

výpočet Bouguerovej anomálie

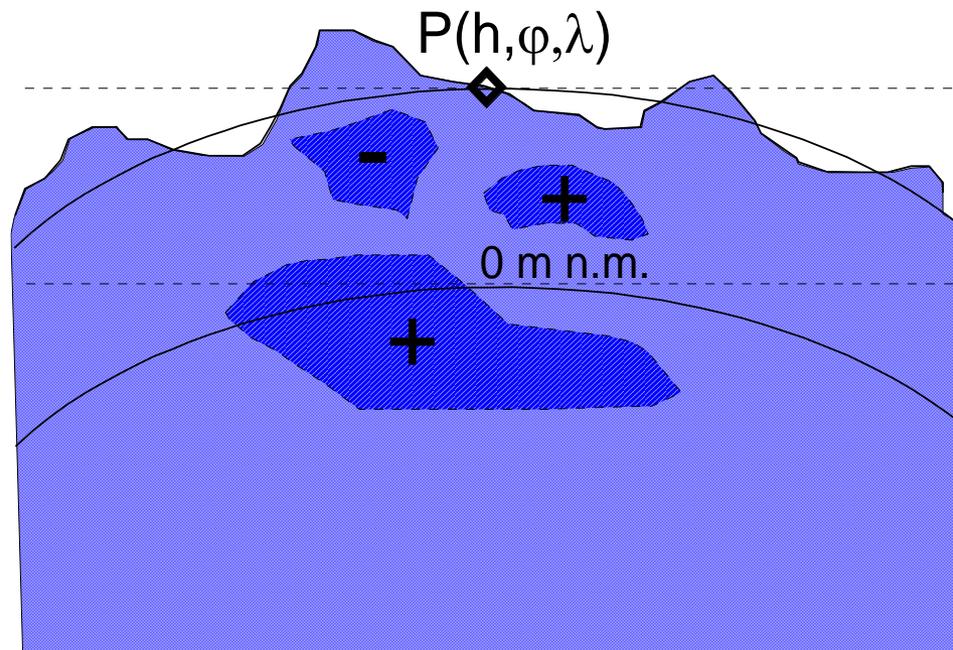
v aplik. gravimetrii sa nevyhodnocuje priamo merané tiažové zrýchlenie, ale sa tvoria tzv. ÚPLNÉ BOUGUEROVE ANOMÁLIE (ÚBA, Δg_B)

základnou ideou je odstránenie vplyvu tzv. „normálnej Zeme“, t.j. všetkých vplyvov, ktoré sa v tiažovom poli významne prejavujú (závislosť od zemepisnej šírky, výšky, od okolitého reliéfu) a neodrážajú prejavy hustotných nehomogenít v litosfére

LaFehr (1991, Geophysics: „Standardization in gravity reduction“):

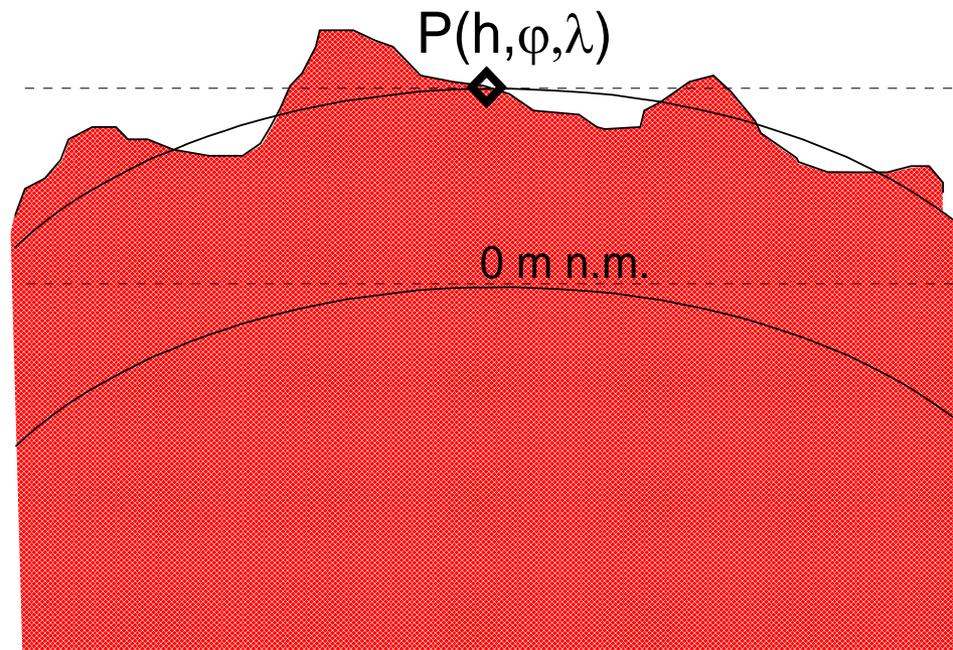
$$g_{\text{geol}} = g_{\text{obs}} - g_{\text{teor}}$$

účinok celej „reálnej“ Zeme



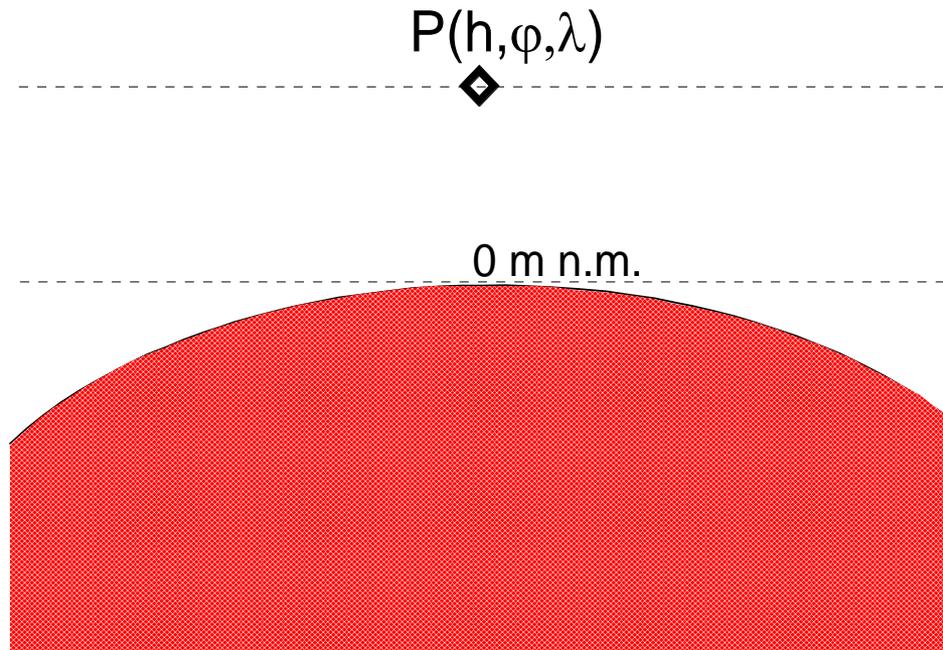
aproximujeme ako...:

ako účinok „normálnej“
(teoretickej, homogénnej) Zeme



účinok elipsoidu a hmôt nad elipsoidom do
vzdialenosti 166.735 km od bodu výpočtu

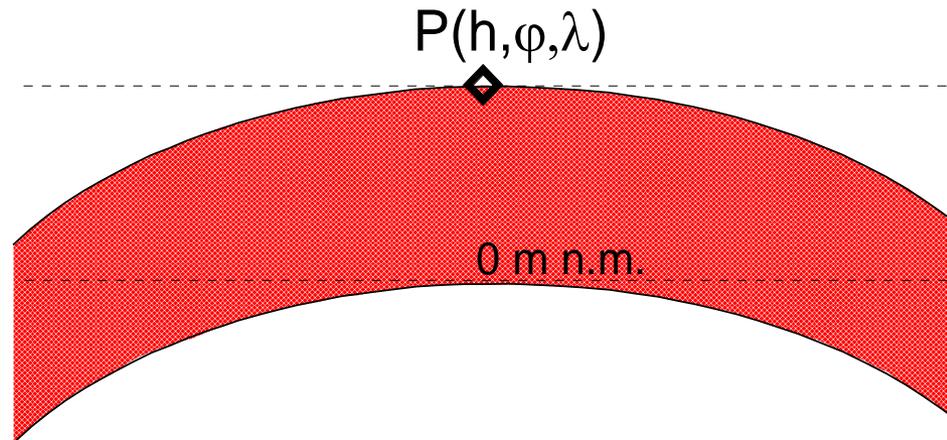
ako účinok „normálnej“ (teoretickej, homogénnej) Zeme



postupne:

popisujeme ho ako účinok elipsoidu (normálne pole), určené v bode P pomocou Fayeovej korekcie a ...

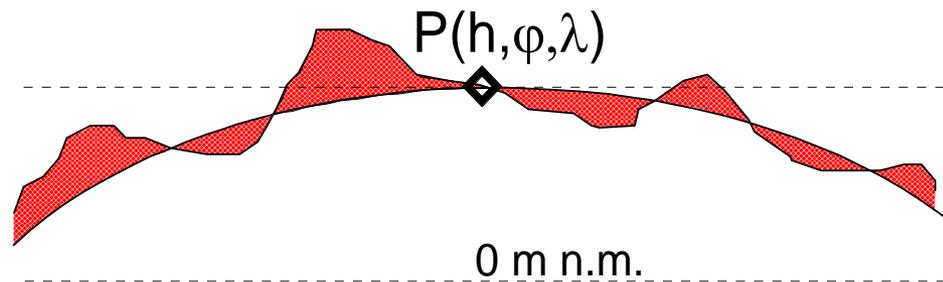
ako účinok „normálnej“ (teoretickej, homogénnej) Zeme



postupne:

popisujeme ho ako účinok elipsoidu (normálne pole), určené v bode P pomocou Fayeovej korekcie a účinok orezanej sférickej dosky do vzdialenosti 166.736 km.

ako účinok „normálnej“ (teoretickej, homogénnej) Zeme



postupne:

popisujeme ho ako účinok elipsoidu (normálne pole), určené v bode P pomocou Fayeovej korekcie a účinok orezanej sférickej dosky a terénnych korekcií do vzdialenosti 166.736 km.

žiaľ, v gravimetrii panuje značný zmätok - existujú dve interpretácie matematickej symboliky definície Bouguerovej anomálie:

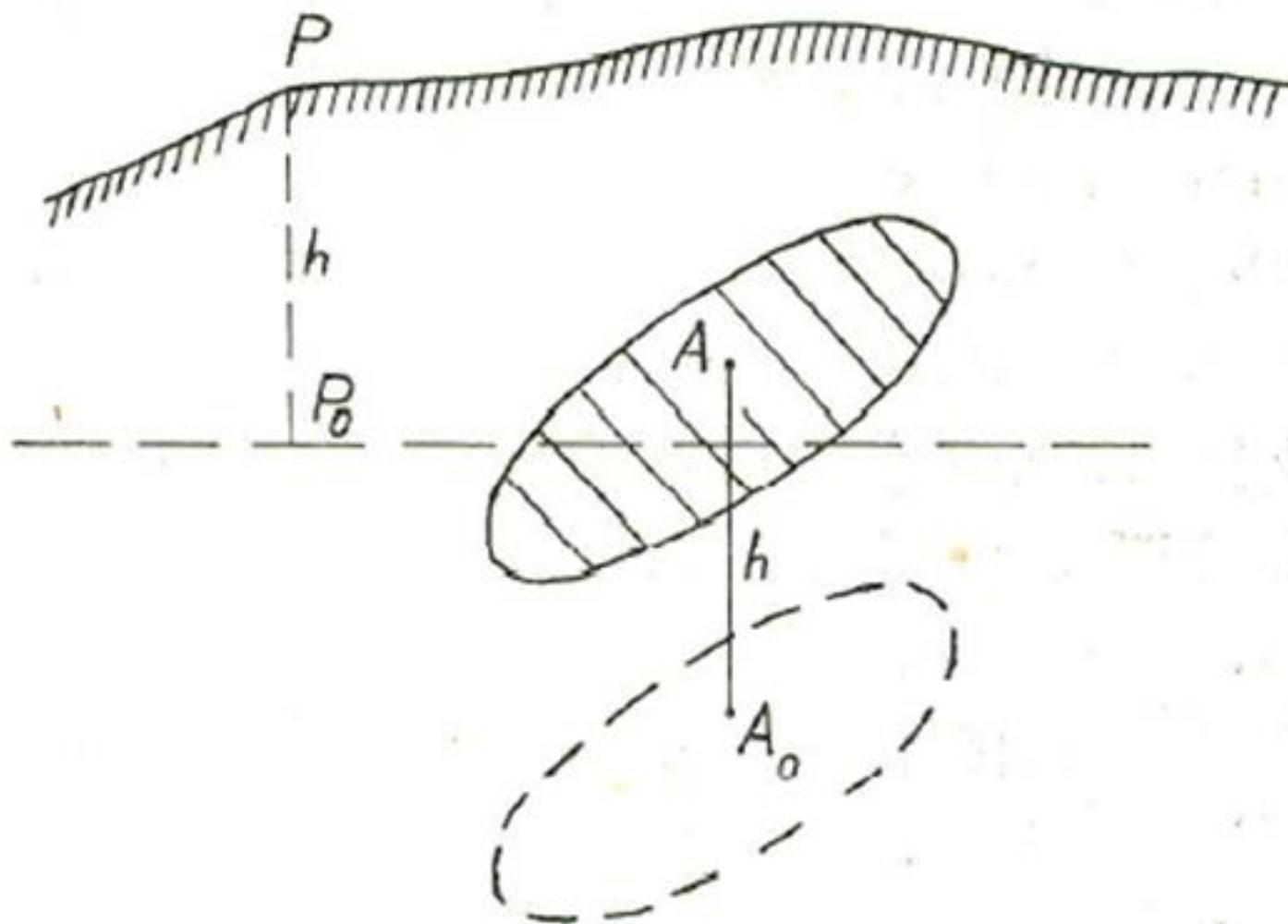
$$\mathbf{a) \Delta g_B = g - g_n + 0.3086h - 0.0419h\rho - B + T}$$

hodnota nameranej tiaže sa redukuje (presúva) z reliéfu na úroveň 0 m (na geoid \approx elipsoid)

$$\mathbf{b) \Delta g_B = g - (g_n - 0.3086h) - 0.0419h\rho - B + T}$$

hodnota nameranej tiaže zostáva v bode merania, prepočítava sa hodnota normálneho poľa z úrovne elipsoidu (geoidu) do bodu merania na reliéfe

Ktorá z týchto dvoch interpretácií je správna?



Obr. 61
Pick et al. (1973)

aktuálna verzia vzorca pre ÚBA pre územie SR (Zahorec et al., 2021)

$$\text{UBA}(\lambda, \varphi, h_E) = g(\lambda, \varphi, h_E) - \gamma(\varphi, h_E) - \delta g_M(\lambda, \varphi, h_E) + \delta g_B(\lambda, \varphi, H) + \delta g_A(\lambda, \varphi, H)$$

kde:

$g()$ je merané tiažové zrýchlenie (opravené o chod, prepočítané na absolútne hodnoty),

$\gamma()$ je normálne tiažové zrýchlenie (počítané v tej istej výške h_E , kde bolo merané $g()$),

$\delta g_M()$ je masová (Bouguerova) korekcia alebo topografický efekt (vo výške h_E),

$\delta g_B()$ je batymetrická korekcia (pozor!, vo výške H),

$\delta g_A()$ je atmosferická korekcia (pozor!, taktiež vo výške H),

h_E je elipsoidálna výška, H je nadmorská (ortometrická) výška, λ, φ sú geografické súradnice bodu výpočtu.

ďalej platí pre jednotlivé členy:

$$\gamma(\varphi, h_E) = \gamma_0(\varphi) + \left. \frac{\partial \gamma}{\partial h_E} \right|_0 h_E + \frac{1}{2} \left. \frac{\partial^2 \gamma}{\partial h_E^2} \right|_0 h_E^2 \quad \begin{array}{l} \text{normálne pole} \\ \text{vo výške } h_E \end{array}$$

$$\gamma_0(\varphi) = \frac{a\gamma_E \cos^2 \varphi + c\gamma_P \sin^2 \varphi}{\sqrt{a^2 \cos^2 \varphi + c^2 \sin^2 \varphi}} \quad \begin{array}{l} \text{normálne pole} \\ \text{v nulovej výške} \end{array}$$

$$\left. \frac{\partial \gamma}{\partial h_E} \right|_0 = -\frac{2\gamma_0}{a} \left(1 + f - 2f \sin^2 \varphi + \frac{3}{2} f^2 - 2f^2 \sin^2 \varphi + \frac{1}{2} f^2 \sin^4 \varphi \right) - 2\omega^2$$

prvý gradient norm. poľa
(namiesto 0.3086H)

$$\left. \frac{\partial^2 \gamma}{\partial h_E^2} \right|_0 = \frac{6\gamma_0}{a^2(1 - f \sin^2 \varphi)^2} \quad \text{druhý gradient normálneho poľa}$$

$$\delta g_A(\lambda, \varphi, H) = 0.874 - 9.9 \cdot 10^{-5} H + 3.56 \cdot 10^{-9} H^2 \quad \text{atmosferická korekcia}$$

použité parametre systému

Geodetic Reference System 1980 (GRS80):

$\gamma_E = 9.7803267715 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$, normálne tiaž. zrýchlenie na rovníku,

$\gamma_P = 9.8321863685 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$, normálne tiaž. zrýchlenie na póle,

$a = 6378137 \text{ m}$, hlavná poloos normálneho elipsoidu,

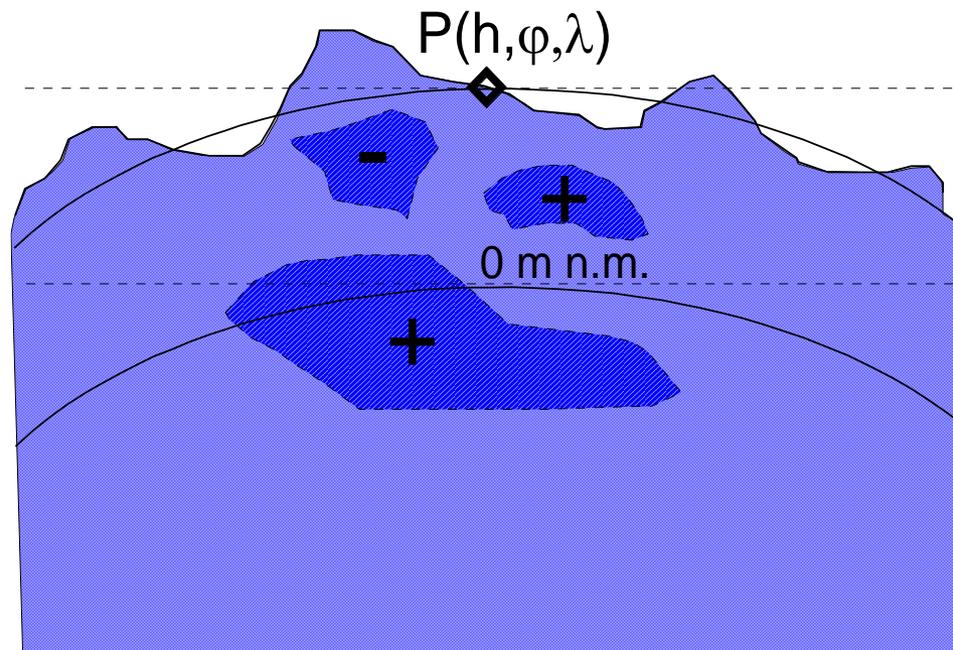
$c = 6356752.3141 \text{ m}$, vedľajšia poloos normálneho elipsoidu,

$f = 0.00335281068118$, geometrické sploštenie,

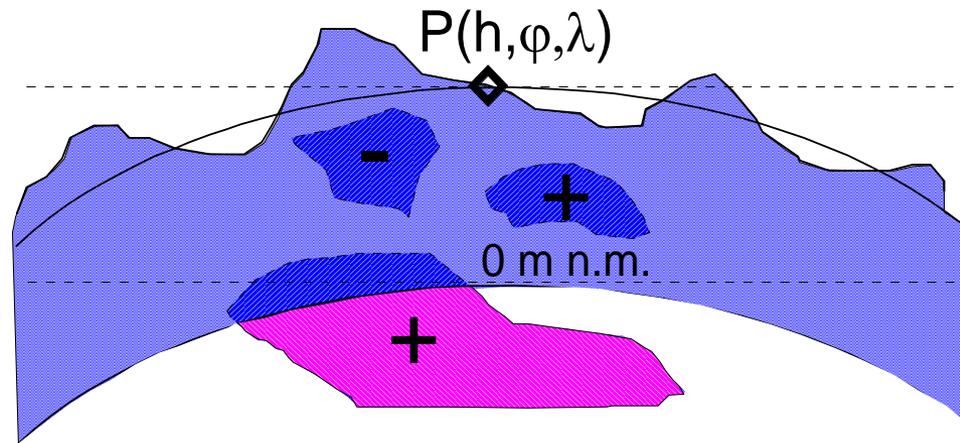
$\omega = 7.292115 \cdot 10^{-5} \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$, uhlová rýchlosť rotácie Zeme.

**manifestácia prejavov
hustotných nehomogenít
v poli ÚBA**

účinok celej „reálnej“ Zeme

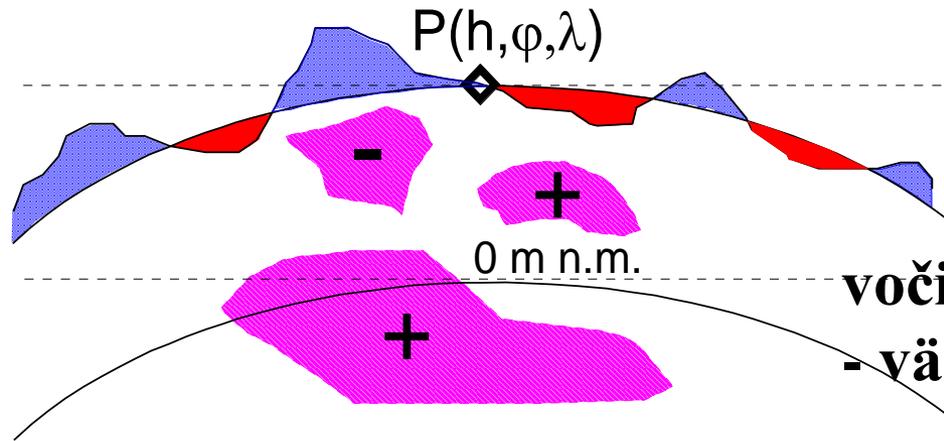


odstráňené normálne pole...



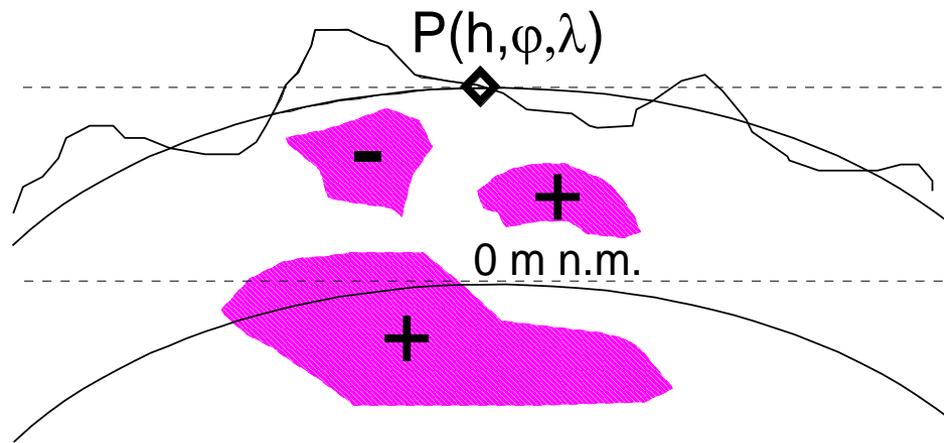
voči „asi“ 2.67 až 2.70 g.cm⁻³

odstránené normálne pole a účinok orezanej sférickej vrstvy ...



voči volenej hustote
- väčšinou 2.67 g.cm^{-3}

odstránené normálne pole, účinok orezanej sférickej vrstvy a terénnych korekcií...

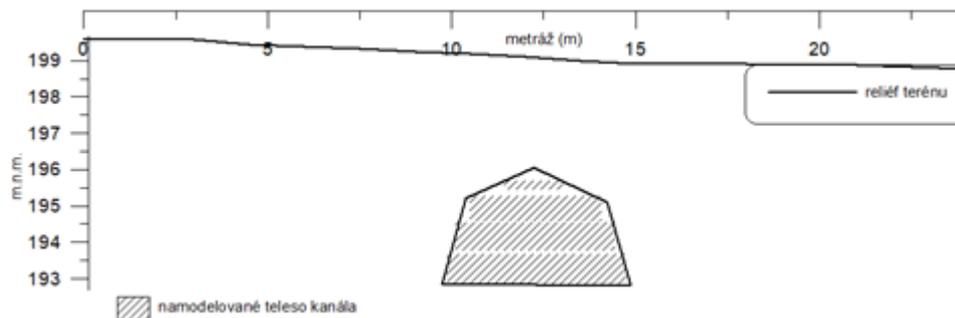


prejav hustotných nehomogenít voči syntetickému modelu Zeme, zároveň sa však prejavujú hustotné kontrasty aj medzi nehomogenitami navzájom (!)

**Príklady významu zavádzania korekcií
v rámci výpočtu ÚBA:**

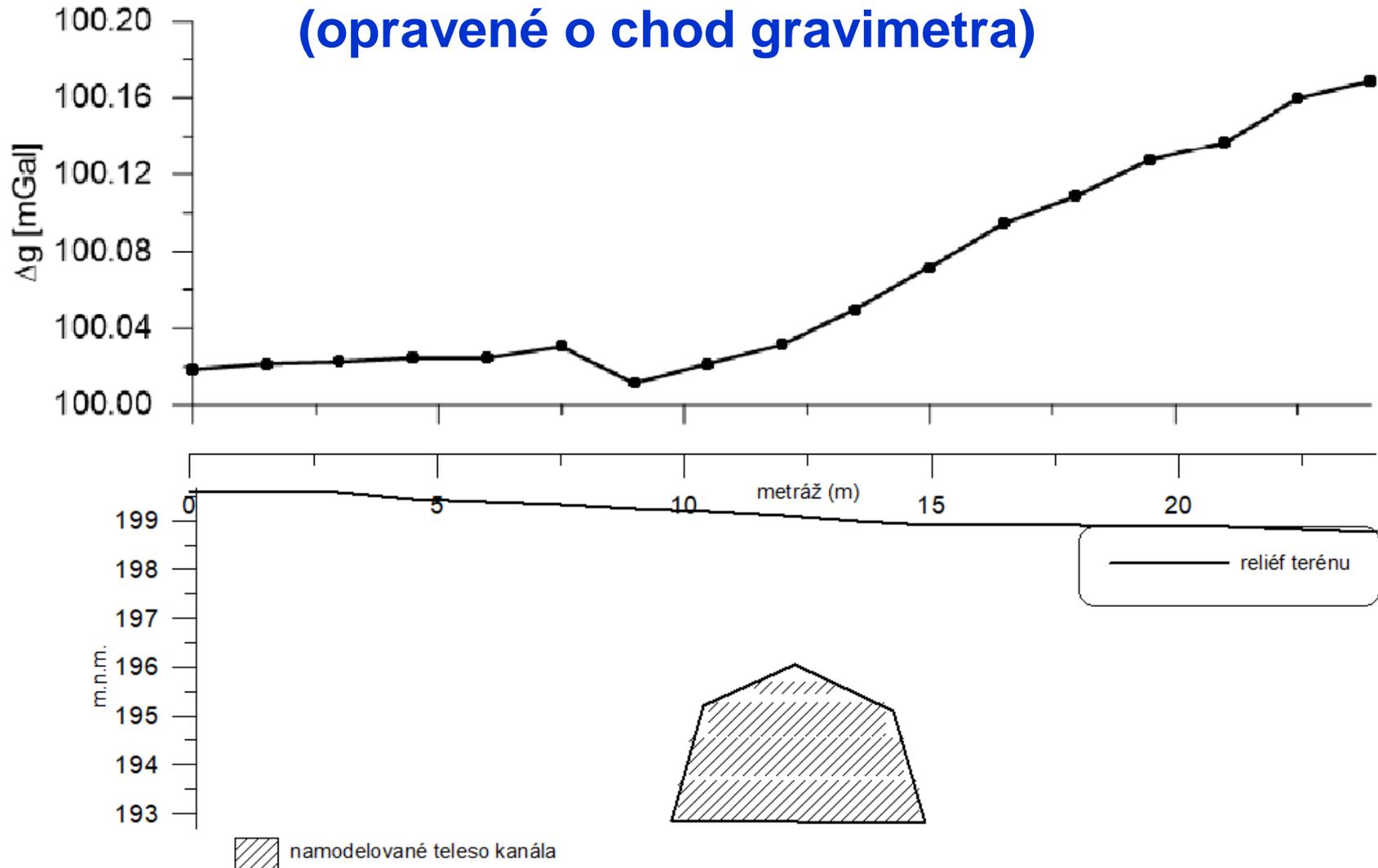
Príklady významu zavádzania korekcií v rámci výpočtu ÚBA (1/5):

- vymapovanie priebehu kanalizačného zberača na Gagarinovej ul. v Bratislave (časť Ružinov)



kanalizačný zberač, Gagarinova ul., BA

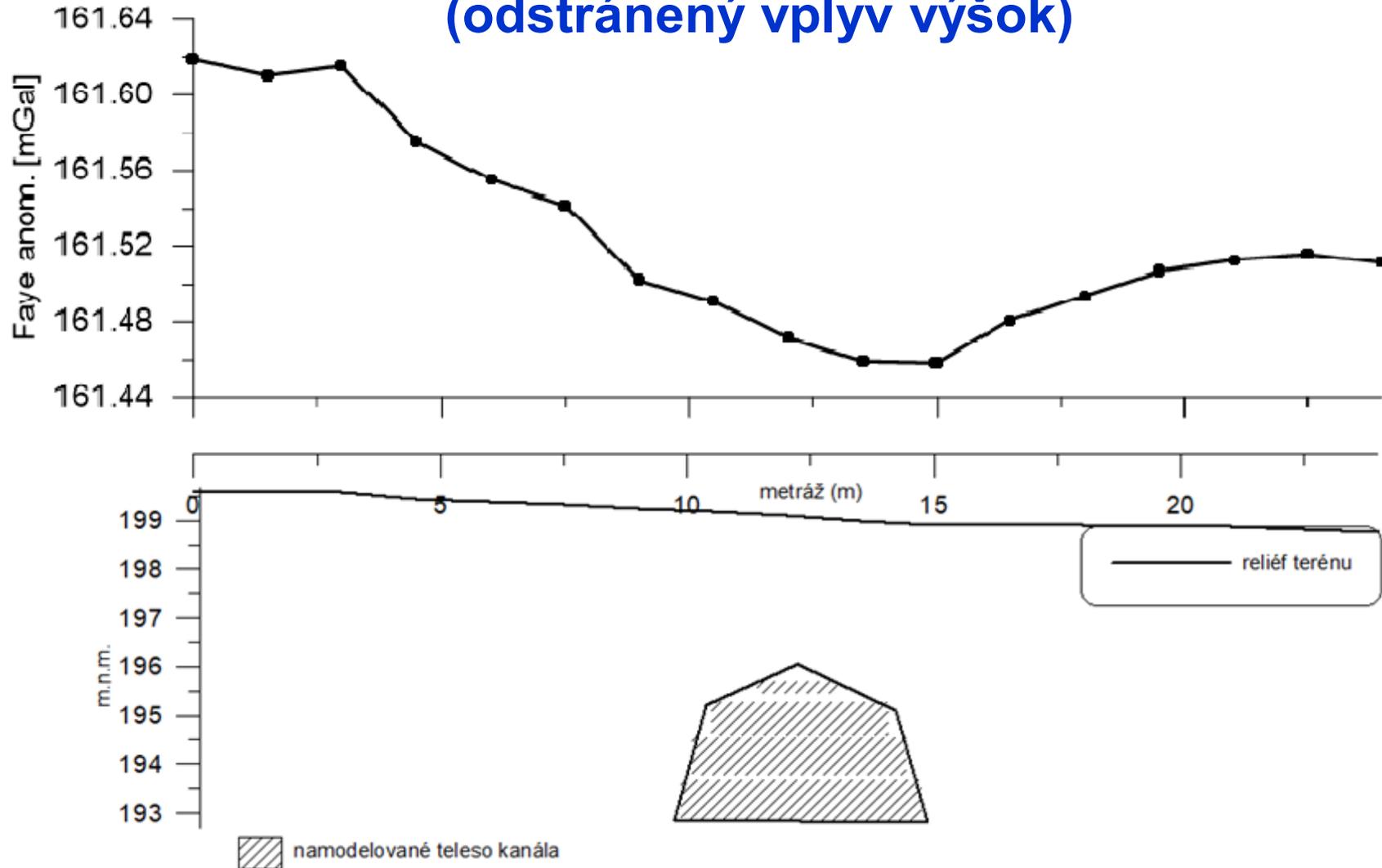
**namerané relatívne tiažové zrýchlenie Δg
(opravené o chod gravimetra)**



kanalizačný zberač, Gagarinova ul., BA

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

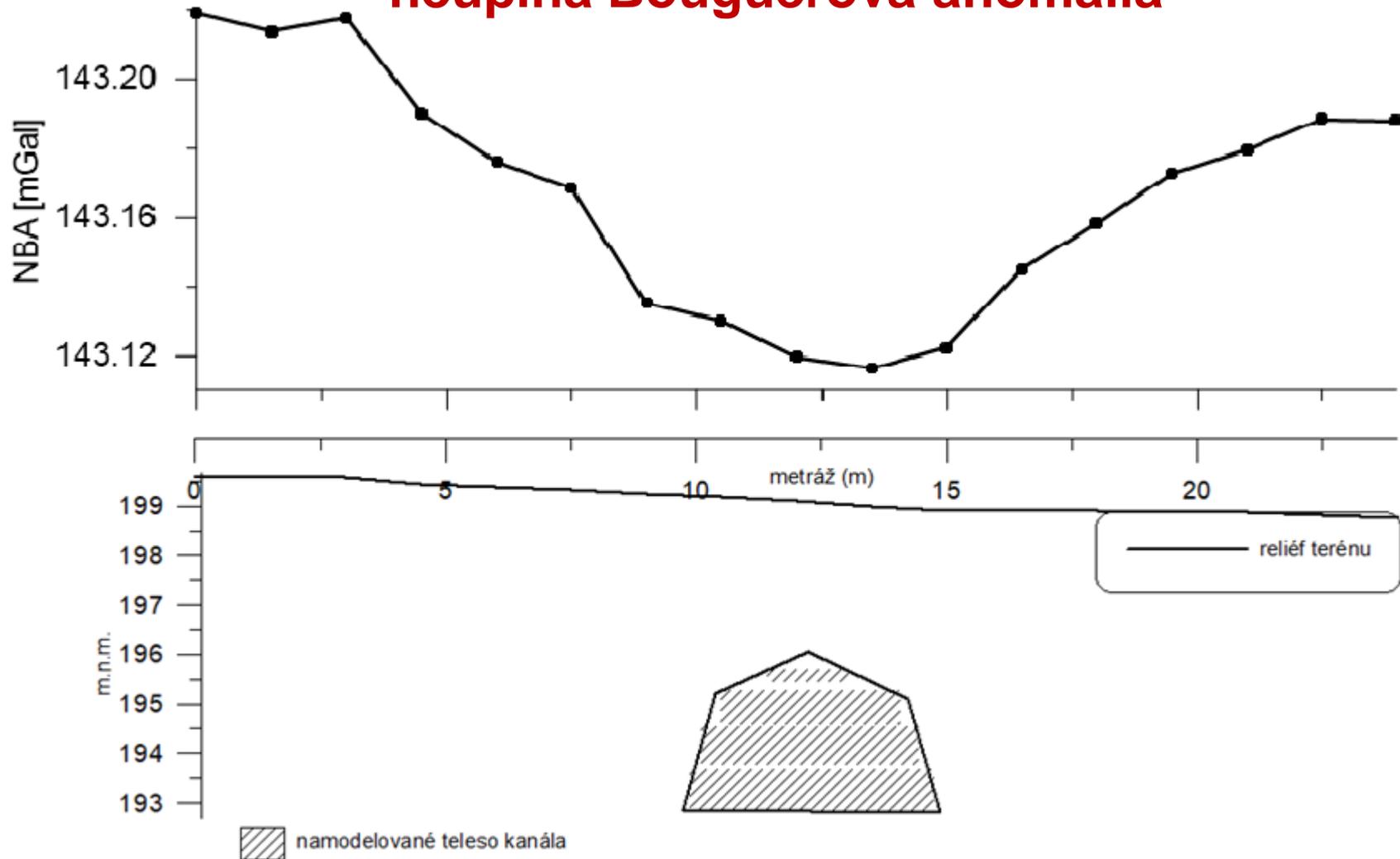
tzv. Fayeova anomália
(odstránený vplyv výšok)



kanalizačný zberač, Gagarinova ul., BA

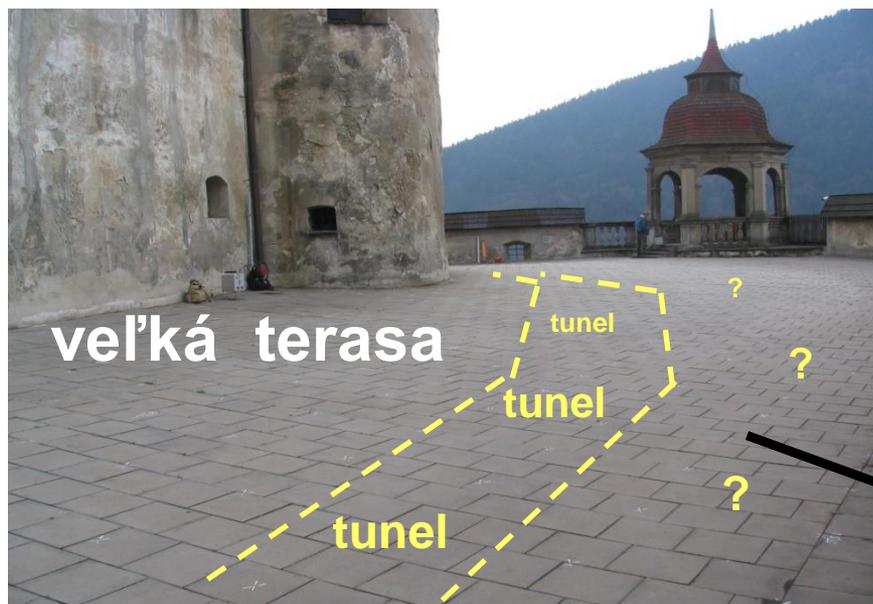
$$\text{NBA} = g + 0.3086h - 0.0419h\rho$$

výsledok:
neúplná Bouguerova anomália



Príklady významu zavádzania korekcií v rámci výpočtu ÚBA (2/5):

- prieskum priebehu podzemných chodieb (kazemát) pod Veľkou terasou na Oravskom zámku



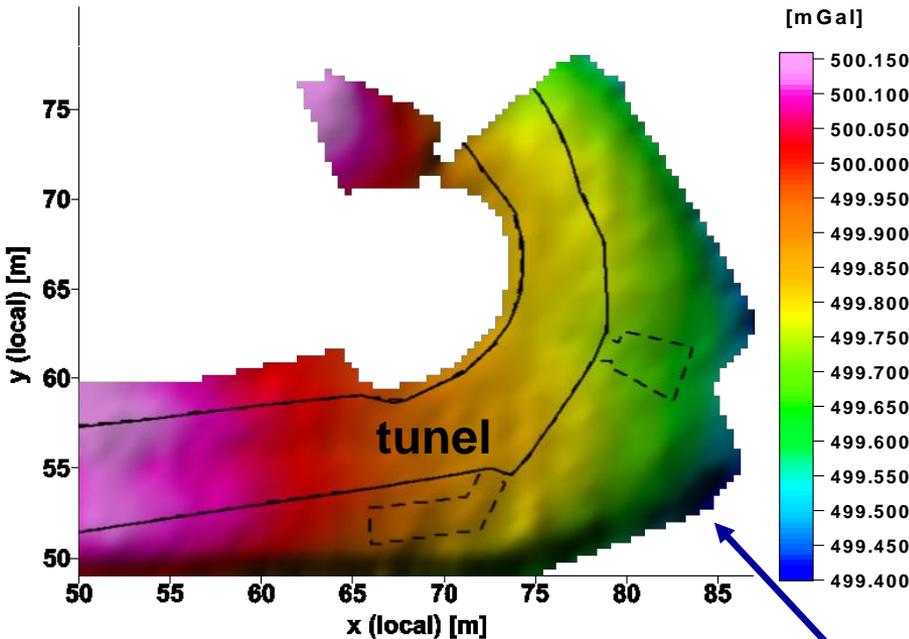
cieľom prieskumu bolo nájsť možné spojovacie chodby medzi tunelom a opevnením



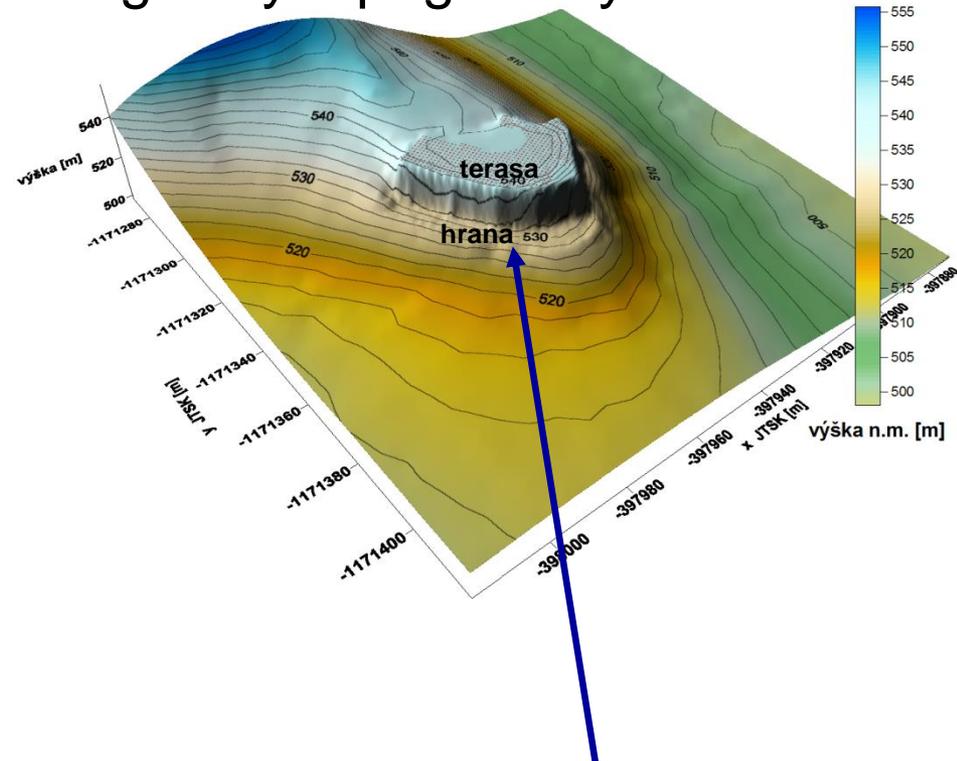
pohľad od prístupovej cesty na zámok

gravimetrický prieskum Veľkej terasy Oravského zámku

merané g



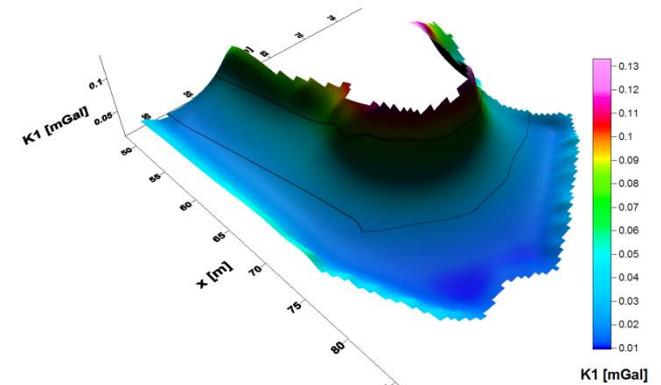
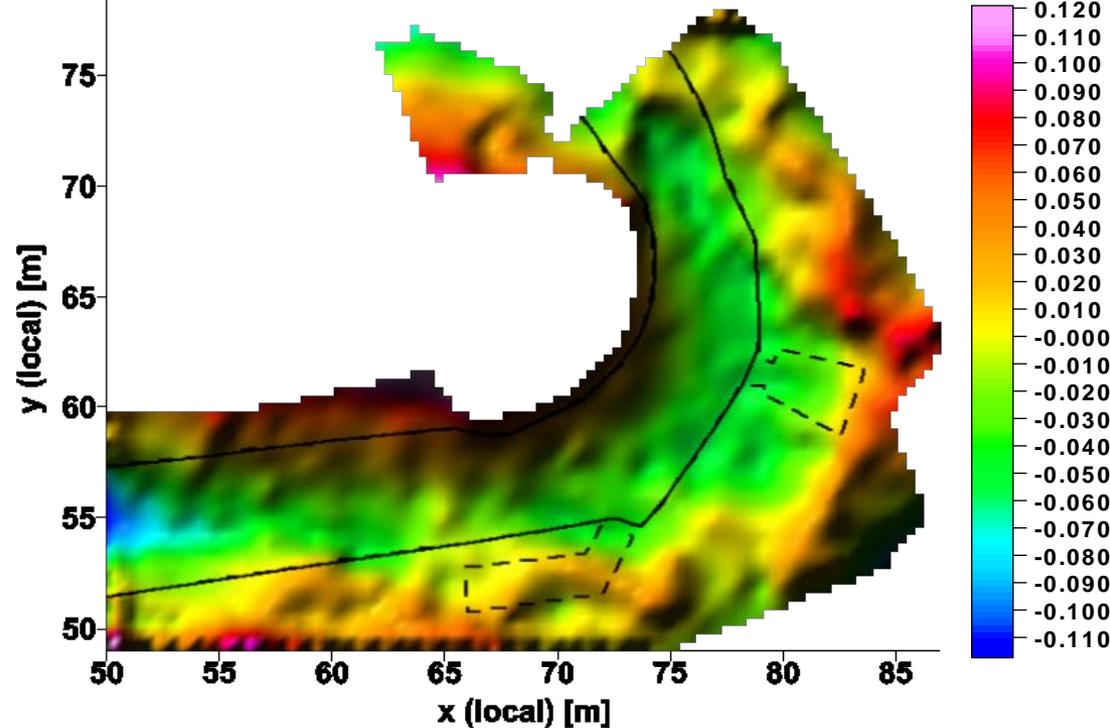
digitálny topografický model



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

gravimetrický prieskum Veľkej terasy Oravského zámku

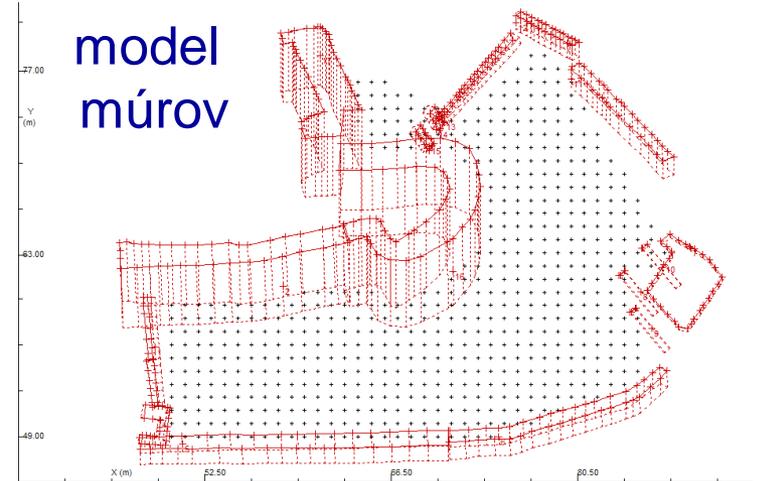
úplné Bouguerove anomálie



gravitačný efekt múrov

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

model
múrov

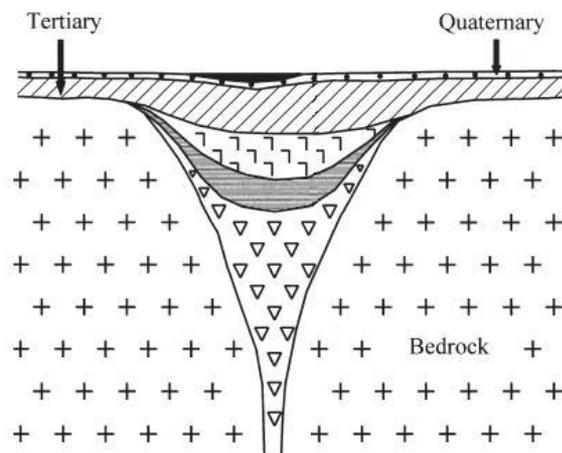


Príklady významu zavádzania korekcií v rámci výpočtu ÚBA (3/5):

- vymapovanie rozsahu maarového telesa,
lokalita Pinciná pri Lučenci

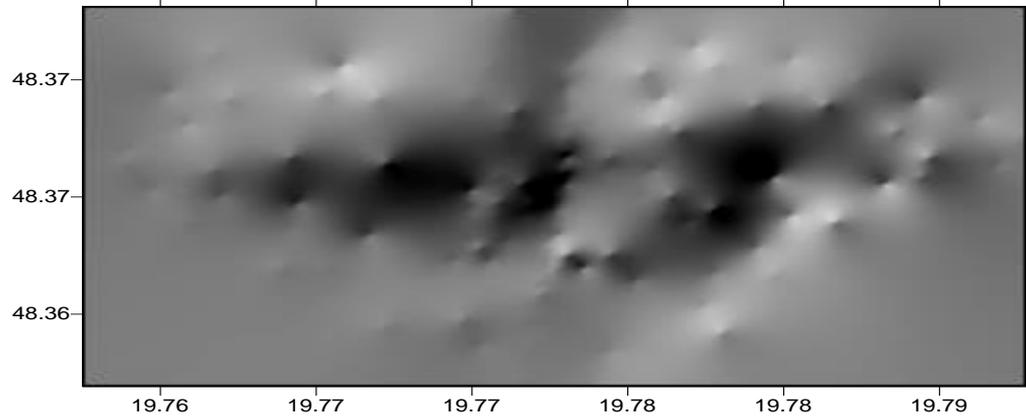
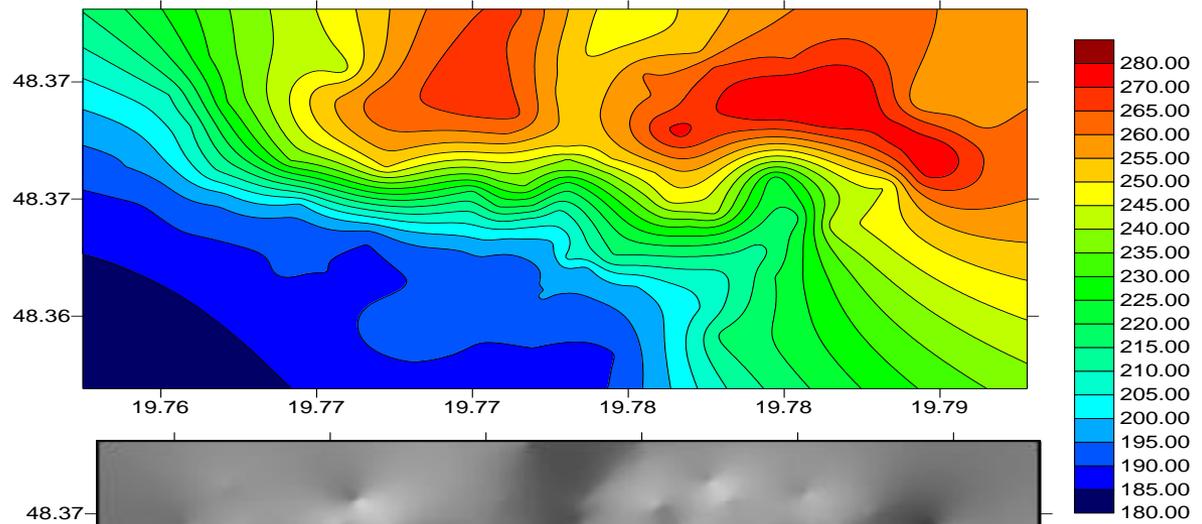


príklad súčasného maaru,
Nemecko

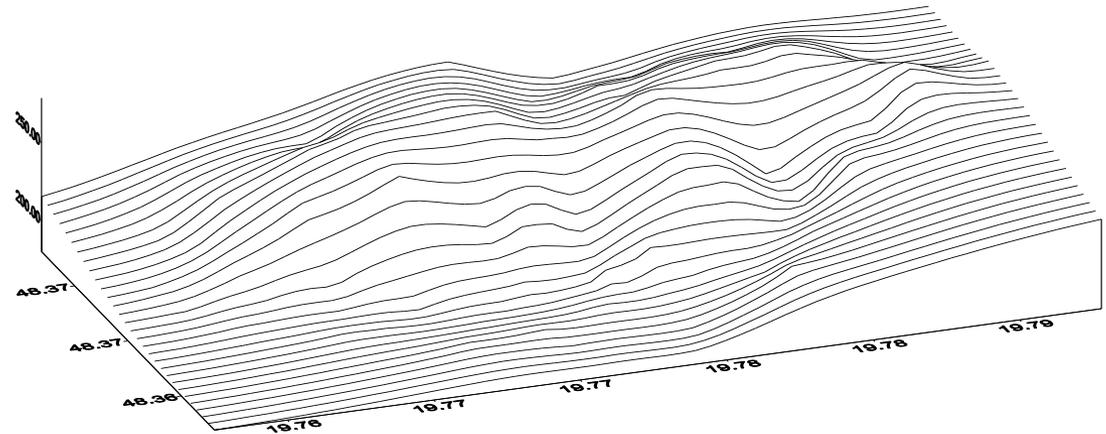


idealizovaná schéma výplne
maarového telesa

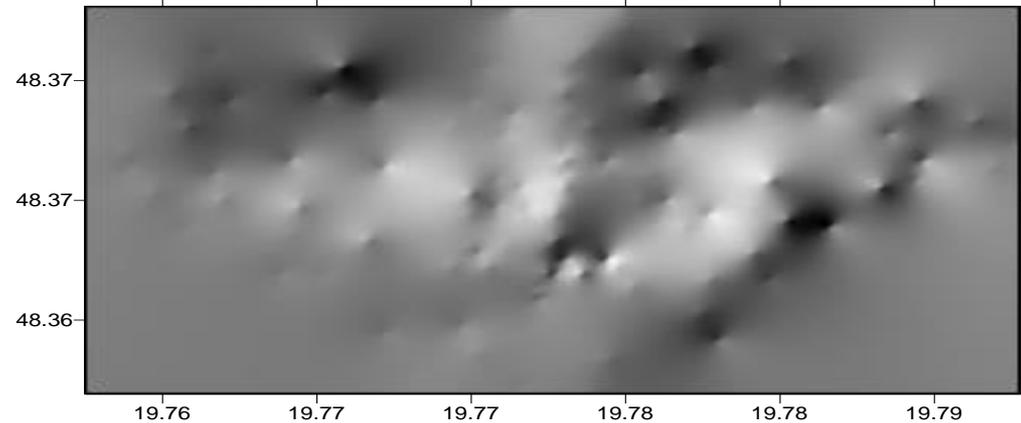
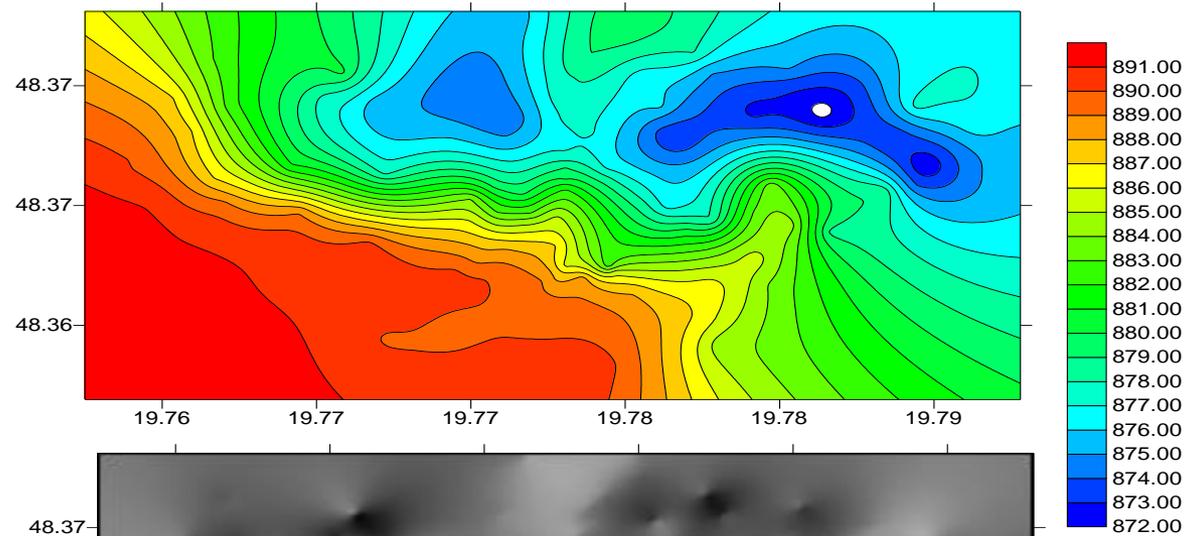
**tvorba ÚBA –
plošné merania
v oblasti maarového
telesa,
Pinciná pri Lučenci**



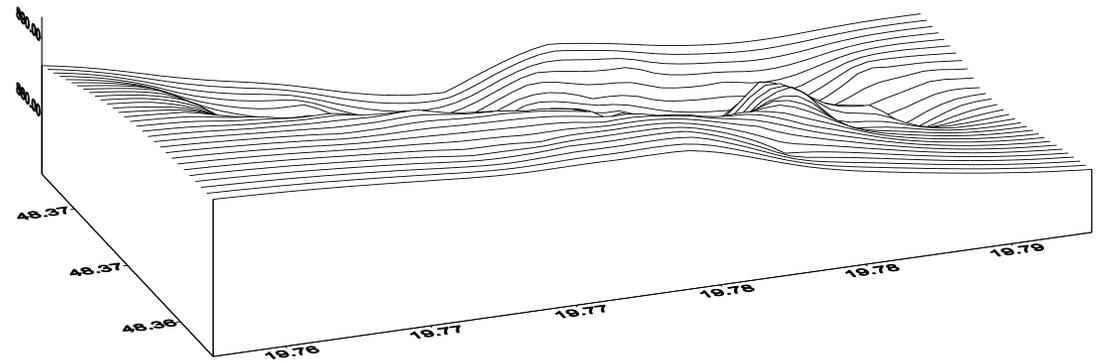
nadmorské výšky



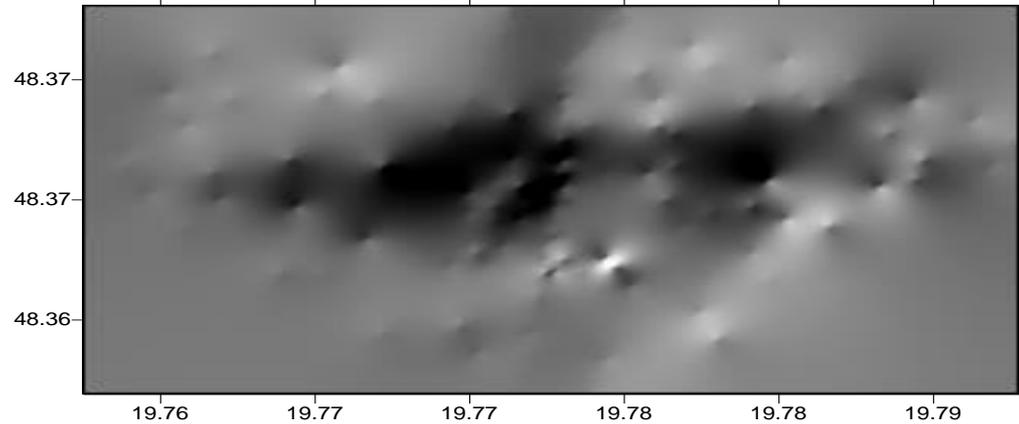
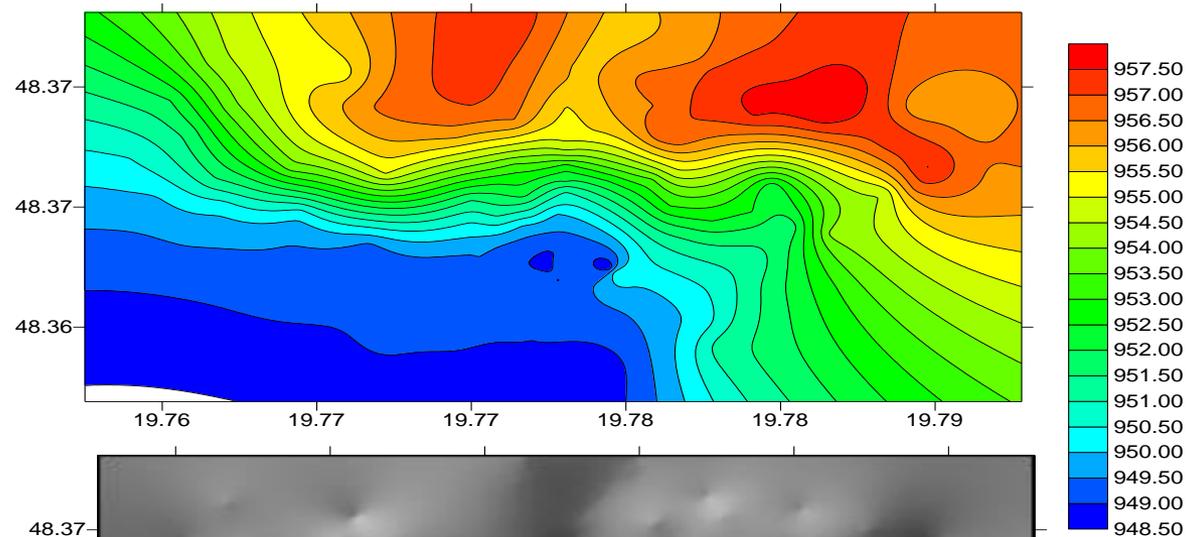
**tvorba ÚBA –
plošné merania
v oblasti maarového
telesa,
Pinciná pri Lučenci**



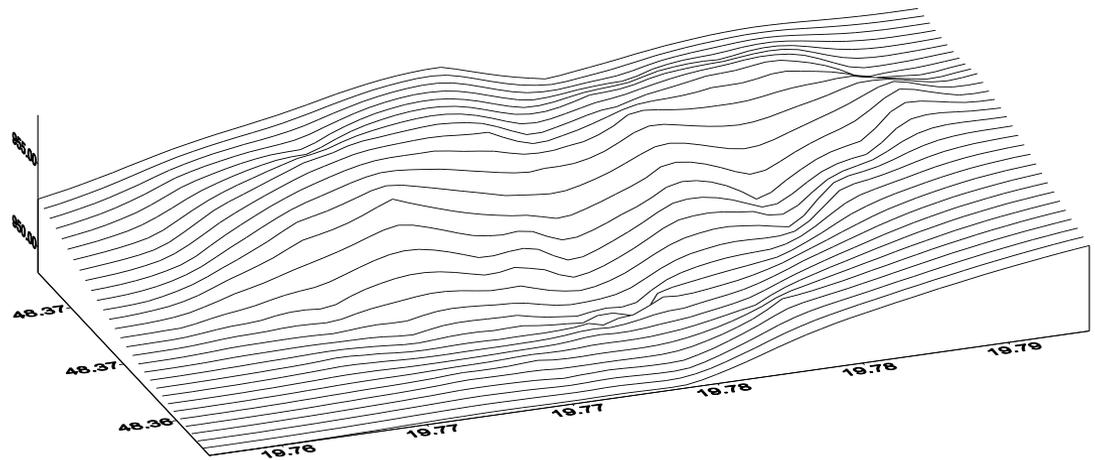
**namerané tiažové
zrýchlenie
(so zavedenou
opravou o chod)**



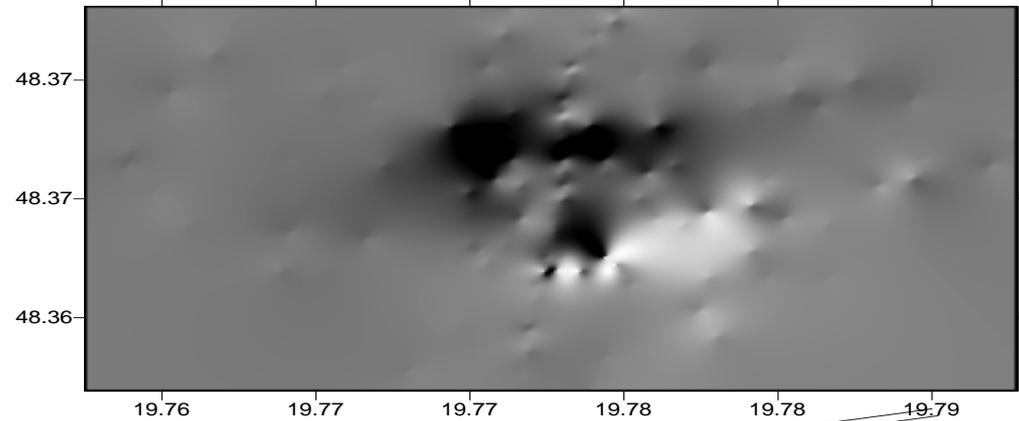
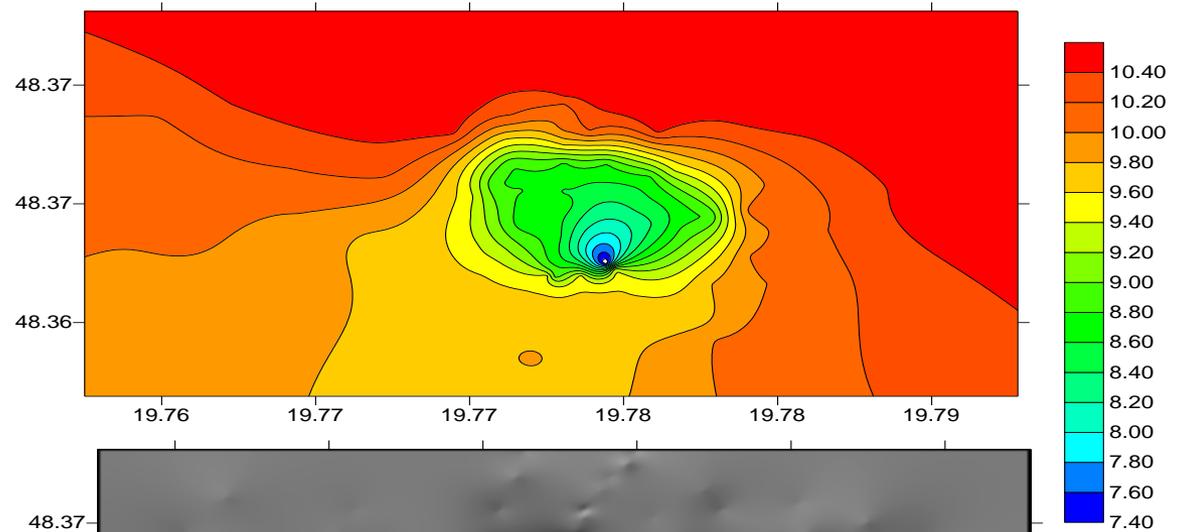
**tvorba ÚBA –
plošné merania
v oblasti maarového
telesa,
Pinciná pri Lučenci**



Fayeova anomália:
 $\Delta g_F = g - g_n + 0.3086h$
(odstránený vplyv
výšok)

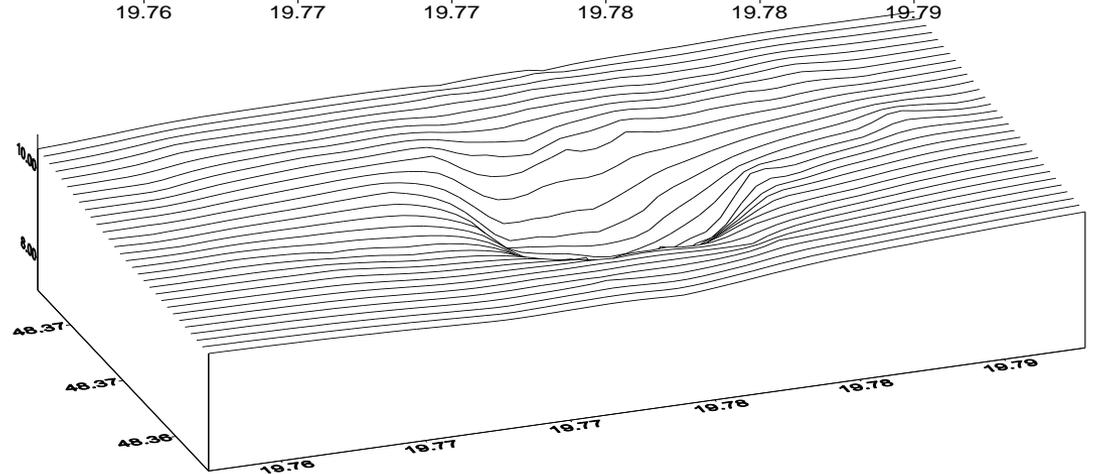


**tvorba ÚBA –
plošné merania
v oblasti maarového
telesa,
Pinciná pri Lučenci**



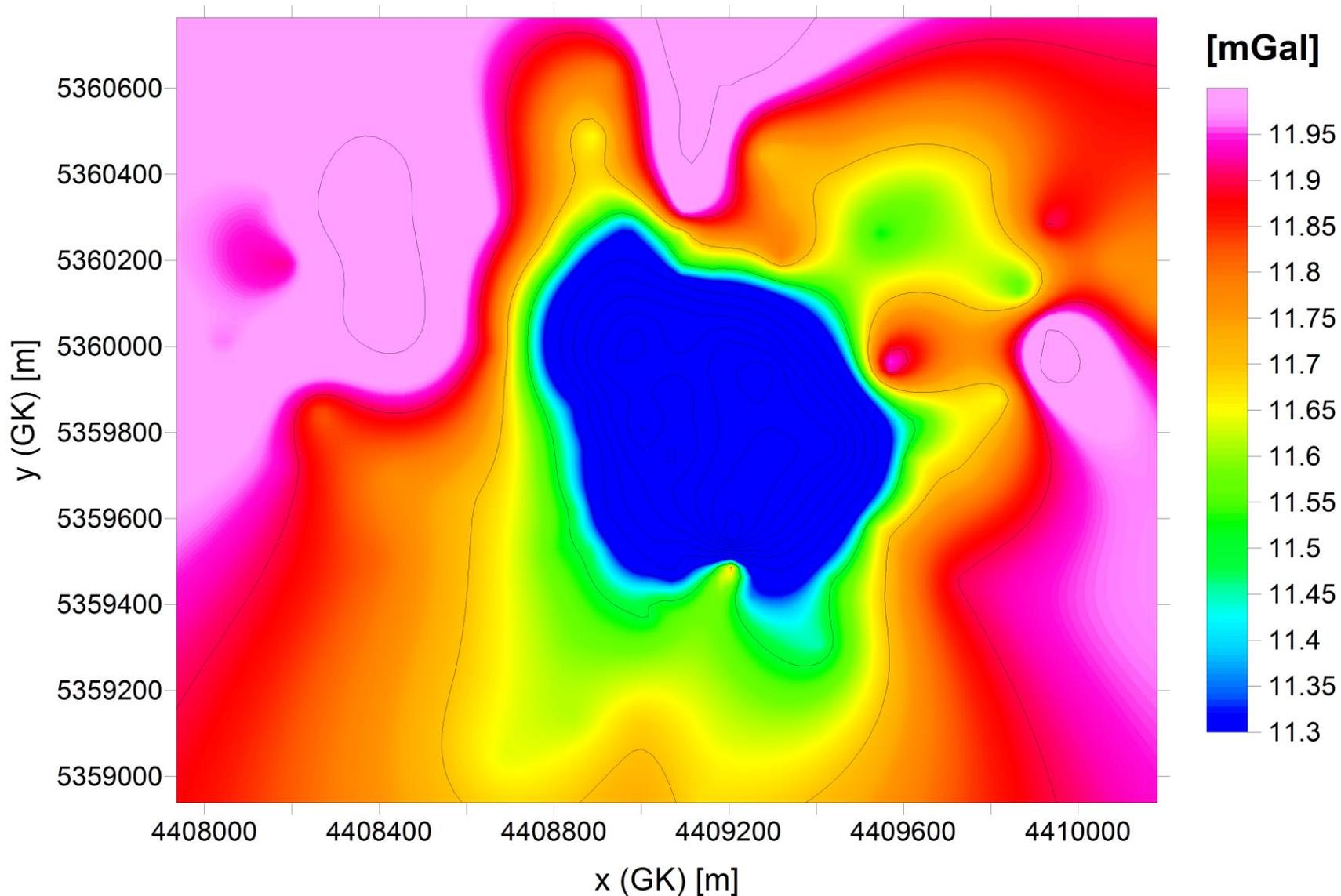
**Úplná Bouguerova
anomália:**

$$\Delta g_B = g - g_n + 0.3086h - 0.0419\rho h - B + T$$



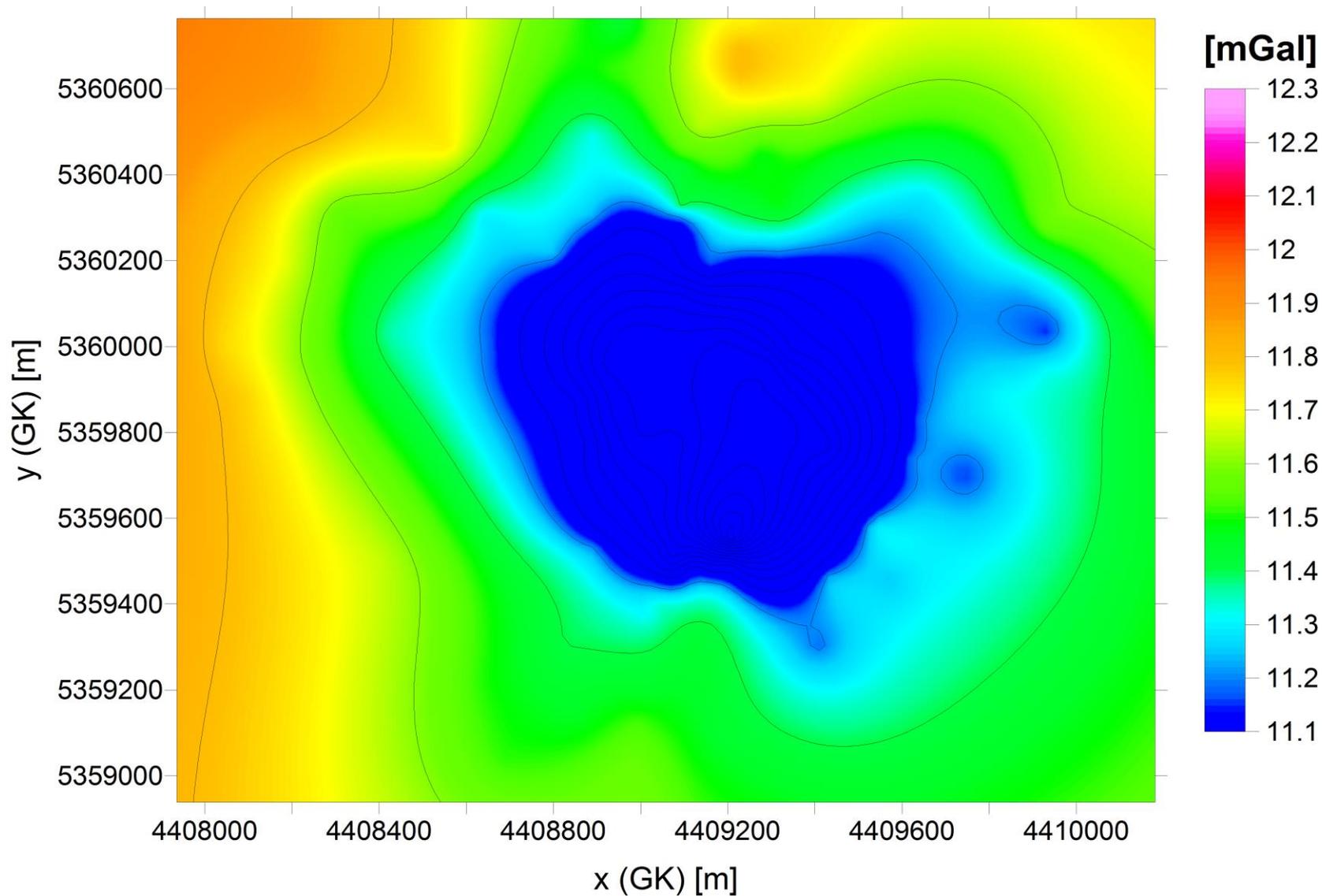
Úplná Bouguerova anomália:

$$\Delta g_B = g - g_n + 0.3086h - 0.0419h\rho - B + T$$

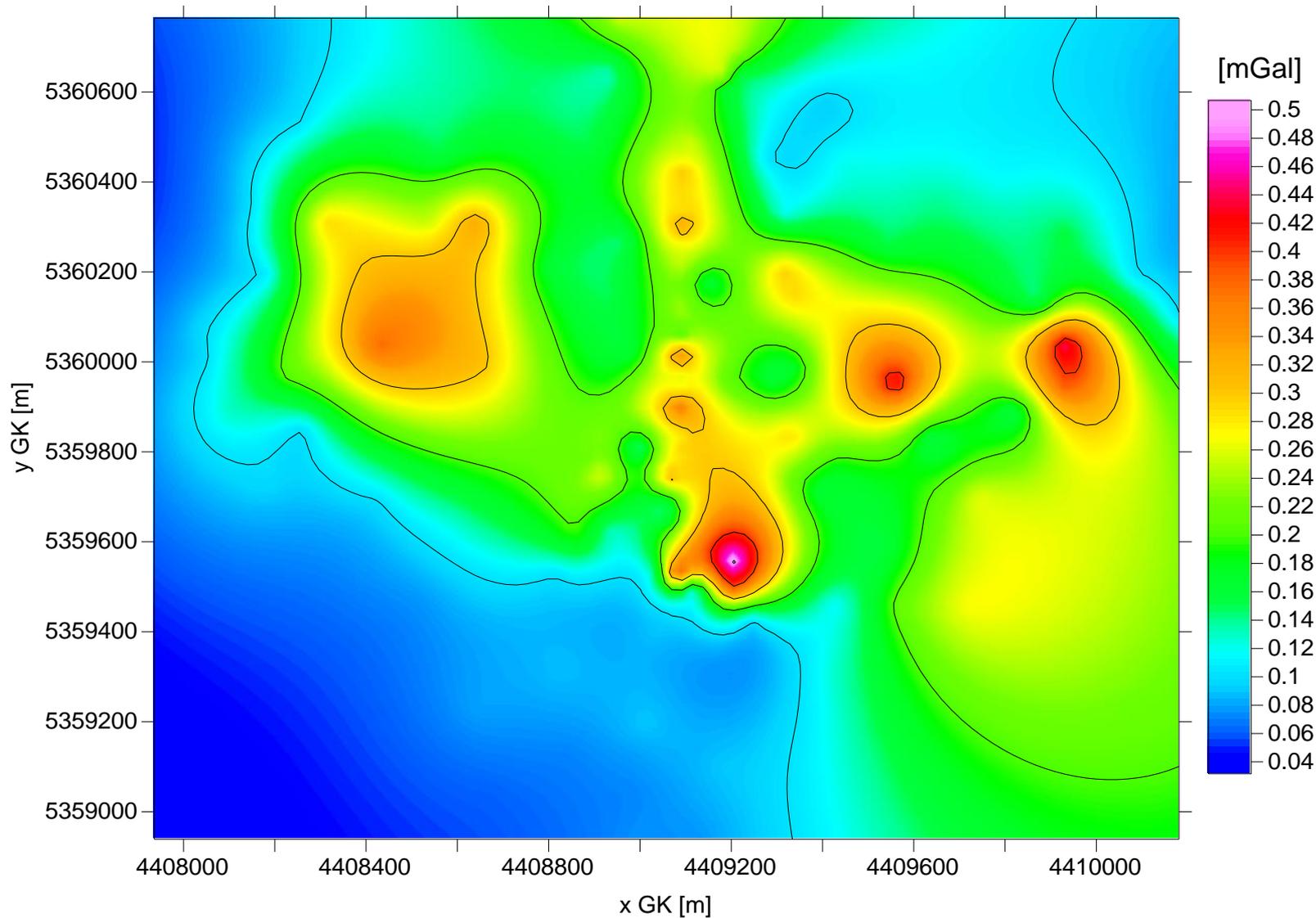


Neúplná Bouguerova anomália:

$$\Delta g_B = g - g_n + 0.3086h - 0.0419h\rho$$

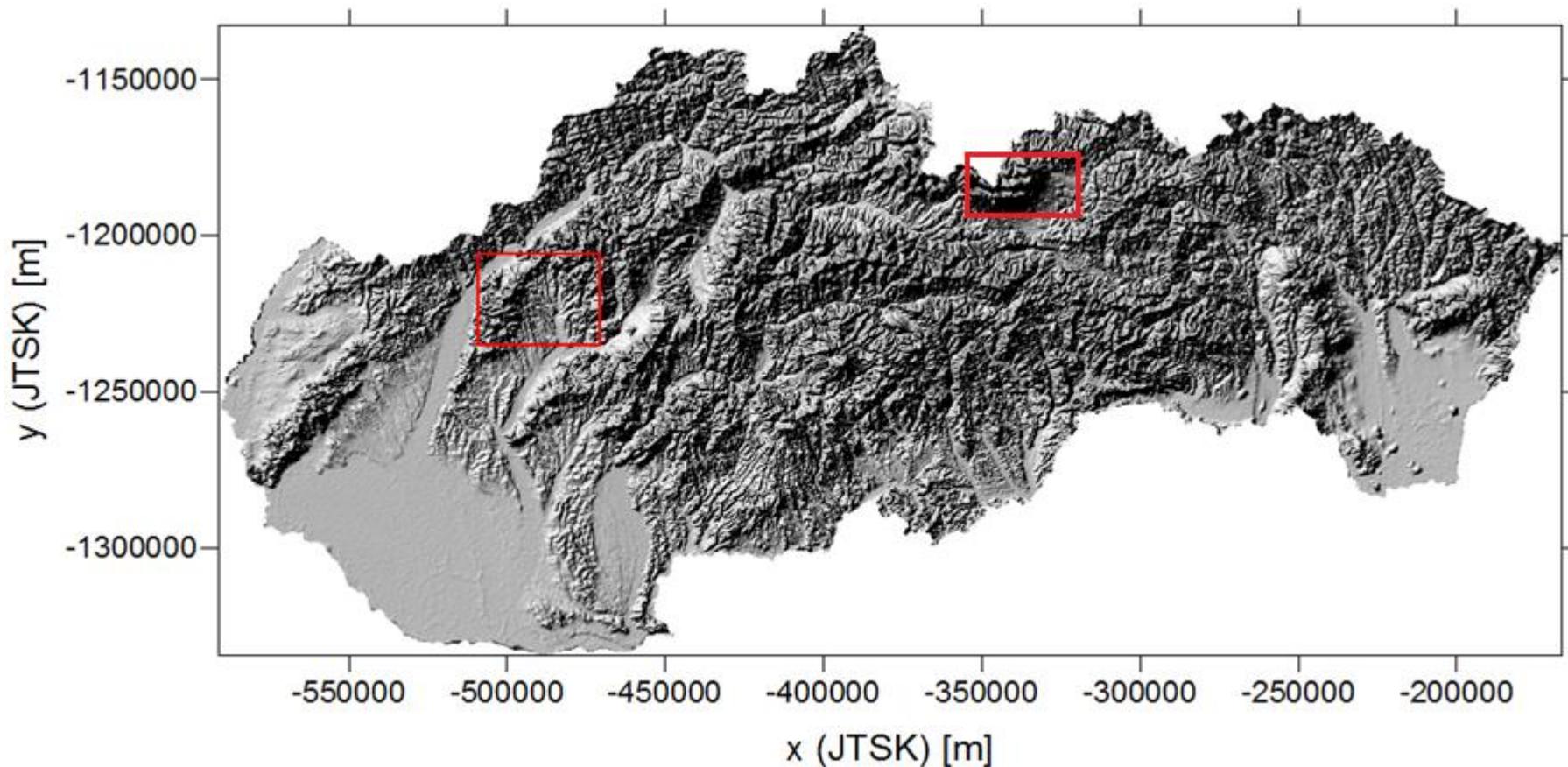


Dôvod? Terénne korekcie dosahujú relatívne malé hodnoty.



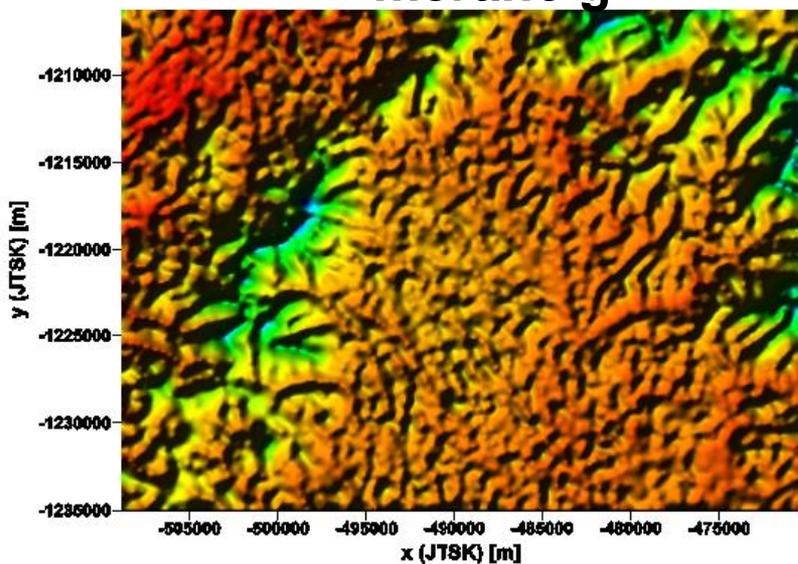
Príklady významu zavádzania korekcií v rámci výpočtu ÚBA (príklady 4/5 a 5/5):

- prejav ľahkej výplne neogénnej kotliny (Bánovská kotlina)
- význam ich zavedenia vo vysokohorskom prostredí (Vysoké Tatry)

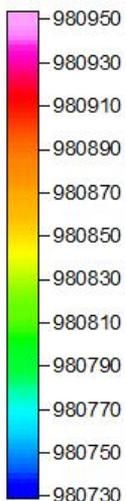


Bánovská kotlina

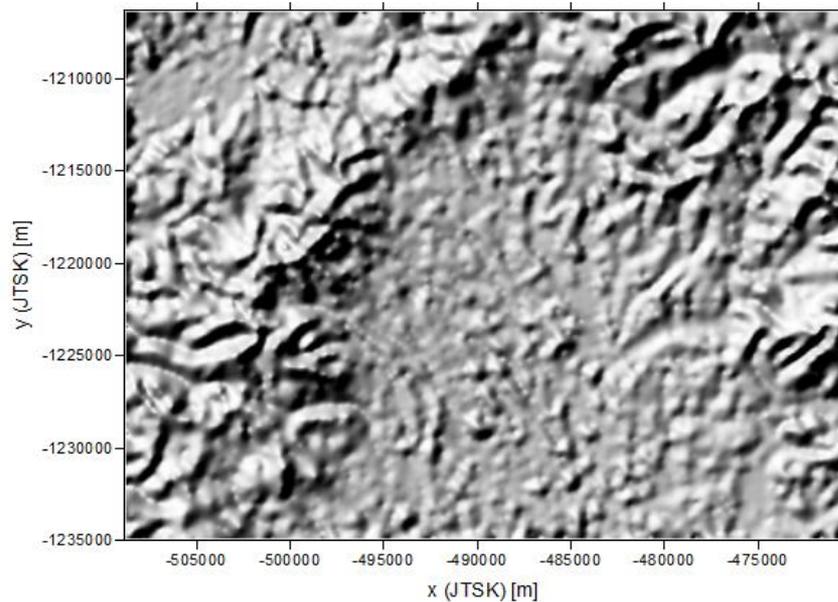
merané g



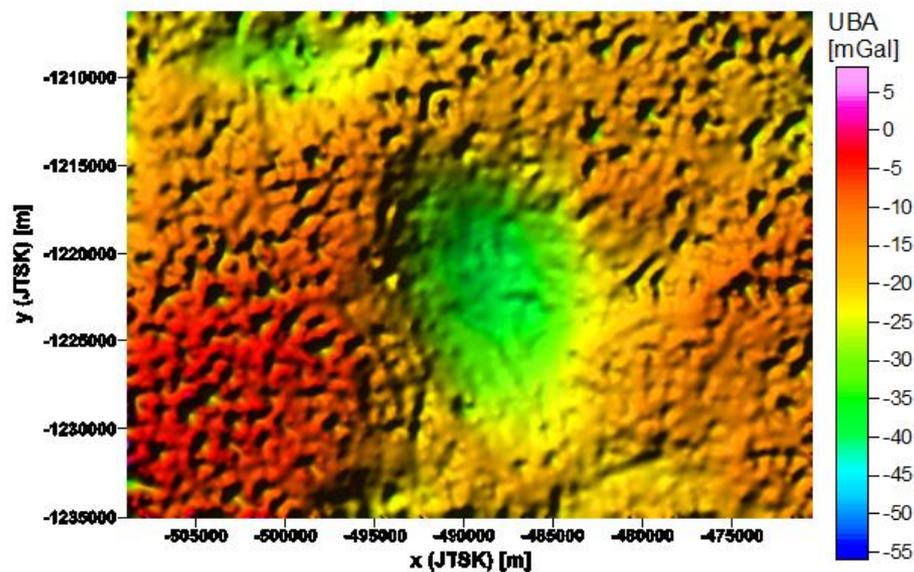
g [mGal]



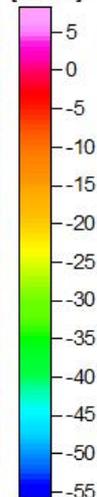
nadm. výšky



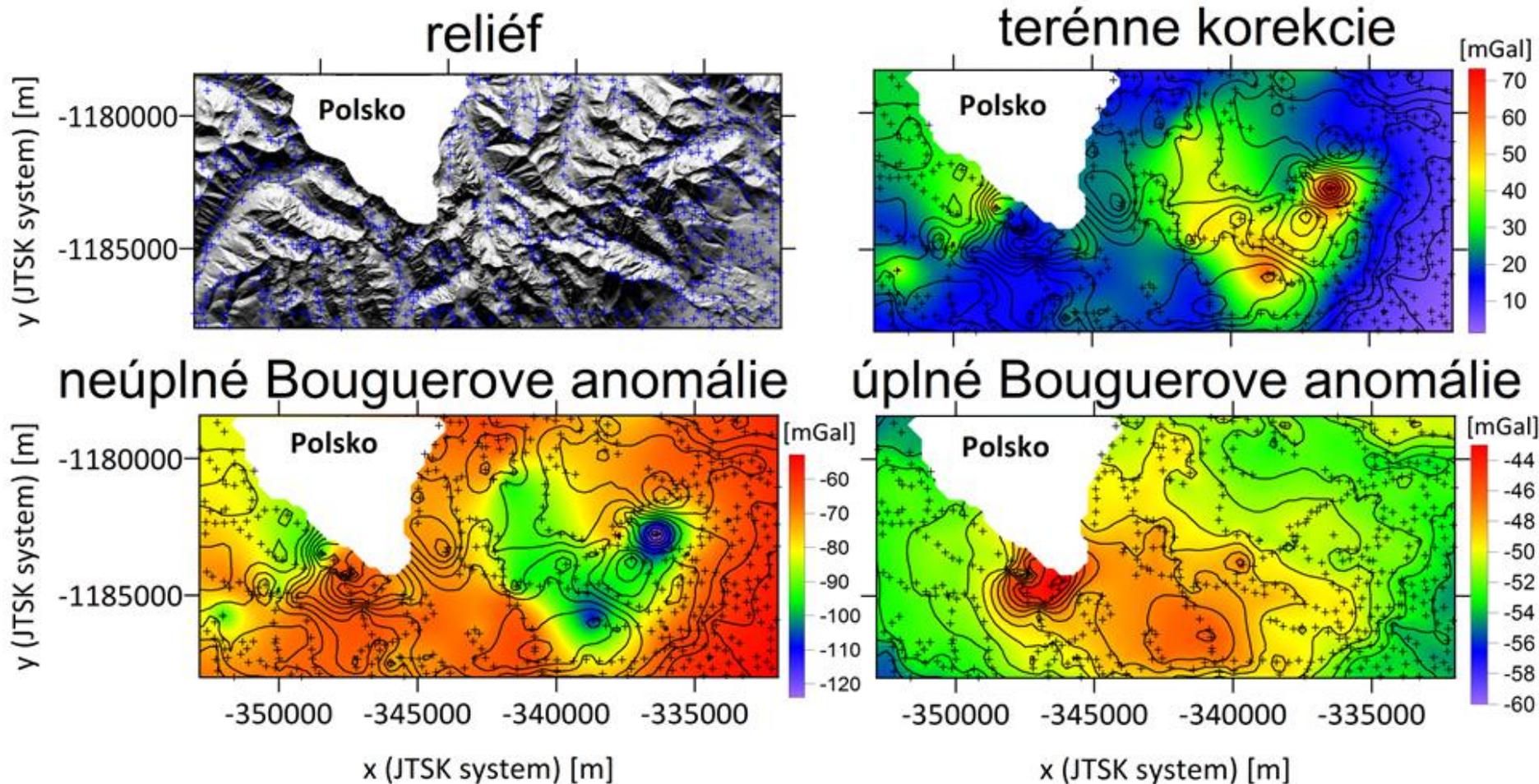
ÚBA (2.67 g.cm⁻³)



ÚBA [mGal]

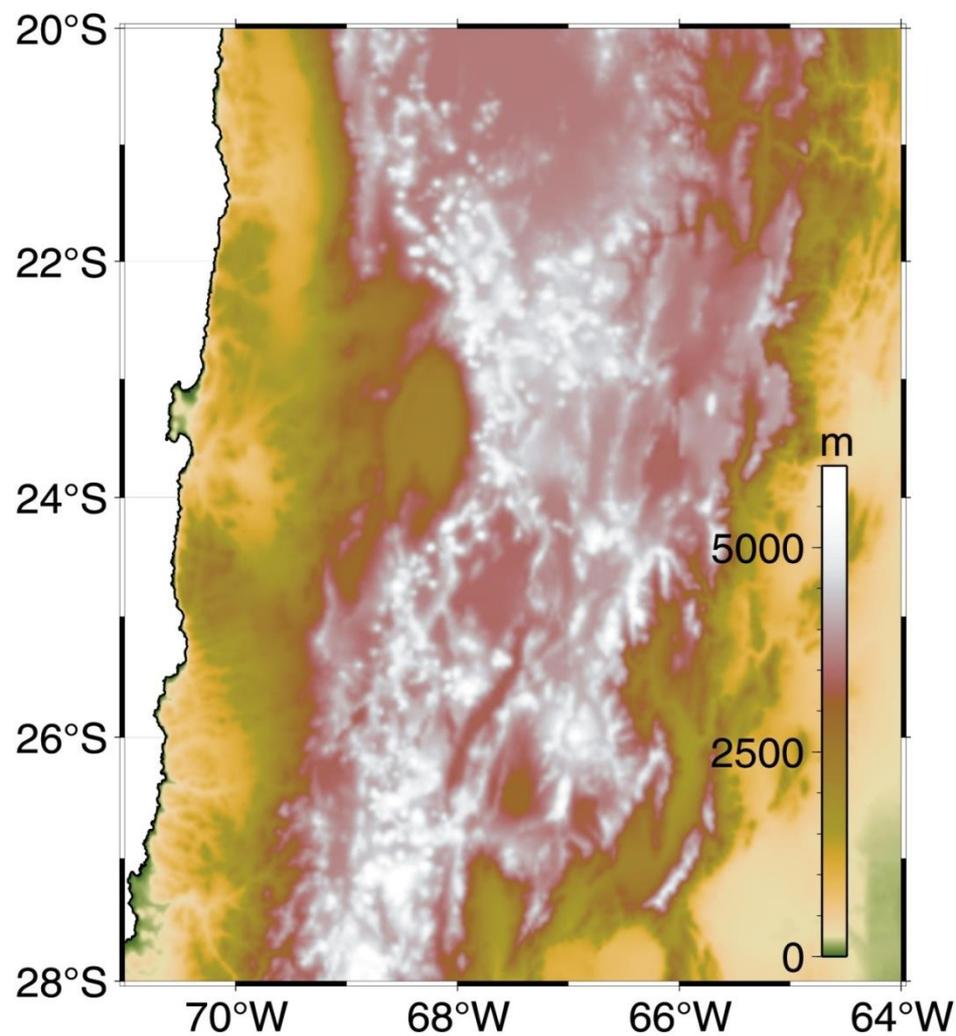


**extrémny príklad – Vysoké Tatry:
(terénne korekcie tu hrajú významnú úlohu a zabraňujú vzniku
falošných anomálií)**

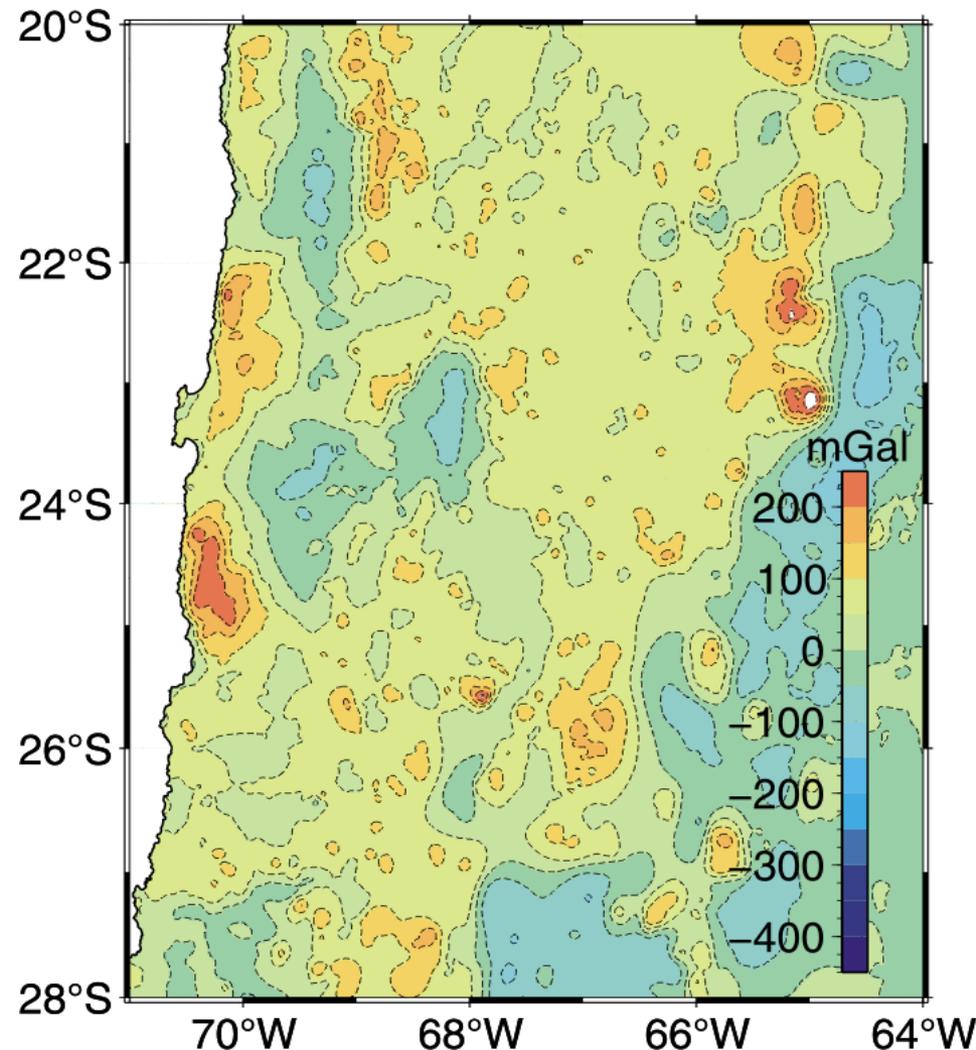


Príklad zo zahraničia: Andy – južná Amerika

topografia

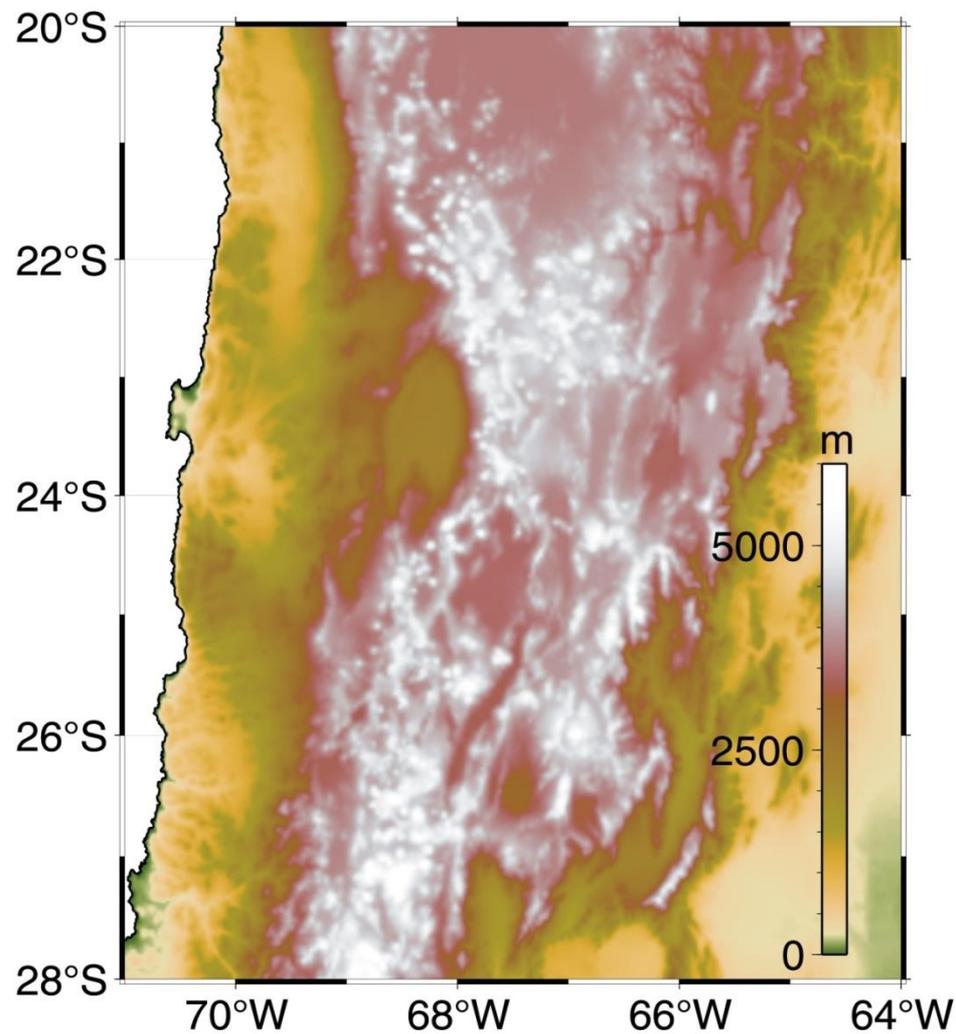


Fayeove anomálie

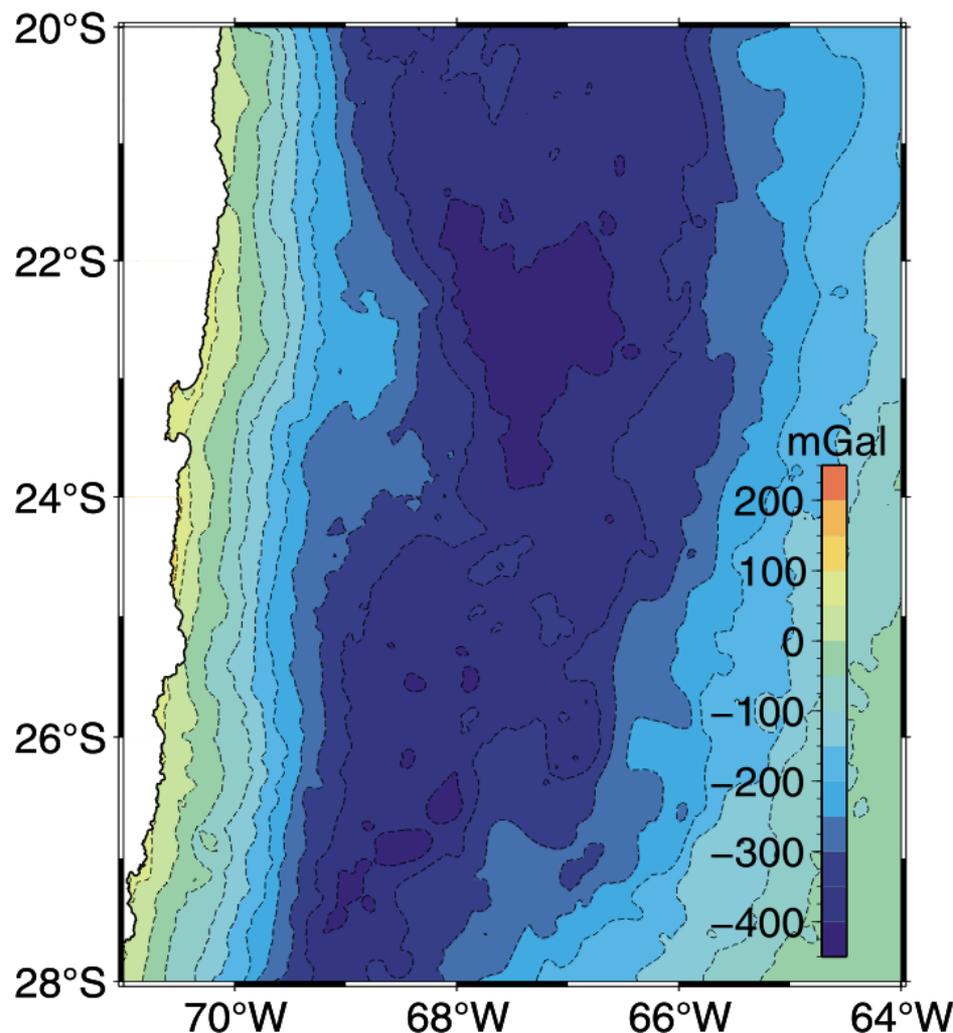


Príklad zo zahraničia: Andy – južná Amerika

topografia



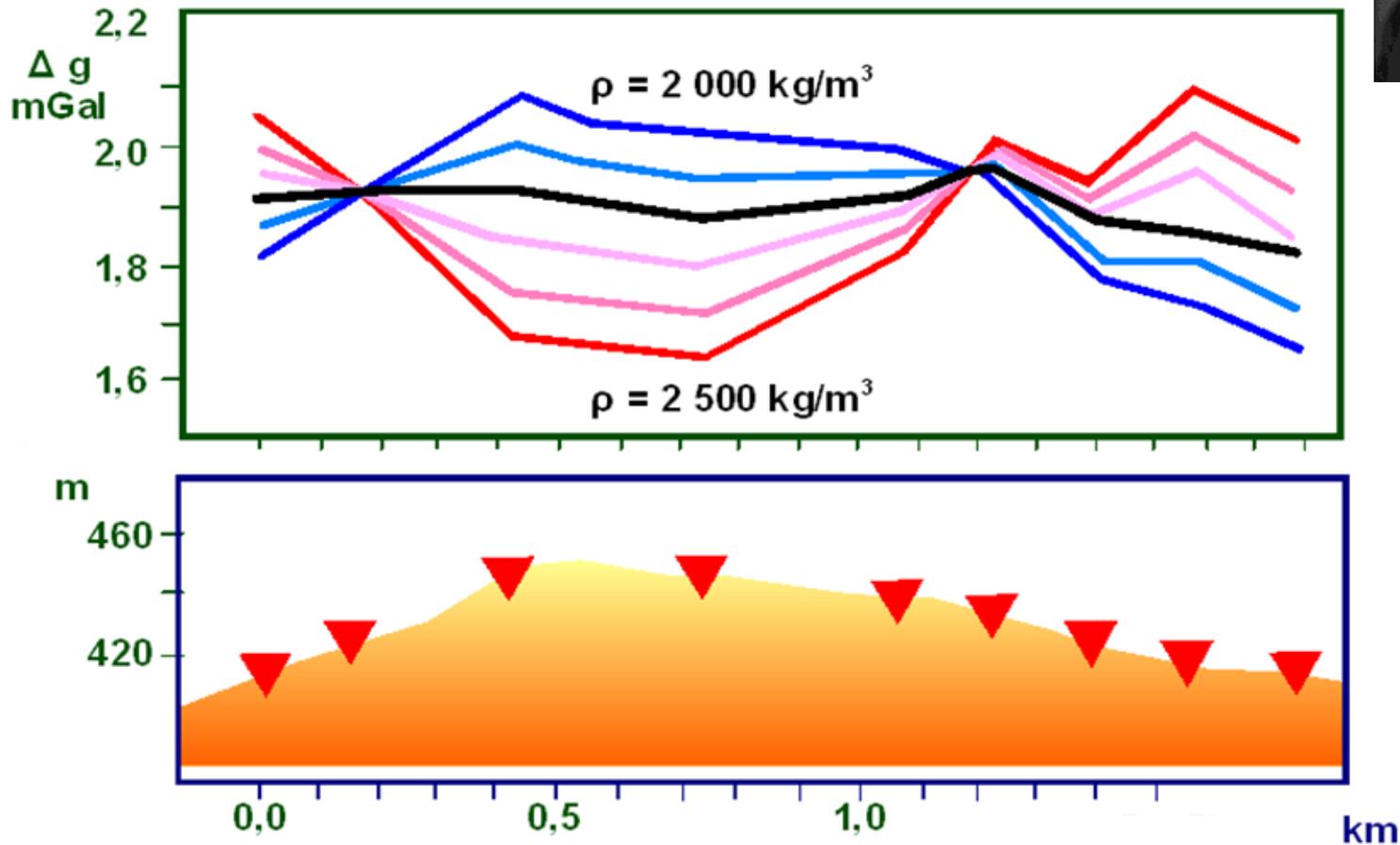
Bouguerove anomálie



**dôsledok vplyvu korekčnej hustoty pri
výpočte ÚBA:**

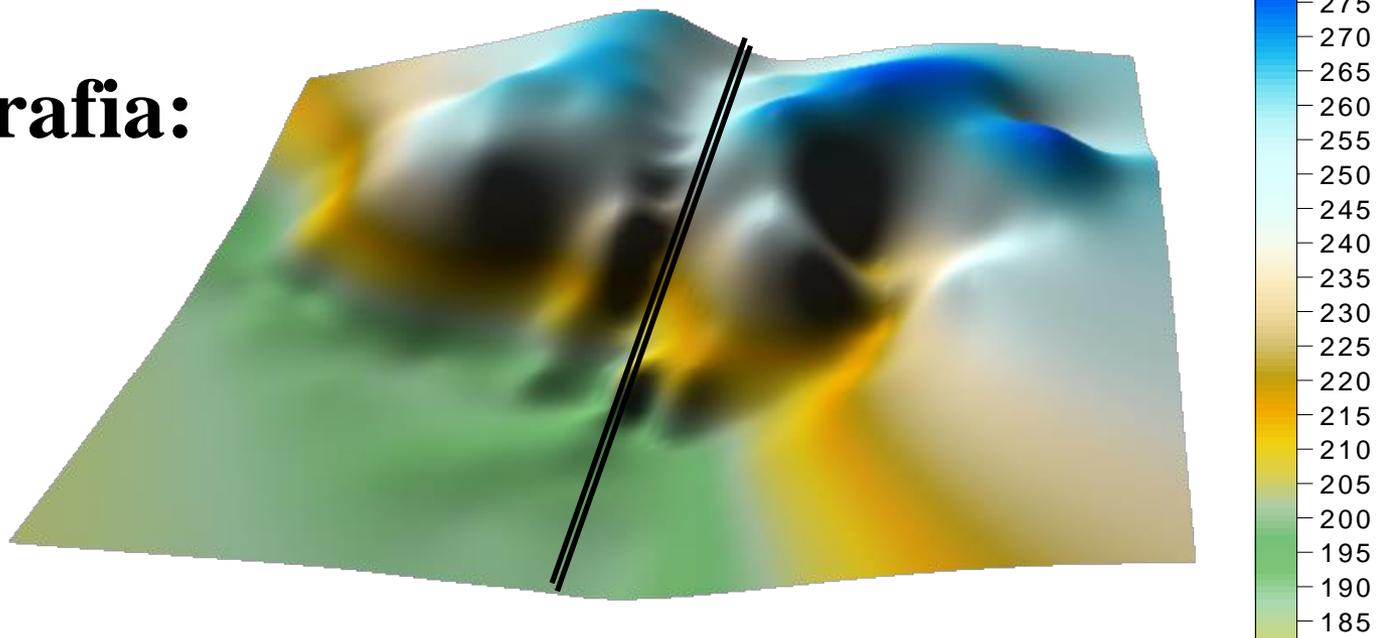
**Nettletonova metóda odhadu
strednej hustoty**

Nettletonova metóda odhadu strednej hustoty

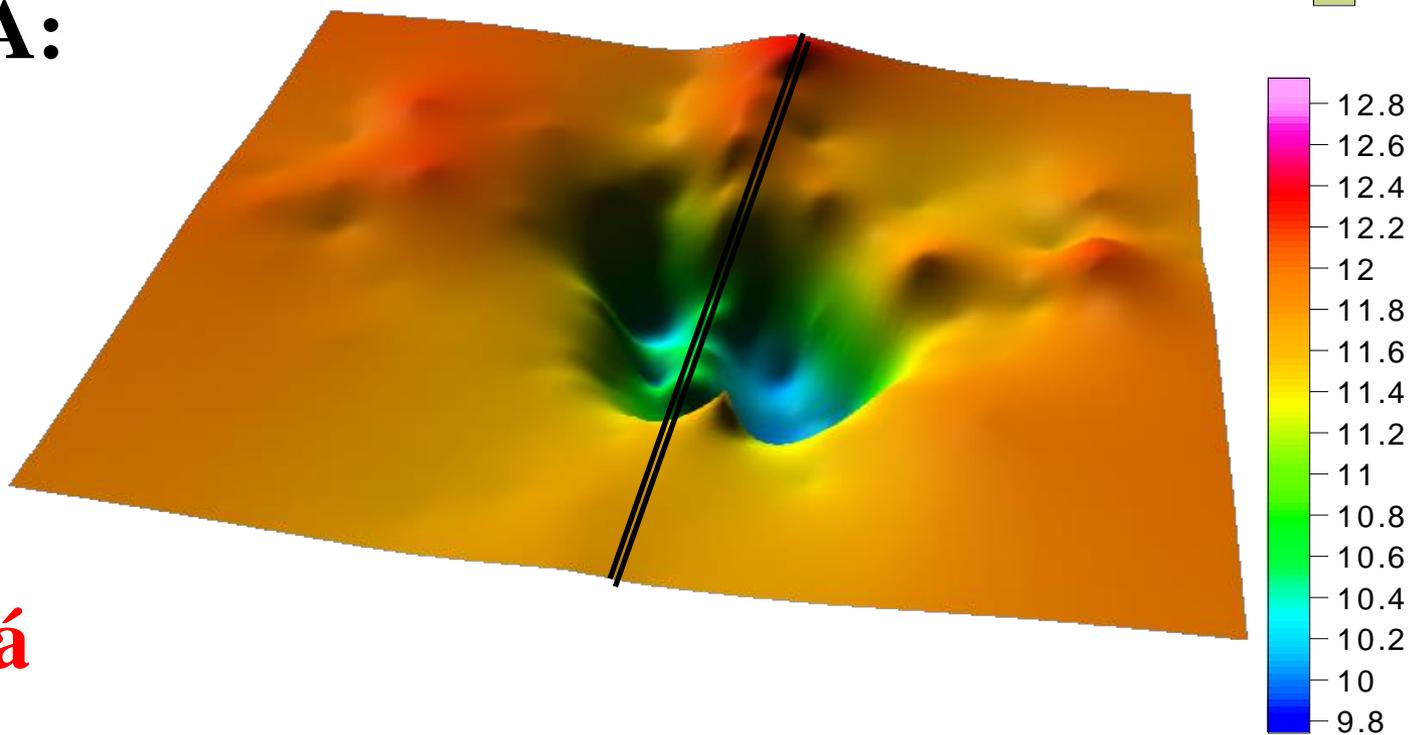


spočíva vo výpočte ÚBA pre rôzne korekčné hustoty na profile s výraznou topografiou – aby bolo možné korelovať alebo antikorelovať získané krivky ÚBA so zmenou výšky

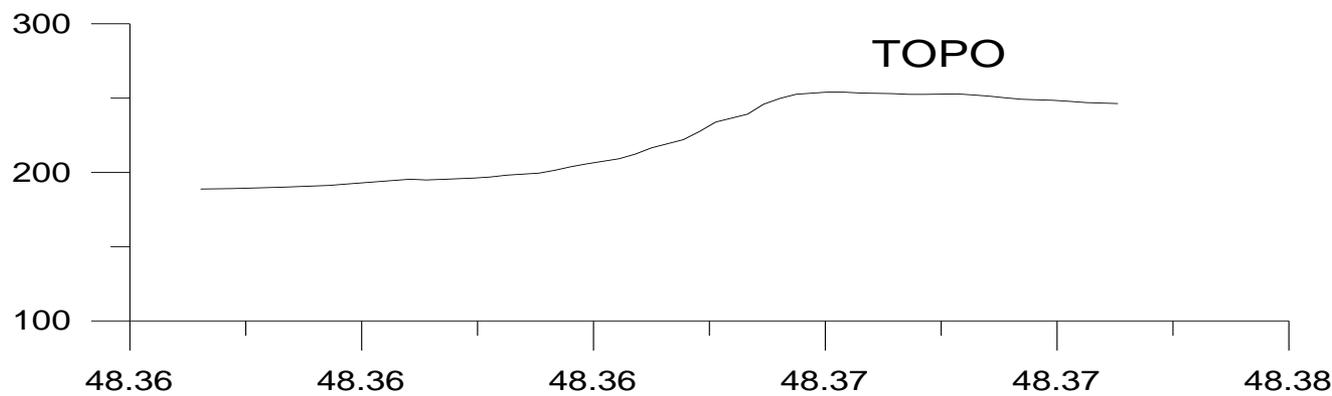
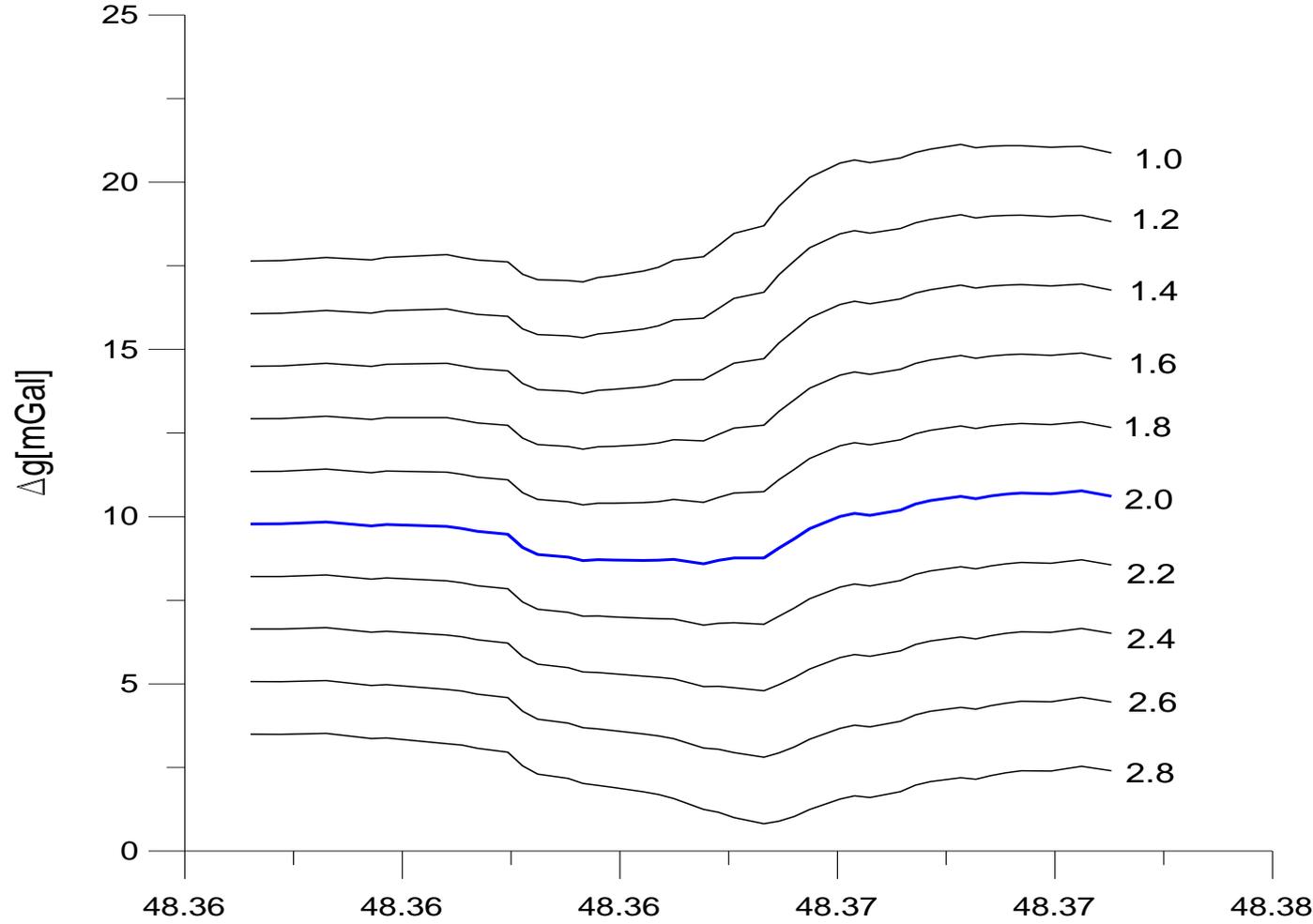
topografia:



ÚBA:

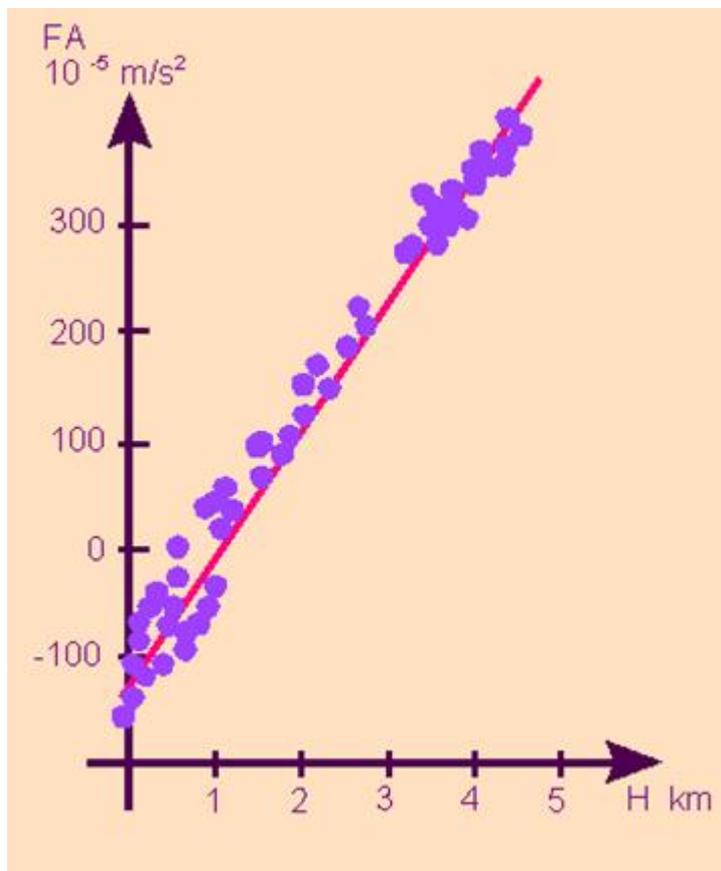


Pinciná



Pinciná

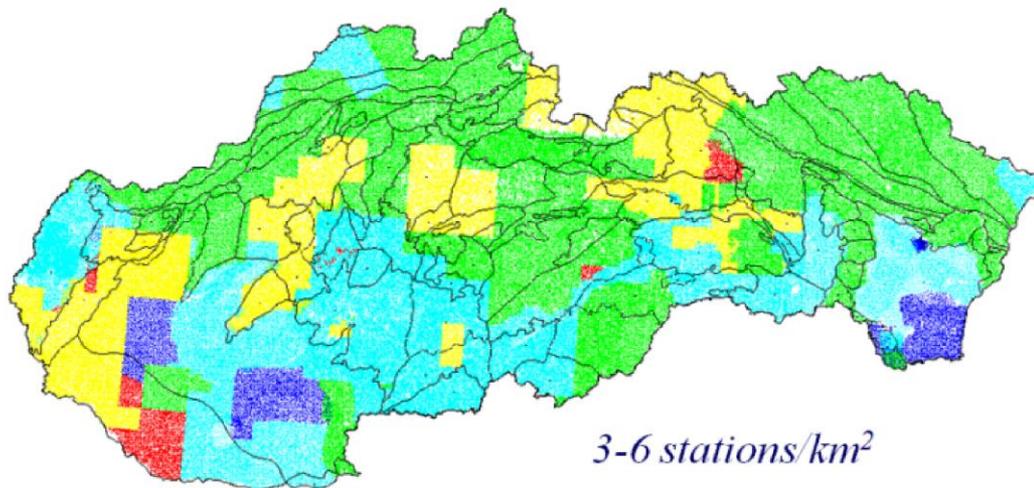
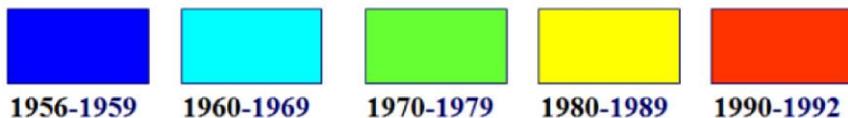
Nettletonova metóda odhadu strednej hustoty



niektorí autori počítajú koeláciu medzi Fayovou anomáliou (FA) a nadmorskou výškou (H) výpočtových bodov, smernica je potom funkciou odhadnutej strednej hustoty.

ÚBA – územie SR

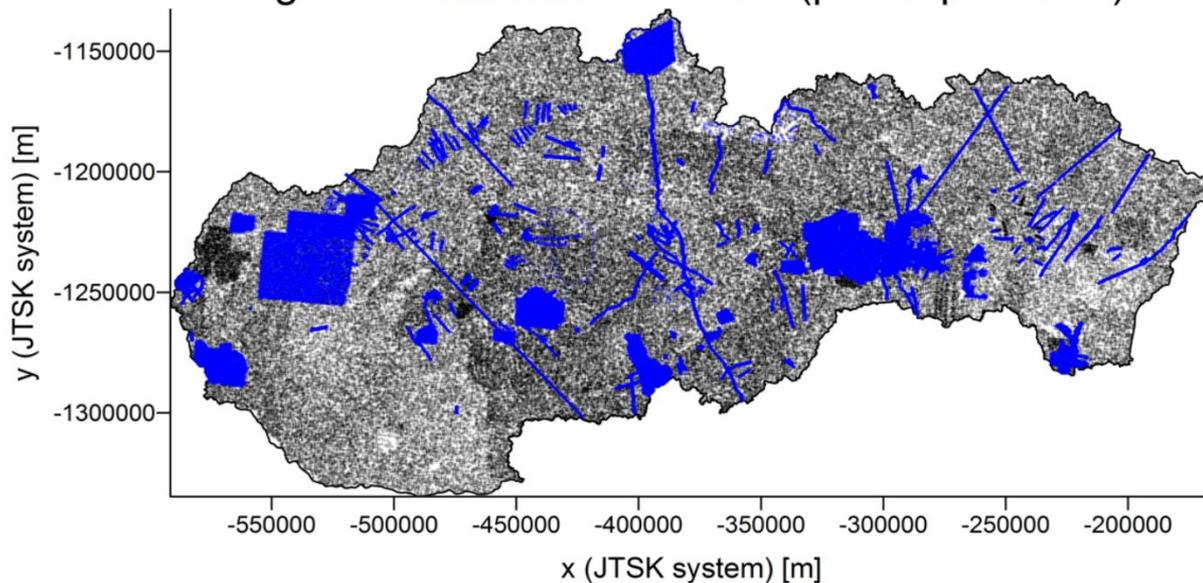
ÚBA (2.67 g.cm^{-3}) – územie Slovenska



tzv. „staršia regionálna databáza“, 1950-1990

1. krát prepočítaná v rokoch 1999-2001 (projekt MŽP SR „Atlas“)
2. krát prepočítaná v rokoch 2011-2014 (projekt APVV „Bouguer_NG“)

regional + detailed database (points positions)

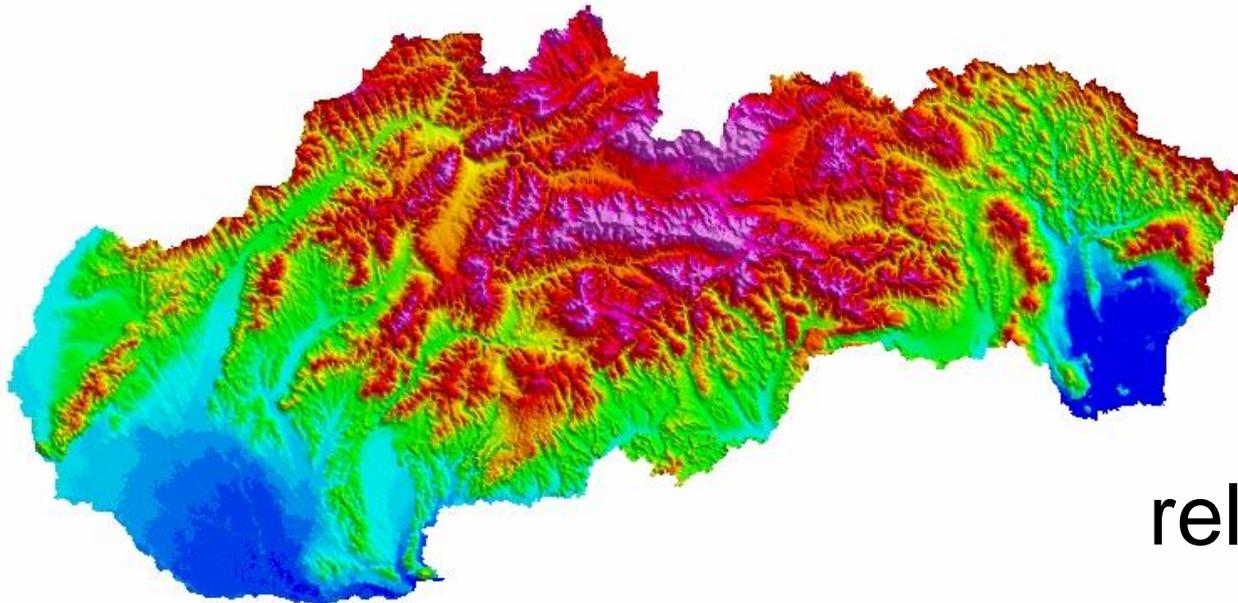
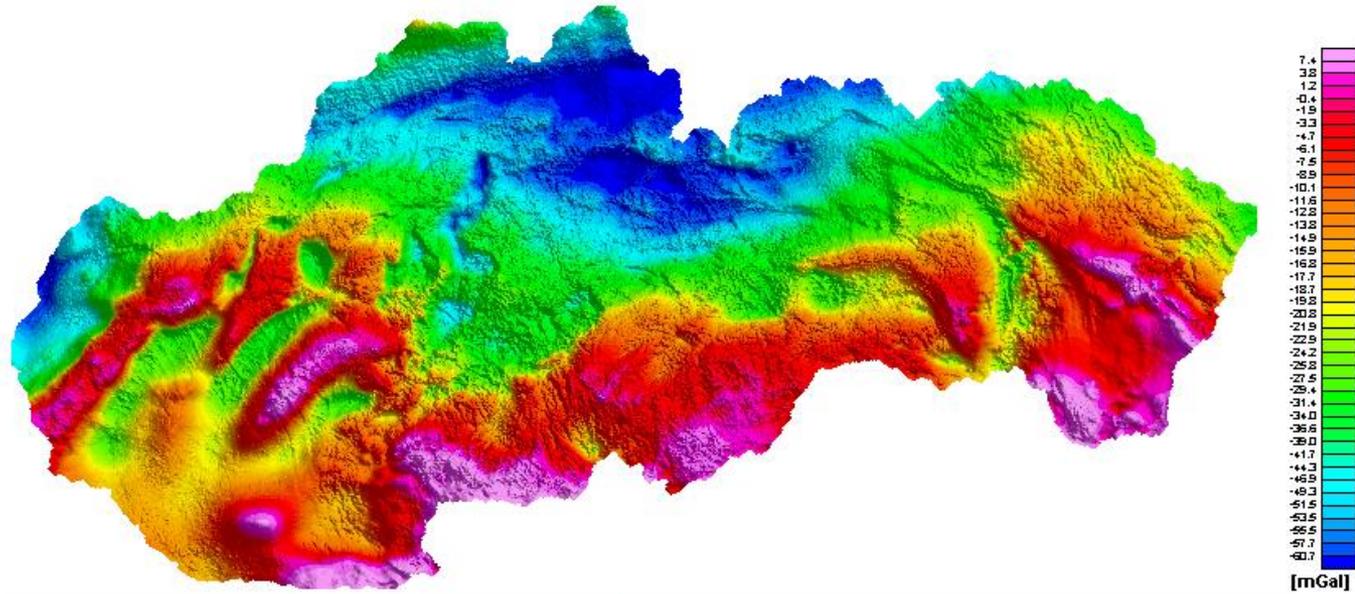


v súčasnosti:
212 778 regionálnych bodov
(čierne bodky)

plus

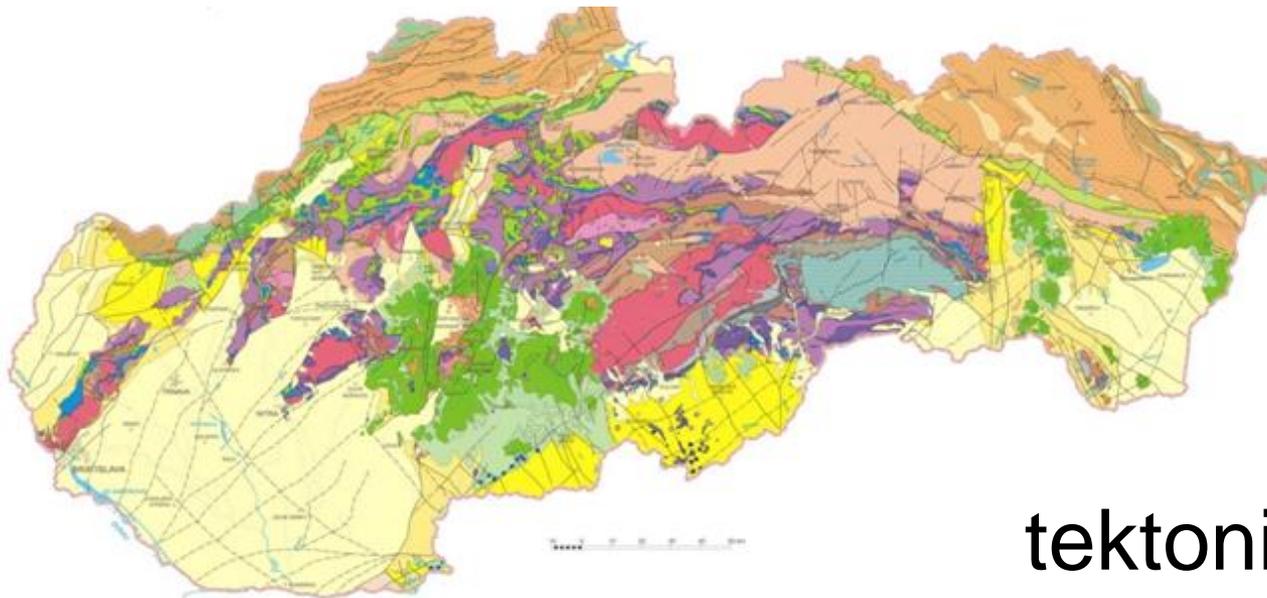
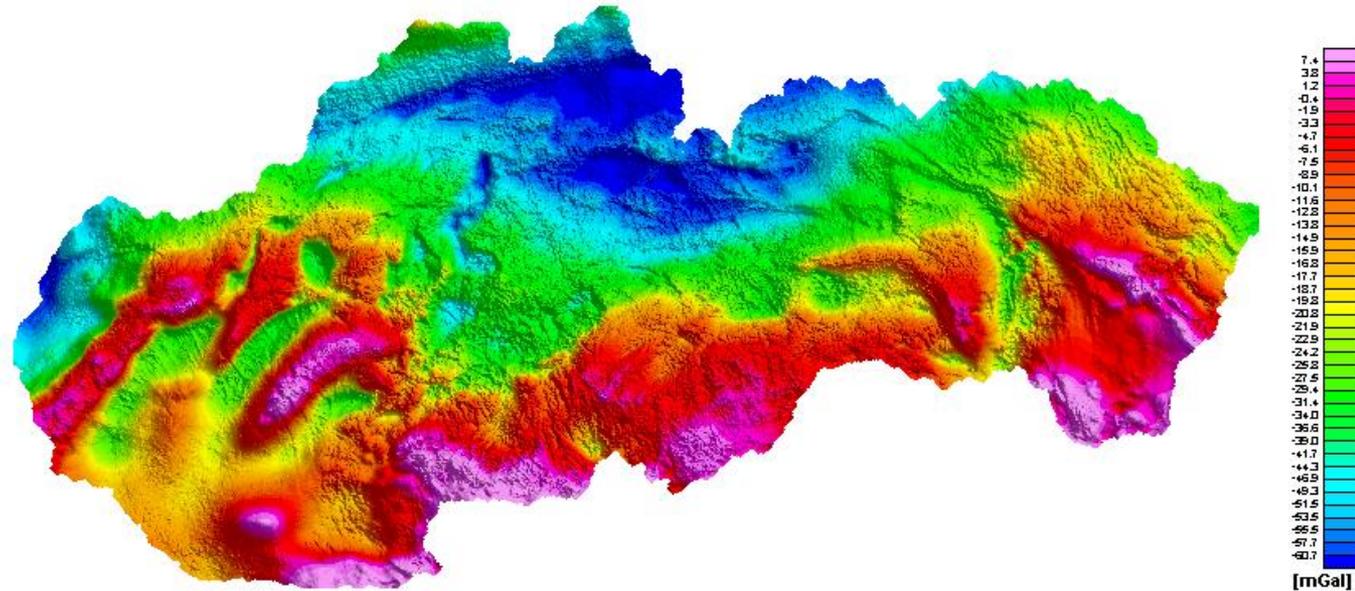
107 437 detailných bodov
(modré bodky)

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

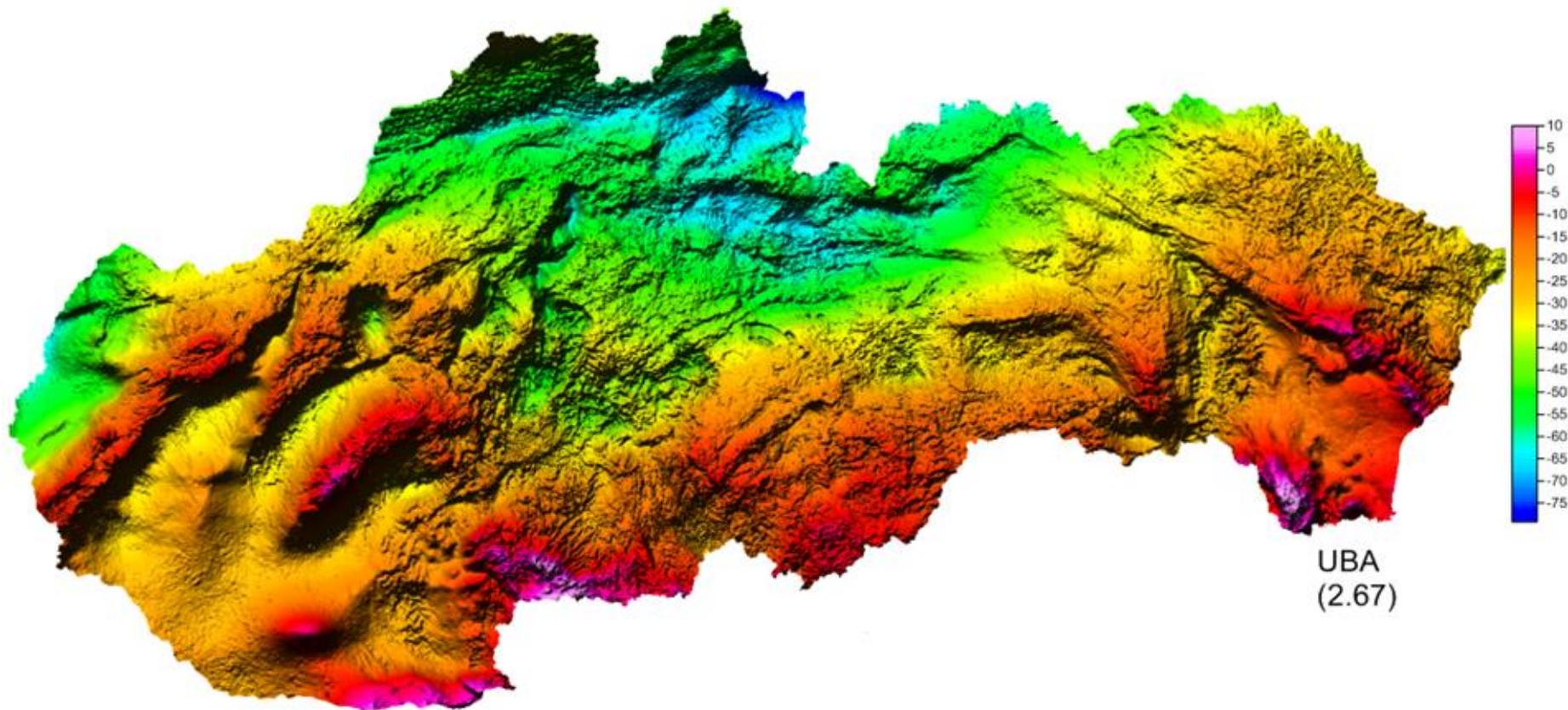


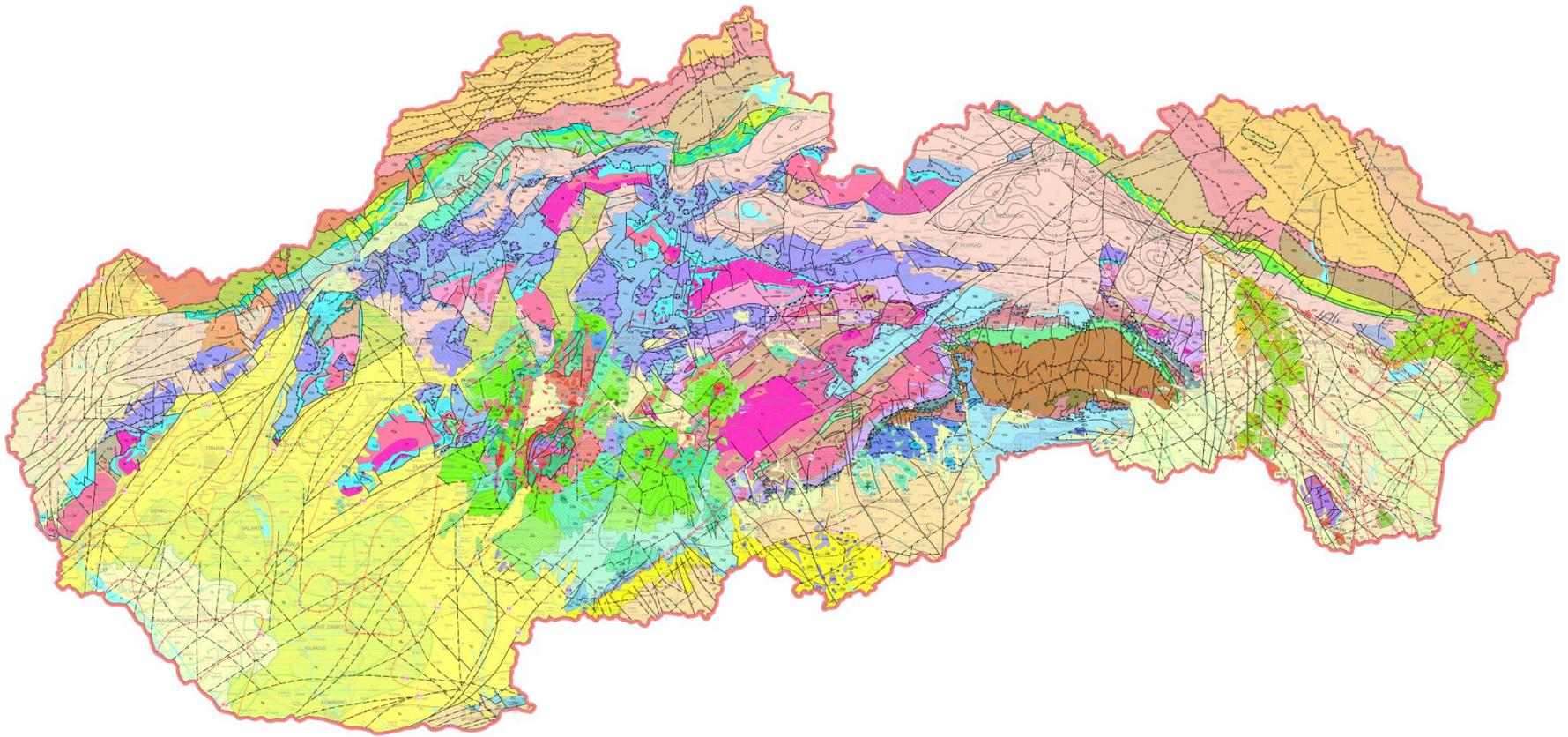
relief

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



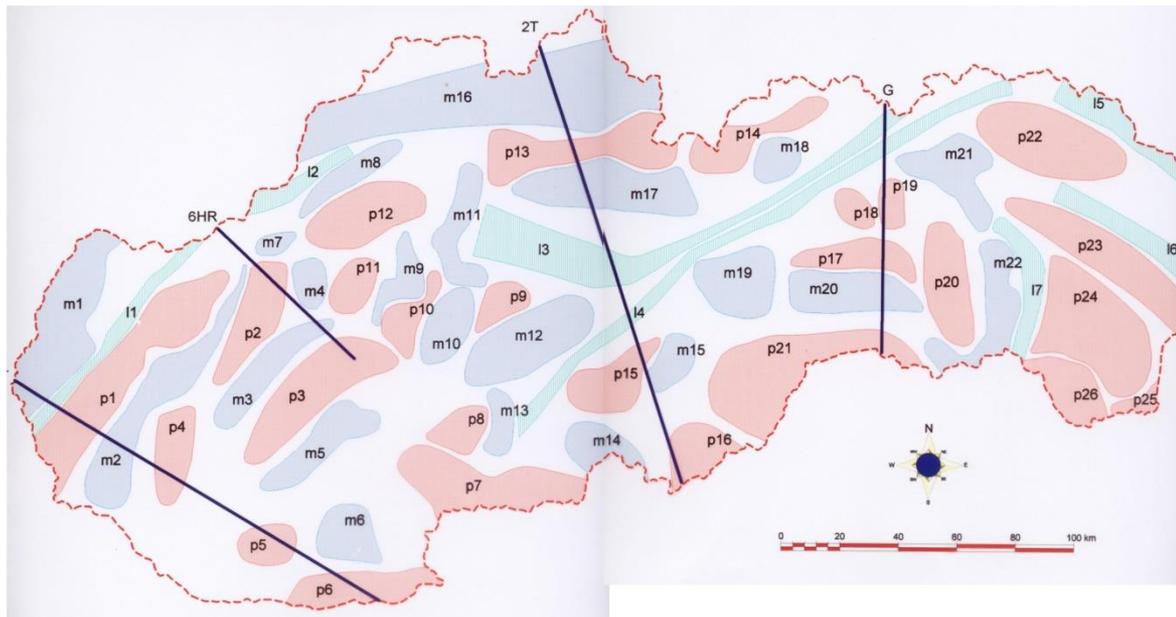
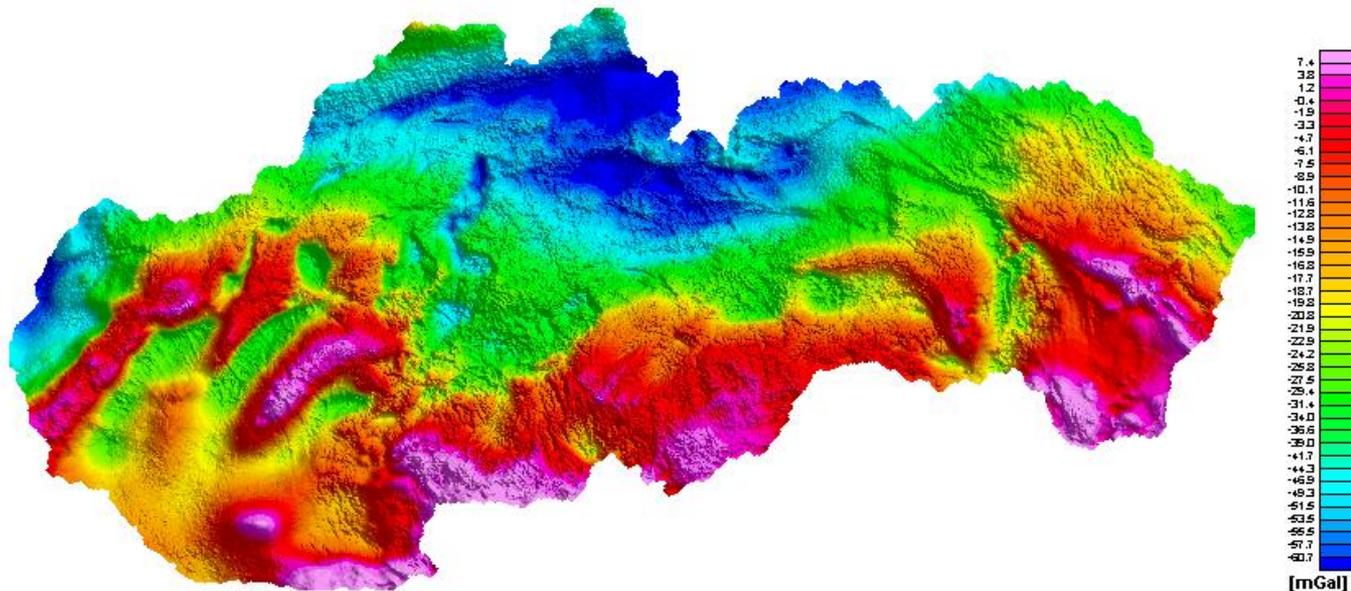
tektonická mapa





Bezák et al., 2004: Tectonic map of Slovak Republic

ÚBA – územie Slovenska



mapa
region.
anomálií
v rámci
ÚBA SR

regionálne anomálie ÚBA

(Szalaiová, Šantavý, Šefara in Atlas hlbinných reflexných seizmických profilov ZK, 1999)

kladné anomálie: p1 – p26

záporné anomálie: m1 – m22

gradienty: I1 – I7

p1: anomália Malých Karpát (ťažšie štruktúry v podloží kryštalinika?, mezoz.?)

p2: anomália Považského Inovca (detto + kontrast oproti sediment. okoliu)

p3: anomália Trábeča (detto)

p4: prejav ponoreného chrbáta Inovca v podloží terciérnych hornín
(tzv. úľanská elevácia)

p5: Kolárovska anomália, zdroj v podloží panvy (ultrabázika?), cca. 5-6 km

p6: anomália Komárňanskej vysokej kryhy

(plytko uložené mezozoikum na S. zanoreného maďarského pohoria Geresce)

p7: anomália Santovsko-túrovského chrbáta

p8: anomália Levickej kryhy

p9: prejav mezozoických komplexov

regionálne anomálie ÚBA

(Szalaiová, Šantavý, Šefara in Atlas hlbinných reflexných seizmických profilov ZK, 1999)

kladné anomálie: p1 – p26

záporné anomálie: m1 – m22

gradienty: I1 – I7

p10: prejav Handlovskej predterciérnej elevácie

p11: prejav ťažších komplexov pohoria Malá Magura, Suchý (mezozoikum?)

p12: anomália Strážovských vrchov (prejav ťažších hlbinných štruktúr?)

p13: prejav kryštalických a mezozoických hornín (Chočské vrchy a Tatry)

p14: prejav kryštal. a mezoz. hornín (priestor Tatier a Ružbašského ostrova)

p15: prejav komplexu kryštalických hornín

p16: Lučensko-rimavská-blhovecká anomália, spájaná s updomingom a mladším bazaltovým vulkanizmom

p17: prejav ťažkých hornín rakoveckej a klátovskej série Gemerika (bázické vulkanity a metamorfity)

p18: anomália v oblasti Kozích chrbtov a j. časti Levočských vrchov

regionálne anomálie ÚBA

(Szalaiová, Šantavý, Šefara in Atlas hlbinných reflexných seizmických profilov ZK, 1999)

kladné anomálie: p1 – p26

záporné anomálie: m1 – m22

gradienty: I1 – I7

p19: anomália Braniska, prejav mezozoických a proterozoických hornín

p20: Košická anomália Braniska, prejav metamorf. a mezoz. komplexov
veporika Čiernej hory (iní autori – hlbšie bázické teleso)

p21: prejav mezozoika Slovenského krasu

p22: prejav ťažšieho podložja flyšu

p23: prejav výzdvihu predterciérneho podložja humenského mezozoika

p24: prejav zakrytých mezoz. a kryštal. hornín + elevácie vrchného plášťa

p25: prejav ťažších vulkanických hornín Kral'ovského Chlmca

p26: účinok Zemplínskeho ostrova + prejav zakrytých neovulkanitov

regionálne anomálie ÚBA

(Szalaiová, Šantavý, Šefara in Atlas hlbinných reflexných seizmických profilov ZK, 1999)

kladné anomálie: p1 – p26

záporné anomálie: m1 – m22

gradienty: I1 – I7

m1: prejav výplne Viedenskej panvy v spojení s vonkajším karpatským minimom

m2: prejav Blatnianskej depresie, pokračujúca do Piešťansko-beckovskej d.

m3: anomália Topolčianskeho zálivu, prejav ľahkých sedimentov

m4: anomália Bánovskej depresie, prejav ľahkých sedimentov

m5: anomália Zlatomoraveckého zálivu, prejav ľahkých sedimentov

m6: Želiezovská anomália, prejav väčšej hrúbky sedimentov dunaj. panvy

m7: anomália Trenčianskej depresie, prejav ľahkých sedimentov

m8: anomália Ilavskej depresie, prejav ľahkých sedimentov

m9: anomália Hornonitrianskej depresie, prejav ľahkých sedimentov

m10: anomália Žiarskej intravulkanickej depresie (v centre je slabá kladná anomália, patriaca vulkanickému centru)

kladné anomálie: p1 – p26

záporné anomálie: m1 – m22

gradienty: I1 – I7

m11: prejav sedimentov Turčianskej kotliny (podložie ma grábenový charakter)

m12: anomália v priestore Poľana-Banská Štiavnica, vyvolaná vulkanicko-sediment. pokryvom + účinkom nehomogenít v predterc. Podloží

m13: anomália Krupinskej depresie a výbežkov depresie Javoria

m14: prejav výraznej trenčskej tektonickej prepadliny

m15: anomálna zóna v údolí Ipľa, prejav kyslých (rimavických?) granitov

m16: prejav oravsko-magur. flyšovej jednotky + miocénnej oravskej panvy (súčasť vonkajšieho karpatského minima)

m17: anomália Liptovskej a Popradskej kotliny (prejav paleogénu a kvartéru)

m18: anomália v oblasti Levočských vrchov (prejav vnútrokarp. paleogénu)

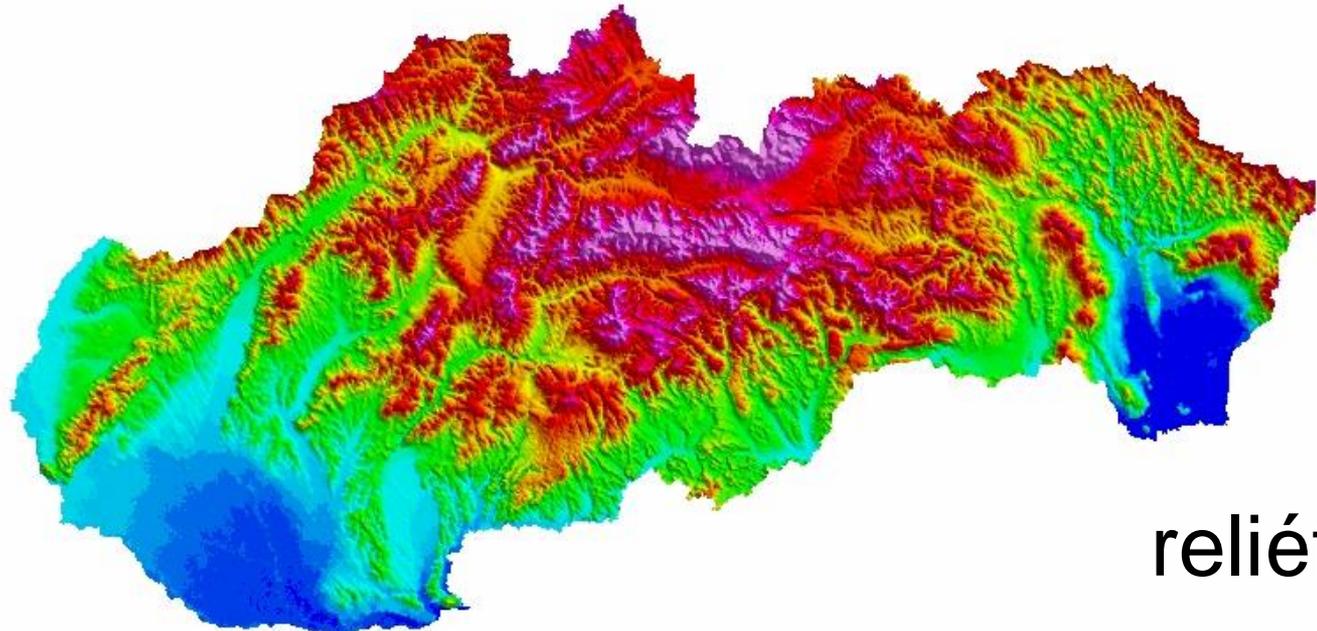
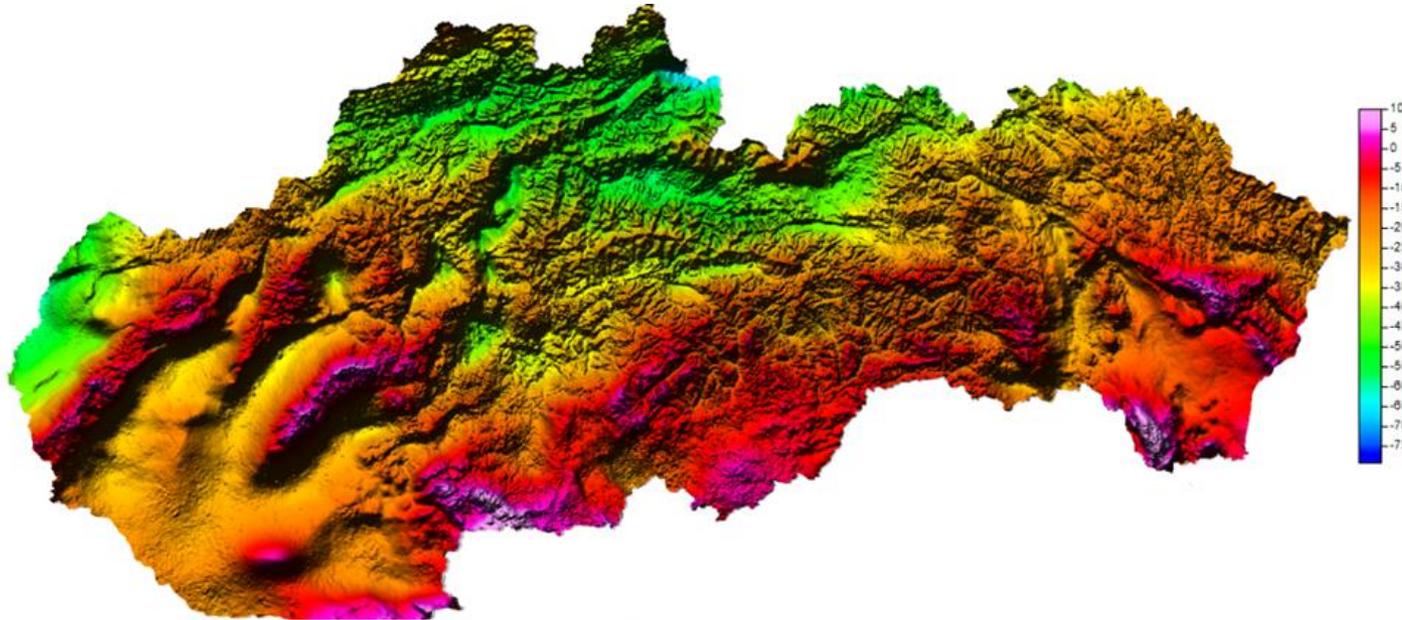
m19: prejav Rochovského granitu (s nižšou hustotou)

m20: prejav gemeridných granitov (s nižšou hustotou) v gelnickej sérii

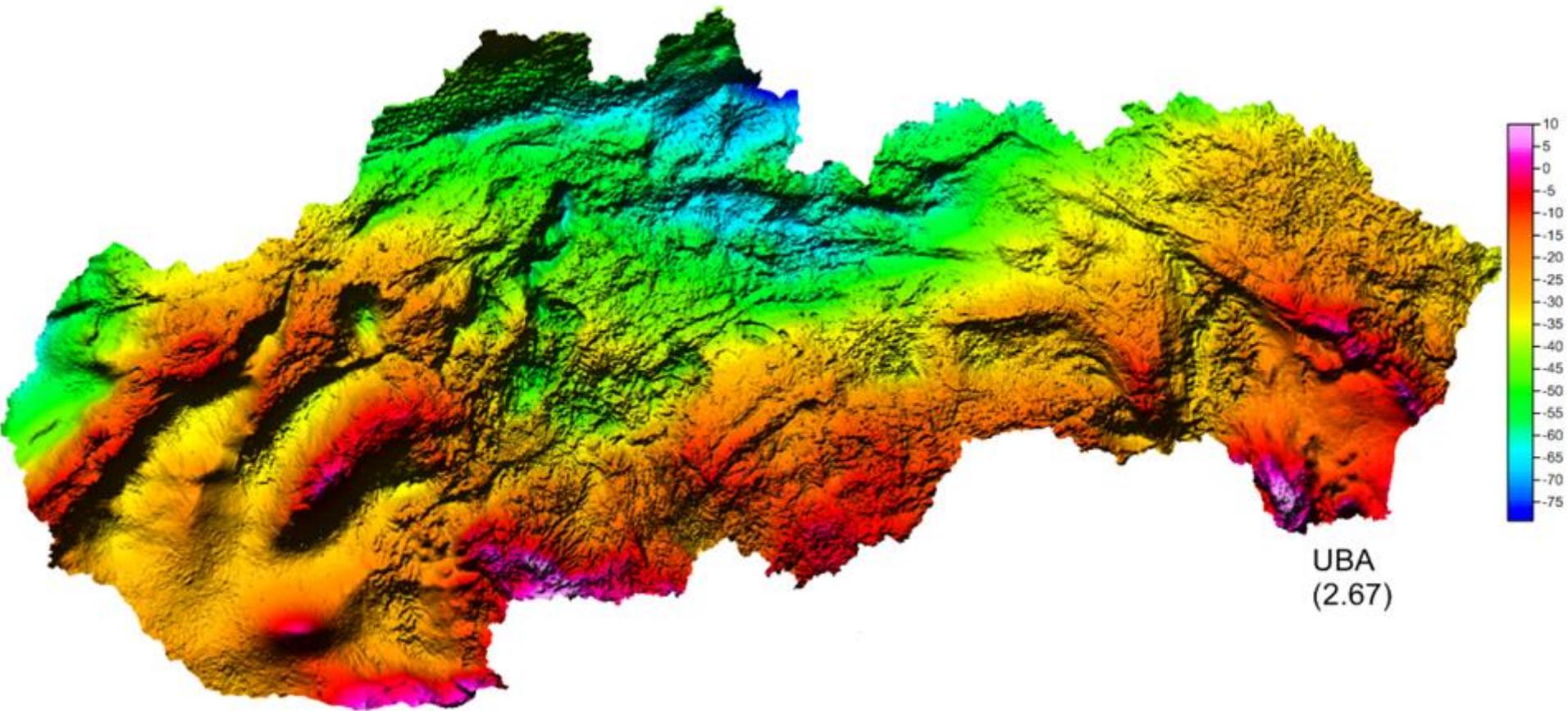
m21: anomália Spišskej depresie, prejav neovulkanických a flyšových sedimentov

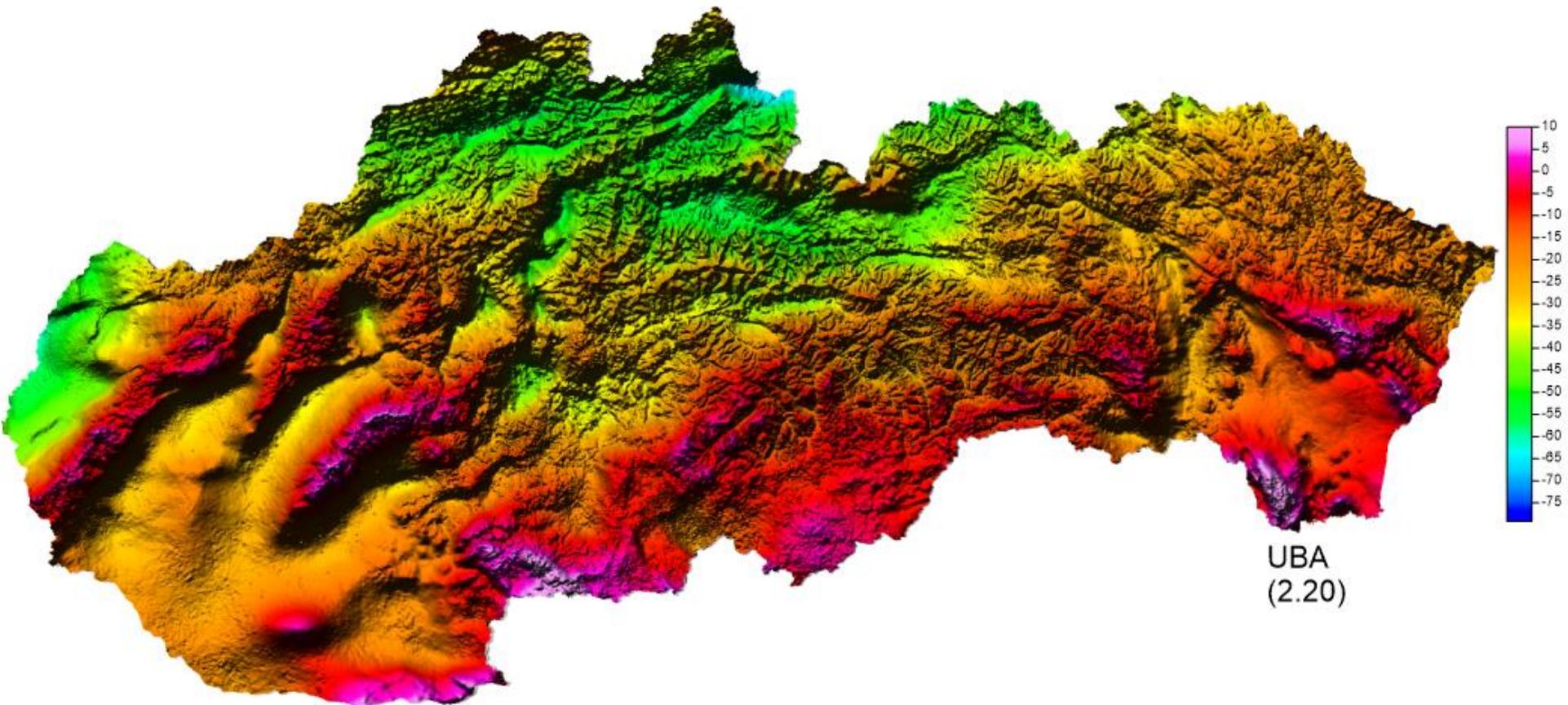
m22: anomália Košickej kotliny, najmä prejav väčších hrúbok terciéru

ÚBA (2.20 g.cm^{-3}) – územie Slovenska



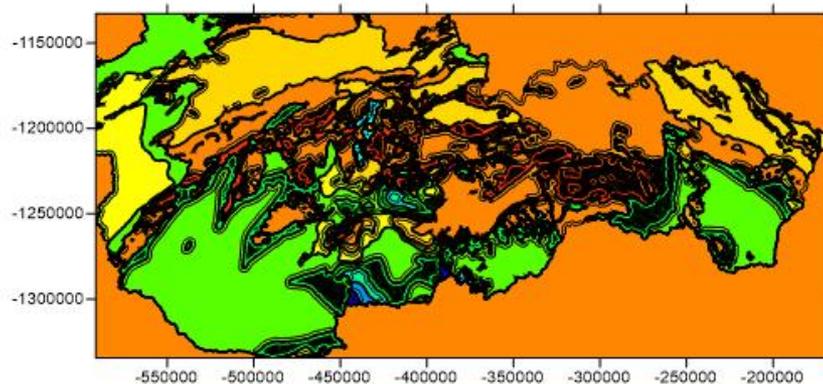
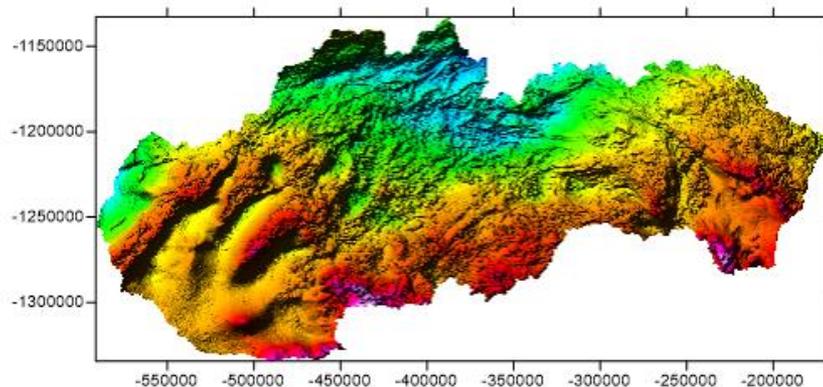
reliéf





UBA
(2.20)

- použitie hustoty 2.67 g.cm^{-3} pre územie SR je v celku akceptovateľné, ale pri štúdiu niektorých častí územia je vhodnejšie použiť inú (nižšiu hustotu),
- ide najmä o veľké panvy (Dunajská, Východoslovenská, Juho slovenská) a o oblasti neovulkanitov (hlavne Stredoslovenské neovulkanity),
- existujú aj pokusy s verziou ÚBA s premenlivými hustotami, ale zatiaľ máme len pracovnú verziu (nesie v sebe „nášľapné míny“).

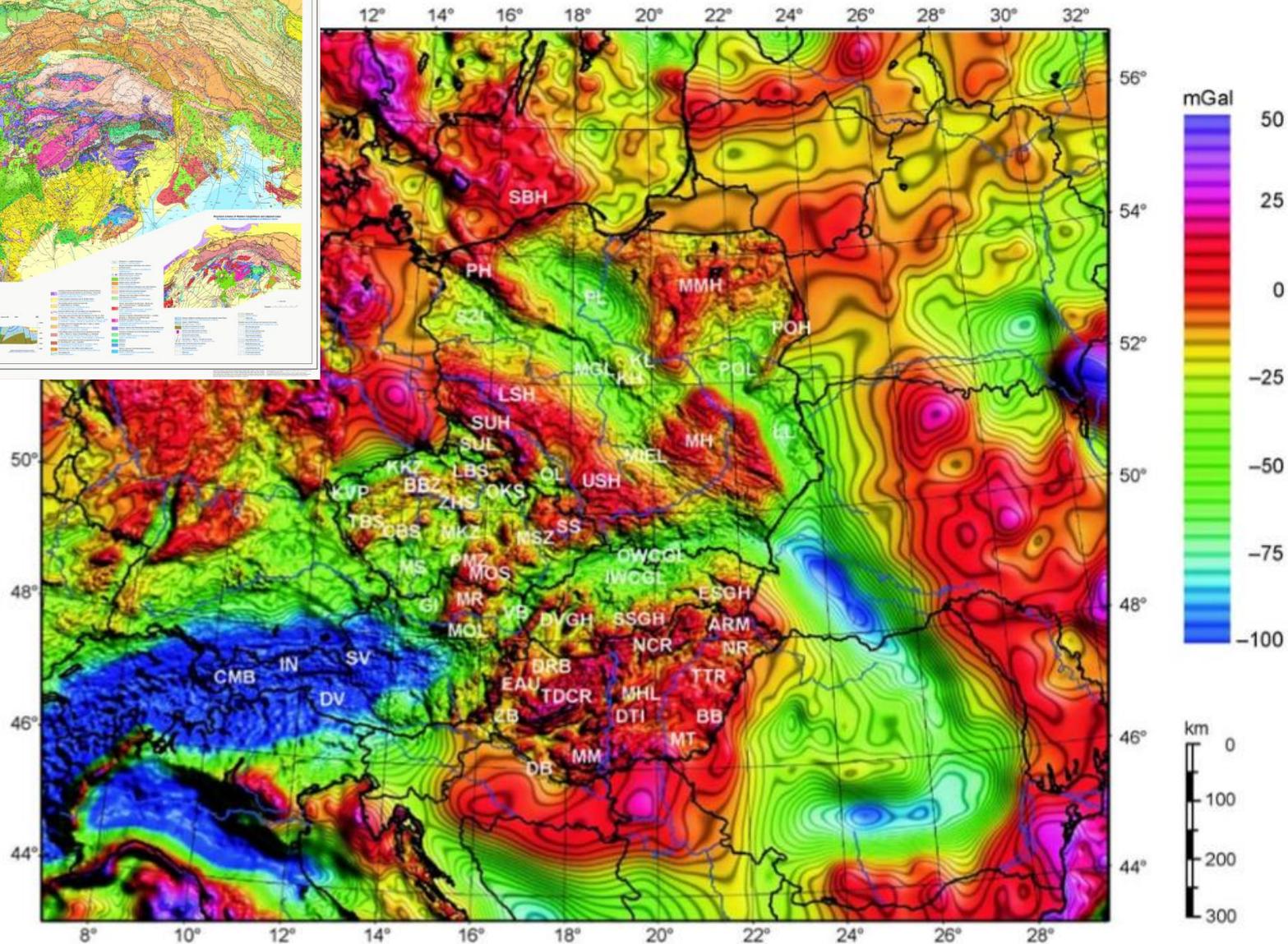
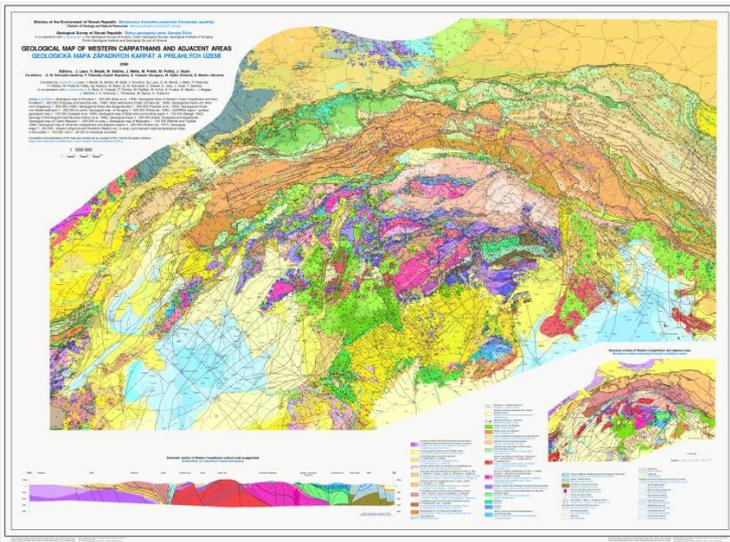


použitý model povrchových hustôt: Stránska a kol., 1986

ÚBA – okolie SR

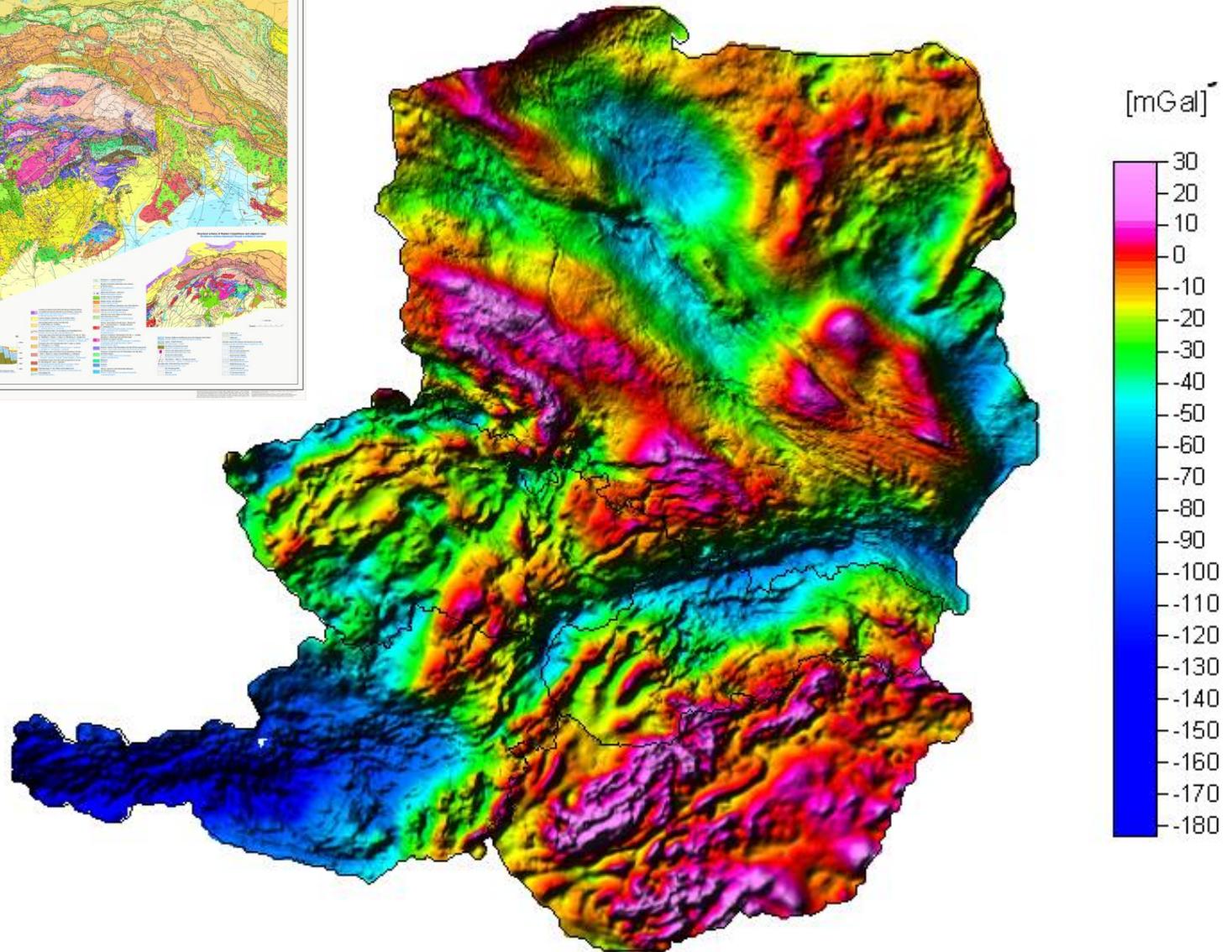
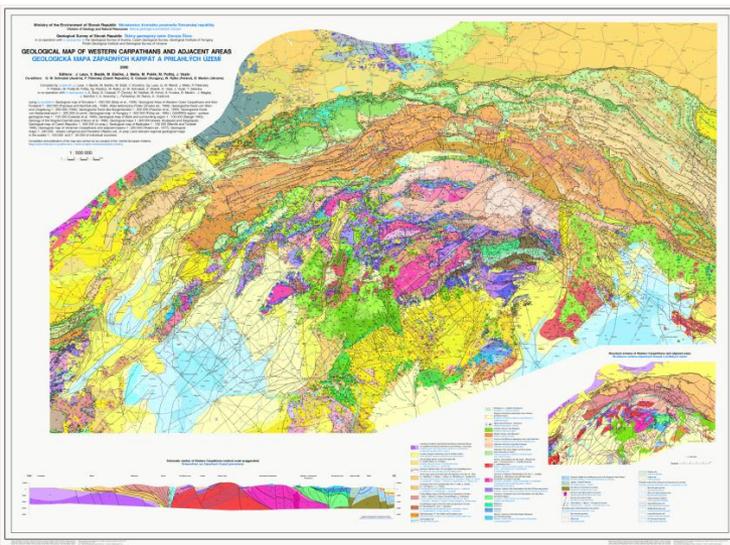
ÚBA (2.67 g.cm^{-3}) – stredná Európa

v rámci projektu CELEBRATION2000
(Bielik, Wybraniec et al., 2006)

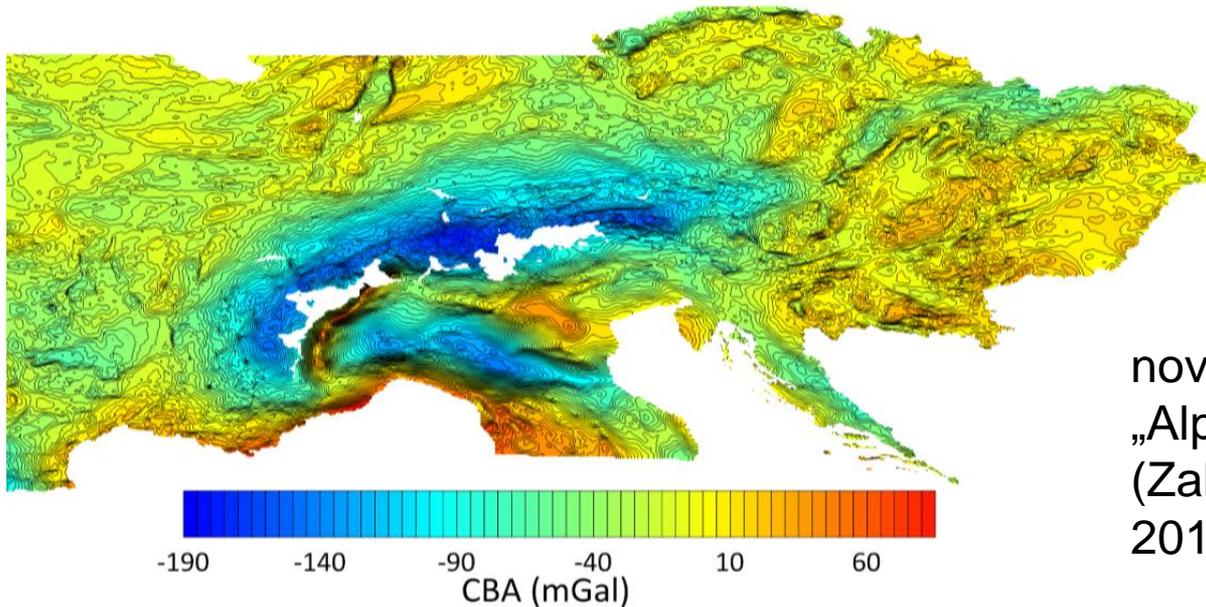
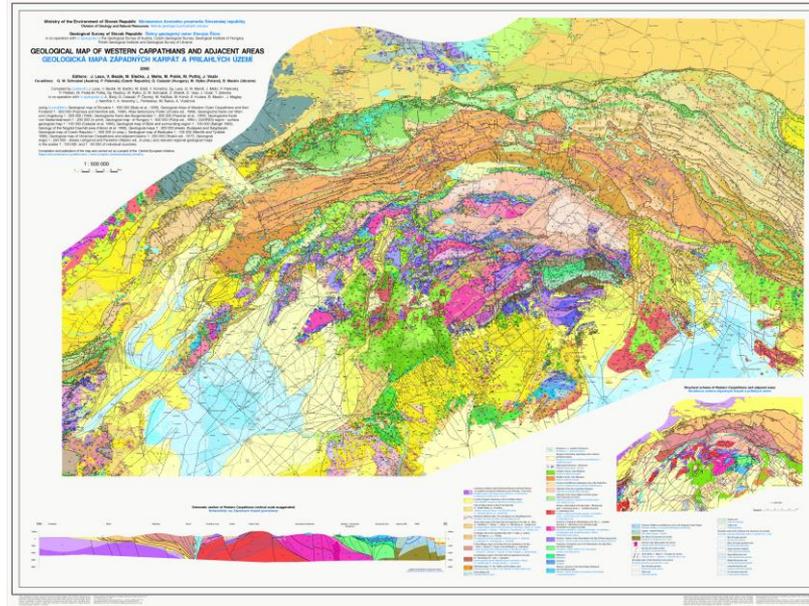


ÚBA (2.67 g.cm^{-3}) – stredná Európa

v rámci projektu CELEBRATION2000
(Bielik, Wybraniec et al., 2006)

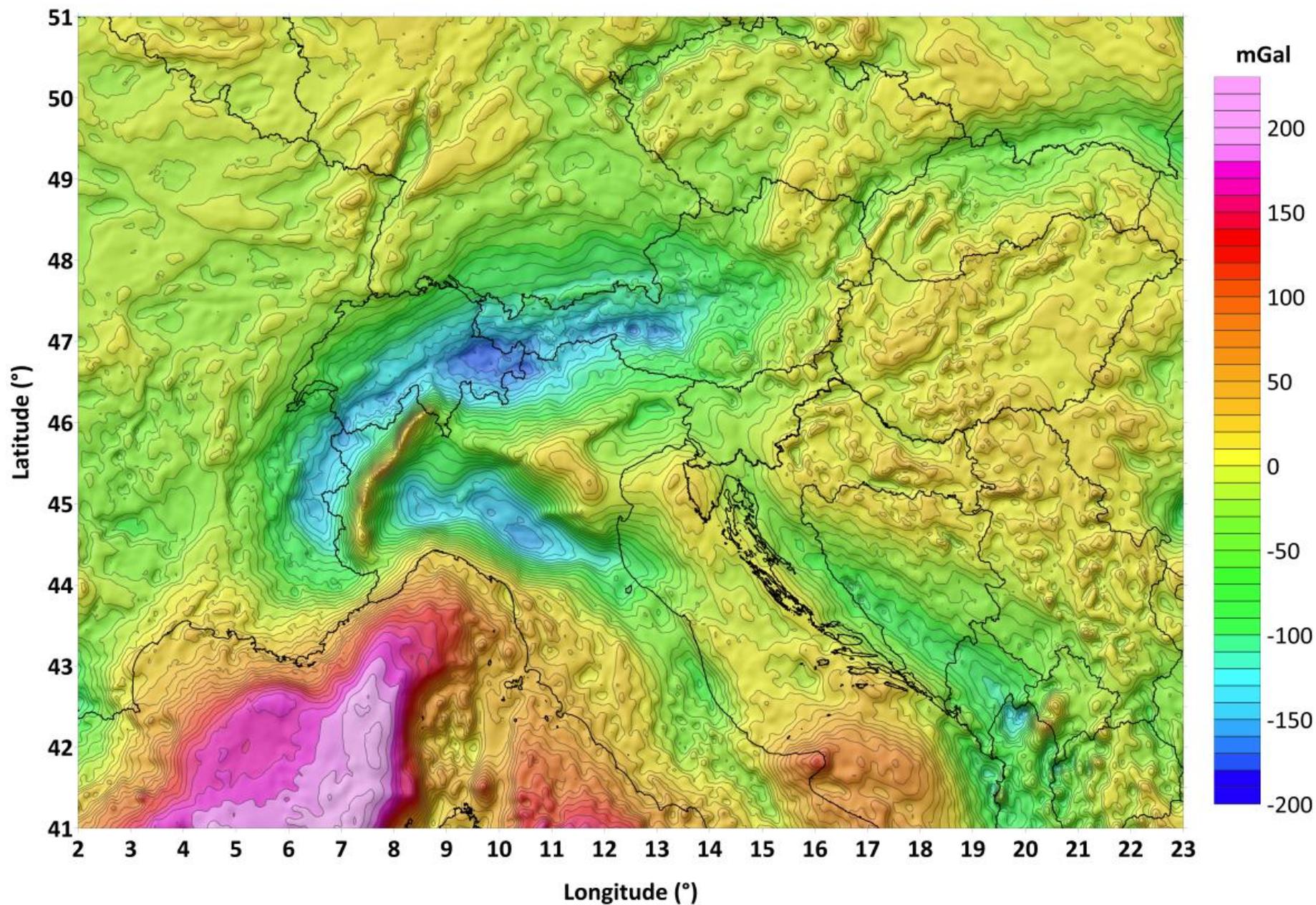


ÚBA (2.67 g.cm⁻³) – stredná Európa



nový projekt
„AlpArray“
(Zahorec et al.,
2019)

nový projekt „AlpArray“ – alpská oblasť (Zahorec et al., 2019), ÚBA (2.67 g.cm^{-3})



nový projekt „AlpArray“ – alpská oblasť (Zahorec et al., 2019), polohy bodov

