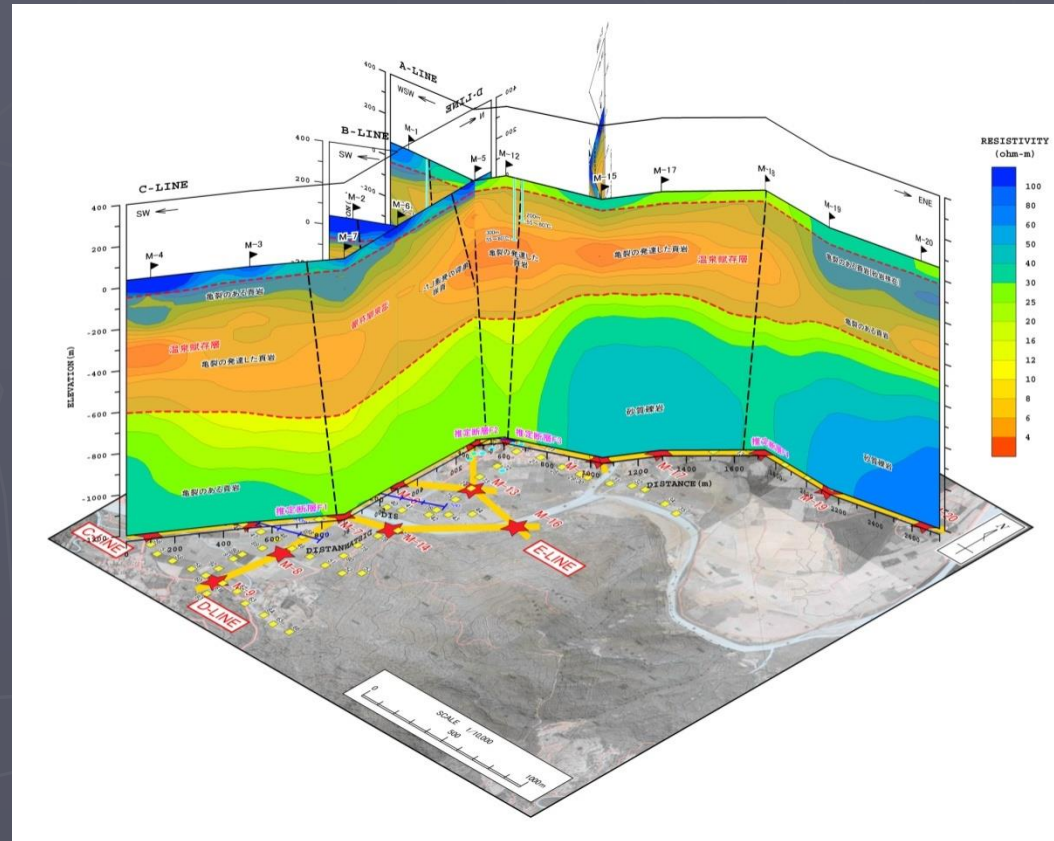
Stratagem

- 4-component (2D Audio Magnetotellurics): Ex, Ey, Hx, Hy
- manufacturer: Geometrics, Inc.
- source: natural and controlled source
- transmitter: 2 orthogonal vertical loop antennas:
 - ◆ frequency range: 1 kHz ◆ 70 kHz
 - ◆ momentum: $400 \text{ A} \cdot \text{m}^2$
 - ◆ surface: 4 m^2 each
- magnetic sensors:
 - ◆ frequency ranges: 10 Hz ◆ 100 kHz ◆ and ◆ 0.1 Hz ◆ 1 kHz
- investigation depth: 10 ◆ 1000 meters, depending on the substratum resistivity



(above images from Geometrics, Inc.)

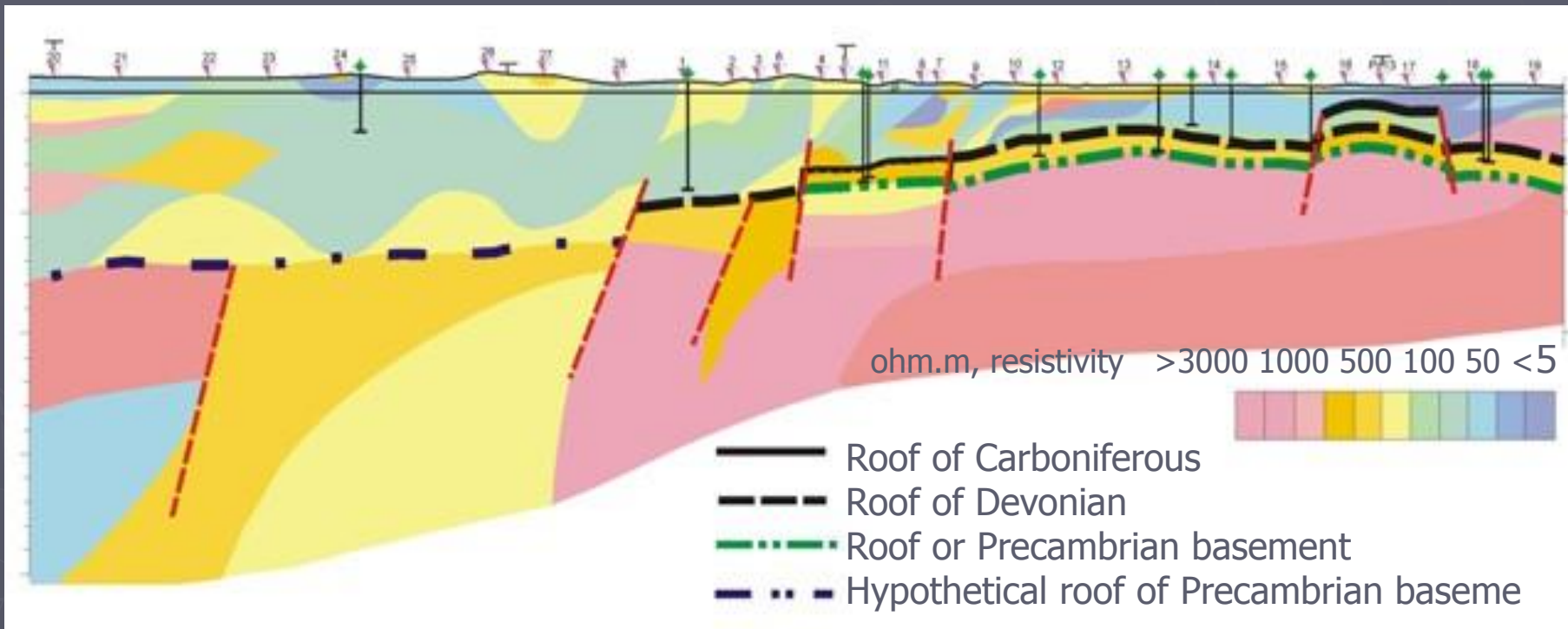
StraraGEM



AFMAG

- ▶ **AFMAG** -Audio-Frequency Magnetics
- ▶ mapovanie indukovaných EM polí vyvolaných v horninovom prostredí EM vlnením vyvolaným bleskami
- ▶ EM pole bleskov je charakterizované spektrom frekvencií, ktoré konvenčne začína pri 1 Hz a z praktického hľadiska zasahuje zhruba do oblasti 1 kHz

AFMAG



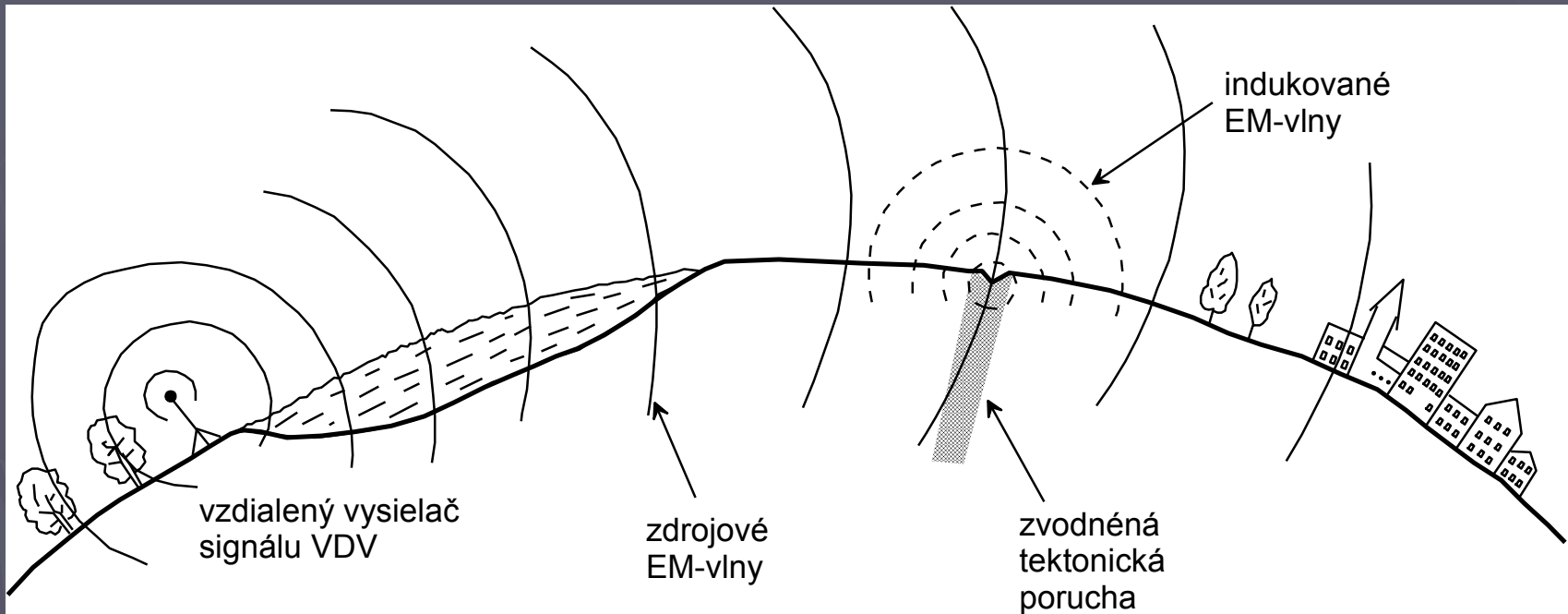
Variable resistivity distribution reflects complex geological structure of the Carpathians area

VDV (metóda Veľmi Dlhých Vln)

- je metóda profilová a používa sa na mapovanie vybraných parametrov EM poľa komunikačných vysielateľov na ploche vybranej na prieskum



VDV



vysielač generuje EM vlnu, ktorá sa šíri vlnovodom vymedzeným dolným okrajom ionosféry a horným okrajom zeme. Vlna sa šíri v podobe priamej vlny a v podobe odrazov od ionosféry. Prítomnosť tejto zdrojovej vlny spôsobuje v geologických vodičoch vznik indukovaného EM poľa. Cieľom metódy je zmapovať tieto indukované polia

VDV

Postup pri meraní

- VDV je profilová metóda
- výsledkom merania je priebeh meraných parametrov na profile
- z výsledkov merania na sústave profilov je možné zostaviť plošné mapy zvoleného parametra.

VDV je optimálne využiť na:

- vyhľadávanie strmo upadajúcich doskovitých vodivých geologických objektov (žilné ložiskové telesá, strmé litologické kontakty horní, strmé tektonické poruchy a poruchové pásme)
- pri vhodných litologických podmienkach (dostatočne odporovo kontrastné litologické útvary) je možné metódu využiť aj na mapovanie horizontálnej premenlivosti rezistivity vo vyšetrovanej oblasti.

VDV



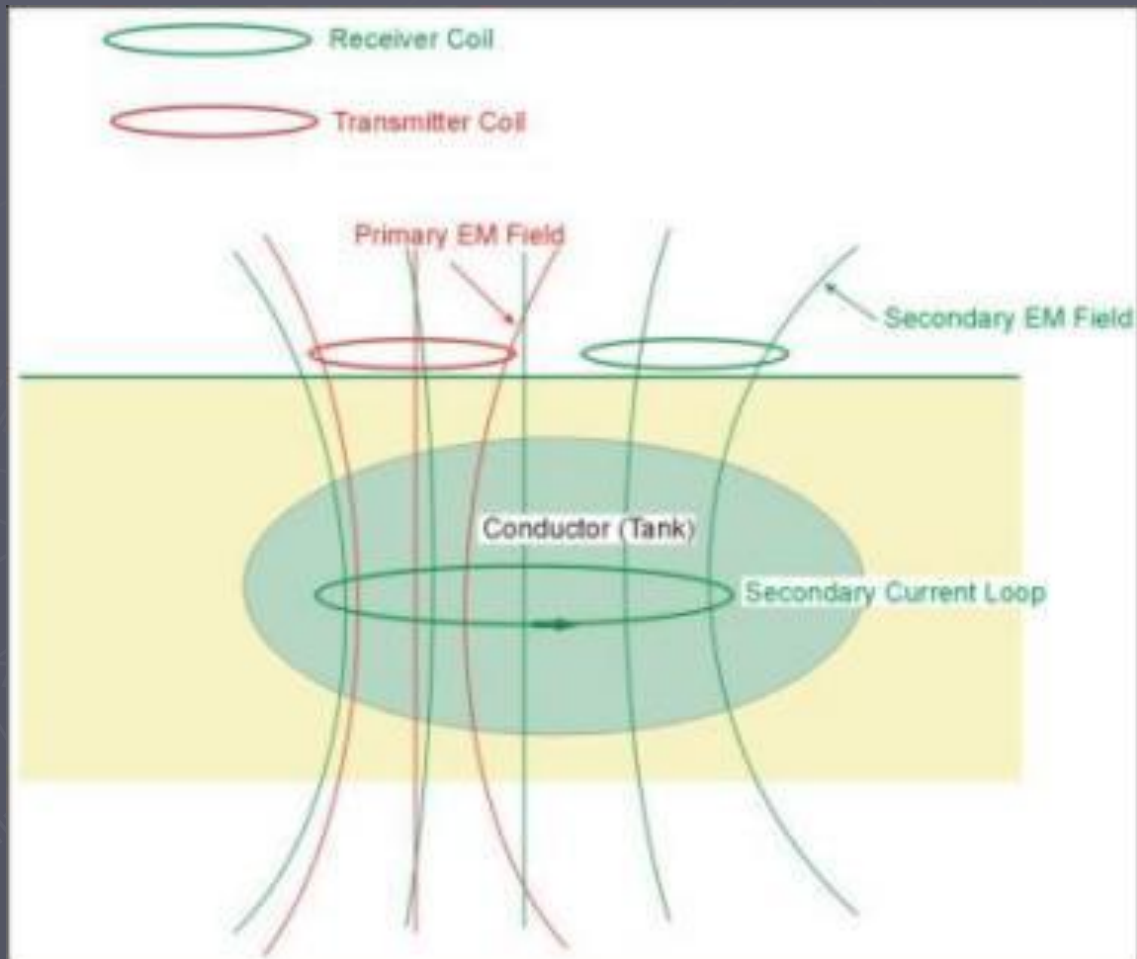
VDV



DEMP

Meranie metódou DEMP sa realizuje buď na izolovaných profiloch, alebo v sieti profilov, ktorá pokrýva vyšetřovanú plochu. Krok merania na profiloch závisí na veľkosti hľadaných objektov a pohybuje sa pri aparátúre EM-31 od 5 do 10 m (pri aparátúre EM-38, kde je hĺbkový dosah cca 1,5 m je krok merania od 0,5 do 2 m). Pri plošnom meraní je vhodné používať štvorcovú alebo štvorcovej blízku obdĺžnikovú sieť merania

DEMP



DEMP

Ground Conductivity Meter



EM31

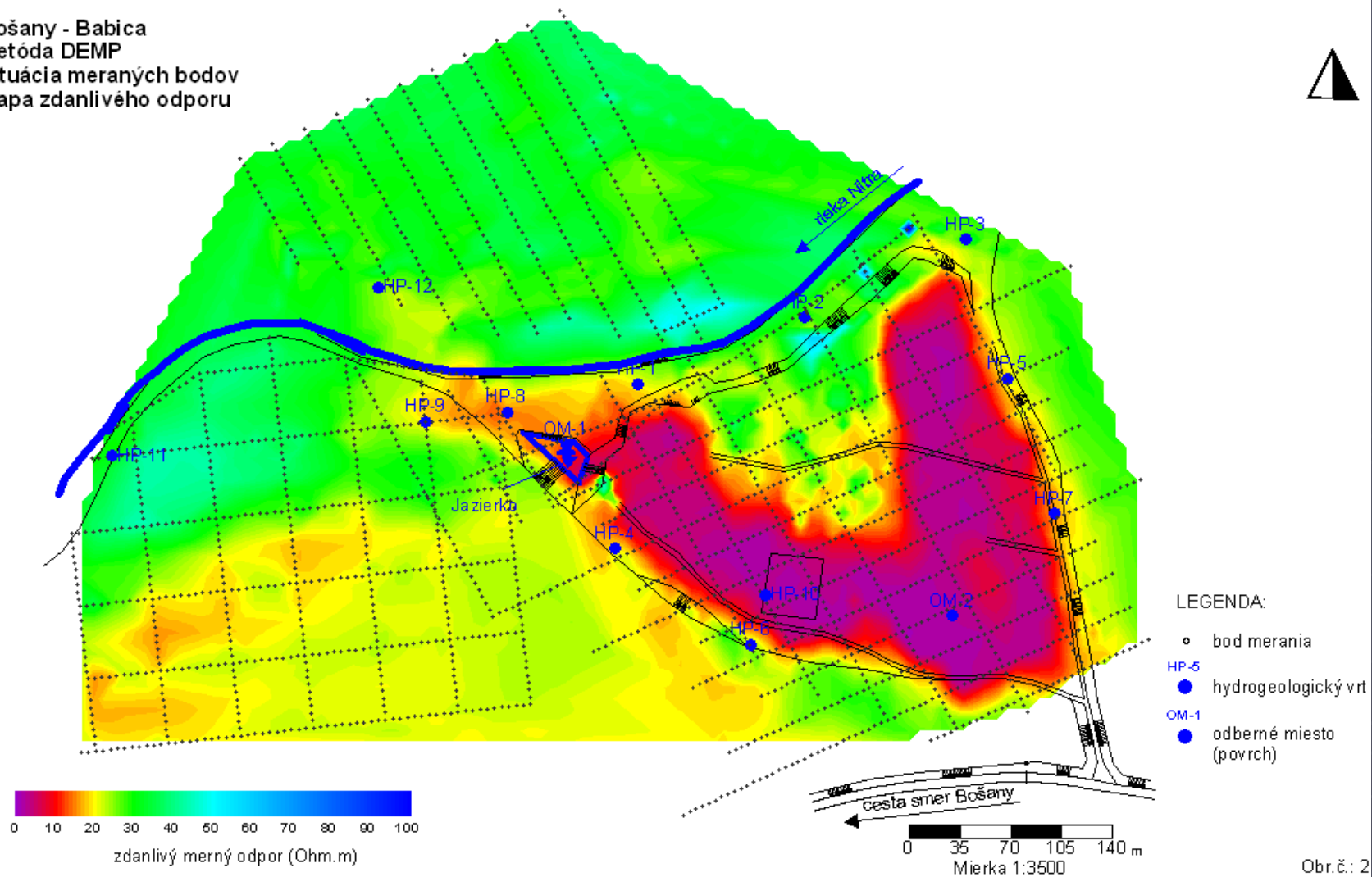
Terrain Conductivity Surveys

EM38



DEMP

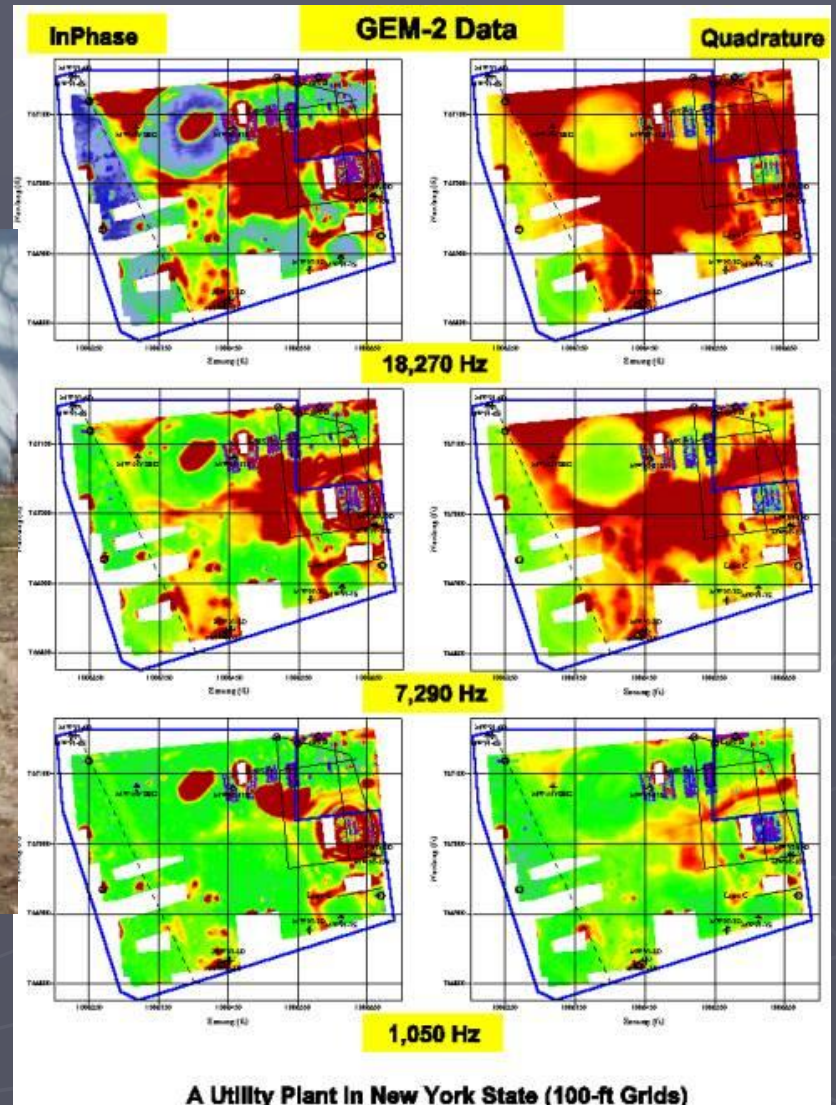
Bošany - Babica
Metóda DEMP
Situácia meraných bodov
Mapa zdanlivého odporu



GEM 2 Multi-Frekvenčný EM Senzor

- ▶ Využitelná frekvencia 300 Hz to 96 kHz
- ▶ Multifrekvenčné vlastnosti sú dôležité, pretože:
 - Plytké ciele sú mapovateľné z vyššími frekvenciami
 - Pre získanie informácií z hlbších vrstiev sú vhodné nízke frekvencie

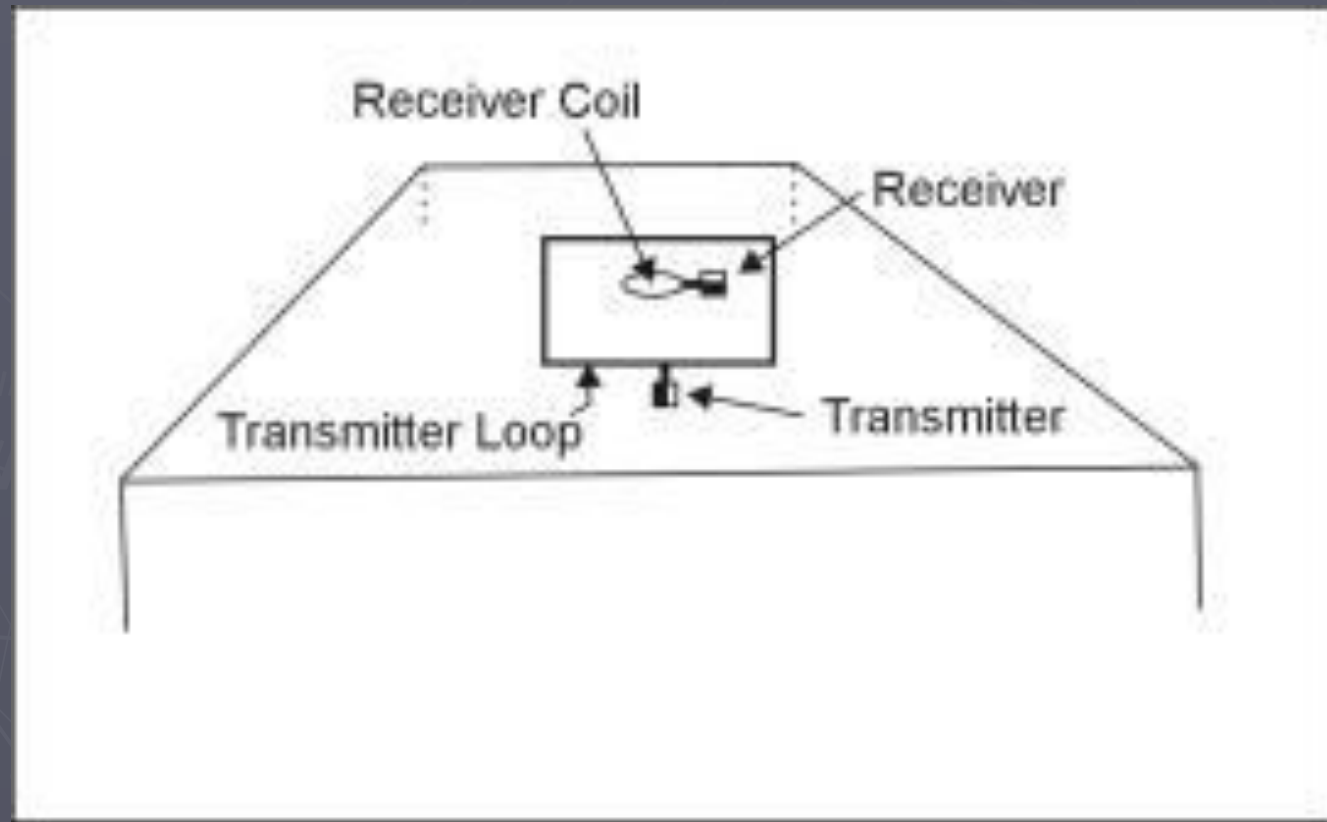
GEM2



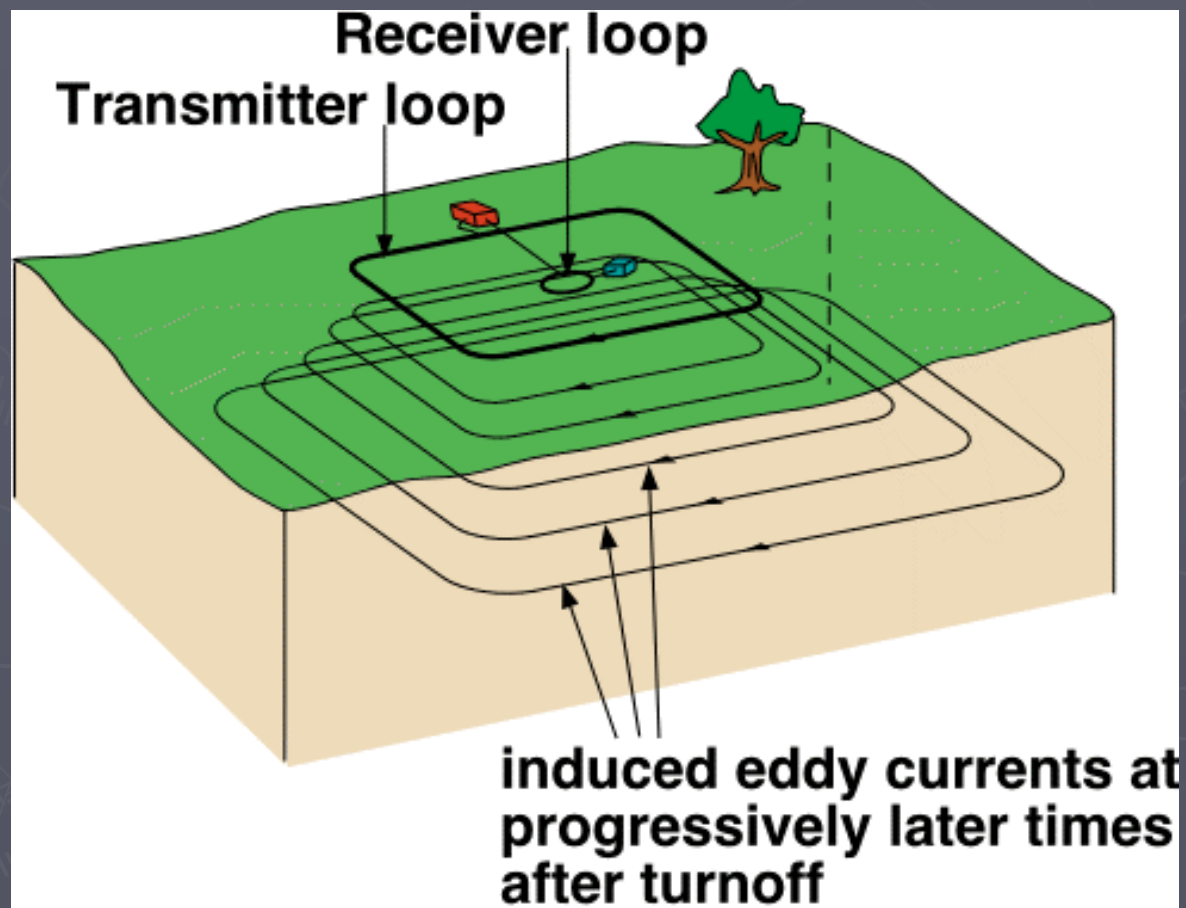
TEM (PJ)

Metóda prechodných javov (v anglickej literatúre sa označuje ako TEM (transient electromagnetic), prípadne ako TDEM (time domain electromagnetic)) využíva vznik indukovaných EM polí v geologickom prostredí, pričom ako zdrojové pole pre vznik týchto indukovaných polí využíva tzv. prechodný jav v elektrickom obvode, ktorý v ňom vzniká pri zapnutí a vypnutí elektrického prúdu

TEM

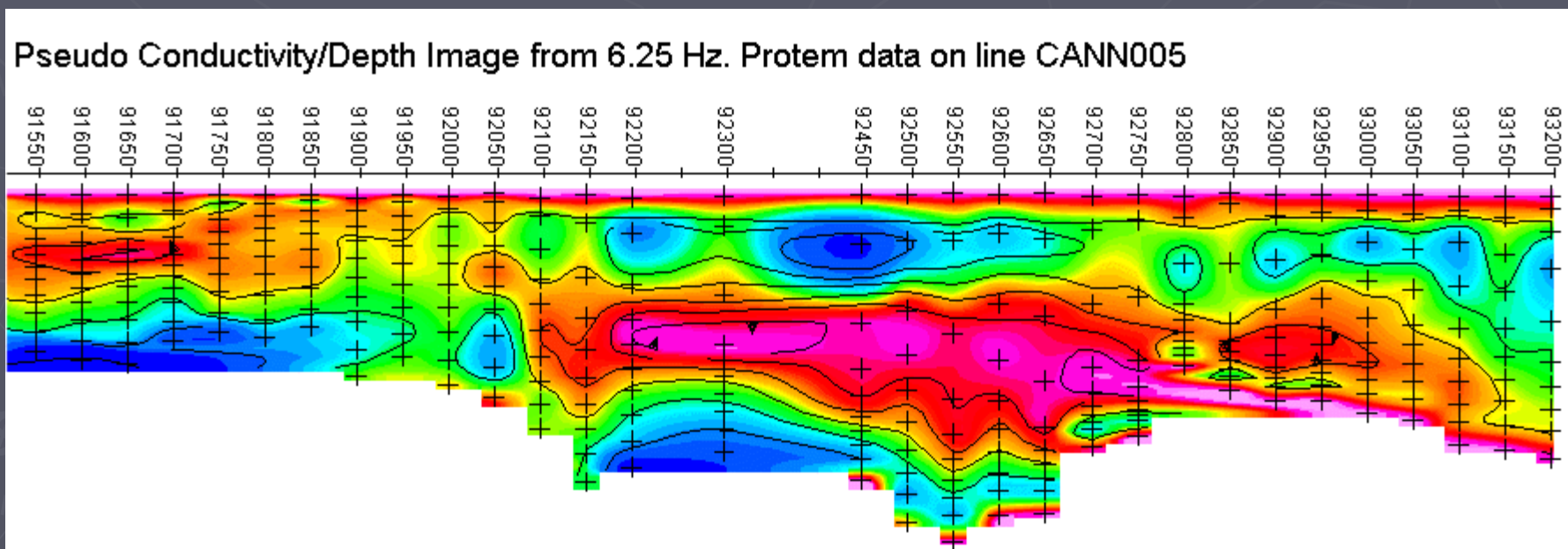


TEM



TEM

Pri sondovaní sa z údajov v jednotlivých kanáloch zostavujú sondážne krivky a tieto sa interpretujú podobne ako pri VES: buď sa z nich konštruujú izoohmické rezy, alebo sa kvantitatívne interpretujú a určujú sa z nich vrstevné parametre.



georadar - GPR

- Georadarová metóda, alebo georadar (GPR - angl. Ground penetrating radar) je založená na vysielaní EM vlny v tvare pulzov o vysokej vlastnej frekvencii. (50 - 1000 MHz) do horninového prostredia a registrácii času príjmu EM vlny odrazenej od podpovrchových reflexných rozhraní. Tieto rozhrania sú prejavom zmien EM vlastností, hlavne elektrickej vodivosti a permitivity.

GPR Obmedzenia

- ▶ hĺbkový dosah je veľmi závislý od lokálnych podmienok a limitovaný elektrickou vodivosťou pórových fluid a ílových minerálov ako aj použitou frekvenciou EM vlny
- ▶ hĺbkový dosah je bežne do 10 m, pri externých pôdnych podmienkach môže byť efektívny dosah do 1m
- ▶ prístrojové a technické vybavenie je náročné a vyžaduje skúseného operátora
- ▶ za určitých podmienok môže byť interpretácia surových dát veľmi ťažká pri interpretácii treba venovať značnú pozornosť na vyhnutie sa chybám
- ▶ hĺbková kalibrácia vyžaduje pozornú prácu na danej lokalite a ak sa podmienky na lokalite menia, môže to ovplyvniť hĺbkovú kalibráciu; hĺbková mierka býva často nelineárna
- ▶ údaje môžu byť ovplyvnené rôznymi zdrojmi šumu

Georadar

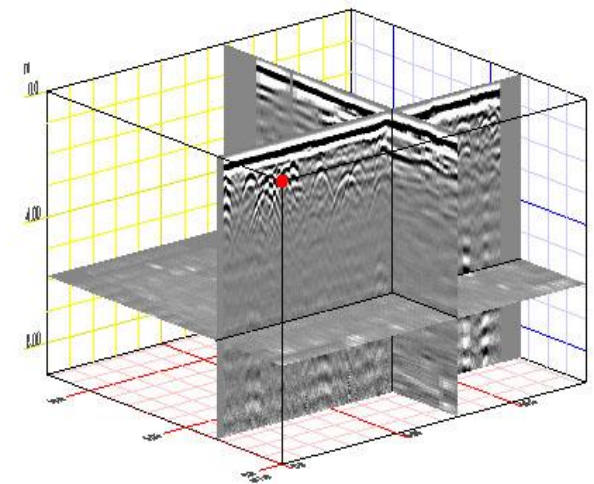
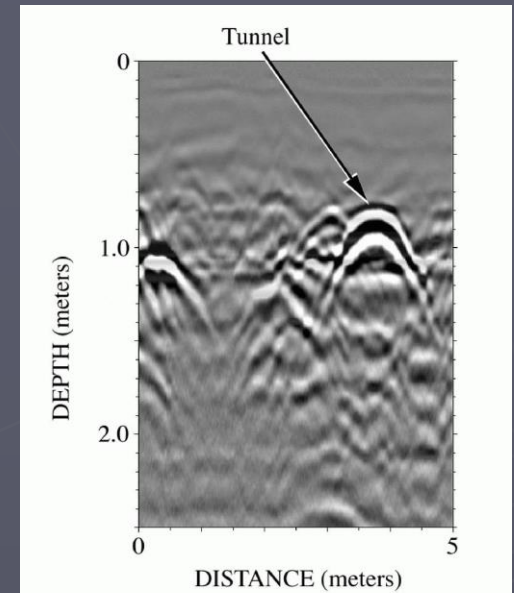
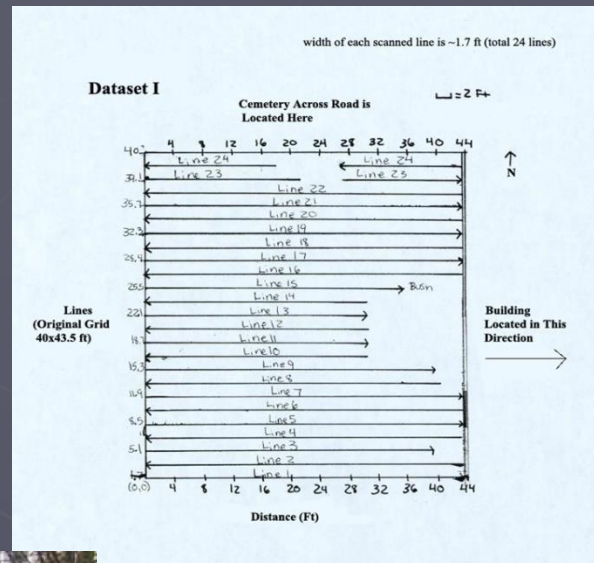
Center Frequency / Depth of Penetration/ Typical Applications

- ▶ 2600 MHz to 0.4 m (12 in) Concrete Evaluation
- ▶ 1600 MHz to 0.5 m (18 in) Concrete Evaluation
- ▶ 1000 MHz to 0.6 m (24 in) Concrete Evaluation
- ▶ 900 MHz 0-1 m (0-3 ft) Concrete Evaluation, Void Detection
- ▶ 400 MHz 0-4 m (0-12 ft) Utility, Engineering, Environmental, Void Detection
- ▶ 270 MHz 0-6 m (0-18 ft) Utility, Engineering, Geotechnical
- ▶ 200 MHz 0-9 m (0-30 ft) Geotechnical, Engineering, Environmental
- ▶ 100 MHz 2-15 m (5-50 ft) Geotechnical, Engineering, Mining 16-80 MHz 0-50 m (0-150 ft) Geotechnical
- ▶ Air-Launched Horn 2.0 GHz 0-.75 m (0-2.5 ft) Pavement Thickness and Road Condition Assessment 1.0 GHz 0-.9 m (0-3 ft) Highway and Bridge Deck Evaluations

Georadar



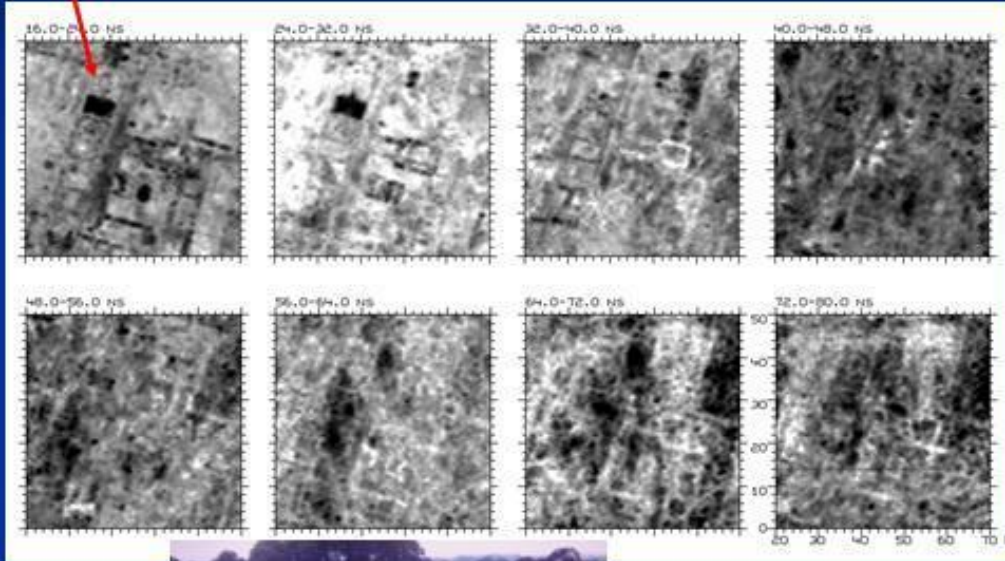
Georadar



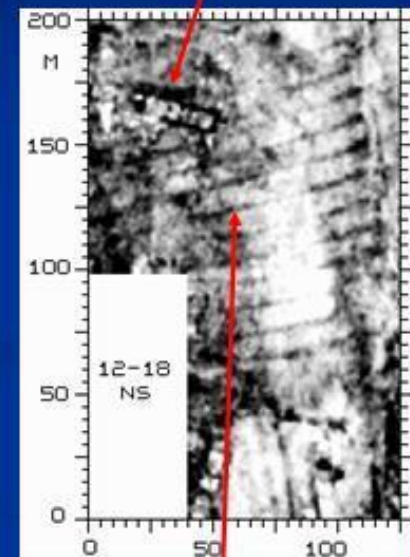
Georadar

Wroxeter Roman Town Shrewsbury, England

mosaic



robbed wall
trenches

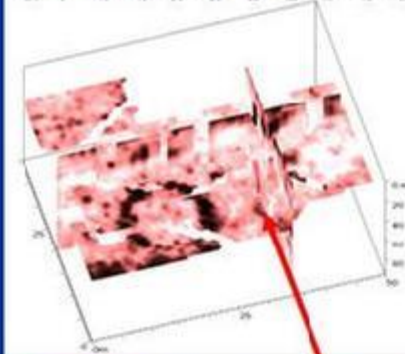
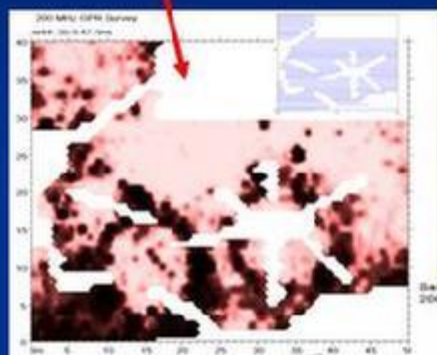


medieval plow
trenches

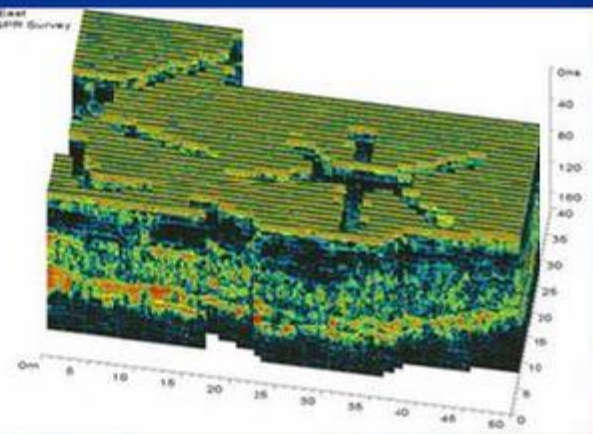
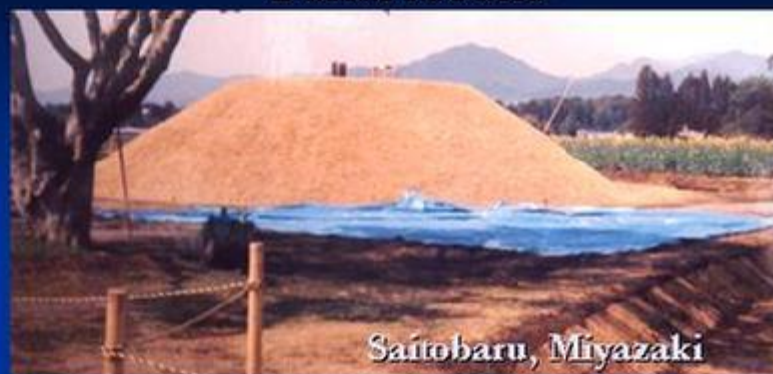


Reconstructed Kofun Burial Mound

Overlay of strongest reflectors

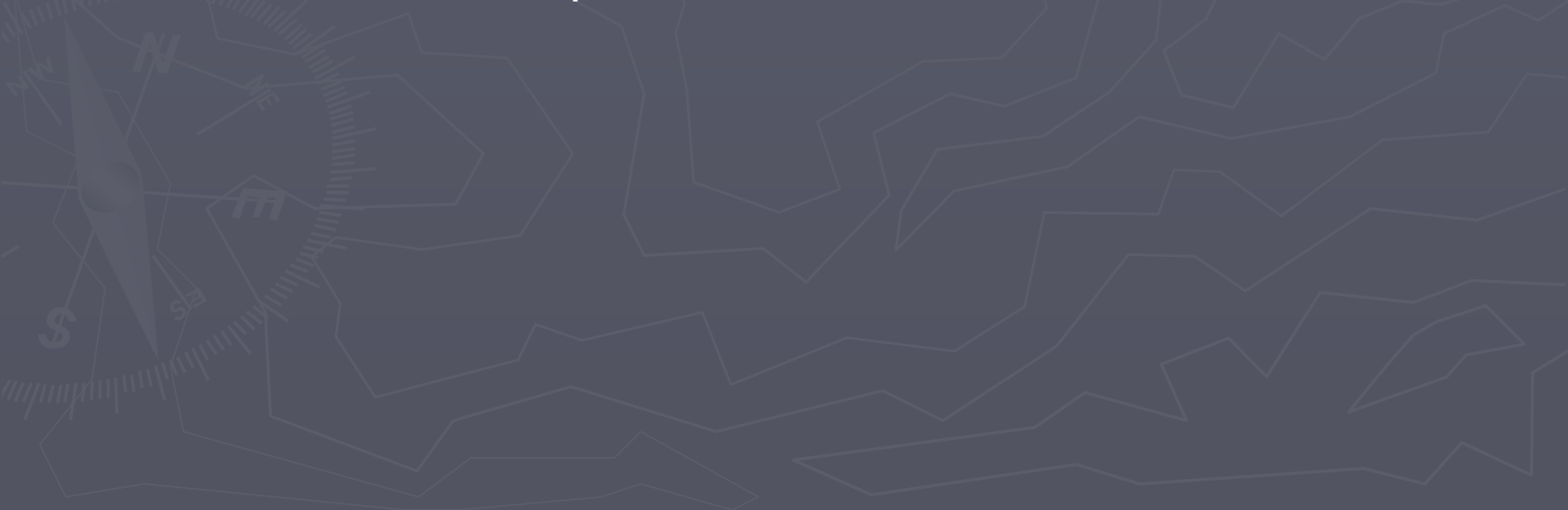


Individual (narrow) time slice



Letecké merania

Použitie lietadla pri geoelektrickom meraní je nákladná záležitosť a preto je snaha o maximálne využitie merania. Robí sa teda na sieti profilov, ktorou sa pokrýva plocha niekoľko desiatok km². Vzdialenosť profilov je 100 až 500 m, dĺžka profilov niekoľko km. Na lokalizáciu trasy letu sa robí vertikálnou kamerou a pomocou GPS.



Letecké merania



Letecké merania

