

Közel fél évszázados szünet után ismét Eötvös-inga mérések Magyarországon

Dr. Völgyesi Lajos egyetemi tanár^{1, 2}, dr. Csapó Géza szaktanácsadó³,
Laky Sándor tudományos segédmunkatárs², dr. Tóth Gyula egyetemi docens^{1, 2},
Ullmann Zita egyetemi hallgató¹

¹ BME Általános- és Felsőgeodézia Tanszék

² MTA-BME Fizikai Geodézia és Geodinamikai Kutatócsoport

³ Eötvös Loránd Geofizikai Intézet

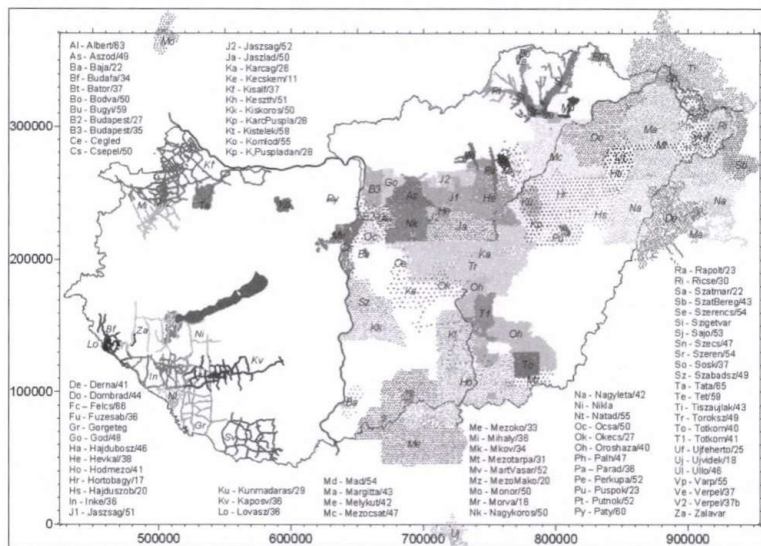


Az 1900-as évek elején a magyarországi gravitációs kutatások eredményeire figyelt a világ földtudományokkal foglalkozó valamennyi neves szakembere. Eötvös Loránd nagyszerű találmánya új fejezetet nyitott az ásványi nyersanyagok kutatásában, de új lehetőségeket teremtett a geodéziában is a Föld alakjának meghatározásában. Az 1910-es évek első nagy sikerei, majd az 1950-es évektől az ingamérések második nagy aranykora után az 1960-as évek végére gyakorlatilag befejeződtek Magyarországon a földtani kutatás céljából végzett ingamérések. Az ezt követő hosszabb szünet után napjainkban a geodézia tudománya újabb igényekkel jelentkezett további mérések végzésére.

1. Előzmények

Torziós ingával az első nagyobb területre kiterjedő terepi méréseket 1901 és 1903 között Eötvös Loránd és munkatársai végezték. Később, az 1960-as évek végéig terjedő időszakban a Magyar–Amerikai Olajipari Rt. (MAORT), az Eötvös Loránd Geofizikai Intézet (ELGI) és az Országos Köolaj és Gázipari Tröszt (OKGT) geo-

fizikusai összesen mintegy 60 000 ingamérést hajtottak végre a sík- és az enyhén dombvidéki területeken (Polcz, 2003). Ezzel a mennyiségű méréssel Magyarország a Föld egyik legjobban felmért területe. A korábbi méréseket elsősorban ásványi nyersanyagok kutatása céljából végezték, ennek megfelelően nagy általánosságban csak a W_{zx} és W_{zy} horizontális gradienseket dolgozták fel, a geodézia szempontjából kiemelten fontos W_{Δ} és W_{xy} görbületi gradiensek feldolgozatlanul maradtak. Sajnos mára a korábbi mérési adatok



1. ábra. Az 1995–2008 között digitális adatbázisba rendezett mintegy 34 144 db Eötvös-inga mérés területi eloszlása

egy része elveszett, viszont a jelentősebb részük az egykori észlelési lapok, mérési jegyzőkönyvek, térképek vagy fénymásolt gradiens-térképek alapján még hozzáférhető (Csapó, 2005). 1995 óta komoly erőfeszítések folynak a még meglévő adatok megmentésére, az egykori – esetenként már alig olvasható – mérési dokumentumok adatait az ELGI munkatársai a BME Általános és Felsőgeodézia Tanszék anyagi támogatásával számítógépes adatbázisba rendezik. Az 1. ábrán az 1995 és 2009 között digitális adatbázisba rendezett inga-mérések területi eloszlását láthatjuk. Az ábráról többek között leolvasható, hogy az egyes területrészekben mikor történtek az ingamérések (pl. az *As* – *Aszod/49* arra utal, hogy a térképen „*As*”-sel jelölt Aszód környéki területen 1949-ben végezték a méréseket.) Eddig több mint 34 000 ingamérés adatai kerültek a számítógépes adatbázisba, lehetővé téve ezzel az értékes adatok további – elsősorban geodéziai célú – hasznosítását.

2. Az Eötvös-inga mérések geodéziai hasznosítása

Eötvös már az első terepi méréseivel egy időben olyan számítási eljárást dolgozott ki, melynek segítségével a torziós-ingával mért W_{Δ} és W_{xy} görbületi gradiens adataiból meghatározható két pont között a függővonal-elhajlás értékek változása (Eötvös, 1906, 1909). Ha torziós ingával felmért terület néhány pontjában asztrogeodéziai módszerekkel meghatározzuk a függővonal-elhajlásokat, akkor az ingamérések adataiból minden egyes Eötvös-inga mérési pontra levezethetők a függővonal-elhajlás értékek. Ugyanakkor az így meghatározott függővonal-elhajlás értékekből a csillagászati szintezés módszerét alkalmazva lehetőség nyílik a részletes geoidformák meghatározására (Völgyesi, 2001); vagyis ilyen módon a torziós-inga mérések felhasználásával részleteiben tanulmányozhatjuk a geoid alakját. Napjainkban – a legújabb matematikai és számítástechnikai eszközök birtokában – Eötvös számítási módszerét sikerült továbbfejleszteni (Völgyesi 1993, 1995, 2005; Völgyesi és mások, 2005) és ezzel lehetőség adódott a függővonal-elhajlások és a lokális geoidformák minden eddiginél pontosabb meghatározására.

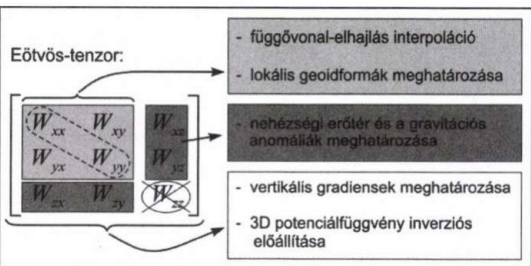
A görbületi adatok felhasználása mellett a számítástechnika fejlődésével ma már további lehetőségek nyíltak az Eötvös-inga mérési eredmények geodéziai alkalmazása területén. Mivel

a fizikai geodéziában a valódi földi nehézségi erőter ismeretének meghatározó jelentősége van, időközben felmerült a szüksége és geodéziai alkalmazási lehetősége az Eötvös-ingával mérhető vízszintes gradienseknek is. Ugyanis ezeket a gradienseket néhány megfelelő nehézségi gyorsulás vagy nehézségi rendellenesség értékkel kombinálva, viszonylag egyszerűen előállíthatók a helyi nehézségi erőter rövidperiódusú, különösen a 30 km-nél rövidebb hullámhosszúságú összetevői (Völgyesi–Tóth–Csapó, 2004).

A nehézségi erőter ilyen úton történő előállításához viszont szükségünk van a függőleges (gyakori szóhasználattal vertikális) gradiensekre is, amelyek valódi értéke vizsgálataink szerint jelentősen eltér az ismert normálértéktől, ráadásul ez az egyetlen gradiens, amely Eötvös-ingával nem mérhető közvetlenül (Csapó, 2001, Csapó–Völgyesi, 2004). Mivel a függőleges gradiensek nagy pontsűrűségű meghatározása graviméteres mérésekkel meglehetősen hosszadalmas és költséges, ezért erre más megoldást célszerű keresni.

Ehhez az Eötvös-inga mérésekből előállíthatók a $T = W - U$ potenciálzavar különböző második deriváltjai: a T_{xx} , T_{yy} vízszintes gradiensek és a $T_{\Delta} = T_{yy} - T_{xx}$, $2T_{xy}$ görbületi értékek, márpedig a Haalck (1950) által javasolt eljárással, pontosan ezek segítségével a szükséges T_{zz} függőleges gradiens is (legalábbis relatív értelemben) kiszámítható (Tóth–Völgyesi–Csapó, 2004). Ez az eljárás – a csillagászati szintezéshez hasonlóan – a függőleges gradiensek *különbségeit* állítja elő Eötvös-ingával mért legalább három pont között. Ebből következik, hogy a függőleges gradiens értékét egy adott terület legalább néhány pontjában ismernünk kell ahhoz, hogy az eljárással az Eötvös-inga mérések alapján a függőleges gradiens abszolút értelemben is meghatározható legyen.

Fontos és érdekes újdonság az ingamérések geodéziai alkalmazásában a nehézségi erőter potenciálfüggvényének inverziós előállítására. Amennyiben ugyanis az Eötvös-inga mérésekből meg tudjuk határozni a nehézségi erőter potenciálfüggvényét, a potenciálfüggvény megfelelő irányú első deriváltjaiból előállíthatók az erőter vektorának összetevőit, a második deriváltak pedig az Eötvös-tenzor elemeit adják, amelyek kiválóan alkalmasak a számítás ellenőrzésére. Ennél fogva igen nagy jelentősége van a potenciálfüggvény meghatározásával kapcsolatos kutatásoknak. A legújabban kidolgozott módszer lehetőséget ad az Eötvös-inga mérések alapján a nehézségi erőter potenciálfüggvényének és a po-



2. ábra. Az Eötvös-inga mérések geodéziai hasznosítási lehetőségei

tenciálfüggvény valamennyi fontos deriváltjának inverziós előállítására (Dobróka–Völgyesi, 2008, 2009). Ezáltal teljes képet nyerhetünk a szintfelületek helyi felületdarabjainak alakjáról és így ez akár analitikusan is előállítható.

A 2. ábrán röviden összefoglaltuk az Eötvös-inga mérések geodéziai hasznosításának jelenlegi helyzetét. Az ábra bal oldalán az Eötvös-tenzor elemeit három csoportba osztottuk: a világosabb árnyalattal jelölt területen az ingával mérhető görbületi adatokat emeltük ki, a sötétebb résszel a horizontális gradienseket jelöltük, míg az áthúzott W_{zz} függőleges gradiens a torziós-ingával közvetlenül nem mérhető. Ugyanezen ábra jobb oldalán azt szemléltettük, hogy az Eötvös-tenzor különböző elemeinek felhasználásával milyen geodéziai célú számítások végezhetők, illetve milyen mennyiségek határozhatók meg.

3. Az újabb ingamérések szükségése

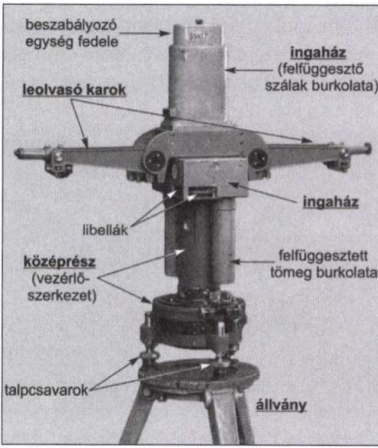
Az Eötvös-inga mérések geodéziai alkalmazására vonatkozó kutatásaink során az utóbbi időkből több olyan probléma adódott, amelyek szükségessé tették újabb mérések elvégzését. A legfontosabbok a függőleges gradiensek meghatározásával kapcsolatos. Mint említettük, Haalck (1950) ötlete alapján olyan számítási módszert dolgoztunk ki, amellyel Eötvös-inga mérések felhasználásával az Eötvös-tenzor hiányzó W_{zz} eleme, a függőleges gradiens is meghatározható interpolációs eljárással (Tóth és mások 2005; Tóth, 2007). A módszer alkalmazhatóságát szintetikus adatok felhasználásával, teszt-számításokkal már igazoltuk,

szükséges azonban ennek mért adatokkal történő ellenőrzése. Erre a célra olyan pontok kellenek, ahol mind Eötvös-inga adatok, mind függőleges gradiens mérések rendelkezésre állnak. Sajnos azonban a korábbi ingamérések helyszínén nem mértek függőleges gradiens értékeket, ráadásul a pontok koordinátáit sem ismerjük olyan pontossággal, hogy az egykori ingamérések helyszínén utólag mérhessünk függőleges gradiens értékeket. Másik lehetőségnek az ELGI Mátyás-hegyi barlangjában 1990-ben létrehozott 14 pontból álló gravitációs mikrobázis mutatkozott, amelynek pontjain ismertek a vertikális gradiens helyi értékei és 3 azimutós Eötvös-inga mérések is történtek (Csapó, 1991). Sajnos azonban a 3 azimutós ingamérésekből a függőleges gradiensek interpolációjához szükséges görbületi adatok nem határozhatók meg, ezért szükségessé vált az ELGI Mátyás-hegyi barlangjában található 14 pontból álló gravitációs mikrobázis Eötvös-ingával történő 5 azimutós újramérése, illetve a függőleges gradiensek és az Eötvös-inga mérések egyidejű végrehajtása egy új helyszínen.

4. Az ingák előkészítése a mérésekre

A korábban gyártott Eötvös-ingák közül jelenleg két típus alkalmas még megfelelő pontosságú terepi mérések végzésére. Az egyik az 1920-as évek végére kifejlesztett Eötvös-Rybár (Auterbal) inga, a másik ennek az 50-es évekre továbbfejlesztett változata, az E54 típus (Szabó, 1999).

A rendelkezésre álló közel 80 éves Auterbal-ingával különböző gondjaink voltak. Korábban, 1964-ben az újabb E54 ingák elterjedésével az ELGI számára egy akkor már sokat „gyengélkedő” Auterbal-inga nélkülözhetővé vált, ezért az ÉKME Felsőgeodézia tanszékének ajándékozta oktatási célokra. Nem sokkal ezt követően az inga teljesen működésképtelen lett és a tanszék múzeumába került. Hosszú évek múlva, 2008-ban megvizsgáltuk az ingát és megállapítottuk, hogy a torziós szálak nincsenek elszakadva, az alapvető probléma a vezérlő szerkezettel van. Ekkor még nem lehetett tudni, hogy az inga közel 40 éve teljesen megfeszített állapotban lévő forgató rugója



3. ábra. Az Auterbal-inga

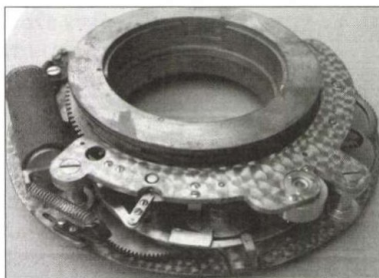
mennyire veszítette el az erejét, és milyen egyéb problémák lehetnek a műszerrel. Az ingáról semmiféle leírás nem állt rendelkezésünkre, így javítása és felújítása komoly feladatnak mutatkozott.

Az első feladat az inga szét-, illetve összeszerelési sorrendjének és logikájának megfigyeltése, a számtalan csavar és rögzítő elem funkciójának tisztázása volt. Már a szétbontás kezdetétől fogva nagyon körültekintően kellett eljárni, mivel tudtuk, hogy a teljesen megfeszített nagy erejű forgatórugó a szétszedés közben igen komoly károkat okozhat. A 3. ábrán látható ingaház és a középrész szétválasztását követően, szerencsére már a középrész szétbontásának kezdetén sikerült a rugót kioldani, majd minden további bontási lépést alaposan megfontolva végül a hibás vezérlőszervezetet ki tudtuk emelni. A 4. ábrán látható vezérlőszervezet felújítása és részbeni átalakítása, valamint az egyik törött alkatrész pótlása után sikerült a szerkezetet működőképes állapotba hozni.

A másik, E54 típusú ingát az ELGI munkatársai újították fel. A felújítást követő drift és egyéb vizsgálatok során bebizonyosodott, hogy az inga mérőképes állapotban van, a terepi mérések végzéséhez viszont szükséges volt egy megfelelő észlelőház elkészítése. (Az E54 típusú inga és a hozzá elkészített észlelőház a címlap fotón látható).

Ezt követően további fontos fejlesztéseket hajtottunk végre. Az automatikus leolvasás megvalósítása céljából mindkét ingára CCD-érzékelős kamerákat szereltünk fel, a skálák megvilágítására pedig erős fényű LED-eket (fénykibocsátó diódákat) alkalmaztunk. Az 5. ábrán az Auterbal-inga leolvasó karjára szerelt kamera látható. A kamerák vezérlését, a képek rögzítését számítógéppel oldottuk meg, a szükséges szoftvereket Linux operációs rendszer alá fejlesztettük.

Mivel a kamerák alkalmazásával lehetőség nyílt hosszú időn keresztül akár másodpercenkénti leolvasásokat végezni, ezzel új távlatok nyíltak eddig ismeretlen jelenségek



4. ábra. Az Auterbal-inga vezérlőszervezete

megfigyelésére. Lehetővé vált például a lengések csillapodásának minden eddiginél pontosabb és részletesebb megfigyelése, és a hosszú idejű drift pontosabb tanulmányozása.

5. Az ingák besabályozása, tesztmérések

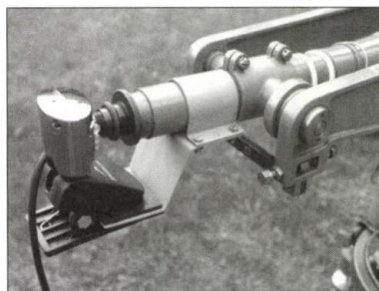
A terepi méréseket megelőzően a felújított ingákkal különféle tesztméréseket végeztünk,

amelyek közül a legfontosabb a torziós szálak driftjének (időbeli egyirányú elcsavarodásának) vizsgálata volt. Jó minőségű szálra függesztett inga hosszú időn keresztül ugyanabban a helyzetében marad, míg a gyengébb minőségű szálak esetében az inga kis mértékben folyamatosan elfordul, a skálaleolvasás állandóan változik. A jelenségnek szilárdtestfizikai magyarázata van. A drift csökkentése a szálak hőkezelésével, és hosszú idejű terheléses felfüggesztésével érhető el.

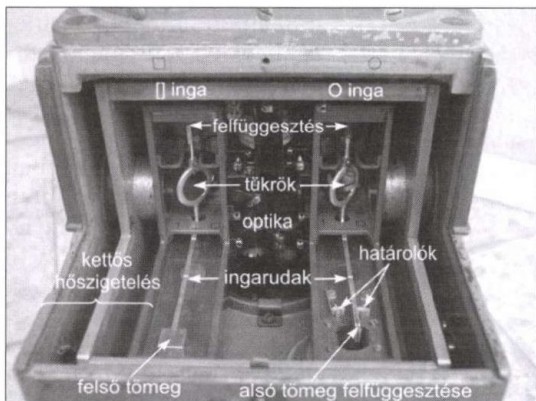
Az ingák besabályozásához, és a vizsgálatok megértéséhez szükséges az ingaszervezet belső felépítésének pontosabb ismerete. Az általunk használt műszerek két egymástól függetlenül felfüggesztett ingát tartalmaznak. Az ingaházon belül az ingák elhelyezése a 6. ábrán látható, a műszer szétszedett állapotában. A két antiparalel elhelyezésű inga kétfősen hőszigetelt térben van, mindkét alumíniumból készült ingarúd a felülről ráerősített tükrön keresztül csatlakozik a felfüggesztő torziós szálhoz. Az Auterbal-ingában a torziós szálak vastagsága 0.017 mm (a vékonyabb emberi hajszálak vastagsága ennél nagyobb: 0.02 mm). A 6. ábrán jól látható a baloldali ingán az ingarúdra erősített téglatest alakú tömeg, a másik vele párhuzamos ingakaron pedig az alsó tömeg felfüggesztési helye. Megkülönböztetésül az egyik ingát „O”-val jelölve kör-ingának, a másikat „□”-gel jelölve négyszög-ingának nevezzük.

Az ingák lengési tartománya a 6. ábrán látható „határolókkal” állítható be, az ingák elfordulási szöge valamivel kisebb, mint $\pm 2^\circ$.

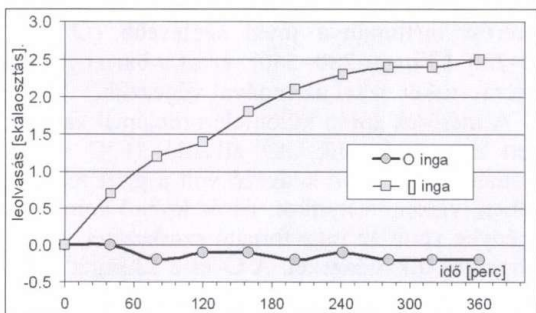
Az E54 inga drift vizsgálatát célzó labormérések 6 órás megfigyelésének eredménye a 7. ábrán látható. Megállapítha-



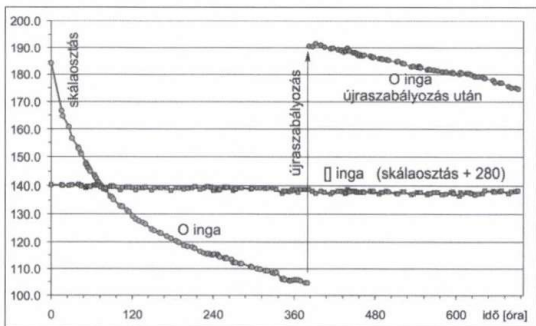
5. ábra. CCD érzékelős kamera a leolvasó karon



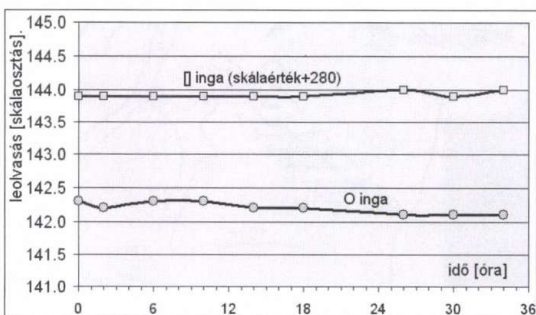
6. ábra. Az Auterbal ingaház belseje a két ingával



7. ábra. Az E54 inga drift vizsgálata



8. ábra. Az Auterbal-inga drift vizsgálata



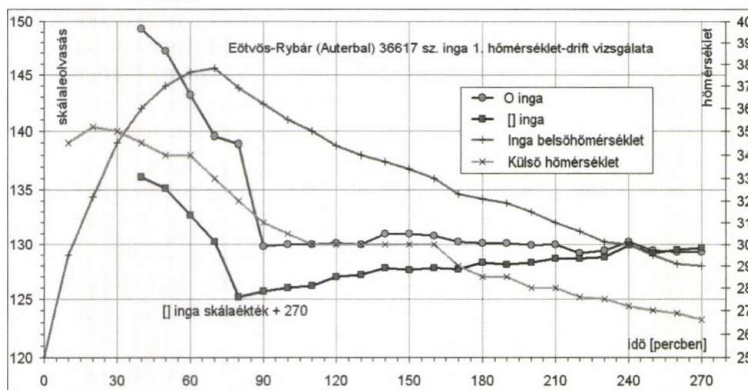
9. ábra. Az Auterbal inga driftje a javítás után

tó, hogy a két torziós szál driftje nem azonos, a $\square$ ingához tartozó szál járása lényegesen nagyobb. A kör-inga csupán 0,2 skálaosztással tért el az első leolvasási értéktől, ugyanakkor a $\square$ ingánál ez az eltérés meghaladta a 2 skálaosztást (7. ábra). Tapasztalataink szerint terepi mérések esetén a hőmérséklet változása miatt a helyzet jóval kedvezőtlenebb, a $\square$ ingaszál driftje az 5-6 skálaosztás értéket is elérheti (Csapó, 2008).

Izgalmasabb probléma volt az Auterbal-inga torziós szálainak vizsgálata: a nagy kérdés az volt, hogy a közel 40 éves pihenési idő milyen hatással volt a szálakra. Az összeszerelést követően közel egy hónapon keresztül ugyanabban az azimutban ellenőriztük az ingák állapotát napi legalább 10 leolvasással. Az első napok mérési eredményei aggasztóak voltak: miközben a $\square$ inga kiválóan működött, a kör-ingánál hatalmas driftet tapasztaltunk: az első 24 órában több mint 20 skálaegységet zuhant a leolvasás. Néhány nap elteltével viszont már sejteni lehetett, hogy nem annyira reménytelen a helyzet, ugyanis amint a 8. ábrán is látható, jelentősen kezdett csökkenni a driftgörbe meredeksége.

Két hét elteltével már „csak” napi 1–2 skálaosztással csökkent a leolvasás, viszont az addigi folyamatosan csökkenő drift miatt újra be kellett szabályozni az ingát. (Az inga beszabályozása – az egyensúlyi helyzet finombeállítása – az inga kismértékű elfordítását, emelését/süllyesztését jelenti.) Amint a 8. ábrán is láthatjuk, ekkor szándékosan kicsit túlfordítottuk a kör-ingát, mivel továbbra is számítani lehetett tartósan csökkenő driftre. A tartós drift valóban meg is maradt, ezért kiemeltük és alaposan megvizsgáltuk a torziós szál befogásait. Mivel a szál felső oldali rögzítését bizonytalannak találtuk, ezt speciális ragasztóval megerősítettük (Völgyesi és mások, 2009). Emellett a szál megfelelő mértékű ellentétes irányú csavarási terhelésével, majd tartós nyugalmi függesztésével gyakorlatilag sikerült megszüntetni a kör-inga driftjét (9. ábra).

Érdekes tapasztalatokat szereztünk a mérési eredmények hőmérsékletfüggésére vonatkozóan is. Az egyik vizsgálatunk arra irányult, hogy ha gyakran előforduló terepi körülmény esetén az ingát egy alacsonyabb hőmérsékletű raktárból a terepre kiszállítva magasabb hőmérsékletű inga-sátorban felállítjuk, akkor mennyi idő múlva lesz nagy eséllyel lineáris a hőmérséklet-változás miatti drift. Az erre vonatkozó méréseink közül az egyik jellegzetes megfigyelést a 10. ábrán mutatjuk be.



10. ábra. Az Auterbal-inga hőmérséklet-drift vizsgálata

Látható, hogy az eddig alkalmazott és elfogadott 40 perces várakozási (csillapodási) idő helyett a mérés kezdetén kb. 90 perc után alakult ki a hőmérséklet olyan egyensúlyi állapota, amikor célszerű az első leolvasást elvégezni. Vizsgálatokat kezdtünk a leolvasások hőmérsékleti javítására vonatkozóan is, ezt a kérdést azonban eddig nem sikerült megnyugtatóan megoldanunk. Az inga már néhány tized fokos hőmérsékletváltozásra is érzékenyen reagál, tapasztalataink szerint a lassú változások jelentős része a torziós szálak hőmérsékleti érzékenysége miatt következik be, az azonnali változások viszont az ingakarok és a leolvasókarok hőtágulása, illetve hőmozgása miatt következnek be. A több hónapos vizsgálatok, tesztmérések és a többszöri beszabályozások után 2008 derekára lehetővé vált az Auterbal-ingával is a terepi éles mérések végzése.

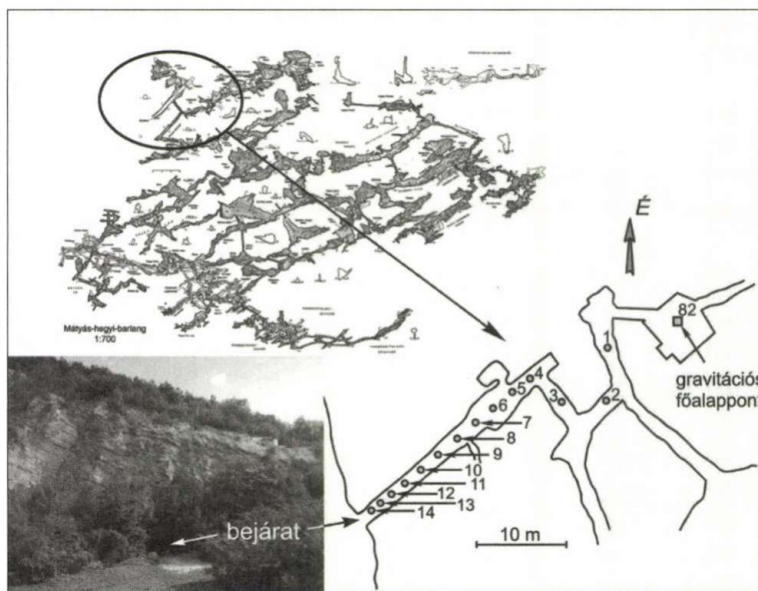
6. Mérések a Mátyás-barlangban

Amint már a 3. részben említettük, az Eötvös-ingás méréseink egy részét a Mátyás-barlangban terveztük az ELGI gravitációs mikrobázisának pontjain. A Mátyás-hegyi barlangrendszer alaprajza a 11. ábra felső részén látható, a bekeretezett és kinagyított rész az ELGI gravitációs laboratóriuma, illetve a geo-

dinamikai állomás területe, benne a gravitációs főalappont és az Eötvös-ingás mikrobázis 14 pontjának helye. Először az E54 ingával próbálkoztunk, azonban már az első mérések során látható volt, hogy néhány ponttól eltekintve olyan hatalmas gradiens értékek vannak, amelyeket az általunk használt E54 inga szűkebb mérési tartománya (O inga: 0–170, [] inga: 200–370) nem tud átfogni. Ennél az Auterbal-inga

mérési tartománya jóval szélesebb (O inga: 0–280, [] inga: 280–560), ezért a barlangban a méréseinket ezzel az ingával végeztük.

A mérések során különféle problémákkal kellett megküzdenünk. Az állandó 11 °C körüli hőmérséklet ugyan kedvező volt a drift tekintetében, viszont a nyirkos, párás levegő komolyan igénybe vette az inga forgató szerkezetét, a mechanikus alkatrészeket. A O és a [] ingát többször is aszimmetrikusan kellett beszabályozni a különlegesen magas gradiens értékek miatt, hogy ezek a szélső helyzetekben is leolvashatók legyenek. A barlang bejáratához közeli három ponton már így sem tudtunk méréseket végezni, mi-



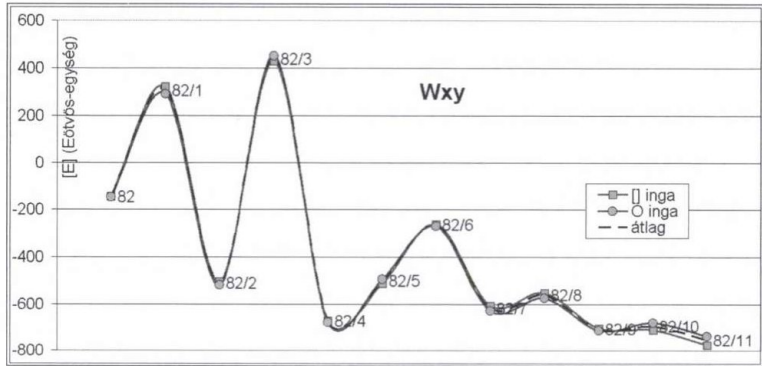
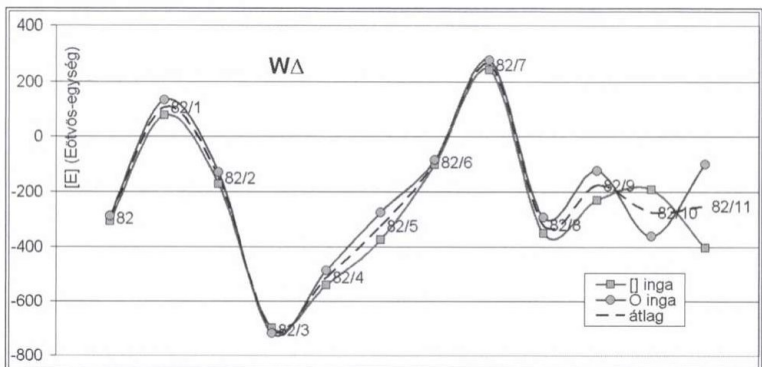
11. ábra. Az Eötvös-inga mérések mikrobázisa az ELGI Mátyás-barlangi gravitációs laboratóriumában

vel itt már az Auterbal-inga nagyobb mérési tartománya sem volt elegendő.

A gravitációs főalapponton és a mikrobázis pontjain végzett méréseink alapján példaként a W_{Δ} és a W_{xy} görbületi adatok változását mutatjuk be a 12. és a 13. ábrán, a 82 főalapponttól indulva a mikrobázis 82/11. pontjáig.

Amint már említettük, az inga konstrukciójának megfelelően egymástól 7 cm távolságban két egymástól független antiparalel elhelyezésű ingaszerkezet működik, ezért minden egyes gradiensre és görbületi adatra a mérések során két független értéket kapunk. Teljesen hibátlan mérések esetén elvileg a két inga méréseinek meg kellene egyeznie, így az eltérések alapvetően a mérések megbízhatóságára adnak információt. A 12. és a 13. ábrán jól megkülönböztethetők a kör-, és a négyzög-inga mérési eredményei, a szaggatott vonal pedig a kettő átlagértékét mutatja.

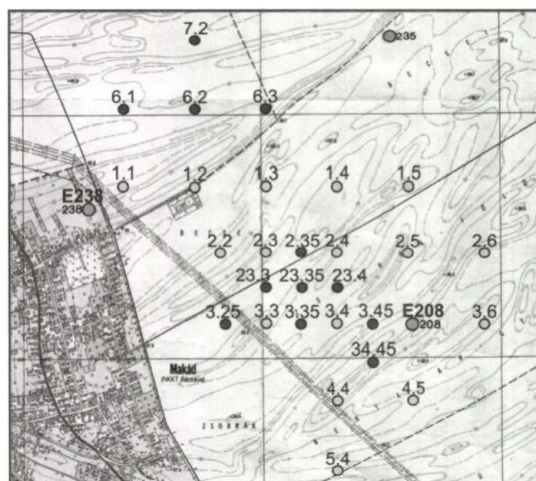
Ha megvizsgáljuk a két független inga által mért értékek egymástól való eltérését, akkor azt tapasztaljuk, hogy a 82 jelű gravitációs főalapponton a többször is megismételt mérések során a kör- és a négyzög-inga gyakorlatilag ugyanazokat a gradiens-értékeket mérte, viszont a barlang belsejétől a kijárat felé haladva egyre nagyobb eltérések adódtak. A gravitációs főalappont nagy légtérű terem közepén található, ahol feltételezhetően a két ingára gyakorlatilag ugyanakkora erők hatnak. Ugyanakkor a főalappontot tartalmazó nagyteremhez képest a mikrobázis pontjai a barlangba vezető jóval alacsonyabb és keskenyebb folyosón találhatók. Itt az igen jelentős üreghatás mellett az 5-ös ponttól a kijárat felé haladva egyre inkább jelentkezik a külső meredek sziklafal gravitációs hatása is (Ullmann, 2008, 2009). Elképzelhető, hogy ezekben a pontokban olyan jelentős a gradiensnek térbeli változása, hogy ez már az egymástól 7 cm távolságra lévő ingák esetén is mérhető különbséget jelent.

12. ábra. W_{xy} értékek a Mátyás-barlang gravitációs mikrobázisán13. ábra. W_{Δ} értékek a Mátyás-barlang gravitációs mikrobázisán

7. Mérések Makád környékén

A terepi Eötvös-inga mérések újraindítását a K60657 számú OTKA pályázat anyagi támogatása tette lehetővé. Az Eötvös-inga és az egyidejű függőleges gradiens mérések céljára a Csepel-sziget déli része, Makád község külterülete látszott alkalmasnak, ahol minimális a beépítettség és az ötvenes években már számos Eötvös-inga mérést is végeztek.

A 14. ábrán bemutatott hálózat pontjait kezdetben 300 m-es rácshálózat sarokpontjaiban terveztük, később ezt a hálózat középső részén 150 m-es távolságra sűrítettük. A hálózati pontok vízszintes koordinátáit GPS technikával (a pontoknak az országos hálózatba illesztésével), magasságukat vonalszintezéssel, a pontok környékének 8 irányú terepfelvételét mérőállomással a Geoservice Kft. munkatársai határozták meg. Valamennyi ponton – az ingamérésekkel párhuzamosan – LCR graviméterekkel meghatároztuk a vertikális gradiens helyi értékét, a horizontális gradienseket, valamint az MGH-2000



rendszerbeli „g” értékeket is. Eötvös-ingával a feltüntetett hálózat 30 pontján végeztünk méréseket, amely pontok döntő többségében egyidejűleg graviméterekkel horizontális és vertikális gradiens méréseket is végeztünk.

Az ingaméréseket E54 típusú ingával végeztük 5 azimutos vizuális észleléssel (az első két azimut ismétlődő méréssel), de két ponton az Auterbal-ingával is dolgoztunk. Figyelembe véve a nemlineáris gradiens változásokat, a terület digitális domborzatmodelljének segítségével elkészítettük a mérésekből előállítható gradiens és görbületi térképeket 50×50 m-es osztásközű rácsra. Ezek numerikus differenciálásával kiszámítottuk a W_{xx} , W_{yy} , harmadik deriváltakat, majd ezekből numerikus integrálással előállítottuk a W_z vertikális gradienseket (Tóth, 2007; Csapó és mások, 2009). Az így elkészített W_z térkép (E egységben) a 15. ábrán látható, amelyen a mért pontokat és a területszintezéssel meghatározott pontokat is feltüntettük. Szembetűnő a számított vertikális gradiensek korrelációja a 16. ábrán látható domborzatmodellel (a 15. és a 16. ábra keretein az EOVS koordinátákat tüntettük fel).

Összevetve a mért és az Eötvös-inga mérések alapján interpolált vertikális gradiens értékeket megállapítható, hogy a számított értékek kisebbek a mért értékeknél. Ez vagy az alkalmazott numerikus differenciálási eljárásból (centrális differenciák képzése), amelynek átviteli függvénye levágja a magas frekvenciák jelentős részét, vagy magából a numerikus eljárásból adódik (Csapó és mások, 2009). Ennek eldöntése további vizsgálatokat igényel.

Említtettük, hogy a Makád környéki mérések során a horizontális gradienseket graviméteres mérésekkel is meghatároztuk. Összevetve a graviméteres mérésekből számíttással meghatározott W_{xx} , W_{yy} gradienseket az Eötvös-inga mérések értékeivel megállapítható, hogy ebben a tekintetben a legmodernebb graviméterekkel sem érhető el az Eötvös-inga mérések pontossága (Csapó és mások, 2009), vagyis a gradiensek és görbületi adatok néhány E pontosságú meghatározására egyelőre az Eötvös-ingán kívül nincs más lehetőség.

Összefoglalás

Az Eötvös-inga mérések geodéziai célú felhasználása tekintetében nem csak a már meglevő mérési anyagnak van felbecsülhetetlen jelentősége, hanem további mérések végrehajtása is szükségessé vált.

Egy Auterbal és egy E54 típusú inga felújítását és modernizálását követően – közel fél évszázados szünet után – ismét Eötvös-inga mérések folynak Magyarországon, részben a Mátyás-barlangban, részben a Csepel-sziget déli részén.

A gravitációs gradiometria, melyet Eötvös Loránd indított el egyedülálló műszerének megalakításával, napjainkban is fontos szerepet játszik a geodéziában. Az Eötvös-inga mérések a jövőben is jelentős és nélkülözhetetlen adatforrást jelentenek a nehézségi erőter finomszerkezetének megismeréséhez, a korszerű, nagypontosságú új magyarországi geoid meghatározásához.

Magyarországon ismét kialakult egy olyan szakembergárda, amely kellő elhivatottsággal rendelkezik Eötvös Loránd munkásságának folytatásához, képes az egykori műszerek felújítására, és rutinszerű terepi ingamérések elvégzésére.

Köszönetnyilvánítás

A kutatások a K60657 és a K76231 sz. OTKA támogatásával folynak. Ezúton köszönjük továbbá a Makád környéki terepi mérésekben résztvevő Kloska K. (ELGI), Földváry L., Égető Cs. (BME), és a Geoservice Kft. munkatársainak közreműködését és segítségét.

IRODALOM

Csapó G. (1991): Az ELGI Mátyás-barlag mikrobázisán LCR graviméterrel végzett Δg , VG, és E54 Eötvös-ingával végzett gradiensmérések. (ELGI adattár).

Csapó G. (2001): A nehézségi erő vertikális gradiensének (VG) mérése és szerepe nagy pontosságú graviméteres méréseknél. Mérésügyi Közlemények, 3, (67–72).

Csapó G.–Völgyesi L. (2004): Újabb mérések a vertikális gradiens (VG) értékének meghatározására. Magyar Geofizika, 45, 2. (64–69).

Csapó G. (2005): Az Eötvös Loránd Geofizikai Intézet geodéziai vonatkozású gravitációs kutatásai napjainkig. Magyar Geofizika, 46, 2, (66–76).

Csapó G. (2008): A K60657 sz. OTKA pályázat 2008. évi szakmai jelentése (OTKA és ELGI adattár)

Csapó G.–Égető Cs.–Kloska K.–Laky S.–Tóth Gy.–Völgyesi L. (2009): Graviméteres és Eötvös-inga mérések a Csepel-sziget déli részén. Geomatikai Közlemények, XII. (91–100).

Dobróka M.–Völgyesi L. (2008): Inversion reconstruction of gravity potential based on gravity gradients. *Mathematical Geosciences*, Vol. 40, No. 3. (299–311).

Dobróka M.–Völgyesi L. (2009): A nehézségi erőter 3D potenciálfüggvényének inverziós előállítása. *Geomatikai Közlemények*, XII, (101–107).

Eötvös R. (1906) Bestimmung der Gradienten der Schwerkraft und ihrer Niveauflächen mit Hilfe der Drehwaage. *Verhandl. d. XV. allg. Konferenz der Internat. Erdmessung in Budapest*.

Eötvös R. (1909) Bericht über geodätische Arbeiten in Ungarn besonders über Beobachtungen mit der Drehwaage. *Verhandl. d. XVI. allg. Konferenz der Internat. Erdmessung in London-Cambridge*.

Haalck H. (1950): Die vollständige Berechnung örtlicher gravimetrischer Störfelder aus Drehwaagemessungen. *Veröffentlichungen des Geodätischen Institutes Potsdam*, Nr. 4, Potsdam.

Polcz I. (2003): Az Eötvös Loránd Geofizikai Intézet története I. ELGI (külön kiadvány).

Szabó Z. (1999): Az Eötvös-inga históriája. *Magyar Geofizika*, 40, 1, (26–38).

Tóth Gy.–Völgyesi L.–Csapó G. (2005): Determination of vertical gradients from torsion balance measurements. *IAG Symposia Vol 129, Gravity, Geoid and Space Missions*, C. Jekeli, L. Bastos, J. Fernandes (Eds.), Springer, 292–297.

Tóth Gy. (2007): Vertikális gravitációs gradiens meghatározás Eötvös-inga mérések hálójában. *Geomatikai Közlemények* X. 29–36.

Ullmann Z. (2008): Eötvös-inga mérések. TDK dolgozat, BME Építőmérnöki Kar.

Ullmann Z. (2009): A nehézségi erőter gradienseinek vizsgálata a Mátyás-barlagban. Diplomater, BME Építőmérnöki Kar.

Völgyesi L. (1993): Interpolation of Deflection of the Vertical Based on Gravity Gradients. *Periodica Polytechnica Civ.Eng.*, Vol. 37. Nr. 2, (137–166).

Völgyesi L. (1995): Test Interpolation of Deflection of the Vertical in Hungary Based on Gravity Gradients. *Periodica Polytechnica Civ.Eng.*, Vol. 39, Nr. 1, (37–75).

Völgyesi L. (2001): Local geoid determinations based on gravity gradients. *Acta Geodaetica et Geophysica Hung.* Vol. 36 Nr. 2, pp. 153–162.

Völgyesi L.–Tóth Gy.–Csapó G. (2004): Determination of gravity anomalies from torsion balance measurements. *Gravity, Geoid and Space Missions GGSM 2004*. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York; Vol. 129. (292–297).

Völgyesi L. (2005): Deflections of the vertical and geoid heights from gravity gradients. *Acta Geodaetica et Geophysica Hungarica*, 40, 2 (147–159).

Völgyesi L.–Tóth Gy.–Csapó G.–Szabó Z. (2005): Az Eötvös-inga mérések geodéziai célú hasznosításának helyzete Magyarországon. *Geodézia és Kartográfia*, 57, 5 (3–12).

Völgyesi L.–Égető Cs.–Laky S.–Tóth Gy.–Ullmann Z. (2009): Eötvös-inga felújítása és tesztmérések a Budapesti Mátyás-barlangban. *Geomatikai Közlemények*, XII. (71–82).

New torsion balance measurements in Hungary after a half century's interruption

Völgyesi, L.–Csapó, G.–Laky, S.–
Tóth, Gy.–Ullmann, Z.

Summary

Before the end of the 1960s approximately 60,000 torsion balance measurements were made in Hungary. Recent research on the field of their geodetic applications showed the need for new observations.

After an interruption of half a century, torsion balances are operated again in Hungary. Following the renovation and modernization of an Auterbal and an E54 balance, measurements are taking place on two sites: in the Mátyás cave and at the southern part of the Csepel island.

Gravity gradiometry was introduced by Lorand Eötvös by creating his famous instrument in the beginning of the 1900s, but nowadays it is playing important role in geodesy again. Torsion balance measurements will be important and indispensable data source for the determination of small wavelength gravity field and geoid features in Hungary.

A group of professionals has been formed again who have the intent to continue the scientific efforts of Lorand Eötvös, are able to renovate and modernize obsolete instruments, and have the field experience to continue torsion balance measurements.