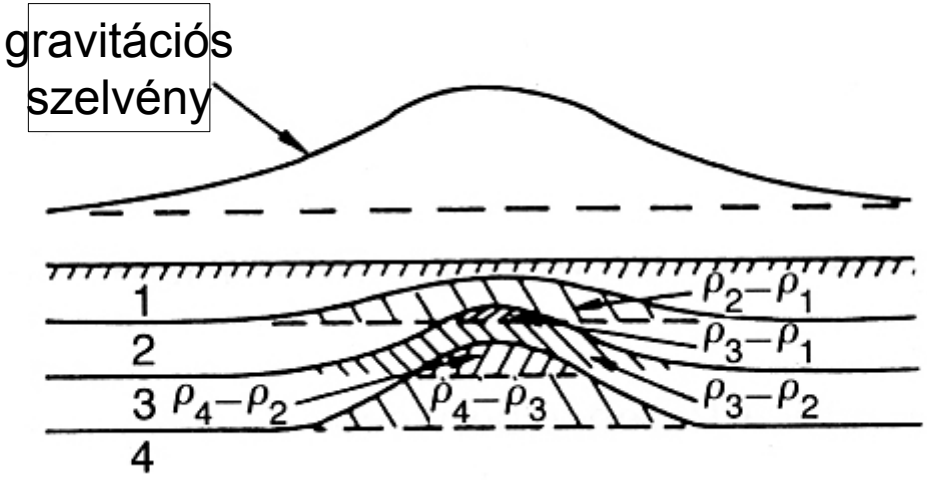
GRAVITÁCIÓS KUTATÓMÓDSZER

Alkalmazott földfizika gyakorlat

BEVEZETÉS

A gravitációs módszer a nehézségi gyorsulás mérésén alapul.
A felszínen végzett mérések során a gravitációs tér térbeli változásait (az elméleti értékekhez képesti anomáliák) térképezzük fel, amelyek a mérési pont környezetében, a felszín alatti laterális sűrűségváltozásokhoz köthetők.



Nettleton, 1971

A FÖLD NEHÉZSÉGI ERŐTERE, NEHÉZSÉGI GYORSULÁS

Tömegvonzás: $\underline{F} = -G\frac{Mm}{r^2}\frac{\underline{r}}{r}$ Gravitációs térerősség: $\underline{g} = -G\frac{M}{r^2}\frac{\underline{r}}{r}$

Nehézségi erő: tömegvonzás + a Föld forgása

A Föld melyik pontján egyezik meg a gravitációs és a nehézségi térerősség?

Newton II. tv.-e → Mivel az egységnyi tömegre ható erő számértéke megegyezik az általa ugyanezen tömegen létrehozott gyorsulás számértékével, a geofizikában a gravitációs mérési eredményeket gyorsulásegységekben adják meg.

Nehézségi gyorsulás nagysága (szferoid): $g = \frac{GM}{r^2} + r\omega^2 \cos\Phi^2$

Az SI mértékegység m/s^2, de a gravitációs mérések gyakorlatában gal egységet használunk: *1 gal = 1 cm/s^2*

A földtani kutatások nagyságrendje mgal *1 mgal = 10^{-3} cm/s^2 = 10^{-5} m/s^2*

A Föld normál nehézségi erőtere: referenciaellipszoidra vonatkoztatva, mesterséges holdak pályaelemeiből → nemzetközi képlet

$$g_{1980} = 978{,}0327\left(1 + 0{,}0053024\sin^2\Phi - 0{,}0000058\sin^2 2\Phi\right)$$

Φ: földrajzi szélesség

A FÖLD NEHÉZSÉGI ERŐTERÉNEK TÉRBELI VÁLTOZÁSA

$$g(r) = G\frac{M}{r^2} + r\omega^2 \cos\Phi^2$$

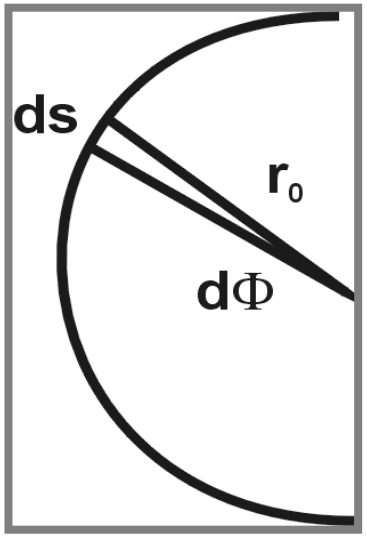
Vertikális gradiens:

$$\frac{dg(r)}{dr} = -2G\frac{M}{r^3} + \omega^2 \cos\Phi^2 \cong -0{,}3086\frac{mgal}{m} = 3086\ eötvös$$

A földfelszíntől távolodva ennyivel csökken a nehézségi gyorsulás értéke méterenként. Mekkora a különbség a Mt. Everest csúcsán (8850 m) és a tengerszinten mért nehézségi gyorsulás értéke között?

Horizontális gradiens: nemzetközi képletből számítva, a harmadik tagot elhanyagolva

$$\frac{dg}{ds} = \frac{dg}{r_0 d\Phi} \approx \frac{1}{r_0}\frac{d}{d\Phi} g_e\left(1 + \beta_1 \sin^2\Phi\right) = \frac{1}{r_0} g_e \beta_1 2 \sin\Phi \cos\Phi = \frac{g_e \beta_1}{r_0} \sin 2\Phi$$



r_0=Föld közepes sugara
g_e=egyenlítői nehézségi gyorsulás

É-D irányban:

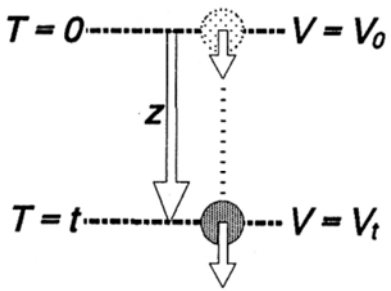
$$\Delta g = 0{,}814\frac{mgal}{km}\sin 2\Phi$$

Hol maximális ez a változás?

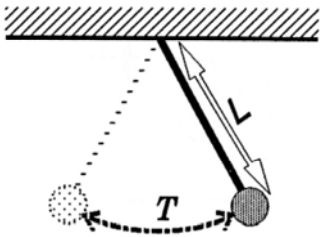
A NEHÉZSÉGI ERŐTÉR MÉRÉSE

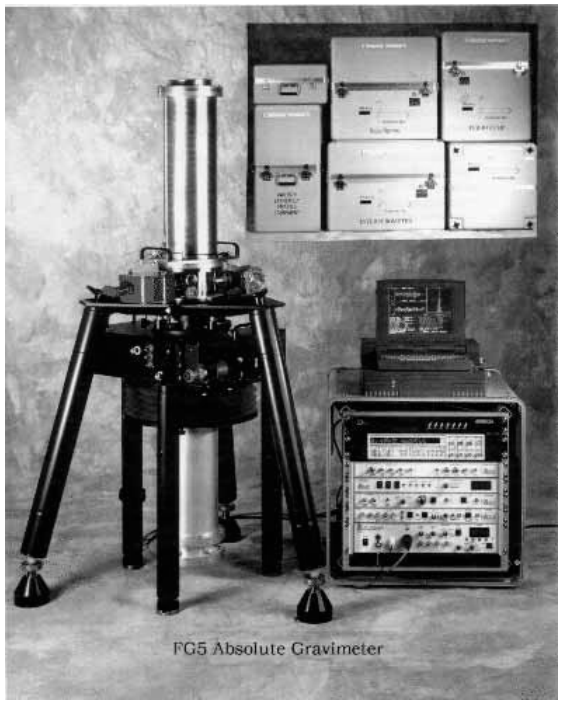
Abszolút mérések: ingák, szabadejtések

szabadejtés



inga





időzítés: lézerinterferométer
pontosság: 5-10 μgal
NEM ALKALMAZZUK földtani kutatásra

A rutinszerűen biztosítandó mérési pontosság - század milligal - a teljes érték százmilliomod része, azaz annál 8 nagyságrenddel kisebb. Ezt nem lehet elérni, ha a teljes mennyiséget próbálnánk mérni.

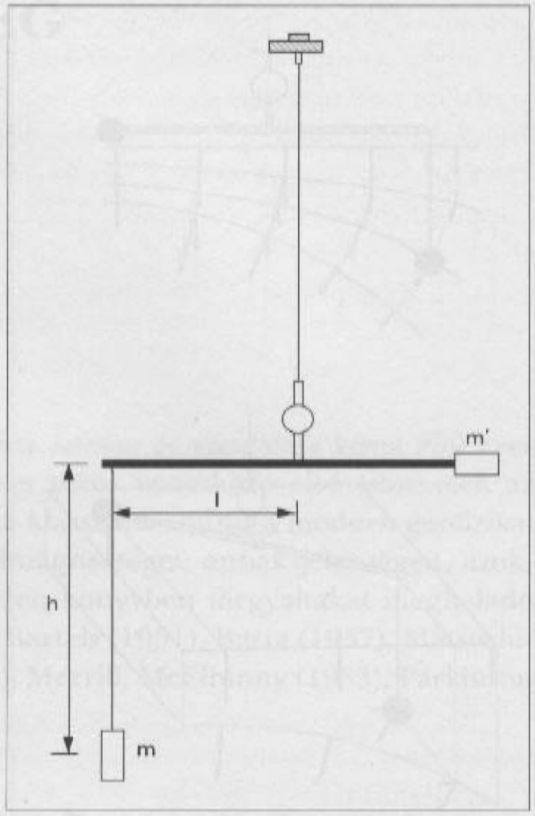
Relatív mérések: a nehézségi gyorsulás két időpont/mérési hely közötti változását mérik (graviméterek)

EÖTVÖS-INGA (horizontális variométer)

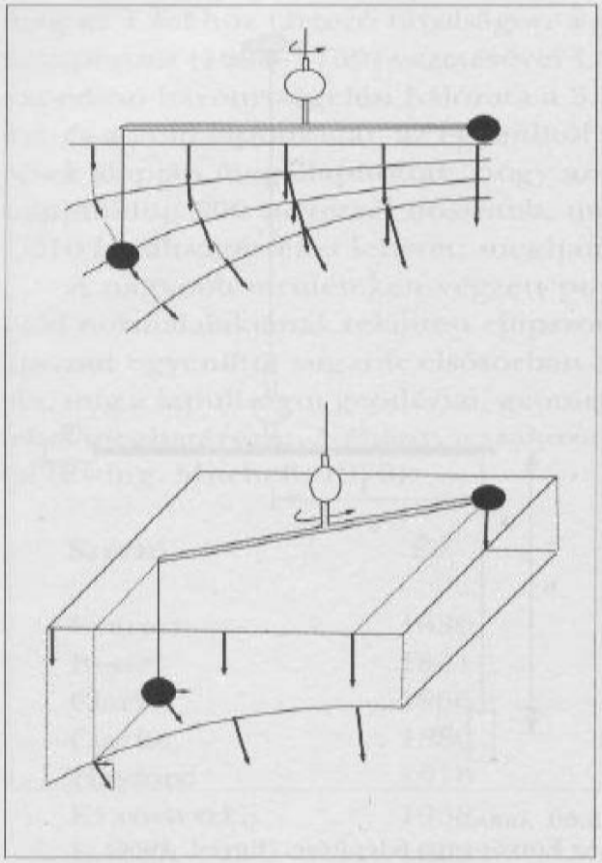
Eötvös jelentősen növelte a Coloumb-féle inga stabilitását és érzékenységét.

- Kettős, majd hármas falú fémszekrény: védelem a
  - a külső mágneses és elektromos terek
  - az egyenlőtlen felmelegedés és
  - a légáramlatok ellen.
- Hosszabb és vékonyabb torziósszálak platina és irídium ötvözetéből.
- Hosszú idejű hőkezelés és húzás: feszültségmentesség.
- A kis elfordulások pontos meghatározása: ingarúdra erősített tükör, az arról visszavert fénysugár helye a műszerhez erősített skálán távcsővel olvasható le.

EÖTVÖS-INGA (horizontális variométer)



3.60. ÁBRA.
Az Eötvös-inga felépítése. (Egyed, 1956)

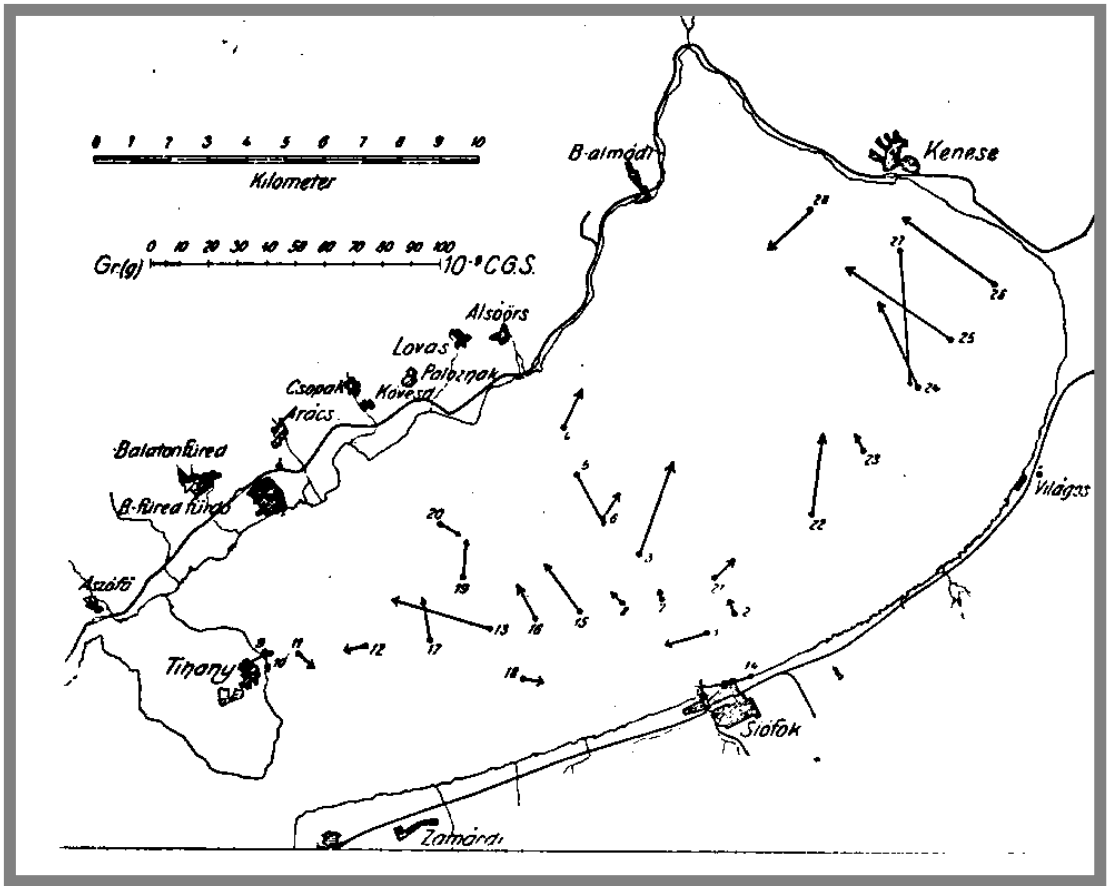


Az ingarúd két végén különböző magasságban elhelyezett tömegekre a földi nehézségi erőtér vízszintes irányú összetevői hatnak. Az erők különbsége vízszintes forgatónyomatékot ad, elcsavarja a torziós szálat. Több lengés után egyensúlyi helyzet alakul ki, melyben az erőtér változásából eredő forgató-nyomaték a felfüggesztő szál torziós nyomatékával egyezik meg.

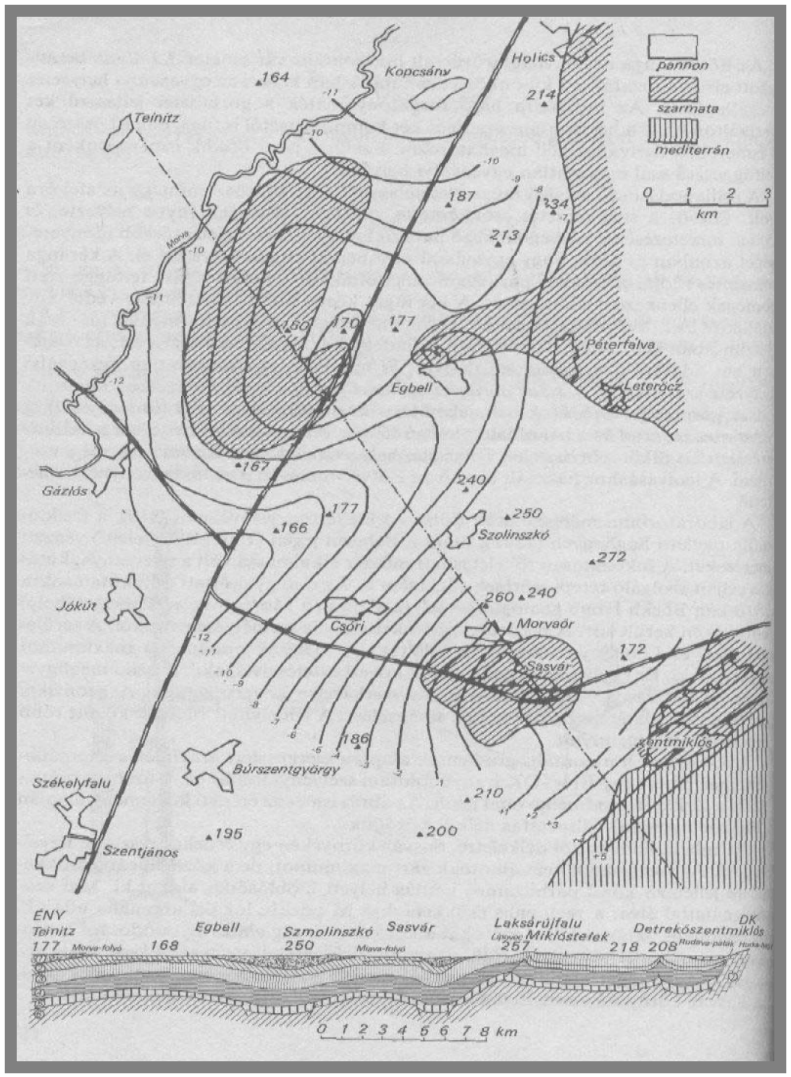
- Ismeretlen mennyiségek: nehézségi erőtér második deriváltjai + a torziósszál csavaratlan egyensúlyi helyzete: összesen 5 paraméter.
- A műszer szekrényét és vele együtt az ingarudat 5 azimutban kell beállítani és minden helyzetben megvárni, amíg az inga eléri az egyensúlyi helyzetet.
- A leolvasásokból számításokkal megkaphatók a nehézségi erőtér különböző deriváltjai és az ezekből alkotott görbület és horizontális gradiens.
- Kettős inga: két azonos, egymással szembefordított inga közös burkolatban. Így az észlelések száma három különböző azimut beállításra csökken.

EÖTVÖS-INGA SZEREPE A FÖLDTANI KUTATÁSOKBAN
5.

1901 telén az első nagyobb területen történő mérésre a Balaton jegén került sor.
Jégen való mérés előnye: zavaró felszíni hatások kiküszöbölése.
A mérések alapján a "víz és a fenék homokja alatt egy Kenesétől majdnem Tihanyig elhúzódó tömeg-fölhalmozódást, mondjuk egy hegygerincet" fedezett fel.

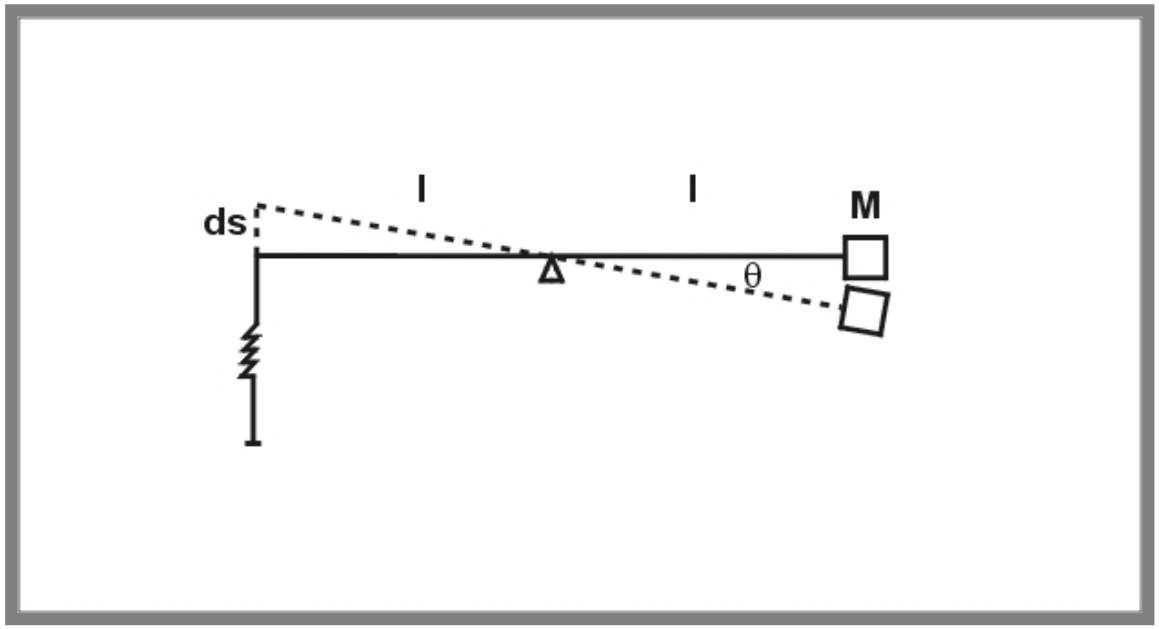


EÖTVÖS-INGA ALKALMAZÁSA A NYERSANYAGKUTATÁSBAN



1916-ban Böckh Hugó kezdeményezésére torziós inga méréseket végeztek Egbell környékén, ahol korábban gáz- és olajnyomokat találtak. 92 állomáson végeztek méréseket annak eldöntésére, hogy hol mélyüljenek a fúrások.
A gradiensek alapján szerkesztett térképen Egbelltől nyugatra gravitációs maximum van, mely a geológusok feltételezését megerősítve egy felboltozódást (antiklinális) körvonalaz. A később itt lemélyített fúrások közül több produktívnak bizonyult. Ez az eredmény bizonyította a torziós inga használhatóságát a kõolajkutatásban.

GRAVIMÉTEREK



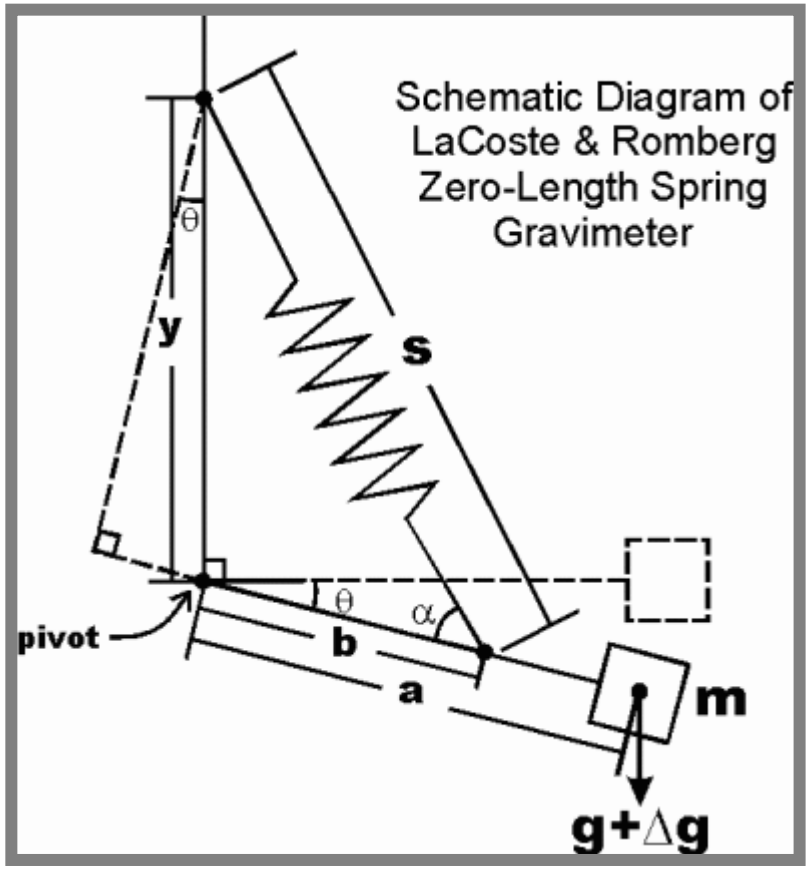
$$Mgl = ksl$$

$$M(g + dg)\cos\theta \cdot l = k(s + ds)\cos\theta \cdot l$$

$$dg = \frac{k}{M} ds$$

Mérések alapja: a nehézségi erő megváltozására a rugóra erősített test kimozdul egyensúlyi állapotából.
A pontosság növeléséhez k-t kellene csökkenteni és/vagy M-et növelni.
Ennek a Hooke-tv. érvényességi tartománya szab határt.

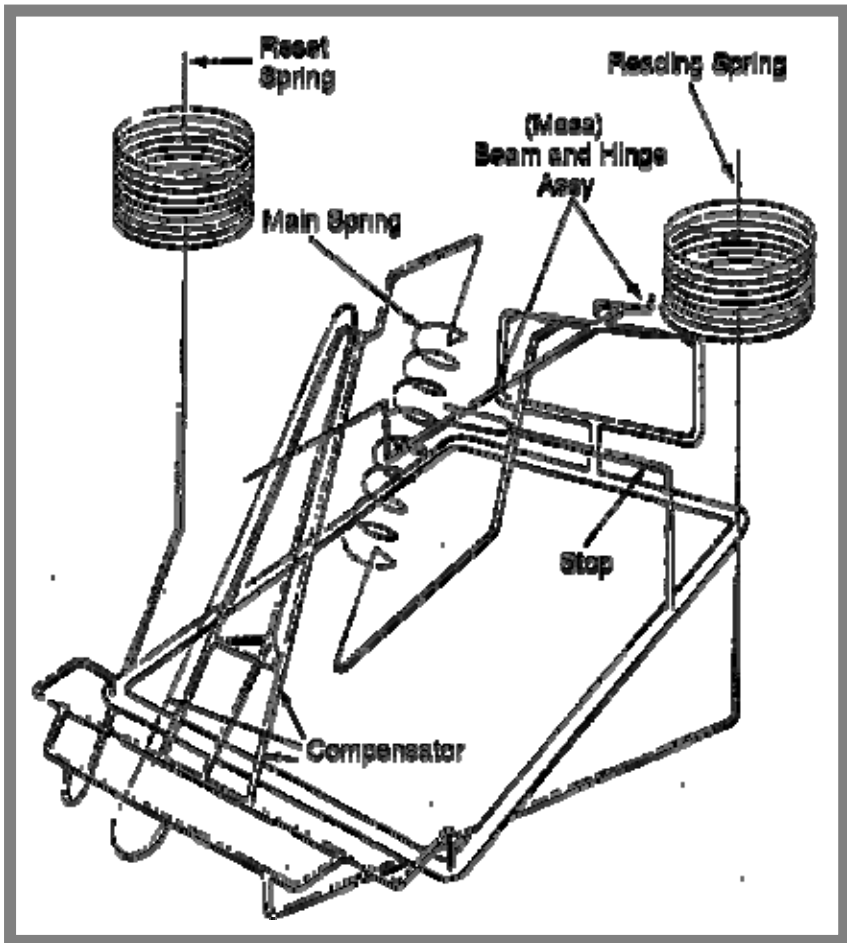
LaCoste-Romberg graviméter



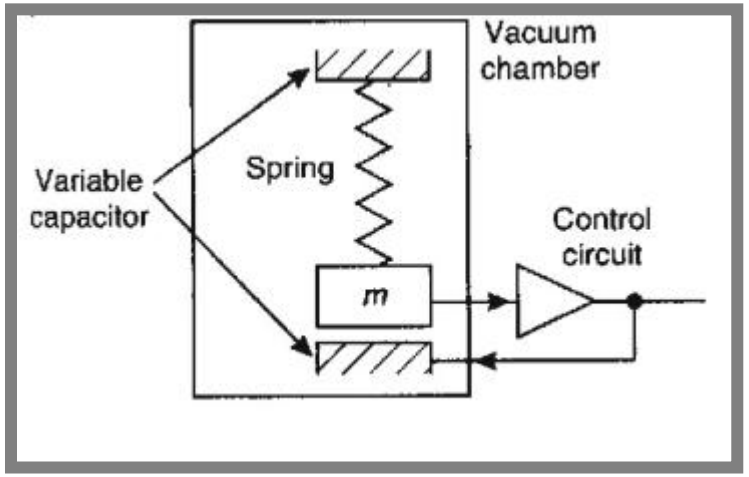
- Nulla hosszúságú fémrugó: A húzóerővel arányos a rugó hossza. Gyakorlatban ez előfeszített nyugalmi állapotot jelent.
- A nehézségi erőtér megváltozásával arányos az az erő, amellyel a rugón függő tömeget visszatérítjük a nulla pozícióba.
- Elérhető pontosság: 0.01 mgal
- Fémalkatrészek miatt állandó hőmérsékleti viszonyokat kell biztosítani.

Worden graviméter

- Kvarcrugókból álló rendszer, mely kevésbé érzékeny a hőmérsékletváltozásokra, ezekből az egyik rugó nulla-hosszúságú.
- Kis tömeget használ: 5 mg
- Elérhető pontosság: 0.01 mgal



SCINTREX graviméter



- Kvarcrugó
- A tömeg elmozdulásával megváltozik a kapacitás.
- Visszacsatolt áramkör feszültséget ad a kondenzátor fegyverzetére, így a tömeg visszatér a nulla pozícióba
- Pontosság: mikrogal/sub-mikrogal

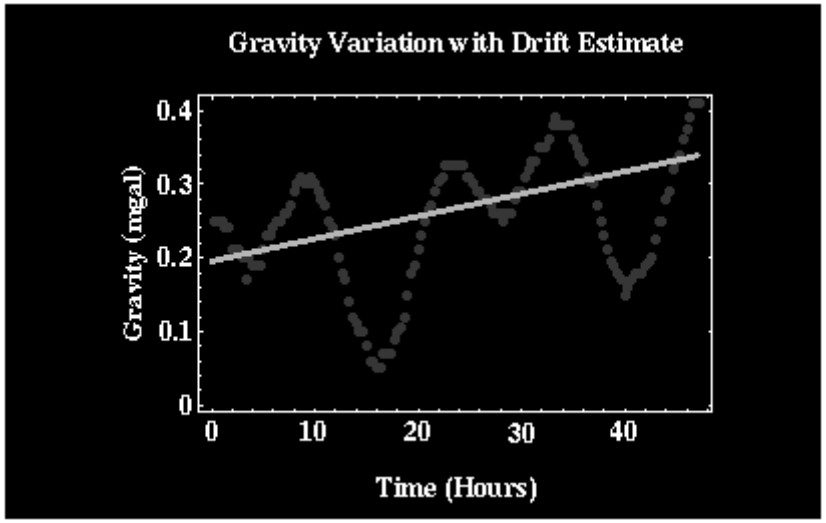
GRAVITÁCIÓS ANOMÁLIÁK KORREKCIÓI

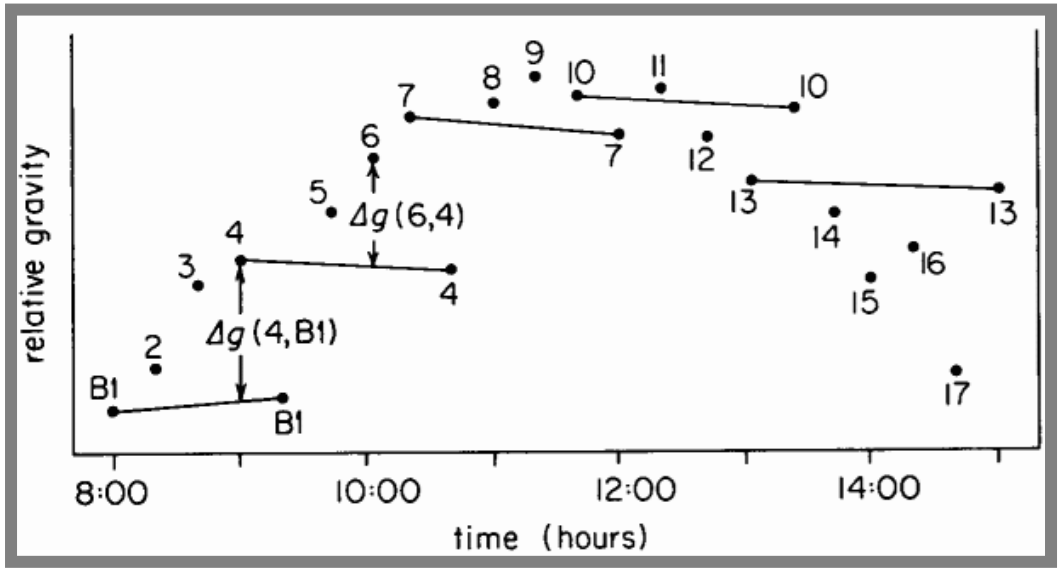
- Időtől függő korrekciók: drift (műszerjárás), árapály hatása

- Mérési állomás helyétől függő korrekciók: free-air (magassági), szélességi

- Zavaró tömegek hatásából származó korrekciók: Bouguer, topográfiai

DRIFT ÉS ÁRAPÁLY KORREKCIÓK





- Drift: műszerállandók lassú változása (anyagi tulajdonságok, hőingás, stb.).
- Mértéke mai műszerek esetén is elérheti a 0,1 mgal-t.

- Árapály hatás: a Föld-Hold-Nap rendszer vonzásából.
- Mértéke elérheti a 0,2 mgal-t.

Korrigálása: bázisműszerrel?
+: árapály korrekciója pontos
-: költség, logisztika, két műszer → nem azonos drift!

- Hurokmódszer: időről időre megismételt mérések egyes állomásokon → a két hatás együttes korrekciója
- Feltételezés: lassú és lineáris változások

FREE-AIR ÉS SZÉLESSÉGI KORREKCIÓ

Vertikális/horizontális gradiens alapján

- h magasságban a referenciaellipszoid felett: $\Delta g(h) \cong -0{,}3086 \frac{mgal}{m} h$
- É-D-i irányban S távolságot megtéve:

$$\Delta g(S) = 0{,}814 \frac{mgal}{km} \sin 2\Phi \cdot S$$

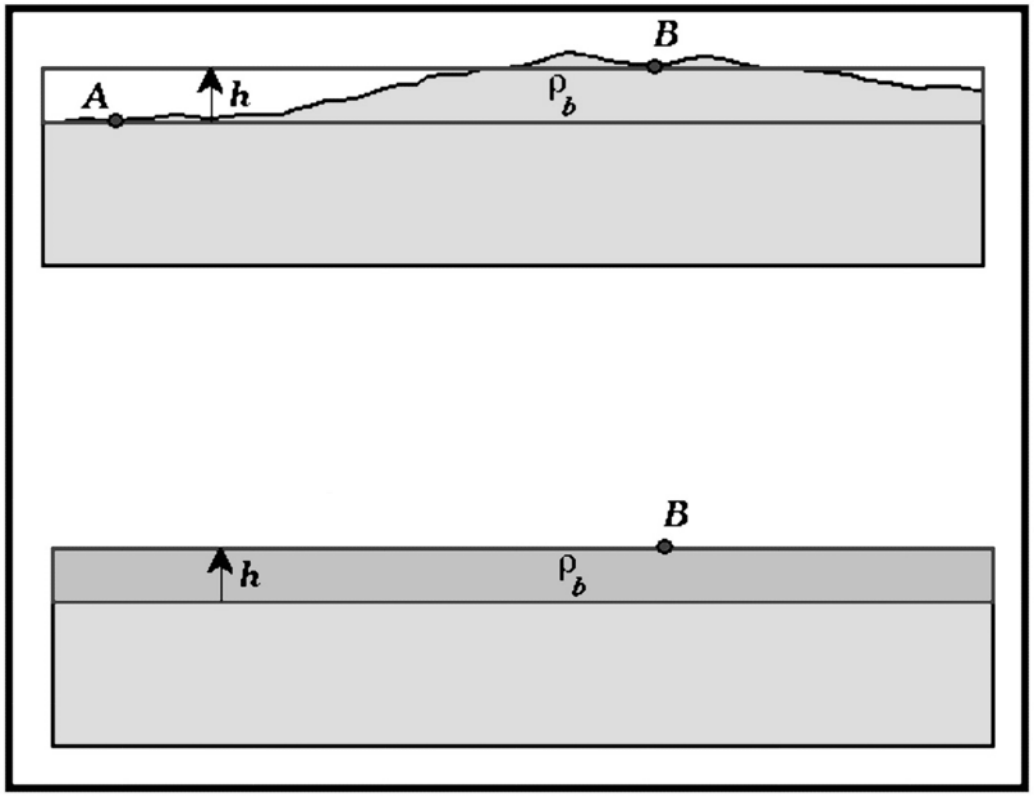
Merre növekszik/csökken?

Feladat:
- 30°É szélességen a referenciaellipszoid felett 200 m magasságban mekkora nehézségi gyorsulást mérek, ha a normálformulában g_e=978,0327; β_1=0,0053024 és a harmadik tagot elhanyagolhatónak tekintjük?

- Mennyivel változik a mért érték, ha ugyanilyen magasságban 10 km-rel délebbre mérek?

$$g_{1980} = 978{,}0327\left(1 + 0{,}0053024 \sin^2 \Phi - 0{,}0000058 \sin^2 2\Phi\right)$$

BOUGUER KORREKCIÓ

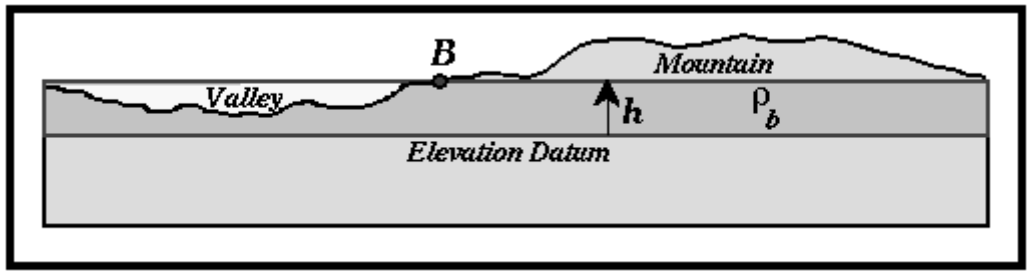


A *B* pontban mért nehézségi gyorsulási érték és az *A* ponthoz tartózó referenciaszint közötti különbséget közelítjük a két pont közötti távolsággal megegyező vastagságú, állandó sűrűségű, félvégtelen Bouguer lemez hatásával.

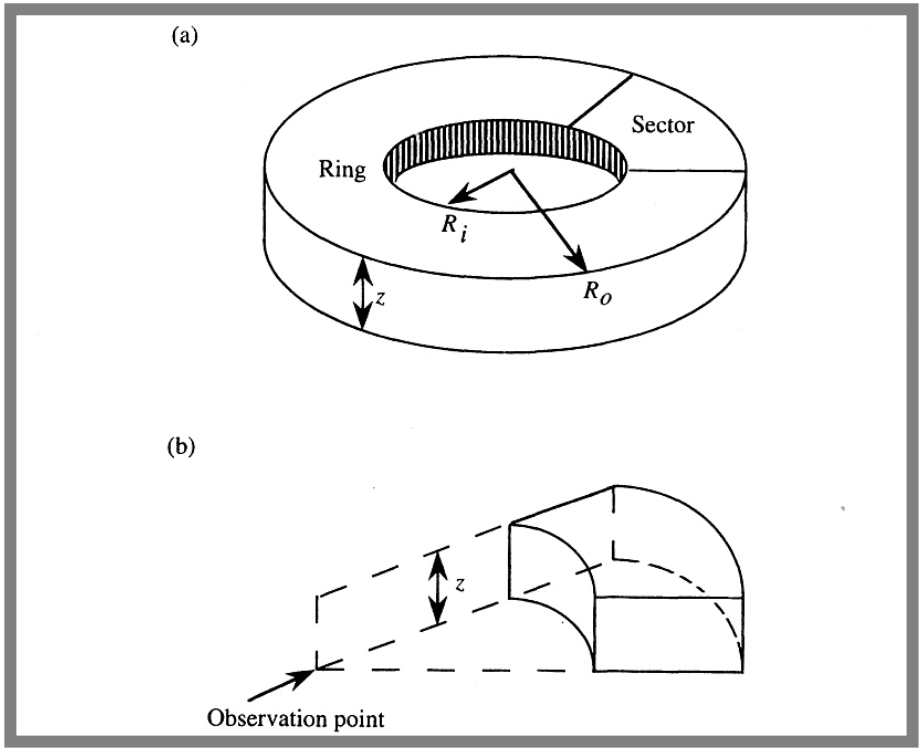
$g_z=2\pi G\rho_b h$

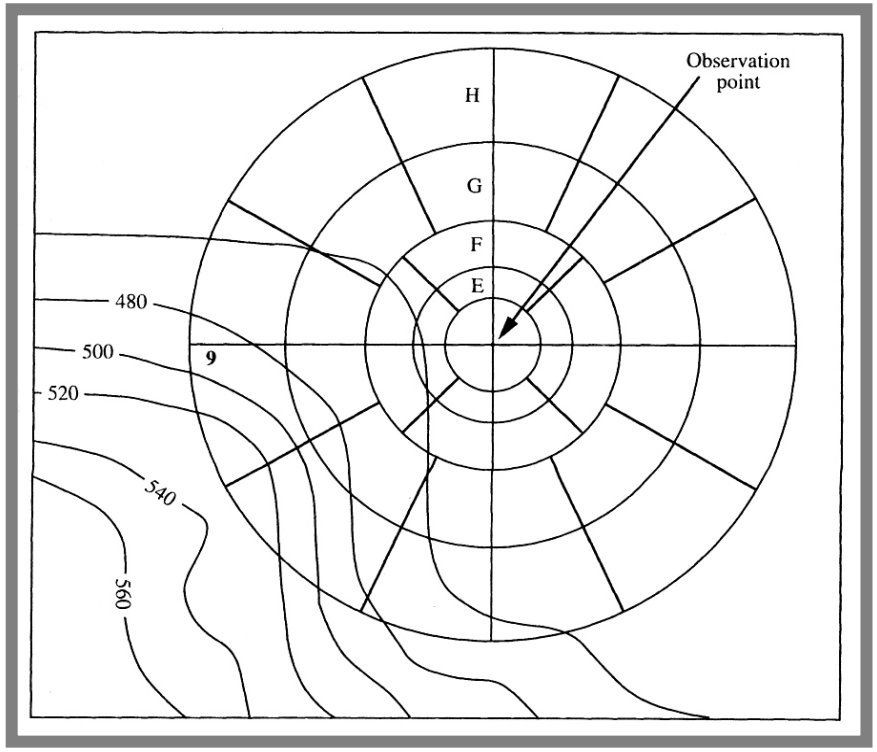
A Bouguer korrekció előjele ellentétes a magassági korrekcióval.

TOPOGRÁFIAI/TÉRSZÍNI KORREKCIÓ



A Bouguer korrekció során nem vettük figyelembe a hegy által okozott tömegtöbbletet, ugyanakkor tömeget helyeztünk a völgybe is, ahol valójában nincs is. Ezt az állomást körülvevő, topográfiai térképekről vagy geodéziai úton meghatározott szegmensek hatásával javítjuk.
A topográfiai korrekció mindig pozitív előjelű.





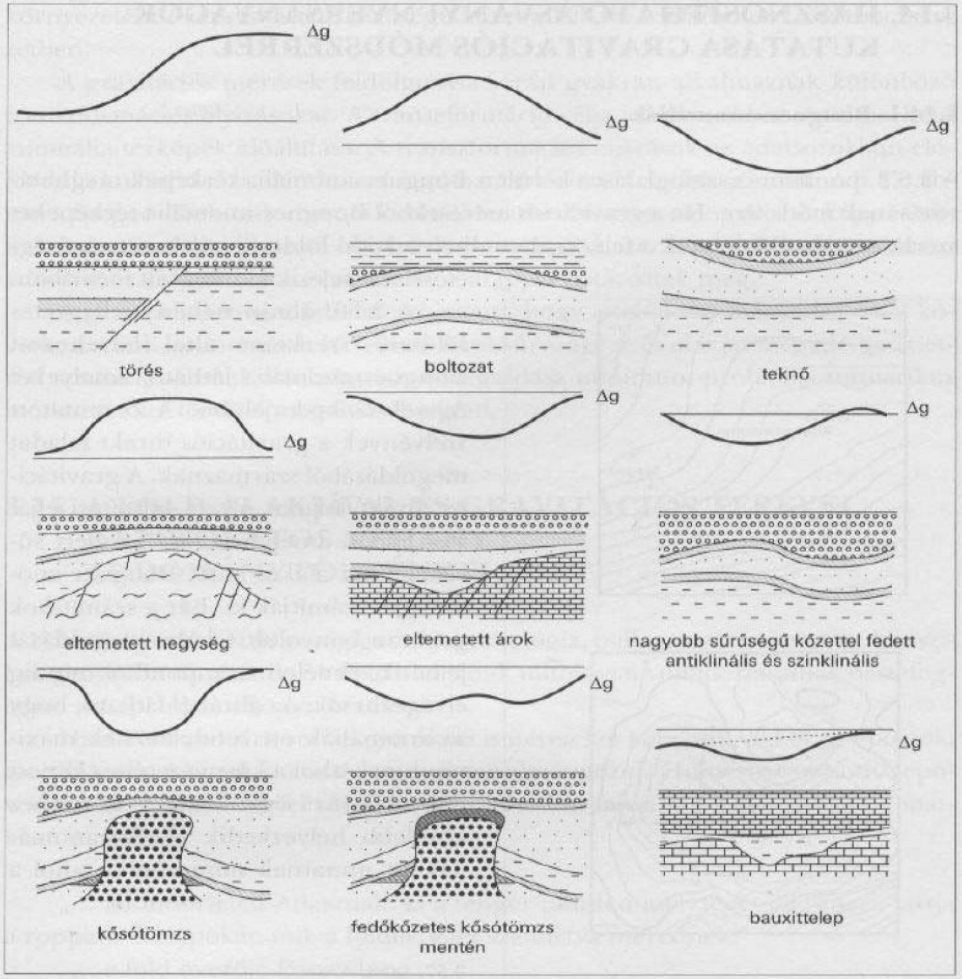
EÖTVÖS KORREKCIÓ

- Mozgó műszer esetében alkalmazandó (pl. légi gravitációs mérések).
- Az Egyenlítőn v=1m/s sebességgel K-i irányban haladó műszer álló műszerhez képest Δg=-0,145 mgal eltérést ad.)

ANOMÁLIATÉRKÉPEK, SZELVÉNYEK

Free-air anomália: $\Delta g_{free} = g_{mért} \pm g_{free\text{-}air} \pm g_{szélességi} - g_{referencia}$

Bouguer anomália: $\Delta g_{Bouguer} = g_{mért} \pm g_{free\text{-}air} \pm g_{szélességi} \mp g_{Bouguer} + g_{topográfiai} - g_{referencia}$



3.56. ÁBRA.
Néhány jellegzetes gravitációs ható felett kialakuló Bouguer-anomália (Δg) szelvény formája. A szelvények jól tükrözik a környezetüknél nagyobb vagy kisebb sűrűségű kőzet okozta gravitációs hatást. (Egyed, 1955)

Kis, 2007, p.233

A Bouguer anomália térképek a vonatkoztatási szint alatt lévő sűrűségkülönbségeket ábrázolják.

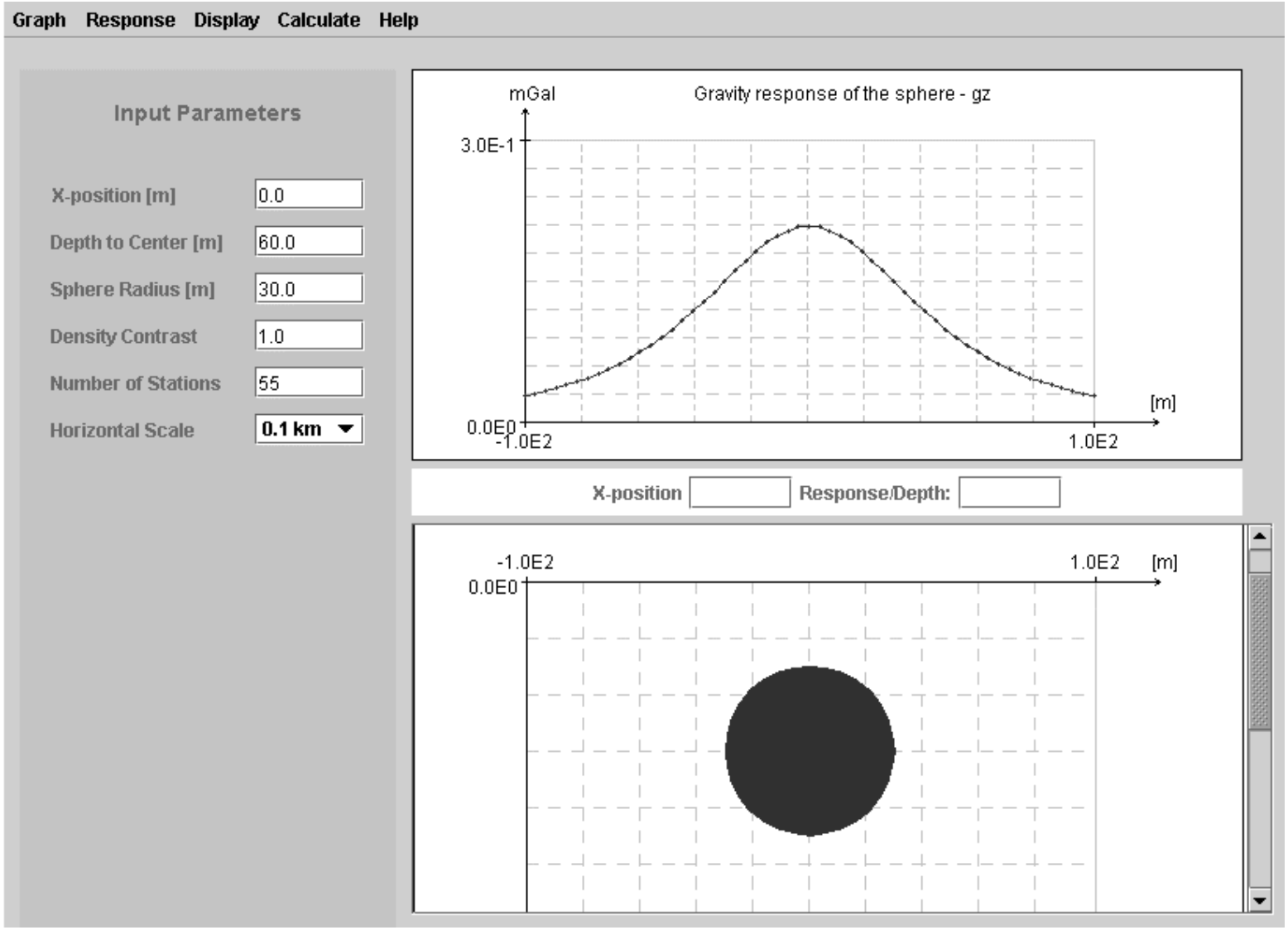
Pozitív anomália: környezeténél nagyobb sűrűségű kőzet kerül a felszínhez közel.

Negatív anomália: környezeténél kisebb sűrűségű kőzet kerül a felszínhez közel.

GRAVITÁCIÓS HATÓSZÁMÍTÁS - INVERZIÓ

$$g_{sphere} = \frac{G\Delta M}{\left(x^2 + z^2\right)} \cos\theta = \frac{G\Delta M z}{\left(x^2 + z^2\right)^{3/2}}$$

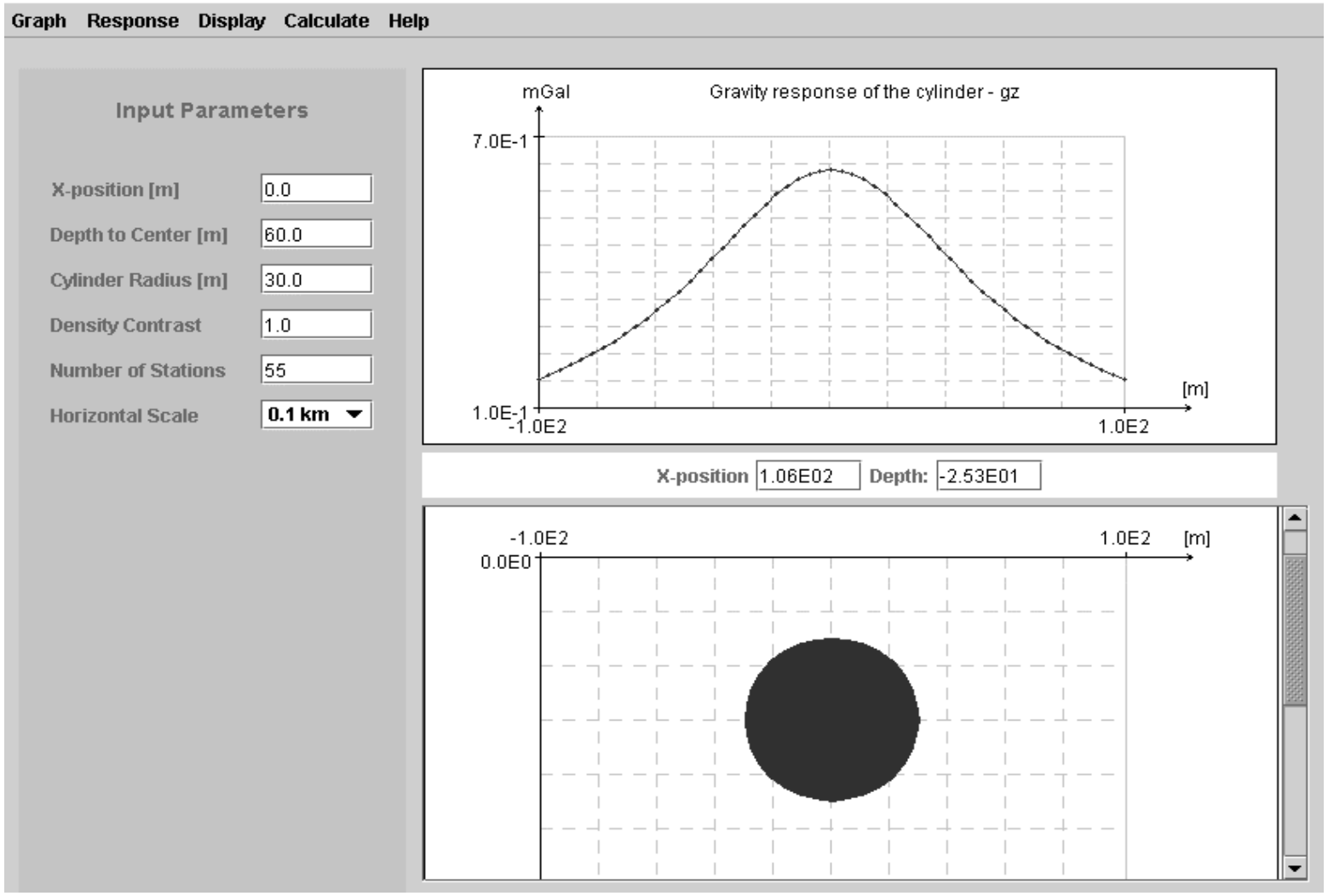
Eltemetett gömb által okozott gravitációs anomália:



GRAVITÁCIÓS HATÓSZÁMÍTÁS - INVERZIÓ

$$\Delta g = \left(\frac{2G\sigma}{z}\right)\frac{z^2}{x^2+z^2} = \frac{2G\sigma}{z}\left(\frac{1}{\left(\frac{x}{z}\right)^2+1}\right)$$

Eltemetett horizontális henger által okozott gravitációs anomália:



GRAVITÁCIÓS HATÓSZÁMÍTÁS - INVERZIÓ

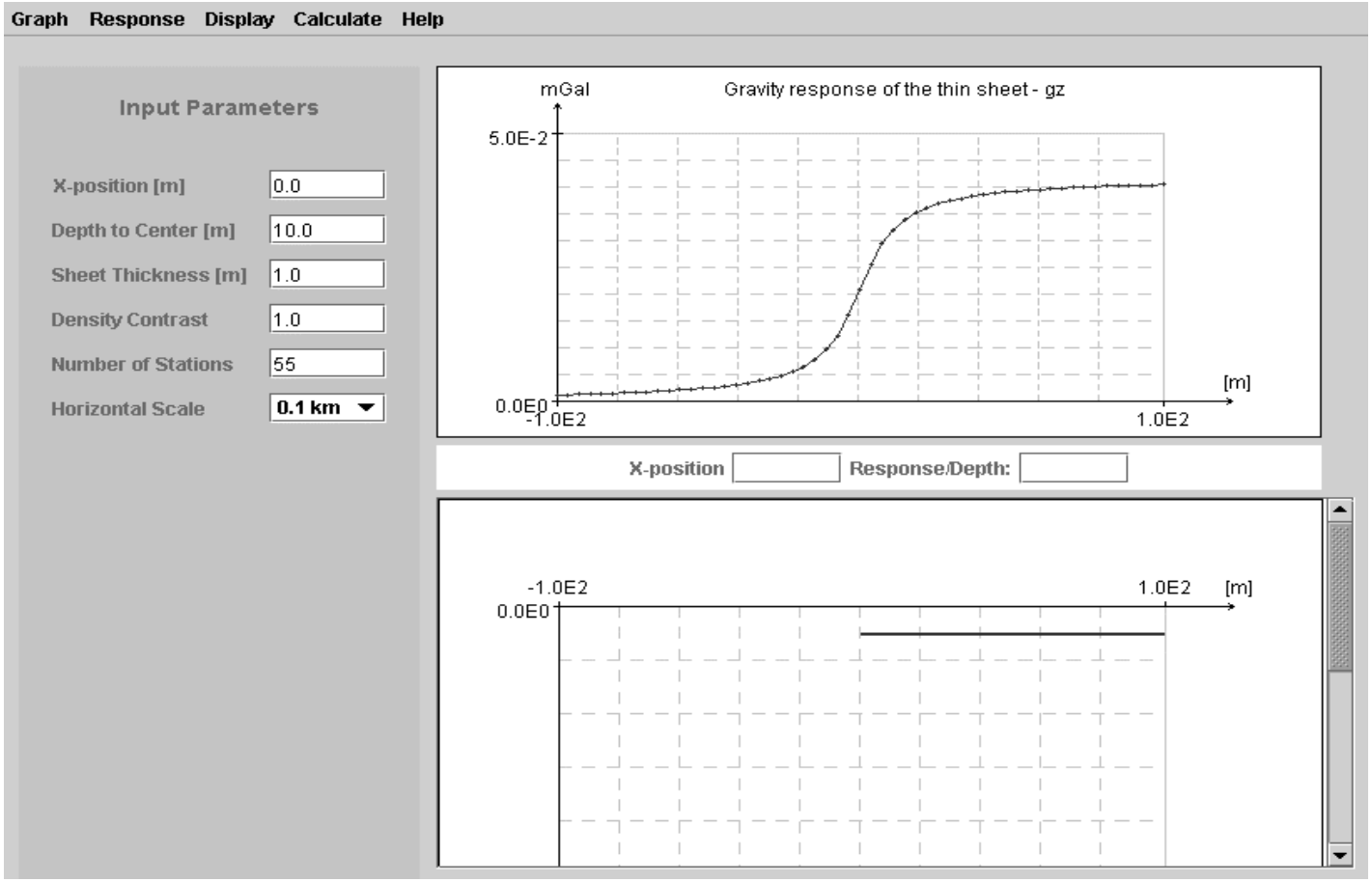
Use superposition:

$$\Delta g = 2G\sigma\left(\tan^{-1}\frac{x_2}{z} - \tan^{-1}\frac{x_1}{z}\right)$$

Notice that $\tan^{-1}\frac{x_1}{z} = \theta_1$ and $\tan^{-1}\frac{x_2}{z} = \theta_2$, so

$$\Delta g = 2G\sigma\left(\theta_2 - \theta_1\right)$$

Eltemetett végtelen lemez által okozott gravitációs anomália:



GRAVITÁCIÓS HATÓSZÁMÍTÁS - INVERZIÓ

Eltemetett hasáb által okozott gravitációs anomália:

$$U_{12} = a_1 \sin\phi_1 \cos\phi_1 \left[\theta_1 - \theta_2 + \tan\phi_1 \ln \frac{\cos\theta_1 \left(\tan\theta_1 - \tan\phi_1 \right)}{\cos\theta_2 \left(\tan\theta_2 - \tan\phi_1 \right)} \right]$$

positions are used to get a_1, θ_1, θ_2, ϕ_1, etc., for example,

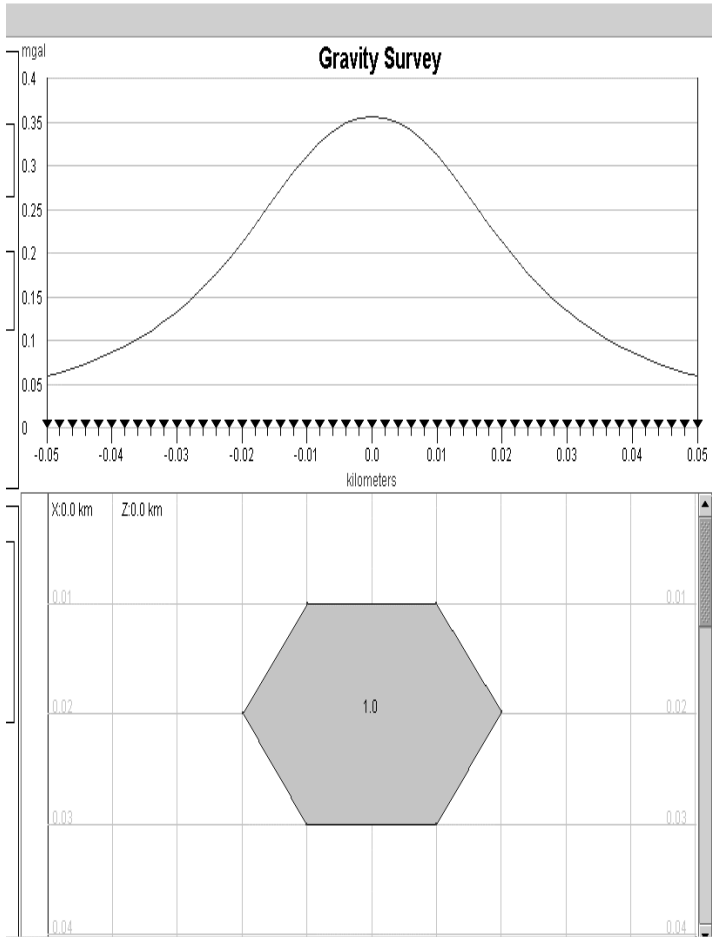
$$a_1 = x_2 - z_2 \frac{\left(x_2 - x_1 \right)}{\left(z_2 - z_1 \right)}$$

$$\theta_1 = \tan^{-1} \left(\frac{z_1}{x_1} \right)$$

$$\phi_1 = \tan^{-1} \left(\frac{z_2 - z_1}{x_2 - x_1} \right)$$

Finally,

$$\Delta g = 2G\Delta\rho \left(U_{12} + U_{23} + \ldots + U_{n1} \right)$$

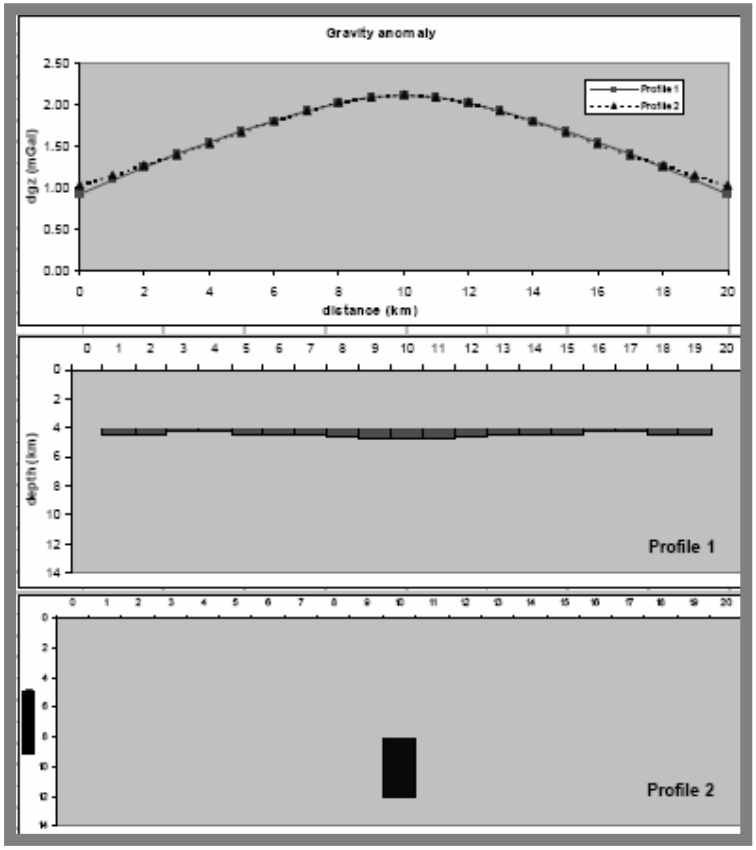


GRAVITÁCIÓS HATÓSZÁMÍTÁS - INVERZIÓ

- A mért értékeket összehasonlítjuk elméleti úton meghatározott anomáliaszelvényekkel, térképekkel, keresve a legjobb hatómodellt.

- Az inverzióba beépíthetjük a területről előzetesen szerzett információkat (pl. geológia), ezáltal pontosítva a megoldást.

- Mindig megoldások sokasága létezik, ezért az eredményeinket ellenőrizni kell, mennyire áll közel a modellünk a valósághoz.



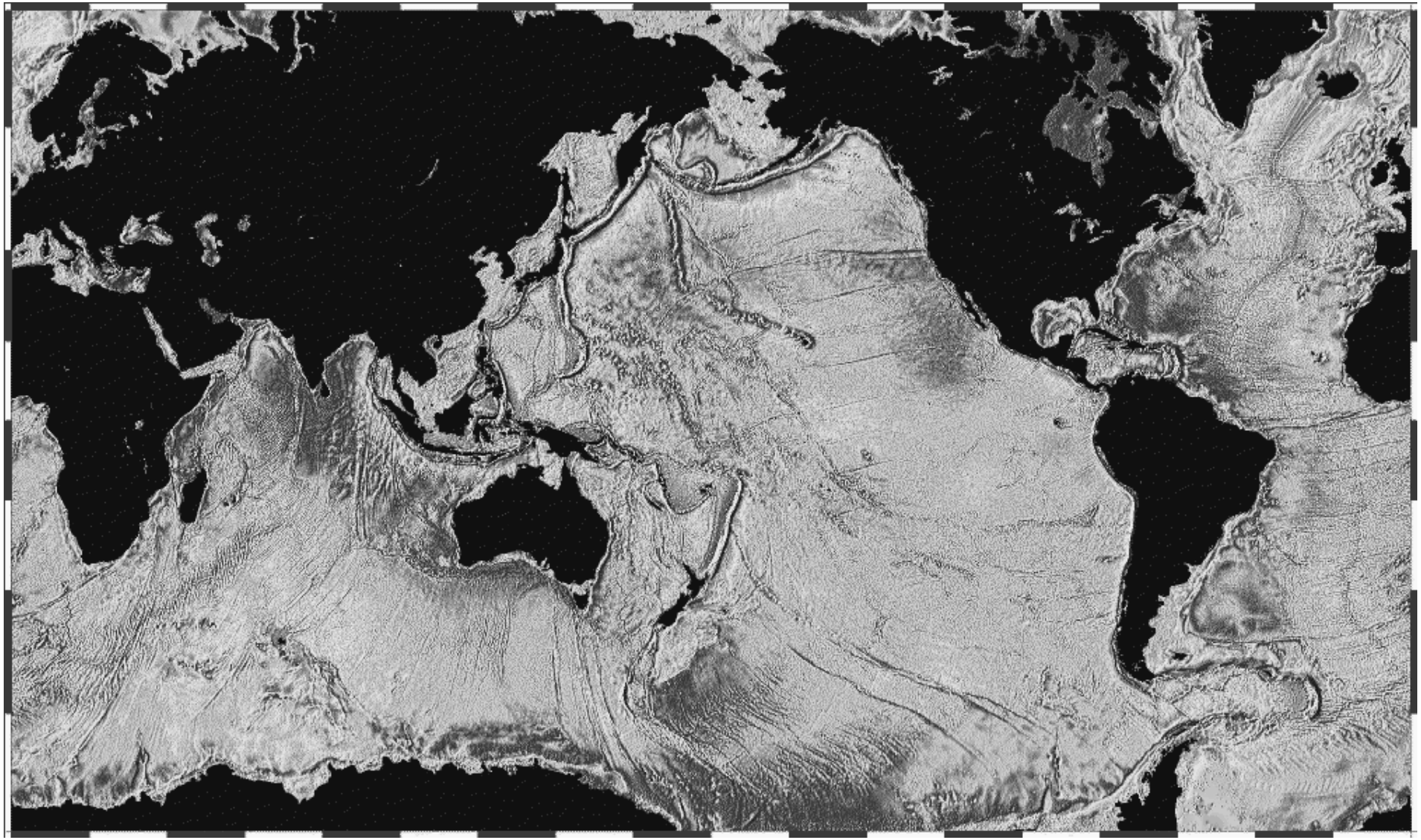
PÉLDÁK GRAVITÁCIÓS MÉRÉSEK FELHASZNÁLÁSÁRA

- Nagyléptékű: kéregvastagság meghatározása, a litoszféra szerkezetének vizsgálata

- Kisebb-közepes léptékben: eltérő sűrűségű kőzeteket elválasztó szerkezetek vizsgálata, nyersanyagkutatás: szénhidrogén tároló szerkezetek, sódómok, bauxittelepek

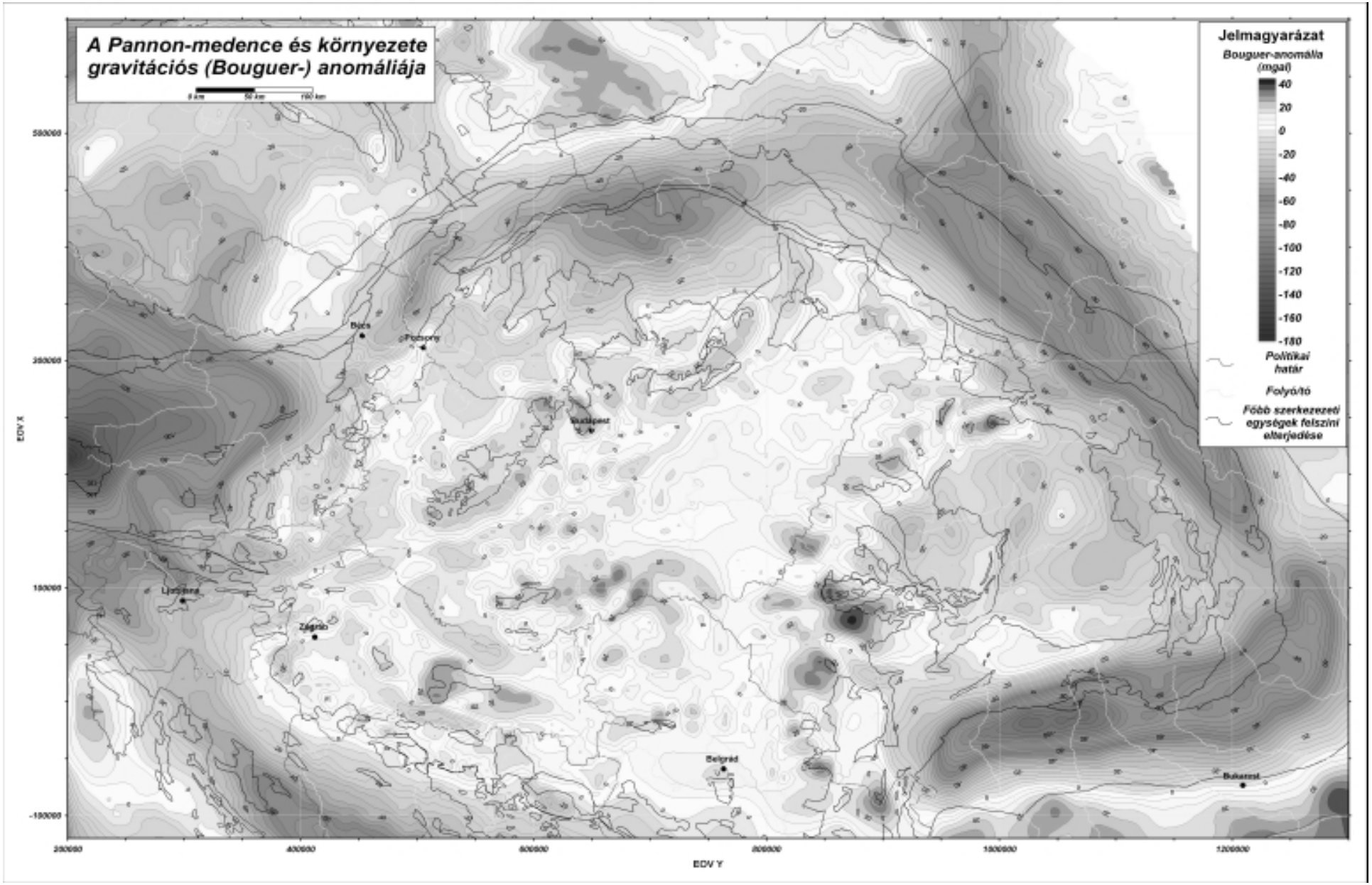
- Nagyfelbontásban: mikrogravitációs mérések üregkutatásban

ÓCEÁNALJZAT GRAVITÁCIÓS ANOMÁLIA TÉRKÉPE



Óceánközépi hátságok: pozitív gravitációs anomália
Mélytengeri árkok: negatív gravitációs anomália

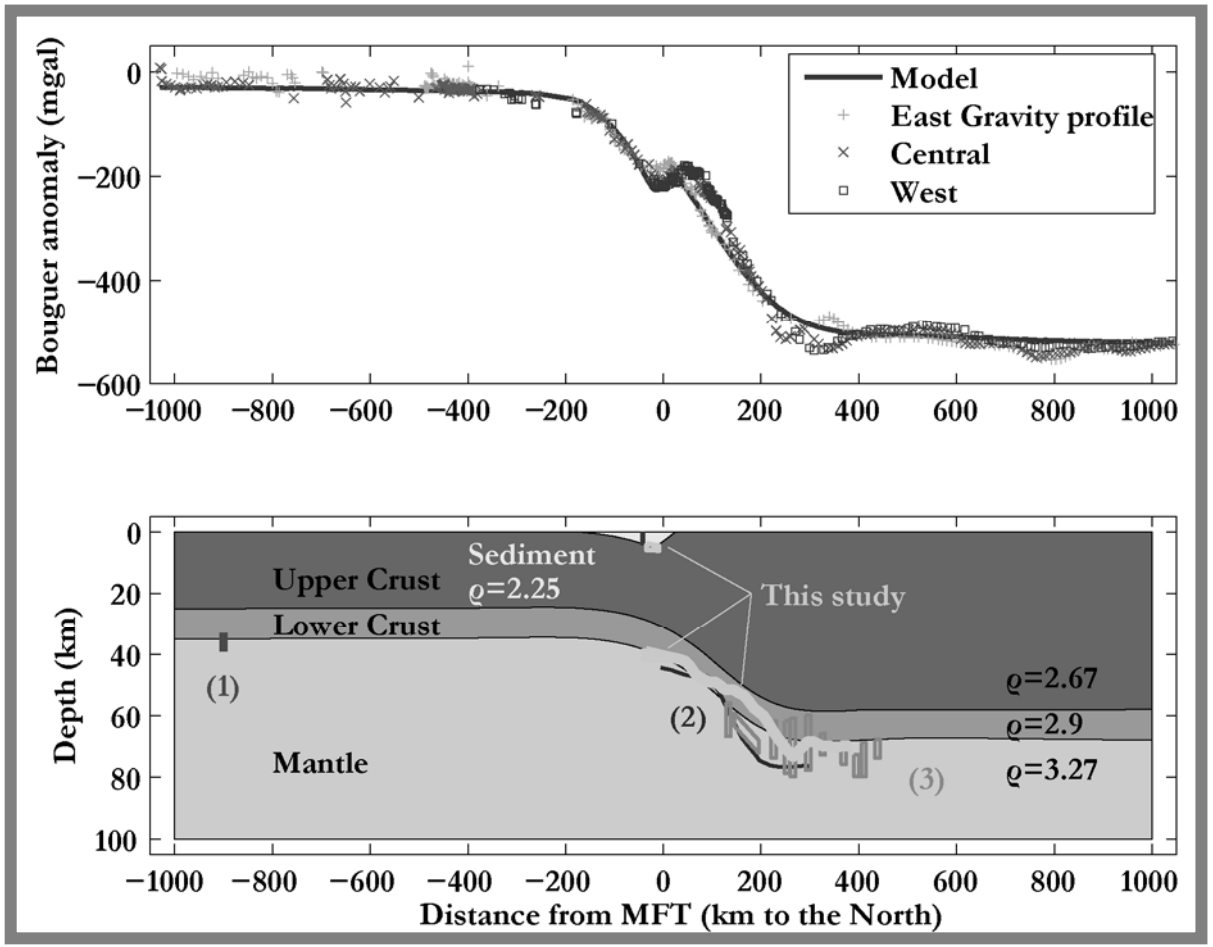
A PANNNON-TÉRSÉG BOUGUER ANOMÁLIATÉRKÉPE



Hegységek és medencék jellegzetességei

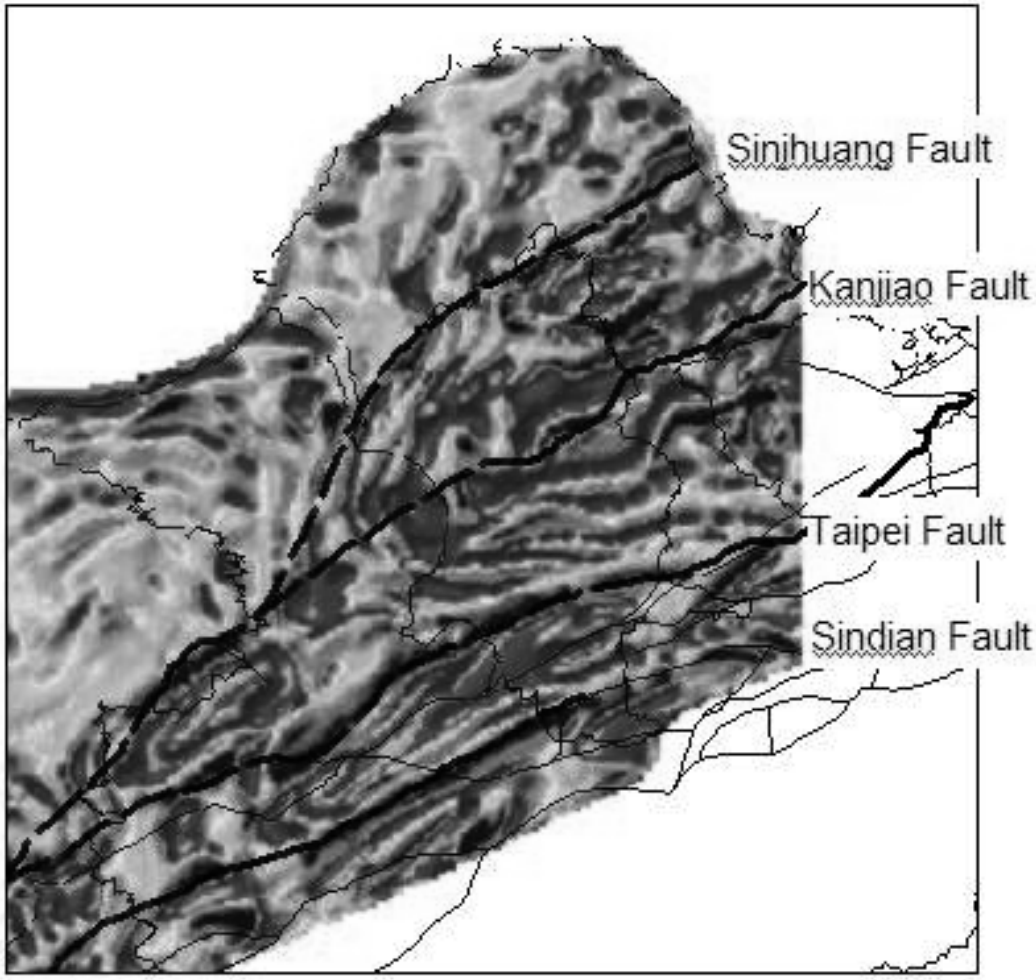
Horváth et al., 2005

Gravitációs mérések: az Indiai lemez flexúrája



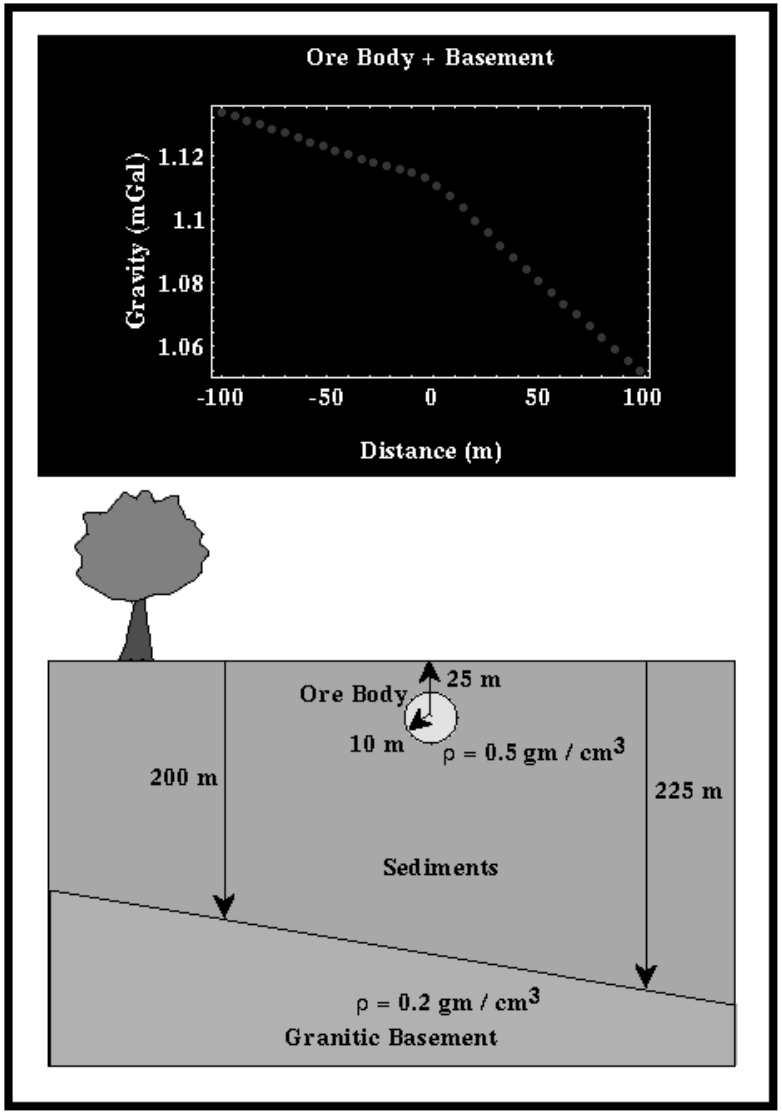
Hetényi et al., 2006

Példa vetők azonosítására Bouguer-anomália térképen (Tajvan)

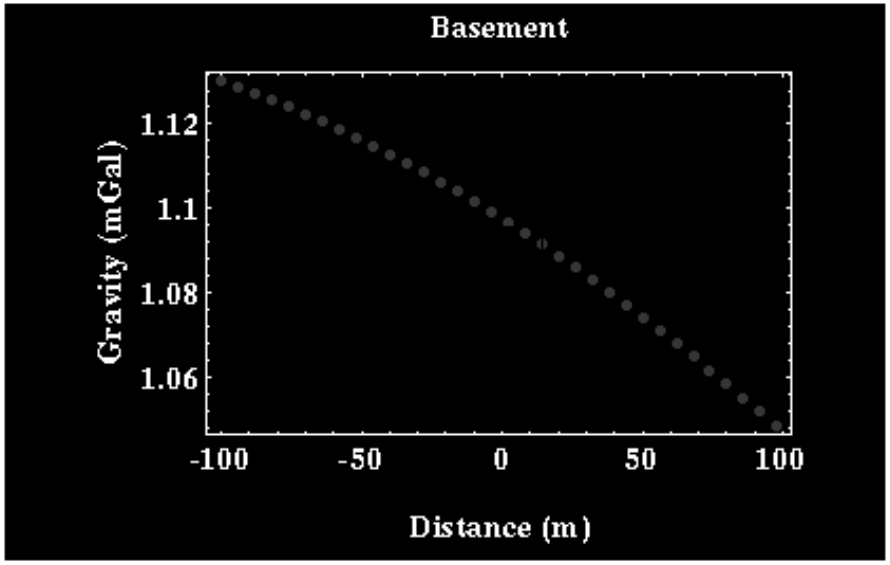


Regionális és lokális hatások

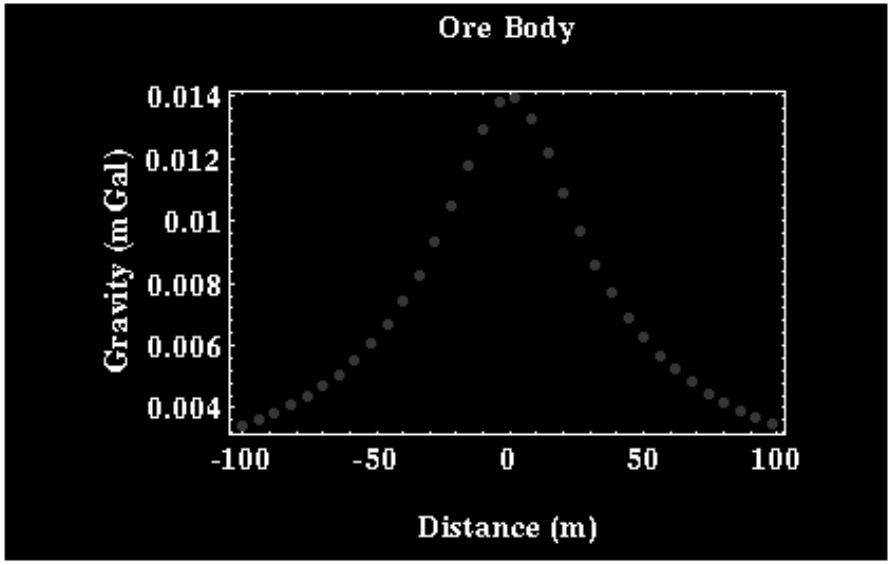
Nagy dőlésű gránitaljzat és egy felszín-közeli érctest felett észlelt gravitációs anomália



Az aljzat által okozott gravitációs anomália -regionális trend

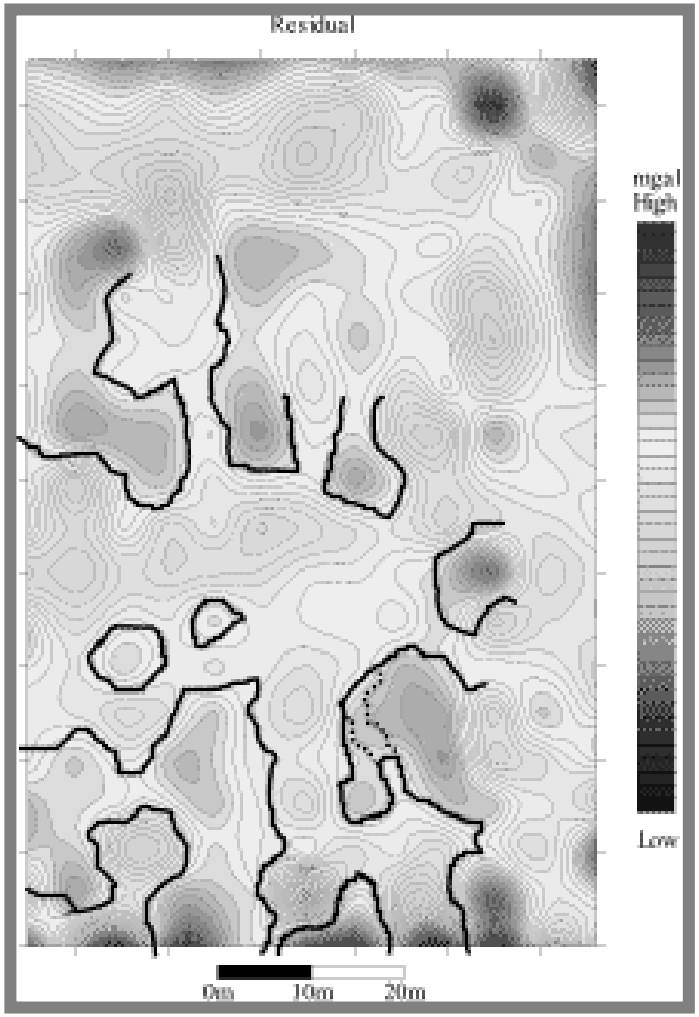


Az érctest által okozott gravitációs anomália -lokális hatás = reziduál anomália



Mikrogravitációs mérések

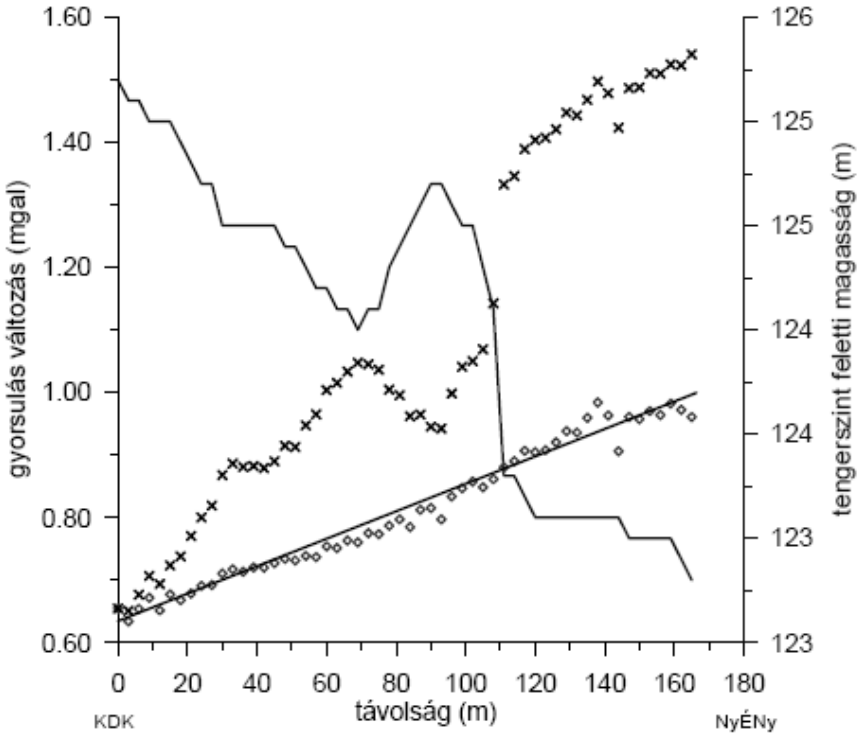
Nagyfelbontású mérések: kis lépésközzel, sűrű rácsban
Felhasználás: üregkutatás, folyadékáramlás, régészet



Víz alatti barlangjáratok felszíni lehatárolása a Bahamákon. – Keele University, UK

Mikrogravitációs mérések – hazai példa

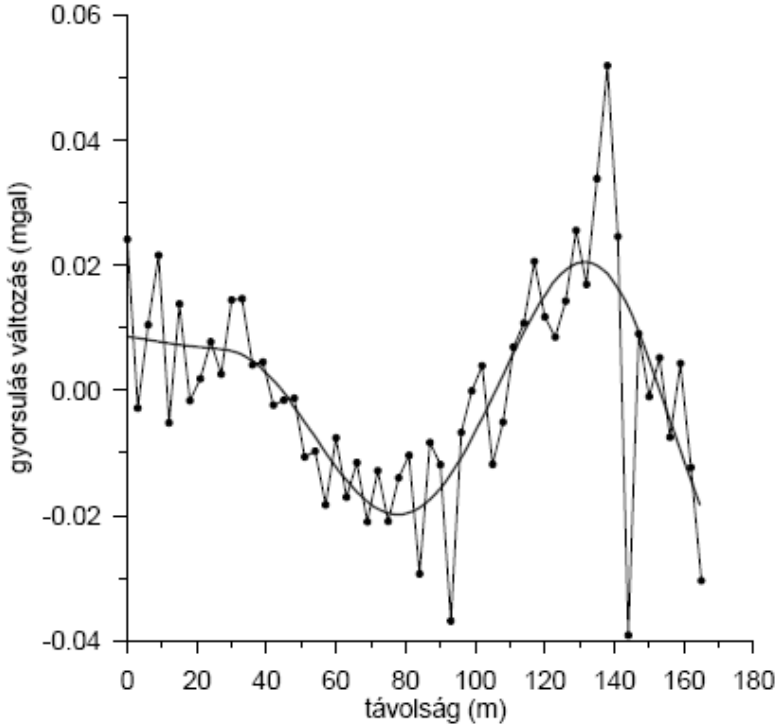
Gravitációs szelvény a Csajkovszkij parkban



A gravitációs tér változása a Csajkovszkij parkban.
x : mért értékek, ◇ : korrigált értékek,
kék folytonos vonal: felszín magassága,
fekete folytonos vonal: regionális trend **(Lenkey L. & Hámori Z., 2001)**

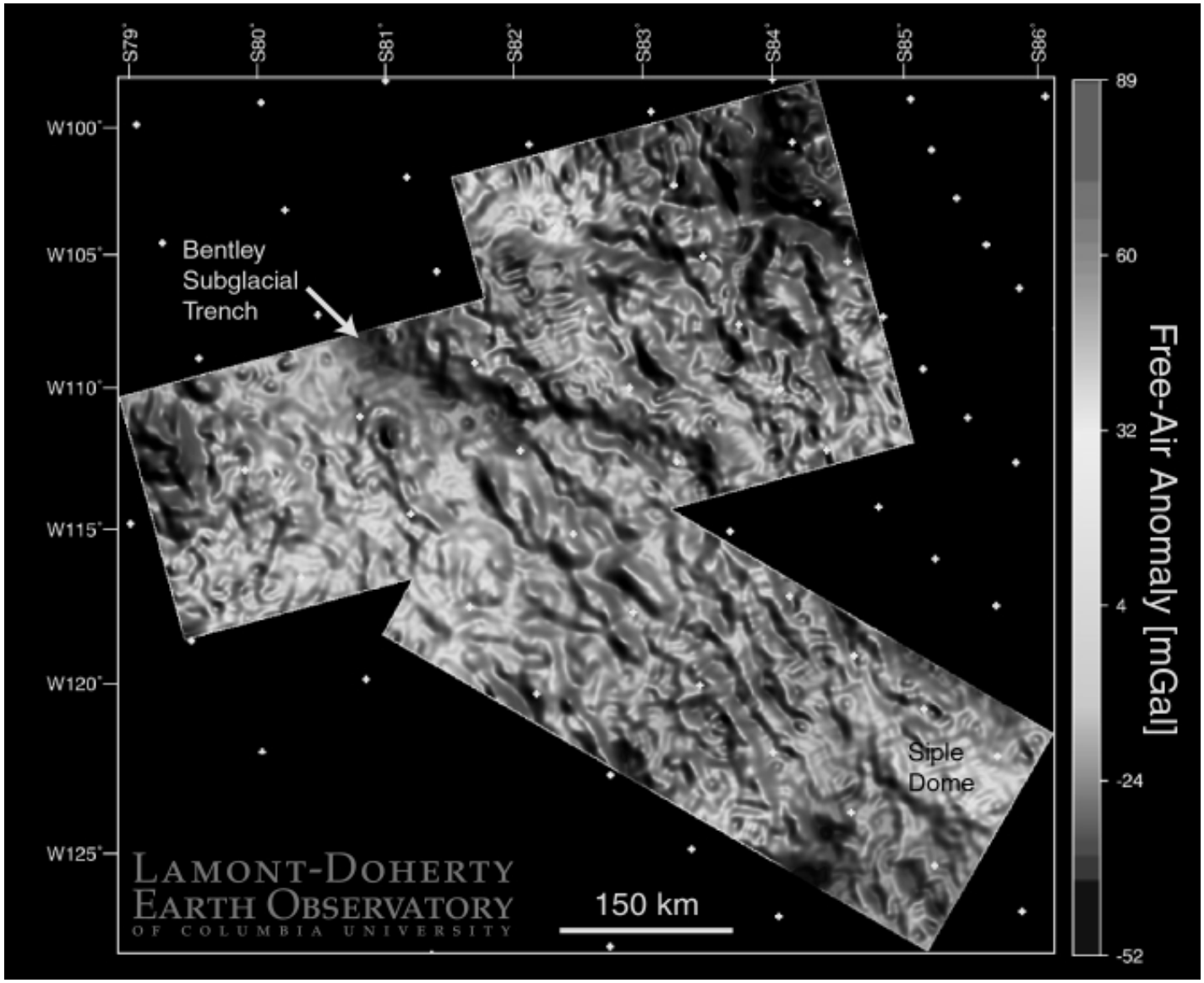
Mikrogravitációs mérések – hazai példa

Maradék anomália a Csajkovszkij parkban



A korrigált értékekből a lineáris trend levonása
után maradó maradék anomália.
A piros vonal a simított trendet ábrázolja.
80 m-nél jól látható egy mélyen található
(kb. 20 m) pincejárat hatása.

(Lenkey L. & Hámori Z., 2001)

LÉGI GRAVITÁCIÓS MÉRÉS

$$\Delta g_{free} = g_{mért} - a_{repülő} + g_{Eötvös} + g_{free\text{-}air} - g_{referencia}$$