

A mély medencék izosztatikus hatása

KISS JÁNOS[@]

Eötvös Loránd Geofizikai Intézet, 1145 Budapest, Kolumbusz utca 17–23.

[@]E-mail: kiss@elgi.hu

Közép-Európa Moho-térképét a Kárpát-medence és környező hegységek (Alpok, Kárpátok, Dinaridák) között meglévő kéregvastagság-különbségek határozzák meg. Ez elsősorban a hegységek alatt megjelenő izosztatikus gyökérszónákhoz kösszönhető. Az izosztatikus korrekcióval a gyökérszónák által okozott regionális gravitációs hatásoktól akartunk megszabadulni, amelyek benyúlnak a Kárpát-medencébe – ezt mutatta be az izosztáziával foglalkozó első cikk (Kiss 2010). Az Alföld mély üledékes medencéi felett tapasztalható nagy Bouguer-értékek okát kerestük, és próbáltuk azokat kiszűrni az izosztázia segítségével. A munkánk eredményeképpen két megállapítást tehetünk. *Egyrészt:* az izosztatikus korrekció ellenére a regionális gravitációs hatásoktól nem sikerült teljesen megszabadulni (feltételezhetően geodinamikai okok vagy a fizikai paraméterek pontatlansága miatt). *Másrészt:* az Alföld területén a gravitációs alapszintet nem sikerült jelentősen csökkenteni. Itt a Moho szintje és a felszíni domborzat között nincs korreláció (mivel a magasságváltozás minimális – viszont ismert köpenyfelboltozódások vannak), azaz a medencealjzat felszíne és a Bouguer-anomália menete között továbbra is ellentmondás van. Az óceáni árkok izosztatikus hatása régóta ismert, de mi a helyzet az Alföld több kilométer mély medencéivel, hiszen azoknak is lehet izosztatikus hatásuk? Ebben a cikkben a mély medencék lehetséges izosztatikus hatását vizsgáljuk. Célunk az izosztatikus hatásoktól mentes gravitációs anomáliatérkép, az izosztatikus anomáliatérkép előállítás.

Kiss, J.: Isostatic effect of deep sedimentary basins

The different depths of the Moho in Central-Europe is determined by different crust thicknesses of the Carpathian Basin and its surrounding mountains (Alps, Carpathians and Dinarides) which are connected, first of all, to the isostatic roots of the mountain regions. Using the isostatic correction we tried to compensate the gravity effects of those roots – as it was published in a previous paper (Kiss 2010). We looked for the reason of high Bouguer values above the deep sedimentary basins of the Great Hungarian Plain and we have tried to eliminate that regional effect by isostatic correction. Our experiences showed as follows. *On the one hand*, some regional gravity anomalies were left also after isostatic corrections (presumably because of geodynamic processes or inaccuracies of used physical parameters). *On the other hand*, the high level of gravity values at the Great Hungarian Plain could not be significantly decreased. The topography has no correlation with the depth of the Moho at the plain but there are some well-known mantle diapirs there. Thereupon the Bouguer gravity anomaly map still contradict to known depths of the basement in the area. A formula to calculate the isostatic effect of oceanic crust – the effect of antiroots – is known for a long while, but what about the isostatic effect of deep sedimentary basins of continental crust? In this paper we are going to study that question. Our purpose is to realize a full isostatic correction and get gravity maps without any isostatic effects.

Beérkezett: 2010. október 7.; *elfogadva:* 2010. november 9.

Bevezetés

Egy előző cikkben (Kiss 2010) az izosztatikus korrekció segítségével a regionális hatásoktól akartunk megszabadulni. A környező magas hegységek (Alpok, Kárpátok, Dinaridák) mély gyökérszónái jelentős negatív gravitációs anomáliát okoznak, és ez a hatás Magyarország területére is benyúlik. Az elvégzett izosztatikus korrekció kizárólag a felszíni domborzat alapján valószínűsíthető (és számítható) Moho-hullámzást kompenzálta. Ez azonban nem volt elegendő, mert nagy negatív anomáliák maradtak a hegyvidéken ÉK-en – a Keleti-Kárpátok vonulata mentén, a Kelet-Európai Táblával való találkozásnál és a D-i Kárpátok mentén – a Moesiai Táblával való találkozásnál. Ezek eredete nem egyértelmű, talán a kéreg mozgásával van kapcsolatban, amint azt a korábbi cikkünkben feltételeztük.

Az európai léptékű hatások esetében a hibás paramétrezés is okozhatja a megmaradó jelentős gravitációs anomáliákat, ám ennek főleg a hegységek környezetében kellene megjelennie szisztematikus hibaként, azaz mindenhol. A pontról pontra jelentkező változások a lokális földtani felépítéssel függenek össze, s ezt nem tudjuk (nem is akarjuk!) kompenzálni.

Az izosztatikus egyensúly irányába mutató változások sokkal hosszabb idejűek, mint a kéreglemezek dinamikai mozgása. A „gyors” kéregmozgások velejárája ugyan a tömegkiegyenlítődes hosszán elnyúló folyamata, de a kétféle földtani folyamat eltérő sebességgel zajlik. Példaként bemutatjuk a Földben zajló különböző mozgások eltérő idődimenzióját (*1. táblázat*) egy EGU konferencián elhangzott előadás adatai alapján.

Szeizmikus hullámterjedés időtartalma pl. a földrengés-hullámok terjedési sebességét, annak időtartalmát jelzi.

1. táblázat | Földben lezajló különböző mozgások időtartalmai (Thatcher és Pollitz 2010)

A mozgás típusa	A mozgás időtartalma (év)
Szeizmikus hullámterjedés	$\sim 10^{-4}$
Szeizmikus deformációkiegyenlítődé	$10^1 - 10^4$
Glaciális izosztatikus kiegyenlítődé	$10^4 - 10^5$
Izosztatikus kiegyenlítődé	$10^6 - 10^7$

A szeizmikus deformációk kiegyenlítődése a feszültség-kiegyenlítés hatására bekövetkező kéregmozgások sebességét, míg az izosztatikus kiegyenlítődések időtartalma a nagy viszkozitású anyag lassú, képlékeny alakváltozásának idejét mutatja.

Mély medencék és az izosztázia

A vizsgálódásaink következményeként rá kellett döbbsen, hogy a hegységek izosztatikus hatásán kívül más hatással is számolni kell, amikor a regionális anomáliákat¹⁾ el akarjuk távolítani a Bouguer-anomáliatérképből.

Az Alföld viszonylag magas Bouguer-anomáliaértékeit csökkentettük a gyökérszónák hatásának kiszűrésével, de az Alföld sima rónasága, csak a magassági adatokból kiindulva, komolyabb izosztatikus eredetű változást nem okozhat.

Nem kellene azonban valamilyen mértékben figyelembe venni a nagy, 5 km-es mélységet is meghaladó, laza üledékekkel feltöltött medencéket, amelyek sűrűsége a kéreg átlagsűrűségétől jelentősen eltér? Hiszen az izosztatikus egyensúlynak nemcsak a magas hegységek esetében, hanem az óceáni árkoknál vagy a mély üledékes medencéknél is fenn kell állnia.

Magyarország esetében a medencemélység maximális értéke durván egy nagyságrenddel nagyobb, mint a domborzati kiemelkedések maximális értéke, így ebben a megközelítésben a medencék izosztatikus hatása jelentősebb lehet, mint a hegységeké!

Az izosztázia szakirodalmában az óceáni vékony kéreg (és mélytengeri árkok vagy negatív domborzati elemek) izosztatikus hatásának kiszámítása legalább olyan régóta ismert, mint a kontinentális kéreg (magas hegységek vagy pozitív domborzati elemek) okozta izosztatikus hatások számítása. Az Alföld több kilométer mély, laza üledékekkel feltöltött medencéje esetében is alkalmazhatóak ezek a képletek, csak megfelelően kell használni ezeket.

Az üledékes medencék izosztatikus hatása

A hegységeknél, az izosztatikus korrekció számítása során, a gyökérszónák mélységét a kéreg sűrűsége, a domborzat magassága, valamint a kéreg és a köpeny közötti sűrűségkülönbség alapján határoztuk meg.

A medencebeli, laza üledékek sűrűsége, a pórusterfogat csökkenése és a tömörödés miatt nagyon változó (1900–2670 kg/m³), az átlagos sűrűségérték 2285 kg/m³ körüli.

A hegységek (felnyúlva a légtérbe) a környezetükhöz képest 2670 kg/m³ sűrűségkontrasztal jelentkeznek. Az üledékekkel feltöltött medencék sűrűségkontrasztja átlagosan 400 kg/m³ körüli (ezek a kéregbe nyúlnak le). Persze ez nem állandó érték, hanem a felszín közeli maximális (770 kg/m³) értékétől a nagy mélységek minimális (0 kg/cm³) sűrűségkontraszt-értékéig változhatna a mélység függvényében. Ebből már látszik, hogy a mély medencék által okozott izosztatikus hatás nem lesz olyan nagy, mint a hasonló méretű hegységek izosztatikus hatása.

Az alkalmazott izosztatikus alapképletet (pl. Heiskanen és Veining Meinesz 1958) ennek megfelelően kissé módosítva, általánosabb formában kell felírni, a hegységek esetében:

$$d = d_c + [(\sigma_b - \sigma_l) / (\sigma_m - \sigma_c)] h_l, \quad (1)$$

ahol d a kompenzációs mélység (*root*), d_c a kéreg átlagos vastagsága, σ_b a Bouguer-korrekciós sűrűség (2670 kg/m³), σ_l a levegő sűrűsége ($\sim 1,3$ kg/m³), σ_m a köpeny sűrűsége (3270 kg/m³), σ_c a kéreg sűrűsége (2670 kg/m³), h_l a domborzat magassága.

A képlet a korábban publikálthoz képest tulajdonképpen annyiban változott meg, hogy kiegészült egy olyan taggal (σ_l), amely a hegységek esetében elhanyagolható, mivel az azokat körülvevő levegő sűrűsége nagyon kicsi, 1 kg/m³ körüli érték.

A síkságokon, mély üledékes medencék esetében a képlet a következőképpen alakul:

$$d = d_c - [(\sigma_b - \sigma_u) / (\sigma_m - \sigma_c)] h_b, \quad (2)$$

ahol d a kompenzációs mélység (*antirroot*), d_c a kéreg átlagos vastagsága, σ_b a Bouguer-korrekciós sűrűség (2670 kg/m³), σ_u az üledékek sűrűsége²⁾ (?), σ_m a köpeny sűrűsége (3270 kg/m³), σ_c a kéreg sűrűsége (2670 kg/m³), h_b az ismert medencemélység.

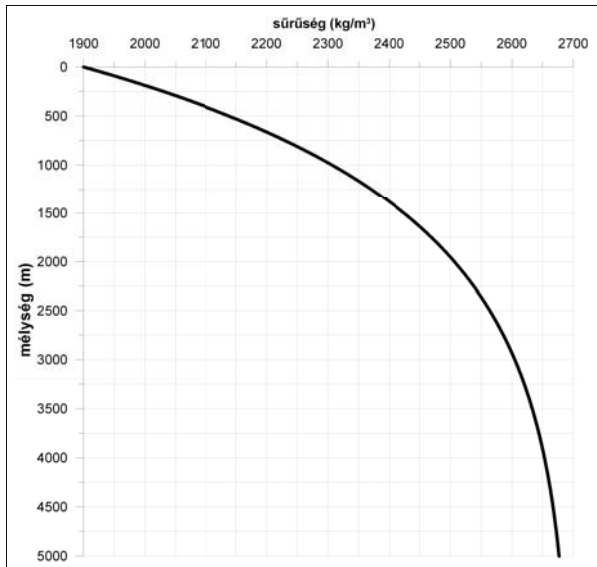
Az (1) és (2) képlet csak a második tag előjelében különbözik – a hegységek izosztatikus gyökerei (*root*) negatív Bouguer-anomáliát okoznak, a mély medencék által okozott izosztatikus kiemelkedések (*antirroot*) a kéreg–köpeny határon pozitív Bouguer-anomáliát adnak. A (2) képletben az üledékes medence sűrűségét elvileg vehetnénk állandónak (ez sok szempontból előnyös lenne), de valójában ez változó érték, amelyet célszerű kicsit részletesebben megvizsgálni.

A nem konszolidált üledékek sűrűsége

A porozitás a laza üledékek esetében a mélység növekedésével exponenciális csökken (Athy 1930), aminek következtében az üledékek sűrűsége a mélységgel exponenciálisan növekszik. Ez azt jelenti, hogy minél mélyebben vagyunk, annál kisebb a porozitás és annál nagyobb a sűrűség.

Mészáros és Zilahi-Sebess (2001) mélyfúrás-geofizikai adatok alapján megállapították, hogy a magyarországi vastag üledékek esetén a sűrűség mélységfüggése³⁾ a következőképpel közelíthető:

$$\sigma = d(a - be^{-ch}), \quad (3)$$



1. ábra A sűrűség mélységfüggése Magyarországon (Mészáros és Zilahi-Sebess 2001)

Figure 1 Density–depth relationship in Hungary (Mészáros és Zilahi-Sebess 2001)

ahol a az üledékek maximális sűrűsége (országos szinten $a = 2,70$), b a felszínre extrapolálás paramétere (országos szinten $b = 0,80$), c a növekedés mértékének paramétere (országos szinten $c = 0,00071$), d konverziós koefficiens, CGS–SI átváltás ($d = 1000$), h a mélység (m), σ a h mélységre vonatkozó sűrűség (kg/m^3).

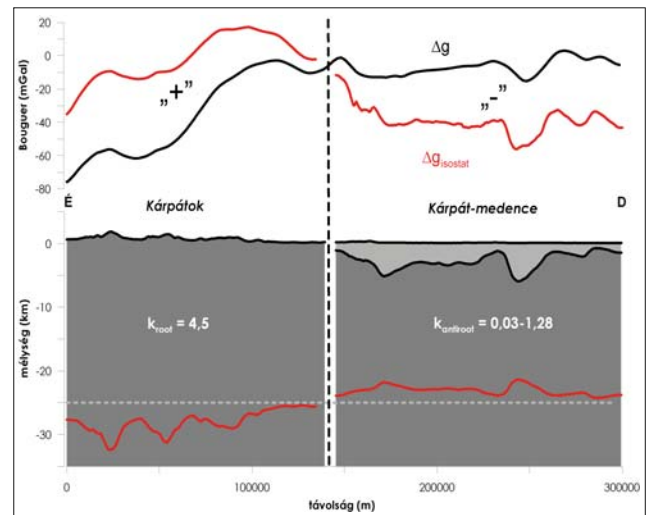
A fenti függvénnyel meghatározott sűrűséggörbét az 1. ábra mutatja. Ez a grafikon a tömörödés (pórustérfogat elvesztése, diagenézis stb.) hatására a mélységgel arányosan bekövetkező sűrűsénövekedést – az üledékek általános tömörödési trendjét Magyarországon – mutatja.

Az üledékes medence okozta köpenykiemelkedés mértékének kiszámításakor ezt az összefüggést fogjuk felhasználni.

A (3) képlet alapján a medence adott (h_b) mélységére ki tudjuk számítani a legnagyobb sűrűséget. Ennek a sűrűségnek és a felszíni sűrűségnek az átlagát képezve előállíthatjuk a medence átlagos sűrűségét, amely pontról pontra változik. Mivel azonban a sűrűség–mélység összefüggés nem lineáris, így valószínűleg alulbecsülnénk a medence sűrűségértékét. Célszerű tehát egy olyan, nem túl bonyolult képletet (4) alkalmazni, amely jobban figyelembe veszi az exponenciális mélységfüggést. Ilyen lehet például a súlyozott átlagolás. Kiszámítva minden pontra a félmélységbeli sűrűséget, majd ha a minimális, maximális és félmélységbeli sűrűségértékeket súlyozva átlagoljuk, akkor megkapjuk a keresett átlagsűrűséget.

A számítás tovább egyszerűsödik, mivel a művelet visszavezethető egy olyan függvényre, amelyben csak a minimális és maximális mélységhez tartozó sűrűség szerepel:

$$\sigma_{\bar{u}} = \frac{1}{4}(\sigma_{h_{\min}} + 2\sigma_{h_{\text{half}}} + \sigma_{h_{\max}}) = \frac{1}{4}(\sigma_{h_{\min}} + 2\sigma_{h_{\max}}), \quad (4)$$



2. ábra A hegységek és medencék hatása a kéreg–köpeny határfeületre (alul) és a kiindulási Bouguer-anomália- (fekete) és izosztatikus anomália- (piros) görbék (felül)

Figure 2 Isostatic effect of high mountains and deep basins on the depth of Moho (below) and on the value of the Bouguer anomaly (above)

ahol $\sigma_{\bar{u}}$ a medenceüledék átlagos sűrűsége, $\sigma_{h_{\min}}$ a felszíni sűrűség, $\sigma_{h_{\text{half}}}$ a félmélységbeli sűrűség, $\sigma_{h_{\max}}$ a legnagyobb mélység sűrűsége.

A sűrűség meghatározásánál feltételezzük az ideális üledékciklus meglétét: a felszíni legfiatalabb képződményektől a medencealjzatig folyamatos üledékképződést és az ennek megfelelő, folyamatosan növekvő sűrűségértékeket. Erre azért van szükség, hogy mindenhol ugyanúgy járjunk el a sűrűség és izosztatikus mélység meghatározása során. Természetesen a földtani felépítés általában nem ilyen. A sűrűség meghatározásából származó hiba csak az izosztatikus köpenykiemelkedés (*antiroot*) méretét módosítja némileg (mivel a felszín közeli, de kvarternél idősebb medenceüledékek sűrűsége nagyobb, mint amelyet kezdősűrűségként az 1. ábra alapján feltételeztünk), de a 25 km-es mélység miatt ez a hiba remélhetőleg nem adódik túl nagyra.

A kapott átlagos sűrűséggel határozzuk meg a $\{(\sigma_b - \sigma_{\bar{u}}) / (\sigma_m - \sigma_c)\}$ kifejezés értékét. Nevezzük ezt a kifejezést izosztatikus koefficiensnek, és jelöljük k -val! Az izosztatikus koefficiens 2670 kg/m^3 korrekciós sűrűségnél a medenceüledékek esetében 0,03–1,28 értékek között változik a medence mélységétől függően (a hegységek esetében ez az érték 4,5 körüli volt). Ez durván azt jelenti, hogy a sekély, néhány száz 100 m mély medencéknél kb. hasonló magasságú köpenykiemelkedés jelentkezik. A nagyon mély medencék esetében a mélységgel csökkenő sűrűségkontraszt miatt egyre kisebb lesz az üledék által okozott izosztatikus hatás. A legmélyebb, kb. 9 km-es medencéknél a köpenykiemelkedés mértéke számításaink szerint maximálisan 2,8 km körülinek adódik.

Az üledékes medencéknek tehát hatásuk van az izosztatikus kompenzációs mélységre. Ez a hatás nem növelni, hanem csökkenteni fogja a Moho-mélységet, mert ebben az

esetben a kompenzációhoz köpenykiemelkedésre van szükség. A köpenykiemelkedés pozitív gravitációs anomáliát okoz, amely megnöveli a gravitációs alapszintet, maximumot okozva. Egy ilyen hatás eltávolítása után az Alföld nagy gravitációs értékei is remélhetőleg eltűnnek!

A 2. ábra a domborzat és mély medencék által okozott izosztatikus gyökérvonalat és köpenykiemelkedést mutatja egy szelvény mentén (25 km-es átlagos Moho-mélységhez viszonyítva), valamint felettük a kiindulási Bouguer-anomáliát és az izosztatikusan korrigált Bouguer-anomáliát, az izosztatikus anomáliát. A szelvény mentén jeleztük az alkalmazott izosztatikus koefficiens értékeit, továbbá a korrekció előjelét is a „+” és „-” szimbólumokkal.

A teljes izosztatikus korrekció Magyarország területére

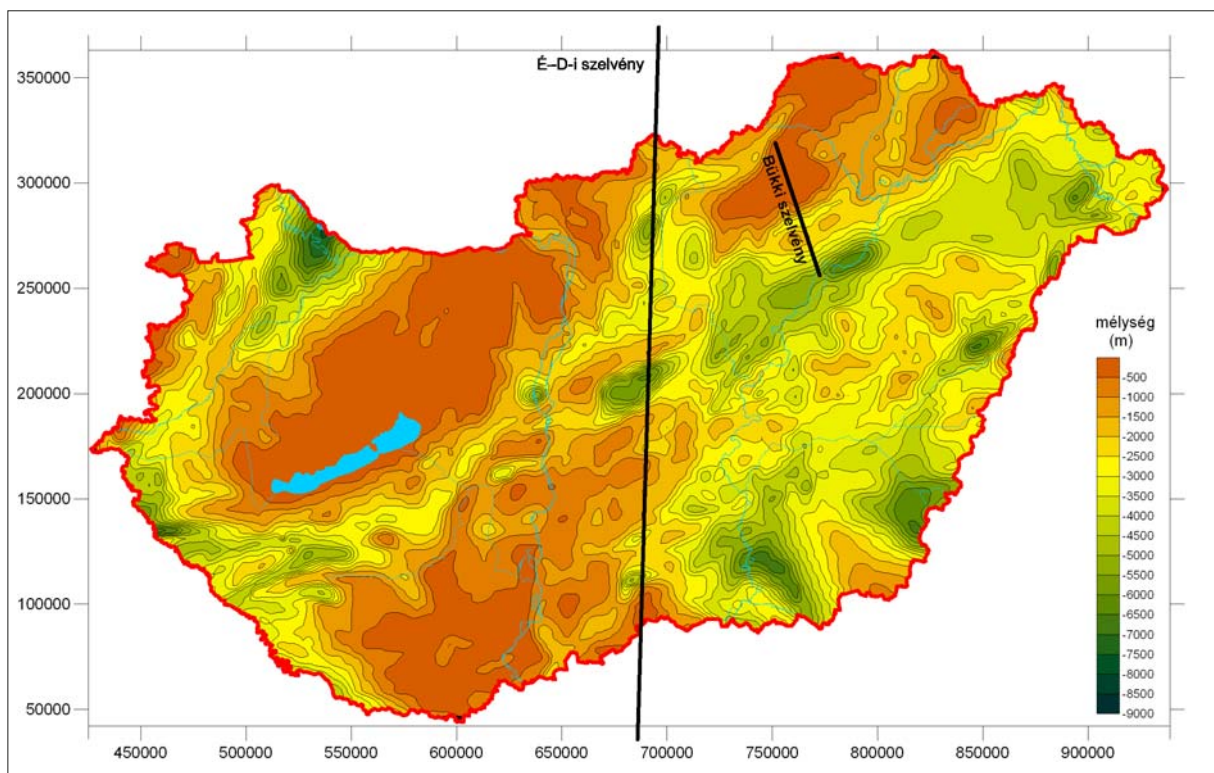
A medenceüledékek vastagságát Magyarország területére a Kilényi et al. (1991) által közölt mélységtérkép alapján (3. ábra) kaphatjuk meg⁴⁾. Az egész Kárpát-medence izosztatikus *antiroot* hatásának kiszámításához ismernünk kellene Közép-Európa medencealjzat-térképét, de ez nem áll rendelkezésünkre! Konkrét mélységadatokat hiányában⁵⁾ számításainkkal az országhatáron belül maradtunk, amiből némi torzulás várható ÉNy-on a Bécsi- és a Duna-medence (Szlovák-Alföld), D-en pedig egészen a Belgrádig lenyúló

(Szerémség–Bácska–Bánság) Pannon-mélymedencék izosztatikus (oldal)hatásának negligálása miatt.

Mivel a domborzat (pozitív felszíni elemek) regionális hatását csak a közép-európai magasságadatok alapján tudjuk meghatározni (átnyúló anomáliák), így a teljes izosztatikus korrekciót két lépésben kell elvégeznünk.

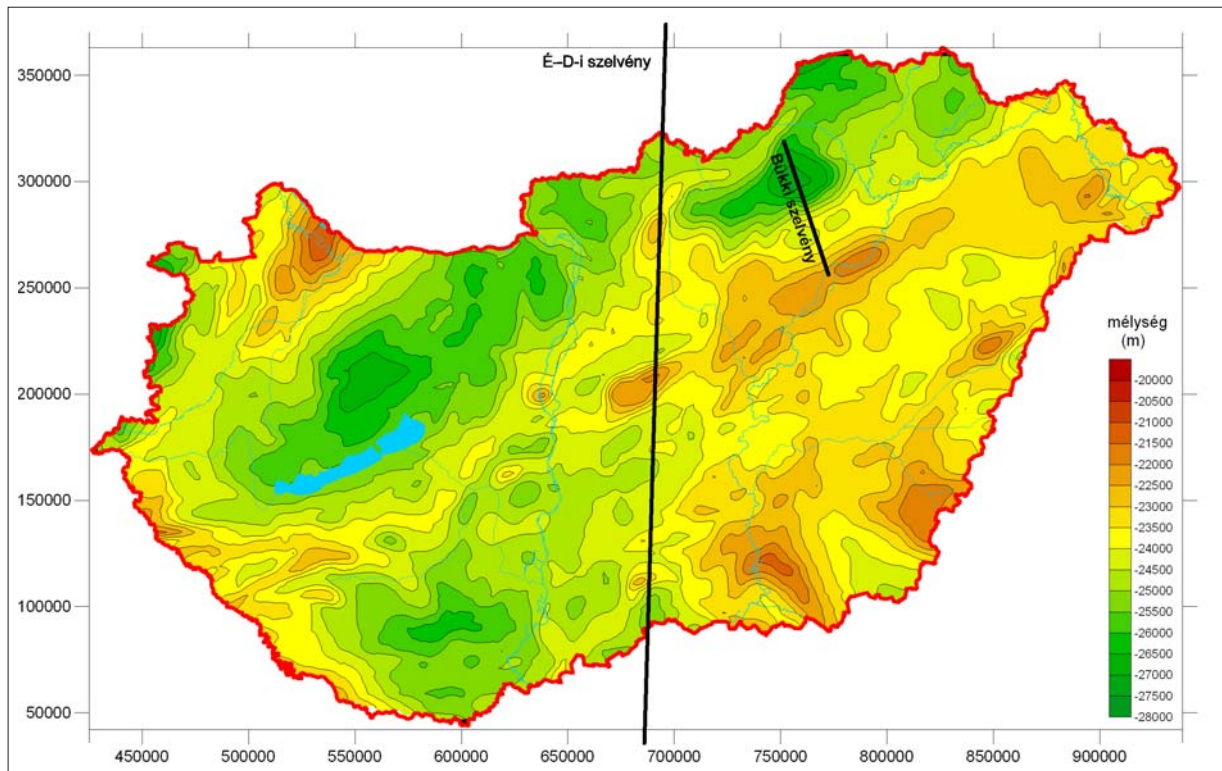
Az *első lépés* az izosztatikus gyökerek (*root*) gravitációs hatásának meghatározása a közép-európai domborzati adatokból (Kiss 2010), majd *második lépésként* a Kilényi-féle mélységtérkép alapján – csak Magyarország területére – a mély medencék által okozott köpenykiemelkedések (*antiroot*) hatását határozzuk meg háromdimenziós gravitációs modellezéssel, a Parker-féle (1973) algoritmus alapján. A kéreg–köpeny felület átlagos mélységét a szeizmikus mérések (Posgay et al. 1991) alapján határoztuk meg. Ez Magyarország területén 25 km-es vonatkoztatási szintet jelent.

Ilyen módon a domborzat és a mély medencék várható (az Air–Heiskanen által adott, nyomáskiegyenlítésen alapuló) izosztatikus hatása alapján meghatározhatunk egy *izosztatikus Moho-felszínt*. Ez a Moho-felszín egy statikus állapotot tükröz, ami az izosztatikus egyensúly feltételezéséből következik. A geodinamikai mozgások miatt sokszor nem tud kialakulni az izosztatikus egyensúly, így ez csak egy pillanatnyi, az izosztázia alapján feltételezhető Moho-felszín, de az izosztatikus korrekció mértékének meghatározására csak ezt tudjuk használni. A kapott Moho-felszínt a 4. ábra mutatja. A mélységintervallumok durván megfelelnek az

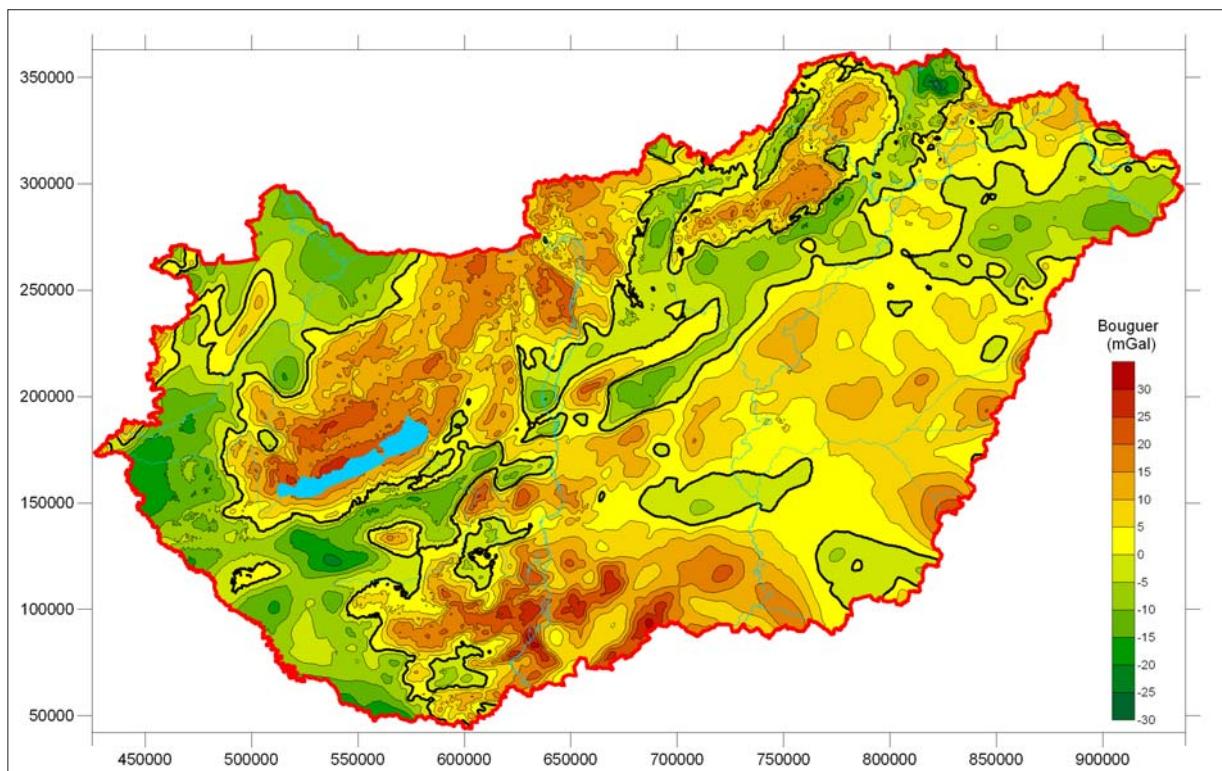


3. ábra | Kilényi-féle mélységtérkép (felszíntől számított mélység) a mintaszelvények nyomvonalával

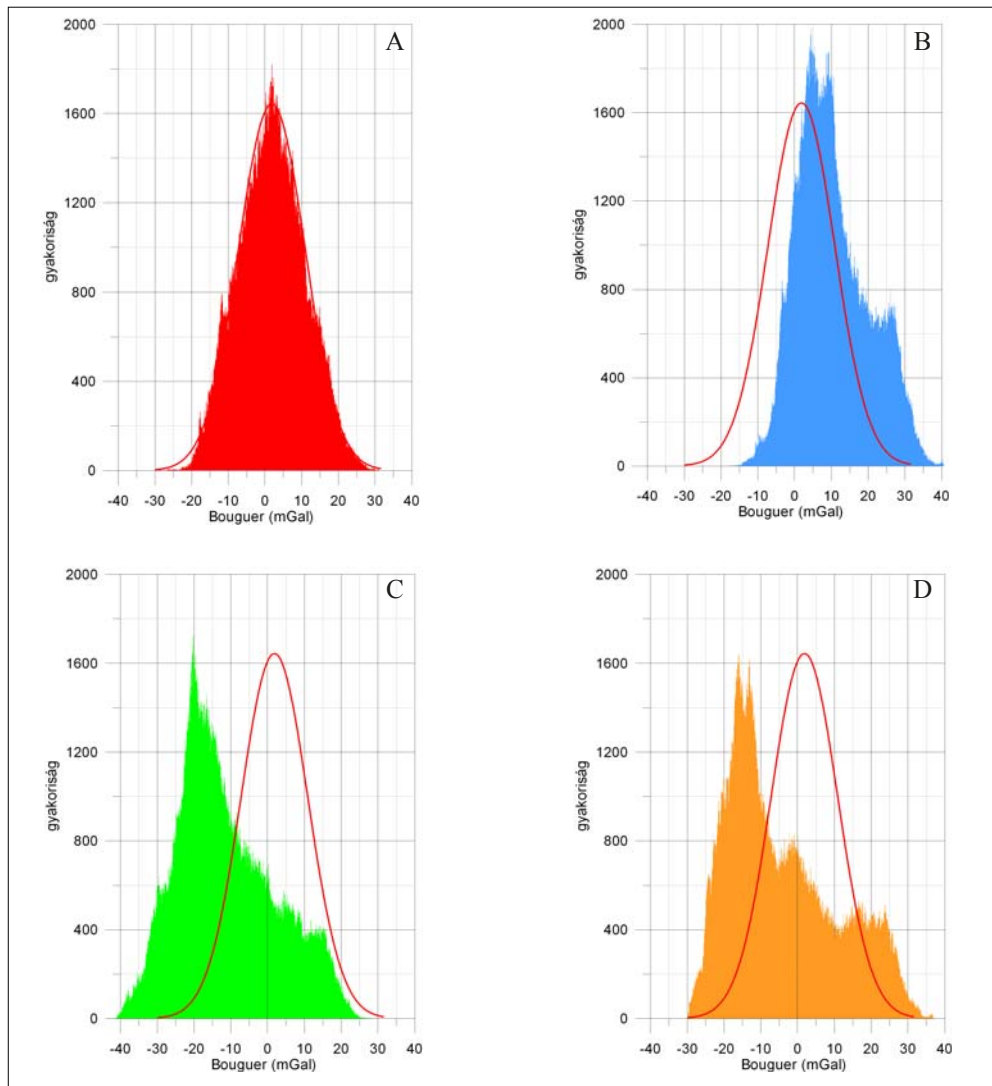
Figure 3 | Basement depth map (Kilényi et al. 1991) with locations of model profiles



4. ábra | A domborzat és a medencemélységek alapján kiszámított izosztikus Moho-felszín a mintaszelvények nyomvonalával
Figure 4 | Hypothetical isostatic surface of the Moho calculated from topography and basement depth with locations of the model profiles



5. ábra | Izosztikus korrekció nélküli alap Bouguer-anomáliatérkép (korrekciós sűrűség 2670 kg/cm^3)
Figure 5 | Base Bouguer anomaly map without isostatical correction (reduction density 2670 kg/cm^3)



6. ábra A rácsadatok histogramjai az eredeti (A), a gyökérszónák (B), a köpenykiemelkedések (C), valamint a teljes izosztatikus (D) hatással korrigált Bouguer-anomáliatérképek esetében

Figure 6 Grid histogram of the original (A), of the root-corrected (B), the antiroot-corrected (C) and the full isostatic-corrected (D) Bouguer anomaly

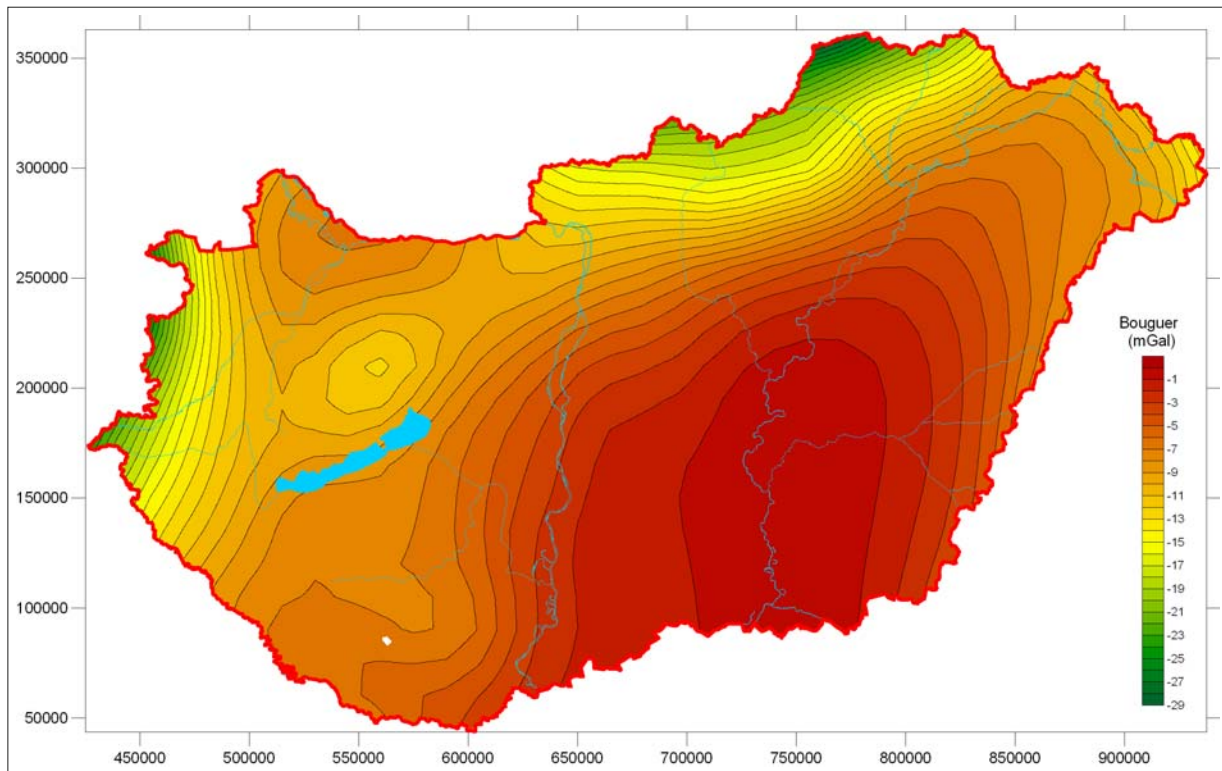
ismert Moho-felszínnek (lásd pl. Lenkey 1999), és csak a Bakony, valamint a Bükk esetén találunk komolyabb eltérést, az előbbi sekélyebb, az utóbbi mélyebb, mint az ismert Moho-szint.

Magyarország területén az egyszerűség kedvéért a maximális *root* hatást és a minimális *antiroot* hatást nullának vettük. Feltételeztük, hogy az Alföldön a legkisebb a hegységek által okozott izosztatikus hatás, illetve a legmagasabb hegyeink esetében a legkisebb, a mély medencék által okozott izosztatikus hatás. Ezeken a helyeken tehát, a minimális hatások legyenek egyenlők nullával!

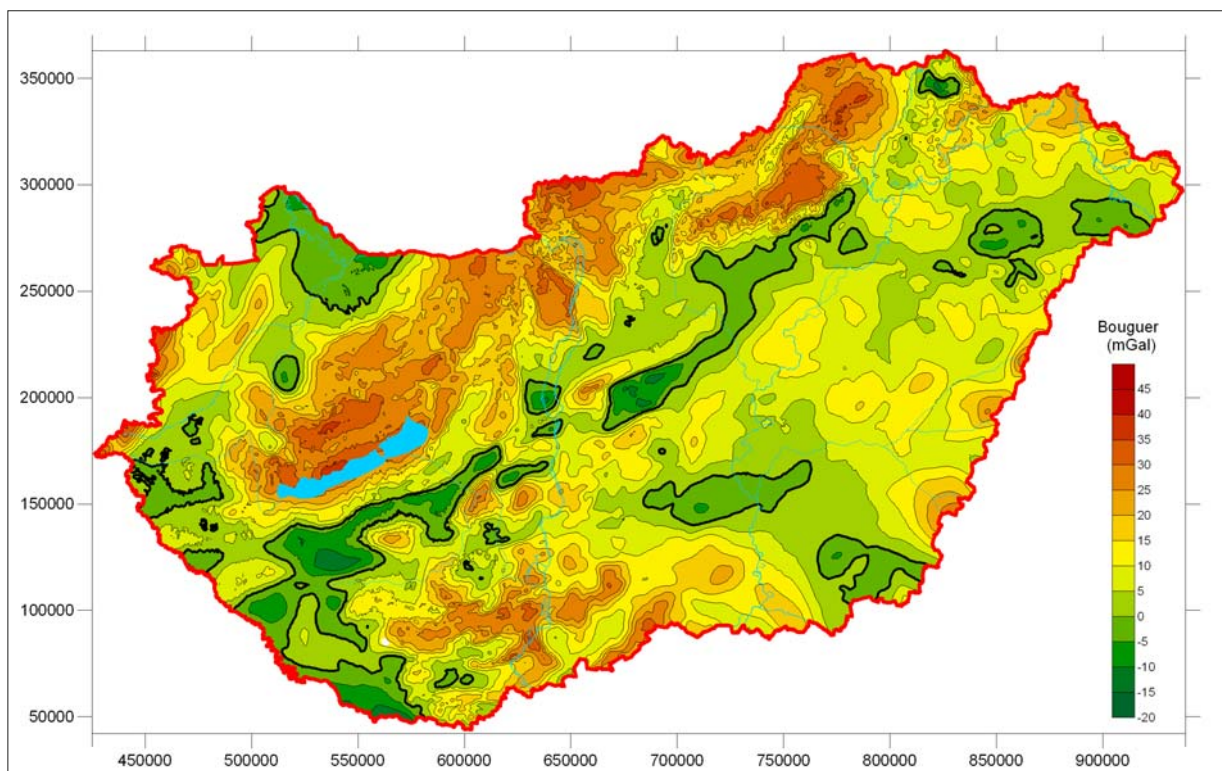
Az izosztatikus gyökérszónák és köpenykiemelkedések gravitációs hatásának kompenzálása után érzékelhető változások jelentkeznek az alap Bouguer-anomáliatérképhez (5. ábra) képest, amelyet például a rácsadatok histogramja (6. ábra) alapján vagy a térképi megjelenítésekben (7–12. ábra) követhetünk nyomon.

Látható, hogy a hegységek izosztatikus hatásának korrigálása pozitív, a mély medencék izosztatikus hatása pedig negatív irányban mozdítja el a histogramot, illetve annak módusát. A gyökérszónák izosztatikus hatása negatív, a köpenykiemelkedések izosztatikus hatása pedig pozitív előjelű! A histogramon megjelenő kisebb maximumok a domborzati kiemelkedések (6.B ábra) és a mély medencék (6.C ábra) hatásának köszönhetőek. A teljes izosztatikus korrekció a normáloszlást mutató Bouguer-anomália histogramjának a szimmetrikus voltát is megbontja, és a térkép szélsőértékeit is kissé módosítja.

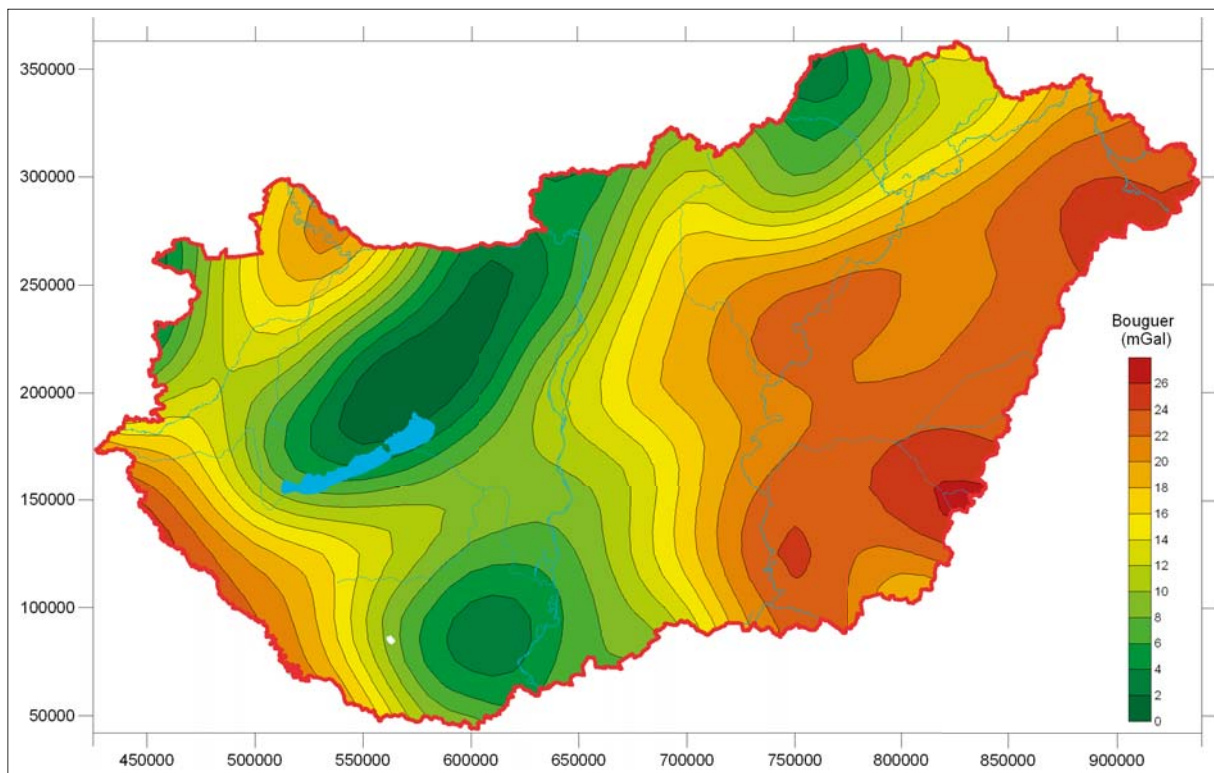
Magyarország területén a gyökérszónák hatása kisebb mértékben módosítja a normál eloszlású Bouguer-értékeket, mint amennyire a köpenykiemelkedések hatása. Ez is azzal van összefüggésben, hogy Magyarország területén nincsenek nagy hegységek, viszont vannak mély medencék!



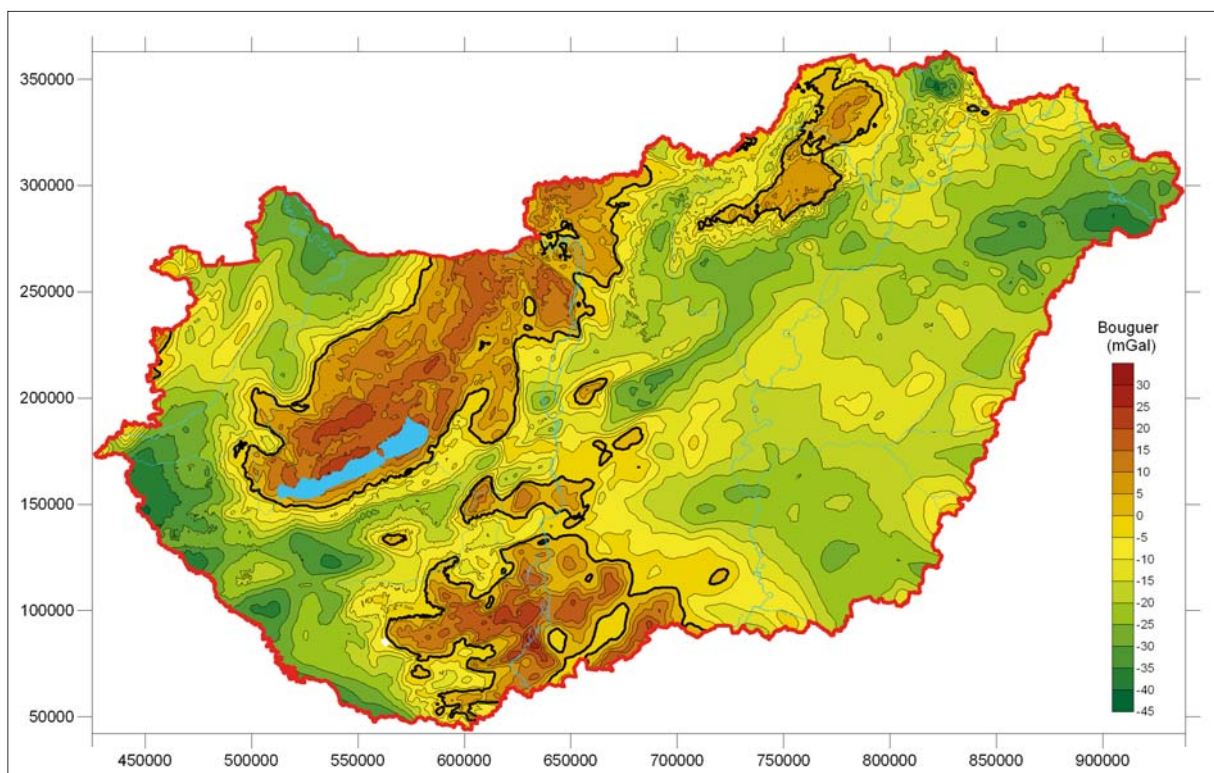
7. ábra | Az iszotatikus gyökérezónák által okozott gravitációs anomáliák (maximális érték = 0)
 Figure 7 | Gravity effect of isostatic roots (maximal value = 0)



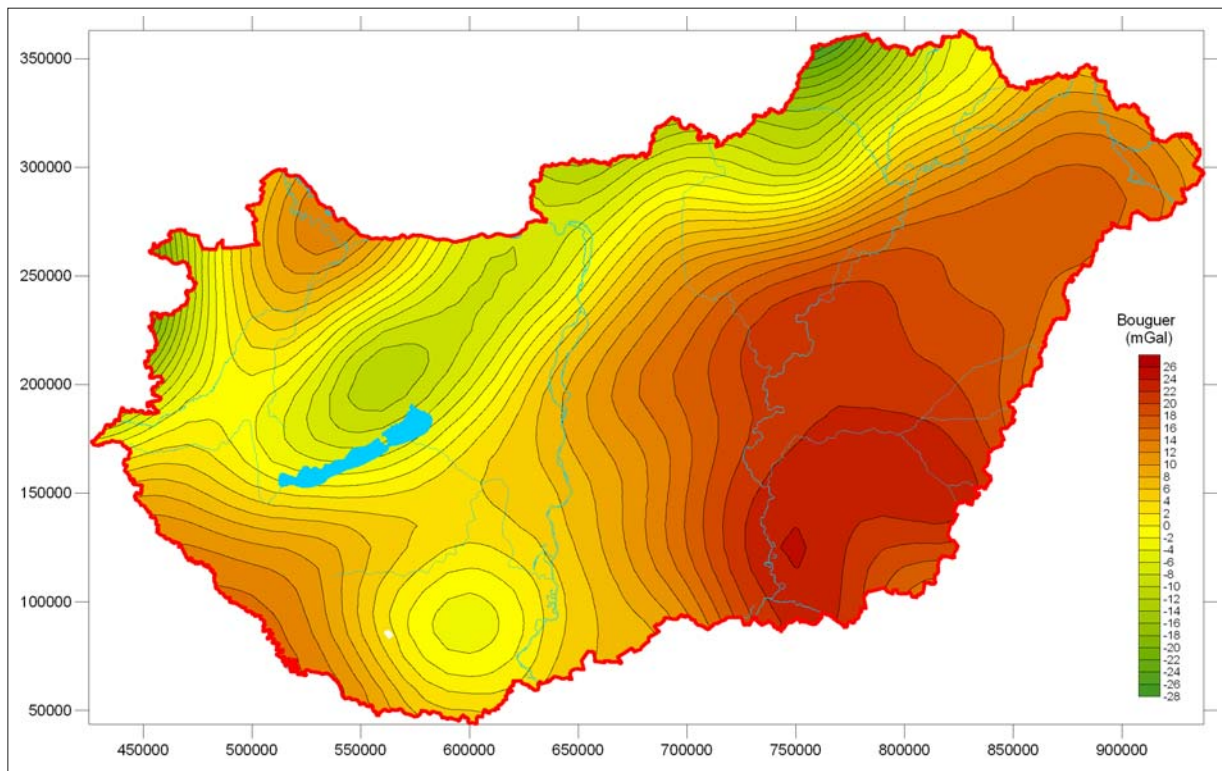
8. ábra | A hegyiségek iszotatikus gyökérhatásától mentes Bouguer-anomáliatérképe
 Figure 8 | Bouguer anomaly map after isostatic correction of roots



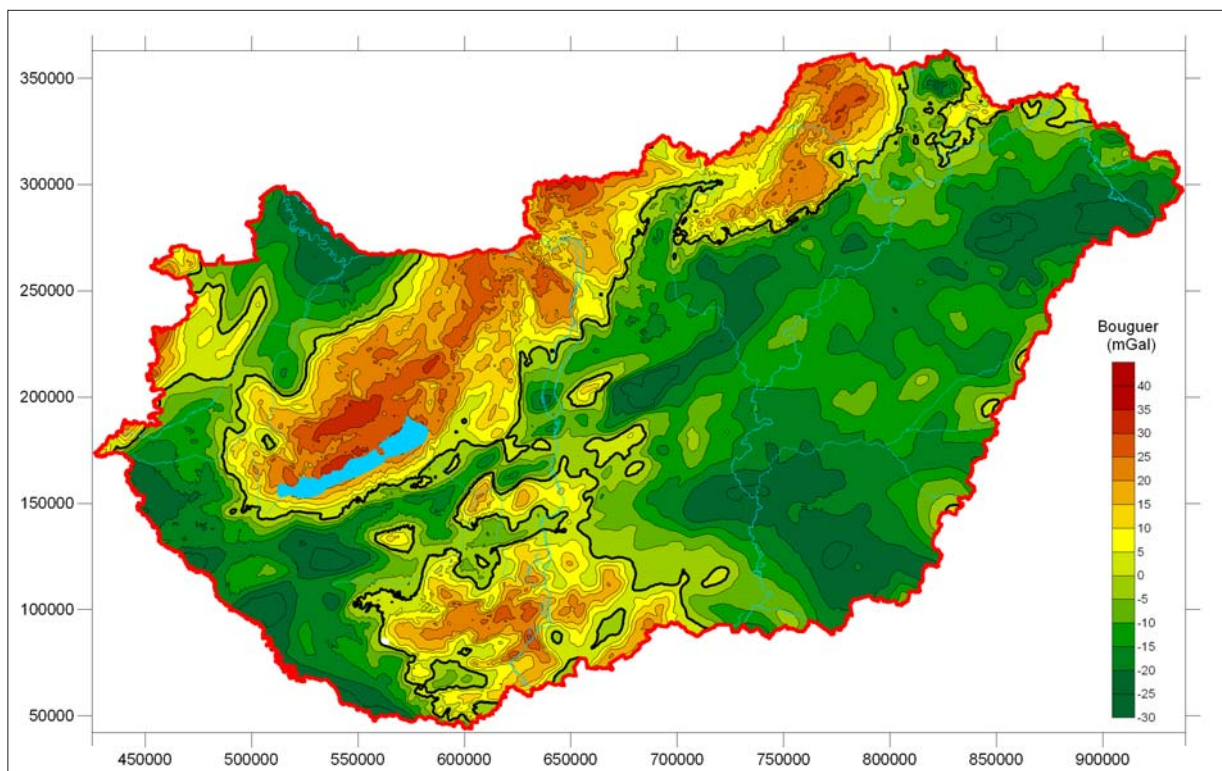
9. ábra | Az izosztikus köpenykiemelkedések által okozott gravitációs anomáliák (minimális érték = 0)
Figure 9 | Gravity effect of isostatic antiroots (minimal value = 0)



10. ábra | A medencék izosztikus hatásától mentes Bouguer-anomáliatérképe
Figure 10 | Bouguer anomaly map after isostatic correction of antiroots



11. ábra | A teljes izosztikus (regionális gravitációs) hatás Magyarország területén
Figure 11 | The full gravity isostatic effect in Hungary



12. ábra | A medencék és a hegységek izosztikus hatásától mentes izosztikus anomáliatérképe
Figure 12 | Bouguer anomaly map after full isostatic correction

Az anomáliatérképeken a jobb szintazonosítás céljából a nullás izovonalat vastagabban jelenítettük meg. Az izovonal helyzetének változása az eloszlásgörbék változásának megfelelően mutatja a korrekciók hatását.

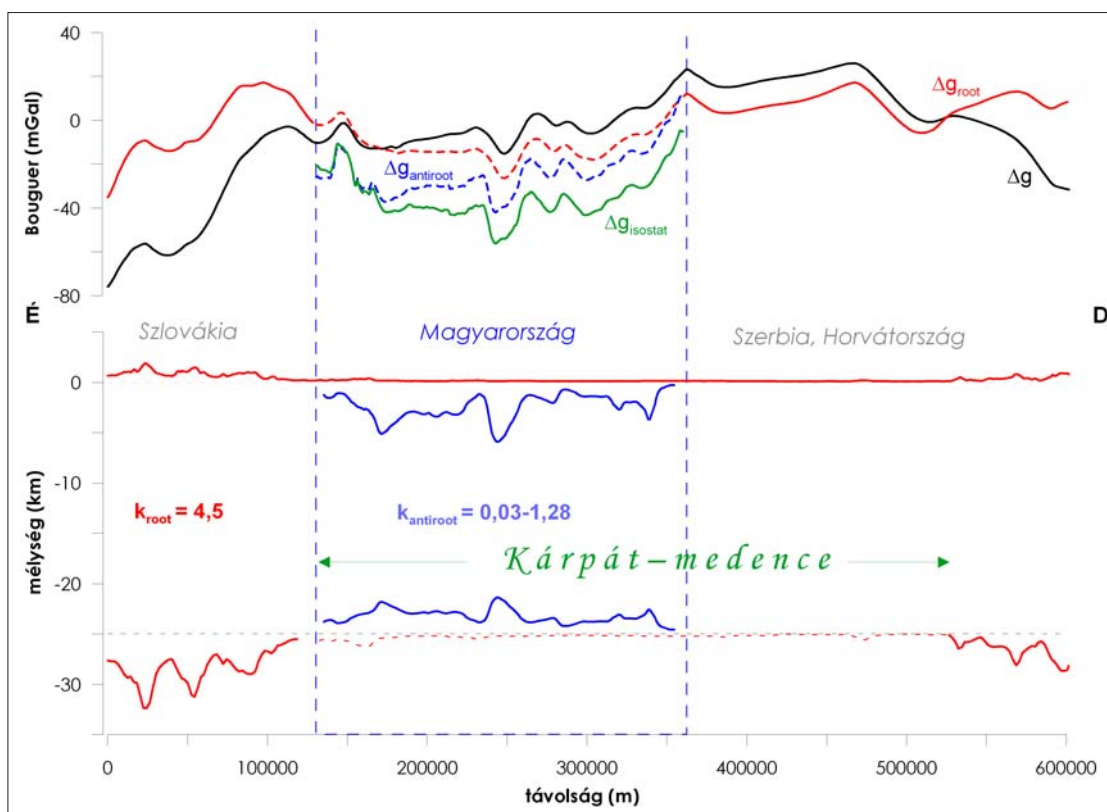
Az eredményeink alapján több, elsősorban meglepőnek tűnő dolog is látszik:

1. Magyarország területén a kétféle izosztikus hatás nagyságrendje ugyanaz, azaz a hegységek és a medencék által okozott izosztikus hatás amplitúdója nagyjából ugyanakkora. Ez abból adódik, hogy a hegységek magassága és a medencék mélysége közötti arány az izosztikus koeficiens (k) arányának felel meg. Ugyanakkor a maximális hatások területi eloszlása már nem ilyen egyenletes, jól láthatóan a köpenykiemelkedések okozta hatás dominál!
2. A gyökérszónák gravitációs hatása negatív, a köpenykiemelkedések gravitációs hatása pozitív előjelű, de mindkét hatás legnagyobb értéke az Alföld területén van, míg a legkisebb hatás a hegyvidéken jelentkezik. Persze ne feledjük, hogy a *root* hatások esetén a nulla a legnagyobb érték, és *antiroot* hatások esetében pedig nulla a legkisebb érték!
3. A kapott izosztikus anomáliatérkép erősebb korrelációt mutat a domborzattal, mint az eredeti korrigálatlan

térkép. A korreláció törvényszerű, ha a medencealjzat mélységét tükrözi vissza a gravitációs anomália. A Bouguer-anomáliaértékek és a domborzat korrelációja Nettleton (1939) szerint a rosszul megválasztott korrekciós sűrűségnek köszönhető. Ez azonban esetünkben kizárható, mivel a kiindulási Bouguer-anomália számításakor a korrekciós sűrűség 2670 kg/m^3 volt, ami a nagy sűrűségű medencealjzat sűrűségének felel meg!

4. Az izosztikusan korrigált gravitációs térkép egy, az Alföld üledékes medencéjének megfelelő gravitációs képet mutat – a medencealjzat-mélységgel összhangban –, ami jelzi az izosztikus korrekció létjogosultságát. A visszamaradó lokális maximumok egy része egyértelműen mágneses anomáliákhoz köthető, azaz kéregbeli sűrűség-inhomogenitásokat jeleznek.

A térképi ábrázolások nagyon látványosak, de a színezés megválasztása módosíthatja a megjelenést. A megjelenítés során ugyanazt a lineáris színskálát alkalmaztuk az eredeti és az izosztikusan korrigált Bouguer-anomália esetében, de eltérő minimum- és maximumértékek mellett, ezért a nullás szintvonalat vastagabb vonallal jelenítettük meg. Egy másik, hasonló színskálát alkalmaztunk az izosztikus gyö-



13. ábra Izosztikus gyökérszónák és köpenykiemelkedések (alul) és azok hatása a Bouguer-anomáliaértékére (felül) az É-D-i szelvény nyomvonalában. g – az eredeti Bouguer, Δg_{root} – csak a gyökérszónák hatásával korrigált Bouguer, $\Delta g_{antiroot}$ – csak a köpenykiemelkedések hatásával korrigált Bouguer, $\Delta g_{isostat}$ – Bouguer-anomália a teljes izosztikus korrekció után, k_{root} – izosztikus koeficiens értéke a hegységek esetében, $k_{antiroot}$ – izosztikus koeficiens értéktartománya a medencék esetében

Figure 13 Isostatic roots, antiroots and their gravity influence on the Bouguer anomalies along a North–West profile. Δg – Bouguer anomaly, Δg_{root} – root-corrected Bouguer, $\Delta g_{antiroot}$ – antiroot-corrected Bouguer, $\Delta g_{isostat}$ – Bouguer anomaly with full isostatical correction, k_{root} – isostatical coefficient in case of roots, $k_{antiroot}$ – isostatical coefficient in case of antiroots

képzóna, a köpenykiemelkedés, valamint a teljes izosztatikus hatás megjelenítése esetében is.

A korrekciók hatásának tanulmányozására alkalmasabbnak tűnik a különféle adatok szelvény menti bemutatása.

A gyökérszónák és köpenykiemelkedések hatása szelvények mentén

Regionális É–D irányú szelvény (13. ábra)

Erre legjobb talán az egyik, korábban már vizsgált közép-európai É–D lefutású szelvény (lásd 3. ábra – Kiss 2010, illetve a 3. és 4. ábra a magyarországi szakaszt mutatja), ami durván az $Y_{EOV} = 685\,000$ -es koordináta mentén halad.

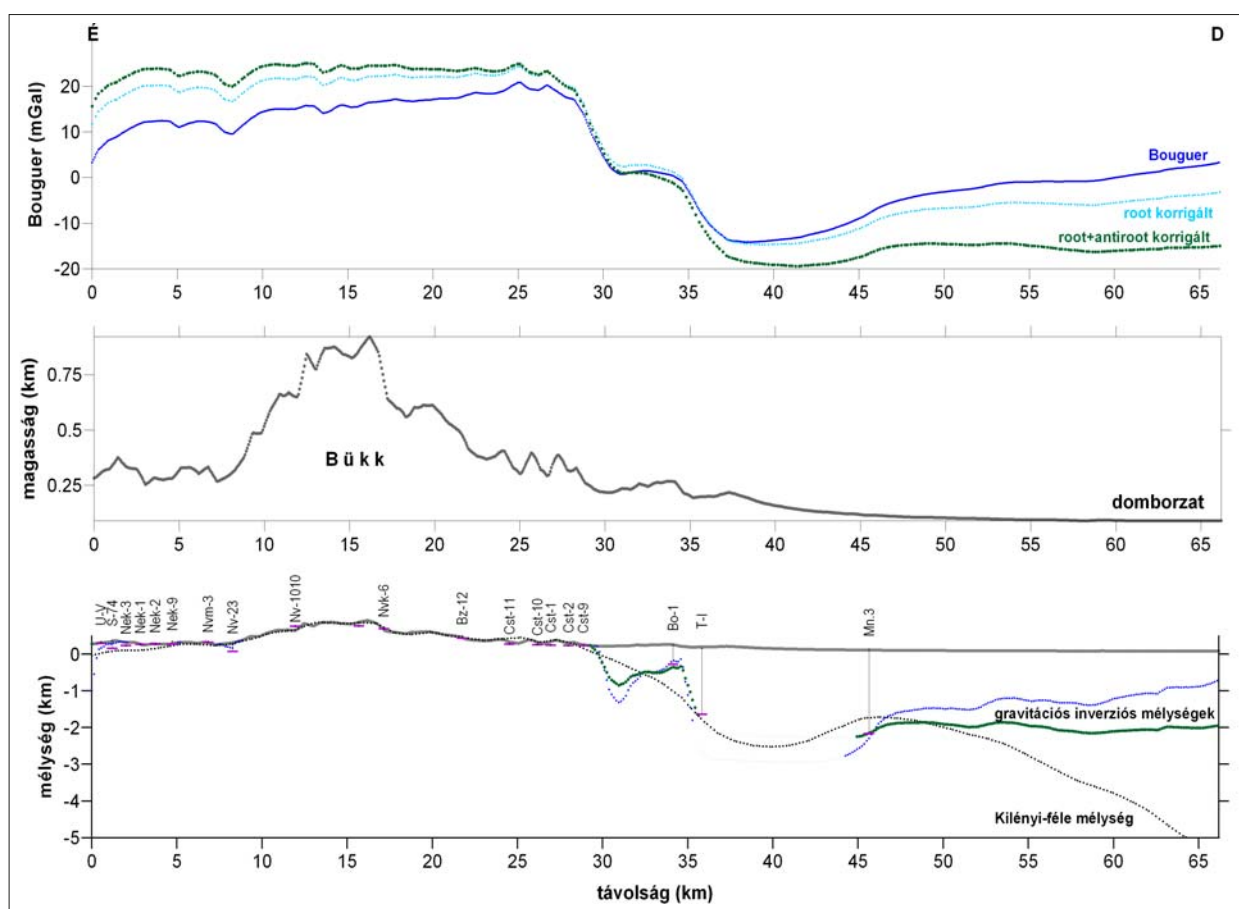
A hegységek izosztatikus gyökérszónáinak hatását a szelvény teljes hosszában ki lehetett számítani, míg a mély medencék által okozott izosztatikus köpenykiemelkedéseket csak a magyarországi adatokból tudtuk meghatározni. Az izosztatikus gyökérszónák és köpenykiemelkedések gravitációs hatását is meghatároztuk, de a hatásokat együttesen figyelembe venni csak Magyarország területére lehetett.

Az eredményeket a 13. ábra mutatja, alul az izosztatikus modell látszik, a domborzat alapján meghatározott gyökérszóna (piros vonal, szaggatottan jelölve ott, ahol szerepe elenyésző) és az üledékes medence által determinált köpenykiemelkedés (kék vonal, vajdasági területen adathiánnyal).

A gyökérszónák (13. ábra alul, piros vonal) hatásának korrigálása után a kapott Bouguer-anomália (13. ábra felül, piros vonal) hegyvidék (Kárpátok és Dinaridák) felett látványosan pozitív irányban mozdult el, kiejtve a gyökérszónák negatív hatását. A Kárpát-medence területén a Bouguer-értékek csökkenése figyelhető meg, amely oldalhatásokból és a +100 m-es átlagos magasságból adódik.

A köpenykiemelkedések (13. ábra alul, kék vonal) hatásának korrigálása után a Kárpát-medence magyarországi szakaszán a Bouguer-érték szintén csökken (13. ábra felül, kék szaggatott vonal). Sajnos a Vajdaság területére (350–525 km) nem tudtuk kiszámítani a köpenykiemelkedésből származó korrekciót, pedig a 13. ábra alapján az analógia nyilvánvaló, és ott is kellene ezzel a hatással számolni!

A gyökérszónák és köpenykiemelkedések együttes izosztatikus hatásának korrigálása után a kapott anomáliagörbe jelentős minimumzónát jelez a Kárpát-medence magyarországi szakaszán (13. ábra felül, zöld vonal).



14. ábra | Közel É–D irányú gravitációs modellszelvény a Bükk és a hegység D-i előterén keresztül kétréteges inverziós mélységmeghatározás eredményeivel

Figure 14 | A North–South oriented gravity model profile at the foreground of Bükk mountains with the depths of two-layered gravity inversion

Szelvény a Bükk-hegység D-i peremén (14. ábra)

Egy másik példát is bemutatunk, a Bükk D-i előterét, ahonnan az egész elképzelés⁶⁾ egy értelmezési probléma miatt kiindult. A gondot a Bouguer-anomália és a Kilényi-féle medencealjzat lefutásának ellentétes irányú viselkedése jelentette a Vatta-Maklári ároktól D-re. A medencealjzat szintje D-i irányban a Kilényi-féle mélységadatok alapján egyre mélyül (14. ábra, alul), miközben a Bouguer-anomália értéke növekszik (14. ábra, felül).

A korrigálatlan Bouguer-anomália menetében, egy regionális, É-i irányú monoton csökkenés mutatható ki, amely a hegység É-i és D-i előterében is jól azonosítható (nyilván nem azonosítható a Bükk D-i vetőzónájában, ahol a szerkezeti lépcső hatása felülír minden más hatást). A felszín közeli földtani adatok (pl. a szelvény nyomvonalában lévő mélyfúrások) semmivel sem igazolták a gravitációs tér ilyen jellegű változását. Nyilvánvalóan egy mélyből származó hatással van dolgunk, amelynek az eredetét nem ismerjük.

Az izosztatikus gyökérvonál által okozott hatás kiszűrése csak csökkentette a regionális hatást, de nem szüntette meg. A mély üledékes medence okozta izosztatikus köpenykiemelkedés hatásának kiszűrése után a Bouguer-anomália-görbe É–D-i emelkedése eltűnt. Az Alföldön 15 mGal-os állandó értékre beálló Bouguer-anomália már elfogadható, mivel 2–3 km-es mélységben az üledékek a medencealjzatnak megfelelő sűrűséget vesznek fel, tehát eltűnik a sűrűségkontraszt az üledékek és a medencealjzat-képződmények között. Az 1. ábra alapján látható, hogy a laza üledékek sűrűségváltozása 2000 és 5000 m között ugyanakkora, mint 0 és 500 m között!

A tömörödési trend alapján, az ismert, 2 km-nél mélyebb medencék esetén a gravitációs adatokból kiindulva már csak azt lehet megmondani, hogy a nagy sűrűségű medencealjzatot ennél nagyobb mélységben kell keresni, illetve azt, hogy az aljzatban megjelenő esetleges sűrűséginhomogenitások (pl. törésvonalak csökkent sűrűségű zónái vagy a kéreg összetételének változásai) hol jelentkeznek.

Összefoglalás

Az Alföld területe a gravitációs Bouguer-anomálián alapuló értelmezések szempontjából hosszú ideig problémát jelentett, mert a nagy mélységű üledékes medence felett nagy Bouguer-anomáliaértékek jelentkeztek. Kis területek gravi-

Jegyzetek

- ¹⁾ Regionális anomália esetünkben azoknak az anomáliáknak összessége, amelyek Moho mélységű hatásoktól származnak.
- ²⁾ Az eredeti képletben a $\sigma_u = 1027 \text{ kg/m}^3$, mivel az óceáni kéreg felett tengervíz van
- ³⁾ Szabó és Páncsics (1999) közzefizikai vizsgálatok alapján a harmadidőszak üledékekre szintén publikáltak sűrűség–mélység összefüggést!
- ⁴⁾ A Kilényi-féle mélységtérkép elkészítésekor a gravitációs adatokat is figyelembe vették, de nem ez volt a mélységmeghatározás

tációs feldolgozásai is gyakran a fűrási adatoknak ellentmondó, ellentétes irányban dőlő medencealjzat-felszint valószínűsítettek.

A jelenségnek nyilvánvalóan földtani eredetű okai vannak, de a felszín közeli földtani felépítés erre nem ad magyarázatot. Egyre több információ áll rendelkezésre a nagyobb mélységekből, pl. litoszférakutató szeizmikus mérésekből, amelyet felhasználva tovább vizsgálhatjuk a kéreg felépítését. Térképi adatrendszerek esetén minél nagyobb mélységet vizsgálunk, annál nagyobb területről kell adattal rendelkezniünk ahhoz, hogy a hatásokat felismerhessük.

A Kárpát-medence gravitációs adatai rámutattak a domborzat és a Moho-felszín kapcsolatára, ahonnan már csak egy lépés volt az izosztázia hatásának a felismerése.

A domborzati adatokból kiindulva az izosztázia alkalmazása a hegységek esetén magyarázatot ad a gyökérvonál negatív gravitációs anomáliáira. Sík területek esetén azonban más tényező, a medencék mélysége határozza meg az izosztatikus egyensúlyt. A hegységek sűrűség-többlete az izosztázia miatt köpenybe nyúló kéreg-gyökérvonálakat okoz, a mélymedencék sűrűséghiánya kéregbe nyúló köpenykiemelkedéseket eredményez, azaz a Moho felszínének mélyégi változását idézik elő.

Az izosztatikus korrekcióval ezeket a hatásokat próbáltuk eltávolítani a Bouguer-anomáliatérképből. A korrekció egyértelműen csökkentette az Alföld gravitációs alapszintjét a környezetéhez képest. A kapott izosztatikus anomáliatérképen az Alföld területe mély medencének megfelelő minimumzóna.

A mély medencék izosztatikus hatásának meghatározása során kényszerből egyszerűsítéseket kellett alkalmazni. A kiindulási adatrendszerekben is van némi bizonytalanság, de az adatok pontosítása esetén az egész számítás bármikor megismételhető!

Összességében, az izosztázia elvéből kiindulva, az alföldi magasabb gravitációs Bouguer-anomália szintjének lehetséges okára sikerült magyarázatot találni!

Utószó

Évekkel ezelőtt, egy ELGI-beszámoló után, egy kedves kollégával (sajnos már nincs közöttünk) jöttünk fel a liftben, aki bajsza alatt mosolyogva a gravitációs módszertani előadással kapcsolatban megjegyezte: „én meg azt hittem, hogy a gravitációban korábban már mindent megoldottunk” – a bajsza alatt talán most is mosolyogna...⁷⁾

alapja, hanem a mélyfűrási adatok és a szeizmika. A gravitáció csak az ismeretlen, fűrási és szeizmikus mérések nélküli medencék mélység-lefutásának meghatározása során volt mérvadó, ennek ellenére ez hibaforrás lehet.

⁵⁾ A Kilényi-féle mélységtérkép tartalmazza a Bécsi-medence és a Szlovák-Alföld mélységadatait is, de a vajdasági mélységadatok hiánya miatt ezeket nem használtam fel!

⁶⁾ Mély medencék izosztatikus hatásának vizsgálata

⁷⁾ Fejes Imre[†] (1943–2006)

Hivatkozások

- Athy L. F., (1930): Compaction and oil migration. American Association of Petroleum Geologist Bulletin 14, 25–35
- Heiskanen és Veining Meinesz (1958): The Earth and its gravity field. McGraw-Hill Series in the Geological Sciences, New York, p. 136
- Kilényi É. et al., (1991): Pre-Tertiary Basement Contour Map of Carpathian Basin Beneath Austria, Czechoslovakia and Hungary. Geophysical Transactions 36/1–2
- Kiss J., (2010): Regionális gravitációs anomáliák, izosztikus hatások Magyarországon. Magyar Geofizika 50/4, 153–171
- Lenkey L., (1999). Geothermics of the Pannonian basin and its bearing on the tectonics of basin evolution. PhD Thesis, Vrije Universiteit, Amsterdam, Netherlands
- Mészáros F., Zilahi-Sebess L., (2001): Compaction of the sediments with great thickness in the Pannonian Basin. Geophysical Transactions 44/1, 21–48
- Nettleton L. L., (1939): Determination of density for reduction of gravity observations. Geophysics 4, 176–183
- Parker R. L., (1973): The rapid calculation of potential anomalies. Geophysical Journal 31, 447
- Posgay K., Albu I., Mayerkova M., Nakladalova Z., Ibrmajer I., Blizkovsky M., Aric K., Gutdeutsch R., (1991): Contour map of the Mohorovičić discontinuity beneath Central-Europe. Geophysical Transactions 36/1, 7–13
- Szabó Z., Páncsics Z., (1999): Rock densities in the Pannonian basin – Hungary. Geophysical Transactions 42/1–2, 5–28
- Thatcher W., Pollitz F., (2010): Continental Lithospheric Strength in Actively Deforming Regions. Geophysical Research Abstracts Vol. 12, EGU2010-13540, EGU General Assembly, Wien