

kapitola 2

GRAVIMETRIA

meranie, spracovanie a interpretácia hodnôt tiažového zrýchlenia

(R. Pašteka)

2.1 ÚVOD	2-1
2.2 MERANIE TIAŽOVÉHO ZRÝCHLENIA	2-4
2.3 VÝPOČET BOUGUEROVÝCH ANOMÁLIÍ.....	2-9
2.4 INTERPRETÁCIA GRAVIMETRICKÝCH ÚDAJOV.....	2-14
2.5 ZÁVER	2-16
2.6 LITERATÚRA	2-17

2.1 Úvod

Z historického pohľadu počínajúc Aristotelom (384 p.K.–322 p.K.), cez Galilea Galilei (1564-1642), Newtona (1643-1727), Laplaceho (1749-1827) a ďalších až po súčasnosť prešli názory na charakter zemskej príťažlivosti a spôsoby jej registrácie veľkými zmenami.

Aristotelova predstava o tiažovej sile bola z pohľadu našich dnešných poznatkov veľmi prostá a dala by sa vysvetliť jednoduchým prirovnaním ku námahе vynaloženej na vrhnutie kameňa: čím bude ťažší, tým väčšiu námahu musíme vykonať a tým je teda viac príťahovaný k zemskej povrchu. To síce sedí, ale nevyplýva z toho ním tvrdená skutočnosť, že čím je teleso ťažšie, tým rýchlejšie musí padať k Zemi. Dnes sa všetci v rámci predmetov fyziky na základných a stredných školách dozvedáme, že tomu tak nie je, ale z historického pohľadu Aristotelovu predstavu vyvrátil až

po niekoľkých storočiach známy taliansky fyzik Galileo Galilei. Podľa niektorých zdrojov robil pokusy s padaním drevených a železných gúľ (viď. obrázok vpravo) a meral čas potrebný na ich dopad na zemský povrch (ako zaujímavosť môže poslúžiť fakt, že tieto



pokusy nevykonával zo známej šikmej veže v Pise, ako to je pre určité okrášlenie uvádzané v literatúre, ale z vyššieho poschodia obyčajného domu). Pri svojich pokusoch zistil, že všetky telesá prekonajú rovnakú vzdialenosť za rovnaký čas, čo svedčí o tom, že im je udeľované rovnaké tiažové zrýchlenie g . Toto zistenie však mohol uskutočniť iba vďaka dost' nepresnej časomiere (podľa výšky stĺpca odtečenej vody vo vedre). Fyzikálne totiž uvedený jav platí iba vo vákuu, v reálnych podmienkach sa prejavuje odpor vzduchu, ktorý je už funkciou hmotnosti. Takže vďaka určitej nepresnosti mali stredovekí mechanici k dispozícii významné zistenie – tiažové zrýchlenie nezávisí od hmotnosti telesa (veľmi pekný pokus známeho súčasného anglického fyzika Briana Coxa nájdete na linku, uvedeného v zozname literatúry). Hlavný Galileiho prínos ohľadom voľného pádu však nie je v uvedených pokusoch, ale v myšlienkovom pokuse, ktorý je možné nájsť v jeho spisoch: spojme ľahké telesá dohromady – spojené telesá by teda podľa Aristotela mali padať rýchlejšie ako každá ich časť (desať k sebe priložených tehál by malo padnúť desaťnásobne rýchlejšie ako jedna tehla – tá by padala skoro ako 'pierko'), čo je logický spor. Na Galileiho prácu (hlavne, čo sa týka pokusov) naviazalo mnoho ďalších, avšak až Isaac Newton, používajúc výsledky práce Johanna Keplera a ďalších vtedajších fyzikov sformuloval gravitačný zákon. Z toho zákona vychádzalo mnoho ďalších pokračovateľov a dá sa povedať, že spolu s prácami Pierre-Simon Marquis de Laplaceho tvorí teoretickú základňu, z ktorej sa odvíja základný aparát aj pre dnešnú gravimetriu – tú časť aplikovanej fyziky, ktorá sa zaoberá meraním, vyhodnocovaním a interpretovaním hodnôt tiažového zrýchlenia (pre záujemcov o historický vývoj základov mechaniky odporúčam knihu Zajac, Šebesta: Historické pramene súčasnej fyziky 1).

Mnohí z ľudí, ktorých stretnete na ulici (okrem úmyselne vyberanej vzorky obyvateľstva do relácie 'Aj múdry schybí') vám odpovedia na otázku ohľadom hodnoty tiažového zrýchlenia hodnotu takmer okamžite hodnotou 9.81 alebo aspoň 10. O fyzikálnych jednotkách už väčšina oslovených nemá ani páru (nevadí – pre čitateľov tohto skriptu by to ale mohlo byť jasné ;-)). Väčšina z takto oslovených ľudí je okrem toho presvedčená, že uvedená hodnota je konštantná. Bolo by fajn, keby absolventi tohoto kurzu aplikovanej geofyziky vedeli z gravimetrie minimálne to, že tomu tak nie je a že hodnota tiažového zrýchlenia závisí od mnohých faktorov (nadmorská výška, zemepisná šírka, morfológia okolitého terénu, lokálne a regionálne hustotné nehomogenity v zemskej kôre

a vrchnom plášti) a mení sa teda od miesta k miestu. Tieto zmeny sú však veľmi malé a pohybujú sa v rámci desatinných miest uvedenej hodnoty v $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ (niektoré až na menej ako šiestom-siedmom desatinnom mieste). V ďalšej časti textu si detailnejšie pohovoríme o niektorých zo spomenutých zákonitostí zmien tiažového zrýchlenia.

Ako už bolo naznačené, veda zaoberajúca sa meraním a vyhodnocovaním tiažového zrýchlenia sa nazýva gravimetria. Z hľadiska toho, za akým účelom sa hodnoty tiažového zrýchlenia g získavajú, sa gravimetria často delí na dve odvetvia: **1. na fyzikálnu geodéziu**, ktorá skúma hodnoty g s ohľadom na zisťovanie tvaru Zeme a **2. aplikovaný gravimetriu**, ktorá merané hodnoty g využíva na určovanie nehomogenít v zemskej kôre, príp. vo vrchnom plášti. Fyzikálna geodézia popisuje tvar Zeme, a to nielen pomocou geometrických útvarov (elipsoid), ale aj pomocou tzv. geoidu, čo je útvar, ktorý nie je definovaný geometricky, ale ako hladina s konštantnou hodnotou tiažového potenciálu. Veľmi dobre sa dá predstaviť ako premietnutý priebeh hladín oceánov a morí do oblasti kontinentov. Táto plocha skutočne zaujíma v oblasti morí a oceánov určitý rovnovážny stav, ktorý je úmerný pôsobeniu tiažového zrýchlenia (hrubo povedané – moria sa „nevyliievajú“ smerom mimo Zem a ani nie sú do nej „vtiahnuté“). V ďalšej časti sa budeme podrobnejšie zaoberať základmi aplikovanej gravimetrie (pre záujemcov o základy fyzikálnej geodézie odporúčam kap. 2 z knihy Hvoždara, Prigancová: Zem-naša planéta; pre pokročilejších kap.2 z knihy Ochaba: Geofyzika).

Ešte pred tým, ako prejdeme na samotný výklad ohľadom merania a vyhodnocovania tiažového zrýchlenia, je potrebné si ujasniť pojmový rozdiel medzi tiažovým a gravitačným zrýchlením (mnohí laici chápú tieto dva pojmy ako synonymá). Tiažové zrýchlenie v sebe obsahuje skutočné pôsobenie hmotnej rotujúcej Zeme na objekt na jej povrchu, pričom je potrebné vziať do úvahy skutočnosť, že na daný objekt pôsobí aj odstredivé zrýchlenie v dôsledku rotácie Zeme. Prísne fyzikálne vzaté, nejde o odstredivé zrýchlenie, ale o zotrvačnú silu vznikajúcu v dôsledku neinerciálnosti danej sústavy v bode merania na povrchu Zeme. Prakticky to znamená, že prítomnosť tohoto zrýchlenia pôsobí proti samotnej príťažlivosti Zeme (čistá príťažlivosť Zeme je popisovaná gravitačným zrýchlením). Z uvedeného vyplýva, že tiažové zrýchlenie má nižšiu hodnotu

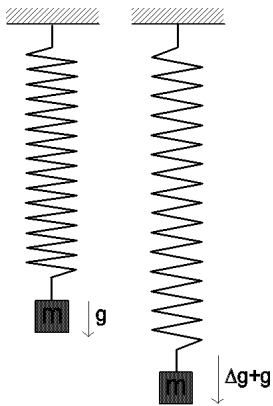
oproti gravitačnému a tento rozdiel sa mení so zemepisnou šírkou (na rovníku približne $9.78 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ a na póloch približne $9.83 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$).

2.2 Meranie tiažového zrýchlenia

V aplikovanej gravimetrii je teda základnou meranou fyzikálnou veličinou tiažové zrýchlenie g – odvodená jednotka v sústave SI je $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$. V dôsledku skutočnosti, že väčšinou pracujeme iba s veľmi malými desatinnými dielmi tejto jednotky sa používa predložka mikro ($\mu\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$), ktorá vraví o faktore 10^{-6} , ktorým je odvodená jednotka vynásobená. V západnej Európe, USA, Kanade a Austrálii sa stále používa stará jednotka zo sústavy CGS, a to tzv. Gal (podľa Galilea, pričom platí: $1 \text{ Gal} = 10^{-2} \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$), hlavne však jeho násobok mGal (miliGal). Najdôležitejší prevodový vzťah najpoužívanejších jednotiek je nasledujúci:

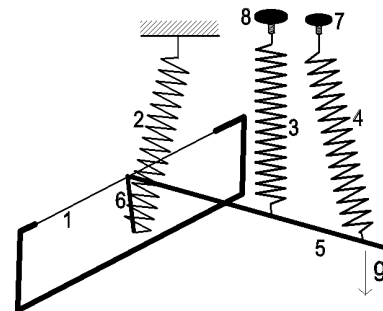
$$1 \text{ mGal} = 10 \mu\text{m}\cdot\text{s}^{-2}.$$

Prístroje na meranie tiažového zrýchlenia sa nazývajú **gravimetre** a delia sa podľa meracieho princípu a druhu získanej hodnoty na tzv. absolútne a relatívne. **Absolútne gravimetre** sú také prístroje, ktoré ako výsledok meracieho procesu dávajú priamo



hodnotu tiažového zrýchlenia g . Ide o laboratórne prístroje, ktorých merací princíp je založený na buď voľnom páde (známe teliesko je opakovane vytáňované nahor a ponechané voľnému pádu na presne zmeranom úseku dráhy) alebo na princípe fyzikálneho kyvadla. Merací proces je často veľmi zdĺhavý (na jednu hodnotu g je často potrebné previesť niekoľkohodinové až dňové meranie), prístroje bývajú viazané na laboratórium a ich preprava je značne komplikovaná. Na druhej strane však poskytujú veľmi presné

hodnoty g (s presnosťou $0.01 \mu\text{m}\cdot\text{s}^{-2} = 0.001 \text{ mGal}$), ktoré sú potrebné pre vedecké, ale aj praktické účely – pre merania pomocou relatívnych gravimetrov. Na základe týchto meraní sa vytvárajú body tzv. štátnej gravimetrickej siete (podobne ako existuje štátna nivelačná sieť). Tieto body sa väčšinou umiestňujú na stabilné miesta (pri starších stabilizovaných budovách



– často kostoloch), sú katalogizované a slúžia na ďalšie merania pomocou terénnych prístrojov. **Relatívne gravimetre** sú prenosné terénne prístroje, ktoré umožňujú veľmi rýchle meranie rozdielov tiažového zrýchlenia. V tom tkvie ich principiálna nevýhoda - dokážu zmerať iba relatívny rozdiel v tiažovom zrýchlení medzi jednotlivými bodmi navzájom. Pri niektorých aplikáciách je v konečnom dôsledku postačujúca aj táto informácia, ale v princípe je možné pri použití výsledkov absolútnych meraní určiť absolútnu hodnotu tiažového zrýchlenia g aj v ďalších bodoch (ak poznáme absolútnu hodnotu na predchádzajúcom bode, tak k nej pripočítame zistený rozdiel). Základom meracieho systému vo väčšine relatívnych gravimetrov je systém kremenných pružín a princíp merania schematicky znázorňujú dva priložené obrázky na predchádzajúcej strane. Zmena polohy meracieho systému (obr. vľavo hore) je spojená so zmenou tiažového zrýchlenia, čo sa prejaví natiahnutím (skrátением) jemnej pružiny pri náraste (poklese) hodnoty g . Moderné, elektronické, prístroje skutočne pracujú týmto spôsobom - zaznamenávajú elektrické napätie, ktoré je potrebné na kompenzáciu polohy závažia, zaveseného na pružine. Staršie, mechanické, prístroje mali omnoho zložitejší princíp – (obr. vpravo dolu). Najdôležitejšou súčasťou systému bolo tzv. vahadlo (5), ktoré svojou hmotnosťou zabezpečovalo výchylku, kompenzovanú tzv. meracou pružinou (4). Táto pružina bola naťahovaná a uvoľňovaná pomocou meracej skrutky (7). Vahadlo bolo jedným svojím koncom upevnené na torznom vlákne (1), ktoré umožňovalo vykonávať výchylky vo vertikálnom smere. Výchylky sboli zvýrazňované pomocou tzv. astazujúcej pružiny (2), ktorá bola uchytená na konci kolmej tyčinky (6) na vahadlo. V rovnovážnom stave vahadlo pôsobila astazujúca pružina presne v kolmom smere na vahadlo a nespôsobovala tak žiadnu zmenu. Akonáhle sa však vahadlo vychýlilo, začala astazujúca pružina svojím pôsobením cez kolmú tyčinku (6) pôsobiť na vahadlo tak, že zvýraznila jeho výchylku. Okrem už uvedených pružín na obrázku bola veľmi dôležitá tzv. rozsahová pružina (3), ktorá bola uchytená na vahadle bližšie k torznému vláknu a zabezpečovala tak výraznejšie výchylky vahadla pri rovnakom počte otáčok skrutky (8), ako to bolo pri meracej pružine (4). Znamenalo to toľko, že ak sa merací systém ocitol v mieste s výraznou zmenou tiaže, ktorú by nebolo možné vykompenzovať činnosťou meracej skrutky, „nastúpila do akcie“ pružina rozsahová. Aj tá má však určitý interval

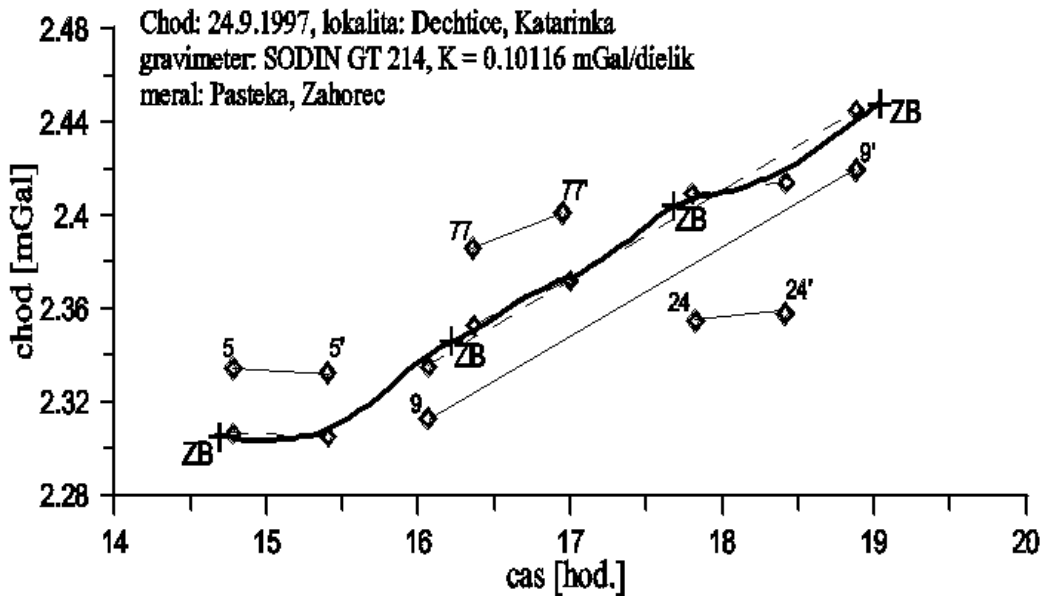
svojej pôsobnosti, a tak majú relatívne gravimetre často výrobcom uvádzaný rozsah použitia (najvhodnejší je rozsah cez celú Zem).

Základom meracieho systému relatívnych gravimetrov je teda systém kremenných pružín alebo izolovaná vertikálna meracia pružina (moderné prístroje). Tieto prístroje sú veľmi citlivé na otrasy a celkovo je ich výroba veľmi náročná (v súčasnosti existuje iba niekoľko výrobcov na celom svete) – meracia pružina sa ručne vyrába zo skla a odpad pri takejto výrobe (nepodarky) dosahuje až vyše 50%. Špičkové firmy na výrobu relatívnych gravimetrov utajujú svoj výrobný postup a táto tradícia sa predáva iba osobne a na starostlivo vybraného kandidáta (podobne ako je v pivovarníctve prenášané výrobné tajomstvo na nastupujúceho sládku). Relatívne gravimetre boli v praxi často slangovo nazývané ako tzv. stotinkové gravimetre. Súviselo to s ich vnútornou presnosťou – dokázali totiž zmerať zmeny v tiažovom zrýchlení s presnosťou na jednu stotinu mGal (jednu desatinu $\mu\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$). Súčasné moderné gravimetre sú však už tisícinkové - ich vnútorná presnosť je už na úrovni 0.001 mGal).



Princíp merania relatívnym pružinovým gravimetrom bol pri starších prístrojoch založený na zhorizontovaní meracieho systému do vodorovnej polohy a nastavení vahadla do horizontálnej polohy pomocou meracej pružiny (vytiahnutím alebo spustením). Tento pohyb vahadla sa prenášal do okuláru cez tzv. svetelný index, čo bol svetelný prúžok, ktorý bolo potrebné nastaviť na výrobcom určenú rysku – vtedy sa vahadlo nachádzalo vo vodorovnej polohe. Na otáčkomerí skrutky meracej pružiny sa odčítal počet otáčok a meranie bolo hotové. Z uvedeného vyplýva, že výsledkom merania boli vždy iba počet otáčok – tie bolo treba previesť na hodnotu tiažového zrýchlenia (jednotka $\mu\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ alebo mGal), čo sa vykonávalo pomocou tzv. konštanty prístroja. Moderné gravimetre je potrebné pri meraní zhorizontovať a potom sa po stlačení píslišnej klávesy na ovládacom paneli prístroja spustí cyklus meraní (väčšinou počas jednej minúty), pri ktorom dochádza ku opakovanej automatickej kompenzácii polohy závažia

na pružine cez elektrické napätie (závažie je súčasťou kondenzátora). Výsledkom merania je potom hodnota elektrického napätia, ktoré je aj v tomto prípade prepočítané na hodnotu tiažového zrýchlenia pomocou konštanty prístroja. **Konštanta prístroja** teda udáva hodnotu v mGal na jeden dielik (otáčku) meracej skrutky alebo na jeden miliVolt použitého elektrického napätia. Hodnota konštanty býva uvádzaná výrobcom na prístroji (na kovovej doštičke – staršie prístroje) alebo je zadaná v riadiacom softvéri gravimetra (moderné prístroje). Táto hodnota sa však časom mení – v dôsledku zmien elastických vlastností kremenných pružín. Kvôli uvedenej vlastnosti je potrebné pre relatívne gravimetre v opakovaných časových intervaloch (minimálne raz za rok) určiť ich aktuálnu hodnotu konštanty. Táto procedúra sa v gravimetrii (podobne je to aj v iných fyzikálnych a technických odvetviach) nazýva ciachovanie. **Ciachovanie** sa uskutočňuje na tzv. základniciach, čo sú miesta, kde sú známe absolútne hodnoty tiažového zrýchlenia - tie boli buď zmerané pomocou absolútneho gravimetra alebo z týchto meraní opakovane odvodené pomocou presných relatívnych gravimetrov. Ciachovacie základnice môžu byť tzv. šírkové a výškové – súvisí to s tým, že tiažové zrýchlenie sa výrazne mení pri zmene zemepisnej šírky a nadmorskej výšky (detailnejšie diskutované nižšie). Pozostávajú z vhodne označených bodov, v ktorých je známe g alebo aspoň rozdiel v tiažovom zrýchlení Δg . Najbližšia výšková základnica v Bratislave je malá výšková základnica v budove Stavebnej fakulty STU na Radlinského ul. Tu bol pomocou opakovaného merania s veľmi presnými gravimetrami stanovený rozdiel medzi 22. poschodím a -2. suterénom (okolo 21 mGal). Veľká ciachovacia základnica u nás na Slovensku je stále vo výstavbe a zahŕňa v sebe body vo Vysokých Tatrách o ich okolí. Naša katedra, ako aj Ústav vied o Zemi SAV, využíva na ciachovanie relatívnych gravimetrov ciachovaciu základnicu Hochkar v Rakúsku, kde je rozdiel Δg v rámci 4 meracích bodov na úrovni cca. 200 mGal. Ciachovanie prebieha tak, že opakovane sa meria na týchto bodoch a potom je známy tiažový rozdiel Δg porovnaný s tým, ktorý vyplýva z aktuálnej hodnoty konštanty gravimetra – táto je potom následne upravená tak, aby tieto dve skutočnosti „sedeli“ (v rámci odhadnutej chyby merania).



Terénne meranie relatívnym gravimetrom je časovo náročnejšie, ako to býva u väčšiny ostatných geofyzikálnych metód. Meranie na jednom bode trvá zväčša rádovo minúty a okrem toho je potrebné niektoré body merať opakovane z dôvodu určenia chyby merania a tzv. chodu prístroja. Relatívny pružinový gravimeter je totiž z určitého pohľadu dosť výnimočný prístroj (kvôli jemnosti a iným vlastnostiam meracieho systému) a má jednu veľmi nepríjemnú vlastnosť, a síce, že meria počas dňa zakaždým inakšie. Čitateľ sa môže podiviť nad takouto zvláštnosťou, ale je to skutočne tak. V dôsledku slabých nárazov, zmien teploty a tlaku (gravimeter je voči tomuto vplyvu z väčšej časti chránený umiestnením do vákuovanej termosky a vnútorným vyhrievaním systému), gravitačného účinku Slnka a Mesiaca (tzv. slapy; tieto sú v moderných prístrojoch odstraňované automaticky na základe vypočítaných hodnôt pre daný bod merania) nameria gravimeter na tom istom bode počas dňa zakaždým inú hodnotu (rozdiely sa môžu pohybovať až do desiatín mGal). Táto vlastnosť sa sumárne nazýva ako **chod gravimetra**. Ako takúto nepríjemnú vlastnosť obísť a ošetriť? Jedno šťastie je v tom, že tieto zmeny nie sú vo väčšine prípadov náhle a príliš výrazné, ale sú blízke k lineárnemu priebehu s prípadnými slabými lokálnymi extrémami (viď. obrázok hore). Chod gravimetra je potrebné konštruovať pre každý deň merania samostatne. Pri jeho zostrojovaní sa využívajú hlavne merania na tzv. základných bodoch (na obrázku skratka ZB), ktoré bývajú väčšinou stabilnejšie a vhodne zvýraznené body v teréne a na ktorých sa opakovane meria počas celého pracovného dňa. Okrem týchto meraní sa využívajú aj dvojice opakovaných

meraní na zvolených bodoch v rôznych časových okamihoch (na obrázku sú to dvojice meraní na bodoch 5, 9, 24 a 77) - tieto dvojice sa po vynesení posúvajú takým spôsobom, aby čo najvhodnejším spôsobom popísali lokálne zmeny chodu a zapadli do celkového priebehu, daného jednoduchým pospájaním hodnôt na základných bodoch. Takýmto spôsobom skonštruované hodnoty chodu gravimetra sa odčítavajú od všetkých meraní počas dňa – tým sa teda eliminuje neprijemná časová závislosť získaných hodnôt tiažového zrýchlenia. Tento krok sa v spracovávaní gravimetrických meraní nazýva ako **oprava o chod** (pre kontrolu musia byť po oprave o chod všetky hodnoty na základných bodoch rovnaké – už by nemala existovať časová premenlivosť nameraných hodnôt). Po oprave o chod a prepočtom zisteného relatívneho rozdielu v tiažovom zrýchlení na bod so známou absolútnou hodnotou g (väčšinou bod tzv. gravimetrickej siete) získavame absolútnu hodnotu g na meranom bode.

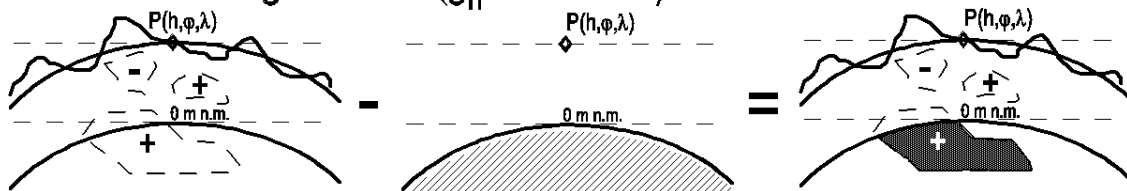
2.3 Výpočet Bouguerových anomálií – prostriedok na geologickú interpretáciu

Pre praktické výstupy do geológie a inžinierstva sa skoro nikdy nepracuje priamo s nameranou hodnotou tiažového zrýchlenia g , ale iba s jej časťou – tzv. anomálnou hodnotou. Táto anomália je v počítaná ako rozdiel medzi nameranou hodnotou a určitou teoretickou hodnotou, ktorú by sme namerali na ideálnej (skoro homogénnej) Zemi. Všetko, čo je potom v týchto hodnotách ‘mimo normál’ (anomálne) svedčí o prítomnosti anomálnych hmôt v zemskom telese (väčšinou v zemskej kôre) a je cieľom interpretácie. V prvom rade je potrebné si uvedomiť, že namerané zrýchlenie je skutočne tiažové (v zmysle rozdelenia v úvode), čiže v sebe zahrňuje aj vplyv rotácie Zeme (závislosť od zemepisnej šírky). Ďalej enormne závisí od nadmorskej výšky a výrazne sa v ňom prejavuje vplyv okolitých terénnych nerovností. Všetky uvedené vplyvy je potrebné z nameraných hodnôt odstrániť (redukovať, opraviť), čo sa deje pri výpočte tzv. **úplnej Bouguerovej anomálie** (nesie meno podľa francúzskeho vedca Pierre Bouguera (1698-1758), ktorý ako jeden z prvých dokázal vopred vypočítať odhad nameraných hodnôt tiažového zrýchlenia v závislosti od polohy a výšky bodu merania). Nasledujúci vzťah popisuje matematicky výpočet úplnej Bouguerovej anomálie a v ďalšej časti textu si vysvetlíme význam jeho jednotlivých členov:

$$\Delta g_B(h, \varphi, \lambda) = g - g_n(\varphi) + 0.3086h - 0.0419h\rho + T(h, \varphi, \lambda) - B(h) \text{ [mGal]}, \quad (3.1)$$

kde h je nadmorská výška, φ , λ sú zemepisná šírka a dĺžka bodu merania, ρ je tzv. redukčná (korekčná) hustota Bouguerovej dosky, g je hodnota nameraného tiažového zrýchlenia (opravená o chod a prepočítaná na absolútnu hodnotu), $g_n(\varphi)$ je tzv. normálne pole, ktoré je funkciou zemepisnej šírky, $T(h, \varphi, \lambda)$ je tzv. terénna korekcia a $B(h)$ je tzv. Bullardov člen. Význam jednotlivých členov si vysvetlíme krok za krokom a určitú predstavu o ich účinku môže čitateľ získať z priložených obrázkov, kde je schématicky znázornené krok za krokom odčítanie prejavov častí teoretickej Zeme od nameranej hodnoty a vznik prejavov hustotných anomalít v rôznych častiach zemskej kôry.

odčítanie normálneho poľa a Fayova redukcia



V prvom kroku sa od nameraného tiažového zrýchlenia odčíta **normálne pole** g_n , ktoré charakterizuje účinok referenčného elipsoidu, ktorého hustota sa v pripovrchovej časti blíži k hodnote $2.7 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ a jeho vonkajšie ohraničenie je totožné s nulovou nadmorskou výškou. Okrem toho je odčítaním normálneho poľa eliminovaný vplyv rotácie Zeme, takže v ďalšom je potrebné na hodnotu získanej anomálie pozerat' ako na gravitačné zrýchlenie. Bežné vzťahy pre normálne pole ho vypočítavajú na úrovni 0 m n.m., takže je potrebné túto hodnotu „zdvihnúť“ do bodu merania. Táto operácia sa deje pomocou tzv. **Fayeovej redukcie (korekcie)**, ktorá je daná vzťahom $R_F = 0.3086h$ (detailné odvodenie sa preberá v rámci predmetu Gravimetria v 1. ročníku Mgr. programu Aplikovaná a environmentálna geofyzika), kde h je nadmorská výška bodu. Znamená to toľko, že pri náraste (poklese) nadmorskej výšky o 1 m gravitačné zrýchlenie klesne (narastie) o hodnotu 0.3086 mGal. Keďže teoretickú hodnotu normálneho poľa "presúvame" z úrovne 0 m n.m. do bodu merania s výškou h , bude nám tento účinok klesať (vzdľahujeme sa od Zeme) – preto sa dá celý výraz odčítania normálneho poľa napísať v tvare $g - (g_n - 0.3086h) = g - g_n + 0.3086h$. Skutočnosť, že dostávame vo vzorci pre úplnú

Bouguerovu anomáliu výraz $+0.3086h$, môže niekoho zmiast' tým spôsobom, že bude predpokladať, že nameraná hodnota g sa "presúva" z bodu merania na úroveň 0 m n.m. (lebo tu vystupuje kladné znamienko pri výraze $0.3086h$), čo je však chybná interpretácia. Odčítaním normálneho poľa, ktoré popisuje teoretickú Zem od 0 m n. m. až po jej stred nám vystúpi na povrch prejav anomalií v tejto oblasti, ktoré sa svojou hustotou líšia od teoreticky predpokladanej ($2.7 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ pre plytšie časti referenčného elipsoidu).

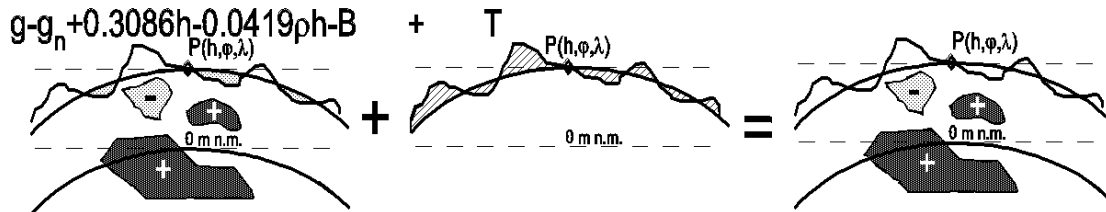
odčítanie účinku sférickej dosky - Bouguerova redukcia a Bullardov člen

$$g - g_n + 0.3086 h - 0.0419\rho h - B$$

V ďalšom kroku potrebujeme odpočítať účinok hmôt medzi bodom merania a nulovou úrovňou – to sa deje zavedením tzv. **Bougerovej redukcie (korekcie)**, čo je v podstate odpočítanie gravitačného účinku tzv. Bouguerovej dosky, ktorej účinok je rovný $0.0419h\rho$ (detailné odvodenie sa preberá v rámci predmetu Gravimetria v 1. ročníku Mgr. programu Aplikovaná a environmentálna geofyzika), kde ρ je jej hustota (tzv. redukčná alebo korekčná hustota). Ide o dosť hypotetické teleso – je to horizontálna hrubá doska, idúca v každom laterálnom smere do nekonečna. Kvôli tomu, aby toto teleso kopírovalo guľové priblíženie ku tvaru Zeme, je potrebné odpočítať hodnotu tzv. **Bullardovho člena**, ktorý "opraví" účinok Bouguerovej dosky na účinok sférickej dosky, ukončenej vo vzdialenosti 166.7 km od bodu výpočtu (sférická doska sa dá predstaviť v tvare hrubej kruhovej čapice, sediacej na hlave Zeme). Odpočítaním účinku sférickej dosky sa vyplní priestor medzi bodom výpočtu a nulovou úrovňou – vystúpia tak hustotne rozdielne anomaly oproti použitej redukčnej/korekčnej hustote tejto dosky. Ako redukčná/korekčná hustota sa často volí hodnota $2.67 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, ktorá je približnou strednou hustotou vrchnej časti zemskej kôry. Túto hodnotu je však možné meniť, čím môžeme regulovať prejavy rôznych hustotných nehomogenít v kôre oproti zvolenej hustote. Uvedený postup je základom tzv. Nettletonovej metódy na určovanie strednej hustoty zemskej kôry, o ktorej bude reč ešte neskôr.

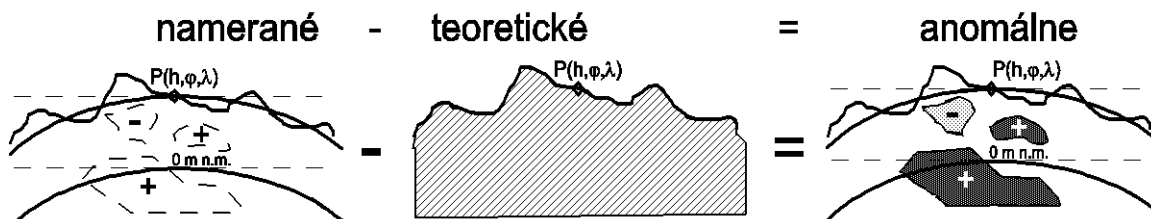
V poslednom kroku výpočtu úplnej Bouguerovej anomálie sa zavádzajú tzv. **terénne korekcie (po starom "topokorekcie")**, ktoré zabezpečujú odstránenie gravitačného

zavedenie topokorekcií



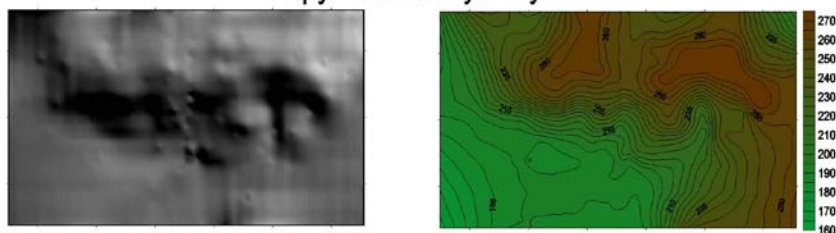
účinku okolitých terénnych tvarov a okrem toho opravujú "chybné" odčítanie účinkov výplní dolín, ktoré bolo spôsobené pri vykonaní Bouguerovej redukcie. Tieto obidva dôvody na zavedenie topokorekcií majú rozdielnu fyzikálnu podstatu, avšak znamienkovo sú totožné. Výplne dolín boli odčítané pri odčítaní účinku sférickej dosky počas Bouguerovej redukcie, takže je potrebné ich spätne vyplniť hmotami (s tou istou hustotou) a ich účinok pripočítať. Kladné terénne nerovnosti (kopce) v blízkosti bodu merania svojou prítomnosťou pôsobia proti meranému tiažovému zrýchleniu (ich ťažisko sa väčšinou nachádza nad horizontálnou rovinou, prechádzajúcou cez bod výpočtu), a tak je potrebné ich objem vyplniť hmotami (opäť s redukčnou/korekčnou hustotou) a ich gravitačný účinok prirátať (meranú hodnotu znižovali). Takže z uvedeného vyplýva, že topokorekcie popisujú účinky výplní dolín a kopcov a majú kladné znamienko. Vzniká tu otázka – ako pôsobí na merané tiažové zrýchlenie vzdialený kopec, ktorý je v dôsledku zakrivenia Zeme celý zanorený pod horizontálnu úroveň, prechádzajúcu cez bod merania (odpoveď ponechávam na čitateľa)? Kvôli kompletnosti prezentovanej tématiky je potrebné uviesť, že v praxi sa môžeme stretnúť s tzv. neúplnými Bouguerovými anomáliami, ktoré sú vypočítané bez zavedenia terénnych korekcií (a často aj bez uvažovania zakrivenia Zeme, čiže bez odčítania Bullardovho členu) alebo s tzv. Fayeovými anomáliami, ktoré v sebe obsahujú iba odčítanie normálneho poľa a Fayeovu redukciu/korekciu vo voľnom vzduchu (používajú sa najmä vo fyzikálnej geodézii).

celkový pohľad na vznik anomálií Bouguerovej anomálie

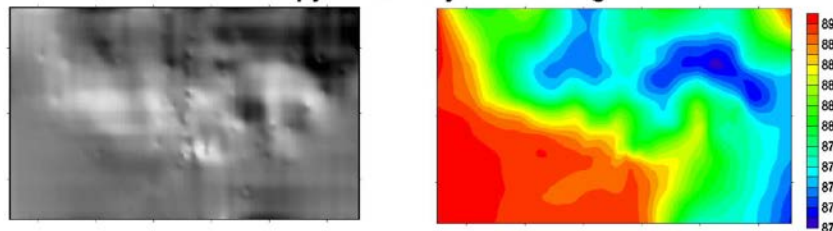


Pri výpočte Bouguerových anomálií vystúpi na povrch prejav hustotne anomálnych štruktúr, pričom v pôvodnom nameranom poli tiažového zrýchlenia sa tieto prejavy väčšinou nedajú vôbec rozpoznať. Na ilustráciu tejto skutočnosti si vezmeme reálne údaje z gravimetrického prieskumu maarovej štruktúry z juho-východného Slovenska (údaje boli poskytnuté na učebné účely firmou Geocomplex . Bratislava). Maarové štruktúry vznikajú často po explozívnej deštrukcii sopiek, pričom ich výplň (ktorá je narušená v dôsledku vulkanickej činnosti) tvorí hustotne výraznú štruktúru (s nižšou hustotou) oproti svojmu okoliu. Oblasť vnútra maaru sa potom často stávala miestom, kde sa v limnickom prostredí tvorili fácie, ktoré premenili vulkanický materiál na iné druhy hornín, medzi nimi aj na tzv. alginit, čo je roponosná bridlica. Tieto bývajú predmetom ťažby. Gravimetrický prieskum dokáže efektívnym spôsobom zistiť takúto hustotne výraznú

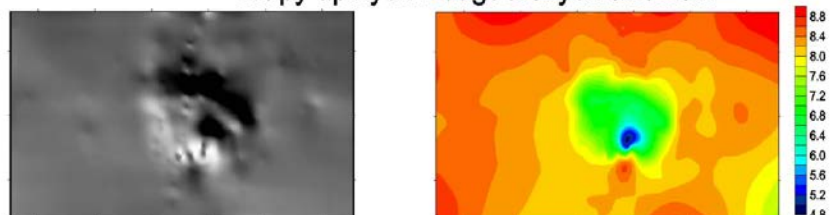
mapy nadmorských výšok



mapy nameraných hodnôt g



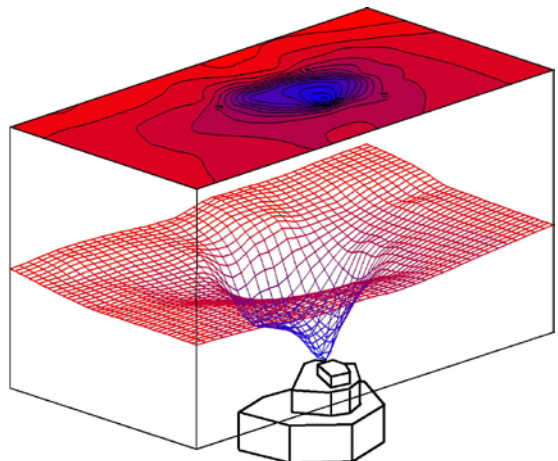
mapy úplných Bouguerových anomálií



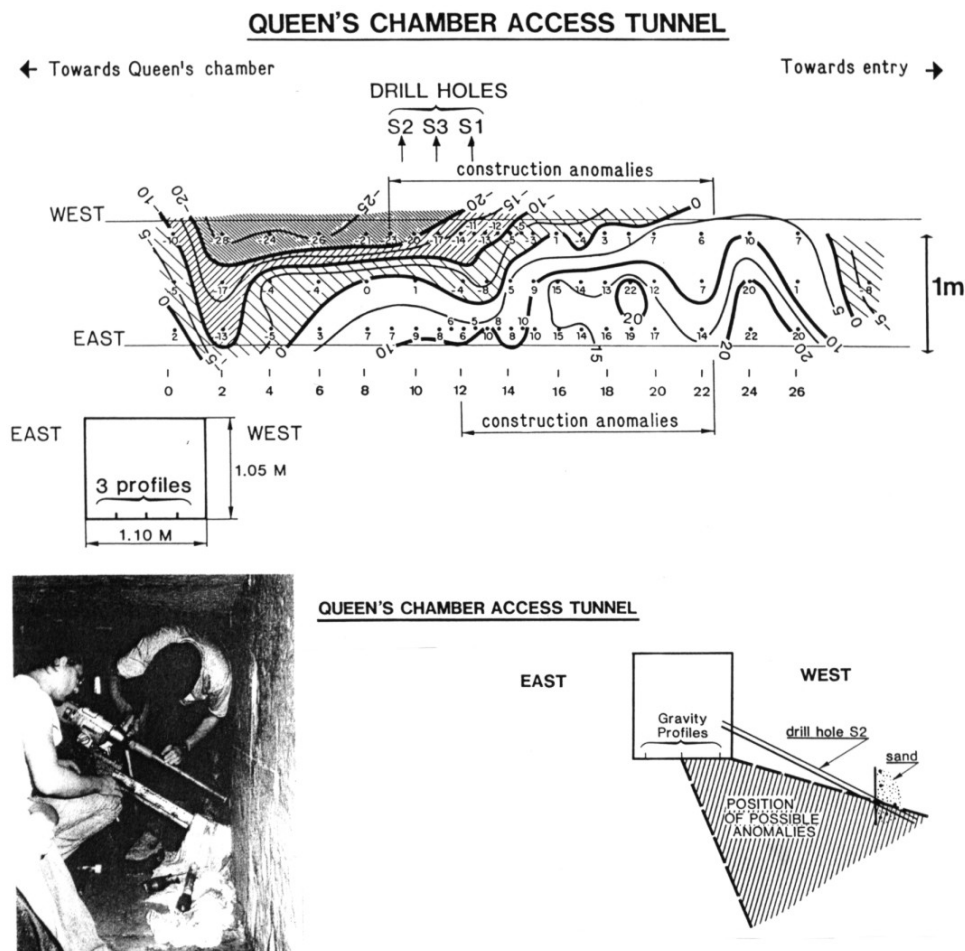
nehomogenitu. Na obrázku hore sú v poradí zobrazené hodnoty nadmorských výšok, nameraného tiažového zrýchlenia (opraveného o chod a prepočítaného na absolútne hodnoty) a napokon úplných Bouguerových anomálií pre redukčnú/korekčnú hustotu $2.2 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$. Zakaždým je pole zobrazené v ľavej časti formou nasvieteného povrchu (nasvietenie z pravého horného rohu) a v pravej časti vo forme farebnej mapy izočiar. Ako je vidieť na obrázku, priebeh poľa nameraného tiažového zrýchlenia má charakter, ktorý je presne obrátený voči mape reliéfu terénu – v oblastiach s najnižšími nadmorskými výškami (ľavý spodný roh) boli namerané najvyššie hodnoty g a v oblasti s vyššou výškou tomu bolo naopak. Oproti tomu je hneď vidieť, že v mape úplných Bouguerových anomálií (pre redukčnú hustotu $2.2 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$) sa prítomnosť ľahkej výplne maaru prejavila výrazným izolovaným minimom približne v strede obrázku, ktoré je možné v ďalšom postupe dobre interpretovať. Použitá redukčná/korekčná hustota (hustota Bouguerovej dosky) bola zistená pomocou už spomenutej Nettletonovej metódy, ktorá je založená na opakovanom výpočte hodnôt Δg_B pre postupnosť hodnôt redukčnej hustoty na zvolenom profile s výraznou morfológiou. Pri zvolení príliš nízkej hodnoty hustoty má získaná krivka Δg_B taký istý charakter ako krivka nadmorských výšok z toho dôvodu, že táto hustota je príliš nízka na vykompenzovanie účinku reliéfu (tam, kde bol kopec stále zostáva zvyšok kladného maxima). Pri voľbe príliš vysokej redukčnej hustoty je v oblasti kopcov korigovaný príliš veľký účinok (väčší ako by v skutočnosti mal byť), a tak získa vypočítaná krivka Δg_B obrátený charakter voči krivke výšok. Ako najvhodnejšia sa vyberá vždy tá hustota, pre ktorú vypočítaná krivka úplných Bouguerových anomálií čo najmenej odráža prejav terénu.

2.4 Interpretácia gravimetrických údajov

Hodnoty úplných Bouguerových anomálií sa ďalej interpretujú pomocou rôznych kvalitatívnych a kvantitatívnych postupov. Detailnejší popis týchto interpretačných postupov presahuje náplň tohoto predmetu a preberá sa vo vyšších ročníkoch. Dôležité je však spomenúť základné rozdelenie



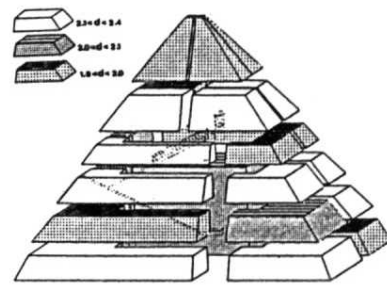
úloh v gravimetrii (plati všeobecne aj pre celú geofyziku) na priamu a obrátenú. **Priama úloha** vypočítava zo zadaných parametrov (fyzikálnych a geometrických) fyzikálne pole, ktoré sa potom často porovnáva s nameraným (tzv. modelovanie). Na priloženom obrázku hore je dobre vidieť modelované gravitačné pole od sústavy vertikálnych hranolov s polygonálnou podstavou, ktorá popisuje situáciu výplne maaru z predchádzajúceho príkladu. **Obrátená úloha** je presným opakom ku priamej – z nameraného poľa sú určované parametre anomálnych štruktúr (fyzikálne, ako aj hĺbkové a laterálne). Jej riešenie je omnoho náročnejšie ako pri priamej úlohe, a to hlavne kvôli jej principiálnym obmedzeniam, ako sú nejednoznačnosť a nestabilita. Ale to je už naozaj téma pre vyššie ročníky.



Gravimetria sa využíva od vyhľadávania pripovrchových dutín, cez riešenie problémov ropnej geofyziky, hydrogeológie a environmentálnej geológie až po riešenie hustotných pomerov v spodnej zemskej kôre a vrchnom plášti (astenosfére). V niektorých oblastiach ložiskovej geológie môže mať zásadnú výpovednú hodnotu, ako napríklad v uvedenom

príklade na vyhľadávanie márových štruktúr (ložiská alginitu), vyhľadávani ložísk sideritu (vd'aka výraznému hustotnému kontrastu – hustota sideritu sa pohybuje okolo $3.9 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$) a pri riešení mnohých ďalších problémov, kde záujmová štruktúra vytvára hustotne odlišnú anomalitu od svojho okolia. Veľmi zaujímavé sú aplikácie mikrogravimetrie (vysoko presnej gravimetrie) v archeológii pri vyhľadávani dutín. Tu si v krátkosti predstavíme výsledky prieskumu v Cheopsovej pyramíde v Egypte (detailnejšie v prednáške). Koncom osemdesiatych rokov prebehol veľmi zaujímavý francúzsky projekt za účelom zisťovania prejavov neznámych prázdnych priestorov v Cheopsovej pyramíde. Najzaujímavejšie výsledky boli dosiahnuté na prístupovej chodbe do tzv. kráľovnej hrobky, kde výrazná záporná anomália v jej pravej časti dovoľovala predpokladať prítomnosť neznámej dutiny vo vzdialenosti niekoľko metrov od chodby (vid'. horný obrázok). Táto dutina bola skutočne overená pomocou vrtov (s malým priemerom kvôli možnosti poškodenia kvádrov) a na prekvapenie všetkých zúčastnených bola vyplnená pieskom. Pri interpretácii tohoto nálezu sa tu zastavovať nebudeme, ale podotknem iba, že výrazne potvrdil efektívnosť gravimetrie pri riešení problémov tohoto druhu.

Pri riešení všetkých týchto problémov je snaha o čo najefektívnejšie zapájanie moderných numerických algoritmov, počítačových riešení a vizualizácie (napríklad pri prieskume Cheopsovej pyramídy musel byť vytvorený počítačový model celej pyramídy aj so známymi prázdnyimi priestormi). Tieto postupy sú mnohokrát matematicky dosť náročné, ale ich prínos je zrejmý z mnohých aplikácií.



Densities of the large block structure of the Cheops Pyramid.

2.5 Záver

Gravimetria je súčasťou viacerých geofyzikálnych metód a významným spôsobom prispieva ku riešeniu problematiky detekcie a interpretácie hustotných nehomogenít v litosfére. Ďalšie poznatky o tejto veľmi zaujímavej vede je možné získať v rámci viacerých predmetov vo vyšších ročníkoch (najmä v rámci Mgr. programu Aplikovaná a environmentálna geofyzika).

2.6 Použitá (a odporúčaná) literatúra:

- Cox B., pokus s voľným pádom: <https://www.youtube.com/watch?v=E43-CfukEgs&feature=youtu.be>
- Hvoždara M., Prigancová A.: Zem – naša planéta. Veda, Bratislava, 1989, 160 s.
- Lakshmanan J., Montlucon J.: Microgravity probes the Great Pyramid, The Leading Edge 6 (časopis Asociácie prieskumných geofyzikov Severnej Ameriky – SEG), 1987, s. 10–17
- Mareš S., Gruntorád J., Hrách S., Karous M., Marek F., Matolín M., Skopec J.: Úvod do užitej geofyziky. SNTL, Praha, 1990, 677 s.
- Ochaba Š.: Geofyzika. SPN Bratislava, 1986, 366 s.
- Rozimant K., Paštka V., Šefara J.: Gravimetria. Vysokoškolské skriptá Prírodovedecká fakulta UK v Bratislave, 1994, 309 s.
- Šefara J., Bielik M.: Geofyzikálny obraz Západných Karpát a ich okolia. Učebný text, Prírodovedecká fakulta UK v Bratislave, 2009, 171 s.
- Zajac R., Šebesta J.: Historické pramene súčasnej fyziky 1. Alfa, Bratislava, 1990, 396 s.

Kontrolné otázky z oblasti gravimetrie:

1. Aký je rozdiel medzi gravitačným a tiažovým zrýchlením? Alebo ide o synonymá?
2. Aká je jednotka gravitačného zrýchlenia v sústavách CGS a SI? Aký je prepočet medzi nimi? Napíšte hodnotu tiažového zrýchlenia $9.81 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ v jednotkách mGal a $\mu\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$.
3. Aký je rozdiel medzi absolútnymi a relatívnymi gravimetrami (hlavne aké výsledky sa nimi získavajú)?
4. Aká je úloha konštanty gravimetra a ako sa získava jej hodnota?
5. Čo je to chod gravimetra?
6. Akú úlohu plní tzv. základný bod pri terénnych gravimetrických meraniach a kde sa väčšinou umiestňuje?
7. Popíšte vzťah pre výpočet Bougerovej anomálie a vysvetlite jednotlivé kroky, ktoré v nej vystupujú.
8. Aký význam majú terénne korekcie a aké majú znamienko?
9. Aký je základný rozdiel medzi priamou a obrátenou úlohou v gravimetrii (celkovo v geofyzike) ?

10. Uved'te niekoľko oblastí z geologického prieskumu, kde môže byť gravimetria využitá.