

A GRAVIMETRIA MAI JELENTŐSÉGE ÉS HELYZETE MAGYARORSZÁGON

Völgyesi Lajos

az MTA doktora, egyetemi tanár
BME, Általános és Felsőgeodézia Tanszék
MTA–BME Fizikai Geodézia és Geodinamikai Kutatócsoport
volgyesi@eik.bme.hu

Előzmények

1583 táján vette észre *Galileo Galilei*, hogy a lengő inga periódusideje állandó, amikor a pisai székesegyházban egy lámpa lengését hasonlította össze a saját pulzusával. Hamarosan kiderült, hogy az inga lengésidejére hatással van a helyszín; az inga a tengerszinten és a pólusok közelében gyorsabban, a magasabb hegyeken és az egyenlítő vidékén viszont lassabban leng. Ez a felismerés indította el a földi nehézségi erőterrel kapcsolatos vizsgálatokat.

A magyarországi gravitációs kutatások hagyománya és története világviszonylatban is kiemelkedő. Hazánk mai területén az első jelentősebb munkák az osztrák *Robert von Sterneck* nevéhez fűződnek, aki 1883-tól végzett ingaméréseket a róla elnevezett invariábilis relatív ingával. A nehézségi gyorsulás abszolút értékének első meghatározója *Gruber Lajos* volt 1885-ben, aki a mérését reverziós ingával végezte. A gravimetria területén azonban *Eötvös Loránd* munkássága hazai és nemzetközi vonatkozásban is messze kiemelkedik, neki köszönhető a róla elnevezett inga világméretű elterjedése és gyakorlati alkalmazása, de igen fontosak az elméleti kutatásai is (Szabó, 1999). Tudománytörténeti szempontból fontos, hogy Eötvös korát messze megelőzve, már 1901-ben megépítette az első gravimétert, azonban a kísérleti mérések

elvégzése után az eszközt nem találta fejlesztésre alkalmasnak, és továbbiakban nem foglalkozott ezzel a műszerrel (Szabó, 2004). Ez a graviméter az Eötvös Loránd Geofizikai Intézet (ELGI) székházában az Eötvös Emlékgyűjteményben jelenleg is megtekinthető. A hazai gravitációs munkákban jelentős szerepet játszott *Oltay Károly* is, aki a Potsdami Geodéziai Intézetben meghatározott nehézségi gyorsulási értéket 1908 és 1915 között többször is levezette a Budapesti Műszaki Egyetemen létesített gravitációs alappontra, amely hosszú évekig a hazai mérések kiinduló értéke volt.

A hazai gravimetria fontos mérföldköve a Nemzetközi Geodéziai Szövetség (IAG) 1906-ban Budapesten megrendezett konferenciája volt, amelynek egyik legnagyobb jelentősége, hogy Eötvös Loránd tudományos tevékenységének nemzetközi szakmai támogatásán keresztül megteremtette a magyar geofizikai kutatások önállóságának alapját, lehetővé tette a terepi mérések ki-terjesztését és a további műszerfejlesztéseket (Völgyesi és mások, 2006). Ennek következtében világszerte felpezsdültek és felértékelődtek a gravitációs kutatások. Eötvös Loránd munkásságának pozitív hozományát a magyarországi gravitációs adatok mennyisége és minősége tekintetében mind a mai napig élvezhetjük.

Az utóbbi évtizedekben a gravitációs

kutatások területén elsősorban az ELGI tevékenységét kell kiemelni. A kiváló alaphálózatunk folyamatos fejlesztési eredményei *Csapó Géza* munkásságához kötődnek.

A mérési technika és fejlődése

A *nehézségi erőtér* meghatározása abszolút, relatív és gradiensmérésekkel lehetséges. Míg az abszolút mérések célja egyetlen pontban végzett mérés alapján megtudni a nehézségi erőtér teljes értékét, addig a relatív mérésekkel különböző pontok között az erőtér megváltozását határozzuk meg. Relatív módszerrel abszolút érték csak akkor nyerhető, ha a mért pontok legalább egyikén ismerjük a nehézségi erőtér abszolút értékét.

Fontos megjegyezni, hogy a földi nehézségi erőt általában a két legjelentősebb összetevő: a Föld tömegének Newton-féle tömegvonzásából származó erő és a Föld tengely körüli forgásából keletkező centrifugális erő eredőjeként értelmezzük. Emiatt élesen meg kell különböztetni a *tömegvonzási, vagy gravitációs erő* és a *nehézségi erő* fogalmát – ugyanis a gravitációs (tömegvonzási) erő a nehézségi erőnek csupán az egyik összetevője (Völgyesi, 2005). Szigorú értelemben azonban a nehézségi erő nemcsak a Föld tömegvonzása és a tengely körüli forgásból származó centrifugális erő eredője, hanem ehhez még hozzájön a Földön kívüli égitestek (elsősorban a Hold és a Nap tömege) vonzó hatásának, valamint a Föld és a Hold, illetve a Föld és a Nap közös tömegközéppontja körüli keringésből származó centrifugális erők eredője, amelyet *árapálykeltő erőnek* nevezünk.

Így végül is a Föld tetszőleges pontjában valamely testre ható nehézségi erő (a test súlya):

$$\mathbf{G} = \mathbf{F} + \mathbf{F}_f + \mathbf{F}_a,$$

ahol \mathbf{F} az m tömegre ható Newton-féle tömegvonzás, \mathbf{F}_f a forgási centrifugális erő és \mathbf{F}_a a Földön kívüli égitestektől származó árapálykeltő erők eredője.

Az abszolút meghatározásokra szolgáló mérési eszközök általában a különféle ingák, vagy az ejtés és a hajtás fizikai alapelvein működő műszerek; ugyanakkor két tetszőleges pont közötti különbségek meghatározására a különböző alapelven működő graviméterek és a relatív ingák használhatók. A nehézségi gyorsulás g abszolút értékének meghatározására elvileg minden olyan fizikai jelenség alkalmas, amelyben a nehézségi erőtérnek (gyorsulásnak) szerepe van, és amely törvényszerűséget leíró összefüggésből a nehézségi erőtér olyan fizikai mennyiségekkel fejezhető ki, amelyek mindegyike megbízhatóan mérhető.

A nehézségi erőtér meghatározásának harmadik lehetőségét az erőtér gradienseinek mérése adja. Ezekből a mérésekből megkapjuk, hogy a különböző irányokban, elemi távolságon mennyivel változik meg a nehézségi erőtér értéke. A gradiensek meghatározására az Eötvös-inga és az újabb (pl. a GOCE műholdon elhelyezett) gradiométerek szolgálnak.

Érdekes nyomon követni a mérési pontosság fejlődését (*1. táblázat*). Az első fonálinga-mérésekkel mindössze három értékes jegyre, csupán $0,1 \text{ cm/s}^2$ pontossággal sikerült meghatározni a nehézségi erő értékét. Később speciális fizikai ingákkal elértek a mGal pontosságot ($1 \text{ Gal} = 1 \text{ cm/s}^2$; az elnevezés Galilei tiszteletére született, a gravimetriában általánosan alkalmazott mértékegység). A nehézségi erőtér mérésében az igazi előretörést az asztatizáció alapelveit felhasználó kvarc- és fémrugós graviméterek alkalmazása jelentette, ezekkel a mérési pontosság $10^{-6} \div 10^{-7} \text{ m/s}^2$ értékre javult. Napjainkban az abszolút lézergraviméterekkel elérhető a μGal , sőt a szupravezető graviméterekkel akár a nGal pontosság. Az abszolút lézergraviméterek kiemelkedő jelentőségét az adja, hogy a relatív graviméterekkel ellentétben igen nagy pontossággal a g abszolút értékét mérik.

1. táblázat. A nehézségi erőter mérési technikájának fejlődése.

| mérési eszközök | módszer | felbontóképesség [m/s ²] | nagyságrend |
|--|------------------|---|--------------------|
| egyszerű fonálinga | abszolút | 10 ⁻³ ÷ 10 ⁻⁴ | |
| speciális fizikai ingák, reverziós ingák | abszolút/relatív | 10 ⁻⁵ | (mGal) |
| korábbi kvarc- és fémrugós graviméterek | relatív | 10 ⁻⁶ ÷ 10 ⁻⁷ | |
| újabb (LaCoste-Romberg) graviméterek | relatív | 10 ⁻⁷ ÷ 10 ⁻⁸ | |
| abszolút lézergaviméterek | abszolút | 10 ⁻⁸ | (μGal) |
| szupravezető graviméterek | relatív | 10 ⁻¹⁰ ÷ 10 ⁻¹¹ | (nGal) |
| Eötvös-inga | gradiensmérés | 10 ⁻⁹ 1/s ² | 1 Eötvös egység |
| GOCE műhold gradiométere | gradiensmérés | 10 ⁻¹¹ 1/s ² | 0,01 Eötvös egység |

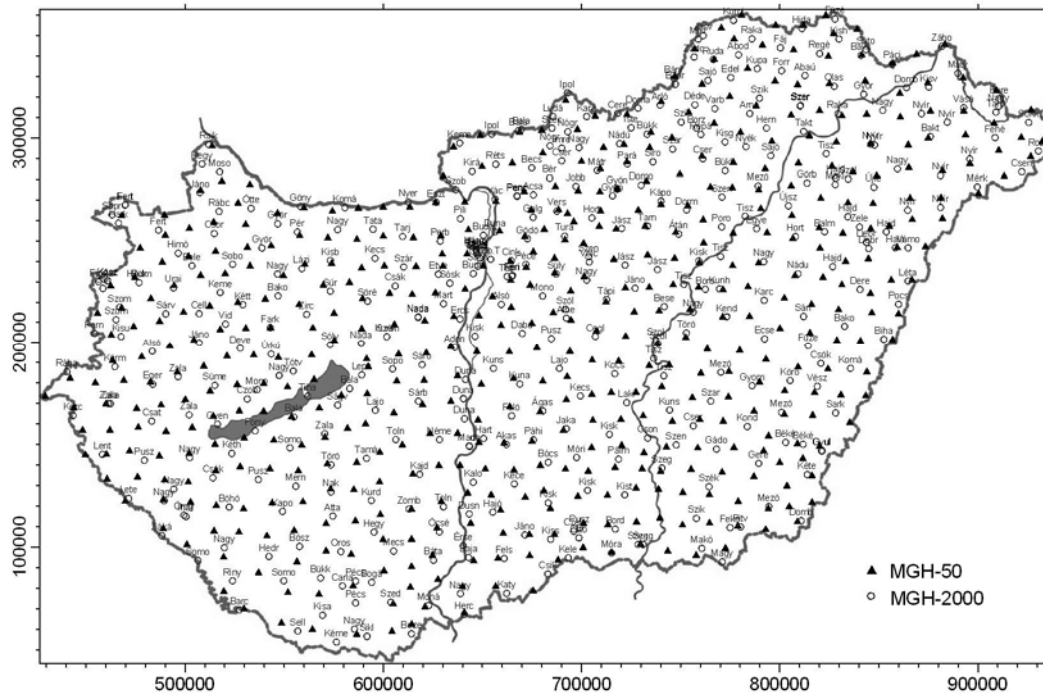
Gravitációs mérések Magyarországon

Hazánkban az eddigi gravitációs kutatók és mérések kettős céllal, egyrészt a Föld alakjának és belső szerkezetének tanulmányozása, másrészt a nyersanyagkutatás szolgálatában történtek. A kezdeti méréseket és vizsgálatokat geodéziai céllal végezték, miután *George Stokes* 1849-ben levezette azt az alapösszefüggést, amely lehetőséget teremtett a gravitációs rendellenességek felhasználásával a Föld elméleti alakjának, a *geoid*nak meghatározására. A nyersanyagkutatásban, és elsősorban a szénhidrogének keresésében a gravitációs kutatások jelentőségét 1916-ban az Egbell környéki sikeres Eötvös-inga-méréseket követően ismerték fel. A gravitációs módszerrel végzett nyersanyagkutatásban az 1930-as évek végétől megjelentek a kisméretű, könnyen kezelhető graviméterek, amelyek a 60-as évek végére egyeduralgokká váltak a gravitációs kutatásokban.

Az első jelentősebb mennyiségű mérést *Sterneck* végezte, 1896-ig a Monarchia területén mintegy 508 állomáson határozta meg ingamérésekkel a nehézségi erő értékét, amelyből 198 pont a történelmi Magyarország területére esett (Szabó, 2004). Később, 1908 és 1933 között *Oltay* és munkatársai relatív ingamérésekkel 110 pontból álló gravitációs alaphálózatot létesítettek. A mérési pontokat általában épületek pincéiben helyezték el, a 110 állomás-

ból 75 esett Magyarország jelenlegi területére. A mérések során 33 korábbi *Sterneck*-féle állomáson is végeztek méréseket, amelyek lehetővé tették a *Sterneck*-féle hálózat megbízhatóságának ellenőrzését. Az összehasonlító mérések alapján a *Sterneck*-féle mérések megbízhatóságára ±22 mGal értéket kaptak, míg a saját mérések középhibájaként ±1,5 mGal értéket adtak meg (Szabó, 2004).

A magyarországi gravitációs anomáliákról egészen az 1940-es évek végéig nem volt áttekinthető térkép. Ennek fő oka, hogy a geofizikai kutatásokat a 30-as évek elejétől kezdve különböző intézmények (a Dunántúlon a MAORT, az Alföldön viszont az ELGI és a MANÁT) végezték egységes irányítás nélkül (Szabó, 2004). Egységes gravitációs alaphálózat hiányában azonban igen nagy nehézséget okozott a különböző években, különböző műszerekkel végrehajtott, sok esetben egymáshoz nem csatlakozó mérések egységbe foglalása. Az egyre szaporodó terepi mérések, és egy országos Bouguer-anomália térkép elkészítésének szándéka miatt a 40-es évek végére elengedhetlenné vált egy országos gravitációs alaphálózat létesítése. Az igény kielégítésére 1950 és 1955 között az ELGI létrehozta a hazánk teljes területére kiterjedő MGH-50 elnevezésű egységes gravimetriai alaphálózatot. A hálózat 16 db I. rendű és 493 db II. rendű pontot tartalmazott (1. ábra), a pont-helyek kiválasztásának elsődleges szem-



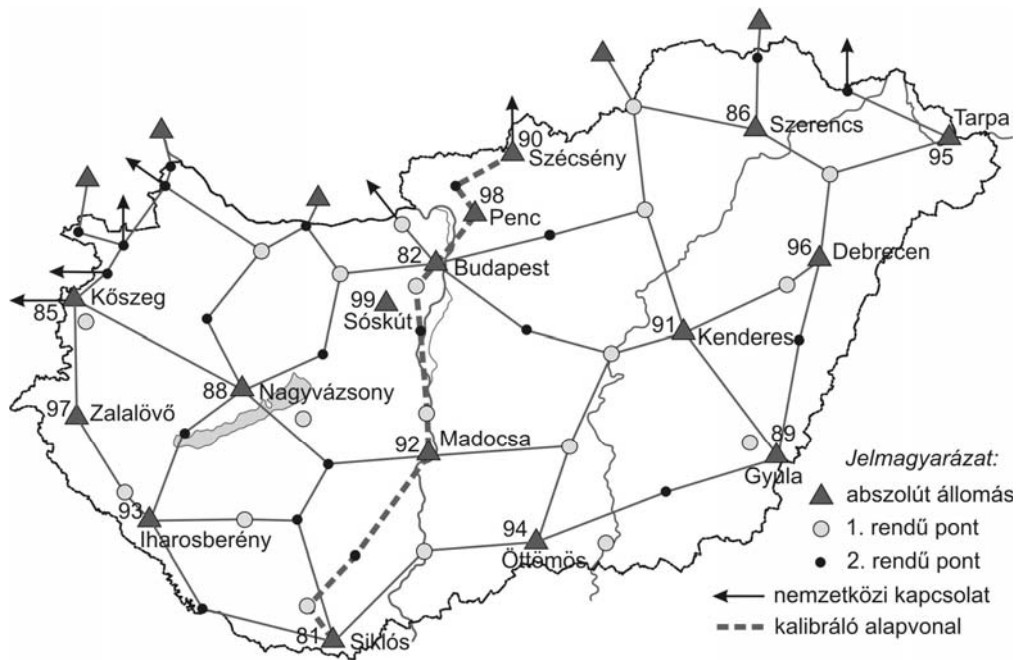
1. ábra. Az MGH-50 és az MGH-2000 gravitációs alaphálózat pontjai

pontja a gyors megközelíthetőség volt, ezért a pontokat közlekedési utak közvetlen közelébe telepítették. Az akkori követelményeknek megfelelő pontosságú hálózati méréseket a MAORT által 1949-ben beszerzett Heiland-40-es graviméterrel végezték, és a Műegyetem Geodéziai Intézetének ingatermében levő (azóta elpusztult) gravitációs főalapponton keresztül kötötték be a potsdami gravitációs rendszerbe. (Potsdamban 1898 és 1904 között határozták meg a nehézségi erő $9,81274 \pm 0,0003 \text{ m/s}^2$ abszolút értékét, ezt 1906-ban publikálták, és ettől kezdve ezt tekintették a nemzetközi alaphálózat kiinduló értékének.) A későbbi hálózatokkal történő összehasonlíthatóság lehetőségének biztosítására 16 különlegesen kiképzett ún. *akadémiai pontot* is telepítettek (Csapó, 2005). Az MGH-50 abban az időben Európa egyik legjobb alaphálózata volt. Erre a hálózatra támaszkodva kezdődött meg az ország ún. „áttekintő” graviméteres felmérése, amelynek eredményeképpen 1979 végére, a felmérés befejezésének ide-

jére mintegy 120 000 mérési ponton határozták meg a nehézségi erő értékét a potsdami gravitációs rendszerben.

A 60-as években lehetővé vált a szabad-esés elvén alapuló abszolút lézergraviméterek kifejlesztése. Ezekkel a műszerekkel végzett mérések során bebizonyosodott a már korábban gyanított tény, hogy a potsdami kiinduló érték mintegy 14 mGal-lal nagyobb a valós értéknél. Ezért 1971-ben a Potsdami Gravitációs Rendszer kezdőpontjának értékét 14 mGal-lal csökkentették, és az újabb abszolút mérések bevonásával a korábbi nemzetközi hálózatot is újból kiegyenlítették. Az új rendszer az International Gravity Standardization Net (IGSN-71).

Az 1970-es évek végére az MGH-50 gravitációs alaphálózat pontjainak zöme különböző okok (elsősorban az útkorszerűsítések) miatt elpusztult, továbbá a fokozódó pontossági igények miatt is szükségessé vált egy új magyarországi alaphálózat létrehozása. Ennek megfelelően a hetvenes



2. ábra. Az UEGN-2002 európai gravitációs hálózat magyarországi pontjai

években új II. rendű gravimetriai alaphálózatot hoztak létre. Okulva az MGH-50 alappontjainak telepítési problémáiból, az új alappontokat időtálló építmények, általában templomok, vagy kastélyok kertjében állandósították 0,6×0,6×1,0 m-es betontömbökkel. A pontok átlagos távolsága 15–20 km. A hálózat graviméteres méréseire két Sharpe és egy geodéziai típusú LaCoste–Romberg (LCR) műszerrel került sor. Az 1971. évi és az 1980–89 közötti mérések eredményeinek együttes kiegyenlítésére 1991-ben került sor. Az MGH-80 elnevezésű új alaphálózat kiegyenlítés utáni hálózati középhibája $\pm 16 \mu\text{Gal}$ (Csapó – Sárhidai, 1990). Az MGH-80 a 389 II. rendű pont mellett 5 abszolút állomást és 18 repülőtéri I. rendű hálózati pontot is tartalmazott.

Közben 1994-ben Európa nyugati felében is elkészült az új UEGN-94 egységes európai gravimetriai hálózat, amelyhez később Magyarország is csatlakozott, miután Ausztrián keresztül összekapcsoltuk gravitációs alaphálózatunkat az európai alaphá-

lózattal. Az osztrák és a szlovák határ menti összekötő mérések mellett néhány határon túli abszolút állomás értékének bevonásával újra kiegyenlítettük a gravitációs alaphálózatunkat, így ebben már 20 abszolút állomás rögzítette a hálózat szintjét és méretarányát (Szabó, 2004; Csapó, 2005). Ennek az új MGH-2000 hálózatnak – amelynek 490 hálózati pontja alapvetően az MGH-80 pontjaiból, valamint 15 abszolút állomásból áll (1. ábra) – a kiegyenlítés utáni középhibája már $\pm 14 \mu\text{Gal}$.

Az MGH-2000 ponthálózatából egyenes eloszlású, ritkább hálózatot alakítottak ki, majd a szomszédos pontokat egymással és az abszolút pontokkal is összemérték. Ez a ritkított ponthálózat alkotja Európa legújabb UEGN-2002 hálózatának 2. ábrán látható magyarországi részét, amelynek 56 alappontjából már 16 abszolút állomás. Az ábrán feltüntettük az 1969-ben Csapó Géza által tervezett és nemzetközi együttműködésben mért gravimetriai kalibráló alapvonalunkat is, amely jelenleg öt abszolút állomásból és kilenc kötőpontból (I. és II.

rendű országos alappontokból) áll, Δg tartománya pedig mintegy 210 mGal, amely a nehézségi erőter teljes hazai intervallumának 80%-a.

Az egyre szaporodó abszolút műszerek és mérések miatt az UEGN-2002 valószínűleg a relatív graviméterekkel mért és kiegyenlített utolsó közös európai alaphálózat, mivel az abszolút graviméterek várhatóan 5-10 éven belül kiszorítják a relatív gravimétereket az alaphálózati mérésekből. Ma már az országos hálózatok I. rendű részét is zömében abszolút állomások alkotják (Csapó, 2005). Nagy pontosságot igénylő relatív mérésekre természetesen továbbra is szükség lesz, de ezek súlypontja áthelyeződik a gyakorlati alkalmazások (pontosúrités, szerkezetkutatás stb.) területére. Megfelelő mérőeszközök beszerzésével tehát arra kell felkészülnünk, hogy a közeli jövőben a terepen állandósított pontjainkon is abszolút graviméterekkel végezzük a hálózati méréseinket. Erre a célra már kaphatók olyan GPS-vevőkkel is ellátott műszerek (pl. a MicroG-LaCoste gyártmányú, Microg A10-es terepi abszolút graviméter), amelyekkel egy pont mérése mindössze 2-3 órát vesz igénybe, pontosságuk pedig eléri a 10 μ Gal értéket (Csapó és mások, 2011).

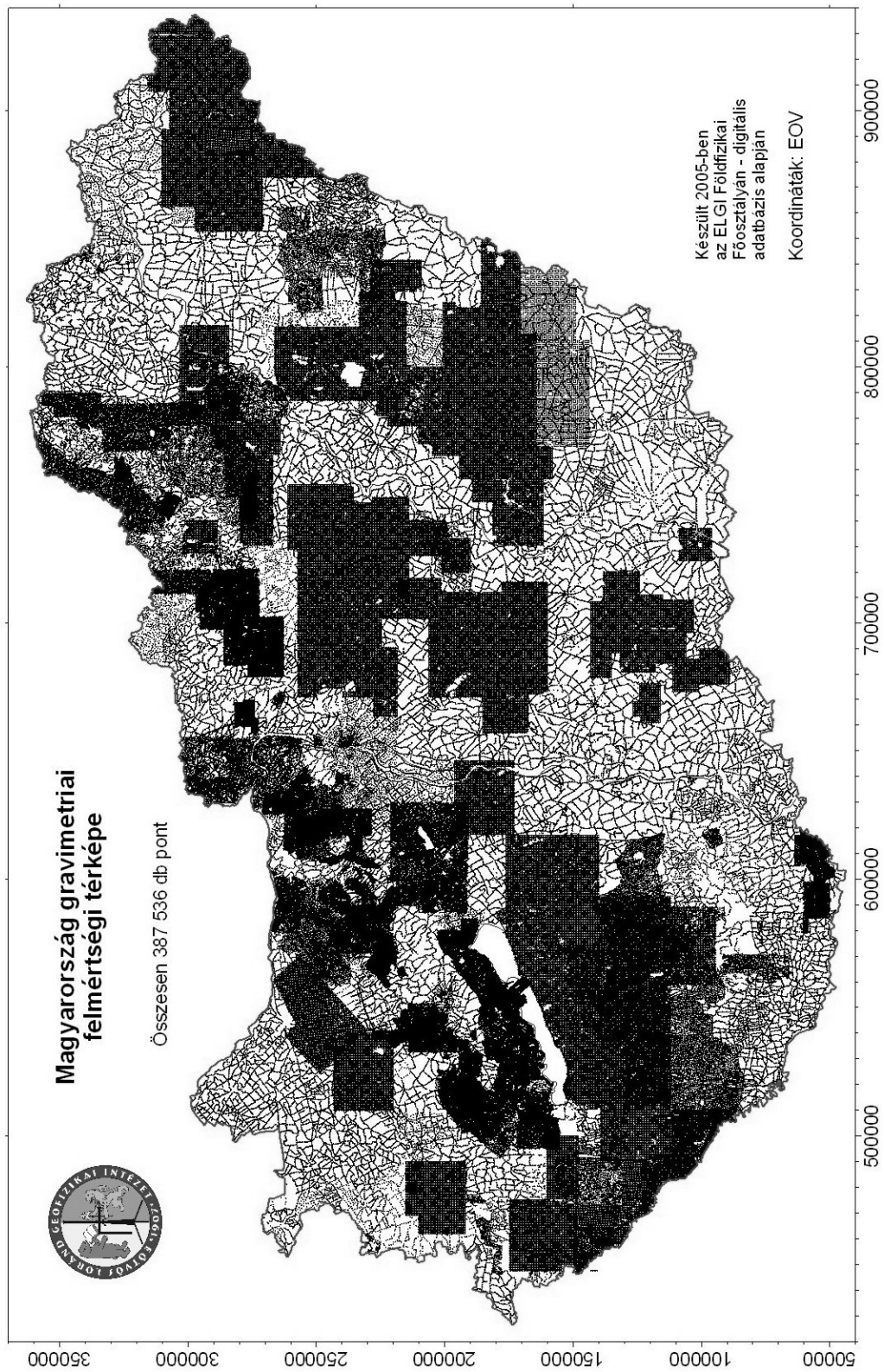
Időközben az éppen aktuális alaphálózatokra támaszkodva folytak és folynak a részletes mérések is. A korábbi mérések zömét ásványi nyersanyagok kutatása céljából főként az 1960-70-es években végezték, az újabb több ezer mérés már kifejezetten geodéziai célokra történik (geoidpontok belső zónás mérései, EOMA [egységes országos magassági alaphálózat] gravitációs mérései, hálózatok, és a határ menti vonalak összekötő mérései).

Magyarország gravimetria felmértségét ugyan kiválóan szokták tekinteni, viszont geodéziai szempontból ezt megfelelő kritikával kell fogadnunk. Ugyanis az ún. áttekintő országos mérések pontjainak döntő része közlekedési utak mentén található, a domb- és hegyvidéki területek felmértsége

pedig helyenként hiányos, a szénhidrogén-kutató hálózatos mérések is elsősorban az ország síkvidéki területeire korlátozódtak. Emiatt még ma is számos olyan kisebb-nagyobb rész található, ahol 10–50 km² területen egyetlen mérési pont sincs annak ellenére, hogy az ELGI gravitációs adatbázisa a 3. ábrán látható területi eloszlásban jelenleg összesen 387536 mérési adatot tartalmaz, amelyet 20 abszolút pont egészít ki. Meg kell állapítani, hogy ezek az adatok igencsak heterogén mérésekből származnak (különböző időpontokban, más célokra, más műszerekkel, különböző gravimetriai alaphálózatokra támaszkodva határozták meg az egyes értékeket).

A magyarországi gravitációs adatbázis kiemelten fontos és értékes részét képezik a korábbi Eötvös-inga-mérések. Eötvös Loránd az 1880-as évek közepén kezdett gravitációs kutatásokkal foglalkozni. Kezdeti kutatásainak elsődleges célja a nehézségi erő potenciálfelületének, és ezen keresztül a Föld alakjának vizsgálata volt. 1891-ben megépített műszerével már ugyanazon év augusztusában végrehajtotta első terepi méréseit a Celldömölk melletti Ság-hegyen. Az első térképezés jellegű felmérésre 1901 elején került sor a Balaton jegén, amelyet a következő évtől kezdődően követtek a terepi mérések.

Eötvös 1919-ben bekövetkezett haláláig 1420 állomáson határozták meg a nehézségi erőter potenciálfelületének görbületét és gradiensét. A méréseket, ahol a topográfia megengedte, általában szabályos hálózatban végezték, kezdetben 3-4, majd 2 ill. 1 km-es állomástávolsággal. Az 1910-es évek kezdetétől a nyersanyagkutatás növekedő igényeinek megfelelően a mérések helyszínének kiválasztásánál egyre nagyobb szerepet kaptak a földtani szempontok, Eötvös halála után pedig már meghatározóvá váltak.



3. ábra. A graviméteres mérések területi eloszlása az ELGI gravitációs adatbázisa alapján

Közben elkészült az inga foto-regisztrálású, automata (Auterbal [Automatic Eötvös-Rybár Balance]) változata is, amely feleslegessé tette az észlelők állandó jelenlétét. Az ELGI ugyan 1931-ben beszerzett egy Auterbal-ingát, de műszerállománya zömét továbbra is a vizuális leolvasású ingák alkották.

Az ELGI az utolsó terepi Eötvös-ingamérést 1966-ban végezte; az összes méréseinek száma mintegy 35000 állomás, amelyből több ezer pont a mai országhatáron kívül esik (Szabó, 1999).

Az 1920-as évek kezdetétől a torziós ingák egyre nagyobb szerepet játszottak a kőolajkutatásban. Ezért, amikor 1933-ban a MAORT jogelődje, az EUROGASCO kőolajkutatási koncessziót szerzett a Dunántúltra, maga is berendezkedett az Eötvös-ingás mérésekre. Eleinte az ELGI-től kölcsönöztek műszereket, majd hamarosan Auterbal-ingákat szereztek be. A kőolajipar méréseit kizárólag gazdaságossági szempontok vezették, így kezdetben főleg utak mentén mértek, majd ahol a mérési eredmények kedvező földtani szerkezetet jeleztek, ott áttértek a hálózatos mérésekre.

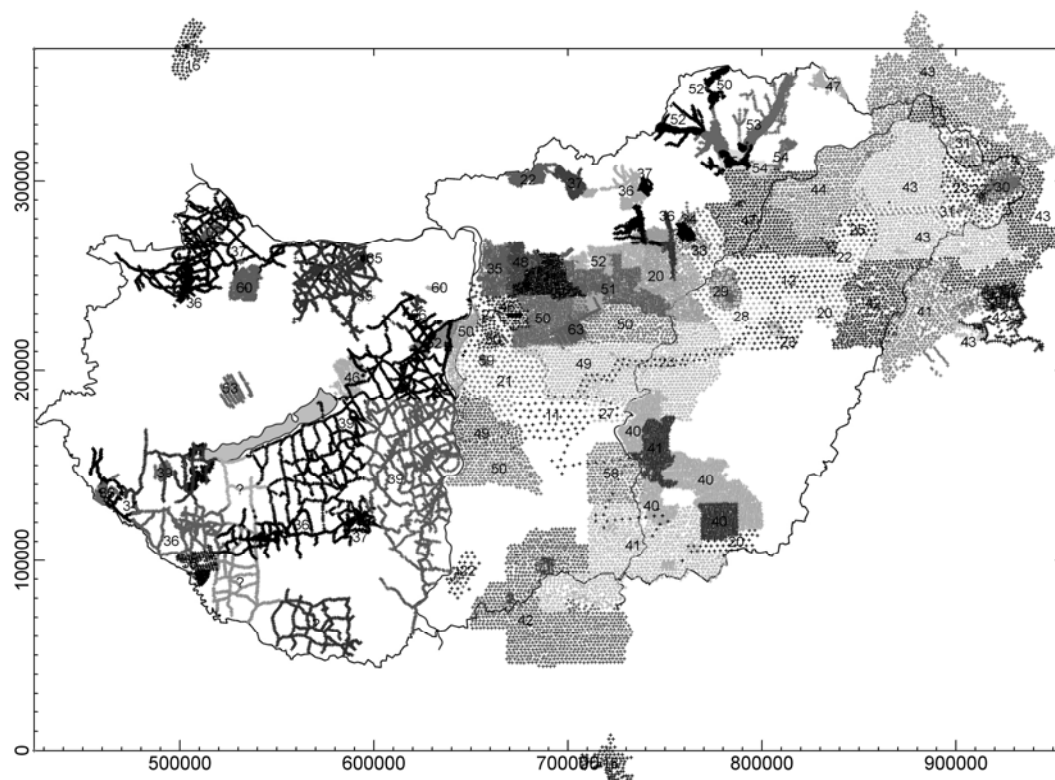
A MAORT 1949 végén történt államosításáig kb. 27000 Eötvös-inga-mérést végeztek. 1950-ben a geofizikai részleg átkerült az ELGI-hez, de az addig felhalmozódott észlelési anyag nem. Így ellentétben az ELGI-vel, ahol az észlelési lapokat folyamatosan megőrizték, a dunántúli mérésekről csak térkép formában maradtak fenn Eötvös-inga-mérési anyagok. 1963 és 1967 között az olajipar ismét berendezkedett Eötvös-inga-mérésekre, amelyeket általában szeizmikus szelvények nyomvonalán 300 m-es állomástávolsággal végeztek. Ebben az időszakban további, mintegy 2900 állomáson végeztek méréseket.

Geodéziai szempontból – mivel itt első sorban a görbületi adatokra van szükség – a kép meglehetősen vegyes (Völgyesi és mások, 2005a). A terepi mérések során egykét kísérleti programtól eltekintve minden

állomáson annyi azimutban észleltek, amennyi elég volt ahhoz, hogy állomásonként meg tudják határozni mind a görbületi, mind a horizontális gradiens értékét. A mérések tömegessé válásakor azonban – különösen dombos területeken – a görbületi érték nehézkes földtani értelmezése miatt ezek ábrázolását elhanyagolták. Az ELGI mérései esetében ez kisebb problémát jelent, mert az eredeti észlelési anyag nagy része a mai napig rendelkezésre áll. A MAORT által felmért területekről azonban hiányoznak a mérési jegyzőkönyvek, csak a térképen ábrázolt adatok hozzáférhetők.

Az ELGI és a BME Általános és Felsőgeodézia Tanszéke a 90-es évek közepén kutatási együttműködési szerződést kötött. Ennek keretében, valamint különböző pályázatok elnyerésével 1995 óta rendszeresen folyik a korábbi Eötvös-inga-mérések anyagának digitális adatbázisba mentése a különböző formában ma még fellelhető mérési anyagok (észlelési lapok, mérési jegyzőkönyvek, térképek, vagy fénymásolt gradiens térképek) alapján. A 2010 végéig digitalizált adatok területi eloszlását a 4. ábrán láthatjuk, amelyen azt is feltüntettük, hogy az egyes területrészekben mely évben történtek az ingamérések. A digitális adatbázis jelenleg 41562 mérés adatait tartalmazza, így az összesen mintegy 60000 magyarországi Eötvös-inga-mérés több mint kétharmada már közvetlenül alkalmas a további – első sorban geodéziai célú – hasznosításra. A 60000 ingamérésből mintegy 5000 pont éppen azokra a trianoni határon túli területekre esik, amelyekről egyébként nincsenek részletes graviméteres adataink, ugyanakkor a magyarországi geoidkép finomszerkezetének meghatározásához erre nagy szükség lenne.

Az 1910-es évek első nagy sikerei, majd az 1950-es évektől az ingamérések második aranykora után az 1960-as évek végére gyakorlatilag befejeződtek Magyarországon a földtani kutatás céljából végzett ingamérések. Az ezt követő hosszabb szünet után

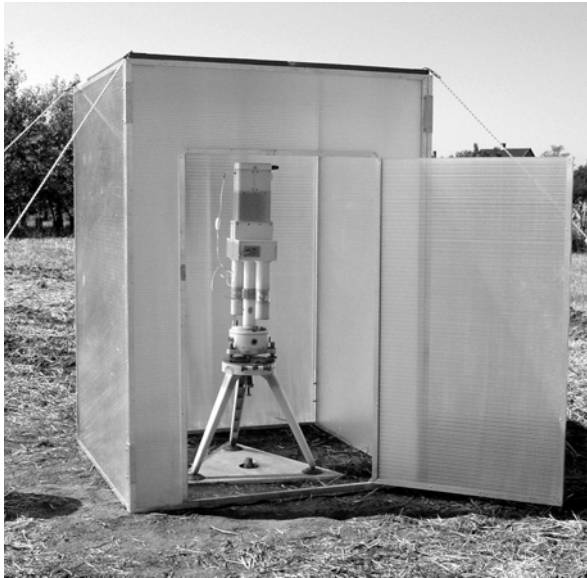


4. ábra. A digitális adatbázisban szereplő Eötvös-inga-mérések területi eloszlása

napjainkban a geodézia tudománya újabb igényekkel jelentkezett további mérések végzésére (Völgyesi és mások, 2009). A korábban gyártott Eötvös-ingák közül jelenleg két műszert sikerült felújítva mérésekre alkalmassá tenni. Az egyik a BME Általános és Felsőgeodézia Tanszékének Auterbal-ingája, a másik ennek az 1950-es évekre továbbfejlesztett változata, az ELGI E54 típusú műszere. A terepi Eötvös-inga-mérések – éppen 50 éves szünetelése utáni – 2007. évi újraindítását a 60657, illetve a 76231 számú OTKA pályázatok anyagi támogatása tette lehetővé. A szükséges vizsgálatok elvégzésére részben a budapesti Mátyás-barlang, részben a Csepel-sziget déli része, Makád község külterülete látzott a legalkalmasabbnak, ahol már az ötvenes években is végeztek ilyen méréseket (Völgyesi és mások, 2009). A 5. ábrán a Makád környéki területen felállított E-54 típusú Eötvös-inga látható az észlelőházban

mérésre kész állapotban. A közeli jövőben ezeknek a méréseknek és kutatásoknak a folytatását tervezzük.

A legújabb lehetőséget a nehézségi erőter megismerésére a műholdas technika szolgáltatja. A 2000-ben felbocsátott CHAMP műhold fedélzetén három egymásra merőleges irányú gyorsulásmérőt helyeztek el, amelyekkel a műhold pályája mentén a nehézségi erőter vektorai határozhatók meg. A 2002-ben közel azonos pályára állított GRACE műhold-pár esetében pedig a két műhold közötti folyamatosan végzett távolságmérésekből következtethetünk a pálya menti nehézségi erő nagyságára. A többszöri halasztás után 2009 márciusában felbocsátott európai GOCE műholdon három pár három tengelyű kapacitív érzékelőkkel ellátott gradiométert helyeztek el, amelyekkel mintegy 250 km magasságban a nehézségi erőter gradiensei (a teljes Eötvös-tenzor elemei) határozhatók meg 0,01



5. ábra. Eötvös-inga mérés a Makád környéki területen 2008-ban

E (Eötvös-egység) pontossággal. (1 E a nehézségi erő változása 1 cm-re elhelyezett 10^{-12} g tömeg hatására.) A GOCE műhold mérési adataihoz magyarországi kutatók is hozzáférhetnek, így az Eötvös-ingaméréseinket 250 km-rel a felszín feletti, gyenge felbontású, ám nagy mennyiségű mérési adattal egészíthetjük ki. A műholdas módszerek a globális, kontinentális méretű jelenségek tanulmányozására szolgáltatnak kiváló lehetőséget (Csapó – Földváry, 2006). Fontos feladat a műholdak magasságában a nehézségi erőtérre vonatkozóan meghatározott adatok transzformációja a földfelszínre. A feladat az ún. analitikai folytatások módszerével oldható meg (Völgyesi, 2002).

A gravitációs adatok felhasználása

A földi nehézségi erőtér ismerete a fizikai geodéziában és a geofizikában alapvetően fontos. A geofizikában korábban a különféle ásványi nyersanyagok kutatásában volt nagy jelentősége, napjainkban inkább a Föld belső szerkezetének tanulmányozásában használják. A nehézségi erőtér nem

árapály jellegű időbeli változása vizsgálatának a geodinamikában van nagy jelentősége. Különösen fontos szerepe van azonban a fizikai geodéziában, ahol egyrészt a Földünk elméleti alakjának, a geoidnak a fogalmát és a különböző magasságfogalmakat is a nehézségi erőtér ismeretében tudjuk definiálni és meghatározni, másrészt a geodéziái méréseinket is ehhez a fogalomhoz kapcsoljuk, mivel a helymeghatározó mérések során a műszereinket minden esetben a helyi függőlegeshez, azaz a nehézségi erő vektorának irányához állítjuk be. Érdeemes megemlíteni még a korábbi katonai alkalmazást is, ami miatt a gravitációs adatokat hosszú éveken keresztül szigorúan titkos adatként

kellett kezelni, megnehezítve ezzel a tudományos kutatásokat és a nehézségi értékek polgári felhasználását is.

Magyarországon a gravitációs adatok tulajdonosa a Magyar Bányászati és Földtani Hivatal, kezelője és karbantartója az ELGI. Az adatok tulajdonosának és kezelőjének kettőssége sajnos több okból sem szerencsés megoldás. A nemzetközi adatok tárolója és kezelője a toulouse-i székhelyű Bureau Gravimétrique International (BGI).

Az adatok jelenlegi legnagyobb hazai felhasználói a Budapesti Műszaki Egyetem Általános- és Felsőgeodézia Tanszéke, valamint a Földmérési és Távérzékelési Intézet (FÖMI), illetve a FÖMI Kozmikus Geodéziái Obszervatóriuma (KGO). Ezekben az intézményekben a gravitációs adatokat elsősorban a Föld alakjának kutatására, illetve az új EOMA magasságmeghatározások céljára használják. Az ELGI-ben és az MTA soproni Geofizikai és Geodéziái Kutatóintézetében (GGKI) mérés- és műszertechnikai, valamint geodinamikai vizsgálatok folynak. További felhasználók még a Miskolci Egyetem és az ELTE Geofizika tanszéke, de a korábbi legnagyobb

alkalmazót, a MOL-t is megemlíthetjük mint jelenlegi lehetséges felhasználót.

Ma a geodéziában az egyik legfontosabb gyakorlati feladat a Föld elméleti alakjának, a geoidnak minél pontosabb meghatározása. Napjainkban ez azért fontos, mert a GPS technika rohamos elterjedésével felmerült az igény a GPS technikával meghatározható ellipszoid feletti h magasságnak a mindennapi gyakorlatban alkalmazott, 6. ábrán látható tengerszint feletti H magasságokká történő átszámítására. Ezt az átszámítást azonban csak olyan pontossággal tudjuk elvégezni, amilyen pontossággal ismerjük az ellipszoid és a tengerszint távolságát, vagyis az N geoidundulációt. A geoid meghatározásához a nehézségi erőter valamennyi mért adata felhasználható, mind a Δg gravitációs anomáliák, mind az Eötvös-ingával mérhető horizontális gradienssek és görbületi adatok bevonhatók a számításokba.

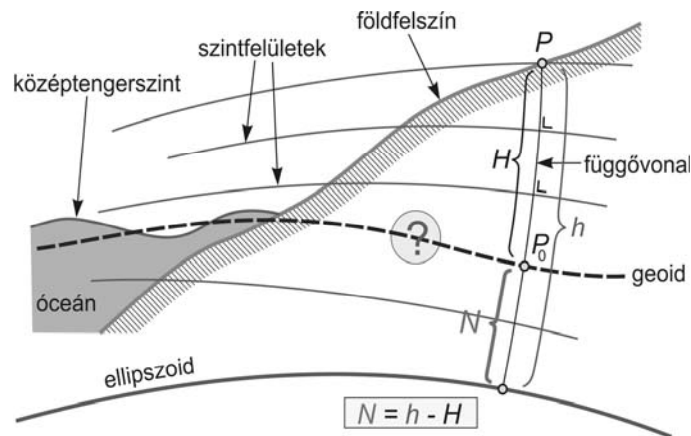
A geoid meglehetősen bonyolult felület, a legcélszerűbb pontonként meghatározni. A nehézségi rendellenességek alapján a Föld tetszőleges pontjában a geoidundulációt az ún. Stokes-integrállal számíthatjuk ki, amely a fizikai geodézia legfontosabb összefüggése (Völgyesi, 2002).

A Stokes-integrál szerinti számítást a teljes földgömb felületére kell elvégezni, vagyis a geoidmagasság kiszámításához az egész Föld felszínén ismerni kell a nehézségi rendellenességek értékét, miközben a meghatározandó pont környezetében ezen értékek jóval nagyobb pontosságú ismerete is szükséges. A feladat megoldásának számos gyakorlati módszere ismert, a jelentős számítási igénye miatt a modern, nagy teljesítményű számítástechnikai eszközök alkalmazásával egyre pontosabb geoidformák

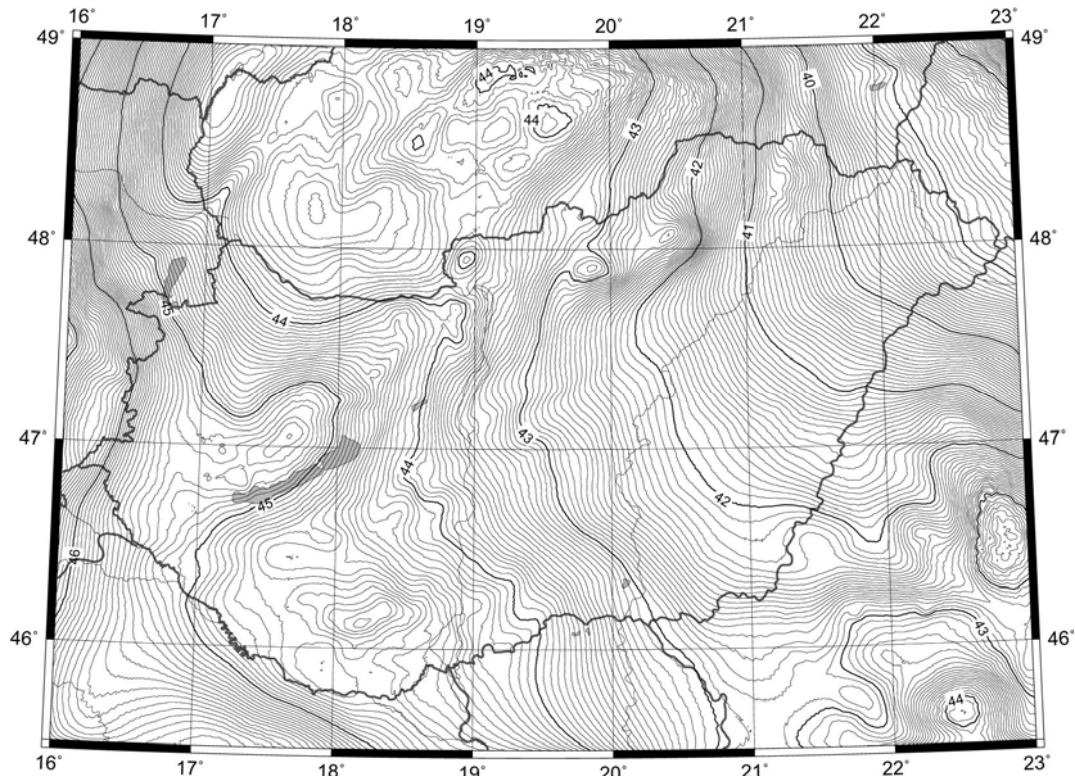
határozhatók meg.

Az elmúlt évtizedben több magas fokszámú geopotenciális modell vált elérhetővé, amelyeket többek között a nagy pontosságú lokális és regionális geoidmeghatározásokhoz is felhasználhatunk. A legújabb, minden eddiginél részletesebb geopotenciális modell az EGM2008, amely $n=2190$ fokszámig és $m=2160$ rendig összesen 4 800 000 együtthatót tartalmaz, ennek megfelelően igen jó: 5 szögperc (≈ 9 km) a felbontása.

Magyarországon a rendelkezésre álló jó minőségű gravimetriai és egyéb adatok birtokában a cm-es pontosságú geoid előállítás a cél. Jelenleg három intézményben folynak jelentősebb munkák és kutatások a geoid magyarországi felületdarabjának részletes meghatározására: a FÖMI KGO-ban, az MTA GGKI-ben és a BME Általános és Felsőgeodézia Tanszékén (Völgyesi és mások, 2005b). A több különböző hazai geoidmegoldás közül ki kell emelni a KGO-ban 2004-ben elkészült HGGG2004 geoidváltozatot, amely 2005-től a FÖMI adatszolgáltatási rendszerébe is bekerült, valamint a 7. ábrán látható kb. 3-4 cm pontosságú HGTUB2007 geoidot, amely a BME Általános- és Felsőgeodézia Tanszékén készült. Az utóbbi megoldás a GPM98CR geopotenciális modell mellett használja az ELGI nehézségi rendellenes-



6. ábra. A geoidundulációk értelmezése



7. ábra. A magyarországi HGTUB2007 geoidkép

ségre vonatkozó több mint 300 000 értékét, a terepi korrekciók számítása során pedig az országon kívüli területekre a GLOBE terepmodellt is alkalmazták.

Fontos vizsgálatok folynak az MTA GGKI-ben is, ahol a felszín közeli és a topográfiai tömegek sűrűségviszonyainak pontosabb figyelembevételével dolgoznak ki módszereket a geoidmagasságok pontosításának lehetőségére.

A nehézségi erő tér időbeli változása

A graviméteres mérések jelenlegi pontossága mellett igen fontos kérdés a nehézségi erő tér nem árapály jellegű időbeli változása. Az időbeli változások globálisak, regionálisak és lokálisak lehetnek. A globális és a regionális változások geodinamikai folyamatokra vezethetők vissza, míg a viszonylag kis területre korlátozódó lokális változások számos okból bekövetkezhetnek

(pl. talajvízszint-ingadozás, technogén hatások), és gyakran járnak együtt függőleges felszínmozgással is.

Mérnökgeofizikai szondázások adatai alapján vizsgálatok történtek a talajvíz által a laza üledékekben okozott sűrűségváltozások területi eloszlásának meghatározására. A vizsgálatok során az ország 24 különböző területén, főleg az Alföldön, összesen több mint 250 szondázás méréséből sikerült meghatározni a talajvíz által okozott sűrűségváltozás mértékét, amely átlagosan $300 \pm 50 \text{ kg/m}^3$. A szokásos módon 1 m vastagságú Bouguer-lemezzel (horizontálisan végtelen kiterjedésű lemezzel) számolva ekkora sűrűsége-növekedés a nehézségi erő $12,6 \pm 2 \mu\text{Gal}$ változását okozza. Ezzel igen jó összhangban voltak a graviméteres mérések eredményei, amelyeket a nehézségi erő tér lokális változására irányuló komplex vizsgálatok során végeztek Debrecen kör-

nyékén az ELGI szakemberei. A mérések szerint az üledékrétegek porozitásának függvényében 1 m talajvízszint-ingadozás hatására 10–15 μGal tartományban változik a g értéke.

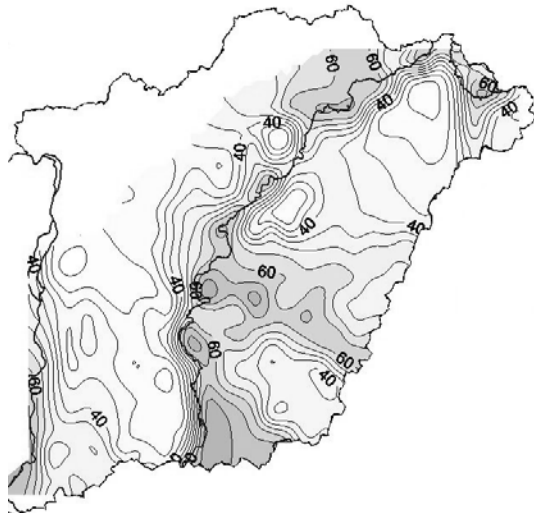
Mivel 1950 és 1955 között a Magyar Állami Földtani Intézet nagyszabású talajvízszint-térképezést végzett az ország síkvidéki részein, ezért lehetőség adódott különböző területeken a nehézségi erőter talajvízszint-ingadozás által okozott változásának meghatározására. A térképezés során több mint 1 000 000 ázott talajvízkút és közel 16 000 fúrt kút adatait mérték meg és jegyezték fel. Rónai és munkatársai a folyamatosan regisztrált adatok alapján az Alföld területére megszerkesztették az 1933 és 1955 közötti időszakban észlelt legalacsonyabb és legmagasabb vízállások közötti különbségek izovonalas térképét. A térképről leolvasható, hogy a nagyobb folyók közelében a szintváltozás elérte, sőt helyenként meg is haladta a 6 m-t, ugyanakkor pl. a Nyírség, vagy a Duna–Tisza közének egyes részein a vízszint ingadozása 2 m alatt maradt.

A Rónai-féle térképet az ELGI szakemberei 10 km-es négyzetháló sarokpontjaiban történő kiolvasással digitalizálták, és az így kapott vízszintváltozások alapján a megállapított sűrűségváltozások ismeretében az Alföldre meghatározták a négyzetháló sarokpontjaiban a talajvíz-ingadozás okozta gravitációs hatást. Az így kapott értékek 20–70 μGal körüli változásokat mutatnak. Ennek az adatrendszernek az alapján megszerkeszthető a talajvíz ingadozás okozta maximális gravitációs változás 8. ábrán látható területi eloszlása (Völgyesi és mások, 2007). A térképről leolvasható, hogy az Alföld különböző területrészein mekkora gravitációs változást okozhat a talajvízszint ingadozása.

Természetesen a talajvíz járásától függetlenül a lehulló csapadék is okozhat néhány μGal változást a g értékében.

A függőleges felszínmozgások követ-

kezében szintén megváltozik a g értéke, ugyanis a pontok a Föld nehézségi erőterében más potenciálértékű helyre kerülnek. Adott Δh nagyságú felszínmozgás mellett a Δg változása a vertikális gradiens függvénye, amelynek jól ismert normálértéke $\partial g / \partial h = -0,3086 \text{ mGal/m}$. A valóságban azonban a vertikális gradiens értéke ettől jelentősen eltérhet. Erre vonatkozóan Csapó Géza végzett részletes vizsgálatokat magyarországi mérések és modellszámítások alapján (Csapó és Völgyesi, 2002). A vertikális gradiens térben változó értéke miatt ugyanakkora Δh mértékű felszínmozgás esetén különböző pontokban más és más lehet a nehézségi erőter Δg megváltozása. Magyarország területén a függőleges felszínmozgások átlagos értéke 1 mm/év, bár helyenként ez lehet 4–5 mm/év is, sőt pl. Debrecen területén eléri a 8 mm/év értéket. Ezért 10 éves időtartam alatt a függőleges felszínmozgások miatt átlagosan 2–4 μGal , de bizonyos területeken akár 10–20 μGal változásra is lehet számítani. Ennek megfelelően Joó István mozgástérképe alapján meghatároztuk a nehézségi erőter ezekből eredő megváltozását Magyarország területére, amely értékek a 9. ábrán látható mó-



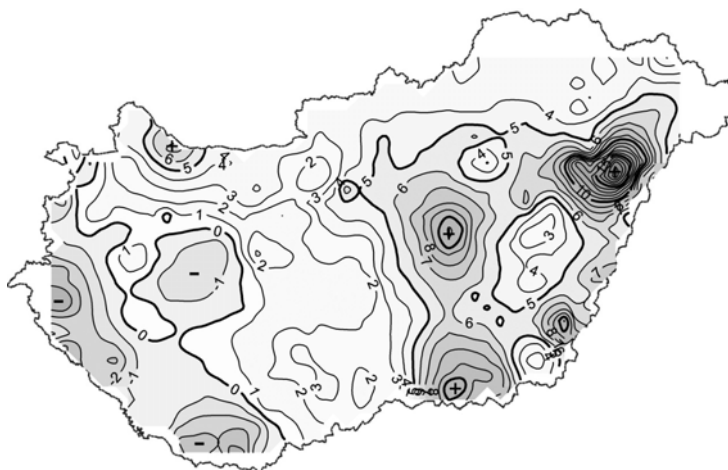
8. ábra. Az 1933 és 1953 között észlelt talajvízszint-változás által okozott gravitációs változás az Alföldön μGal -ban

don átlagosan -5 és $+20 \mu\text{Gal}/10$ év között változnak (a negatív értékek a Dunántúl nyugati részén láthatók).

Jól mutatja a nehézségi erőtér és a geoid szezonális időbeli változását a GRACE és a LAGEOS műholdak 2002 és 2008 közötti mérési adatsora. (Völgyesi, 2009).

A mérési adatok előzetes feldolgozása során az árapály és a légnyomásváltozás hatását javításként eltávolították, az így kapott javított adatok a nehézségi erőtér nem modellezett hosszabb idejű változásait: pl. szezonális hatásokat, hidrológiai tömegátrendeződéseket, hóvastagság változása, sarki jégsapkák olvadásának megfelelő tömegváltozások, stb. hatásait tükrözik. A műholdak méréseiből a gömbfüggvényegyütthetők ismeretében a 2002 és 2008 közötti időszakra tetszőleges időbeli (pl. 10 napos) bontásban kiszámíthatók a geoidmagasságok a Föld bármely pontjára. Az így adódó eredmények meglepően nagy változásokat mutatnak a kontinentális területeken, összhangban egyébként a hidrológiai folyamatok periódusával: pl. az Amazonas vízgyűjtőterületén az éves periódusú változás közel 4 cm.

Fontos kérdés a változások nagyságrendje Magyarország területén. A 10. ábrán a Budapesthez közeli $\varphi = 47,5^\circ$ és $\lambda = 19,5^\circ$ koordinátájú pontban ábrázoltuk a geoid időbeli változását a GRACE és a LAGEOS műholdak 2002. július 29. és 2008. május 27. közötti, közel 6 éves mérési adatsora alapján. Látható, hogy a változás cm nagyságrendű, és több különböző periódusból tevődik össze. Az ábrán sejthető egy hosszabb periódus is, és elképzelhető, hogy ez

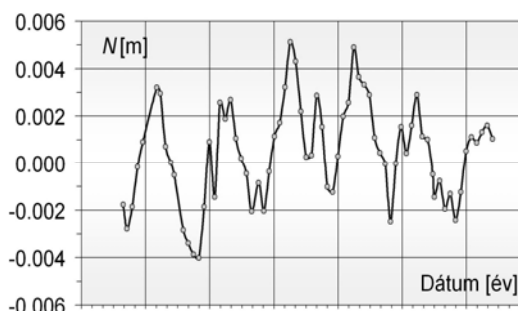


9. ábra. A nehézségi erőtér változása a felszínmozgás következtében $\mu\text{Gal}/10$ év-ben.

a 11 éves naptevékenységi ciklus időjárásra gyakorolt hatásával, illetve a csapadékmennyiség ennek megfelelő változásával kapcsolatos, azonban a megfigyelt időtartam ennek biztos megállapításához még nem elegendően hosszú. Ez a kérdés mindenképpen tisztázódhat a következő években, amikor már hosszabb adatsorok állnak a rendelkezésünkre. Vizsgálataink szerint a változások jellege nagyjából egész Magyarország területére a 10. ábrán láthatóhoz hasonló.

Az Eötvös-inga-mérések hasznosítása

Az Eötvös-inga-méréseket kezdetben geodéziai, majd később ásványi nyersanyagok kutatására használták. Ma ismét a



10. ábra. A geoidmagasság változása Budapest közelében műholdas gravimetriai mérések alapján

geodéziai alkalmazás került előtérbe. A mai alkalmazásokat két fontos terület köré csoportosíthatjuk: egyrészt a mért gradiensek alapján különböző interpolációkat végezhetünk (függővonal-elhajlás, gravitációs anomáliák, vertikális gradiensek), másrészt a torziósinga-méréseket kiegészítve más adatokkal, inverziós eljárással előállíthatjuk a nehézségi erőter potenciálfüggvényét (Dobróka – Völgyesi, 2010), amiből viszont a nehézségi erőter valamennyi fontos jellemzője meghatározható, vagy kollokáció alkalmazásával nehézségi rendellenességek és geoidundulációk számíthatók (Völgyesi és mások, 2005a).

Akár az egyszerű interpolációs eljárással, akár az inverziós vagy a kollokációs eljárást alkalmazva lehetőségünk van gravitációs térképek szerkesztésére. Így azokon a területeken, ahol kevés graviméteres mérés található, vagy ezek területi eloszlása egyenetlen, az Eötvös-inga-mérések segítségével a gravitációs adatokat sűríteni tudjuk.

Jelenleg a geodéziában az Eötvös-inga-adatok legfontosabb felhasználási területe a geoidkép finomítása, a lokális geoidformák meghatározása. E célra ma már rendelkezésre állnak azok a szoftverek, amelyek a legmodernebb számítástechnikai eszközöket és lehetőségeket kihasználva alkalmasak a magyarországi geoidkép finomszerkesztésének meghatározására.

Mindezen okokból még napjainkban is felbecsülhetetlen értékűek a korábbi magyarországi Eötvös-inga-mérések, és ezért mindenképpen folytatni kell a még hátralévő mintegy 5-10000 korábbi mérés digitális adatbázisba rendezését.

Következtetések, jövőbeli feladatok

Gravitációs kutatásokra napjainkban is szükség van. Jelenleg ugyan a hazai geofizikában csökkent a nyersanyagkutatással kapcsolatos gravimetriai munkák és adatok jelentősége, ugyanakkor azt tapasztaljuk, hogy egészen új alkalmazási területeken jut

szerephez a gravimetria; így pl. a környezetvédelemben, a területfejlesztésben, vagy pl. a melegvízlelőhelyek kutatásában.

Ellentétben a geofizikai felhasználással, a geodéziában rendkívüli módon felértékelődtek a gravimetriai adatok és kutatások. Mivel a fizikai geodéziában jelenleg a cm pontosságú geoid meghatározása a cél, ez nem lehetséges nagy mennyiségű és szélső pontosságú gravimetriai adatok felhasználása nélkül. Emellett a korszerű magasságmeghatározás (a folyamatban lévő – bár igen vontatottan haladó – országos magassági alaphálózati munkák) is igénylik a szintezésekhez kapcsolódó pontos gravitációs adatok egyidejű szolgáltatását, illetve kiegészítő graviméteres méréseket.

Az egyre nagyobb jelentőségű hazai geodinamikai vizsgálatok sem képzelhetők el a legmagasabb szintű gravimetriai kutatások nélkül.

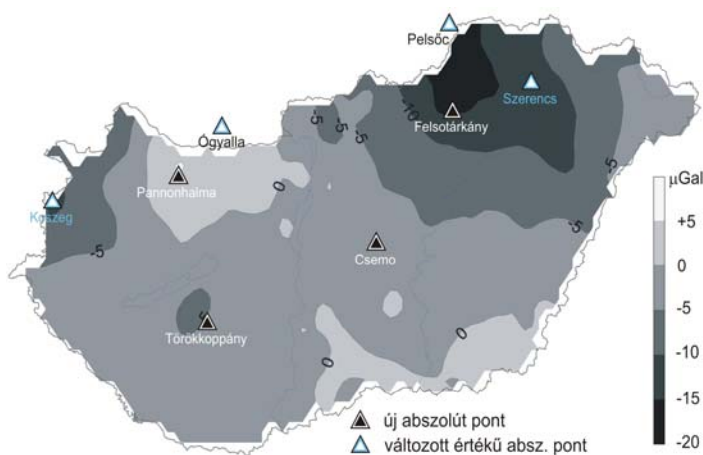
Valamennyi gravimetriai kutatás és mérés elengedhetetlen feltétele egy korszerű gravimetriai alaphálózat. Adott gravimetriai alaphálózat megbízhatósága szükségképpen nagyobb kell, hogy legyen a rá támaszkodó gyakorlati mérési feladatok által megkövetelt mérési megbízhatóságnál. Amennyiben pl. a nehézségi erőter időbeli változásának mértéke meghaladja a g mérésének graviméterekkel elérhető megbízhatóságát, akkor a hálózat egészének, vagy legalább is a változással érintett hálózatrészek újramérése elengedhetlenné válik. Az európai példák alapján ez 15-20 évenként válik szükségessé.

Az MGH-2000 bevezetése óta az ELGI újabb abszolút állomásokat telepített, és több régebbi abszolút pont mérését is megismételtette a hálózat referenciaszintjének további pontosítása érdekében. Az ezen mérésekhez kapcsolódó relatív mérésekkel együtt újból kiegyenlítették az alaphálózatot. A nehézségi gyorsulási értékek két hálózat (MGH-2000 és MGH-2010 [MGH: magyarországi gravitációs hálózat]) közötti eltéréseinek területi eloszlását a 11. ábrán

ábrázoltuk (Csapó – Koppán, 2011). Látható, hogy a g változásai az új abszolút meghatározásokhoz közeli területeken haladják meg a relatív graviméterekkel elérhető mérési megbízhatóságot.

Az Egységes Európai Gravitációs Hálózat (UEGN) legutóbbi kiegyenlítése 2005-ben történt Münchenben. A végső számításokat egy német és három magyar szakember végezte. A munka befejeztével az a vélemény alakult ki a négy szakemberben, hogy valószínűleg ez volt az utolsó ilyen jellegű hálózatkiegyenlítés, mivel (Magyarország és további egy-két gravimetriai kutatási háttérrel nem rendelkező kisebb ország kivételével) már valamennyi államban van abszolút graviméter, így szükségtelenné válik a relatív graviméteres mérésekkel végzett hálózati munkák korábbi jellegű kiegyenlítése.

Magyarországon a hagyományoknak megfelelően a szükséges tudás és tapasztalat rendelkezésre áll a gravimetria tudományterületének sikeres folytatásához. Tudni kell azonban, hogy a tudományterület fontos technikai váltás (az abszolút gravimetria teljes térnyerése) előtt áll. A szakemberek felkészültek az új technika fogadására és alkalmazására, egyelőre csupán



11. ábra. MGH-2000 és MGH-2010 közötti eltérések

az alapeszköz, egy terepi abszolút graviméter hiányzik a hazai gravimetria további világszínvonalú műveléséhez.

Megjegyzés

Az MTA Földtudományok Osztálya 2010. novemberi ülésén vitatta meg a gravimetria mai jelentőségét és helyzetét Magyarországon. Ez a tanulmány az osztályülésen elhangzott előadás és az azt követő vita alapján készült. A jelenlegi gravimetriai kutatásaink az OTKA támogatásával (K76231) folynak.

Kulcsszavak: gravimetria, *nehézségi erőter*, *gravitációs alaphálózat*, *graviméter*, *Eötvös-inga*, *nehézségi gradiensek*.

IRODALOM

- Csapó G., Sárhidai A. (1990): Magyarország új nehézségi alaphálózatának (MGH-80) kiegyenlítése. *Geodézia és Kartográfia*, 42,3, 181-190.
- Csapó G., Völgyesi L. (2002): A nehézségi erő vertikális gradiensének mérése és szerepe a nagy pontosságú graviméteres méréseknél magyarországi példák alapján. *Magyar Geofizika*, 43,4, 151-160.
- Csapó G. (2005): Az Eötvös Loránd Geofizikai Intézet geodéziai vonatkozású gravitációs kutatásai napjainkig. *Magyar Geofizika* 46,2, 66-76.
- Csapó G., Földváry L. (2006): A magyarországi gravimetria története napjainkig. *Geodézia és Kartográfia*, 58,7, 23-30.
- Csapó G., Kenyeres A., Papp G., Völgyesi L. (2011): Az abszolút gravimetria magyarországi alkalmazásával kapcsolatos tervek és feladatok. *Geodézia és Kartográfia*, 63,2, 4-9.
- Csapó G., Koppán A. (2011): A legújabb országos gravimetriai hálózat (MGH-2010) munkálatai és kiegyenlítési eredményei. *Acta Geodaetica et Geophysica Hungarica* (megjelenőben)
- Dobróka M., Völgyesi L. (2010): Sorfejtéses Inverzió IV. A nehézségi erőter potenciálfüggvényének in-

- verziós előállítás. Magyar Geofizika, 51,3, 143-149*.
- Szabó Z. (1999): Az Eötvös-inga históriája. Magyar Geofizika 40,1, 26-38.
- Szabó Z. (2004): A gravitációs és földmágneses kutatások története Magyarországon. Magyar Geofizika 45, különszám, 3-21.
- Völgyesi L. (2002): Geofizika. Egyetemi jegyzet, Tankönyvkiadó, Budapest*.
- Völgyesi L. (2005): A nehézségi erővel kapcsolatos fizikai alapfogalmak áttekintése. Geomatikai Közlemények VIII, 175-179*.
- Völgyesi L., Tóth Gy., Csapó G., Szabó Z. (2005a): Az Eötvös-ingamérések geodéziai célú hasznosításának helyzete Magyarországon. Geodézia és Kartográfia, 57,5, 3-12*.
- Völgyesi L., Kenyeres A., Papp G., Tóth Gy. (2005b): A geoidmeghatározás jelenlegi helyzete Magyarországon. Geodézia és Kartográfia. 57,1, 4-12*.
- Völgyesi L., Ádám J., Csapó G., Nagy D., Szabó Z., Tóth Gy. (2006): A Nemzetközi Földmérés 1906-os budapesti konferenciájának hatása a geodézia és a geofizika fejlődésére. Magyar Geofizika, 47,3, 101-112*.
- Völgyesi L., Csapó G., Szabó Z., Tóth Gy. (2007): A nehézségi erőter időbeli változása a talajvízszint ingadozásának hatására. Geomatikai Közlemények X, 159-166*.
- Völgyesi L. (2009): A geoid időbeli változása. Geomatikai Közlemények, XII, 119-130*.
- Völgyesi L., Csapó G., Laky S., Tóth Gy., Ultmann Z. (2009): Közel fél évszázados szünet után ismét Eötvös-inga mérések Magyarországon. Geodézia és Kartográfia, 61,11, 71-82*.

* A jelzett tanulmányok a www.fgt.bme.hu/volgyesi webladról letölthetők.

* * *

Völgyesi L (2012): A gravimetria mai jelentősége és helyzete Magyarországon. Magyar Tudomány, Vol. 173, Nr. 6, pp. 706-723.

Dr. Lajos VÖLGYESI, Department of Geodesy and Surveying, Budapest University of Technology and Economics, H-1521 Budapest, Hungary, Műegyetem rkp. 3.
Web: <http://www.agt.bme.hu/volgyesi> E-mail: volgyesi@eik.bme.hu