

# **Inženýrská geofyzika II**

(geoelektrické metody, radiometrické metody,  
měření ve vrtech)

544-0095 Fyzikální geodézie a geofyzika

HGF VŠB-TUO

2013, prof. RNDr. Zdeněk Kaláb, CSc.

# Geoelektrické metody

- Geoelektrické metody jsou jedním z nejmladších geofyzikálních disciplín. i když první kroky k jejich aplikaci v geologii byly učiněny již před více než 100 lety (vyhledávání sulfidických ložisek metodou spontánní polarizace), rozvoj od počátku 20. století

## Elektrické vlastnosti hornin

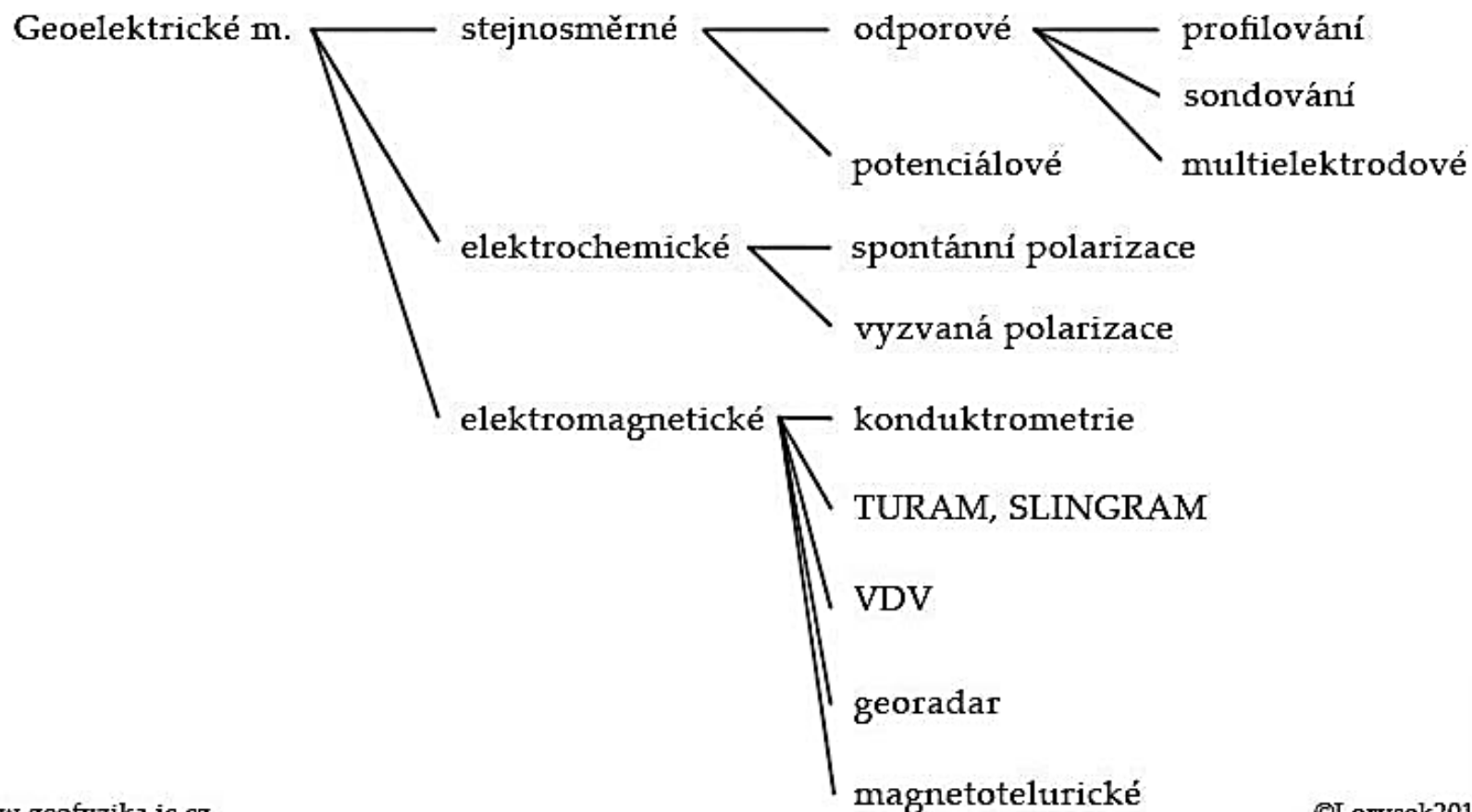
- Velký počet a pestrost geoelektrických metod jsou mimo jiné podmíněny různorodostí elektrických parametrů hornin.
- Základním parametrem je měrný odpor (rezistivita)  $\rho$  určující možnosti většiny geoelektrických metod, zejména odporových a nízkofrekvenčních elektromagnetických. Měrný odpor libovolné látky určíme jako odpor krychle o hraně 1 m, kladený elektrickému proudu ve směru kolmém na stěnu krychle. Měrné odpory jednotlivých typů hornin se mění v širokých intervalech, na což je nevyhnutelné přihlídnout při interpretaci výsledků geoelektrických měření
- Elektrická permitivita  $\epsilon$  se uplatňuje pouze při měření vysokofrekvenčními elektromagnetickými metodami.
- Polarizovatelnost  $\alpha$  vyjadřuje schopnost hornin hromadit náboje na rozhraní kapalné a pevné fáze.

# Geoelektrické metody

- Charakteristika geoelektrických metod:
- Geoelektrické metody využívají ke zkoumání horninového prostředí elektromagnetická pole umělého i přirozeného původu. Průběh a charakter těchto vlastností závisí na elektromagnetických (EM) vlastnostech prostředí – vodivosti (odporu), permitivitě, magnetické permeabilitě a elektrochemické aktivitě
- Pro geoelektriku je charakteristický velký počet dílčích metod, z nichž mnohé mají řadu modifikací. Tato skutečnost se projevuje příznivě v širokém okruhu geologických problémů, k jejichž řešení může geoelektrika přispět
- Ke klasifikaci geoelektrických metod lze přistoupit z řady hledisek:
  - Studované pole může být stejnosměrné či střídavé (se širokým rozmezím frekvencí), harmonické či neharmonické, přirozené či umělé, lze měřit na zemském povrchu, z letadla, ve vrtu i v báňském díle

# Geoelektrické metody

Zjednodušené schéma rozdělení geoelektrických metod dle fyzikálních principů



# Geoelektrické metody

## Odporové metody stejnosměrné

- Jako stejnosměrné označujeme ty geoelektrické metody, které zkoumají rozložení elektrického potenciálu nebo gradientu potenciálu stejnosměrného proudu. Stejnosměrné odporové metody patří mezi nejspolehlivější průzkumné metody mělké geologické stavby a jsou také zpravidla základní skupinou geofyzikálních metod, aplikovaných při inženýrsko-geologických průzkumech. Využívají diferencí v charakteristických hodnotách měrného odporu různých typů hornin.
- Princip stejnosměrných metod
- Ve všech stejnosměrných metodách je měřen potenciál nebo přesněji potenciální rozdíl čili napětí  $V$  mezi dvěma body. Zavedením umělého elektrického pole proudovými elektrodami A a B vznikne napětí  $V$  mezi měřicími elektrodami M a N. Ze vzdálenosti elektrod, měřeného proudu  $I$  a napětí  $\Delta U$  určíme pak měrný odpor homogenního prostředí. Nad nehomogenním prostředím naměříme také napětí  $\Delta U$  při proudu  $I$  a formálně můžeme také určit jakýsi střední měrný odpor, odpovídající homogennímu materiálu prostředí, nad nímž bychom změřili stejným uspořádáním stejné napětí. Tomuto odporu říkáme zdánlivý měrný odpor  $\rho_z$  a platí pro něj tedy:

$$\rho_z = k \cdot \Delta U / I, \text{ kde } k \text{ je tzv. konstanta uspořádání elektrod, závislá na jednotlivých vzdálenostech mezi nimi: } k = (2\pi / (1/AM - 1/BM - 1/AN + 1/BN)).$$

# Geoelektrické metody

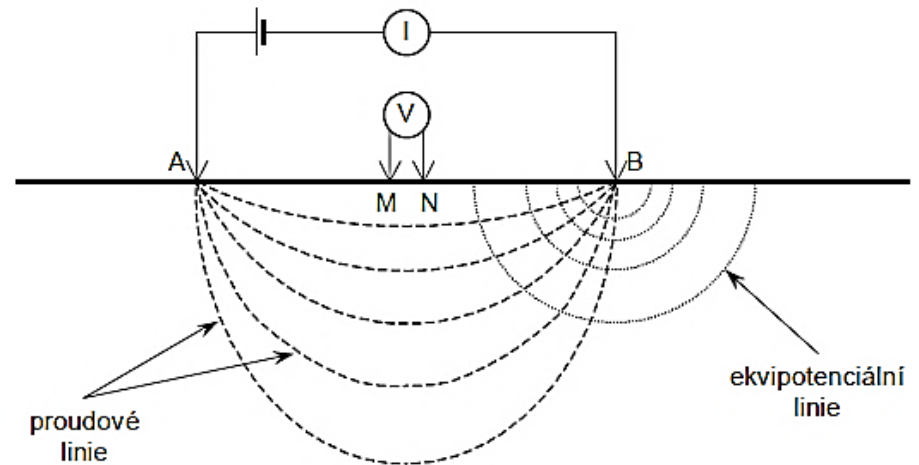
## Rozdělení stejnosměrných metod

- Nejrozšířenější stejnosměrnou metodou je metoda odporová. Pokud se nemění rozestupy elektrod a s uspořádáním se pohybuje po profilu, hovoříme o odporovém profilování. Zůstává-li střed uspořádání elektrod na místě a mění se rozstup elektrod, hovoříme o vertikálním elektrickém sondování. Slouží zejména ke studiu horizontálně zvrstveného prostředí, jaké můžeme předpokládat např. v sedimentárních pánvích.
- Odporová profilování lze podle poměru vzdálenosti potenčních elektrod ku vzdálenosti proudových elektrod (MN/AB) rozdělit na profilování potenciálová ( $\sim 0,3$ ) a gradientová ( $\ll 0,2$ ), přičemž rozlišení nehomogenit v rozsahu jednoho uzemnění je nepřímo úměrné tomuto poměru.
- Odporová uspořádání můžeme dělit podle mnoha hledisek. Globálně definujeme tři skupiny:
  - potenciálová uspořádání, kdy je vzdálenost mezi měřicími elektrodami dostatečně velká ve srovnání s délkou uspořádání  $L$ . Nejpoužívanější potenciálové uspořádání je Wennerovo. Vzdálenost všech sousedních elektrod je stejná a uspořádání je systematické ( $AM = MN = NB = L$ ).
  - gradientová uspořádání, u nichž je vzdálenost mezi měřicími elektrodami podstatně menší než délka uspořádání. Tzv. Schlumbergerovo uspořádání se od Wennerova liší malou vzdáleností měřicích elektrod  $M$  a  $N$ , takže se jedná o uspořádání gradientové.
  - dipólová uspořádání, kdy proudové i měřicí elektrody vytvářejí dipóly.
  - (Multielektrodivé systémy)

# Geoelektrické metody

| Profilování                   | Schéma uspořádání |
|-------------------------------|-------------------|
| Wennerovo                     |                   |
| Schlumbergerovo               |                   |
| Středový gradient             |                   |
| Kombinované                   |                   |
| Dipólové osové                |                   |
| Leeovo                        |                   |
| Kombinovaný středový gradient |                   |

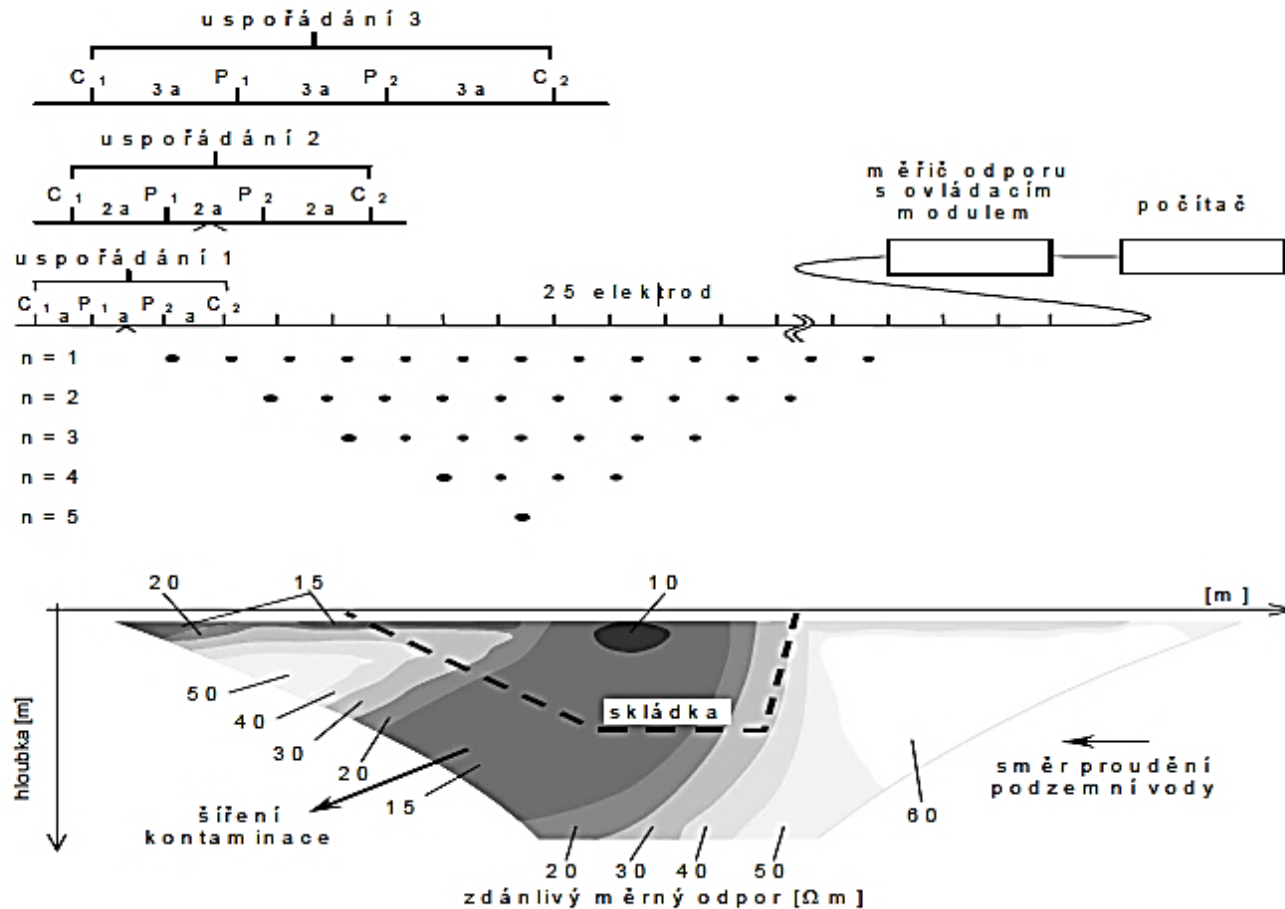
$$\rho = \left( \frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right) \frac{\Delta U}{I} = k \frac{\Delta U}{I}$$



Pole gradientového čtyřelektrodového odporového uspořádání

Nejčastěji používaná uspořádání při stejnosměrném odporovém profilování

# Geoelektrické metody



Obr. 12: Systém měření MRT a příklad detekce šíření kontaminantu do podloží skládky (podle propagačních materiálů CAMPUS Geophysical Instruments).



# Geoelektrické metody

## Metody elektromagnetické (střídavé)

- Ve srovnání se stejnosměrnými a elektrochemickými metodami mají složitější teoretické základy. Zkoumáme jimi proměnná elektromagnetická pole přirozená i umělá, harmonická i neharmonická, o nízké i vysoké frekvenci. Jejich podstatná výhoda spočívá v tom, že většinou nevyžadují galvanické spojení se zemí, a proto jimi může být měřeno z pohyblivého stanoviště.
- Elektromagnetické metody se ve velkém rozsahu uplatňují při komplexních průzkumech i při archeologických výzkumech. Nízkofrekvenční elektromagnetické metody využívají ke zkoumání horninového prostředí jevu elektromagnetické indukce. Hloubkový dosah těchto metod je výrazně ovlivňován vodivostí hornin (nepřímá úměra) a horizontální vzdáleností budící a měřící cívky nebo rozměry budící smyčky (přímá úměra). Hloubka průniku metod je od 1m do 30m, s možností až do 60m.

# Geoelektrické metody

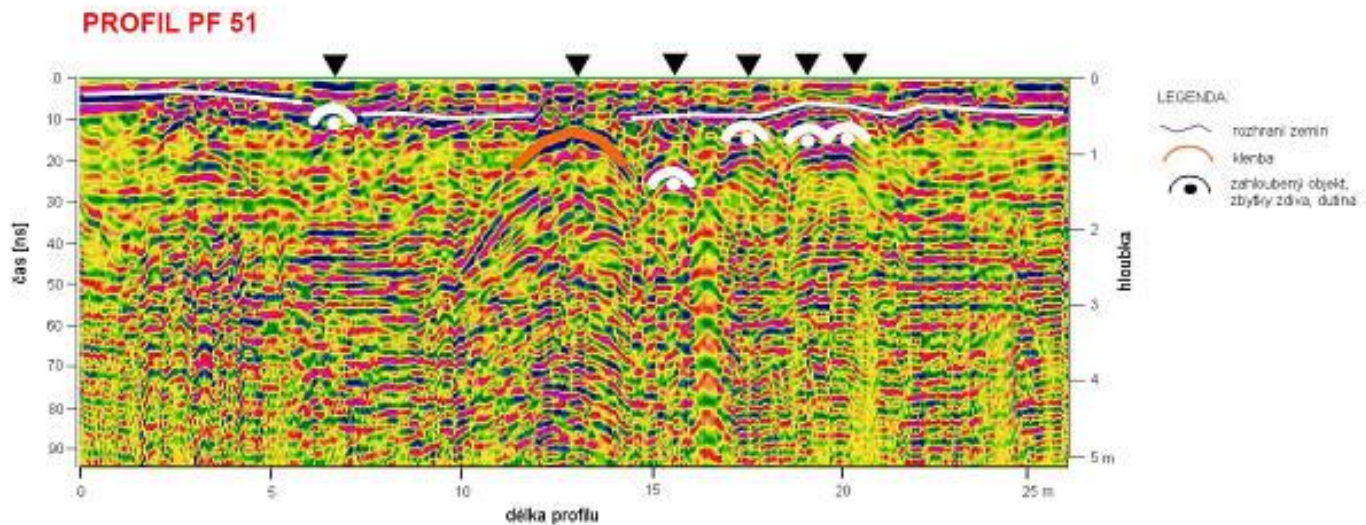
## Rozdělení elektromagnetických metod

- Elektromagnetické profilování a elektromagnetické sondování
- Nejčastěji je využívána tzv. metoda dipólového elektromagnetického profilování (DEMP). Jejich zdrojem jsou antény napájené střídavým proudem různých frekvencí (zdrojový dipól), měří se přijímací anténou anomálie indukované ve vodivém zemském prostředí. Demp umožňuje přímé měření vodivosti zeminového popř. horninového prostředí. Metoda velmi dobře doplňuje elektrickou odporovou tomografii (ERT) a je vhodná pro rychlý průzkum přípovrchových částí měřeného 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.
- V metodě TURAM výsledné pole měříme relativně dvěma vertikálními cívkami. Sledujeme poměr vertikálních složek magnetického pole ve dvou bodech a fázový rozdíl mezi těmito složkami.
- V metodě SLINGRAM se pohybujeme po profilu s generátorem, a přijímačem. Přijímač měří vertikální složku a je spojen s generátorem takže můžeme měřit intenzitu pole a fázové zpoždění výsledného pole za primárním.
- Metoda velmi dlouhých vln (VDV) je založena na měření parametrů elektromagnetických vln vzdálených vysílačů (10-30 kHz). Jejich signál se šíří nad homogenním poloprostorem téměř vodorovně (což je ovlivněno pouze sklonem terénu v okolí místa měření). Zkreslení těchto polí souvisí s výskytem vodivostních nehomogenit – vodivých hornin a vodou nasycených porušených zón, ale i umělých vodičů (elektrická vedení, plynovody, aj.).

# Geoelektrické metody

## Georadarový průzkum (Ground-penetrating radar)

- V trase geofyzikálního profilu je situován přijímač a vysílač signálu (vyslání elektromagnetických pulzů o vysoké vlastní frekvenci (50-1000 MHz) pod povrch a registraci času příjmu po odrazu od podpovrchových reflexních rozhraní, které jsou projevem změny elektromagnetických vlastností). Jejich vzdálenost a krok měření po profilu závisí na povaze řešeného úkolu (očekávaná hloubka hledaných těles, jejich rozměr apod.). Vysílaný signál přijatý po odrazu od těles v zemi je aparaturou dále zpracováván a je možné jej sledovat na obrazovce připojeného počítače, kde se postupně přímo v terénu vykreslí celý geofyzikální řez po profilu. Naměřená data se pak dále zpracovávají pro zvýraznění hledaných struktur nebo objektů v různých částech řezu, zatímco jiné jsou potlačovány. Georadarový průzkum, jako jedna z nejmodernějších geofyzikálních metodik rozlišuje jednotlivé půdní vrstvy, hloubku podloží, zlomy v horninách, přirozené jeskynní prostory a skryté skládky



# Geoelektrické metody

## Elektrochemické metody

- Spontánní polarizace
- Využívá měření přirozených elektrických proudů v zemi, které jsou vyvolány elektrochemickou aktivitou některých minerálů (sulfidy, grafit), což umožňuje výskyt takových minerálů zjistit a mapovat. Další možností je sledování filtračních potenciálů vzniklých při proudění podzemní vody pórovitým horninovým prostředím; tak je možno zjistit směr proudění podzemní vody, místa úniků vody a skryté vývěry. Třetí možností je měření difúzních potenciálů, které se tvoří v místech změn koncentrací půdních roztoků. Stejným způsobem lze měřit také bludné proudy umělého původu, což je významný parametr pro stanovení agresivity prostředí.
- Vyzvané polarizace - polarizace vyvolána proudovými impulzy

## Metoda nabitého tělesa (stejnoseměrná potenciálová)

- Umožňuje zvýraznit fyzikální pole zkoumaného objektu. Tak je možné studovat jeho rozměr, tvar a elektrickou vodivost, popřípadě zkoumat vodivou souvislost s jinými objekty. Při měření se do zkoumaného objektu zavádí elektrický proud pomocí uzemněné proudové elektrody, přičemž druhá proudová elektroda je umístěna ve velké vzdálenosti mimo proměřovaný prostor. Vlastním měřením se snímá potenciál takto vytvořeného elektrického pole. Velikost potenciálu a tvar izolinií pak umožňují stanovit rozsah a tvar zkoumaného tělesa a jeho spojení s jinými tělesy.
- Metoda je použitelná i pro stanovení směru a rychlosti proudění podzemní vody. V tomto případě se proudová elektroda zavádí do vrtu nebo studny pod hladinu vody a pole se zvýrazňuje vodivým značkovačem (roztokem soli apod.). Sleduje se časový postup a směr pohybu tohoto značkovače. Modifikovaná metoda nabitého tělesa se používá pro zjišťování netěsností izolační fólie v podloží skládek odpadu. Zde jsou proudové elektrody umístěny pod tuto fólii a snímá se elektrický potenciál v tělese skládky nad fólií.

# Geoelektrické metody



# Radiometrie a metody jaderné geofyziky

Metody měření přirozené radioaktivity, označované jako radiometrické metody, se užívají ke kvalitativnímu a kvantitativnímu stanovení přirozeně radioaktivních prvků v horninách, vodách a vzduchu.

- Přirozená radioaktivita hornin, vody a vzduchu je dána obsahem přirozených radionuklidů v těchto prostředích. Vnitřní nestabilita jader těchto prvků způsobuje samovolné přeměny, které jsou doprovázeny emisemi jaderného záření ( $\alpha$  částic - protonů a neutronů,  $\beta$  částic - elektronů a  $\gamma$  - záření elektromagnetické povahy). Tyto charakteristické projevy lze přímo indikovat (měřit).
- Důležitou složkou radiometrie je emanometrie - ta měří emanace radonu, který vzniká v zemské kůře rozpadem uranu a thoria a který se difuzí šíří horninou a může se akumulovat v lidských obydlích. Radon je nebezpečný, protože je zdrojem alfa záření, které má negativní účinky na živou tkáň. Úkolem emanometrie je tedy měření emanací a stanovení radonového rizika.
- Metody jaderné geofyziky umožňují též určení fyzikálních vlastností hornin a přírodních materiálů a jejich látkového složení. Patří sem rozsáhlý soubor vrtních, pozemních, leteckých i laboratorních metod, využívajících jednak přímé indikace přirozené radioaktivity, jednak interakce jaderného záření umělých zářičů s horninami .

# Radiometrie a metody jaderné geofyziky

Radiometrické metody:

- Měření úhrnné aktivity gama – přirozená radioaktivita hornin (registrace všech kvant gama o energii vyšší než diskriminační úroveň přístroje)
- Gama spektrometrie (K, U, Th) – stanovení radionuklidů v horninách
- Emanometrie – měření radioaktivních plynů (emanace, Rn)

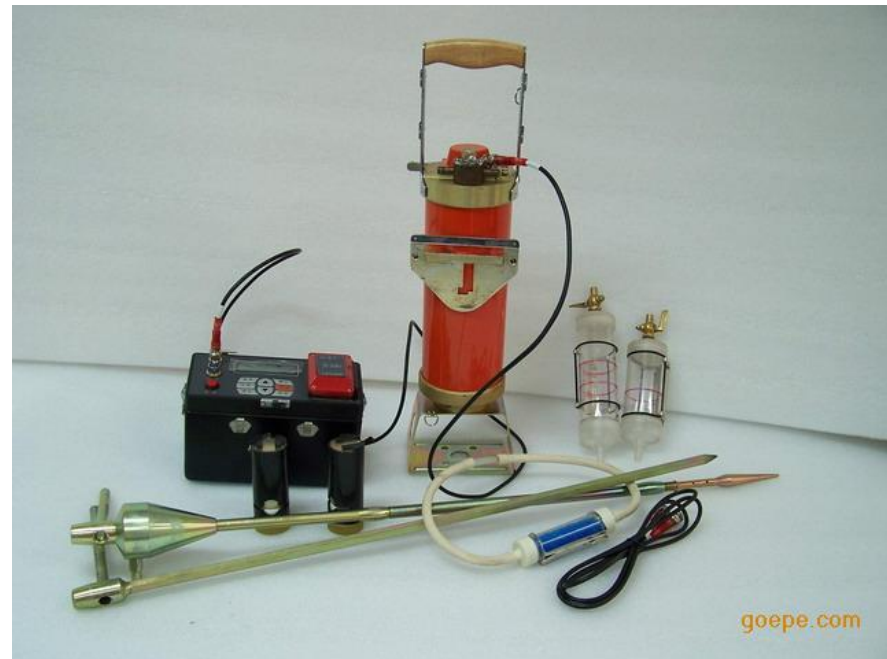
V metodách jaderné fyziky využíváme ozáření hornin externím zdrojem záření a registraci vybuzeného záření. Metody umožňují stanovit některé fyzikální vlastnosti hornin a obsahy určitých prvků.

- Gama - gama metoda – ke stanovení hustoty hornin
- Gama - neutron metoda - ke stanovení berylia
- Neutron - neutron metoda – ke stanovení vlhkosti hornin, obsah boru
- Jaderná gama rezonance – Mossbauerův jev, stanovení kasiteritu ( $\text{SnO}_2$ )
- Rentgenfluorescenční metoda – ozáření horniny a detekce charakteristických emisí při přechodu ze vzbuzeného stavu, stanovení prvků s atomovým číslem nad 24
- Neutronová aktivační analýza – stanovení hliníku, vanadu, kobaltu, manganu, fluoru a mědi

# Radiometrie a metody jaderné geofyziky

Používá se zejména pro:

- prospekci na uranové rudy
  - vyhledávání umělých zdrojů záření
  - průmyslové účely a ochranu zdraví
- Radiometrické metody lze využít při geologickém mapování, vyhledávání tektonických poruch a zlomových pásem, vyhledávání ložisek radioaktivních surovin či při monitorování životního prostředí.





# Geofyzikální měření ve vrtech

Karotáž je soubor geofyzikálních měření ve vrtech používaných pro zjištění litologického profilu vrtu a jeho technického stavu. Vyhodnocením naměřených dat lze určit porozitu, měrnou hmotnost, sycení vodou či uhlovodíky, hranice jílových a pískových obzorů, teplotní gradient a technické údaje o vrtu - průměr, trajektorii, kvalitu kontaktu pažnice-cement.

- Geofyzikální měření ve vrtech je obor velmi mladý, prvá elektrokarotážní měření uskutečnili v r. 1927 na ložiscích ropy ve Francii Marcel a Conrad Schlumbergerovi. od té doby prošel tento obor rozsáhlým vývojem přístrojovým i metodickým, takže je možno o něm bez nadsázky prohlásit, že je z hlediska metodického a přístrojového nejobsáhlejší ze všech geofyzikálních disciplín. 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, apod., které se eliminují v procesu interpretace nebo přímo při měření vhodným technickým či softwarovým systémem.
- Jednotlivé karotážní metody jsou většinou odvozeny z povrchových geofyzikálních metod, mají tedy i společný fyzikální princip a teoretický základ. Některé metodiky vrtních variant byly používány dříve než varianty povrchové a jsou proto technicky dokonaleji propracovány; jsou i metody prováděné jen ve vrtech.

# Geofyzikální měření ve vrtech

## Elektrické metody

- spontánní polarizace, rezistivimetr (odporová elektrotoráž), (dual) laterolog , mikrolaterolog , mikro spherical focused log, mikrolog, dual indukční , metoda klouzajících kontaktů,

## Jaderné metody

- Gamma karotáž, (kompenzovaná) neutronová karotáž, (kompenzovaná) hustotní (gama-gama) karotáž,

## Akustické metody

- (kompenzovaná) akustická karotáž, cementolog , segmentový cementolog, akustický televizor, akustická karotáž se záznamem kompletního vlnového obrazu , akustický televizor

## Magnetická karotáž

- Magnetická susceptibilita

## Technické metody

- Inklinometrie, kavernometrie, lokátor spojek
- Televizní prohlídky vrtů
- Termometrie, průtokometrie, fotometrie, měření tlaku

# Geofyzikální měření ve vrtech

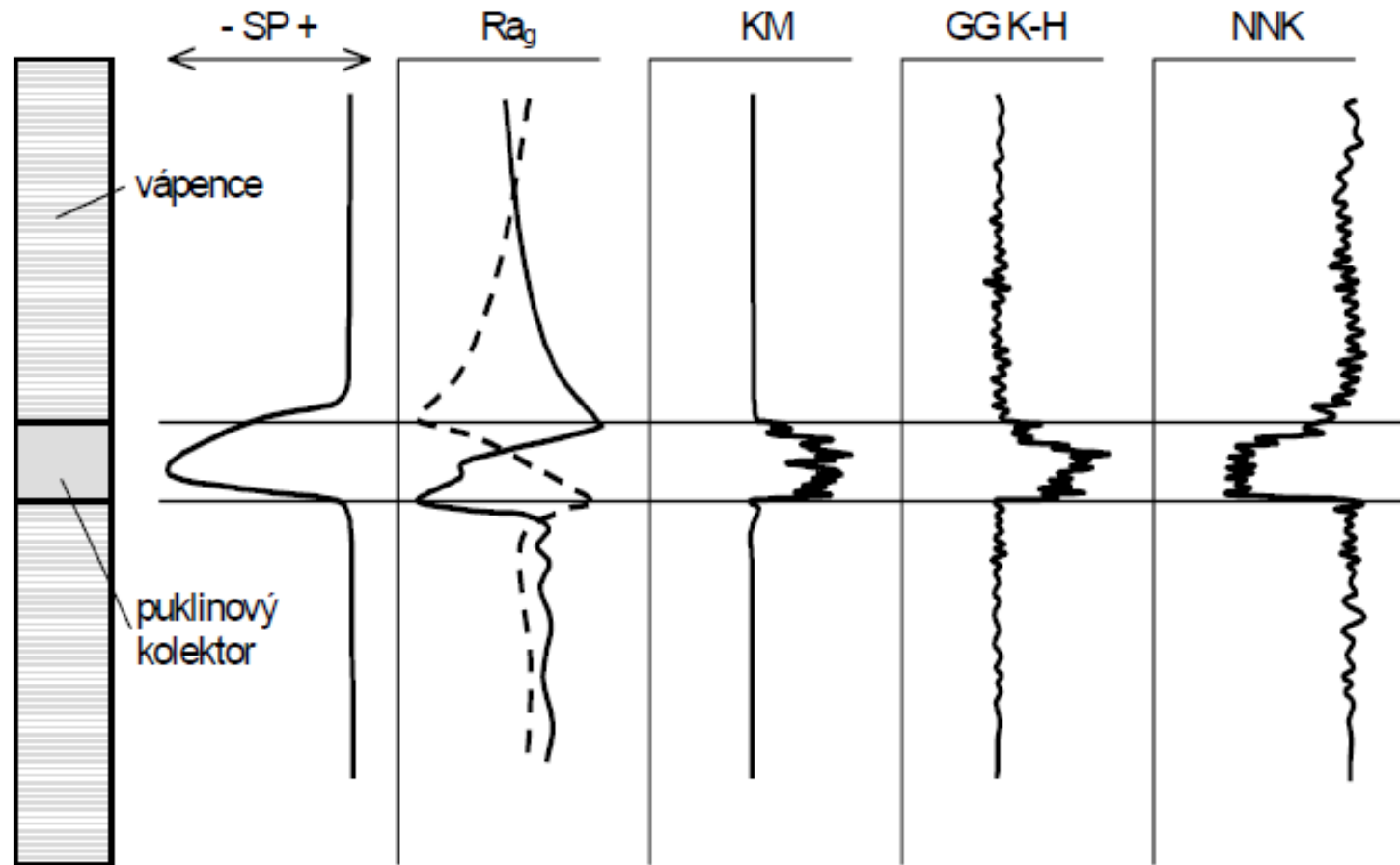
- Z elektrických metod karotážních se pravidelně uplatňuje metoda vlastních potenciálů (SP) při indikaci difúzních, filtračních a oxidačně redukčních procesů, probíhajících v okolí vrtu, proudová karotáž (KK) na vymezení poloh s velkou vodivostí (zajílované poruchy a obecně silně jílovité polohy), různé typy odporové karotáže (Ra) s potenciálovými i gradientovými sondami, z elektromagnetických metod pak indukční (IL) a dielektrická karotáž (DK) k vertikálnímu profilování vodivosti (resp. měrného odporu) a relativní permitivity hornin a pod.
- Z metod seismické karotáže je nejčastěji aplikovanou akustická karotáž (AK), která shromažďuje údaje o rychlosti šíření pružných vln horninami ve vertikálním řezu.
- Z metod jaderné karotáže je potřeba uvést zejména gama karotáž (GK) a karotážní gama spektrometrii (SGK) pro stanovení přirozené radioaktivity hornin (viz metody pozemní), hustotní gama-gama karotáž (GGK-H), mapující obklopující horniny podle jejich objemové hustoty, rentgenfluorescenční karotáž (RFK), neutron-neutron karotáž (NNK) určující neutronovou pórovitost a metodu otevřených radioaktivních zářičů (ORZ), která využívá radioaktivního značkování podzemní vody s cílem monitorovat její prostorový pohyb s časem.
- Magnetometrické metody mezi metodami vrtními zastupuje karotáž magnetické susceptibility (MK), rozčleňující vertikální profil hornin podle přirozeného obsahu feromagnetických minerálů.
- Komplex karotážních metod doplňují další metody, poskytující údaje např. o sklonu a směru vrstev a diskontinuit (stratimetrie SM), o kapalině vyplňující vrt (rezistivimetrie RM, fotometrie FM, hustoměry) a jejím pohybu (vrtné průtokoměry, termometrie TM), a metody zajišťující servis vrtných prací, jako je např. kavernometrie (KM) - měření průměru vrtu a inklinometrie (IM) - měření odchylek stvolu vrtu od vertikály.

# Geofyzikální měření ve vrtech

- Některé metodiky vrtních variant byly používány dříve než varianty povrchové a jsou proto technicky dokonaleji propracovány; jsou i metody prováděné jen ve vrtech.
- Sonda s indikačním zařízením (případně i se zdroji průzkumných polí) je na kabelu spouštěna do vrtu pomocí vrátku s registrací hloubky zapuštění. Měřicí a registrační aparatura je umístěna nejčastěji v upraveném terénním automobilu. Během měření lze většinou získat spojitý průběh hodnot indikovaného parametru podél stvolu vrtu (vertikální profil). Při interpretaci naměřených hodnot je třeba uvažovat vliv kapaliny, která vrt vyplňuje (voda, výplach).
- Karotáž pro inženýrskou geologii:
- litologický profil, stupeň tektonického porušení hornin, mechanické vlastnosti hornin, nepropustnost těsnících stěn, úniky vody z přehradních děl, kontrola geotechnických prací na přehradách, kontrola kvality injektáží in-situ, prostorový průběh vrtů, detekce smykových ploch v oblastech sesuvů, průzkum budoucích nebo stávajících těžebních prostorů uhlí, vápenců, kaolinu, bentonitu, písku atd.

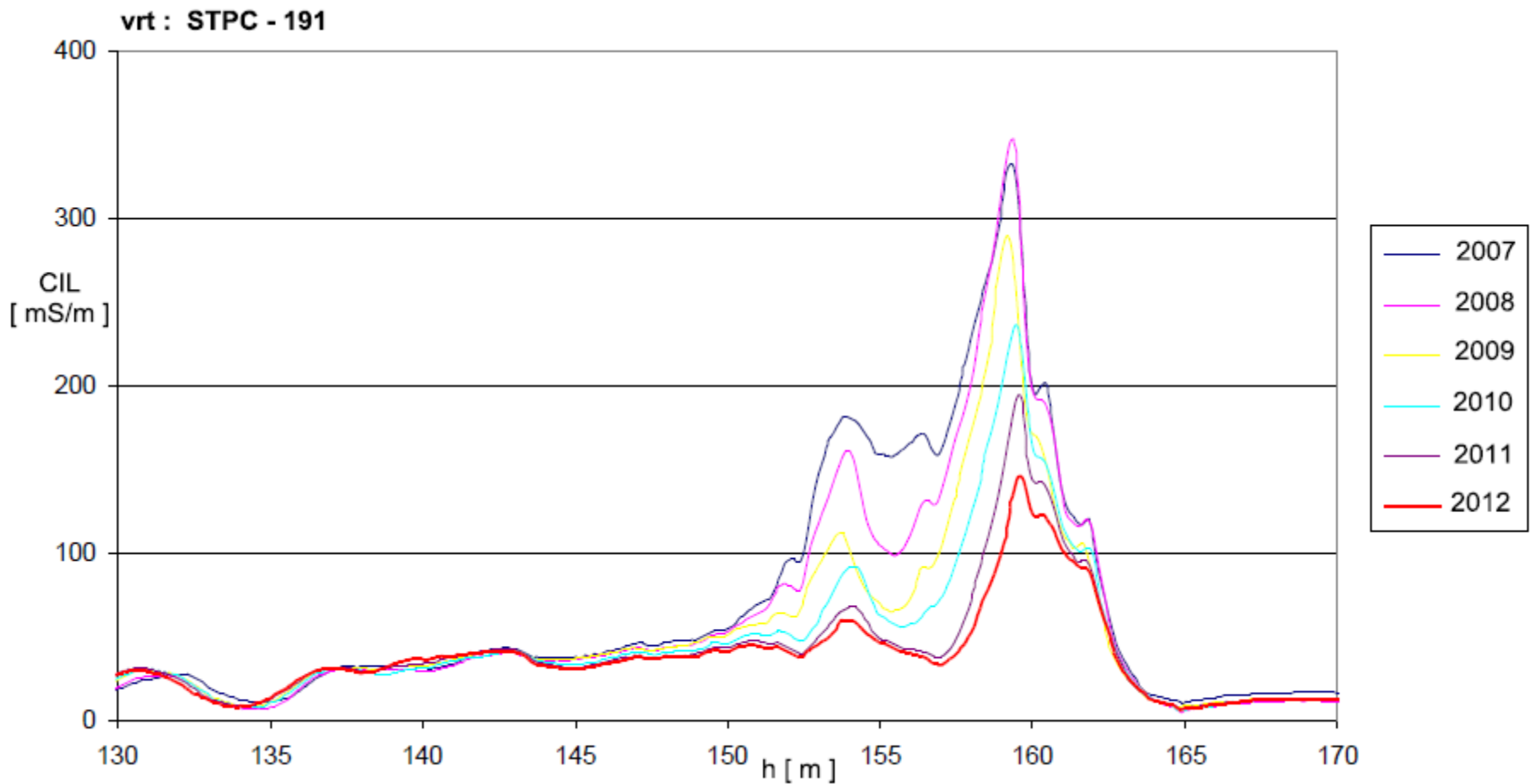
# Geofyzikální měření ve vrtech

Příklad indikace puklinového kolektoru ve vrtu karotážními metodami



# Geofyzikální měření ve vrtech

Vývoj měrné el. vodivosti cenomanských pískovců podle měření indukční karotáže (DIAMO)



# Geofyzikální měření ve vrtech



# Základní a rozšiřující zdroje

- Gruntorád, J. a kol.: Principy metod užitě geofyziky. SNTL. Praha, 1985, 190 s..
- Karous M.: Geofyzikální metody v inženýrské geologii a geotechnice. Geonika, s.r.o., Praha, 77s.
- Mareš, S. a kol.: Geofyzikální metody v hydrogeologii a inženýrské geologii. SNTL, Praha, 1983, 198 s.
- Mareš, S. a kol.: Úvod do užitě geofyziky. SNTL, Praha, 1990, 677 s.
  
- Lowrie, W.: Fundamentals of Geophysics. Cambridge University Press, 2007, 381 s.
- Geophysical exploration for engineering and environmental investigations. Published by ASCE Press, 1998, 204 s.
  
- <http://www.geofyzika.ic.cz/index.php>
- [http://www.kcas.cz/?page=geofyzikalni\\_mereni](http://www.kcas.cz/?page=geofyzikalni_mereni)
- [http://www.geotrend.cz/gtd\\_karo.htm](http://www.geotrend.cz/gtd_karo.htm)
- <http://departments.fsv.cvut.cz/k135/wwwold/ge10/gfvskript.pdf>
- <http://www.monet.cz/atlas/kap25.htm>
- <http://www.listyjm.cz/zajimavosti/vede-z-kostelika-do-hradu-veveri-tajna-chodba.html>
- [http://www.gfinstruments.cz/index.php?menu=gi&cont=special\\_ov](http://www.gfinstruments.cz/index.php?menu=gi&cont=special_ov)