

Gravimetria

- na Prif UK v rámci magisterského študijného programu „Aplikovaná a environmentálna geofyzika“ sú v prípade gravimetrie **2 nosné predmety**:

Gravimetria (1) (Pašteka), 1. roč., ZS, povinný predmet, 3/1 základné metodické poznatky (spracovanie, interpretácia)

Gravimetria (2) (Bielik), 1. roč., LS, povinný predmet, 2/0 interpretácia + aplikačné oblasti, najmä v geológii

plus niekoľko ďalších výberových predmetov...

Gravimetria (1)

- stručná náplň predmetu:
 - Zem ako teleso (tvar Zeme), trošku z fyzikálnej geodézie, normálne tiažové pole spracovanie gravimetrických údajov do formy ÚBA (definícia a výpočet úplnej Bouguerovej anomálie, výpočet topokorekcií),
 - základy teórie potenciálu, priama úloha gravimetrie (výpočet gravitačných účinkov jednoduchých a zložitejších telies),
 - základy interpretácie gravimetrických údajov, obrátená úloha gravimetrie, modelovanie, transformácie poľa ÚBA,

Gravimetria (1)

- hodnotenie predmetu (4 kredity):

- vypracovanie cvičení* (15 %)
- priebežné písomky (3 sa semester) (25 %)
- ústna skúška (60 %)

*vypracované cvičenia je potrebné odovzdať do 2 týždňov od dátumu (a hodiny) zadania

e-mailová adresa: roman.pasteka@uniba.sk

(každý deň omeškania znižuje hodnotenie vypracovaného cvičenia o jeden stupeň)

program prednášok **Gravimetria (1)**

- úvod, repetitórium doterajších poznatkov
- tvar Zeme, normálne pole
- korekcie v gravimetrii, topokorekcie
- definícia a výpočet ÚBA
- priama úloha pre jednoduché telesá
- modelovanie účinkov zložitejších telies
- teória obrátenej úlohy
- interpretačné metódy
- transformácie potenciálových polí
- doplňujúce témy (slapy, izostázia, aplikácie)

program cvičení **Gravimetria (1)**

- spracovanie chodov s rôznymi softvérmami
- výpočet normálneho pol'a
- význam Bullardovho člena
- praktický výpočet terénnych korekcií
- výpočet ÚBA
- analýza ÚBA vybraných území SR
- priama úloha pre jednoduché telesá (2D a 3D)
- použitie jednoduchých interpretačných metód
(metóda polovičnej šírky anomálie)
- jednoduchý príklad modelovania (dutiny)
- zložitejší príklad modelovania (geologické telesá)
- použitie transformovaných polí v interpretácii

Gravimetria – základné pojmy

- gravimetria: gravis (ťažký) + metrein (merať)
- historický vývoj:
 - od (Aristotela) Gallilea,
 - cez Newtona ku Poissonovi a Bouguerovi
 - (ďalej Richer, Huygens, Clairaut, Laplace, Stokes, Green, Helmert, Bullard,...)



Galileo Galilei
(1564 - 1642)



Isaac Newton
(1643 - 1727)



Pierre Simon Laplace
(1749 – 1827)



Pierre Bouguer
(1698 – 1758)

Gravimetria – základné pojmy

- Jean Richer (1630-1696) zistil z kyvadlových meraní rozdiely medzi zrýchlením v Paríži a Cayenne, čo interpretoval tvarom Zeme – jej sploštením (oblate spheroid), podobne tak učinil aj I. Newton,
- merania dĺžky šírkového stupňa vo Francúzsku v rokoch 1669 a 1718 však naznačovali na opačné sploštenie (prolate spheroid),
- bolo potrebné túto dôležitú vec „rozlúsknut“

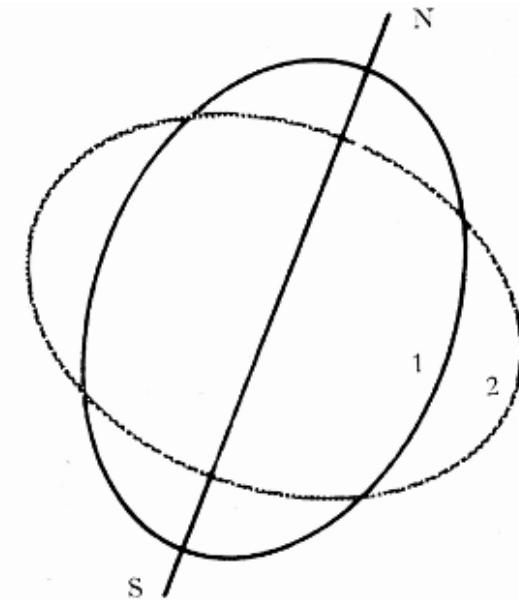


Figure 3.—MEASUREMENTS OF THE LENGTH of a degree of latitude which were completed in different parts of France in 1669 and 1718 gave differing results which suggested that the shape of the earth is not a sphere but a prolate spheroid (1). But Richer's pendulum observation of 1672, as explained by Huygens and Newton, indicated that its shape is that of an oblate spheroid (2). The disagreement is reflected in this drawing. In the 1730's it was resolved in favor of the latter view by two French geodetic expeditions for the measurement of degrees of latitude in the equatorial and polar regions (Ecuador—then part of Peru—and Lapland).

Gravimetria – základné pojmy

- historický vývoj: Pierre Bouguer (1698 - 1758)

mimoriadne zaujímavá postava,

účastník dôležitej expedície do Ekvádoru (1735-1745)

spolu s La Condamine, Godin a Jussieu

(v prípade záujmu poskytnem film:

Voyages of Discovery: Figure of the Earth)

druhá výprava – do Laponska (1736) - A. Celsius a

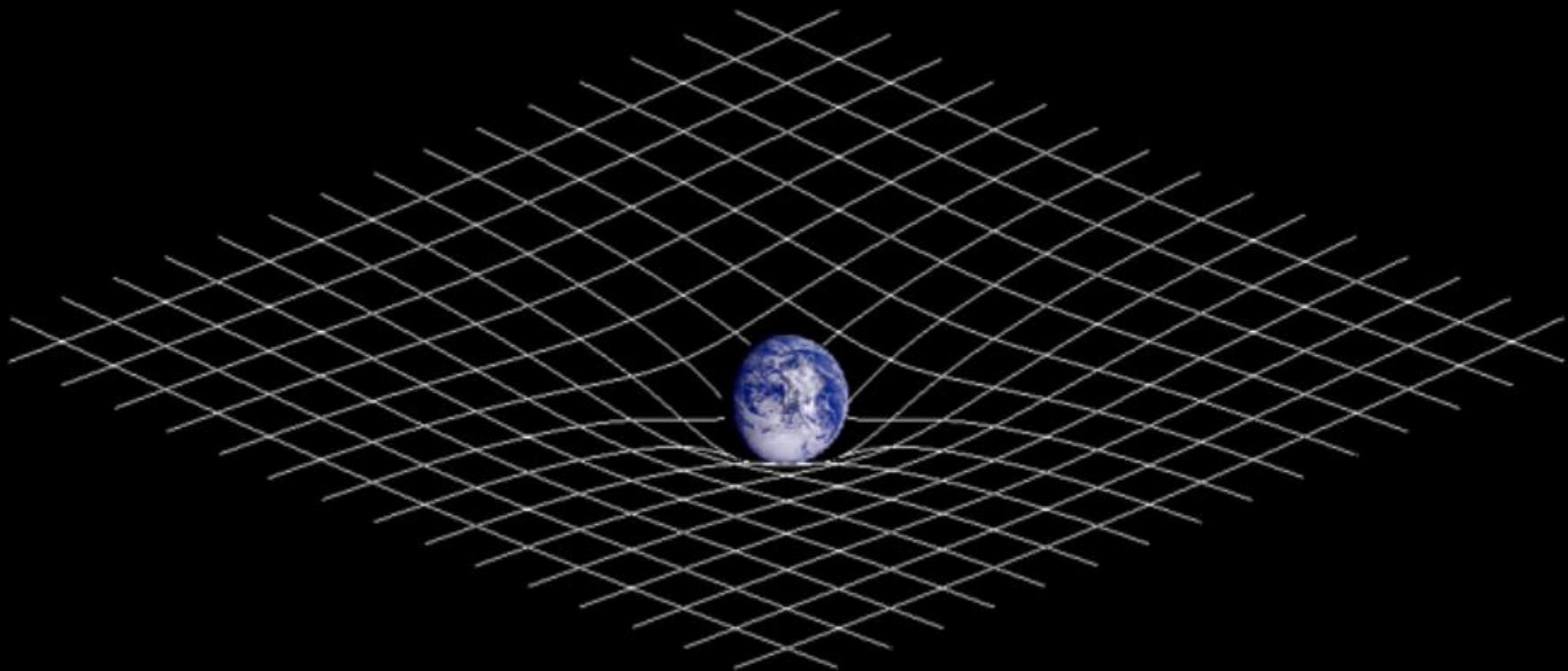
P. Maupertuis)



Gravimetria – základné pojmy

- úplne iný pohľad na gravitáciu (nie ako silové pôsobenie, ale ako vlastnosť časopriestoru) –

Einsteinova všeobecná teória relativity



Gravimetria – základné pojmy

- problémy s prototypom kilogramu

(1889, uložený v BIPM v Sénvres pri Paríži)

(odvtedy vybraný iba v 1946 a 1989)

(zliatina platiny [90%] a irídia [10%])

(vyrobených 40 kópií – po celom svete)



Približná podoba mezinárodního prototypu kilogramu

Za 100 rokov stratal tento prototyp pri porovnaní s inými kópiami hmotnosť cca 100 μg (!).

- strata atómov vodíka (?)
- ošúchanie povrchu pri manipulácii (?)
- “nalepenie molekúl vzduchu na iné kópie” (?)
- v podstate to fyzici nevedia vysvetliť...

Gravimetria – základné pojmy

- meraná **veličina**: tiažové zrýchlenie (g , V_z)
(v ostatných rokoch sa merajú aj jeho zmeny – vyššie gradienty)
- aký je rozdiel medzi **gravitačným** a **tiažovým** zrýchlením? (alebo ide o synonymá?)
- tiažové zrýchlenie je **vektorová veličina**, avšak pre mnohé účely ho berieme ako **skalár**: $|\vec{g}| = g$
- smer vektora tiažového zrýchlenia je takmer identický s vertikálou (odklon sa volá zvislicová odchýlka – je veľmi malá), takže často sa uvažuje: $g \approx V_z$

Gravimetria – základné pojmy

Tiažové a gravitačné polia sú:

konzervatívne (práca, vykonaná po uzavretej dráhe
je nulová)

potenciállové – je možné ho vyjadriť

ako gradient potenciálu: $\vec{g} = \text{grad}(V)$

harmonické – platí preň mimo zdrojov

Laplaceova rovnica: $\nabla^2 V = 0$

(v rámci zdrojov platí Poissonova
rovnica $\nabla^2 V = -4\pi\sigma$).

Vyššie derivácie tiažového (gravitačného)

potenciálu V : $V_z = \partial V / \partial z$, $V_{xz} = \partial^2 V / \partial x \partial z$, $V_{zz} = \partial^2 V / \partial z^2$

Gravimetria – základné jednotky

zrýchlenie:

systém SI: $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$

používané sú násobky: $1 \mu\text{m}\cdot\text{s}^{-2} = 10^{-6} \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$

v anglosaskej literatúre (starý systém CGS) mGal, mgl:

$$1 \text{ Gal} = 10^{-2} \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$$

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

$$1 \text{ mGal} = 10^{-5} \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$$

$$1 \text{ Gal} = 10^{-2} \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$$

$$1 \mu\text{Gal} = 0.001 \text{ mGal}$$

gradient zrýchlenia:

s^{-2} , mGal/m, $\mu\text{Gal}/\text{m}$

$$1 \text{ E} = 10^{-9} \text{ s}^{-2} = 1 \text{ mGal}/10 \text{ km}$$

Gravimetria – základné pojmy

- meranie tiažového zrýchlenia:
 - H. Cavendisch (1797), torzné váhy, (grav. konštanta)
 - kyvadlové prístroje: od F. Bacona (1620)
až po Bullarda (1936), v podstate až po súčasnosť
 - paralelne s tým torzné váhy na zisťovanie niektorých vyšších gradientov V (tzv. Eötvösove váhy)
 - v 1930-1940 nástup pružinových gravimetrov (používaných dodnes; Scintrex CG-3, CG-5, CG-6, ZLS-Burris)
 - od cca 1960 rokov vývoj absolútnych gravimetrov na báze voľného pádu (JILAG, FG-5, A-10)
 - adaptácia pružinových prístrojov na lode a lietadlá
 - vývoj systémov na meranie FTG - gradiometre

Gravimetria – základné pojmy

- meranie tiažového zrýchlenia:

súčasné moderné (state of the art) absolútne gravimetre



Micro-g FG-5
(laboratórny prístroj)



Micro-g A-10
(terénny prístroj)

Gravimetria – základné pojmy

- meranie tiažového zrýchlenia:

súčasné moderné (state of the art) relatívne gravimetre



**LaCoste and
Romberg
(LC&R),
modely G a D**



**Scintrex
CG-3 a
CG-3M**



**Scintrex
CG-5**

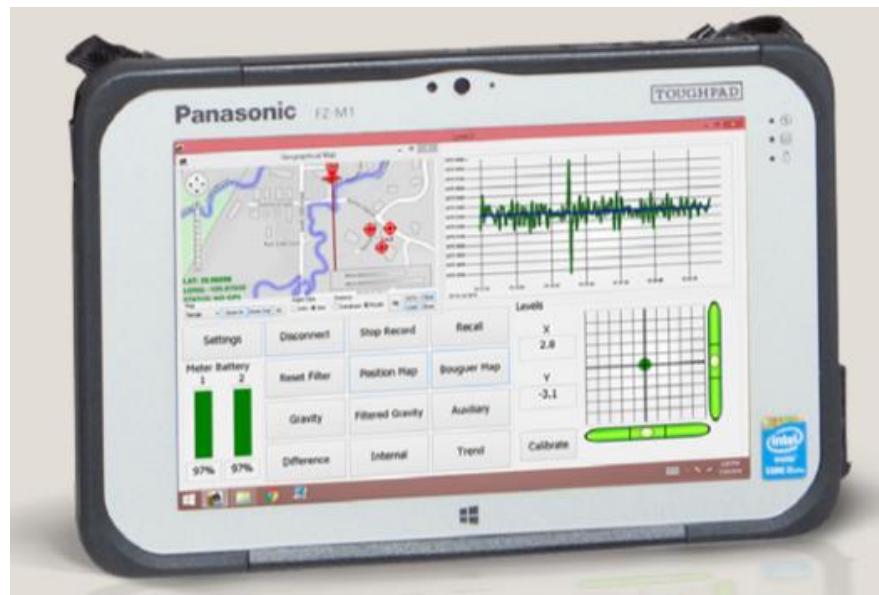


**ZLS-Burris
(skratka pre
Zero Length
Spring)**

Gravimetria – základné pojmy

- meranie tiažového zrýchlenia:

súčasné moderné (state of the art) relatívne gravimetre

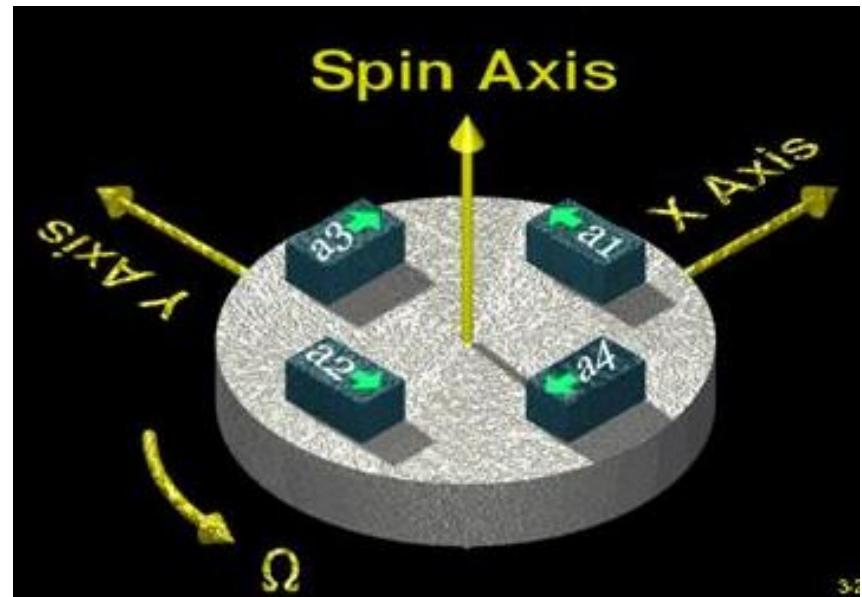


Scintrex CG-6

Gravimetria – základné pojmy

- meranie vyšších gradientov tiažového zrýchlenia
(FTG – Full Tensor Gradient):

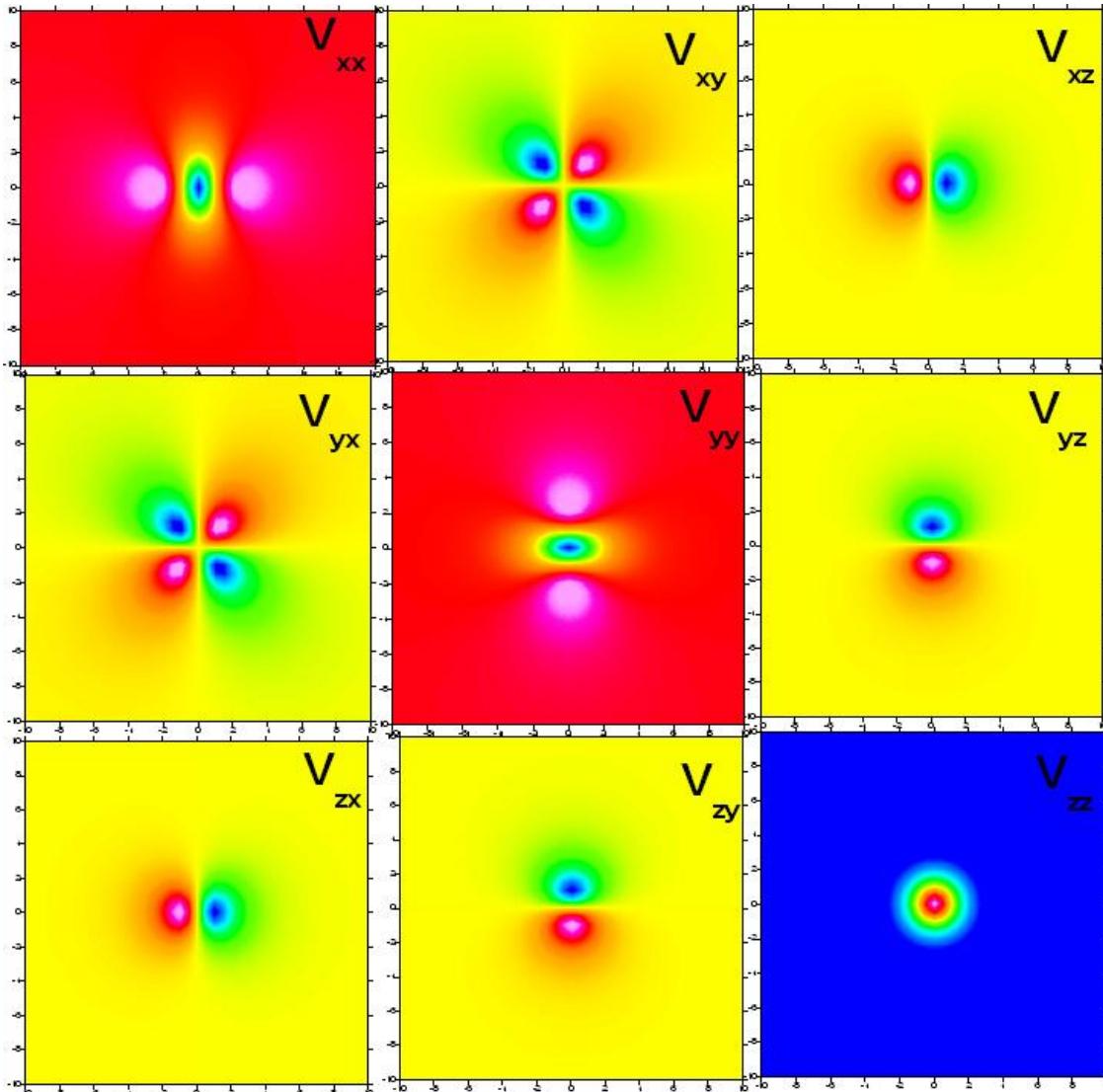
najmodernejšie prístroje (prístupy): gradiometre



rotujúci disk so štyrmi
akcelerometrami (piezoelektrický jav)

zatiaľ používané len na lodiach, lietadlách a družiciach (GOCE)

- meranie vyšších gradientov tiažového zrýchlenia:
5 nezávislých zložiek



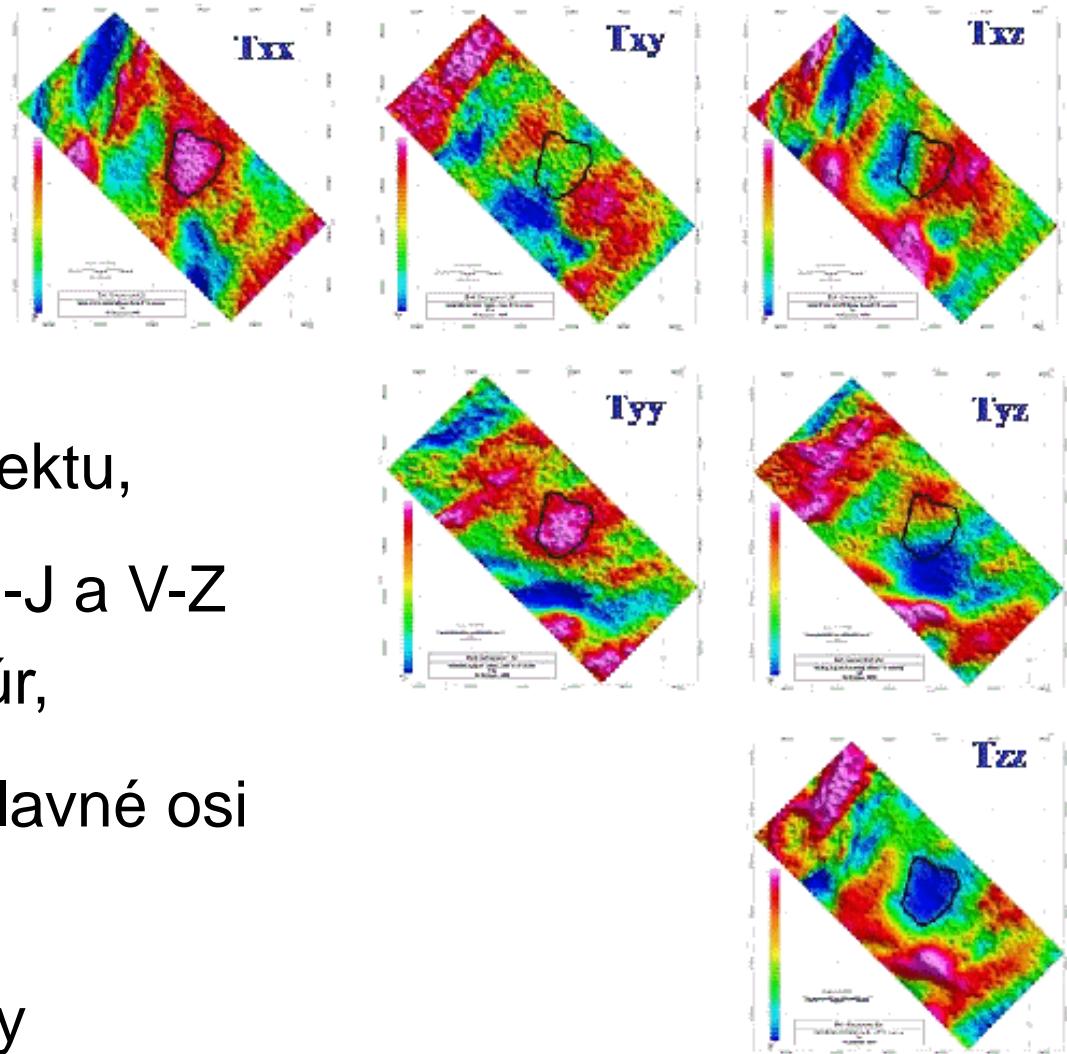
$$\begin{pmatrix} V_{xx} & V_{xy} & V_{xz} \\ V_{yx} & V_{yy} & V_{yz} \\ V_{zx} & V_{zy} & V_{zz} \end{pmatrix}$$

teoretický
príklad: guľa

$$V_{zz} = -(V_{xx} + V_{yy})$$

- meranie vyšších gradientov tiažového zrýchlenia:
praktický príklad:
solný peň

(zdroj: Bell-Geospace)



V_{zz} lokalizuje stred objektu,

V_{xx} a V_{yy} identifikujú S-J a V-Z
okraje štruktúr,

V_{xz} a V_{yz} identifikujú hlavné osi
(tektonika),

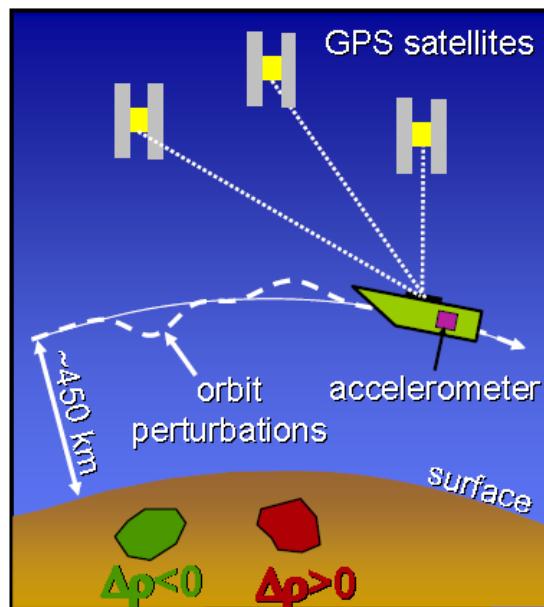
V_{xy} poukazujú na rohy
anomálnych štruktúr,

staršie satelitné systémy: GRACE a CHAMP

nový systém: GOCE

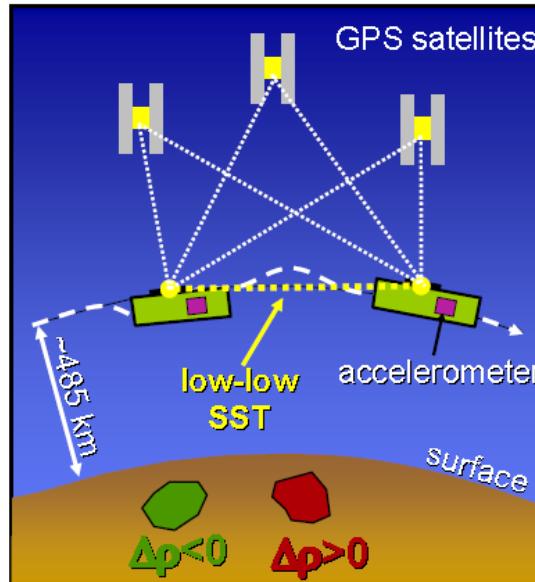


- Launched 2000.
- Single satellite.
- High-low SST.
- Polar gap $\sim 3^\circ$.
- Instruments:
 - vector and scalar magnetometers,
 - accelerometer,
 - star cameras,
 - GPS.



GRACE

- Launched 2002.
- Two-satellites.
- High-low-SST & low-low-SST.
- Polar gap $\sim 1^\circ$.
- Time-varying gravity field.
- Instruments:
 - accelerometer,
 - star cameras,
 - GPS.



SST: Satellite-to-Satellite Tracking

nový systém: GOCE

štart: 17. marec 2009

koniec: 11. november 2013

výška preletu nad
povrchom Zeme: 260 km

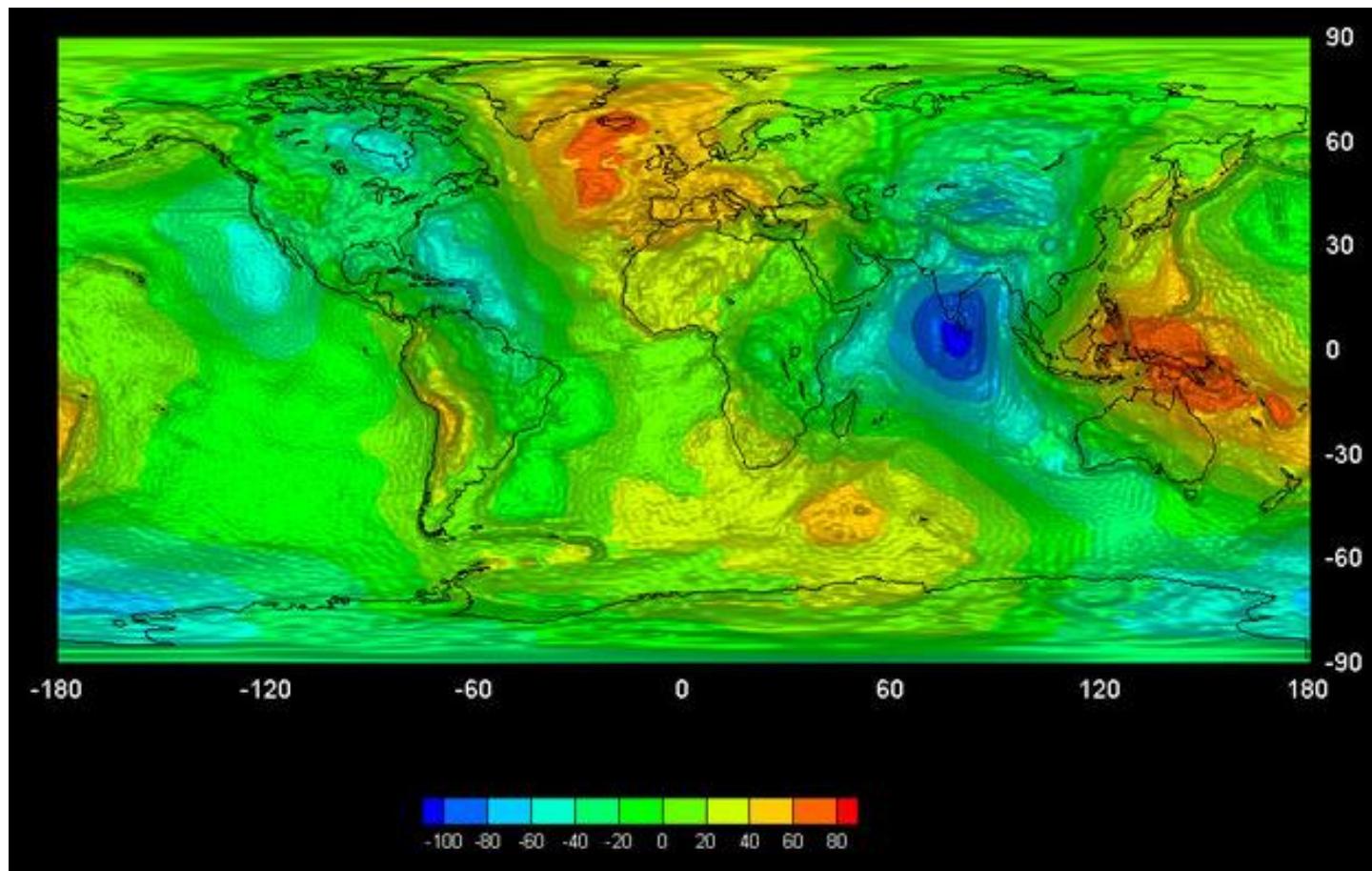


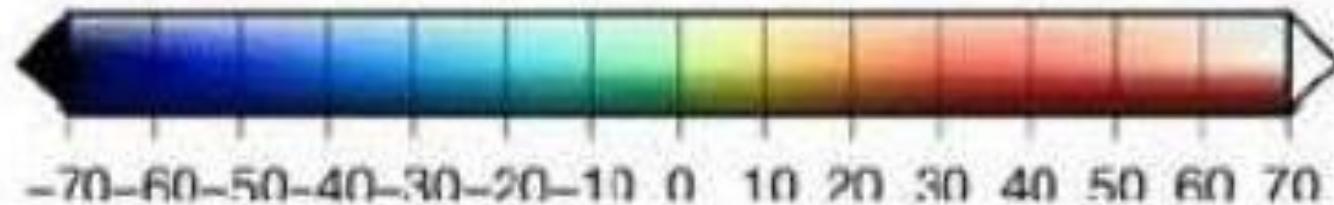
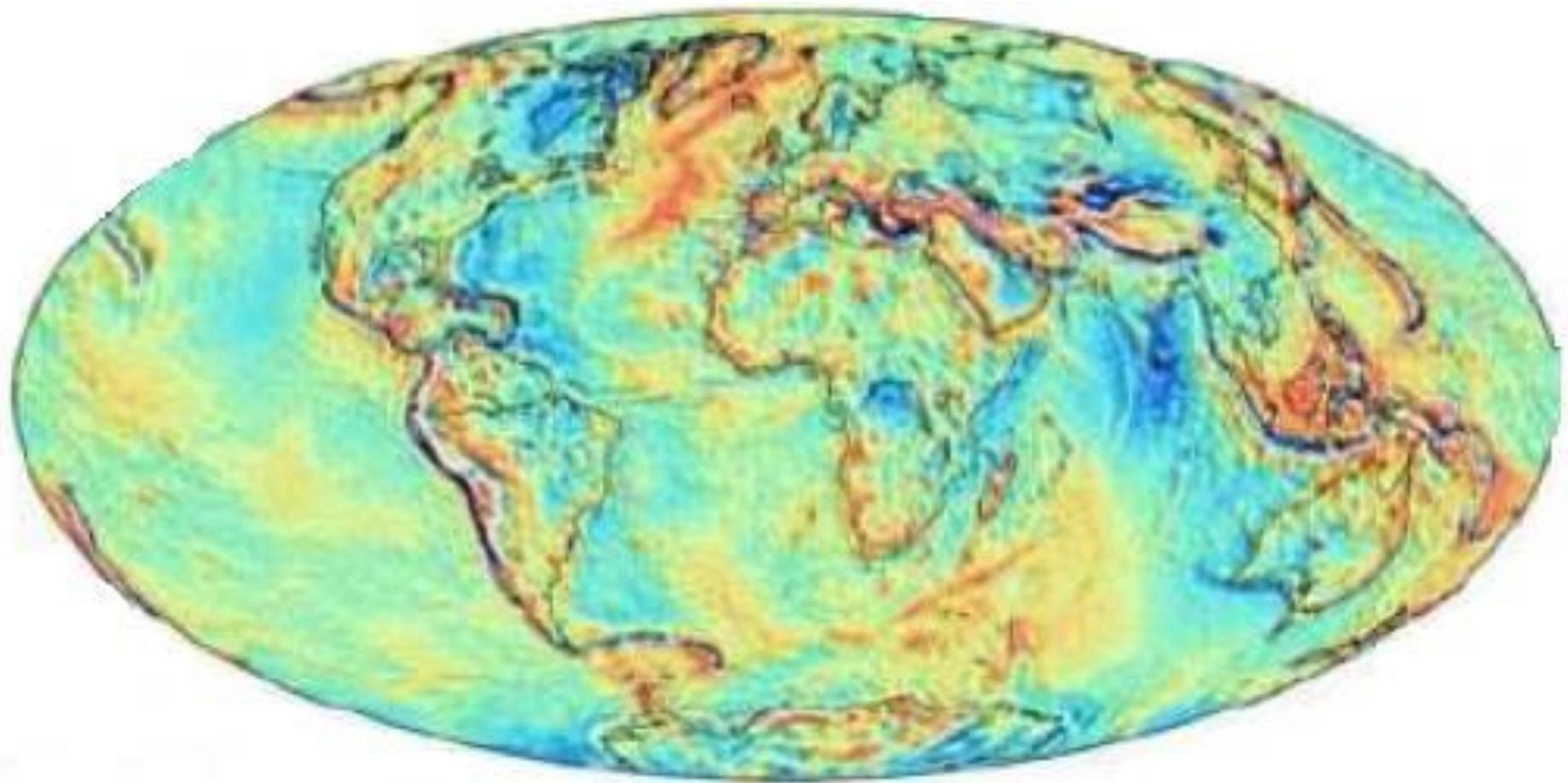
nový systém: GOCE

štart: 17. marec 2009

koniec: 11. november 2013

výška preletu nad
povrchom Zeme: 260 km





anomálie tiažového pola Zeme (zo satelitných meraní, GRACE)

Gravimetria – poznámky ku prvotnému spracovaniu

Prvotné spracovanie gravimetrických meraní:

- oprava o chod gravimetra a
- prepočet na absolútnu hodnotu
(nerobí sa často v prípade mikrogravimetrie)

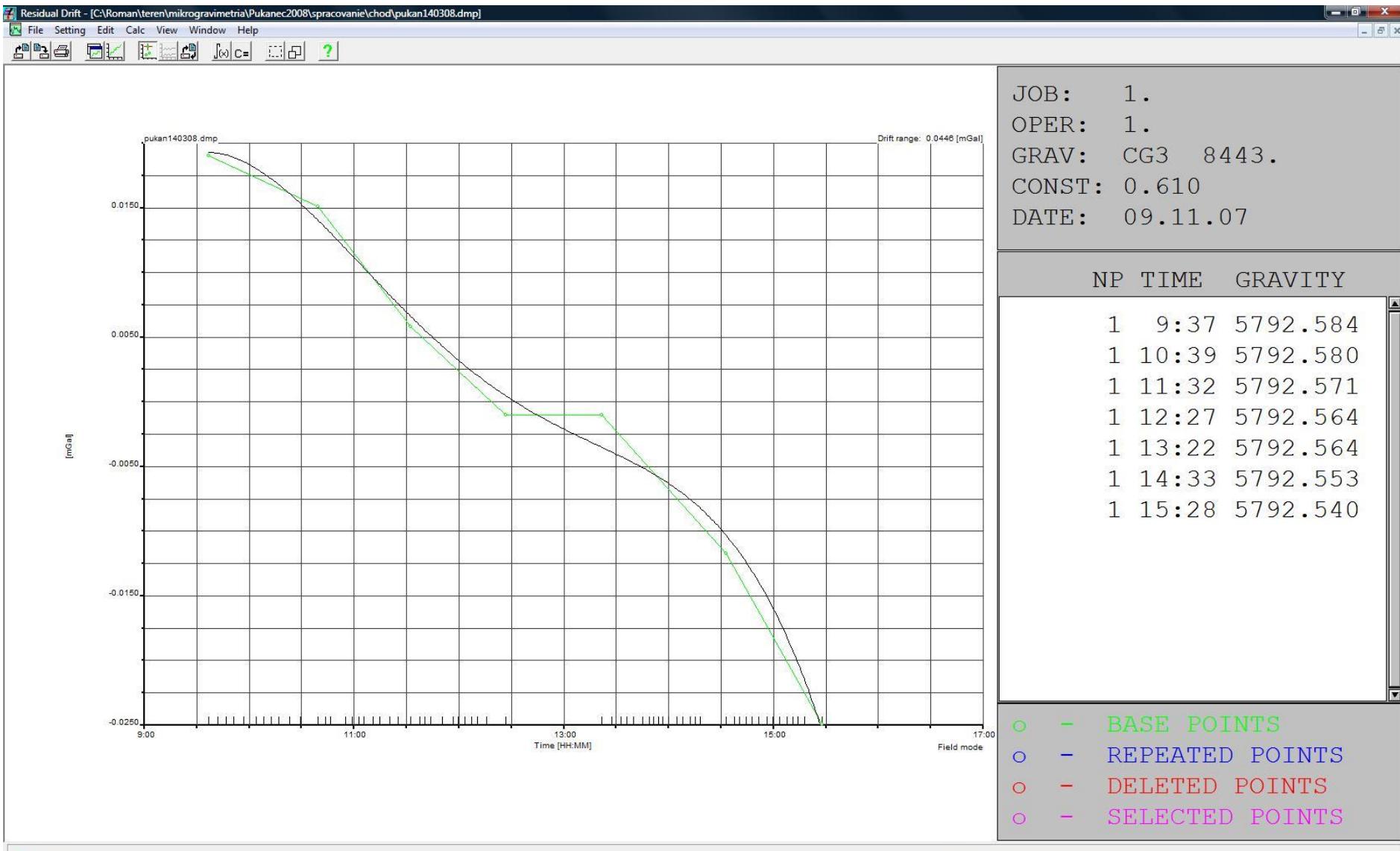
Vo väčšine algoritmov je chod gravimetra aproximovaný pomocou:

- a) polynómov nižšieho stupňa alebo
- b) splajnových funkcií.

Táto approximujúca funkcia je potom odrátaná od všetkých meraných hodnôt.

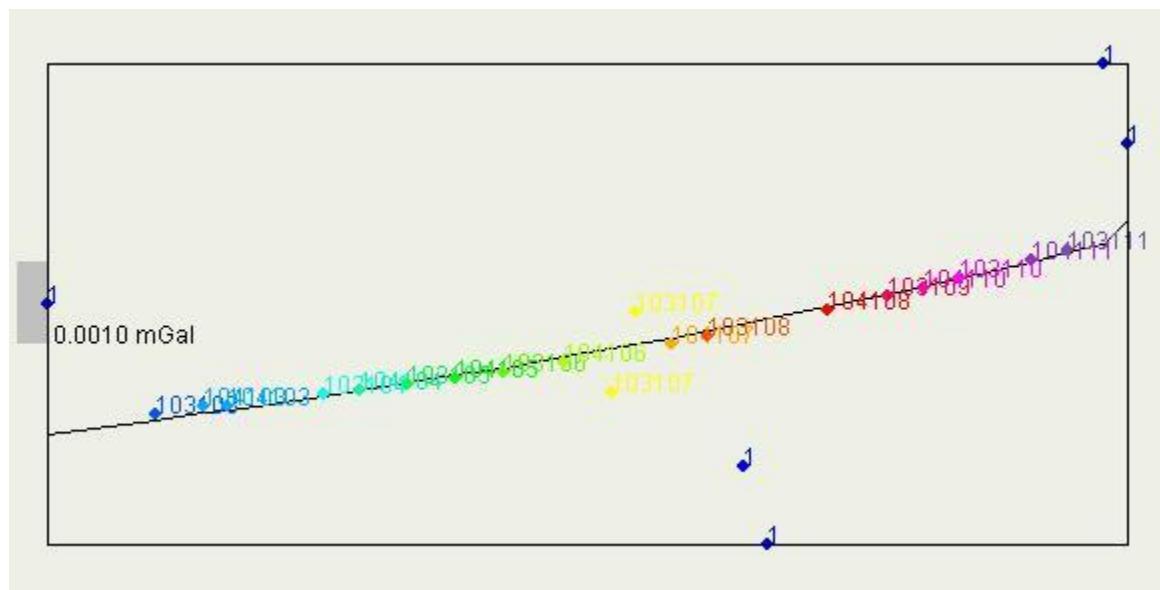
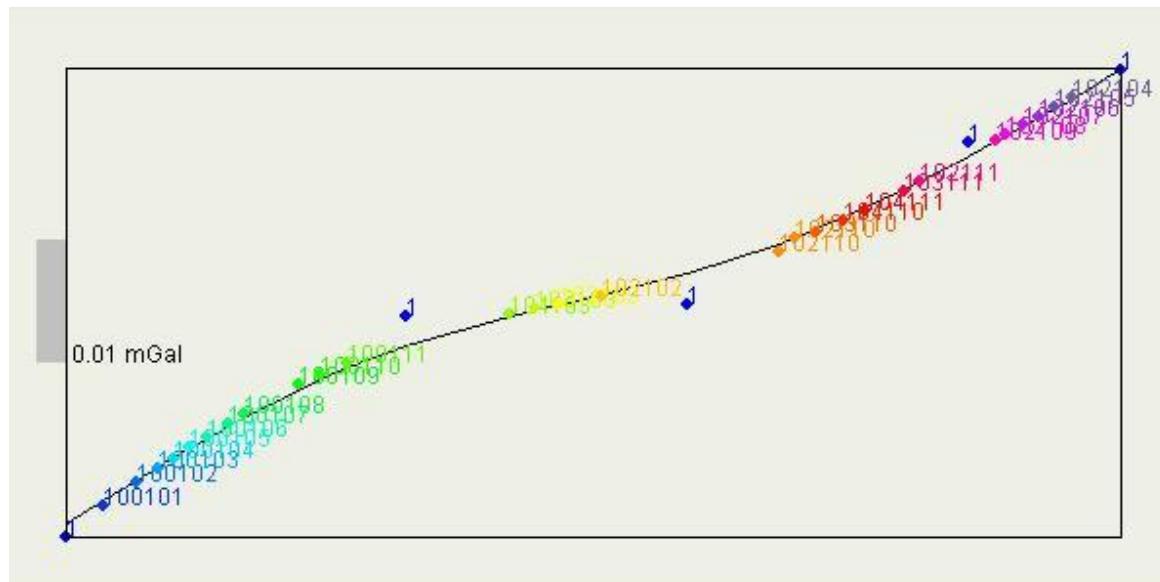
Základná kontrola správnosti opravy o chod je skutočnosť, že hodnoty na základnom bode (ZB) sú rovnaké (podobné).

- oprava o chod gravimetra



príklad použitia polynómu 4. stupňa (program Drift)

- oprava o chod gravimetra



príklady použitia splajnových funkcií (program DbGrav)

Gravimetria – poznámky ku prvotnému spracovaniu

Stredná chyba meraného tiažového zrýchlenia (m_g):

Je určovaná z meraní na kontrolných bodoch (KB), t.j. bodov meraných počas rozdielnych meračských dní alebo s rozdielnymi prístrojmi:

$$m_g = \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [v \cdot v]}{n - p}}$$

kde:

n – počet všetkých meraní na kontrolných bodoch,

p – počet kontrolných bodov

$[v \cdot v]$ – kvadrát odchýlky daného merania na KB

od aritmetického priemeru (z viacerých meraní na KB)

Počet KB by mal tvoriť pri regionálnej gravimetrii 5-10% z celkového počtu všetkých bodov, pri mikrogravimetrii 10-20 %.

Tieto chyby sú akceptovateľné pri regionálnej gravimetrii okolo ± 30 až ± 80 μGal , pri mikrogravimetrii pod ± 20 μGal (lepšie pod ± 10 μGal) .

Gravimetria – poznámky ku meraniu

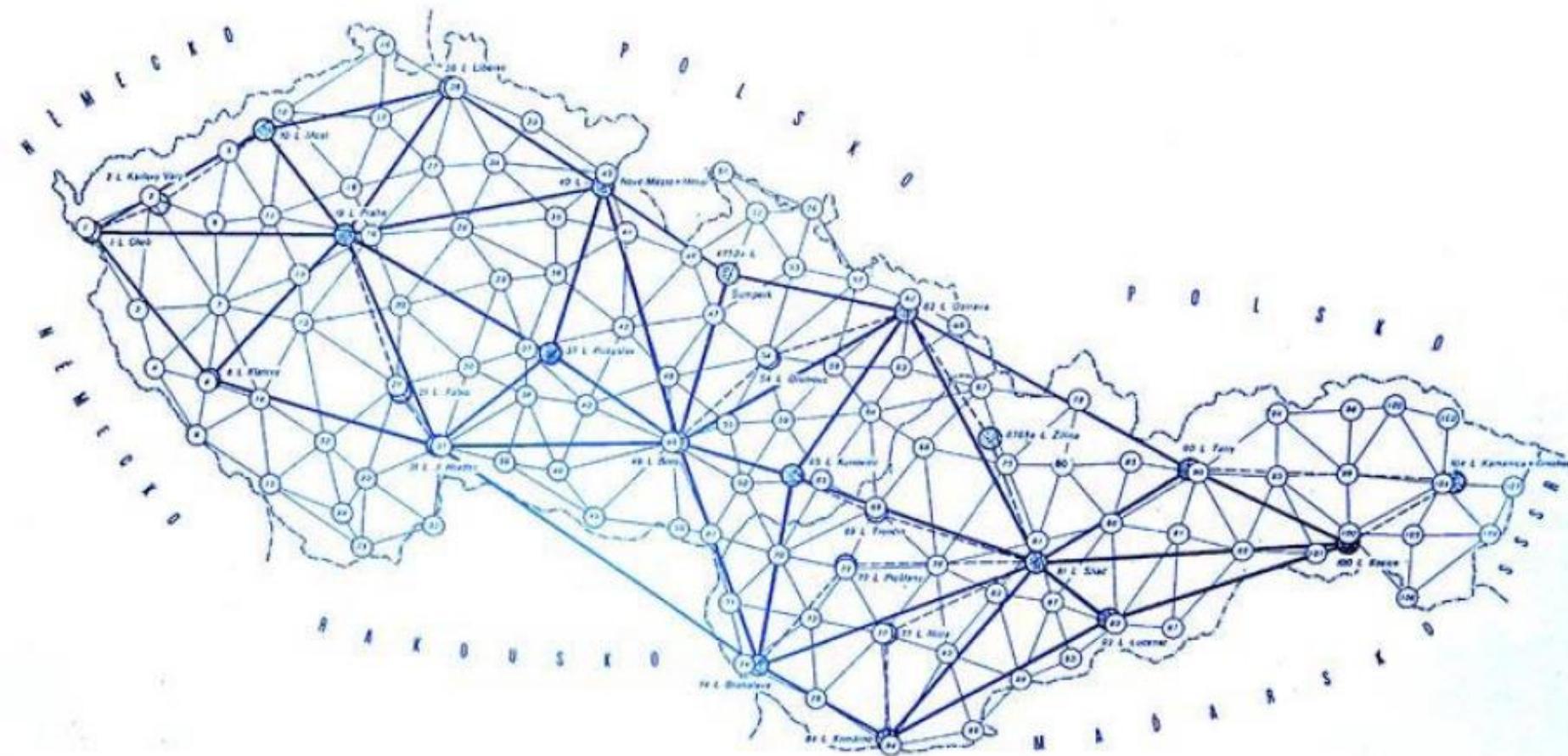
tiažové systémy (tiažového zrýchlenia)

všetky relatívne gravimetrické údaje musia byť naviazané na absolútne merania a tie nie sú vždy rovnaké (žial') - podľa toho, z akých meraní (podľa použitých prístrojov) a koncepcií vychádzajú, hovoríme o tzv. tiažových systémoch

tiažové systémy

- prvý používaný (jednotný) systém tiaže bol **Viedenský systém**
- najznámejší systém bol tzv. **Potsdamský systém**
- dodnes používaný systém tiaže je **IGSN71**, ktorý je rozdielny oproti systému Potsdam o hodnotu $(-14 + \varepsilon)$ mGal, kde ε je hodnota, ktorá závisí od regiónu a bola určená absolútymi meraniami (pre naše územie $+0.2$ mGal); tento rozdiel bol spôsobený chybou v spracovaní absolútnych meraní v 1930ich rokoch v Potsdame, ktorý bol jedným z prvých miest na svete, kde sa absol. merania realizovali (odvtedy je akýmsi štandardom týchto meraní)
celkovo v sebe zahrňuje 1873 bodov po celom svete
- dnes sa v mnohých krajinách (aj u nás) používajú nové (lokálne) systémy, naviazané na merania s absolútymi gravimetrami firmy Micro-g (FG-5, A-10)

tiažové systémy



Československá gravimetrická súťaž zameraná v rokoch 1948-1954.

tiažové systémy

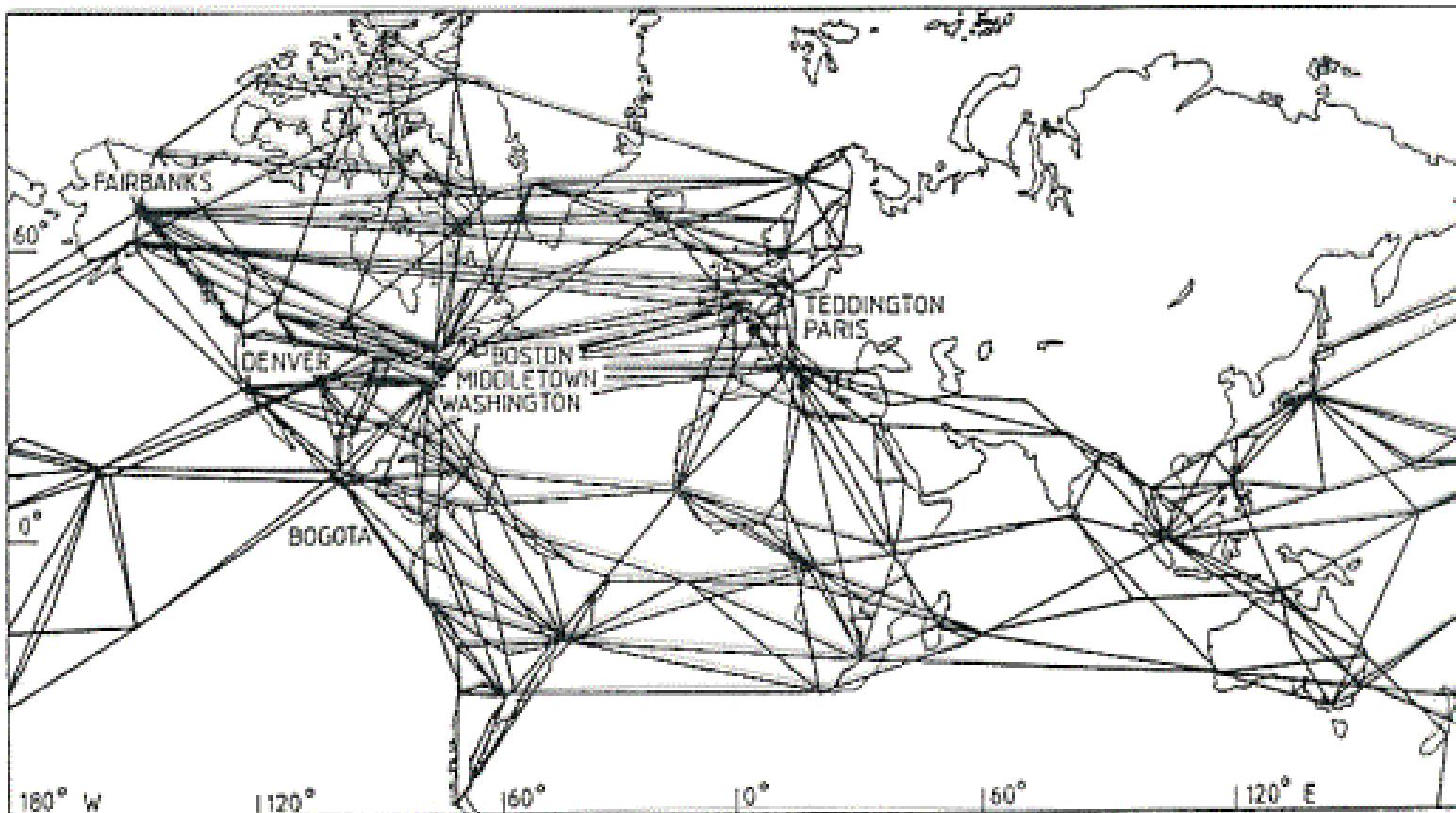


Fig. 9.1: International Gravity Standardization Net 1971 (I.G.S.N.71): Absolute gravity stations and selected network ties, after MORELLI et al. (1974)

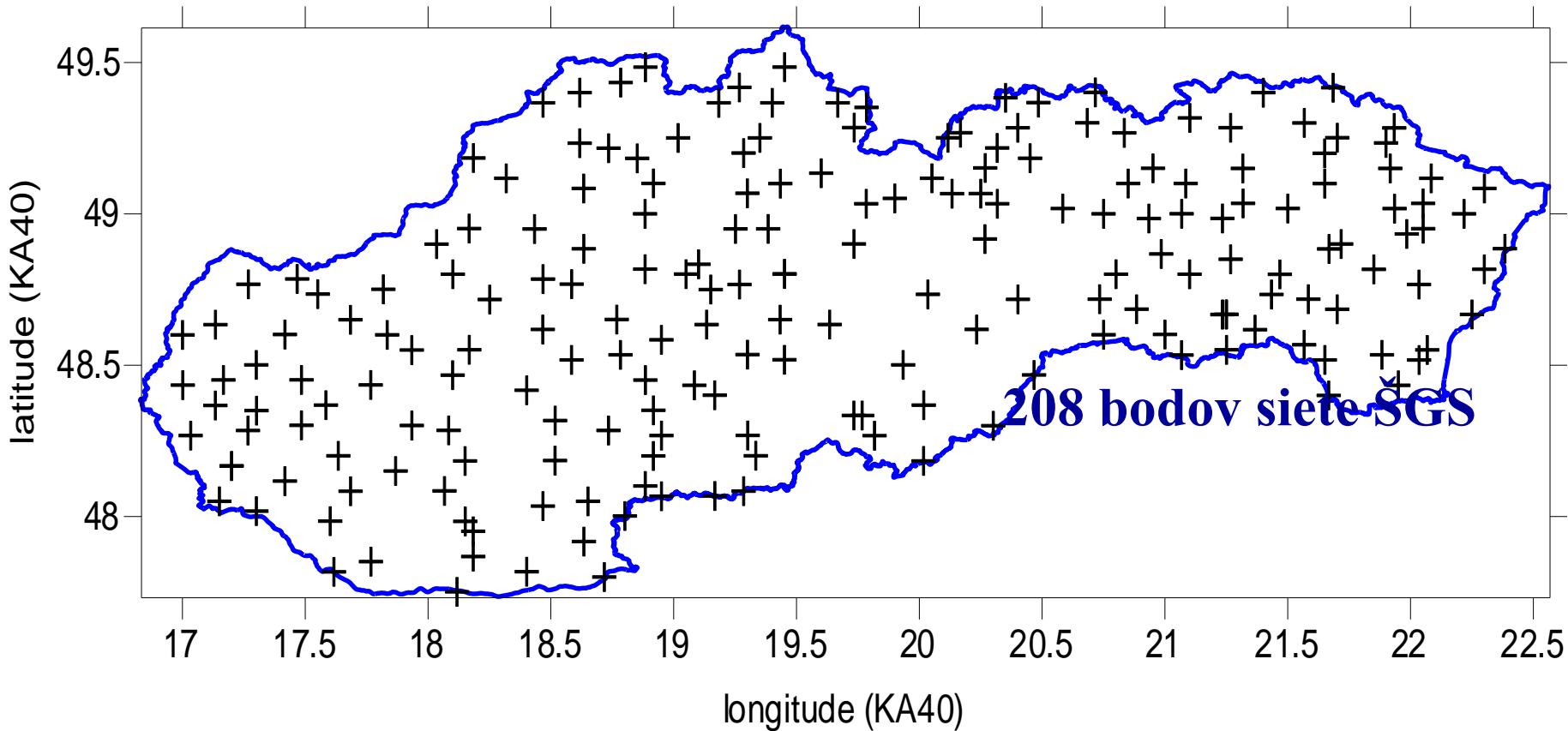
štátne siete –

Štátna Gravimetrická Siet' (ŠGS) Slovenskej Republiky

208 bodov, tzv. systém 1995 (založený na meraniach s FG-5)
správca: Geodetický a kartografický ústav Bratislava (GKÚ)

novšia koncepcia – geodetické body: siet' ŠPS

(zamerané s GPS, nivelované, zatiaľ vo výstavbe)



- všetky detailné a regionálne merania musia byť (podľa normy) naviazané na body Štátnej Gravimetrickej Siete (ŠGS) alebo Štátnej Priestorovej siete (ŠPS)
- výnimkou sú podrobné a mikrogravimetrické merania na inžinierske, environmentálne a archeologické účely, ktoré nemusia byť napojené na bod so známou hodnotou tiažového zrýchlenia(postačujú relatívne hodnoty)

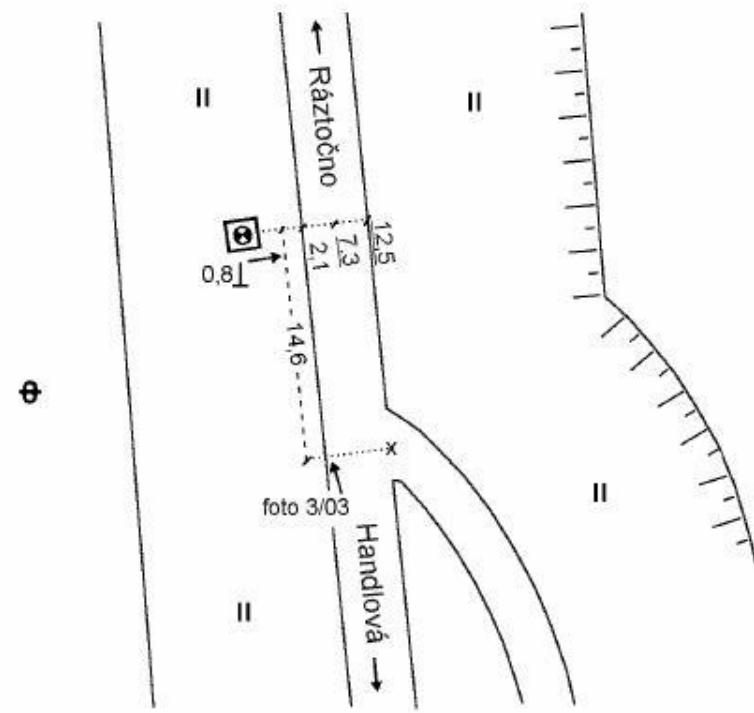


príklad bodu ŠGS

- všetky detailné a regionálne merania musia byť (podľa normy) naviazané na body Štátnej Gravimetrickej Siete (ŠGS) alebo Štátnej Priestorovej siete (ŠPS)



príklad bodu ŠGS



plus v katalógu sa nachádzajú hodnoty zemepisných súradníc, nadmorskej výšky a tiažového zrýchlenia

príklad popisu bodu ŠPS



príklad vzhľadu bodu ŠPS