

Mozgásvizsgálati célú gravimetriai mérések a sóskúti geodéziai mikrohálózaton¹

CSAPÓ GÉZA²

A dolgozatban egy hazai kísérleti mérést ismertet a szerző. A mérések célja a gravimetriai módszer alkalmazhatóságának vizsgálata földtani mozgások kimutathatósága céljából. A feladat a mozgások nagyságának és területi kiterjedésének meghatározása. Megállapítható, hogy megbízható eredményekre a területen csak hosszú időn keresztül ciklikusan végzett mérések után számíthatunk, mert a jelenlegi abszolút graviméterek mintegy 9 mm, a relatív graviméterek pedig 30–60 mm magasságkülönbségnek megfelelő „szekuláris” nehézségi gyorsulási értékváltozások kimutatására alkalmasak. A földtani jellegű mozgások nem okvetlen járnak együtt a nehézségi erő megváltozásával (és fordítva). Miután a gravimetria fizikai módszer, célszerű a geometriai módszerekkel (GPS, szintezés) együtt alkalmazni, mert a komplex értelmezésnél — az adott terület földtani ismeretének birtokában — hasznos információkat szolgáltat a nehézségi erőter változásának okáról és jellegéről, illetve magyarázatot adhat a GPS mérések eredményében esetleg jelentkező ellentmondásokra.

G. CSAPÓ: Gravity measurements for monitoring structural movements on the geodetic micronet near Sósokút

This paper presents the first phase of gravity measurements carried out on a test polygon to detect vertical crustal movements. The aim of the measurements is to investigate the applicability of gravity to detect geological movements. The task is to determine the amplitude and the extent of the movements. It is calculated that reliable results can only be expected from long measurement series because at present the accuracy of absolute and relative gravimeters only makes it possible to detect the gravity equivalent of 9 mm and 30–60 mm vertical movement respectively. At the same time geological movements do not indicate gravity change under any circumstances and vice versa. Since gravity is a physical method it is advisable to combine it with geometrical methods (GPS, leveling). The integrated interpretation of the two methods — taking into consideration the geological conditions and structure of the given region — can lead to the better understanding of the nature and characteristics crustal movements.

Bevezetés

A Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Általános- és Felsőgeodézia Tanszéke a 80-as években hat pontból álló hálózatot létesített Sósokúton. Három-három pontot telepítettek a Benta patak két oldalán meredeken emelkedő mészkő kibúvásokon, a patakmeder közelében feltételezett törésvonal ÉNy–DK csapásirányában. A hálózat célja egyrészt a különböző geodéziai módszerek bemutatása a földmérőmérnök-hallgatóknak, másrészt az esetleges jelenkori kéregmozgások kimutatása ciklikus újramérésekkel. A gondosan állandósított pontjeleket elsősorban GPS-, távolság- és iránymérésekhez, valamint szintezéshez tervezték.

1993–99 között az ELGI kiépítette az ország gravimetriai alaphálózatának korszerű abszolút graviméterekkel mért ún. nulladrendű hálózatát (ennek pontjait az Országos Mérésügyi Hivatal 1998-ban a magyarországi graviméteres mérések etalonjának minősítette), valamint korszerű, néhány μGal megbízhatóságú mérésre alkalmas relatív graviméterek is rendelkezésre állnak [CSAPÓ 1997].

Mindezek figyelembevételével a BME és az ELGI Földfizikai Főosztálya elhatározta, hogy tudományos együttműködés keretében kiegészíti a geometriai jellegű mozgásvizsgálati méréseket a gravimetria módszerrel.

A gravimetria alkalmazása mozgásvizsgálati célra

A gravimetria — jellegét tekintve — fizikai módszer. Mozgásvizsgálati célra történő alkalmazási lehetőségének az a fizikai alapja, hogy a Föld mélyében (vagy a felszínközeli rétegekben) bármely okból történt tömegátrendeződés következtében egy felszíni mérési ponton megváltozik a — korábbi tömegviszonyokhoz képesti — nehézségi gyorsulási érték. A tömegátrendeződés — illetve a nehézségi gyorsulás felszínen mért értékeinek változása — azonban nem jár együtt szükségszerűen felszíni magasságváltozásokkal. Ezért alkalmazása csak más — geometriai jellegű — vizsgálati módszerekkel együtt lehet eredményes. A gravimetria mozgásvizsgálati célú alkalmazása tulajdonképpen a nehézségi erőter évszázados — nem árapály jellegű — változása vizsgálatának az az esete, amikor a graviméterekkel észlelt nehézségi változások geofizikai értelmezésével megkíséreljük azokat a geometriai alapú módszerek (GPS, szintezés) eredményeivel összhangba hozni.

A földtani mozgások jellege

A mozgások jellege szerint megkülönböztethetünk ún. „mélységi mozgást” (a földmag, illetve a köpeny mozgásai) és „kéregmozgást”. Előbbi minden esetben geodinamikai folyamatok (pl. lemeztectonika) eredménye, utóbbi általában vagy részben helyi hatásoké (pl. suvadás, tömörödés, fokozott vízkitermelés stb.).

¹ Beérkezett: 2000. május 29-én

² Magyar Állami Eötvös Loránd Geofizikai Intézet, H-1145 Budapest, Kolumbusz u. 17–23.

Egy másik csoportosítás szerint beszélhetünk globális, regionális vagy lokális mozgásról aszerint, hogy a tömegátrendeződés felszínen mérhető hatása mekkora területre terjed ki (nehézségi, vagy/és magasság-változás).

A tömegátrendeződés vagy hosszú időn keresztül zajló folyamatok (pl. a felszínközeli rétegek tömörödése) eredménye, vagy igen gyorsan (pl. földrengés, bányamolás következményeként) zajlik le.

Az előzőekben mondottaknak megfelelően a vizsgálat célja kettős: egyrészt a mozgások okozta, felszínen jelentkező hatás számszerűsítése, másrészt e mozgások jellegének meghatározása. A vizsgálathoz szükség van a terület földtani (geológiai) szerkezetének ismeretére. Csak ennek birtokában lehet eredményes kísérletet tenni a regionális és lokális hatások szétválasztására.

Ha két földtani szerkezet (blokk) egymáshoz képest mozog, akkor a két blokkon kijelölt mérési pontokon a nehézségi gyorsulás értékek különbsége változik az időben. Ha mindkét blokkon folyamatosan mérjük a nehézségi gyorsulás abszolút értékét, akkor a két értéksor különbségének változásából következtethetünk a regionális változások nagyságára (trend). Erre a célra használhatók az ún. *abszolút graviméterek*, amelyek mérési megbízhatósága 2–3 μGal , ami magasságra átszámítva mintegy 9 mm. Ilyen nagyságrendű magasságváltozások tehát (a vizsgált pontok távolságától függetlenül) abszolút graviméterekkel kimutathatók.

Nehezebb a helyzet a lokális mozgások kimutatásánál (egy földtani blokkon belüli kisebb terület, pl. egy város), különösen, ha azok lassú lefolyásúak és ezért a nehézségi gyorsulás kismértékű változását okozzák. A lokális mozgások rendszerint az emberi tevékenység következményei (bányaművelés, víztározók, fokozott vízkitermelés stb.), és nagyrészt nem az alapközetek, hanem a felszínközeli rétegek helyzetét befolyásolják. Ezek a mozgások néhány kivételtől (pl. suvadás) eltekintve időben lassan történnek és mind az egyes felszíni pontok magasságkülönbségeinek, mind ezen pontok nehézséggyorsulási értékeinek lassú változását okozzák. Éppen ezért kimutatásuk csakis hosszú időn keresztül végzett (ún. „monitorozó”) mérésekkel lehetséges.

Említettük, hogy a nehézségi gyorsulás valamely helyi értékének megváltozása nem okvetlen jár együtt magasságváltozásokkal. Ennek egyik példája az ELGI Mátyás-hegyi Gravitációs és Geodinamikai obszervatóriumában 1980-ban elkezdett abszolút mérések eredménye: ezen az állomáson 2–4 évente rendszeresen végeznek abszolút módszerű nehézséggyorsulás-meghatározásokat abszolút graviméterekkel. Az elmúlt húsz év során a helyi g érték lineárisan csökkent évi 2,5 μGal értékkel. Ez az összességében mintegy 50 μGal csökkenés kb. 16 cm magasságváltozásnak felel meg. Abban az esetben, ha a mért g változás valóban magasságváltozás következménye lenne, akkor a mészkőbarlang (ahol a megfigyeléseket végezzük) valószínűleg már beomlott volna, vagy legalábbis szemmel látható nyomai lennének a mozgásnak. Az eredmények jól korrelálnak viszont a karsztvízszint süllyedésével, ami elsősorban az előző évtizedek intenzív bányaművelésének eredménye.

A lokális mozgások vizsgálatát az adott területen telepített mérési ponthálózaton bizonyos időnként megismételt mérésekkel végzik. Erre a célra abszolút gravimétereket nem szokás használni részben a magas mérési költségek, részben az e módszer megkövetelte pontállandósítás jellege miatt. Ezért ilyen vizsgálatokhoz általában *relatív gravimétereket*

alkalmaznak. Ezen műszerek egy mérési cikluson belüli megbízhatósága mintegy 5 μGal , ugyanazon graviméterrel — azonos külső körülmények között — végzett ismétléseké 10–20 μGal . Magasságváltozásra átszámítva ez mintegy 3–6 cm-nek felel meg.

A hosszú időn keresztül (akár évtizedeken át) végzett monitorozó méréseknél két alapvető feltételt kell biztosítani. Az egyik a *vizsgálati pontok*, a másik az *alkalmazott graviméterek időbeni azonossága*. Egy-egy vizsgálati pont elpusztulása után új pontot kell telepíteni. Ilyenkor az ún. „rekonstruáló mérésekből” a hibaterjedés törvényének megfelelően pótlólagos hibák származnak az elpusztult ponthoz tartozó mérési kapcsolatoknál. Nagyon fontos, hogy az ismétlődő méréseket lehetőleg minden esetben ugyanazokkal a műszerekkel végezzék, mert a tapasztalatok szerint a különböző graviméterek összehasonlítható műszaki paraméterei elég jelentős mértékben szórnak. A relatív méréseknél további gondot jelenthet a műszerek léptékegyűthetőségének lassú változása (ami a kalibráláshoz alkalmazott kényszerpontok nehézségi értékének időbeni változásaiból is származhat).

Gravimetriai mérések a sóskúti mozgásvizsgálati programban

A feltételezett törésvonal két oldalán évekkel korábban telepített 3-3 vizsgálati pontból kialakított mikrohálózaton 1999-ben és 2000-ben végeztünk *relatív graviméteres méréseket*. A két ciklus között mintegy 7 hónap telt el. A méréseket mindkét esetben a *LaCoste–Romberg* cég 1919–G és 963–G jelű gravimétereivel végeztük. A műszereket részben gépkocsival, részben gyalogmenetben szállítottuk a mérési pontok között. A relatív graviméteres mérések vázlatát az 1. ábrán mutatjuk be. A 99 jelű ponton abszolút állomást létesítettünk, de az abszolút mérésekre ez ideig nem került sor. A sóskúti abszolút állomást a 2. ábra szemlélteti, ahol a háttérben a vertikális gradiens meghatározására szolgáló állvány is látható.

A méréseket minden esetben A–B–A–B–A mérési rendszerben végeztük. A műszerleolvasásokat — CPI elektronikával ellátott graviméterekről lévén szó — az elektronikus kimenethez 0,1 Hz-es passzív szűrőn keresztül csatlakoztatott digitális voltmérővel végeztük. A voltmérő szorzóját ($\text{mV}/\mu\text{Gal}$) naponta kétszer határoztuk meg. A reggeli szorzómeghatározás előtt minden esetben elvégeztük e műszerek szükséges ellenőrzéseit is [FETT 1992]. Minden műszerfelállításnál 3–3 ún. „interpoláló” műszerleolvasást végeztünk, amelyekből a pontos leolvasási értéket a feldolgozóprogram határozta meg. Tekintettel arra, hogy a graviméterek rendelkeznek nagy érzékenységű elektronikus libellákkal, a műszerleolvasások megbízhatósága 0,2–0,5 μGal -ra tehető. Valamennyi észlelési időpontban mm pontossággal mértük a pontnyel és a föléje központosan felállított graviméter mérőtömege közötti függőleges távolságot, a hőmérsékletet és a légnomást. A szélérőt és a felhőzet százalékos mértékét becsléssel állapítottuk meg és az észlelési időpontokkal együtt rögzítettük a mérési jegyzőkönyvekben. Az észlelési idők meghatározásához használt órákat naponta ellenőriztük a frankfurti pontos időjellel történő összehasonlítással [ELGI 1997].

A mérési eredmények feldolgozása

A mérési eredmények feldolgozásánál a következő korrekciókat alkalmaztuk:

- árapályhatás miatti korrekció: a korrekciók értékét DOODSON módszerével határoztuk meg,
- műszermagassági korrekció: a kiegyenlített nehézségi gyorsulási értékeket minden esetben a pontjelre vonatkoztatjuk. A redukcióhoz valamennyi mérési ponton meghatároztuk a vertikális gradiens értékét és ezeket a lokális értékeket használtuk a számításhoz [CSAPÓ 1999],
- barometrikus korrekció: a DIN 5450/1968 szabvány szerint,
- műszerjárás miatti korrekció: az egyes pontokon ismételtén végzett műszerleolvasások alapján számítottuk az irodalomban [CSAPÓ 1976] ismertett módszerrel.

A mérési eredmények kiegyenlítése

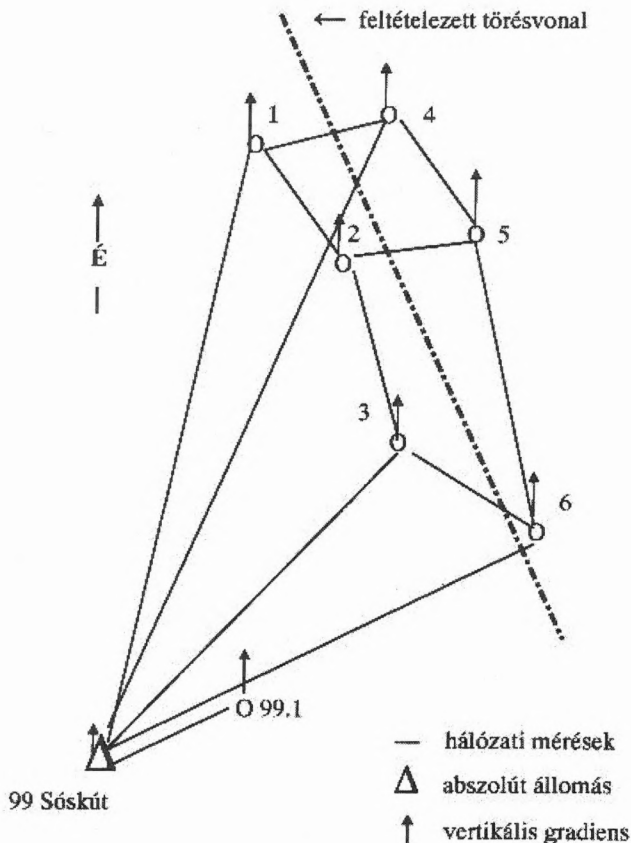
A kiegyenlítésben független mérési eredménynek az egyes graviméterek napi mérési kapcsolataiból számítható 4–4 Δg érték számtani közepét fogadtuk el. A kiegyenlítést szabad hálózat szerint, az ún. „dán” módszerrel, súlyozott mérési eredményekkel, 3 iterációs lépésben végeztük. (Az iterációt addig folytattuk, amíg a kiegyenlítés utáni hálózati középhiba — M_0 — már nem változott érdemlegesen. Jó méréseknél az említett graviméterekkel ez az eset általában a 3. lépés után következik be.) A mérések referenciaszintjét a 99 jelű pontnak az országos hálózatból levezetett nehézségi gyorsulási értéke szolgáltatta. A graviméterek méretarány-tényezője ismeretlenként szerepelt a kiegyenlítésben a 6 mérési pont nehézségi gyorsulási értékével együtt. A kiegyenlítést műszerenként és együttesen is elvégeztük.

A mérési eredmények ismertetése

Az 1. és 2. táblázatban az 1919-G graviméter szabad hálózat szerinti kiegyenlítésének eredményeit mutatjuk be, a 3. és 4. táblázatban pedig a két műszer együttes kiegyenlítéséből származó eredmények találhatók.

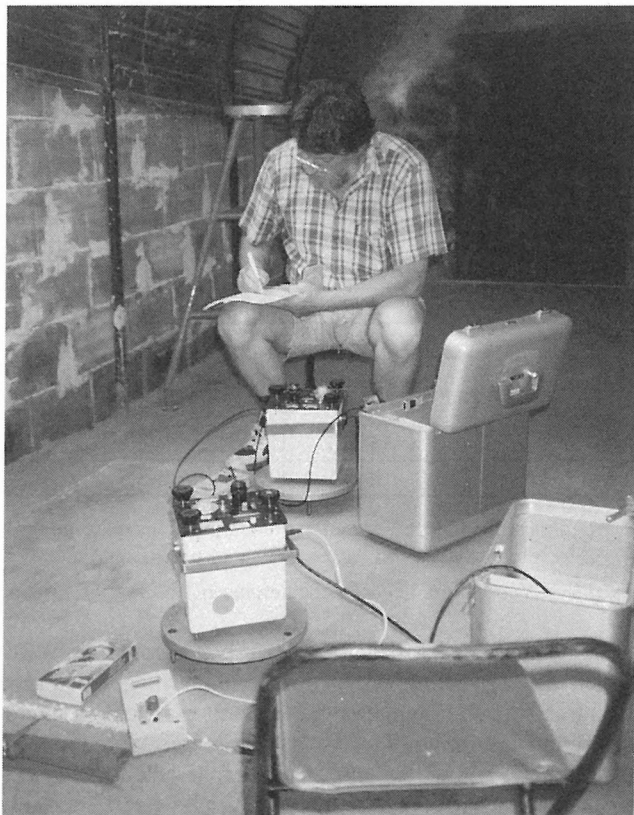
kapcsolat	Δg (mGal)		Δ (μ Gal) (2000-1999)
	1999	2000	
99 – 1	9,746	9,748	+ 2
99 – 3	5,339	5,329	– 10
99 – 4	8,343	8,353	+ 10
99 – 6	8,098	8,089	– 9
1 – 4	1,403	1,395	– 8
2 – 5	2,089	2,109	+ 20
3 – 6	2,759	2,760	+ 1
1 – 2	3,069	3,075	+ 6
2 – 3	1,338	1,344	+ 6
4 – 5	0,423	0,429	+ 6
5 – 6	0,668	0,693	+ 25

1. táblázat. Az 1919-G graviméterrel mért kapcsolatok Δg értékei
Table 1. Observed Δg values obtained by LCR-1919 gravimeter



1. ábra. A relatív graviméteres mérések vázlata

Fig 1: Sketch map of the test polygon near Sósokút village



2. ábra. A sósokúti abszolút állomás

Fig 2: The absolute gravity station in Sósokút

pont	1999		2000		Δ (μGal)
	g (mGal)	m_g (μGal)	g (mGal)	m_g (μGal)	
99	816,411		816,411		kényszer
1	806,665	$\pm 2,5$	806,663	$\pm 4,7$	- 2
2	809,734	$\pm 3,2$	809,738	$\pm 5,2$	+ 4
3	811,072	$\pm 2,9$	811,082	$\pm 4,5$	+ 10
4	808,068	$\pm 2,6$	808,058	$\pm 4,6$	- 10
5	807,645	$\pm 3,0$	807,629	$\pm 6,2$	- 16
6	808,313	$\pm 3,3$	808,322	$\pm 4,6$	+ 9
M_0	$\pm 3,2$		$\pm 5,9$		

2. táblázat. A mérési pontok nehézségi gyorsulási értékei az 1919-G graviméter mérési eredményeiből számítva (M_0 a hálózat kiegyenlítés utáni középhibája)

Table 2. Gravity values of the points calculated from the measurements of No. 1919-G gravimeter (M_0 —the r.m.s. value of the adjusted network)

kapcsolat	Δg (mGal)		Δ (μGal)
	1999	2000	
99-1	9,745	9,717	- 28
99-3	5,353	5,331	- 22
99-4	8,341	8,335	- 6
99-6	8,090	8,075	- 15
1-4	1,404	1,382	- 22
2-5	2,080	2,075	- 5
3-6	2,737	2,744	+ 7
1-2	3,063	3,040	- 23
2-3	1,329	1,346	- 17
4-5	0,421	0,417	- 6
5-6	0,672	0,677	+ 5

3. táblázat. A mérési kapcsolatok Δg értékei az együttes feldolgozásból számítva

Table 3. Adjusted Δg values of the ties with results of LCR-1919 and LCR-963 gravimeters

pont	1999		2000		Δ (μGal)
	g (mGal)	m_g (μGal)	g (mGal)	m_g (μGal)	
99	816,411		816,411		kényszer
1	806,666	$\pm 2,9$	806,694	$\pm 8,1$	+ 28
2	809,729	$\pm 3,7$	809,734	$\pm 9,3$	+ 5
3	811,058	$\pm 3,4$	811,080	$\pm 7,3$	+ 22
4	808,070	$\pm 3,0$	808,076	$\pm 8,8$	+ 6
5	807,649	$\pm 3,5$	807,659	$\pm 8,7$	+ 10
6	808,321	$\pm 3,6$	808,336	$\pm 6,4$	+ 15
M_0	$\pm 5,2$		$\pm 12,8$		

4. táblázat. A mérési pontok nehézségi gyorsulási értékei az együttes kiegyenlítés alapján (M_0 a hálózat kiegyenlítés utáni középhibája)

Table 4. Gravity values of the points obtained from combined adjustment (M_0 —the standard error of the adjusted network)

Földtani vizsgálatok igazolják, hogy a magyarországi függőleges kéregmozgások (szerencsére) igen kis értékűek. Ezért nem várható, hogy ezeket a két mérési ciklus eredményei alapján a sósikói törésvonal mentén kimutathassuk. A mérésekből azonban a módszer alkalmaz-

hatóságára vonatkozóan levonható néhány következtetés.

Az 1. táblázatból látható, hogy a két ciklusban végrehajtott mérésekből az egyes mérési kapcsolatokra számított Δg értékek eltérése megfelel a jó minőségű relatív graviméterektől elvárt megbízhatóságnak, az eltérések abszolút értékének átlaga 9 μGal (két kivételtől eltekintve a mért értékek eltérése 10 μGal -nál kisebb). Megjegyzem, hogy valamennyi kapcsolatot (anyagi okokból) csak egyszer mértük, bár a kedvezőtlen megközelítési viszonyok indokolttá tették volna az összes kapcsolat ismételt lemérését. Ebben az esetben várhatóan növekedett volna az együttes kiegyenlítésből nyert értékek megbízhatósága is (3-4. táblázat). A mozgásvizsgálati mérések eredményét műszerenként célszerű vizsgálni (ezzel számos szabályos műszerhiba hatása kiesik) és a különböző műszerekkel kapott eltérések tendenciáját kell összehasonlítani. Természetesen a tendenciavizsgálatnak csak több ciklus mérése után van értelme.

A 2. táblázat eredményei alapján a hálózat pontjainak szabad hálózatos kiegyenlítéssel számított g értékei is hasonló eltéréseket mutatnak.

Az 5. táblázatból az derül ki, hogy nagypontosságú mérések észlelési anyagának feldolgozásánál nem elegendő a vertikális gradiens elméleti értékével (0,3086 mGal/m) számítani a műszermagassági korrekciókat. Esetünkben pl. a 99-6 jelű mérési kapcsolathoz az elméleti érték használata mintegy 12 μGal hibát okozott volna a számított Δg értékben (az alkalmazott mérőállvánnyal a graviméter mérőtömegének pontjeli feletti magassága kb. 110 mm, így a korrekció a vertikális gradiens teljes, 1 méterre vonatkozó értékének mintegy 10%-a, helyi vertikális gradienssekkel történő számításnál a két helyi érték különbségének 10%-a).

pont	LCR-1919	LCR-963	együtt	m_{VG}
	(eötvös-ben)			
1	3617	3602	3599	± 20
	3577	-		
2	3574	3699	3636	± 88
3	3749	3861	3805	± 79
4	3173	3205	3189	± 23
5	3255	3151	3203	± 74
6	3538	3580	3559	± 30
99	3 graviméterrel	n=13	2406	± 20

5. táblázat. A hálózati pontok vertikális gradiens mérésének eredményei (n az összes mérési sorozat száma)

Table 5. Vertical gradients (n —the number of observation series)

Általánosságban megállapítható, hogy gondosan válogatott LaCoste-Romberg (vagy hasonló megbízhatóságú Scintrex CG-3) graviméterek tapasztalt észlelőkkel lehetőséget adnak arra, hogy a gravimetriai mérések eredményeit felhasználjuk komplex mozgásvizsgálati célokra. Szükségesnek tartjuk azonban az abszolút graviméteres mérésekkel együtt történő alkalmazást — a cikk elején tett megállapítások miatt. Kis értékű mozgások vizsgálata esetén ismétlési periódusnak 2-3 év javasolható.

Köszönetnyilvánítás

A szerző köszönetét fejezi ki a Magyar Tudományos Akadémiának azért, hogy egy akadémiai kutatási projekt keretében (A geodézia környezetvizsgálati mérési módszereinek integrált elemzése a sóskúti mikrohálózaton) anyagi lehetőséget biztosított a mérések elvégzéséhez.

HIVATKOZÁSOK

CSAPÓ G. 1976: A műszerjárás figyelembe vétele nagy pontosságot igénylő graviméteres mérések eredményeinek számítógépes feldolgozásánál. *Magyar Geofizika* **17**, 3, 83–88

CSAPÓ G. 1997: Hungary's new gravity base network (MGH–2000). *Geophysical Transactions* **40**, 3–4, 119–143

CSAPÓ G. 1999: Effect of vertical gravity gradient on the accuracy of gravimeter measurements based on Hungarian data. *Geophysical Transactions* **42**, 1–2, 67–81

ELGI 1997: A Magyar Állami Eötvös Loránd Geofizikai Intézet Mátyás-hegyi Gravitációs és Geodinamikai obszervatóriumának minőségügyi kézikönyve. Budapest, ELGI, NAT és OMH adattár

FETT J. 1992: Instruction manual for LaCoste and Romberg G and D gravimeters. Austin, Texas