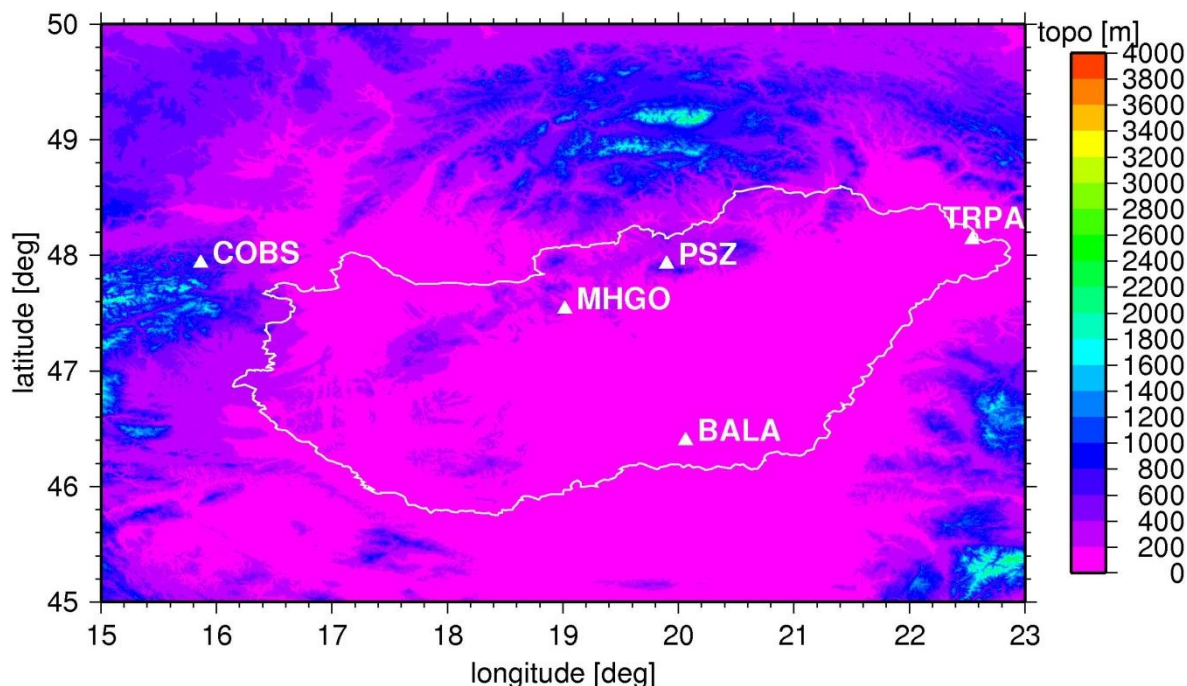


Zárójelentés az NKFIH OTKA K101603 kutatási program eredményeiről

1. A kutatási program során végzett mérések és infrastruktúra fejlesztések áttekintése

Mivel a program gerincét egy a Pannon medence térségére koncentráló (1. ábra), éveken át tartó, szisztematikus mérési sorozat képezte, célszerű ennek menetrendjét mérési állomásonként csoportosítva áttekinteni a zárójelentés elején (1. táblázat).



1. ábra A mérési helyek (ld. 1. táblázat) elhelyezkedése a Keleti-Alpok és a Pannon medence térségében. A színekódolásos térkép a háttérben a domborzatot mutatja

1. táblázat Az árapály mérések, az abszolút g meghatározások és a műszerkalibrálások időrendje a mérési helyek szerint csoportosítva

mérési hely	mérési időszak	műszerek	mérés célja	mérési napok
Conrad Obszervatórium COBS , Ausztria	2012.12.12 – 2013.05.03	LCR G949	árapály-hatás	77
		GWR SG025	regisztrálása	139
		LCR G220		124
MFGI Mátyáshegyi Obszervatórium MHGO , Budapest	2013.07.09 – 2013.07.22	LCR G949	skálatényező- függvény meghatározása	13
	2014.04.22 – 2014.04.30			9
	2016.03.29 – 2016.04.06			9
	2017.06.26 – 2017.07.03			8
		2014.08.26 – 2014.12.19	LCR G963	árapály-hatás
	2015.11.20 – 2016.02.11	LCR G1188	regisztrálása	83
Piszkéstető PSZ szeizmológiai állomás	2014.06.26 – 2015.04.08	LCR G949	árapály-hatás regisztrálása	285
	2015.04.08 – 2015.04.25	LCR G1188	CCD okuláros és CPI + feed back regisztrálás összehasonlítása	18
	2015.04.27 – 2015.05.03	LCR G220	CCD okuláros és CPI regisztrálás összehasonlítása	6

Tarpa TRPA szeizmológiai állomás	2015.05.07 – 2016.03.06	LCR G949	árapály-hatás regisztrálása	304
	2015.05.07 – 2016.10.02	Scintrex CG-5		90
	2016.01.07 – 2016.03.07			58
Balástya BALA ideiglenes állomás	2016.04.13 – 2016.09.16	LCR G949	árapály-hatás regisztrálása	155
	2016.09.16 – 2017.06.24			feldolgozatlan
	2016.06.30 – 2016.09.21	Scintrex CG-5		82
	2016.10.29 – 2017.02.15			107
Sopron (Fertőrákos – Sopronbámfalva – Sopron-Muck gravitációs alappontok)	2015.05.20 – 2015.05.22	Micro-g LaCoste FG5X – 251 (Pecny Geodéziai Obszervatórium műszere)	abszolút gravitációs mérések	3
	2016.03.23.	LCR G949	soproni gravitációs alappontok	1
	2016.04.11.	LCR G949		1
	2016.06.29.	Scintrex CG-5 (Miskolc)	összemérése relatív graviméterekkel	1
	2017.07.05.	LCR G949 (GGI), Scintrex CG-5 (Miskolci Egyetem), Scintrex CG-5 (Bécsi Tudomány- egyetem)		1

Mint látható, elsősorban a programban résztvevő intézmények (MTA CSFK GGI, MFGI) meglévő infrastruktúrájára, obszervatóriumaira illetve szeizmológiai állomáshálózatára alapozva hajtottuk végre a mérési programot. Ezzel lehetett biztosítani, hogy a legkisebb anyagi ráfordítás mellett biztonságosan tudjuk működtetni a rendszereinket és azok interneten keresztül történő ellenőrzését megvalósíthatjuk. Ki kell emelni, hogy a BALA mérőállomást Vass Zoltán szegedi vállalkozó (Azimut Kft) ingyen bocsátotta rendelkezésünkre, megengedvén, hogy egy eredetileg zöldségtárolásra szolgáló veremben kialakíthassuk a műszereket hordozó beton pillért illetve leválaszthassunk egy észlelő kamrát.

A mérési program kezdete óta folyamatosan törekedtünk arra, hogy a rendszereinket (hardver és szoftver) a minimálisan szükséges mértékben úgy fejlesszük tovább, az előírt gyári karbantartásukról is gondoskodva, hogy azok a lehetőségeinkhez viszonyítva legalább funkcionálisan megfeleljenek a legkorszerűbb műszerekkel szemben támasztott igényeknek (2. ábra). Az automatikus vízszinteséget szabályozó platform prototípusa Koppán András tervei alapján készült. Hangsúlyozni kell, hogy a platformok kialakításához szükséges egyedi mechanikai munkákat nagyrészt Schlaffer Ferenc végezte el az MTA CSFK GGI soproni műhelyében. A prototípus mikrokontrolleres vezérlését Koppán András, a GGI platformjának, amely a prototípus módosított változata, elektronikáját és mechanikáját a GGI villamosmérnökei (Bánfi Frigyes, Molnár Tibor) tervezték és állították össze. A platformok mikrométer nagyságrendű mozgatásához szükséges alkatrészeket erre specializálódott vállalkozással készítettük el. Mindezen fejlesztéseket foglalja össze időrendben a 2. táblázat.



a)

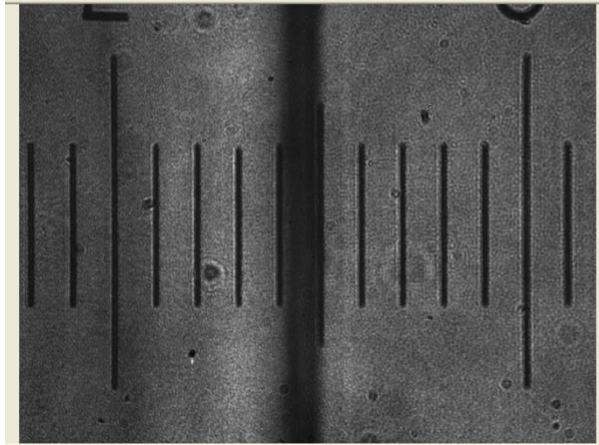
b)

2. ábra a) Az LCR G949 mérőrendszer (bal oldalon) és a Scintrex CG-5 graviméter (jobb oldalon) a TRPA állomáson. 1) CCD okulár, 2) dőléskompenzáló platform (GGI verzió), 3) „koppantó” relé, ami az index-szál mechanikai feltapadását (=mérés kiesés) max. 30 percre korlátozza, 4) távműködtetésű mikrométer mozgató motor és 5) meteorológiai szenzor. b) A platformvezérlő elektronika (alul) és tápegységek (felül)

A hardveres fejlesztések mellett az LCR G949 mérőrendszer vezérléséhez használt szoftvert is javítottuk (Battha László) illetve bővítettük, aminek következtében a CCD okulár által másodpercenként készített képeken (3. ábra) az ún. index-szál pozícióját 1 pixel alatti felbontással tudtuk meghatározni. Ezen túlmenően megoldottuk a rendszer interneten keresztüli távfelügyeletét, ami lehetővé tette, hogy a mérőhelyekre utazás nélkül újraindíthassuk, módosíthassuk a mérőprogramot vagy állíthassuk a mikrométer tárcsát, amely művelet kb. havonta szükséges az index-szál driftjének kompenzálására. A távfelügyeletet segítette az automatikus regisztrátum rajzoló (Papp Gábor), adatátviteli- és megjelenítő program-rendszer is, amely a megadott időközönként (általában 30 perc) az aktuális mérésekből (észlelt árapály-hatás, meteorológiai paraméterek) rajzokat készített, ezeket feltöltötte egy GGI-s szerverre, majd az ábrákat közzétette az Interneten a bárki által elérhető <http://kepujsag.ggki.hu> weblapon.

2. táblázat Hardveres fejlesztések és karbantartások az OTKA program keretében

dátum	fejlesztés, karbantartás	használat helye
2012. március - június	Az LCR G949 graviméter gyári karbantartása, Lexington, Texas, USA	
2012	2 db digitális vezérlésű műszeralátét a műszerdőlés kompenzálására	MHGO
2013 - 2014	1 db analóg vezérlésű autonóm műszeralátét a műszerdőlés kompenzálására és in situ dőlésérzékenység meghatározására	PSZ, TRPA, BALA
2015	távvezérelhető mikrométer – tárcsa-forgató mechanika	TRPA, BALA



3. ábra Az LCR G949 graviméter leolvasó mikroszkópjának látómezeje, ahogyan azt a Leutron Vision CCD kamera látja. Az index-szál helyzete kb. +50 pixel a nominális leolvasási osztásvonáshoz (2.4) viszonyítva

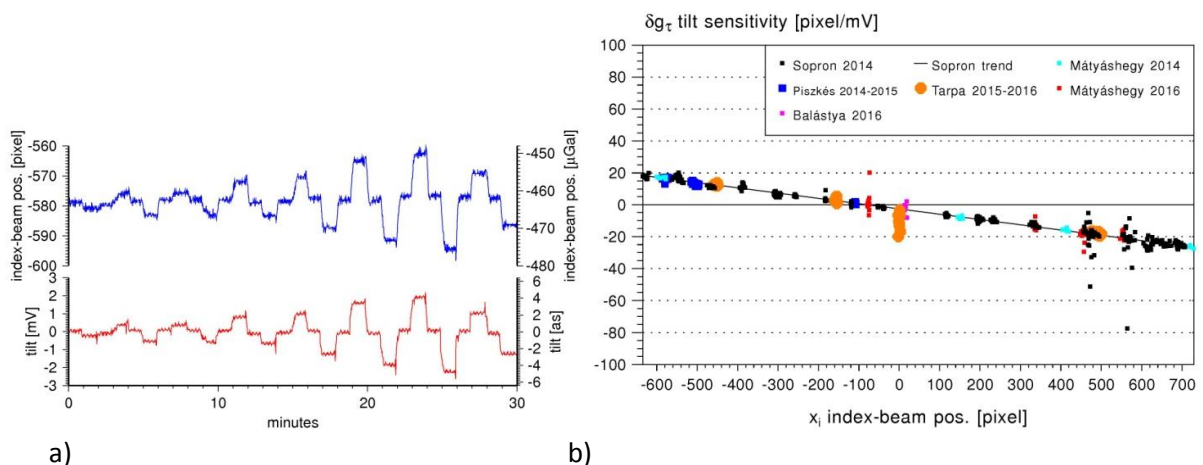
2. A környezet paramétereinek mérése és a hőmérsékletváltozás hatásainak csökkentése

Az árapály-hatáson, vagyis a nehézségi gyorsulás időbeli változásán túl minden mérési ponton folyamatosan rögzítettük a hőmérsékleti-, a légnyomás- és a páratartalom adatokat. Ezek közül a legnagyobb hatással a g mérésekre a légnyomás változásának van, hiszen az általános modell szerint +3 mbar változás $-1 \mu\text{Gal}$ (10^{-8} m/s^2) gyorsulás változást okoz a légtömegek besűrűsödése következtében. A sűrűbb légtömegek, felfelé irányuló tömegvonzásuknak következtében, a g értékének csökkenését eredményezik (direkt hatás).

A hőmérséklet stabilizálása azért fontos, mert a változása során a műszerek fém alkatrészeiben (pl. talpcsavarok) fellépő egyenlőtlen deformációk megváltoztatják a graviméternek (vagyis rugós felfüggesztésű, asztatikus mechanikai szenzorának) a helyi vízszintes síkhoz viszonyított helyzetét, amely a szenzor pillanatnyi x_i pozíciójától (index-szál helyzetétől) függően kisebb-nagyobb mértékben módosítja a mérési eredményt. Az egyes műszerek dőlésérzékenysége, pl. a kifejlesztett dőléskompenzáló platformokkal, a folyamatos észlelések alatt is elvégezhető. A 4. ábra mutatja az LCR G949 műszer dőlésérzékenységét, vagyis azt a δg_τ leolvasási érték változást, amely egységnyi τ dőlésre bekövetkezik:

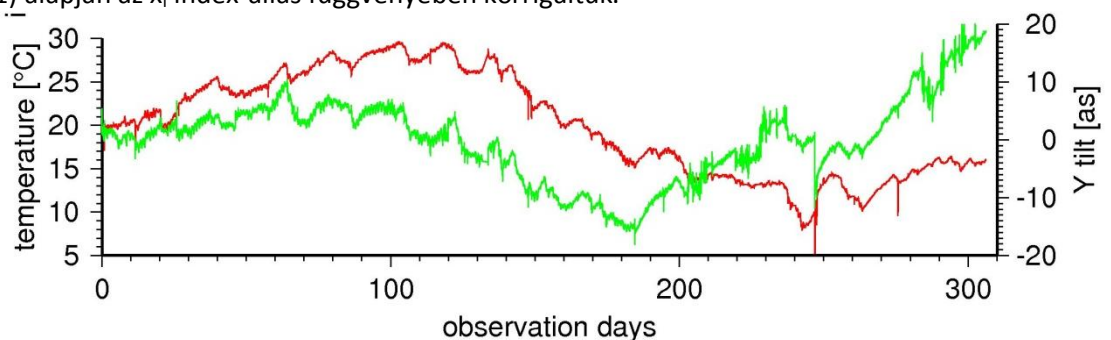
$$\delta g_\tau(x_i) = \frac{\Delta g}{\Delta \tau} \Big|_{x_i} = \delta g_{\tau,0} + m x_i \quad (1)$$

ahol $\delta g_{\tau,0}$ és m egy lineáris regressziós modell paraméterei. Ugyanez az ábra mutatja a meghatározás elvét is.



4. ábra a) döntési tesztjel-sorozat (piros vonal) és a G949 graviméter válasza (kék vonal) PSZ állomáson. b) A G949 graviméter dőlésérzékenysége az index-állás függvényében, az in situ meghatározások alapján. A jelmagyarázatban a mérési helyek és a hozzájuk tartozó évszámok láthatók. Az ábra az összes, időnként erős zajjal terhelt mérést mutatja. Minden esetben sikerült a zaj forrását (magnövekedett mikroszeizmikus tevékenység, távoli földrengés felületi hullámjai, városi forgalom Sopronban) azonosítani

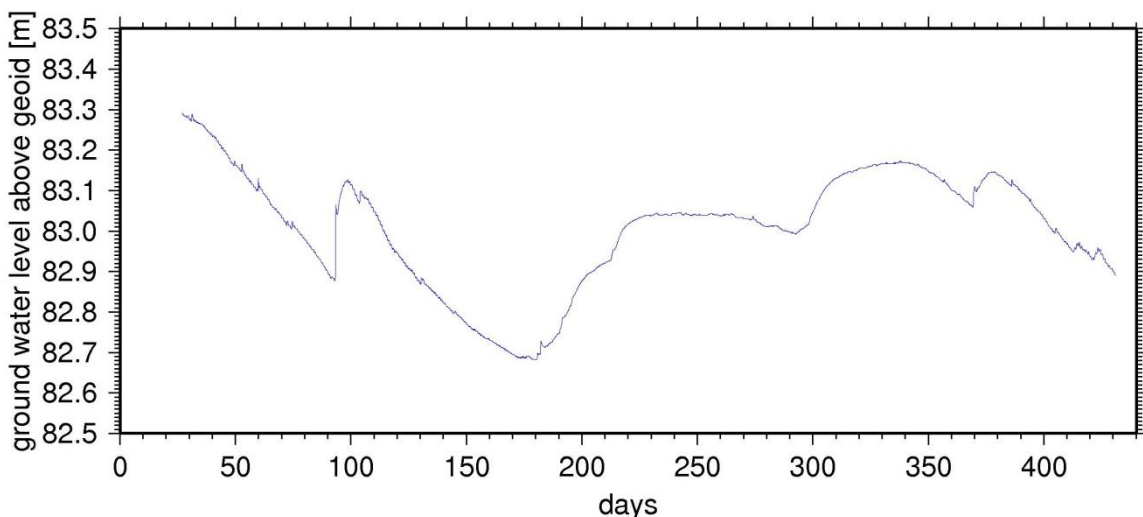
Megjegyzendő, hogy az LCR graviméterek asztalizált szenzorai az Y irányú (azaz az ún. long-level irányú) dőlésekre érzékenyek. A 4. ábrán jól látható, hogy 2014 és 2017 között a G949 műszer dőlésérzékenysége igen stabil volt, hiszen a később meghatározott adatok jól illeszkednek a 2014-ben meghatározott lineáris trendhez. A hőmérséklet változásból származó kedvezőtlen hatások csökkentésére egyrészt a műszereket egy 5 cm vastag Nikecell lemezekkel burkolt kamrában helyeztük el (2. ábra), így sikerült a napi hőmérséklet változást $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ alatt tartani (5. ábra). Másrészt aktív és passzív dőléskompenzálást alkalmaztunk. Az aktív dőléskompenzálás során a műszerdőlést $\pm 1.5''$ között tartottuk ($\pm 0.7\text{ mV}$), míg az ez alatti mértékű dölések mérési eredményre kifejtett hatását az (1) alapján az x_i index-állás függvényében korigáltuk.



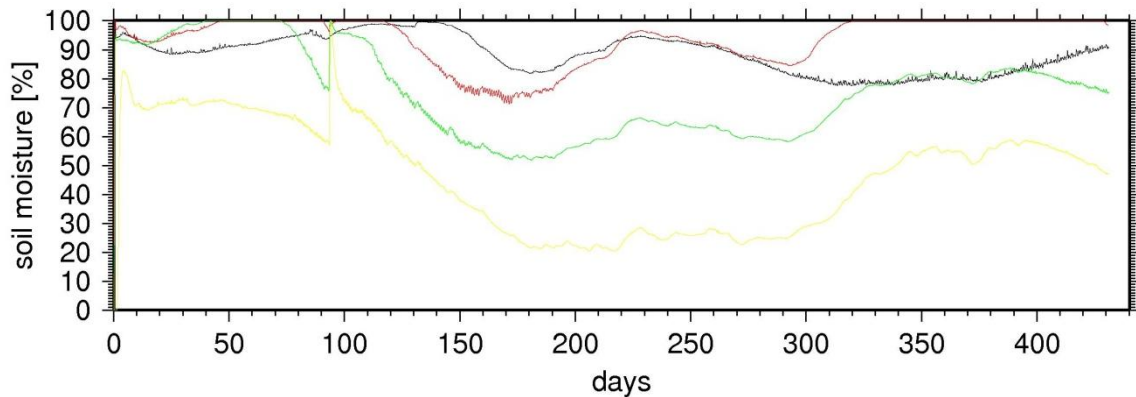
5. ábra A TRPA állomáson a hőszigetelt műszerkamra belsejében észlelt hőmérséklet változás (piros vonal) és a G949 graviméter Y irányú összegezett dőlésének (nemlineáris komponensek) változása (zöld vonal)

Az Alföldön, Szegedtől északra található BALA állomáson (1. ábra) sikerült beüzemelnünk egy Aquasmart talajvízszint- és egy Boreas talajnedvesség mérő műszer együttest is. A talajnedvesség illetve a talajvízszint változása ugyanis a talaj térfogatsűrűségének változásával jár, ami a helyszínen található homoktalaj nagy porozitása miatt igen jelentős gravitációs hatással lehet. Ráadásul a talajvíz szintje a vizsgált időszakban a műszerhez közel (a pillér Balti tengerszint feletti magassága 84.539 m), az alatt mindössze $1.2\text{ m} - 1.8\text{ m}$ mélységek között változott (6. ábra).

A talajnedvességet 4, különböző mélységben (4. táblázat), közvetlenül a mérőpillér mellett elhelyezett érzékelővel mértük, 10 perces mintavételezéssel (7. ábra). A talajvízszint- és a talajnedvesség változás között igen szoros korreláció mutatkozik. Jól látszik pl. a mérés 90. napja körül bekövetkezett intenzív csapadékhullás következménye, amely telítésbe vitte az összes szondát.



6. ábra A talajvízszint Balti tengerszint feletti magasságának változása a BALA állomáson 2016.04.13 és 2017.06.19 között



7. ábra A talajnedvesség változása a BALA állomáson 2016.04.13 és 2017.06.19 között, 4 különböző mélységben mérve. 70 cm – fekete vonal, 45 cm – piros vonal, 25 cm – zöld vonal és 5 cm – sárga vonal. A mélység magyarázatához ld. a 3. táblázatot

3. táblázat A talajnedvesség mérő szondák elhelyezési mélységei. A padlószint a verem alját jelenti, vagyis a járófelületét. A graviméter alatti mélység nagyjából a verem körüli külső térszín alatti magassággal egyenlő

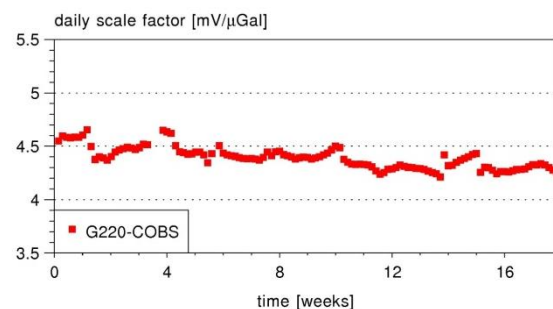
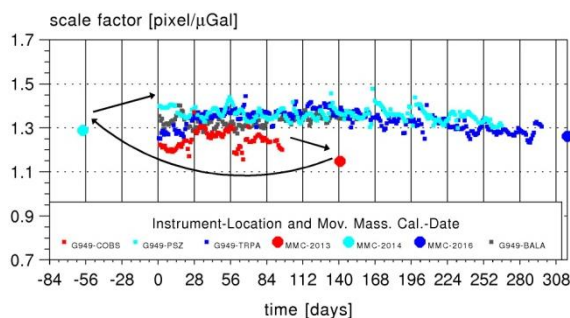
szonda	mélység padlószint alatt [cm]	mélység a graviméter alatt [cm]
1.	70	135
2.	45	110
3.	25	90
4.	5	70

A talajvízszint- illetve talajnedvesség változás gravitációs hatását egyelőre nem vettük figyelembe a BALA állomáson mért adatok feldolgozása során.

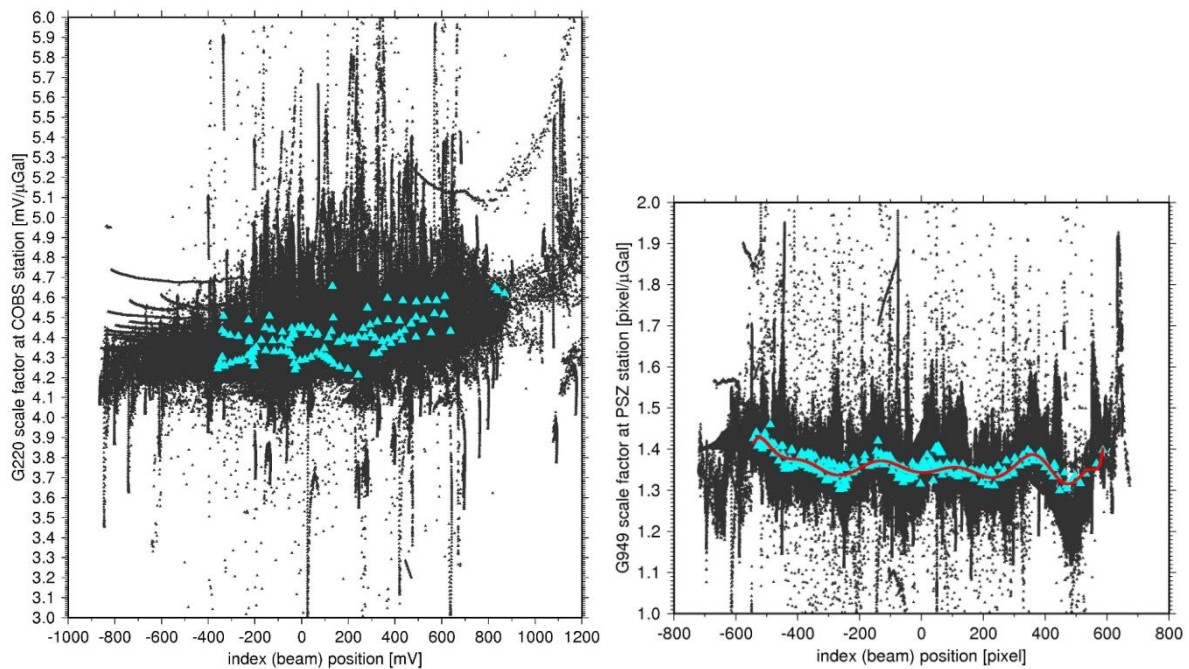
3. A graviméter méretarány-tényezőjének illetve méretarány-tényező függvényének meghatározása

3.1 A méretarány-tényező vizsgálata elméleti modell alapján

Ez a módszer nem biztosítja ugyan az árapály hullámcsoportok amplitúdói abszolút értékeinek meghatározását, de ha egy mérési helyen az így nyert skálatényezőt az összes többi mérési helyen alkalmazzuk, a változások indikálására alkalmas lehet. Feltéve, hogy időközben nem változnak meg az adott műszer jellemzői. Sajnos a méretarány-tényező változatlansága erősen kétséges, amint azt a 8. ábra mutatja. Ez származhat egyrészt az asztalizált és feedback-rendszer nélküli szenzor tulajdonságaiból (a méretarány-tényező változik a szenzor pozíciójával) másrészt a mechanikus szenzor bizonytalan működéséből, hiszterézis, súrlódások, stb... miatt (8. és 9. ábra).



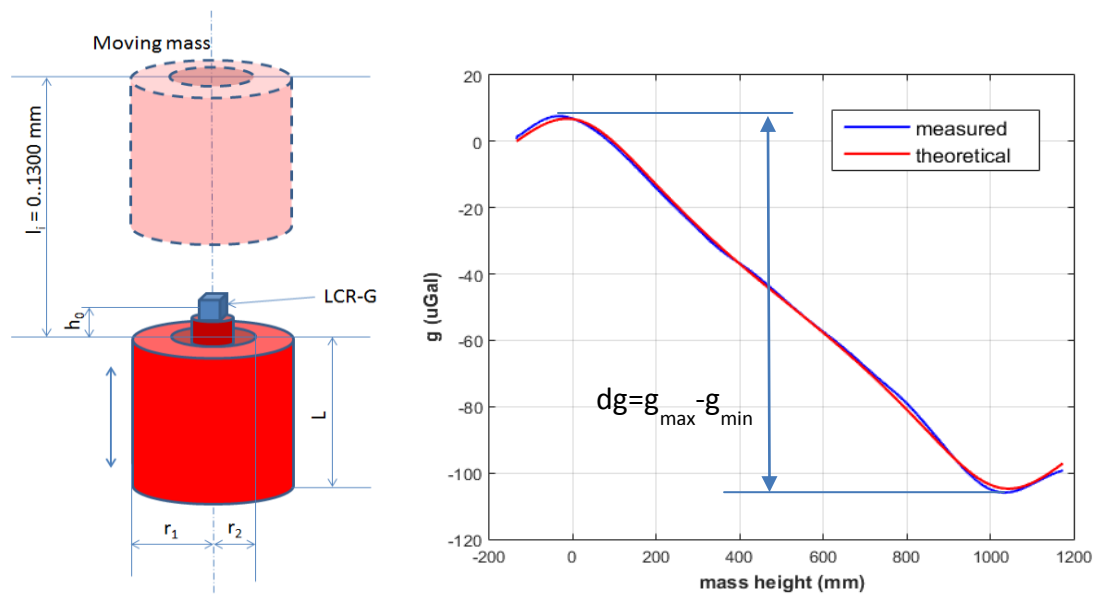
8. ábra A napi, relatív méretarány-tényező változások és a mozgótömeges kalibrálásból származó átlagos méretarány-tényezők. Bal ábra: G949 graviméter. A jelmagyarázat mutatja az eddig feldolgozott mérési sorozatokat és a kalibrálási kísérleteket. Jobb ábra: G220 graviméter



9. ábra A relatív méretarány-tényező változása (napi: kék, pillanatnyi: fekete) az index-helyzet (szenzor pozíció) függvényében. Bal oldal: G220 graviméter. Jobb oldal: G949 graviméter. A piros vonal az N=15 fokú Chebishev-polinomos közelítés

3.2 A méretarány-tényező vizsgálata mozgótömeges kalibrálással

Az árapály jel amplitúdó-tartományában ($\sim 100 \mu\text{Gal}$) a különböző (abszolút,relatív) graviméterekkel végzett összehasonlító (kollokált) mérések alapján történő kalibrálás mellett mérés technológiai szempontból ettől független lehetőséget nyújt a mozgó tömeges berendezés, amelyet a Mátyás-barlangban hoztak létre kimondottan az LCR G graviméterek kalibrálására 1990-ben. A $3103.765 \pm 0.021 \text{ kg}$ össztömegű acél hengergyűrű (etalon-test) vertikális mozgatása $110.3 \mu\text{Gal}$ térerősség változást képes létrehozni. (10. ábra). A hengergyűrű geometriai és fizikai (pl. sűrűség) paramétereinek realisztikus bizonytalanságait szimulálva modellszámítással igazoltuk, hogy a valódi hengergyűrű tömegvonzási hatása $\pm 0.1 \mu\text{Gal}$, vagyis 10^{-9} abszolút pontossággal meghatározható, így mérés technológiai szempontból standardnak tekinthető. 2013-tól kezdődően a LCR G949 mérőrendszert rendszeresen kalibráltuk (4. táblázat) figyelembe véve a lehetséges mesterséges hatások korrekcióját (dőléskorrekció, a hengergyűrű által keltett mágneses hatás korrekciója), amelyeket az korábban végzett kalibrálások során elhanyagoltak. A dőlés korrekciót a kísérletek során folyamatosan rögzített dőlésértékekből és a hozzájuk tartozó index-állásokból az (1) szerint, a műszerenként meghatározott dőlésérzékenységek alapján számítottuk. A mágneses korrekció, melynek mértéke eléri a kalibráló jel 5%-át, számszerűsítéséhez szükséges adatok 2016-re rendelkezésre álltak. Mind a dőlés, mind a mágneses korrekció figyelembe vétele elengedhetetlen a kalibrációval előállított skálatényezőnek a tervezett (0.1-0.2)% relatív pontossággal való meghatározásához.

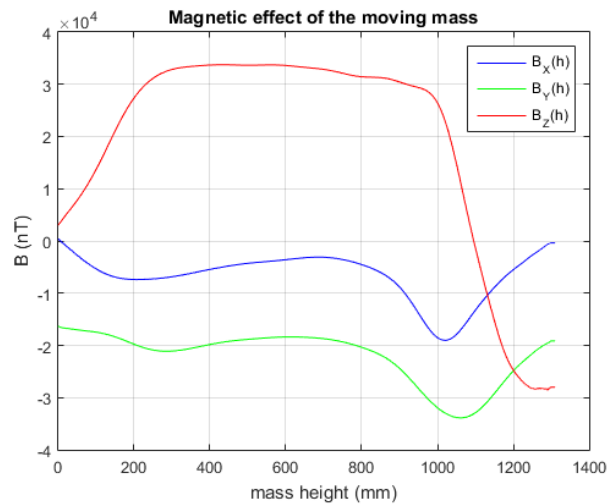


10. ábra. A tömegmozgatásos kalibrálás elve

4. táblázat 2013-tól kezdődően a Mátyáshegyi Gravitációs és Geodinamikai Observatóriumban az LCR G műszerekkel végzett tömegmozgatásos kalibrálások adatai

műszer	mérési időszak	emelések száma	kalibrálási tartomány	méréseket végző intézmény	korrekciók
LCR G949 (elektro- optikai)	2013.07.09 – 2013.07.22	60	1 mGal	GGI	dőlés (GGI)
	2014.04.22 – 2014.04.30	56			dőlés+mágneses (GGI)
	2016.03.29 – 2016.04.06	58			dőlés+mágneses (GGI)
	2017.06.26 – 2017.07.03	67			feldolgozás alatt
LCR G220 (CPI)	2014.10.27 – 2016.10.31	38	0.6 mGal	MFGI	feldolgozott (MFGI)
LCR G963 (CPI)	2015.08.04 – 2015.08.10	45		MFGI	feldolgozott (MFGI)
LCR G821 (CPI)	2015.08.10 – 2015.08.14	54		MFGI	feldolgozott (MFGI)
LCR G1188 (Aliod 100 FB)	2016.02.17 – 2016.03.01	71	20 mGal	MFGI	feldolgozott (MFGI)

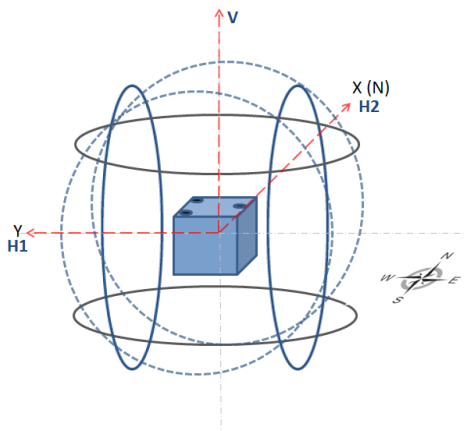
Mivel a kalibráló tömeg hengerelt acélból készült, már korábban is felmerült, hogy a kalibrációs tényező megkívánt pontosságának szempontjából nem elhanyagolható mágneses hatása lehet a fémrugós LCR-G graviméterekre. Egy ekkora fémtömeg mágneses hatását megmérni nem egyszerű, a geofizikai gyakorlatban használt obszervatóriumi és terepi mágneses műszerek ebben az esetben használhatatlanok. A vektor magnetométerek a földi mágneses tér variációját mérik nagy pontossággal, de szűk (pár ezer nT) mérési tartományban. A skalár magnetométerek képesek ugyan a szükséges méréstartományban mérni, de irány-információt nem adnak. Kipróbáltuk a fejlesztés alatt lévő FluxSet magnetométert, mely egyszerre képes a tér három irányában mágneses térerősséget mérni. A méréseket 2014. március 21-én és április 9-én végeztük.



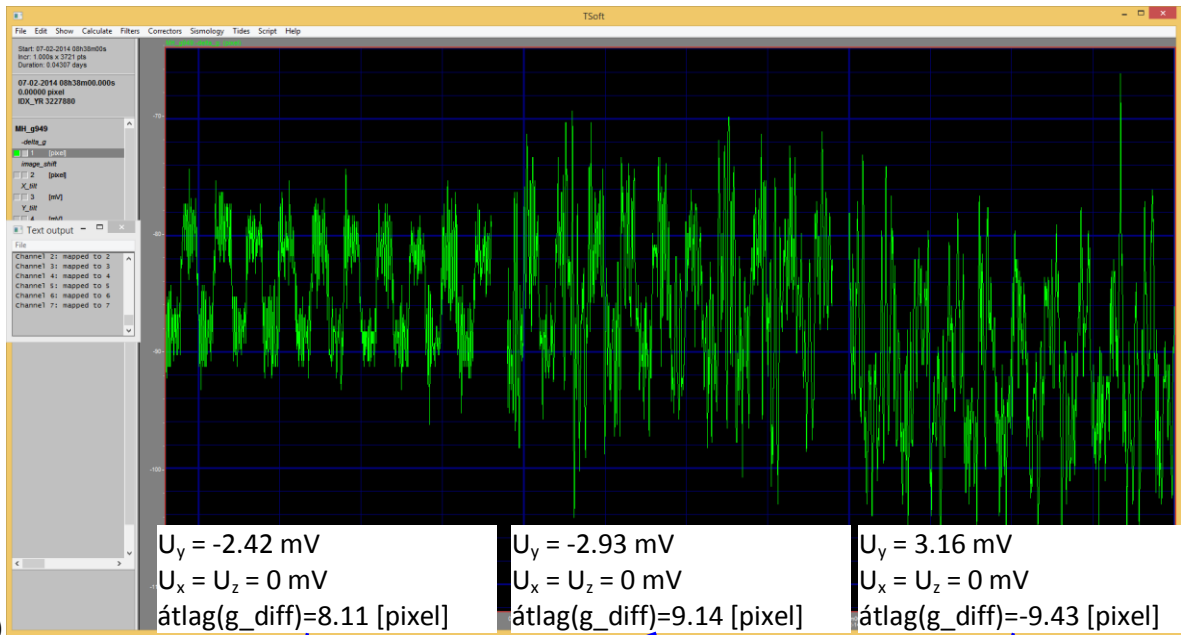
12. ábra. a) A FluxSet magnetométer a kalibráló-oszlop tetején. b) A mozgó acéltömeg mágneses hatása

Emellett kísérletképpen egy olcsó megoldást is alkalmaztunk. Két Honeywell HMC5983 mágneses chip szenzorral is megmértük a kalibráló tömeg mágneses hatását, 2015.06.02-03. között. A mérések előtt a szenzorokat Helmholtz-tekercesekben (GGI, MFGI) kalibráltuk. A magnetométeres (12.b. ábra) és szenzoros mérések hasonló eredményt adtak, amelyek azt mutatják, hogy a tömeg mozgása közben bekövetkező mágneses térváltozás mértéke meghaladja a teljes Földi tér nagyságát.

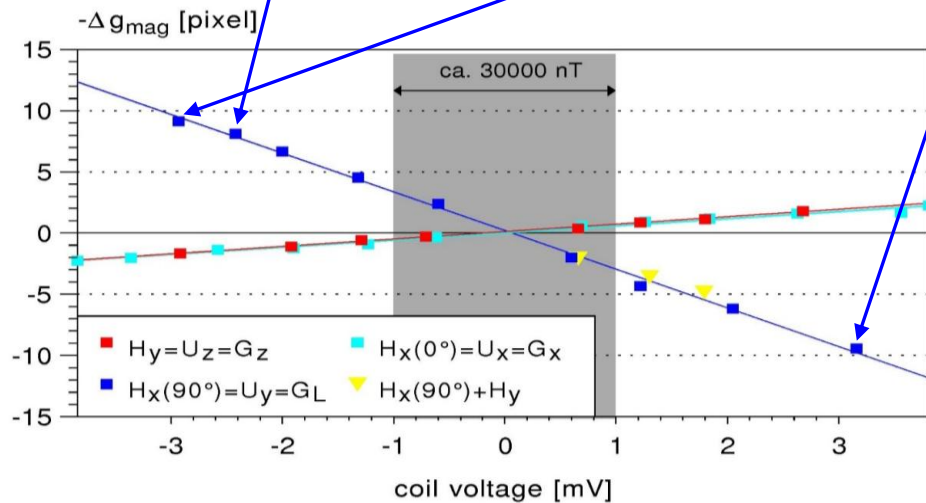
Az árapály észlelésekben részt vevő LCR G műszerek mágneses érzékenységét Helmholtz-tekercesben határoztuk meg. A LCR G220 és LCR G963 műszert 2015.09.08-10. között, a LCR G1188 műszert 2016.09.07-08. között vizsgáltuk a tihanyi Geomágneses Obszervatóriumban, míg a LCR G949 műszert az MTA CSFK GGI soproni geodéziai laboratóriumában, 2014.01.29-02.11. között teszteltük. A 14. ábra az LCR G949 graviméter egy tipikus (10 – 10 áram be- és kikapcsolásból álló) tesztsorozat során regisztrált válaszjeleit mutatja.



13. ábra. a) A Helmholtz-tekerces mérés elvi elrendezése. b) Az LCR G949 graviméter a Helmholtz-tekercesben

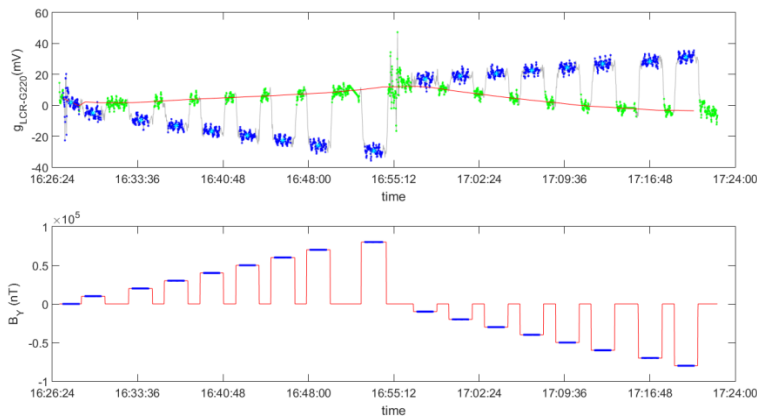


a)



b)

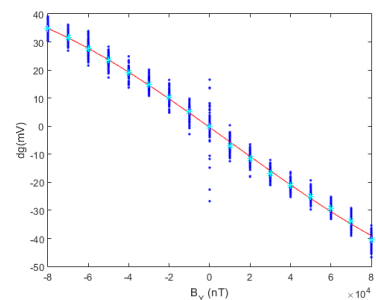
14. ábra a) Az LCR G949 graviméternek a Helmholtz-tekercs segítségével generált mágneses erőterre adott válasza, pixel egységben. b) A kísérletek eredményei alapján előállított válaszfüggvények a 3 koordináta tengely mentén (13/a ábra). A $H_x(0^\circ)$ mérés déli irányítású, vagyis növekvő tekercsfeszültség déli irányban növeli a horizontális mágneses komponensét. Minden adat 10 mérés középértéke



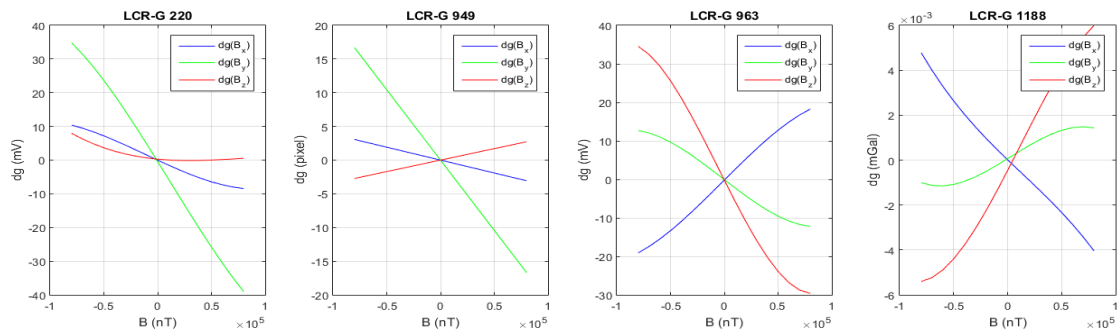
a)

b)

15. ábra. a) A LCR G220 graviméter vizsgálata H1 pozícióban, Y irányban hozzáadott mágneses tér esetében (13/a ábra). b) Az Y irányú mágneses érzékenység függvény

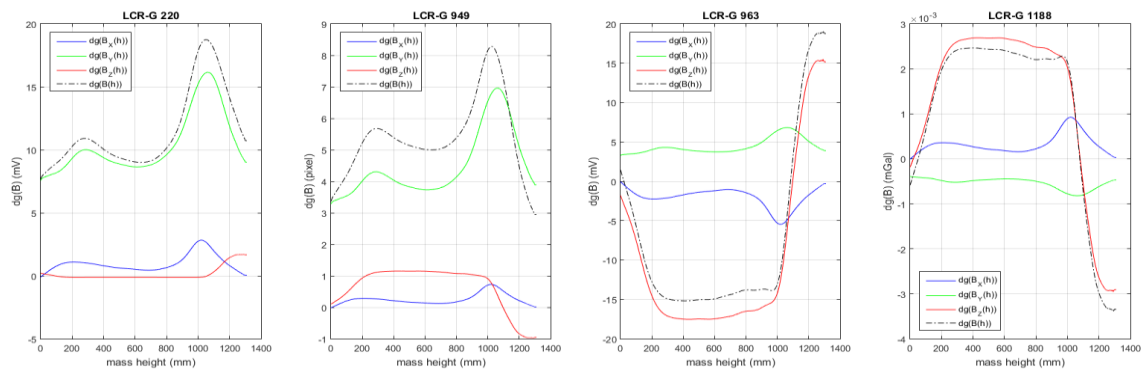


A vizsgált LCR G műszerek 3 irányban meghatározott mágneses érzékenységeinek összefoglalása az 16. ábrán látható.



16. ábra. LCR G graviméterek Helmholtz-tekercek segítségével meghatározott mágneses érzékenysége

Ezen információk ismeretében a tömegmozgatásos kalibráló mozgó hengergyűrűjének mágneses hatását ezekre a műszerekre egyedileg ki lehet számítani (17. ábra.).



17. ábra. A mozgó tömeg mágneses hatására számított korrekciók az LCR G graviméterek egyedi mágneses érzékenysége alapján

Az adatfeldolgozás során a nyers adatsoron elvégeztük a baromterikus korrekciót, dőléskorrekciót, mágneses korrekciót, s végül egy lépésben az árapály és drift korrekciót:

A kalibráló méréseket úgy terveztük meg, hogy a tömeg emelését az árapálygörbe inflexióis illetve minimum/maximum pontja körül végeztük olyan időintervallumban, ahol az árapálygörbe és az előbb említett pontokon simuló helyzetű egyenes abszolút eltérése $0.5 \mu\text{Gal}$ alatti, így napjában átlagosan 7-8 emelésre és süllyesztésre került sor. Ezen feltételek mellett az árapály és a drift korrekció egyetlen, L2 normával illesztett lineáris modellel leírható $<0.5 \mu\text{Gal}$ hibahatár mellett.

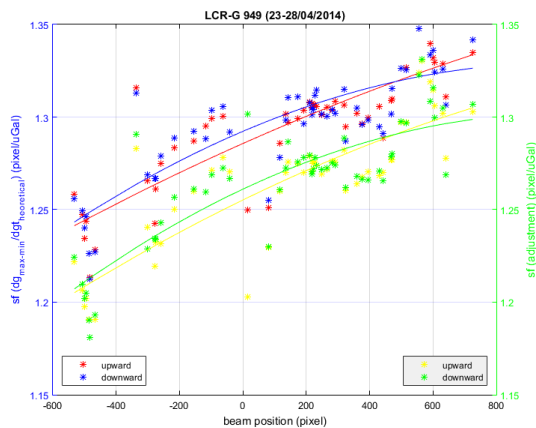
A korrekciók után kétféle módszerrel határoztuk meg a műszerek skálatényezőit valamennyi emelési-süllyesztési sorozatra:

1. A MIN-MAX módszer szerint az elméleti és mért maximális g változás aránya adja a skálatényezőt: $k(x_i) = dg_{mért} / dg_{elméleti}$. A minimális és maximális g értékeket a helyi szélsőértékek környezetében a mérésekre L2 normával illesztett másod- illetve harmadfokú görbék analitikus alakjainak felhasználásával számítjuk ki.
2. Elméleti görbe illesztése a mért adatokra (full-fit módszer): $g_{mért}(h_0 - l_i, x_i) + e_i = k(x_i) \cdot g_{elméleti}(h_0 - l_i) + g_0$, ahol k , g_0 és h_0 paramétereket az inverzió adja eredményül, e_i az i -ik mérési eredmény javítása, h_0 a teszt tömeg tömegközéppontjának és a szenornak a függőleges távolsága és l_i az i -ik mérési pont magassága.

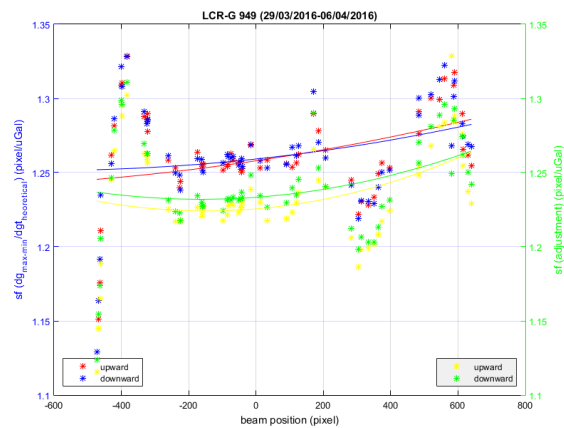
A mágneses hatást is figyelembe véve 5 db LCR G típusú graviméter kalibrálását végeztük el 6 mérési kampány során. A MIN-MAX és full-fit módszerek alkalmazásával határoztuk meg az x_i index-pozíció

függő $k(x_i)$ skálatényező-függvényeket az egyes graviméterekre (20.a-e ábra). A kapott eredmények azt mutatják, hogy CPI és optikai leolvasású műszerek esetében a skálatényező határozott függést mutat az index-pozíciótól. A referenciaműszer, az ALIOD-100 feedback-rendszerrel rendelkező LCR G1188 esetében pedig a mérés/kalibrálás pontosságának tartományán belül konstansnak tekinthető az átvitel. A feedback-rendszer nélküli műszerek esetében szignifikáns eltérés van a fel és le irányokban kapott skálatényező-függvények között.

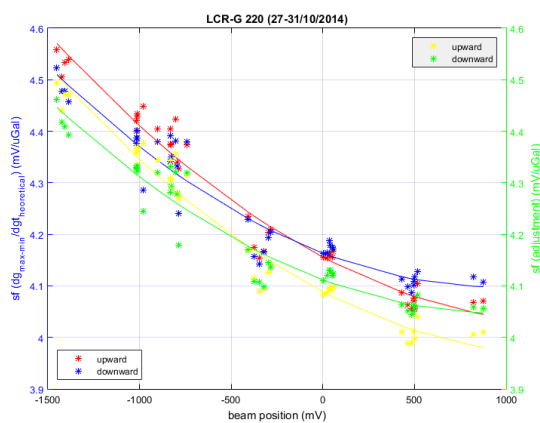
A kétféle feldolgozási módszer eredménye némileg eltérő. A MIN-MAX módszer rendre magasabb értékű skálatényezőket ad, mint a full-fit módszer. Szerencsére az alkalmazott L2 normás kiegyenlítés miatt mindkét módszer lehetőséget nyújt a kalibrálás pontosságának becslésére. A full-fit módszer alkalmazásával kapott maradékok szórásait az 5. táblázat mutatja fel és le irányban. Modellezve a lehetséges egyéb, a kalibráló jel bizonytalanságát növelő, hatásokat, úgy mint a graviméter érzékelőjének a hengergyűrű függőleges tengelyéhez viszonyított excentrikus elhelyezkedését (pozicionálási hiba), a hengergyűrű geometriai paramétereinek feltételezett bizonytalanságát, igazoltuk, hogy ezeknek összhatása nem haladja meg a $0.1 \mu\text{Gal}$ -t, így a minden emelés során szisztematikusan jelentkező $\sim 1.5 \mu\text{Gal}$ amplitúdójú maradékjel (az elméleti és a mérésekből a skálatényezővel felszorozott jel különbsége) okát egyéb, pl. instrumentális hatás (hiszterézis) magyarázhatja. Ugyanis a maradékjel alakja hasonlít a kalibráló jel első deriváltjára, ami a térerősség-változás nagyságával és irányával függ össze. Gravitációs inverzióval vizsgáltuk, hogy a maradék jel magyarázható-e a hengergyűrű esetleges anyagi inhomogenitásaival. Az eredmények alapján ez kizárható, mert olyan nagymérvű inhomogenitások szükségesek ($-500 \text{ kg/m}^3 < \Delta\rho < 500 \text{ kg/m}^3$), amelyek megléte a teszt-tömegben alkalmazott mérési-ellenőrzési eljárásokkal könnyedén kimutatható lett volna. A feedback-rendszerrel rendelkező LCR G1188 index-pozíció független kalibrálási tényezője az árapály változás tartományában 0.5%-os, míg a többi műszerek esetében 1%-os pontossággal határozható meg a mozgótömeges kalibráló rendszerrel.



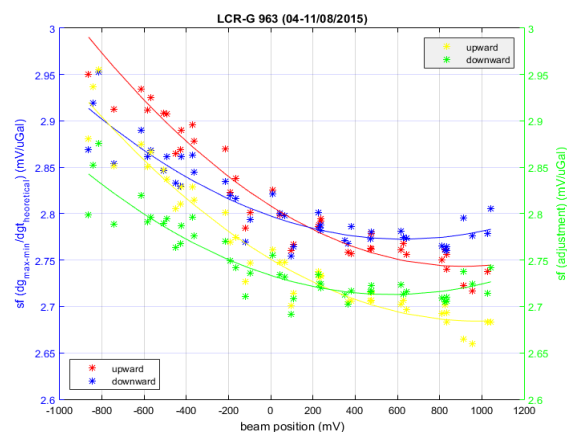
a)



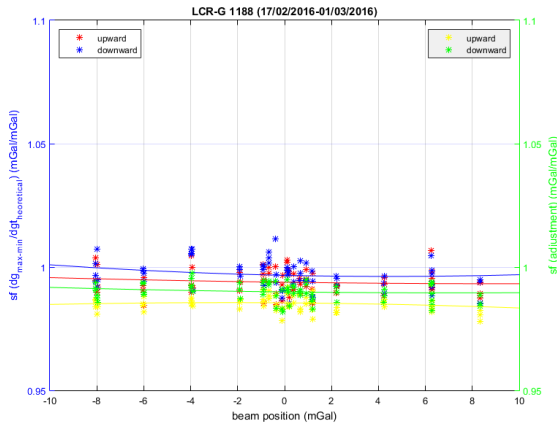
b)



c)



d)



e)

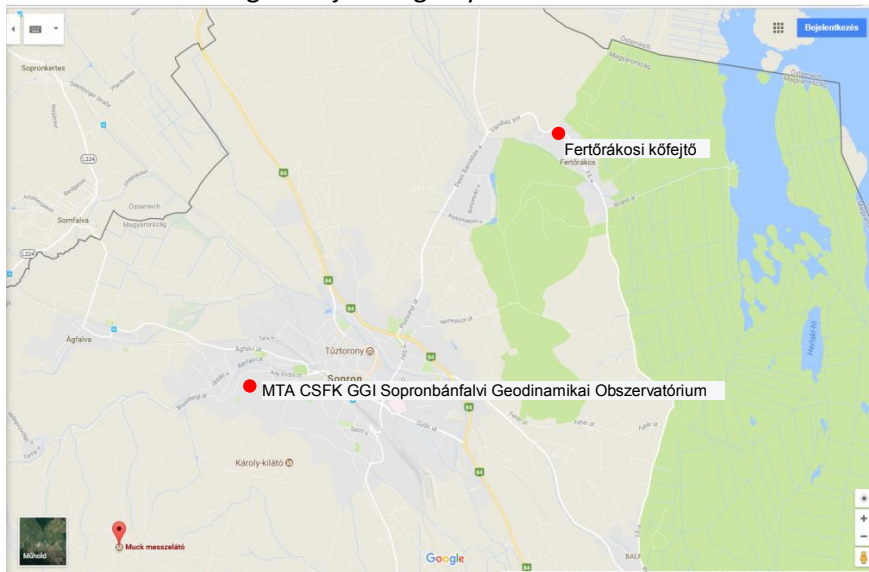
18. a-e. ábra. A tömegmozgatás kalibrálással kapott skálatényező karakterisztikák az x_i index-állás függvényében. A piros és kék pontok a MIN-MAX módszerrel, míg a sárga és kék pontok a full-fit módszerrel a fel- és le irányokban kapott skálatényezőket mutatják

5. táblázat A kiegyenlítés utáni maradék adatok szórásai az egyes LCR G műszerek esetében

Graviméter	SD (fel) (μ Gal)	SD (le) (μ Gal)
LCR-G 220	0.814	0.900
LCR-G 949	0.927	0.926
LCR-G 963	1.974	1.723
LCR-G 1188	0.539	0.577

3.3 A soproni gravitációs alappontokon végzett abszolút és relatív mérések

A soproni gravitációs alappontokon (19. ábra) végzett abszolút és relatív mérések (1. táblázat) összevetésének egyik célja az OTKA programban használt műszerek skálatényezőinek vizsgálata az árapály hatásnál (~ 0.1 mGal) kb. 3 nagyságrenddel nagyobb (~ 80 mGal) mérési tartományban. A mérési adatok feldolgozása jelenleg folyamatban van.

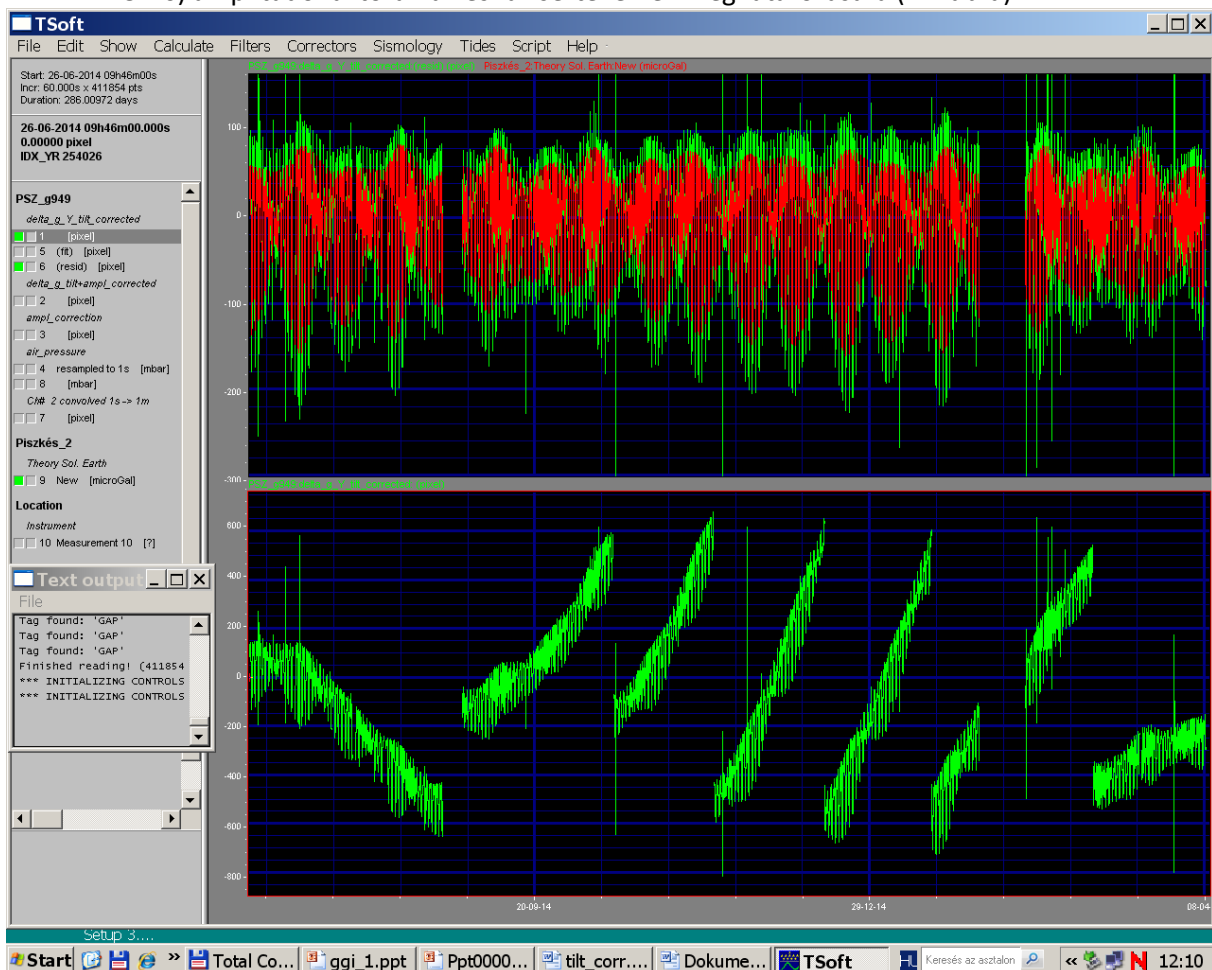


19. ábra. Az abszolút g alappontok helyei. A maximális távolság ~ 15 km, maximális magasságkülönbség ~ 370 m

4. A mérési adatok feldolgoása, előzetes eredmények

A feldolgozás lépései:

- 1) Az 1 perces mintavételezésű meteorológiai adatok besűritése 1 mp-es gyakoriságra lineáris interpoláció alkalmazásával,
- 2) A nyers mérési formátum, ami pontosan 1 napnyi adatot tartalmaz, átalakítása TSF formátumra (TSOFT programhoz),
- 3) A mért nehézségi gyorsulás adatok dőléskorrekciója a regisztrált Y irányú dőlésértékek segítségével,
- 4) A dőléskorrigált mérések további korrigálása a légnyomás változás szerint,
- 5) A feedback-rendszer nélküli műszerek esetén a regisztrátumok ún. step-korrekciója, vagyis a méréshatár állítás miatti regisztrátum eltolódások kiküszöbölése a regisztrátum folyamatosságának biztosítására (20. ábra),
- 6) Műszerdrift eltávolítása az adatokból (5 – 7. fokú polinom),
- 7) A mérési eredmények átszámítása az adatok digitalizálása során használt mértékegységből (CPI: mV, CCD okulár: pixel) a nehézségi gyorsulás mértékegységére a kalibrálási adatok (skálatényező illetve skálatényező függvény) alapján,
- 8) Simítás, szűrés és decimálás az 1 órás mintavételezésű adatrendszer előállításához,
- 9) Árapály-analízis az ETERNA3.4 programcsomaggal a 2 naposnál kisebb hullámcsomagok (Q1 – M3M6) amplitúdó faktorainak és fázisértékeinek meghatározására (21. ábra).



20. ábra Az LCR G949 graviméterrel mért gravitációs gyorsulás változás adatok a PSZ állomáson. Felső ablak: a légnyomás változással, műszerdőléssel és műszerdrifttel korrigált adatok (zöld) és a GWR SG25 szupravezető graviméter évtized hosszúságú méréseiből levezetett árapály paraméterek alapján szintetizált elméleti árapály görbe (piros). Alsó ablak: műszerdrift- és step-korrekció nélküli mérési adatok

```

Program ANALYZE, version 3.40 970921           File: lcr
#####
# GGI                                           #
# VERTICAL COMPONENT                           #
# LCR-949                                       #
#####
Latitude: 47.9184 deg, longitude: 19.8944 deg, azimuth: 0.0000 deg.
20140626...20150408    1 blocks. Recorded days in total: 285.375
Hartmann+Wenzel (1995) TGP, threshold: 0.100E-06    7761 waves.
WAHR-DEHANT-ZSCHAU inelastic Earth model used.
UNITY window used for least squares adjustment.
Sampling interval:    3600. s
Numerical filter is  N60M60M2    with 167 coefficients.

Average noise level at frequency bands in nm/s**2
0.1 cpd*****        1.0 cpd    0.836221    2.0 cpd    0.634852
3.0 cpd    0.467189    4.0 cpd    0.262175    white noise  0.220041

adjusted tidal parameters :

          theor.
from      to      wave  ampl. ampl.fac.  stdv. ph. lead  stdv.
[cpd]    [cpd]    [nm/s**2 ]      [deg]  [deg]
-----
0.501370 0.911390 Q1    59.1942  1.13114  0.01246 -1.7032  0.6308
0.911391 0.947991 O1    309.1642 1.14578  0.00270 -0.4196  0.1350
0.947992 0.981854 M1    24.3024  1.14678  0.02394 -0.9004  1.1956
0.981855 1.023622 K1    434.6343 1.13106  0.00175 -0.2886  0.0887
1.023623 1.057485 J1    24.3109  1.08903  0.03325 -0.5286  1.7497
1.057486 1.470243 O01    13.2956  1.20915  0.07362 -0.9329  3.4893
1.470244 1.880264 2N2    10.3261  1.15032  0.03365  2.4113  1.6757
1.880265 1.914128 N2    64.6544  1.15872  0.00749  0.6671  0.3704
1.914129 1.950419 M2    337.6801 1.16296  0.00147  1.5611  0.0724
1.950420 1.984282 L2     9.5455  1.30291  0.03884  3.2754  1.7085
1.984283 2.451943 S2    157.0925 1.16218  0.00306  1.0968  0.1506
2.451944 7.000000 M3M6  4.4507  1.16943  0.07559  1.4760  3.7040

Standard deviation:    10.149 nm/s**2
Degree of freedom:    6659
Maximum residual:    59.974 nm/s**2
Maximum correlation:  0.019 Y-wave-S2    with Y-wave-L2
Condition number of normal equ.    1.080

```

Routine GEOEXT. Execution time= 1.100 sec

21. ábra Részlet az ETERNA3.4 ANALYZE programjának eredmény listájából

A különböző állomásokon mért adatok árapály analíziseinek legmegbízhatóbb eredményei az 6. táblázatban láthatók. Megállapítható, hogy a feedback-rendszer nélküli műszerek (G220, G963, G949) által mért adatokból számítható árapályparaméterek, a műszerek kalibrálásra tett erőfeszítések ellenére, jelentősen eltérnek a szupravezető graviméter (GWR SG025) méréseiből levezetett paraméterektől. Ez utóbbiak egyébként a rugalmas földmodellek alapján levezethető elméleti paraméterekkel jó egyezést mutatnak. A G1188 és a Scintrex CG-5 által rögzített adatokból kapott eredmények viszont konformak ezekkel.

Az eredmények közvetlen összehasonlíthatóságának, vagyis az árapály hatás területfüggése vizsgálatának fent érintett nehézségei miatt meghatároztuk a $\delta(O1)$ és $\delta(M2)$ delta faktorok hányadosait, helyről helyre, kiválasztva a legmegbízhatóbb eredményeket (7. táblázat). Ezek azt mutatják, hogy ha gyengén is, de a hányados értéke nyugatról keletre növekszik, ami jó összhangban van azzal, hogy amíg az O1 hullámcsoport amplitúdóit az óceáni terhelés hatása alig módosítja, addig az M2 hullámcsoportnál ez, különösen a tengerpartok mentén, jól kimutatható hozzájárulást ad a szilárd földmodellekből számítható amplitúdókhoz. Ez a hozzájárulás azonban nyugatról keletre csökkenő tendenciájú, így végeredményben nő a hányados értéke.

Az óceáni terhelési modellek lehetőséget adnak az elméleti és tapasztalati adatok összehasonlítására. A 22. ábrán jól látszik, hogy a FES2014 modell alapján szimulációval számított változás a mérési helyek földrajzi hosszúságainak függvényében tendenciáját tekintve megegyezik a tapasztalati adatokkal. Mértékük azonban különbözik. Az is megállapítható, hogy a feedback-rendszer

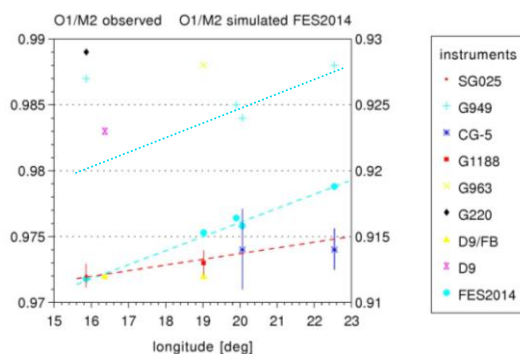
nélküli műszerek (G220, G963, G949) adataiból nyert eredmények meglehetősen inkonzisztensek. Az egyetlen, részleges kivétel talán a G949, amely olyan mérési adatokat szolgáltatott, amelyekből meghatározott hányadosok PSZ, BALA és TRPA állomásokon szinte tökéletes leképezik a FES2014 modell (Bruno Meurers személyes közlése) meghatározta növekvő tendenciát (v.ö. a világoskék köröket a világoskék keresztekkel). Ehhez kapcsolódik az az OTKA keretében végzett és publikált optimalizálási módszerfejlesztés is, amelynek segítségével a jövőben pl. az óceáni, mozgó víztömegek gravitációs hatását magunk is meg tudjuk majd határozni 3D modellezéssel, globális koordináta rendszerben.

6. táblázat Árapály amplitúdó (ún. delta-) faktorok és a hozzájuk tartozó a posteriori megbízhatósági mérőszámok (négyzetes középhibák). A μ_0 az egység súlyú mérési eredmény középhibája

	COBS			MHGO			PSZ			TRPA			BALA		
	μ_0 days	O1 μ_{O1}	M2 μ_{M2}	μ_0 days	O1 μ_{O1}	M2 μ_{M2}	μ_0 days	O1 μ_{O1}	M2 μ_{M2}	μ_0 days	O1 μ_{O1}	M2 μ_{M2}	μ_0 days	O1 μ_{O1}	M2 μ_{M2}
GWR SG025	± 0.24139 139	1.14971 ± 0.00094	1.18341 ± 0.00018												
G220	± 0.95124 124	1.16386 ± 0.00381	1.17646 ± 0.00154												
G949	± 1.7777 77	1.16334 ± 0.01315	1.17867 ± 0.00822				± 1.01263 263	1.15670 ± 0.00291	1.17420 ± 0.00166	± 1.68304 304	1.16405 ± 0.00404	1.17772 ± 0.00223	± 1.22155 155	1.15930 ± 0.00503	1.17850 ± 0.00263
G963				± 0.86115 115	1.12922 ± 0.00303	1.14284 ± 0.00173									
G1188				± 0.23830 83	1.13062 ± 0.00093	1.16230 ± 0.00019									
CG-5										± 0.4890 155	1.14874 ± 0.00176	1.17976 ± 0.00074	± 0.62630 63	1.14981 ± 0.00363	1.18029 ± 0.00084

7. táblázat A $\delta(O1)/\delta(M2)$ hányadosok értékei állomásonként. A vastagon szedett adatok a legmegbízhatóbbnak tűnő eredményeket jelölik

	COBS		MHGO		PSZ		TRPA		BALA	
	μ_0 days	O1/ M2 RMS	μ_0 days	O1/M2 RMS	μ_0 days	O1/M2 RMS	μ_0 days	O1/M2 RMS	μ_0 days	O1/M2 RMS
GWR SG025	± 0.24139 139	0.971523 ± 0.000808								
G220	± 0.95124 124	0.989290 ± 0.003488								
G949	± 1.7777 77	0.986994 ± 0.013109			± 1.01263 263	0.985096 ± 0.002843	± 1.68304 304	0.988393 ± 0.003908	± 1.22155 155	0.983708 ± 0.004800
G963			± 0.86115 115	0.988082 ± 0.003044						
G1188			± 0.23830 83	0.972744 ± 0.000816						
CG-5							± 0.4890 155	0.973707 ± 0.001612	± 0.6263 63	0.974176 ± 0.003153



22. ábra Az észlelt és szimulált $\delta(O1)/\delta(M2)$ hányadosok változása a földrajzi hosszúság szerint, műszerenként csoportosítva. A pontozott kék vonal párhuzamos a szaggatott kék vonallal és illeszkedik a 3 megfelelő állomáson a G949 műszer méréseiből levezetett delta faktorok hányadosaira

5. Összefoglalás, további feladatok

Az OTKA 5 éves futamideje alatt felhalmozott észlelési anyag feldolgozása korántsem teljes jelen beszámoló írásakor. Az azonban kijelenthető, hogy a műszeres nehézségek ellenére a mérések támogatják az elméleti megfontolásokat az árapály hatás területfüggésével kapcsolatban. Ennek mértéke azonban egyelőre bizonytalan. A kérdés további vizsgálatához a G949 graviméterrel elkezdtek a méréseket a Conrad Observatóriumban, most már azzal a mérőrendszerrel, amely a piszkási mérések óta a rendelkezésre áll. Vélhetően ez növelni fogja az adatok megbízhatóságát és segít majd az óceáni terhelési modellek kiértékelésében. További vizsgálatot igényel annak megállapítása, hogy a területfüggés mekkora mértékű változást okoz a g mérések árapály redukciójában, vagyis figyelembe nem vétele mekkora hibát okoz.

Egyelőre nem sikerült megmagyaráznunk, hogy a mozgótömeges kalibrálási kísérletekben mi okból mutatkoznak olyan szisztematikus jelenségek, amik nem teszik lehetővé az 1%-nál pontosabb méretarány tényező meghatározást. Ez ugyan biztosítja a kitűzött $\pm 1 \mu\text{Gal}$ pontosságot, de elképzelhető, hogy ennek további javítása az alkalmazott LCR acélrugós graviméterek működési mechanizmusából (pl. hiszterézis) adódó szerkezeti korlátok miatt nem lehetséges. Ennek igazolására kalibrálni fogjuk majd a Scintrex CG-5 gravimétert is, amely ugyan szintén rugós szenzorú, de nem asztalizált és rugója kvarcból készült. Ennek eredménye egyébként a CG-5 mérési eredményeinek újrafeldolgozását is hozhatja, ha a módszer alkalmazása esetleg a jelenlegitől szignifikánsan eltérő méretarány-tényezőt eredményezne. Tudunkkal a Scintrex műszerek esetében ilyen kalibrálást még nem végeztek sehol a világon.

A környezeti hatások tekintetében a talajvízszint ingadozás hatását kell még modelleznünk és a rendelkezésre álló mérésekből kimutatnunk. Ezen a téren fontos lenne tanulmányozni, hogy ez a jelenség regionálisan milyen jellegű és mekkora erőter változásokat okoz, mert ez segítség lehet a műholdakkal (GRACE) végzett megfigyelések helyes magyarázatához. Ehhez az országban működő talajvízszint mérő kúthálózat adatai használhatók fel.

Két cikkünket most októberben fogadtak el közlésre a Journal of Geodesy-ben (DOI: 10.1007/s00190-017-1067-1) illetve a Geodesy and Geodynamics folyóiratban (ref.: GEOG_2016_55_R3). Mivel még rengeteg publikálható anyagunk van (ld. pl. a kalibrálással kapcsolatos eredményeket), ezért tisztelettel kérem a résztvevők nevében, hogy az OTKA Hivatal kutatási eredményeink értékelést 2 év múlva ismétlje meg, hiszen két éven belül még 2-3 cikkünk megjelenése várható.

Manuscript Number	Manuscript Title	Initial Date Submitted	Status	Status Date	Letter:
GEOG_2016_55_R3	Feasibility study applied to mapping tide effects in the Pannonian basin – an effort to check location dependencies at global level	15/Dec/2016	Accepted	08/Oct/2017	Accept
GEOG_2016_55_R2	Feasibility study applied to mapping tide effects in the Pannonian basin – an effort to check location dependencies at global level	15/Dec/2016	Under Revision	24/Sep/2017	Revise
GEOG_2016_55	Mapping of tide effects in the Pannonian basin – an effort to check location dependencies at regional level	15/Dec/2016	Under Revision	16/May/2017	Revise
GEOG_2016_55_R1	Feasibility study applied to mapping tide effects in the Pannonian basin – an effort to check location dependencies at global level	15/Dec/2016	Under Revision	25/May/2017	Revise

Sopron – Budapest, 2017. október

Papp Gábor
témavezető