

# A GRACE-FO első másfél éve

Földváry Lóránt – Nyilas Annamária

DOI: [10.30921/GK.72.2020.4.1](https://doi.org/10.30921/GK.72.2020.4.1)

*Absztrakt: A GRACE-műholdak 2002 és 2017 között hónapos felbontásban szolgáltatották a Föld nehézségi erőterének időbeli változásait, lehetőséget nyújtva ezzel a nagyobb tömegátrendező folyamatok hatásának műholdas követésére. Az idősor folytatására pályára állított GRACE-FO-műholdpár 2018 utolsó hónapjaitól kezdve végzi ezt a feladatot. Jelen tanulmányban áttekintjük, mennyire egyenletesek a GRACE és a GRACE-FO által szolgáltatott adatok, továbbá hogy milyen folyamatokra utalnak a GRACE-FO első másfél évének eredményei.*

*Abstract: The GRACE mission has provided monthly solutions of the gravity field in the period of 2002 to 2017, which turned to be a useful tool for monitoring large scale mass redistribution processes. In order to carry on monitoring these processes, the GRACE-FO mission started to deliver monthly solutions from the last months of 2018. The present study provides an estimate on the coherency of the GRACE and GRACE-FO monthly solutions, also provides an overview of the mass variation processes in the GRACE-FO period so far.*

**Kulcsszavak:** GRACE-FO-műholdak, nehézségi erőter időbeli változásai, tömegátrendező folyamatok

**Keywords:** GRACE-FO mission, solutions of the gravity field, mass redistribution processes

## 1. Bevezetés

Az jubileumi Eötvös-év kapcsán (Dobszay et al. 2019) a nemzetközi figyelem ismét Eötvös Loránd munkásságára irányult, még ha a szakmai és emberi nagyságához méltó elismertséget (részben szerény jellege okán) mindmáig nem is érte el. Tudományos jelentőségének egyik legismertebb eredménye a geofizika tudományág alapjait lefektető műszer, az Eötvös-inga megalkotása. Az Eötvös-inga a gradiometria terepi eszköze, a nehézségi térerősség gradienseinek mérése révén teszi lehetővé a felszíni és felszín alatti tömegeloszlás feltérképezését, nem mellesleg ipari hasznosítását és nyersanyagkutatói célú alkalmazását.

Míg az Eötvös-inga egy-egy kisebb területen ad lehetőséget a tömegeloszlás megismerésére, annak az egész Földre kiterjedő felmérése csak műholdas technikákkal végezhető el. Az 1960-as évektől az évszázad végéig a nehézségi erőter meghatározásának műholdas módszere műholdpályák alapján, azoknak egy-egy földi követő állomás feletti áthaladását mérve történt. A GPS-rendszer kiépülésével lehetőség adódott a műholdpálya folyamatos követésére; ezt használta fel 2000–2010 között a CHAMP nevű műhold. A két évvel később, 2002-ben pályára állított (és 2017-ig üzemelő) GRACE-műholdpár ezt továbbfejlesztette: két, egyforma

műhold azonos pályán, egymástól hozzávetőlegesen 220 km-re keringett, mely műholdak között 1  $\mu\text{m/s}$  alatti pontossággal mérték a távolságváltozás mértékét, így a pályaadatokon kívül a távolságváltozás szolgáltatotta a nehézségi erőter meghatározásának alapját. A GRACE sikerét mutatja, hogy küldetésének folytatása céljából pályára állították 2018-ban a GRACE Follow-On-műholdpárt (GRACE-FO). A „dedikált gravimetriai műholdas kísérletek” hármását (Földváry 2004) a CHAMP és a GRACE mellett a 2009–2013 között működő GOCE-műhold egészíti ki, amely leginkább tekinthető Eötvös hagyatékának, mivel ezen műhold mérési mennyisége – az Eötvös-ingával megegyezően – a nehézségi térerősség gradiense volt (Földváry et al. 2015, 2019).

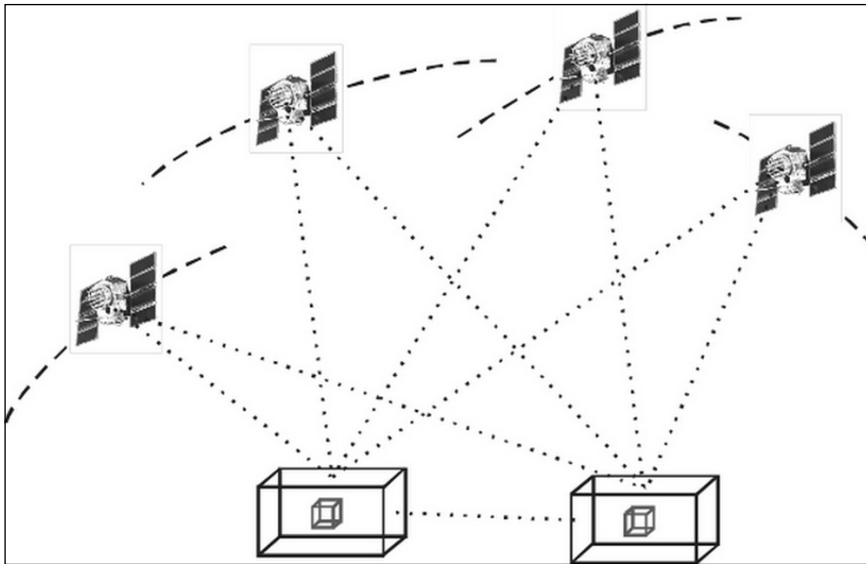
Jelen tanulmányunk a GRACE-műholdpárral és annak jelenleg működő folytatásával, a GRACE-FO-val foglalkozik. A GRACE-műholdak pályáját úgy alakították ki, hogy egy hónap mérései a Föld felszínén egyenletesen álljanak rendelkezésre. Ez lehetővé teszi az egyes hónapokra vonatkoztatva egy-egy teljes nehézségi erőter modelljének előállítását (Bettadpur 2018). A GRACE küldetése során hónapról hónapra új modell meghatározására volt lehetőség, ami alapján a tömegeloszlás időbeli változásának hónapos mintavételezésű vizsgálata végezhető. Bár a hónapos adatmennyiség a nehézségi

erőteret csak durva, több száz km-es felbontásban szolgáltatja, ezek kiválóak nagyobb területek éves periódusú (Kiss-Földváry 2015, 2017b) és hosszú, akár több évtizedes lefolyású (Földváry-Mészáros 2009, Földváry 2012, Földváry et al. 2015, Kiss-Földváry 2017a) tömegátrendeződéssel járó folyamatainak elemzésére és követésére. A GRACE-FO célja a GRACE által megkezdett hónapos idősor folytatása volt, amely (egyéves megszakítással ugyan) lehetővé teszi a vizsgált geofizikai és geodinamikai folyamatok folytatólagos követését (Földváry 2019).

Korábbi tanulmányunkban (Földváry 2007) a GRACE tényleges pontosságát hasonlítottuk össze a tervezés során megfogalmazott elvárásokkal; jelen tanulmányunk ugyanennek szellemében a GRACE és a GRACE-FO pontossági kérdéseit elemzi.

## 2. GRACE-FO

A GRACE műholdak 2017 novemberében befejezték működésüket, az utolsó méréseik alapján levezetett hónapos nehézségi erőter-modell 2017 júniusára esik, ezzel összesen 163 hónapos modellt szolgáltatva a 2002 áprilisától számított bő 15 évre. A NASA 2018. május 22-én állította pályára a GRACE utódját, a GRACE-FO-műholdpárt, melyet a GRACE-szel teljesen megegyező elrendezésben és



1. ábra. A GRACE-FO mérési alapelve (Földváry 2004)

technikai megoldásokkal alakítottak ki (1. ábra), csupán a műholdak közötti távolságmérés pontosságán javítottak egy nagyságrendnyit (Flechtner et al. 2016). Ennek értelmében a GRACE-FO-műholdak 220±50 km-re elszakadva egymástól járják be ugyanazt az 500 km névleges magasságú, közel kör alakú és közel poláris pályát. A keringés során egyrészt a műholdak között mikrohullámú távolságváltozás-mérést végeznek, másrészt a nem gravitációs eredetű erőhatások meghatározása céljából az egyes műholdak tömegközéppontjában egy nagy pontosságú hőmérséklet-szabályozott elektrosztatikus gyorsulásmérő üzemel. Ezen kívül a műholdak pályájának folyamatos meghatározására GPS-vevőket, továbbá az egyes műholdak tájolásának követésére pedig hármas csillagkamerákat használnak (Yuan 2019).

### 3. Hónapos nehézségierőtér-modellek

A GRACE 2002 áprilisától 2017 júniusáig hónapos nehézségierőtér-modelleket szolgáltatott, amely idősort a GRACE-FO-modellek 2018 júniusától folytattak (lásd 1. táblázat). Mint minden, ami mérésen alapszik, a GRACE-műholdpár esetében is voltak olyan időszakok, amikor nem volt kellő mennyiségű vagy minőségű mérés ahhoz, hogy hónapos nehézségierőtér-modellt lehessen előállítani. De más esetekben sem mindig

álltak rendelkezésre a teljes időszakra pontos mérések, így ezek a hónapos modellek névlegesen tekinthetők hónaposnak, számos alkalommal a felhasználható mérések alapján módosítani kellett a feldolgozási időszak hosszát és/vagy időzítését. Esetenként a modell előállításához felhasznált napok a névleges 30 helyett kevesebb vagy több napra vonatkoznak (szélső esetei ennek a 13 nap és a 41 nap), számos esetben pedig a vonatkoztatási hónap a felhasznált adatok alapján valójában kicsit korábbi vagy kicsit későbbi adatokat használ fel (de akár fél hónapos eltolásra is találunk példát). Összességében

így is a GRACE utáni és a GRACE-FO előtti szűk év tömegátrendeződéseire vonatkozóan nem áll rendelkezésünkre mérés, így az idősor egyrészt nem tekinthető folytonosnak, másrészt az eltérő műholdpár miatt nem tekinthető egységesnek.

A GRACE és a GRACE-FO hónapos nehézségierőtér-modellek olyan területi eloszlású adatokon alapszanak, amelyek alapján a földfelszínen mintegy 330 km-es felbontással lehet reálisan a nehézségi erőter formáit beazonosítani (Cooley-Landerer 2019). A GRACE és a GRACE-FO hónapos nehézségierőtér-modelleket (gömbfüggvény-együtthatókat) az ennek megfelelő  $l_{max} = 60$  fokig és rendig határozzák meg, de a fejlesztők a felhasználók rendelkezésére bocsátanak részletesebb, mintegy 200 km-es felbontásnak megfelelő  $l_{max} = 96$  fokig és rendig terjedő modelleket is; ez utóbbi csak egyéb mérések bevonásával állítható elő.

Az idők folyamán a nyers mérések feldolgozási folyamatát finomítják a fejlesztők, ilyenkor visszamenőleg is feldolgozzák a korábbi méréseket, és az abból nyert nehézségierőtér-modelleket nyilvánossá teszik, úgymond „kiadják”. Az egyes feldolgozási módszerekkel előállított nehézségierőtér-modelleket egyértelműen megkülönböztetendő, azokat egy kiadási azonosítóval jelölik meg.

1. táblázat. GRACE és GRACE-FO hónapos nehézségierőtér-modellek.

	Jan	Feb	Már	Ápr	Máj	Jún	Júl	Aug	Szep	Okt	Nov	Dec
2002				X	X			X	X	X	X	X
2003	X	X	X	X	X		X	X	X	X	X	X
2004	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
2005	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
2006	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
2007	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
2008	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
2009	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
2010	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
2011		X	X	X		X	X	X	X	X	X	X
2012	X	X	X	X		X	X	X	X		X	X
2013	X	X		X	X	X	X			X	X	X
2014	X		X	X	X	X		X	X	X	X	
2015	X	X	X	X	X		X	X	X			X
2016	X	X	X		X	X	X	X			X	X
2017	X		X	X	X	X						
2018						X	X			X	X	X
2019	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
2020	X	X	X									

A jelen tanulmányban használt GRACE- és GRACE-FO-modellek mind-egyike a 6. kiadás, azaz Release06 (vagy röviden RL06) modellek voltak.

#### 4. GRACE- és GRACE-FO-modellek becsült középphibái

A nehézségi erőter egyes megnyilvánulásainak, így a geoidundulációnak a leírására a felsőgeodéziai gyakorlatban is a gömbfüggvénysor szolgál, ami a különböző hullámhosszú geoidformák (tehát különböző földrajzi kiterjedésű jelenségek) összegként adja meg a geoid alakját (Biró et al. 2013). A gömbfüggvények ortonormális bázist alkotnak, ami azt jelenti, hogy módunkban áll a különböző kiterjedésű formákat egymástól függetlenül vizsgálni (elméletben, de a gyakorlatban azonban az egyes hullámhosszak nem teljesen függetlenek, a nehézségi erőter-modell meghatározása során „átszivárognak”).

Alapvetően azonban a gömbfüggvénysor egyes fokai a nehézségi erőter különböző kiterjedésű formáit írják le, így különböző felbontás mellett látható részleteket jellemeznek. Az egyes felbontások mellett a nehézségi erőter-modell pontossága eltérő: míg a nehézségi erőter durvább formáit pontosabban, addig a finom részleteit pontatlanabban ismerjük (különösen műholdas mérések alapján). A felbontás szerinti pontossági modellezést Jekeli-Rapp (1980) tanulmánya szerint, a nehézségi erőter-modell spektrumának az ún. fokvarianciája segítségével végeztük. Megkülönböztetünk jel-fokvarianciát (ez esetben a nehézségi erőter formáit leíró gömbfüggvény-együtthatók alapján számoljuk a fokvarianciát),

$$\sigma_l = \sqrt{\sum_{m=2}^l \bar{C}_{lm}^2 + \bar{S}_{lm}^2}$$

és a hiba-fokvarianciát (amely esetben a gömbfüggvény-együtthatók középphibáinak állítjuk elő a fokvarianciáját).

$$\varepsilon_l = \sqrt{\sum_{m=2}^l \delta \bar{C}_{lm}^2 + \delta \bar{S}_{lm}^2}$$

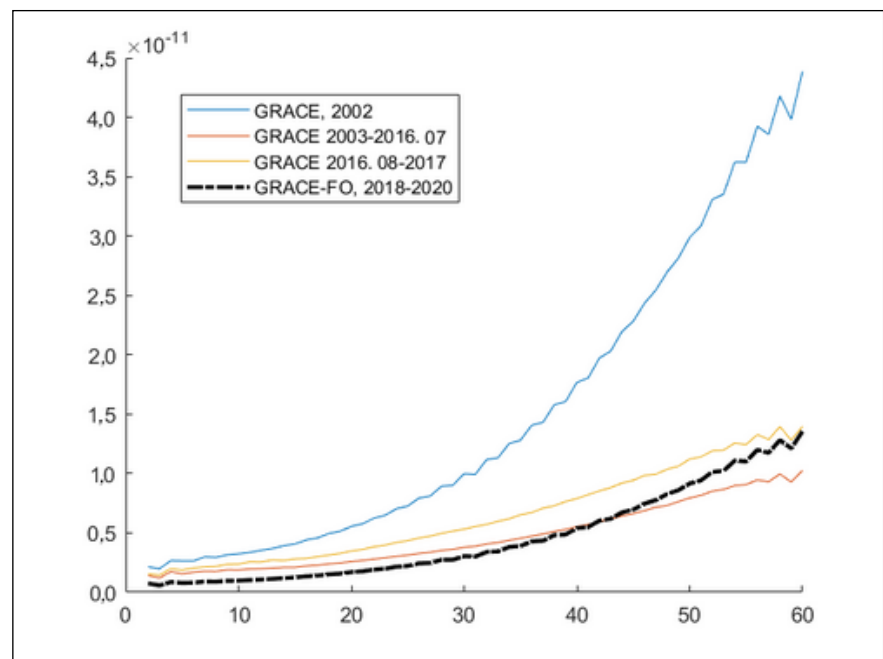
A jel-fokvariancia,  $\sigma_l$ , a nehézségi erőter fokonkénti (tehát különböző

felbontású komponenseinek) nagyságát írja le, míg a hiba-fokvariancia,  $\varepsilon_l$ , ezek középphibáit. Az egyenletben  $\bar{C}_{lm}$  és  $\bar{S}_{lm}$  a gömbfüggvény-együtthatók,  $\delta \bar{C}_{lm}$  és  $\delta \bar{S}_{lm}$  pedig ezek a *posteriori* középphibái.

Jelen tanulmányban a hónapos GRACE- és GRACE-FO-modellek hiba-fokvarianciáit vizsgáltuk, ehhez az 1. táblázatban összegzett GRACE- és GRACE-FO-modelleket használtuk fel. A GRACE-modellek középphibáit vizsgálva megállapítható, hogy az első év (2002) mérései pontatlanabbak a későbbi időszak méréseitől, mivel ez a periódus a műszerek fedélzeti kalibrációnak kezdeti pontatlanságaival terhelt. A GRACE küldetésének végéhez közeledve, 2016 augusztusának elején a GRACE-B-műholdnak tönkrement a fedélzeti gyorsulásmérője, így a feldolgozás során a GRACE-B-mérések helyett a GRACE-A-műhold mérései alapján becsült értékeket használták. Azonban ez a megoldás pontosságát tekintve nem tudja pótolni a kimaradt méréseket, ami az erre az időszakra számolt modellek kisebb megbízhatóságán is meglátszik. A GRACE-modellek időben változó megbízhatósága alapján három időszakra bontottuk a hiba-fokvariancia meghatározását: (1) 2002 áprilisa és 2002 decembere között, (2) 2003 januárja és 2016 júliusa között, (3) 2016

augusztusa és 2017 júniusa között. Ezen három időszakra, valamint a GRACE-FO eddigi hónapjaira számolt hiba-fokvariancia görbéit mutatja a 2. ábra. Tekintettel arra, hogy az egyes időszakokban sem ugyanolyan pontosak a modellek, valamennyi időszakra egy-egy tipikusnak mondható hónapot választottunk ki.

A hiba-fokvariancia a fok szerint emelkedik, ami azt mutatja, hogy a nehézségi erőter formáit durva felbontásban (kis fokszámok) nagy pontossággal, finom felbontásban (magas fokszámok) kisebb pontossággal tudjuk meghatározni. Valamennyi fokon a leggyengébbnek a GRACE 2002 évi modelljei bizonyulnak, a GRACE a „fénykorában”, 2003 és 2016 júliusa között volt a legjobb. Összevetve, a GRACE-FO eddigi modelljei a nagyobb formák tekintetében (mintegy 40 fokig és rendig, tehát 500 km-es felbontásig) felülműlják a GRACE-t, a magasabb fokoknál azonban a GRACE pontosabb volt. Figyelembe véve, hogy a nehézségi erőter durvább felbontású formái adják a nehézségi térerősség jelentős részét, így az egyes komponenseket összeadva azt tapasztaljuk, hogy a GRACE-FO pontosságát tekintve felülmúlja a GRACE-t, csak az apróbb részleteket nem tudja annyira precízen meghatározni.



2. ábra. GRACE és GRACE-FO modellek hiba-fokvarianciája; x-tengely: fok, y-tengely: hiba-fokvariancia (mindkettő mértékegység nélküli mennyiség).



Mindez persze csak a GRACE-FO eddigi modelljeire vonatkozik (2018 októberétől 2020 márciusáig). Figyelembe véve, hogy a GRACE milyen megbízhatóságot nyújtott az első időszakában, várhatóan a GRACE-FO is áttesik azokon finomításokon, amelyekkel ez a pontosság tovább javulhat.

### 5. Tömegátrendeződések vizsgálata GRACE- és GRACE-FO-modellek alapján

A GRACE és a GRACE-FO nehézségi erőter modelleiből Kiss-Földváry (2015) módszere alapján – a tömegváltozás szempontjából érdekes helyeken – nehézségianomália-idősorot számoltunk. Ezeknek a GRACE időszakára vonatkozó részét Földváry (2019) vizsgálta, amelyet most a GRACE-FO nehézségi anomáliáival egészítünk ki. A 3. ábra a vizsgálati helyeket, míg a 2. táblázat a vizsgálati pontok jellemzőit összegzi.

A vizsgált helyek mindegyike olyan, ahol a nehézségi anomália időbeli változása jelentős tömeggyarapodásra vagy tömegpusztulásra utal.

A nehézségianomália-idősorokat a 4. ábra a)–f) részei

mutatják. Az ábrákon bejelöltük a GRACE vége és a GRACE-FO eleje időpontokat (folytonos függőleges vonal) és a GRACE különböző megbízhatóságúként ismert időszakait is (szaggatott függőleges vonal).

A vizsgált helyek mindegyike alapján elmondható, hogy az utolsó három-négy GRACE-modell „kivág”, tehát olyan nehézségianomália-változást mutatnak, amelyet a későbbi GRACE-FO-modellek nem támasztanak alá.

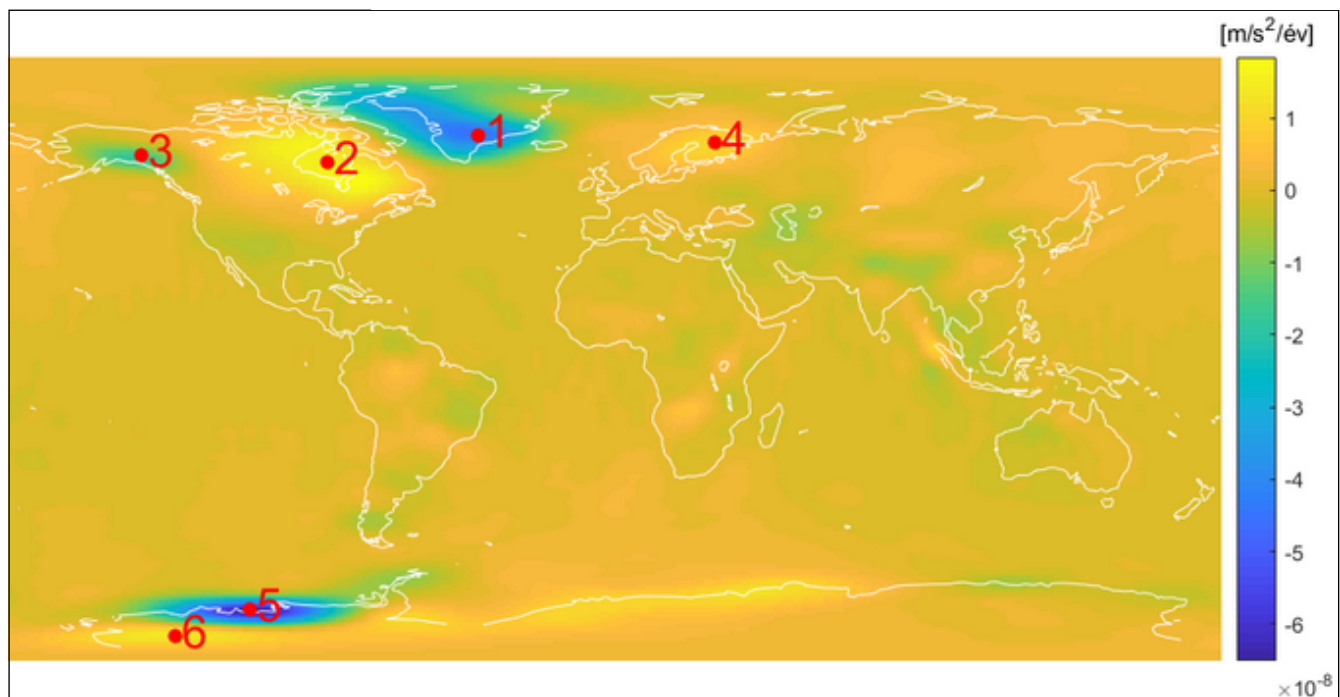
A grönlandi idősor (4. ábra a) része) a jégtakaró olvadását mutatja. A GRACE-mérések 2015 végén az olvadási folyamat megtorpanását mutatják, a GRACE-FO azonban jelzi, hogy ez a megtorpanás csak időszakos volt. Hasonlóan olvadási folyamatot látunk Alaszkában (4. ábra c) része), még ha ennek üteme jóval lassabb is. Bár a GRACE-FO 2019 év végi (novemberi és decemberi) modelljei a vártnál

valamivel alacsonyabb értékeket mutatnak, a 2020-as modellek jelzik, hogy az olvadás tendenciája valójában nem változott, mértéke a korábbiaknak megfelelő.

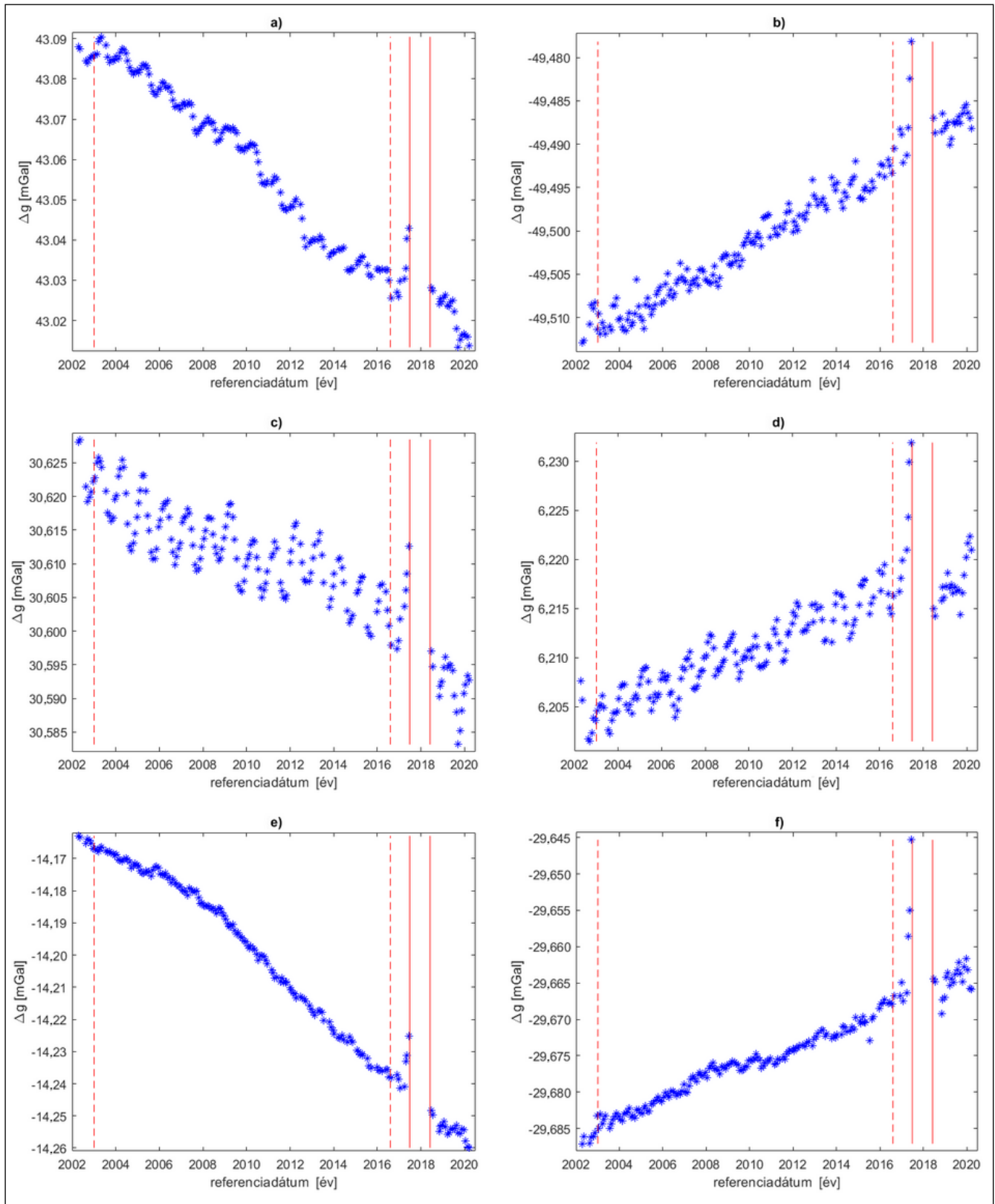
A Hudson-öböl (4. ábra c) része) és Skandinávia (4. ábra d) része) egyaránt a GIA- és PGR-folyamatok határait tükrözi. A GIA (Global Isostatic Adjustment) a jégtakaró változásának jelenlegi folyamatai következtében a földkéreg jelenlegi kiegyenlítődési folyamatát írja le, míg a PGR (Post-Glacial Rebound) a legutóbbi jégkorszak során eltűnt hatalmas jégtakaró megszűnése következtében kialakuló késleltetett kiegyenlítődési folyamat, amely a földkéreg hosszú távú, elnyúló, nagyon lassú felúszását jellemzi. A Hudson-öböl és Skandinávia ezeknek a klasszikus, jól ismert példái. A PGR változására rövid távon nem számíthatunk, és a Hudson-öböl esetében a

2. táblázat: A vizsgált pontok és ezekben a tömegváltozás lineáris trendjének jellege

Sorszám	Földrajzi név	$\phi$ [°]	$\lambda$ [°]	Domináns jelenség
1	Grönland	68	-40	csökkenő trend
2	Hudson-öböl	60	-85	növekvő trend
3	Alaszkai-hegység	62	-140	csökkenő trend
4	Skandinávia	66	30	növekvő trend
5	Amundsen-tenger (Antarktisz)	-74	-108	csökkenő trend
6	Marie Byrd-föld (Antarktisz)	-82	-130	növekvő trend



3. ábra. A lineáris trend szempontjából érdekes tömegváltozások (forrás: Földváry 2019)



4. ábra. Nehézségianomália-idősorok a vizsgálati helyeken

a) Grönland, b) Hudson-öböl, c) Alaszkai-hegység, d) Skandinávia, e) Amundszen-tenger (Antarktis), f) Marie Byrd-föld (Antarktis)

GRACE-FO az elvárásoknak megfelelő folyamatot mutat. Skandinávia esetében azonban a  $\Delta g$  idősorban egy pár  $\mu\text{Gal}$ -os ugrás észlelhető, de a trend változatlan. A 4. ábra d) részén

ábrázolt változás magyarázatára két lehetőséget látunk. Az egyik szerint ez a változás csak látszólagos, és a GRACE-FO újabb modelljei a PGR ismert folyamatának állandóságát

megerősítik és a mostani eredményeket pedig apróbb kilengésnek minősítik. A másik lehetőség, hogy a Skandináv permafrosztnek (évenként keresztül fagyott állapotban

lévő talaj) a globális éghajlatváltozás következtében meginduló olvadása olyan ütemű, hogy az a PGR trendjére rakódva látható mértékű tömegváltozást eredményez, így bár a PGR folyamat változatlan, a permafroszt olvadása okozta tömegvesztés is megjelenik az idősorban. A skandináv permafroszt olvadásáról már bő egy évtizede írnak (Åkerman–Johansson 2008, Lyon et al. 2009), és napjainkban a folyamat felgyorsulásáról tudósít a közmédia (Welch 2019).

Az utolsó két ábrán (4. ábra e) és f) része) egy antarktiszi gyarapodó és egy olvadó helyet mutat. Bár két pontbeli folyamatból a teljes kontinensre nem lehet következtetéseket levonni, ebben a két pontban a folyamat jellege mindkét esetben változatlan, ami arra utal, hogy az antarktiszi jégtakaró jóval stabilabb, mint az Arktisz (lásd pl. a grönlandi ponton tapasztalható 4. ábra a) része szerinti egyértelmű olvadási folyamatot). A jól ismert nyugat-antarktiszi olvadás tovább folyik (4. ábra e) része), de ennek üteme nem tűnik gyorsulónak, míg a jéggyarapodás a Marie Byrd-földön (4. ábra f) része) is stagnálni látszik. Az egyetlen felmelegedésre utaló folyamat az, hogy a nyári évszakhoz képest (ami az Antarktis esetében októbertől februárig tart, és decemberben van a legmelegebb) pár hónapos késleltetéssel, a decembertől márciusig terjedő időszakban mind 2019 elején, mind 2020 elején kisebb visszaesés tapasztalható a  $\Delta g$  idősorában (lásd a 4. ábra f) részét), ami a korábbi években nem volt jellemző. A folyamatok tisztázása azonban az egész kontinensre kiterjedő vizsgálatot igényel.

### Irodalom

- Åkerman, H. J. – Johansson, M. 2008. Thawing Permafrost and Thicker Active Layers in Sub-Arctic Sweden. *Permafrost and Periglacial Processes*, 19, pp. 279–292. DOI [10.1002/ppp.626](https://doi.org/10.1002/ppp.626)
- Bettadpur, S. 2018. Gravity Recovery and Climate Experiment Level-2 Gravity

- Field Product User Handbook. Center for Space Research at The University of Texas at Austin. [https://podaac-tools.jpl.nasa.gov/drive/files/allData/grace/docs/L2-UserHandbook\\_v4.0.pdf](https://podaac-tools.jpl.nasa.gov/drive/files/allData/grace/docs/L2-UserHandbook_v4.0.pdf), utolsó elérés: 2020. június 9.
- Biró, P. – Ádám, J. – Völgyesi, L. – Tóth, Gy. 2013. A felsőgeodézia elmélete és gyakorlata. HM Zrínyi Térképészeti és Kommunikációs Szolgáltató Nonprofit Kft. Kiadó, Budapest. ISBN 978-963-257-248-2, p. 508
- Cooley, S. S. – Landerer, F. W. 2019. GRACE-FO Level-3 Data Product User Handbook. Jet Propulsion Laboratory, JPL D-103133. [https://podaac-tools.jpl.nasa.gov/drive/files/allData/gracefo/docs/GRACE-FO\\_L3\\_Handbook\\_JPL-D-103133\\_20190327.pdf](https://podaac-tools.jpl.nasa.gov/drive/files/allData/gracefo/docs/GRACE-FO_L3_Handbook_JPL-D-103133_20190327.pdf), utolsó elérés: 2020. június 9.
- Dobszay, T. – Estók, J. – Gyáni, G. – Patkós, A. (szerk.) 2019. Eötvös Loránd emlékalbum. Budapest, Kossuth Kiadó, ISBN 978-963-09-9927-4, p. 176
- Flechtner, F. – Neumayer, K. H. – Dahle, Ch. – Döbbslaw, H. – Fagiolini, E. – Raimondo, J. C. – Güntner, A. 2016. What Can be Expected from the GRACE-FO Laser Ranging Interferometer for Earth Science Applications? *Surveys in Geophysics*, 37, pp. 453–470. DOI: [10.1007/s10712-015-9338-y](https://doi.org/10.1007/s10712-015-9338-y)
- Földváry, L. 2004. A gravimetriai műholdak korszaka. *Magyar Geofizika*, 45. évf. 4 sz. pp. 118–124.
- Földváry, L. 2007. Az évszakos nehézségi erőter változások GRACE műholdas meghatározásának pontossági kérdései. *Geodézia és Kartográfia*, 59. évf. 8–9. sz. pp. 40–46.
- Földváry, L. 2012. Mass-Change Acceleration in Antarctica from GRACE Monthly Gravity Field Solutions. In *Geodesy for Planet Earth, Proceedings of IAG Symposium in Buenos Aires, IAG Symposia*, 131, pp. 591–597. DOI: [10.1007/978-3-642-20338-1\\_72](https://doi.org/10.1007/978-3-642-20338-1_72)
- Földváry, L. 2019. GRACE hónapos nehézségi erőterváltozások elemzése és előrejelzése ARIMA modellezzel. *Geomatikai Közlemények*, XXII. évf. pp. 7–27.
- Földváry, L. – Kiss, A. – Su, Z. X. – Wang, G. C. – Wang, L. 2015. Accuracy investigations of GRACE-borne ice mass variations in Antarctica. *Earth Science Frontiers*, 22(4), pp. 239–246. DOI: [10.13745/j.esf.2015.04.024](https://doi.org/10.13745/j.esf.2015.04.024)
- Földváry, L. – Kiss, J. – Szarka, L. – Szűcs, E. – Timár, G. – Wessztergom, V. 2019. Modern geodéziai-geofizikai eredmények Eötvös nyomán. In Dobszay, T. – Estók, J. – Gyáni, G. – Patkós, A. (szerk.) *Eötvös Loránd emlékalbum*, Budapest, Kossuth Kiadó, pp. 67–75.
- Földváry, L. – Mészáros, P. 2009. Az Antarktiszi tömegátrendeződéseinek vizsgálata GRACE geopotenciális modellek alapján. *Geomatikai Közlemények*, XII. évf. pp. 109–118.
- Földváry, L. – Tóth, Gy. – Kiss, A. – Kemény M. 2015. GOCE műhold: Eötvös-inga mérések Föld körüli pályán. *Magyar Tudomány*, 176. évf. 2015/9 sz. pp. 1063–1070.

- Jekeli, Ch. – Rapp, R. H. 1980. Accuracy of the determination of mean anomalies and mean geoid undulations from a satellite gravity field mapping mission. Report No. 307, Dept. of Geodetic Science and Surveying, The Ohio State University, Columbus
- Kiss, A. – Földváry, L. 2015. Éves hidrológiai változások meghatározása GRACE geopotenciális modellek segítségével. *Geomatikai Közlemények*, XVIII. évf. 2. sz. pp. 43–52.
- Kiss, A. – Földváry, L. 2017a. Uncertainty of GRACE-borne long periodic and secular ice mass variations in Antarctica. *Acta Geodaetica et Geophysica*, 52(4), pp. 497–510. DOI: [10.1007/S40328-016-0185-1](https://doi.org/10.1007/S40328-016-0185-1)
- Kiss, A. – Földváry, L. 2017b. Seasonal hydrologic variations in the La Plata basin from GRACE gravity field models. *Acta Geodynamica et Geomaterialia*, 14(2), pp. 145–152. DOI: [10.13168/AGG.2016.0035](https://doi.org/10.13168/AGG.2016.0035)
- Lyon, S. W. – Destouni, G. – Giesler, R. – Humborg, C. – Mörtch, M. – Seibert, J. – Karlsson, J. – Troch, P. A. 2009. Estimation of Permafrost Thawing Rates in a Sub-Arctic Catchment Using Recession Flow Analysis. *Hydrology and Earth System Sciences*, 13(1), pp. 595–604. DOI: [10.5194/hessd-6-63-2009](https://doi.org/10.5194/hessd-6-63-2009)
- Welch, C. 2019. Arctic permafrost is thawing fast. That affects us all. *National Geographic*, September 2019 issue <https://www.nationalgeographic.com/environment/2019/08/arctic-permafrost-is-thawing-it-could-speed-up-climate-change-feature/>, utolsó elérés: 2020. június 9.
- Yuan, D. N. 2019. GRACE Follow-On Level-2 Gravity Field Product User Handbook. Jet Propulsion Laboratory, JPL D-103922. [https://podaac-tools.jpl.nasa.gov/drive/files/allData/gracefo/docs/GRACE-FO\\_L2-UserHandbook\\_v1.0.pdf](https://podaac-tools.jpl.nasa.gov/drive/files/allData/gracefo/docs/GRACE-FO_L2-UserHandbook_v1.0.pdf), utolsó elérés: 2020. június 9.



**Dr. Földváry Lóránt**  
*egyetemi docens*

Óbudai Egyetem, Geoinformatikai Intézet,  
CSFK Geodéziai és Geofizikai Intézet  
foldvary.lorant@amk.uni-obuda.hu



**Nyilas Annamária**  
*tudományos segédmunkatárs*

BME Általános- és Felsőgeodézia Tanszék  
kiss.annamaria@epito.bme.hu