# Základy aplikovanej geofyziky 1



gravimetria magnetometria geoelektrika seizmika karotáž rádiometria seizmológia

# Základy aplikovanej geofyziky 1

úvod – E. Nogová gravimetria, magnetometria – R. Pašteka geoelektrika – R. Putiška seizmika, seizmológia – B. Brixová rádiometria, karotáž – A. Mojzeš

### skúška – písomka s 21 až 22 otázkami

### učebné texty (a prezentácie)





- merané pole: tiažové zrýchlenie g

- študovaný fyzikálny parameter hornín: hustota

#### GRAVIMETRIA

### **Obsah prednášky:**

- ujasnene si základných pojmov
- trošku z histórie
- jednotky v gravimetrii
- meranie tiažového zrýchlenia (prístroje)
- hustoty (minerálov a hornín)
- spracovanie meraní (úplné Bouguerove anomálie)
- interpretácia
- príklady využitia gravimetrie

#### GRAVIMETRIA

### Meranie, vyhodnocovanie a interpretácia tiažových meraní ("gravis" – ťažký, "metrein" - merať)



UJASNENIE SI ZÁKLADNÝCH POJMOV hodnota g (tiažového zrýchlenia) je ... ? konštantná?

a) pre telesá s rozdielnou hmotnosťou v tom istom bode? b) pre telesá s rozdielnou hmotnosťou v rôznych bodoch?



#### anomálie tiažového poľa Zeme (zo satelitných meraní)

### UJASNENIE SI ZÁKLADNÝCH POJMOV

Newtonov gravitačný zákon:

$$|F| = G \frac{m_1 m_2}{r^2} = G \frac{mM}{r^2}$$

z Newtonovho zákona sily vyplýva pre zrýchlenie **g**:

$$F| = mg \implies |g| = \frac{F}{m} \implies |g| = G\frac{M}{r^2} [m \cdot s^{-2}]$$

Veľkosť g nie je závislá o malého m.

UJASNENIE SI ZÁKLADNÝCH POJMOV existuje vlastne rozdiel medzi gravitačným a tiažovým zrýchlením? (alebo ide o synonymum?)

gravitačné - "čistá príťažlivosť" Zeme

tiažové (merané) – výsledok vektorového súčtu gravitačného a odstredivého zrýchlenia Zeme

Pomer odstredivého a gravitačného zrýchlenia Zeme je veľmi malý ≈ 0.005 (na póle je g cca 9.83 m·s<sup>-2</sup>, na rovníku cca 9.78 m·s<sup>-2</sup>)







(na póle je g cca 9.83 m·s<sup>-2</sup>, na rovníku cca 9.78 m·s<sup>-2</sup>)

# GRAVIMETRIA

#### trošku z histórie ...



Galileo Galilei (1564 - 1642)



#### Pierre Simon Laplace (1749 – 1827)





Isaac Newton (1643 - 1727)



Pierre Bouguer (1698 – 1758)

#### **GRAVIMETRIA** úplne prvé prístroje... kyvadlové



$$T = 2\pi \sqrt{\frac{L}{g}}$$

### Meraná veličina v gravimetrii

Merané g je vektor, avšak pracujeme so skalárom g. používané jednotky v gravimetrii systém SI: m·s<sup>-2</sup> používané sú násobky:  $1 \,\mu m \cdot s^{-2} = 10^{-6} \,m \cdot s^{-2}$ v anglosaskej literatúre:  $1 \text{ mGal} = 10 \ \mu \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$  $1 \text{ mGal} = 10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$  $1 \text{ Gal} = 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$  $1 \mu Gal = 0.001 mGal$ 

predstava o presnosti dnešných gravimetrických meraní

# g = 9.82345678 m/s<sup>2</sup>

úroveň mGal

úroveň µGal

# súčasné prístroje merajú s presnosťou $0.01 \text{ do } 0.001 \text{ mGal} = 10 \text{ do } 1 \mu \text{Gal}$



### meranie v gravimetrii

# prístroje na meranie tiažového zrýchlenia sa nazývajú gravimetre

### <u>absolútne</u> gravimetre

merajú priamo g laboratórne, vyššia presnosť: 0.001 mGal, voľný pád, pomalšie (hodiny)



<u>relatívne</u> gravimetre

merajú iba rozdiel ∆g terénne, nižšia presnosť: 0.01-0.005 mGal, pružinový systém rýchlejšie (minúty)



**Scintrex CG-5** 

### relatívny (pružinový) gravimeterr

### meranie – manuálne





- 1 torzné vlákno
- 2 astazujúca (zvýrazňujúca) pružina
- 3 rozsahová pružina
- 4 meracia pružina
- 5 vahadlo

## relatívny (pružinový) gravimeterr meranie – automatické (tzv. Autograv systém)

### novší systém







## relatívny (pružinový) gravimeterr meranie – automatické (tzv. Autograv systém)



# relatívny (pružinový) gravimeterr súčasné moderné (state of the art) <u>relatívne gravimetre:</u>



Staršie typy – meraná veličina je počet otáčok skrutky meracej pružiny (prevod na [mGal] pomocou tzv. konštanty prístroja [mGal]/dielik ). Novšie typy – meraná veličina je elektrické napätie, ktoré je opäť prevedené na [mGal] pomocou vnútornej konštanty prístroja ([mGal]/mV).

# relatívny (pružinový) gravimeterr najnovšie <u>relatívne</u> gravimetre:





Scintrex CG-6 (na obr. spolu s CG-5) LG-1 GALILEO (česká firma GF Instruments)

### Meranie a základné spracovanie dát v gravimetrii:

### Zahŕňa v sebe:

- samotné meranie s prístrojom (gravimeter)
- opravu o chod prístroja
- prepočet na absolútnu hodnotu (pri relat. meraniach)
- výpočet chyby merania
- výpočet tzv. Bouguerových anomálií

### meranie v gravimetrii musí sa odstraňovať <u>tzv. chod prístroja (drift)</u> spôsobený: otrasmi, zmenami teploty a tlaku, slapovými účinkami Slnka a Mesiaca (moderné gravimetre ich vedia zrátať)



### meranie v gravimetrii

výsledkom meraní a opravy o chod je hodnota relatívneho tiažového zrýchlenia ∆g, ktoré sa prepočítava na jeho absolútnu hodnotu g, K tomu je potrebné takúto hodnotu g poznať aspoň v jednom bode (meranie s absol. grav. alebo sa využijú body štátnej siete)



Body Štátnej Polohovej Siete (ŠPS) u nás spravuje Geodetický a Kartografický Ústav Bratislava (GKÚ).

### meranie v gravimetrii



Starší systém – tzv. Štátna Gravimetrická Sieť (ŠGS), taktiež pod správou GKÚ.

Základný materiálový parameter v gravimetrii je hustota, študujeme prejavy hustotných nehomogenít v nameranom (anomálnom) poli g jednotky (systém SI): kg·m<sup>-3</sup>

používané sú násobky: 1 g·cm<sup>-3</sup> = 1 kg·dm<sup>-3</sup> = 1 Mg·m<sup>-3</sup> = = 1000 kg·m<sup>-3</sup>

#### Rozpätie hustôt minerálov: od 0.98 (ľad) po 22.59 g·cm<sup>-3</sup> (čisté Osmium) (príklad: olovo: 11.34 g·cm<sup>-3</sup>, zlato: 19.32 g·cm<sup>-3</sup>)





Rozpätie hustôt hornín: od 1.65 (hlina) po 3.35 g·cm<sup>-3</sup> (eklogit) (granit: 2.65 g·cm<sup>-3</sup>, vápenec: 2.70 g·cm<sup>-3</sup>, fylit: 2.75 g·cm<sup>-3</sup>)

Priemerná hustota vrchnej časti zemskej kôry na základe gravimetrie je približne 2.67 g·cm<sup>-3</sup>.

#### magmatické horniny

nárast hustoty s bázicitou,
okrem toho efuzívne sú
vždy ľahšie ako plutonické

#### metamorfované horniny

- závisí od typu metamorfózy

#### sedimentárne horniny

 dôležitý je nárast hustoty s hĺbkou + kompakcia horniny (súvisí s vekom)



Obr. 3. Závislosť prirodzených hustôt na hĺbke panví. Vysvetlivky: 1 - viedenská panva, 2 - dunajská panva, 3 - Výchoslovenská nížina (Šefara et al., 1987).

#### nepriame metódy určovania hustôt – zo seizmológie



kvízové otázky: Ako sa volá diskontinuita medzi plášťom a vonkajším jadrom?

> A medzi vnútorným a vonkajším jadrom?

#### nepriame metódy určovania hustôt – zo seizmológie



Ako sa volá diskontinuita medzi plášťom a vonkajším jadrom? Gutenberg-Wiechert

A medzi vnútorným a vonkajším jadrom? Lehmann-Bullen základy gravimetrie – spracovanie údajov

v aplikovanej gravimetrii (na geologické účely) sa však nevyhodnocuje priamo merané tiažové zrýchlenie g, ale sa počítajú tzv.

> ÚPLNÉ BOUGUEROVE ANOMÁLIE (ÚBA)

## merané tiaživé zrýchlenie g v sebe zahŕňa okrem vplyvu geológie aj iné vplyvy:

- vplyv zemepisnej šírky (odstredivého zrýchlenia) vzorec pre tzv. normálne tiažové zrýchlenie: g<sub>n</sub> = 978049(1 + 0.0052884sin<sup>2</sup>φ) [mGal] (približne to znamená zmenu 0.01 mGal na 10 m vzdialenosť v S-J smere)
- vplyv nadmorskej výšky (pokles g s rastúcou výškou) tzv. vertikálny gradient = -0.3086h [mGal] (cca 0.01 mGal na 3 cm vo vertikálnom smere)
- vplyv reliéfu: blízke kopce znižujú merané g, doliny tak isto…

### Úplné Bouguerove anomálie (ÚBA)

$$\acute{U}BA = \Delta g = g_{mer} - g_{teor}$$

### od tiažového účinku celej (reálnej ) Zeme...



### ... sa odpočíta tiažový účinok teoretickej Zeme...



účinok teoretickej Zeme sa skladá z účinku referenčného elipsoidu a ...


spracovanie v gravimetrii (tvorba ÚBA)

účinok teoretickej Zeme sa skladá z účinku referenčného elipsoidu a sférickej dosky...



spracovanie v gravimetrii (tvorba ÚBA)

# účinok teoretickej Zeme sa skladá z účinku referen. elipsoidu a sférickej dosky a topografie



#### spracovanie v gravimetrii (tvorba ÚBA) - matematické vyjadrenie

 $\Delta g_{B} = UBA = g - g_{n} + 0.3086h - 0.0419h\rho - B + T$ 

g – meraná tiaž (opravená o chod a prepočítaná na absolútnu hodnotu) g<sub>n</sub> – normálne pole (účinok elipsoidu) h – nadmorská výška bodu merania ρ – tzv. korekčná (redukčná) hustota (často 2.67 g.cm<sup>-3</sup>) 0.3086h – korekcia "vo voľnom vzduchu" (tzv. Fayeova) 0.0419hp – Bouguerova korekcia (účinok rovinnej dosky) B – Bullardov člen ("ohýba" rovinnú dosku) T – terénne korekcie (do vzdialenosti 166.7 km od bodu)

spracovanie v gravimetrii (tvorba ÚBA) Pri niektorých aplikáciách sa používajú upravené vzťahy (verzie) ÚBA:

anomália NUBA = g –  $g_n$  + 0.3086h – 0.0419h $\rho$ sa nazýva ako <u>tzv. neúplná Bouguerova anomália</u>

anomália  $\Delta g_{Fay} = g - g_n + 0.3086h$ sa nazýva ako <u>tzv. Fayeova anomália</u> alebo <u>anomália vo voľnom vzduchu</u> (odstránený vplyv výšok)















výsledkom je prejav anomálnych hustotných nehomogenít v zemskej kôre (až vo vrchnom plášti)

#### Praktické ukážky (výhod) výpočtu ÚBA:

- vymapovanie priebehu kanalizačného zberača, Bratislava, Gagarinova ul.
- hľadanie podzemných chodieb pod Veľkou terasou (Oravský zámok)
- vymapovanie rozsahu maarového telesa, Pinciná, Lučenec

#### kanalizačný zberač, Gagarinova ul., BA





#### kanalizačný zberač, Gagarinova ul., BA



#### kanalizačný zberač, Gagarinova ul., BA



#### kanalizačný zberač, Gagarinova ul., BA NBA= g + 0.3086h - 0.0419hp



#### Praktické ukážky (výhod) výpočtu ÚBA:

 hľadanie podzemných chodieb pod Veľkou terasou (Oravský zámok)







cieľom prieskumu bolo nájsť možné spojovacie chodby medzi tunelom a opevnením

pohľad od prístupovej cesty na zámok



výrazný prejav ostrej hrany za múrmi (vzduch = chýbajúce hmoty = pokles  $\Delta g$ )



az po aplikovaní vsetkých korekcii (aj opravy o gravit. účinok múrov) sa v mape úplných Bouguerových anomálií prejaví prítomnosť tunelu a ostatných hustotných nehomogenít

#### Praktické ukážky (výhod) výpočtu ÚBA:

#### vymapovanie rozsahu maarového telesa, Pinciná, Lučenec



súčasný maar, Nemecko



schematická výplň maarového telesa (diatomity, bentonity, alginity...)

nadmorské výšky



merané tiažové zrýchlenie g



19.78

tzv. Fayeove anomálie (odstránený hlavný vplyv výšok)



Úplné **Bouguerove** Anomálie (odstránené všetky negeologické vplyvy)



#### ÚBA (2.67 g.cm<sup>-3</sup>) – územie Slovenska



# *interpretácia v gravimetrii* INTERPRETÁCIA –

#### kvalitatívna/kvantitatívna

kvalitatívna – opisuje kvalitatívne pole ÚBA (znížené hodnoty = znížené hustoty objektov alebo vplyv geometrie telies, zvýšené... naopak) kvantitatívna – určuje hĺbkové, rozmenrové, tvarové a hustotné parametre študovaných geologických objektov

### dôležité pojmy:

*a) priama úloha* – pri zadaných parametroch telies vypočítať ich gravitačný účinok (tzv. <u>modelovanie</u>)

b) obrátená úloha – opačná úloha (náročnejšia)

### interpretácia v gravimetrii



mnohoznačnosť (nejednoznačnosť) interpretácie v gravimetrii – vieme vyriešiť iba pomocou doplňujúcich (nezávislých) údajov a informácií

# INTERPRETÁCIA – kvalitatívna priebeh gravitačného účinku (ÚBA) nad zlomom (poklesom)



INTERPRETÁCIA – kvalitatívna príklad: úplné Bouguerove anomálie z oblasti Mŕtveho mora (sedimenty mora sú ľahšie ako okolie)



# INTERPRETÁCIA – kvantitatívna tzv. metóda polovičnej šírky

jednoduchý príklad – Bouguerova anomália prejavu soľného diapíru,lokalita Lousiana príbrežná oblasť) (Nettleton, 1976)



z polovičnej šírky "odpichnutej" anomálie je možné odhadnúť vrchný okraj soľného diapíru



# INTERPRETÁCIA – kvantitatívna tzv. hustotné modelovanie



### **INTERPRETÁCIA – hustotné modelovanie**

výsledok hustotného modelovania – profil z Európskej platformy cez Západné Karpaty do Panónskej oblasti,

model siaha až do hĺbky 170 km



# využitie gravimetrie

- v regionálnej a štruktúrnej geológii
- v ložiskovom a ropnom prieskume
- detekcia dutín

(inžiniersky, environmentálny prieskum, archeológia, ...)

- atď. (hustotné nehomogenity)

# výsledok hustotného modelovania – profil zo subdukcie oceánickej platne Nasca pod juhoamerický kontinent (model siaha až do 250 km)


## výsledok hustotného modelovania – profil cez Malé Karpaty a Dunajskú panvu, SR (model siaha do 70 km)



### výsledky prieskumu karbonatitového ložiska Cataláo, Brazília

#### geologická mapa štruktúry



#### Bouguerove anomálie





#### výsledok 3D hustotného a suscept. modelovania

### lokalita Wolfsberg, Rakúsko, 2012



priestor bývalej bane na hnedé uhlie (neogénny vek)

### lokalita Wolfsberg, Rakúsko, 2012



výsledná mapa úplných Bouguerových anomálií (krok: 2 x 2 m)



lokalita Wolfsberg, Rakúsko, 2012

> výsledky vrtného prieskumu (spolu s našimi hĺbkovými odhadmi – tzv. metóda Eulerovej dekonvolúcie)

### lokalita Wolfsberg, Rakúsko, 2012

### odkopaná dutina



Abb. 4: Freilegung des durch die geophysikalische Untersuchung festgestellten Hohlraumes (ca. 60 m³) mit einer Überlagerung von etwa 3,5 m



lokalita Wolfsberg, Rakúsko, porovnanie rokov 2012 a 2016 (kontrolné merania)



#### výsledky geofyzikálneho prieskumu Dómu Sv. Mikuláša v Trnave



Obr. 8 Mapa priebehu lokálnych neúplných Bouguerových anomálií v priestore kostola (so zavedením opráv o gravitacný úcinok múrov a odstráneným trendom), kor. hustota = 1.80 g.cm



spojenie výsledkov mikrogravimetrie a metódy georadaru (GPR), overené videoinšpekciou



## Cheopsova pyramída, Egypt – francúzsky mikrogravimetrický projekt





By LACQUES LARSHMANAN Compagnie de Prospection Géoghysique Française Passence, France and LACQUES MONTLUCON Electricité de France Paris, France

## Cheopsova pyramída, Egypt – francúzsky mikrograv. projekt

#### štruktúra pyramídy



#### merané priestory



### Cheopsova pyramída, Egypt – francúzsky mikrograv. projekt





### tvorba Bouguerovej anomálie - odstránenie gravitačných účinkov známych štruktúr



model hustotného "rozvrstvenia" pyramídy

### Cheopsova pyramída, Egypt – francúzsky mikrograv. projekt <u>výsledky</u>

### hlavný výsledok:

### zistenie dominantnej negatívnej anomálie v západnej časti prístupovej chodby do "královninej" pohrebnej miestnosti



#### overenie anomálie:





3 vrty dosiahli po 2.1 m dutinu vyplnenú pieskom, (modelovaný objem dosahuje až 40 m<sup>-3</sup>)

### Cheopsova pyramída, Egypt – francúzsky mikrograv. projekt <u>výsledky – možná interpretácia</u>



Densities of the large block structure of the Cheops Pyramid.

### zvyšok pieskovej rampy



#### Zaujímavosť – rok 2017: objavenie novej dutiny (tzv. Big Void) v Cheopsovej pyramíde pomocou registrácie kozmického žiarenia (muóny).









#### Zaujímavosť – rok 2017: objavenie novej dutiny (tzv. Big Void) v Cheopsovej pyramíde pomocou registrácie kozmického žiarenia (muóny).







# Bolo by možné prítomnosť tejto dutiny overiť presnými gravimetrickými meraniami na povrchu pyramídy?



modelované 4 scenáre (výška 5 a 7 m)





# Bolo by možné prítomnosť tejto dutiny overiť presnými gravimetrickými meraniami na povrchu pyramídy? – asi áno...





Hrubá izočiara približne vymedzuje plochu, na ktorej by mohla byť daná dutina "merateľná" pomocou súčasných moderných gravimetrov.

### GRAVIMETRIA

### Zhrnutie:

- meraná veličina: tiažové zrýchlenie g
- prístroje gravimetre (absolútne, relatívne)
- jednotky v gravimetrii μm·s<sup>-2</sup>, v praxi ale mGal, μGal
- fyzikálny parameter minerálov a hornín: hustota
- spracovanie meraní (úplné Bouguerove anomálie)
- interpretácia kvalitatívna a kvantitatívna
- príklady využitia gravimetrie (hustotné nehomogenity)

### **ZOSTÁZIA** predpokladá kompenzáciu litostatických tlakov od horninových celkov litosféry v určitej hĺbke (astenosféra).



### tzv. Airyho model a Prattov model

### CHAMP

### staršie satelitné systémy: GRACE a CHAMP

### nový systém: GOCE



### SST: Satellite-to-Satellite Tracking

#### Launched 2000.

- Single satellite.
- High-low SST.
- Polar gap ~3°.
- Instruments:
  - vector and scalar magnetometers,
  - accelerometer,
  - star cameras,
  - GPS.



### GRACE

- Launched 2002.
- Two-satellites.
- High-low-SST & low-low-SST.
- Polar gap ~1°.
- Time-varying gravity field.
- Instruments:
  - accelerometer,
  - star cameras,
  - GPS.

### C A U GPS satellites



### nový systém: GOCE

štart: 17. marec 2009 koniec: 11. november 2013 výška preletu nad povrchom Zeme: 260 km



