

Základy aplikovanej geofyziky 1



gravimetria

magnetometria

geoelektrika

seizmika

karotáž

rádiometria

seizmológia

GRAVIMETRIA

**Meranie, vyhodnocovanie a interpretácia tiažových meraní
(„gravis“ – ťažký, „metrein“ - merať)**

- **merané pole: tiažové zrýchlenie g**
- **študovaný fyzikálny parameter hornín: hustota**

GRAVIMETRIA

Obsah prednášky:

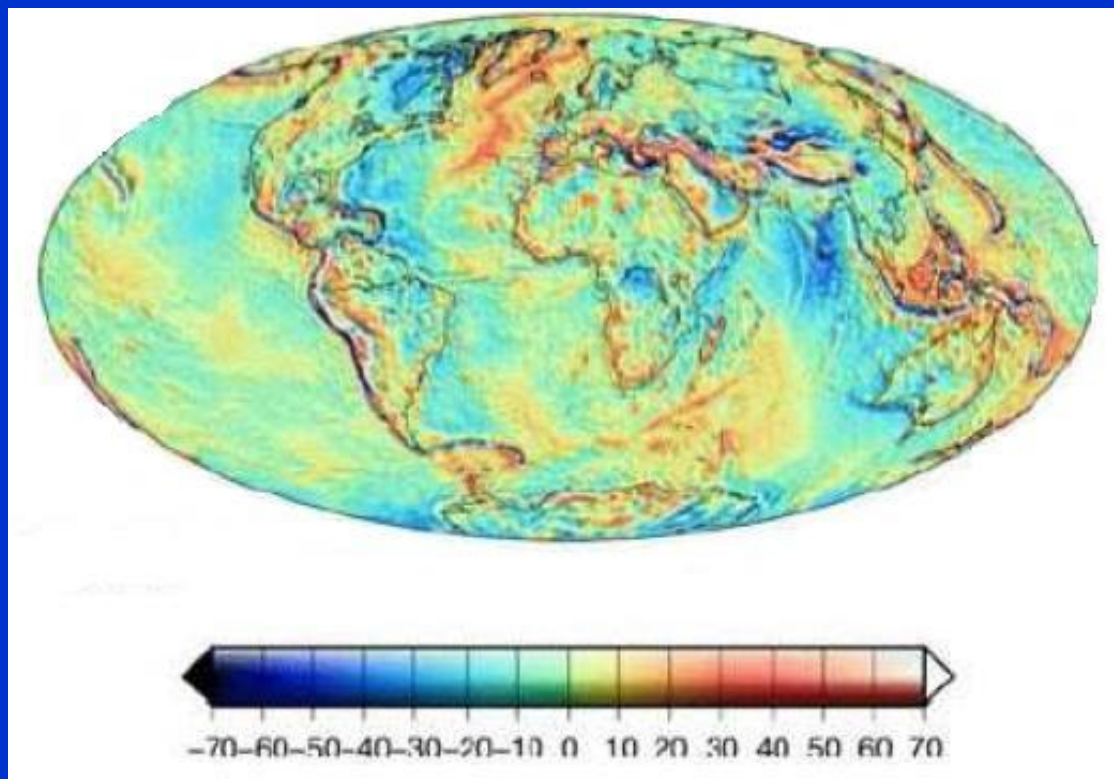
- ujasnene si základných pojmov
- trošku z histórie
- jednotky v gravimetrii
- meranie tiažového zrýchlenia (prístroje)
- hustoty (minerálov a hornín)
- spracovanie meraní (úplné Bouguerove anomálie)
- interpretácia
- príklady využitia gravimetrie

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 :

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

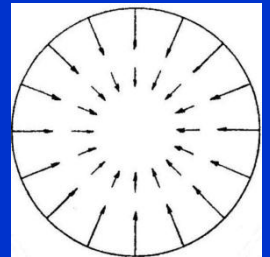
Veľkosť g nie je závislá o malého m .

Uvedená skutočnosť je dosť dôležitá...

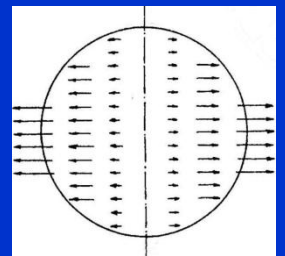
UJASNENIE SI ZÁKLADNÝCH POJMOV

*existuje vlastne rozdiel medzi gravitačným
a tiažovým zrýchlením?
(alebo ide o synonymum?)*

gravitačné - „čistá príťažlivosť“
Zeme

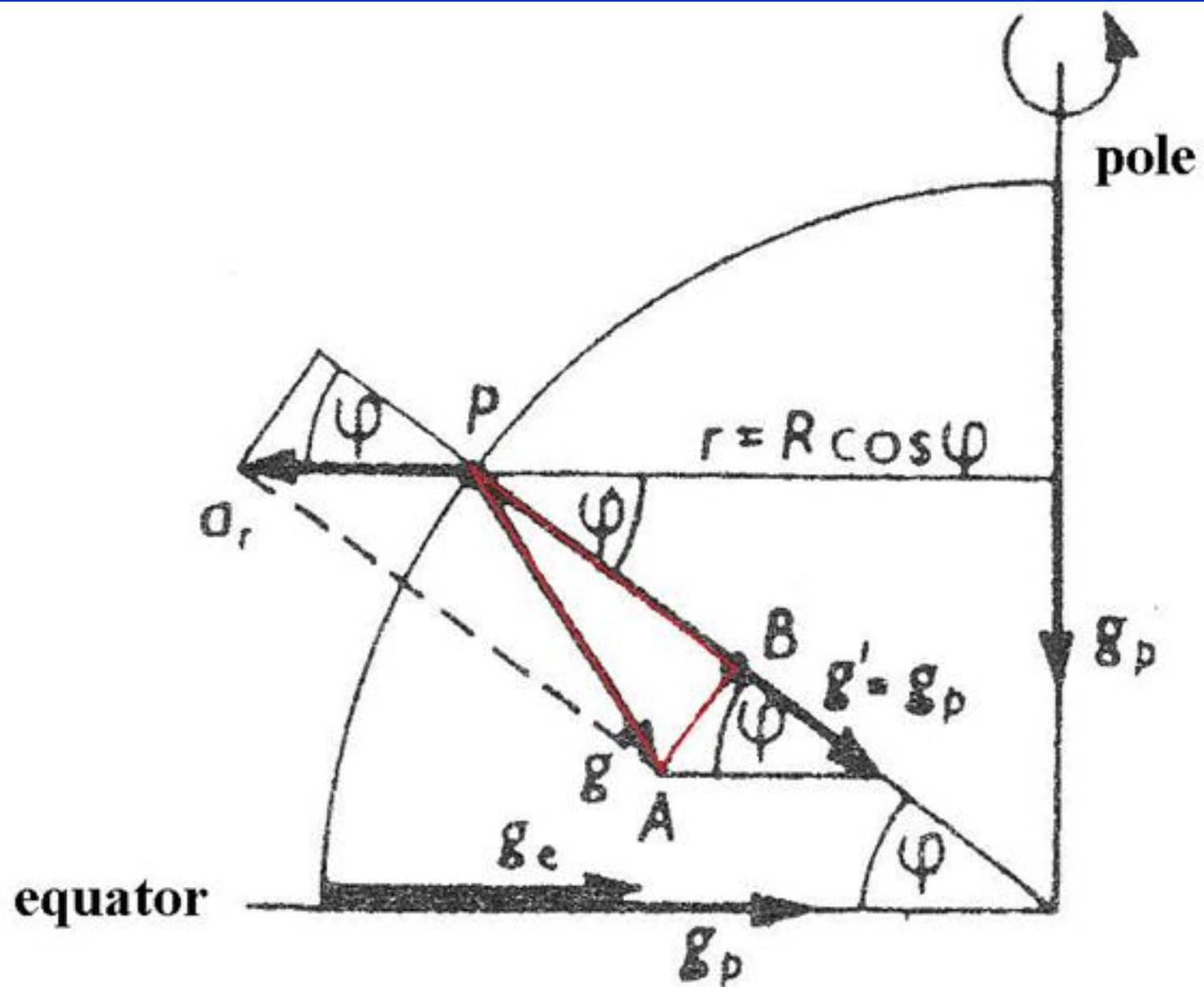


tiažové (merané) – výsledok
vektorového súčtu gravitačného a
odstredivého zrýchlenia Zeme



Pomer odstredivého a gravitačného zrýchlenia Zeme
je veľmi malý ≈ 0.005
(na póle je g cca $9.83 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$, na rovníku cca $9.78 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$)

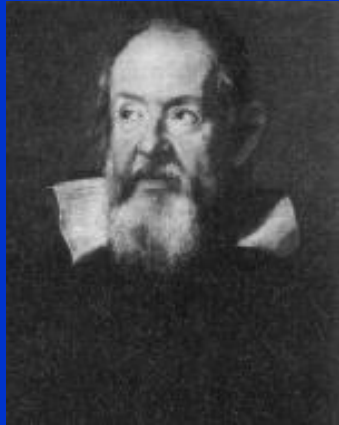
UJASNENIE SI ZÁKLADNÝCH POJMOV



(na póle je g cca $9.83 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$, na rovníku cca $9.78 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$)

GRAVIMETRIA

trošku z histórie ...



Galileo Galilei
(1564 - 1642)



Pierre Simon Laplace
(1749 – 1827)



Isaac Newton
(1643 - 1727)



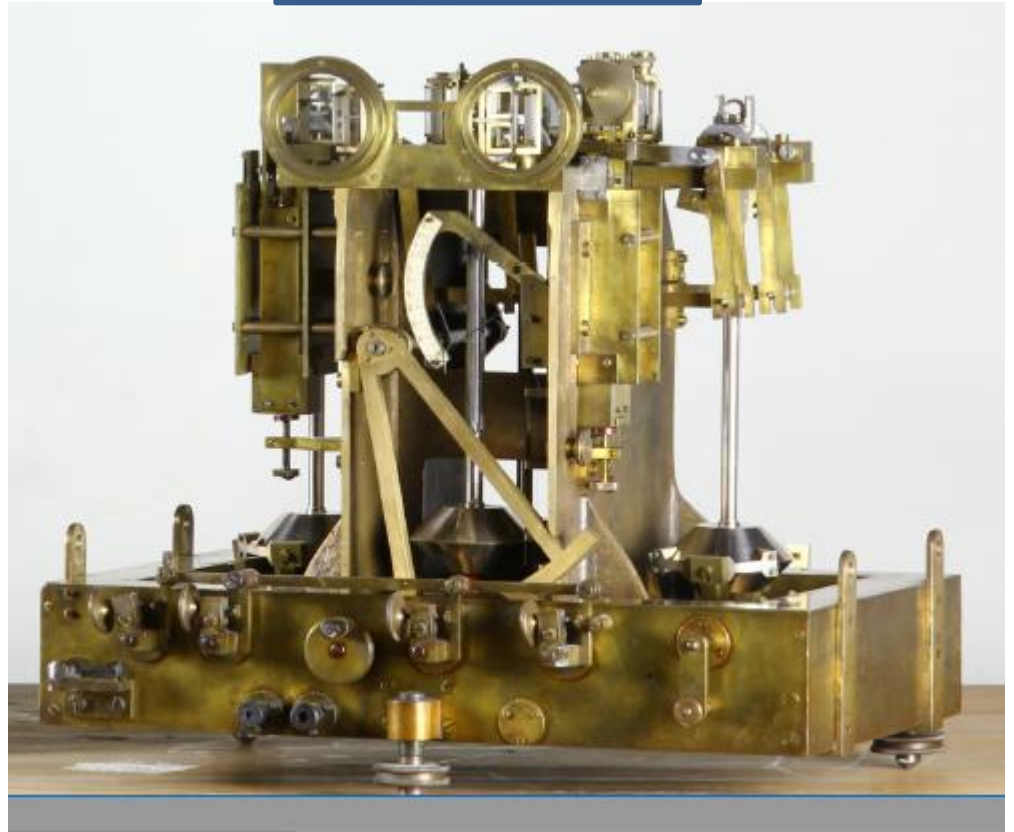
Pierre Bouguer
(1698 – 1758)

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

system 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:

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

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

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

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

predstava o presnosti dnešných gravimetrických meraní

$$g = 9.82345678 \text{ m/s}^2$$

úroveň mGal

úroveň μGal

súčasný prístroje merajú s presnosťou

0.01 do 0.001 mGal = 10 do 1 μGal



oblast'
mikrogravimetrie

dutiny

meranie v gravimetrii

**prístroje na meranie tiažového
zrýchlenia sa nazývajú gravimetre**

absolútne gravimetre

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



relatívne gravimetre

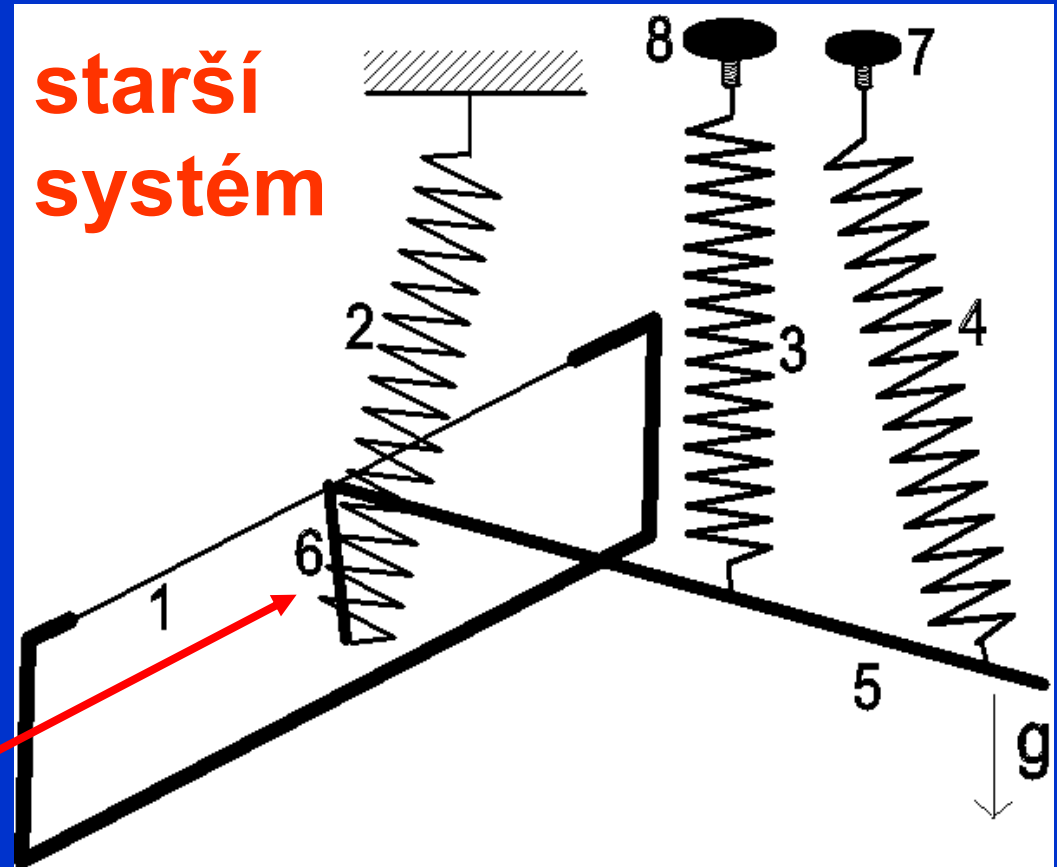
merajú iba rozdiel Δg
terénne,
nižšia presnosť:
0.01-0.005 mGal,
pružinový systém
rýchlejšie (minúty)



Scintrex CG-5

relatívny (pružinový) gravimeter

meranie –
manuálne

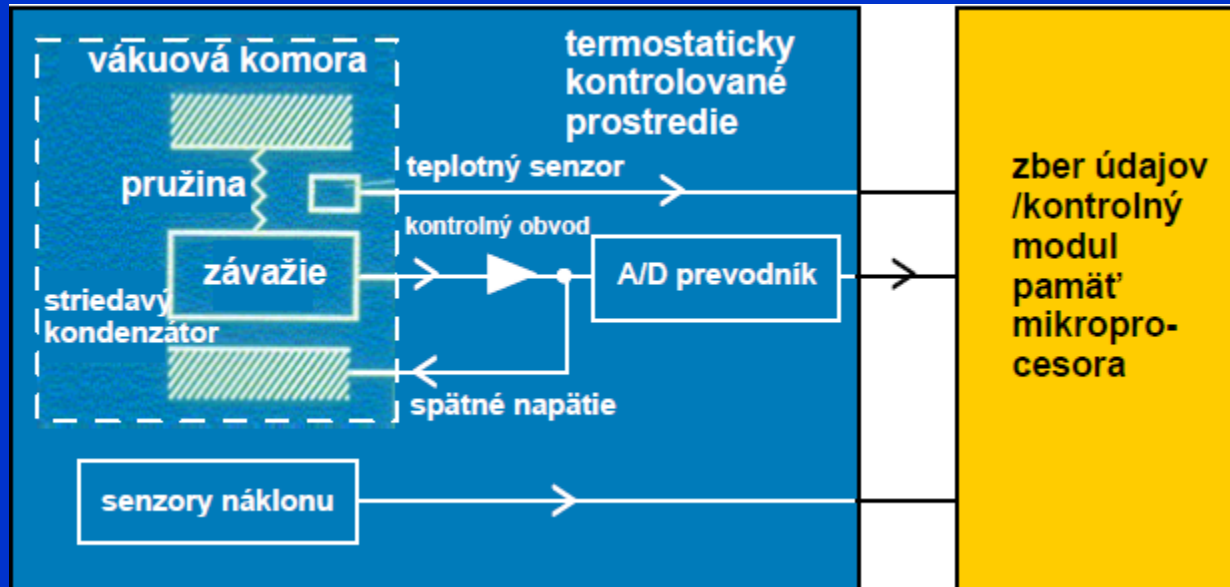
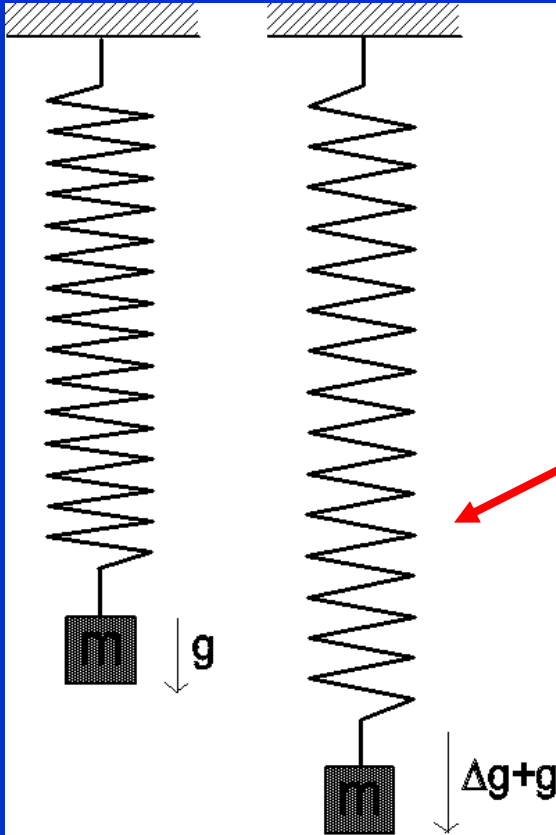


- 1 – torzné vlákno
- 2 – astazujúca (zvýrazňujúca) pružina
- 3 – rozsahová pružina
- 4 – meracia pružina
- 5 - vahadlo

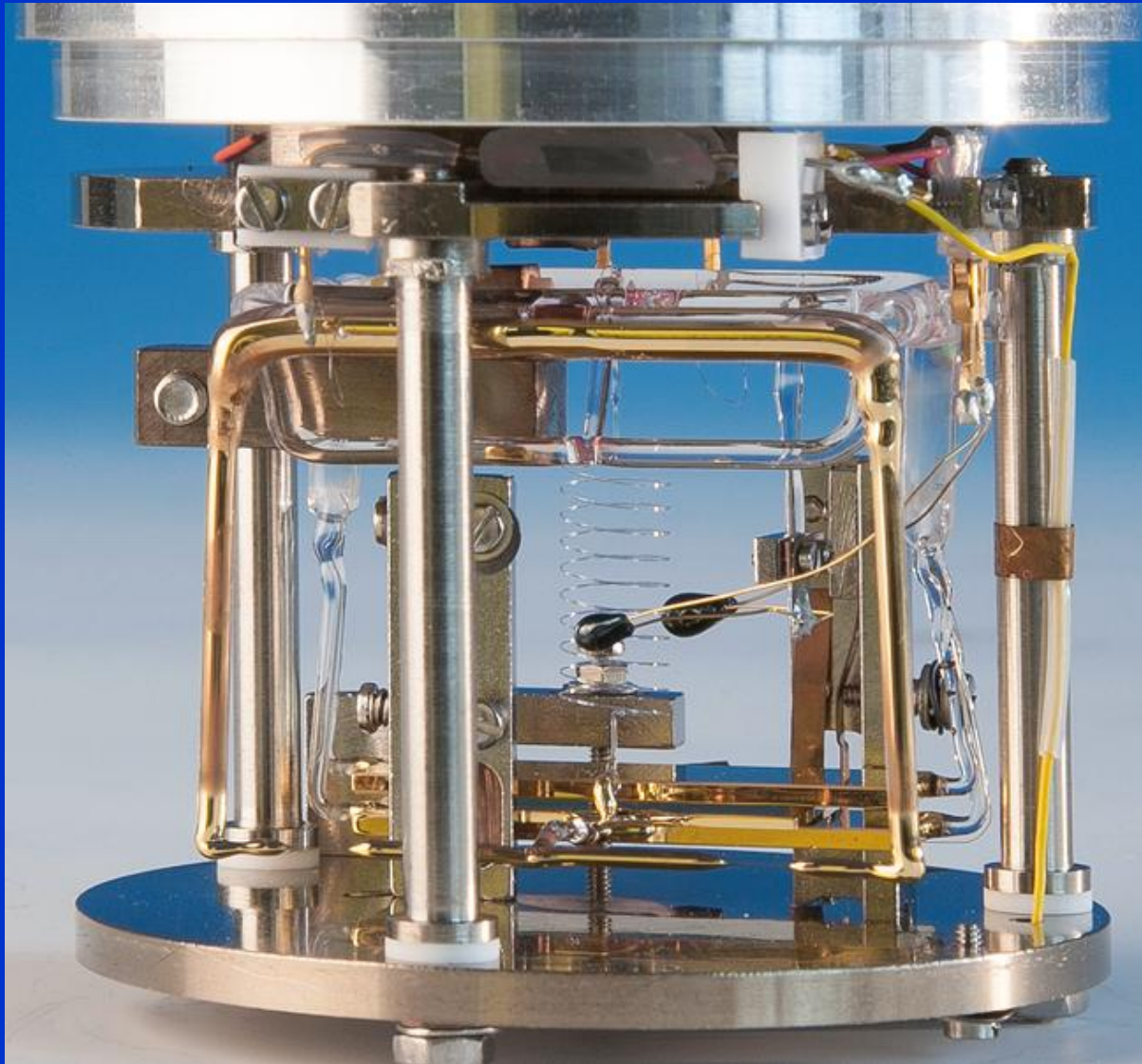
relatívny (pružinový) gravimeter

meranie – automatické (tzv. Autograv systém)

novší systém



relatívny (pružinový) gravimeter
meranie – automatické (tzv. Autograv systém)



relatívny (pružinový) gravimeter

súčasný moderný (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)**

Staršie typy – meraná veličina je počet otáčok skrútky 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) gravimeter

najnovšie relatívne gravimetre:



Scintrex CG-6
(na obr. spolu s CG-5)



LG-1 GALILEO
(česká firma GF Instruments)

Meranie a základné spracovanie dát v gravimetrii:

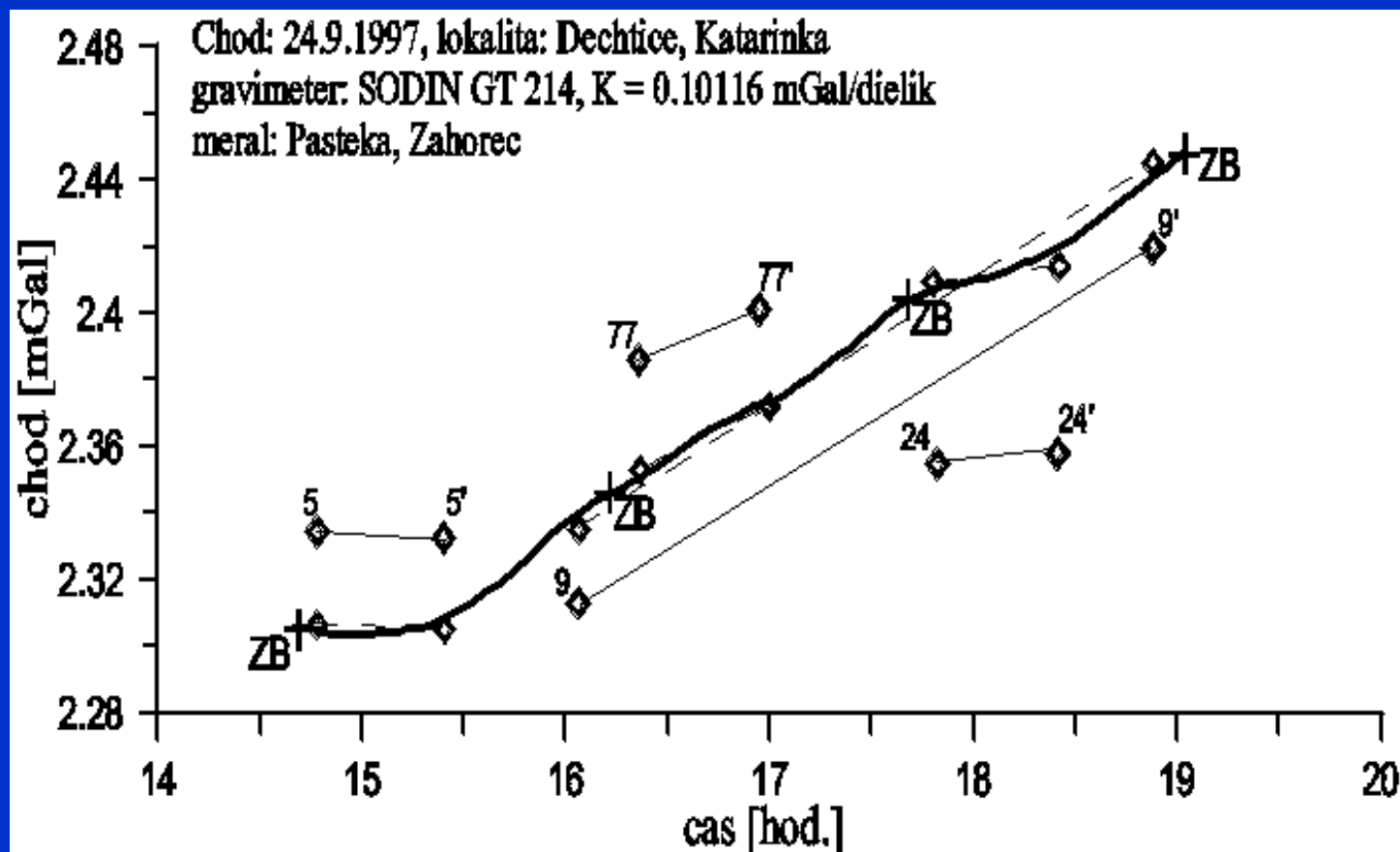
Zahrňa v sebe:

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

meranie v gravimetrii

musí sa odstraňovať tzv. chod prístroja (drift)

spôsobený: otrasmi, zmenami teploty a tlaku,
slapovými účinkami Slnka a Mesiaca
(moderné gravimetre ich vedia zrátať)



meranie v gravimetrii

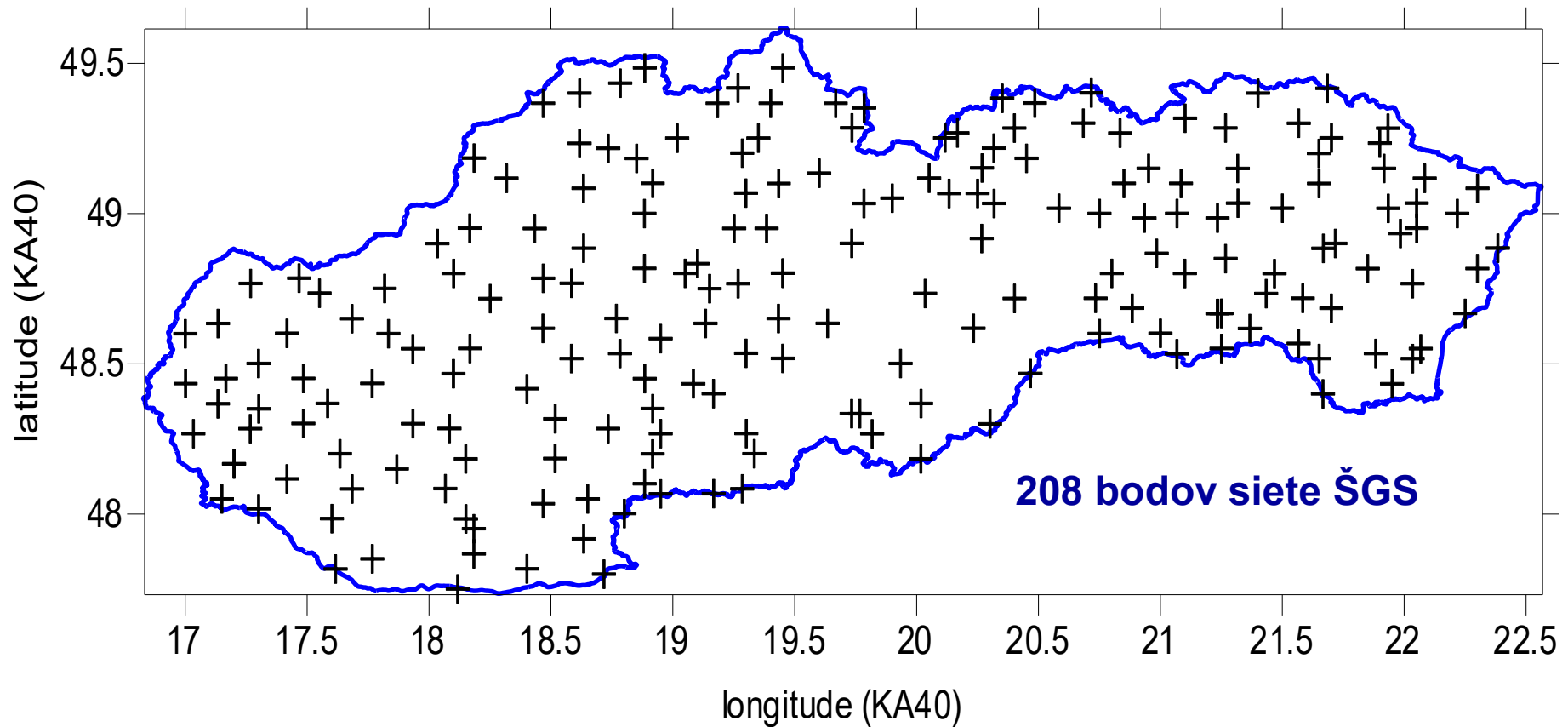
výsledkom meraní a opravy o chod je hodnota relatívneho tiažového zrýchlenia Δg , ktoré sa prepočítava na jeho absolútnu hodnotu g ,

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): $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$

používané sú násobky:

$$1 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3} = 1 \text{ kg}\cdot\text{dm}^{-3} = 1 \text{ Mg}\cdot\text{m}^{-3} = \\ = 1000 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$$

Rozpätie hustôt minerálov:

od 0.98 (ľad) po $22.59 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ (čisté Osmium)
(príklad: olovo: $11.34 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, zlato: $19.32 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$)



Rozpätie hustôt hornín:

od 1.65 (hlina) po $3.35 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ (eklogit)
(granit: $2.65 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, vápenec: $2.70 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, fylit: $2.75 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$)

Priemerná hustota vrchnej časti zemskej kôry na základe gravimetrie je približne $2.67 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$.

magmatické horniny

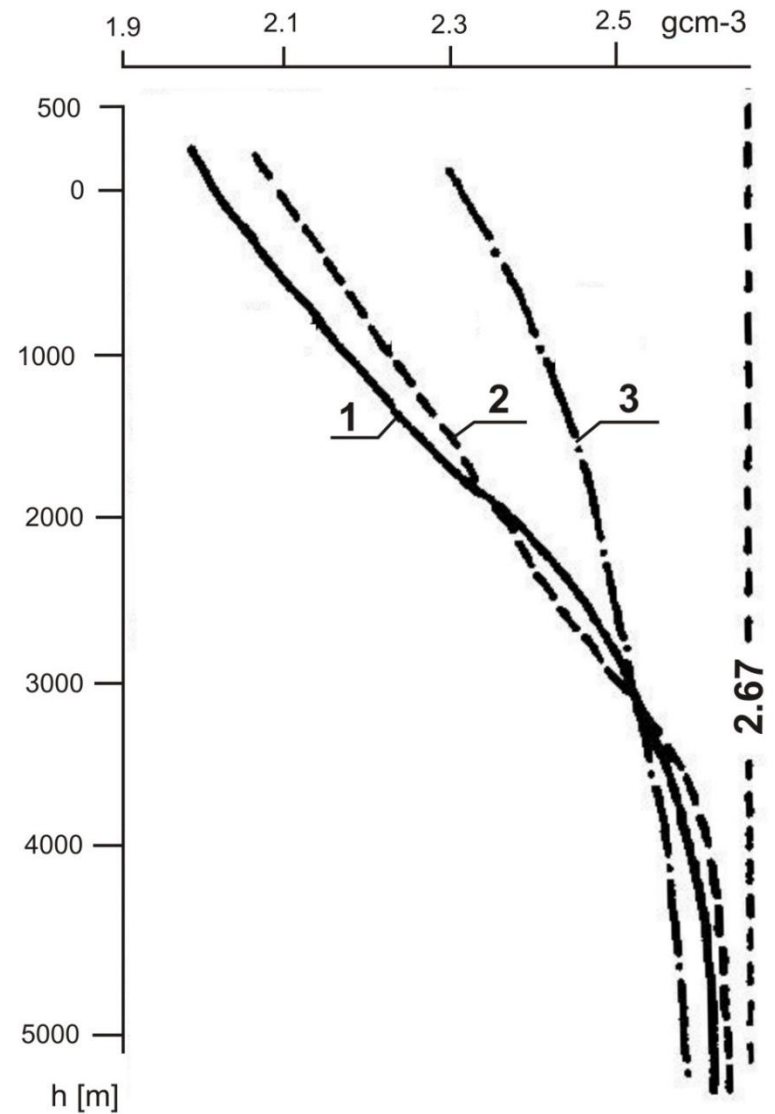
- nárast hustoty s bázicitou, okrem toho efuzívne sú vždy ľahšie ako plutonické

metamorfované horniny

- závisí od typu metamorfózy

sedimentárne horniny

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

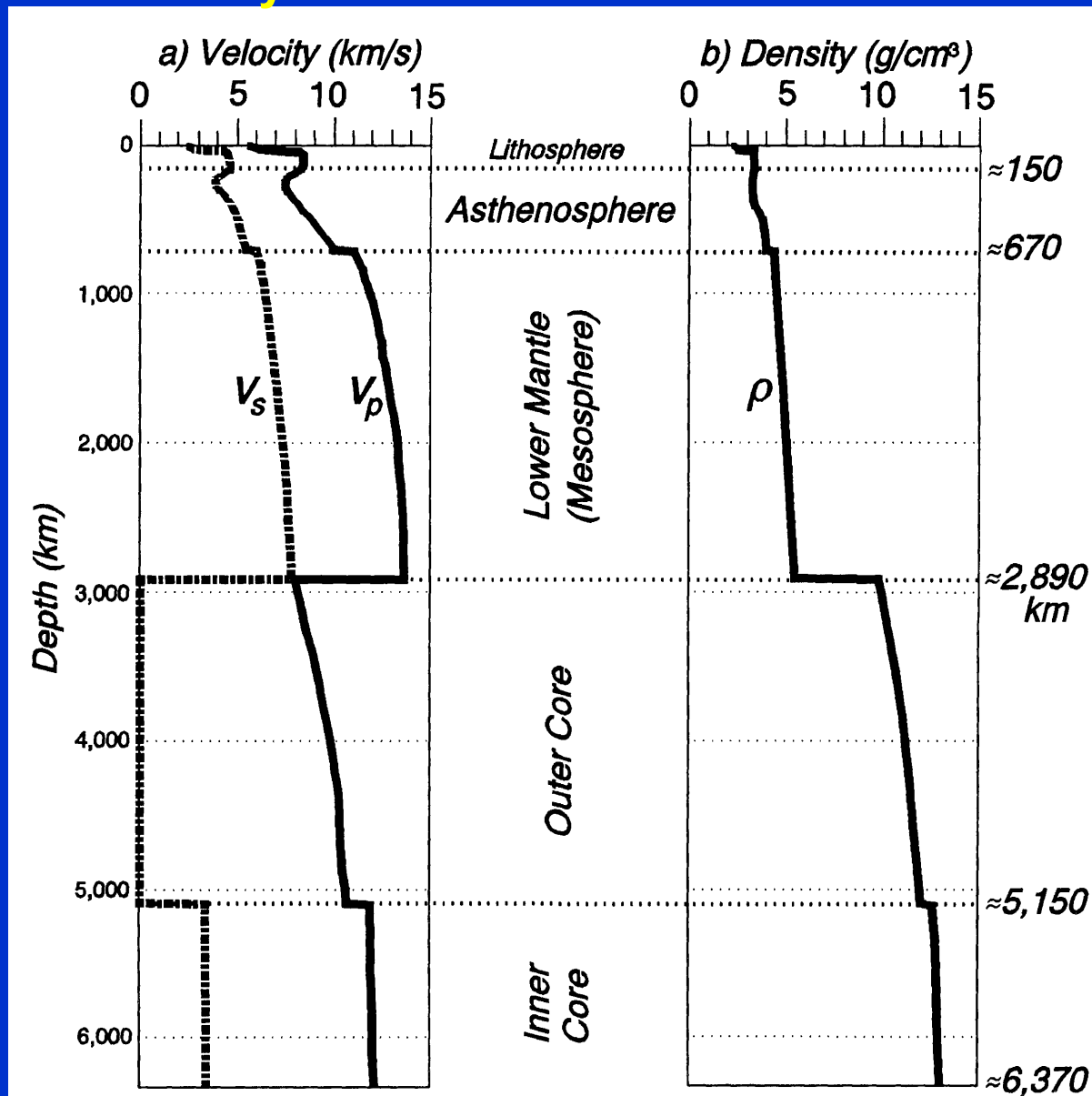


Obr. 3. Závislosť prirodzených hustôt na hĺbke panví. Vysvetlivky: 1 - viedenská panva, 2 - dunajská panva, 3 - Východoslovenská nížina (Šefara et al., 1987).

nepriame metódy určovania hustôt – zo seizmológie

rýchlosť

hustota

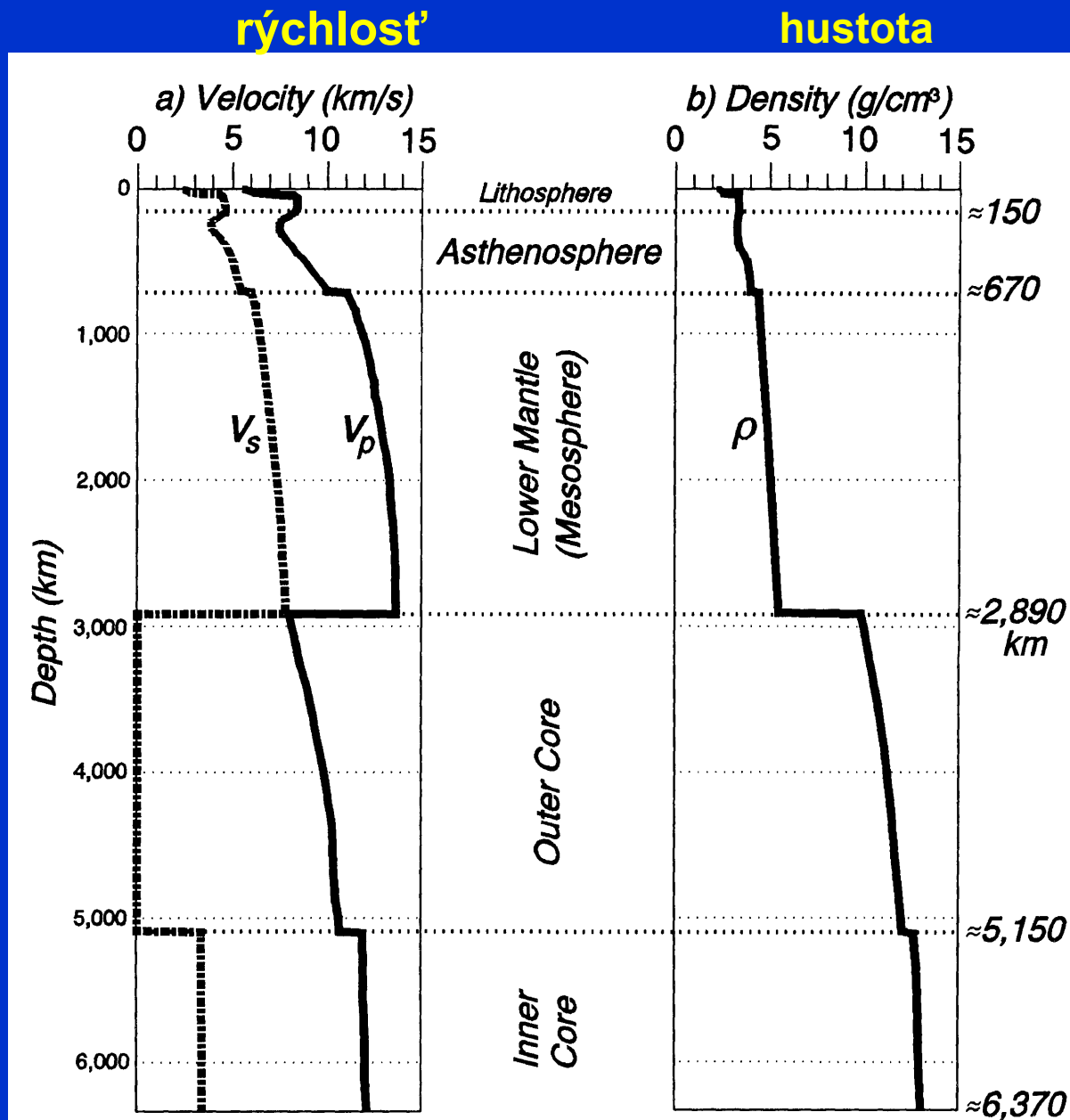


kvízové otázky:

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:
$$g_n = 978049(1 + 0.0052884\sin^2\varphi) \text{ [mGal]}$$

(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 = $-0.3086h \text{ [mGal]}$
(cca 0.01 mGal na 3 cm vo vertikálnom smere)
- **vplyv reliéfu**: blízke kopce znižujú merané g
(aj budovy a ich múry), doliny tak isto...

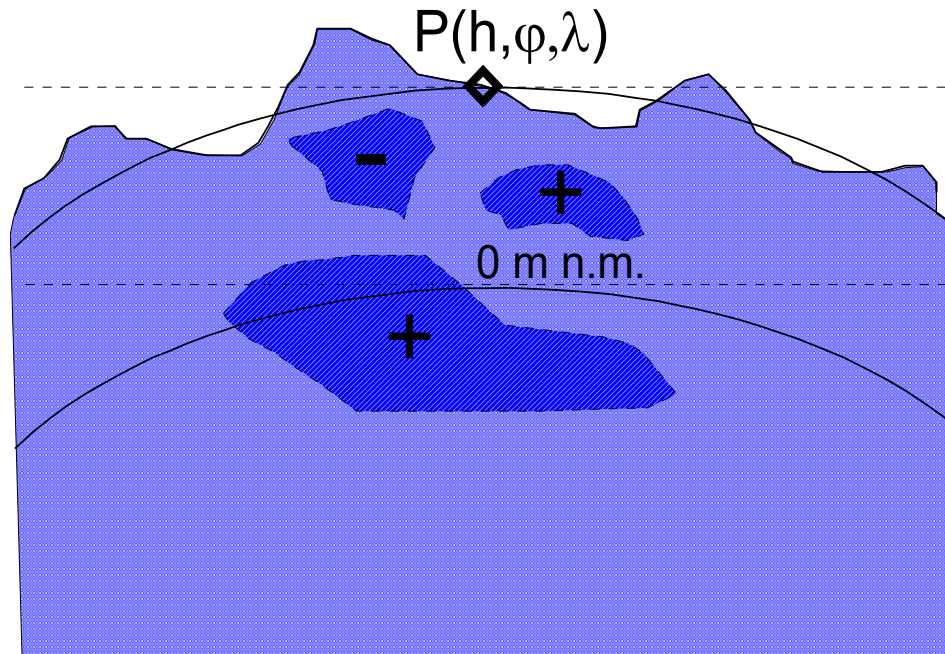
spracovanie v gravimetrii (tvorba ÚBA)

Úplné Bouguerove anomálie (ÚBA)

$$\text{ÚBA} = \Delta g = g_{\text{mer}} - g_{\text{teor}}$$

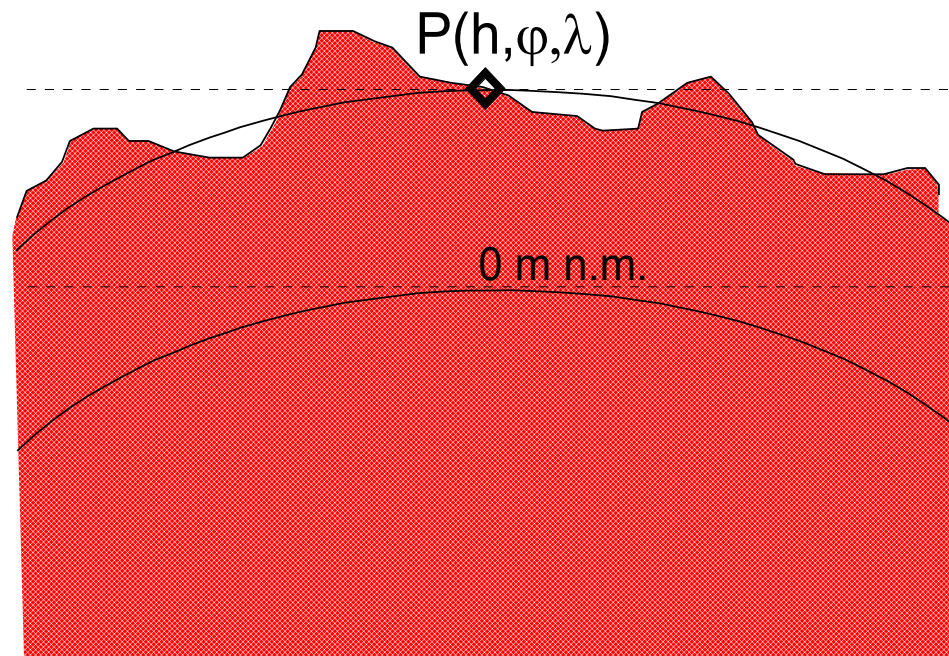
spracovanie v gravimetrii (tvorba ÚBA)

od tiažového účinku celej (reálnej) Zeme...



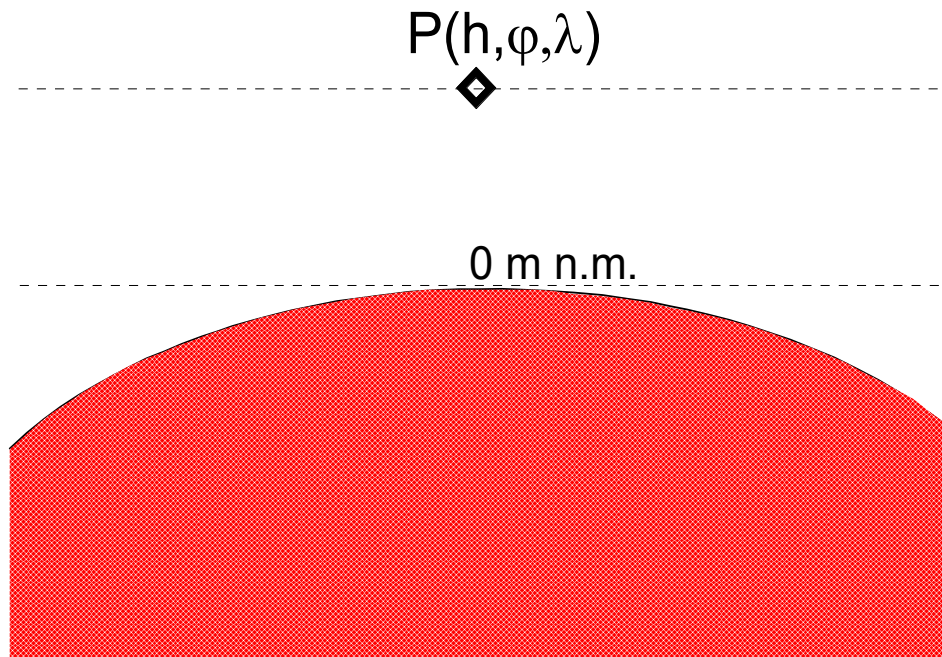
spracovanie v gravimetrii (tvorba ÚBA)

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



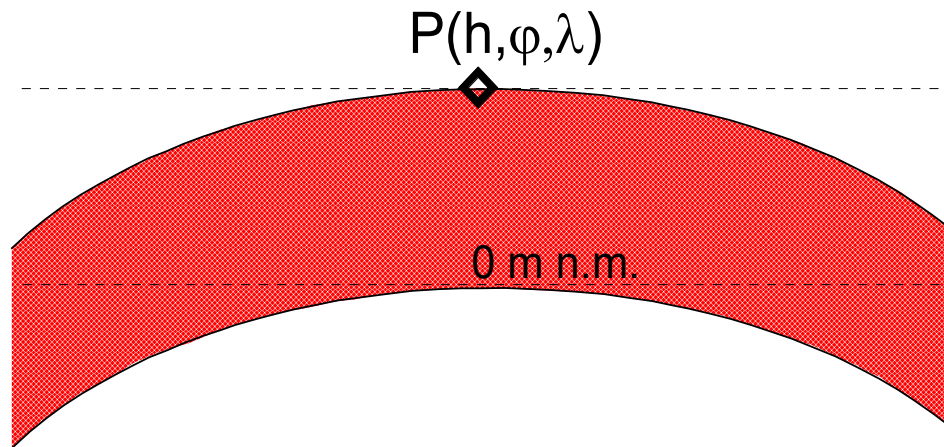
spracovanie v gravimetrii (tvorba ÚBA)

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



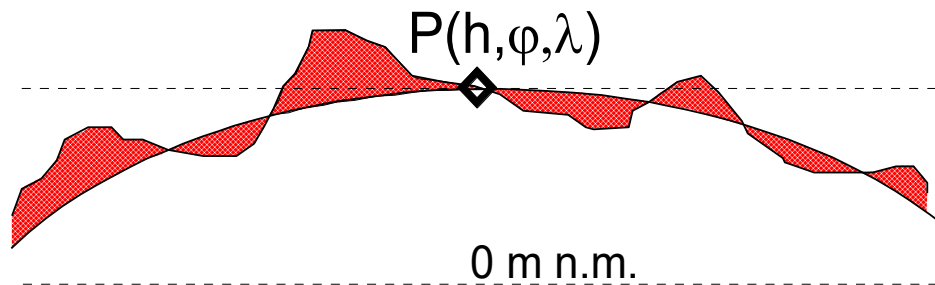
spracovanie v gravimetrii (tvorba ÚBA)

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



spracovanie v gravimetrii (tvorba ÚBA)

účinkok 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_n – normálne pole (účinkok elipsoidu)

h – nadmorská výška bodu merania

ρ – tzv. korekčná (redukčná) hustota (často 2.67 g.cm^{-3})

$0.3086h$ – korekcia “vo voľnom vzduchu” (tzv. Fayeova)

$0.0419h\rho$ – Bouguerova korekcia (účinkok rovinatej dosky)

B – Bullardov člen („ohýba“ rovinnú dosku)

T – terénne korekcie (do vzdialenosti 166.7 km od bodu)

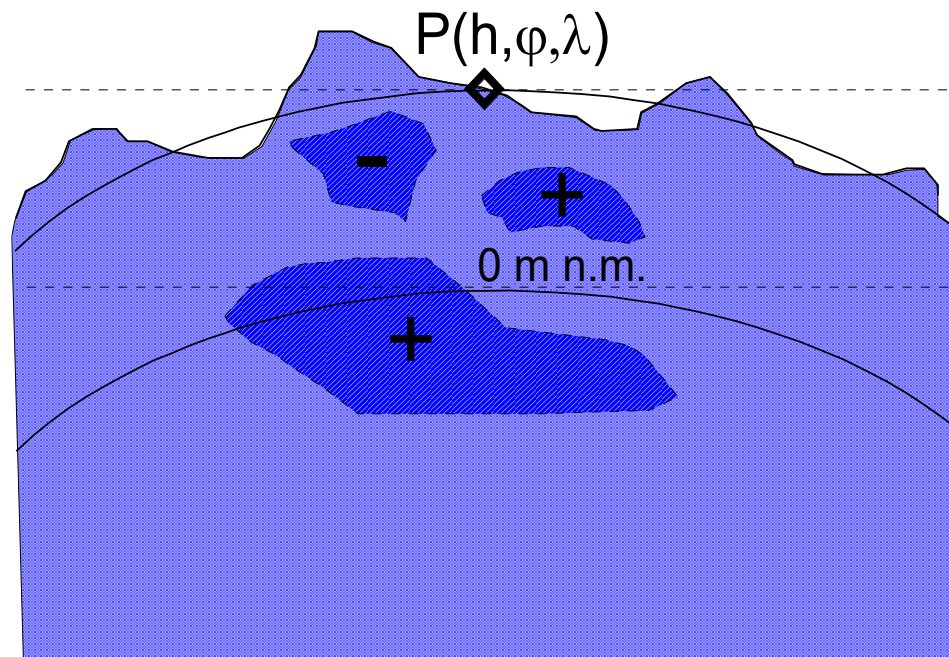
spracovanie v gravimetrii (tvorba ÚBA)

Pri niektorých aplikáciách sa používajú upravené vzťahy (verzie) ÚBA:

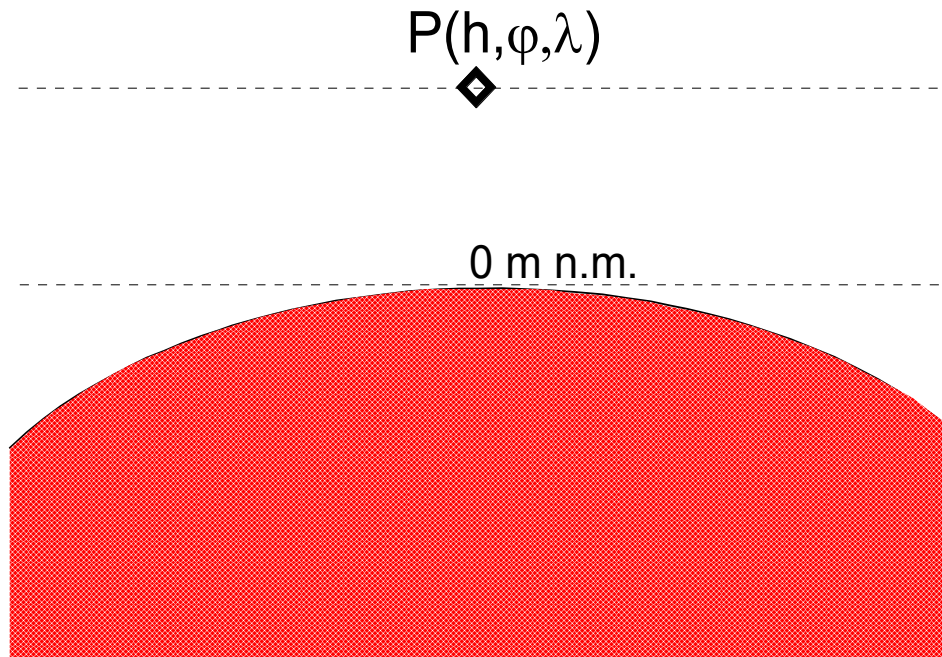
anomália **$NUBA = g - g_n + 0.3086h - 0.0419h\rho$**
sa nazýva ako tzv. neúplná Bouguerova anomália

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

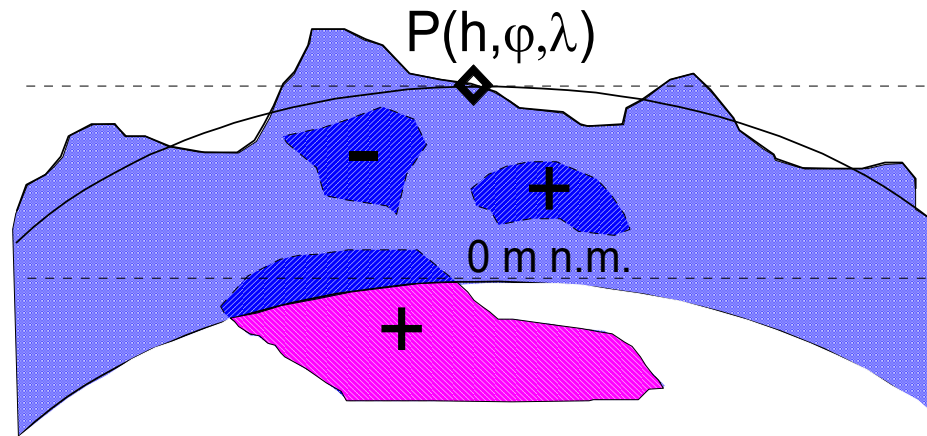
prejav hustotných nehomogenít v poli ÚBA



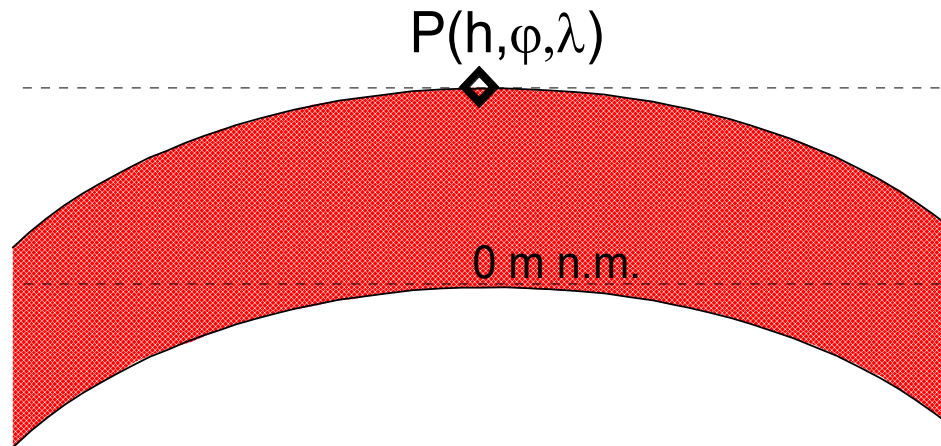
prejav hustotných nehomogenít v poli ÚBA



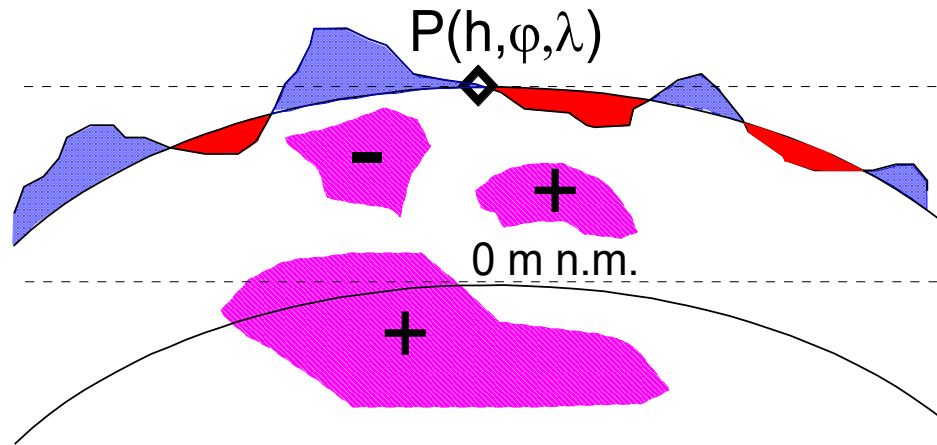
prejav hustotných nehomogenít v poli ÚBA



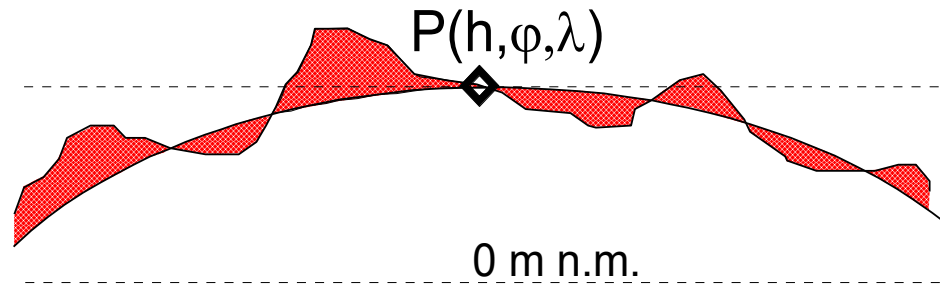
prejav hustotných nehomogenít v poli ÚBA



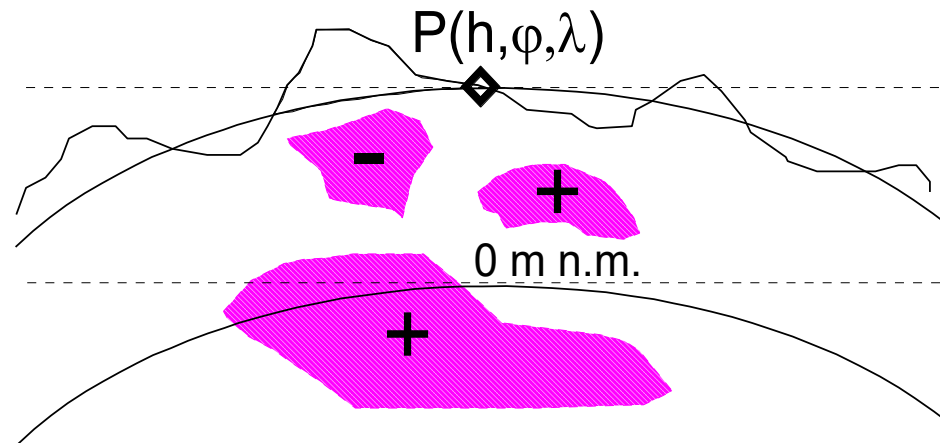
prejav hustotných nehomogenít v poli ÚBA



prejav hustotných nehomogenít v poli ÚBA



prejav hustotných nehomogenít v poli ÚBA

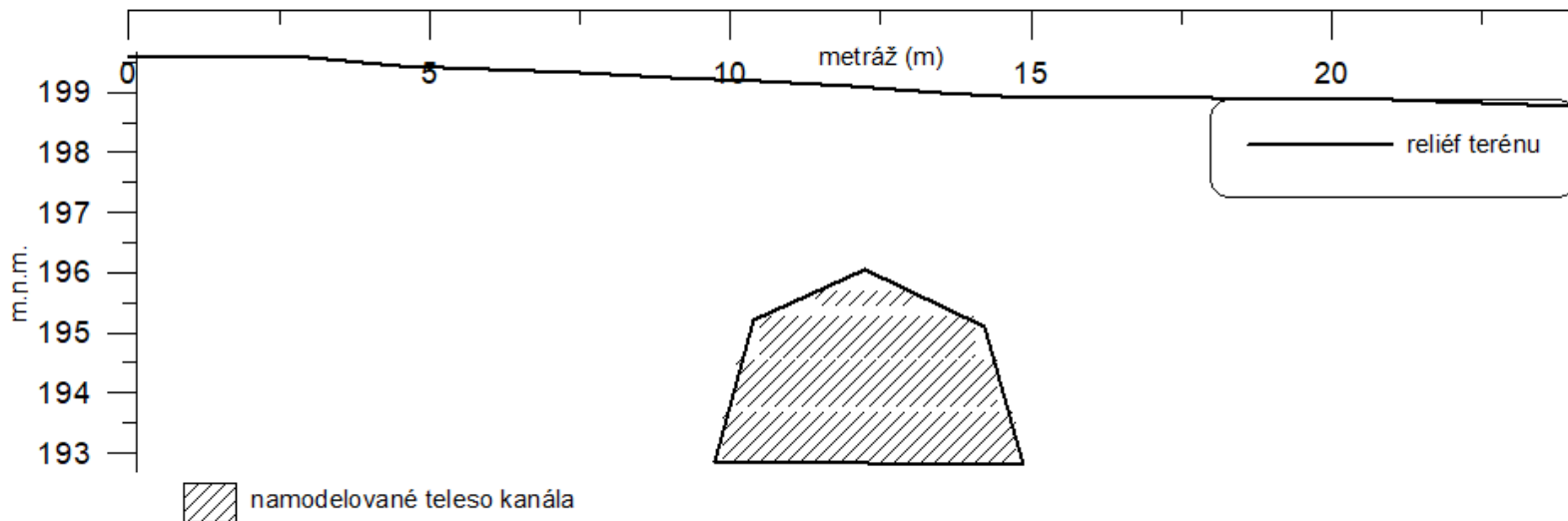
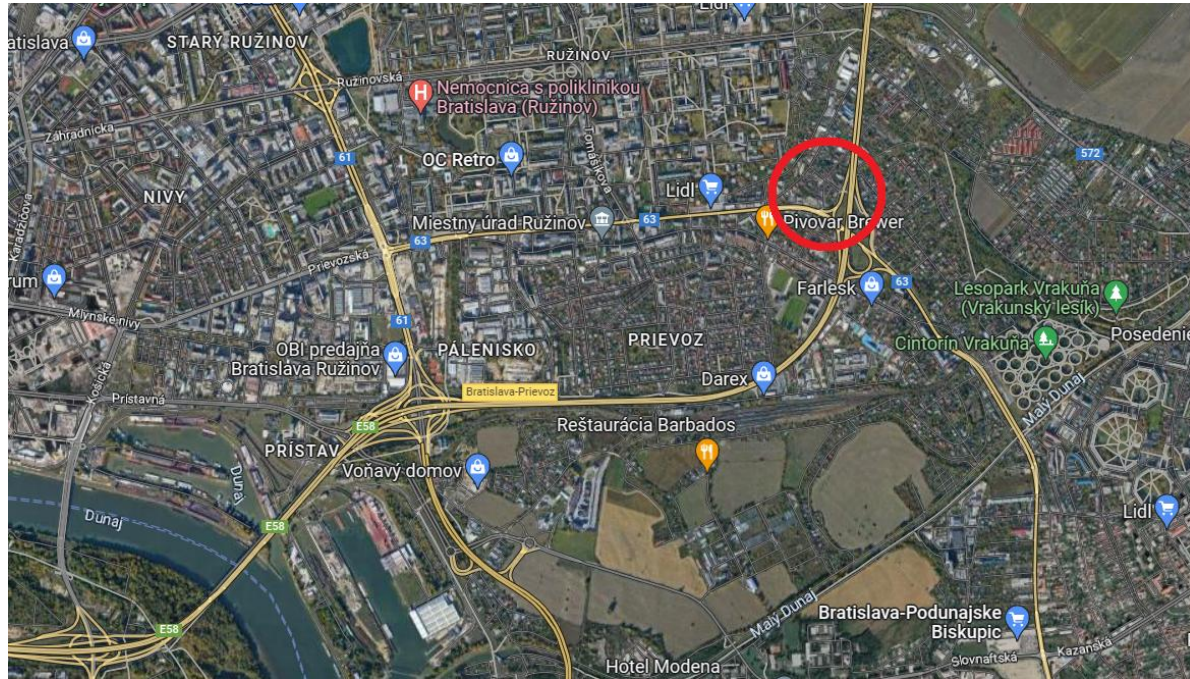


**výsledkom je prejav anomálnych
hustotných nehomogenít
v zemskej kôre (až vo vrchnom plášti)**

Praktické ukážky (výhod) výpočtu ÚBA:

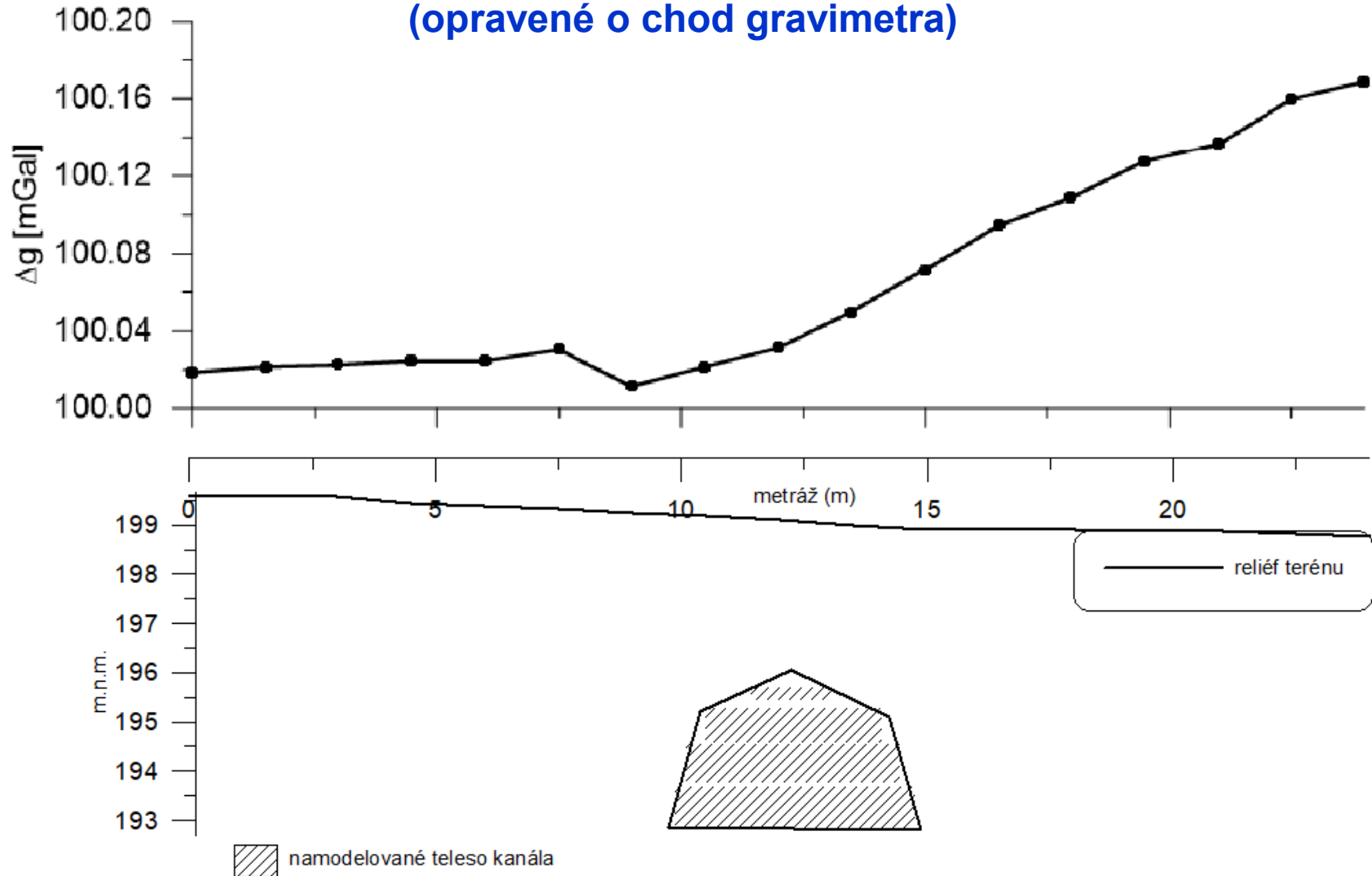
- vymapovanie priebehu kanalizačného zberača, Bratislava, Gagarinova ul.
- hľadanie podzemných chodieb pod Veľkou terasou (Oravský zámok)
- vymapovanie rozsahu maarového telesa, Pinciná, Lučenec

kanalizačný zberač, Gagarinova ul., BA



kanalizačný zberač, Gagarinova ul., BA

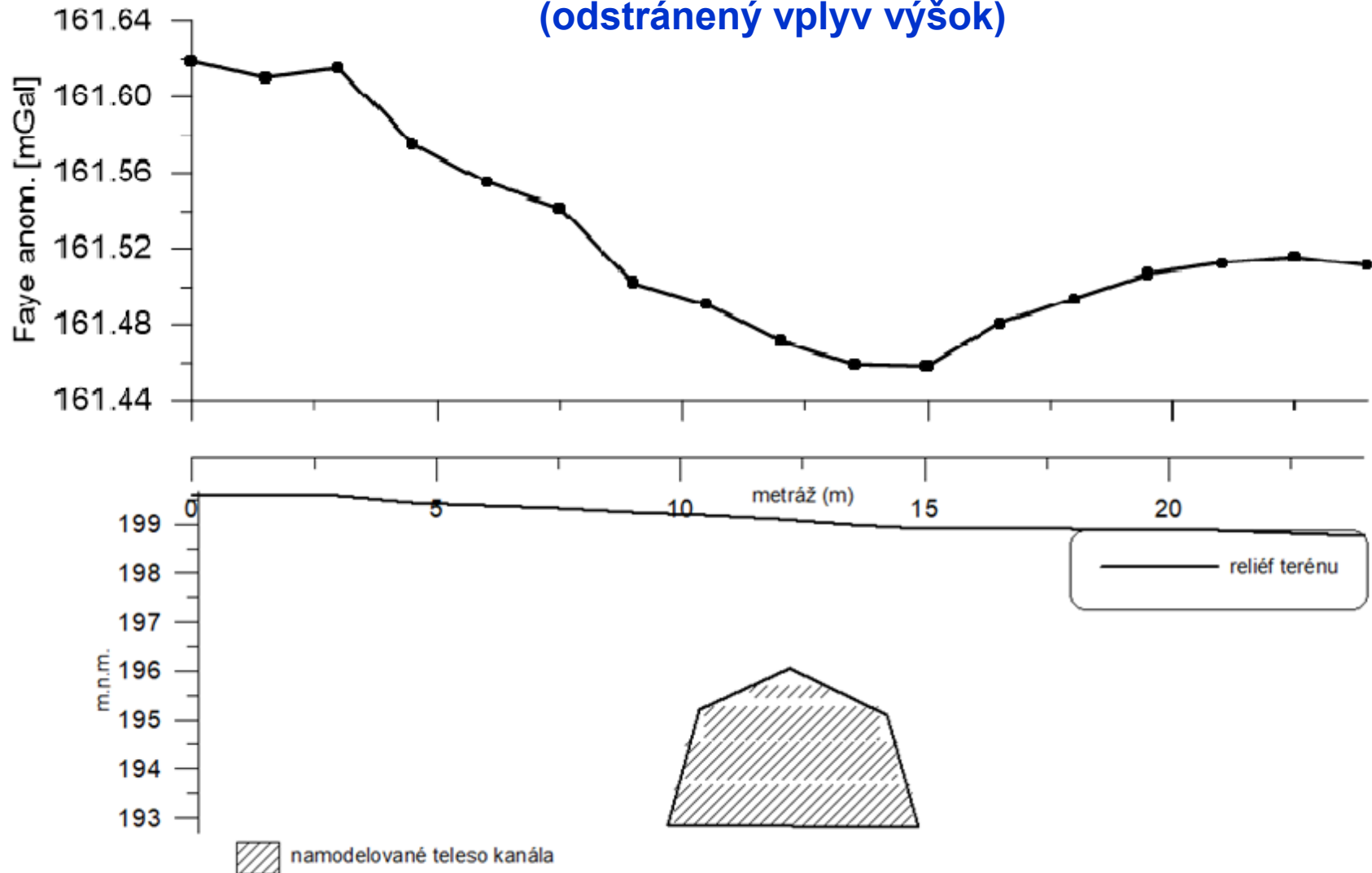
**namerané relatívne tiažové zrýchlenie Δg
(opravené o chod gravimetra)**



kanalizačný zberač, Gagarinova ul., BA

$$\Delta g_{\text{Fay}} = g + 0.3086h$$

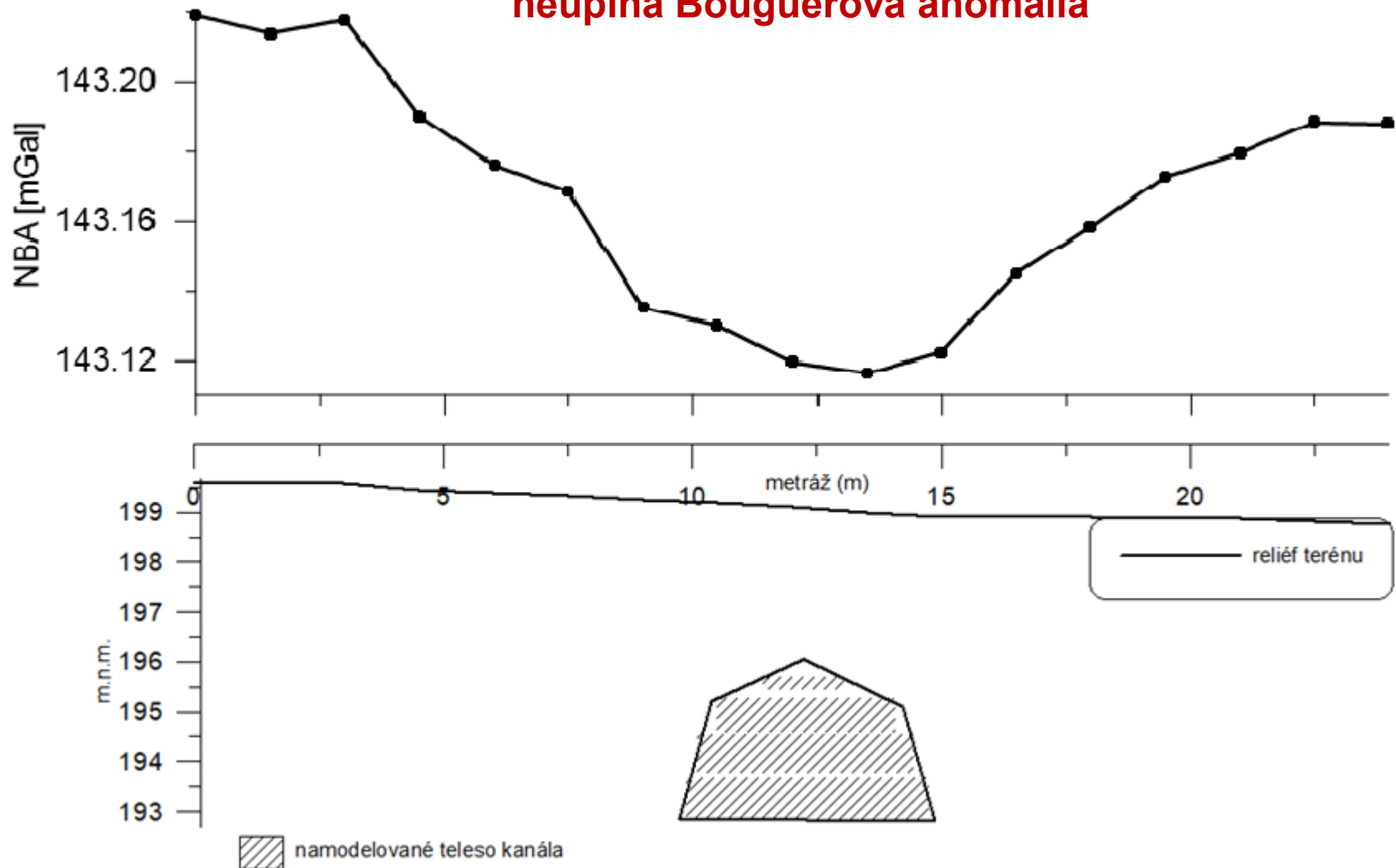
tzv. Fayeova anomália
(odstránený vplyv výšok)



kanalizačný zberač, Gagarinova ul., BA

$$\text{NBA} = g + 0.3086h - 0.0419h\rho$$

výsledok:
neúplná Bouguerova anomália



Praktické ukážky (výhod) výpočtu ÚBA:

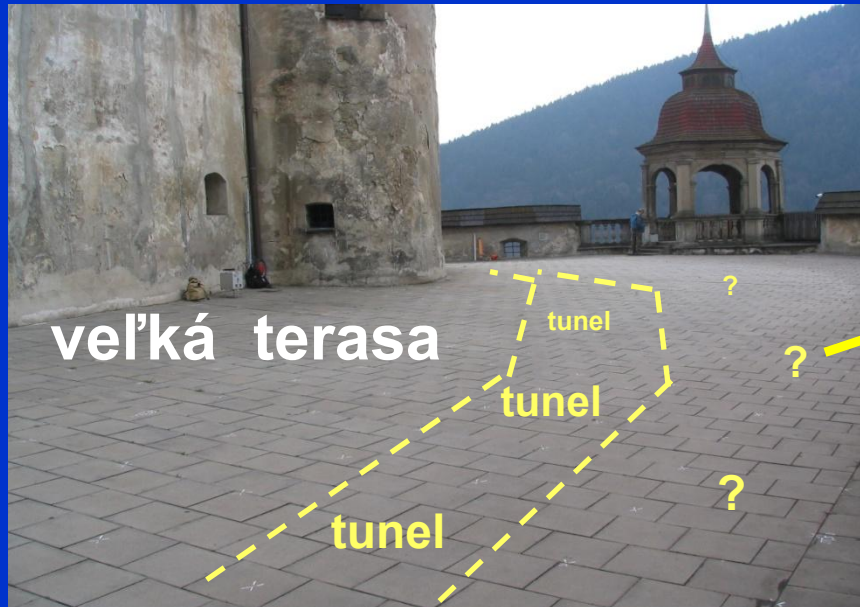
- hľadanie podzemných chodieb pod Veľkou terasou (Oravský zámok)



gravimetrický prieskum Veľkej terasy Oravského zámku



gravimetrický prieskum Veľkej terasy Oravského zámku



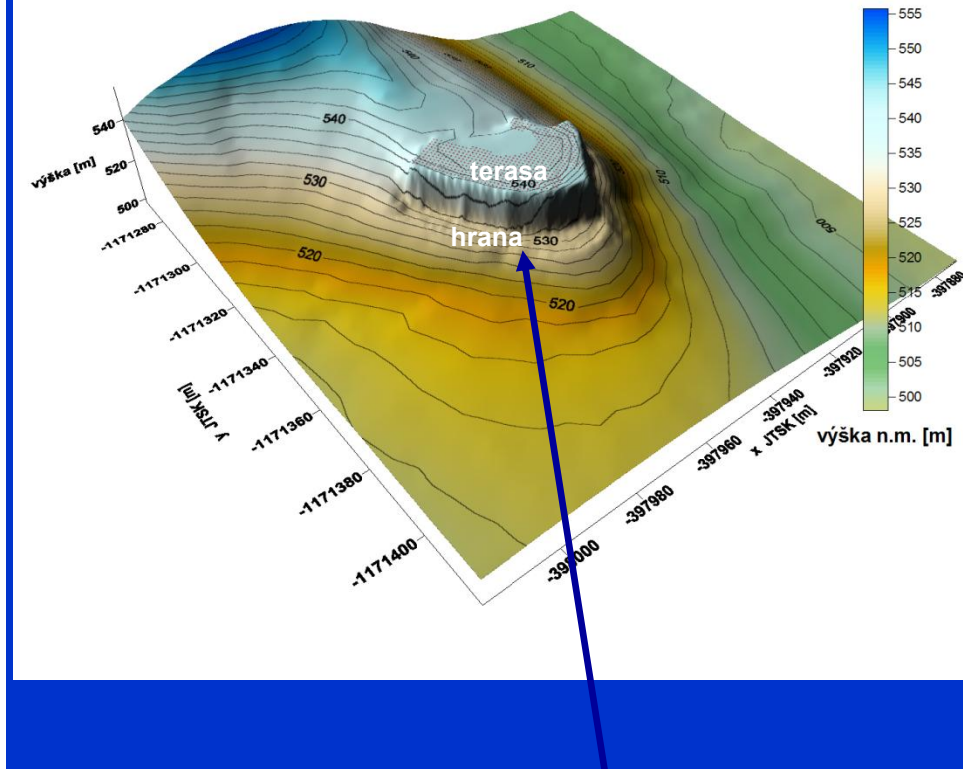
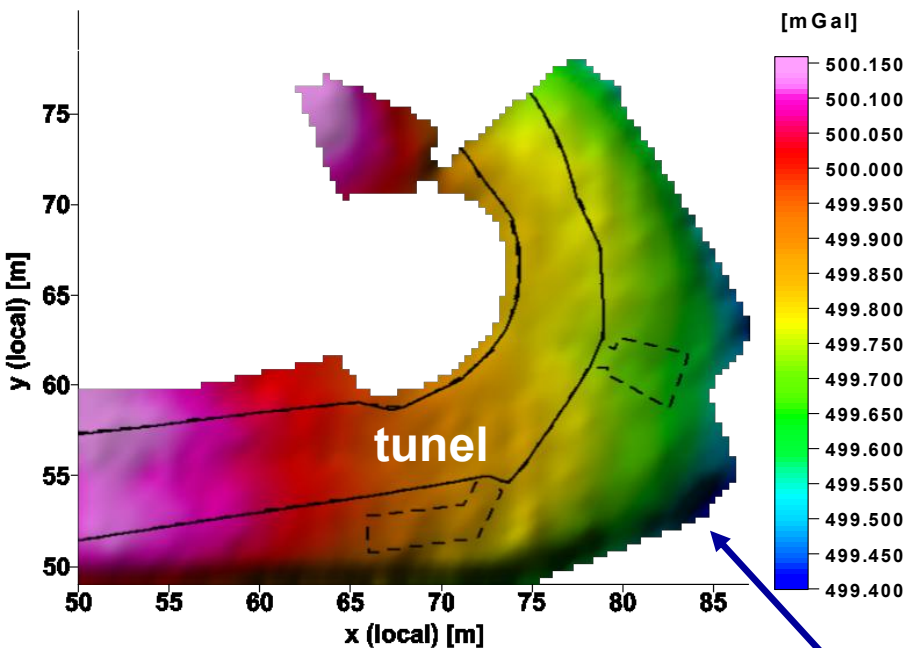
cieľom prieskumu
bolo nájsť možné
spojovacie chodby
medzi tunelom a
opevnením



pohľad od
prístupovej
cesty na
zámok

gravimetrický prieskum Veľkej terasy Oravského zámku

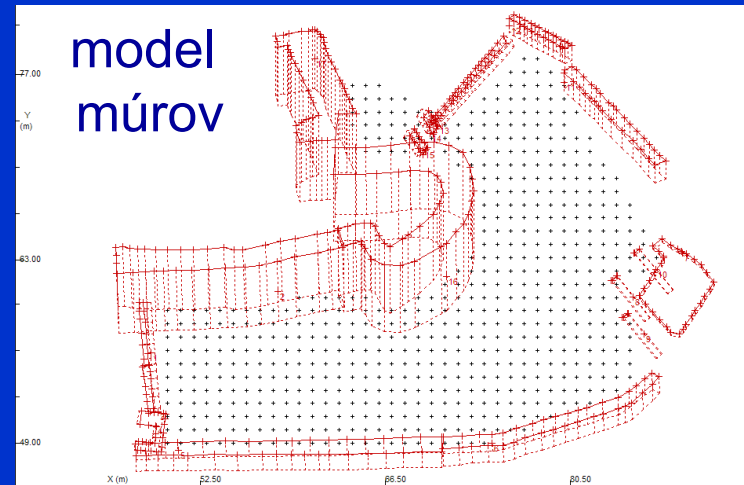
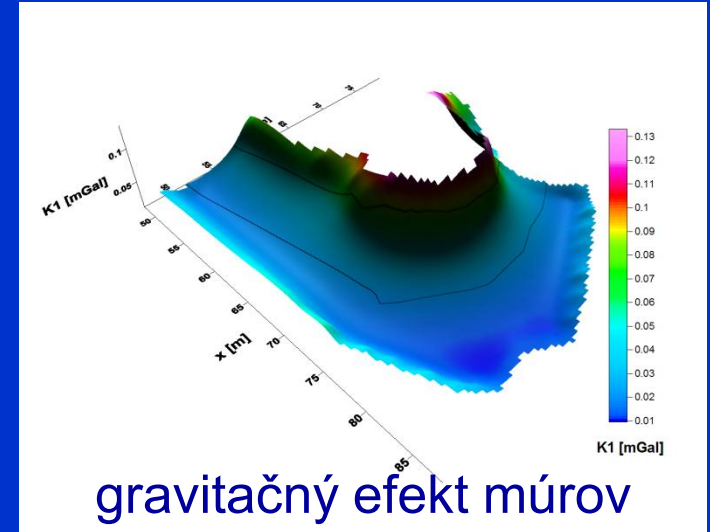
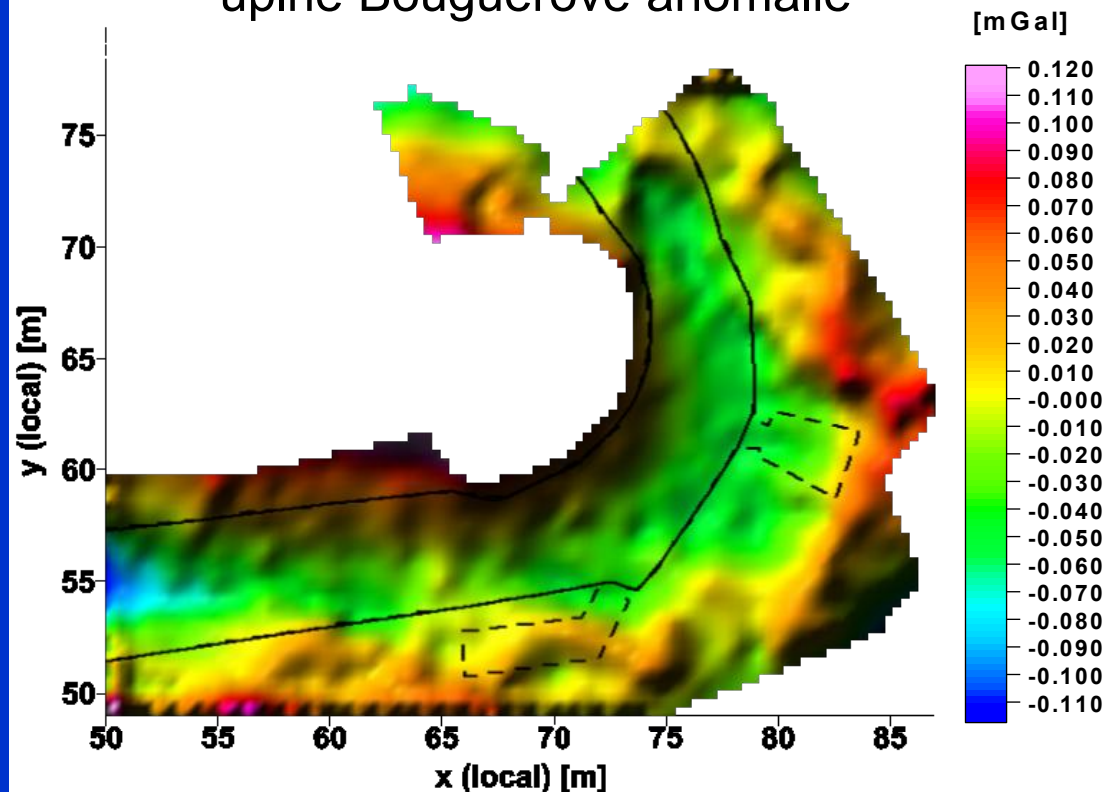
merané Δg



výrazný prejav ostrej hrany za múrmi
(vzduch = chýbajúce hmoty = pokles Δg)

gravimetrický prieskum Veľkej terasy Oravského zámku

úplné Bouguerove anomálie



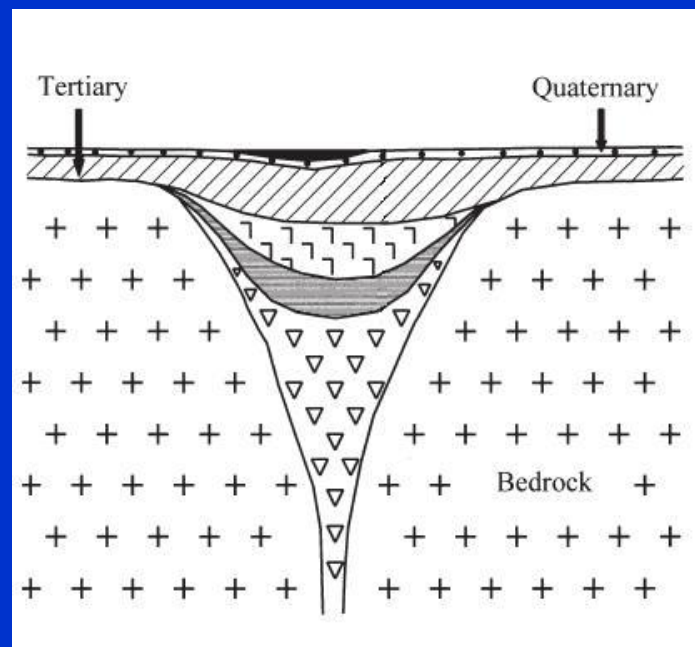
až po aplikovaní všetkých korekcií
(aj opravy o gravit. účinkov múrov)
sa v mape úplných Bouguerových
anomálií prejaví prítomnosť tunelu
a ostatných hustotných nehomogenít

Praktické ukážky (výhod) výpočtu ÚBA:

- vymapovanie rozsahu maarového telesa,
Pinciná, Lučenec



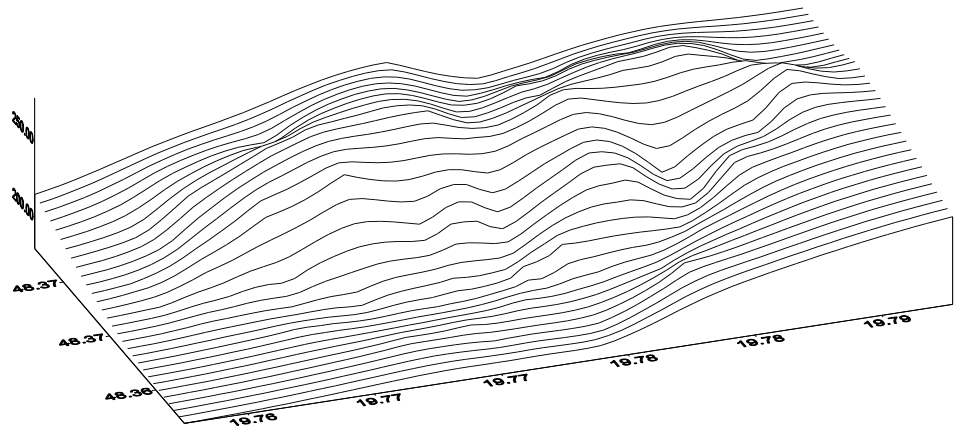
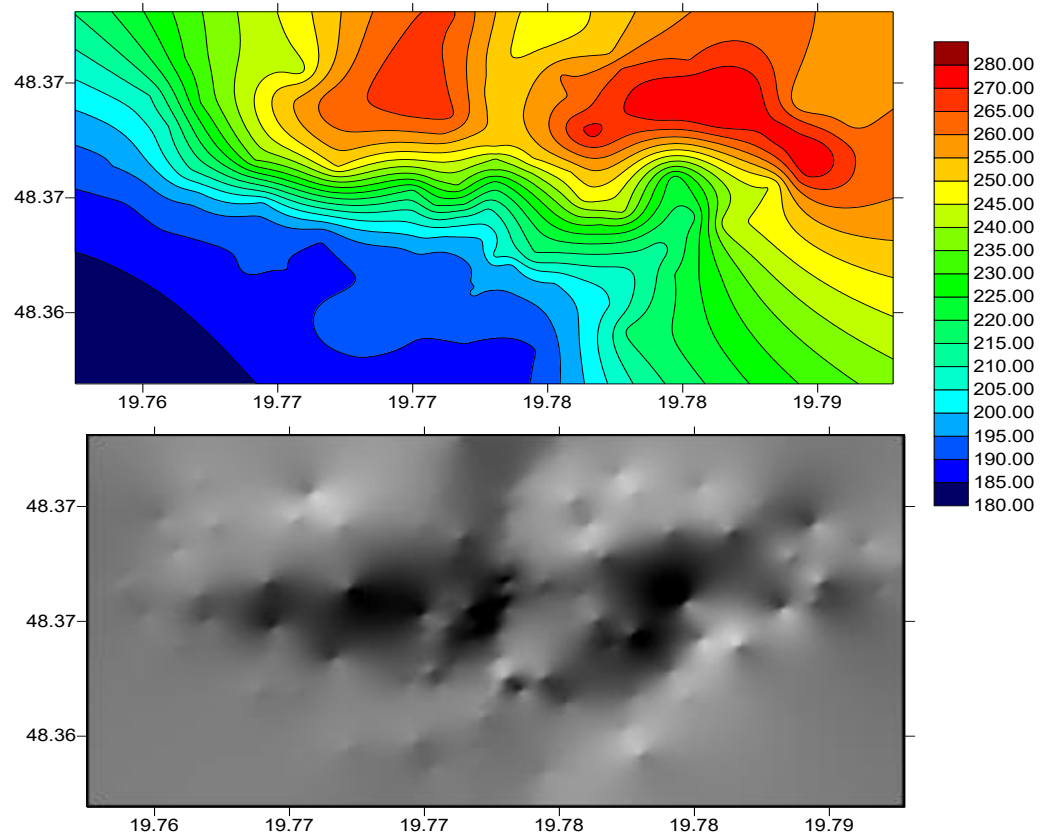
súčasný maar, Nemecko



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

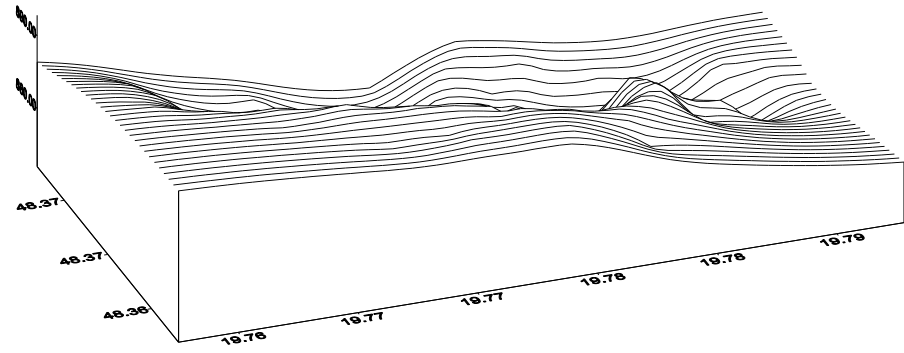
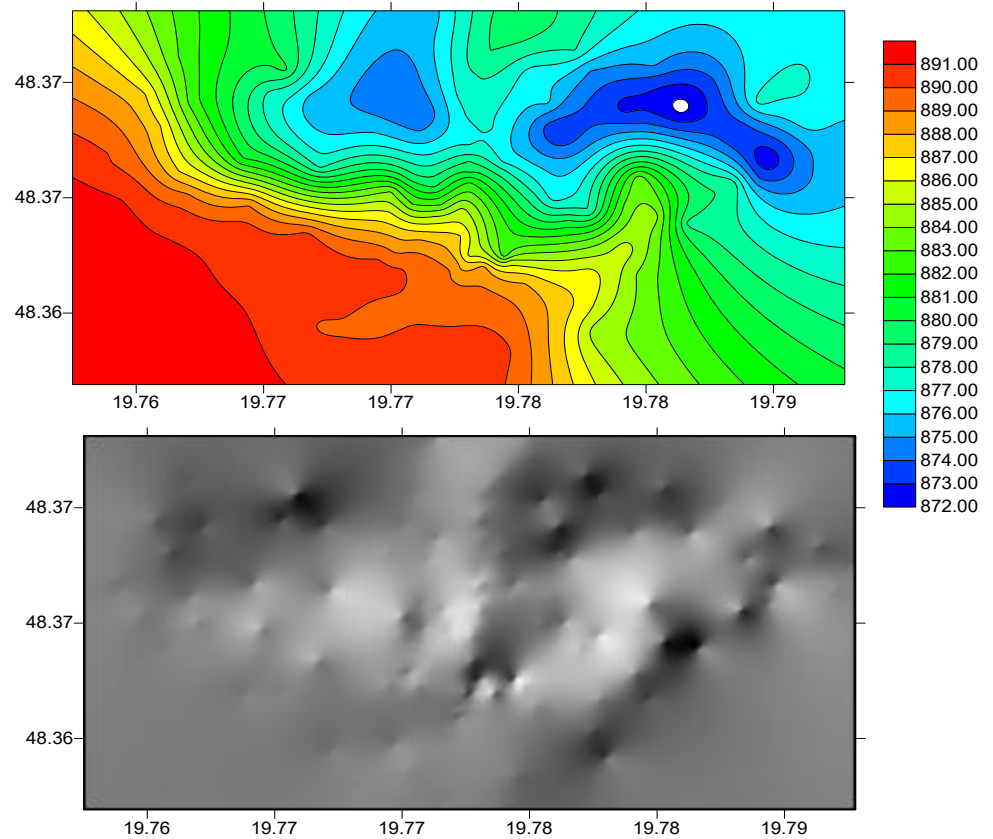
maarová štruktúra, Pinciná pri Lučenci

nadmorské
výšky



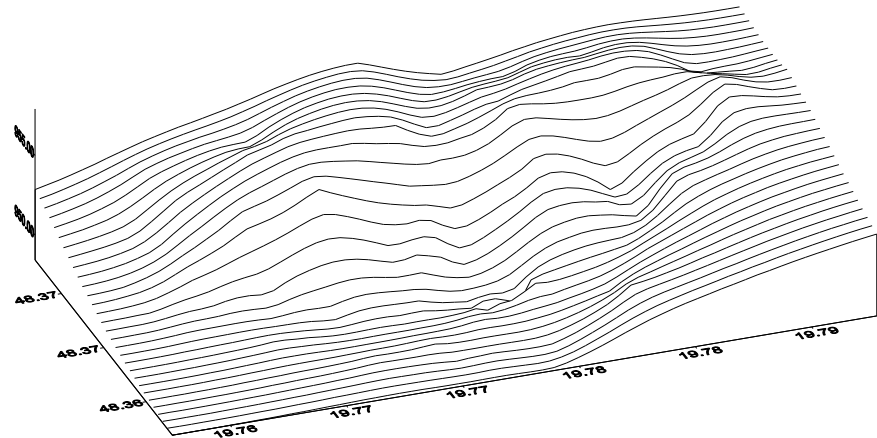
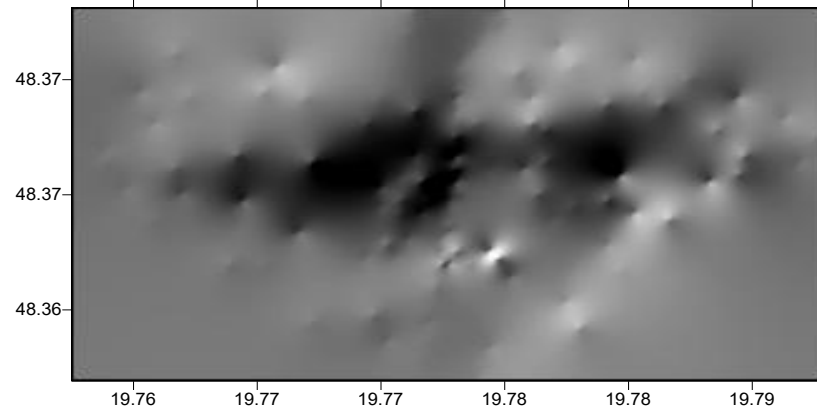
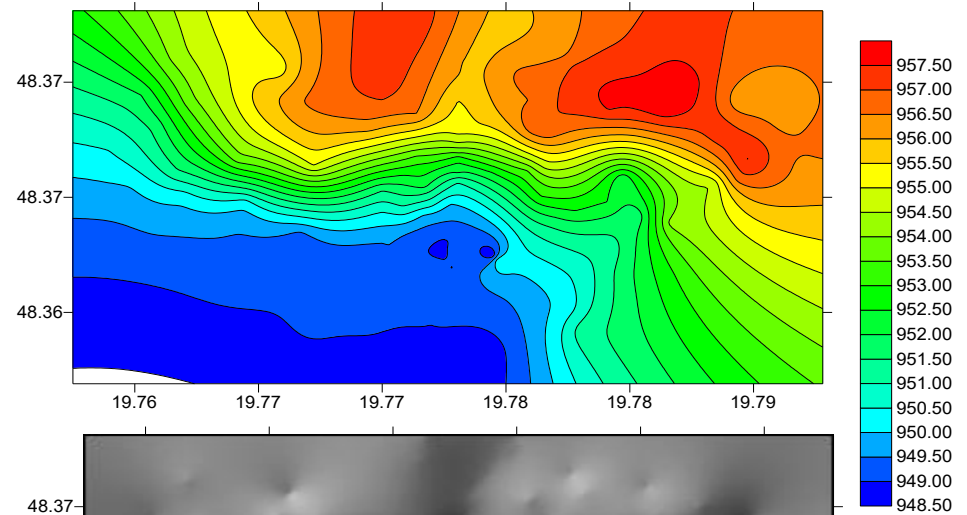
maarová štruktúra, Pinciná pri Lučenci

merané
ťažové
zrýchlenie g



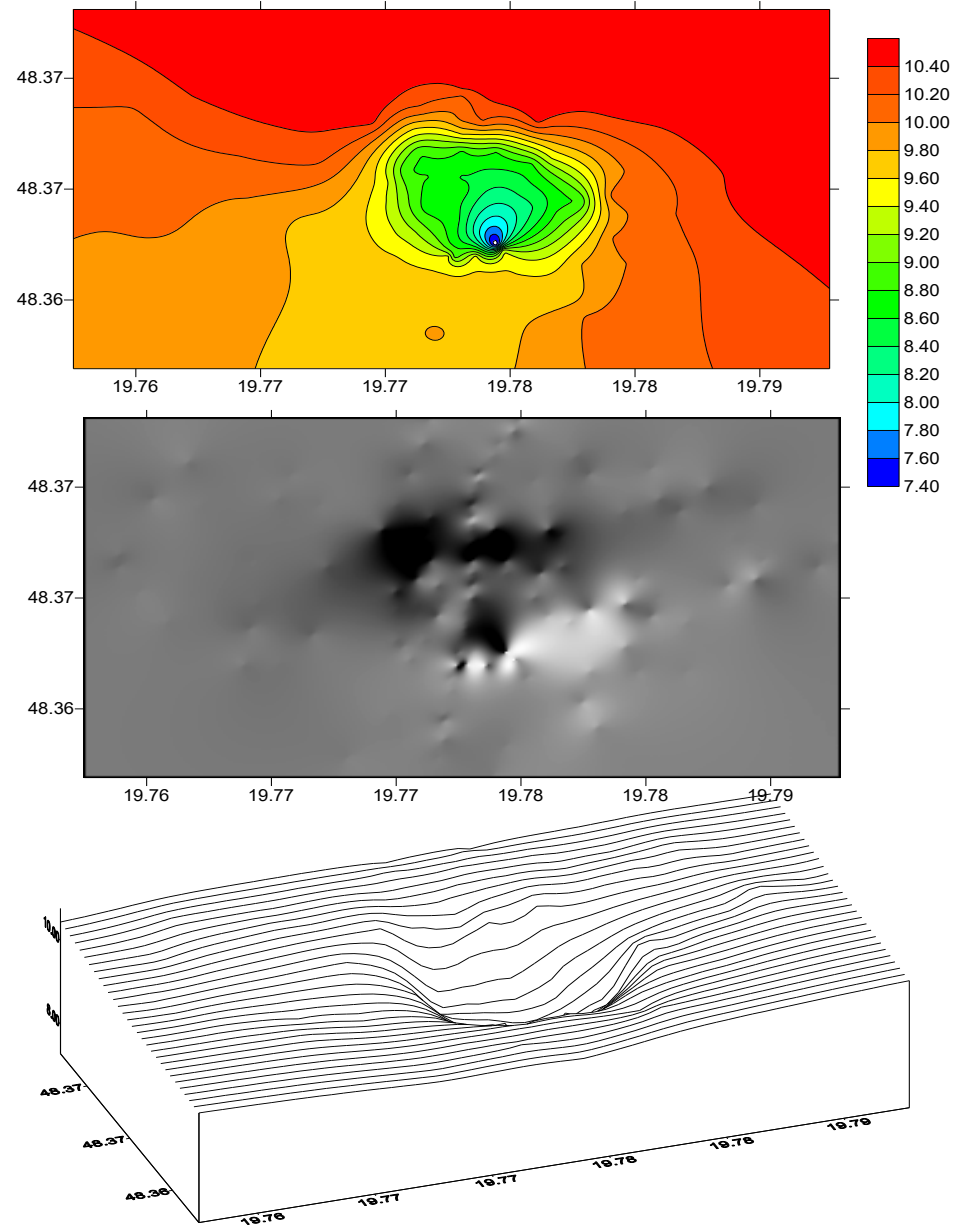
maarová štruktúra, Pinciná pri Lučenci

tzv. Fayeove
anomálie
(odstránený
hlavný vplyv
výšok)

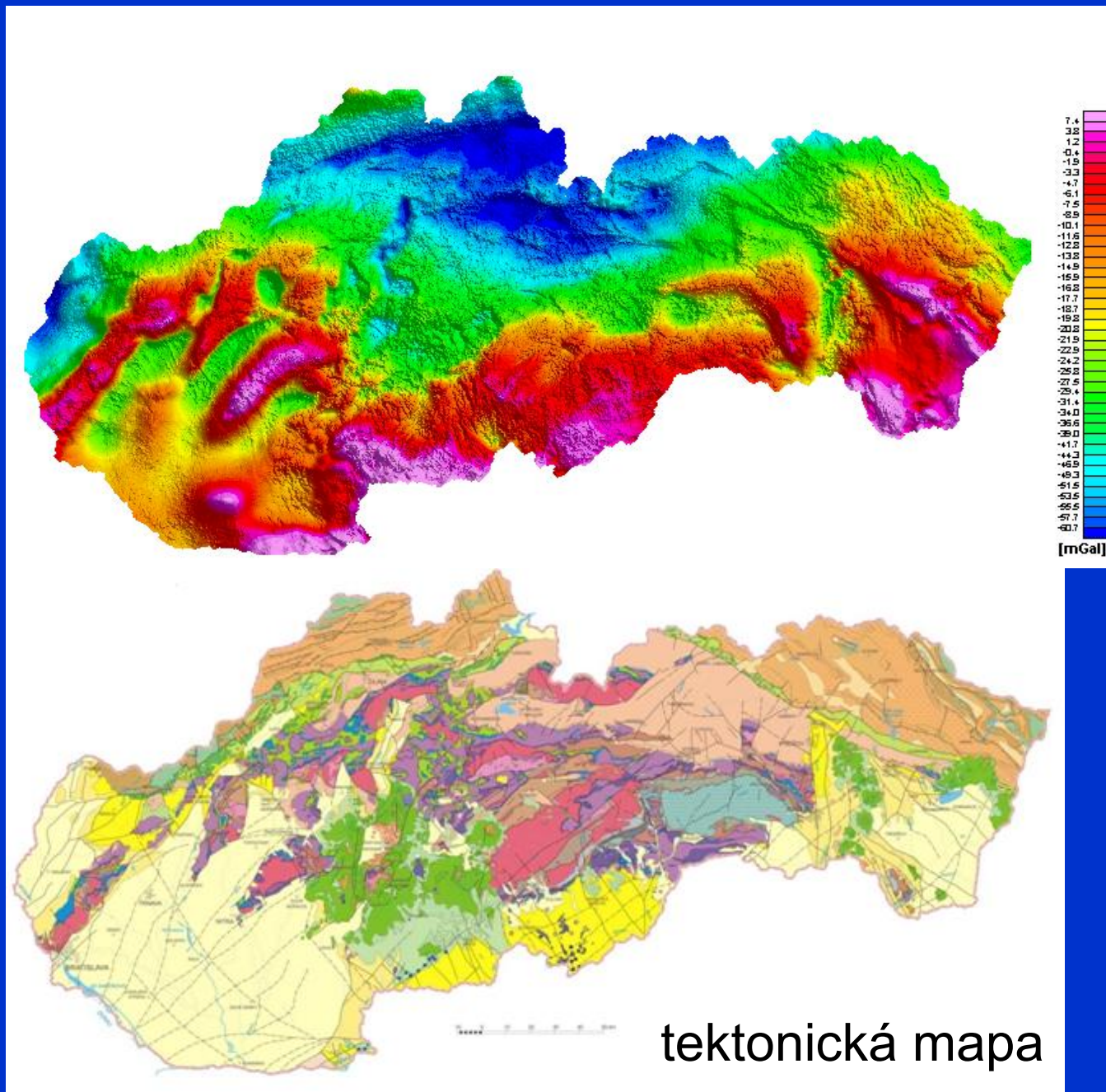


maarová štruktúra, Pinciná pri Lučenci

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



ÚBA (2.67 g.cm^{-3}) – územie Slovenska



interpretácia v gravimetrii

INTERPRETÁCIA –

kvalitatívna/kvantitatívna

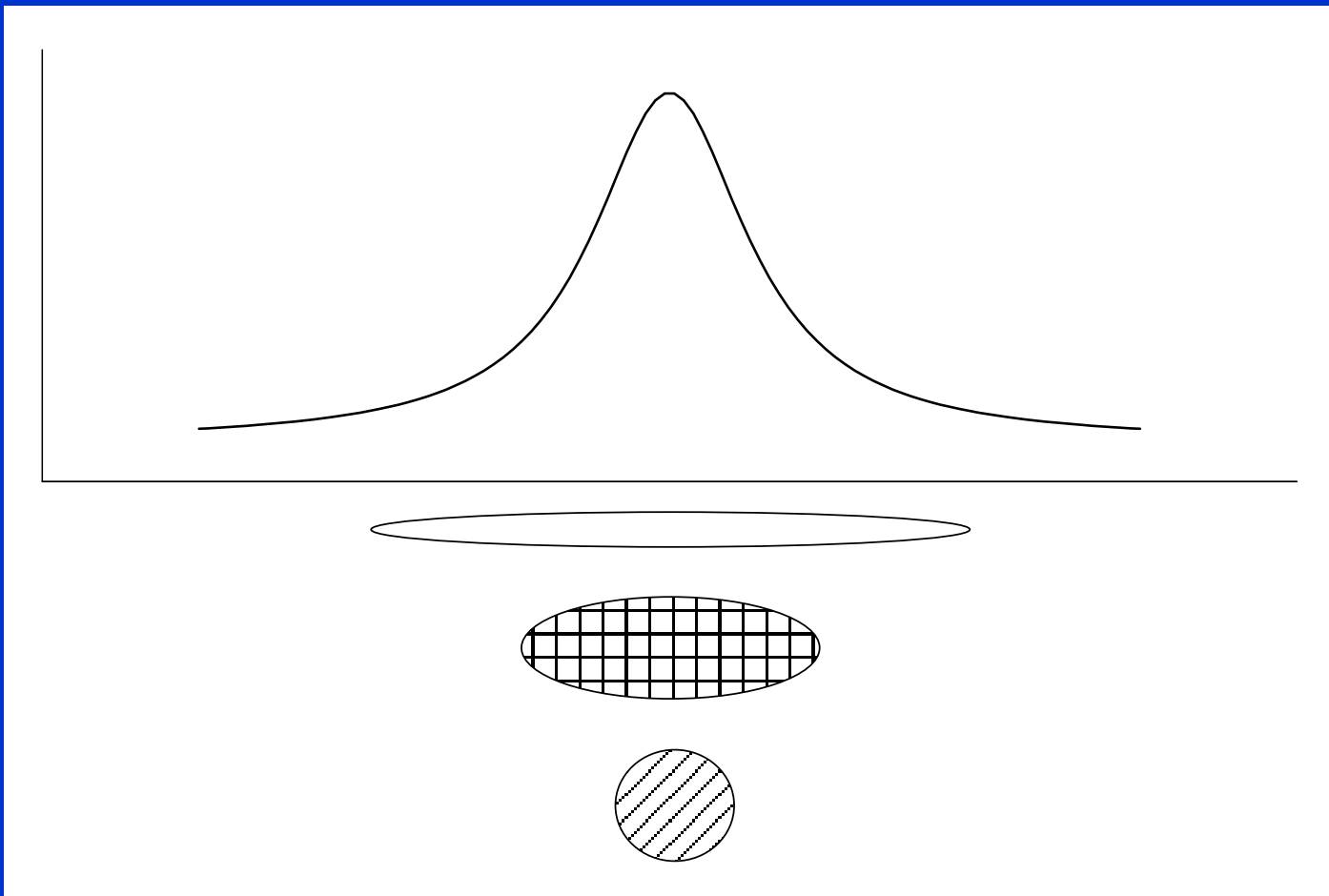
kvalitatívna – opisuje kvalitatívne pole ÚBA (znížené hodnoty = znížené hustoty objektov alebo vplyv geometrie telies, zvýšené... naopak)

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. modelovanie)
- b) obrátená úloha* – opačná úloha (náročnejšia)

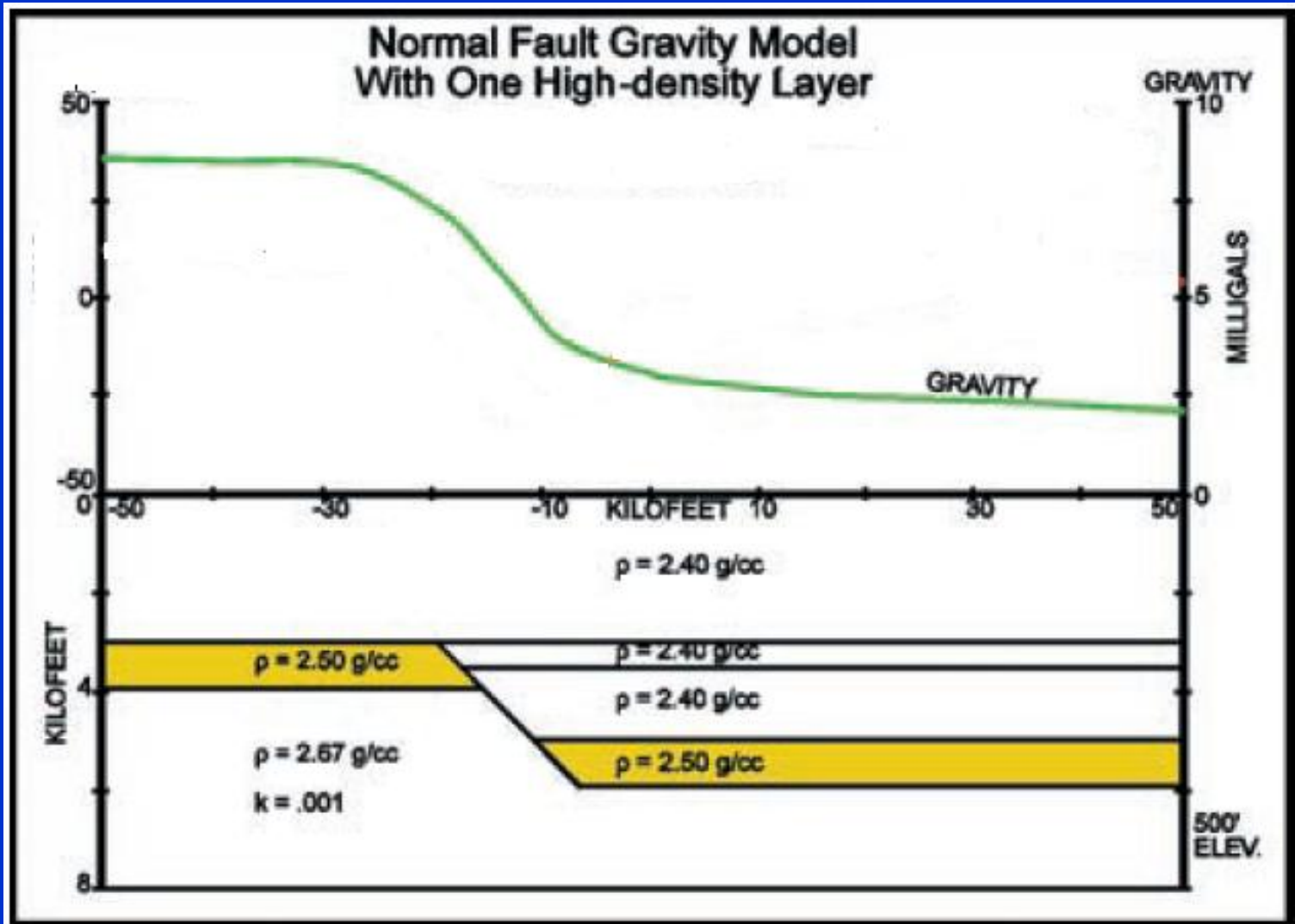
interpretácia v gravimetrii



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

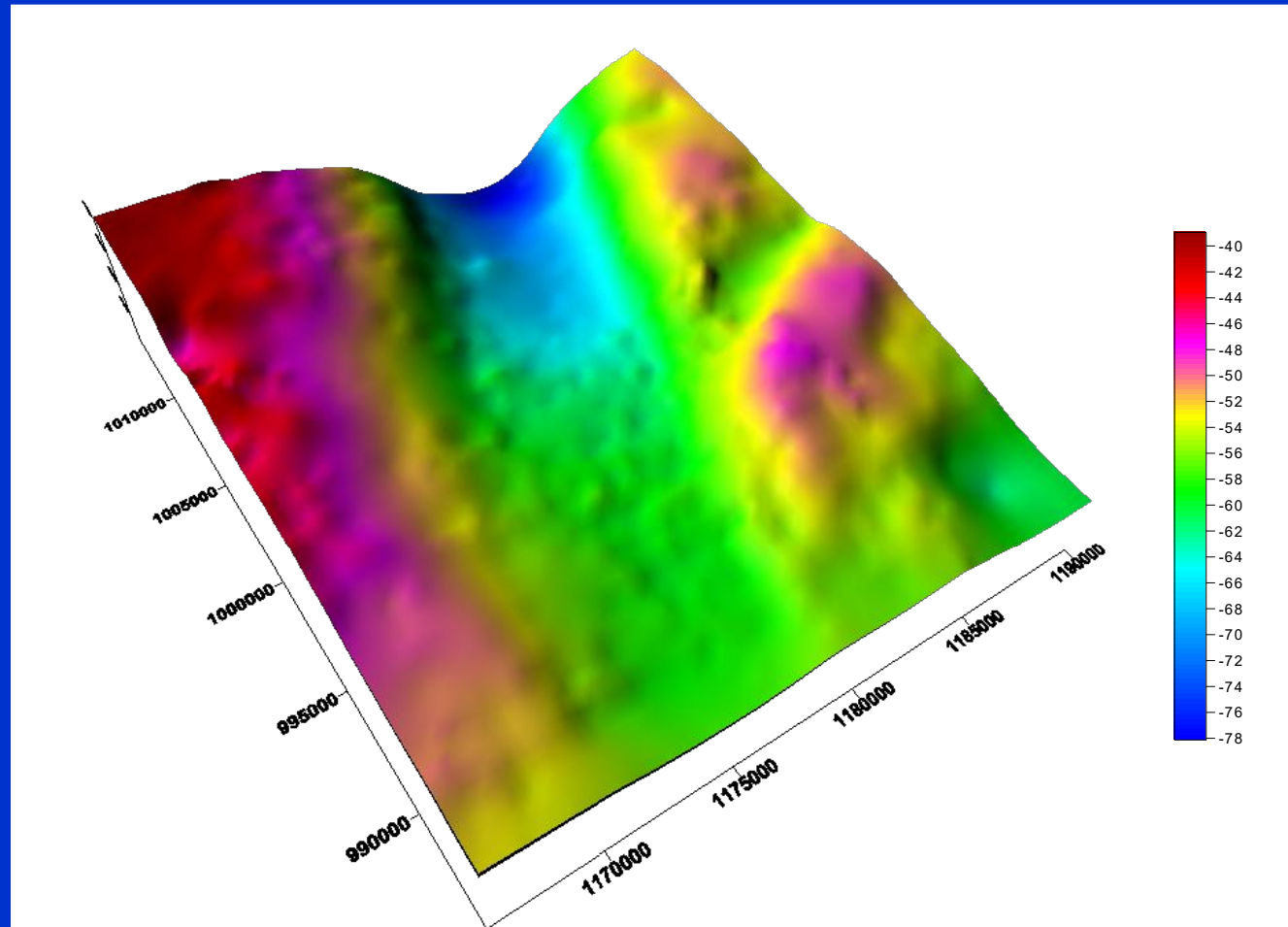
INTERPRETÁCIA – kvalitatívna

priebeh gravitačného účinku (ÚBA)
nad zlomom (poklesom)



INTERPRETÁCIA – kvalitatívna

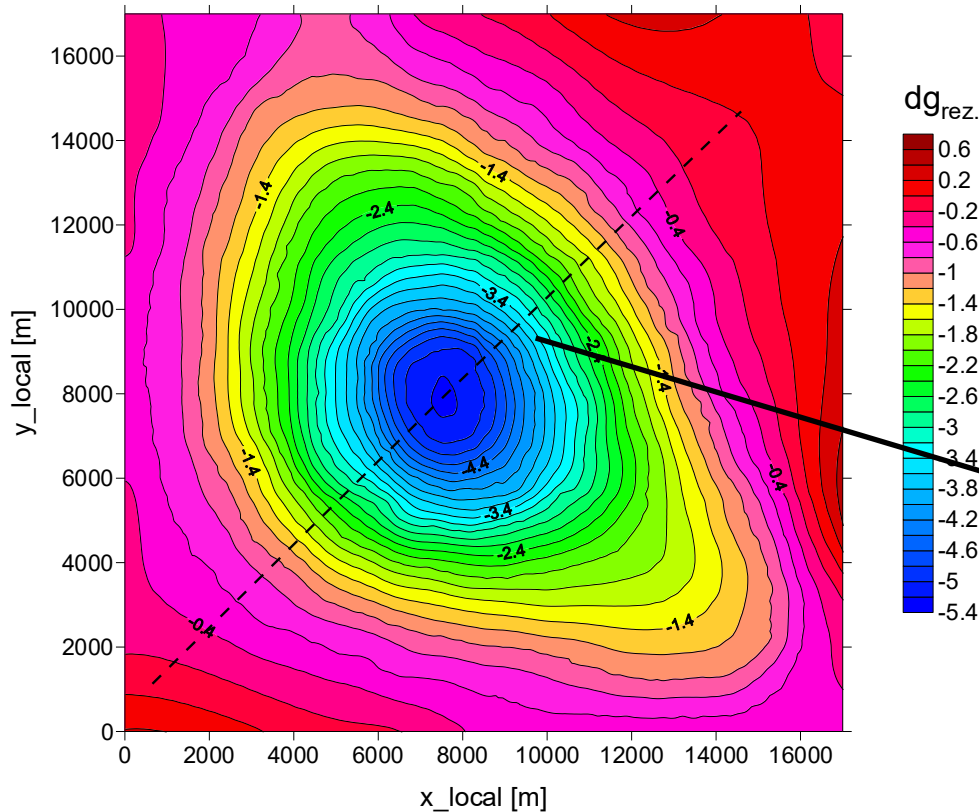
príklad: úplné Bouguerove anomálie z oblasti Mŕtveho mora (sedimenty mora sú ľahšie ako okolie)



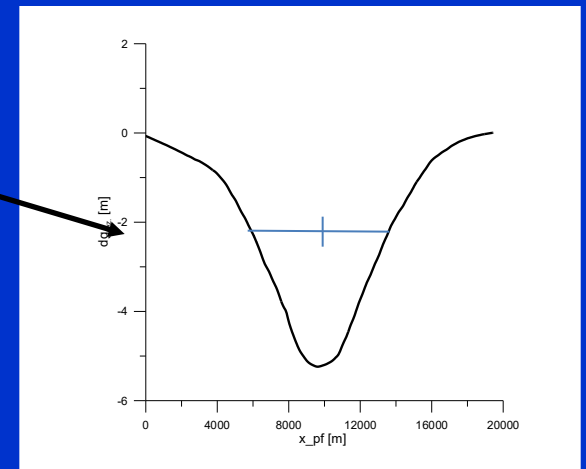
INTERPRETÁCIA – kvantitatívna

tzv. metóda polovičnej šírky

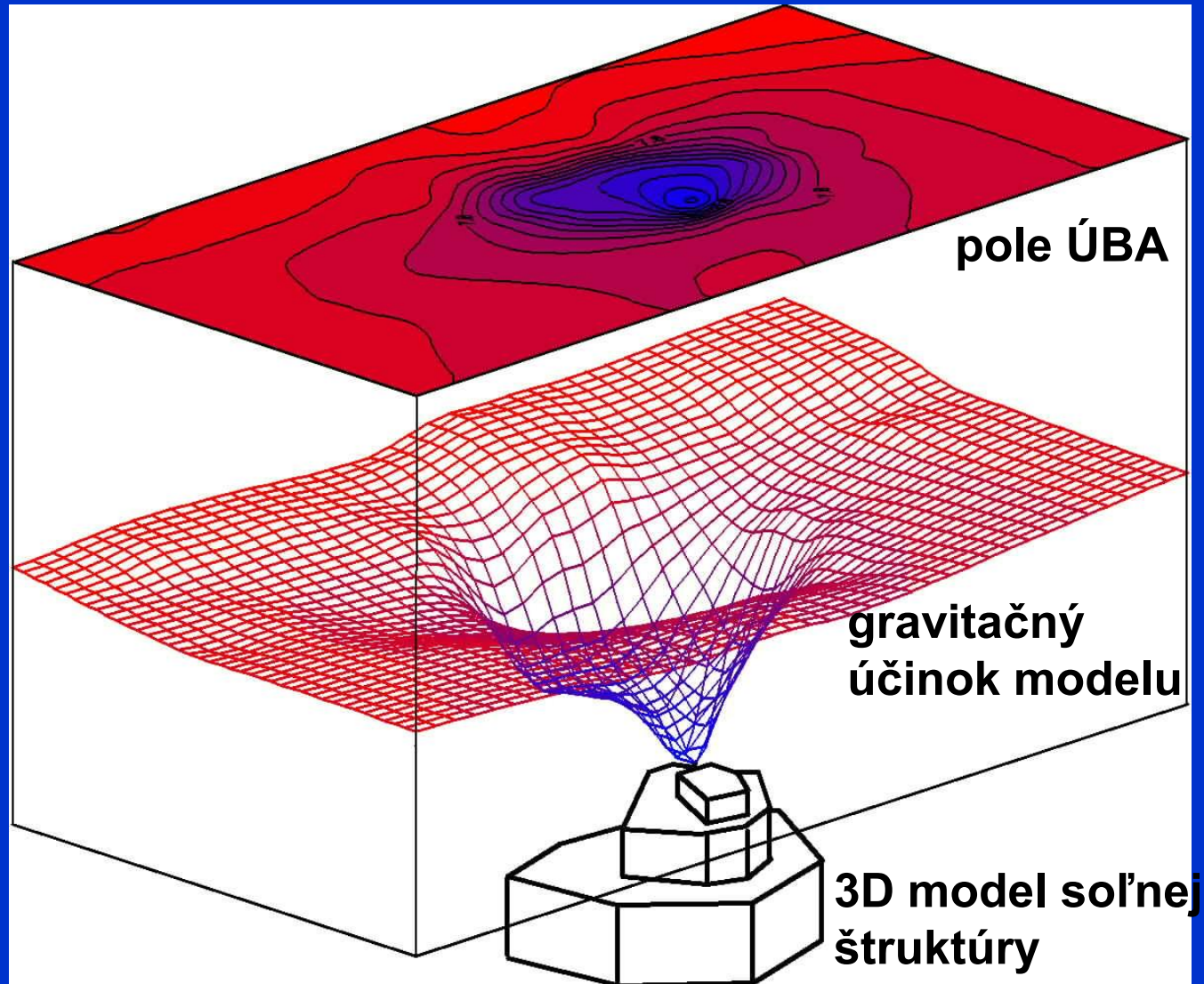
jednoduchý príklad – Bouguerova anomália prejavu soľného diapíru, lokalita Louisiana príbrežná oblasť (Nettleton, 1976)



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



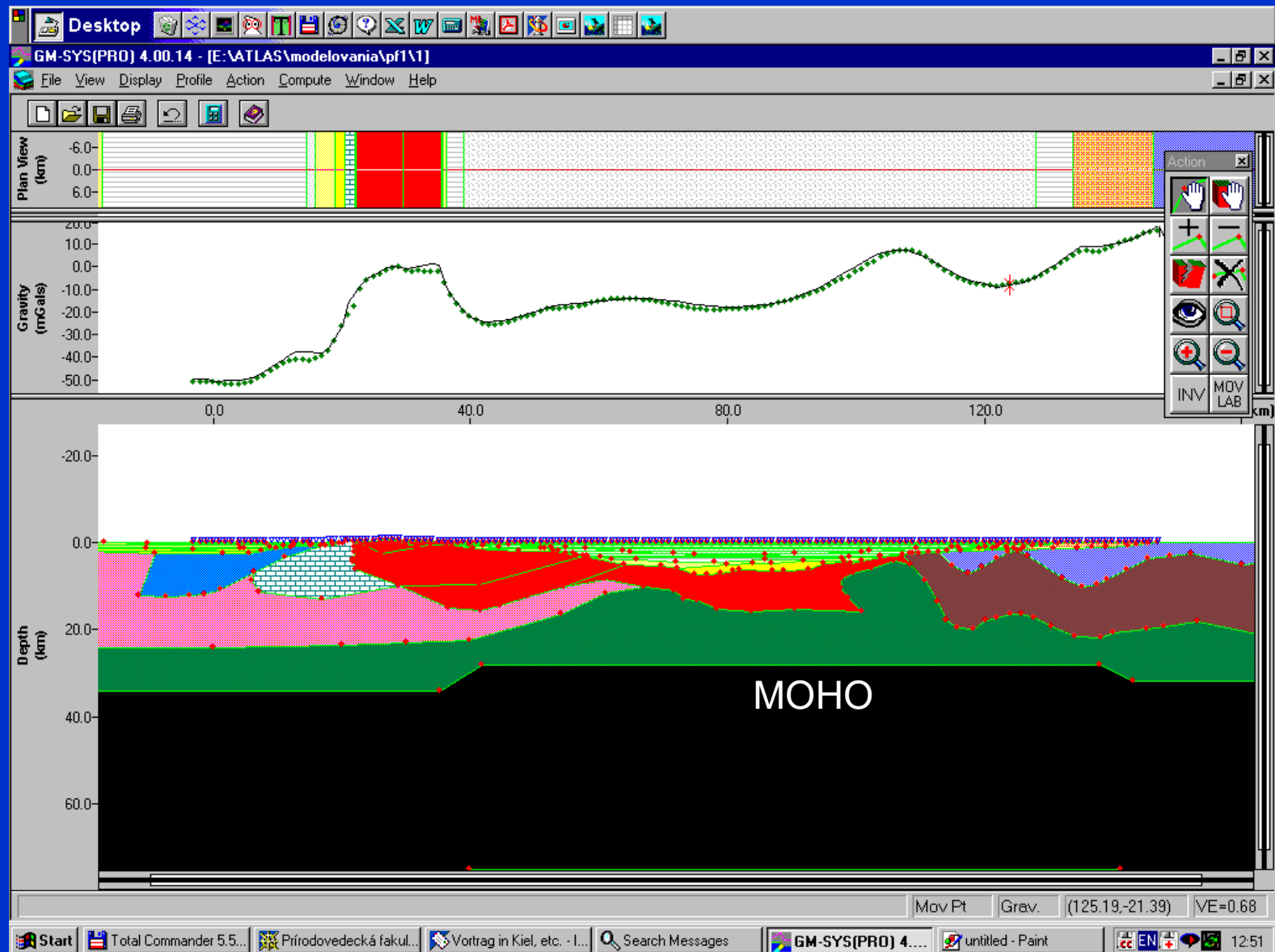
INTERPRETÁCIA – kvantitatívna tzv. hustotné modelovanie



využitie gravimetrie

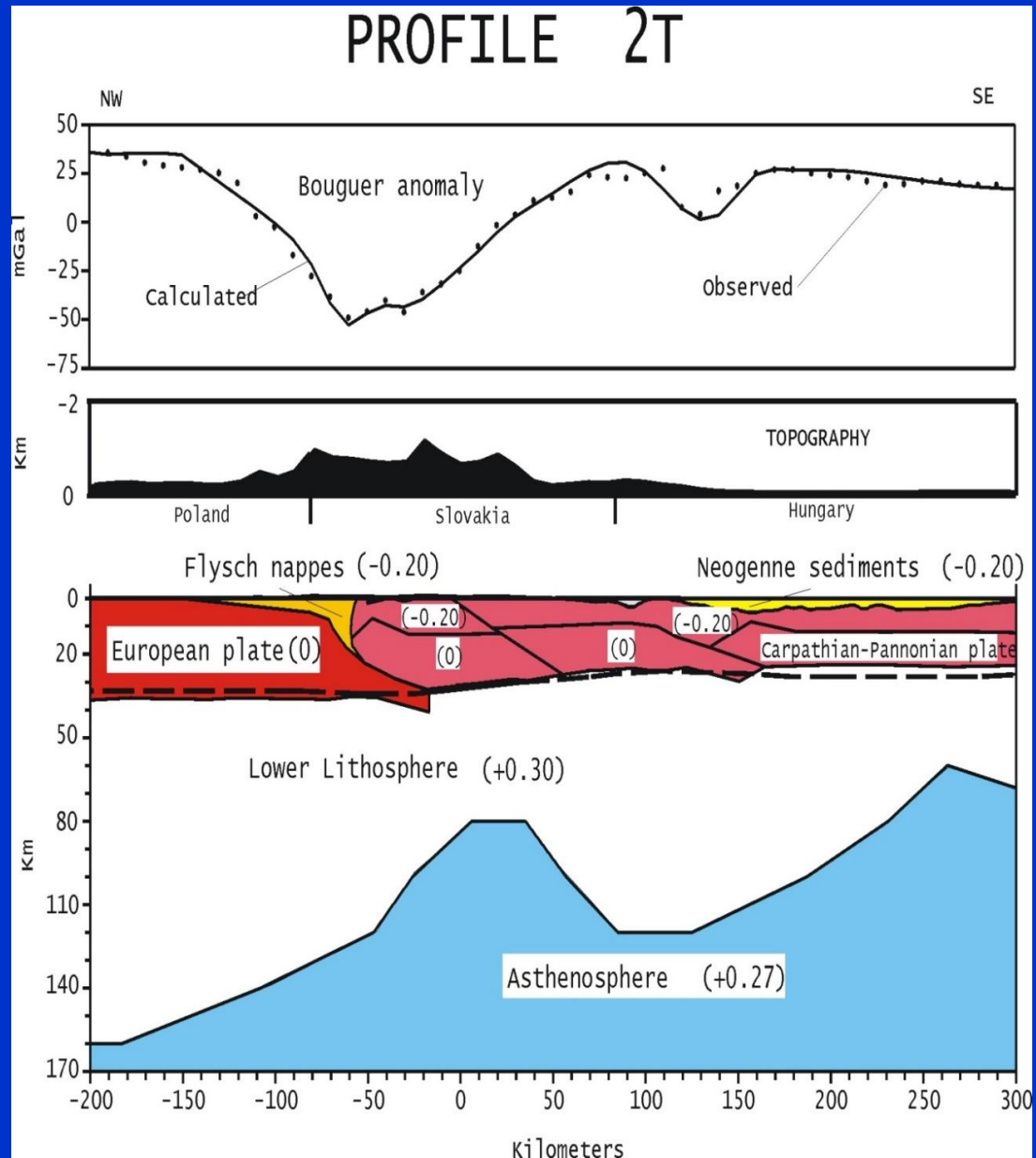
- v regionálnej a štruktúrnej geológii
- v ložiskovom a ropnom prieskume
- detekcia dutín
(inžiniersky, environmentálny prieskum,
archeológia, ...)
- atď. (hustotné nehomogenity)

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

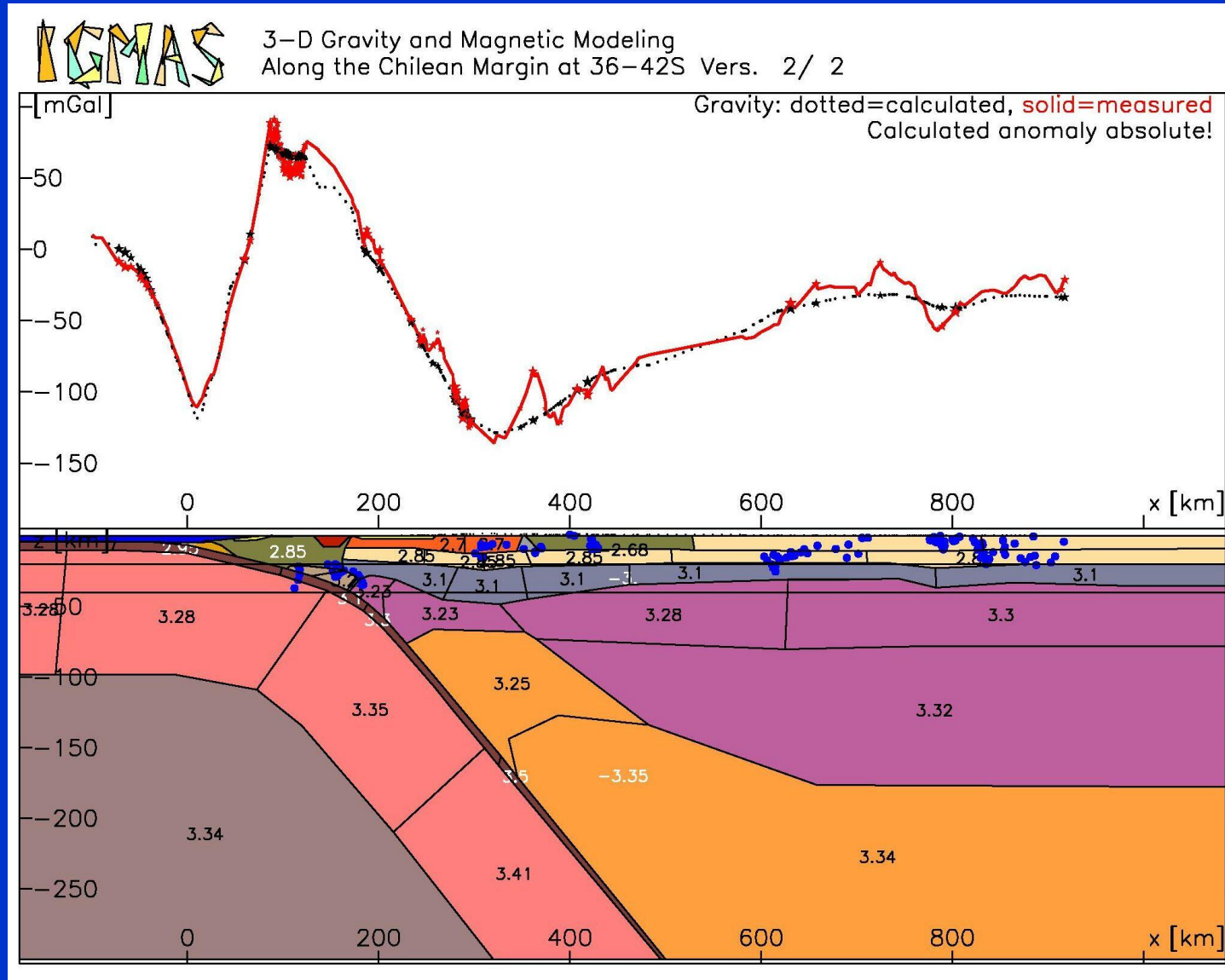


výsledok hustotného modelovania – profil cez Malé Karpaty a Dunajskú panvu, SR (model siaha až do 170 km)

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

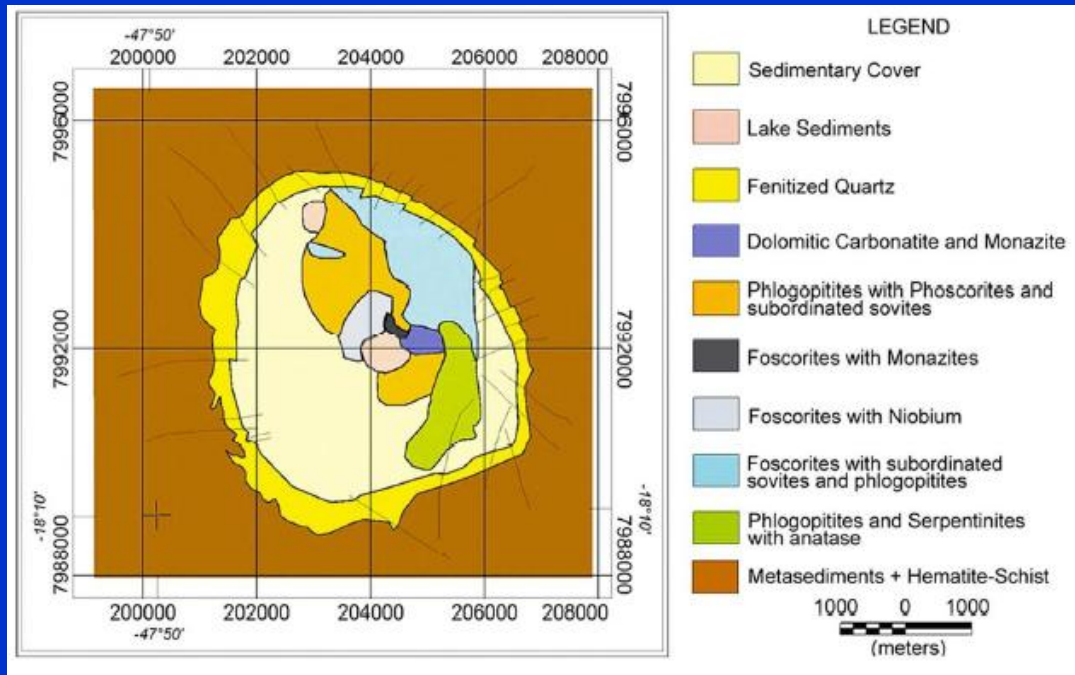


výsledok hustotného modelovania – profil zo subdukcie oceánickej platne Nasca pod juhoamerický kontinent (model siaha až do 250 km)

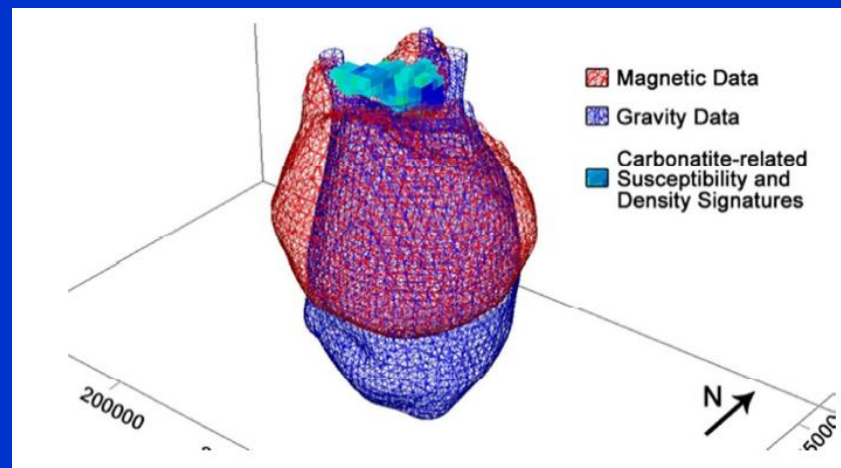
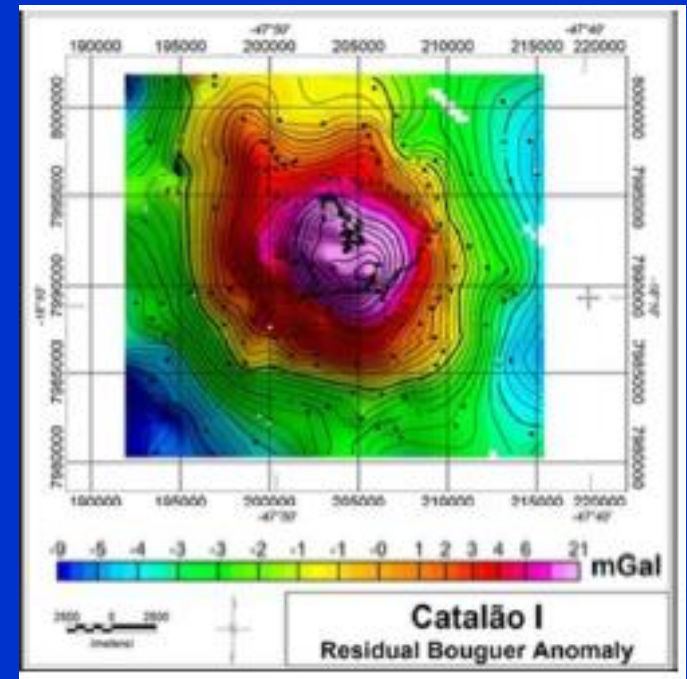


výsledky prieskumu karbonatitého ložiska Catalão, Brazília

geologická mapa štruktúry

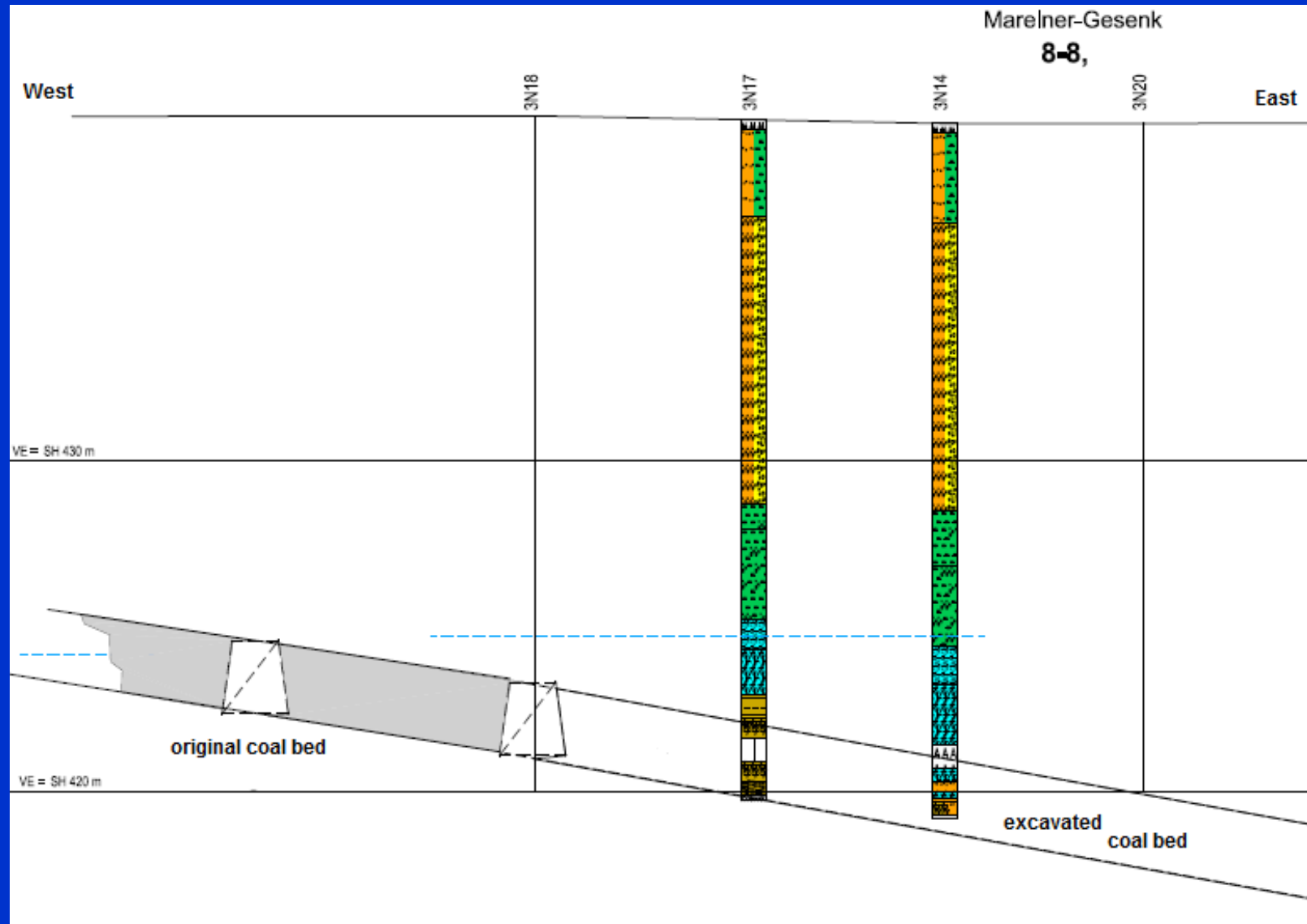


Bouguerove anomálie



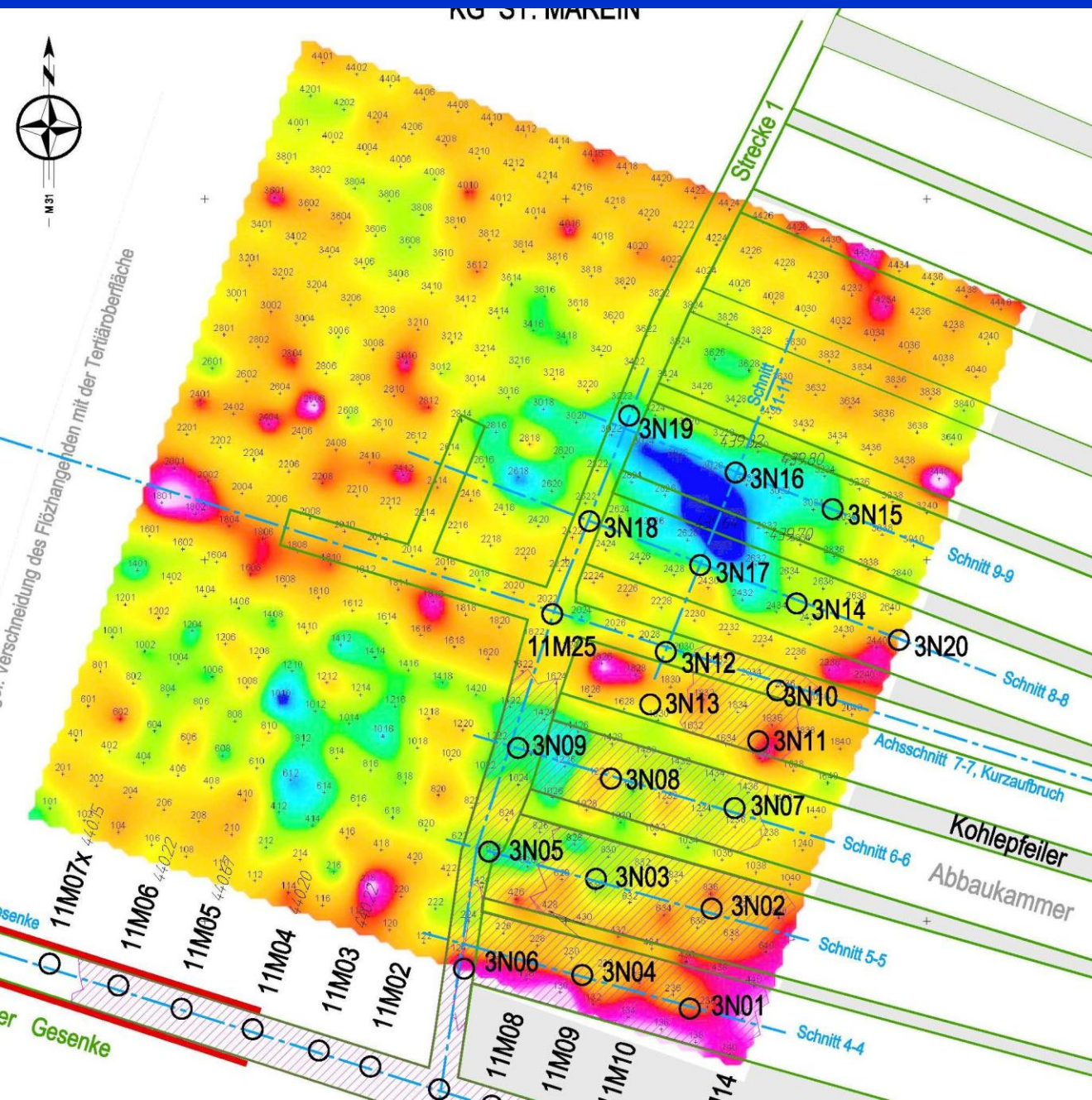
výsledok 3D hustotného a suscept. modelovania

lokalita Wolfsberg, Rakúsko, 2012

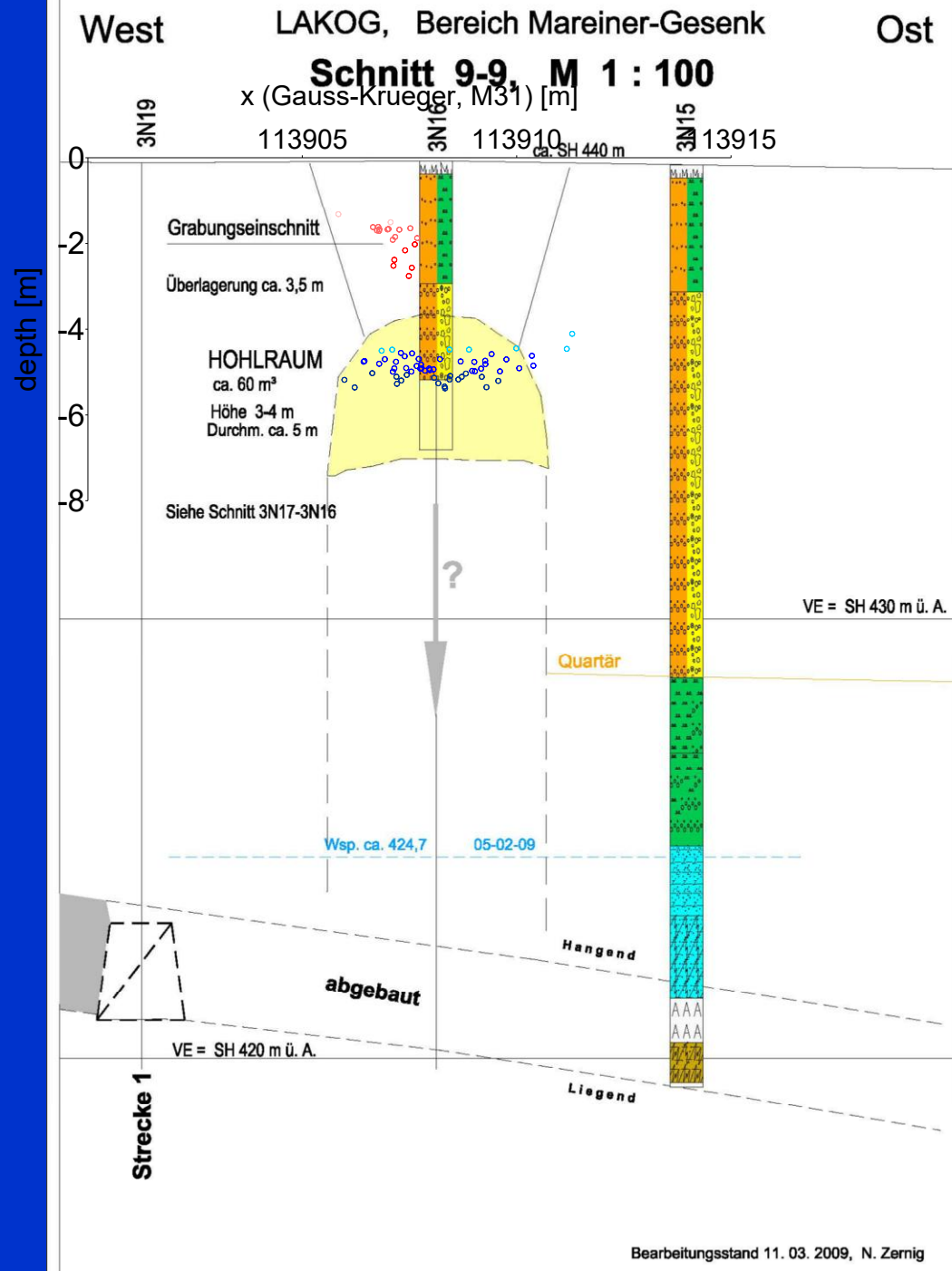


priestor bývalej bane na hnedé uhlie (neogénny vek)

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)

odkopaná dutina

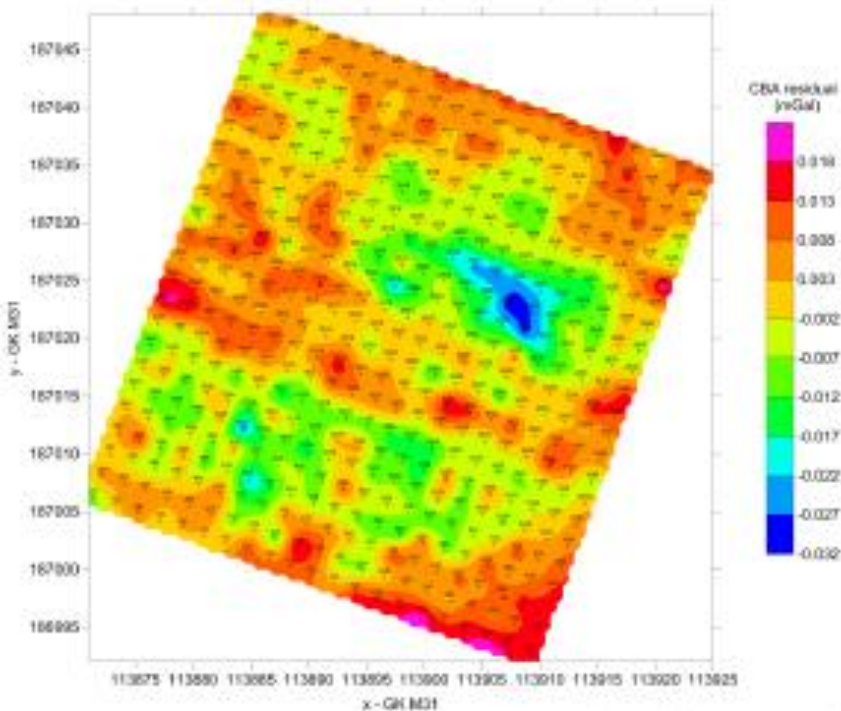
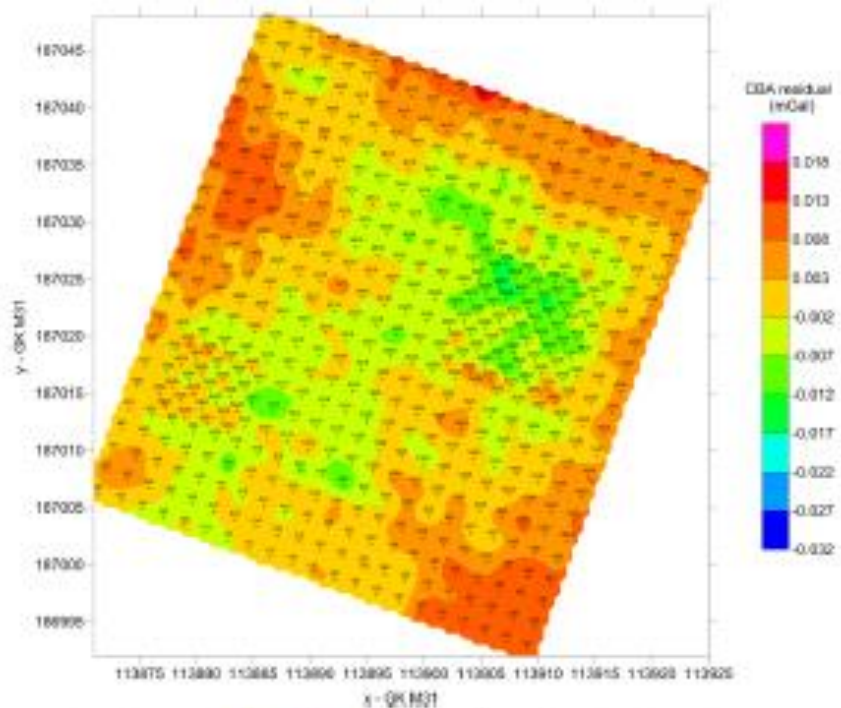
lokalita Wolfsberg,
Rakúsko, 2012



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

2016

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



2012

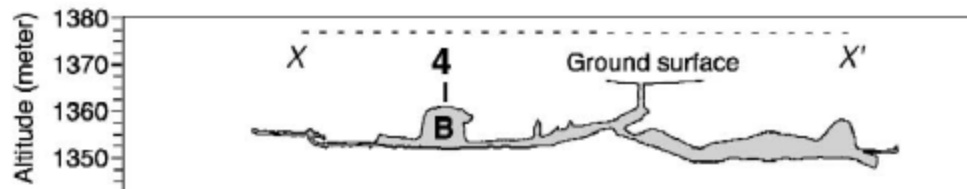
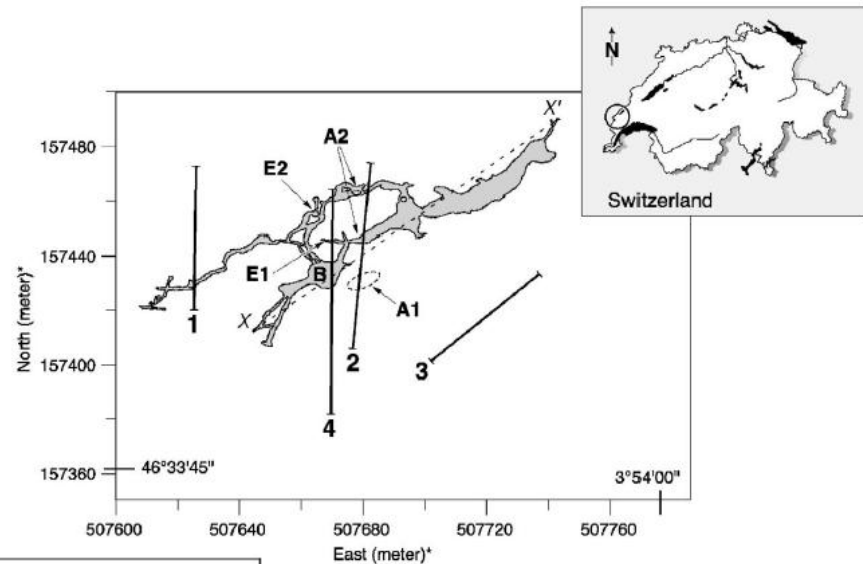


Integration of ground-penetrating radar and microgravimetric methods to map shallow caves

Milan Beres*, Marc Luetscher, Raymond Olivier

Institut de Géophysique, Collège Propédeutique, Université de Lausanne, CP, CH-1015 Lausanne, Switzerland

Received 1



prieskum krasových útvarov

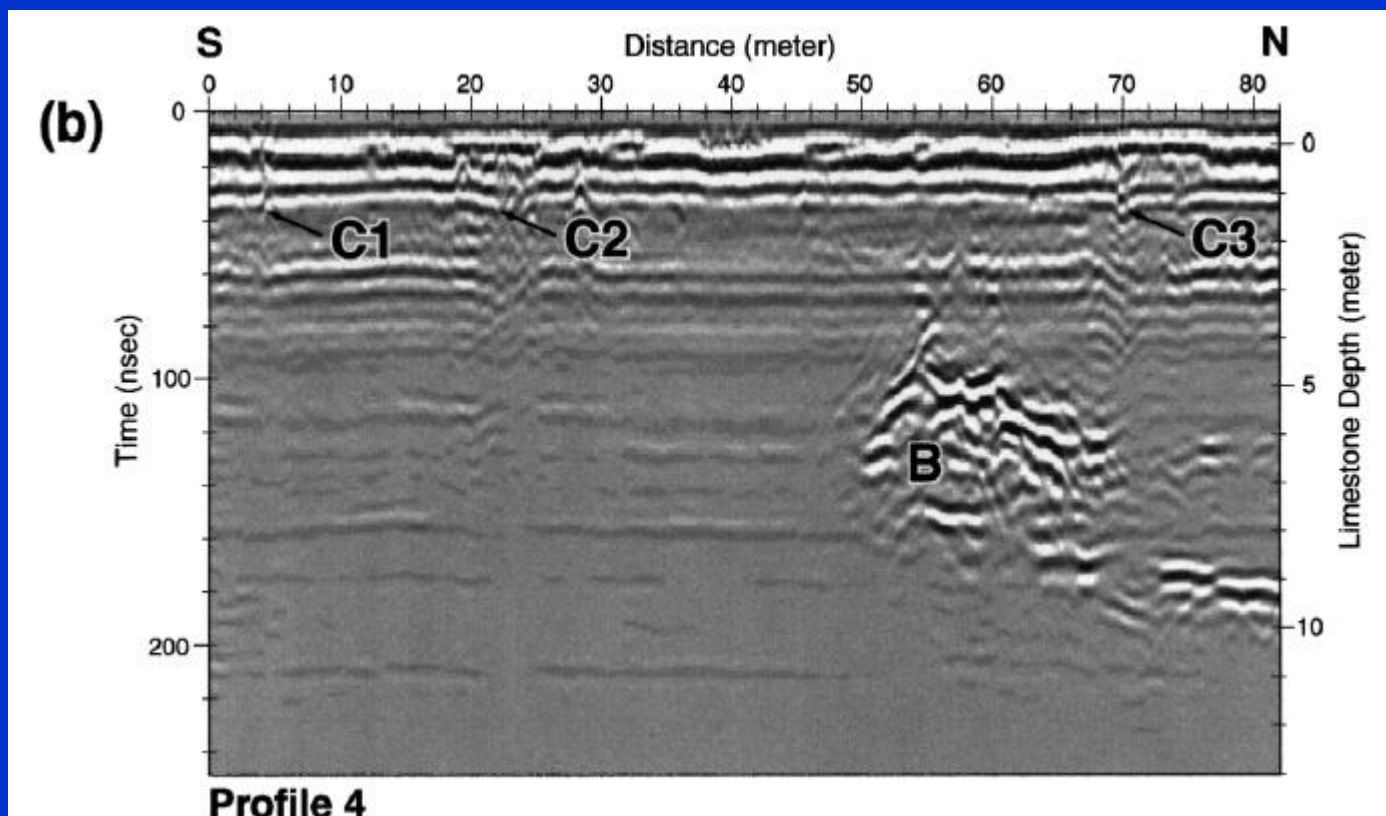
Integration of ground-penetrating radar and microgravimetric methods to map shallow caves

Milan Beres*, Marc Luetscher, Raymond Olivier

Institut de Géophysique, Collège Propédeutique, Université de Lausanne, CP, CH-1015 Lausanne, Switzerland

Received 14 March 2000; accepted 12 February 2001

radargram – migrovaný rez



prieskum krasových útvarov

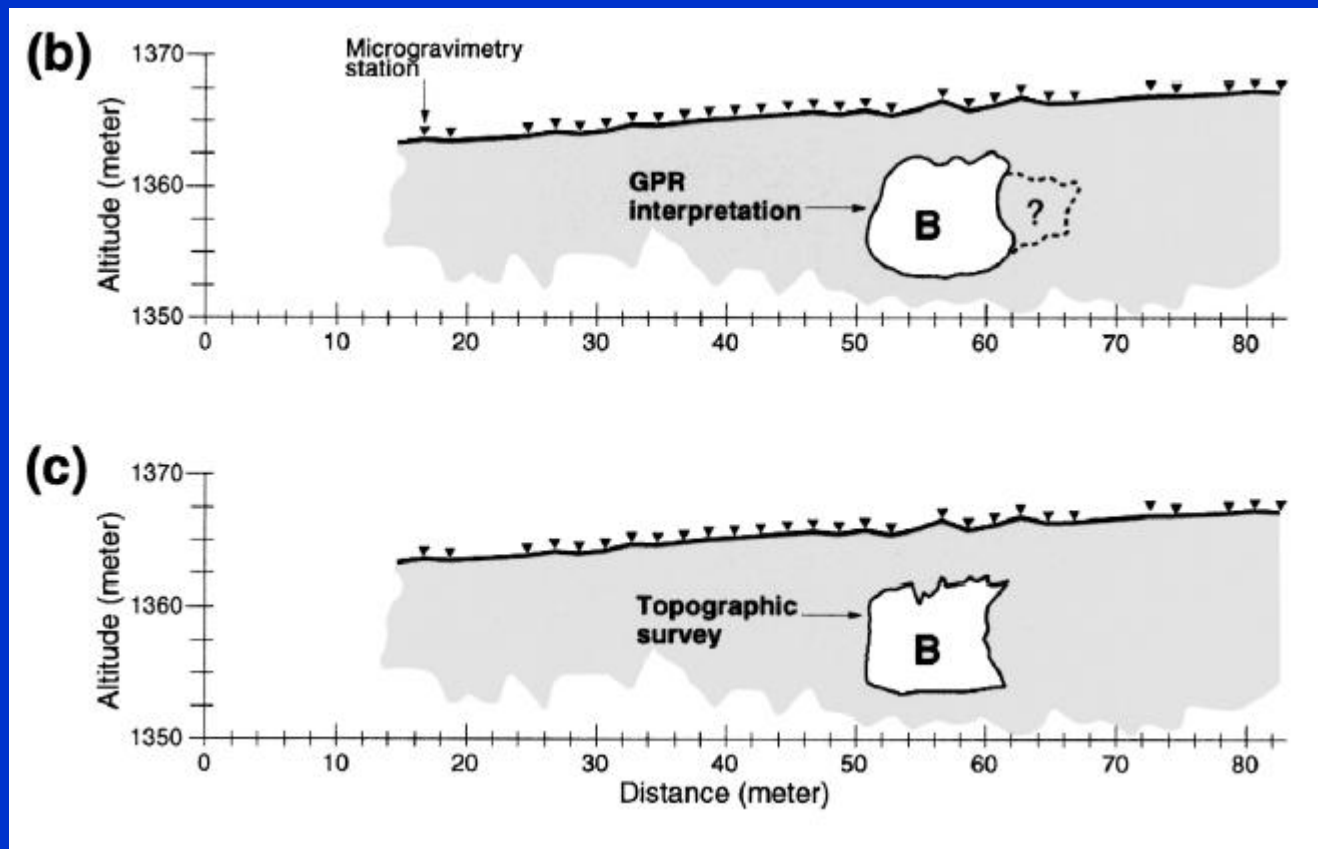
Integration of ground-penetrating radar and microgravimetric methods to map shallow caves

Milan Beres*, Marc Luetscher, Raymond Olivier

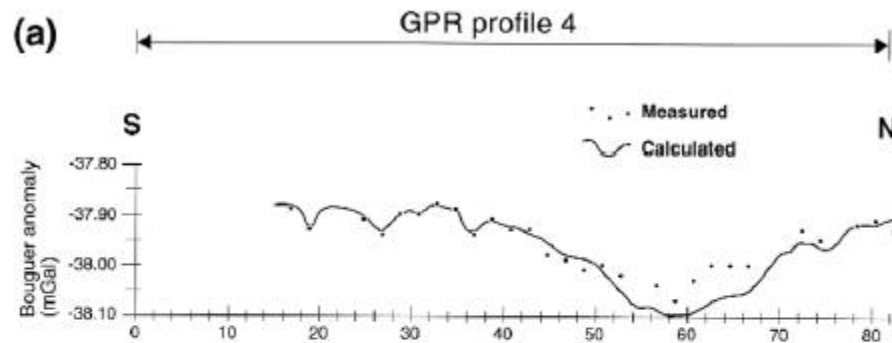
Institut de Géophysique, Collège Propédeutique, Université de Lausanne, CP, CH-1015 Lausanne, Switzerland

Received 14 March 2000; accepted 12 February 2001

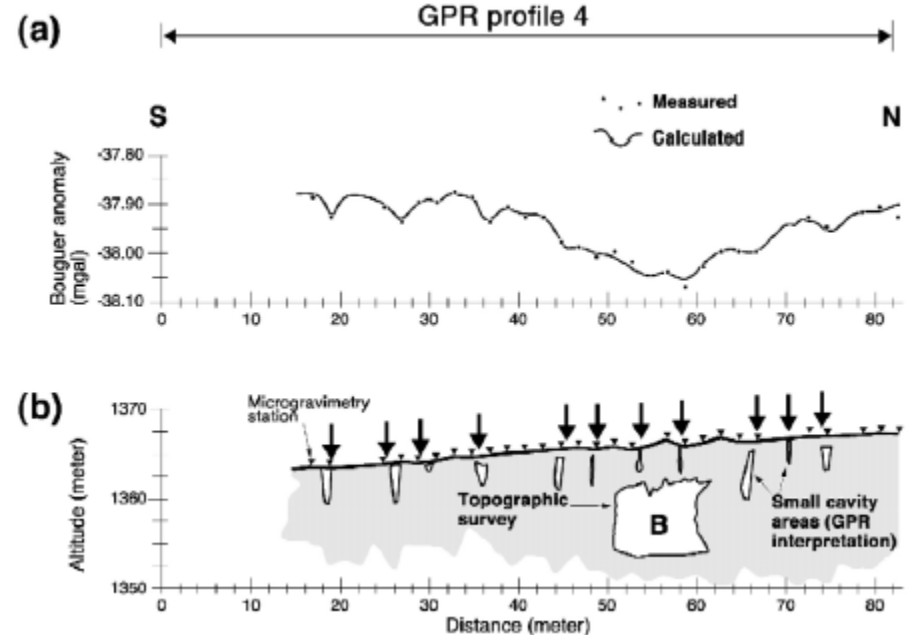
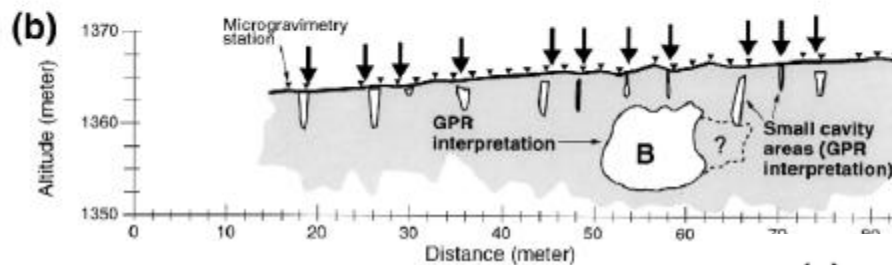
interpretácia – GPR vs. speleolog. prieskum



prieskum krasových útvarov

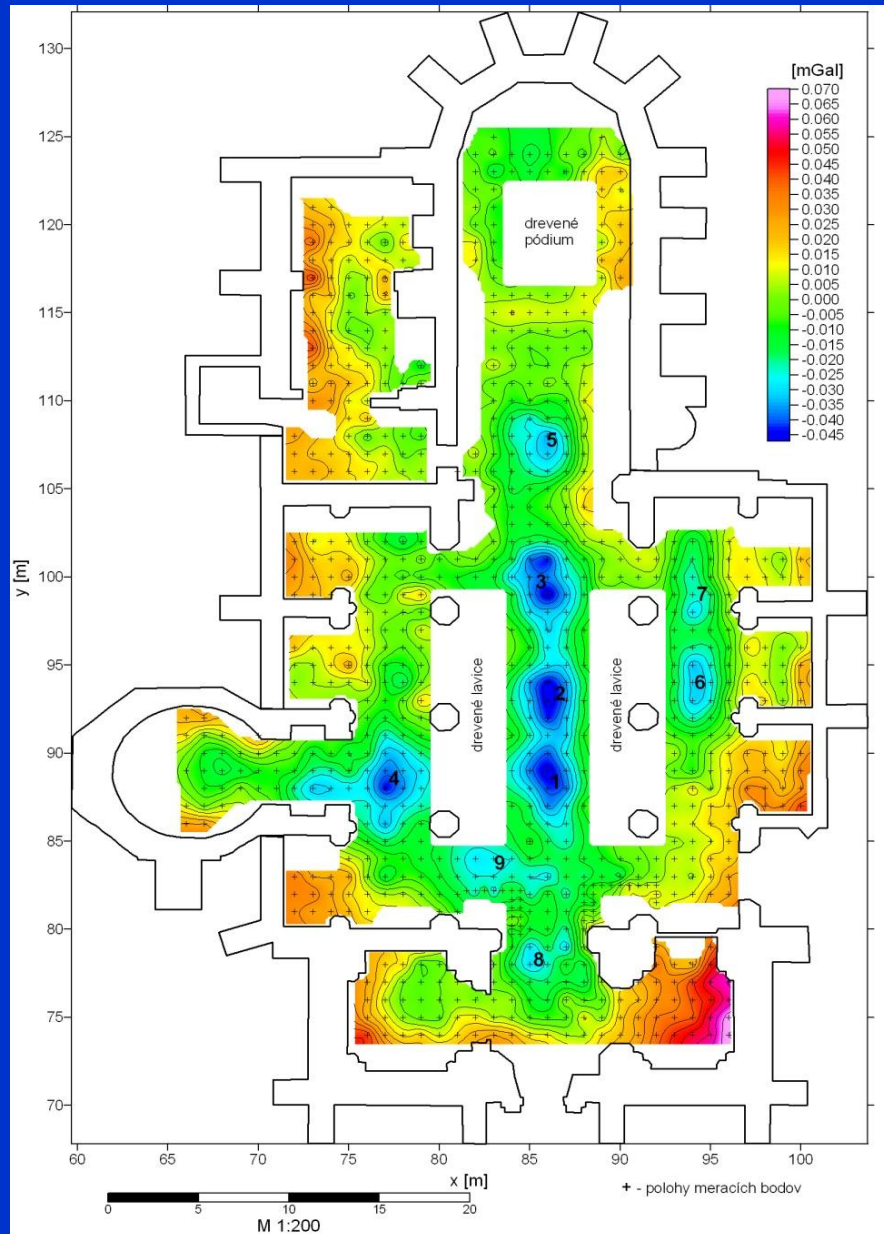


interpretácia – modelovanie
mikrograv. anomálie



prítomnosť susednej kaverny
nebola potvrdená

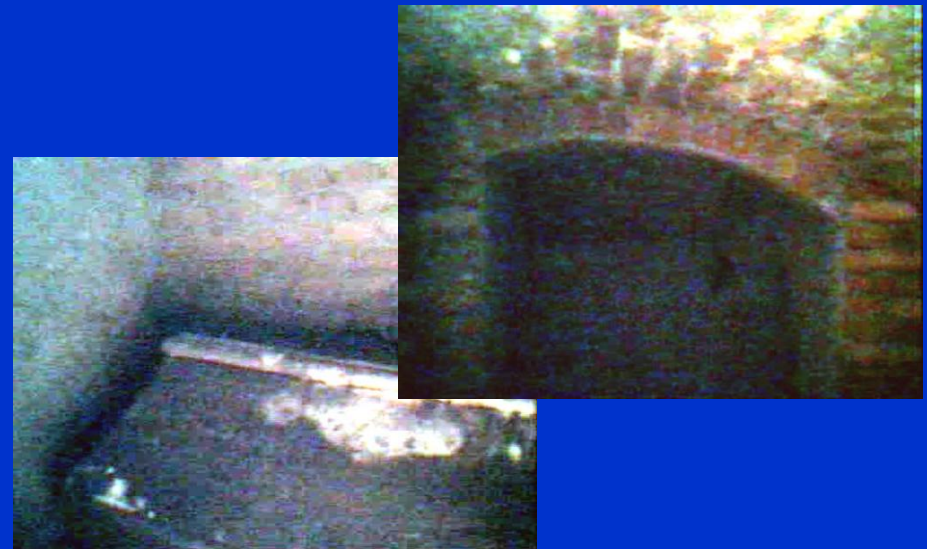
výsledky geofyzikálneho prieskumu Dómu Sv. Mikuláša v Trnave



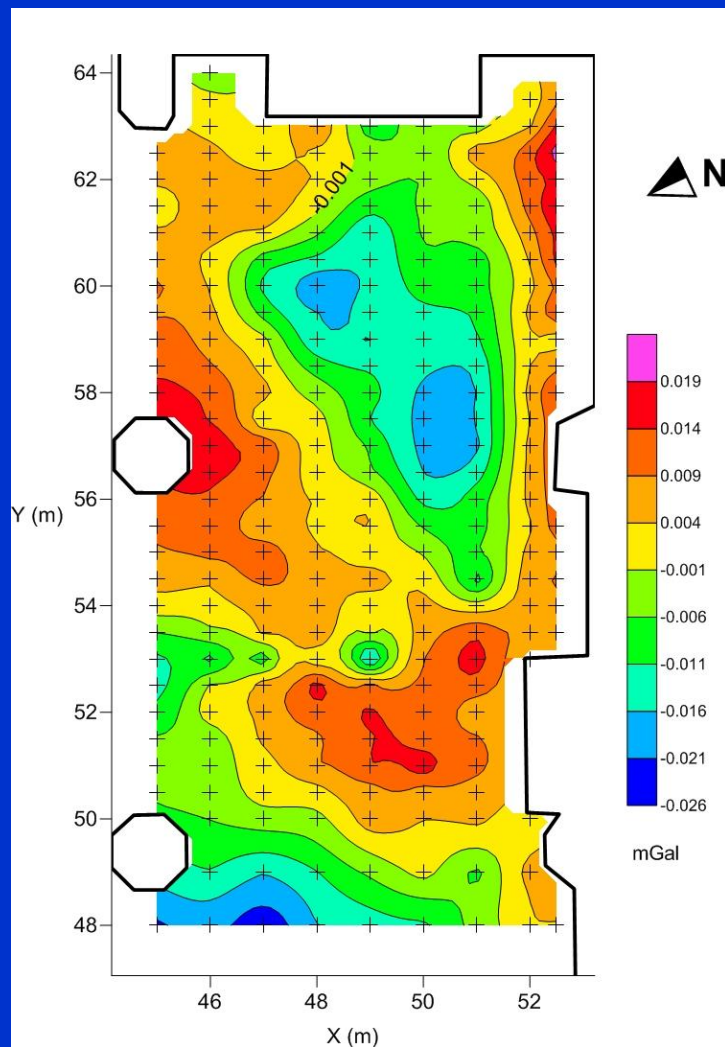
Obr. 8 Mapa priebehu lokálnych neúplných Bouguerových anomálií v priestore kostola (so zavedením opráv o gravitačný účinok múrov a odstráneným trendom), kor. hustota = 1.80 g.cm^{-3}



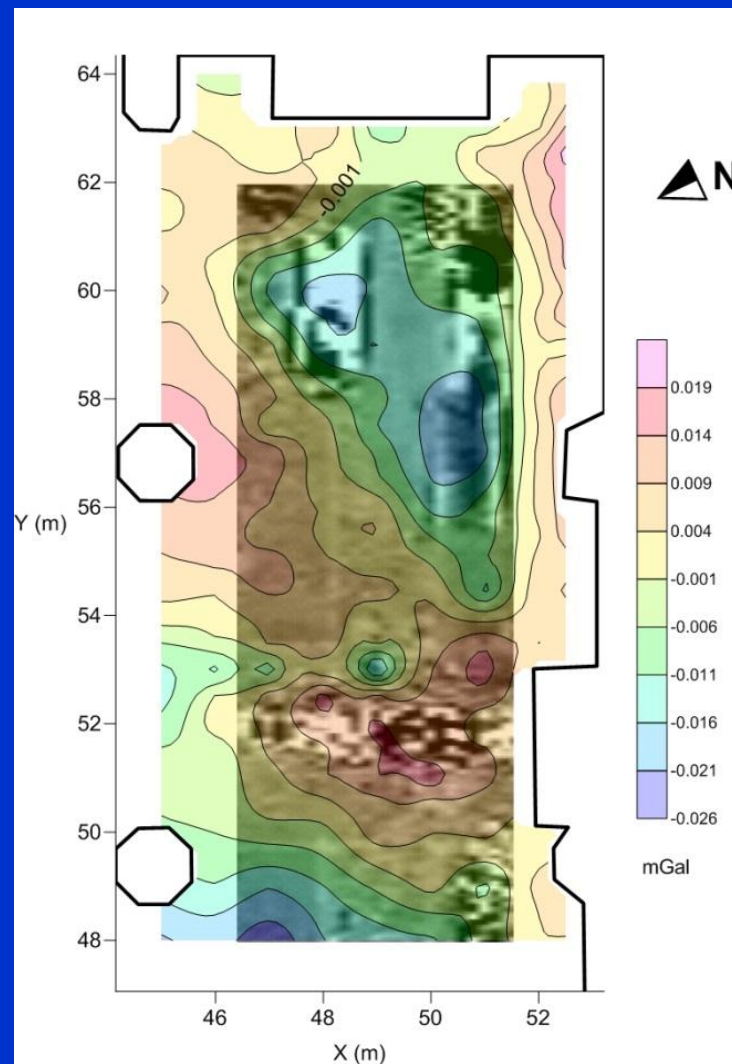
spojenie výsledkov mikrogravimetrie
a metódy georadaru (GPR),
overené videoinšpekciou



výsledky geofyzikálneho prieskumu kostola sv. Juraja v Juri

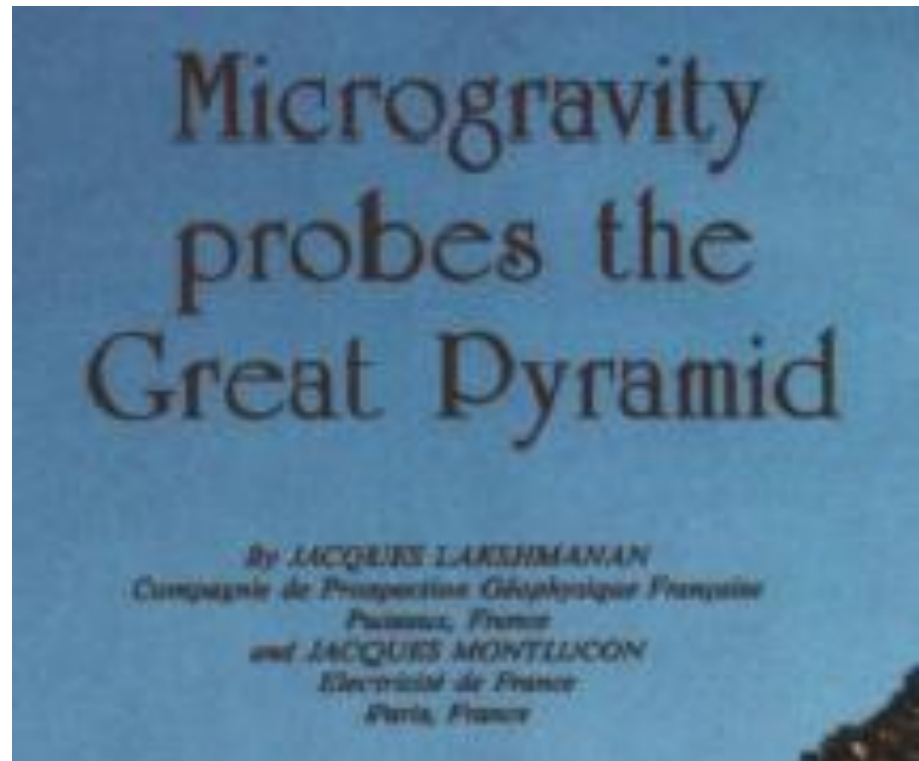


mikrogravimetria



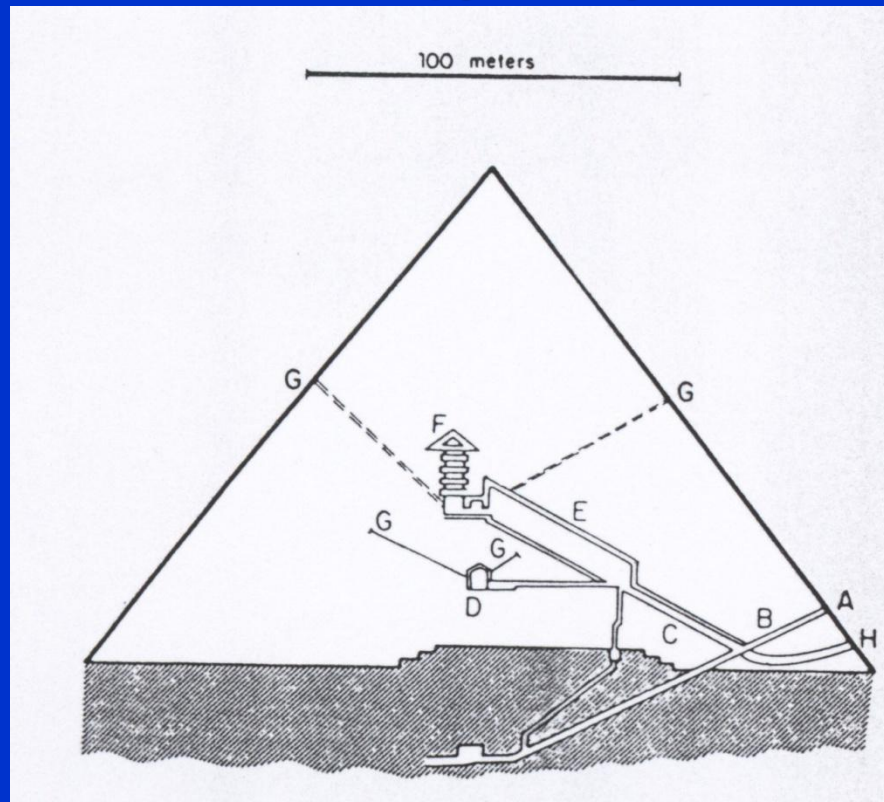
mikrograv. + GPR (0.6 m)

Cheopsova pyramída, Egypt – francúzsky mikrogravimetrický projekt

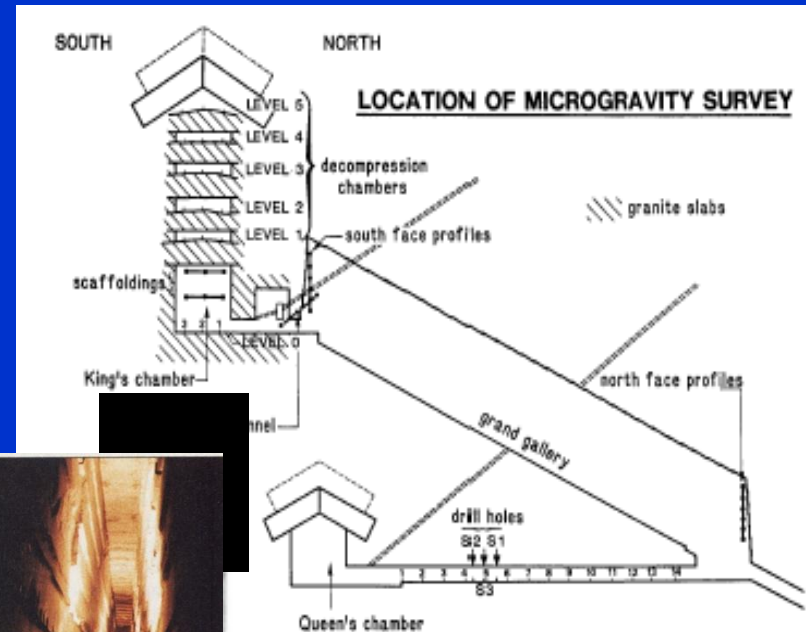


Cheopsova pyramída, Egypt – francúzsky mikrograv. projekt

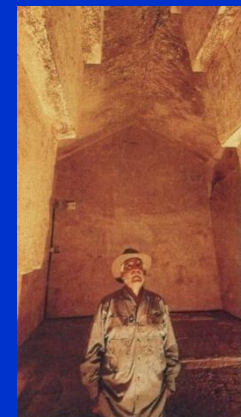
štruktúra pyramídy



- A. NORTHERN ENTRY
- B. DESCENDING CORRIDOR
- C. RISING CORRIDOR
- D. QUEEN'S CHAMBER
- E. LARGE GALLERY



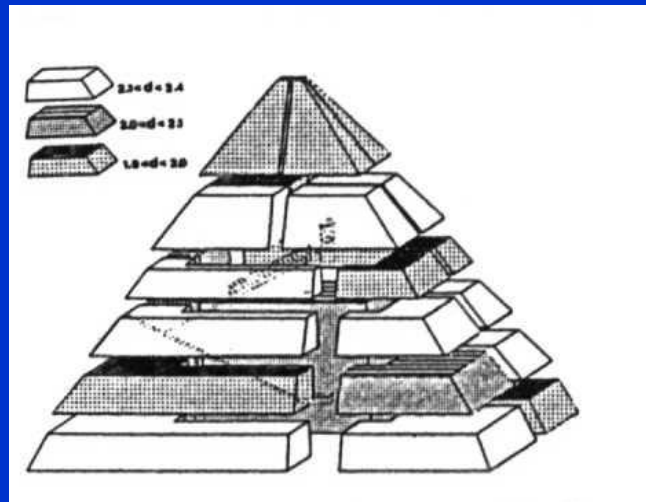
veľká
galéria



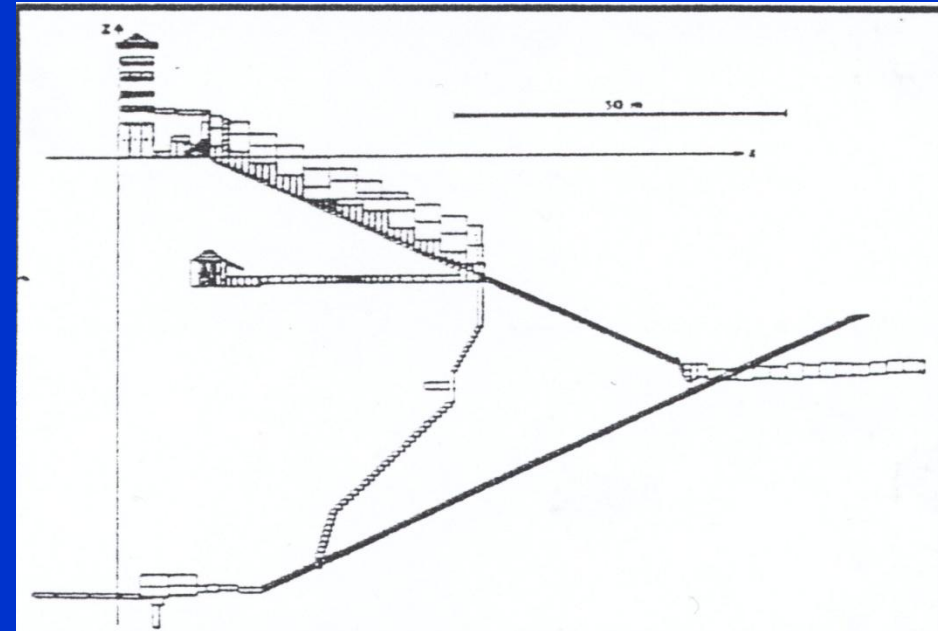
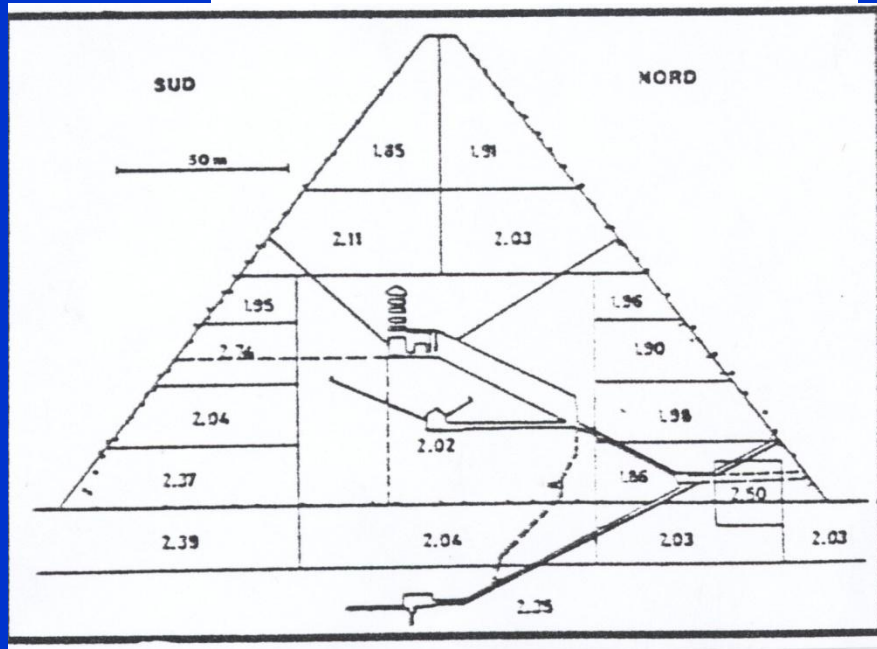
kráľovská
komnata

odhad. chyba: 2 - 10 μ Gal samotné meranie

Cheopsova pyramída, Egypt – francúzsky mikrograv. projekt



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



známe dutiny

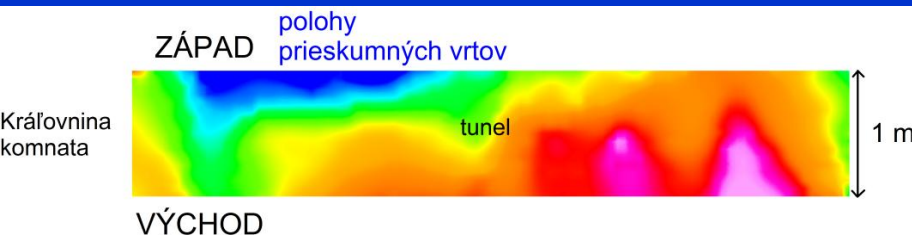
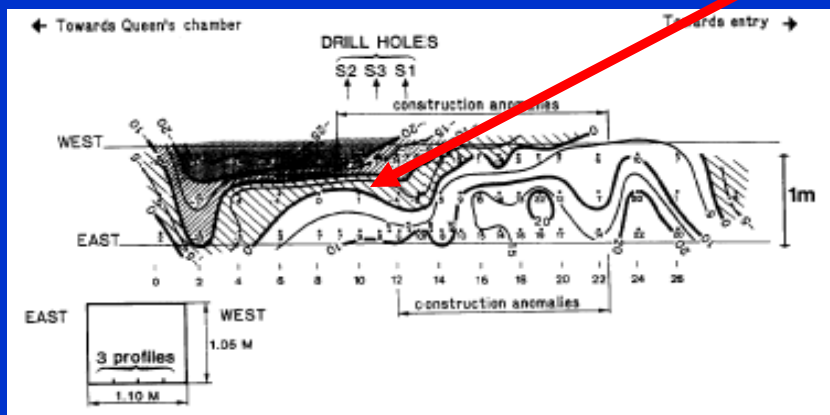
model hustotného „rozvrstvenia“ pyramídy

Cheopsova pyramída, Egypt – francúzsky mikrograv. projekt

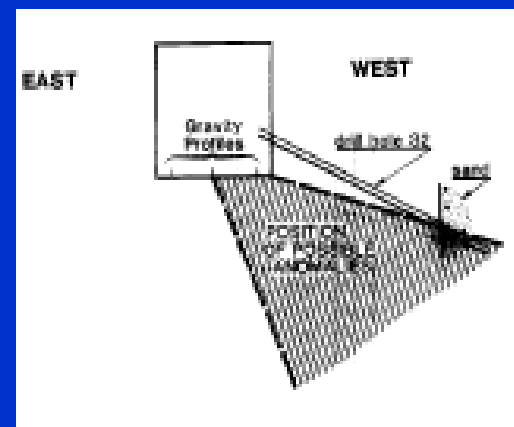
výsledky

hlavný výsledok:

zistenie dominantnej negatívnej anomálie v západnej časti prístupovej chodby do „kráľovninej“ pohrebnej miestnosti



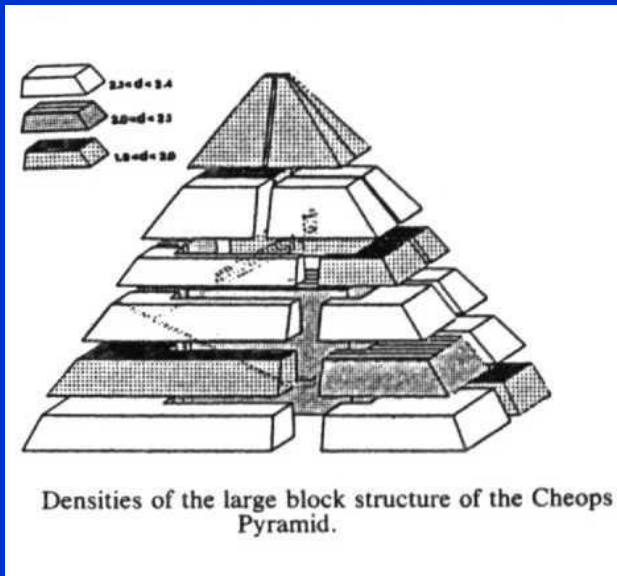
overenie anomálie:



3 vrtý dosiahli po 2.1 m dutinu vyplnenú pieskom, (modelovaný objem dosahuje až 40 m³)

Cheopsova pyramída, Egypt – francúzsky mikrograv. projekt

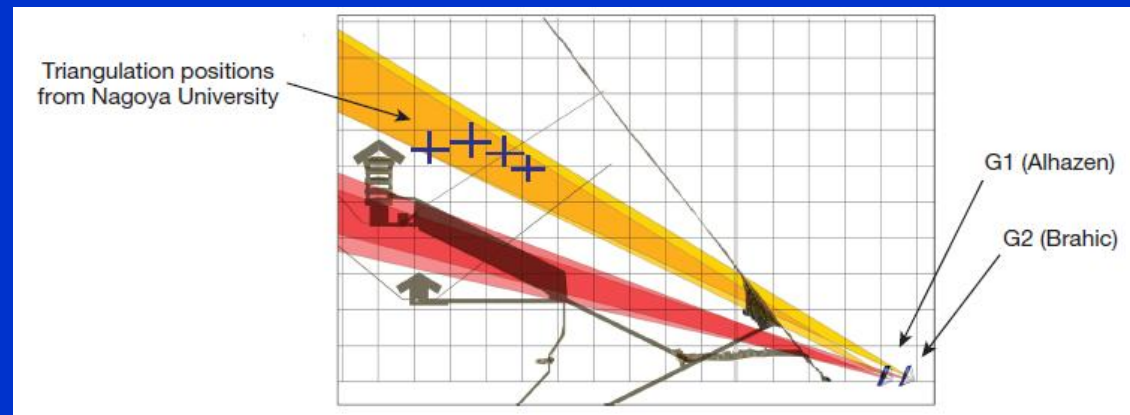
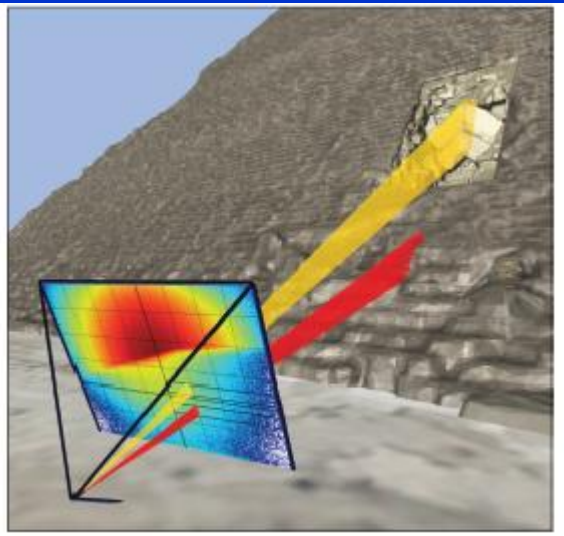
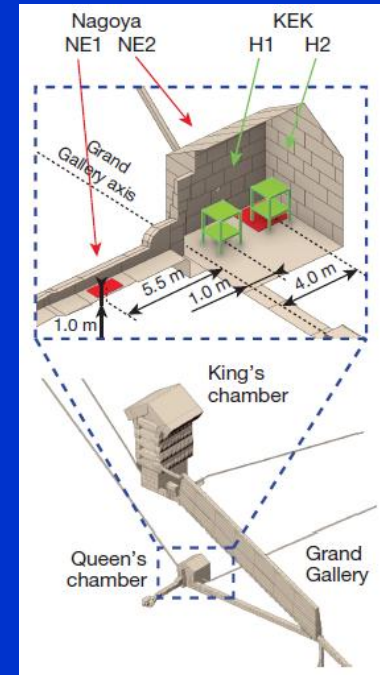
výsledky – možná interpretácia



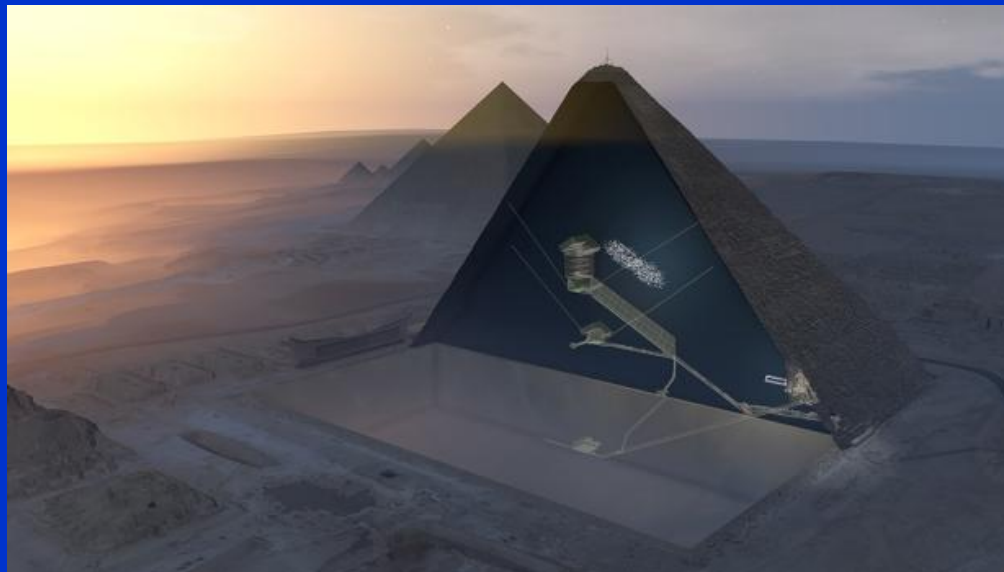
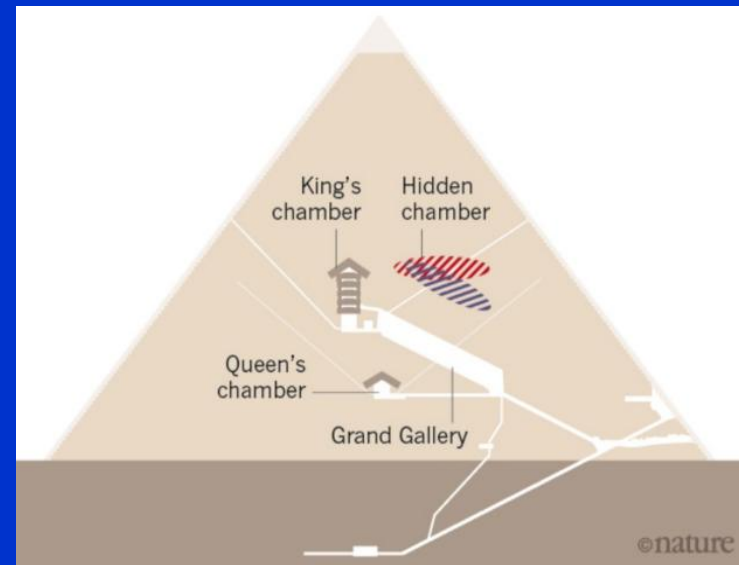
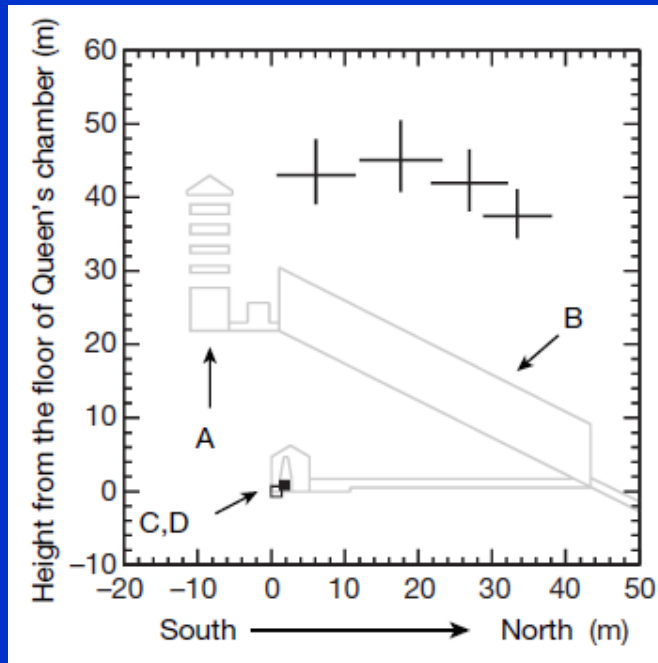
zvyšok pieskovej rampy



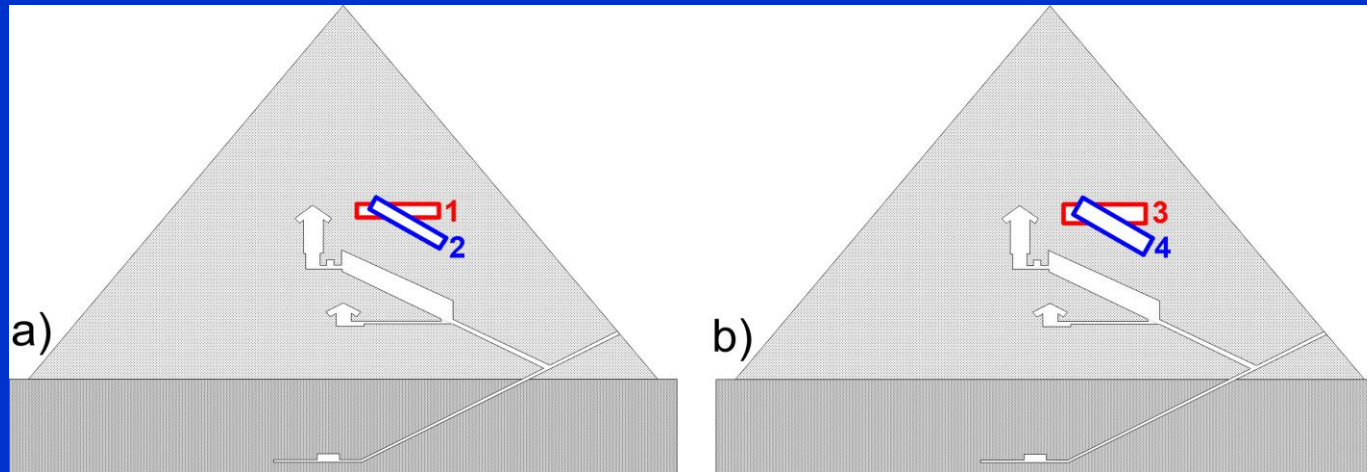
Zaujímavosť – rok 2017: objavenie novej dutiny (tzv. Big Void) v Cheopsovej pyramíde pomocou registrácie kozmického žiarenia (muóny).



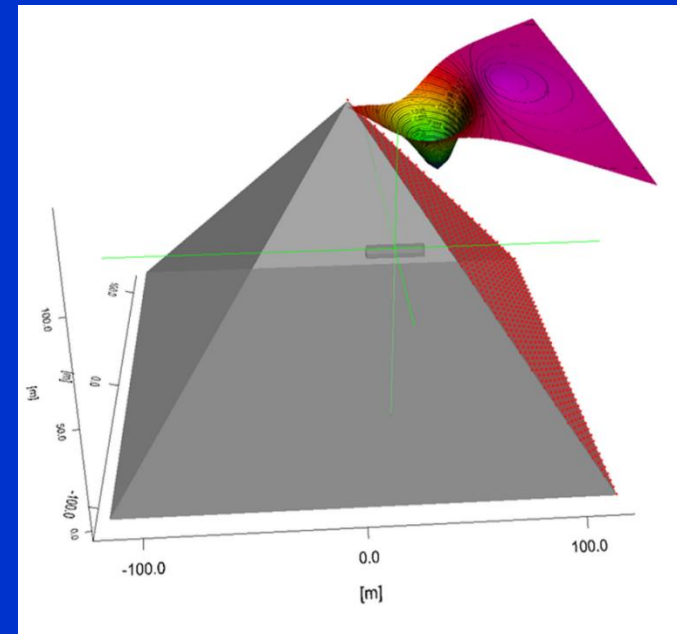
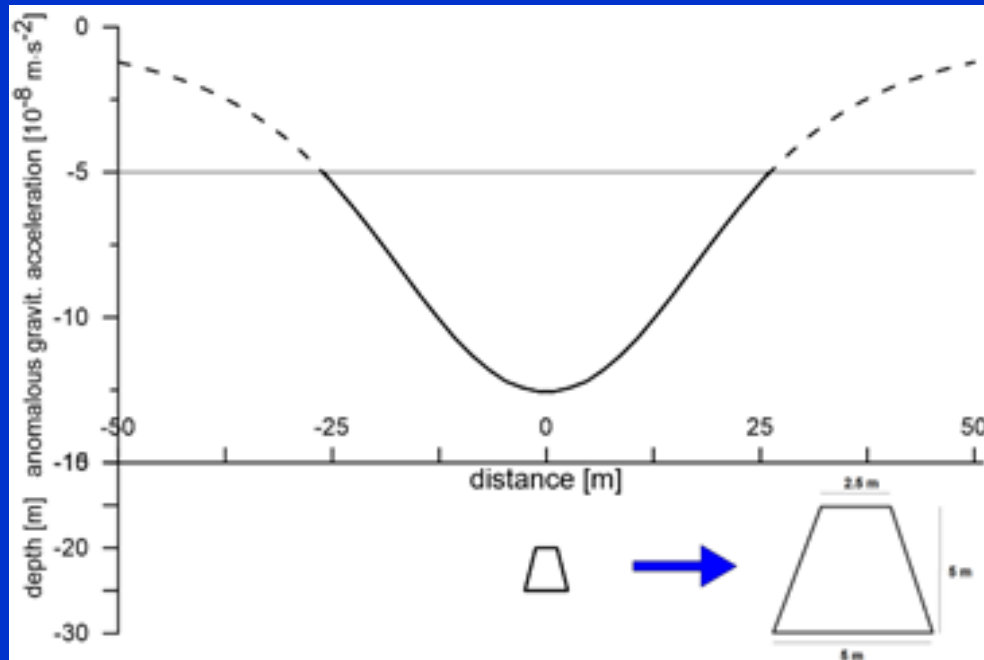
Zaujímavosť – rok 2017: objavenie novej dutiny (tzv. Big Void)
v Cheopsovej pyramíde pomocou registrácie kozmického žiarenia (muóny).



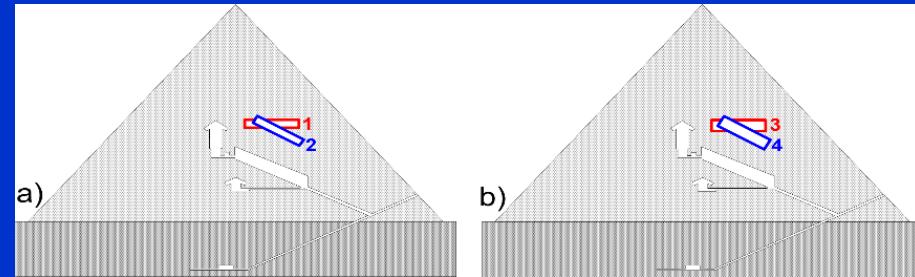
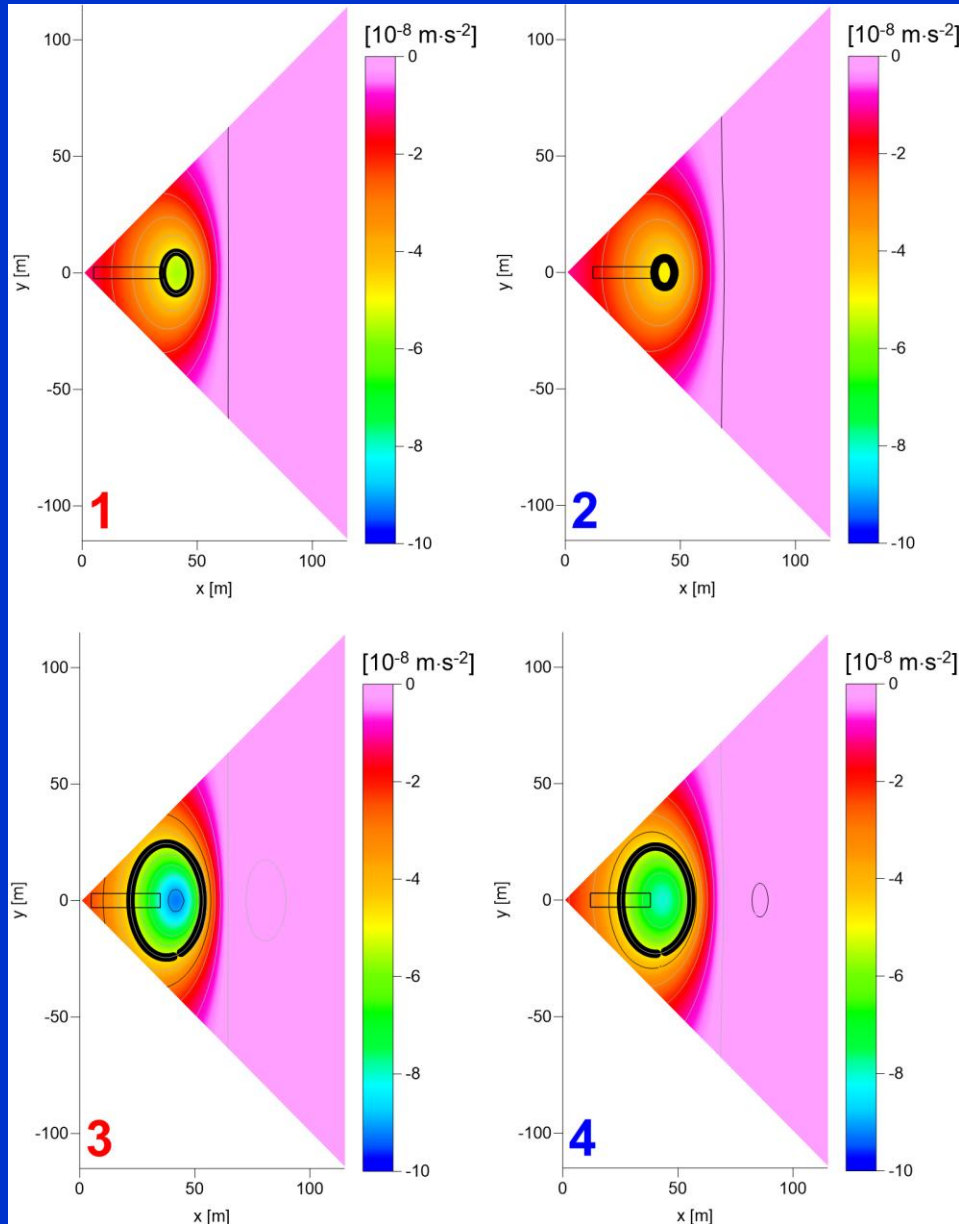
Bolo by možné prítomnosť tejto dutiny overiť presnými gravimetrickými meraniami na povrchu pyramídy?



modelované
4 scenáre
(výška 5 a 7 m)



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



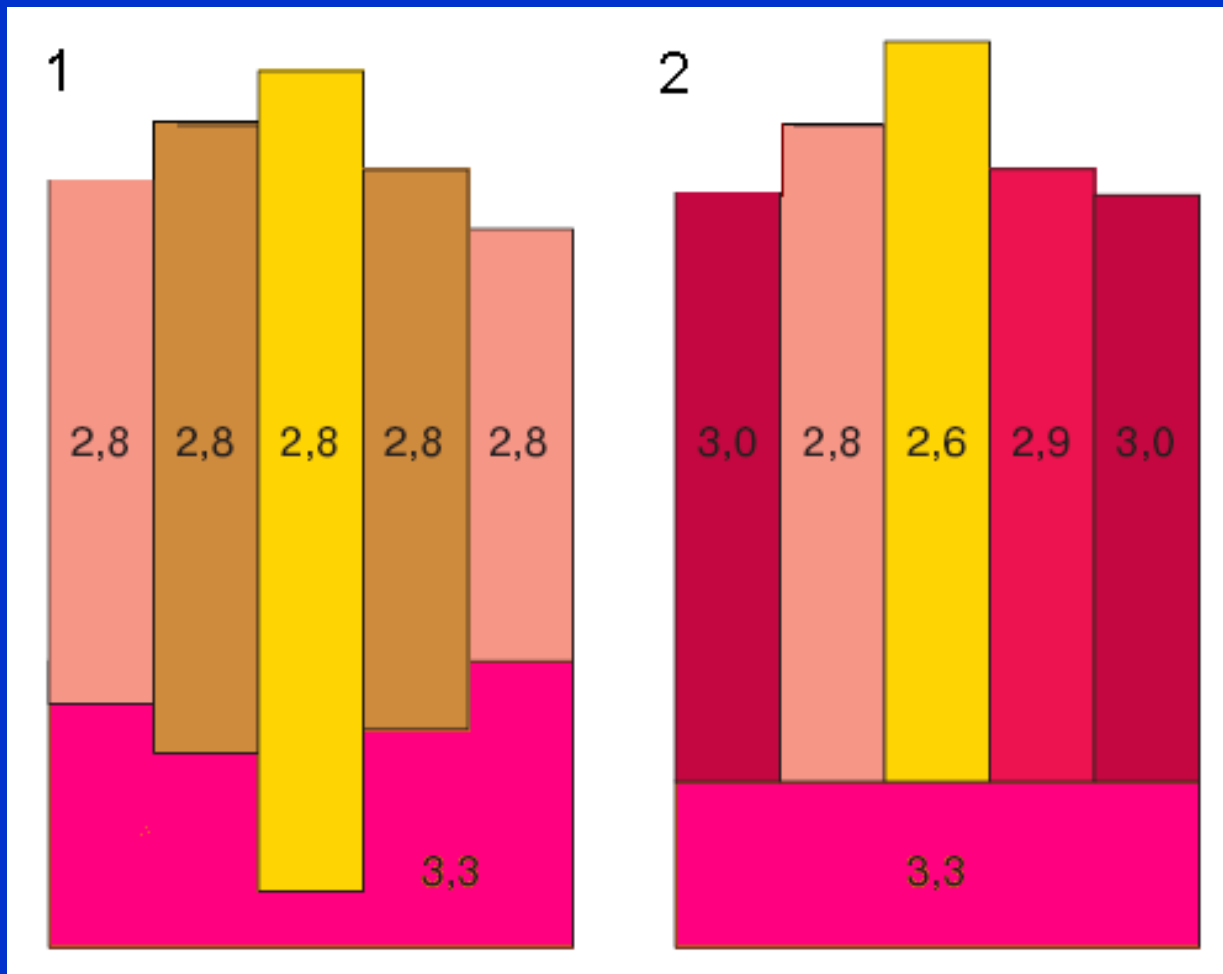
Hrubá izočiará približne vymedzuje plochu, na ktorej by mohla byť daná dutina „merateľná“ pomocou súčasných moderných gravimetrov.

GRAVIMETRIA

Zhrnutie:

- meraná veličina: tiažové zrýchlenie g
- prístroje – gravimetre (absolútne, relatívne)
- jednotky v gravimetrii – $\mu\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$, 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)

Izostázia predpokladá kompenzáciu litostatických tlakov od horninových celkov litosféry v určitej hĺbke (astenosféra).



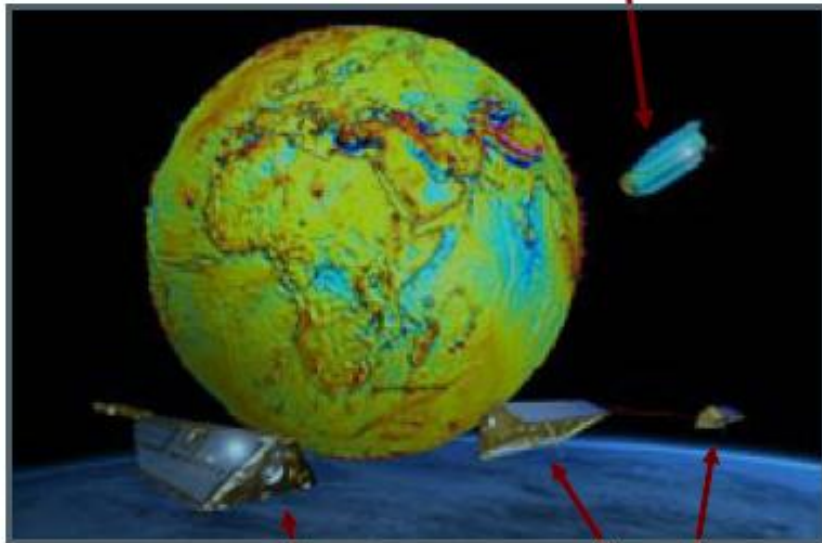
tzv. Airyho model a Prattov model

staršie satelitné systémy:

GRACE a CHAMP

nový systém: GOCE

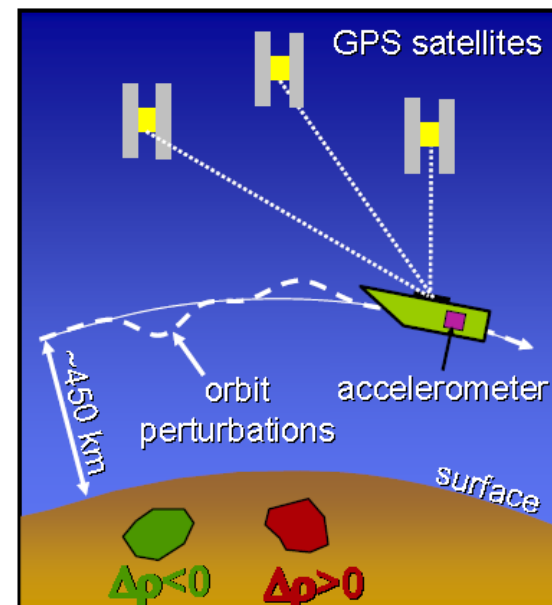
GOCE



CHAMP

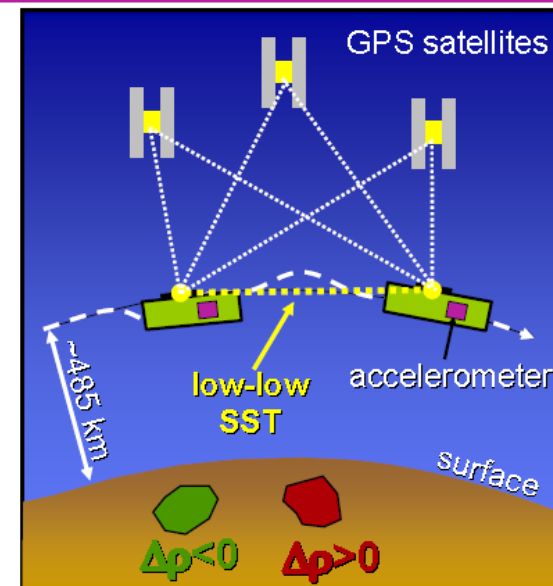
GRACE

- 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

