

EÖTVÖS-INGA FELÚJÍTÁSA ÉS TESZTMÉRÉSEK A BUDAPESTI MÁTYÁS-HEGYI-BARLANGBAN

Völgyesi Lajos^{***}, Égető Csaba^{*}, Laky Sándor^{**}, Tóth Gyula^{***}, Ultmann Zita^{*}



Reconstruction of a torsion balance, and test measurements in the Mátyás cave in Budapest – During recent investigations concerning geodetic applications of torsion balance measurements several problems arose, which required performing new torsion balance measurements. For that reason the Eötvös-Rybár (Auerbal) torsion balance owned by the Department of Geodesy and Surveying (Budapest University of Technology and Economics), which has been out of operation for many decades, was reconstructed and modernized. The scale reading has been automatized and its accuracy has been improved by using CCD sensors. Calibration and processing of field measurements were computerized to meet today's requirements. The first test measurements took place in the Mátyás cave (Budapest), including measurements on the main gravity reference point of Hungary, and the points of a gravity microbase created by the Eötvös Loránd Geophysical Institute.

Keywords: reconstruction of a torsion balance, CCD sensor, automation, test measurements

Az Eötvös-inga mérések geodéziai alkalmazására vonatkozó kutatásaink során az utóbbi időben több olyan probléma adódott, amely szükségessé tette újabb Eötvös-inga mérések elvégzését. Ennek érdekében felújítottuk a BME Általános- és Felsőgeodézia Tanszék múzeumában korábban kiállított működésképtelen Eötvös-Rybár (Auerbal) ingát, a leolvasást CCD érzékelők alkalmazásával automatizáltuk és pontosabbá tettük. Modern technikai és számítástechnikai lehetőségek alkalmazásával oldottuk meg a kalibrációt és a mérések kiértékelését. Az első teszt-méréseket a budapesti Mátyás-hegyi-barlangban a gravitációs főalapponton és az ELGI mikrobázisán végeztük.

Kulcsszavak: Eötvös-inga felújítása, CCD érzékelő, automatizálás, tesztmérések

1 Bevezetés

Magyarországon 1967-ben történtek utoljára Eötvös-inga mérések. A gravitációs kutatásokban az Eötvös-inga mérések nehézsége, időigényessége miatt egyre inkább a graviméteres mérések vették át a vezető szerepet. Időközben a technika és a tudásunk is sokat fejlődött. Az új technikai lehetőségek (a modern számítógépek megjelenése, CCD érzékelős kamerák, digitális hőmérők alkalmazása, stb.) olyan új távlatokat nyitottak, amelyekről nagynevű példaképeink – Eötvös Loránd és társai – a korukban még nem is álmodhattak. Elképzelhető, hogy az új alapelveken működő gradiométerek megjelenésével – és részben a még fellelhető Eötvös-ingák modernizációjával – a gradienstmérések új, nagy reneszánszát éljük meg hamarosan.

Napjainkban az újabb Eötvös-inga mérések végzését több különböző ok mellett elsősorban a vertikális gradiensek meghatározásával kapcsolatos kutatásaink tették szükségessé (Csapó et al. 2008, Völgyesi et al. 2005). Mint ismeretes, az Eötvös-tenzor 9 eleme közül szimmetria okok miatt csak 5 elem független, amelyből 4 mérhető közvetlenül Eötvös-ingával. Haalck (1950) ötlete alapján olyan számítási módszert dolgoztunk ki, amellyel Eötvös-inga mérések felhasználásával az Eötvös-tenzor hiányzó 5. eleme, a vertikális gradiens is meghatározható interpolációs eljárással (Tóth et al. 2005, Tóth 2007). A módszer alkalmazhatóságát szintetikus adatok felhasználásával teszt számításokkal már igazoltuk (Tóth et al. 2005), hátra van még viszont a valódi mért adatokkal történő ellenőrzés. Erre a célra olyan pontok kellenek, ahol mind Eötvös-inga adatok, mind vertikális gradiens rendelkezésre állnak. Mivel a korábban szinte kizárólagosan nyersanyagkutatás céljaira végzett ingamérések pontos koordinátái nem ismeretesek, ezért ezeken a pontokon ma már vertikális gradiens mérések nem végezhetők. Adott volt ugyanakkor az ELGI Mátyás-hegyi-barlangjában egy olyan 14 pontból álló mikrobázis, ahol rendelkezésre állnak korábbi Eötvös-inga mérések, valamint

* Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Általános- és Felsőgeodézia Tanszék

** MTA-BME Fizikai Geodézia és Geodinamikai Kutatócsoport

E-mail: volgyesi@eik.bme.hu, csabiegeto@yahoo.de, laky.sandor@freemail.hu, gtoth@sci.fgt.bme.hu, ultmann@gmail.com

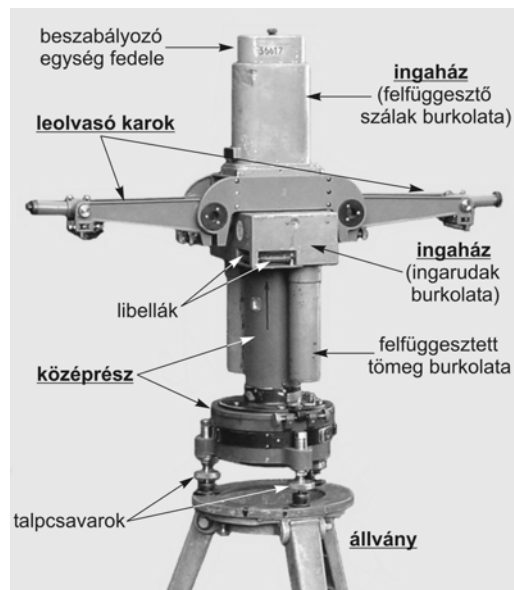
garviméteres és vertikális gradiens mérések is történtek. Sajnos korábban csak 3 azimutos ingaméréseket végeztek, így ezekből az interpolációhoz szükséges görbületes gradiens nem határozható meg. A mikrobázis pontjai egymáshoz igen közel, néhány méteres távolságban helyezkednek el a Mátyás-hegyi-barlang bejárati folyosójában.

Az Eötvös-ingák közül napjainkban két olyan típus áll rendelkezésre, amelyekkel jelenleg is megfelelő pontosságú terepi méréseket tudunk végezni. Az egyik az 1920-as évek végére kifejlesztett Eötvös-Rybár (*Auterbal*) inga, a másik ennek az 50-es évekre továbbfejlesztett változata, az *E54* típus. Az *E54* ingák elterjedésével az ELGI 1964-ben egy akkor már sokat „gyengélkedő” *Auterbal*-ingája nélkülözhetővé vált, ezért az ÉKME Felsőgeodézia tanszékének ajándékozta oktatási célokra. Nem sokkal ezt követően az inga teljesen működésképtelen lett és később a tanszék múzeumába került. Mivel a működésképtelen inga javítását senki nem tudta elvégezni, magunk vállalkoztunk a feladat megoldására. Hosszú munkánkat siker koronázta, az *Auterbal*-inga működőképes lett, sőt bizonyos szerkezeti elemek továbbfejlesztésével (pl. CCD érzékelős leolvasással) sikerült a jelenkori technikai szintnek megfelelően továbbfejlesztetni. Az alábbiakban röviden megismerkedünk az *Auterbal*-inga felépítésével, a felújításának problémáival, és áttekintjük a tesztmérések eredményeit.

2 Az *Auterbal*-inga felépítése

Az *Auterbal*-inga mérőképes állapotában a 1. ábrán látható. Négy fő szerkezeti egysége: az ingaház, a középrész, az állványzat és a leolvasókar. Az ábrán látható ingaház a műszer legfontosabb szerkezeti eleme, ebben található két egymástól teljesen független, ugyanakkor egyenértékű torziós inga egymással antiparalel felfüggesztésben. Az ingaház és a középrész a későbbi fejlesztésű és széles körben elterjedt *E54* típusú ingával ellentétben még egyetlen egységet képez, amelyek szétszerelését csak megfelelő ismeretekkel rendelkező szakember végezheti el, 6 db erős összekötő-csavar eltávolításával. Az ingaház felső részén található a beszabályozó csavarok (2. ábra), amelyek a védőkupak leszerelésével válnak hozzáférhetővé. Ezekkel állítható külön-külön a két inga felfüggesztési magassága, és itt nyílik lehetőség az ingatestek parányi elfordítására. Ugyancsak itt lehet előkészíteni a torziós szálak kiemelését, illetve cseréjét. Ezeket a műveleteket kizárólag speciális ismeretekkel és nagy gyakorlati tapasztalatokkal rendelkező szakember végezheti el, a legkisebb rossz mozdulat a torziós szál szakadását eredményezi. A torziós szálak ma már pótolhatatlanok.

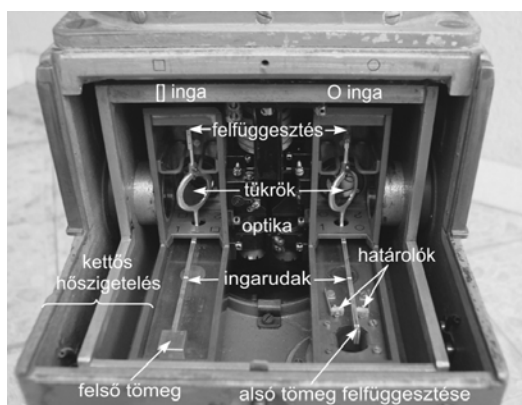
Vizuális leolvasás esetén speciális leolvasókar csúsztatható az ingaházra a felső részén található függőleges sínekre. A leolvasókaron és az ingaházon a megegyező számozásnak megfelelően egyetlen helyzetében illeszthető finoman és akadálymentesen a leolvasókar az ingaházra, fordított felhelyezés esetén a kar rászorulhat az öt vezető függőleges sínekre. Az ingaházon belül az ingák elhelyezése a 3. ábrán látható, az inga szétszedett állapotában. A két antiparalel elhelyezésű inga kettősen hőszigetelt térben van, mindkét alumíniumból készült ingarúd a felülről ráerősített tükrön keresztül csatlakozik a felfüggesztő torziós szálakhoz. Az *Auterbal*-ingában a torziós szálak vastagsága 0.017 mm (a hajszálak vastagsága 0.06 - 0.14 mm). A 3. ábrán jól látható a baloldali 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 “[]”-val jelölve négyyszög-ingának nevezük.



1. ábra. Az *Auterbal*-inga fontosabb szerkezeti elemei



2. ábra. A torziós szálak beszállító csavarjai



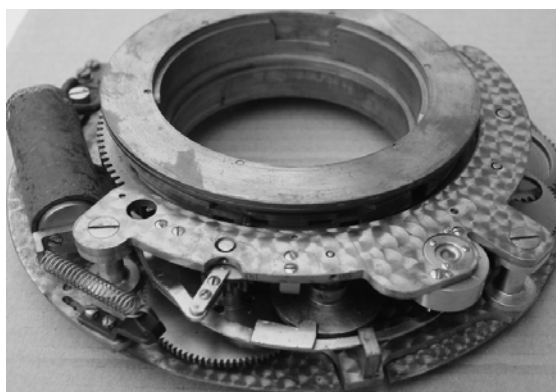
3. ábra. Az inga belső szerkezete

1. táblázat. A 36617 sz. Auterbal-inga fontosabb fizikai paramétereit

	O inga	[] inga
tömeg	14.905 g	14.906 g
az ingarúd keresztmetszeti méretei	2 / 7 mm	2 / 7 mm
az ingarúd fél karhossza	7 cm	7 cm
a torziós szál hosza	20 cm	20 cm
a torziós szál átmérője	0.017 mm	0.017 mm
a torziós szál csavarási állandója	0.0612 [cgs]	0.0616 [cgs]
az ingakar és a lelógó tömeg távolsága	20.987 cm	20.992 cm
tehetetlenségi nyomaték	1634.2 [cgs]	1652.6 [cgs]
tűkör - skála távolság	32.46 cm	32.46 cm
skálaosztás tartománya	0 - 280	280 - 560
két szomszédos skálaosztás távolsága	0.25 mm	0.25 mm
ingakar 1°-os elfordulása	88 skálaosztás	88 skálaosztás
torziós fej állítócsavarjának menetemelkedése	1 mm	1 mm
a két párhuzamos inga egymástól mért távolsága	7 cm	

Az ingák lengési tartománya a 3. ábrán látható "határolókkal" állítható be, az ingák elfordulási szöge valamivel kisebb, mint $\pm 2^\circ$. A vizsgált 36617 számú Auterbal-inga fontosabb fizikai paramétereit Rybár I. 1937-as, Banai Gy. 1964-es valamint Völgyesi L. és Tóth Gy. 2008-as mérései illetve számításai alapján az 1. táblázatban láthatók összefoglalva.

Az Auterbal-inga 1. ábrán bemutatott középülésének több fontos funkciója van. Legfontosabb része a bonyolult óraszerkezet, amely az ingát elforgatja és különböző azimutokban leállítja. Az ingával 3, 4, vagy 5 azimutban lehetséges a mérés, így a kiinduló É-i irányhoz viszonyítva $360/3=120$ fokoskénti (3 azimutos mérés) $360/4=90$ fokoskénti (4 azimutos mérés), vagy $360/5=72$ fokoskénti (5 azimutos mérés) lehetséges. A kívánt azimutszám a középülésen található beállító kar megfelelő pozícióba fordításával választható meg. Ahhoz hogy a torziós inga különböző azimutokba el tudjon fordulni, a mérés előtt a műszert „fel kell húzni”, vagyis az



4. ábra. Az Auterbal-inga kibontott vezérlőszervezete

óramutató járásával ellentétes irányban a rugóerő ellenében el kell forgatni. A felhúzás során összesen négyszer lehet körbefordítani az ingaházat, a felhúzás mértékét a középrész hengeres falán kiépített ablakokban lehet ellenőrizni. Az inga mérés közbeni forgatását a 4. ábrán látható óraszerkezet vezérli, amely az inga „gyenge pontja”, kisebb konstrukciós hibák miatt a vezérlőszerkezet alkatrészeinek akár enyhe kopása következtében is a vezérlés időnként bizonytalanul működik.

3 Az Auterbal-inga felújítása

Az első vizsgálatok alapján megállapítottuk, hogy az ingánkban lévő torziós szálak nincsenek elszakadva. Ugyanakkor az inga teljesen felhúzott állapotban van, és mivel a vezérlő óramű nem működik, ebben az állapotban a műszer használhatatlan. Ekkor még nem lehetett sejteni, hogy a legalább 30 éve teljesen megfeszített állapotban lévő rugó mennyire veszítette el az erejét, és milyen egyéb problémák lehetnek a műszerrel. Az ingáról semmiféle leírás nem állt a rendelkezésünkre, így az inga szétszerelése, javítása és felújítása jelentős kihívás volt.

Az első komoly feladat az inga szét-, illetve összeszerelési sorrendjének és logikájának megfejtése, a számtalan csavar és rögzítő elem funkciójának tisztázása volt. Már a szétbontás kezdetétől fogva nagyon körültekintően kellett eljárni, mivel tudtuk, hogy a teljesen megfeszített forgatórugó a szétszedésnél igen komoly kárt okozhat.

Az ingaház és a középrész szétválasztását követően, szerencsére már a középrész szétbontásának kezdetén sikerült a rugót kioldani, majd minden további bontási műveletet alaposan megfontolva végül a 4. ábrán látható hibás vezérlőszerkezetet ki tudtuk emelni. A vezérlő óramű felújítása és az egyik törött alkatrész cseréje után sikerült a szerkezetet működőképes állapotba hozni.

Az inga összeszerelése után már az első tesztmérések alapján látható volt, hogy a „[]” inga kiválóan működik, viszont a „O” inga n_0 nyugalmi helyzete (a torziós szál csavarodásmentes állapota) a 0-280 osztású skála középső 140-es osztása helyett a skála szélén $n_0=20$ körüli értékre esett, következésképpen szükségessé vált a „O” inga szabályozása. Ez újabb problémát okozott, ugyanis máig tisztázatlan okból a „O” inga szabályozó csavarjával az ingatestet nem lehetett elfordítani. Emiatt ellenőrizni kellett a torziós szál felfüggesztését, amihez viszont elkérülhetlenné vált a torziós szál kiemelése. Ez a szál szempontjából rendkívül veszélyes művelet, ezért korábban mindenképpen szeretnénk volna elkerülni. Itt további jelentős probléma merült fel, ugyanis a torziós szál kiemeléséhez ki kellett volna oldani három olyan nehezen hozzáférhető csavart, amelyek egyikét lehetetlen volt kicsavarni, mivel a feje tőből le volt törve. A törött csavarhoz felülről nem lehetett hozzáférni a közvetlenül fölötte lévő tárcsa miatt, amit éppen ennek a 3 csavarnak a kioldásával lehetett volna eltávolítani. Végül a problémát – ha nem is egyszerűen, de – sikerült megoldani, kiemeltük a torziós szálát és ellenőriztük a szabályozó csavar és a felfüggesztés kapcsolatát. Az összeszerelést követően már be tudtuk szabályozni a „O” ingát, és elkezdődhettek a tesztmérések, amely során először közel egy hónapon keresztül ugyanabban az azimutban ellenőriztük az ingák állapotát napi legalább 10 leolvasással.

Az első napok mérési eredményei ijesztőek voltak: miközben a „[]” inga kiválóan működött, a „O” 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 kétségbeejtő a helyzet, ugyanis amint az 5. 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 a „O” szálát. Amint az 5. ábrán is láthatjuk, ekkor szándékosan kicsit „túlszabályoztuk” az ingát, mivel továbbra is számítani lehetett tartós csökkenő driftre. A közel egy hónapos folyamatos megfigyelés után elérkezettnek láttuk az időt „éles” mérések elvégzésére a Mátyás-hegyi-barlangban, ahol egyébként pár hónappal korábban már mértünk a gravitációs fólalapon az ELGI E54 típusú ingájával is.

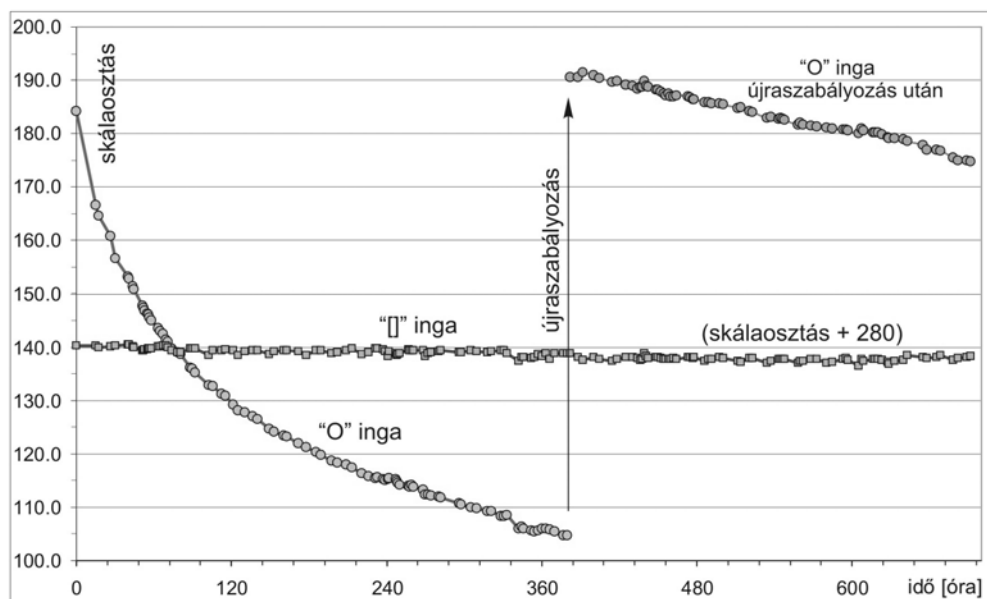
A barlangban több mérési sorozatot is végeztünk, amelyek során egyre gyakrabban felfigyelhetünk az ingánk furcsa viselkedésére. Az 5 azimutos mérések esetén az 1. és 2. ismétlődő azimutban a „[]” inga szinte ugyanazokat az értékeket mérte, ugyanakkor a „O” ingánál miközben az egyik ismétlődő azimutban gyakorlatilag visszajött ugyanaz a leolvasás, a másikban viszont nem egyszer akár 40-50 skálaegység ugrást tapasztaltunk. Emiatt erős gyanú merült fel, hogy valami gond lehet a

torziós szál befogásával. Ismét szétszedtük az ingát, kivettük a torziós szálát, és erős nagyítóval átvizsgáltuk a szál befogását. A torziós szál mindkét végét a 6. ábrán látható formában forrasztással rögzítették a befogó fülekhez.

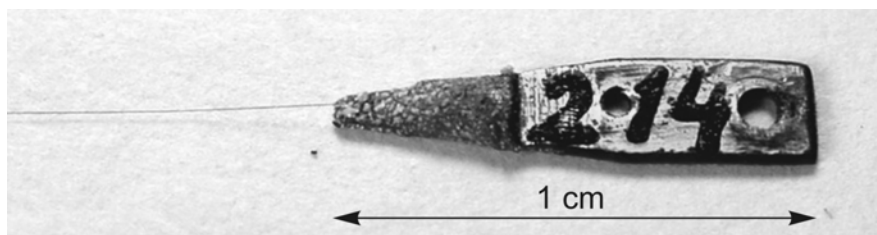
Az átvizsgálás során a felső befogó fül forrasztásán erős korróziót tapasztaltunk és a torziós szál körül egy mélynek tűnő üreg alakult ki a befogás csatlakozásánál. Még a viszonylag erős nagyítás mellett sem lehetett az üregen belül látni a szál és a forrasztás fémek kapcsolatát. Mivel az újraforrasztásnak túl nagy lett volna a kockázata, végül a ragasztás mellett döntöttünk. Vegyszerekkel konzultálva olyan rendkívül erős, de ugyanakkor kellőképpen rugalmas ragasztót alkalmaztunk, amely várhatóan nem tesz kárt a szál anyagában. A ragasztás rendkívül kényes műveletét nagyító alatt hajszálak ragasztásával gyakoroltuk (a torziós szál a legfinomabb női hajszálnál is vékonyabb, szabad szemmel alig látható).

Az összeszerelés után több hétig tartó tesztmérések azt mutatták, hogy eltűnt a „O” inga korábbi erős driftje, és a 7. ábra tanúsága szerint a két inga most már teljesen egyenrangúan működött.

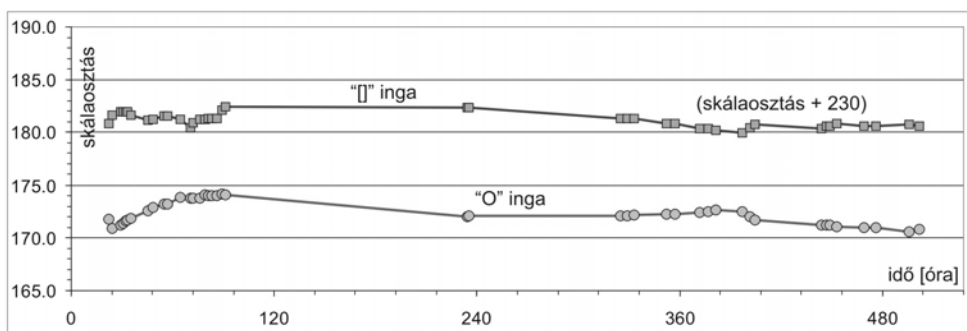
Ezt követően további fontos fejlesztéseket hajtottunk végre. Az automatikus leolvasás megvalósítása céljából a 8. ábrán bemutatott formában CCD-érzékelős kamerákat szereltünk fel a leolvasókarokra, a skálák megvilágítására pedig a 9. ábrán látható formában erős fényű LED-eket (fénykibocsátó diódákat) erősítettünk a leolvasó távcsövek alá. 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 leolvasásokra is, ezért új távlatok nyíltak eddig ismeretlen jelenségek megfigyelésére. Megoldódott például a lengések csillapodásának, valamint a hosszú idejű drift minden eddiginél pontosabb és részletesebb megfigyelése és tanulmányozása.



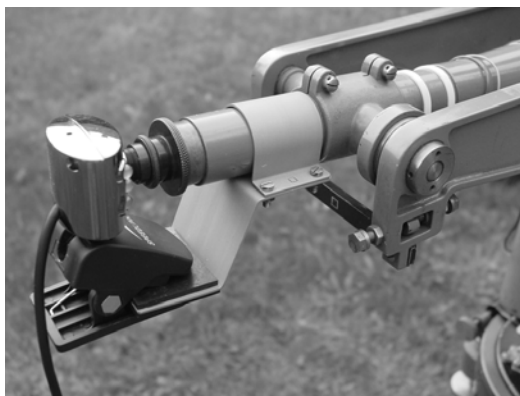
5. ábra. Az Auterbal-inga drift vizsgálata a két besabályozás után



6. ábra. A torziós szál befogása



7. ábra. Az Auterbal-inga drift vizsgálata az „O” torziós szál ragasztása után



8. ábra. CCD-érzékelős kamera a leolvasókaron



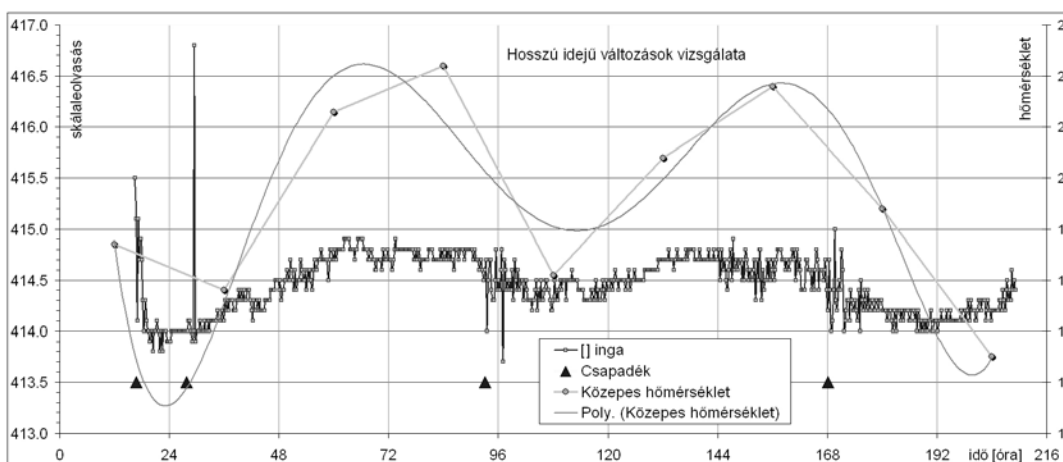
9. ábra. A skála megvilágítása fénykibocsátó diódákkal

4 Tesztmérések és az Auterbal-inga vizsgálata

A számítógéppel vezérelt CCD-érzékelők alkalmazása lehetővé tette a hosszú idejű változások pontos vizsgálatát és többek között annak ellenőrzését, hogy valóban teljesen érzéketlenek-e az ingák az árapály hatására. A vizsgálat céljából nyolc napon keresztül 5 percnként leolvasásokat végeztünk egy lakatlan, nyugodt épületen belül, majd ábrázoltuk a méréseket az idő függvényében. A “[” ingára vonatkozó megfigyelés a 10. ábrán látható. Amint várható volt, az Eötvös-inga méréseken árapály-hatás nem mutatkozik. Láthatók viszont rövid és hosszabb idejű, illetve rendszertelen változások. A rendszertelen, markáns változások időben egy-egy nagyobb nyári zápor illetve zivatar után adódtak közvetlenül, az épületen kívül az inga környezetében feltételezhető aszimmetrikus sűrűségváltozás következtében. A hosszabb idejű ingadozásról kiderült, hogy a napi külső átlaghőmérséklet változásával hozható kapcsolatba. Ekkor sajnos az inga mellett még nem történt folyamatosan pontos hőmérsékletmérés, hiszen éppen ez a megfigyelés irányította a figyelmet a hőmérsékleti változások vizsgálatának fontosságára. Az egészen rövid idejű változások okát egyelőre nem tudjuk biztosan, elképzelhető a mikroszeizmikus talajnyugtalanóság hatása.

Ezt követően felkészítettük az ingát külső terepi mérések végzésére. Beszereztünk egy észlelősátrat (11. ábra), és többek között az ingalábak alá speciális teherelosztó háromszöget készítettünk (12. ábra). A mérések során most az inga hőérzékenységet teszteltük. A vizsgálatokhoz több-érzékelős digitális hőmérőt alkalmaztunk, a hőérzékelőket a 11. ábrán látható különböző magasságokban helyeztük el, és az ingát ugyanabban az azimutban több órán keresztül 5 percnként leolvastuk.

Terepi mérések esetén gyakran előfordul, hogy az ingát nyári napon pl. 20-25°C hőmérsékletű rak-tárból kiszállítva a 30°C feletti inga-sátorban felállítjuk. Az első vizsgálatunk arra irányult, hogy néhány fokok hőmérsékletváltozás esetén mennyi idő múlva kezdhető a mérés, amikor már nagy



10. ábra. A [] inga hosszú idejű vizsgálata



11. ábra. Hőmérők az inga-sátorban

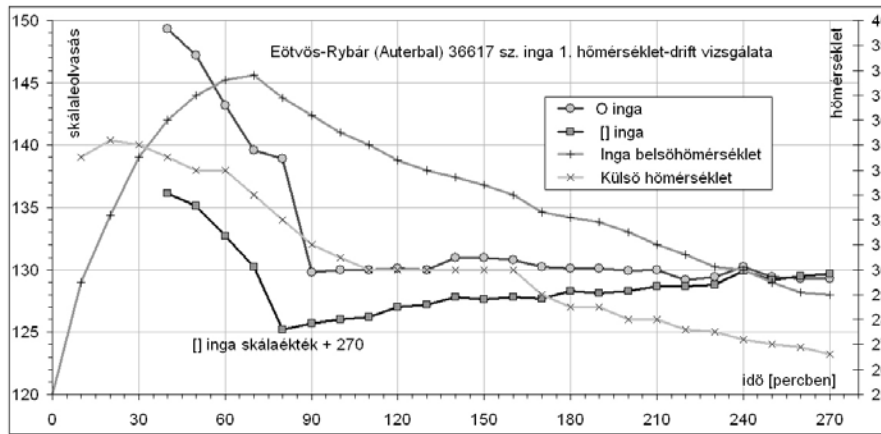


12. ábra. Teherelosztó háromszög az ingalábak alatt

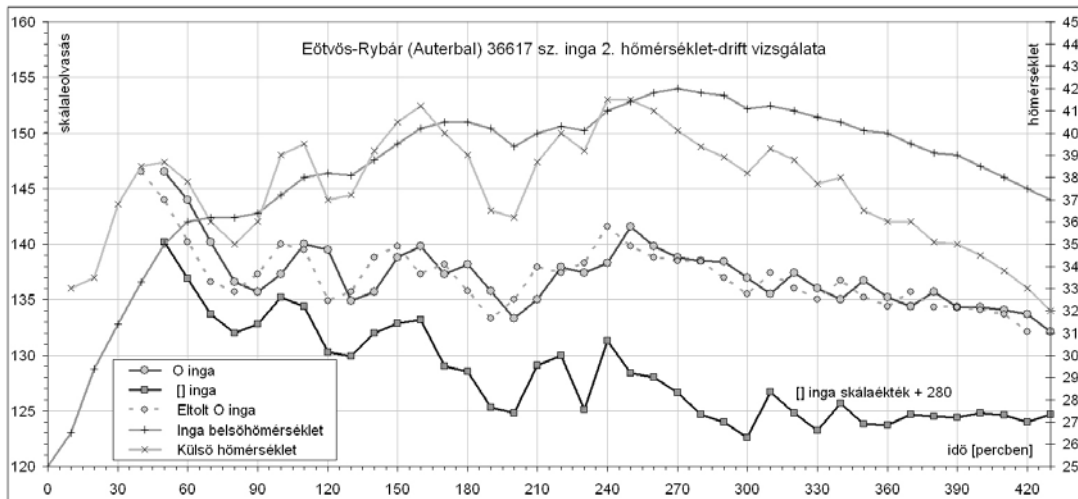
eséllyel lineáris a hőmérsékletváltozás miatti drift. Az erre vonatkozó méréseink közül az egyik jellegzetes megfigyelést a 13. ábrán mutatjuk be. Látható, hogy esetünkben az eddig alkalmazott és elfogadott 40 perces várakozási (csillapodási) idő helyett 90 perc után alakult ki olyan állapot, amikor lehetővé válik a jó minőségű mérés elvégzése.

A másik fontos vizsgálatunkkal a mérések közben rendszerint előforduló nagyobb hőingadozások hatását kívántuk megállapítani. Erre a célra olyan közepesen felhős meleg nyári napokat választottunk, amikor a felhős és a napos periódusok között az inga-sátorban 3-5°C-os hőingadozás volt tapasztalható. A sátorban a 13. ábrán látható különböző magasságokban helyeztük el a hőérzékelőket. Az egyik jellegzetes napi mérés eredményeit a 14. ábrán láthatjuk, a könnyebb áttekinthetőség érdekében csak az ingaház belső hőmérsékletét, illetve a leolvasó-karok magasságában elhelyezett hőmérséklet változását szemléltettük. Ezt egyébként az is indokolja, hogy a talajon illetve más magasságokban feljegyzett hőmérsékletváltozással nem találtunk olyan jó korrelációt, mint az ingakarok magasságában mért hőmérséklettel. Jól látható, hogy a leolvasások alapvetően nem az ingaház belső hőmérsékletének függvényében változnak, hanem szinte azonnal és feltűnően követik a külső hőmérséklet ingadozását. Ebben azonban a “[]” és a „O” inga viselkedése nem teljesen azonos, ugyanis amíg a “[]” inga gyakorlatilag azonnal-, addig a „O” inga mintegy 10 perces késéssel követi a leolvasó karok magasságában lévő külső hőmérséklet változását.

Igen jól szemléltethető ez a 14. ábrán, ahol a szaggatott vonal a „O” inga leolvasásait 10 perc értékkel balra eltolva ábrázolja. Az inga belső hőmérsékletének változása lényegesen letompítva és némi fáziskéséssel van korrelációban a skálaleolvasások változásával, ez inkább a leolvasások trendjét adja meg.



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

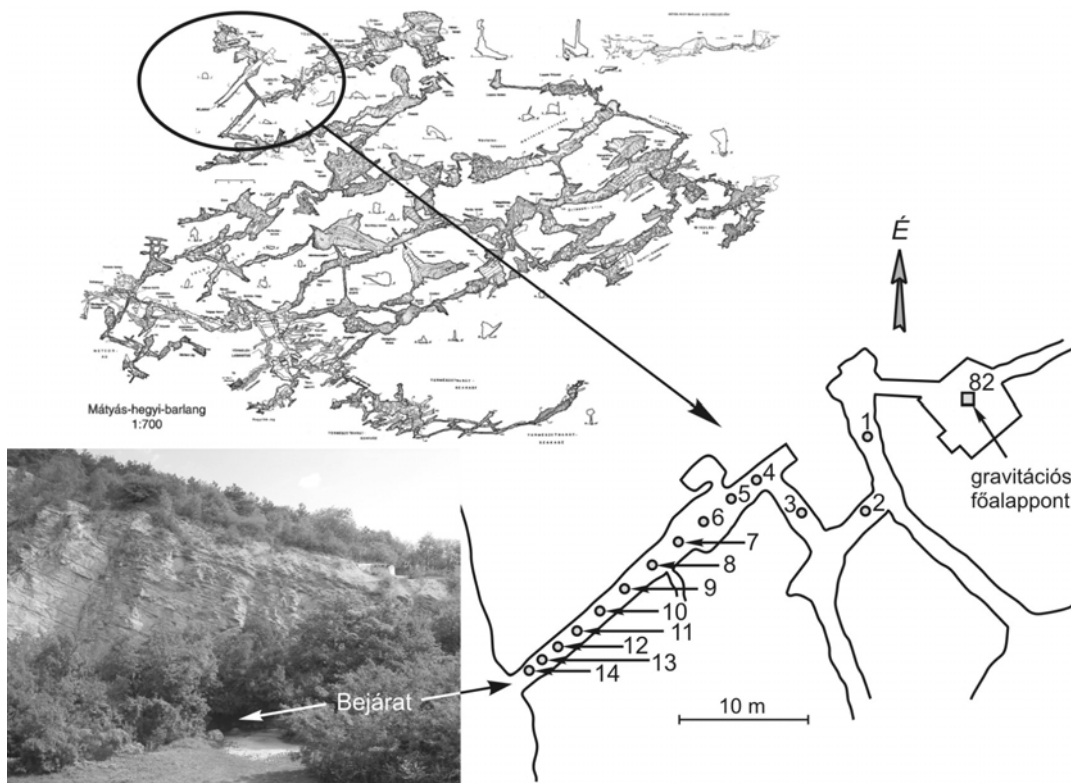


14. ábra. Az Auterbal-inga hőmérséklet-drift vizsgálata

Korábban arra gyanakodtunk, hogy a torziós szálak hőmérsékletének változása befolyásolja a jelenséget és a gyors, szinte azonnali változás okát abban láttuk, hogy az ingaházon belül a hő nemcsak viszonylag lassan vezetéssel, hanem sugárzással is terjed, amelynek hatása igen gyorsan jelentkezhet. Ma már az tűnik lényegesen valószínűbbnek, hogy a lassú változások jelentős része valóban a torziós szálak hőmérsékleti érzékenysége miatt következik be, a szinte azonnali változások oka viszont az ingakarok hőtágulása, hőmozgása. Ennek bizonyítására már van elképzelésünk, azonban ezzel kapcsolatosan további mérésekre lesz szükség. Végző cél a leolvasások hőmérsékleti korrekciójának kidolgozása – amire egyébként már szintén van elképzelésünk. Ez lényeges kérdés a mérések pontossága tekintetében ugyanis a legutóbbi vizsgálataink azt mutatják, hogy az inga már néhány tized fokok hőmérsékletváltozásra is érzékenyen reagál.

5 Mérések a Mátyás-hegyi-barlangban

Mivel a Mátyás-hegyi-barlangban gyakorlatilag nem változik a napi hőmérséklet, másrészt az eredeti célunk eleve az itteni mérések végzése volt, ezért a fenti tapasztalatok birtokában a már jó állapotban lévő felújított ingával megkezdhetjük a tényleges munkát. A Mátyás-hegyi-barlang alaprajza, ezen belül az ELGI gravitációs obszervatóriumának alaprajza, bejáratának fotója, valamint a gravitációs főalappont és az Eötvös-ingás mikrobázis pontjainak elhelyezkedése a 15. ábrán látható.



15. ábra. Az Eötvös-inga mérések mikrobázisa az ELGI Mátyás-hegyi-barlang laboratóriumában

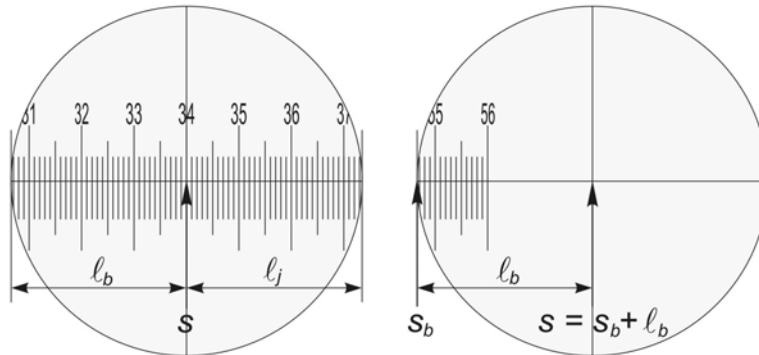
A Mátyás-hegyi-barlangban a rendszeres napi méréseket 2008. július második harmadában kezdtük, és szeptember elejére fejeztük be. A mérések során mind a „O”-inga, mind a „[”-inga kiválóan működött; problémák csupán az inga forgató szerkezetével adódtak, amit később megoldottunk (Ulmann 2008). A 15. ábrán látható mikrobázis 5. pontjától kifelé haladva újabb nehézségek jelentkeztek: bizonyos azimutokban a skálaértékek egyre inkább közeledtek a még leolvasható szélső értékekhez. Ezt kezdetben sikerült az inga újraszabályozásával (az n_0 értékének kismértékű aszimmetrikus eltolásával) megoldani, de a 10. ponttól már ez a megoldás sem segített. Ekkor egy bizonyos tekintetben vitatható, de ugyanakkor hasznos ötlettel sikerült mintegy ± 33 skálaosztással mindkét irányban kibővíteni a leolvasási tartományt azzal, hogy nem a középső index-szálon, hanem szükség esetén a leolvasó mikroszkóp látómezőjének jobb illetve bal oldali szélén olvastunk le. Mindezt a 16. ábrán szemléltetjük, ahol példaként az ábra bal oldali részén, a középső indexszálon a leolvasás 340.0, a leolvasó mikroszkóp látómezőjének bal oldali szélén kb. 306.5, a leolvasó mikroszkóp látómezőjének jobb oldali szélén pedig 373.5. Ugyanakkor az ábra jobb oldalán példaként bemutatott esetben a leolvasó mikroszkóp látómezőjében a középső indexszálon már nem lehet leolvasni, a bal oldali szélén viszont a leolvasás értéke 546.5. A skála ilyen módon történő kibővítését hosszabb kalibráló mérések előzték meg, amelynek egy skálarészletét a 2. táblázatban láthatjuk.

Természetesen annak ára van, hogy nem a látómező közepén lévő index-szálon, hanem a látómező szélén olvassunk le, a leolvasott értékek megbízhatósága bizonyos tekintetben romlik, ezek ugyanis becslült, és nem pontos leolvasások. A gradiensek további drasztikus növekedésével már ezzel az ötlettel sem tudtunk mérni a 12.-14. pontokon.

A barlangban végzett mérések során általában lehetőségünk volt az adott napi mérést befejezve az ingát azonnal áthelyezni és elindítani a soron következő mérési ponton. Ezzel egyrészt időt tudtunk megtakarítani, mivel a másnapi mérést már a kiérkezés pillanatában azonnal meg lehetett kezdeni, másrészt így az inga kioldásához kapcsolódó sokkhatás (kezdeti jelentős drift) is már elmúlt. A Mátyás-hegyi-barlangban a gravitációs főalapponton és a mikrobázis pontjain végzett méréseink

eredményeit a 17. 18. 19. és a 20. ábrákon foglaltuk össze. Az ábrákon rendre a W_{zx} és W_{zy} gradiensek, valamint a W_{Δ} és a W_{xy} görbületi adatok változása látható a főlapponttól indulva a mikrobázis 11. pontjáig. A mikrobázis pontjai a 15. ábrán látható elrendezésben a barlangba vezető folyosón helyezkednek el. A folyosó a főlappontot tartalmazó nagy teremhez képest jóval alacsonyabb és keskenyebb. Az 5-ös ponttól kezdve a bejárat felé haladva jelentkezik egyre inkább a külső meredek sziklafal gravitációs hatása is. A várható egyre nagyobb gradiens-értékek miatt a mérési pontok a bejáratához közeledve egyre sűrűsödnek.

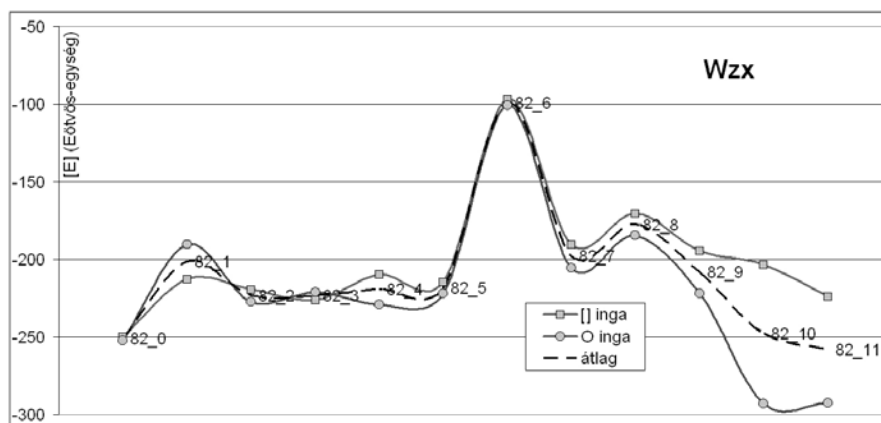
Mivel az Eötvös-ingában két egymástól független antiparalel elhelyezésű ingaszerkezet található az 1. táblázat adatai szerint egymástól 7 cm távolságban, ezért minden egyes gradiensre és görbületi adatra a mérések során két független értéket kapunk. Teljesen hibátlan mérések esetén elvileg a két inga méréseinek meg kellene egyeznie, így az eltérések részben a mérések megbízhatóságára adnak információt. A 17. 18. 19. és a 20. ábrákon jól megkülönböztethetők a „O”-inga, és a „[]”-inga mérési eredményei, a szaggatott vonal pedig a kettő átlagértékét mutatja.



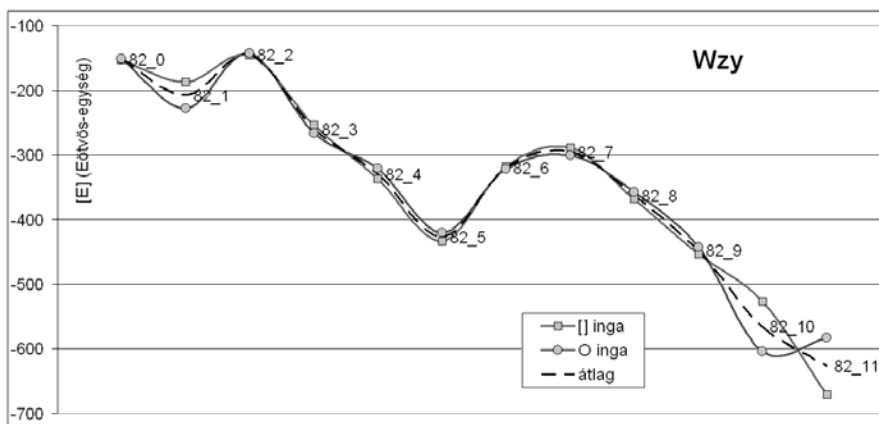
16. ábra. A mérési tartomány kibővítése

2. táblázat. Példa a kalibráló mérésekre a mérési tartomány kibővítésre vonatkozóan

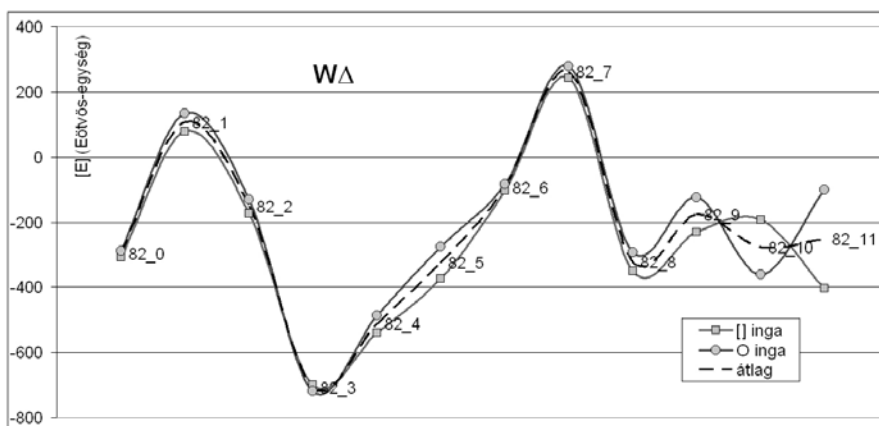
t	“O” bal	l_b	“O” közép	l_j	“O” jobb
15.12	136.5	33.5	170.0	33.0	203.0
15.31	137.2	33.5	170.7	32.9	203.6
16.20	138.0	33.4	171.4	33.0	204.4
17.15	138.7	33.5	172.2	33.0	205.2
19.16	139.6	33.4	173.0	33.0	206.0
	33.5			33.0	



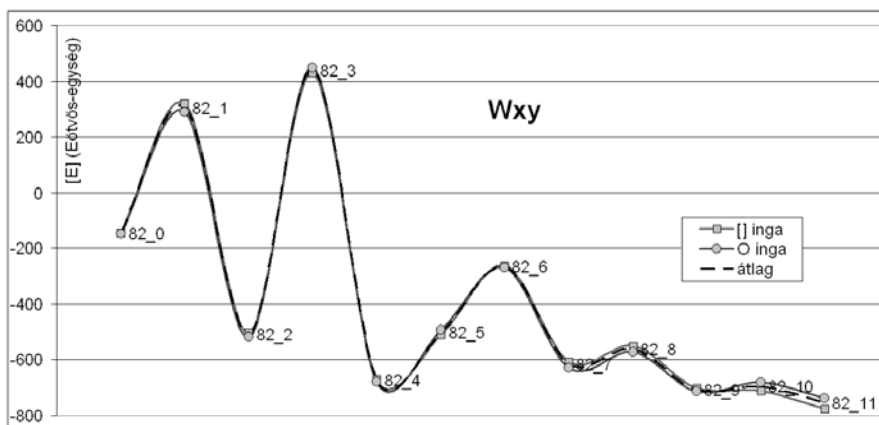
17. ábra. A W_{zx} gradiensek a Mátyás-hegyi-barlang mikrobázisának pontjain



18. ábra. A Wzy gradiensek a Mátyás-hegyi-barlang mikrobázisának pontjain



19. ábra. A WΔ gradiensek a Mátyás-barlang mikrobázisának pontjain



20. ábra. A Wxy gradiensek a Mátyás-hegyi-barlang mikrobázisának pontjain

Ha megvizsgáljuk a két független inga által mért értékek eltérését egymástól, akkor többé-kevésbé jó egyezéseket láthatunk, vannak azonban olyan (pl. a 82/1, a 82/10 és a 82/11) pontok, ahol jelentősebb eltérések adódtak. A 82/1 pont közvetlen szomszédságában egy nagy tömegű biztonsági vasajtó található, míg a 82/10 és a 82/11 pontok a barlang bejáratának közvetlen közelében fekszenek, ahol mintegy 40 m magasságú meredek sziklafal emelkedik a magasba, ráadásul ezek a pontok az egyik oldalon aszimmetrikusan közel helyezkednek el a barlang falához. Kézenfekvőnek tűnik,

hogy ezekben a pontokban olyan jelentős a gradiensek változása, hogy ez már az egymástól 7 cm távolságra lévő ingák esetén is kimérhető különbséget jelent. A sejtés bizonyítására további ingamérések szükségesek, részben az 1. ponton a vasajtó mind nyitott, mind csukott állapota mellett. A 10. és a 11. pontokon pedig a közelebbi barlangfaltól kb. 10 cm-es távolsággal beljebb mozdulva is érdemes lenne a méréseket megismételni. A 10. és a 11. pontokon tapasztalható nagyobb eltérések további lehetséges oka, hogy itt a nagy gradiensek miatt nem a látómező közepén lévő index-szálon, hanem a látómező szélén tudtunk csak leolvasni. Probléma adódhat abból is, hogy az ingamérések feldolgozásakor használt egyenletekben szereplő egyensúlyi mérési azimutok a gyakorlatban az elvi értékektől (0°, 72°, 144°, stb.) pont a gradiensek hatása miatt akár 2°-al is eltérhetnek. Ezt a hatást eddig nem vettük figyelembe, pedig a gradiensek számított értékeiben több Eötvös különbséget is jelenthet. Ez utóbbi lehetőséget is ellenőriznünk kell a későbbiekben.

Feltűnő ugyanakkor, hogy a 82/0 jelű gravitációs főalapponton a többször is megismételt mérések során a „O” és a „[]”-inga gyakorlatilag ugyanazokat az értékeket mérte. A gravitációs főalappont nagy légterű terem közepén található viszonylag távol a zavaró tömegek hatásától, így feltételezhetően a két ingára gyakorlatilag ugyanakkora erők hatnak.

6 Összefoglalás

Az Eötvös-inga mérések geodéziai alkalmazására vonatkozó kutatásaink során több olyan probléma adódott, amely szükségessé tette újabb Eötvös-inga mérések elvégzését. Ennek érdekében megjavítottunk és felújítottunk egy már működésképtelen Auterbal-ingát. Az újabb technikai lehetőségek (a modern számítástechnika, CCD kamerás érzékelők, digitális hőmérők alkalmazása, stb.) új távlatokat nyitottak az Eötvös-inga mérések területén is. A felújított ingával széleskörű vizsgálatokat végeztünk az inga használhatóságára vonatkozóan, majd sikeres méréseket folytattunk a Mátyás-hegyi-barlang gravitációs laboratóriumában. Vizsgálataink során világossá vált, hogy a közel 80 éve gyártott Eötvös-Rybár ingával kiváló minőségű méréseket lehet végezni, és az inga alkalmazásával számos új problémára választ lehet adni. A mérési eredményeink értelmezése során sok új izgalmas kérdés is felmerült, amelyeket csak további mérésekkel és vizsgálatokkal tudunk megválaszolni.

Köszönetnyilvánítás. Kutatásaink a K60657 és a K76231 OTKA támogatásával folynak. Ezúton is köszönjük a Mátyás-hegyi-barlangban végzett méréseinkhez az ELGI, és kiemelten Csapó Géza segítségét.

Hivatkozások

- Csapó G, Tóth Gy, Laky S, Völgyesi L (2008): Experiences of new Eötvös torsion balance observations and reliability tests. Geophysical Research Abstracts, 10, 2-2-2008
- Haalck H (1950): Die vollständige Berechnung örtlicher gravimetrischer Störefelder aus Drehwaagemessungen. Veröffentlichungen des Geodätischen Institutes Potsdam, Nr. 4, Potsdam.
- 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 hálózatában. Geomatikai Közlemények X. 29-36.
- Ulmann Z (2008): Eötvös-inga mérések. TDK dolgozat, BME, Építőmérnöki Kar, Földmérő és térinformatikai szekció.
- Völgyesi L, Tóth Gy, Csapó G, Szabó Z (2005): Az Eötvös-ingamérések geodéziai célú hasznosításának helyzete Magyarországon. Geodézia és Kartográfia, 57(5), 3-12.