

Inženýrská geofyzika I

(gravimetrie, magnetometrie, termometrie,
seizmické metody)

544-0095 Fyzikální geodézie a geofyzika

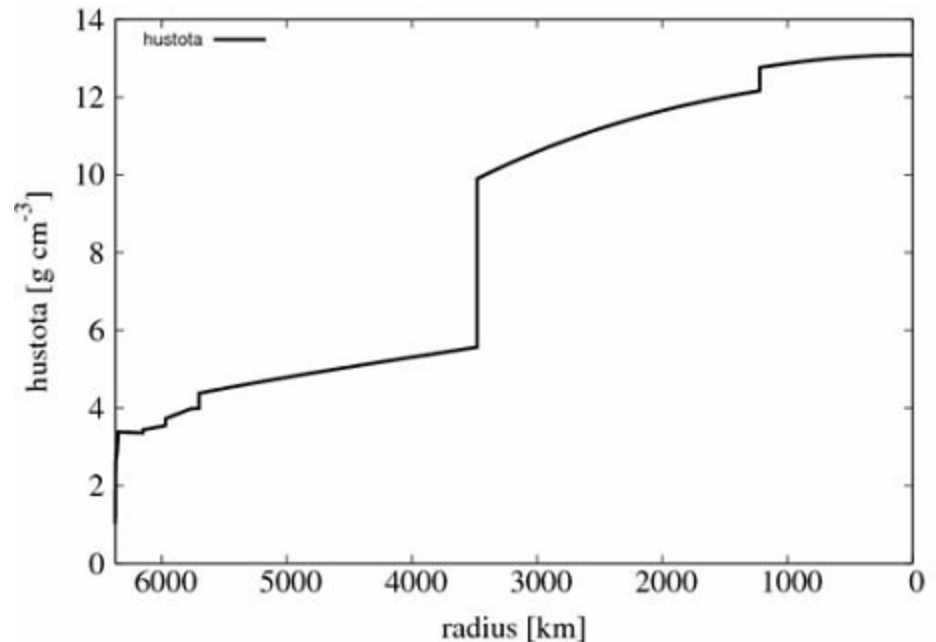
HGF VŠB-TUO

2013, prof. RNDr. Zdeněk Kaláb, CSc.

Gravimetrie

- Hustota Země je jeden ze základních geofyzikálních parametrů; může být přímo stanovena jen u hornin vyskytujících se v nejsvrchnějších částech zemské kůry. Rozložení hustoty Země je možné získat z hloubkového průběhu rychlostí seismických vln při využití hodnot některých základních parametrů (hmotnost Země, momenty setrvačnosti Země, koeficienty gravitačního pole). Ze znalosti hustoty lze odvodit další mechanické vlastnosti.
- Do hloubky roste až na cca 13 g.cm^3

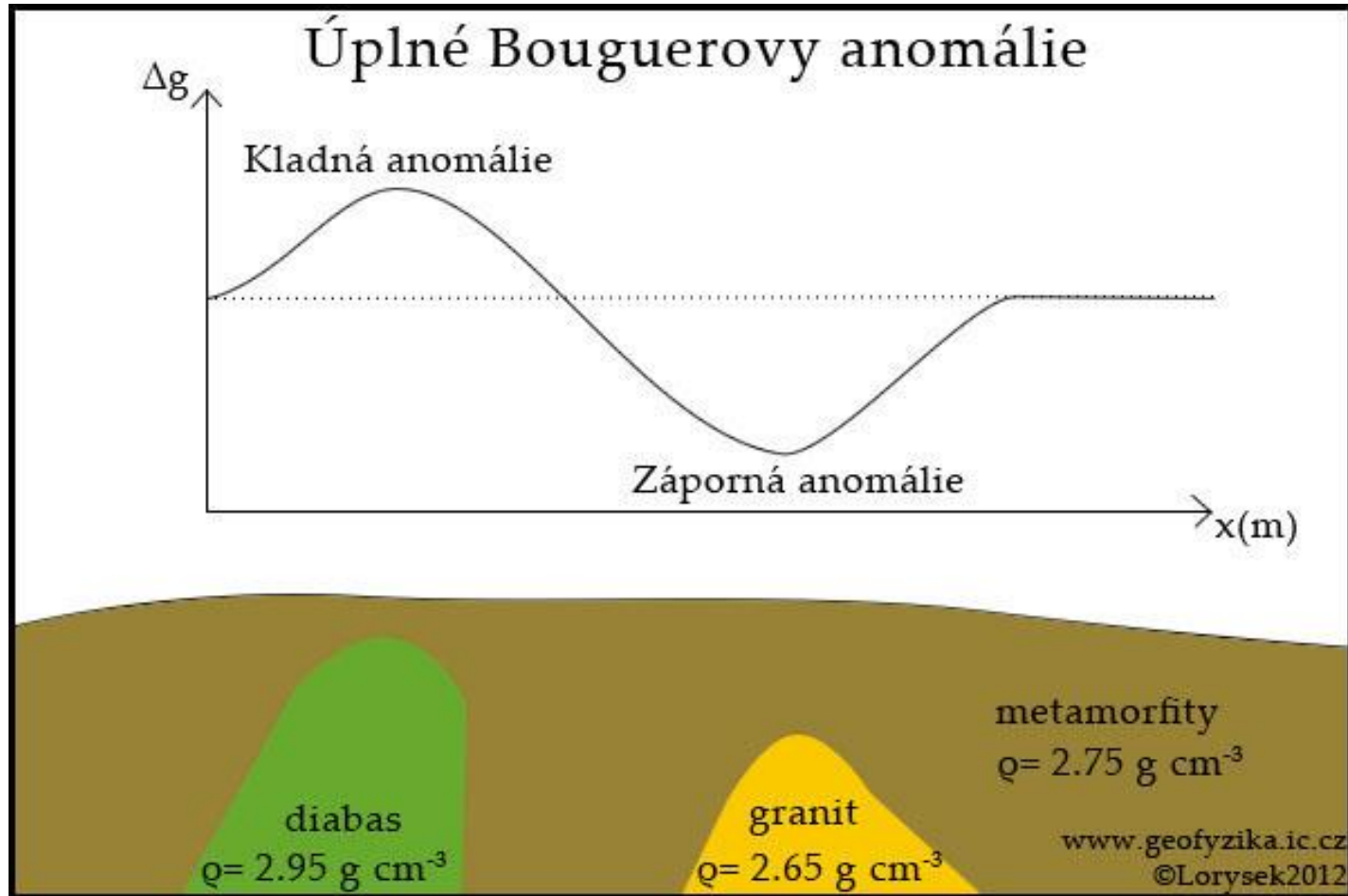
- Model PREM
(Preliminary Reference Earth Model)



Gravimetrie

- Měření tíhového pole pomocí přesných gravimetrů
- Interpretace rozložení hustot v horninovém prostředí (z tíhových anomálií)
- Z hustotních rozhraní jsou stanovovány:
 - Litologické typy (různé horniny)
 - Porušené zóny (tektonika)
 - Dutiny (jeskyně, umělé prostory, dutiny zaplněné vodou)
 - Reliéf podloží s vyššími hustotami
 - Mocnost a rozložení pokryvu, resp. antropogenních sedimentů (skládek)
- Rozsah hustot
 - Hlína, zemina – (1,1) – 1,5 – 2,1 – (2,3) g.cm³
 - Sedimentární horniny (1,5) – 1,9 – 2,6 – (3,0) g.cm³
 - Vyvřelé horniny (2,4) – 2,5 – 3,0 – (3,3) g.cm³
 - Metamorfované horniny (2,4) – 2,6 – 3,2 – (3,6) g.cm³

Gravimetrie

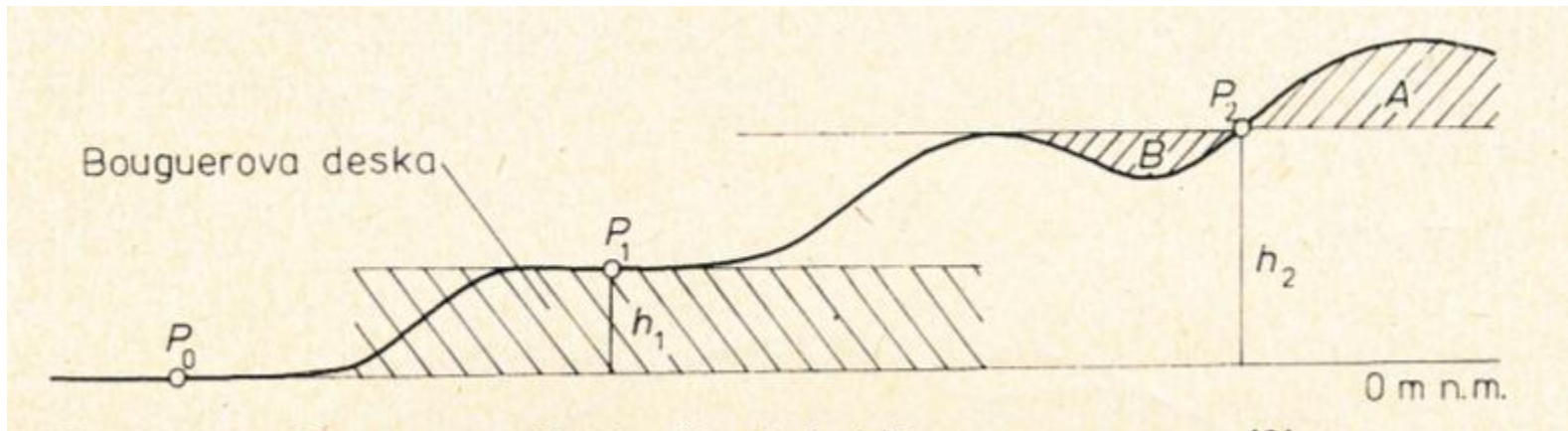


Gravimetrie

- Tíhové anomálie – skutečná tíže určená relativním měřením se porovnává s normálním polem pro odpovídající zeměpisnou šířku; anomálie je kladná, pokud je skutečná tíže větší než normální, pro zápornou anomálie platí opak. Vliv topografických nerovností na tíhové anomálie je zachován v plném rozsahu. Toto se používá pro řešení geodetických úkolů (určení tvaru geoidu, tížnicové odchylky, ...).
- Tíhové anomálie pro řešení geologických problémů – nutno odstranit vliv topografických nerovností, aby anomálie byly projevem změny hustoty. Celková hodnota tíhového pole je řádu $10^7 \mu\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$, změna závislejší na zeměpisné šířce je $5 \cdot 10^4 \mu\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$, projev hustotních nehomogenit je do $10^3 \mu\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$.
 - Závislost na zeměpisné šířce – odečtení normální tíže g_n od naměřené tíže g . Normální tíže je tabelována (PC).
 - Odstranění vlivu nadmořské výšky – k naměřené tíži přičteme opravu z volného vzduchu = Fayova oprava („přenesení měřeného bodu do nulové nadmořské výšky z výšky h_1), tj. $3,086 \cdot h_1$, dále pak odečteme opravu z Bouguerovy desky, tj. $0,419 \cdot \rho h_1$. Toto platí pro vodorovný terén, jinak anomálie kopíruje reliéf povrchu!
 - Je-li terén členitý, zavádí se vždy kladná topografická oprava Δg_t , která se počítá na PC.
 - Oprava na ohraničení Bouguerovy desky kulovými plochami je Bullardův člen B.
 - **Úplná Bouguerova anomálie:**
$$\Delta g = g - g_n + (3,084 - 0,419 \cdot \rho) h_1 + \Delta g_t - B$$

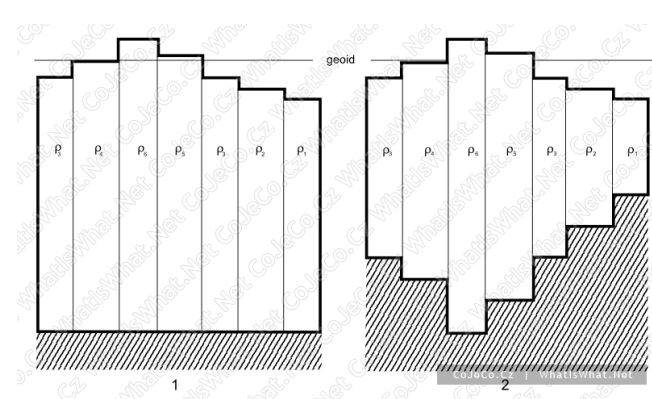
Gravimetrie

- Vzorec úplné Bouguerovy anomálie platí pro měření na pevnině s kladnou nadmořskou výškou.
- Měříme-li v podzemí s kladnou nadmořskou výškou, pak se topografická korekce nahrazuje účinkem hmot nad místem měření. Je-li v měření v podzemí se zápornou nadmořskou výškou, pak Fayova oprava má záporné znaménko, oprava z Bouguerovy desky je kladná, účinek hmot nad bodem měření se stanovuje opět jako topografické korekce.
- Měříme-li na hladině vodních ploch, hustota vody je doplněna na $2,67 \text{ g.cm}^{-3}$, tj. tíže se zvětšuje o účinek desky o mocnosti hloubky dna a hustotě cca $1,7 \text{ g.cm}^{-3}$.



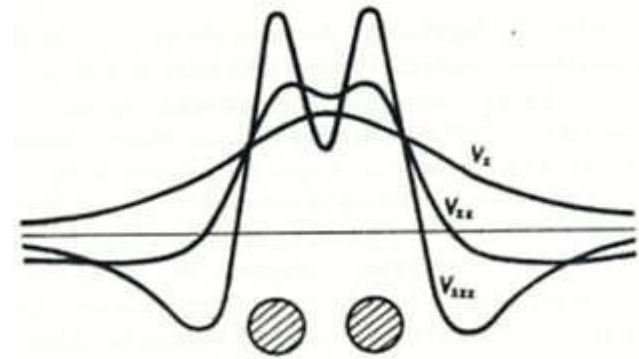
Gravimetrie

Izostáze = stav blížký hydrostatické rovnováze



- V hornatých oblastech - úplné Bouguerovy anomálie výrazně záporné. Předpokládá se, že „horstva mají kořeny“ tvořené hmotami lehčí zemské kůry zatlačené do těžšího svrchního pláště. Výpočet se opět provádí pouze na PC.
- Izostatická anomálie – součet úplných Bouguerovy anomálií a izostatické korekce. Nulová hodnota znamená izostaticky kompenzované pohoří, kladná hodnota znamená nedokompenzované prostředí (kořen málo hluboký), záporná hodnota představuje překompenzované pohoří s příliš hlubokými kořeny.
- Izostatická nerovnováha dokazuje působení endogenních sil na formování zemské kůry (kromě sil hydrostatických).
- Na izostatické anomálie existuje několik teorií. Airyho předpokládá lokální kompenzaci: kořenová zóna hory leží přímo pod ní. Prattova naopak předpokládá, že hydrostatické rovnováhy v dané hloubce je dosaženo tím, že bloky zemské kůry mají různou hustotu: čím vyšší blok, tím nižší hustota. Meineszova předpokládá vyšší elasticitu svrchních vrstev Země a předkládá hypotézu regionální izostatické kompenzace.

Gravimetrie



Slapové jevy

- působí na vodu, vzduch i pevné hmoty
- změny tíhového zrychlení, které vyvolává Slunce, se pohybují v hodnotách kolem $1,0 \mu\text{ms}^{-2}$
- změny tíhového zrychlení, které vyvolává Měsíc, se pohybují i v hodnotách $2,0 \mu\text{ms}^{-2}$
- působí-li ve stejném směru, účinek se sčítá ($3,0 \mu\text{ms}^{-2}$)

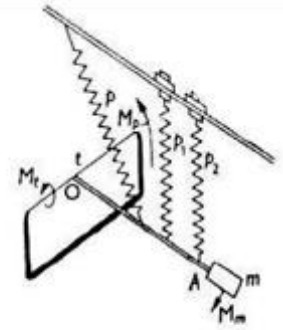
Přímá a obrácená úloha v gravimetrii (platí pro většinu gf metod)

- přímá úloha - definujeme anomálii, kterou vyvolává těleso, jehož tvar, polohu a hustotu známe; využíváme poznatky o účincích těles, které mají pravidelný tvar pomocí analytických metod, pro nepravidelné tvary jsou aplikovány přibližné integrační postupy
- obrácená úloha - analýzou známé anomálie hledáme tvar a polohu tělesa, které by jí mohlo vyvolávat, výsledky nemusí být jednoznačné

Odvozené tíhové anomálie

- Mapy regionálních a lokálních tíhových anomálií
- Analytickými postupy odvozeny mapy druhých derivací tíže, maximálních horizontálních gradientů tíže, ...

Gravimetrie



Obr.2.1 Křemenný otočný systém u mechanického gravimetru

Přístroje pro tíhová měření (měříme tíhové zrychlení)

- absolutní měření – realizace ve speciálně vybavených laboratořích; kyvadla a přístroje založená na principu volného pádu; od $\pm 0,1 \mu\text{ms}^{-2}$, dnes $\pm 0,001 \mu\text{ms}^{-2}$ např. Earth Tide Meter od fy. LaCoste and Romberg; získáváme přímo hodnoty tíhového zrychlení
- relativní měření – realizace v terénu; jsou lehké, snadno ovladatelné a jejich měření probíhá v krátkém časovém úseku (minuty); získáváme relativní hodnoty tíhového zrychlení; např. Scintrex Limited CG-2, TI-Worden, La Coste and Romberg D,S,M;
- gravimetry (translačního typu – moment tíže vyrovnáván pružností pružiny, rotačního typu – moment tíže vyrovnáván momentem torze vlákna, plynového typu – moment tíže vyrovnáván tlakem plynu);
- měnila se přesnost (s vývojem), dnes až $\pm 0,05 \mu\text{ms}^{-2}$ (La Coste D);

Geodetické gravimetry - lze měřit přímo i rozdíly tíhového zrychlení větší než $10^4 \mu\text{ms}^{-2}$, prospekční gravimetry do $10^3 \mu\text{ms}^{-2}$

Chod gravimetru – změny čtení na gravimetru, které nejsou způsobeny pouze změnami tíhového zrychlení (ale např. v přístroji, teplota, slapové jevy), za účelem určení přesnosti prováděných tíhových měření je nutné v každém denním tíhovém profilu provést zaměření několika kontrolních bodů (10-15 % z celkového počtu nově zaměřených bodů); po 2-3 hod se zaměřují kontrolní body;

Gravimetr pro absolutní měření FG-5 od firmy Scintrex.

Zdroj: <http://www.scintrexltd.com/gravity.html>

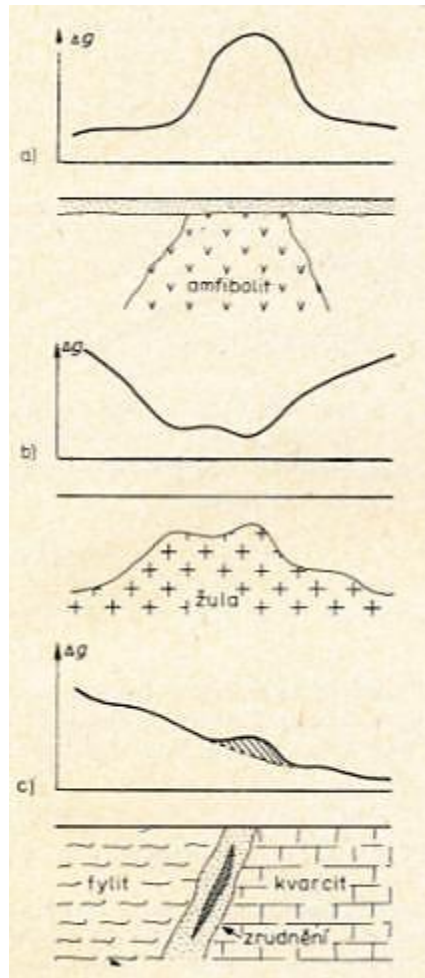
Gravimetr pro relativní měření CG-5 od firmy Scintrex.

Zdroj: <http://www.scintrexltd.com/gravity.html>

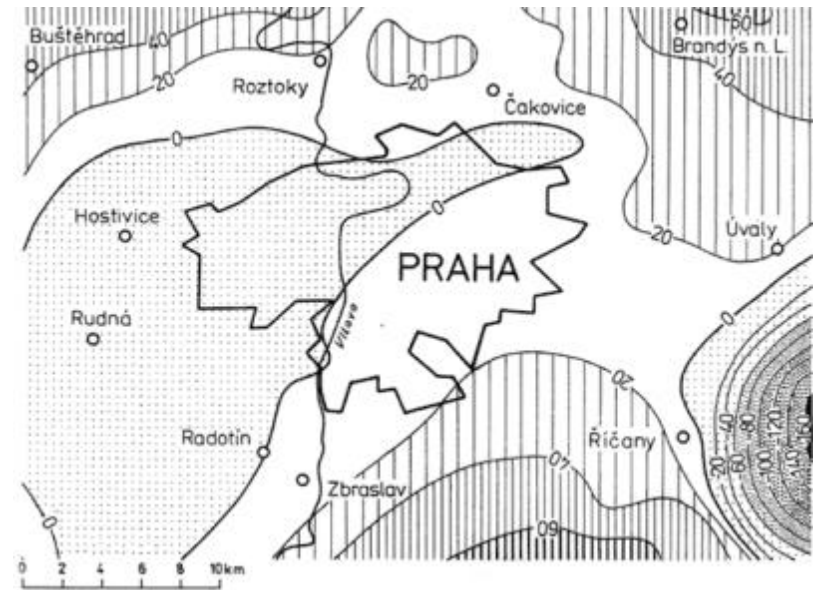


Gravimetrie

Tíhové anomálie nad amfibolitovým tělesem (a),
žulovou elevací (b) a zrudněním (c)



Mapa úplných Bouguerových anomálií Dg (redukční hustota / 2670 kg.m^3). Převzato z přehledné gravimetrické mapy ČSSR, vydanou Ústředním ústavem geologickým v Praze, 1965. Izoanomály popsány v jedn. $\mu\text{m.s}^2$.



Magnetometrie

Charakteristiky zemského magnetického pole

- Toto pole je charakterizováno vektorem magnetické indukce, intenzita pole je charakterizována totálním vektorem (má vždy určitou amplitudu a orientaci), který lze rozložit na složku rovnoběžnou se zemským povrchem (max na rovníku, min na pólech) a na složku kolmou na zemský povrch;
- lokální orientaci totálního vektoru určuje, jak velikost úhlu I (inklinace) a úhlu D (deklinace).
- Magnetizace je vektorová veličina, která charakterizuje schopnost hornin a horninových celků vytvářet si ve vnějším magnetickém poli sekundární magnetické pole;
 - Přirozená remanentní magnetizace - je parametrem, složité povahy, neboť byl dlouhodobě formován fyzikálními a chemickými faktory; permanentní magnetizace je nezávislá na současném zemském poli, je závislá na termální, mechanické a magnetické historii hornin.
 - Magnetická susceptibilita - je závislá na druhu a množství magneticky aktivních minerálů v hornině (magnetické oxidy, pevné roztoky magnetitu, minerály hematitové řady).
 - Indukovaná magnetizace - dělíme horniny podle magnetických vlastností na diamagnetické (susceptibilita je záporná), paramagnetické (intenzita indukovaného pole působí ve stejném směru jako intenzita primárního pole) a feromagnetické (kladná a vysoká susceptibilita).

Magnetometrie

- Vektor T geomagnetického pole v daném bodě na zemském povrchu lze schematicky vyjádřit jako vektorový součet::
- $T = T_d + T_k + T_{ar} + T_{al}$
 - T_d je podíl pole odkloněného dipólu,
 - T_k je podíl kontinentální anomálie (zdroj v jádře)
 - T_{ar} je podíl anomálie regionální
 - T_{al} je je podíl anomálie lokální
- Světové magnetické mapy – anomálie regionální a lokální jsou vyhlazeny.
- Měří se absolutní či relativní hodnoty modulu gm pole: totální hodnota, vertikální složka, horizontální složka, anomálie je definována jako rozdíl měřené hodnoty a normální hodnoty, např. $T_a = T - T_n$. Obvykle se určuje a analyzuje jen jedna složka, nejčastěji ΔT , kterou lze s přibližně definovat jako složku pole anomálního ve směru normálního gm pole o inklinaci I_n . Složky jsou na sobě závislé, např.:
$$\Delta T = Z_a \cdot \sin I_n + H_a \cdot \cos I_n \cdot \cos A$$
(A – azimut charakteristického profilu)

Magnetometrie

Měří se též gradienty pole – gradiometry

- vhodnější pro geologické interpretace
- minimalizují vliv variací gm pole

Magnetometrii lze použít i pro detekci podzemních objektů s kontrastními magnetickými vlastnostmi

Pro detekci kovových objektů se magnetická měření kombinují s měřením detektory kovů

Pro diferenciaci horninových typů je užitečná kapametrie, kterou je možné rychle zjistit magnetické vlastnosti (susceptibilitu)

Paleomagnetický výzkum slouží k analýze možných změn magnetického pole Země v průběhu dlouhodobé historie vývoje naší planety.

Magnetometrie

Přístroje pro geomagnetické měření

- Magnetické váhy
- Magnetometry s ferosondou
- Protonové magnetometry- pozemní měření, vyhovující citlivost 1nT, celosvětový rozsah, rychlé čtení a široký teplotní rozsah (PM-2, <http://26vv.com/high-progress-magnetometer-2>)
- Atomové magnetometry: letecké měření, césiové nebo rubidiové, vyšší citlivost než protonové
- Magnetometr SQUID – Josephsonův efekt (supravodiče za teploty blízké absolutní nule)

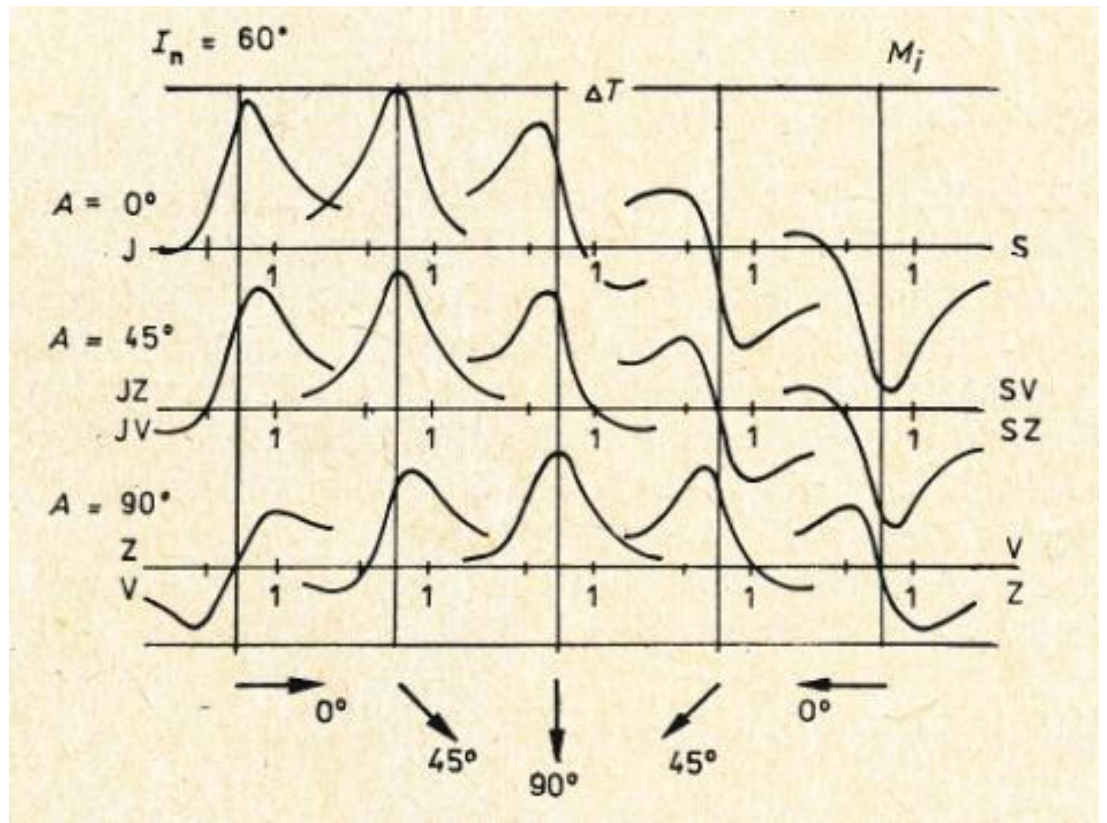
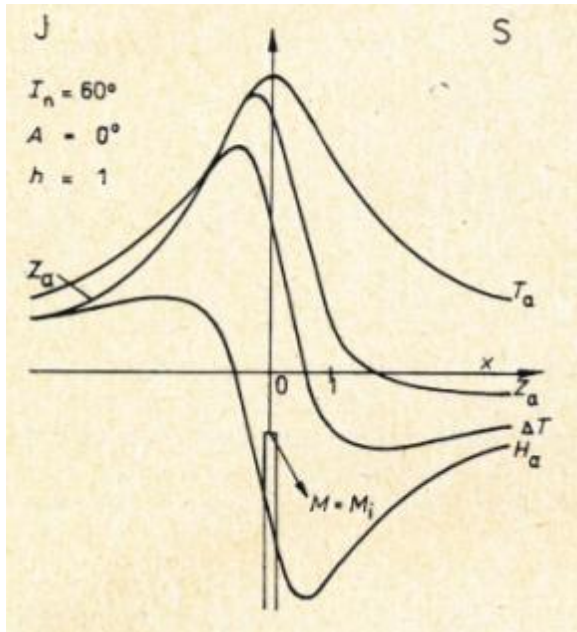
Terénní geomagnetické měření:

- druh měření - regionální, detailní, profilové, plošné
- charakteristické geologické a magnetické stavby oblasti; volba způsobů, které umožní efektní odstranění nežádoucích vlivů.



Magnetometrie

Magnetické pole ΔT nad šikmými tenkými deskami o velkém hloubkovém dosahu, namagnetovanými indukovaně v poli o inklinaci 60°



Termometrie

- Tepelné pole Země je produkováno rozpadem radioaktivních prvků, teplo uvolňované při mechanických pohybech zemských ker, ...
- Lokálními zdroji teplotních anomálií při povrchu jsou jednak výstupové cesty podzemních vod (extrémní kontrasty u termálních vod), chemické procesy, hoření přirozené i v umělých deponiích.
- Povrchové měření je značně ovlivněno klimatickými podmínkami (sezónní a hloubkové variace teplot).
- Měření se provádí kontaktními (elektrické termistorové teploměry) nebo bezkontaktními (infračervené termální snímače) termometry. Lze užít i dálkové snímání v intervalu infračerveného záření. Specifické aplikace termometrie ve vrtech, kde slouží ke zjišťování přítoků podzemní vody do vrtů a zjištění technického stavu vrtu a stavu cementace.

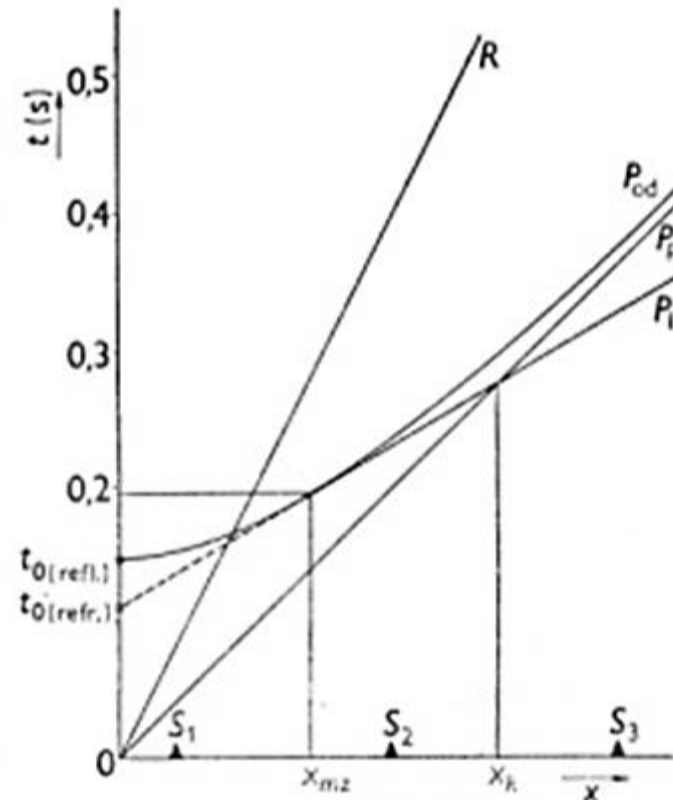


Seismické metody

- Seismické metody zjišťují podmínky šíření mechanických vzruchů v horninovém masivu, jejich odrazy od rozhraní apod. Signály mohou být zemětřesení a další jevy přirozeného původu nebo signály umělé, tj. výbuchy, vibrace, údery, indukované jevy. Rušivé vlny: přímá podélná vlna, příčná, transformovaná, násobná, difragovaná, mikroseismy.
- Hodochrona – hodochrona seismických vln je časová závislost příchodu seismické vlny k bodu registrace
- Hodochrona odražené vlny – hyperbolická křivka
- Hodochrona přímé vlny – přímka
- Hodochrona lomené (čelné) vlny – přímka (není od „nuly“)

Metody určování seismických rychlostí

- seismokarotážní měření
- laboratorní měření na vzorcích
- stanovení efektivních rychlostí z užitečných hodochron (hlavně odražených vln)



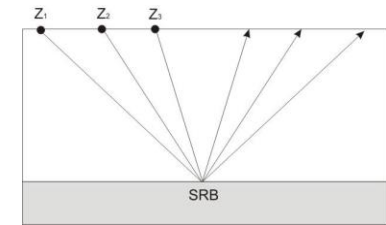
Seizmické metody

Mělká refrakční seizmika (inženýrská seizmika)

- Seizmické vlny se zpravidla budí kladivem nebo slabými výbuchy náloží
- Sleduje se příchod lomených vln; registrace vstřícných hodochron
- Registrace se provádí ve vzdálenějších bodech pomocí geofonů (přeměna mechanického kmitání na elektrický signál)

Mělká reflexní seizmika

- Seizmické vlny se budí výbuchy, údery vibrátory
- Sleduje se příchod odražených vln
- Zpravidla pro hluboký průzkum struktury zemské kůry (průzkum pro naftová a plynová ložiska)
- (Metoda společného reflexního bodu)



Seizmické profilování

- Pohybuje se zdroj i geofony podél profilu, mnohdy i v podzemí (tunely, důlní dílo)
- Sleduje se rychlost šíření seizmické osy podél díla, detekují se především porušené zóny a kvazihomogenní celky (lze analyzovat i útlum amplitudy vlny)

Seizmické metody

Seizmická tomografie (metoda přímých vln)

- Vzruch buzen v řadě bodů na jedné straně zkoumaného bloku horniny, na druhé straně jsou instalovány geofony.
- Řada variant: důl-vrt, vrt-vrt, vrt-povrch, ...
- Sledování struktury zkoumaného bloku, studium porušení a zvětrání, sledování změn napětí, lokalizace dutin
- SW umožňuje sestavit tomografický řez, užívají se přímé i zakřivené dráhy

Mikroseizmika a seizmoakustika

- Mikroseizmika – sledování slabých vibrací (přirozená, indukovaná i průmyslová seizmicita)
- Seizmoakustika – zpravidla sledování četnosti zvukových impulzů (10 Hz – 1 kHz), porušování hornin při tlakovém či smykovém namáhání, též zvýšené tlaky na sesuvech

Seizmické rajónování

- Systematické zjišťování četnosti a výskytu lokálních zemětřesení
- Na základě seizmického monitorování se oceňuje stupně seizmického ohrožení velkých staveb

Seizmické metody



Vibrátor (<http://www.sage.lanl.gov/2008.html>)

Vzduchové dělo - air gun (http://en.wikipedia.org/wiki/Seismic_source)



Seizmické metody

Seismická aparatura Terraloc Mk6 (<http://en.psm-ce.com/labs.aspx>)

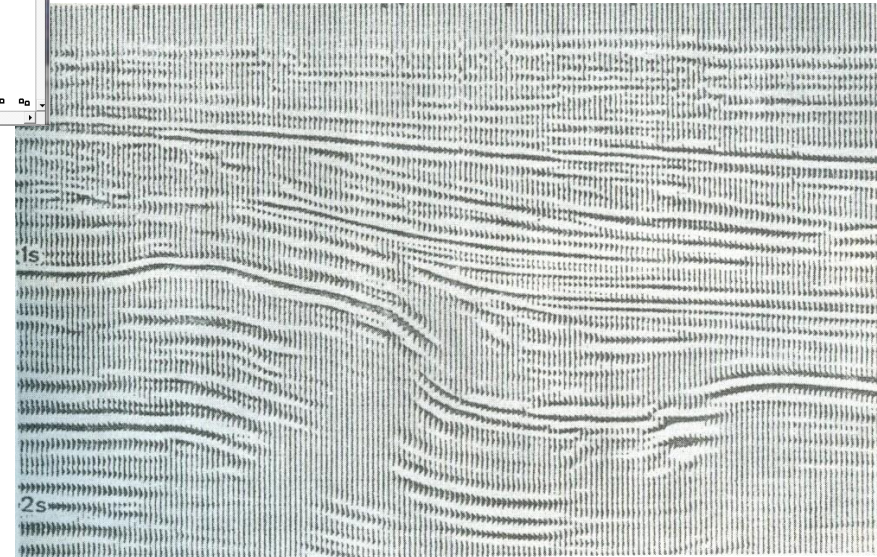
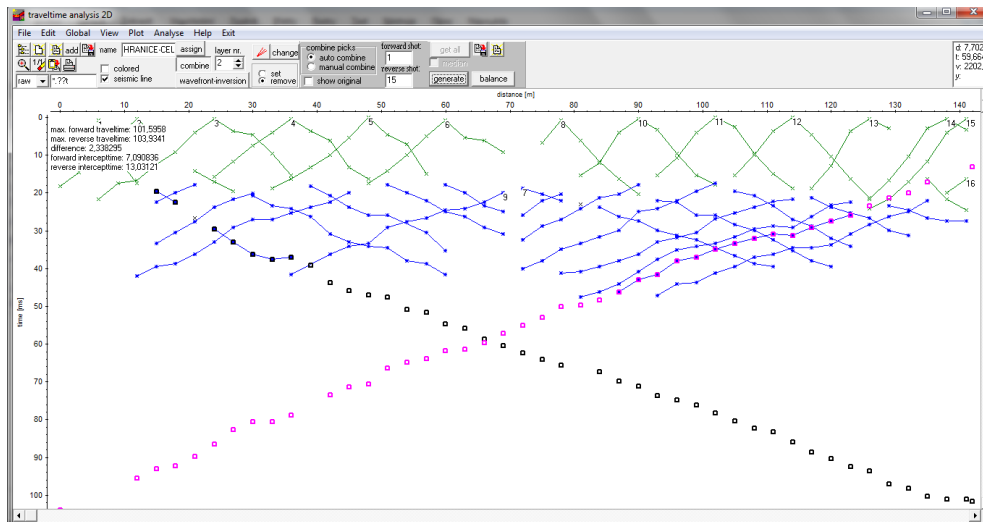
Elektrodynamický geofon (<http://www2.informatik.hu-berlin.de/~hochmuth/bvp/geofon.htm>)



Seizmické metody

System hodochron a hodochrony svodné. Modul travelttime analysis 2D

Časový řez po migraci (Mareš 1990)



Základní a rozšiřující zdroje

- Gruntorád, J. a kol.: Principy metod užití 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.: Úvod do užití 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.monet.cz/atlas/kap25.htm>
- [http://theses.cz/id/wr7cl8/Bakalsk_prce - Hana Koubov.pdf](http://theses.cz/id/wr7cl8/Bakalsk_prce_-_Hana_Koubov.pdf)