

# MAGYAR GEOFIZIKA

HUNGARIAN GEOPHYSICS

A MAGYAR  
GEOFIZIKUSOK  
EGYESÜLETÉNEK  
FOLYÓIRATA



JOURNAL OF THE  
ASSOCIATION  
OF HUNGARIAN  
GEOPHYSICISTS

2019 – Eötvös Loránd halálának százéves évfordulójára emlékezünk  
A Szerkesztőség köszönete

Meghívó Dobogókőre, az Eötvös Loránd-megemlékezésre  
10th Congress of Balkan Geophysical Society,  
18–22 September 2019, Albena Resort, Bulgaria

Eötvös ingájának megalkotásával megszületett a kőolajkutató geofizika  
Előkészületek az Eötvös-kísérlet újramérésére

Geodinamika a Kárpát-Pannon régióban

A szovjet katonai bázisok területének környezetvédelmi felmérése, 1990–1992

In Memoriam:

Nagy Zoltán      Zsille Antal





# MAGYAR GEOFIZIKA

## HUNGARIAN GEOPHYSICS

59. évfolyam (2018) 4. szám



A MAGYAR GEOFIZIKUSOK EGYESÜLETÉNEK FOLYÓIRATA  
JOURNAL OF THE ASSOCIATION OF HUNGARIAN GEOPHYSICISTS

### TARTALOM • CONTENTS

#### SZERKESZTŐSÉGI ROVAT • EDITORIAL

- 157 2019 – Eötvös Loránd halálának százéves évfordulójára emlékezünk (2019 – Remembering the centenary of Eötvös' death) – *Bodoky T.*
- 158 A Szerkesztőség köszönete (Acknowledgments) – *Szerkesztőség*

#### MGE HÍREK • NEWS OF ASSOCIATION OF HUNGARIAN GEOPHYSICISTS

- 159 Meghívó Dobogókőre, az Eötvös Loránd-megemlékezésre (Invitation to Dobogókő, commemorating Roland Eötvös) – *Szerkesztőség*
- 160 10th Congress of Balkan Geophysical Society, 18–22 September 2019, Albena Resort, Bulgaria

#### TANULMÁNYOK • PAPERS

- 161 Eötvös ingájának megalkotásával megszületett a kőolajkutató geofizika (Eötvös' torsion balance initiated the oil exploration geophysics) – *Szabó Z.*
- 165 Előkészületek az Eötvös-kísérlet újramérésére (Preparations for the remeasurement of the Eötvös experiment) – *Völgyesi L., Szondy Gy., Tóth Gy., Péter G., Kiss B., Deák L., Égető Cs., Fenyvesi E., Gróf Gy., Ván P.*
- 180 Geodinamika a Kárpát-Pannon régióban (Geodynamics in the Carpathian-Pannonian Region) – *Kiss J., Zilahi-Sebess L.*
- 197 A szovjet katonai bázisok területének környezetvédelmi felmérése, 1990–1992 (Environmental investigation of the Soviet military bases in Hungary, 1990–1992) – *Nemesi L.*

#### IN MEMORIAM

- 204 Nagy Zoltán – *Vida Zs.*
- 205 Zsille Antal – *Szerkesztőség*

# MAGYAR GEOFIZIKA

## HUNGARIAN GEOPHYSICS

59. évfolyam (2018) 4. szám

A MAGYAR GEOFIZIKUSOK EGYESÜLETÉNEK FOLYÓIRATA  
JOURNAL OF THE ASSOCIATION OF HUNGARIAN GEOPHYSICISTS

*Főszerkesztő • Editor-in-Chief*

DR. BODOKY TAMÁS

E-mail: mageofedit@gmail.com

*Szerkesztőbizottság • Editorial Board*

DR. BARÁTH ISTVÁN, DR. GALSA ATTILA

DR. PETHŐ GÁBOR, DR. SZABÓ NORBERT PÉTER

*Technikai szerkesztő • Technical Editor*

HOCK GÁBOR

E-mail: mageoftechn@gmail.com



Lapunk megjelenését a Magyar Olaj- és Gázipari Nyilvánosan Működő Részvénytársaság támogatja

---

A szerkesztőség a szakcikkeket (tanulmányokat) szaklektorálás után közli. A szaklektorok névsorát az évváró számban tesszük közzé. A lapban megjelenő cikkek adatainak és állításainak helyességért, ill. közölhetőségéért kizárólag a szerzők tartoznak felelősséggel.

---

Kiadja a Magyar Geofizikusok Egyesülete  
A kiadásért felel: Magyar Balázs

Készült: Starkiss Kft., 2040 Budaörs, Kisfaludy utca 40.  
Felelős vezető: Kiss Sándor üv. igazgató

Szerkesztőség: 1145 Budapest, Columbus u. 17–23.  
Telefon/Fax: (1) 201-9815  
Titkársági e-mail: postmaster@mageof.t-online.hu  
Honlap: www.mageof.hu

Előfizethető a Magyar Geofizikusok Egyesületénél  
(1371 Budapest, Pf. 433, Telefon/Fax: (1) 201-9815)  
egyesületi tagoknak tagdíj ellenében  
Megjelenik évente négyszer

Borító, tipográfia és nyomdai előkészítés:  
EP Systema Bt., Budapest

INDEX: 26 507  
HU ISSN 0025-0120



2019

## Eötvös Loránd halálának százéves évfordulójára emlékezünk

1EÖTVÖS

www.eotvos100.hu

Vásárosnaményi báró Eötvös Loránd, a nagy magyar fizikus, aki Albert Einstein szerint „a klasszikus fizika egyik fejedelme” volt, száz éve, 1919. április 8-án halt meg a budapesti egyetem egykori Fizikai Intézetének épületében.

Fizikusként is a XIX–XX. század fordulójának kiemelkedő tudósai közé tartozott, ám világgazdasági szerepe a nyersanyagkutató geofizika megteremtésével egyedülálló. Az ő munkásságához köthető az ipari jelleggel is végezhető kőolajkutatás elindítása és így a világ máig is tartó „kőolaj korszakának” kezdete.

Rá emlékezve az UNESCO 2019-et Eötvös Loránd-emlékévének nyilvánította, és a Magyar Tudományos Akadémia, amelynek egykor tagja és elnöke is volt, ünnepi megemlékezések sorát tervezi az év folyamán.

Az első megemlékezésen, az Akadémia épületében rendezett január 14-i tudományos ülészen Eötvös Loránd-emlékévének nyilvánította, és a Magyar Tudományos Akadémia, amelynek egykor tagja és elnöke is volt, ünnepi megemlékezések sorát tervezi az év folyamán.

a geofizikusról, Eötvös Lorándról, a Magyar Tudományos Akadémia elnökéről, Eötvös Lorándról, a budapesti Pázmány Péter Tudományegyetem rektoráról, Eötvös Lorándról, a kultuszminiszterről és Eötvös Lorándról, a sportemberről. Eötvös Lorándról, a fotográfusról ugyan előadás nem hangzott el, de az ülészen Eötvös Lorándról, a budapesti Pázmány Péter Tudományegyetem rektoráról, Eötvös Lorándról, a kultuszminiszterről és Eötvös Lorándról, a sportemberről.

Eötvös Lorándról, a fotográfusról ugyan előadás nem hangzott el, de az ülészen Eötvös Lorándról, a budapesti Pázmány Péter Tudományegyetem rektoráról, Eötvös Lorándról, a kultuszminiszterről és Eötvös Lorándról, a sportemberről.

Bár Eötvös Loránd egykori intézetét, az Eötvös Loránd Geofizikai Intézetet az évfordulóra a kormányzat felszámolta, az Intézet által az Eötvös-hagyatékból berendezett Eötvös Loránd Emlékiállítás még megvan. Megtekinthetők itt a nagy tudós személyes iratai, laboratóriumának eredeti eszközei és a világhírré tett Eötvös Loránd teljes sorozata.

Rójuk le tiszteletünket a nagy tudós előtt Emlékiállításának meglátogatásával és az Eötvös Loránd-emlékévé rendezvényein való részvételünkkel!



*Bodoky Tamás*

## A Szerkesztőség köszönete

A *Magyar Geofizika* szerkesztősége köszönetét fejezi ki a lap olvasóinak nevében is azoknak, akik a lap szerkesztésében, illetve színvonalának megőrzésében, javításában az elmúlt 2018. évben közreműködtek.

A hírek, beszámolók szerzőinek nevét mindig közöljük írásuk végén, így ezt nem ismétljük meg itt, de a köszönet természetesen nekik is szól.

Név szerint is szeretnénk megemlíteni itt azokat, akiknek a neve máshol nem jelent meg.

Köszönet a szakcikkek lektorainak! Ezt a sokszor sok vesződséggel járó munkát az elmúlt évben következő kollégáink vállalták:

*Baráth István, Bodoky Tamás, Erdős Zoltán, Galsa Attila, Kiss János, Kovács Péter, Piller Imre, Prácser Ernő, Prónay*

*Zsolt, Szabó Zoltán, Takács Ernő, Timár Gábor, Verő László, Völgyesi Lajos*

Köszönet a hátlapon közölt képek beküldőinek! Köszönjük, hogy kérésünkre vették a fáradságot, hogy sok év-tizeddel ezelőtti fényképeket keressenek elő és juttassák el hozzánk. A képeket következő kollégáinktól kaptunk:

*Bodoky Tamás, Deres János, Kakas Kristóf<sup>r</sup>, Kis Károly, Rezsény Géza, Rezsabek Nándor, Szabó Norbert, Vida Zsolt*

Végül, de nem utolsó sorban, köszönjük *Hock Gábor* technikai szerkesztőnek a lap igényes külsejét és a szerkesztés magas minőségét, illetve *Petró Erzsébet*nek a lappal járó adminisztráció gördülékeny intézését!

*Szerkesztőség*

## MEGHÍVÓ

**A Magyar Turista Egyesület tisztelettel meghívja Önt  
a báró Eötvös Loránd Menedékházba, Dobogókőre**



### A megemlékezés programja:

- 7:30-kor emléktúra indul Dömösről, a Téry úton (8 km/600 m), várható érkezés 10:45
- 11:00: Schönviszky László, az MTE elnöke és az egykori Magyar Állami Eötvös Loránd Geofizikai Intézet (ELGI) nyugalmazott tudományos főmunkatársa megnyitja
- 11:15: Kis Domokos Dániel PhD, tudományos kutató (Országos Széchényi Könyvtár): „A természet-szerető Eötvös Loránd” címmel tart előadást
- 11:35: Papp János színművész, az MTE tagja Eötvös Loránd verset szaval
- 11:40: Perneczky László dr., az egykori Atomenergiái Kutató Intézet (AEKI) nyugalmazott tudományos munkatársa: „Eötvös Loránd, a fotográfus nyomában, a Dolomitokban” címmel tart előadást
- 12:05: Regály Zsolt (MTA CSFK), Eötvös Loránd által sztereodiáiból digitálisan készített anaglif képeket vetít
- 12:20: Eötvös Loránd-emléktábla leleplezése és koszorúzása a menedékház Thirring-termében
- 12:30: Emlékjelvény vagy kítűző kiosztása a résztvevőknek
- 13:30: Könnyebb túra indul a Rezső-kilátóhoz (1,7 km/20 m szint) és nehezebb túra a Thirring-körútra (2,0 km/100 m szint)

*Kérjük, szíveskedjék jelezni megjelenését!*

*Információ:* Schönviszky László, Tel.: 06-70-319-4812, E-mail: mte.elnok@gmail.com

# 10th Congress of Balkan Geophysical Society

## 18–22 September 2019, Albena Resort, Bulgaria



Dear Colleagues,

We are pleased to invite you to participate in the **10th Congress of the Balkan Geophysical Society (BGS)**, celebrating 25 years since its creation. **The Congress will be held from 18 to 22 September 2019 in Albena Resort, Bulgaria.**

**The main topics of the Congress are:**

- Seismology
- Geophysical methods – theory and applications
- Exploration geophysics
- Engineering geophysics
- Geophysical instruments and softwares

**Each of the selected topics contains subtopics that you can find here:**

[www.bgs2019.org/topics-and-abstract-submission/](http://www.bgs2019.org/topics-and-abstract-submission/)

**We have selected several Special topics:**

- Geophysics of polar regions and high mountains
- Marine geophysics
- Geophysics for cultural and historical heritage
- Geophysics for society

**The registration and abstract submission are already opened ([www.bgs2019.org](http://www.bgs2019.org)). Please consider the deadlines:**

*Early Bird Registration end date:* 20 May 2019

*Call for abstracts closes:* 30 June 2019

The body of the extended abstract needs to be *four (4) full pages* in length, *paper size A4*. Longer or shorter sized abstracts will not be included in the review process and therefore be rejected. Abstracts should be submitted by the platform provided for the Congress from EAGE ([www.bgs2019.org/topics-and-abstract-submission/](http://www.bgs2019.org/topics-and-abstract-submission/))

*Please feel free to forward this message among your colleagues and students.*

On behalf of the Organizing Committee we are looking forward to welcome you to Albena, Bulgaria in September 2019.

Yours sincerely,  
*Christian Tzankov*, Senior Professor Assistant  
President of the Bulgarian Geophysical Society  
Chairman of the Organizing Committee  
<http://www.bgs2019.org/>

*Mira Bonova*  
Event Manager  
Congress Management and Events, Ltd.  
8 Tzar Kaloyan Str., fl. 3, office 19, Sofia 1000, Bulgaria  
Tel.: (+359) 2 9877 422; Mobile: (+359) 896 700 956  
Fax: (+359) 2 988 80 35; E-mail: [mira@cmebg.com](mailto:mira@cmebg.com)  
[www.cmebg.com](http://www.cmebg.com)  
[www.facebook.com/CMEBG](https://www.facebook.com/CMEBG)

# Eötvös ingájának megalkotásával megszületett a kőolajkutató geofizika

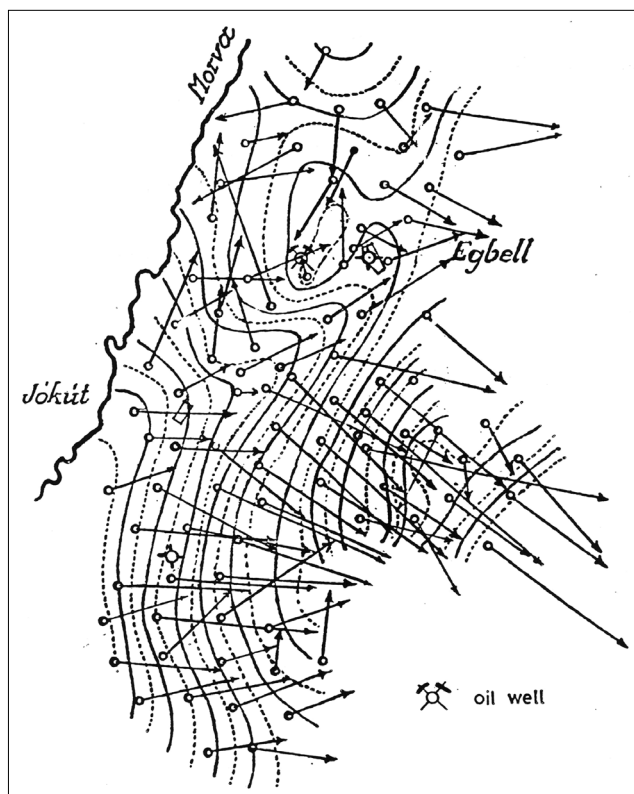
SZABÓ Z.

Eötvös Loránd az 1880-as évek második felében kezdett a gravitációval foglalkozni. A kérdés a földalak pontos meghatározásának igénye kapcsán merült fel. Ez irányú vizsgálata során jutott el a később róla elnevezett torziós inga megalkotásáig. Igen korán felismerte, hogy ingája a földalak vizsgálata mellett alkalmas felszín alatti földtani szerkezetek kimutatására is. A gyakorlati alkalmazás nem késett sokáig. A világon az első mélyfúrás, melyet Eötvös-ingamérések alapján tűztek ki 1913-ban, az erdélyi kőszelvényhez kapcsolódott, melynek sikere után, a kőolajkutató alkalmazás már csak egy lépésre volt.

A történet az Egbell (Gbely, Szlovákia) környéki kőolaj előforduláshoz kapcsolódik. Az egbelli kőolajmező előtörténetéhez tartozik Medlen János Amerikát megjárt földműves esete. Történt ugyanis, hogy János gazda Amerikában megtakarított pénzén földet vásárolt Egbell környékén. Szántáskor furcsa szagra figyelt fel. Amerikában hallott sikertörténetek nyomán megállapította, hogy földgáz szivárog a talajból. Feltételezésének kísérleti ellenőrzése sikerrel járt, a szivárgó gáz lángra lobbant. Praktikus elme lévén, a gázt téglából épített csatornán bevezette a házába, és azzal fűtött és főzött. Az esetnek híre ment a környéken, a hatóság fülébe is eljutott az ingyen fűtőanyag története. Rögvest jelentették a dolgot a feljebbvalóknak, míg nem eljutott a hír a pénzügyminisztériumba is. A továbbiakban már szakmai útra terelődött a dolog: Böckh Hugó, Lázár Vazul és Papp Simon geológusok kivonultak földtani térképezésre, minek eredményeként Egbell környékén egy földalatti boltozat alakja körvonalazódott. A tetején létesített fúrás 1913 végén meglepően kis mélységben, 70–160 m között földgázt, 160–250 m között kőolajat talált.

A későbbi termelőfúrások alapján a boltozat alakja és kiterjedése pontosan körvonalazható volt. Böckh Hugó, a Földtani Intézet későbbi igazgatójának javaslatára – aki már korábban figyelemmel kísérte a terepi torziósinga-méréseket – és a pénzügyminiszter kérésére Eötvös és munkatársai 1916-ban torziósinga-méréseket végeztek a területen. A mérési eredményekről Papp Simon, aki aktív részese volt a terület földtani térképezésének, az alábbiak szerint nyilatkozott: „Földtani és rétegtani eredményeim nem volt szabad közölnöm a geofizikusokkal, csak akkor, amikor munkálataikkal ők is elkészültek. Ekkor kitűnt, hogy a kétféle módszer csaknem azonos szerkezeti eredményeket adott, és ezzel az egész világon először igazolódott be, hogy a nehézségi mérések igenis alkalmasak a szénhidrogéneket tároló szerkezetek kimutatására.”

E mérés bebizonyította az Eötvös-inga alkalmazhatóságát a szénhidrogén-kutatásban, és ezzel megteremtette a kőolajkutató geofizika alapjait.



**1. ábra** | Az egbelli kőolajmező gradiens- és a gradiensekből számított izogamma térképe. Az erős regionális hatás ellenére jól felismerhető a maradékanomáliaként jelentkező antiklinális

## A műszer és a mérési módszer elterjedése a nagyvilágban

A külföld már igen korán felismerte Eötvös új módszerének jelentőségét. Kezdetben főleg a tudós világ, elsősorban a geodéták érdeklődtek a torziós inga iránt. F. R. Helmert, a potsdami Geodéziai Intézet nemzetközileg elismert igazgatója egyenesen a libella mellett a geodézia legegyszerűbb és egyben egyik legfontosabb műszerének tartotta. Még Eötvös életében jöttek Budapestre külföldi, elsősorban egyetemi, szakemberek, hogy megismerkedjenek az új kutatóeszközzel.



Külföldön nyersanyag-kutatási céllal elsőként W. Schweydar alkalmazta a torziós ingát. 1917 elején méréseket végzett Hamburgtól délre, az észak-német síkságon (Nienhagen-Haenigsen környékén). A mérések célja az előző évi egbelli mérések mintájára egy már fúrásokkal feltárt sótömsz körvonalainak pontosítása volt. A kapott eredményekkel meg voltak elégedve, a sötést gradiensek alapján kijelölt határvonalát a később lemélyített fúrások igazolták. Schweydar már igen korán kapcsolatba került Eötvössel, olyannyira, hogy 1910-ben Eötvös útmutatása alapján elkészíteti saját tervezésű, fotografikus észlelésű ingáját, melyhez Eötvöstől kapott torziós szálat. A külföldiek közül Európában ő tette a legtöbbet a torziós inga megismertetése érdekében.

Az I. világháborút követően a motorizáció ugrásszerű fejlődésének következtében, nagymértékben megnőtt a kőolajipari termékek iránti kereslet, ugyanakkor futótűzként terjedt el az Eötvös-inga híre a legfontosabb olajtermelő országokban. A különböző kőolajtársaságok és kutatóvállalatok egyre-másra küldték megbízottjaikat az új kutatómódszer tanulmányozása céljából az Eötvös-intézetbe (ELGI). Az első külföldi kezdeményezők a Royal Dutch Shell és az Anglo-Iranian Csoport voltak. Tudomásunk szerint az olajtársaságok közül ők végezték az első torziós-inga-mérést az egyiptomi Hurgada mezőn 1921 őszén vagy 1922 tavaszán.

Berlinből az Exploration Bodenuntersuchungs und Verwertungs GmbH igazgatója, H. Gornick kereste fel az ELGI-t. J. P. Schumacher holland geológus hosszú ideig tartózkodott Budapesten, majd mint a Torsion Balance Exploration Company (Houston, Texas) igazgatósági tagja az eszközök egész sorát rendelte Magyarországról. Az Anglo-Persian Oil Company, Ltd. (London) J. C. Templetont küldte Budapestre a műszer és módszer tanulmányozására. B. H. Wilsdon, a Punjab Irrigation Research Laboratory (Lahore, India) vezetője hindu asszisztensét, dr. N. K. Bose-t küldte az ELGI-be, aki azután Indiában végzett méréseket. A Companhia de Petroleo de Angola (Luanda) az afrikai portugál gyarmaton az ELGI-ben kiképzett H. W. Rose és J. D. La Touche geofizikusokkal végeztetett petróleumkutatást magyar ingákkal. A Kensington Museum részére szállított Pekár-féle műszerrel W. F. P. McLintock és J. Hemister mértek. A Fokföldön, Johannesburg környékén O. Weiss, alias Weisz Oszkár végzett bányakutatást célzó méréseket magyar ingákkal. A hágai székhelyű, a Shell csoporthoz tartozó, N. V. De Bataafsche Petroleum Maatschappij Jáva szigetén Batavia (Jakarta) környékén használta a magyar műszereket. Az Aktiebolaget Elektrisk Malmletning (Stockholm) igazgatója, Helmer Hedström ugyancsak felkereste az ELGI-t, és egész különleges mérést végzett. J. Morozewitz professzor, a lengyel Panstwowy Instytut Geologiczny (Warszawa) igazgatója eszközöket rendelt, amelyekkel az ELGI-ben tanult Janczewski dolgozott. Ezenkívül a zágrábi Műegyetem Geodéziai Tanszékén Fasching Antal professzor vezetésével tudományos méréseket végeztek a kis ingákkal. Ugyancsak tudományos célt szolgált az a Kanadába

szállított eszköz, amelyet a Dominion Observatory (Ottawa) igazgatója, Klotz professzor rendelt, s amellyel A. H. Miller, az intézet főgeofizikusa dolgozott.

Az angolok és az amerikaiak kiemelkedő érdeklődésének köszönhetően mindkét helyen külön-külön kizárólagos jogú képviselő alakult az ingák forgalmazására. A Brit Birodalomban a londoni székhelyű, V. F. Adam vezette The British Geophysical Agency kapta meg a kizárólagos terjesztési jogot. Ennek a cégnek lett a későbbiekben igazgatósági tagja James C. Templeton, aki különösen szoros kapcsolatot tartott az ELGI-vel. Az amerikai kontinensen pedig a magyar származású dr. George Steiner geológus, aki Budapesten tanulta meg a torziós inga használatát, vált a kizárólagos képviselői jog birtokosává. Cégének a Texas állambeli Houstonban volt a székhelye. Steiner saját repülőgépén utazva intézte üzleti ügyeit. 1930-ban egyik üzleti útja során gépe lezuhant, és ő életét veszítette. Halála után a képviselőt és a nála tartott torziósdrót-készletet az ugyancsak Houstonban működő dr. Donald C. Barton vette át, aki szintén Magyarországon ismerkedett meg a torziós-inga-mérésekkel, és akinek érdekes Eötvös-intézeti beszámolója a későbbiekben visszatérünk. Barton azután a képviselői jogot – a magyar fél hozzájárulásával – 1934 áprilisában, az Eötvös-intézettel már ugyancsak régi kapcsolatban álló Torsion Balance Exploration Company (TORBALEX, Houston, Texas) cégnek adta át. Az 1930-as évek első felében, a legnagyobb kőolaj-kutatási konjunktúra idején, a Suess gyár kéthetente szállított torziós ingákat Amerikába.

Ily módon több mint huszonöt külföldi szakember közvetlenül a Pekár Dezső vezette Eötvös-intézetben tanulta meg a torziós inga használatát, és általuk közvetítve terjedt el azután ez az új kutatómódszer az egész világon. Közben egyre újabb érdeklődők fordultak levélben az intézethez, nem egyszer távoli, egzotikus helyekről, így pl. Honolulu-ból, Jáva és Haiti szigetéről stb.

Az amerikai kontinensen Everette Lee DeGolyer és Donald C. Barton, a második világháború előtti időszak legnevesebb kőolajipari szakembereinek nevéhez fűződik az Eötvös-ingamérések meghonosítása. DeGolyer, aki egy személyben volt az Amerada Petroleum Co. elnökhelyettese és a Mexican Eagle Oil Co. tanácsadója, megállapodást hozott létre a két olajvállalat között két Eötvös-inga megvásárlására. Az egyezmény értelmében Barton, az Amerada vállalat Harvardon doktorált geológusa utazott Magyarországra a torziós inga elméletének és gyakorlatának elsajátítása és a két inga átvétele céljából.

Miután Barton megismerkedett az inga elméletével, gyakorlatot szerzett a terepi mérésekben és az észlelési adatok feldolgozásában hazatért, és várt az ingák megérkezésére. Az első két inga meg is érkezett 1922 novemberében. Már ez év decemberében sort kerítettek az egbelli mérésekhez hasonló kísérleti mérésre, de ebben az esetben nem egy antiklinálishoz kapcsolódó olajmező, hanem a Gulf Coast egyik legjelentősebb kőolaj-előfordulásán, a spindletoni sótömsz (Spindletop, Texas) területén. A méréseket az Amerada Petroleum Corporation keretében

Donald C. Barton vezetésével a fizikus végzettségű Andrew Gilmour végezte, akit kimondottan az Eötvös-ingamérésekre szerződtettek. Az amerikai kontinensen ez volt az első geofizikai felmérés.

A kőolajkutató geofizika első sikerére sem kellett sokáig várni. 1924 februárjában az Amerada társaság leányvállalata, a Rycade Oil Corporation – Barton és Gilmour közreműködésével végzett torziósinga-mérések alapján kitűzött – fúrása feltárta az amerikai kontinens első, kizárólag geofizikai adatok alapján megtalált kőolajmezőjét (Nash dóm, Brazoria County, Texas). Az első találatot hamarosan követték a többiek. Ugyanakkor az egyes vállalatok igyekeztek titokban tartani kutatási módszerüket és eredményességüket. Jellemző erre dr Steiner esete, aki 1923 decemberében Pekárhoz írt levelében arra panaszkodik, hogy:

„...nagyon nehéz feladatnak tartom az itteni társaságokat meggyőzni arról, hogy nekik a műszerre szükségük van. Ezen feladat azonban csak addig lesz nehéz, míg az inga segítségével valahol olajat találtak.

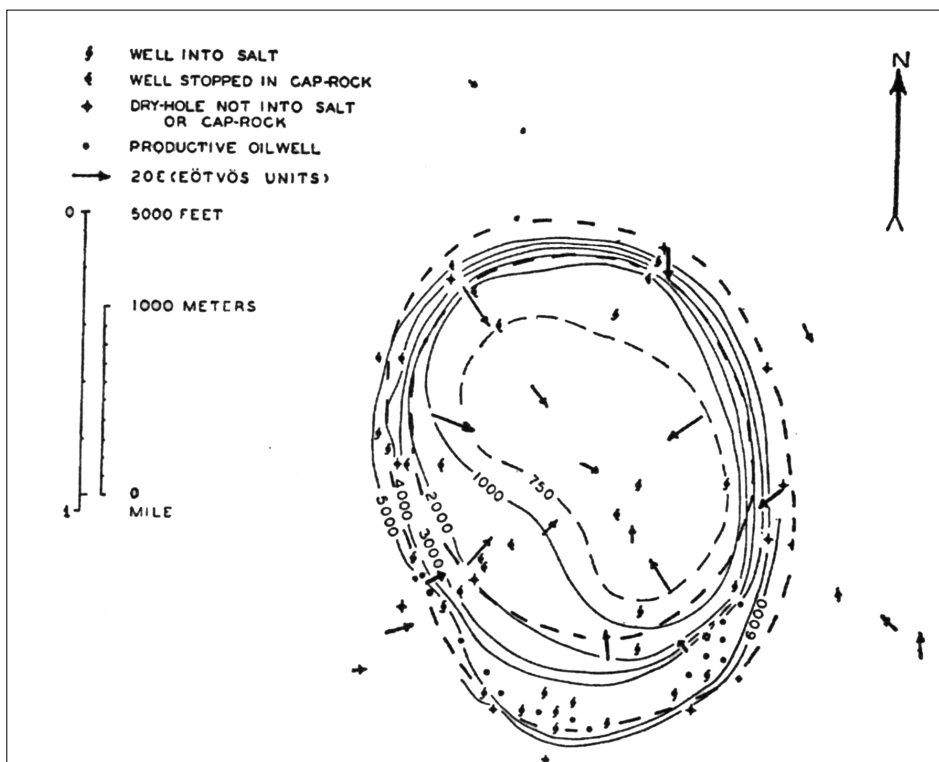
Itt a második nehézségre akadunk. Az Amerada Társaság, mely az ingát használja, és amelynek geológusa Mr Donald C. Barton a készüléket az Ön intézetében tanulmányozta, a Corsica-i petróleumtelepen nagy területeket bír, amelyek kivétel nélkül értéktelenek, míg köröskörül a többi társaságok a világ legnagyobb telepét fejlesztették ki egy pár hónap alatt. Ez ugyebár nem a legjobb ajánlás... Én megpróbáltam Mr Bartontól, kit személyesen jól ismerek, egy pár felvilágosítást szerezni és, hogy a helyzetet a lehetőségig tisztává tegyem, válaszát másolatban itt közlöm: Kedves Dr Steiner, november 17-én kelt levelét megkaptam. Boldogan válaszolnék kérdéseire, ha megtehetném.

A vállalatom véleménye szerint azonban nem válna előnyünkre ha felhívnánk más USA-beli vállalatok figyelmét az Eötvös-ingára. Ezért szigorúan megtiltották, hogy munkánkkal vagy kapott eredményeinkkel kapcsolatban bármilyen információt adjak.”

Ebből a levélből is kitűnik, hogy a Nash dómhoz kapcsolódó sikert Barton nem közölhette Steinerrel, akivel pedig jó ismeretségben volt. A nagy titkolódzás ellenére Jakosky szerint az 1930-as évek elején már több mint 125 inga dolgozott az Egyesült Államokban és 1938 elejéig – csak a Gulf Coaston – 79 olajmezőt fedeztek fel Eötvös-ingamérés alapján.

### Külföldi vállalatok magyarországi érdekeltségei

A trianoni békeszerződés szinte valamennyi jelentős ásványkincsétől megfosztotta Magyarországot, és jó néhány évbe telt, amíg a földtudomány alkalmazkodni kezdett a jelentősen korlátozott lehetőségekhez. A kőolaj- és földgázkutatással foglalkozó geológusok többsége, hosszabb-rövidebb időre, külföldi olajvállalatokhoz szegődött. A magyar kormány az igen költségesnek ígérkező szénhidrogénkutatások folytatására idegen tőkét keresett. A tárgyalások már 1919-ben megkezdődtek a világ egyik legnagyobb olajvállalatának, az Anglo-Persian Oil Company (APOC) vezetőivel. A tárgyalások eredményeként 1921-ben megalakult a Hungarian Oil Syndicate, Ltd. (HOS). Az új vállalat megalakulása új lehetőségeket teremtett a hazai szakemberek számára. Böckh Hugó és Pekár Dezső egyaránt



2. ábra | A Nash dóm gradiens- és mélységtérképe

kivált az állami szolgálatból. Böckh Hugó az Anglo–Persian Oil Co. Tanácsadója lett, és ebben a minőségében közreműködött a társaság magyar leányvállalatának, a HOS tevékenységében is. Pekár Dezső fizetés nélküli szabadság címén távozott az állami szolgálatból, és elvállalta a HOS geofizikai kutatásainak irányítását, miközben „társadalmi munkában” tovább igazgatta az Eötvös-intézetet, miközben 1922-ben az Akadémia levelező tagjává választották. A dolog pikantériája, hogy a vállalat geofizikai méréseit az Eötvös-intézet munkatársai végezték.

A társaság első fúrását, a Pávai Vajna Ferenc dőlésmérései alapján kimutatott budafapusztai antiklinálison Böckh Hugó és a vállalat nagy nemzetközi tapasztalattal rendelkező angol geológusa tűzte ki. Az 1737 m mélységű fúrás azonban jelentéktelen olajszagú gáznymon kívül semmi érdemlegeset nem talált. Érdekességként megemlítjük, hogy a fúrást eredetileg északabbra tűzték ki, de az angol fúrómester nem volt hajlandó a fúróberendezést a dombra felvinni. A társaság további tevékenysége, bár koncessziós szerződését az első három év után további három évre meghosszabbították, szénhidrogén szempontból változatlanul sikertelennek bizonyult.

Az első sikertelennek bizonyult kőolaj-kutatási koncessziót 1933-ban követte a második, az EUROGASCO<sup>1</sup>-val kötött szerződés (a MAORT<sup>2</sup> jogelődje). A vállalat vezetői földgázt szerettek volna feltárni a Kisalföldön. Bécs és Győr közelsége miatt az esetlegesen megtalált földgázt könnyen értékesíthették volna. A cél érdekében létrehozott geofizikai részleg első feladata a Kisalföld felmérése lett. 1933 októberében kezdték meg a torziósinga-méréseket Vajk Raul vezetésével (Papp 1939). A mérésekben meghatározó szerepet játszottak a báró Eötvös Loránd Geofizikai Intézetben kiképzett Pekár-tanítványok, akik a későbbiekben a magyar kőolajipari geofizika meghatározó képviselőivé váltak. Elegendő talán megemlíteni, hogy Oszlaczky Szilárd és Facsinay László 1953-ban Kossuth-díjat kapott a nagylengyeli kőolajmező felfedezéséért. A Geofizikai Intézet az általa kiképzett szakembereken kívül torziós ingák kölcsönzésével is segítette a kőolajkutató geofizika megindulását. A vállalat első fúrásponjtját, a Mihályi-1 fúrást a kimutatott gravitációs maximum tetőpontjára telepítették, amely földgázkutatás szempontjából ugyan meddőnek bizonyult, de jelentős mennyiségű szén-dioxid-gázt tárt fel.

Az első jelentős magyarországi szénhidrogénmező – a budafapusztai – megtalálása szintén Eötvös-ingamérésekhez kapcsolódott. Amikor 1934-ben a dunántúli Eötvös-ingacsoport a kisalföldi síkságról a dél-zalai dombok közé költözött, a vállalkozást hazai körökben elég kockázatosnak ítélték. Az volt ugyanis az általános felfogás, hogy a Dunántúl medencéje sokkal sekélyebb, mint az Alföldé és az altalaj is sokkal inhomogénebb. Kérdésesnek tartották, hogy a dimbes-dombos terepi körülmények között lehet-e egyáltalán eredményes Eötvös-ingaméréseket végezni. Az eredmények azonban megcáfolták a kételkedőket, mert az Eötvös-ingaméréseknek néhány hónap alatt sikerült körvonalazniuk a később kőolajtárolónak bizonyult budafapusztai maximumot, melynek tengelye mintegy 1500 m-rel északabbra van az 1921-ben lefúrt eredménytelen fúrástól. Az antiklinális létét az amerikai szakemberek által 1935–36-ban végzett szeizmikus mérések is igazolták. Bár a terület gravitációs felmértsége legfeljebb áttekintő jellegű volt, ennek ellenére a maximum tengelyébe telepített Budafapuszta-2 fúrás 1937. november 21-én kőolajat talált. Ez a dátum jelzi a magyar kőolajipar születésnapját.

#### A tanulmány szerzője

Szabó Zoltán

#### Hivatkozások

Az angol nyelvű irodalomban bőséges hivatkozás található Eötvösre. Példaként néhány kézikönyv:

- Barton D. C. (1928): The Eötvös torsion balance method of mapping geologic structure. Technical Publication No. 50. A.I.M.E. Washington D.C.
- De Golyer E. (1938): Historical notes on the development of the technic of prospecting for petroleum. The Science of Petroleum. Vol. I., Oxford University Press, Oxford, pp. 268–275.
- Heiland C. A. (1940): Geophysical Exploration. SEG.
- Jakosky J. J. (1950): Exploration Geophysics. Los Angeles, Truja Publ., Co.
- Owen E. W. (1975): Trek of the Oil Finders: A History of Exploration for Petroleum. A.A.P.G. Memoirs No. 6. Tulsa, Oklahoma

<sup>1</sup> European Gas and Electric, Co.

<sup>2</sup> Magyar–Amerikai Olajipari Rt.



# Előkészületek az Eötvös-kísérlet újramérésére

VÖLGYESI L.<sup>1,\*</sup>, SZONDY GY.<sup>2</sup>, TÓTH GY.<sup>1</sup>, PÉTER G.<sup>3</sup>, KISS B.<sup>3</sup>, DEÁK L.<sup>4</sup>, ÉGETŐ CS.<sup>1</sup>,  
FENYVESI E.<sup>4</sup>, GRÓF GY.<sup>5</sup>, VÁN P.<sup>4,5</sup>

<sup>1</sup>Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Általános- és Felsőgeodézia Tanszék, H-1521 Budapest

<sup>2</sup>Független kutató, Budapest

<sup>3</sup>Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Irányítástechnika és Informatika Tanszék, H-1521 Budapest

<sup>4</sup>MTA, Wigner Fizikai Kutatóközpont, H-1121 Budapest, Konkoly-Thege Miklós út 29–33.

<sup>5</sup>Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Energetikai Gépek és Rendszerek Tanszék, H-1521 Budapest

\*E-mail: volgyesi.lajos@epito.bme.hu

Eötvös Loránd munkatársaival, Pekár Dezsővel és Fekete Jenővel 1906-tól méréssorozatot végeztek (EPF-mérések) a súlyos (gravitációs) és a tehetetlen tömeg arányosságára vonatkozóan. 1986-ban Ephraim Fischbach és társai az EPF-mérési eredményekben olyan szisztematikus anyagfüggést fedeztek fel, amelyet végül kísérletileg nem tudtak igazolni, ugyanakkor az eltérések okára máig sem találtak magyarázatot. A mérések elemzésének eredményeképpen most olyan szisztematikus hibalehetőséget találtunk, amely indokolttá teszi a mai korszerű technikai lehetőségek által kínált jobb feltételek mellett a kísérletek megismétlését. 2017 júniusában a Wigner Fizikai Kutatóközpontban (Wigner FK) döntés született az EPF-mérések Eötvös-ingával történő megismétlésére és az esetleges eltérések tényleges okának feltárására. A 2017 júniusától megkezdett munkában a mérésekben és ezek előkészületeiben az MTA Wigner Fizikai Kutatóközpontja, a BME Általános- és Felsőgeodéziai Tanszéke, az Egyesület a Tudomány és Technológia Egységéért (ETTE), illetve a BME Irányítástechnika és Informatika Tanszéke vesznek részt más további szervezetek, tanszékek és szakértők bevonásával. A mérések több mint egy éves igen alapos előkészületek után a KFKI (Wigner FK) területén lévő Jánossy Földalatti Fizikai Laboratóriumban, 30 m mélységben, megfelelő nyugalmi körülmények és kontrollált feltételek között 2018 decemberében megkezdődtek. Az EPF-mérések megismétlésének külön aktualitást ad *Eötvös Loránd halála 100. évfordulójának tiszteletére* 2019-ben tartott Eötvös-év. Jelenlegi tanulmányunkban röviden áttekintjük a szükséges fizikai alapismereteket, az előzményeket, beszámolunk a mérések előkészületeiről és a jelenlegi állapotáról.

## Völgyesi, L., Szondy, Gy., Tóth, Gy., Péter, G., Kiss, B., Deák, L., Égető, Cs., Fenyvesi, E., Gróf, Gy., Ván, P.: Preparations for the remeasurement of the Eötvös experiment

Between 1906 and 1908 Roland (Loránd) Eötvös and his colleagues Dezső Pekár and Jenő Fekete made measurements with revolutionary precision (the EPF measurement) for validating the equivalence of gravitational and inertial mass. Almost 80 years later, in 1986, Ephraim Fischbach and his colleagues reanalyzed the results of the EPF measurement and discovered a correlation between the small violations and some atomic parameter. Finally they were unable to reproduce this correlation experimentally, but there is still no valid explanation of these differences in the EPF results. Our analysis of the EPF experiment pointed to a possible bias that justifies repeating the tests under better conditions and using modern new technology. Planning and preliminary measurements started at July of 2017. Participants are from Wigner Research Centre for Physics of the Hungarian Academy of Sciences, Department of Geodesy and Surveying of Budapest University of Technology and Economics (BME), Society for the Unity of Science and Technology (SUST), and the Department of Control Engineering and Information Technology of BME in cooperation with other organizations, departments and experts. After more than one year of thoughtful preparation, in December 2018 preliminary tests have been started in a controlled and undisturbed environment of the Jánossy Underground Laboratory at KFKI, 30 meters below ground level. This paper gives a brief overview of the basic physics, history, preparations and present status of the new experiments. Another good reason for repeating the EPF measurements is that 2019 – as the 100th anniversary of Eötvös' death – is referred to as "Eötvös year".

Beérkezett: 2019. február 13.; elfogadva: 2019. március 4.

## Előzmények

Eötvös Loránd és munkatársai 1906 és 1908 között Eötvös-ingával méréseket végeztek a súlyos és a tehetetlen tömeg azonosságának kimutatására. A méréseiket arra alapozták, hogy a földi nehézségi erő a tömegvonzási (gravitációs) és a forgási centrifugális erő eredője, és amennyiben a gravitációs erő anyagfüggő, akkor az eredő nehézségi erő iránya szintén az lesz, ami egy K–Ny tájolású Eötvös-ingával kimutatható (Eötvös et al. 1922). Az elvégzett mérések csupán  $10^{-9}$  hibahatár-közeli véletlenszerűen tűnő eltéréseket mutattak.

Renner János az 1930-as években más anyagpárokkal megismételte a kísérleteket, de anyagfüggést ő sem talált (Renner 1935). További kísérletekre közel 30 évet kellett várni, Dicke és munkatársai  $10^{-11}$  (Roll et al. 1964), Braginsky és munkatársai pedig  $10^{-12}$ -es pontossággal igazolták az ekvivalenciaelvet (Braginsky et al. 1971). Dicke és munkatársai É–D tájolású ingával a Nap vonzása és a Föld keringéséből adódó centrifugális erő viszonyának anyagfüggését mérték, aminek előnye, hogy az ingát a jel 24 órás periodicitása miatt a mérés során nem kellett forgatni.

Később, 1986-ban Fischbach és munkatársai azt találták, hogy ezek a kis eltérések mégsem teljesen véletlenszerűek, hanem az atommagok kötési energiájának lineáris függvényként írhatók fel, és felvetették egy rövid hatótávolságú, úgynevezett ötödik erő létezését (Fischbach et al. 1986). A feltételezés komoly vitákat váltott ki, és további méréseket és ellenőrző kísérleteket motivált. Eötvösök eredményeit részletesen elemezték, új, sokkal pontosabb méréseket is végeztek, de azokban nem mutatták ki a megjósolt Yukawa-jellegű, rövid hatótávolságú ötödik erőt.

Például 1990-től torziós ingákkal végzett kísérleteket az Eöt-Wash csoport (University of Washington), méréseikben elérték a  $10^{-13}$ -os pontosságot (Király 2007, Patkós 2019).

Mindezek mellett az EPF-méréseket az eredeti formában és eredeti eszközökkel nem ismételték meg, és az újabb, kifinomultabb módszereket alkalmazó kísérletek mellett nem foglalkoztak az Eötvösök munkáiban megfigyelt szisztematikus eltérések okával. Mivel az eredeti EPF-kísérlet elvileg más, mint bármely későbbi teszt, ezért ez a szisztematikus eltérés továbbra is jelentheti az ekvivalenciaelv speciális sértését (Franklin, Fischbach 2016, Fischbach 2019). Az EPF-kísérlet megismétlése nemcsak az említett szisztematikus hibára vonatkozó feltevésünket igazolhatja, hanem új szempontokkal járulhat hozzá a jelenlegi legpontosabb földi mérésekhez.

## A súlyos és a tehetetlen tömeg

Newton II. törvénye szerint bármely testre ható erő egyenlő a test tömegének és a gyorsulásának szorzatával ( $F = ma$ ), vagyis akármilyen mechanikai erőhatás éri is a testet (lehet ez rugóerő, súrlódási erő stb.) az erő és a gyorsulás hányadosa egy adott testnél mindig ugyanannyi, a testre jellemző mennyiség: a *tehetetlen tömeg*.

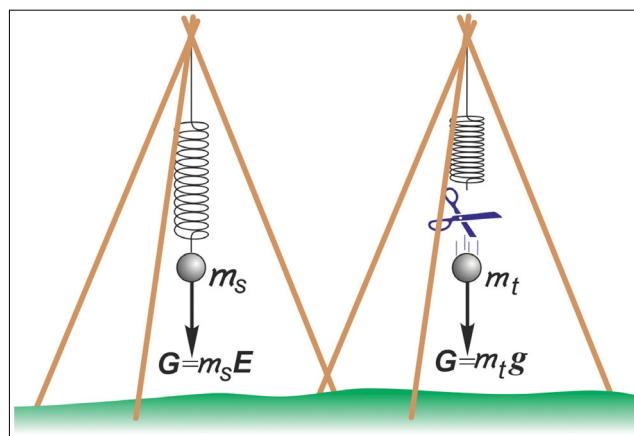
Van ugyanakkor egy erő, amely bármely két test között mindig fellép. Ez a vonzóerő az  $F = kMm/r^2$  Newton-féle általános tömegvonzási (gravitációs) erő, melynek nagysága szintén arányos a testre jellemző mennyiséggel: a *súlyos tömeggel*.

A súlyos és a tehetetlen tömeg egymástól független mennyiség, amely két teljesen különböző fizikai törvényben jelenik meg. Newton óta a fizika kiemelt kérdése, hogy *a két tömeg valójában ugyanaz-e, vagy más-más mennyiséget jelöl*.

Tapasztalatunk szerint az 1. ábrán látható módon rugóra felfüggesztett test a rugót megfeszíti. A rugó megnyúlása arányos a rugót feszítő súlyerővel és fordítottan arányos a rugó erősségével. Így a rugót feszítő  $G$  erő a felfüggesztett test tömegével és az  $E$  nehézségi térerősséggel arányos:

$$G = m_s E. \quad (1)$$

Itt  $m_s$  a test azon tulajdonságát jellemzi, hogy adott nehézségi erőterben mennyire képes megnyújtani egy rugót. A test e statikai tulajdonságát az  $m_s$  *súlyos* tömegének nagyságával jellemezhetjük. A rugóra felfüggesztett test most nyugalomban van, hiszen a rá ható erők eredője zérus, mert a  $G$  súlyerőt pontosan kiegyensúlyozza az ellentétes irányú rugóerő.



1. ábra | Súlyos és tehetetlen tömeg a nehézségi erőterben  
Figure 1 | Inertial and gravitational mass in gravity field

Ha a rugó elszakad, vagy levágjuk a rugóra függesztett tömeget, akkor megszűnik az a rugóerő, mely egyensúlyt tartott a súlyerővel, de változatlanul ugyanaz az erőter fog ugyanarra a testre hatni. Így a test a rá ható eredő erő, a súlyerő hatására Newton II.,  $F = ma$  törvényének megfelelően gyorsuló mozgást fog végezni. Ha a légalenállástól eltekintünk, a test a szabadesés gyorsulásával, a  $g$  nehézségi gyorsulással fog mozogni, tehát:

$$G = m_t g, \quad (2)$$

ahol  $m_t$  a test azon tulajdonságát jellemzi, hogy adott nehézségi erőterben mennyire képes ellenállni annak a gyorsító erőnek, amely a mozgásállapotát igyekszik megváltoztatni. A test e dinamikai tulajdonságát az  $m_t$  *tehetetlen* tömegének nagyságával jellemezhetjük.

Tekintettel arra, hogy az (1) és a (2) bal oldalán ugyanaz a  $G$  súlyerő szerepel, ezért

$$m_s E = m_t g. \tag{3}$$

A XVI. századtól kezdve többen is foglalkoztak ejtési kísérletekkel, például egy vasgolyó és fagolyó egyidejű ejtésekor azt tapasztalták, hogy a két test a nagy súlykülönbség ellenére gyakorlatilag egyszerre ért a talajra. Később Newton és Bessel már kimondottan a súlyos és tehetetlen tömeg ekvivalenciáját tesztelték különféle ingákkal végzett kísérletekben. Eötvös Loránd már 1889-ben az addigi méréseknél több mint két nagyságrenddel pontosabb kísérleteket végzett, majd az akkori technikai lehetőségeknek megfelelően a híres EPF- (Eötvös–Pekár–Fekete-) kísérlettel a 9. jegyig terjedő pontossággal igazolta a súlyos és a tehetetlen tömeg azonosságát (Renner 1964, Perjés 2005). Einstein a súlyos és a tehetetlen tömeg egyenlőségére és anyagtól való függetlenségére, vagyis az ún. *gyenge ekvivalenciaelv*re építette fel az általános relativitás elméletét. Különböző fizikai megfontolások és megfigyelések azt mutatják, hogy a súlyos és a tehetetlen tömeg ugyan a testek két teljesen eltérő tulajdonságát jellemzi, mégis a két mennyiség egyenlő egymással, tehát az

$$m_s = m_t, \tag{4}$$

melynek alapján

$$E = g, \tag{5}$$

vagyis a szabadon eső test gyorsulása, a nehézségi gyorsulás, irány, értelem és nagyság szerint megegyezik a nehézségi térerősséggel (Völgyesi 2005).

Ezek szerint a gravitációs és a tehetetlenségi erők ekvivalensek. Ennek érzékeltetésére Einstein gondolatkísérletet alkotott, amelynek az a lényege, hogy ha egy fizikust bezárunk egy kabinba, felruházzuk az emberiség teljes fizikatudásával, és a rendelkezésére bocsátunk minden elképzelhető fizikai eszközt és kísérleti lehetőséget, akkor sem képes sehogyan megállapítani, hogy a kabin gravitációs erőterben van felfüggesztve, vagy a kabint az univerzum távoli gravitációs tömegektől mentes területén rakéta-hajtómű gyorsítja. A helyzet azonban nem ilyen egyszerű; ha ugyanis graviméterrel két különböző alkalmas pontban mérünk, akkor a vonzó tömegetől mért távolság függvényében különböző értékeket fogunk észlelni, ugyanakkor gyorsuló erőterben nem tapasztalunk különbséget. A megkülönböztethetlenséget lokálisan, homogénnek tekintett erőterekre kell tekintetbe vennünk. A súlyos és a tehetetlen tömeg azonossága a mai napig aktuális kérdése a fizikának, bármilyen kölcsönhatásból származtatott erőre igaznak feltételezzük, illetve precíziós kísérletek sorával ellenőrizzük (Will 2014). Ezeknek a méréseknek a sorában az EPF-mérések máig viszonyítási alapnak, az első mérőföldkőnek számítanak.

### Az EPF-mérések alapelve

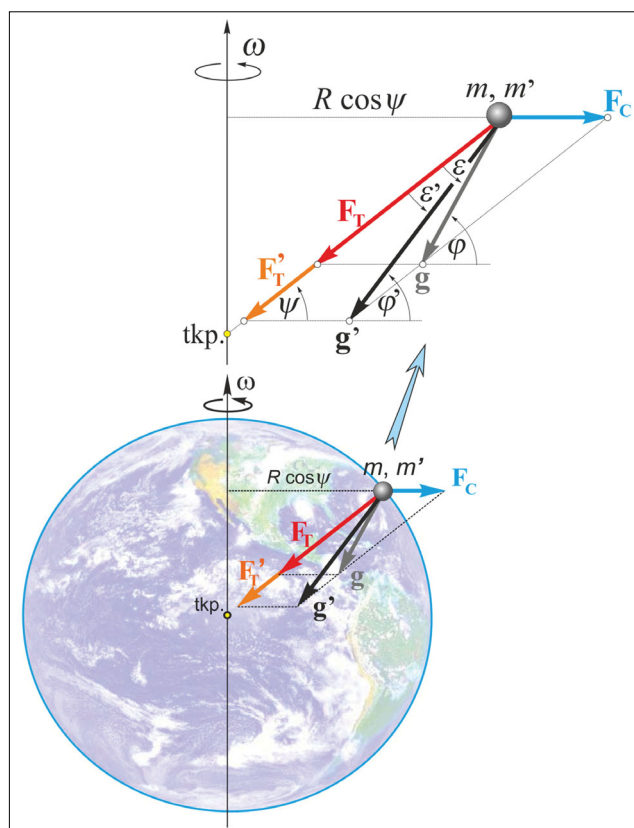
Eötvös Loránd és munkatársai, Pekár Dezső és Fekete Jenő 1906-tól több méréssorozatot végeztek (EPF-mé-

rések) a súlyos (gravitációs) és a tehetetlen tömeg arányosságára vonatkozóan.

A  $g$  földi nehézségi erő, az  $F_T = Tm$  tömegvonzási- (gravitációs-), az  $F_C = Cm$  forgási centrifugális és az árapálykeltő erők eredője ( $T$  a tömegvonzási (gravitációs),  $C$  pedig a centrifugális gyorsulást (térerősséget) jelöli). Az EPF-kísérletek során az árapálykeltő erők elhagyhatók, mivel a kísérletben használt eszközre kifejtett hatások általában kicsi. Más kérdés az, hogy ha az árapály az inga közelében valamilyen tömegátrendeződést okoz, akkor az igen érzékeny inga már érzékelheti ezt az indirekt árapályhatást.

Eötvös feltételezte, hogy az  $F_C$  forgási centrifugális erő független az anyagi minőségtől, viszont az  $F_T$  tömegvonzási (gravitációs) erő függhet attól. Gondolatban helyezzünk el a 2. ábrán látható földfelszíni pontban különböző anyagokat (pl. aranyat és alumíniumot). A két különböző testnek legyen szigorúan azonos a tömege ( $m = m'$ )! A feltételezés szerint mindkét testre azonos  $F_C$  forgási centrifugális tehetetlenségi erő hat, viszont a Föld az  $m$  tömegre  $F_T$  míg az  $m'$  tömegre  $F'_T$  gravitációs erőt gyakorol. Ennek megfelelően a 2. ábrán látható módon az  $m$  tömegre ható nehézségi erő  $g$ , az  $m'$  tömegre ható nehézségi erő pedig  $g'$ .

A Földdel együtt forgó testekre ható  $F_C$  centrifugális erő merőleges a Föld forgástengelyére, melynek vízszintes irányú  $F_C \sin \varphi$  összetevője a 3. ábrán látható módon (az északi féltéken) déli irányba mutat. Az  $F_C \sin \varphi$  összetevő



2. ábra | A nehézségi erő feltételezett változása különböző anyagok esetén

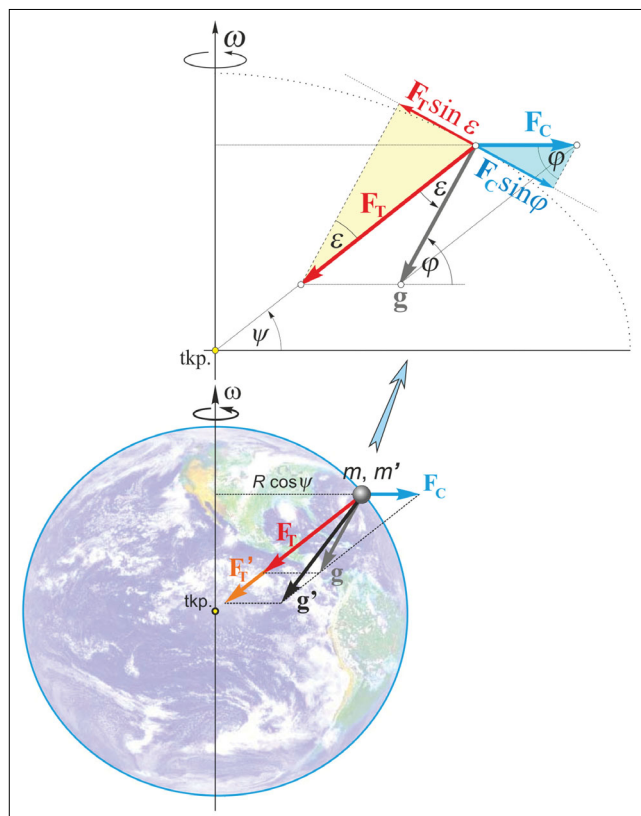
Figure 2 | Assumed difference of gravity in case of different materials

nagysága függ a hely  $\varphi$  földrajzi szélességétől. Ezzel az erővel egyensúlyban van az északra mutató  $F_T \sin \varepsilon$  erő, amely a testre ható  $F_T$  tömegvonzási erő vízszintes síkba eső vetülete. A 3. ábrán látható  $\varepsilon$  szög a  $g$  nehézségi erő (az  $F_T$  gravitációs és az  $F_C$  forgási centrifugális erő eredője) és az  $F_T$  tömegvonzási erő által bezárt szög. Az  $\varepsilon = 5'57''$  maximális értékét, a  $45^\circ$ -os földrajzi szélességen éri el.

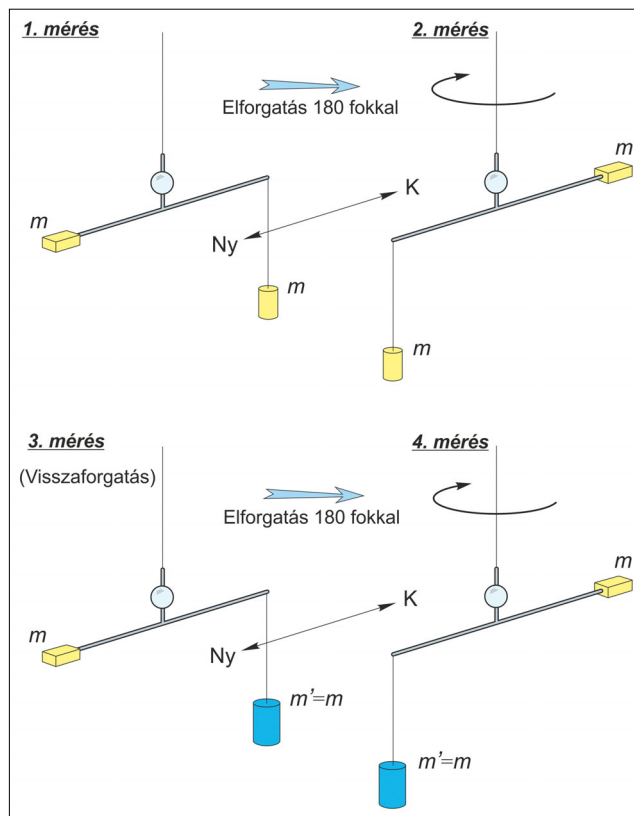
Feltételezve, hogy az  $F_T$  tömegvonzási (gravitációs) erő függhet az anyagi minőségtől, Eötvös az anyagi minőségi tényezőre az

$$\eta = 2 \frac{(m_s/m_t) - (m'_s/m'_t)}{(m_s/m_t) + (m'_s/m'_t)} \quad (6)$$

jelölést vezette be. Így ha valamilyen referenciaanyagra (pl. vízre)  $\eta = 0$  értéket vesszük fel, akkor a gravitációs erő más testre az  $(1 + \eta)F_T$  összefüggés szerint változik. Ha  $\eta \neq 0$ , akkor a gravitációs és tehetetlen tömeg eltérése miatt megszűnik a 3. ábrán látható erőegyensúly, ezért az  $m'$  tömegre egy kicsiny  $\eta F_T \sin \varepsilon$  északi irányú erő fog hatni, amely erő az Eötvös-féle torziós inga karjának elfordulását eredményezi. Az Eötvös-kísérlet fő kérdése tehát az, hogy az inga karjáról lelógatott tömeget kicserélve a felső tömegtől eltérő másik anyagból készített tömegrre, a felső és az alsó testre ható feltételezett különböző erők miatt tapasztalható-e az inga karjának az elcsavarodása.



3. ábra | Vízszintes síkban ható erőösszetevők  
Figure 3 | Horizontal components of forces



4. ábra | EPF-mérési stratégia a tömegek cseréjével  
Figure 4 | Strategy of EPF measurement by exchanging masses

Mivel a kimutatásra váró feltételezett erő a 3. ábra szerint északi irányba mutat, ezért ez az erő a K–Ny-i irányban álló ingakar tömegeire hatva fejt ki maximális nyomatékot.

Az EPF-mérések 1. módszere esetében az inga megfelelő forgatásával és a tömegek meghatározott cseréjével a 4. ábrán összefoglalt sorrend szerint történnek a mérések.

Az 1. lépésben és a K–Ny irányban ( $\alpha = 90^\circ$  azimutban) állított ingaszerkezeten leolvassuk az ingarúd nyugalmi helyzetét.

A 2. lépésben 180 fokkal elfordítjuk az ingaszerkezetet, és az  $\alpha = 270^\circ$  azimutban is leolvassuk az ingakar nyugalmi helyzetét.

A 3. lépésben visszaforgatjuk az ingaszerkezetet  $\alpha = 90^\circ$  azimutba, az inga lelógatott aranyból készült tömegét kicseréljük egy ugyanolyan tömegű pl. alumínium tömegrre, majd nyugalmi állapotban leolvassuk az ingakar helyzetét.

Végül a 4. lépésben a felcserélt tömeggel elfordítjuk az ingaszerkezetet  $\alpha = 270^\circ$  azimutba, és így is leolvassuk az ingakar nyugalmi helyzetét.

A torziós száltól keleti illetve nyugati irányban  $l$  távolságban elhelyezkedő tömegek esetében a súlyos és tehetetlen tömeg feltételezett különbözősége miatt fellépő  $\eta l F_T \sin \varepsilon$  nyomatékok egymással ellentétes előjelűek, így az ingakar szöghelyzetének változása egyenesen arányos lesz a keresett nyomatéki hatás kétszeresével (5. ábra).

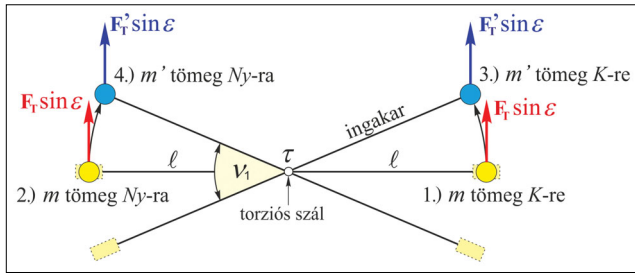


Az 5. ábrán a torziós inga karjának  $v_1$  elfordulása látható felülnézetben ábrázolva, amennyiben nem teljesül a súlyos és tehetetlen tömeg ekvivalenciája. Az ábrán az inga alsó tömegét mutatjuk a 4. ábrán látható négy különböző helyzetében. Először az  $m$  tömeg a torziós szálhoz képest keletre, majd második lépésben nyugatra helyezkedik el. Miután az  $m$  tömeget kicseréljük egy másik anyagból készült  $m'$  tömegre ( $m = m'$ ), az eltérő  $\eta$  anyagi minőségi tényezők miatt az ingakar mind keleti, mind nyugati irányában jelentkezik az  $m'$  tömegre ható kis erő, amely elforgatja az inga karját, és vele együtt az  $m'$  tömeg is új helyzetbe kerül.

A  $v_1$  elfordulást pontosan megmérve kiszámítható az  $\eta$  anyagi minőségi tényező az adott anyagpárra az inga  $l$  félkarhossza és az  $m$  tömeg nagyságának függvényében:

$$\eta = \frac{\tau v_1}{2F_T l \sin \varepsilon}, \quad (7)$$

ahol  $\tau$  a torziós szál csavarási állandója.



5. ábra Az inga felfüggesztett tömegének helyzete körökkel jelölve felülnézetben a mérés 4 különböző fázisában, amennyiben nem teljesül az ekvivalencia elve

Figure 5 The position of the suspended mass of the torsion balance is marked with circle in top view in 4 different phases of the measurement, if the principle of equivalence is not true

### A méréseket zavaró tömeghatások

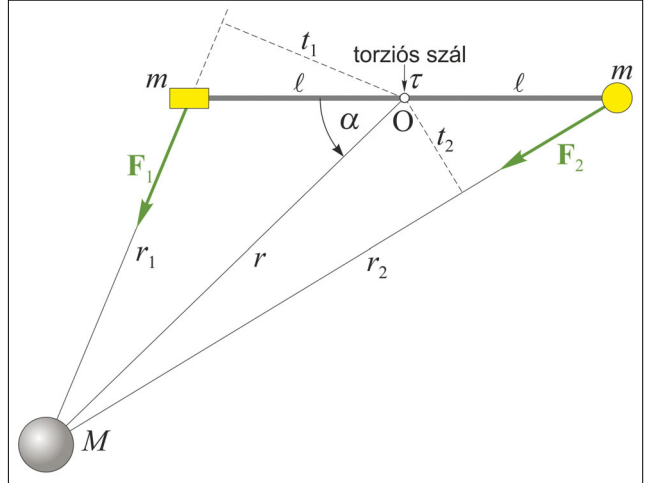
A torziós ingától  $t$  távolságban a 6. ábrán látható módon elhelyezett  $M$  tömeg az ingakart elfordítja. Jelöljük  $F_1$ -gyel és  $F_2$ -vel az  $M$  tömeg által az inga bal és jobb oldali  $m$  tömegére kifejtett Newton-féle tömegvonzási erőket,  $t_1$ -gyel és  $t_2$ -vel ezen erőknek az inga  $O$  pontjára vonatkozó erőkarját! Így az eredő forgatónyomaték

$$M_E = F_1 t_1 - F_2 t_2 = kMm \left( \frac{t_1}{r_1^2} - \frac{t_2}{r_2^2} \right), \quad (8)$$

ahol  $k$  a gravitációs állandó. A háromszögek területének egyenlősége miatt  $r_1 t_1 = r_2 t_2$ , így az eredő forgatónyomaték

$$M_E = kmMlr \sin \alpha \left( \frac{1}{r_1^3} - \frac{1}{r_2^3} \right). \quad (9)$$

A (9) összefüggéssel  $m = 9$  g,  $l = 10$  cm,  $\tau = 6 \cdot 10^{-9}$  m<sup>2</sup>kg s<sup>-2</sup> ingaparaméterek esetében kiszámítható az ingakar elfordulása tetszőleges  $M$  tömeg hatására.



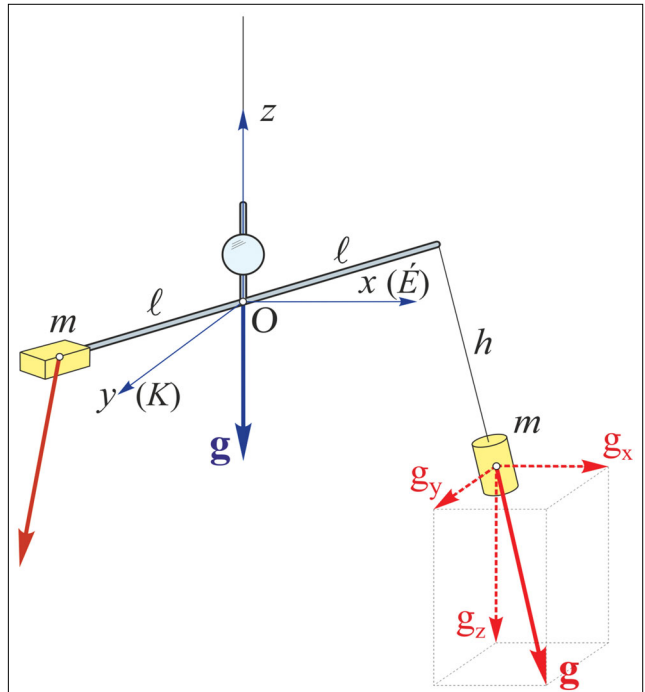
6. ábra Az inga tömegeire ható erők forgatónyomatéka

Figure 6 Torque of different gravity forces acting on the masses of the torsion balance

Példaként egy  $M = 60$  kg tömegű észlelő az ingától  $r = 0,5$  m távolságban  $\alpha = 45^\circ$ -os szögben, 3,5 skálaegység változást okoz a leolvasásban; ugyanez a változás a Hold esetében  $10^{-5}$  skálaosztás, amelyet az ingával már egyáltalán nem lehet kimutatni.

A Föld inhomogén sűrűségeloszlása miatt a nehézségi erő térbeli eloszlása teljesen szabálytalan, a  $g$  vektor hossza és iránya is pontról pontra változik, ezért a 7. ábrán látható módon az inga tömegeire különböző erők hatnak.

Az EPF-kísérlet szempontjából az  $mg_x$  és  $mg_y$  vízszintes erőösszetevők változása fontos, mert ezek okozhatnak olyan nyomatékokat, amely zavarva az EPF-méréseket az



7. ábra Az inga tömegeire ható különböző erők

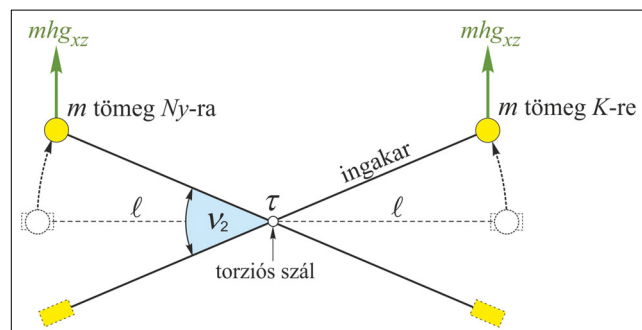
Figure 7 Different gravity forces acting on the masses of the torsion balance

inga karjának elcsavarodását eredményezi. A K–Ny irányban álló ingarúd elcsavarodását csak az északi vagy a déli irányba mutató  $mg_x$  erőösszetevő változása okozza. A  $g_x$  összetevő a térben akár  $x$ , akár  $y$ , akár  $z$  irányban megváltozhat. Azonban a K–Ny helyzetben álló ingarúd lejjebb levő tömege esetében csak  $z$  irányú változás okozhat olyan nyomatókülönbséget, amely elfordítja az inga karját. Ez a függőleges változás első közelítésben az  $mg_x(z) = mzg_{xz}$  lineáris összefüggéssel írható le, ahol  $g_{xz}$  a  $g_x$  összetevő magassági gradiense, azaz magasságtól függő változásának mértéke. Így az ingakar 8. ábrán látható  $v_2$  szögelfordulása a nehézségi erő magasság szerinti megváltozása miatt

$$v_2 = -(2/\tau)mhg_{xz}, \quad (10)$$

ahol  $h$  az Eötvös-inga lejjebb levő tömegének távolsága az inga karjától. (Eötvös egyébként éppen az ilyen gradiensek mérésére fejlesztette ki a torziós ingáját.)

A 8. ábrán a torziós inga karja  $v_2$  elfordulásának okát szemléltetjük. Az ábrán az inga alsó tömegét láthatjuk felülnézetben, két különböző, az inga felfüggesztési pontjától keleti és nyugati helyzetben. Az inga alsó  $m$  tömegére akár keleti, akár nyugati helyzetében északi irányú erő hat a gravitációs erő  $mg_x$  összetevőjének térbeli változása miatt. Az ábrán látható  $mhg_{xz}$  erő abból adódik, hogy a torziós inga alsó tömege  $h$ -val lejjebb van, és ez kimozdítja az inga karját északi irányban. Ha az  $m$  tömeg kicserélése után csak kicsit is megváltozik ez az erő, a tapasztalt hatás tévesen úgy értelmezhető, hogy az 5. ábrához hasonlóan nem teljesen a súlyos és tehetetlen tömeg ekvivalenciája.



8. ábra Az inga körökkel jelölt felfüggesztett tömegének helyzete felülnézetben 2 különböző azimutban a  $g_{xz}$  gradiens hatására

Figure 8 Positions of the balance caused by the gradient  $g_{xz}$  in 2 azimuths. The suspended mass of the torsion balance are marked with circles

Mivel a (10) összefüggéssel kifejezett gradienshatás nagyságrendekkel nagyobb lehet a gravitációs és tehetetlen tömeg eltéréséből várható hatásnál, ezért az EPF-mérések során nagy pontossággal biztosítani kell a  $\tau$ ,  $m$ ,  $l$ ,  $h$  ingaparaméterek állandóságát, vagy ismerni kell ezek pontos értékét. Ezek bármilyen megváltozása meghamisíthatja a mérés eredményét, mivel a (7) összefüggés szerint az alsó tömeg cseréje után a  $v$  elfordulás értékében tapasztalt változás értelmezhető lenne úgy is, mint a gravitációs és tehetetlen tömegek különbözőségének hatása. A gyakorlatban ez azt jelenti, hogy a felsorolt paramétereket gondosan

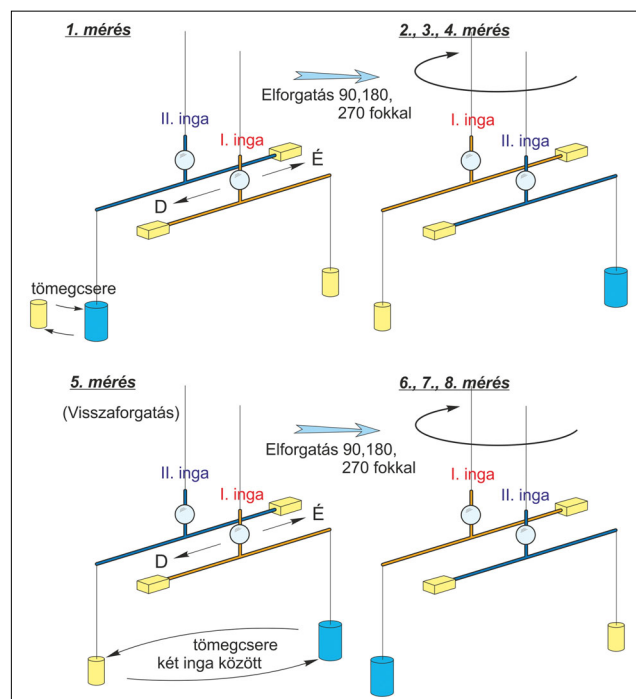
meg kell mérni az alsó tömeg cseréje előtt és után is, az esetleges kis eltéréseket pedig a számítások során figyelembe kell venni.

Az EPF mérések 2. módszere esetében Eötvös és munkatársai kihasználták azt a tényt, hogy az É–D irányban álló ingarúdra nincs forgató hatás az  $m$  és  $m'$  anyagi különbsége miatt, van viszont gradienshatás, amelyből számítható az ingakar  $w$  elfordulása a (10)-hez hasonló

$$w = (2/\tau)mhg_{yz}, \quad (11)$$

összefüggéssel. Ebben az esetben viszont csak az  $mg_y$  erőösszetevő  $mg_y(z) = mzg_{yz}$  magasságtól függő változása játszik szerepet. (A (10) és a (11) közötti előjelkülönbség az  $mg_x$  és az  $mg_y$  erők egymással ellentétes irányú forgató hatása miatt adódik.)

Eötvösök ötletének lényege, hogy a  $v/w$  hányados már nem tartalmazza a  $\tau$  paramétert, viszont a  $v/w$  hányadosnak az alsó tömeg kicserélése utáni megváltozásából a keresett  $\eta$  továbbra is kiszámítható. Ezt könnyen beláthatjuk, ugyanis a  $v/w$  hányadosban szereplő  $v$ , vagyis a K–Ny-i irányban álló ingakar teljes elfordulása kétfajta erő hatását tükrözi: egyrészt a gravitációs és tehetetlen tömeg eltérése miatti  $\eta m G \sin \epsilon$  erőét (5. ábra), amely miatt  $v_1$  elfordulás adódik, másrészt a gravitációs erő megváltozása miatti  $mhg_{xz}$  erő hatását (8. ábra), amely miatt  $v_2$  elfordulás keletkezik. A teljes  $v/w$  hányados tehát  $(v_1 + v_2)/w$ . Amennyiben a tömeg kicserélése után sem az  $mhg_{xz}$ , sem az  $mhg_{yz}$  erő nem változott meg, akkor  $v_2$  és  $w$  értéke azonos marad, tehát a hányados változása valóban csak a  $v_1$  változását, vagyis az anyagi minőségi tényező változását tükrözi.



9. ábra EPF-mérési stratégia Eötvösök 3. módszere szerint

Figure 9 EPF measurement strategy according to the 3rd method of Eötvös'

A (10) összefüggésből látható, hogy a  $g_{xz}$  gradiens megváltozása az EPF-kísérlet során befolyásolja, akár meg is hamisíthatja a kapott eredményt.

**Az EPF mérések 3. módszerét** alkalmazva a  $g_{xz}$  gradiens megváltozása sem hat a kísérlet eredményére. Ezt Eötvösök úgy érték el, hogy kettős torziós ingával végeztek szimultán méréseket a kétfajta tömeggel. A továbbfejlesztett Eötvös-ingákban (pl. Eötvös–Pekár-, Auterbal-, E54-ingákban) már két (I. és II. jelű) antiparalel ingatesetet helyeztek el. Így a  $g_{xz}$  esetleges időbeli változása azonos mértékben hat a két tömegrre, az elcsavarodások (pontosabban a  $v/w$  hányadosok) különbségéből a hatás kiesik. A szimultán mérést megismételték a két inga között felcserélve a tömegeket. Ezzel elérték, hogy a két inga kismértékben eltérő paraméterei és beállításai ne befolyásolják a végeredményt.

A 3. módszer szerinti EPF-mérések a tömegek cseréjével és az inga meghatározott sorrendű forgatásával a 9. ábrán látható mérési sorrendben történnek.

Az 1. lépésben a II. inga lelógatott aranyból készült tömegét kicseréljük egy ugyanolyan tömegű pl. alumínium tömegrre, és az  $\hat{E}-D$  irányba ( $\alpha = 0^\circ$  azimutba) állított ingaszerkezeten leolvassuk az ingák nyugalmi helyzetét.

A 2., 3. és 4. lépésben  $\alpha = 90^\circ, 180^\circ$  és  $270^\circ$  azimutba elfordítva a teljes ingaszerkezetet szintén leolvassuk az ingakarok nyugalmi helyzetét.

Az 5. lépésben visszaforgatjuk az ingaszerkezetet  $\alpha = 0^\circ$  azimutba, kicseréljük egymással az I. és II. ingarúdról lelógatott tömegeket, és így is leolvassuk a nyugalmi állapotban az ingakarok helyzetét.

Végül a 6., 7. és 8. lépésben az ingakarokon felcserélt tömegekkel elfordítjuk az ingaszerkezetet  $\alpha = 90^\circ, 180^\circ$  és  $270^\circ$  fokos azimutba, és így is leolvassuk az I. és II. ingakar nyugalmi helyzetét.

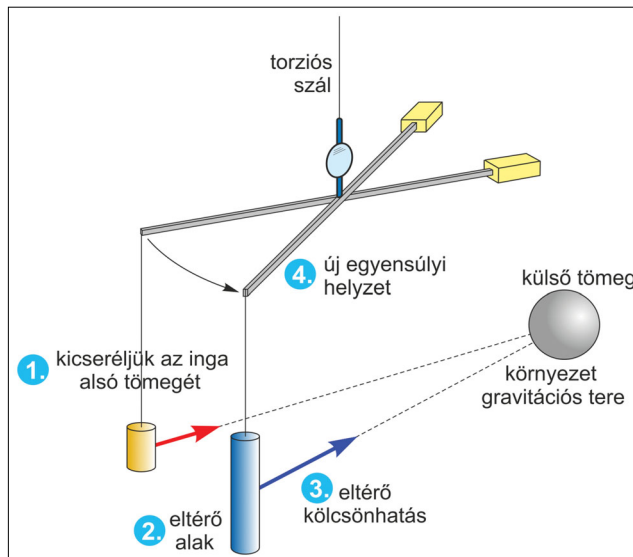
Ezzel a mérési stratégiával a fontos zavaró hibahatások kiejtethők.

### Az EPF-mérések szabályos hibája

A (10) összefüggés mind pontszerű  $m$  tömegrre, mind pedig az EPF-kísérletben alkalmazott homogén sűrűségű henger alakú próbatestekre érvényes abban az esetben, ha az  $l$  és  $h$  távolságok a próbatest tömegközéppontjára vonatkoznak. Abban az esetben viszont, ha a  $g_x$  változása nem egyenletes, vagyis a  $g_x(z) = g_{xz}z$  összefüggés nem írja le pontosan a magasságfüggő változást, akkor ezt a  $g_x(z) = g_{xz}z + g_{xxx}z^2$  másodfokú összefüggéssel lehet jól közelíteni. Ekkor például henger alakú próbatestre – amelyeket Eötvösök is használtak a kísérletek során – a teljes erőhatást a módosított  $g_x(z)$  függvény  $z$  szerinti integrálásával lehet meghatározni, és így a (10) képlet a

$$v_2 = -(2/\tau)m l [hg_{xz} + (h^2 + H^2/12)g_{xxx}] \quad (12)$$

szerint módosul, ahol  $H$  a henger alakú próbatest magasságát jelöli (Tóth 2019).



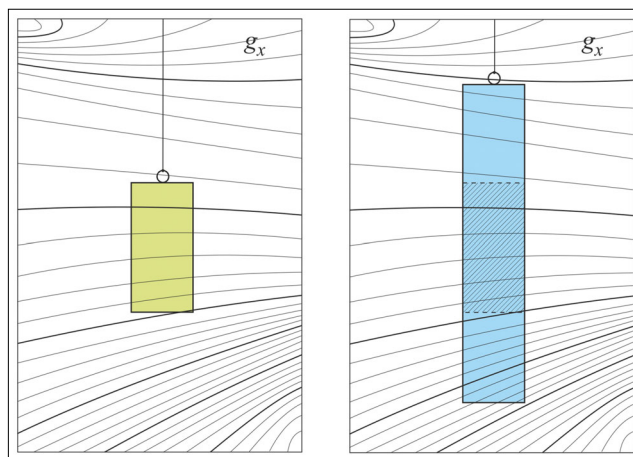
**10. ábra** A próbatest alakjának változása miatt megváltozik a külső tömegek okozta gravitációs kölcsönhatási erő, ezért az inga új egyensúlyi helyzetbe kerül

**Figure 10** Depending on the shape of the mass, the gravitational interaction between the torsion balance and the external masses is different, so the torsion balance is stabilized in another equilibrium position

Ez a (12) összefüggés arra figyelmeztet, hogy *nem lineárisan változó  $mg_x$  nehézségi erőtér esetén az EPF-mérésekben szabályos hiba fog jelentkezni, mert a fellejő nyomaték és a  $v_2$  elfordulás a próbatest  $H$  magasságától is függ!*

Az eredeti EPF-kísérletben az inga alsó henger alakú tömegét különböző anyagú próbatestekre cserélték ki, így a próbatestek  $H$  magasságai lényegesen eltértek egymástól (például a Pt-henger magassága 6 cm, a magnárium (Mg-Al ötvözet) hengeré 11,9 cm, a kígyófaból készült hengeré pedig 24 cm volt).

A próbatest alakjának változása miatt megváltozhat a külső tömegek okozta gravitációs kölcsönhatási erő, ezért



**11. ábra** Ugyanabban az erőterben különböző méretű tömegekre más erő hat, ha a  $g_x$  térbeli változása nem lineáris

**Figure 11** In case the spatial change of the  $g_x$  is not linear effective gravitational forces in the same gravity field are depending on the size of the body



az inga szükségszerűen új egyensúlyi helyzetbe kerül még akkor is, ha az ekvivalenciaelv sem sérül, és a külső tömegek sem változnak meg (lásd a 10 ábrát).

Ennek az egyszerű magyarázatát a 11. ábrán láthatjuk. Ha a  $g_{zz}$  gradiensnek a térbeli változása szabálytalan (nem lineáris) az inga felfüggesztett tömegének környezetében, akkor az ábra bal oldalán lévő nagyobb sűrűségű, kisebb térfogatú tömegről más eredő erő hat, mint a jobb oldali kisebb sűrűségű, nagyobb térfogatú tömegről, amely egy része más erőterésben van. Változó sűrűségeloszlású külső tömegek közvetlen környezetében ez a hatás számottevő lehet, ugyanakkor teljesen szabályos, lineárisan változó erőterésben nem lenne ilyen hatás, itt a különböző méretű tömegekre azonos eredő erő hatna.

A (7) és a (12) képletekből látható, ha az alsó tömeg kicserélése után a próbatest magassága  $H$ -ról  $H'$ -re változik, akkor emiatt

$$\eta = g_{zz}/(12T \sin \epsilon) [H^2 - H'^2] \quad (13)$$

nem zérus anyagi tényező adódik, vagyis látszólag sérül az ekvivalenciaelv.

Fontos kérdés, hogy az EPF-mérések esetében mekkora szabályos hibát okoz, ha az inga cserélgetett tömegei nemlineáris  $g_{zz}$  gradiensű térben vannak.

A szabályos hiba a (13) összefüggés szerint egyenesen arányos  $g_{zz}$  értékével, amely egyébként a  $g_x$  összetevő magasság szerinti nemlineáris változásának mértékét jellemzi. Tapasztalataink szerint a nagy sűrűségkülönbségű határfelületek közelében legnagyobb a  $g_{zz}$ , vagyis itt a legnagyobb a nemlinearitás mértéke, itt változik a legmarkánsabban a  $g_x$  összetevő (Völgyesi, Ultman 2010). Akár kisebb tömegek is okozhatnak erős nemlinearitást, ha túl közel vannak a mérések helyszínéhez.

Sajnos az eredeti EPF-mérések helyszínéről nincsenek információink, sem az eredeti mérési jegyzőkönyvek, sem a kísérlet helyszínéről készült rajzok nem állnak rendelkezésre, így utólag a gradienshatást sem tudjuk pontosan meghatározni. A mérések és modellszámítások szerint viszont falak, padló vagy nagyobb tömegek közelében a  $g_{zz}$  értéke elérheti akár a  $0,5\text{--}3 \text{ nGal/cm}^2$  értéket is, így a kísérlet eredményében jelentkező hatás zérus értéktől egészen a  $8 \cdot 10^{-8}$  értékig terjedő tág tartományban változhat az erőteréstől és a hengerek alakjától függően (Tóth 2019). Az EPF-kísérlet eredményeit, az Eötvösök által kiszámított  $\eta = \pm 1 - 6 \cdot 10^{-9}$  értékeket (Eötvös et al. 1922) ez a szabályos hiba elérheti, sőt kedvezőtlen esetben meg is haladhatja (Tóth 2019).

Az ekvivalenciakísérlet megismétlése tehát nemcsak azért indokolt, mert további szempontokat adhat a Fischbach és munkatársai által az EPF-kísérletben talált kötési energiától függő szabályos eltérés okára, hanem azért is, hogy ellenőrizzük a próbatestek alakjától függően jelentkező szabályos hatás befolyását a mérési eredményekre. Szerencsére a szabályos hiba viszonylag könnyen kezelhető a próbatestek alakjának célszerű megválasztásával. Ha ugyanis olyan henger alakú próbatömegeket használunk a kísérletben, amelyek esetében a  $H^2/12 - R^2/4$  értéke



12. ábra A mérésekre kész műszerek a BME Általános- és Felsőgeodézia Tanszékén. Balra hátul az Auterbal-, jobbra elől az Eötvös–Pekár-inga

Figure 12 Torsion balances at the Department of Geodesy and Surveying of BME. On the left side of the picture the Auterbal, and the right side the Eötvös–Pekár torsion balance can be seen

állandó, akkor ez a szabályos hiba – függetlenül a gravitációs erőter szerkezetétől – az EPF-mérésekben nem jelentkezik (Tóth 2019). Természetesen a magasabbrendű effektusok és minden más hibaforrás nagyságát meg kell becsülnünk.

## Előkészületek az EPF-mérések megismétlésére

A tervezett mérések céljára két különböző típusú műszert találtunk alkalmasnak: a BME Általános és Felsőgeodézia Tanszékének Eötvös–Rybár-féle Auterbal- (Automatic Eötvös–Rybár Balance) ingáját, illetve az MTA CSFK Geodéziai és Geofizikai Intézetének Eötvös–Pekár-féle torziós ingáját, az ún. Small original Eötvös G-2 műszert. A 12. ábra bal oldalán látható Auterbal-ingát az 1920-as években fejlesztették ki Rybár István, Eötvös későbbi utóda vezetésével a Kísérleti Fizikai Tanszéken. A korábbi ingákhoz képest az azimutonkénti 40 percre csökkentett észlelési idő mellett a legjelentősebb fejlesztés a műszer forgatásának rugós óraszerkezettel történő megoldása és a műszer leolvasási értékeinek fotografikus rögzítése volt (Szabó 1999). Az automatikus leolvasás lehetővé tette az inga felügyelet nélküli működését, ugyanakkor a kényes óraszerkezet gyakori meghibásodásai miatt a műszer folyamatos figyelmet igényelt.



A 12. ábra jobb oldalán látható Eötvös–Pekár-inga fejlesztése esetében Pekár Dezső a méretek és a lengésidő csökkentésére törekedett, és a műszerek egyszerűségének megőrzésére helyezve a hangsúlyt, maradt a pontosabb és megbízhatóbb vizuális leolvasás mellett. A Pekár által fejlesztett ingák Eötvös–Pekár-ingaként ismertek, de a hivatalos típusjelzésük Small original Eötvös G-2 volt (Szabó 1999). A műszert három változatban gyártották, amelyek alapvetően csak a torziós szál hosszában különböztek egymástól. Az 1926-ban gyártott műszerekben a szál hossza még 50 cm, az 1928-as típusú készülékekben 40 cm, az 1930-as ingákban pedig már csak 30 cm volt. Az Auterbal- és mindhárom Eötvös–Pekár-inga érzékenysége is meg egyezik az EPF-mérésekre használt ingák érzékenységeivel, köszönhetően a közben lezajlott fejlesztéseknek, azaz kb. 1 E.

Mivel a rendelkezésünkre álló ingákat igen régen használták, az első fontos lépés az ingák felújítása, javítása, használhatóságuk ellenőrzése, az ún. beszabályozása és kalibrálása volt (Völgyesi et al. 2009). Mindez hosszú hónapokat vett igénybe. A torziós szálak csavarodási driftjének minimálisra csökkentése céljából a szálakat közel egy éven keresztül folyamatosan terheltük az ingák kioldott helyzetében. A szálak hosszú idejű terhelésével a Pekár-inga esetében sikerült elérni mindkét szál közel driftmentes állapotát, míg az Auterbal-ingának egyelőre csak az egyik torziós szála érte el a szinte teljes driftmentes helyzetet. Ettől persze az Auterbal-inga is alkalmas mérésekre, mivel a drift a mérések kiértékelése során egyszerűen korrekcióba vehető, de a szélső pontosságot igénylő EPF-mérések céljára szerencsésebbnek látszott a Pekár-inga használata. Ráadásul mivel az EPF-mérések megismétlése tekintetében döntő szempont az ingában lévő tömegek egyszerű cserélhetősége, ezért az EPF-mérések céljára egyértelműen a 30 cm szálhosszúságú Pekár-inga mellett döntöttünk, és a további fejlesztéseket elsősorban erre az eszközre koncentráltuk.



13. ábra | Talajrezgések regisztrálása *Güralp* 3T 3 tengelyű szeizmográf-fal az inga szomszédságában  
 Figure 13 | Registering microseismic vibrations with *Güralp* 3T 3-axis seismograph next to the torsion balance

A sikeres mérések legfontosabb követelménye a méréseket zavaró körülmények minél teljesebb kiiktatása. Az EPF-méréseket leginkább veszélyeztető hibaforrások: a műszert leolvasó észlelő zavaró tömege, a talajrezgések, a hőmérséklet változása és a nehézségi erőtér gradienseinek magas értéke az inga környezetében. Az utóbbi probléma egyszerűen kezelhető a megfelelő helyszín kiválasztásával és a nehézségi erő potenciáljának második deriváltjait tartalmazó Eötvös-tenzor elemeinek pontos feltérképezésével a műszer környezetében. Megfelelő helyszín kiválasztásával a környezeti hőmérséklet stabilitása és elsősorban a forgalom okozta talajrezgések is kiküszöbölhetők, ezért választottuk a mérések helyszínéül a KFKI Jánossy Földalatti Fizikai Laboratórium 30 m-es mélységben lévő földalatti folyosóját. Előzetes méréseink szerint a helyszín hőmérsékleti stabilitása megfelelő, a napi változás mindössze néhány század fok és a mikroszeizmikus talajnyugtalanság is megfelelően alacsony, amit a 13. ábrán látható *Güralp* 3T háromtengelyű, szélessávú szeizmográf-fal folyamatosan regisztrálunk az inga szomszédságában.

A mérések legjelentősebb és legveszélyesebb hibaforrása a műszert kezelő és leolvasó személy jelenléte, elsősorban a tömeghatása (Csapó et al. 2009). Ugyanakkor a jelenlétével a hőmérsékleti egyensúlyt is megbontja, és mozgásával egyértelműen érzékelhető talajrezgéseket kelt, sőt a tapasztalat szerint a műszer parányi megdőlését is okozza. A hibaforrás a közvetlen emberi jelenlét kiküszöbölésével, a mérési folyamat teljes automatizálásával, távvezérelt méréssel oldható meg. Ehhez szükséges a vizuális leolvasás helyett megfelelő CCD érzékelők alkalmazásával és számítógépes képiértékeléssel történő digitális műszerleolvasás, valamint az inga különböző mérési azimutokba forgatásához távvezérelt motor alkalmazása.

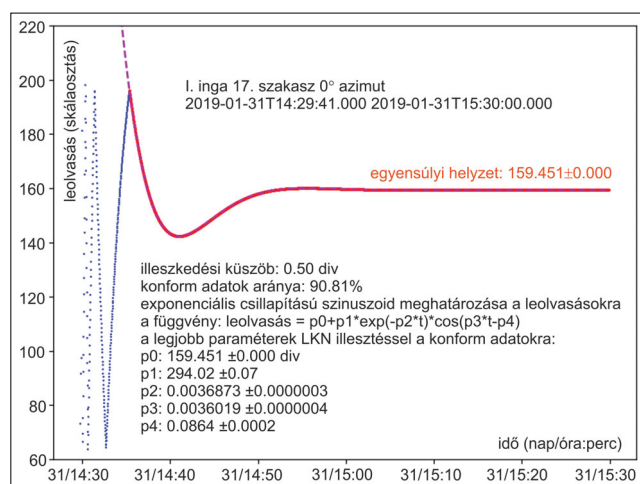


14. ábra | Az inga leolvasóberendezésének automatizálása  
 Figure 14 | Reading the scale of the torsion balance has been automated

A Pekár-inga vizuális leolvasásra szolgáló okulárjának helyére CCD érzékelőt szerelve az inga karjának helyzetét a keletkezett digitális kép kiértékelésével tudjuk meghatározni (14. ábra). Vizsgálataink szerint megfelelő felbontású CCD kamerát alkalmazva az elektronikusan rögzített képen a kinagyított skála egy osztása 25–30 képpont nagyságú részt foglal el. Alkalmos képkiértékelési eljárással egy képpont tört részének megfelelő helyzet is meghatározható, így a várható leolvasási pontosság egy képből nagyjából  $1/100$  skálaosztás ( $10^{-10}$ ). Ez már így is egy nagyságrenddel jobb, mint az eredeti vizuális észlelés  $10^{-9}$  pontossága. Ha ehhez hozzávesszük még azt, hogy az inga egyensúlyi helyzetéről másodpercenként több képet készítve néhány perc alatt akár 1000 kép is rögzíthető és kiértékelhető, ez további leolvasási pontosságnövekedést eredményezhet.

Fontos kérdés a mérés során az, hogy a digitális képfeldolgozás kellően gyors és hatékony-e? A relatív skálaelmozdulás két egymást követő kép között képkorrelációval az eredeti skálát használva is gyorsan és pontosan meghatározható. A skála abszolút helyzetének, vagyis a teljes leolvasásnak az automatikus meghatározása már jóval nehezebb, a mesterséges látás alkalmazását igényli, ugyanis fel kell ismerni a skála osztásaihoz tartozó számokat és azok helyzetét is.

Ezért új vonalkódos skálát terveztünk és ehhez kapcsolódó kiértékelési eljárást készítettünk, amely a számítógépes leolvasást jóval egyszerűbbé, hatékonyabbá teszi, ugyanakkor növelni tudja a leolvasási pontosságot is. A vonalkódos hosszmerési technológiát már évtizedek óta sikeresen alkalmazzák különböző geodéziai műszergyártó cégek a nagy pontosságú, szabatos digitális szintezésben. Ennek analógiájára olyan vonalkódos skálát terveztünk, amelynek a CCD-n látható részéből bármilyen leolvasási helyzetben nagy pontossággal és egyértelműen rekonstru-



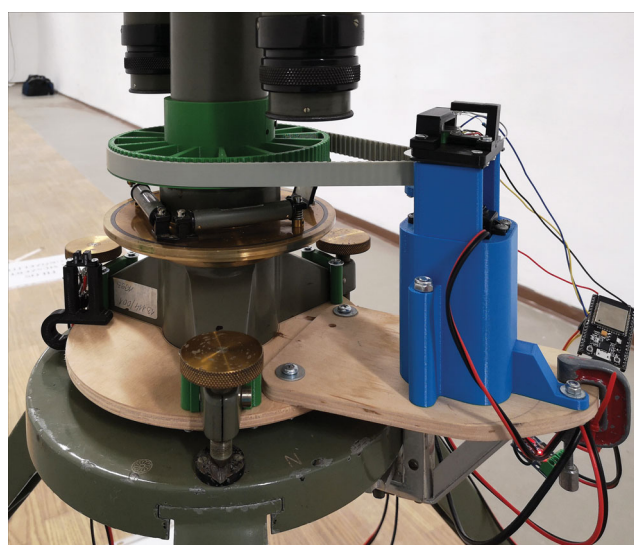
**15. ábra** Az ingakar egyensúlyi helyzetének meghatározása a mozgás csillapodási görbéjének illesztésével. Az ingakar a kezdeti gyors mozgás közben a határolók között ütközik, majd egy közel 1 órás időtartam elteltével nyugalmi helyzetbe kerül

**Figure 15** Determining equilibrium position of the torsion balance's arm by fitting of a damping curve. The arm's movement starts with quick motion and bounces between delimiters, then it settles in the equilibrium position after about 1 hour

álható a skála nullpontjának távolsága, vagyis a keresett skálaleolvasás. Miután a vonalkódos skála hagyományos vizuális észlelésre nem alkalmas, ezért amint a 14. ábra felső részén is látható, kombinált vonalkódos és hagyományos számozott skálákat terveztünk. Így megmarad a hagyományos észlelés lehetősége, ugyanakkor a számítógépes leolvasás számára ideális és gyors vonalkódos kiértékelés is lehetővé válik. A kombinált skálák legyártása lézergravírozással folyamatban van, és amennyiben a pontosságuk kielégíti az igényeinket, akkor ezeket fogjuk alkalmazni a mérés során. Az első vonalkód-gravírozás minősége sajnos messze nem elégtette ki az elvárásainkat, ezért ezt követően részletesen meg kellett ismerkednünk a gyártási technológiákkal, és az új terveket ezek ismeretében kellett kialakítani.

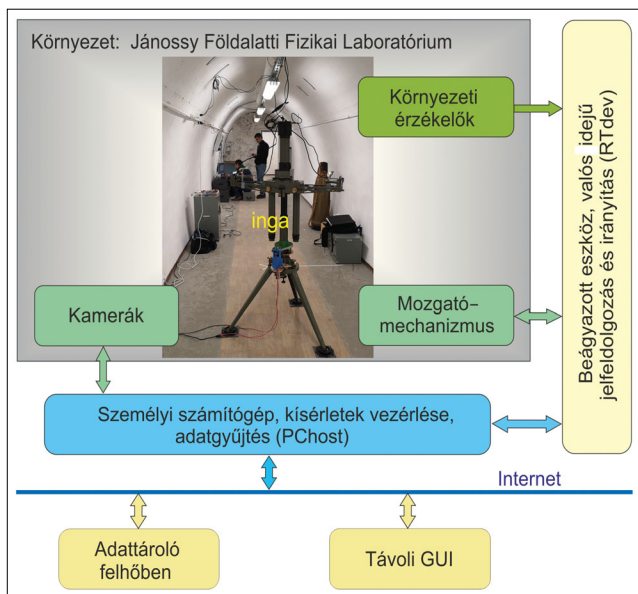
A kísérlet szempontjából lényeges követelmény az inga egyensúlyi helyzetének pontos meghatározása. Az Eötvös-kísérletben az inga egyensúlyi helyzetét az észlelő személy vizuális leolvasással állapította meg az ingakar mozgásának csillapodása után. Az eredeti kísérlettől eltérően az egyensúlyi helyzet meghatározását a leolvasások alapján az ingakar mozgását leíró csillapodási görbe illesztésével valósítjuk meg (15. ábra). Ennek az az előnye, hogy egyrészt több adat alapján pontosabb meghatározást tesz lehetővé, másrészt az ingakar lengésének folyamatos megfigyelése révén az inga mérés közbeni viselkedéséről is fontos információkhoz jutunk.

A mechatronikai megoldások közül a legkritikusabb elem az inga távvezérelt forgatását végző egység elkészítése. Az egységgel szemben támasztott fontos követelmény, hogy a forgatások közötti nyugalmi helyzetben, a mérések közben elkerüljük a forgatómotor és az ehhez kapcsolódó szerkezet által okozott permanens mágneses zavarokat. A motor vezérlését úgy kellett megoldani, hogy az inga  $0^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $180^\circ$ ,  $270^\circ$  azimutokba forgatása pontosan, üzembiztosan, ugyanakkor hirtelen gyorsulások és lassulások nélkül,



**16. ábra** Az inga távvezérelt forgatásának megoldása

**Figure 16** Preliminary solutions for the remote-controlled rotation of the torsion balance



17. ábra | A távvezérelt rendszer felépítése  
 Figure 17 | Structure of the remote control system

a rendkívül érzékeny ingaszerkezet szempontjából kíméletesen, mechanikai sokkhatás nélkül történjen. A forgatás során a megfelelő indulás és megállás az inga lengésének csillapodását is kedvezően befolyásolja, rövidítheti a csillapodáshoz szükséges időt.

Az inga különböző mérési azimutokba forgatásához a 16. ábrán látható szerkezetet készítettük el, a forgatásról speciális motor gondoskodik, az inga szabadon futó felső részével összekötő bordásszíjas hajtáson keresztül. A legtöbb alkatrész 3D nyomtatással készült.

A jelenlegi áttétel 1:10, amelyhez egy 10 és egy 100 fogas tárcsa tartozik a motor, illetve az inga oldalán. A szöghelyzet megfelelő felbontású visszaméréséről optikai elven működő enkódertárcsa és a hozzá kapcsolt optokapuk gondoskodnak a hajtás motoroldali tengelyén. A tárcsa 100 vonalas, ez a dupla fototranzisztoros kialakításnak köszönhetően fordulatonként összesen 400 inkremenst jelent. Mivel az inkeremensek előjeles számlálása a motoroldali tengelyen történik, az áttétel miatt az inga teljes, 360°-os tartományára vonatkoztatva elvileg 0,09°-os felbontást kapunk. Az inga távvezérléssel történő forgatása már megfelelően, rutinszerűen működik, azonban a tapasztalataink szerint az ingakarok azimutjának gyakorlati meghatározási pontossága az EPF-mérésekhez még nem megfelelő. Jelenleg két olyan megoldáson dolgozunk, amely lehetővé teszi az ingakarok helyzetének lényegesen pontosabb meghatározását.

A mérés automatizálását biztosító megoldás architektúrájának vázlatát a 17. ábra mutatja. A beágyazott mikrovezérlőt tartalmazó egység (RTdev) feladata a valós idejű adatgyűjtés az inga környezetében elhelyezett szenzorokról (hőmérséklet, páratartalom, a mágneses tér mérése és kompenzálása stb., igény szerint), a tápellátás monitorozása, valamint az inga mozgóegységének vezérlése, így a szöghelyzet-jeladók kezelése is. A nem időkritikus mű-

veletek személyi számítógépen (PChost) valósulnak meg. Itt történik az automatizált méréshez rögzített, akár mérésenként egyedi módon definiált forgatási szekvenciák végrehajtása, a CCD érzékelőkön az adatgyűjtés vezérlése, a kapott adatok és képek naplózása és mentése, illetve feldolgozása is. A PChost fogadja a kameraképeket is. Itt nem szükséges valós idejű feldolgozás, ugyanakkor a képek rögzítésének pontos időpontját is tárolni kell.

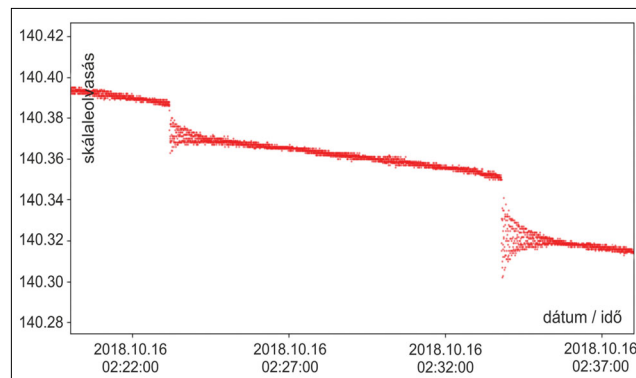
A sikeres mérések fontos követelménye, az inga modernizálásához szükséges egyedi informatikai megoldások mellett különleges alkatrészek precíziós beszerzése és gyártása. A soron következő legnehezebb feladat a megfelelő alakú és tömegű próbatömegek gyártása, valamint megfelelő szálakra függesztése és cseréje. A munka ebben a tekintetben is a tervek szerint halad, az első alumínium és réz próbatestek elkészültek és a felfüggesztő szálak rögzítésére is már vannak sikeres próbálkozásaink.

### Az eddigi mérések és tapasztalatok

A műszerek felújítását követően a torziós szálak csavarodási driftnének csökkentése érdekében a szálakat hosszú ideig terheltük, közel egyéves terheléssel a Pekár-ingánál nagyjából sikerült elérni a szálak közel driftmentes állapotát. A szálak pihentetése után a drift újra jelentkezik, viszont rövidebb pihenés után gyorsabban megszűnik. Ennek szilárdtest-fizikai magyarázata van.

A drift minden eddiginél pontosabb megfigyelését az inga automatizált átalakítása tette lehetővé. A CCD érzékelők alkalmazásával lehetőségünk van másodpercenként több kép rögzítésére, és az általunk készített képkiértékelő szoftverrel század skálaegységnél is nagyobb pontosságú leolvasás lehetséges (az eredeti vizuális leolvasás esetében már a tized skálaegység is bizonytalan).

A drift részletes tanulmányozása során érdekes jelenségre figyeltünk fel. Amint a 18. ábrán látható, az inga lassú elcsavarodása miatt csökken a skálaleolvasások értéke, viszont ebben a lassú csökkenésben ugrásszerű változások is jelentkeznek. Az ugrást követően a zavar hatására az inga kis amplitúdóval lengeni kezd, de ez gyorsan csillapodik.



18. ábra | A torziós szálban terhelés hatására bekövetkező ugrásszerű elmozdulások, szögelfordulások

Figure 18 | Jump-like rotation changes by the load of torsion wire





19. ábra | A felfüggesztő szál hosszának mérése precíziós hosszú szárú tolómérővel

Figure 19 | Measuring the length of the suspension wire by a precision long-stem caliper

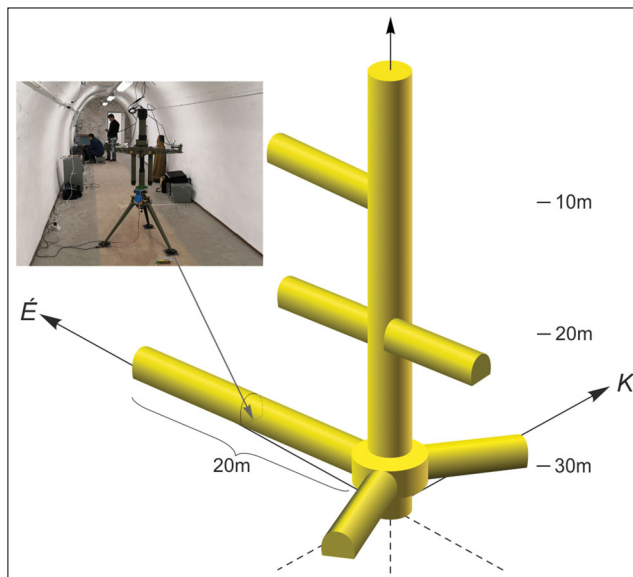


20. ábra | A felfüggesztett tömeg mérése Kern DLB precíziós labor-mérleggel

Figure 20 | Measuring the suspended mass with a Kern DLB precision laboratory balance

A jelenségnek szilárdtest-fizikai magyarázata van, az igen vékony (0,017 mm vastagságú) torziós szálban diszlokációk jelenlétére következtethetünk. A diszlokációk a torziós szál anyagában (kristályrácsában) meglévő szabálytalanságok, rácshibák. Ezek a szabálytalanságok és rácshibák különböző hatásokra (pl. hő- és erőhatásra) átalakulnak, átrendeződnek, a szemcsehatárokon fennakadnak, majd terhelés hatására felszabadulnak; megváltoztatva ezzel az anyag (a torziós szál) mechanikai tulajdonságait. (Eötvösék éppen a hőkezeléssel és a torziós szálak terhelésével érték el a szálakban a diszlokációk átalakítását, csökkentését.) A 18. ábrán a 2018. október 16-i éjszakai regisztrátum rövid kinagyított része látható; a függőleges tengelyen az I. inga skálaleolvasásai, a víz-

szintes tengelyen az idő szerepel. Eddig a torziós szálaknak ez a változása nem volt látható, erre a folyamatos és igen pontos skálaleolvasás adott először lehetőséget. Az általunk kimutatott változások elsősorban a szálak pihenés utáni terhelésekor jelentkeztek. Ez arra utal, hogy a jelenség a régóta ismert Portevin–Le Chatelier-effektus egy változata.



21. ábra | Az EPF-mérések helyszíne a Jánosy Földalatti Fizikai Laboratóriumban. Az Eötvös-ingát 30 m mélységben a közel É–D irányú, 20 m hosszú folyosó közepén állítottuk fel

Figure 21 | The location of the EPF measurements in the Jánosy Underground Laboratory. The torsion balance is set up at a depth of 30 m in the middle of a 20 m long corridor



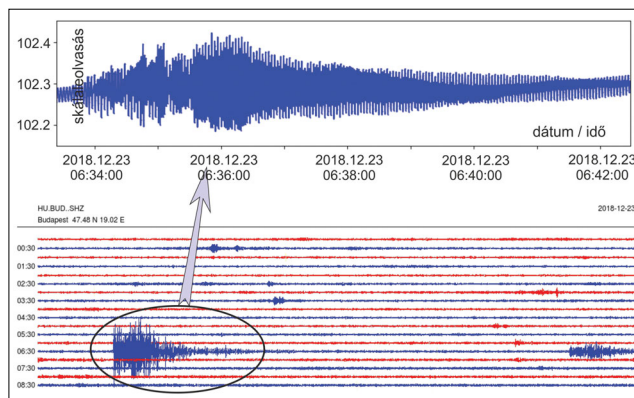
22. ábra | Mérés giroteodolittal a Jánosy Földalatti Fizikai Laboratóriumban a pontos É–D irány meghatározására

Figure 22 | Measuring with gyrotheodolite at Jánosy Underground Laboratory to determine the exact N–S direction

A többé-kevésbé driftmentes állapot elérését követően az ingák pontos beszabályozása, a nullhelyzet beállítása, majd a műszerállandók ellenőrzése következett. A torziós szál  $\tau$  csavarási állandóját és a lengő szerkezet mechanikai tehetetlenségi nyomatékát az inga közelében megfelelően elhelyezett különböző tömegek felhasználása mellett, a lengésidő mérésén keresztül határoztuk meg; a felfüggesztő szálak hosszát 0,05 mm pontosságú speciális tolómérővel mértük (19. ábra), a tömegeket a 20. ábrán látható Kern DLB precíziós labormérleggel 0,001 gramm pontossággal határoztuk meg. Itt kell megjegyeznünk, hogy a  $\tau$  csavarási „állandó” a mérések során (pl. éppen a diszlokációk miatt) folyamatosan változhat. Ennek következtében az EPF-mérések szintjén már nem beszélhetünk a hagyományos értelemben vett „ingakalibrációról” és „inga-állandókról”, mivel mindkettő függ a szál változó csavarási „állandójától” is. Nem véletlen, hogy Eötvösök az EPF-kísérlet 2. és 3. módszerében igyekeztek kiejteni a csavarási „állandó” változásának hatását.

Az Auterbal- és az Eötvös-Pekár-ingák felújítását és átalakítását követően a kalibrációs összehasonlító mérésekre a BME Oltay-féle főalappontján (Ádám et al. 2018) került sor, ahol mindkét ingával több 5 azimutos mérést végeztünk a gradiensek meghatározása céljából. A két különböző ingával mért gradiensek az elvárt mértékben megegyeztek, az  $U_{xz}$ ,  $U_{yz}$  horizontális gradiensek néhány tized E, az  $U_{\Delta}$ ,  $2U_{xy}$  görbületi gradiensek 1 E nagyságrendben tértek el egymástól.

2018-ban az ingák BME-n végzett fejlesztésével és a tesztmérésekkel párhuzamosan, a mérések végleges helyszínén, a Wigner FK Jánossy Földalatti Fizikai Laboratóriumában is folytak az előkészületek. Az EPF-méréseket a

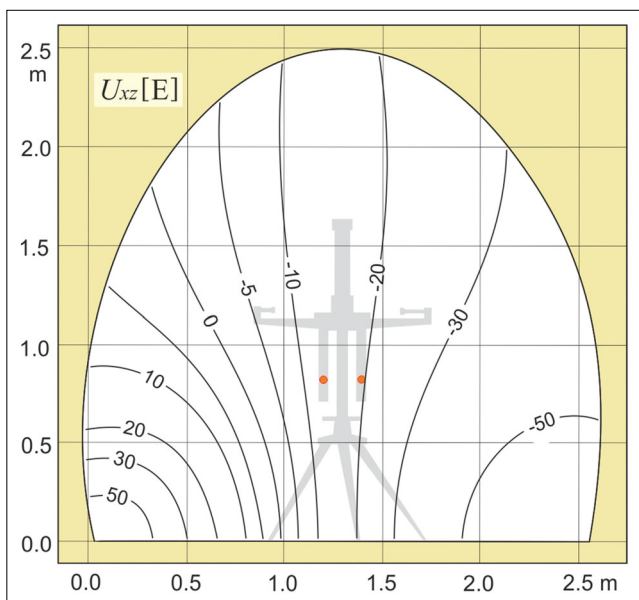


23. ábra Szerbiai földrengés felületi hullámai. Az ábra felső részén az Eötvös-ingával regisztrált kép, alatta a budapesti Kövesligethy Radó Szeizmológiai Observatórium felvételének egy részlete

Figure 23 Surface waves of Serbian earthquake. In the upper part of the figure is the registered picture by the torsion balance, below is the seismogram of the Kövesligethy Radó Seismological Observatory

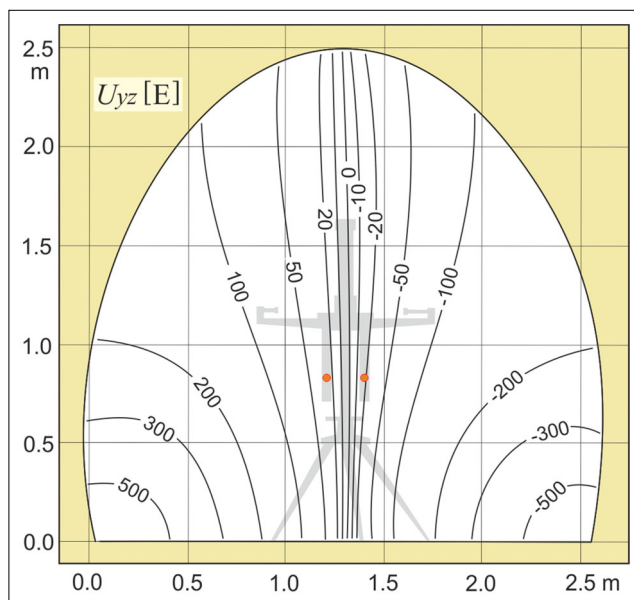
21. ábrán látható akna 30 m mélységben lévő közel É-D irányú, 20 m hosszúságú folyosója közepén terveztük.

A megfelelő elektromos hálózat és internetkapcsolat kiépítését követően elkészült a mélyakna légkondicionálása, megtörtént a digitális hőmérők, páratartalom-mérő és szeizmográf telepítése. A mérések céljára átalakított Eötvös-Pekár-inga 2018. december 20-án került a Jánossy Földalatti Fizikai Laboratóriumba. A tesztmérések elkezdése előtt giroteodolitos méréssel szögmásodperc megbízhatósággal meghatároztuk az EPF-mérésekhez szükséges pontos É-D irányt (22. ábra).



24. ábra Modellszámítással meghatározott  $U_{xz}$  gradiensek a Jánossy Földalatti Fizikai Laboratóriumban a mérési pont szelvényében

Figure 24 Calculated gravity gradients  $U_{xz}$  in the section of the measuring point in the Jánossy Underground Laboratory



25. ábra Modellszámítással meghatározott  $U_{yz}$  gradiensek a Jánossy Földalatti Fizikai Laboratóriumban a mérési pont szelvényében

Figure 25 Calculated gravity gradients  $U_{yz}$  in the section of the measuring point in the Jánossy Underground Laboratory

Röviddel a tesztmérések megkezdése után a 23. *ábra* felső részén látható szokatlan hullámokra lettünk figyelmesek az Eötvös-ingamérések során rögzített felvételeken. Mivel a hullámok hasonlítottak a földrengések esetén regisztrált felületi hullámokhoz, ellenőriztük, hogy a kérdéses időben valóban keletkezett-e olyan földrengés, amely a jelenséget okozhatta. Egyértelműen kiderült, hogy az Eötvös-ingával valóban földrengést regisztráltunk, ugyanis 2018. dec. 23-án reggel 06:34-kor Szerbiában, Belgrád közelében pattant ki az  $M = 4,3$  magnitúdójú, kis fészekmélységű rengés, amelynek a hullámai Budapest területén is észlelhetők voltak. A 23. *ábra* alsó részén az MTA Budapesti Kövesligethy Radó Szeizmológiai Observatóriuma által regisztrált felvétel egy részlete látható, ahol megjelöltük a szerbiai rengés felületi hullámait. A földrengést a laborban telepített szeizmográfunk is mérte. Nagy biztonsággal állítható tehát, hogy az Eötvös-inga történetében először sikerült az ingával földrengés-hullámokat regisztrálnunk.

Az előző részekben láthattuk, hogy az EPF-mérések eredményeit veszélyesen befolyásolhatják a nehézségi erőter ismeretlen gradiensei. A nehézségi erő gradienseinek nemlinearitása az egykori EPF-mérések ismeretlen szabályos hibáját okozhatta. Ezen kétféle úton lehet segíteni: vagy megfelelő mérési technika alkalmazásával, vagy a nehézségi erőter gradienseinek ismeretében megfelelő korrekciós számításokkal. Bármelyik lehetőséget (akár a kettőt együtt is) használjuk, szükséges az inga felfüggesztett tömegeinek környezetében a nehézségi erőter gradienseinek pontos ismerete. Ezeket a gradienseket kétféleképpen határozhatjuk meg: modellszámításokkal és mérésekkel. Az EPF-mérések szempontjából kritikus  $U_{xz}$ ,  $U_{yz}$  gradiensek modellszámításokkal meghatározott eloszlását a Jánossy Földalatti Fizikai Laboratóriumban a mérési pont szelvényében a 24. és a 25. *ábrán* láthatjuk. Az *ábrán* feltüntettük az inga árnyképét is, így jól látható a gradiensek értéke és eloszlása az inga felfüggesztett tömegeinek környezetében.

A tesztméréseket követően mérésekkel is meghatároztuk a gradiensek értékét a mérési pont környezetében. Legkevesebb 3-3 darab, öt azimutos mérést végeztünk a mérési ponton, a mérési ponttól 15 cm távolságra É, D, K és Ny irányban, valamint az ingát 30 cm magasságra felemelve is mértünk.

A méréssel meghatározott  $U_{xz}$  gradiens  $-15,2$  E volt, az  $U_{yz}$  pedig  $-14,4$  E. A számított és mért  $U_{xz}$  gradiensek eltérése  $1,0$  E, az  $U_{yz}$  gradiense pedig  $15,9$  E. Az  $U_{yz}$  viszonylag nagy eltérése nem meglepő, a 24. *ábrán* is látható nagy oldalirányú változás miatt. Ezt a változást a K-i irányban 15 cm-rel áthelyezett ingával megmérve az  $U_{yz}$  különbség  $-24,4$  E-nek adódott, tehát a mért változás 10 cm-en ke-reken  $-16$  E értéket tesz ki.

Az inga átalakítását követően, az eddigi tesztmérések tapasztalatai alapján bizakodva tekintünk az EPF-mérések megismétlése elé, bízunk a mérések sikerében és eredményességében.

## Összegezés

Eötvös Loránd munkatársaival a súlyos és a tehetetlen tömeg arányosságára vonatkozóan elvégzett kísérletsorozatban apró, a hibahatárt alig meghaladó eltéréseket kaptak. Az Eötvösék méréseiben általunk feltárt szisztematikus hiba a nehézségi erőter gradienseinek olyan magasabb rendű hatása miatt lép fel, amelyet az alkalmazott minták alakjától függő erőhatást okoz. A mérésekben talált szisztematikus hibalehetőség indokoltá teszi a mai korszerű technikai lehetőségek által kínált jobb feltételek mellett a kísérletek megismétlését.

2017 júniusában a Wigner Fizikai Kutatóközpontban döntés született az EPF-mérések Eötvös-ingával történő, megismétlésére és az esetleges eltérések tényleges okának feltárására. A mérésekben és ezek előkészületeiben az MTA Wigner Fizikai Kutatóközpontja, a BME Általános és Felsőgeodéziai Tanszéke, az Egyesület a Tudomány és Technológia Egységéért (ETTE), a BME Irányítástechnika és Informatika Tanszéke vesznek részt más további szervezetek, tanszékek és szakértők bevonásával.

A méréseket a KFKI területén lévő Jánossy Mélyaknában, 30 m mélységben, megfelelő nyugalmi körülmények és kontrollált feltételek között tervezzük.

A mérések előkészületi munkái több mint egy éven keresztül folytak a BME Általános és Felsőgeodéziai Tanszékén. Az EPF-mérések céljára szolgáló Eötvös–Pekár-inga átalakítása megtörtént, a távvezérelt forgatómechanika működik, a CCD érzékelők a megfelelő skálavilágítással kiválóan alkalmasak a mérésekre, a szükséges vezérlő- és kiértékelőszoftverek döntő részét megírtuk és teszteltük, a Jánossy Mélyakna felújítása befejeződött.

A mérések céljára átalakított Eötvös–Pekár-inga 2018. december 20-án került a Jánossy Mélyaknába, ahol azóta a legfontosabb tesztmérések megtörténtek.

Jelenleg az inga működésének, valamint a vezérlő- és kiértékelőszoftvereknek a „finomhangolása” folyik, és további fontos tesztmérések is folyamatban vannak. Megoldandó feladat még a próbatömegek rutinszerű cseréjének kidolgozása. A napokban készültek el az igen pontosan megmunkált első alumínium- és réztömegek, az elkövetkező napok kritikus feladata a megfelelő hosszúságú felfüggesztő szálak rögzítése a tömegekhez.

Elképzeléseink szerint a tényleges EPF-méréseket a Jánossy Földalatti Fizikai Laboratóriumban 2019 februárjában tudjuk elkezdni. A kísérleteink célja, hogy az EPF-mérések pontosságát legalább egy nagyságrenddel javítva megmutassuk, hogy az azokban feltárt rejtélyes szisztematikus hibát valóban gradienshatás okozta-e, vagy esetleg valamilyen speciális, a Föld forgásához kötött ekvivalenciaelv-sértés történik. Az újabb torziós ingás méréseket nem pontosan az Eötvös-inga módszerével végezték, ezért ekvivalenciaelv-sértés sem zárható ki (Fischbach 2019).

## Köszönetnyilvánítás

A mérések alpműszere, az Eötvös–Pekár-inga az MTA CSFK Geodéziai és Geofizikai Intézet tulajdona. Ezúton

fejazzük ki köszönetünket az intézet vezetőinek, hogy a műszert a méréseink céljára a rendelkezésünkre bocsátották. Köszönjük továbbá Lévai Péternek, a Wigner FK főigazgatójának, továbbá Barnaföldi Gergelynek és Somlai Lászlónak a Jánosy Földalatti Fizikai Laboratórium laborvezetőinek segítő közreműködését. Kutatásaink részben a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal – NKFIH No. 124286 támogatásával folytak.

#### A tanulmány szerzői

Völgyesi Lajos, Szondy György, Tóth Gyula, Péter Gábor, Kiss Bálint, Deák László, Égető Csaba, Fenyvesi Edit, Gróf Gyula, Ván Péter

#### Hivatkozások

Ádám J., Rózsa Sz., Tóth Gy., Völgyesi L. (2018): Magyarország 100 évvel ezelőtt létesített első gravimetriai főalappontjának újramérése a Műegyetemen. *Geodézia és Kartográfia*, 70(2), 4–14.

Eötvös R., Pekár D., Fekete J. (1922): Beiträge zum Gesetze der Proportionalität von Trägheit und Gravität. *Annalen d. Physik*, 11–66.

Braginsky V. B., Panov V. I. (1971): Verification of Equivalence Principle of inertial and Gravitational Mass. *Zh. Eksp. Theor. Fiz.*, 61, 873.

Csapó G., Laky S., Égető Cs., Ultmann Z., Tóth Gy., Völgyesi L. (2009): Test measurements by Eötvös-torsion balance and gravimeters. *Periodica Polytechnica Civil Eng.*, 53(2), 75–80.

Fischbach E., Sudarsky D., Szafe A., Talmadge C., Aronson S. H. (1986): Reanalysis of the Eötvös experiment. *Physical Review Letters*, 56(11), 3.

Fischbach E. (2019): The enduring significance of Eötvös' most famous experiment, arXiv:1901.11163.

Franklin A., Fischbach E. (2016): *The rise and fall of the fifth force: Discovery, pursuit, and justification in modern physics.* Springer, 2016.

Király P. (2007): A 100 éves Eötvös–Pekár–Fekete-kísérletek és máig tartó hatásuk. *Fizikai Szemle*, 57(1), 1–6.

Patkós A. (2019): Eötvös Loránd időszerűsége – 1. rész. *Fizikai Szemle*, 69(1), 6–12.

Perjés Z. (2005): Precíz gravitációs kísérletek. *Fizikai Szemle*, 55(2), 45–48.

Péter G., Deák L., Gróf Gy., Kiss B., Szondy Gy., Tóth Gy., Ván P., Völgyesi L. (2019): Az Eötvös–Pekár–Fekete ekvivalenciaelmérések megismétlése. *Fizikai Szemle*, 69(4).

Renner J. (1935): Kísérleti vizsgálatok a tömegvonzás és tehetetlenség arányosságáról. *Matematikai és Természettudományi Értesítő* 13, 542.

Renner J. (1964): Az Eötvös-kísérlet. *Fizikai Szemle*, XIV, 6–10.

Roll P. G., Krotkov R., Dicke R. H. (1964): The equivalence of inertial and passive gravitational mass. *Ann. Phys.* 26, 442.

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

Tóth Gy. (2019): Az Eötvös–Pekár–Fekete ekvivalenciamérések szabályos hibája. *Fizikai szemle* 69(5).

Völgyesi L., Égető Cs., Laky S., Tóth Gy., Ultmann Z. (2009): Eötvös-inga felújítása és tesztmérések a budapesti Mátyás-hegyi-barlangban. *Geomatikai Közlemények*, 12, 71–82.

Völgyesi L. (2005): A nehézségi erőttel kapcsolatos fizikai alapfogalmak áttekintése. *Geomatikai Közlemények* 8, 175–179.

Völgyesi L., Ultman Z. (2010): A nehézségi gradiensek linearitás vizsgálata a Mátyás-barlangban. *Geomatikai Közlemények*, 13(2), 123–128.

Will C. M. (2014): The confrontation between general relativity and experiment. *Living Reviews in Relativity*, 17.1, 4. (arXiv:1403.7377)



# Geodinamika a Kárpát-Pannon régióban

KISS J.<sup>@</sup>, ZILAHÍ-SEBESS L.

Magyar Bányászati és Földtani Szolgálat (MBFSZ),  
1145 Budapest, Columbus u. 17–23., Hungary  
<sup>@</sup>E-mail: kiss.janos@mbfsz.gov.hu

A litoszférolemezek mozognak, vízszintesen (kontinensvándorlás) és közel függőlegesen (forrópontok, szubdukciók, riftzónák) a mélybeli konvekciós áramlások meghajtó erejének hatására. A mozgás és a mozgás hatására kialakuló változások az erő nagyságától, irányától és a litoszférolemezek tulajdonságaitól függenek. A tulajdonságok nem abszolút értelemben, hanem sokkal inkább relatívan, egymáshoz viszonyítva értendők. Ahhoz, hogy megértsük a jelenséget, meg kell ismernünk pontosan a mozgatóerő eredetét és a mozgásban részt vevő lemezek tulajdonságait.

Cikkünk a Kárpát-Pannon régió mélyfúrási és földregézési adataiból meghatározott feszültségtérnek, az űrgeodéziai GPS-mérésekből kapott recens lemezmozgásnak, a szeizmológiai mérések által meghatározott gyors hullámterjedési irányoknak és gravitációs geofizikai mérési eredményeknek a figyelembevételével következtet a térség geodinamikai folyamataira és azok eredetére. Napjaink megfigyelési eredményei alapján azt vizsgálja, hogy milyen mozgások és meghajtó erők játszhattak szerepet a Kárpát-Pannon régió kialakulásában.

## Kiss, J., Zilahi-Sebess, L.: Geodynamics in the Carpathian-Pannonian Region

The lithospheric plates are moving horizontally (continental drift) and almost vertically (hotspots, subductions, rift zones) because of the driving force of deep convection flows. The moves and the changes connected to this moves depend on the strength and direction of the driving force and on the physical parameters of the moving lithospheric plates. That dependence should be understood not in an absolute but rather in a relative meaning, relative to each other. To understand this phenomenon we have to know the source of driving force and the physical parameters of the lithospheric plates.

The paper draws conclusions for the geodynamic processes and their origins of the Carpathian-Pannonian region from the current crust movements obtained from space geodesic GPS measurements, from the rapid shear wave splitting directions determined by seismological measurements, from the results of gravity measurements, and from the stress and strain fields based on the deep drilling and earthquake data of the region. On the basis of today's observation results, it examines what kind of movements and driving forces could play a role in the development of the Carpathian-Pannonian region.

*Beérkezett:* 2018. december 2.; *elfogadva:* 2019. március 13.

## Bevezetés

A Kárpát-Pannon régió gravitációs adatai és az izosztikus jelenségek együttes vizsgálata lehetőséget adott a Kárpát-medence és környéke kialakulásának újfajta fizikai megközelítésére. Ebben az új elképzelésben persze sok a régi információ, de van benne új is, és persze vannak olyan feltételezések, amelyek még bizonyításra, megerősítésre várnak.

A földtani folyamatok a fizika törvényeinek megfelelően folynak, amit röviden a következőképpen lehetne összefoglalni: *törekvés egy magasabb potenciálú (labilis) állapotból egy alacsonyabb potenciálú (stabil) állapot felé, azaz az energiaminimum-állapotra.*

A Földön minden változás az egyensúly megteremtése céljából történik, mégis saját szemszögünkből nézve különböző jelzőkkel illetjük ezeket, romboló-építő, elsődleges-másodlagos vagy – éppen Newtonig visszatekintve – akció-reakció. Pedig, ha nem egyoldalúan, hanem több oldalról az egész folyamatot vizsgáljuk, akkor a jelenségek jelentős része kiegyenlítődéssé, ami valamilyen szempontból az egyensúlyi állapot elérése, visszaállítása céljából történik. A kiegyenlítődéssé folyamat időnként egy másik állapot egyensúlyának a megbomlásához vezet és fordítva. Áttételesen itt is igaz a mondás, hogy „a nagy hal megeszti a kis halat”, azaz először a rövid karakterisztikus idejű, domináns egyensúlytalanságok egyenlítődnének ki. Ezzel kapcsolatban még egy örök igazság elmondható, hogy



csak a változás állandó, amit belátni könnyű, de elfogadni igen nehéz.

A jelenségek tanulmányozása nehéz, mert csak egy nagyon szűk időintervallumra látunk rá, és a négydimenziós térből jó, ha kettőt vagy hármat ismerünk részlegesen.

A cikkben a következő kérdésre keressük a választ:

1. Hová mozognak a mikrolemezek, milyen irányokba, és miért éppen arra?
2. Miből következtethetünk a mélybeli áramlásokra?
3. Mi határozza meg a mélybeli áramlások irányát?

### Lemezmozgások mélyfúrási és földregzési adatok alapján

Bada et al. (1999, 2004, 2007) tették közzé tanulmányaikban a fúrásvizsgálatok és a földregzés adatok alapján meghatározott feszültségtérképet (1. ábra), ami jól illusztrálja a térség fő mozgásirányait, a kéreg felső 5 km-es mélység-tartományában. Mivel a mozgatóerő alulról hat, így feltételezhető, hogy a rideg felső kéregképződményeken azonosítható mozgástörténet a korábbi köpenymozgások egyfajta lenyomataként áll rendelkezésre, és némileg eltér a mélyebb rétegek recens (mai) mozgásától. Azonban minél mélyebbre megyünk le, annál kevesebb és annál megbízhatatlanabb információ áll a rendelkezésünkre.

A térkép (1. ábra) alapján jól látszik D-ről, az Adria felől a pálcikák alapján azonosítható É-i és ÉK-i irányítottság a feszültségtérben. A kezdetben É-i irányú pálcikák egészen a K-Alpokig megtartják irányítottságukat, majd ott elfordulnak ÉNy-i és ÉK-i irányokat vesznek fel. Az ÉK-i irány

határozza meg a kárpát-medencei feszültségirányokat, egészen a TESZ<sup>1)</sup> vonaláig, ahol a pálcikák megint kétféle ágaznak, egy É-i és egy K-i irányra (ez utóbbi a TESZ mentén gyorsan DK-nek fordul). Ez a kép szemléletesen mutatja az elmúlt földtörténeti időszak legvalószínűbb kéregmozgási irányait.

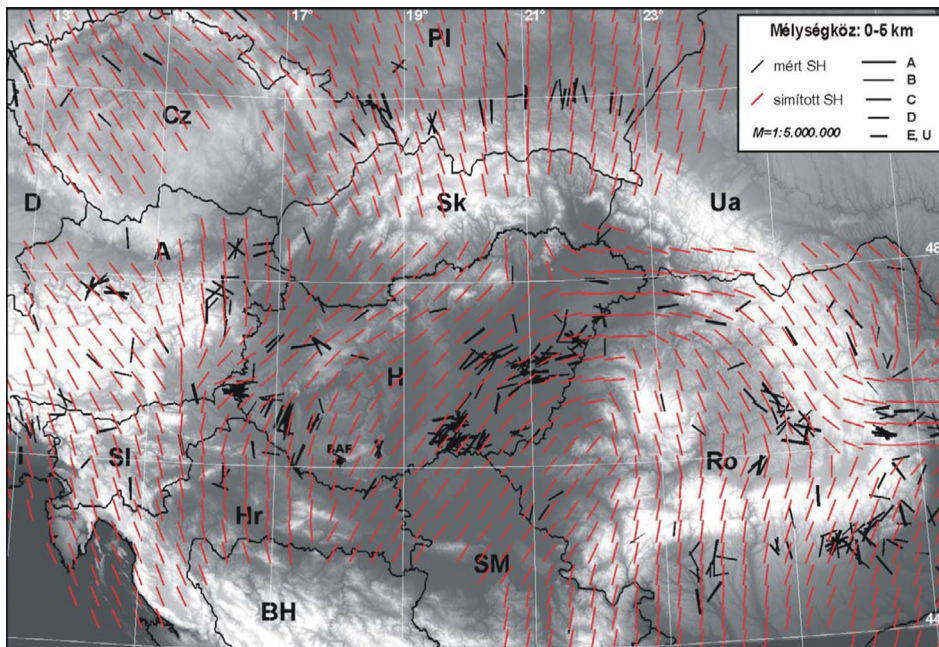
Ugyanebben a tanulmányban a szerzők az Alpi-Mediterrán rendszer központi részének jelenkori geodinamikai képét is bemutatják GPS-mérési adatokra alapozva, ld. Oldow et al. (2002), Grencerczy et al. (2000) és Grencerczy és Kenyeres (2004) munkái alapján (2. ábra).

A két különböző forrásból származó térkép az eltérő felbontás ellenére gyakorlatilag ugyanazt mutatja. Egy északi irányú „trajektória” az Alpok térségében, egy ÉK-i a Kárpát-medencében és Ny-Kárpátokban és egy ÉK–K–DK-i a K-Kárpátok mentén.

Ezek az információk később, az idők folyamán egy hosszabb észlelési időszakot magában foglaló GPS-mérési kampány alapján (Grencerczy 2014), újabb részletesebb kéregmozgás-térképpel gyarapodtak, amit a paksi földtani kutatások, értelmezések során is felhasználtak. Vizsgáljuk meg ezeket is!

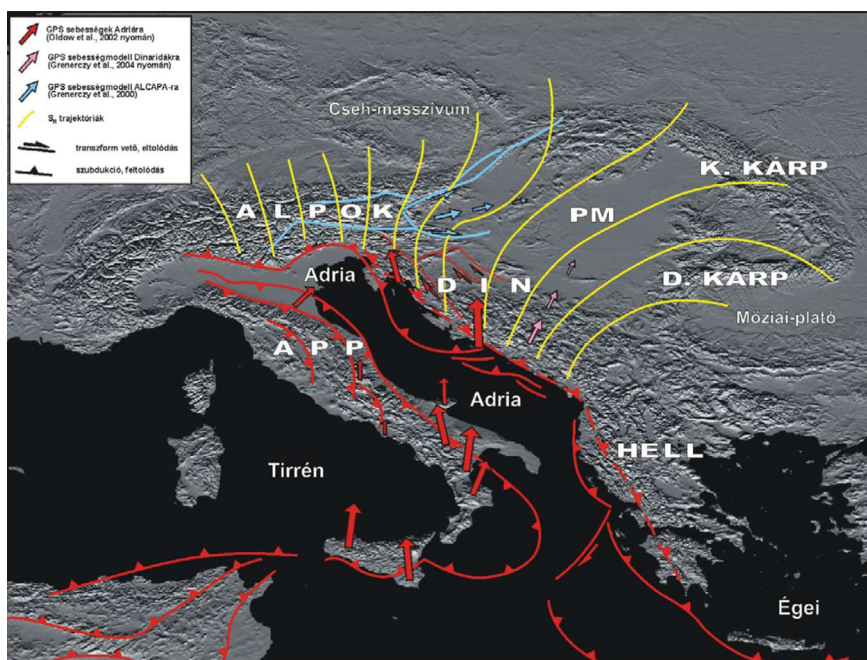
### Lemezmozgások az űrgeodézia alapján

„A közel negyedszázados MGGA (Magyar GPS Geodinamikai Alaphálózat) és a két évtizedes CEGRN (Central European Geodynamic Reference Network) mérések alapján készült el Közép-Európa jelenkori kéregmozgás-térképe (Grencerczy 2014), amely a kvázistabil Észak- és



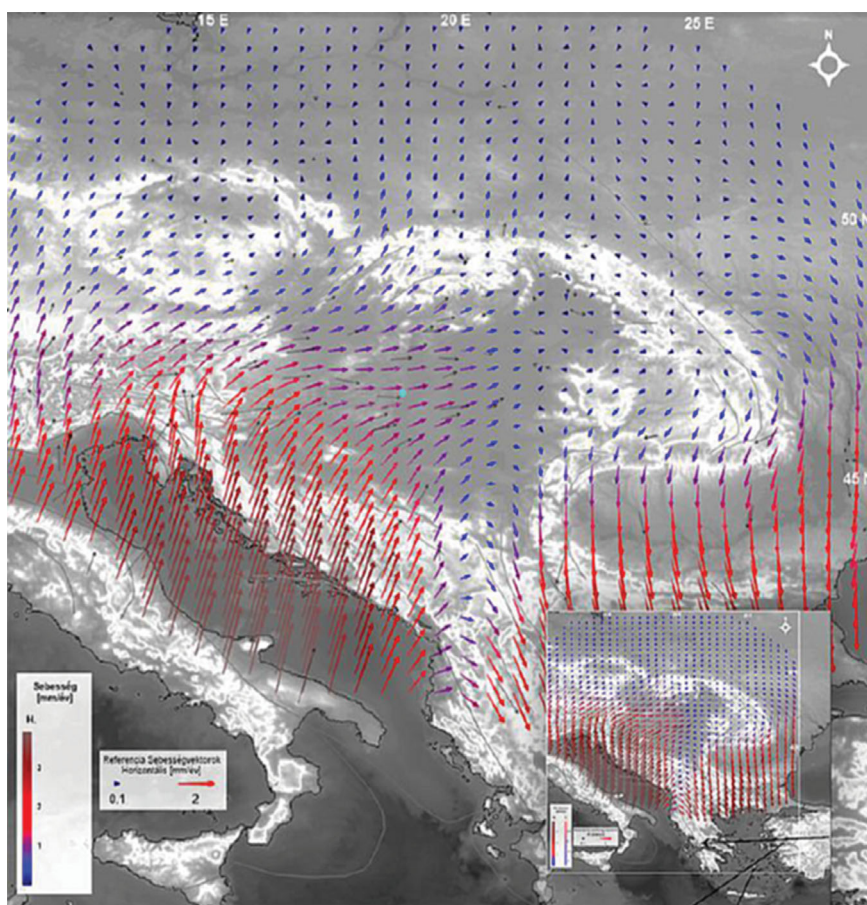
1. ábra | A Pannon-térség legfelső kérgének jelenkori feszültségállapota a 0–5 km mélységtartományból származó feszültségadatok és az azokból nyert simított irányok alapján (Bada et al. 2004). [A feszültségi adatok földregzés-feszékek-mechanizmusból, fúrólukfal-repedésekből, ráfúrásos mérésekből és hidraulikus rétegrepszteésekből lettek meghatározva (fekete pálcikák). A simítás és az adatok extrapolációja Hansen és Mount (1990) algoritmus alapján történt (piros pálcikák).]

Figure 1 | Pressure field of the upper crust of Pannonian region based on the data from the range 0–5 km depth (Bada et al. 2004)



**2. ábra** Az Alpi-Mediterrán rendszer központi részének jelenkori geodinamikai képe a főbb lemezhatárokkal, a fontosabb aktív szerkezetekkel és az űrgeodéziai módszerrel (GPS) meghatározott sebességvektorokkal (Bada et al. 2004)

**Figure 2** Geodynamic image of the Alps-Mediterranean system with the main plate boundaries, the most important active structures and the velocity vectors defined by space geodesy (GPS)



**3. ábra** Közép-Európa jelenkori kéregmozgás-sebességtérképe geodinamikai GPS-hálózatok mérése alapján (Grenerczy 2014). [A fekete vektorok a tényleges sebességet mutatják, a színes vektorok az ezek alapján interpolációval számított sebességmezőt.]

**Figure 3** Central Europe's crust velocity map based on measurements of geodynamic GPS networks (Grenerczy 2014)



Kelet-Európa referencia-rendszerben adja meg a terület kéregmozgás-sebességeit (3. ábra).

A GPS-es kéregmozgás-sebességtérképről egyértelműen látható, hogy a közép-európai tektonika meghatározó egysége az Adria mikrolemez. Az Adria mikrolemez az óramutató járásával ellentétes rotációt végez a Nyugati-Alpokban lévő Euler-pólus körül. Az Adria és a Cseh-masszívum közötti alpi ütköző zónából kiperéselt kéregdarab (a korábbi ALCAPA-blokk) 1,2–1,6 mm/év sebességgel mozog keleties irányba. Adria rotációja a dinári fronton DK-i irányú kompressziót eredményez, de ez az irány az egykori Tisza-egység irányában markánsan ugyancsak keleties irányítottá válik, mégpedig az északi egységhez hasonló sebességgel. A GPS-adatok egyértelműen azt mutatják, hogy a területen térképezett vetők mentén számottevő jelenkori oldalelmozdulás nincs, a két nagyszerkezeti egység egymáshoz képest lényegében nem mozog, vagy ez a mozgás a 0,1 mm/év szint alatt van.

Az ürgeodéziai mérések integrált értelmezése szerint az egész közép-magyarországi terület egységesen kompressziós deformációs állapotban van. Ha összevetjük a Pannon-medence Adria által hajtott mozgásait az Alpi-Mediterrán térség más területeivel, akkor világosan megmutatkozik, hogy a Pannon-medence, különösen annak központi része, a térség legnyugodtabb tektonikai provinciája. A környező alpi, dinári, balkáni, égei és anatóliai területeken a Pannon-medencebeli mozgásoknál 1-2 nagyságrenddel nagyobb mozgásokat határoznak meg a hasonló ürgeodéziai vizsgálatok.” (Chikán et al. 2016)

Az összehasonlításhoz a szűkebb régióra készült és a feszültségteret bemutató vonalas ábrán (1. ábra) a mozgásirányok – egységnyi pálcikákkal ábrázolva – nagyon jól követhetők.

A kéregmozgás sebességvektorai az újabb, GPS alapú térképen a mozgás horizontális vektorának nagyságát is

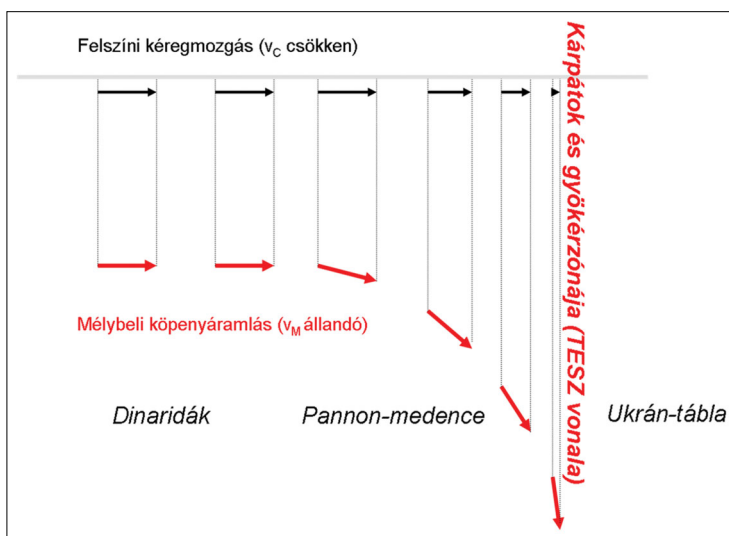
mutatják. A vektor nagyságának csökkenése jelentheti egyrészről a horizontális mozgás megszűnését (elnyelődését), de másrészről jelentheti a mozgás irányának megváltozását is, például azért, mert a vektor lefelé fordul, így annak vízszintes összetevője egyre kisebb lesz (miközben a függőleges növekszik), vagy akár le is nullázódik (például függőleges mozgásvektor esetén, lásd 4. ábra).

A horizontális vektorok amplitúdójának a lecsökkenési zónájában, ott ahol „a mozgás elnyelődik”, nagymértékű feszültségnek, kompresszióknak és jelentős deformációknak kellene jelentkeznie. A Pannon-medence esetében valóban jelentkezhet egy DK–ÉNy irányú antiklinálisokat és szinklinálisokat létrehozó litoszféragyűrődés – az Alföld D-i részén található mélymedencék iránya megfelel ennek. A felszíni elmozdulások sebességében keleti irányban mutatkozó csökkenéshez a deformáción kívül hozzájárulhat az is, hogy a litoszféragyűrődés alulról „hajtó” asztenoszféraáramlás iránya döntően horizontális jellegűből vertikálisba vált, értelemszerűen lecsökkentve ezzel a horizontális komponenst (4. ábra). Talán ezt figyelhetjük meg az Alpok D-i vagy a K-Kárpátok Ny-i előterében.

Az ürgeodéziai adatok szerint tehát a Tiszától K-re a felső kéreg már nem mozog annyira, legalább is vízszintesen, viszont a köpeny anyagának litoszféra alatti K-i irányú mozgása okozhatja a kéreg alsó részének alábukását. Az elmozdulás mértéke – többek közt az oldalirányú elmozdulásé is – feltehetően a mélységgel arányosan növekszik, ahogy az anyag plasztikussága a mélységgel nő.

Elemizzük a geodéziai mérések eredményeit is!

„A GPS-technika terjedésével az 1980-as évek végére szükségessé vált a Nemzetközi Földi Vonatkoztatási Rendszer (ITRS) mellett egy európai, térbeli háromdimenziós geodéziai célú vonatkoztatási rendszer (ETRS) definiálása is, ahol a koordináták időbeli változatlansága volt a cél. Mindez azzal indokolható, hogy a földi pontok koordinátái



4. ábra | Mélybeli állandó nagyságú mozgásvektor ( $v_M$ , piros nyíllal jelölve, pl. köpenyáramlás) és felszíni, vízszintes összetevője ( $v_C$ , fekete nyíllal jelölve, pl. kéregmozgás)  
 Figure 4 | Vector of depth motion ( $v_M$ , marked with red arrows, e.g. mantle flow) and its horizontal component on the surface ( $v_C$ , marked with black arrows, e.g. crust motion)

a lemeztektonikai mozgások miatt folyamatosan változnak. Ez az európai kontinensen az eurázsiai kőzetlemez mozgása miatt hozzávetőlegesen 2,5 cm/év elmozdulást és koordinátaváltozást jelent.” (Borza et al. 2007)

„Természetesen Európa területén belül a mikrolemezeknek további, az előbbtől eltérő mozgásai is vannak. Az Adriai-mikrolemez (Afrikai-lemez része), D-en 4 mm/év sebességgel mozog északias irányban, míg É-on ez a sebesség csak 2,5 mm/év. Ennek a mozgásnak az energiáját az Alpok előtere 70 km-en belül emészti fel, ÉK-en, a Pannon-medencében viszont 200–300 km sem elegendő a mozgás felemésztésére. A Pannon-medence belsejében, napjainkban Ny-on 1,2 mm/év sebességű ÉK-i irányú mozgás határozható meg, míg K-en érdemben nem mutatható ki mozgás.” (Völgyesi 2010)

A Pannon-medence belsejében 200–300 km sem elegendő a mozgás felemésztésére. Viszont a lemezek határához, a Kelet-Kárpátokhoz és az Európai platformhoz közeledve megváltozik a helyzet. A „mozgási energia felemésztése” jelenség (3. ábra) a mozgás irányának megváltozásával lehet tehát összefüggésben, s nem az erőhatás megszűnésével. A lemez domináns vízszintes mozgása után egyre inkább a függőleges irányú mozgás lesz a jellemző, például alábukik, mert egy vastagabb, keményebb, stabilabb, de kisebb sűrűségű lemez került az útjába.

Ez úgy lehetséges, hogy a litoszférolemez több, különböző sűrűségű rétegből áll (a sűrűségváltozása folyamatos, de az egyes egységekre az átlagérték megadható, 5. ábra). A hőmérséklet és a nyomás változásával megváltoznak a reológiai tulajdonságok. A fajsúlyok különbözősége miatt a lefelé irányuló mozgás csak a lemez alsó, köpenylitoszféra részét tudja nagy mélységig (~300 km) magával ragadni, a többi rész kisebb elmozdulás mellett a kollízió során a felszínközeli deformálódik. Ez okozza a kéreg

nagymértékű megvastagodását az orogén zónákban. A kollízió során a részlegesen folytatódó alábukás a litoszférolemez delaminációját jelenti, amelynek következtében a szinte már álló kéreg és a lassan továbbmozgató köpenylitoszféra között súrlódás lép fel, ez alulról mozgatja és erodálja a kérget.

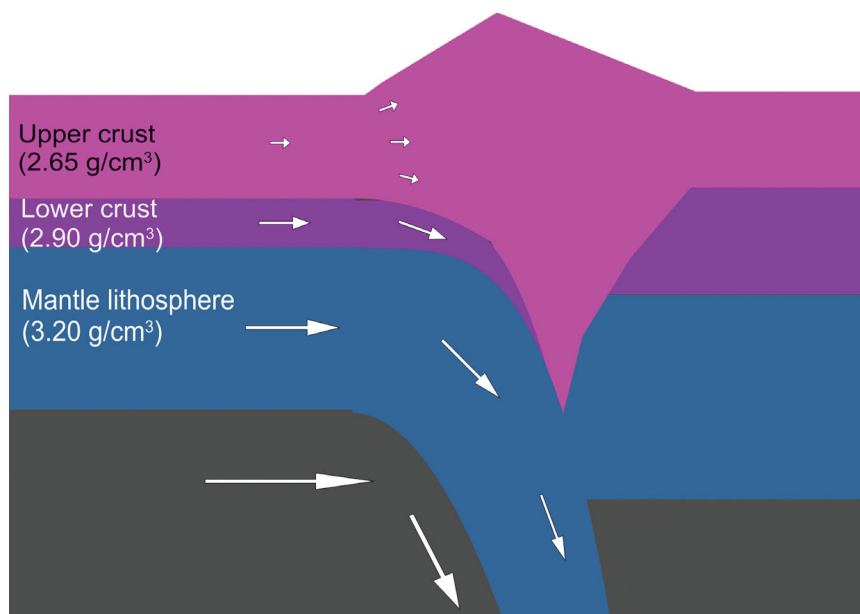
A környezetéhez képest ma körülbelül 20 km-rel vékonyabb a kárpát-medencei kéreg, aminek kialakulásához 5 millió év alatt átlagosan 4 mm/év mértékű vékonyodás kellett.

## Lemezmozgások szeizmológiai mérések alapján

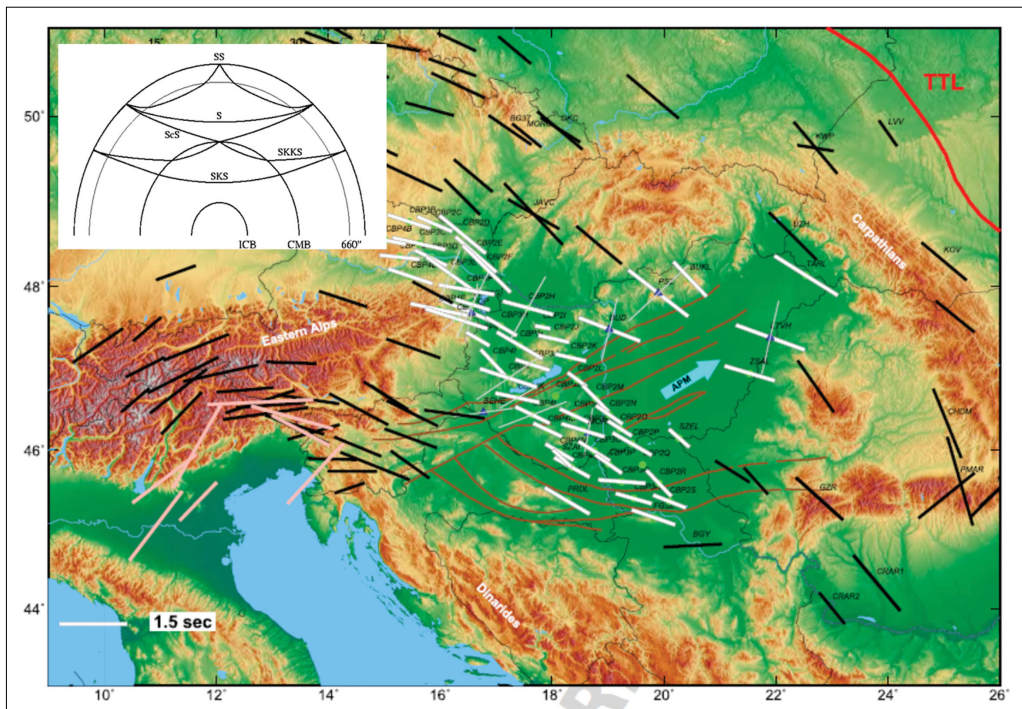
A környező országok alaphálózatai, a Magyar Szeizmológiai Alaphálózat és a *Carpathian Basin Project* (CBP) ideiglenes hálózat passzív szeizmikus mérési adatainak nyíróhullám-anizotrópiára vonatkozó vizsgálata megadja a leggyorsabb hullámterjedési irányt az SKS és SKKS hullámok alapján (6. ábra). A nyíróhullám-anizotrópia integrált hatást mutat a felső köpeny mélységtartományában.

Mélyfúrások faldeformációja és földrengések fézkek-mechanizmusai alapján a Pannon-medencebeli horizontális főfeszültség domináns iránya, amint azt korábban bemutattuk, DDNy–ÉÉK és DNy–ÉK között változik (Bada et al. 1999, 2004, 2007). Ezek a feszültségirányok összhangban vannak a szeizmológia segítségével (Qorbani et al. 2016, Kovács et al. 2011, 2012) kimutatott gyors tengelyirányok alapján feltételezhető mozgásmodellel.

A szeizmológia legnagyobb sebességiránya merőleges a köpenyáramlás, illetve az abszolút lemezmozgás (APM) irányára (6. ábra, kék nyíllal jelölve), ilyen módon a szeizmológiai mérési hálózat pontjai alapján területi kép raj-



5. ábra | A litoszférolemez sematikus felépítése és várható mozgása kollízió esetén  
Figure 5 | Schematic structure and the expected movement of the lithosphere in case of collision



6. ábra | Szeizmikus nyíróhullám-anizotrópia vizsgálata, SKS gyors tengelyirányok (APM – abszolút lemezmozgás iránya, Qorbani et al. 2016)

Figure 6 | Average shear wave splitting parameters. Orientation of the bars represents the fast axis azimuth, and their lengths correspond to the splitting delay time in seconds. Data based on previous SKS splitting studies. (APM – absolute plate motion, Qorbani et al. 2016)

zolódik ki a köpenymozgásról. Ezt vizuálisan is könnyű belátni, mivel a gyors tengelyirányok az Alpok, illetve a K-Kárpátok gerincvonalával azonos lefutásúak, azaz a kompressziós irányokra merőlegesek (6. ábra).

De hová mozog a lemez, milyen irányokba és miért éppen arra?

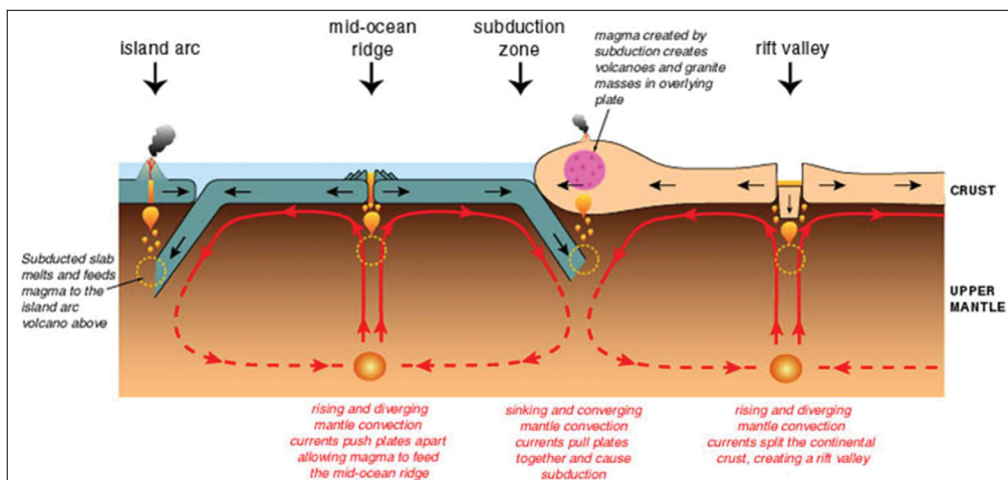
### Lemezmozgató konvekciós áramlások

A litoszférolemezek mozgása különböző megközelítésben mélybeli konvekciós áramláshoz kapcsolható, amely első sorban az alsó köpeny és felső köpeny viszkozus anyagá-

nak mozgása révén jut el a szilárd litoszférához, s azon keresztül a felszínre. A köpenyáramlásokat idehaza Cserepes László, Galsa Attila, valamint Kovács István vizsgálták szerzőtársaikkal.

A konvekciós feláramlások a köpenyből kiindulva a felszín irányába haladnak, azaz közel függőlegesen felfelé. A földfelszín közelében az áramlások a forrópontoktól (hotspotok), óceáni riftzónáktól eltekintve egy ideig közel vízszintes irányúak, majd alábuknak (pl. szubdukciós zónákban) és visszatérnek a köpenyre.

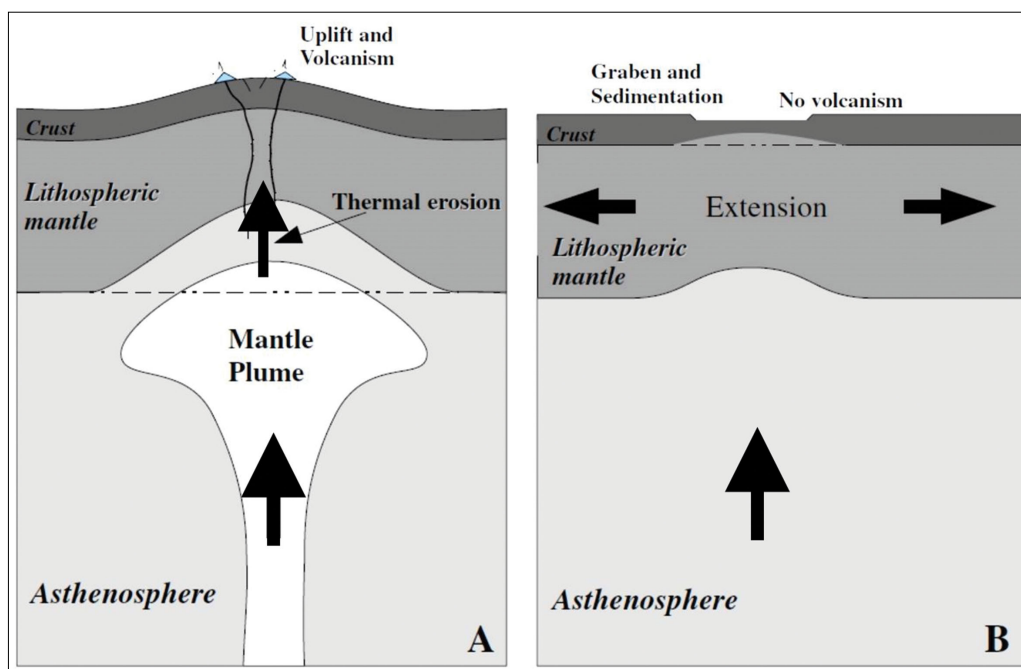
A litoszférolemezek mozgásának motorja tehát a Föld mélyének hőtermelése és az ezt követő hőmérséklet-



7. ábra | Lemezeket mozgató, tektonikát és vulkánokat gerjesztő konvekciós áramlások sematikusán

Figure 7 | Plate tectonics based on mantle flow





8. ábra Feláramlási zónában tapasztalható aktív (A) és passzív (B) riftesedés (Merle 2011). Felszínemelkedés és vulkanizmus (A) és kéregvékonyodás, mélytörések, felszínsüllyedés (B)

Figure 8 Active (A) and passive (B) rifting in the upstream zone (Merle 2011). Surface updoming and volcanism (A) and crust thinning, deep faults and surface collapse (B)

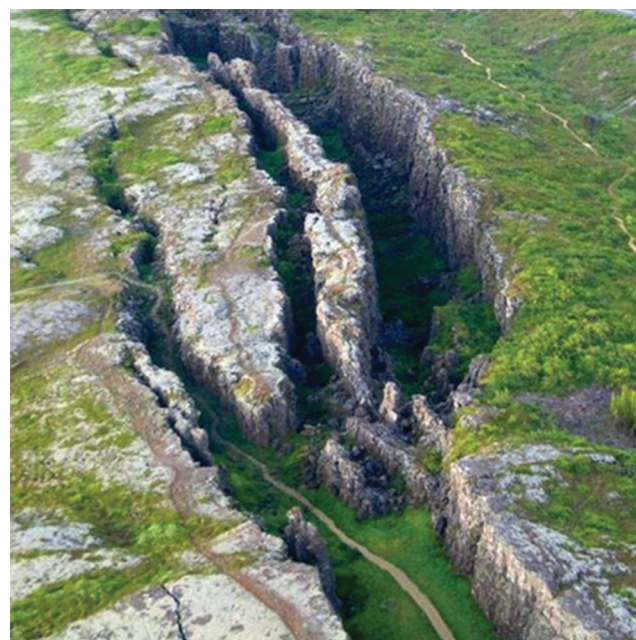
kiegyenlítődé. Szinte az összes földtani mozgási jelenség közvetve vagy közvetlenül összekapcsolható ezekkel a mélybeli folyamatokkal, például lemezvándorlás, tektonikai mozgások, földrengések vagy a vulkanizmus, hogy néhányat említsünk (7. ábra).

A 7. ábra alapján is látszik, de fontos hangsúlyozni, hogy a konvekciós áramlások okozzák a riftesedést és az extenziót, azaz a lemezek távolodását, illetve a széthúzó lemezmozgásokat. Ezek mindig együtt jelentkeznek, és nem lehet egy adott pontban extenzió köpenykiemelkedés és konvekciós áramlás nélkül, mert ezek a mélybeli folyamatok adják meg azt a mozgási energiát, amelyet a felszínen észlelünk.

Ezzel kapcsolatban további problémaként merül fel, hogy elvileg a feláramlás az adott helyen anyag többletet jelent, tehát a környezethez képest pozitív domborzati elem megjelenésével járna együtt (lásd pl. óceánközépi hátságok, forrópontok), a gyakorlatban azonban, például a kontinentális lemezek esetén sokszor nem állapítható meg a kiemelkedés, inkább törérendszer, extenziós jelenségek tapasztalhatók, miközben többféle mérési adat is megemelkedett köpenyszintet jelez (szinrift fázis). Ha egy köpenyáramlást három oldalról gátak határolnak (izosztatikus gyökérvonák), akkor a központi részen az anyagáramlásból adódóan riftesedésre jellemző folyamatok indulnak be, amelyek addig fenn is maradnak, amíg az áramlás nem talál kiutat magának ebből a zárt rendszerből (a Kárpát-Pannon régió területén ilyen kiút lehet a szeizmikus aktivitása alapján a Vrancea-zóna iránya).

Meg kell jegyezni, hogy a kontinentális riftesedés során a litoszféradarab nem esik le (mint dugó a palackba, aho-

gyan azt a 7. ábra „rift valley” modellje sugallja), mivel ott aktív anyagfeláramlás van, ami ezt lehetetlenné teszi. A konvekciós feláramlás a litoszféralemezeket fel- és szétnyomja (8. ábra). Ez extenziót, kivékonyodást, töréseket



9. ábra Izlandi riftzóna, széthúzó erők hatására kialakult mély törések, árkok, amelyek fiatal üledékkel telnek meg (a riftzóna középvonala magasabb a feláramlásból adódóan, mint az oldalak magassága, ami a képen is érzékelhető)

Figure 9 Iceland rift zone – deep faults caused by spreading forces and these trenches are filled with young sediments

okozhat (de nem kéregvastagsági blokk-süllyedést!). Mély törések keletkezhetnek, amint azt az afrikai riftzónában vagy Izlandon napjainkban is tapasztalhatjuk (9. ábra), és süllyedhet is a felszín, de ezek a lemezek divergenciájának (távolodásának, azaz a kinyílásnak) köszönhetően alakulnak ki.

A kéreg elvékonyodása részben a köpenylitoszféra horizontális irányú, széthúzó mozgásának köszönhető, részben pedig a lassúbb kéreg és gyorsabb köpenylitoszféra között megjelenő koptató hatással magyarázható. Azt mondhatjuk, hogy ahol a konvekciós anyagáramlás a felszínig jut (gyakorlatilag nincs oldalirányú kéregmozgás), ott anyag-többletet okoz, ahol nem éri el a felszínt, mert a Föld szilárd kérgé pajzsként útját állja (oldalirányú kéregmozgások mellett), ott megpróbál a felszínre törni, alulról gyengítve a litoszférát (8. ábra).

Mi határozza meg az áramlások irányát felszínközelségben?

### Lemezmozgást gátoló, befolyásoló tényezők

Az izosztáziához kapcsolódó adatfeldolgozások és értelmezések a Kárpát-Pannon régió (KPR) gravitációs térképének értelmezésével indult, mely során a felszíni kőzet-sűrűségek és a gravitációs anomáliák ellentmondásainak feloldására<sup>2)</sup> kerestük a választ (Kiss 2009a, 2010). A legelfogadhatóbb megoldást erre az izosztázia szolgáltatta. A klasszikus Airy-féle (vagy Pratt-féle) izosztatikuss elméletek kialakulása óta azonban nagyot változott a világ, pontosabban a világról alkotott elképzelésünk és az új ismeretek az izosztáziaelméletét sem kímélték.

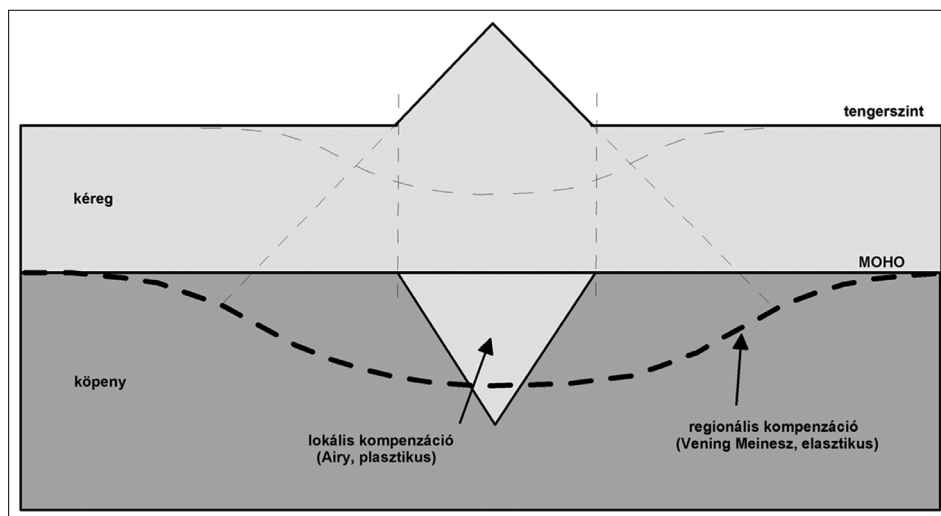
Az izosztázia jelenségét már a XIX. században felismerték, de a XX. században a tengeri gravitációs méréseknek köszönhető, hogy az izosztatikuss jelenségek mára legalább két nagy csoportra oszthatók.

Az első a korábban felismert a lokális izosztázia, amely plasztikus, gyűrődéses vagy töréses anyagmozgással lehet

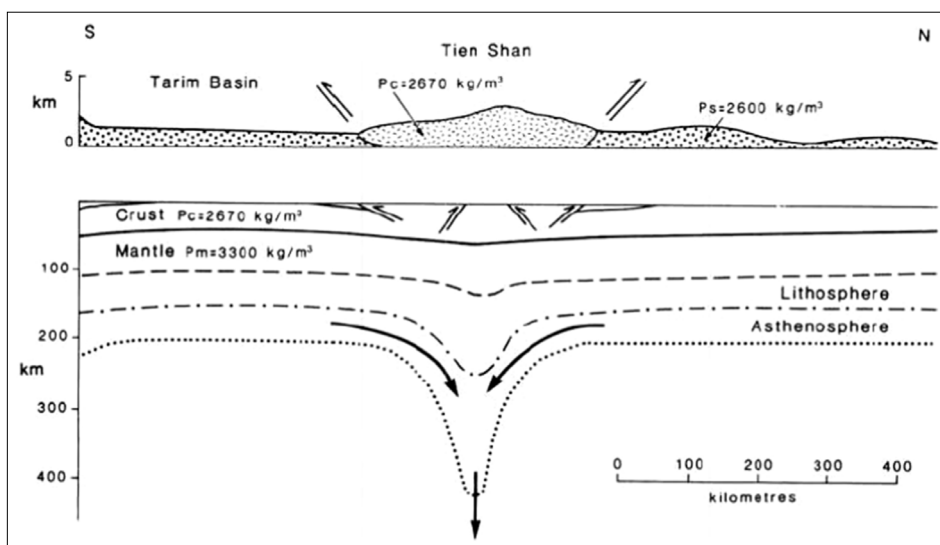
összefüggésben. A kialakuló gyökérszóna vízszintes kiterjedése a terhelést létrehozó domborzati elemmel közel azonos vagy csak kicsit nagyobb annál. A másik a regionális izosztázia, ebben a modellben a litoszféalemez meghajlásával rugalmasan veszi fel a terhelést, és itt a gyökérszóna vízszintes mérete jóval meghaladja a terhelést kialakító domborzati elem méretét (a terhelés pontjától kb. 200–250 km távolsáig érzékelhető).

Kezdetben elsősorban a kéregre vonatkozó izosztázia-elméletek voltak, mint például Pratt izosztatikuss modellje, az eltérő sűrűségű vertikális kéreghasábokkal (Pratt 1855) vagy Airy különböző kéregvastagságú úszási modellje (Airy 1855), illetve e modellek kombinációja (Heiskanen 1948). Vening Meinesz 1931-ben a tengeri gravitációs mérések alapján határozta meg a rugalmas, elasztikus lemezmodellen alapuló új, regionális izosztáziaelméletét. Ez utóbbi elmélet már az egész litoszféalemezre kiterjed, s egyben felveti annak kérdését, hogy a korábbi elméletek esetében vajon nem kellett volna-e a teljes litoszféra vastagságában gondolkodni (pl. azért, mert az Airy-féle izosztatikuss gyökérszóna nemcsak a kéreg szintjén, hanem esetleg mélyebben, az egész litoszféra mélységtartományában jelentkezik). Ha az óceáni lemezek esetében (SiMa) a regionális izosztázia a jellemző, akkor kontinentális lemez (SiAl + SiMa) esetében a rideg, törékeny felső kéregre a lokális, az alatta lévő az alsó kéregre viszont már a regionális izosztázia jelenségét valószínűsíthetjük (10. ábra), mivel az eltérő felépítésű kéregrészek fizikai paraméterei jelentősen eltérnek egymástól.

Régen ezekről a mélységtartományokról nagyon keveset tudunk, ebből adódhattak a kezdeti modellek hiányosságai, de a szeizmikus tomográfia segítségével ma már ezek a mélységtartományok is elérhetővé váltak (lásd pl. a Bakony sebességadatok alapján kirajzolódó izosztatikuss gyökérszónáját a CEL08 szelvény mentén, Kiss 2009b). Az is látszik, hogy a terhelés mértéke és a litoszféalemez tulajdonságai együttesen határozzák meg, hogy melyik tí-



10. ábra | Lokális (Airy) és regionális (Vening Meinesz) izosztatikuss modell  
 Figure 10 | Local (based on Airy) and regional (based on Vening Meinesz) isostatic model



11. ábra A Tien-Shan hegység tömege miatt kialakult izosztikus gyökérzóna (Burov et al. 1990). [Az ábrán nyílak jelzik a Tien-Shan hegység terheléséből származó mozgásokat, ami a hegység alatt süllyedést, izosztikus gyökérzóna kialakulását eredményezi (még az asztenoszférában is!), a hegység két oldalán, az előtérben pedig húzásból származó extenziót.]

Figure 11 Isostatic root zone formed by the (elevation) mass of Tien-Shan Mountains (Burov et al. 1990)

pusú izosztázia alakul ki, és nem zárható ki, hogy bizonyos feltételek mellett egy komplex, mindkét izosztáziát tartalmazó modellnek megvan a létjogosultsága.

A lokális izosztázia alapján a hegységképződés a fajsúlykülönbségekből adódóan sokkal nagyobb (számítások alapján kb. ötszörös) hegységgyökeret eredményez. Az Alpok 60–70 km-nyi gyökere 20–30 km többletvastagságot jelent az átlagos kéregvastagsághoz képest, amely a köpenybe nyúlik bele.

A magas hegyek tehát a súlyuknál fogva kéregkivastagodást, azaz a kéreg–köpeny határ süllyedését eredményezik, a süllyedéshez kapcsolódó húzóerő (11. ábra) viszont a hegyek szomszédságában, a kéregben extenziós jelenségeket idéz elő (pl. Burov et al. 1990). A Kárpát-medence belsejében – mivel azt szinte minden oldalról hegyvonulatok veszik körül – így ez a jelenség többszörösére is felerősödhet.

A Föld mélyébe benyomuló izosztikus gyökérzóna „plusztömege” már maga is köpenyáramlást generálhat, de ami még fontosabb, hogy helyzeténél fogva alkalmas lehet arra, hogy a mélybeli (gyökérzónától független) konvekciós áramlásokat megterelje, egyfajta gátat képezve a kéreg szilárd kőzetanyagából a viszkózusabb köpeny anyagában. A köpenyáramlás valószínűleg gyorsabb folyamat, mint az izosztikus kiegyenlítődé, így térben és időben eltérő módon jelentkeznek.

A 11. ábra azt is jelzi, hogy a hegytömeg által okozott terhelés hatása nem áll meg a Moho felszínén, hanem valószínűleg az asztenoszférára is hatással van. Ha ehhez még hozzávesszük a rugalmas (regionális) izosztázia jelenségét is, akkor már jelentős anyagátrendezéssel (áramlással) kell számolni. Ha kiindulásként létezik egy fő áramlási rendszer, akkor azt további mellékáramlások egészítik ki, ez utóbbiakat az izosztikus gyökérzónák generálják, és ezek együttes hatását tapasztalhatjuk a kü-

lönböző mérési és észlelési rendszereken keresztül. Persze mindez nem emberi, hanem földtani időskála mentén történik.

Az izosztikus gyökérzónák kéreg- vagy litoszféraszintű kivastagodása és a köpenyáramlás együttesen már képes megadni az alpi (kárpáti) orogén zóna kialakulásának litoszféralemez léptékű magyarázatát.

## Lemezmozgások – geodinamika

A mediterrán régió kialakulásának mozgásmodelljével találkozhatunk Mantovani (2002), vagy Carminati és Doglioni (2004), részben Kuhleemann (2007) vagy Horváth (2013), illetve Handy (2014) publikációiban. Szűkebb környezetünkre, a Kárpát-Pannon régióra szinte felsorolhatatlan a szerzők száma. Ezekben a munkákban a felszíni, felszínközeli folyamatok tanulmányozásán keresztül jutottak el egy nagyobb terület mozgásmodelljéig, nem vizsgálva a mozgást előidéző folyamatok pontos okát, hanem összegezve a megfigyelések eredményeit.

Meghatározták a mozgás idejét, irányát, az elmozdulás vagy térrövidülés mértékét, a forgást és annak Euler-pólusát, szinte mindent, amit „felülről” azonosítani lehet. Ennek megfelelően minden esetben csak a mozgások vízszintes vetületét és a mozgás következményét mutatják be. A mozgásvektor azonban mindig háromdimenziós (sőt lehet, hogy négy), így a folyamatok csak a 3D (4D) térben értelmezhetők teljes egészében.

Nagyon kevesen vállalkoznak azonban arra, hogy a vizsgálódást „alulról” is megtegyék, a meghajtó „motor” oldaláról, ami főleg elméleti úton vagy geofizikai módszerekkel vizsgálva közvetve, illetve korlátozott mértékben a felső köpeny és alsó kéreg kőzetanyagát vizsgálva közvetlenül is megtehető.



Konszenzus alakult ki a szerzők többségében és a GPS-mérések (úrgeodézia) is azt mutatják, hogy az Adriai mikrolemez É-i mozgásának köszönhető az Alpok kialakulása, és hogy a Kárpátok ívének kialakulása is az Alpok D-i előteréből (Adria–Bohémia satu) történő „kilökődésnek” köszönhető. A hegyvonulatok íve is egy É-i (Alpok), illetve egy É–ÉK-i (Ny-i Kárpátok) majd K–DK-i (K-i és D-i Kárpátok) irányú erőt (mozgást) valószínűsítenek.

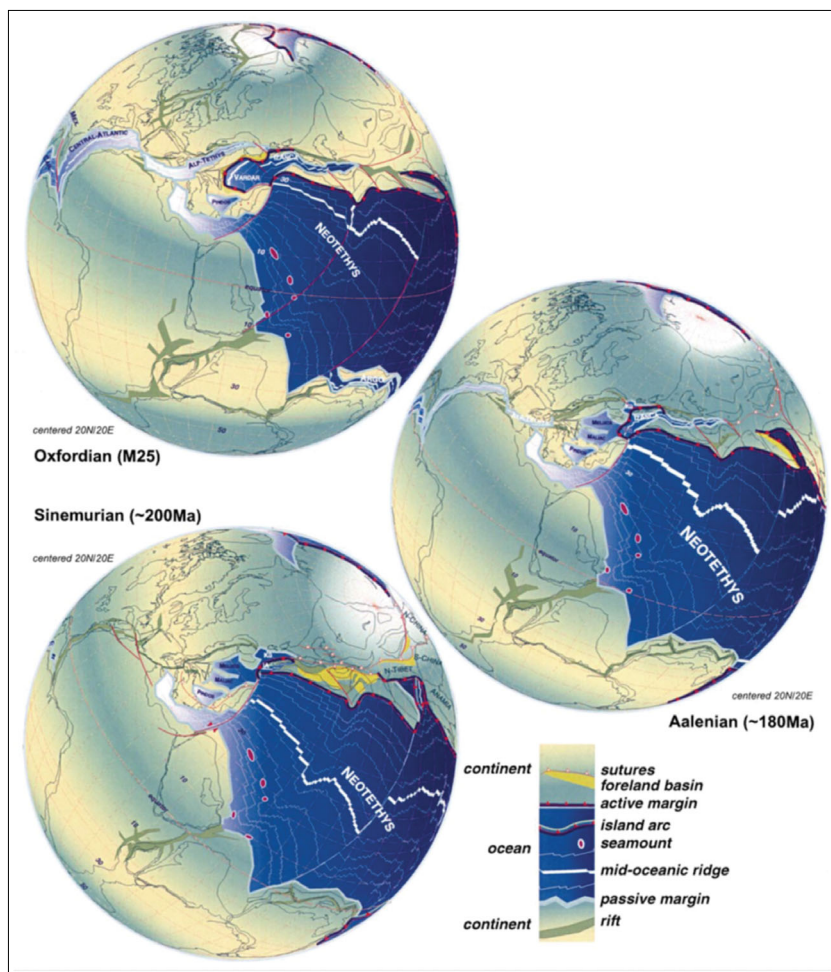
A litoszférolemezek szubdukciója, kollíziója nem teljesen tisztázott, többféle elképzelés vagy megközelítés létezik. Fizikai szempontból az látszik a legvalószínűbbnek, hogy a nagyobb sűrűségű, vékonyabb és rugalmasabb lemez bukik alá. Ilyen szempontból szinte minden esetben egy bázisabb összetételű, összehasonlításban fiatalabb, vékonyabb és rugalmasabb lemez fog alábukni (mert mozgékonyabb és nagyobb sűrűségű), a savanyúbb összetételű, idősebb, kisebb sűrűségű, vastag és feltételezhetően rideg kontinentális litoszféra alá.

A konverziót előidéző mozgás irányának (melyik lemez mozog?) nincs is igazán jelentősége, mert a mozgás mindig vonatkoztatási rendszer kérdése, viszont az alábukást a két lemez egymáshoz viszonyított tulajdonságai határozzák meg.

Azaz, az álló lemez is alábukhat a mozgó lemez alá, ha a két lemez tulajdonságai olyanok (azaz nem mindig a mozognak látszó lemez bukik alá!).

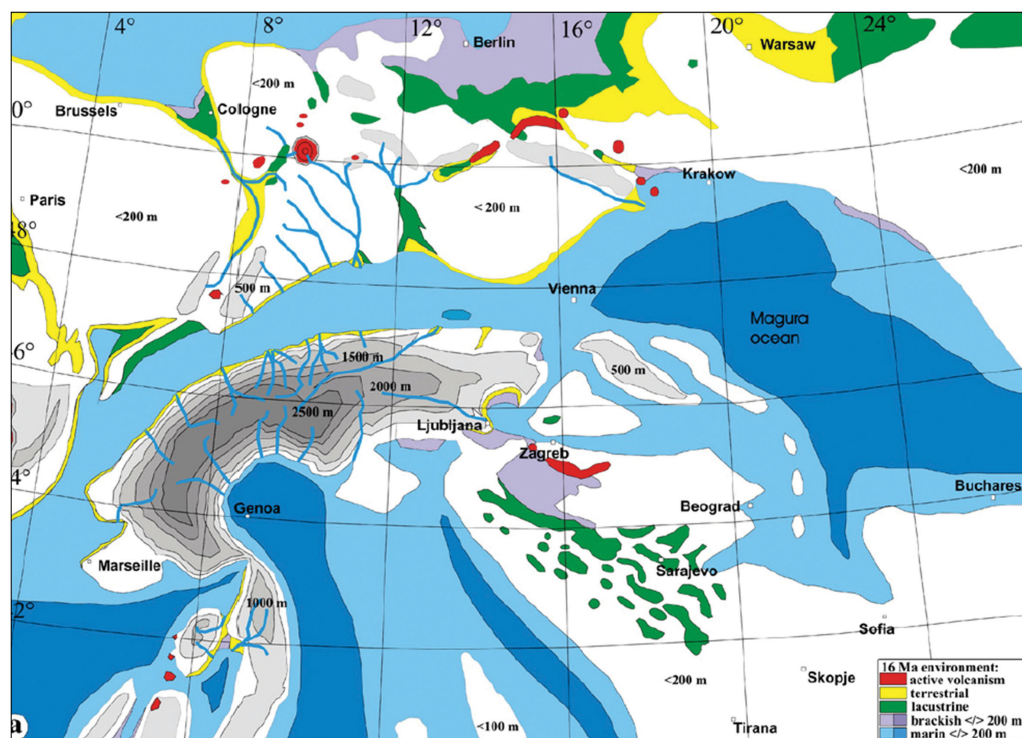
E megfontolások alapján, az Alpok és a Kárpátok kialakulásának kezdeti fázisában is feltételeznünk kell egy nem túl nagy kiterjedésű, óceáni típusú lemezt, amelyik a szubdukálódott (valamelyik kontinentális – európai vagy adriai – lemez alá). Erre az Európa területén a földtörténeti múltban meglévő egykori Tethys-ágak meg is adhatják a reális alapot (12. ábra). Ezt azért érezzük fontosnak, mert a fiatal adriai lemez É-i mozgása és az idősebb „európai lemez szubdukciója” ellentmondásosnak tűnik, viszont a két lemez közti, egykori Tethys-óceán lefűződő ágainak óceáni típusú kérge – mint az európai kontinentális lemez folytatása, amely ma már nincs meg a felszínen, mert szubdukálódott – hihetővé teszi az egész történetet. Ilyenek voltak a Pindos, Maliac, Meliata, Vardar, Alp-Tethys (12. ábra) és Magura-óceánágak (13. ábra).

Még inkább élesen jelentkezik ez a probléma a K-Kárpátok esetében. Ebben az esetben a vastag, ősi, kontinentális táblát (Ukrán-tábla) akarjuk felszíni földtani adatok alapján Ny-i irányban lebuktatni a fiatalabb és vékonyabb



12. ábra Neo-Tethys lefűződő óceánágak helyzete a jurában (Stampfli, Borel 2002) [alul a liász-sinemuri (200 Ma), középen a dogger-aaleni (180 Ma) és felül a malm-oxfordi (160 Ma) korszakok idején]

Figure 12 The Neo-Tethys sprawling oceanic position in the Jurassic (Stampfli, Borel 2002)



13. ábra Magura-óceán feltételezett kiterjedése az alsó miocénben (16 Ma, Kuhlemann 2007). [Piros – aktív vulkanizmus, sárga – szárazföldi üledékképződés, zöld – édesvízi üledékképződés, kékeszürke, felirat nélkül – csökkent sós vízi üledékképződés, kék – tengeri üledékképződés, matt szürke felirattal – domborzati kiemelkedés, Alpok]. Az Alpok már kialakult, a Kárátkok még „embrionális” állapotban van.]

Figure 13

Supposed extent of the Magura Ocean in the Lower Miocene (16 Ma, Kuhlemann 2007)

ÉK–K-i irányban mozgó Pannon-mikrolemez alá, ami fizikai képtelenségnek tűnik. A hatalmas kiterjedésű ukrán tábla vastag, rideg és stabil, és csak eurázsiai léptékben mozog. A fizikai tulajdonságai alapján ez nemigen fog alábukni! Nyilvánvaló, hogy itt sem az Ukrán-tábla bukik alá, hanem a ma már csak a mélyben azonosítható, egykor passzív az Ukrán-táblához tartozó Magura óceáni lemez (13. ábra).

Az, hogy nem találunk az Alpoknál és a Kárpátoknál látványos, mély szubdukcióra utaló jeleket (pl. a szeizmikus tomografikus mérési eredményekben, pl. Koulakov et al. 2009) az éppen e kis óceánágak korlátozott méretéből és térfogatából adódik. Az óceáni lemezek mélybe bukása után már kontinentális táblák ütközése zajlik (kollízió), ahol a klasszikus szubdukció már nem jellemző, helyette inkább a különböző irányú delamináció az uralkodó.

A meglévő mélyföldtani információk alapján viszonylag bonyolult kép rajzolódik ki az Alpok alatt, Ny-on D-i irányú szubdukcióval, K-en É-i irányú szubdukcióval. Nincsenek még pontos, meggyőző mélyföldtani adataink a Kárpátok vonulatáról sem. A Kárpát-medence belsejére jellemző köpenykiemelkedés miatt a Moho szintje a medence belsejéből a hegyvonulathoz közeledve egyre mélyebb helyzetben van, miközben eddigi ismereteink szerint a szubdukció valószínűleg ellentétes, azaz a medence belseje felé történt, erre utal a külső flisövezet elhelyezkedése. Az óceáni kéreg szubdukciója után, körülbelül 10 millió éve kezdődött a litoszféradarabok ütközése, és a köpenylitoszféra folyamatos mozgása miatt alakulhatott ki a visz-

szagördülő szubdukció. A kéregnél mélyebb tartományok (20–100 km) megismerésére lenne szükség, hogy az adott földtani szituációt pontosabban megérthessük.

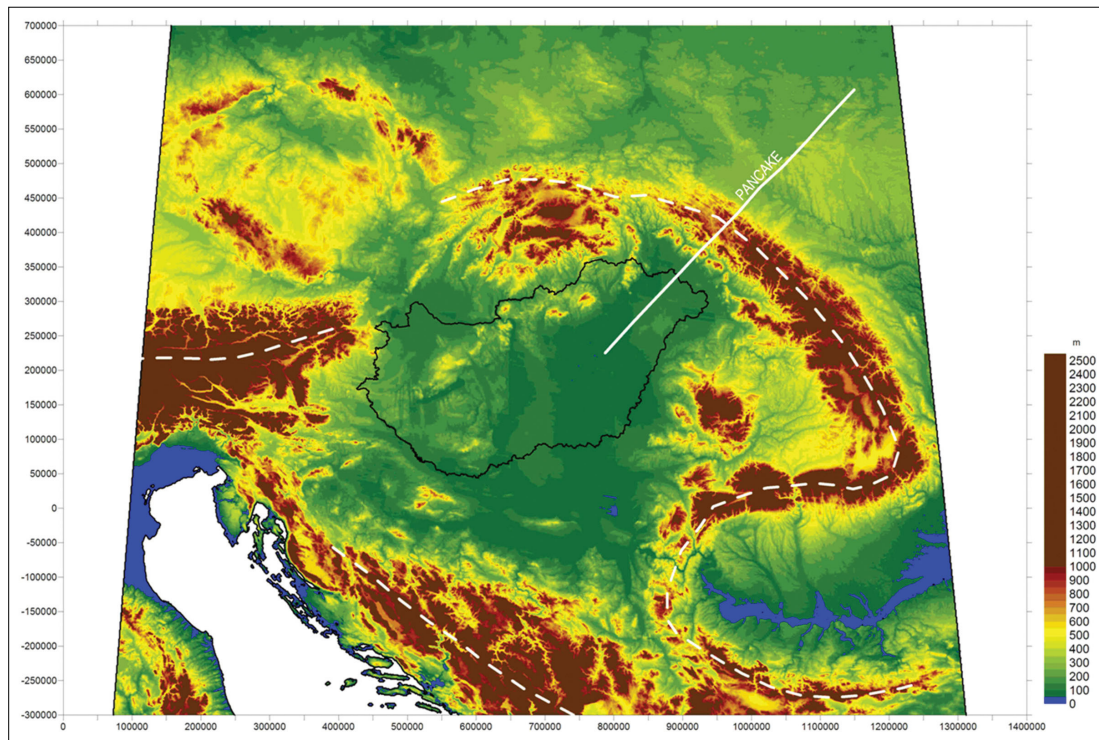
### Geodinamikai mozgás egy szelvény mentén

A Kárpát-Pannon régió domborzati és Bouguer-anomáliatérképe alapján kirajzolódó Moho-felszín lehetőséget ad a geodinamikai mozgások tanulmányozására is. A domborzati térképen (14. ábra) feltüntettük a hegységek gerincvonalát és PANCAKE szelvény nyomvonalát is. Először ezt a mélyszeizmikus szelvényt tanulmányozzuk, majd megpróbáljuk az értelmezési eredményeket kiterjeszteni a területi adatokra is.

A PANCAKE szelvény (Starostenko et al. 2013) elsőbeérkezései tomográfia segítségével a K-Kárpátok alatti litoszféra felépítését vizsgálta. A szelvény a kéreg szintjén mutatja az izosztázia miatt bekövetkezett változásokat (15. ábra). A Moho szintjéről már nincs elegendő információ (Kiss 2016) a hullámutak nem megfelelő átfedése miatt (a mérések behatolási mélysége nem elégséges az 50 km-nél mélyebb szintek bontására). A szelvény vizsgálata ennek ellenére hasznos.

Csökkent sebességű zóna rajzolódik ki a Kárpátok alatt, attól kicsit K-re eltolódva (15. ábra). A csökkent sebességű zóna (a sebesség és sűrűség paraméterek hasonlósága miatt) a lokális izosztatikuss gyökérvonalat mutatja, meglepő módon főleg a kéregben. Nem látszik viszont a gyökér-



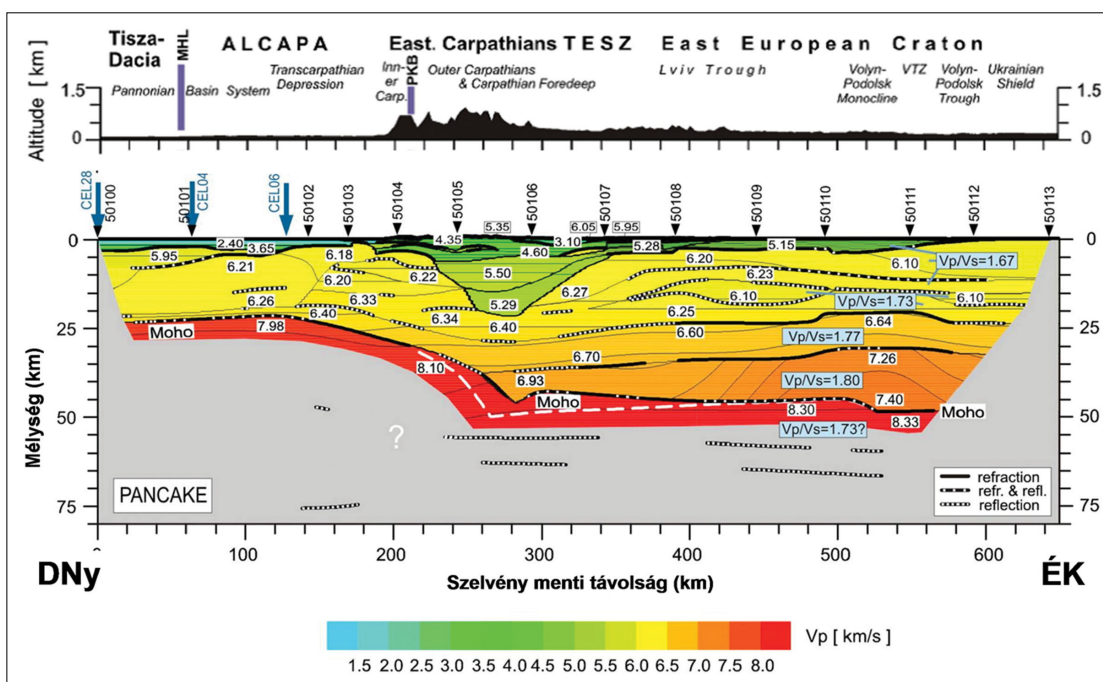


14. ábra A Kárpát-Pannon régió domborzati térképe (SRTM) a hegységek gerincvonalával (fehér szaggatott vonal) és a PANCAKE szelvényével (fehér folytonos vonal)

Figure 14 The terrain map of the Carpathian-Pannonian region (SRTM) with the axis of the mountains (white dashed line) and the PANCAKE section (white continuous line)

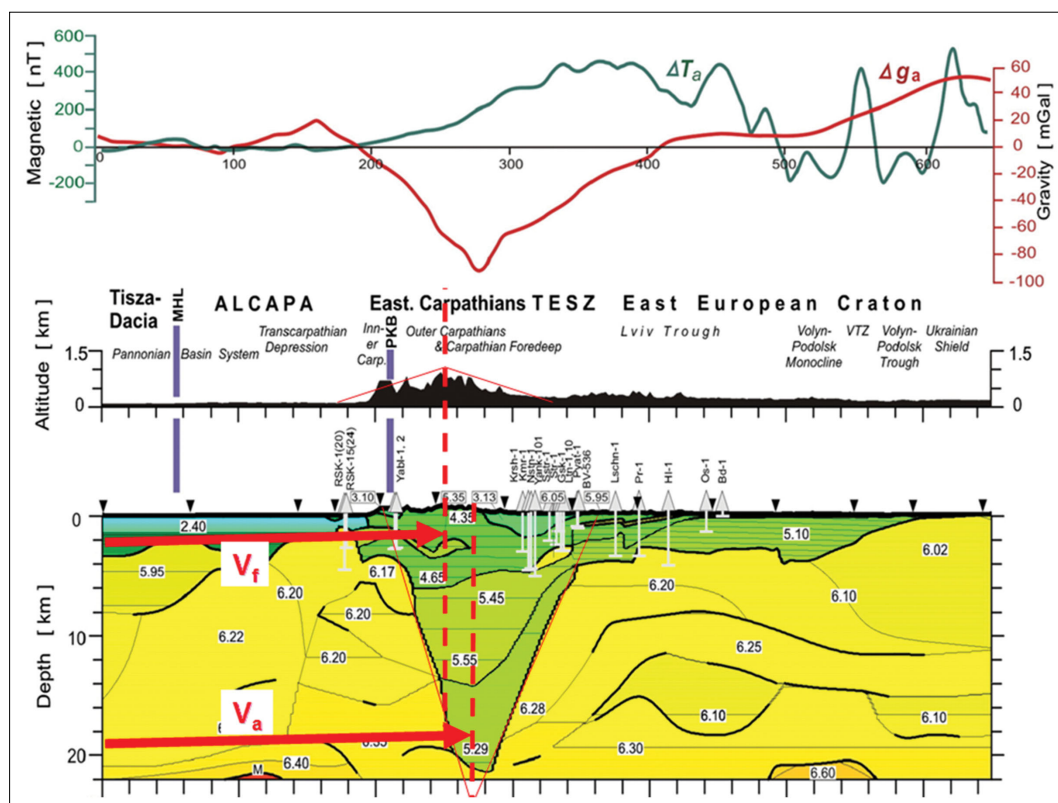
zóna a Moho szintjén, ami valószínűleg annak köszönhető, hogy a mérések ezt a mélységszintet már nem tudták megfelelően leképezni. A regionális (elasztikus) izosztázia, amely elsősorban az alsó kéreg és a litoszféralemez szintjén

jelentkezik, az Alpok, Kárpátok és Dinári-hegységrendszer jelenléte miatt szintén nem zárható ki. Ennek hatása pedig, biztosan begyűrűzik a medence belsejébe is, de nagyságának megítélése nem egyszerű.

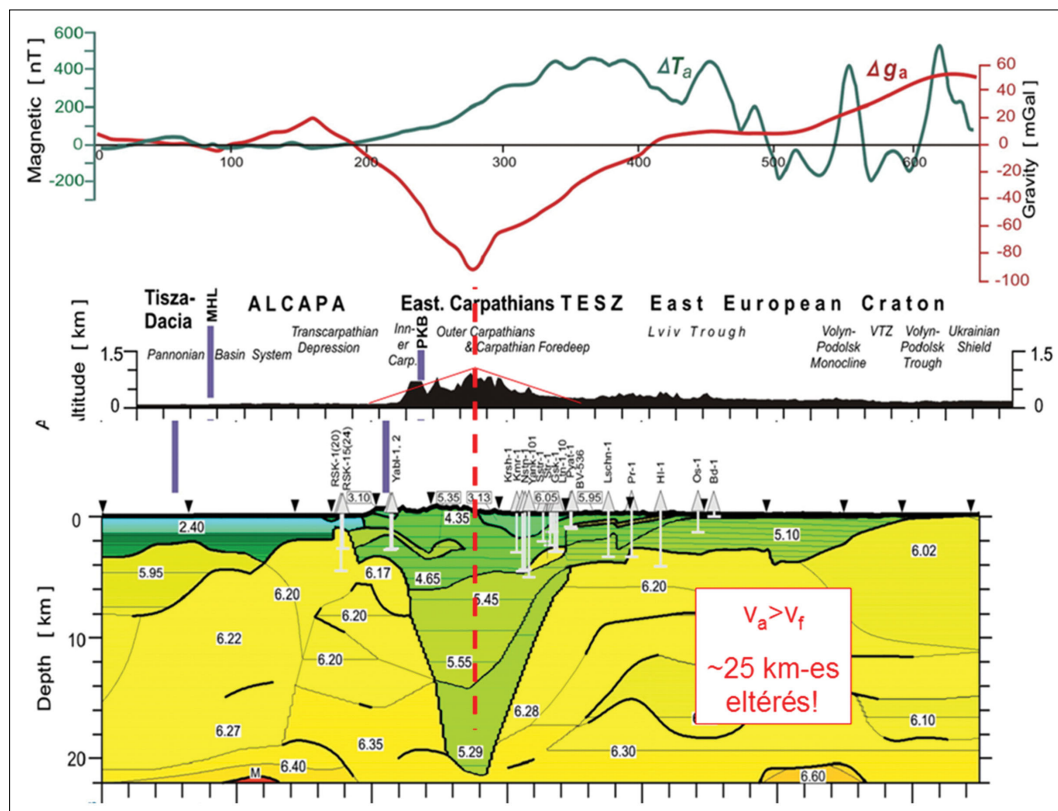


15. ábra A litoszférakutató PANCAKE szeizmikus sebességszelvény (alul) és a szelvény menti domborzat (felül) (Starostenko et al. 2013)

Figure 15 The lithosphere exploration PANCAKE seismic velocity section (below) and the topography (above) (Starostenko et al. 2013)



16. ábra | A litoszférakutató PANCAKE szeizmikus sebességszelvény a domborzattal és a gravitációs- és mágnesesanomália-görbékkel (alaphelyzet)  
 Figure 16 | The lithosphere exploration PANCAKE seismic velocity section with topography and curves of gravity and magnetic anomalies (measured)



17. ábra | A litoszférakutató PANCAKE szeizmikus sebességszelvény (visszazotgatott)  
 Figure 17 | The lithosphere exploration PANCAKE seismic velocity section (removed)

A PANCAKE szelvény mentén a felső 0–25 km-es mélység leképzése még teljesnek mondható. Vizsgáljuk meg tehát ezt a tartományt, különös tekintettel az izosztatikus gyökérvonalra (16. ábra)! A Pannon-medence alatt a felszínközeli 2400 m/s-ról a sebesség 6400 m/s-ra nő 20 km mélységben (a változás mértéke 4000 m/s). A Kárpátok alatt ugyanez az érték 4350 m/s-ról 5290 m/s-ra nő (változás mértéke 940 m/s). A két területrészen a mélységgel arányosan kialakuló sebességnövekedés mértéke durván négy az egyhez. Ennek oka a Kárpátok mentén felszínre került nagy sebességű preneogén képződmények, illetve az alsó kéregbe benyúló 20 km vastagságot is meghaladó gyökérvonal csökkenő sebességű, felső kéreg eredetű képződményei, amelyek a felszínen felgyűrődő kőzetek súlyából származó nyomás hatására kerültek ebbe a mélységbe.

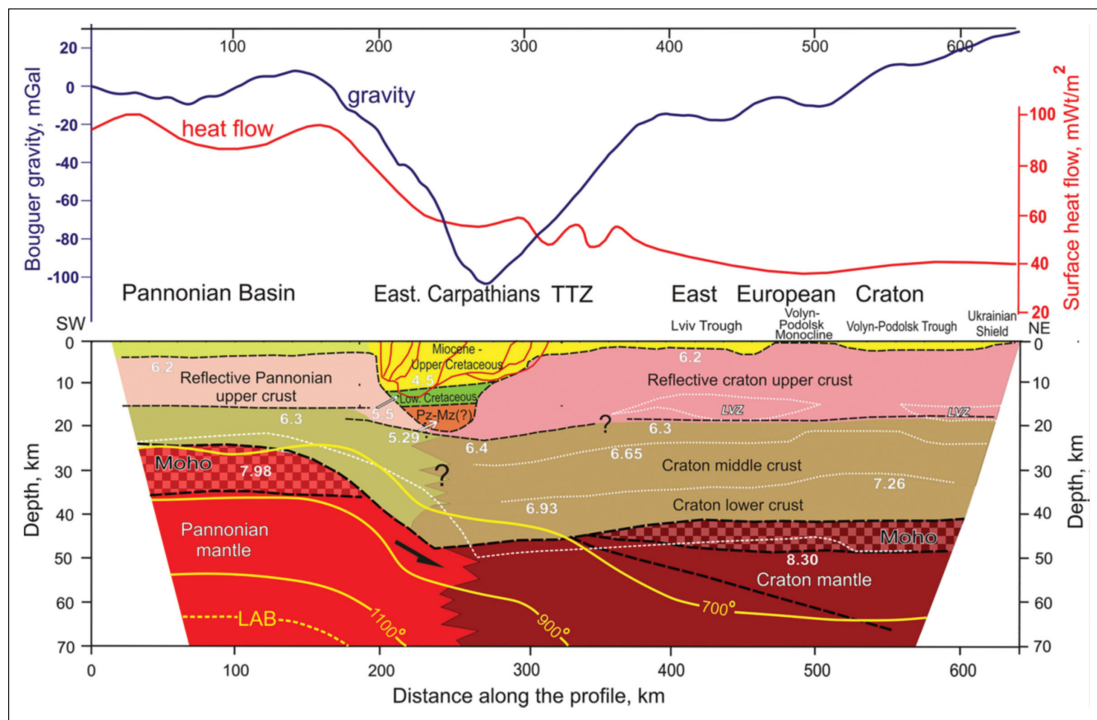
A medenceterületeken a SiAl-kérget is két részre osztjuk: medencekitöltő és prepannon részre. A felszínközeli 2400 m/s nagyjából a felső 1000–1200 m-re igaz mint átlagsebesség. A pannon alján már mindenütt legalább 4000 m/s sebességről beszélhetünk a felszínközeli alaphegységi kőzetek ismeretében, ez azonban inkább mállási kéregre jellemző érték. A pretercier mezozoos kőzeteknél ez a sebesség már inkább 4500–5000 m/s. A bontatlan magmás és metamorf prepannon aljzat átlagos sebessége még a felszín közelében is 5000–5800 m/s körüli. Az ásványokra jellemző sebességekből kiindulva a sárga színnel jelzett rész esik olyan tartományba, amely a SiAl-kéregre lehet jellemző (15. ábra). A 6250 m/s sebességnél nagyobb sebességek a bazalt-gabbro összetételű, SiMa-kéregben

fordulhatnak elő. A sebességeloszlás (15. ábra) azt látszik alátámasztani, hogy a medenceterület alatt középső kéreg nincs és az alsó kéregből is hiányozhat, miközben a felső kéreg szinte változatlan vastagságban megvan (lásd Szénás 1964).

A viszonylag kis sebességet jelző zöld szín a plasztikus, azaz még nem metamorfizálódott SiAl anyagot jelenti. Ennek alsó határán, 22 km mélységben a várható geosztatikus nyomás 600 MPa körüli, amely alatt a sebességugrás metamorf átalakulással magyarázható. A sárga és a zöld szín epi- és a mezometamorf átalakulási határt jelent. A felső kéreg a medenceterületeken kívül is átkristályosodott és nem átkristályosodott részre bontható.

16. és 17. ábra alapján még egy geodinamikai információ is kiolvasható. A Kárpátok fő gerince és az izosztázia miatt kialakuló gyökérvonal legmélyebb pontja (a gravitációs minimummal együtt) egymáshoz képest el van csúszva. A gyökérvonal K-i irányú elcsúszását, a kéreg- és köpenyszintű mozgások eltérő sebessége okozhatja. Asztroszféra szinten feltételezzük a Ny-i irányból származó köpenyáramlást (Kovács et al. 2011, 2012).

A PANCAKE szelvény alapján a litoszférolemezeket mozgató áramlás vízszintes komponense 20 km-es mélységben jóval nagyobb, mint amelyet a felszínen érzékelünk. A Pannon-mikrolemez és az Ukrán-tábla ütközésekor a kéreganyag egy része felgyűrődik (létrehozva a kiemelkedő köztömeget), másik része a súlyánál fogva leüllyed, és kialakítja a gyökérvonalat, ami a kérgen keresztül egészen a köpenyig feltételezhető. Minél mélyebbre me-



18. ábra | A PANCAKE szelvény tektonikai értelmezése és az átmeneti zóna az ALCAPA és a Kelet-Európai Kraton között, felül a hőáram- és a gravitációs anomália-görbe, alul az értelmezett sebességszelvény (Verpakhovska et al. 2018)

Figure 18 | Tectonic interpretation of the PANCAKE section and the transition zone between ALCAPA and Eastern European Kraton (Verpakhovska et al. 2018)



gyünk le a Föld mélyébe robusztus megközelítéssel, annál képlékenyebb anyaggal találkozunk, és egy adott szinten már teljesen „megnyílik” az út az anyagáramlásra (rideg-képlékeny határfelület). A rideg és a képlékeny képződmények közötti átmenetet mutatják a vízszintes sebességösszetevők, amelyeket a PANCAKE szelvény mellett is azonosíthatunk, illetve rámutatnak arra, hogy a mozgás iránya éppen a gyökérvonal megjelenése miatt függőlegessé válhat, ami a vízszintes összetevő drasztikus lecsökkenését okozhatja.

A Kárpátok fő gerincének és az izosztatikus gyökérvonaljának elcsúszása 25 km körüli, azaz a gyökérvonal kialakulása óta a kéreg, illetve a köpeny mozgási sebességének különbségéből napjainkra ekkora eltérés (távolság) adódik. Mindeközben a felső kéreg sűrűségű anyag 20 km mélységbe süllyed le a gyökérvonalában. A 16. ábra mutatja a mérés idején fennálló állapotot, a 17. ábra pedig, az anomáliák és a gyökérvonal Ny-i 25 km-es visszatolása után a feltételezhető eredeti állapotot.

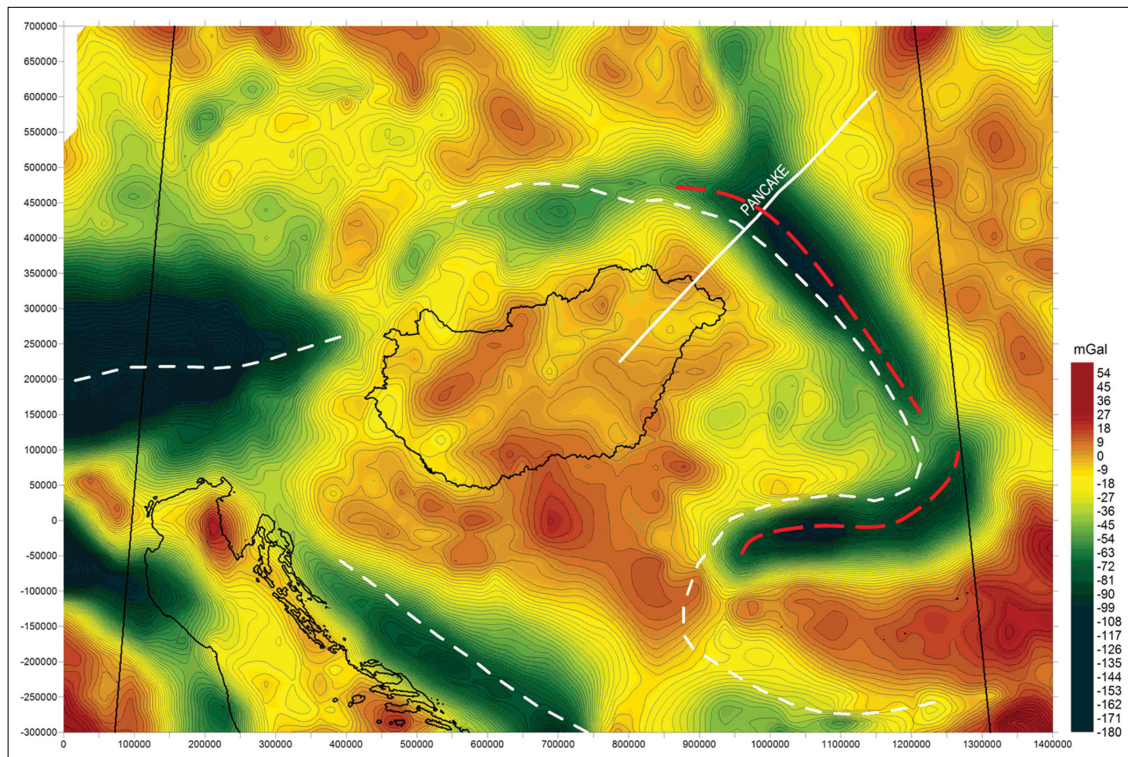
A 18. ábra a PANCAKE szelvény legújabb értelmezési eredményeit mutatja (Verpakhovska et al. 2018). Az ábráról leolvasható, hogy a kelet-európai tábla esetében hármas osztatú a kéreg, a Pannon-medencében viszont csak kétosztatú, és fele olyan vastag. A felső kéreg a Pannon-medencében 15 km vastag, a kelet-európai táblán 20 km körüli. A középső kéreg a Pannon-medencében hiányzik, esetleg az alsó kéreggel közösen, egyetlen átmeneti réteggént jelentkezik a köpeny felett. A geotermikus és

hőfluxus adatok egyértelműen a köpeny szintjének K-i irányú mélyülését mutatják, a pannon-medencei 25 km-ről 45–65 km mélységre (lásd 18. ábra Moho-szint, illetve a 700 °C izoterma).

## Geodinamikai mozgás területi kép alapján

A 19. ábra a Kárpát-Pannon régió Bouguer-anomáliatérképét mutatja, amelyen megőriztük a domborzati térkép (14. ábra) hegyvonulatainak gerincvonalát (fehér szaggatott vonal), de feltüntettük a gravitációs (izosztatikus) minimumzóna tengelyvonalát is a Kárpátok mentén (piros szaggatott vonal). Látszik, hogy a minimumtengely a gerincvonallal párhuzamos, de attól K–DK-i irányban elcsúszva jelentkezik. A két vonal hosszan nyomon követhető, azonos lefutása jelzi az összetartozást. A két vonal a felszíni domborzat K–DK-i elmozgatása esetén kerülhetne egymásra.

Feltételezésünk szerint az izosztatikus gyökérvonalára az asztenoszféra mozgása nagyobb hatással volt, mint a felszíni domborzatra. A mélybeli meghajtó erő a közegsűrűdésen keresztül adódik át a felszínközeli részekre. A mélybeli képlékeny közegben a mozgás folyamatos, de felszín felé közeledve az egyre ridegebb kőzetek már összetörednek, felgyűrődnek, feltorlódhatnak: ellenállnak a meghajtó erőnek és lefékezik a mozgásnak a vízszintes összetevőjét. A mozgásvektor a felgyülemlő, kivastagodó,



19. ábra A Kárpát-Pannon régió Bouguer-anomáliatérképe a hegységek gerincvonalával (fehér szaggatott vonal) és a PANCAKE szelvényvel (fehér folytonos vonal), valamint a gravitációs minimumzóna tengelyével (piros szaggatott vonal)

Figure 19 Bouguer anomaly map of the Carpathian-Pannonian region with the axis of the mountains (white dashed line) and PANCAKE (white continuous line) and with the axis of the gravity minimum zone (red dashed line)

rideg felső kéreg kőzetek miatt a kezdeti főleg vízszintes irányú mozgásból egyre inkább függőlegessé válik, ez lát-szik a kéregsebesség-térképen (3. *ábra*) a horizontális mozgásvektorok amplitúdójának lecsökkenéséből is. A gyökérszónák elcsúszásának, a további feldolgozások szempontjából van egy kedvezőtlen mellékhatása.

A domborzat és az üledékes medencék vastagsága és átlagsűrűsége alapján az izosztatikus gyökérszónák nagyságát Magyarország területére már meghatároztuk (Kiss 2010). Hasonló módon a Kárpát-Pannon régió területére is elvégezhető lenne ez a számítás, s általa a Moho felszínének hullámzása megbecsülhető. Nagyon nehéz azonban figyelembe venni a domborzat és a gyökérszónák eltérő sebességű mozgását! Milyen mértékű ez, mettől-meddig tart a térben? A kiszámított Moho-felszín és a valós Moho helyzete eltérő lesz, így a felszíni földtani értelmezéshez a mélyhatást nem tudjuk pontosan korrekcióba venni. E problémák miatt az egész izosztatikus korrekció a Kárpát-Pannon régió térség hegyvidéki részén bizonytalan, megbízhatatlanná válik, ráakadódik egy geodinamikai mozgásból származó kevésbé ismert tényező.

A feldolgozásaink láthatóvá tették a kéreglitoszféra és a köpenylitoszféra eltérő sebességű mozgását, ami fontos, és a mélyföldtani értelmezés pontosításához vezethet, de a felszínközeli földtani értelmezésekhez nem tudjuk a gravitációs anomália-térképet pontosabbá tenni (kiszűrve a nagyobb mélységek anomális hatásait), pedig ezt céloztuk meg.

## Összefoglalás

A tanulmányban a mélyfúrás, földrengési (szeizmológiai) és ürgeodéziai adatok alapján meghatározott mozgási modelleket gyűjtöttük egy csokorba, és elemeztük azok megállapításait. A korábbi publikációkban megjelent feszültség- (1. *ábra*) és sebességterek (3., 6. *ábra*), valamint a geodinamikai mozgásterek (2., 4. *ábra*) információi konvergálnak, a Kárpát-Pannon régió kialakulásának egyfajta lenyomatát mutatják.

Megpróbáltuk a mozgásirányok kialakulásának az okait is feltárni, amelyhez a konvekciós köpeny- illetve asztenoszféraáramlásokon túl az izosztázia jelenségét (10., 11. *ábra*) is felhasználtuk. Érdekes melléktermékként a kompressziós alpi/kárpáti orogén zónában választ találtunk az extenzió lehetséges okaira is.

Az információk nem ellentmondásosak, inkább kiegészítik egymást, mint fontos darabjai egy földtani *puzzle* játéknak.

A mozgási modell megértéséhez három dimenzióban kell gondolkodni, amivel érthetővé válik a mozgásmodell, amelyet a vízszintes komponens alapján rengeteg publikációban bemutatnak, s amelynek alapján a mozgási energia felemésztődése látszik, közeledve az Alpok D-i, illetve a Kárpátok Ny-i előteréhez. A függőleges összetevő szerepéről eddig nem nagyon emlékeztek meg.

A mélyfúrás, földrengési és ürgeodéziai mérési eredmények kontrolljaként megvizsgáltuk a PANCAKE litoszféra-akutató szeizmikus szelvényt (15.–17. *ábra*). Az elsőbeérkezései tomográfiából kapott eredmények megerősítették a mozgásmodellt, egyrészt a konvekciós áramlásra visszavezethető lemezmozgást, másrészt a hegységperemeken az izosztatikus gyökérszónák miatt jelentkező közel függőleges mozgás kialakulásának törvényszerűségét. A függőleges vektorkomponens felerősödése a vízszintes vektorkomponens gyengülését okozza a kéreg felső tartományában, amit a felszíni GPS-mérések, mozgásvizsgálatok alapján érzékelünk.

Míndezeket tanulmányoztuk a domborzati térkép (14. *ábra*) és a Bouguer-anomáliatérkép (19. *ábra*) alapján területileg is, amiből a K-Kárpátok vonatkozásában az elmozdulás mértéke jól követhető. A térképi adatrendszerek összevetése alapján egy DK irányú csúszás azonosítható a gerincvonal és a minimumtengely között, amit csak az eltérő sebességű kéreg- és köpenymozgással lehet megmagyarázni. A mozgás fő iránya a Vrancea-zóna.

## Utószó

A cikk írásakor még arra gondoltunk, hogy megint lesz miről beszélgetnünk Horváth Ferivel a cikkel kapcsolatban. Sajnos már nem tudtunk vitatkozni, mert Feri már nincs velünk. Pedig véleménye, előadásai mérvadóak voltak a szakmában. Nehéz lesz pótolni az egyetemi tanárembert, a szakmai tudományos előadót, a vitapartnert és az éles szemű kritikust is. Bízunk benne, hogy most is látja és követi szakmánkat és a Föld geodinamikai folyamatait. Nyugodj békében Feri, nem feledünk!

## A tanulmány szerzői

Kiss János, Zilahi-Sebess László

## Jegyzetek

- <sup>1)</sup> Trans European Suture Zone
- <sup>2)</sup> Nagy sűrűségű kőzetek a felszínen és a Bouguer-anomália-minimumok ellentmondása

## Hivatkozások

- Airy G. B. (1855): On the computation of the effect of the attraction of mountain masses as disturbing the apparent astronomical latitude of stations in geodetic surveys. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 145, 101–104.
- Bada G., Horváth F., Gerner P., Fejes I. (1999): Review of the present-day geodynamics of the Pannonian basin: progress and problems. *Journal of Geodynamics*, 27/4, 501–527.
- Bada G., Windhoffer G., Szafián P., Dövényi P. (2004): Feszültségtér Európában és a Pannon-medence térségében: adatok, modellek és geodinamikai alkalmazások, Budapest, ELTE, Geofizikai Tanszék, p. 118.
- Bada G., Horváth F., Dövényi P., Szafián P., Windhoffer G., Cloetingh S. (2007): Present day stress field and tectonic inversion



- in the Pannonian Basin. *Global and Planetary Change*, 58/1, 165–180.
- Borza T., Kenyeres A., Virág G. (2007): Műholdas geodéziai vonatkoztatási rendszerünk (ETRS89) felújítása. *Geodézia*, 10, 40–48.
- Burov E. V., Kogan M. G., Lyon-Caen H., Monár P. (1990): Gravity anomalies, the deep structures and dynamic processes beneath the Tien Shan. *Earth and Planetary Sciences Letters*, 96, 367–383.
- Carminati E., Doglioni C. (2004): Mediterranean tectonics. *Tectonics, Europe, Mediterranean tectonics and neotectonics*. GEOL: 00135
- Faccenna C., Piromallo C., Crespo-Blanc A., Jolivet L., Rossetti F. (2004): Lateral slab deformation and the origin of the western Mediterranean arcs. *Tectonics*, 23, TC1012, DOI: 10.1029/2002TC001488.
- Grenerczy Gy. (2014): A Pannon-medence első háromdimenziós űrgeodéziai kéregmozgástérképe (1. rész). Űrvilág úrkutatási hírportál (<http://www.urvilag.hu>)
- Grenerczy Gy., Kenyeres A., Fejes I. (2000): Present crustal movement and strain distribution in Central Europe inferred from GPS measurements. *J. Geophys. Res.*, 105, 21835–21846.
- Grenerczy Gy., Kenyeres A. (2004): GPS velocity field from the Adriatic to the European Platform. *The Adria Microplate: GPS Geodesy, Tectonics, and Hazards*. NATO Advanced Research Workshop, Abstract Book, pp. 52–55 (Veszprém).
- Handy M. R., Ustaszewski K., Kissling E. (2014): Reconstructing the Alps–Carpathians–Dinarides as a key to understanding switches in subduction polarity, slab gaps and surface motion. *International Journal of Earth Sciences (Geol Rundsch)*, DOI: 10.1007/s00531-014-1060-3.
- Hansen K. N., Mount V. S. (1990): Smoothing and extrapolation of crustal stress orientation measurements. *Journal Geophysical Researches*, 95, 1155–1166.
- Heiskanen W. A. (1948): Report on Isostasy. Intern. Union of Geophys. and Geod., Oslo.
- Horváth F. (2004): A Pannon-medence jelenkori geodinamikájának atlasza, Euro-konform térképsorozat és magyarázó. [http://geophysics.elte.hu/atlas/geodin\\_atlas.htm](http://geophysics.elte.hu/atlas/geodin_atlas.htm)
- Horváth F. (2012): A Pannon-medence geodinamikája. Magyar Tudomány Ünnepe, Budapest, MTA 2012. november 7.
- Kiss J. (2009a): Regionális gravitációs anomáliák, izosztikus hatások Magyarországon. *Magyar Geofizika*, 50/4, 153–171.
- Kiss J. (2009b): A CEL08 szelvény geofizikai vizsgálata. *Magyar Geofizika*, 50/2, 59–74.
- Kiss J. (2010): Mély medencék izosztikus hatása. *Magyar Geofizika*, 51/3, 1–13.
- Kiss J. (2014): A Kárpát-Pannon régió gravitációs képe – geodinamikai vonatkozások. pp. 113–126. In: Fancsik T., Piros O. (eds): *Magyar Földtani és Geofizikai Intézet Évi Jelentése*, 184 o., 2012–2013, MFGI, HU ISSN-0368-9751.
- Kiss J. (2016): A gravitációs és mágneses anomáliák átfogó értelmezése a Kárpát–Pannon-régióban. *Földtani Közlöny*, 146/3, 275–298.
- Koulakov I., Kaban M., Tesauro M., Cloetingh S. (2009): P- and S-wave anomalies in the upper mantle beneath Europe from tomographic inversion of ISC data. *Geophysical Journal International*, 179, 345–366.
- Kovács I., Falus Gy., Stuart G., Hidas K., Szabó Cs., Flower M., Hegedűs E., Posgay K., Zilahi-Sebess L., Fancsik T. (2011): Asztenoszféra-áramlás, mint a terciér kilökődés és extenzió meghajtóereje? *Magyar Geofizika*, 52/2, 79–87.
- Kovács I., Falus Gy., Stuart G., Hidas K., Szabó Cs., Flower M., Hegedűs E., Posgay K., Zilahi-Sebess L., Fancsik T. (2012): Seismic anisotropy and deformation patterns in upper mantle xenoliths from the central Carpathian–Pannonian region: Asthenospheric flow as a driving force for Cenozoic extension and extrusion? *Tectonophysics*, 514–517, 168–179
- Kuhlemann J. (2007): Paleogeographic and paleotopographic evolution of the Swiss and Eastern Alps since the Oligocene. *Global and Planetary Change*, 58, 224–236.
- Merle O. (2011): *A Simple Continental Rift Classification – Tectonophysics*. Elsevier, pp. 88–95.
- Oldow J. S., Ferranti L., Lewis D. S., Campbell J. K., D’Argenio B., Catalano R., Pappone G., Carmignani L., Conti P., Aiken C. L. V. (2002): Active fragmentation of Adria, the north African promontory, central Mediterranean orogen. *Geology*, 30, 779–782.
- Pratt J. H. (1855): On the attraction of the Himalaya Mountains and of the elevated regions beyond them upon the plumbline in India. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 145, 53–100.
- Starostenko V., Janik T., Kolomiyets K., Czuba W., Środa P., Grad M., Kovács I., Stephenson R., Lysynchuk D., Thybo H., Artemieva I. M., Omelchenko V., Gintov O., Kutas R., Gryn D., Guterch A., Hegedűs E., Komminaho K., Legostaeva O., Tiira T., Tolkunov A. (2013): Seismic velocity model of the crust and upper mantle along profile PANCAKE across the Carpathians between the Pannonian Basin and the East European Craton. *Tectonophysics*, 608, 1042–1072.
- Qorbani E., Bokelmann G., Kovács I. J., Horváth F., Falus Gy. (2016): Deformation in the asthenospheric mantle beneath the Carpathian-Pannonian Region. *Journal of Geophysical Researches: Solid Earth*, 121, DOI: 10.1002/2015JB012604.
- Stampfli G. M., Borel G. D. (2002): A plate tectonic model for the Paleozoic and Mesozoic constrained by dynamic plate boundaries and restored synthetic oceanic isochrons. *Earth and Planetary Science Letters*, 196, 17–33.
- Chikán G., Czakó S., Ficker B., Géher B., Gyertyánffy Z., Gyöngyösi P., Horváth F., Kelemen I., Kerekes A., Major A., Mező Gy., Nagy L., Nász I., Ozorai J., Radnóti G., Szucsán S., Tóth L., Tóth Z., Trosits D. (2016): Telephely Biztonsági Jelentés, II. Kötet, MVM Paks II. Zrt.
- Vening Meinesz F. A. (1931): Une nouvelle methode pour la reduction isostatique regionale de l’intensite de la pesanteur. *Bulletin Géod.*, 29, 33–51.
- Verpakhovska A., Pylypenko V., Yegorova T., Murovskaya A. (2018): Seismic image of the crust on the PANCAKE profile across the Ukrainian. *Journal of Geodynamics*, 121, 76–87
- Völgyesi L. (2010): A Kárpát-Pannon-térség geodinamikája. Kézirat, BME <http://www.agt.bme/volgyesi/mszeizmo/pannon.pdf>

# A szovjet katonai bázisok területének környezetvédelmi felmérése, 1990–1992\*

NEMESI L.

## Bevezetés

2017-ben megjelent az Eötvös Loránd Geofizikai Intézet (továbbiakban ELGI) 1965 és 2012 közötti történetét bemutató 726 oldalas kötet. Mint a kiadvány egyik szerzője és lektora nagyon sajnálom, hogy a majdnem tizenöt éven át készülő könyv megjelenésében már nem is reménykedtünk, és ezért nem igyekeztünk kiemelni kellően intézetünk talán egyik legnagyobb rendszerváltás utáni eredményét, a szovjet katonai objektumoknak a csapatkivonással összefüggő környezetvédelmi vizsgálatát, annak sikereit. A következőkben ezt a mulasztást szeretném pótolni.

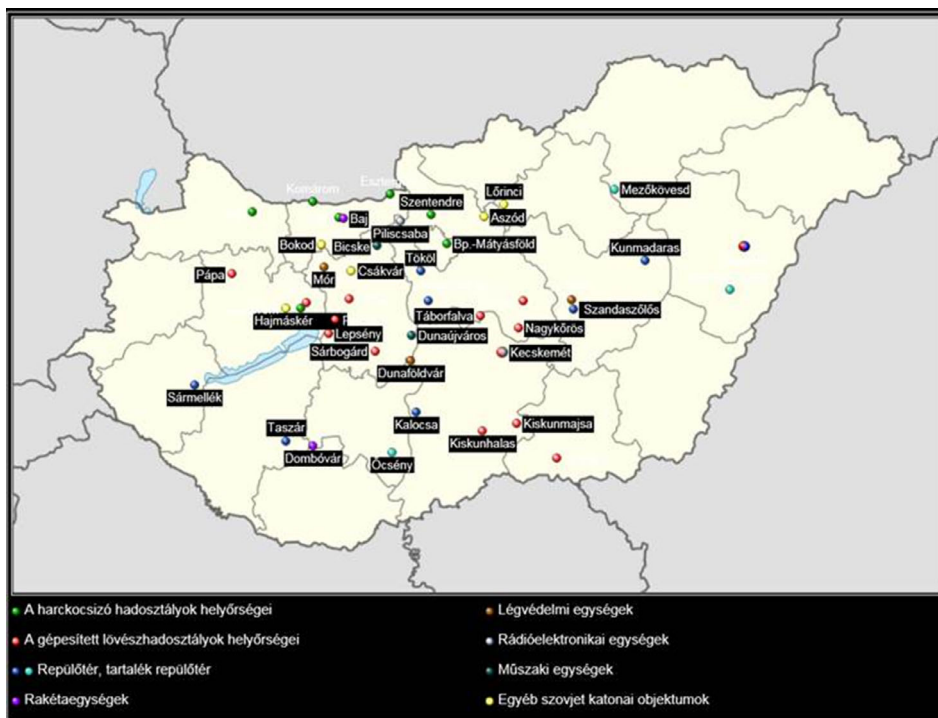
## Történeti háttér

Ez a cikk ugyan az ELGI történetét bemutató könyv II. kötetének kiegészítéseként készült, de önálló írásként is

érthetőnek kell lennie. Ezért feltétlenül szükséges a történeti háttér bemutatása.

A több mint 25 évvel ezelőtt történeteket, illetve az azt megelőző helyzetet érdemes felidézni. 1989 áprilisáig, az egyoldalú (részleges) kivonás kezdetéig, egy 110 ezer fős szovjet kontingens állomásozott Magyarországon. A Déli Hadseregcsoport 100 helyőrségben települt, és mintegy 6000 – köztük 2000 magyar állami tulajdonban lévő – objektumot használt.

1990. március 10-én Moszkvában *Horn Gyula* és *Eduard Sevardnadze*, a két ország külügyminiszterei írták alá a teljes szovjet csapatkivonás kormányközi egyezményét. A kivonási menetrend: atom-robbanófejek hordozóeszközei – 1990. március–április; harckocsi-hadosztályok – 1990. március–szeptember; gépesített lövészadosztályok: Szekesfehervár – 1990. szeptember–december; Kecskemét – 1991. január–március; légielő – 1990. május–június; biztosítóegységek, anyagi készletek – 1991. június 30. 1991. jú-



1. ábra. A Déli Hadseregcsoport által használt fontosabb objektumok elhelyezkedése Magyarországon (Wikipédia)

\* *Magyar Balázs* és *Verő László* írásainak és ismereteinek felhasználásával.



2. ábra. *Annus Antal* (balra) altábornagy, a Honvédelmi Minisztérium államtitkára ünnepélyes keretek között búcsút vesz *Viktor Silov* (jobbra) altábornagytól, a még hazánkban tartózkodó utolsó szovjet katonától (MTI fotó)

nius 16-án indult el az utolsó katonavonat, az utolsó szovjet katona, *Viktor Silov* altábornagy, a Déli Hadseregcsoport kivonását levezénylő parancsnok, pedig 1991. június 19-én 15 óra 01 perckor a Záhony-Csap-i hídnál lépte át a magyar határt.

Hátramaradtak viszont az elhagyott objektumok elszámlolásával, őrzés-védelmével, az ismeretlen mértékű környezetszennyezéssel és -károsítással és a felek megegyezéseként magyar részről kezdetű javasolt null-szaladás megoldással kapcsolatos gondok. A csapatkivonást elhúzó vagyoni-pénzügyi vita követte, mert az 1957-es kormányközi egyezmény több kérdést nem tisztázott. A felek a hátrahagyott katonai objektumok át-, illetve visszaidása, leromlott állaga, valamint az okozott környezeti károk miatt hosszas vitába bonyolódtak. Végül „nulla megoldás” született: a magyar kormány nem fizetett a szovjet csapatok által hátrahagyott vagyonért, de nem is követelte az általuk okozott környezeti károk megtérítését. Az egyezséget 1992. november 11-én Budapesten írta alá *Antall József* miniszterelnök és *Borisz Jelcin* orosz elnök.

A következőket érdemes megjegyezni, a mintegy 6000 objektum átvételére és ismeretlen mértékű környezetszennyezésének felmérésére, a kormányközi egyezmény 1990 márciusi aláírása és az 1991 júniusában befejezett kivonulás között alig több mint egy év jutott.

## A csapatkivonásokkal kapcsolatos tárgyalások delegációi és a környezetvédelmi szempontok

A szovjet csapatkivonásokkal kapcsolatban a Szovjet és Magyar Szakértői Csoportok egyike 1990. szeptember 28. és 1990 decembere között tárgyalt.

Tagjai magyar részről:

*Kiss Ernő*: Környezetvédelmi és Területfejlesztési Minisztérium osztályvezetője

*Dr. Zsilák György*: Magyar Állami Földtani Intézet osztályvezetője

*Magyar Balázs*: Eötvös Loránd Geofizikai Intézet osztályvezetője

*Pálmüller József*: Pénzügyminisztérium Zárolt Vagyongazdálkodási és Hasznosító Intézete, környezetvédelmi szakértő

*Dr. Maklár György*: Magyar Honvédség Katonai Közegészségügyi Járványügyi Állomás igazgatója

*Dr. Csató Éva*: Földmérési és Távérzékelési Intézet csoportvezetője

*Dr. Endrédi István*: Környezetgazdálkodási Intézet főmunkatársa.

A Szovjet Szakértői Csoport tagjai:

*Grosev V. I.*: A Szovjetunió Környezetvédelmi Állami Bizottsága (GOSZKOMPRIRODA) Közgazdasági Főosztályának főosztályvezető helyettese (a tárgyalócsoport vezetője)

*Vlagyimirov Ju. M.*: A GOSZKOMPRIRODA Ellenőrzési-Felügyeleti Főosztályának szakértője

*Hramenkov V. M.*: A Szovjetunió Igazságügyi Minisztériumának osztályvezető helyettese

*Szirazjev T. M.*: A Szovjetunió Erdészeti Állami Bizottságának tudományos munkatársa

*Jefremenko A. B.*: A Szovjetunió Geológiai Minisztériumának tudományos munkatársa.

Az Ökológiai szakértői Bizottság tagjai 1990. december 21. és 1992. augusztus 22. között:

*Dr. Szabó Gábor*: Környezetvédelmi és Területfejlesztési Minisztérium helyettes államtitkára, a bizottság vezetője (1990. december 21. és 1992. augusztus 15. között)

*Dr. Kemény Attila*: Környezetvédelmi és Területfejlesztési Minisztérium helyettes államtitkára 1992. augusztus 15. után a bizottság vezetője

*Kiss Ernő*: Környezetvédelmi és Területfejlesztési Minisztérium osztályvezetője, a bizottság helyettes vezetője

*Dr. Endrédi István*: Környezetgazdálkodási Intézet főmunkatársa (1991. július 1-től)

*Frits Tivadar*: Környezetgazdálkodási Intézet (szakértő)

*Pálmüller József*: Pénzügyminisztérium Szovjet Csapatkivonási Titkárság (szakértő)

*Gerőfi Levente*: Közép-Duna-völgyi Környezetvédelmi felügyelőség (szakértő)

*Magyar Balázs*: Eötvös Loránd Geofizikai Intézet osztályvezetője (szakértő).

A tárgyalásokon meghívott szakértőként a magyarországi Környezetvédelmi Felügyelőségeknek további harminc, és a Földmérő és Talajvizsgáló Vállalatnak három tagja vett részt.

A Szovjet Tárgyaló Delegációnak a szakértői és ökológiai csoporton kívül huszonhárom tagja volt, akik közül mindenkit nem sorolunk fel. A delegáció vezetője: *Grisin, Ju. P.*, helyettes vezetője: *Sikunov, G. Sz.* volt. A többiek a Szovjet Külgazdasági Kapcsolatok Minisztériumának, a Külügyminisztériumnak, az Igazságügyi Minisztériumnak, a Környezetvédelmi Minisztériumnak, az Ipari Minisztériumnak, a Pénzügyminisztériumnak, a Honvédelmi Minisztériumnak, a Környezetvédelmi és Természetgazdál-

codási Minisztériumnak tagjai, és a felszín alatti vizek és a talaj védelmének szakértői voltak.

### Az ELGI Mérnökgeofizikai Osztályának környezetszennyezéseket vizsgáló tevékenysége: módszerek, műszerek

Az egyes objektumokban lezajló vizsgálatok menetét *Fejes Imre* az *ELGI története II.* kötetének 331. oldalán leírta. Szeretnénk azonban azt is érzékeltetni, hogy milyen feladatai voltak egy 20–25 fős – kutatókból, technikusokból, gépkocsivezetőkből, segédmunkásokból álló – osztálynak alig több mint egy év alatt az ország teljes területén. 112 objektumban kellett elvégezni a felmérést, dokumentálni és az eredményeket a tárgyaló felekkel, a mintegy 45–50 fős szovjet–magyar miniszteriális és szakértői csoporttal megismertetni, elfogadtatni.

Egy-egy objektum felmérése a következő lépésekben történt:

- helyszíni szemle, a geofizikai vizsgálatok szükségességének megállapítása, a vizsgálati helyek kijelölése,
- geoelektromos felszíni vizsgálatok indukciós eljárással (Geonics EM–31 műszerrel) a zavartalan és a háborgatott kőzetek elkülönítésére,
- mérnökgeofizikai szondázások (8–10 m mélységig) a földtani felépítés, a talajvízszint és az esetenként ezen úszó szénhidrogének megismerésére,
- rétegszelektív talaj- és talajvízminták kiemelése a legkritikusabb mélységszakaszokból,
- laborvizsgálatok szaklaboratóriumban,
- közelítő számítások a szennyezett talaj mennyiségének megállapítására,
- az elhárítás várható költségeinek megbecslése.

A környezetvédelmi vizsgálatokban meghatározó szerepe volt a mérnökgeofizikai szondázó (MGSz) berendezésnek. A műszerről *Fejes Imre* az *ELGI története II.* kötetének 327–331. és 559–561. oldalán is írt. De miután ez az eszköz még a szakmai körökben sem közismert, és még a

szovjet objektumokban végzett mérések során is fejlesztés alatt állt, érdemesnek érezzük e műszerkomplexumot röviden ismertetni és kiemelni azt, hogy a kivonulást vezénylő főtisztet és a szovjet szakértőket is ez a műszer győzte meg az eltemetett szennyezések (főleg szénhidrogének) kimutathatóságáról.

A mérnökgeofizikai szondázó műszert *Jósa Ernő* szellemi irányításával kezdték létrehozni az 1980-as években. A lényege az, hogy a felszínközeli laza rétegekbe egy 4 cm átmérőjű csövet egy hidraulikus berendezéssel sajtolnak be, és lesajtoláshoz szükséges össznyomás és köpenysűrűlőség mérésén túl a csövön belül karotázs méréseket is végeznek. Az szükséges, kis átmérőjű lyukakban használható szondákat is az ELGI-ben fejlesztették ki. A kezdetben sok problémával működő berendezést később főleg már *Magyar Balázs* irányításával továbbfejlesztették és stabilizálták. A meghatározott fizikai paraméterek alapján a mérés helyszínén egy értelmező program számítógépen kiírja a rétegsort, valamint jelzi a szennyező anyagokat (oroszul is). Az értelmező program orosznyelvű fordítását is *Magyar Balázs* végezte el.

Az MGSz berendezések és a módszer tökéletesítése a gyakorlati alkalmazással párhuzamosan folyt. A Kivonási Titkárság munkáját *Annus Antal* altábornagy és *Karácsony Imre* vezérőrnagy irányította. 1990 vége felé felgyorsultak az események, mivel a teljes felmérést 1991. június 30-ig el kellett végezni, így november végén Cegléden, majd Kalocon is kellett bemutató mérést tartani. 1991 januárjában pedig az ELGI megnyerte a Felső-Tisza-vidéki (Nyíregyháza), a Tiszántúli (Debrecen), a Közép-Tisza-vidéki (Szolnok), az Alsó-Tisza-vidéki (Szeged), Alsó-Duna-völgyi (Baja), Nyugat-Magyarországi (Győr) Környezetvédelmi Felügyelőségek területén található valamennyi, továbbá a Közép-Duna-völgyi (Budapest) és Közép-Dunántúli Felügyelőség (Székesfehérvár) területén található jelentősebb objektumok felmérési pályázatát. Ezek között a Debrecen, Kiskunlacháza, Kalocsa, Sármellék repülőterei voltak a legjelentősebbek.

A felmérés során a mérnökgeofizikai szondázásnál először került alkalmazásra az úgynevezett „null-neutron” szonda, amellyel kedvező körülmények között el lehetett



3. ábra. A mérnökgeofizikai szondázó berendezés Sármelléken



4. ábra. Mintavételezés Sármelléken az új laptop alapú szondázóval





5. ábra. Az ELGI technológiai bemutatója a hajmáskéri gyakorlótéren

különíteni a szénhidrogénnel telített talajt a talajvízzel telítettől. A másik jelentős fejlesztés a laptop alapú regisztrálás és a mért, átlagolt paraméterek alapján kidolgozott talajminősítés volt. Ez azt jelentette, hogy a két mechanikai paraméter – csúcsnyomás, köpenysúrlódás – és a természetes gamma-paraméterek alapján a kifejlesztett programmal automatikusan minősítettük a harántolt földtani képződményeket, a gamma–gamma-, neutron–neutron- és csúcsnyomás-paraméterek segítségével pedig a harántolt képződmények fizikai állapotát is lehetett minősíteni. A programot *Stickel János*, a réteggkorrelációs minősítést pedig *Magyar Balázs* készítette el.

A harántolt rétegek minősítésekor ki lehetett választani, hogy az adatokat magyar, angol, német vagy orosz nyelven jelenítsük meg, majd január végére már az adatlapokat a helyszínen is ki lehetett nyomtatni.

A másik újítás az volt, hogy az EM–31 műszert az illegális, lefedett hulladéklerakók felkutatására is használtuk. Ez a módszer különösen a téli, hóval borított időszakban volt rendkívül értékes, amikor a felszíni nyomokat a hó elfedte. A módszert egyébként vezetékutatásnál és a szondázási pontok kijelölésénél biztonsági szempontból is használtuk.

A módszeregyüttes rendkívül hatékony volt, amit a bemutatók egyikén a résztvevő orosz (szovjet) szakértők is



7. ábra. Kiskunlacháza repülőtér, bombázóknak épülő hangárokkal – előtérben balról: *Szabadvány László*, *Verő László*



6. ábra. A szovjet szakértői csoport Kalocsa repülőtérén

értékelhettek. Az eset a kalocsai repülőtéren történt, ahol a kivonulást követő napra a Kivonulási Titkárság 21 szovjet szakértőt hívott meg, továbbá a Csapatkivonási Titkárság, a Környezetvédelmi Minisztérium képviselői is részt vettek. A repülőtér szennyezettségi állapotáról semmilyen információnk sem volt, az első szondázási pontot *Viktor Girinszkij* alezredes, a Déli Hadseregcsoport környezetvédelmi felelőse jelölte ki. A szondázás befejezését követően azonnal elkészült a gépi kiértékelés, amelyet orosz nyelven rögtön kinyomtattunk, majd a nyomtató kapacitásának függvényében adtuk át a részt vevő szakértőknek. Az adatlapok áttanulmányozása során hitetlenkedő és a módszer hasznosságát kétségbevonó megjegyzéseket kaptunk szovjet részről, mivel az automatikus kiértékelés egy 2,5 m vastagságú rétegre „magas szervesanyag-tartalmú durva homok” minősítést adott. Közben összeszerelték a kollégák a rétegszelektív vízmintavételt és zavartalan talajmintavételt biztosító eszközöket is, és elsőnek „vízmintavételre” került sor. A vízmintavételt követően a vita már csak arról szólt, hogy a literes mintavételi üvegben található két csepp víz a kerozinnal együtt a talajból került-e az üvegbe, vagy pedig az üveg belső falán lévő pámaradványból. Tehát a durva homokban a „szerves anyagot” a kerozin adta. A mintavételi üveg falára ekkor kerül rá a „SILOV-KOKTÉL” címke.



8. ábra. Tájékoztató a felmérési eredményekről a debreceni repülőtér egyik hangárjában





9. ábra. Kalocsai repülőtér: így jött a földből a „Silov-koktél”  
(kerozin 95%, talajvíz 5%)

A felmérés során több olyan objektumot is kaptunk felmérésre, amelyet még nem hagytak el a szovjet katonák. Ilyen volt például a Kiskunhalasi Lövészetred laktanyája, amelynek parancsnoka oszét származású, legalább 220 cm magas katona volt. A munka megkezdésekor *Magyar Balázs* bemutatta *Silov* altábornagy által aláírt engedélyt, amelyet a parancsnok figyelmesen elolvasott, majd közölte: „Tudja, magukat én ide nem engedem be”. *Magyar Balázs* nem hagyta szó nélkül: „Én úgy tudtam, hogy a szovjet hadseregben rend van és fegyelem, ezért ellenkezését nem értem.” „Ha a szovjet hadseregben még rend lenne és fegyelem, nem a kivonulásról és a területre történő beengedésről tárgyalnánk” – válaszolta a parancsnok.

*Magyar Balázs* megköszönte az „együttműködést”, majd körbejárta a laktanyát, amelyet egyik oldalról egy dohányfeldolgozó, másik oldalról a Magyar Honvédség laktanyája, harmadik oldalról pedig egy varroda határolt. Mindhárom objektum vezetőjétől engedélyt kért a mintavételre, amelyet meg is kapott. Két berendezés volt a helyszínen, mindkettőt a szovjet laktanya kerítése mellé vezényelte, és mivel harmadik nem volt, az egyik munkatárs egy négyméteres fűrócsövet állított a kerítéshez közel.

Ezután *Magyar Balázs* visszament a parancsnokhoz, aki eléggé ingerülten fogadta, de gyorsan lecsillapodott, amikor *Magyar Balázs* a következőképpen vázolta a helyzetet: „Parancsnok úr! Egy berendezésünk ott, a másik amott, a harmadik pedig ezen az oldalon vizsgálja az Önök környezetét. Kérem, lássa be, Önöket bekerítettem, kérem, adja meg magát.” A parancsnok vagy húsz másodpercig csak nézett, majd legyintett: „Tudja, jöjjenek be és csináljanak, amit akarnak.” Ezután végig együttműködő és segítőkész volt.

Az előrehaladásról és a laktanyák felmérésének ütemezéséről kéthetente a „spenót-házban” (az akkori Roosevelt téren) volt beszámoló, amelyet szovjet részről *Silov* altábornagy vezetett, magyar részről pedig *Annus Antal* altá-



10. ábra. A tárgyalások színhelye az azóta lebontott spenót-ház az egykori Roosevelt téren

bornagy. A tárgyalás hivatalos nyelve a magyar volt, és váltakozva hol a magyar, hol a szovjet fél adta a tolmácsot. Általában négy fő témája volt a tárgyalásoknak, ezek a következők voltak:

- a szovjet fél által épített objektumok „visszavásárlása”, ezek értékének meghatározása. Ezek közé tartoztak az ideiglenes „öröklakások”, a repülőterek felújított kifutópályái, üzemanyag-tárolók, javítóműhelyek, oktatóbázisok,
- a szovjet fél által a magyarországi műemlékekben, azok használata során keletkezett károk meghatározása,
- a környezetvédelem területén okozott károk felmérése, elhárítási költségek meghatározása,
- magyarországi magánszemélyeknek a szovjet katonák által okozott károk megtérítése.

A szovjet fél az első pontban megjelölt vagyontárgyért 62 milliárd forintot kért, és kifizetett számlákkal próbálta igazolni, hogy ezt az összeget magyar vállalatoknak kifizette.

A magyar fél számára a tárgyalások során rendkívül fontos volt, hogy ez az összeg ellentételezésre kerüljön, mivel csak így volt lezárható a megállapodás 1991. június 30-ig, a szovjet Déli Hadseregcsoport megszűnéséig. Ezért fontos volt, hogy a környezetvédelmi fejezet elfogadásra kerüljön, mivel a szovjet fél vitatta a szennyezettségi határértékeket és a kárszámítás módját is (a vizsgálatok módszerét is néha kikezdték).

1991. január 17-én úgynevezett nagy plenáris ülésen a környezetvédelmi fejezet volt napirenden, amelyre a magyar fél egy, az orosz szakmai nyelvet egyáltalán nem beszélő tolmácsot hozott, úgyhogy nagyon vontatottan ment a napirend elfogadása. A környezetvédelmi fejezet előadója *Magyar Balázs* következett, amikor *Silov* türelme elfogyott és *Annus Antal*nak címezve a következőképpen fakadt ki: „Uraim! Mit gondolnak, azzal, hogy mi vállaltuk a kivonulást, Önök feljogosultnak érzik magukat, hogy mindenkit, aki oroszul beszél, már a süllyesztöbe küldjék? Ne felejtsek el, uraim, hogy a Déli Hadseregcsoport leg-ütőképesebb egységei még Magyarország területén vannak.”



11. ábra. Verő László ismerteti angolul a felmérés eredményeit Hajmáskéren

*Annus Antal* erre nem válaszolt semmit, hanem bejelentette az előadást. *Magyar Balázs* odament hozzá és kérte, hogy oroszul tarthassa meg az ismertetést, amelyre *Annus Antal* szigorú arccal azt válaszolta: „A tárgyalás hivatalos nyelve a magyar, ezt jól jegyezze meg, ha itt maga megszólal oroszul, én azonnal kivezettetem.”

Ilyen fagyos, nehéz egyeztetés után *Magyar Balázs* megkezdte előadását – oroszul! Erre *Annus Antal* felállt és kiment a teremből. Nagyjából húsz perc után *Silov* altábornagy megállította az előadást, megkérdezte, hol tanult meg ilyen jól oroszul. *Magyar Balázs* Leningrádban járt egyetemre. *Silov* a válasz után közölte, hogy az ő veje is azon az egyetemen tanul, majd a beszélgetés átment teljesen más, személyes jellegűbe – hol volt a kollégium, ki volt akkor a rektor, hogy volt az egyetemalapítás 200. évfordulója, és így tovább –, majd megkérdezte *Karácsony Imre* vezérőrnagyot, aki nem hagyta el a termet: „Mi ez az ember a bizottságban?” „Ő a környezetvédelmi tótumfaktum” – volt *Karácsony Imre* válasza. „Ha ez így van, én ma este kész vagyok a környezetvédelmi »Metodika« elfogadására, és hajlandó vagyok azt aláírni” – jelentette ki *Silov*. Nagy volt az öröm, és *Annus Antal* altábornaggyal a vita a szünetben háromszor féldeci szilvapálinkával lett rendezve, amelyet ő állt.

A laktanyákban uralkodó állapotokról a Fekete Doboz munkatársa, *Elbert Márta* szeretett volna forgatni, amelyre nem kapott engedélyt, ezért a laktanyákon belüli első felvételek készítésére *Flórián Endrét* és *Magyar Balázst* kérte meg. A kivonást követően bemutatott *Hagyaték* című film egy jelentős része, különösen az, amelyik a katonákról is szól, így a környezetvédelmi felmérésben dolgozó munkatársak alkotása volt.

Érdekesekek volt a kiskunlacházai repülőtéren történetek. Ezt a repülőtérrel kívánták legjobban fejleszteni, úgyhogy nagy teherbírású bombázók részére két hangár építését kezdték meg, ezek már 80%-os készületben voltak. Az előzetes bejárás során a parancsnok fogadott bennünket, és vele jártuk be a repülőtérrel, kijelölve a mintavételi helyeket is. A közel 300 hektáros területen két nagy üzemanyag-tároló is volt, ezért lassan haladtunk a bejárással. Ezért megegyeztünk, hogy a következő nap folytatjuk a

bejárást. A repülőtéren mintegy 15–20 repülőgép és 120–150 katona volt ezen a napon. Másnap, amikor be akartunk menni a repülőtérre, meglepetéssel tapasztaltuk, hogy a kapunál nincs őr, nincs lakat, a kapu nyitható. Óvatosan mentünk be a repülőtérre, arra gondolva, mikor ugrik elénk egy fegyveres katona, de sehol senki. A szálláson az ágyak bevetetlenek, az őrség szobájában még meleg a teavíz. Később tudtuk meg, hogy húsz nappal hamarabb hazavezényelték az „ütőképes” egységet azzal, hogy a Szovjetunióban most nagyobb szükség van az egységre, mint Magyarországon.

Közben készültek a felmérések, a Mérnökgeofizikai Osztály terepi munkatársai gyakran három hétig nem mentek haza, és utána is csak a „váltásért”, egy napra. Rendkívül ütemezetten kellett a terepi méréseket végezni, mivel a szovjet fél közölte, csak azon laktanyák felmérésének korrektségét fogja vizsgálni, amelyekről a zárójelentés 1991. június 1-jéig átadásra kerül. Május közepére az ELGI Mérnökgeofizikai Osztályán készült és a Csapatkivonási Titkárságon átadott jelentések száma meghaladta a 100-at, ami azt jelentette, hogy havonta átlag húsz területről kellett átadni a felmérési, laborvizsgálati és kárszámítási fejezetekből álló jelentést, olyan minőségben, hogy mindegyik jelentést tíz-tizenöt szovjet szakértő fogja ellenőrizni. Az eredmények, következtetések a plenáris ülésen a magyar területi környezetvédelmi szakemberek bevonásával lettek megtárgyalva, „kivesézve”. Május eleje felé már látható volt, hogy a környezetvédelmi károk értéke megközelíti a szovjet fél által az építményekért követelt összeget, ezért fokozódott az ellenőrzés mértéke. Gyakran kellett kockáztatni is, mivel a felmérések költségére nem volt elkülönített pénzeszköz, és ez gyakran okozhatta volna a felmérés megtorpanását. Ilyen volt a Felső-Tisza-vidéki Környezetvédelmi Felügyelőség területe (Nyíregyháza), ahol gyakorlóterek voltak, harckocsizó egységek állomásoztak. *Molnár Béla* igazgató jelezte, hogy a megállapodott munkákat azonnal be kell szüntetni (egy napja dolgoztunk a várhatóan kéthetes mintavételezésen), mivel nincs fedezete a munkáknak. Az osztályvezető, *Magyar Balázs* úgy döntött, hogy a munkákat folytatjuk és terv szerint be is fejezzük. Három hét múlva kétségbeesett telefonhívás érkezik *Molnár Béla* igazgatótól:

„Balázs, itt jártak ellenőrizni az előrehaladást a minisztériumból, és a Csapatkivonási Titkárságtól, és közölték velem, hogy ha kettő nap múlva nem adom át az összes, a működési területemet érintő jelentést, azonnali hatállyal ki leszek rúgva. Te, ez egy reménytelen helyzet.”

„Te Béla! Holnap reggel ültess fel egy kollégádat a vonatra, és átadom neki az összes jelentéseket, mivel mindet elkészítettem.” – válaszolta *Magyar Balázs*.

„És ki csinálta a laborvizsgálatokat, mivel én a saját laboromnak megtiltottam?” – jött a következő kérdés.

„Természetesen a Te igazgatásod alatt működő laboratórium.”

A kárfelmérések során talán az egyetlen pozitívum: a nukleáris fegyvert hordozó rakéták állomásoztatása ellenére radióaktív szennyezést sehol sem észleltünk.





12. ábra. Debreceni repülőtér készenléti üzemanyag-tárolói

A környezeti károk meghatározó részét az üzemanyag-tárolók szakszerűtlen kezelése, vagy nem kellő műszaki színvonalon kivitelezett, a vizsgálatok időpontjára korródálódott földalatti vezetékek vagy tartályok okozták. A debreceni repülőtéren például a vizsgált 90 fúráspontról több mint 20 mintavételi pontban találtunk a vízfelszín felúszó, szabad fázisú kerozint vagy gázolajat. A fúrásokban sokszor a kerozin vastagsága jelentősen meghaladta a 200 cm-t is. A repülőtéren jól megfigyelhető volt, hogy a szovjetek az 1980-as évek elejéig gyakorlatilag a magyarok által épített szénhidrogén-tárolókapacitást használták, és utána kezdődött egy igen intenzív fejlesztés. Az 5000 m<sup>3</sup>-es kerozintároló tartályok köré épített betonfal például 60×60×85 cm-es, egymáshoz illeszthető betontéglaiból épült fel, amelyeket orosz területről, vasúton szállítottak a repülőtérre. A föld alatti csővezetékeken és a földdel fedett, 17–25 m<sup>3</sup>-es tartályokon jelentős, sokszor 3–5 cm-t meghaladó, korróziós eredetű lyukakat találtunk. Annak ellenére, hogy a repülőgépek töltésekor elfolyó kerozin felfogására kiválóan kivitelezett drénrendszer épült ki, a gyűjtőtartályokon észlelt lyukak a drága pénzen kivitelezett rendszert értelmetlenné tették.

Az üzemanyag-tárolók jelentős hányadánál meghatározó volt a magyar lakossággal folytatott „üzemanyag-kereskedelem”. Ilyen terület tipikus példája volt a zeleméri üzemanyag-tároló, ahol a mai napig (2018 novembere) sem sikerült a kármentesítést megkezdeni. Az üzemanyag-tároló naiv parancsnoka azzal büszkélkedett, hogy a magyarok nagyon szeretik őket, amit azzal támasztott alá, hogy az örököt négy óránként váltani kell, mert a magyarok „szeretettől” leitatják őket. A felmérés során derült ki a „nagy szeretet” oka az, hogy az üzemanyag-tárolóból a kettős szögesdrótos kerítésen is keresztülvezetve, a föld alatt a legkülönbözőbb csővezetékeket fektettek le, amelyen az üzemanyagot a „vevőnek” továbbították, és így a tárolót nem kellett a katonának elhagyni, az üzemanyagért

az ellentételezés pedig az örökön át jutott az „eladóhoz”, amelyet valószínűen az örök tisztességesen megvámoltak.

A felmérést ezért a kerítésen túlra is ki kellett terjeszteni, mert a végcélnál a pancsolások is sokszor igen jelentős kárt okoztak. A zelemér-bodaszőlői üzemanyag-tárolónál elszámolási vita következményeit is megtaláltuk. A környéken birkáit legeltető pásztor nem fizette ki az üzemanyag ellenértékét, ezért a következő szállítmány a birkás kútjába érkezett.

A környezetvédelmi felmérés befejeztével a környezetvédelmi károk értékét 67 400 millió forintban határoztuk meg, amely ellentételezte a szovjet fél által az építményekért követelt összeget.

A felmérés során szerzett tapasztalatok kiválóan hasznosultak a további munkák során, mivel az objektumfelmérésekben vállalt nyilvánosság ismertté tette az ELGI Mérnökgeofizikai Osztályának munkáját, eredményeit, amelyek később az ELGI-ből kiszakadt magáncégeknél hasznosultak. Több környezetvédelmi felügyelőséggel alakult ki a mai napig is tartó korrekt szakmai kapcsolat, munkánk iránti megbecsülés. A tényfeltárási munkákban a területet már olyan szemmel néztük, hogy lehetséges, jövőre itt fogunk fizikai, kémiai vagy biokémiai módszerekkel olyan műszaki beavatkozást végezni, amely 1992-ben a debreceni és mezőkövesdi repülőtéren, a hajmáskéri gyakorlótéren valóban jelentős új kihívásként realizálódott is.

A munkák eredményeképpen 1992. november 11-én Budapesten írta alá *Antall József* miniszterelnök és *Borisz Jelcin* orosz elnök az úgynevezett nullszaldós megállapodást.

A felmérés során végzett „kiemelkedő, a magyar hazát szolgáló munka” elismeréseként *Magyar Balázs* és további öt környezetvédelmi minisztériumi vezető – a honvédelmi miniszter felterjesztése alapján – kormányelismerést kaptak külön díszfogadás keretében.

## Utóirat

Ez a publikáció is vagy két esztendeig készült. A '90-es években végzett embert próbáló munka elsődleges célja nem egy publikáció volt. A felmérések után több mint két évtizeddel már nehéz volt összegyűjteni dokumentumokat, élményeket, a most is sok munkával terhelt – és már máshol dolgozó – kollégáktól. Az enyém csak az ötlet volt, de köszönöm a sok segítséget *Magyar Balázsnak*, *Verő Lászlónak*, *Jánosi Mártának*, *Stickel Jánosnak* és *Stickel Gábornak*.

## A tanulmány szerzője

Nemesi László

# Nagy Zoltán

## 1936 – 2019

Egy karizmatikus önzetlen barát, kiváló szakember és példás családapa távozott el körünkől: Nagy Zoltán okleveles geofizikusmérnök, élt 83 évet.

„Iszonyú hirtelen hagyta itt bennünket, s csak állunk itt letörten... Ragaszkodtál, hogy – ha úgy adódik – szakmai búcsúztató el ne hangozzon. Szerény voltál mint mindig. Letiltottad: éppen eleget mondtam én mások felett!” – hangzott el a búcsúztatásodkor.

Ezt kell itt most pótolnom. A nyáron esedékes gyémántdiploma átvételéhez már megírtad rövidített szakmai életrajzodat, amely most kiváló forrásmunka, de amelyen nincs jogom sokat rövidíteni, egy kivételesen értékes életpályán nem eshet csorba.

1936-ban született Sopronban, ott is érettségizett a patinás Széchenyi Reál-gimnáziumban, majd ugyancsak Sopronban a Földmérőmérnöki Kar geofizikusmérnöki szakán kapta meg oklevelét 1959-ben.

1959. május 15-én lépett be a Kőolajipari Tröszt Szeizmikus Kutatási Üzemének állományába. Az ezt követő négy évben az ország különböző területein dolgozott a szeizmikus üzemegységeknél. Feladata a terepi szeizmikus mérések szakmai irányítása és a mérési adatok kiértékelése volt.

1963-ban újabb geofizikai módszerek bevezetéséről döntöttek az Üzemben. Megbízták a földi áramok mérésén alapuló tellurikus térképezés, valamint az egyenáramú szondázások bevezetésével, az üzemi technológia kidolgozásával és a terepi munkák megszervezésével. A cél medencealjzat kutatásának elősegítése és részben mérnökgeofizikai jellegű feladatok megoldása volt. Ezután két évig terepen irányította a geoelektromos méréseket, majd az 1965-ben létrehozott Geoelektromos Osztály vezetőjévé nevezték ki. A Geofizikai Kutató Vállalattá (GKV) átalakult cégénél ezt a beosztást töltötte be egészen 1993-ig, a MOL Rt. megalakulásáig.

Az 1971. évi külföldi tanulmányútján úgy tapasztalta, hogy a kutatással szembeni megnövekedett elvárásoknak csak az akkor legújabb elektromágneses mérési módszerek, a magnetotellurika, valamint a frekvenciatartományban mért EM-szondázások bevezetésével lehet megfelelni a közeljövőben. Munkatársaival 1974–75 folyamán megvalósította az EM-szondázások elindításához szükséges technikai feltételeket. Kidolgozta a terepi mérési meto-

dát, az adatfeldolgozást és a kiértékelés rendszerét. A magnetotellurika bevezetéséhez tartós kapcsolatot és fejlesztési együttműködést sikerült kialakítania a hazai egye-

temi és akadémiai kutatóhelyekkel (Miskolci Egyetem Geofizikai Tanszéke és a soproni MTA GGKI). Ez a közel három évtizedre kiterjedő együttműködés biztosította munkájának elméleti hátterét.

Kérésére a soproni Geofizikai Intézet felkarolta a modellvizsgálatok alkalmazását az interpretációs módszerek fejlesztésében. Az Intézetben megvalósított laboratórium lehetőséget adott az elektromágneses tér háromdimenziós fizikai modellezésére.

A bevezetett módszerek segítettek a medencealjzat tektonikai zónáinak vizsgálatát, a geotermikus tárolók kimutatását és hozzájárultak a szénhidrogén-tárolók kimutatásához. Az EM-szondázások módszerét és a hazai eredményeket két évtizeden keresztül ismertette a Miskolci

Egyetem geofizikus hallgatóinak.

1993-tól a MOL Rt. főmunkatársa lett, majd 1995–1998 között a Kutatás–Művelési Mérnöki Iroda Erőtérgeofizikai csoportjában az elektromágneses kutatási terület vezetőjeként dolgozott. 1998 júniusában ment nyugdíjba. Ezután – mint önálló vállalkozó konzultáns – a mérési eredmények interpretálását, a kutatási jelentések összeállítását és az egyéb szakmai konzultációt végezte továbbra is a Mérnöki Iroda, ill. a MOL Rt. számára. Kidolgozta az EM síkhullámterének számítási algoritmusát frekvenciadiszperziós közegre, amelyet 2003-ban publikált is.

Az erőtér-geofizikai módszerek gyakorlati elterjesztésében végzett munkáját a MOL Rt. a „Magyar Olajiparért” kitüntető érem ezüst fokozatával ismerte el 1994-ben. A bányászathoz kapcsolódó tevékenységéért pedig 1998-ban a Szt. Borbála-érem kitüntetését vehette át.

Munkájának eredményeit számos publikációban ismertette, részben önállóan vagy munkatársaival közösen, felhasználva a Magyar Geofizikusok Egyesülete fórumait, valamint a nemzetközi konferenciák és szakfolyóiratok lehetőségeit.

Az MGE tagjainak sorába 1958-ban még Sopronban lépett be. 1973-ban titkárként aktívan bekapcsolódott az Egyesület munkájába. 1974–1990 között szervezte a hazai geofizikai vándorgyűléseket, valamint – a Kelet-európai Nemzetközi Geofizikai Szimpózium szervező bizottságának magyar tagjaként – az évenkénti nemzetközi konferen-



Nagy Zoltán  
1936 – 2019

ciákat. Egyesületi tevékenységéért 1980-ban az MGE tiszteletbeli tagjává választotta, majd 1987-ben a Renner János- emlékéremmel és 1989-ben MTESZ-díjjal tüntették ki. Az Európai Geofizikusok (EAGE) 1985-ben megrendezett budapesti kongresszusának konferenciáttkára volt. A kongresszus nemzetközileg is elismert sikeréért, a többi szervezővel együtt, a „Kiváló Munkáért” miniszteri kitüntetésben részesült. 1992-ben a Magyar Geofizikusok Egyesületének elnöke, míg 1991-ben és 1993-ban alelnöke volt. Társ szerzőként, részben szerkesztőként 2004-ben részt vett az „50 éves a Magyar Geofizikusok Egyesülete” szakmatörténeti monográfia összeállításában. 2006-ban az MGE Egyed László- emlékéremmel ismerte el geofizikusként végzett tevékenységét.

S most, hogy közelről megismertük Nagy Zoltánt a *szakembert*, essen pár szó Zoliról, „CZW”-ről, a *barátról* is, évfolyamtársi szemmel.

Mi az 1959-ben Sopronban diplomázott geofizikusok (és geodéták) egy hihetetlenül összekovácsolódott évfolyam, szinte család lettünk. A „halhatatlan Évfolyam”. Így döntöttünk önmagunkról – és nem érdemtelenül. Összekovácsolt minket a selmeci hagyományok megélése, a mihályi nagygyakorlat, 56 forgataga, Dzseki bácsi és az orosz lányi meddőhányó, Tapir prof gömbszene... Valétálásunk után sem szakadtunk el egymástól. Számon tartottuk egymást a pályáján, s ha kellett és tudtunk, segítettünk. Rendszeres

családos nagy kirándulásaink a Fertő partjától Torockóig vagy akár a Vereckéig terjedtek... S végül, ki nem felejtve a „világtalálkozót”, amikor is az 56-ban kintfelejtkezett és ideiglenesen hazahívott évfolyamtársakkal felidézttük a soproni közös múltat, s az egykori aknazáras brennbergi miniszteri úton még nagy sörpartit is csaptunk. *Zoli, ezekben mindig Te voltál a nagy ötletadó és főszervező!* Azután mintegy két évtizede úgy döntöttünk, hogy pár oldalt írunk önmagunkról, gyökereinkről, életünkéről, pályánk alakulásáról – majd összeállt az a bizonyos „fehér könyv”, amely azóta is a legértékesebb kincsünk egyike. Hatvanöt éves barátság van mögöttünk!

Zoli azon ritka vezetők egyikévé vált, akit mindenki szeretett, és olyan kolléga, aki mások érvényesülését is szíven viselte.

A Farkasréti temetőben február 18-án rengetegen búcsúztak Tőle, majd kísérték utolsó útjára a 60. parcellához. Sokan már csak nehezen lépdelve, némán, deresedő fejjel... Barátok, szakmabeli kollégák, belföldről-külföldről, évfolyamtársak és természetesen a Család.

És én hiszem, hogy Te most egy olyan dimenzióban vagy, ahol az igaz emberek békében nyugszanak. Zotyó, Isten veled!

„Szerencse fel, szerencse le, ilyen a bányász élete!”

Vida Zsolt





„Elcsitul a szív, mely értünk dobogott,  
Pihen a kéz, mely értünk dolgozott.  
Számunkra Te sosem leszel halott,  
Örökre élni fogsz, mint a csillagok.”

**Fájó szívvel tudatjuk mindazokkal,  
akik ismerték és szerették, hogy**

**Zsille Antal**

**2019. február 2. napján, életének 87. évében elhunyt.**

**Felejthetetlen halottunktól**

**2019. március 6. napján 9 óra 45 perckor,  
az Óbudai Temető Főnix ravatalozójában veszünk végső búcsút.**

**DRÁGA EMLÉKE SZÍVÜNKBEN ÖRÖKKÉ ÉL.**



## Rendezvénynapló

2019. április		
ápr. 7–12.	EGU General Assembly	Bécs, Ausztria
ápr. 8–11.	20th European Symposium on Improved Oil Recovery (IOR 2019)	Pau, Franciaország
ápr. 23–26.	5th International Workshop on Rock Physics ( <a href="http://sgpnus.org/5iwrp.html">http://sgpnus.org/5iwrp.html</a> )	Hong Kong
ápr. 26.	Magyar Geofizikusok Egyesületének Közgyűlése	Budapest
2019. május		
máj. 13–16.	XVIIIth International Conference „Geoinformatics: Theoretical and Applied Aspects”. Organizer: EAGE	Kiev, Ukrajna
máj. 19–22.	AAPG Annual Convention & Exhibition	San Antonio, Texas, USA
máj. 21–25.	II. AGES/EAGE/CEI Conference & Technical Exhibition: Geosciences Applied to Solve Humanitarian Problems Worldwide	Kopaonik Mt. Serbia
máj. 23–25.	Az MFT és az MGE közös vándorgyűlése A Magyar Királyi/Állami Földtani Intézet jubileumának és Eötvös Loránd centenáriumi alkalmából	Balatonfüred
2019. június		
jún. 3–6.	81. EAGE évi kongresszus és műszerkiállítás ( <a href="http://www.eage.org">www.eage.org</a> )	London, Anglia
jún. 15–19.	SPWLA Annual Symposium 2019	The Woodlands, Texas, USA
jún. 16–20.	The 8th International Geosciences Student Conference (IGSC)	Uppsala, Svédország
2019. szeptember		
szept. 2–6.	Fourth EAGE Conference on Petroleum Geostatistics Organizer: EAGE	Firenze, Olaszország
szept. 8–12.	Near Surface Geoscience Conference and Exhibition 2019 The world's most significant Near Surface Event	Hága, Hollandia
szept. 15–20.	SEG International Exposition and 89th Annual Meeting ( <a href="https://seg.org/Events/Upcoming-SEG-Annual-Meetings">https://seg.org/Events/Upcoming-SEG-Annual-Meetings</a> )	San Antonio, Texas, USA
szept. 18–22.	10th Congress of Balkan Geophysical Society (BGS)	Albena Resort, Bulgária
szept. 30. – okt. 2.	SPE Annual Technical Conference and Exhibition	Calgary, Alberta, Kanada

További részletek, referenciák az MGE ([www.mageof.hu](http://www.mageof.hu)) honlapjáról, illetve az EAGE ([www.eage.org](http://www.eage.org)) és a SEG ([www.seg.org](http://www.seg.org)) honlapjairól érhetők el.

Szerkesztőség



## Eötvös Loránd halálának 100 éves évfordulóján



MAGYAR GEOFIZIKUSOK EGYESÜLETE

1145 Budapest, Columbus u. 17-23.; Tel./Fax: (1) 201-9815

E-mail: [postmaster@mageof.t-online.hu](mailto:postmaster@mageof.t-online.hu); Honlap: [www.mageof.hu](http://www.mageof.hu)

