

# MAGYAR GEOFIZIKA

HUNGARIAN GEOPHYSICS

A MAGYAR  
GEOFIZIKUSOK  
EGYESÜLETÉNEK  
FOLYÓIRATA



JOURNAL OF THE  
ASSOCIATION  
OF HUNGARIAN  
GEOPHYSICISTS

A Magyar Geofizikusok Egyesülete  
2020. évi egyszerűsített pénzügyi beszámolója

Klímatudomány és földfizika

Umow kísérlete a földmágneses quadropólus paramétereinek meghatározására

A mágneses tér évszázados változásának vizsgálata

Kétdimenziós magnetotellurikus modellezés –  
irányanizotrópiából származó hatások vizsgálata

Vulkáni formációk szeizmikus leképezése egy Tokaj környéki kutatási területen  
CRS-összegzési eljárás alkalmazásával

Rugalmassági paraméterek AVO-inverzióval történő becslése a  
Moho mélységtartományában – PGT-4 szeizmikus szelvény

In Memoriam:  
Stomfai Róbert  
Gadó Károly





# MAGYAR GEOFIZIKA

## HUNGARIAN GEOPHYSICS

62. évfolyam (2021) 1. szám



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

### TARTALOM • CONTENTS

- MGE HÍREK • NEWS OF ASSOCIATION OF HUNGARIAN GEOPHYSICISTS (AHG)**
- 3 A Magyar Geofizikusok Egyesülete 2020. évi egyszerűsített pénzügyi beszámolója (Disclosure statement of AHG) – *MGE Titkárság*
- TANULMÁNY • PAPER**
- 7 Klímatudomány és földfizika (Climate science and earth physics) – *Szarka L.*
- 27 Umow kísérlete a földmágneses quadropólus paramétereinek meghatározására – Visszatekintés (Note on Umow's experiment of calculating the parameters of the geomagnetic quadrupole) – *Márton P.*
- 32 A mágneses tér évszázados változásának vizsgálata – Archeomágneses, paleomágneses és mágneses térmodelleken alapuló módszerek összehasonlítása (Investigation of the centuries-old change in the magnetic field) – *Velki M.*
- 43 Kétdimenziós magnetotellurikus modellezés – irányanizotrópiából származó hatások vizsgálata (Two-dimensional magnetotelluric modelling – investigation of effects due to directional anisotropy) – *Kiss J., Prácser E.*
- 61 Vulkáni formációk szeizmikus leképezése egy Tokaj környéki kutatási területen CRS-összegzési eljárás alkalmazásával (Seismic imaging of a volcanic formation utilizing CRS stacking technique in a study area near the city of Tokaj) – *Kiss V., Takács E.*
- 73 Rugalmassági paraméterek AVO-inverzióval történő becslése a Moho mélységtartományában – PGT-4 szeizmikus szelvény (Elastic parameter estimation in the vicinity of Moho using AVO inversion – PGT-4 seismic section) – *Takács E., Kemény M., Gúthy T., Hegedűs E., Fancsik T.*
- IN MEMORIAM**
- 84 Stomfai Róbert – *Szabó Z.*
- 85 Gadó Károly – *Mód G.*

# MAGYAR GEOFIZIKA

## HUNGARIAN GEOPHYSICS

62. évfolyam (2021) 1. 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. KISS JÁNOS,

DR. PETHŐ GÁBOR, DR. SZABÓ NORBERT PÉTER

*Technikai szerkesztő • Technical Editor*

HOCK GÁBOR

E-mail: mageoftechn@gmail.com

---

A szerkesztőség a szakcikkeket (tanulmányokat) szaklektorálás után közli. A szaklektorok névsorát az évfolyam számában 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: Zelei Gábor

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

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

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


Előfizethető a Magyar Geofizikusok Egyesületénél  
(1371 Budapest, Pf. 433, Telefon/Fax: (1) 201-9815)  
egyesületi tagoknak tagdíj ellenében  
Megjelenik évente négyszer  
INDEX: 26 507  
HU ISSN 0025-0120 (print)  
HU ISSN 2677-1497 (online)

Tisztelt Kollégák, kedves Tagtársak!

Idén ismét későbbre csúszott az éves közgyűlésünk a járvány miatt, így arról nem számolhatunk be, de hagyományainknak megfelelően az év első számában közreadjuk a Magyar Geofizikusok Egyesületének előző évi pénzügyi mérlegét.

MGE Titkárság

## A Magyar Geofizikusok Egyesülete 2020. évi egyszerűsített pénzügyi beszámolója

	<b>A kettős könyvvitelt vezető egyéb szervezet egyszerűsített éves beszámolója és közhasznúsági melléklet</b>	PK-642
	<b>2020. év</b>	


Szervezet / Jogi személy szervezeti egység neve:

**Magyar Geofizikusok Egyesülete**

<b>Az egyszerűsített éves beszámoló mérlege</b>			
<i>(Adatok ezer forintban.)</i>			
	Előző év	Előző év helyesbítése	Tárgyév
<b>ESZKÖZÖK (AKTÍVÁK)</b>			
A. Befektetett eszközök	3		1
I. Immateriális javak	3		1
II. Tárgyi eszközök	0		0
III. Befektetett pénzügyi eszközök	0		0
B. Forgóeszközök	83 460		81 478
I. Készletek	0		0
II. Követelések	78		78
III. Értékpapírok	0		0
IV. Pénzeszközök	83 382		81 400
C. Aktív időbeli elhatárolások	0		45
<b>ESZKÖZÖK ÖSSZESEN</b>	<b>83 463</b>		<b>81 524</b>
<b>FORRÁSOK (PASSZÍVÁK)</b>			
D. Saját tőke	79 173		77 970
I. Induló tőke/jegyzett tőke	6 473		6 473
II. Tőkeváltozás/eredmény	66 555		72 700
III. Lekötött tartalék	0		0
IV. Értékelési tartalék	0		0
V. Tárgyévi eredmény alaptevékenységből (közhasznú tevékenységből)	6 145		-1 203
VI. Tárgyévi eredmény vállalkozási tevékenységből	0		0
E. Céltartalékok	0		0
F. Kötelezettségek	889		46
I. Hátrasorolt kötelezettségek	0		0
II. Hosszú lejáratú kötelezettségek	0		0
III. Rövid lejáratú kötelezettségek	889		46
G. Passzív időbeli elhatárolások	3 401		3 508
<b>FORRÁSOK ÖSSZESEN</b>	<b>83 463</b>		<b>81 524</b>

Kitöltő verzió:3.3.0 Nyomatvány verzió:1.1

Nyomtatva: 2021.03.23 10.46.19

	<b>A kettős könyvvitelt vezető egyéb szervezet egyszerűsített éves beszámolója és közhasznúsági melléklet</b>	PK-642
<b>2020. év</b>		

Szervezet / Jogi személy szervezeti egység neve:


**Magyar Geofizikusok Egyesülete****Az egyszerűsített éves beszámoló eredménykimutatása**

(Adatok ezer forintban.)

	Alaptevékenység			Vállalkozási tevékenység			Összesen		
	előző év	előző év helyesbítése	tárgyév	előző év	előző év helyesbítése	tárgyév	előző év	előző év helyesbítése	tárgyév
1. Értékesítés nettó árbevétele	7 398		0	0		0	7 398		0
2. Aktivált saját teljesítmények értéke	0		0	0		0	0		0
3. Egyéb bevételek	11 282		5 726	0		0	11 282		5 726
ebből:									
- tagdíj	3 798		4 110				3 798		4 110
- alapítótól kapott befizetés	0		0				0		0
- támogatások	7 484		1 615				7 484		1 615
ebből: adományok	3 818		1 022				3 818		1 022
4. Pénzügyi műveletek bevételei	969		822	0		0	969		822
A. Összes bevétel (1+-2+3+4)	19 649		6 548	0		0	19 649		6 548
ebből: közhasznú tevékenység bevételei	14 815		1 615				14 815		1 615
5. Anyagjellegű ráfordítások	4 916		2 871	0		0	4 916		2 871
6. Személyi jellegű ráfordítások	8 115		4 124	0		0	8 115		4 124
ebből: vezető tisztségviselők juttatásai	0		0				0		0
7. Értékcsökkenési leírás	2		2	0		0	2		2
8. Egyéb ráfordítások	360		686	0		0	360		686
9. Pénzügyi műveletek ráfordításai	111		68	0		0	111		68
B. Összes ráfordítás (5+6+7+8+9)	13 504		7 751	0		0	13 504		7 751
ebből: közhasznú tevékenység ráfordításai	11 008		2 618				11 008		2 618
C. Adózás előtti eredmény (A-B)	6 145		-1 203	0		0	6 145		-1 203
10. Adófizetési kötelezettség	0		0				0		0
D. Tárgyévi eredmény (C-10)	6 145		-1 203	0		0	6 145		-1 203

Kitöltő verzió:3.3.0 Nyomtatvány verzió:1.1

Nyomtatva: 2021.03.23 10.46.19

	<b>A kettős könyvvitelt vezető egyéb szervezet egyszerűsített éves beszámolója és közhasznúsági melléklet</b>	PK-642
<b>2020. év</b>		

Szervezet / Jogi személy szervezeti egység neve:

**Magyar Geofizikusok Egyesülete****Az egyszerűsített éves beszámoló eredménykimutatása 2.**

(Adatok ezer forintban.)

	Alaptevékenység			Vállalkozási tevékenység			Összesen		
	előző év	előző év helyesbítése	tárgyév	előző év	előző év helyesbítése	tárgyév	előző év	előző év helyesbítése	tárgyév
Tájékoztató adatok									
A. Központi költségvetési támogatás	319		150	0		0	319		150
ebből: - normatív támogatás	319		0	0		0	319		0
B. Helyi önkormányzati költségvetési támogatás	0		0	0		0	0		0
ebből: - normatív támogatás	0		0	0		0	0		0
C. Az Európai Unió strukturális alapjaiból, illetve a Kohéziós Alapból nyújtott támogatás	0		0	0		0	0		0
D. Az Európai Unió költségvetéséből vagy más államtól, nemzetközi szervezettől származó támogatás	797		0	0		0	797		0
E. A személyi jövedelemadó meghatározott részének az adózó rendelkezése szerinti felhasználásáról szóló 1996. évi CXXVI.törvény alapján átutalt összeg	300		343	0		0	300		343
F. Közszolgáltatási bevétel	0		0	0		0	0		0
G. Adományok	3 818		1 022	0		0	3 818		1 022

**Könyvvizsgálói záradék**

Az adatok könyvvizsgálattal alá vannak támasztva.

Igen

Nem

Kitöltő verzió:3.3.0 Nyomtatvány verzió:1.1

Nyomtatva: 2021.03.23 10.46.19

A 2019-ben beérkezett 1%-os felajánlásokat nem volt mód 2020-ban az ISZA-n részt vevő és előadást tartó egyesületi tag hallgatók támogatására felhasználni, mivel a pandémia miatt a rendezvény elmaradt. Ezért a beérkezett felajánlást – 343 495,- Ft-ot – a következő módon használta fel az Egyesület: 258 495,- Ft-ot a *Magyar Geofizika* egyesületi szaklap előállítási költségeire, 85 000,- Ft-ot az Egyesület működésére használtuk fel.


**A kettős könyvvitelt vezető egyéb szervezet egyszerűsített éves beszámolója és közhasznúsági melléklet**

PK-642

2020. év

Szervezet / Jogi személy szervezeti egység neve:

Magyar Geofizikusok Egyesülete

## 7. Közhasznú jogállás megállapításához szükséges mutatók

(Adatok ezer forintban.)

Alapadatok	Előző év (1)	Tárgyév (2)
<b>B. Éves összes bevétel</b>	<b>19 649</b>	<b>6 548</b>
ebből:		
<b>C. A személyi jövedelemadó meghatározott részének az adózó rendelkezése szerinti felhasználásáról szóló 1996. évi CXXVI. törvény alapján átutalt összeg</b>	<b>300</b>	<b>343</b>
<b>D. Közszolgáltatási bevétel</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
<b>E. Normatív támogatás</b>	<b>319</b>	<b>0</b>
<b>F. Az Európai Unió strukturális alapjaiból, illetve a Kohéziós Alapból nyújtott támogatás</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
<b>G. Korrigált bevétel [B-(C+D+E+F)]</b>	<b>19 030</b>	<b>6 205</b>
<b>H. Összes ráfordítás (kiadás)</b>	<b>13 504</b>	<b>7 751</b>
<b>I. Ebből személyi jellegű ráfordítás</b>	<b>8 115</b>	<b>4 124</b>
<b>J. Közhasznú tevékenység ráfordításai</b>	<b>11 008</b>	<b>2 618</b>
<b>K. Adózott eredmény</b>	<b>6 145</b>	<b>-1 203</b>
<b>L. A szervezet munkájában közreműködő közérdekű önkéntes tevékenységet végző személyek száma (a közérdekű önkéntes tevékenységről szóló 2005. évi LXXXVIII. törvénynek megfelelően)</b>		
<i>Erőforrás ellátottság mutatói</i>	<i>Mutató teljesítése</i>	
	<i>Igen</i>	<i>Nem</i>
<i>Ectv. 32. § (4) a) [(B1+B2)/2 &gt; 1.000.000, - Ft]</i>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<i>Ectv. 32. § (4) b) [K1+K2&gt;=0]</i>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<i>Ectv. 32. § (4) c) [(I1+I2-A1-A2)/(H1+H2)&gt;=0,25]</i>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<i>Társadalmi támogatottság mutatói</i>	<i>Mutató teljesítése</i>	
<i>Ectv. 32. § (5) a) [(C1+C2)/(G1+G2) &gt;=0,02]</i>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<i>Ectv. 32. § (5) b) [(J1+J2)/(H1+H2)&gt;=0,5]</i>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<i>Ectv. 32. § (5) c) [(L1+L2)/2 &gt;= 10 fő]</i>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

Kitöltő verzió:3.3.0 Nyomtatvány verzió:1.1

Nyomtatva: 2021.03.23 10.46.19



# Klímatudomány és földfizika

SZARKA L.

Földfizikai és Űrtudományi Kutatóintézet,  
9400 Sopron, Csatkai E. u. 6–8.  
E-mail: szarka.laszlo@epss.hu

A klíma és annak állandó változása rendkívül változatos erők sokrétű kölcsönhatásának kísérőjelensége az atmo-, bio-, geo-, hidroszféra határfelületén. A klímaváltozás visszacsatolásos nemlineáris kaotikus folyamat: egy adott helyen időbeli változásként, globális áttekintésben pedig térbeli átrendeződésekként figyelhető meg. A lehetséges klímaváltozási hipotéziseket földtudományi tények szorítják korlátok közé. Számos lehetséges külső (Nap, Naprendszer, kozmikus térség eredetű) és belső, azaz földi (embertől független természeti és „antropogén”) ok és kölcsönhatás földfizikai áttekintésével rámutatunk a kvantitatív földtudományi szemlélet megerősítésének időszerűségére.

## Szarka, L.: Climate science and earth physics

Climate and its eternal change is an accompanying phenomenon of multifaceted interactions of extremely diverse forces at the interface of the atmo-, bio-, geo-, and hydrospheres. Climate change is a coupled nonlinear chaotic process: in a given place it can be observed as a variation over time. In a global overview it is a perpetual spatial rearrangement. Possible climate change hypotheses are constrained by earth science facts. By reviewing a number of possible external (solar, solar system, cosmic) and internal, i.e. terrestrial (human-independent natural and “anthropogenic”) causes and interactions, we point to the timeliness of strengthening the quantitative earth science approach.

*Beérkezett: 2021. március 21.; elfogadva: 2021. március 26.*

## Bevezető

A görög „klíma” szó jelentése: ferdeség, hajlás. Az „éghajlat”: az eredetnél is jobb magyar lelemény, hiszen a klíma csakugyan „az ég hajlatát” jelenti. A Nap megfigyelt járására utal a Föld felszínének különféle helyein (pl. az egyenlítő, a sarkok és a mérsékelt övek mentén), de az éghajlat a vízpartokon, a hegyoldalakon és a völgyekben is jellegzetesen különbözik egymástól. Összefoglalóan azt lehet mondani, hogy az éghajlat: helyjellemző tulajdonság. A klíma és annak állandó változása külső és belső erők kölcsönhatásának kísérőjelensége az atmoszférában, annak bio-, geo- és hidroszférával való határfelületei mentén. A klímaváltozás csatolásos nemlineáris kaotikus folyamat (IPCC 2000). Egy adott helyen időbeli változásként jelentkezik, globális nézőpontból pedig térbeli átrendeződések egymásutánisága.

A klímatudományt sokan a klímamodellezéssel azonosítják, pedig annál sokkal több. Mindenekelőtt fizika (komplex rendszerek fizikája, sugárzástan, asztrofizika,

csillagászat, napfizika), valamint földfizika (geodézia, geofizika, légkörfizika, meteorológia). Továbbá kémia (geokémia, levegőkémia, vízkémia) és biológia (ökológia, paleoökológia, agrártudomány), a földtudományok eddig nem említett, további sokféle ága: természetföldrajz, hidrológia, krioszféra-tudomány, oceanográfia és persze geológia (geokronológia, hidrogeológia, szedimentológia, tektonika, vulkanológia stb.). A történettudományból elsősorban a régészetnek és a természettörténetnek van klímatudományi relevanciája. A bonyolult jelenségek egzakt kifejezéséhez, a következtetések levonásához matematikai szigorúság szükséges. A klímatudományt orvosi, gazdaságtörténeti és egyéb idősorok és térbeli kapcsolatok is szolgálják. Egy-egy ember önmagában csupán töredékes ismeretekkel rendelkezhet. Szerencsére a tudomány empirikus, objektív és racionális. Ezért egy szűk szakterületen szerzett több évtizedes kutatási tapasztalat nagy segítséget jelent az eligazodásban. Amennyiben persze a tudományt klasszikus értelemben definiáljuk (ahol a tények számítanak, nem az elméletek), és nem az ún. posztmodern, netán

az advocacy („pártos”) tudományt részesítjük előnyben. Geofizikus kutatóként környezettudományi-klímakutatási cikkek szerzője is voltam (pl. Szarka 1988, Koppán et al. 2000, Szarka et al. 2021), rálátásom volt soproni kollégáim szerteágazó eredményeire. Aztán öt éven át tartozott feladataim közé egy kutatóhálózat mindenféle kutatási eredményeinek figyelemmel kísérése, a nemzetközi szakirodalmat pedig ma is követem. Mindezen tapasztalatok birtokában igyekszem földfizikai áttekintést adni a klímatudomány helyzetéről.

Tapasztalatiságuk, elfogulatlanságuk és ésszerűségük révén a földtudományi megfigyelések a klímaváltozási hipotéziseket nem engedik a valóságtól elrugaszkodni. A helyi megfigyelésekből időbeli változásokra, a globális áttekintésekből térbeli átrendeződésekre következtethetünk. Az egyidejű kváziglobális klímaváltozási jelenségek a klímarendszeren kívüli (extraterresztrikus vagy földi) magyarázatot igényelnek. A megfigyelt éghajlatváltozást csak akkor nyilváníthatjuk antropogén eredetűnek, ha a földi és extraterresztrikus természet hatását kellően figyelembe vettük. Amint látni fogjuk, a természet sokkal fantáziadúsabb az embernél.

### Tapasztalatiság, elfogulatlanság, ésszerűség

Az eszményi tudomány empirikus (tapasztalatokra épül), objektív (elfogulatlan) és racionális (ésszerű). Egyetlen tudományos elmélet nem állíthat olyat, ami nincs összhangban a természetben meg tapasztaltakkal. A mai klímakutatást illetően az egyik legszembetűnőbb tény, hogy a manapság visszahúzódó gleccserek némelyike (nevezetesen a dél-alaszkai Mendenhall-gleccser) alól eredeti (álló)

helyzetben lévő 1000–2000 éves fatöncök kerülnek elő (Daily Mail 2013, Spencer 2017, 1. ábra). Akkoriban tehát azon a helyen melegebb volt, mint ma.

Ennek ellenére elég sokan hívei lettek az ún. klímavész-helyzet gondolatának. A következő kétszáz év folyamán 60 millió éve nem tapasztalt felmelegedést hirdetnek. Ha azonban csak a tényekhez ragaszkodunk, és a 2. ábrán a klímamodellzési jósolatokat 2021-nél letakarjuk, nyilvánvalóvá válik mindenki számára, hogy az ún. „klímavész-helyzetet” kizárólag a klímamodellzéssel lehet alátámasztani. A kérdés aktualitását jelzi, hogy a „klímavész-helyzet”-et az ENSZ Biztonsági Tanácsban 2021-ben napirendre tűzték, de Oroszország vétőjával (és India ellenszavazatával) a kezdeményezést elvetették. Az orosz delegátus meglátása szerint „amennyiben a biztonsági kérdések kiváltó okának az éghajlatváltozást tekintjük, akkor elterelődik a figyelem a valódi kiváltó okokról, ami a megoldást akadályozza” (SC 2021).

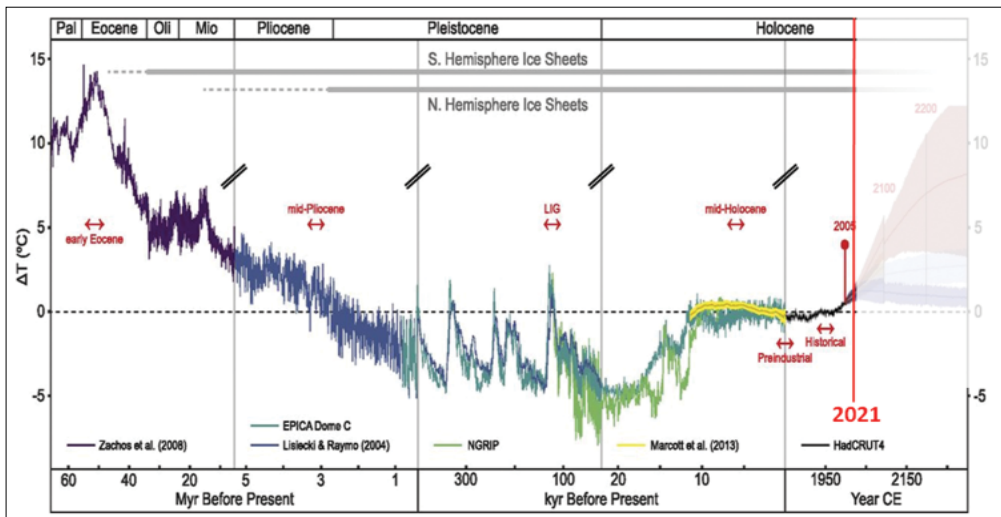
Évtizedek óta azt halljuk, hogy Malé (a Maldív-szigetek fővárosa) szigete a globális felmelegedés miatti tengerszint-emelkedés következtében elsüllyed. Tény, hogy a 20 ezer évvel ezelőtti helyzethez képest a tengerek szintje átlagosan 130 m-rel emelkedett, és ugyan a trend csökkent, de az irány nem változott. A tengerszintváltozás (relatív és eusztrikus vízszint stb.) igen összetett földfizikai problémakör. Az is tény (Mörner 2011), hogy e partok mentén (3. ábra) több mint öt évtizede nem történt relatív tengerszint-emelkedés, pedig a klímaelmélet szerint a vízszintnek folyamatosan emelkednie kellett volna. A háttérben látható mesterséges sziget (Hulhumale) 2 m-re emelkedik ki a tengerből. Építését 1997-ben kezdték, 2019-ben fejezték be. A klímamodellzés szerint 14 év alatt el kellene süllyednie. Az interneten e két sziget



1. ábra | Legalább 1000 éves fatöncök a visszahúzódó dél-alaszkai Mendenhall-gleccser alatt. *Forrás:* Spencer 2017, Daily Mail, 2013

Figure 1 | At least one thousand year old tree stumps under the retreating Mendenhall Glacier in Southern Alaska.

Source: Spencer 2017, Daily Mail 2013



2. ábra Hőmérsékleti trendek és kilátások a legutóbbi 65 millió év egyedi léptékű klímátörténete (proxyrekonstrukciója) alapján, trendváltások (piros nyilak) bejelölésével. *Forrás:* Burke et al. 2018. Burke et al. 1. ábráján a különféle szcenáriók is szerepeltek

Figure 2 Temperature trends and prospects based on the proxy reconstruction of the climate history of the last 65 million years, in a quasi logarithmic time scale. Trend changes are indicated by red arrows. *Source:* Burke et al. 2018. In their original Figure 1, various scenarios were also shown



3. ábra A Maldív-szigetek fővárosának (Malé szigetének) légifényképe, háttérben a csaknem negyedszázadon át (1997–2019 között) készült mesterséges szigettel (Hulhumale), valamint a 2018-ban átadott összekötő hídval (Sinamalé). *Forrás:* Science News 2018

Figure 3 Aerial view of the capital of the Maldives (Malé Island). In the background, the artificial island, Hulhumale (built through a quarter of century, between 1997 and 2019), and the connecting Sinamalé bridge, inaugurated in 2018. *Source:* Science News 2018

együttesselről korábbi légifényképek (pl. Ilyas 2004) is láthatók.

### Változások időben

**Népi bölcsességek.** Nincs olyan szeglete a világnak, ahol ne lenne a helyi bölcsesség része, hogy „nincs semmi új a nap alatt” (Prédikátor 1, 9). A Brihaspati nevű indiai-kínai naptár például 60 év múltán újrakezdődik. (A Brihaspati a Jupiter bolygót jelenti.) Az Ószövetség (Mózes I. 41: 18–20) 7 + 7 = 14 éves ciklust örökít meg. (A fáraó álmában azt látta, hogy „a Nílusból hét kövér és szép tehén jött

ki, és legelt a sás között. De hét másik tehén is kijött utánuk, amelyek nagyon hitványak, rútak és soványak voltak”. József álomfejtése szerint hét bőséges esztendőre hét szűk esztendő fog következni. Úgy is lett.) Egy angol közmondás szerint „There is no debt so surely met as wet to dry and dry to wet”. Magyarul talán így mondhatnánk: „Halálbiztos, hogy száraz időszakra csapadék jön, majd újra száraz idő következik”.

**Kutatási eredmények.** William Herschel, minden idők egyik legnagyobb megfigyelő csillagásza szoros összefüggést talált az 1700–1800 közötti naptevékenység és a londoni értéktőzsde gabonaárai között (Herschel 1980). Het-

ven éve pedig Berkes Zoltán (Réthly Antal munkatársa) ezt írta: „Éghajlat-ingadozások tehát vannak, sőt néha oly mértékűek és tartalmúak, hogy akinek nincs módjában 50–100 évet áttekinteni, egyen-irányú változásnak gondolhatja azokat...” (Berkes 1940).

A klímatudományi szakirodalomban se szeri, se száma a klimatikus ciklikusságról, periodicitásról szóló publikációknak. A régebbi eredmények közül illusztrációként megemlítenéd, hogy 1939-ben egy *Nature*-cikk 23 éves periodicitást mutatott ki a csapadékban (Abbot 1939). Másutt a pekingi csapadékra kb. 10 éves periodicitást találtak (Zhang 1981). A légköri nyomás és a naptevékenység alakulása között pedig világos összefüggést fedeztek fel, de a szoros kapcsolat kizárólag nyugati szelek idején figyelhető meg (Burroughs 1992).

**Egyedülálló idősor.** Az efféle időbeli változások tanulmányozásához egyedülálló jelentősége van a Nílus 847 éven át folyamatosan ismert vízszintváltozási idősorának. Éveken, néha évtizedeken keresztül tartóan alacsony, máskor tartóan magas vízszinteket mértek, és e folyamatokról akár azt is gondolhatták, hogy végzetesen egyirányúak. És egyszer csak megfordult a trend. Nem pontos szabályszerűséggel, hanem mindig egy kicsit másképp. Az egyedülálló természeti idősorból egy gátépítés-tervezéssel megbízott angol hidrológus (Hurst 1951) alapvető elméleti következtetéseket tett. A Hurst-kitevő ma a legkülönfélébb összetett folyamatok (pl. tőzsdérfolyamok) elemzésében egyenesen nélkülözhetetlen. A Hurst-kitevőt a hidrológiában itt-ott alkalmazzák, de a földtudományokban csak elvétve lehet vele találkozni. A környezet- és klímakutatásból pedig fájdalmasan hiányzik. A Hurst-kitevő a természeti idősorok eredendő tulajdonságára, az

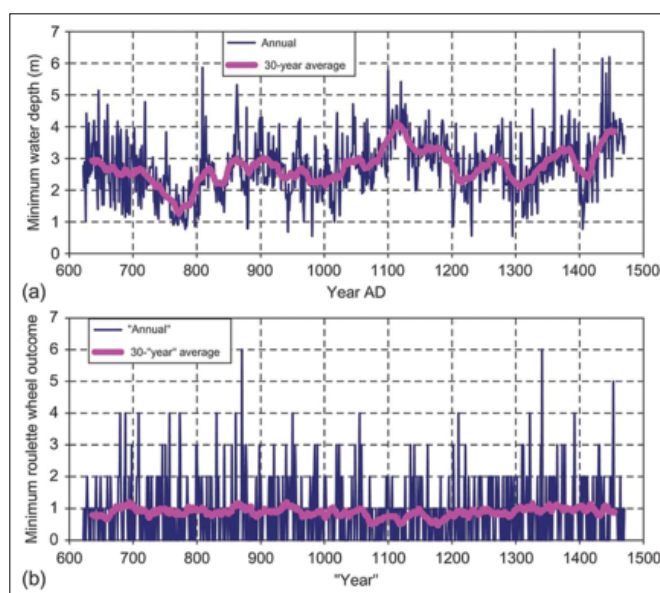
ún. *tartós perzisztenciára* (az átlagértéktől való időnkénti makacs eltérésekre) mutat rá.

A 4. ábra a Nílus 847 éven át éves vízminimum-szintjét hasonlítja össze egy véletlenszám-generátorral szimulált idősorral. A természeti idősorokban vannak, a véletlen idősorokban pedig nincsenek tartós perzisztenciák. Hurst (1951) és Koutsoyiannis (2012) megállapítása tökéletesen összecseng Berkes Zoltánéval.

## Változások térben

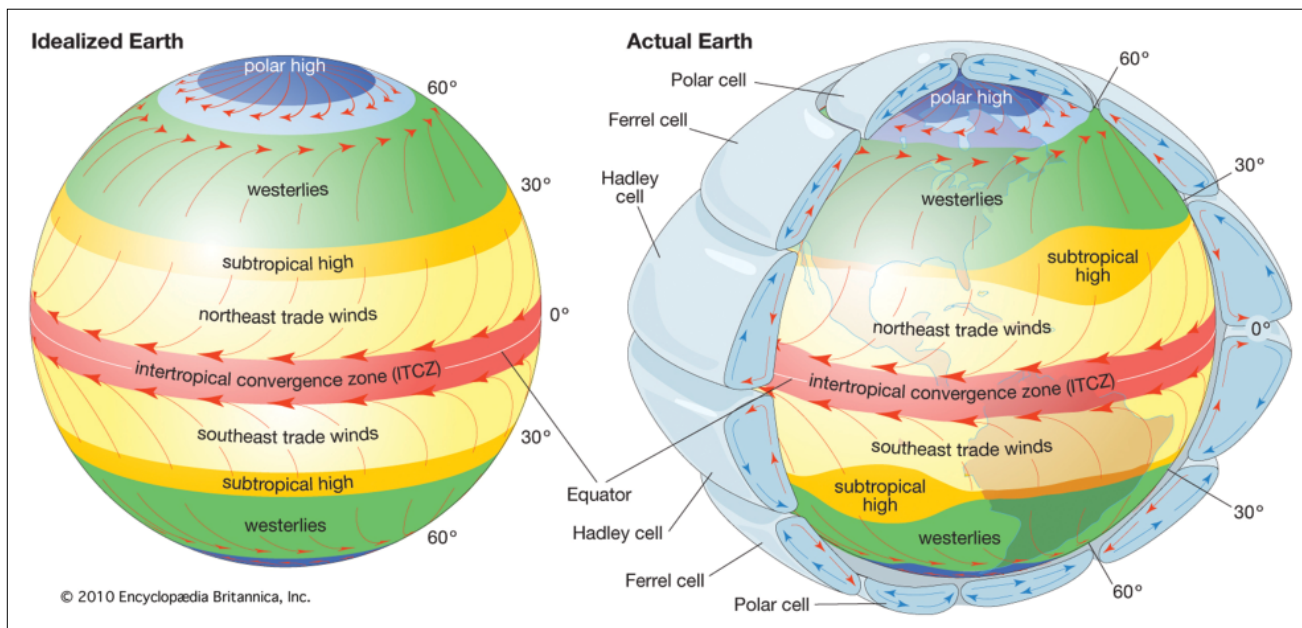
Az éghajlatváltozás térbeni alakulásának megértéséhez érdemes rápillantani a globális légkörzés bonyolult rendszerére (5. ábra), amely összetett hatások (pl. a Föld forgása) örökös egyensúlykereséseként alakul ki. A szelek járása nincsen köbe vésve. A legkisebb hatásra itt-ott megváltozik az egyensúlyi helyzet, ami meg másutt okoz változást. Azt mondhatjuk, hogy e rendszerben, amely örök, az maga a változás. Erre ismerhetünk rá a szélrendszerrel jóval egyszerűbb hármasinga-végpont térbeli-időbeli játékában, ami a nemlineáris kaotikus rendszerek egyik legegyszerűbb esete. Helyi megfigyelésekből mindenütt csak időbeli változásokat lehet látni. Globális megfigyelések révén azonban nagy részletességű térbeli átrendeződések figyelhetők meg. A mintázatalapú (ún. „pattern-based”) klímakutatás viszonylag új („Big Data”) fejlemény. Akkor is van éghajlatváltozás, ha a globális átlaghőmérséklet semmit se változik.

**El Niño.** A térbeli összefüggésrendszerek egyik legelső példáját az El Niño jelenség (a Csendes óceán felszíni vízének felmelegedése) szolgáltatta (6. ábra, Adler et al.



4. ábra (a) A Nílus éves vízszintminimumjának alakulása 847 éven át a Kairó melletti Roda vízállásjelző állomás adatai alapján, (b) Véletlenszám-generátorral szimulált ruletteredmények sorozata. *Forrás:* Koutsoyiannis 2013

Figure 4 (a) Evolution of the annual minimum levels of the Nile throughout 847 years, based on the data of the Roda water level monitoring station near Cairo, (b) A series of roulette results simulated with a random number generator. *Source:* Koutsoyiannis 2013



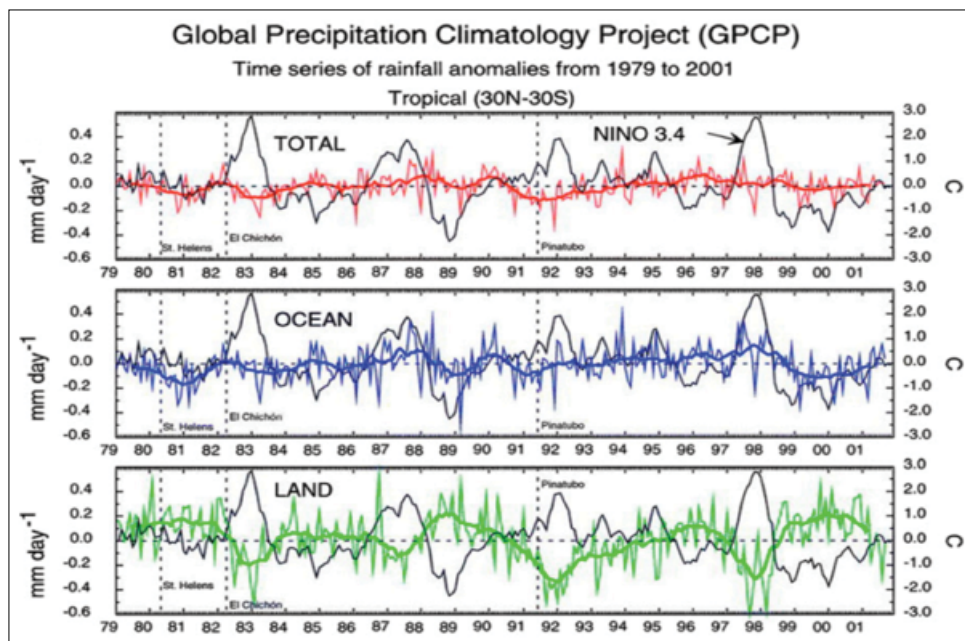
5. ábra A globális légkörzés kétféle (idealizált és valóságközelebi) rajzolata. *Forrás:* Encyclopaedia Britannica, Lupo 2021. Figyelem: a légkör erősen kivastagított. A valóságban inkább „almahéj”, mint „takaró”

Figure 5 The global circulation model of the atmosphere in two (idealized and quasi real) variants. *Source:* Encyclopaedia Britannica, Lupo 2021. Attention: the atmosphere is strongly thickened. In reality, it is rather “apple peel” than “blanket”

2003). El Niño jelenségek idején (amikor az ún. El Niño-index magas) a szárazföldi csapadék minimumértéket vesz fel. A Föld 2/3-ad részét borító óceánok fölött nincs ilyen összefüggés, és kapcsolat még globálisan (a kontinenseket és az óceánokat együtt véve) sem mutatható ki. Csakis akkor, amikor a Föld felszínét kettébontjuk szárazföldekre

és óceánokra, akkor tűnik elő ez az érdekes és fontos összefüggés.

**Távkapcsolatok.** A meteorológiai-klimatológiai szakirodalom távkapcsolatok („teleconnection”) és társjelenségek sokaságát tárta fel. Ezek nagy részét az 1. táblázat



6. ábra Az El Niño index (fekete) kapcsolata a globális csapadékkal (piros), az óceáni csapadékkal (kék) és a száraz szárazföldi csapadék alakulásával 1979–2001 között. *Forrás:* GPCP projekt, Adler 2003

Figure 6 Relationship of the El Niño index (black) to global precipitation (red), ocean precipitation (blue), and dry land precipitation between 1979 and 2001. *Source:* GPCP project, Adler 2003

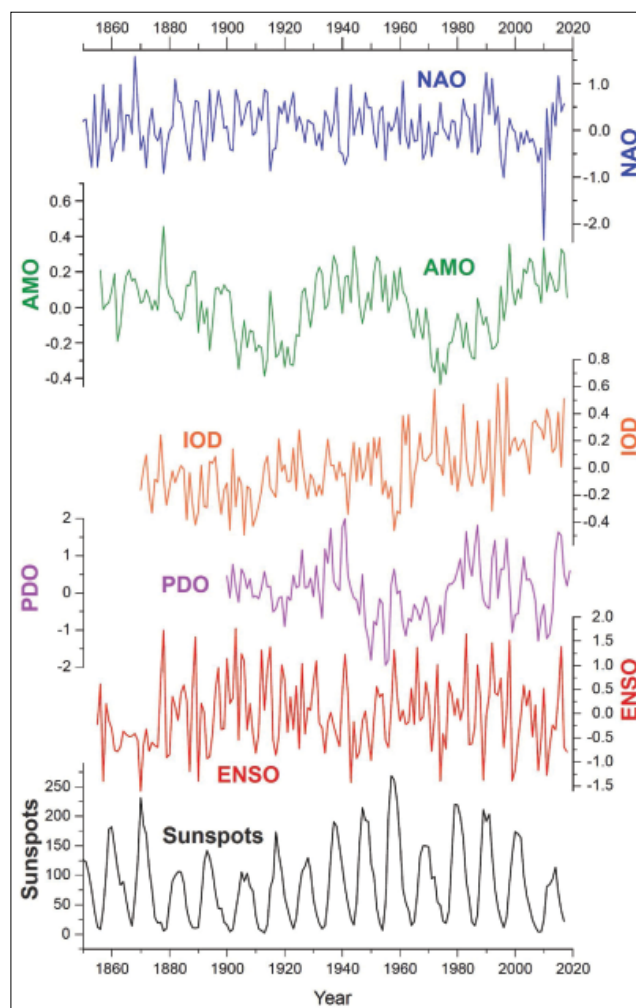
**I. táblázat** A szakirodalomban talált időjárási távkapcsolat-jellegű jelenségek listája

Távkapcsolatok és társaik	Rövidítés
Antarctic Circumpolar Wave	ACW
Arctic dipole anomaly	ADP
<b>Arctic Oscillation/Northern Annular Mode</b>	<b>AO/NAM</b>
Atlantic Equatorial Mode	AEM
<b>Atlantic Multidecade Oscillation</b>	<b>AMO</b>
Brewer-Dobson Circulation	BDC
<b>El Niño-Southern Oscillation</b>	<b>ENSO</b>
Equat. Indian Ocean Monsoon Oscillation	EQUINCO
European Wind storms	
Gravity waves	
<b>Indian Ocean Dipole</b>	<b>IOD</b>
Jet streams	
Madden-Julian Oscillation	MJO
<b>North Atlantic Oscillation</b>	<b>NAO</b>
North Pacific Gyre	NPG
North Pacific Oscillation	NPO
Pacific/North American telecon. pattern	PNA
<b>Pacific Decadal Oscillation</b>	<b>PDO</b>
Pineapple Express	
Planetary Waves	
Polar Vortex	
Quasi-Biennial Oscillation	QBO
Seasonal lag	
Semiannual Oscillation	SAO
<b>Southern Annular Mode/Antarctic Oscillation</b>	<b>SAM/AAO</b>
Southern Oscillation Index	SOI
Stratospheric Variability	
Sudden Stratospheric Warmings SSW	SSW
Walker circulation	

ABC sorrendben tartalmazza, az igazi távkapcsolatokat rövid nevükön is. A legjelentősebb hatással bíró távkapcsolatok neve vastagítva szerepel.

A 7. ábra a NAO, AMO, IOD, PDO, ENSO, továbbá a napfoltszám alakulását mutatja a legutóbbi 160 évre (Lüdecke et al. 2021 alapján). Mintázatok lüktetéseit láthatjuk bennük. Felmerül, hogy valamiféle extraterresztrikus vagy belső földi erő hajtja ezeket, de legtöbbször be kell érniük belső ingadozások feltételezésével, azzal, hogy „weather drives weather” („az időjárást az időjárás hajtja”). A globálisan egyirányú események azonban mindenképpen külső (a rendszeren kívüli) okot igényelnek.

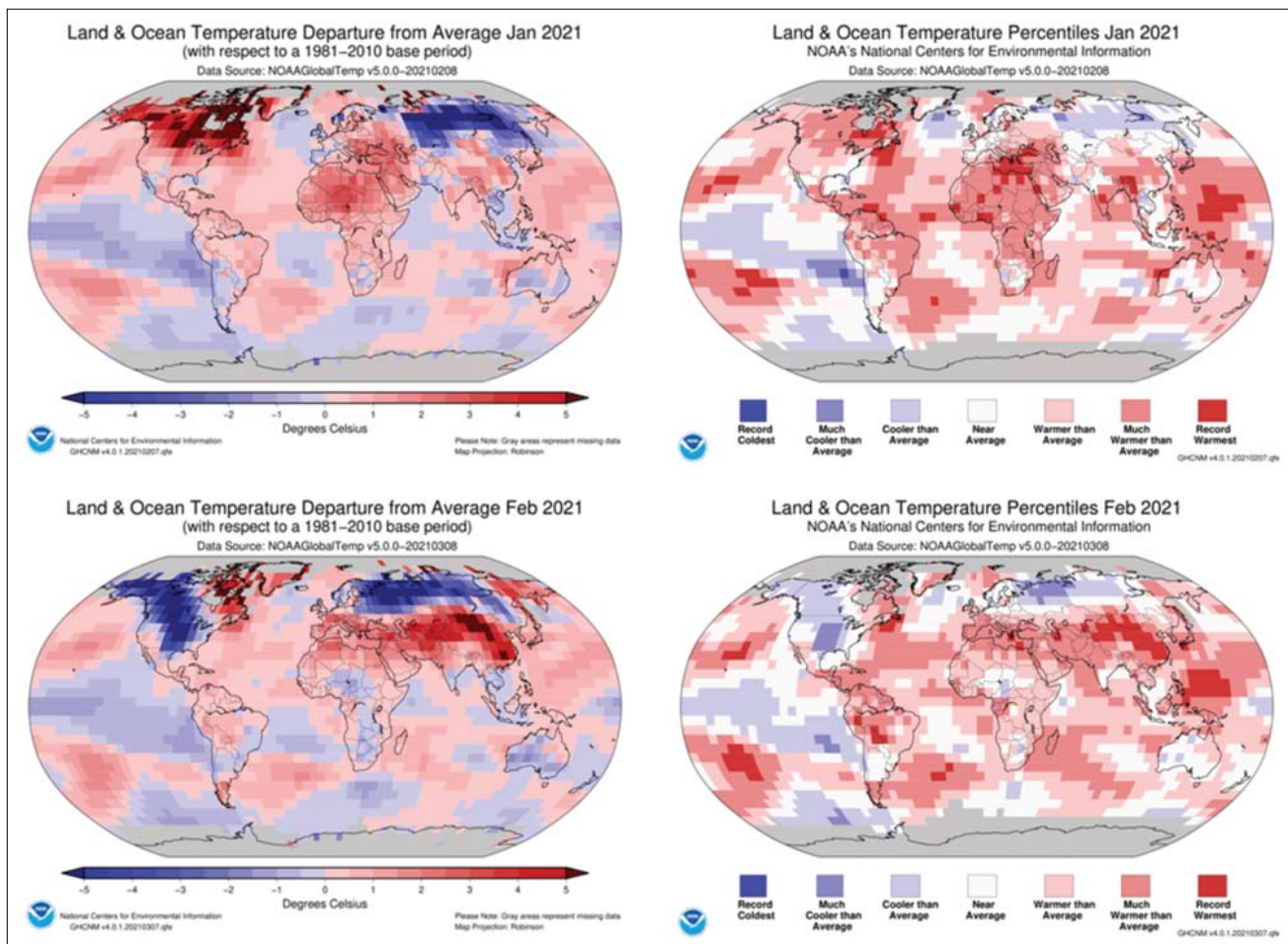
**Mintázatok a felhőborítottságban.** A mintázatok időbeli változására az egyik közvetlen bizonyítékot román szerzők (Sfîcă et al. 2021) páratlanul érdekes műholdas felhőborítottság-elemzése szolgáltatja. 27 jellegzetes európai felhőborítottsági mintázat 1981–2014 közötti alakulásában mutattak ki különféle jellegzetes változásokat, amelyeknek az okát a légköri áramlások (az 5. ábrán mutatott *westerlies*en belüli) változására vezetik vissza.



**7. ábra** Távkapcsolati (NAO, AMO, IOD, PDO, ENSO) adatsorok éves simítatlan értékei, valamint a napfoltok alakulása 1850–2018 között. Forrás: Lüdecke et al. 2021

**Figure 7** Annual unadjusted values of teleconnection data series (NAO, AMO, IOD, PDO, ENSO), and the evolution of sunspots between 1850–2018. Source: Lüdecke et al. 2021

**A hidrológiai ciklus.** Egy klímamodellelési feltételezés (Del Gieno 1991) alapján a kilencvenes évek végétől a hidrológiai ciklus végzetes felgyorsulásának („intenzifikálódásának”) hipotézise nyert egyre nagyobb hivatalos támogatást (Huntington 2006). Láthatjuk, hogy a hidrológiai ciklus ún. felgyorsulásának gondolata még azokból az időkből ered, amikor egy bizonyos időszakon át mért helyi adatokból állandó egyirányú változásra lehetett következtetni. Tavaly azonban egy mintázatokra alapozó átfogó elemzés (Koutsoyannis 2020) cáfolta a hidrológiai ciklus elemeinek egyirányú változására vonatkozó állításokat. Monoton tendenciák helyett mindenféle ingadozásokat talált (az erősödéstől a gyengülésig és fordítva). Koutsoyannis (2020) szerint a 21. század elejét inkább a gyengülés, mint az erősödés jellemzi. A légköri vízpára-adatokban Miskolczi (2021, szóbeli közlés) belső ellentmondásokra hívta fel a figyelmet.



**8. ábra** Havi hőmérséklet-eloszlások a Földön 2021 januárjában (fent) és 2021 februárjában (lent). A hőmérsékletértékek a bal oldalon az 1981–2010 közötti átlagértékekhez képest Celsius fokban kvantitatív módon kifejezve szerepelnek, a jobb oldalon pedig környezeti információs szolgáltatásként, kvalitatív osztályokba sorolva. *Forrás:* NCDC NOAA 2021

**Figure 8** Temperature distribution on Earth in January 2021 (above) and February 2021 (below). The temperature values on the left are expressed in degrees Celsius relative to the average values from 1981 to 2010, and on the right as environmental information, classified on qualitative basis. *Source:* NCDC NOAA 2021

**Havi átlaghőmérsékletek.** Térbeli mintázatot mutat a havi átlaghőmérsékleti adatok globális térképe is (8. ábra). A kvantitatív  $\Delta^{\circ}\text{C}$ -ábrázolás – amelyen a több évtizedes átlaghőmérséklettől való eltéréseket Celsius fokban láthatjuk – karakterisztikus és objektív információt nyújt. A másik, „környezeti információ”-ra szolgáló kvalitatív ábra ugyanezekről az adatokról elmosódottabb és szubjektív (egyfajta felmelegedés-érzetet sugalló) képet ad.

### Globális események

A többé-kevésbé egyidejű globális éghajlatváltozások három – egymással is összefüggő, egymást átfedő – eseménnytípusra vezethetők vissza. Az ún. Bond-esemény feltehetően 1000–1500 évenként (az első felfedezés szerint 1470 éves periódussal) jelentkezik, és jellemzően moréna-felhalmozódással kapcsolatos lehűléseket jelent. E rendszer-

**2. táblázat** Kimutatott Heinrich-, Bond- és Dansgaard–Oeschner-események egyesített listája. *Forrás:* Kordos 2015, Rahmstorf 2003

**Table 2** Frequencies used in two-A united list of detected Heinrich, Bond and Dansgaard–Oeschner events. *Source:* Kordos 2015, Rahmstorf 2003 modelling

Heinrich-események		Bond-események		D–O-események	
Jelölés	BP (ezer év)	Jelölés	BP (ezer év)	Jelölés	BP (ezer év)
		B0	0,5		
		B1	1,4		
		B2	2,8		

**2. táblázat** Kimutatott Heinrich-, Bond- és Dansgaard–Oeschner-események egyesített listája. *Forrás:* Kordos 2015, Rahmstorf 2003 (*folyt.*)  
**Table 2** Frequencies used in two-A united list of detected Heinrich, Bond and Dansgaard–Oeschner events. *Source:* Kordos 2015, Rahmstorf 2003 modelling (*cont'ed*)

Heinrich-események		Bond-események		D–O-események	
Jelölés	BP (ezer év)	Jelölés	BP (ezer év)	Jelölés	BP (ezer év)
		B3	4,2		
		B4	5,9		
		B5	8,2		
		B6	9,4		
		B7	10,3		
		B8	11,1		
H0	12			DO 0	11,605
				DO A	13,073
				DO 1	14,630
H1	16–15				
H2	24–22				
				DO 2	23,398
				DO 3	27,821
				DO 4	29,021
H3	31–29			DO 5	32,293
				DO 6	33,581
H4	38–35			DO 7	35,270
				DO 8	38,387
				DO 10	41,143
				DO 11	42,537
H5	45			DO 12	45,362
H6	60				

ben az ún. kis jégkorszak a B0 nevet kapta. A Dansgaard–Oeschger- (D–O) eseménynek nevezik a legutóbbi mintegy százezer év (eljegesedés) idején tapasztalt 20–25 hirtelen és nagy (10 °C/évszázad) mértékű felmelegedést. A tengervíz sótartalmának periodikus változásaival kapcsolatos Heinrich-események pedig nagyjából 12 ezer évenként következnek be. A legutóbbi százezer évben hat-nyolc Heinrich-esemény nyomait mutatták ki (jégszállította hordaléklerakódások ismétlődése alapján). A H0 jelölésű Heinrich-esemény a 12 ezer évvel ezelőtti Younger Dryas időszak volt, amikor még a Golf-áramlat is „megfordult”. A Bond-, A D–O- és a Heinrich-események egy része minden bizonnyal szub-Milankovics-esemény, de nem mindegyike az. Az okokat illetően találgatásokra vagyunk utalva (2. táblázat).

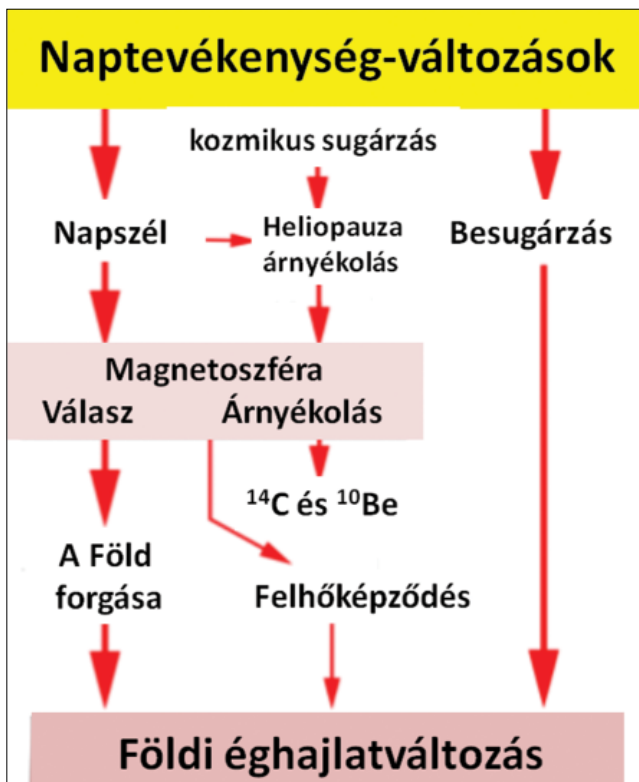
### Néhány lehetséges extraterresztrikus hatótényező

A lehetséges külső okok számbavételekor lényegében a teljes világegyetemet figyelembe kell vennünk, mindenek-

előtt persze a Nap (és a Naprendszer) folyamatait. A 9. ábrán Mörner (2013) javaslata látható. (Nils-Axel Mörner mutatta ki – a földtörténeti negyedidőszakkal foglalkozó INQUA, azaz az International Union for Quaternary Research tengerszintváltozási bizottságának elnökeként –, hogy a Maldiv-szigeteken nincs tengerszint-emelkedés.)

A központi szerepet Mörner (2013) rendszerében is a naptevékenység játssza, meghozza két, egymástól elkülönülő módon. Az egyik a fénysugárzás és annak változása. A földi légkör tetején a fénysugárzás intenzitása ezerháromszáz-hatvan és valamennyi W/m<sup>2</sup>. Ennyi az átlagos teljesítménysűrűség: négyzetméterenként 1,3 kW teljesítményt, azaz négyzetméterenként és másodpercenként 1,3 kilojoule (239 kalória, fél kilogramm víz forráshőjének megfelelő) energiát jelent. A napműködés egy másik megnyilvánulási formája az ún. napszél: pozitív és negatív elektromos töltésű részecskék (zömmel protonok és elektronok) igen változó sűrűségű és sebességű árama. A napszéláramlőketek kölcsönhatásba kerülnek a földi mágnesstérrel. A mágnesztér egyrészt árnyékol, másrészt impulzusnyomatékot is felvesz, aminek következtében nagyon picit még a Föld forgási sebessége is megváltoz-

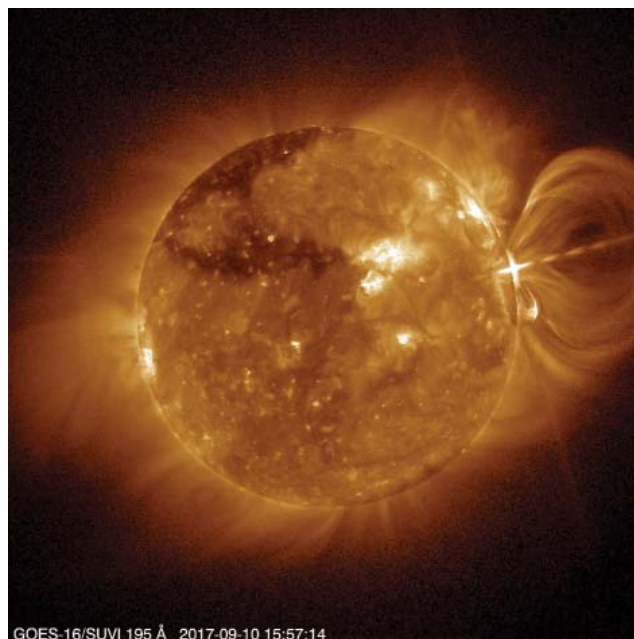




9. ábra | Egy lehetséges (és nem teljes) kapcsolatrendszer a naptevékenység és a földi éghajlat változása között. *Forrás:* Mörner 2013

Figure 9 | A possible (and not complete) relationship between solar activity and terrestrial climate change. *Source:* Mörner 2013

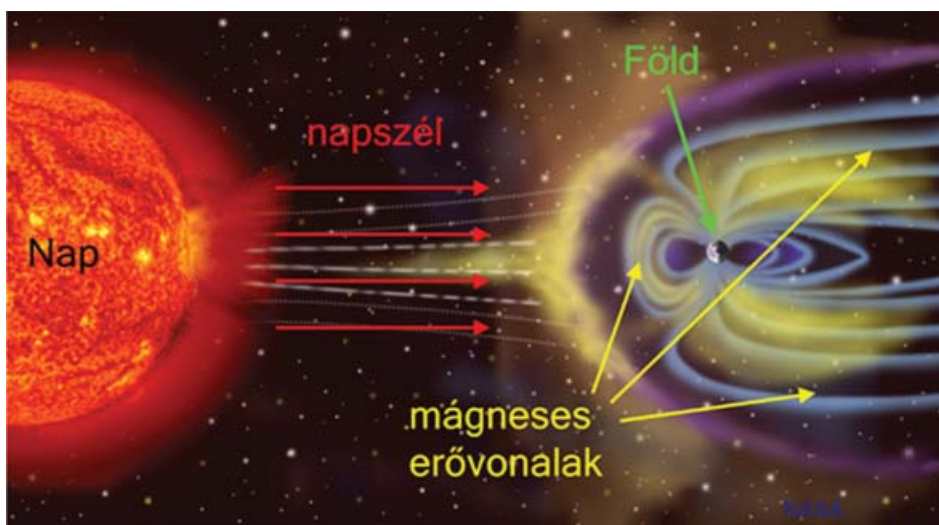
hat. A Föld forgási sebességében tapasztalható apró változások az impulzusnyomaték (angular momentum, „perdület”) törvénye értelmében kihatnak a légköri áramlás rendszerére. Harmadrészt, az ún. heliopauza (a helio-



10. ábra | A GOES-16 műhold által 2017. szeptember 10-én felvett SUVI ultraibolya napkép: napkitörés és X8,2-es fler (SUVI: „Solar Ultraviolet Imager”). *Forrás:* Seaton and Darnel 2018 (a szerző engedélyével)

Figure 10 | SUVI ultraviolet sun image taken by GOES-16 satellite on September 10, 2017: solar flare and X8.2 fler (SUVI: “Solar Ultraviolet Imager”). *Source:* Seaton and Darnel 2018 (courtesy of the author)

szféra külső határa, amelyen belül a kozmikus sugárzás szempontjából a Nap az uralkodó) időben változó mértékben árnyékolja a galaktikus kozmikus sugárzást, ami egyrészt jellegzetes radioaktív izotópképződési időszakokban nyilvánul meg (<sup>14</sup>C-, valamint a múltbeli naptevékenység nyomait jól megőrző <sup>10</sup>Be-izotópok formájában),



11. ábra | A Nap, a napszél, a Föld és a mágneses erővonalak sematikus rajza. *Forrás:* NASA, www.ggki.hu. A napszél mindig a Nap felől érkezik, a kozmikus sugárzás mindenfelől

Figure 11 | Schematic drawing of the Sun, solar wind, Earth and magnetic field lines. *Source:* NASA, www.ggki.hu. The solar wind always comes from the Sun, the cosmic radiation from all over

másrészt befolyásolja a felhőképződéshez szükséges kondenzációs magképződést. A besugárzás, a földforgás, a felhőképződés változása mind-mind befolyásolják a földi éghajlatot. Mörner (2011) vázlatánál jóval összetettebb sejtések is léteznek. E vázlat csupán egy példa kíván lenni a rendszerben gondolkodásra.

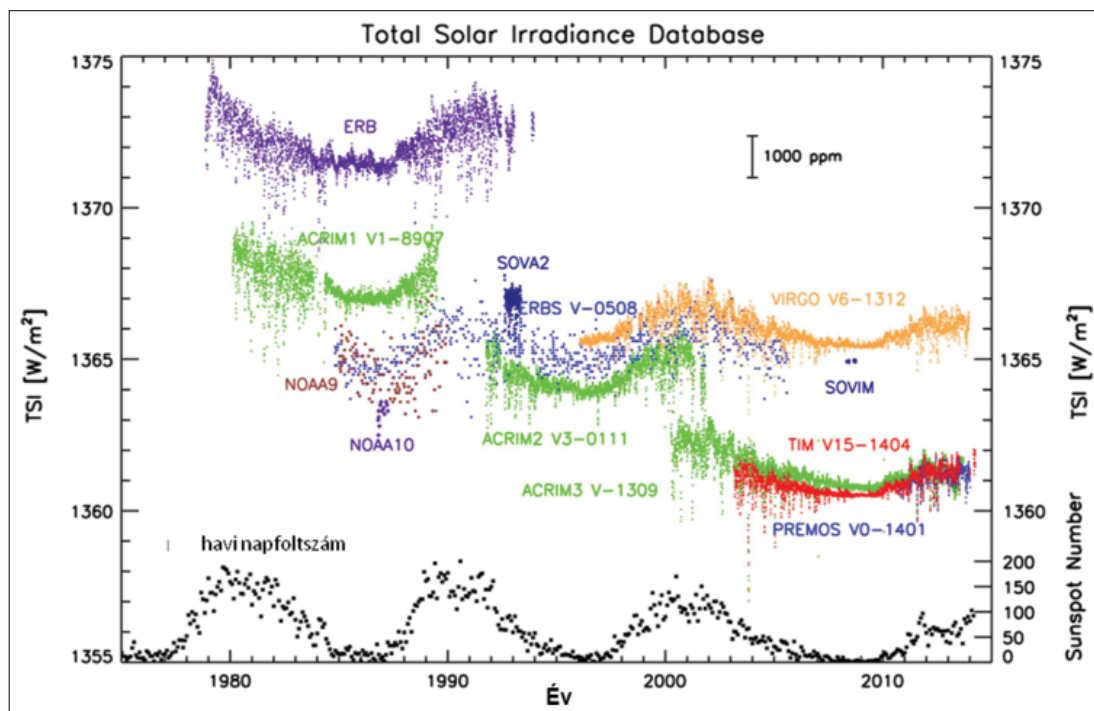
A NASA és az ESA weboldalain napképek tömegét lehet találni. Ilyen például a legutóbbi (2010–2020 közötti) teljes napciklus ultraibolya-képsorozata (NASA 2020), a 2020. november 29-ei koronakitörés (CME) LASCO (Large Angle and Spectrometric Coronagraph) C3 képe (Phillip 2020). A látható fény tartományában teljes napfogyatkozás idején plazmaszerű képződmények tárulnak fel (Druckmüller 2017). A 10. ábra a hurrikánok és földrengések kiváltójaként meggyanúsított 2017. szeptember 10-ei napkitörés UV-képét mutatja.

A napszél és a Föld mágneses terének kölcsönhatását illusztráló 11. ábra közismert. A napszél („szoláris kozmikus sugárzás”) a Nap irányából létezik, a galaktikus kozmikus sugárzás pedig mindenfelől. Amennyiben a 2020. november 29-ei koronakitörés (CME) köpete a Föld felé irányult volna, az emberiséget leginkább foglalkoztató probléma ma nem a COVID lenne...

**A Nap fényességváltozása.** A Nap fényességváltozását csak a légkör fölött (műholdról) lehet megmérni. Ilyen megfigyelések 1979 óta vannak (12. ábra). A műholdak érzékenysége egy idő után leromlik; időnként új műholdakat lőnek fel, újabb és újabb műszerekkel felszerelve. A különböző műholdak adatai jellegükben hasonló képet mutatnak, értékükben azonban valamivel eltérnek egy-

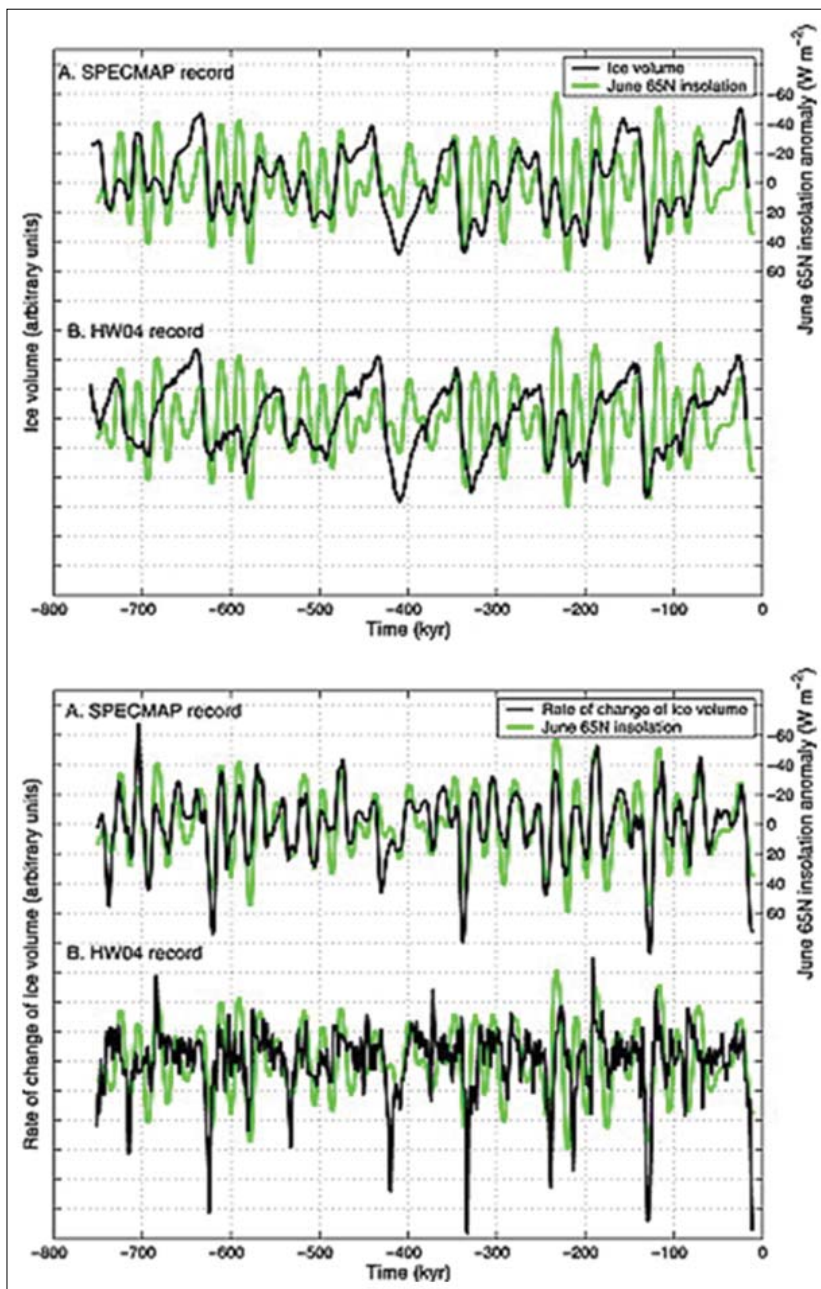
mástól. Egyetlen kompozit idősorra egyesítésük előtt a mért adatokon korrekciók sokaságát kell végrehajtani (többek között a változó Nap–Föld távolság miatt). A bizonytalanságok miatt egymástól igen eltérő évtizedes trendeket lehet felrajzolni. A naptevékenység műholdkorszak előtti alakulását napfoltadatok, faévgyűrű-,  $^{10}\text{Be}$ - és stabilizotóp-vizsgálatok (ún. proxy, azaz „helyettesítő” adatok) alapján lehet következtetni. A TSI- és proxy-adatokból napsugárzás-változás 1600–2000 közötti alakulására sokféle, egymástól lényegileg különböző lehetséges idősort lehet felrajzolni, és egyikről sem állítható, hogy alaptalan lenne. Connolly et al. (2021) nyolc változatot különített el. Az ún. mainstream verzió szerint a napsugárzásban az elmúlt évszázadok során csak jelentéktelen ( $1 \text{ W/m}^2$ -en belüli) ingadozások történtek. Más kompozitadatsor-változatok (a nyolcból négy verzió) szerint a TSI-változás tartománya  $10 \text{ W/m}^2$ -hez közelít. Mind a nyolc változat megegyezik abban, hogy a Nap a 20. század utolsó éveiben sötét a legfényesebben.

A műholdas TSI-adatok szorosan követik a naptevékenységgel többé-kevésbé arányos számban előforduló havi napszámadatokat. Érdekes azt is megjegyezni, hogy amikor több a napfolt (az ábrán nagyjából 1979–1980, 1990–1991, 2001–2002, 2013–2014 táján), akkor nemcsak a TSI-értékek magasabbak, de számos lefelé kiütő TSI-adat is látható. A szélsőségesen kis értékeket kivétel nélkül napkitörések idején mérték. A mainstream irányzatban a látható fény tartományában sajnos a kiütő adatokat is figyelembe vevő, lecsökkent energiaárammal számolnak, a megnövekedett naptevékenységből eredő egyéb erőhatásokat ugyanakkor teljes mértékben elhanyagolják.



12. ábra | TSI műholdadatokat (TSI: Total Solar Irradiance, a Naptól a légkör tetejére érkező fényenergia-áram,  $\text{W/m}^2$ ). Forrás: Kopp 2016

Figure 12 | TSI satellite data (TSI: Total Solar Irradiance,  $\text{W/m}^2$  light energy flux from the Sun to the top of the atmosphere). Source: Kopp 2016



13. ábra Fent: A 65. északi szélességre számított júliusi besugárzásanomália időszora ( $W/m^2$ ), valamint proxy adatokból becült SPECMAP és HW04 jég-tömegidősor az elmúlt 750 ezer évben. Lent: A 65. északi szélességre számított júliusi besugárzás- és proxyadatokból becült SPECMAP és HW04 jég-tömegváltozási idősor az elmúlt 750 ezer évben. *Forrás és további részletek:* Roe 2007

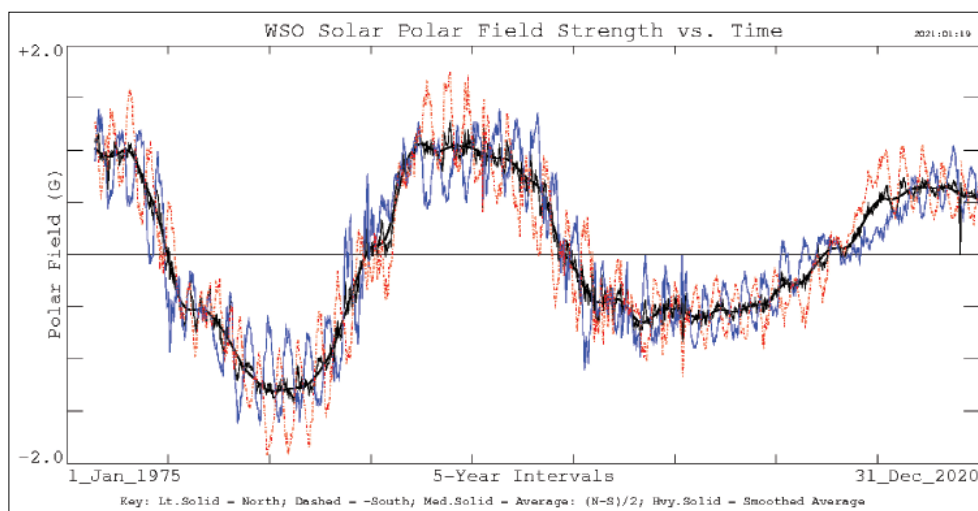
Figure 13 Above: June 65N insolation anomaly (in  $W/m^2$ ) and two different (SPECMAP and HW04) global ice volume reconstructions, over the last 750 kyr. Below: June 65N insolation anomaly (in  $W/m^2$ ) and two different (SPECMAP and HW04) global ice volume change reconstructions, over the last 750 kyr. *Source and details:* Roe 2007

Pedig a Naptól kibocsátott teljes energia a napkitörés során minden valószínűség szerint nagyobb annál, mint amennyi a Nap nyugodt állapotában hagyja el a csillagfelszínt.

A besugárzás hosszú távú – a Milankovics–Bacsák-elmélettel leírt – változása a sarki jég-tömegekre is hatással van. A kapcsolat világosan látható, amennyiben a besugárzással nem a jég-tömeget, hanem a jég-tömeg időbeli változását (matematikailag: időbeli deriváltját) ábrázolják együtt. A 13. ábra az északi szélesség 65. fokán a 750 ezer

évre visszamenően mutatja a napsugárzás jég-tömegváltozásra kifejtett hatását. Roe (2007) két egymástól független megközelítés esetében (SPECMAP: Imbrie et al. 1984 és HW04: Huybers és Wunsch 2004) is nagyon hasonló eredményt kapott.

**Szoláris mágneses tér.** A Nap mágneses tere rendkívül dinamikus, nagyjából 22 éves (kétszeres napfoltciklusnyi) periódusidővel változik. A NASA vizualizációs stúdiója weboldalán jobbnál jobb képekkel és videókkal illusztrál



**14. ábra** FA Nap sarkvidékeinek mágneses tere 1975. január 1. és 2020. december 31. között gauss (G) egységekben. Kék folyamatos görbe: Észak; piros szaggatott görbe: Dél; fekete görbe: (Észak–Dél)/2; fekete sima görbe: simított átlag. *Forrás:* WSO 2021

**Figure 14** The polar magnetic field of the Sun between 1 January 1975 and 31 December 2020 in Gaussian (G) units. Blue continuous line: North; red dashed line: South; black line: (North–South)/2; Black smoothed line: smoothed average. *Source:* WSO 2021

rálják a nyitott pozitív és nyitott negatív, valamint a zárt erővonalak folyamatos hullámzását (NASA SVS 2018). A Nap poláris (sarkokra jellemző) mágneses terének alakulását a 14. ábra mutatja. Két nullátmenet között 11 év, azaz egy teljes naptevékenységi ciklus telik el. Akármelyik mágneses polaritást veszik fel a sarkok, az erős napmágneses tér „elnyomó” hatással van a naptevékenységre. A naptevékenységnek a poláris mágneses tér nullához közeli értékei idején vannak maximumai.

**Napszél.** A naptevékenység (solar activity) által okozott földi geomágneses vihar közismert jelenség. Kevésbé ismert, hogy – a legelső vizuális műholdmegfigyelések szerint – hatásukra statisztikusan megnő a felhőborítottság (Illés-Almár 2004).

Még kevésbé ismert a sarkvidéki sztratoszféra (a 10–50 km magasságú térrész) hirtelen felmelegedésének jelensége (SSW, Sudden Stratospheric Warming, Butler et al. 2017). A hirtelen felmelegedések nemcsak azért érdekesek, mert a hosszú sarki éj (tél) idején alakulnak ki (amikor a napsugárzás gyakorlatilag nulla  $W/m^2$  intenzitású), hanem elsősorban azért, mert a napciklus végén a leggyakoribbak és a legintenzívebbek. Asikainen et al. (2020) összefüggést talált a téli időjárást meghatározó jelenség, az ún. sarki örvény (Polar Vortex, a sarkvidék fölötti sztratoszférában minden télen kialakuló kialakuló erős nyugati szél) változásai és az úrból érkező nagyenergiájú elektronbecsapódások („precipitáció”, electron precipitation) között. A sarki örvény legdrámaibb változásai közvetlenül a sztratoszféra hirtelen felmelegedéseit megelőző időszakok idejére esnek. A sarki örvény, továbbá a NAO, a NAM és az AO (mindegyikük, sőt a Polar Vortex és az SSW is szerepel a 3. táblázatban) azokon a teleken erősebb, amikor a napszél az átlagosnál gyorsabb. Ez utóbbi a napciklus hanyatló szakaszában tapasztalható. A jelenség összefüggést mutat a szoláris mágneses tér cik-

likus szerkezeti evolúciójával. Akkor a legerősebb, amikor a koronalyukak alacsony napszélességekre – a gyors napszél forrás helyeire – tolódnak. Az elektronprecipitáció által okozott kémiai változások a mezoszférában és a sztratoszférában ózonvesztést is okoznak.

**Kozmikus sugárzás.** A Napból érkező, általában kisebb energiájú komponensekből álló, ún. szoláris kozmikus sugárzás mellett a csillagközi térből nagyenergiájú töltött részecskékből álló galaktikus kozmikus sugárzás is érkezik a Földre. Látnunk kell, hogy a Nap és az egész helioszféra üstököszerűen, kb. 26 km/s sebességgel száguld a csillagközi térség ionizált gáztömegében. A galaktikus és szoláris kozmikus (ionizáló) sugárzás sokféle kölcsönhatásban állnak egymással; a szoláris kozmikus sugárzás intenzitásának növekedésekor a Naprendszeren (a helioszférán) belül a galaktikus kozmikus sugárzás szintje csökken. A galaktikus kozmikus sugárzással szemben a helioszféra hasonlóképpen viselkedik, mint ahogyan a földi mágneses tér a napszéllel szemben. Következésképpen a kozmikus sugárzás földfelszínen megfigyelt időbeli változásában a helioszféra és a földi mágneses tér változása is tükröződik. Lehet mondani, hogy „kettős pajzs alatt” élünk (AEKI 2011), de talán közelebb áll a valósághoz, ha – japán kutatók (Kitaba et al. 2017) nyomán – mindkét védelmet ernyőnek nevezzük. (A japán napernyő festhető papírból, díszíthető szalvétatechnikával készül. Aprólékos kidolgozású, nyitható és csukható, de sérülékeny.)

A galaktikus kozmikus sugárzás befolyásolhatja a földi éghajlatot. Svensmark és Friis-Christensen (1997) például a felhőborítottságban 11 éves periódusidővel jelentkező, 2%-os ingadozást találtak. Magyarozatuk szerint a helioszféra által változó intenzitással „beengedett” nagyenergiájú kozmikus sugárzás olyan légköri ionokat kelt, amelyek elősegítik a felhőképződéshez szükséges kondenzációs magok kialakulását és növekedését. A felhőborított-

ság 2%-os változásának a klímaváltozási hatása összemérhető a CO<sub>2</sub>-klímaérzékenységgel. A hipotézis ellenőrzésére a CERN projektet indított (Cosmics Leaving Outdoor Droplets, CLOUD 2016). Eleinte alátámasztották, később cáfolták a hipotézist. Svensmarkék friss publikációja szerint (Svensmark et al. 2017) az elmélet állja a sarat.

**Égi mechanika.** A Föld forgástengely-jellemzői (dőlésszög, precesszió és nutáció) égi mechanikai okokból változnak. A földi éghajlatra gyakorolt következményeket a Milankovics–Bacsák-elmélet összegezi (Cionco, Soon 2017). Miután a Naprendszer tömegéhez a bolygók (mindenekelőtt a nagybolygók) is adnak némi hozzájárulást, a Naprendszer tömegközéppontja nem esik egybe a Nap középpontjával. Sőt, nagyon sokszor nem is a Nap belsejében van. A tömegközéppont ma (és az elkövetkezendő 5-6 évben) a Napon kívül (2021-ben a Nap középpontjától kétszeres Nap-sugárnyi távolságban) található. Időnként fellángoló viták tárgya, hogy Nap körül keringő nagybolygók (elsősorban a Jupiter és a Szaturnusz) által keltett égi mechanikai hatások adhatnak-e ritmust a Nap működésének. Efféle kérdésekkel foglalkozott a *Pattern Recognition in Physics* című folyóirat naprendszer-fizikai lapszáma 2013-ban. A megjelenést követően a folyóiratot megszüntették (PRP 2014, <https://www.pattern-recognition-in-physics.net/>)

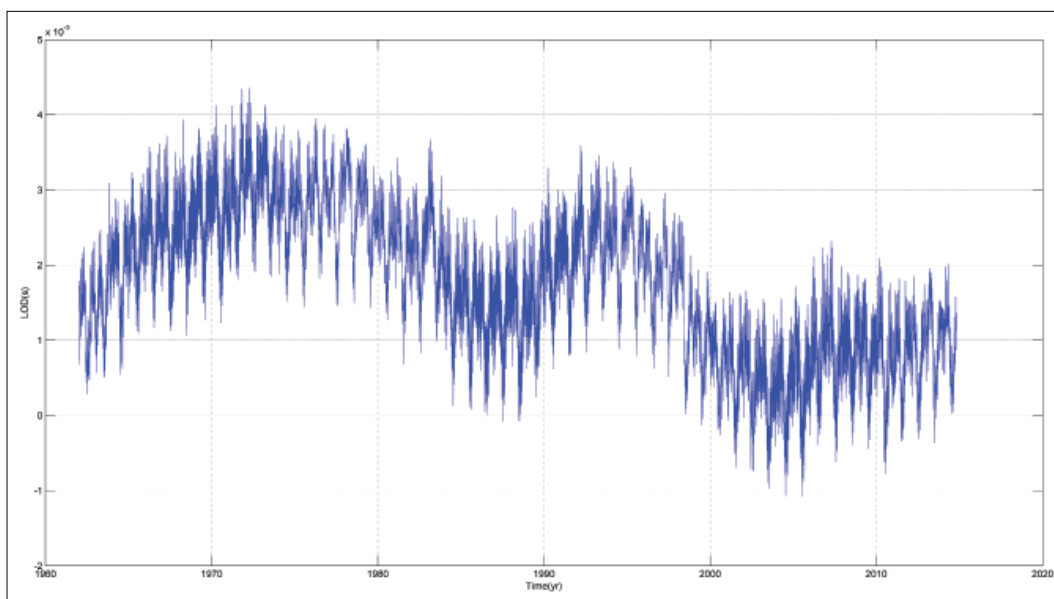
### A Föld belsejében zajló folyamatok lehetséges éghajlati hatásai

Azon túlmenően, hogy a Földet érő külső hatásoknak közvetlen éghajlati következményei lehetnek, a Föld bel-

sejének folyamatait is befolyásolhatják. Még a meteor- és aszteroida-becsapódásoknál nagyobb „csudák” is megtörténhetnek, például a Földet állítólag átlugató CUDO-k (Compact Ultra Dense Object, lengyelül „cud”, Rafelski et al. 2013). És ott munkálnak a folyamatosan változó külső erők (pl. gravitációs árapályúrlódás) is.

**Forgásidő-változás.** A Föld tengely körüli forgásideje a naphossz (angolul Length Of Day, röviden LOD), körülbelül 86400 másodperc. A LOD piciny változásait az IERS (International Earth Rotation and Reference Systems Service) nevű szervezet 1962 óta atomóra-pontossággal gyűjti. A 15. ábra az 1962-től 2015-ig mért adatokat mutatja. Az már régóta ismert, hogy a szelek befolyásolják a LOD-ot. Az Andok nyugati oldalának nekifeszülő szelek például gyorsítják, a keleti szelek lassítják a Föld forgását. (A szelek pedig fékeződnek.) A kulcs az impulzusnyomaték-tétel (vagy perdülettétel): a fizika egyik alapvető megmaradási elve. Az impulzusnyomaték-megmaradás népszerű illusztrációja a piruettozó műkorcsolyázó esete, aki saját maga forgását gyorsítani és lassítani is képes.

Francia geofizikusok (Le Mouél et al. 1992, 2010) és sokan mások (pl. Kolaczek 1995, Wilson 2006, Salstein 2019) azt mutatták ki, hogy szoros összefüggés van a naptevékenységi ciklus és a Föld forgásidő-változása között. E tényből nyilvánvaló, hogy a naptevékenység a földi légkörre is fejt ki valamiféle hatást. Logikus, hogy a klíma-rendszer impulzusnyomaték-rendszerébe a légkör és a szilárd Föld impulzusnyomatéka mellé elvileg felveendő a napszél forgatónyomatéka, valamint a Föld folyadék halmazállapotú részeinek (szárazföldi vizek, óceánok, külső földmag) impulzusnyomatéka is. Ha az impulzusnyomatékot *AM*-mel (Angular Momentum) jelöljük, és



15. ábra | LOD 1962 és 2015 között millisekundumban (ms, 10<sup>-3</sup> s) mért változásában tisztán látható egy kb. 22 éves periódusidő. *Forrás:* Shen, Peng 2016 (a szerző engedélyével)

Figure 15 | LOD changes, measured in milliseconds (ms, 10<sup>-3</sup> s) between 1962 and 2015 clearly shows an approx. Period of 22 years. *Source:* Shen, Peng 2016 (courtesy of the author)

a szilárd (Solid) Földre *SAM*, a földfolyadékokra (külső magra, óceánokra, szárazföldi vizekre) *LAM* (Liquid), a légkörre (Atmosphere) *AAM*, a külső (External) forgatónyomatékra *EAM* rövidítést alkalmazunk, az impulzusnyomaték (perdület) megmaradására a következő egyszerű összefüggés adódik:

$$SAM + LAM + AAM = EAM.$$

Amennyiben  $EAM = 0$ , akkor

$$SAM = - (LAM + AAM).$$

A LOD a szilárd Föld impulzusnyomatékának változásait (*SAM*) méri. A LOD klímatudományi jelentősége felmérhetetlen, hiszen megőrökíti a *LAM* (mindenekelőtt a földmag impulzusnyomatéka) és az *AAM* eredőjét. Az impulzusnyomaték szempontjából egy roppant kiszolgáltatott klímarendszer rajzolódik ki, különösen, ha még az *EAM*-mal is számolni kell.

2021 elején sajtóhírekben olvashattuk, hogy a Földnek 2020-ban 28 rekordsebességű napja volt (Yirka 2021). Az IERS előrejelzései szerint 2021-ben a rövidebb idő alatt eltelő napok száma tovább nő. Azt, hogy a földforgás ily különös alakulását külső vagy belső erők okozzák-e, nem tudjuk.

Közismert, hogy a globális légkörzés cellajellegű (Hadley-cella, Ferrel-cella, Poláris cella) alapvetően a Föld forgása alakítja ki. A földforgás piciny megváltozásai nyilvánvalóan befolyásolják a cellák elhelyezkedését és a bolygóléptékű óceáni és légköri Rossby-hullámokat. Az óceáni távkapcsolatok némelyikét bizonyítottan földforgássebességi változások okozzák.

**Geodinamika.** Evidenciának vesszük, hogy a Föld belsejének – a kisebb-nagyobb szabálytalanságokat leszámítva – gömbhéjas szerkezete van. A 21. század földfizikája az egyre nagyobb belső aszimmetriák megismeréséről szól: újszerű megközelítések jelennek meg a lemeztectonikáról, a litoszféra–asztenoszféra határfelületről (pl. Chen et al. 2021), a földkéopencsíkokról (plume-król), a földmagról, mindenekelőtt a külső mag folyadékdinamikájáról (pl. Hide 2000), amely elvileg a Föld forgására és mágneses terére is kihat. Jól tudjuk, hogy a Bibliában számos, az ember által ténylegesen megtapasztalt természeti jelenség leírása is megtalálható. Vajon a „Megállt a nap az ég közepén, nem sietett lenyugodni majdnem egy teljes napig” mondat (Józsúé 10, 13) középük tartozik-e? Mert ha igen, mai tudományos megfogalmazásban ez azt jelentené, hogy a litoszféra megcsúszhat az asztenoszférán. (Sosem gondoltam volna, hogy az asztenoszféra elektromos vezetőképesség-vizsgálatának ekkora jelentősége volna.)

A Föld belsejéből a felszínre jutó hő területi eloszlása egyenetlen. A geotermikus hő ugyan csak tízezred része annak, ami a Napból a légkör tetejére érkezik ( $0,1 \text{ W/m}^2$ , szemben az  $1300 \text{ W/m}^2$ -rel), de ez sem jelentéktelen. Azt a jelenséget például, hogy az Antarktisz jégtömegének kizárólag a nyugati része fogy (a déli sarkvidék egyéb

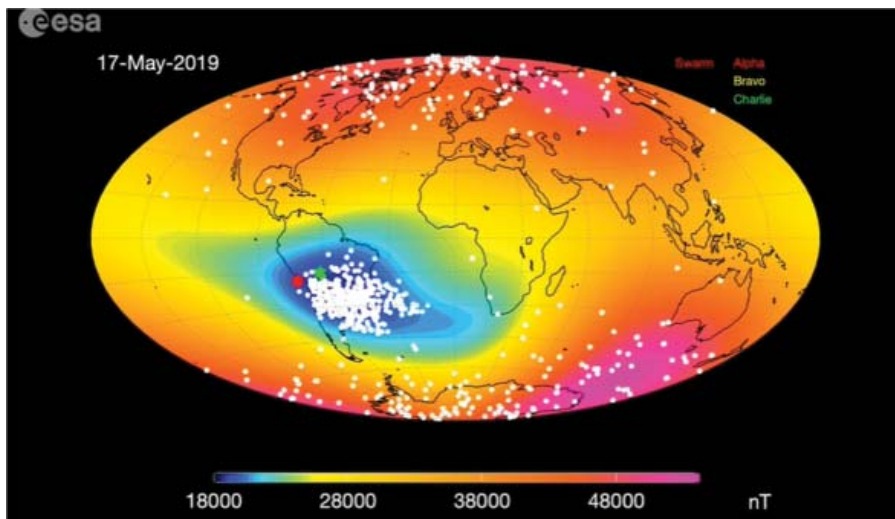
részein inkább hízik a jég), geodinamika (azon belül magmatizmus-vulkanizmus) okozza (Kiss, Földváry 2017, Martos 2017).

A sztratoszférába lövellt kénsav, aeroszol stb. révén a vulkánkitörések lehűlést („vulkanikus telet”) képesek okozni. A különféle VEI-méretű vulkánkitörésekről szóló történelmi dokumentumok alapján a kitörések gyakorisága ciklikus jelleget mutat. (VEI: Volcanic Explosivity Index). Azt, hogy mik lehetnek a ciklicitást kiváltó okai, nem tudjuk. Az utolsó nagyobb kitörés az indonéziai Tambora vulkáné volt (1815), amely Európában, így Erdélyben is éhínséget okozott (Kósa 2008).

Még a nagy földrengésekkel kapcsolatban is komolyan felvetődött, hogy esetleg külső hatások triggerelik a kipattanásukat. Erre utal, hogy sok rengés előtt már néhány nappal jelentősen megnő az ionoszféra elektrontartalma (Total Electron Content, TEC). Az egyik lehetséges modell az ún. LAIC, azaz Lithosphere–Atmosphere–Ionosphere Coupling (litoszféra–atmoszféra–ionoszféra csatolás, Pulinets, Ouzounov 2010, Oikonomou et al. 2021, Pulinets et al. 2021). Maguknak a földrengéseknek szerencsére nincs közvetlen éghajlatmódosító hatásuk. Kipattanásuk azonban azonnal és tényszerűen okoz (lokális, de nagy személyi és gazdasági veszteségekkel járó) katasztrófát, ellentétben a klímamodellezés által jelzett hipotetikus éghajlatváltozással.

**Geomágneses tér.** A Föld mágneses terét alapvetően a külső mag folyadékdinamikája alakítja ki és tartja fenn. A kívülről érkező töltött részecskék árama elleni védelem erőssége a geomágneses tér intenzitásával arányos. A földtörténetből (mindenekelőtt paleomágneses geofizikai vizsgálatokból) tudjuk, hogy időnként (átlagosan 250 ezer évente) a Föld mágneses polaritása ellenkezőjére fordul. A pólusváltás idején a napszél szinte akadálytalanul jut a Föld felszínére. A friss publikációk egyike a légköri oxigén elfogyásának lehetőségét is felveti. A mai polaritás – noha voltak benne kilengések, sőt egy rövid átfordulás is – már 768 ezer éve áll fenn.

A Föld mágneses terének csökkenésével a kétezres évek elején tapasztalt média-közérdeklődés hatására már korábban foglalkoztunk (Szarka et al. 2003). Azóta (és különösen a legutóbbi években) a geomágneses tér csökkenése és a pólusok vándorlása még jobban felgyorsult. Az abszolút érték csökkenése a Földön meglehetősen egyenlőtlenül oszlik meg. Magyarországon az elmúlt évszázadban lényegében alig változott, de Buenos Airesnél az 100 évvel ezelőtti értéknek mindössze kevesebb mint felére zsugorodott. A dél-amerikai tércsökkenés szembevetően látszik az ESA Swarm műholdprojektje keretében készült globális térképen (16. ábra, ESA Swarm 2020), amely a földi mágneses tér abszolút értékét a műhold magasságában (450 km-en) mutatja. A térképen feltüntetették a kozmikus sugárzásból észlelt beütéseket is. A kozmikus sugárzási beütésszám a Dél-atlanti anomálián való áthaladáskor ugyanannyi (vagy több), mint az északi és a déli sarkvidéken.



**16. ábra** A földi mágneses tér abszolút értéke nanotesla (nT) mértékegységben (1 tesla =  $10^{-4}$  gauss,  $1 \text{ nT} = 10^{-9}$  T,  $1 \text{ G} = 10^5$  nT). A pontok 2014 elejétől 2019. május 17-ig észlelt a kozmikus sugárzási beütéseket mutatják. *Forrás:* ESA Swarm 2020

**Figure 11** Global distribution of the absolute values of the Earth's magnetic field in nanotesla (nT) units (1 tesla =  $10^{-4}$  gauss,  $1 \text{ nT} = 10^{-9}$  T,  $1 \text{ G} = 10^5$  nT). The dots show cosmic radiation impacts detected from early 2014 to May 17, 2019. *Source:* ESA Swarm 2020

A mágneses tér csökkenése mellett az is megfigyelhető, hogy az északi földrajzi sark környékén lévő mágneses pólus egyirányú – Kanadából Szibéria felé tartó – vándorlása nemigen akar megállni (WDC 2021). A legutóbbi geomágneses polaritásváltás a pólusok mintegy ötszáz éven tartó, egyre nagyobb mértékű imbolygásával kezdődött, majd a pólusok felcserélődése ezt követően kevesebb mint száz év alatt ment végbe (Sagnotti et al. 2014).

A legutóbbi 70 ezer évből a 3. táblázatban felsorolt geomágneses kilengéseket (geomagnetic excursion: ki-mozdulás, „kirándulás”) ismerjük. A Laschamp-esemény idején néhány száz évig meg is fordult a geomágneses tér polaritása. A Laschamp- és a Mono Lake-eseményt még a Neander-völgyi ősember kihalásával is összefüggésbe hozták (Valet, Valladas 2010).

A geomágneses tér (a szoláris és galaktikus „szél”, „eső”, „sugárzás” ellen úgy-ahogy védő földi „ernyőnk”) az efféle

**3. táblázat** | Geomágneses rándulások. A Laschamp-eseménykor ideiglenes pólusátfordulás is történt (Korte et al. 2019)  
**Table 3** | Geomagnetic excursions. During the Laschamp event a temporary pole reversal occurred (Korte et al 2019)

Név	BP ezer év	Forrás
Göthenburg	12,4–12,4	Mörner 1977
Hilina Pali	19,6–17,0	Liu et al. 2020
Lake Mungo	30,8–28,1	Barbetti, McElhinny 1976
Mono Lake	34,5–35,0	Liu et al. 2020
Laschamp	42,0–39,5	Liu et al. 2020
Norwegian-Greenland Sea	68,9–61,0	Liu et al. 2020

nagy eseményektől eltekintve is örökösen változik. A geomágneses tér idő szerinti deriváltjában jelentkező szélsőértékeket a fizikából vett  *jerk* (a gyorsulás időbeli változására utaló „rándulás”) fogalom alapján geomágneses jerknek nevezzük. Vannak közöttük globálisan észlelhetők, de olyanok is, amelyek csak regionálisan jelentkeznek. E jelenség is magyarázatra vár (Aubert, Finley 2019).

Az ún. globális elektromos áramrendszer (Global Electric Circuit, GEC) generátorát az egyenlítői viharzóna villámai jelentik, egyéb részeit pedig az atmoszféra, az ionoszféra, az elektrojetek (egyenlítői és sarki áramok, equatorial electrojets, auroral electrojets, Birkeland currents) és a földfelszín alatti térség jelentik (Tinsley 2000, Rycroft et al. 2000). A GEC-en keresztül közvetlen kapcsolat létesül a szoláris plazmaesemények és a földi időjárási események között. A jelenség intenzív kutatások tárgya (Tinsley 2020, NCAR 2021).

A valamikori MTA Geodéziai és Geofizikai Kutatóintézetből (majd CSFK Intézetből) 2021-ben létrejött Földfizikai és Űrtudományi Kutatóintézet a geoelektromosság és a geomágnesség terén felhalmozott korábbi tudás alapján (Verő et al. 2009), széles nemzetközi együttműködésben építkezik tovább. Ezt friss GEC-publikációk is mutatják (pl. Williams et al. 2020, Prácser et al. 2020, Arnone et al. 2021). A múltban gyökerező jövő a soproni földfizika (geodézia+geofizika) egészére érvényes. A legfrissebb példa: Szűcs et al. 2021.

### Antropogén hatások

Az ember (mint a bioszféra része) kölcsönhatásban él a természettel. Energia-, ásványianyag-, víz- és talaj-

felhasználásával (a földfelszín átalakításával), aeroszol- és üvegházgáz-kibocsátásával (mindenekelőtt CO<sub>2</sub>- és H<sub>2</sub>O-emisszióval) hozzájárulhat a klímaváltozáshoz is. A legkisebb beavatkozás (pl. egy faültetés) is okoz helyi klímaváltozást. Az ember fizikai teljesítménye 100-szorosának megfelelő teljesítménnyel alakítja a természetet. Természeti beavatkozásának mértéke első közelítésben a primér energiafogyasztás nagyságával jellemezhető. Az antropogén energiafelhasználás azonban még mindig jelentéktelen a természeti energiákhoz képest. Az emberiség ipari forradalom óta integrált teljes primérenergiafogyasztása körülbelül annyi (40 zettajoule), mint amennyi egy nagy földrengés idején összesen felszabadul. (A 2004. december 26-i indiai óceáni nagy földrengés teljes energiája kb. 40 ZJ volt.) Mások az emberiség széndioxid-emisszióját mondják meghatározónak. Erről a tények a következők: 1960 óta az ember 170 ppm-nyi CO<sub>2</sub>-t bocsátott ki, a természet pedig 5700 ppm-nyit. Be kell látni, hogy a légköri CO<sub>2</sub>-tartalom alakításában az ember alárendelt szerepet játszik (Salby 2011, Harde 2017, Berry 2019). A természet miért ne rendelkezhetne dinamikusán változóképesseggel a széndioxid-kibocsátás és -abszorpció vonatkozásában is?

Az ember a földi természet töredékét jelentő bioszféra egészére meghatározó jelentőségű (Szarka 2019). A földi éghajlatváltozást (sőt, teljes földi létünket) illetően nem mindegy, hogy az ember szerepét miként ítéljük meg. Az antropogén klímatervezők megismerése lehetetlen akkor, ha a természeti hatótényezőket nem ismerjük eléggé. „A mostani klímaváltozásra azt szoktuk mondani, hogy ilyen sebességű klímaváltozás nem nagyon fordult még elő. Ez így valószínűleg nem igaz. Alapjában véve hasonlóan gyors változások voltak a földtörténeti múltban is, csak nem volt hozzá ilyen mértékű kihalási esemény, mint ami most látható az ember tevékenységének köszönhetően.” (Demény 2021). A Demény Attila-nyilatkozat egyrészt elismeri a természet hatalmas éghajlatváltoztató erejét, másrészt egy olyan érvvel hozakodik elő, ami az éghajlatváltozás tényétől és okaitól valójában független. A mai „kihalás”-nak ráadásul nincs egzakt definíciója. Számtalan faj bizonyítottan elpusztult legutolsó példányait senki sem látta. Talán inkább egyedszámcsökkenésről lehet szó.

## A lehetséges okok egy teljesebb tárháza

Az eddigiekben az éghajlatot kialakító és annak változását befolyásoló lehetséges okoknak csak egy részét tekintettük át.

- A légkörből érintőlegesen foglalkoztunk a globális légkörzettel, a felhőzettel, a magaslégkörből az ionoszférával, de nem foglalkoztunk az üvegházhatással, az aeroszolokkal és a sugárzási mérleggel.
- Illusztráltam a bioszférával való érvelés ellentmondásosságát. Az olyan modell-előrejelzéseket, miszerint a fajok 1/3-a ki fog halni, célszerű lenne gondosan ellen-

őrizni. Az viszont tény, hogy a korallok és jegesmedvék pusztulására vonatkozó állítások valótlanok. A légköri CO<sub>2</sub>-koncentráció-növekedés következményeként pedig globális zöldülés tapasztalható (IPCC 2019), ami klímaváltoztató tényező, feltehetően negatív visszacsatolással. Az ember energia-, ásványianyag-, víz- és talajfelhasználása (a földfelszín átalakítása), mindenféle kibocsátása (a földbe, vízbe, levegőbe, pl. aeroszolok) valamekkora léptékben és mértékben nyilván klímamódosító tényezők. Az invazív fajok terjedését és az ún. biodiverzitás-csökkenését az ember okozza, de mindkét folyamat független a klímaváltozás épp aktuális tendenciájától.

- Az óceáni folyamatok is mélyebb áttekintést igényelnének. Csupán a tengerszintváltozás és a távkapcsolatok sokasága került szóba, a nagy óceáni áramlások, a pH, a Henry-törvény (ami többek között az óceánok hőmérsékletfüggő CO<sub>2</sub>-oldóképességét írja le) nem.
- A hó és a jég birodalmából (az ún. krioszférából) csupán a Mendenhall-gleccsert (mint koronatanút), Nyugat-Antarktisz és a jégtömegváltozás napsugárzással való közvetlen földtörténeti összefüggését említettem, minden egyéb kérdés (pl. az albedo) kimaradt.
- A Föld belsejének dinamikus folyamatai között szóba került a belső mágneses tér, bolygónk belső felépítésével kapcsolatos néhány bizonytalanság, a litoszférasztenoszféra határ, a Föld forgása, magmatizmusa és vulkáni tevékenysége, a globális elektromos áramkör, sőt – esetleges következményként – a földrengés is (de például az izosztázia már nem).
- A Nap működésének – fényenergia-áramában, napfoltokban, napfáklyákban, plazmafelhőkben, kifényesedésekben, koronakitörésekben, koronalyukakban, Parker-spirálban, napszélben, napmágneses (helioszférikus) térváltozásokban – és sok más hasonló tüneteiben (esetleg mikronóvának is nevezhető időnkénti szuperkitörésben) megnyilvánuló jelenségei közül csak néhány került szóba. Érdemes lenne boncolgatni a napműködés, a geomágneses tér és a globális földi klímaváltozással járó jelenségek (D–O-esemény, Bond-esemény, Heinrich-esemény) periodicitásának kapcsolatát. A vélt vagy valós 12 ezer éves katasztrófaciklus alapján egyesek néhány éven vagy évtizeden belül apokaliptikus eseményt várnak.
- A bolygó–Nap kapcsolatok közül a Naprendszer tömegközéppontjának vándorlása sokféle égi mechanikai hatás (a nem pejoratív „asztrológia”) egyik megnyilvánulása. Az, hogy van-e az égitestek között a gravitációs kölcsönhatáson túlmenő más (elektromos, elektromágneses) kölcsönhatás, ködbe vész. Tény, hogy a Naprendszer egyéb bolygói is szakadatlanul zajlik klímaváltozás. A Mars és a Hold felszíni kutatása földi klímátörténeti kulcselemekre is magyarázatot adhat.
- A Tejút, az univerzum egyéb részeiből érkező kozmikus sugárzás – e tanulmányban nem részletezett – esetleges változásai szintén befolyással lehetnek földi életünkre, de ezekről még bizonytalanabbak az ismeretek, hiszen



az univerzum jelenségeit – néhány űreszköztől eltekintve – a helioszféra és a földmágneses tér szűrőjén keresztül érzékeljük. A kozmikus sugárzás esetleges felhőképző hatása mellett olyan új fogalmak bukkannak fel, mint „FRB” (Fast Radio Burst, gyors – ms nagyságrendű – radiopulzusok), „kozmosz jet”, „elektromos univerzum”. Ezek szintén az ismeretlenség, esetenként a fantázia világába vezetnek.

A mindezeket tartalmazó komplex fizikai rendszerek leírásához statisztikus fizika is kell. E kérdéskörrel Fan et al. 2021 nyújt friss áttekintést.

## Összefoglalás

A természetről, így az éghajlatváltozásról egyre több megfigyelési eredményt ismerünk, és feltérképeztünk egy sor lehetséges hatótényezőt. Ha az antropogén hatótényezőket  $A$ -val, a Földön kívüli (extraterresztrikus) hatótényezőket  $E$ -vel, a Föld belsejéből származókat  $I$ -vel (internal), a közöttük lévő – tetszőlegesen összetett és véletlenekkel terhelt – függvénykapcsolatot (azaz az időben és térben változó megfigyelési adatokat)  $M$ -mel jelöljük, a geofizikai inverziós kultúra alapján biztosan tudható, hogy az

$$f(A, E, I) = M$$

összefüggésnek csak akkor lehet a megoldása  $A = f^{-1}(M)$ , ha  $E$  és  $I$  nem változik sem időben, sem térben. A tanulmányban ennek az ellenkezőjére mutattunk tényeket.

*Panthea rei*: minden változik. Térben is és időben is. Néhány – valóban állandónak gondolható – fizikai állandón kívül semmi sincs, ami a természetben ne változna. Valójában fogalmunk sincs, hogy a földi éghajlat a Kárpát-medencében és globálisan hogyan alakul a következő években. Arról, hogy milyen dinamikával jelentkeznek a Föld belsejéből és a Földön kívüli térségből különféle hatótényezők, csak sejtések vannak. Az antropogén eredetű klímaváltozás hatását csak akkor ismerhetjük meg, ha a földi és extraterresztrikus természet földiklíma-változtató tényezőit empirikusan, objektívan és racionálisan vesszük figyelembe. Az emberileg lehetséges korrekt válaszok zömét a földfizikától reméljük.

A tanulmányban nyújtott földfizikai pillanatkép nem lehet teljes, hiszen naponta érkeznek hírek meglepőbbnél meglepőbb új felfedezésekről. Az áttekintés mindazonáltal közelebb viszi az olvasót „korunk legnagyobb kihívásának” megértéséhez és a helyzet reális értékeléséhez (ld. Függelék). Állítsuk a földfizikát – és rajta keresztül az egész földtudományt – mai periférikus helyzetéből a klímatudomány fókuszába!

Töredékes ismereteinkről Eötvös Loránd – Galiani abbét idézve – ekként vélekedett: „...a természet [dobó] koczkái ólmozva vannak, s fejünk fölött csak mosolyog rajtunk a bűvészet legnagyobbika”, azaz „...the dices of nature are leaded, and the greatest magician is just smiling at us over our heads.” (Eötvös 1877).

## Köszönetnyilvánítás

Az összefoglaló helyzetkép megírását a valamikori MTA Geodéziai és Geofizikai Kutatóintézet (2012–2019 között MTA CSFK GGI, 2019–2021 ELKH CSFK GGI) alapjain, az Eötvös Loránd Kutatási Hálózat (ELKH) keretein belül létrejövő Földfizikai és Űrtudományi Kutatóintézet (FI) ihlette. Közvetlen motivációt a XXIV. Gyermekegyógyászati Konferencián 2021. március 4-én tartott „Leletek és diagnózis a klímaváltozásról” című és a 206. ENPOL Hétfőn elhangzott „Szemlények a klímakutatás legújabb eredményeiből” c. előadásra való felkészülés adott. Köszönet a lektorok (Wesztergom Viktor, Zelei Gábor) hasznos észrevételeiért, kiegészítő megjegyzéseikért.

## Függelék

### A klímaváltozás definíciójának tisztázatlanságáról

Az ENSZ Környezetvédelmi Programja (UNEP, United Nations Environmental Programme) és a Meteorológiai Világszervezet (UN WMO, World Meteorological Organization) „a klímaváltozás tudományának értékelésére” 1988-ban létrehozták az IPCC-t (Intergovernmental Panel on Climate Change).

Az UNEP 1992-ben – a Riói Egyezmény részeként – megalkotta az ENSZ Éghajlatváltozási Keretegyezményt (UNFCCC, United Nations Framework Convention on Climate Change), amelyben az éghajlatváltozás („climate change”) fogalmát újradefiniálták: kizárták belőle a természeti eredetű éghajlatváltozásokat. Az UNFCCC definíció szerint „climate change means a change of climate which is attributed directly or indirectly to human activity”. A teljes mondat magyarul a Keretegyezmény kihirdetéséről szóló 1995. évi LXXXII. törvény 1. cikkelyben, a fogalom meghatározások között található meg, és így hangzik: „Éghajlatváltozás jelenti az éghajlat megváltozását, ami közvetlenül vagy közvetve a globális légkör összetételét módosító emberi tevékenységnek tudható be, és ami az összehasonlítható időtartamokon belül megfigyelt természetes éghajlati változékonyságon túli járulékos változásként jelentkezik.”

Az IPCC hivatalos vezérelve – követve az UNFCCC definíciót – „az ember okozta éghajlatváltozás kockázatait tudományos alapjainak megismerése” („understanding the scientific basis of risk of human-induced climate change”) lett (IPCC 1998).

Saját dokumentumaik alapján levonhatjuk a következtetést, hogy az UNEP és az IPCC által pártolt klímatudomány nem elfogulatlan, hanem inkább pártos („advocacy”) tudomány.

### A tanulmány szerzője

Szarka László

## Hivatkozások

- Abbot C. G. (1939): Solar variation and the weather. *Nature*, 29, 705.
- Adler R. F., Huffman G. J., Chang A., Ferraro R., Xie P-P., Janowiak J., Rudolf B., Schneider U., Curtis S., Bolvin D., Gruber A., Susskind J., Arkin P., Nelkin E. (2003): The Version 2 Global Precipitation Climatology Project. *Journal of Hydrometeorology*, 4, 1147–1167.
- AEKI (2011): Úrállomás dozimetria. <http://www.aeki.kfki.hu/?contentid=745&lang=hu>
- Arnone E., Bór J., Chanrion O. et al. (2020): Climatology of transient luminous events and lightning observed above Europe and the Mediterranean Sea. *Surv. Geophys.*, 41, 167–199.
- Asikainen T., Salminen A., Maliniemi V., Mursula K. (2020): Influence of enhanced planetary wave activity on the polar vortex enhancement related to energetic electron precipitation. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 125, 9, e2019JD032137.
- Aubert J., Finlay C. C. (2019): Geomagnetic jerks and rapid hydromagnetic waves focusing at Earth's core surface. *Nat. Geosci.*, 12, 393–398. <https://doi.org/10.1038/s41561-019-0355-1>
- Barbetti M. F., McElhinny M. W. (1976): The Lake Mungo geomagnetic excursion. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 281, 1305, 515–542.
- Berkes Z. (1940): Éghajlatváltozás vagy éghajlatingadozás? *Az Időjárás*, 44, 7–8, 149–154.
- Berry E. X. (2019): Human CO<sub>2</sub> emissions have little effect on atmospheric CO<sub>2</sub>. *International Journal of Atmospheric and Oceanic Sciences*, 3, 1, 13–26. Angol-magyar kétnyelvű változatban (a szerző engedélyével) megjelent itt: <https://en-pol2000.hu/dokumentumok/eladas/article/Dokumentumok/C3%A1ci%C3%B3k/Dokumentumok/13-El%C5%91ad%C3%A1s/867-az-emberi-eredetu-co2kibocsatas-csekely-hatast-gyakorol-a-legkori-co2-ra>
- Burke K. D., Williams J. W., Chandler A., Haywood A. M., Lunt D. J., Otto-Bliesner B. L. (2018): Pliocene and Eocene provide best analogs for near-future climates. *PNAS* 115, 52, 13288–13293.
- Burroughs W. J. (1992): *Weather Cycles: Real Or Imaginary?* Cambridge Univ Press.
- Butler A. H., Jeremiah P., Sjöberg J. P., Dian J., Seidel D. J., Rosenlof K. H. (2017): A sudden stratospheric warming compendium. *Earth Syst. Sci. Data*, 9, 63–76.
- Chen Y. W., Colli L., Bird D. E. et al. (2021): Caribbean plate tilted and actively dragged eastwards by low-viscosity asthenospheric flow. *Nat. Commun.*, 12, 1603, <https://doi.org/10.1038/s41467-021-21723-1>
- Cionco R. G., Soon W. W.-H. (2017): Short-term orbital forcing: A quasi-review and a reappraisal of realistic boundary conditions for climate modeling. *Earth-Science Reviews*, 166, 206–222.
- CLOUD (2016): The CLOUD Project. <https://cloud.web.cern.ch/>
- Connolly R. et al. (2021): How much has the Sun influenced Northern Hemisphere temperature trends? An ongoing debate. *Research in Astronomy and Astrophysics*. Megjelenőben.
- Daily Mail (2013): Ancient forest revealed 1,000 years after being 'entombed' in gravel as Alaskan glacier melts. Mail Online by Nolan S, 10 October 2013, <https://www.dailymail.co.uk/sciencetech/article-2451640/Mendenhall-Glacier-melting-reveals-ancient-forest.html#comments>
- Del Genio A., Laci A., Ruedy R. (1991): Simulations of the effect of a warmer climate on atmospheric humidity. *Nature*, 351, 382–385.
- Demény A. (2021): Stabilizotópokkal a klímaváltozás nyomában. In: Babinszky Edit: *Kőbe zárt világok. A Magyarhoni Földtani Társulat kisfilmje*. <https://youtu.be/6e6ZyZrCkxI>
- Druckmüller M. (2017): Total Solar Eclipse, 2017, USA [http://www.zam.fme.vutbr.cz/~druck/eclipse/Ecl2017u/Mi/Mitchell\\_800mm/0-info.htm](http://www.zam.fme.vutbr.cz/~druck/eclipse/Ecl2017u/Mi/Mitchell_800mm/0-info.htm)
- Encyclopaedia Britannica (2010): <https://www.britannica.com/science/atmospheric-circulation>
- Eötvös L. (1877): A távolba hatás kérdéséről. *Magyar Tudományos Akadémia Évkönyvei XVI. (1877–1882)*, 57–68. In: Eötvös Loránd (ed: Környei Elek), Gondolat Kiadó, Budapest. Rövidítve: *Magyar Nemzet* 2019. április 7., <https://magyar-nemzet.hu/lugas-rovat/a-tavolba-hatas-kerdeserol-6335396/>
- ESA Swarm (2020): Swarm probes weakening of Earth's magnetic field. [https://www.esa.int/Applications/Observing\\_the\\_Earth/Swarm/Swarm\\_probes\\_weakening\\_of\\_Earth\\_s\\_magnetic\\_field](https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Swarm/Swarm_probes_weakening_of_Earth_s_magnetic_field)
- Fan J., Meng J., Ludescher J., Chen X., Ashkenazy Y., Kurths J., Havlin S., Schellnhuber H. J. (2021): Statistical physics approaches to the complex Earth system. *Physics Reports*, 896, 1–84.
- Harde H. (2017): Scrutinizing the carbon cycle and CO<sub>2</sub> residence time in the atmosphere. *Global and Planetary Change*, 152, 19–26.
- Herschel W. (1801): Observations tending to investigate the nature of the Sun, in order to find the causes or symptoms of its variable of light and heat; with remarks on the use that may possibly be drawn from solar observations. *Philos. Trans. R. Soc. Lond.*, 91, 265–318.
- Hide R., Boggs D. H., Dickey J. O. (2000): Angular momentum fluctuations within the Earth's liquid core and torsional oscillations of the core–mantle system. *Geophysical Journal International*, 143, 3, 777–786. <https://doi.org/10.1046/j.0956-540X.2000.01283.x>
- Huntington T. (2006): Evidence for intensification of the global water cycle: Review and synthesis. *Journal of Hydrology*, 319, 1–4, 83–95.
- Hurst H. E. (1951): Long-term storage capacity of reservoirs. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 116, 1. <https://doi.org/10.1061/TACEAT.0006518>
- Huybers P., Wunsch C. (2004): A depth-derived pleistocene age model: Uncertainty estimates, sedimentation variability, and nonlinear climate change. *Paleoceanography*, 19, PA1028.
- Illés-Almár E. (2004): Weather reacting to geomagnetic storms. *Advances in Space Research*. 34, 376–378.
- Ilyas S. (2004): Aerial view of the whole of Malé proper on the eponymous island, prior to the construction of the Sinamalé Bridge. October 4, 2004. <https://en.wikipedia.org/wiki/Mal%C3%A9#/media/File:Male-total.jpg>
- Imbrie J., Hays J. D., Martinson D. G., McIntyre A., Mix A. C., Morley J. J., Pisias N. G., Prell W. L., Shackleton N. J. (1984): The orbital theory of Pleistocene climate: Support from a revised chronology of the marine  $\delta^{18}\text{O}$  record. In: Berger A. et al. (eds), *Milankovitch and Climate*. Hingham, MA: D. Reidel, 269–305.
- IPCC (1998): Principles governing IPCC work. <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/09/ipcc-principles.pdf>

- IPCC (2000): TAR WG1, The Scientific Basis, Chapter 14, Executive Summary
- IPCC (2018): Advancing Our Understanding. <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/TAR-14.pdf>
- IPCC (2019): Summary for Policymakers. In: Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems [P. R. Shukla, J. Skea, E. Calvo Buendia, V. Masson-Delmotte, H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, P. Zhai, R. Slade, S. Connors, R. van Diemen, M. Ferrat, E. Haughey, S. Luz, S. Neogi, M. Pathak, J. Petzold, J. Portugal Pereira, P. Vyas, E. Huntley, K. Kissick, M. Belkacemi, J. Malley, (eds.)]. In press. [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/4/2020/02/SPM\\_Updated-Jan20.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/4/2020/02/SPM_Updated-Jan20.pdf)
- Kiss A., Földváry L. (2017): Uncertainty of GRACE-borne long periodic and secular ice mass variations in Antarctica. *Acta Geodaetica et Geophysica*, 52, 4, 497–510.
- Kitaba I., Hyodo M., Nakagawa T., Katoh S., Dettman D. L., Sato H. (2017): Geological support for the Umbrella Effect as a link between geomagnetic field and climate. *Sci. Rep.*, 7, 40682.
- Kolaczek B. (1995): Short period variations of Earth rotation. *Nournées 1995, L'observatoire de Paris*
- Kopp G. (2016): Magnitudes and timescales of total solar irradiance variability. *J. Space Weather Space Clim.*, 6, A30.
- Koppán A., Szarka L., Wesztergom V. (2000): Annual fluctuation in amplitudes of daily variations of electrical signals measured in the trunk of a standing tree. *C. R. Acad. Sci., III*, 323, 6, 559–563.
- Kordos L. (2015): Gyors klimatikus átmenetek az észak-atlanti területeken. <http://klimaszkeptikusok.hu/wp-content/uploads/2015/10/Kordos-L%C3%A1szl%C3%B3-Gyors-klimatikus-%C3%A1tmenetek-az-%C3%A9szak-atlanti-ter%C3%BCleten.pdf>
- Korte M., Brown M. C., Panovska S., Wardinski I. (2019): Robust characteristics of the Laschamp and Mono Lake Geomagnetic Excursions: Results from global field models *front. Earth Sci.*, 30.
- Kósa L. (2008): Természeti csapások és civilizációs következményeik a 19. században Magyarországon. Székfoglalók a Magyar Tudományos Akadémián, ISSN 1419-8959. MTA, 2014
- Koutsoyiannis D. (2013): Hydrology and change. *Hydrological Sciences Journal*, 58, 6, 1177–1197.
- Koutsoyiannis D. (2020): Revisiting global hydrological cycle: Is it intensifying? *Hydrology and Earth System Sciences*, 24, 3899–3932.
- Le Mouél J.-L., Cortillot V., Jault D. (1992): Changes in Earth rotation rate. *Nature*, 355, 26–27.
- Le Mouél J.-L., Blanter E., Shnirman M., Courtillot V. (2010): Solar forcing of the semi-annual variation of length-of-day. *Geophysical Research Letters*, 37, L15307, DOI: 10.1029/2010GL043185
- Liu J., Nowaczyk N. R., Panovska S., Korte M., Arz H. W. (2020): The Norwegian-Greenland Sea, the Laschamps, and the Mono Lake excursions recorded in a Black Sea sedimentary sequence spanning from 68.9 to 14.5 ka. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 125, e2019JB019225.
- Lupo A. R. (2021): Climate, Climate Change, and the General Circulation. *Climate Information Brief*. Office of Science and Technology Policy, Executive Office of the President of the United States, 8 January, 2021
- Lüdecke H.-J., Müller-Plath G., Wallace M. G., Lüning S. (2021): Decadal and multidecadal natural variability of African rainfall. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 34, 2021, 100795.
- Martos Y. M., Catalán M., Jordan T. A., Golynsky A., Golynsky D., Eagles G., Vaughan D. G. (2017): Heat flux distribution of Antarctica unveiled. *Geophysical Research Letters*, 44, 22. <https://doi.org/10.1002/2017GL075609>
- Mörner N.-A. (1977): The Gothenburg magnetic excursion. *Quaternary Research*, 7, 3, 413–427.
- Mörner N.-A. (2011): The Maldives: A measure of sea level changes and sea level ethics. In: *Evidence-Based Climate Science* (ed.: Don Easterbrook), Elsevier, Chapter 7, 197–209.
- Mörner N.-A. (2013): Planetary beat and solar–terrestrial responses. *Pattern Recognition in Physics*, 1, 107–116. DOI: 10.5194/prp-1-107-2013
- NASA (2020): What Is the Solar Cycle? <https://spaceplace.nasa.gov/solar-cycles/en/>
- NASA SVS (2018): The Dynamic Solar Magnetic Field with Introduction. Bridgman T., NASA Scientific Visualization Studio. <https://svs.gsfc.nasa.gov/4623>
- NCAR (2021): Earth's Global Electric Circuit – Atmospheric Electricity. NCAR & UCAR Science. <https://www.youtube.com/watch?v=X7-0YRiln7E>
- NCDC NOAA (2021): Global Climate Report – January 2021 és February 2021 ([www.ncdc.noaa.gov/sotc/global/202101](http://www.ncdc.noaa.gov/sotc/global/202101) és 202102)
- Oikonomou C., Haralambous H., Pulinets S., Khadka A., Paudel S. R., Barta V., Muslim B., Kourtidis K., Karagiorgas A., Inyurt S. (2021): Investigation of pre-earthquake ionospheric and atmospheric disturbances for three large earthquakes in Mexico. *Geosciences*, 2021, 11, 1, 16.
- Phillip T. (2020): Major solar flare and CME. *Space Weather Archive*, November 29, 2020. <https://spaceweatherarchive.com/2020/11/29/major-solar-flare-and-cme/>
- Prácser E., Bozóki T., Satori G., Williams E., Guha A., Yu H. (2020): Reconstruction of global lightning activity based on Schumann resonance measurements: Model description and synthetic tests. *Radio Science*, 54, 3, 254–267.
- PRP (2014): Termination of the journal *Pattern Recognition in Physics*. <https://www.pattern-recognition-in-physics.net/>
- Pulinets S. A., Krankowski A., Hernandez-Pajares M., Marra S., Chernik I., Zakharenkova I., Rothkaehl H., Kotulak K., Davidenko D., Blazkiewicz L., Fron A., Flisek P., Rigo A. G. G., Budnikov P. (2021): Ionosphere Sounding for Pre-seismic anomalies identification (INSPIRE): Results of the project and Perspectives for the short-term earthquake forecast. *Frontiers in Earth Science*
- Pulinets S. A., Ouzounov D. (2010): Lithosphere–Atmosphere–Ionosphere Coupling (LAIC) model – An unified concept for earthquake precursors validation. *Journal of Asian Earth Sciences*, 41, 4, 371–382. DOI: 10.1016/j.jseaes.2010.03.005
- Rahmstorf S. (2003): Timing of abrupt climate change: A precise clock. *Geophys. Res. Lett.*, 30, 10, 1510. Bibcode: 2003GeoRL...30.1510R.
- Roe G. (2007): In defense of Milankovitch. *Geophys. Res. Lett.*, 33, L24703, DOI: 10.1029/2006GL027817
- Rycroft M. J., Israelsson S., Price C. (2000): The global atmospheric electric circuit, solar activity and climate change. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 62, 17–18.
- Sagnotti L., Scardia G., Giaccio B., Liddicoat J. C., Nomade S., Renne P. R., Sprain C. J. (2014): Extremely rapid directional

- change during Matuyama-Brunhes geomagnetic polarity reversal, *GJI*, 199, 2, 1, 1110–1124.
- Salby M. (2011) The global emission of CO<sub>2</sub>: the contribution from various sources. The Sydney Institute Lectur, 2 August 2011, [www.youtube.com/watch?v=YrI03ts-9I](http://www.youtube.com/watch?v=YrI03ts-9I)
- Salstein D. A. (2019): Atmospheric Angular Momentum related to Earth Rotation studies: History and modern developments. Presentation. Journées 2019, L'observatoire de Paris, October 8
- SC (2021): UN Security Council Press Release, February 23, 2021. <https://www.un.org/press/en/2021/sc14445.doc.htm>
- Science News (2018): Limiting global warming to 1.5 degrees versus 2 has big benefits, the IPCC says. By Gramling C., October 7, 2018, <https://www.sciencenews.org/article/global-warming-limit-degrees-ippc-climate-change>
- Seaton D. B., Darnel J. M. (2018): Observations of an eruptive solar flare in the extended EUV solar corona. *ApJL*, 852, L9. DOI: 10.3847/2041-8213/aaa28e
- Sfīcǎ L., Beck C., Nita A.-I., Voiculescu M., Birsan M.-V., Philipp A. (2021): Cloud cover changes driven by atmospheric circulation in Europe during the last decades. *International Journal of Climatology*, 41, S1, E2211–E2230.
- Shen W., Peng C. (2016): Detection of different-time-scale signals in the length of day variation based on EEMD analysis technique. *Geodesy and Geodynamics*, 7, 3, 180–186.
- Spencer R. W. (2017): An inconvenient deception: How Al Gore distorts climate science and energy policy. <https://www.drroyspencer.com/wp-content/uploads/Mendenhall-Glacier-tree-stumps.jpg>
- Svensmark H., Friis-Christensen E. (1997): Variation of cosmic ray flux and global cloud coverage – a missing link in solar-climate relationships. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 59, 1225–1232.
- Svensmark H., Enghoff M. B., Shaviv N. J. et al. (2017): Increased ionization supports growth of aerosols into cloud condensation nuclei. *Nat. Commun.*, 8, 2199. <https://doi.org/10.1038/s41467-017-02082-2>
- Szarka L. (1988): Geophysical aspects of man-made electromagnetic noise in the earth – A review. *Surv. Geophys.*, 9, 287–318. <https://doi.org/10.1007/BF01901627>
- Szarka L., Wesztergom V., Verő J. (2003): Hírek és rémhírek a geomágneses pólusátfordulásról. *Ezredforduló*, 1, 26–30.
- Szarka L. (2019): Föld és ember. MTA rendes tagsági székfoglaló előadás, 2019. szeptember 17. <https://www.enpol2000.hu/hirek-info/article/Aktu%C3%A1lis/64-Aktu%C3%A1lis%20h%C3%ADrek/762-fold-es-ember-szarka-laszlo-szekfoglalo-eloadasa-a-magyar-tudomanyos-akademian>
- Szarka L., Soon W. W.-H., Cionco G. (2021): How the astronomical aspects of climate science were settled? On the Milankovitch and Bacsák anniversaries, with lessons for today. *Advances in Space Research*, 67, 1, 700–707.
- Szűcs E., Gönczy S., Bozsó I., Bányai L., Szakács A., Szárnya Cs., Wesztergom V. (2021): Evolution of surface deformation related to salt-extraction-caused sinkholes in Solotvyno (Ukraine) revealed by Sentinel-1 radar interferometry. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 21, 977–993.
- Tinsley B. A. (2000): Influence of the solar wind on the global electric circuit, and inferred effects on cloud microphysics, temperature, and dynamics in the troposphere. *Space Sci. Rev.*, 94, 231–258.
- Tinsley B. A. (2020): Influence of global electric circuit on weather and climate. <https://www.issibern.ch/workshops/svc/Abstracts/tinsley1.pdf>
- Valet J.-P., Valladas H. (2010): The Laschamp-Mono lake geomagnetic events and the extinction of Neanderthal: A causal link or a coincidence? *Quaternary Science Reviews*, 29, 27–28, 3887–3893.
- Verő J., Ádám A., Bencze P., Bór J., Heilig B., Koppán A., Kovács K., Lipovics T., Márcz F., Müller I., Sántori G., Szalai S., Szarka L., Wesztergom V., Zieger B. (2009): Geoelektromágnesség és a változó Föld = Geoelectromagnetism and the changing Earth. *Munkabeszámoló. OTKA*. [http://real.mtak.hu/2534/1/61013\\_ZJ1.pdf](http://real.mtak.hu/2534/1/61013_ZJ1.pdf)
- WDC (2021): Magnetic North, Geomagnetic and Magnetic Poles. World Data Center for Geomagnetism, Kyoto. <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/poles/polesexp.html>
- Williams E., Bozóki T., Sántori G., Price C., Steinbach P., Guha A., Liu Y., Beggan C. D., Neska M., Boldi R., Atkinson M. (2020): Evolution of global lightning in the transition from cold to warm phase preceding two super El Niño events. *JGR Atmospheres*, 126, 3, e2020JD033526.
- Wilson I. R. G. (2006): Are changes in the Earth's rotation rate externally driven and do they affect climate? *The General Science Journal*, <https://www.gsjournal.net/Science-Journals/Research%20Papers-Astrophysics/Download/3811>
- WSO (2021): WSO Solar Polar Field Strength vs. Time. <http://wso.stanford.edu/gifs/Polar.gif>
- Yirka B. (2021): The Earth has been spinning faster lately. <https://phys.org/news/2021-01-earth-faster.html>
- Zhang J.-C. (1981): The periodicity and predictability of climate. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 60, 274–228.

# Umow kísérlete a földmágneses kvadrupólus paramétereinek meghatározására

## *Visszatekintés*

MÁRTON P.

Eötvös Loránd Tudományegyetem, Geofizikai és Űrtudományi Tanszék  
H-1117 Budapest, Pázmány Péter stny. 1/C  
E-mail: archeomag@caesar.elte.hu

Visszatekintve Umow kísérletére a földmágneses kvadrupólus paramétereinek meghatározására megállapítható, hogy mind az általa felállított egyenletek, mind a megoldásukra kidolgozott algoritmus matematikailag hibátlanok, és így az általa idézett paraméterek az 1829 epochára nem lehetnek ezen algoritmussal történő számítás eredményei. Megállapítható továbbá, hogy Umow földmágneses kvadrupólusa nem teljesen azonos a mai értelemben vett földmágneses kvadrupólussal, noha a kettő erőssége és egyik pólusa egyenlő, de az Umow-féle kvadrupólus másik pólusa az utóbbinak tükörcsképe. Ez a különbség azonban könnyen eltüntethető az alapegyenletek kis módosításával, úgyhogy Umow algoritmusával számolva is ugyanazon eredményekre lehet jutni, mint a később kidolgozott módszerekkel.

### **Márton, P.: Note on Umow's experiment of calculating the parameters of the geomagnetic quadrupole**

It is shown in this note that Umow's ingenious algorithm of calculating the parameters of the geomagnetic quadrupole is mathematically faultless and the controversial result quoted by him for 1929 could not be obtained by the use of it. It is also shown that the quadrupole obtained by his algorithm must be fitted to what is now generally understood under this term. Namely, either pole of his quadrupole can be taken to be one pole, but then the other pole of his quadrupole must be reversed in order to become the other pole. Finally, it is argued that by a little change in the basic equations, Umow's algorithm will give the correct quadrupole parameters, so that it can still be a useful alternative besides other direct analytical or iterative methods of solution.

*Beérkezett:* 2021. április 22.; *elfogadva:* 2021. május 9.

### **Bevezetés**

A gömbfelületi harmonikus függvények Maxwell-féle póluselméletét, az ún. multipólus-analízist, először Umow (1904a,b) kísérlete meg a földmágneses potenciálfüggvény kis rendszámú ( $n = 1, 2, 3$ ) komponenseire alkalmazni. A földmágneses potenciálfüggvény  $n$ -ed rendű komponensének multipólus-analízise során, egy multipólus-erősséget és további  $2n$  paramétert határoznak meg, amelyek  $n$  db egységvektor irányának poláris és azimutális koordinátái. Winch (1968) megfogalmazásában ez más szavakkal azt jelenti, hogy az  $n$ -edik földmágneses potenciál komponens  $2n + 1$  harmonikus koefficiensét  $2n + 1$

másfajta paraméterrel helyettesítik. Minthogy ez általában csak többismeretlenes, nemlineáris egyenletek megoldásával lehetséges, multipólus-analízist általában iterációs eljárással végeznek. Például: Winch and Slaucaitajs (1966), James (1968), Márton (2020). Umow fent említett kísérlete azért figyelemre méltó, mert ő a földmágneses potenciál első három komponensének ( $n = 1, 2, 3$ ) analízisét direkt analitikai módszerrel közelítette meg. Az  $n = 1$  eset (földmágneses dipólus) azonban triviális, ui. Gauss óta a földmágneses pólus erőssége (1 paraméter), mind pedig poláris ( $\vartheta_1$ ) és azimutális ( $\lambda_1$ ) koordinátái (2 adat) közismert, zárt formulákkal számíthatók ki az elsőrendű Gauss-koefficiens értékeinek felhasználásával.

Ebben a visszatekintésben az  $n = 2$  (földmágneses kvadrupólus) esetre fókuszálunk, felidézve és kommentálva Umownak erre vonatkozó eredményeit.

## A földmágneses kvadrupólus

Umow a földmágneses potenciálfüggvény másodrendű tagjának és egy kvadrupólus mágnes potenciálfüggvényének összevetésével a következő egyenleteket vezette le és oldotta meg.

$$(2/3M)g_{20} = xy - (1/2) \cos \Delta, \quad (1.1)$$

$$(2/3M)g_{21} = y \cos \lambda_1 + x \cos \lambda_2, \quad (1.2)$$

$$(2/3M)h_{21} = y \sin \lambda_1 + x \sin \lambda_2, \quad (1.3)$$

$$(4/3M)g_{22} = \cos \sigma, \quad (1.4)$$

$$(4/3M)h_{22} = \sin \sigma, \quad (1.5)$$

ahol  $g_{20}$ ,  $g_{21}$ ,  $h_{21}$ ,  $g_{22}$ ,  $h_{22}$  a földmágneses potenciál másodrendű tagjának állandói (Gauss-koefficiensek) Gauss-Laplace-normalizáció mellett. A  $(\vartheta_1, \lambda_1)$  és a  $(\vartheta_2, \lambda_2)$  változók a kvadrupólus pozitív irányú tengelyei felszíni metszéspontjainak (az ún. pólusoknak) poláris ( $0 < \vartheta_{1,2} < 180^\circ$ ) és azimutális ( $0 < \lambda_{1,2} < 360^\circ$ ) koordinátái. A tengelyek sorrendje közömbös. További változók az (1.1)–(1.5) egyenletrendszerben:  $x = \text{ctg} \vartheta_1$ ,  $y = \text{ctg} \vartheta_2$ ,  $\Delta = \lambda_2 - \lambda_1$ , és állandók:  $\sigma = \lambda_1 + \lambda_2 = \arctg(h_{22}/g_{22})$ , valamint  $M = (4/3)[g_{22}^2 + h_{22}^2]^{1/2}$ . Az utóbbi két állandó értékének figyelembevételével az ismeretlenek meghatározásához az (1.1)–(1.5) egyenletrendszer első három egyenlete elegendő. Umow megmutatta, hogy az  $x$  és az  $y$  változó kiküszöbölése után a  $\Delta$ , illetve a  $z = 1 - \cos \Delta$  változóra egy harmadfokú egyenlet áll elő, amelynek egyetlen olyan valós megoldása van, amely a szükséges  $\text{abs}(\cos \Delta \leq 1)$  feltételt kielégíti. Ezen  $\Delta$  és  $\sigma$  összevetésével adódik  $\lambda_1$  és  $\lambda_2$ , majd az (1.2) és (1.3) egyenletekből álló lineáris egyenletrendszer megoldásával  $x$  és  $y$ , azaz  $\vartheta_1$  és  $\vartheta_2$  értéke. Végül a kvadrupólus erőssége:  $M_E = M/2 \sin \vartheta_1 \sin \vartheta_2$ . (E paraméter helyett Umow a kvadrupólus momentumát,  $\delta_2 = M/\sin \vartheta_1 \sin \vartheta_2$  kifejezést használja, amelynek dimenziója  $\text{gauss} \cdot \text{cm}^4$ , számértéke pedig egységnyi fűldugár mellett  $M_E$  kétszerese.)

A probléma fenti megoldási lépéseinek ismertetését Umow egy számpéldával kísérte, amelyhez kiindulási adatokként Neumayer és Petersen által az 1885 epochára kiszámított Gauss-koefficienseket (l. Umow (1904a)) használta fel. Ezeket és a kvadrupólus eredményül kapott paramétereit az 1. táblázat bal oldalán a harmadik oszlopban mutatjuk be.

Idézett két dolgozatában Umow az 1829 epochára vonatkozó kvadrupólus paramétereit is közöl ( $\vartheta_1 = 33,25^\circ$ ,  $\lambda_1 = 186,02^\circ$ ,  $\vartheta_2 = 73,75^\circ$ ,  $\lambda_2 = 167,93^\circ$  és  $\delta_2 = 0,005011 \text{ gauss} \cdot \text{cm}^4$ ), amelyeket megkíséreltünk reprodukálni az általa szintén megadott Neumayer és Petersen-féle Gauss-

koefficiensek mellett (1. táblázat bal oldali második oszlop felső része). Megoldási algoritmus szerint haladva, a következő értékeket számítottuk ki:

$$A = (2/3M)^2 [g_{21}^2 + h_{21}^2] = 3,0760,$$

$$n = (2/3M)^2 [g_{21} \sin(\sigma/2) - h_{21} \cos(\sigma/2)]^2 = 1,3373,$$

$$a = 1 + (4/3M)g_{20} = 1,0953.$$

A  $z = 1 - \cos \Delta$  változó harmadfokú egyenlete így állítandó fel:

$$z^3 - (a + 2)z^2 - (A - 2a)z + 2n = 0,$$

azaz a fenti állandókkal

$$z^3 - 3,0953z^2 - 0,8854z + 2,6747 = 0.$$

Az egyetlen,  $0 \leq z \leq 2$  feltételt kielégítő valós megoldásra  $z_0 = 0,9247$  adódik. Innen  $\Delta = \lambda_2 - \lambda_1 = 85,68$ , amit  $\sigma$  értékével összevetve kapjuk, hogy

$$\lambda_2 = 0,66^\circ \quad \text{és} \quad \lambda_1 = -85,02^\circ (= 274,98^\circ).$$

Az (1.2) és (1.3) egyenletből képezhető lineáris egyenletrendszerből

$$y = (2/3M) [g_{21} \sin \lambda_2 - h_{21} \cos \lambda_1] / \sin(\lambda_2 - \lambda_1) = -0,048772,$$

$$x = (2/3M) [h_{21} \cos \lambda_1 - g_{21} \sin \lambda_1] / \sin(\lambda_2 - \lambda_1) = -1,74951,$$

azaz

$$\vartheta_2 = \arctg(1/y) = 92,79^\circ \quad \text{és} \quad \vartheta_1 = \arctg(1/x) = 150,25^\circ.$$

Végül a kvadrupólus erőssége  $M_E = 1708 (10^{-5} \text{ gauss})$ -ra, illetve momentuma  $\delta_2 = M/\sin \vartheta_1 \sin \vartheta_2 = 0,03416 \text{ gauss} \cdot \text{cm}^4$ -re jön ki (1. táblázat bal oldali második oszlop).

Az 1. táblázat 2. és 3. oszlopában feltüntetett eredményekből látható, hogy az 1829 epochára itt kiszámolt adatok (2. oszlop felső adatok és/vagy alsó adatok) teljes összhangban vannak az eredetileg Umow által mintegy 60 évvel későbbi epochára kapott adatokkal (3. oszlop alsó adatok és/vagy felső adatok). Ezek egymást kölcsönösen megerősítik, tehát Umow idézett dolgozataiban az 1829 epochára közölt adatok idegenek, azaz nem állhattak elő az (1.1)–(1.5) egyenletrendszernek a fenti algoritmussal történő megoldásával.

## Összevetés a jelenlegi számításokkal

A földmágneses potenciálfüggvény másodrendű tagjának Gauss-koefficiensei a jelenleg általánosan elfogadott Schmidt-féle normalizáció mellett, a korábbi szerzők és Umow által is használtakkal a következőképpen fejezhető ki (McDonalds, Gunst 1967):

$$\begin{aligned} g_2^0 &= -(2/3)g_{20}, & g_2^1 &= -(1/\sqrt{3})g_{21}, & h_2^1 &= -(1/\sqrt{3})h_{21}, \\ g_2^2 &= -(1/\sqrt{3})g_{22}, & h_2^2 &= -(1/\sqrt{3})h_{22}. \end{aligned} \quad (1.6)$$

**1. táblázat** Gauss-koefficiensek és a megfelelő földmágneses kvadrupólusok kiszámított paramétereinek két epochára. Bal oldalon az Umow-, jobb oldalon egy iterációs módszerrel kapott eredmények állnak. A bal oldali első oszlopban jelzett módon az eredeti (vagyis a kiszámított) és az azzal ellentétes tengelyirányokkal rendelkező kvadrupólus szögparamétereinek is fel vannak tüntetve. Ezek fizikailag azonos mágnesek. A pólusok sorrendje különböző

**Table 1** Gauss coefficients and calculated parameters of corresponding geomagnetic quadrupoles for two epochs. Left side: results by use of Umow's algorithm, right side: results by use of an iterative method

( $10^{-5}$ gauss)	Epocha 1829	Epocha 1885	(nT)	Epocha 1829	Epocha 1885	Megjegyzés
$g_{20}$	121,0	790,6	$g_2^0$	-80,7	-527,1	
$g_{21}$	-4453,7	-4979,8	$g_2^1$	2571,3	2875,1	
$h_{21}$	72,0	1299,9	$h_2^1$	-41,6	-750,5	
$g_{22}$	124,9	-566,7	$g_2^2$	-144,2	654,4	
$h_{22}$	-1263,7	-1220,4	$h_2^2$	1459,2	1455,4	
$M$	1693	1842	$2M_2^*$	1693	1843	
$M_E$	1708	1966	$10^{-7}m_2/a^4$	1708	1968	A kvadrupólusok erőssége
(°)	(°)	(°)		(°)	(°)	
$\vartheta_1/$ $180 - \vartheta_1$	150,25 29,75	28,2 151,8		87,2 92,8	82,2 97,8	A +/- pólusok koordinátái
$\lambda_1/$ $\lambda_1 + 180$	275,0 95,0	76,2 256,2		180,7 0,70	169,6 349,6	
$\vartheta_2/$ $180 - \vartheta_2$	92,8 87,2	82,7 97,3		150,2 29,8	151,8 28,2	
$\lambda_2/$ $\lambda_2 + 180$	0,70 180,7	169,6 349,6		275,0 95,0	256,2 76,2	

Jelmagyarázat a szövegben, illetve a Függelékben

Symbols: ( $\vartheta_1, \lambda_1$ ), polar and azimuthal components of one of the poles; ( $\vartheta_2, \lambda_2$ ), same of the other pole. For other symbols see text and Appendix

Számértékeik az 1829 és az 1885 epochára az 1. táblázat jobb oldali felső részén láthatók. A megfelelő kvadrupólusok paramétereinek kiszámolására több módszer is kínálkozik, amelyek alapját az (F.1)–(F.2) egyenletrendszer képezi (l. Függelék). Itt az 1. táblázat jobb oldali részében az algebrailag talán legegyszerűbb iterációs megoldással (Márton 2020) kapott eredményeket idézzük. Közvetlenül látható, hogy a kvadrupólus erősségek számértékei Umownál és e számítások alapján azonosak. A pólusoknál mindkét vizsgált epocha esetén található egy közös. Így 1829-re az 1-es indexű pólus Umow algoritmus szerint azonos a 2-es indexűvel a jelenlegi számítás szerint, míg 1885-re a 2-es indexű pólus Umownál azonos az itteni 1-es indexűvel, a nem említett pólusok pedig egymás tükörképei. Összefoglalva, mindkét epochára nézve egy-egy azonos, illetve egy-egy ellentétes értelmű pólus adódik, amely az (1.6) szerinti átszámítás következménye.

(Helyettesítéssel igazolható, hogy az egyik tengely irányának megfordítása esetén az (1.1)–(1.5) egyenletek jobb oldalai ellenkező előjelűvé válnak, míg a két tengely irányának egyidejű megfordítása nem jár előjelváltással, vagyis a „megfordított kvadrupólus” tere nem különbözethető meg az eredeti terétől.)

A fentiekből következik, hogy az Umow-féle kvadrupólusok (1. táblázat 2. és 3. oszlop) a következőképpen értelmezendők. Feltéve, hogy a ( $\vartheta_1, \lambda_1$ ) koordinátájú pólus, akkor a másik pólus a ( $180 - \vartheta_2, \lambda_2 + 180$ ) koordinátájú pólus lesz. Ha viszont a ( $\vartheta_2, \lambda_2$ ) koordinátájú pólus, akkor a másik pólus a ( $180 - \vartheta_1, \lambda_1 + 180$ ) koordinátájú pólus lesz. Mindkét megoldás helyes, hiszen ezek egymás tükörképei.

### Frissítés

Umow megoldási algoritmusának levezetése a földmágneses kvadrupólus paramétereinek közvetlen analitikai úton történő meghatározására matematikailag annyira ötletes, hogy talán érdemes megmutatni, hogy maga az algoritmus változatlan formában ma is használható, ha erre alkalom adódik, pl. egy égitest mágneses terének analízisakor.

Tekintsük az (1.1)–(1.5) alapegyenleteket, és a bal oldalon álló „régii” Gauss-koefficienseket cseréljük ki a következőkre:

$$g_{20} = \sqrt{3}g_2^0, \quad g_{21} = 2g_2^1, \quad h_{21} = 2h_2^1, \quad g_{22} = g_2^2, \quad h_{22} = h_2^2,$$

ahol  $(g_2^0, g_2^1, h_2^1, g_2^2, h_2^2)$  a jelenleg használatos másodrendű harmonikus koeficiensek.

Ezekkel a módosításokkal a megoldandó egyenletek így alakulnak:

$$(2/\sqrt{3}M)g_2^0 = xy - (1/2)\cos\Delta, \quad (2.1)$$

$$(4/3M)g_2^1 = y \cos \lambda_1 + x \cos \lambda_2, \quad (2.2)$$

$$(4/3M)h_2^1 = y \sin \lambda_1 + x \sin \lambda_2, \quad (2.3)$$

$$(4/3M)g_2^2 = \cos \sigma, \quad (2.4)$$

$$(4/3M)h_2^2 = \sin \sigma \quad (2.5)$$

$M$  a (2.4) és (2.5) egyenlet alapján:  $M = (4/3)[(g_2^2)^2 + (h_2^2)^2]^{1/2}$ , ill.  $\sigma = \lambda_1 + \lambda_2 = \arctg(h_2^2/g_2^2)$ .

Illusztrációképpen tekintsük az IGRF-12 táblázatból (Thébault et al. 2015) az 1975 epochára vonatkozó következő másodrendű Gauss-koeficienseket:

$$g_2^0 = -1902 \text{ (nT)}, \quad g_2^1 = 3010 \text{ (nT)}, \quad h_2^1 = -2067 \text{ (nT)},$$

$$g_2^2 = 1632 \text{ (nT)}, \quad h_2^2 = -68 \text{ (nT)},$$

és oldjuk meg ezekkel a (2.1)–(2.3) egyenleteket Umow algoritmusának alkalmazásával! Erre az epochára ui. többféle független megoldás is rendelkezésre áll, amelyekkel eredményünket összehasonlíthatjuk. A fentebb már követett úton haladva először a következő állandókat számítjuk ki:

$$M = 2177,888, \quad \sigma = 357,62,$$

$$A = (4/3M)^2 [(g_2^1)^2 + (h_2^1)^2] = 4,997132,$$

$$n = (4/3M)^2 [g_2^1 \sin(\sigma/2) - h_2^1 \cos(\sigma/2)]^2 = 1,50530,$$

$$a = 1 + (4/\sqrt{3}M)g_2^0 = 1.01685.$$

Ezekkel az értékekkel a  $z = 1 - \cos\Delta$  változó harmadfokú egyenlete,

$$z^3 - (a + 2)z^2 - (A - 2a)z + 2n = 0$$

alapján

$$z^3 - 0,983147z^2 - 7,03084z + 3,01058 = 0.$$

A  $0 \leq z \leq 2$  feltételt kielégítő megoldás:

$$z_0 = 0,414309.$$

Innen  $\Delta = \lambda_2 - \lambda_1 = 54,148$ , amit a  $\sigma = 357,62$  értékkel összevetve kapjuk, hogy

$$\lambda_2 = 205,88^\circ \quad \text{és} \quad \lambda_1 = 151,74^\circ.$$

A (2.2) és a (2.3) egyenletből képezhető lineáris egyenletrendszerből

$$y = (4/3M)[g_2^1 \sin \lambda_2 - h_2^1 \cos \lambda_2]/\sin(\lambda_2 - \lambda_1) = -2,397039,$$

$$x = (4/3M)[h_2^1 \cos \lambda_1 - g_2^1 \sin \lambda_1]/\sin(\lambda_2 - \lambda_1) = 0,298712,$$

azaz

$$\vartheta_2 = \arctg(1/y) = 157,36^\circ \quad \text{és} \quad \vartheta_1 = \arctg(1/x) = 73,37^\circ.$$

Végül a kvadrupólus erőssége

$$M_E = (\mu_0/4\pi) \cdot (m_2/a^4) = (\sqrt{3}/4)[M/\sin\vartheta_1 \sin\vartheta_2] = 2556,8 \text{ nT}.$$

A kiszámított adatokat a 2. táblázat második oszlopában találjuk. A fejlécben az „Umow (2021)” felirat arra utal, hogy a számítások ugyan 2021-ben készültek, de Umow eredeti algoritmusára szerint. A harmadik és negyedik oszlopban az (F.1)–(F.2) egyenletrendszernek (l. Függelék) egy iterációs algoritmussal és egy közvetlen analitikai algoritmussal történő megoldásával kapott eredmények állnak. A háromféle számítás nyilvánvalóan azonos eredményre vezet, ami alátámasztja a (2.1)–(2.5) alapegyenletek helyességét, mind pedig Umow algoritmusának használhatóságát (itt) a földmágneses kvadrupólus paramétereinek kiszámítására. Nem nehéz belátni, hogy a (2.1)–(2.5) alapegyenletek tulajdonképpen az (F.1)–(F.2) egyenletrendszer „retro”-változatát képezik. Befejezésül megjegyezzük, hogy az Umow-algoritmus kevesebb számítási lépésben vezet eredményre, mint a harmadik oszlopban lévő adatok kiszámítására alkalmazott, szintén közvetlen analitikai módszer.

2. táblázat | A földmágneses kvadrupólus paramétere az 1975 epochára három különböző számítás alapján

Table 2 | Results of three different calculations of the parameters of the geomagnetic quadrupole for epoch 1975

(°)	Umow (2021) direkt anal. algoritmussal	Márton (2020) iterációs al- goritmussal	Willis (1982) direkt anal. algoritmussal
$\vartheta_1$	73,37	73,38	73,38
$\lambda_1$	151,74	151,74	151,74
$\vartheta_2$	157,36	157,36	157,36
$\lambda_2$	205,88	205,88	205,88
$M_E$ (nT)	2556,80	2556,70	2556,70

Jelmagyarázat: l.1. táblázat

Symbols: as in Table 1

## A tanulmány szerzője

Márton Péter

## Hivatkozások

- James R. W. (1968): Multipole analysis. I. Theory and geomagnetic multipoles 1965.0, Aust. J. Phys., 21, 455–464.
- Márton P. (2020): Az első öt földmágneses multipólus IGRF-13 koeficiensek értékeiből számolt paramétereinek táblázatai (1900–2020). (Parameters of the leading geomagnetic multipoles ( $n = 1, 2, \dots, 5$ ) computed from the harmonic coefficients of the IGRF-13 field model). Magyar Geofizika, 61, 1–15.
- McDonald K. L., Gunst R. H. (1967): An Analysis of the Earth's Magnetic Field from 1835 to 1965. ESSA Technical Report IER 46 – IES 1. Inst. Earth's Sci., Boulder, Colorado.



Thébault E., Finlay C. C., Beggan C. D. et al. (2015): International Geomagnetic Reference Field: The 12th generation. *Earth. Planet. Sp.* 67, 79. <https://doi.org/10.1186/s40623-015-0228-9>.  
 Willis D. M. (1982): A direct analytic method of calculating the quadrupole parameters of a planetary magnetic field. *Geophys. J. R. Astr. Soc.*, 68, 751–764.  
 Winch D. E., Slautitajs L. (1966): Geomagnetic multipoles, 1829 to 1960. *Pure Appl. Geophys.*, 63, 121–132.  
 Winch D. E. (1968): Multipole analysis and secular variation. *J. Geomag. Geoelect.*, 20, 205–210.

Umow N. A. (1904a): Построение геометрического образа потенциала Гаусса, как прием изыскания законов земного магнетизма. *Избранные сочинения*, т. XII, 311–370.  
 Umow N. (1904b): Die Konstruktion des geomagnetisches Bildes des Gauss'schen Potentials, als Methode zur Erforschung der Gesetze des Erdmagnetismus, *Terr. Magn. Atmos. Elect.*, 9, 105–112.

## Függelék

A földmágneses potenciálfüggvény jelenleg általánosan elfogadott Schmidt-féle kvázinormált alakjának második tagja és a földmágneses kvadrupólus paramétereinek között fennálló egyenletek szerint (pl. Willis 1982), a másodrendű Gauss-koefficiensek ( $g_2^0, g_2^1, h_2^1, g_2^2, h_2^2$ ) kifejezése az  $M_2^* = M_2 \sin \vartheta_1 \sin \vartheta_2$ ,  $y = \text{ctg} \vartheta_2$ ,  $\Delta = \lambda_1 - \lambda_2$  jelölésekkel a következők:

$$g_2^0 = 2M_2^*(xy - 0,5 \cos \Delta), \quad (\text{F.1})$$

$$g_2^1 = \sqrt{3}M_2^*(y \cos \lambda_1 + x \cos \lambda_2), \quad (\text{F.2})$$

$$h_2^1 = \sqrt{3}M_2^*(y \sin \lambda_1 + x \sin \lambda_2), \quad (\text{F.3})$$

$$g_2^2 = \sqrt{3}M_2^* \cos \sigma, \quad (\text{F.4})$$

$$h_2^2 = \sqrt{3}M_2^* \sin \sigma. \quad (\text{F.5})$$

Itt  $M_2 = (\mu_0/4\pi) \cdot (m_2/a^4)$  a földmágneses kvadrupólus erőssége,  $\mu_0$  a vákuum permeabilitása,  $m_2$  a földmágneses kvadrupólus momentuma és  $a$  a földgömb sugara. Továbbá, ha  $g_2^2 \neq 0$  és  $h_2^2 \neq 0$ , akkor  $\sigma = \lambda_1 + \lambda_2 = \text{arctg}(h_2^2/g_2^2)$  és  $M_2^* = \{(1/3)[(g_2^2)^2 + (h_2^2)^2]\}^{1/2}$  egyenletből az első három elegendő az ötből háromra redukált ismeretlen  $(x, y, \Delta)$  meghatározására.

# A mágneses tér évszázados változásának vizsgálata

## *Archeomágneses, paleomágneses és mágneses térmodelleken alapuló módszerek összehasonlítása*

VELKI M.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Eötvös Loránd Tudományegyetem, Geofizikai és Űrtudományi Tanszék  
H-1117 Budapest, Pázmány Péter stny. 1/C

<sup>2</sup>Paleomágneses Laboratórium, Magyar Bányászati és Földtani Szolgálat  
H-1145 Budapest, Columbus u. 17–23.  
E-mail: velki.mate1144@gmail.com

Korai obszervatóriumi mérések Londonból és Párizsból azt igazolták, hogy a Föld mágneses tere időben változik. Azokat a változásokat, amelyek periódusa néhány évszázad, évezred összefoglalóan évszázados változásnak nevezzük. Az obszervatóriumi mérések túl rövid időintervallumúnak bizonyultak az évszázados változás mértékének a vizsgálatához, ezért a témában új archeomágneses és paleomágneses kutatások jelentek meg. Az információs technológia fejlődésével később a vizsgálati módszerek a mágneses térmodellekkel egészültek ki. Jelen tanulmány néhány jellegzetes példával mutatja be a módszereket és azok eredményeit. Európa számos országára készült deklináció- és inklinációgörbe archeomágneses adatokból. Pontosan datált régészeti leletek körülbelül az elmúlt 10 000 évre visszamenőleg állnak rendelkezésre. Magyarországi archeomágneses adatok i.e. 300 és i.sz.1800 közötti időszakból származnak. A paleomágneses eredmények gyorsan kihűlt vulkáni kőzetek és tavi üledékek vizsgálatából származnak. Ezeknek a kőzeteknek a kora néhány száz évtől kezdve néhány millió évig terjed, de kevésbé pontosan datálhatók, mint a régészeti objektumok. A mágneses térmodellek közül jelen tanulmány az időfüggetlen TK03 modellt, valamint az időfüggő CALS10k.1b és SHA.DIF.14k modelleket vizsgálja, amelyeket archeomágneses és paleomágneses eredményekre illesztettek. A használt módszertől függetlenül elmondható, hogy azok az eredmények, melyek néhány száz év adataiból származnak, gyakran alulbecsülik az évszázados változásból adódó irányváltozások teljes szórását, mivel nem elég hosszú időtartamú az adatsor. Azok az eredmények, amelyek több millió éves kőzeteket vizsgáltak, általában túl nagy szórást mutatnak, köszönhetően az összetettebb mágnesezettségnek és az esetleges tektonikai mozgásoknak. Ugyanez elmondható a vizsgált időfüggetlen, statisztikai modellre (TK03), amely az elmúlt 5 millió év paleomágneses adataira lett illesztve, vagyis az előbb említett esetleges hibák ezt a modellt is terhelték. Ezek alapján azt mondhatjuk, hogy azok a mágneses eredmények közelíthetnek legjobban az évszázados változásból eredő irányszórást, amelyek néhány ezer–tízezer éves kőzetekből, régészeti objektumokból származnak. A vizsgált tanulmányok közül a legjobbnak tűnnek a magyarországi archeomágneses eredmények, a Kanári-szigetek paleomágneses adatai, a Balaton-felvidék normál mágnesezettségű csoportjának eredményei, valamint a SHA.DIF.14k időfüggő térmodell eredménye.

### **Velki, M.: The secular variation of the geomagnetic field. *Comparison of archeomagnetic, paleomagnetic and geomagnetic field-based methods***

Early direct magnetic measurements in London and Paris proved that the geomagnetic field is varying over time. Those variations with the period of hundreds or thousands years, called as secular variation. The observatory measurements had too short age interval for the examination of the extent of the secular variation and it led to new archeomagnetic and paleomagnetic researches in this topic. Due to the development of the information technology these methods were supplemented by the statistical field models. This study makes the comparison between the methods through some representative examples. Secular variation curves from archeomagnetic data were made to several European countries. Accurately dated archaeological objects cover the last 10000 years. In Hungary we have archeomagnetic data ranging in age from 300 BC to 1800 AD. The paleomagnetic directions were obtained from volcanic rocks and lacustrine deposits. These rocks are less accurately dated than the archaeological objects. The paleomagnetic data are in an age interval ranging from nowadays to a few million years. From the field models, this study uses the TK03 simplified statistical model, the CALS10k.1b and SHA.DIF.14k geomagnetic field models, which were fitted to archeomagnetic and paleomagnetic results. Irrespectively of the applied method those results with the age interval of just a few hundred years will often underestimate the full dispersion of the directions resulted by the secular variation. The reason can be the short age interval of these data. On the other hand, paleomagnetic data with the age interval of couple million years usually over-

estimate the variation of the magnetic directions because of the more complex magnetization and the possible tectonic movements. The simplified statistical model (TK03), which was fitted to paleomagnetic data of 5 million years, also overestimates the secular variation. We can say that magnetic data with the age interval of few thousand-myriad years seem to be the best estimation of the maximal dispersion caused by the secular variation. The most promising results were the Hungarian archeomagnetic data, the paleomagnetic data from the Canary Islands, the results from the normal polarity group of the Balaton Highland and the result of the SHA.DIF.14k geomagnetic field model.

Beérkezett: 2021. március 19.; elfogadva: 2021. június 16.

## Bevezetés

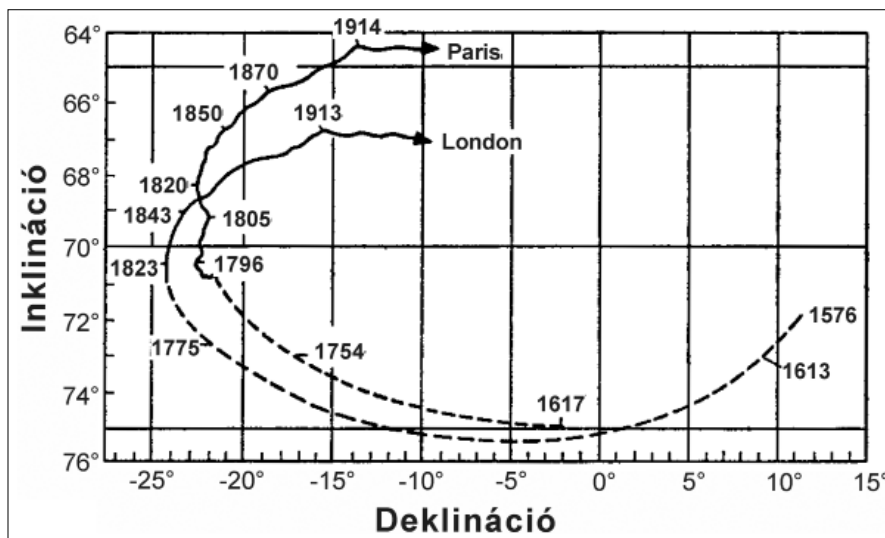
A Föld mágneses terének eredete a folyékony külső mag, amely nagyrészt mágnesezhető vasból és nikkeltől áll. Az itt működő magnetohidrodinamikai folyamatok a dinamo-elv alapján generálják a Föld mágneses terének legnagyobb részét. Az egyik legsikeresebb numerikus modell Glatzmaier és Roberts (1995a, 1995b) dinamómodellje volt, amely a mágneses tér pólusváltásait is modellezni tudta. Fontos megjegyezni, hogy a külső magon kívül a kéregben található kőzetek mágnesezettsége is mágneses teret generál, és hozzájárul a földi térhez.

A geomágneses tér időben és térben változik. A hosszabb időbeli változásokat leginkább a külső mag áramlásainak megváltozása okozza, különböző dinamikai és mágneses kölcsönhatásoknak köszönhetően. Az időbeli változások igen széles spektrumot ölelnek fel mind időtartam, mind amplitúdó szempontjából. Ezek közül az évszázados és évezredek időtartamú változásokat összefoglalóan szekuláris vagy évszázados változásnak nevezzük. A szekuláris változás a gyakorlatban azt eredményezi, hogy a mágneses

iránykomponensek egy tektonikailag stabil területen is bizonyos szórásán belül változni fognak. A mágneses tér évszázados változásának mértéke szoros kapcsolatban áll a földrajzi szélességgel (Cox 1970), amennyiben kis szélességen nagyobb, mint nagy szélességen.

A mágneses teret egy adott földrajzi helyen és időben a mágneses deklináció, inklináció és intenzitás jellemzi, ezek megváltozása jól reprezentálja az évszázados változást. A deklináció a földi mágneses tér adott helyen mérhető horizontális komponensének a földrajzi meridiánnal bezárt szöge, míg az inklináció a mágnesezettség irányának a vízszintessel bezárt szöge. A mágneses tér változásait leggyakrabban a mágneses deklinációt és inklinációt leíró görbékkel, valamint sztereografikus projekción ábrázoljuk.

A 16. században a mágneses obszervatóriumok voltak az első intézmények, amelyek a mágneses tér időbeli változását regisztrálták. A londoni és párizsi obszervatóriumok mérései szinte az 1600-as évektől kezdve folyamatosan szolgáltatnak deklináció- és inklinációértékeket (1. ábra). A technológia fejlődése egyre pontosabb és részletesebb képet mutató műszerek kifejlesztését tette lehetővé. Nap-



1. ábra A mágneses tér időbeli változása Londonban és Párizsban, obszervatóriumi mérések alapján, a 16. és 20. század között. (Malin, Bullard 1981 és Alexandrescu et al. 1996 alapján)

Figure 1 Secular variation curves from observatory measurements in London and Paris between the 16th and the 20th centuries (After Malin, Bullard 1981 and Alexandrescu et al. 1996)

jainkban az obszervatóriumok protonprecessziós magnetómetereket és variációs mérőműszereket használnak a mágneses tér változásainak időbeli követésére. Magyarországon 1768-ban Nagyszombaton kezdődtek a rendszeres földmágneses észlelések. Később Budán, majd Ógyalán állítottak fel mérőállomást, 1956 óta pedig a Tihanyi Obszervatóriumban folynak a geomágneses tér rendszeres mérései (Kovács et al., 2012).

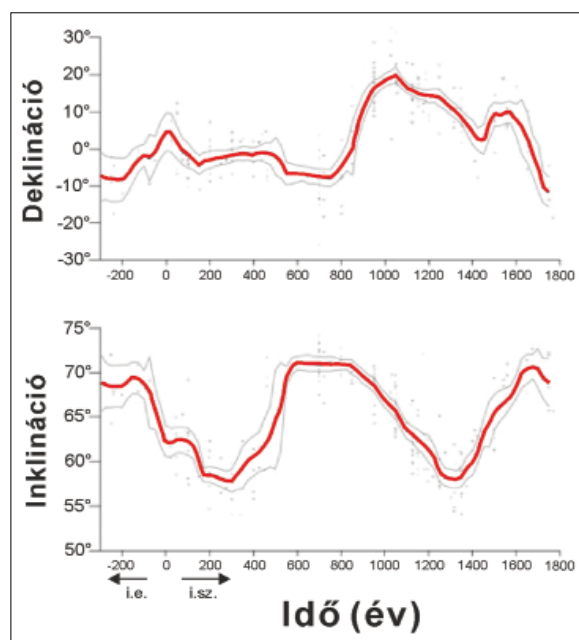
Az obszervatóriumi mérések túl rövid időintervallumot tudtak vizsgálni az évszázados változás mértékének a meghatározásához, ezért később archeomágneses (pl.: Márton 2010) és paleomágneses kutatások (pl.: Kissel et al. 2015) eredményei alapján próbálták megállapítani ezt a változást. A számítástechnika fejlődésével a mágneses térmodellek (pl.: Korte et al. 2011) is megjelentek e tudományterületen. Ez a tanulmány az archeomágneses, paleomágneses és térmodellekből származó eredményeket vizsgálja meg és hasonlítja össze. Az összehasonlíthatóság céljából az eredmények közös földrajzi helyre vannak átszámítva. A paleodeklinációból és a paleoinklinációból virtuális geomágneses pólus (VGP) számítható az adott földrajzi hely koordinátáinak ismeretében. A pólusok koordinátáit felhasználva tetszőleges helyre vonatkozó deklináció- és inklinációértékeket számíthatunk ki, azaz a világ bármely pontjáról származó adatokból megbecsülhetjük az évszázados változás szórását a kívánt területre. A tanulmány a Bükk hegység koordinátáit (É.sz.: 48°, K.h.: 20,3°) használja közös pontként, mivel egy aktuális OTKA-pályázat (NKFIH K-128625) a hegység tektonikai vizsgálatával is foglalkozik. Ebben a vonatkozásban fontos, hogy az évszázados változásból adódó mágneses irányváltozásokat el lehessen különíteni a tektonikai eredetűektől. A tanul-

mány messze nem teljes körű az irodalom felkutatása terén, csak néhány jellegzetes példát vizsgál az évszázados változás témájában.

## Archeomágneses és paleomágneses kutatási módszerek

Az archeomágneses kutatások tárgyát a különböző kiégetett agyagedények, kemencék vagy egyéb, magas hőmérsékleten készült régészeti leletek képezik, amelyekben található mágneses szemcsék a kihűlésük idején uralkodó mágneses tér irányát megőrizhetik. A lehűléskor „befagyott” mágneses szemcsék az aktuális mágneses északi meridián síkjába esnek. A leletek közül csak azok alkalmasak a teljes mágneses információ kinyerésére, amelyek a kiégetésük óta helyben maradtak. Körülbelül i.e. 10 000-tól állnak rendelkezésre elég pontosan datált régészeti objektumok.

A paleomágneses kutatások a kőzetek remanens mágnesezettségét használják fel, amely kőzetek akár több száz millió évek is lehetnek. A kőzetekben különböző folyamatok hatására alakulhatott ki remanens mágnesezettség (pl.: termoremanens mágnesezettség, ülepedési remanens mágnesezettség). Mind az archeomágneses, mind a paleomágneses módszer esetében a kutatás orientált terepi mintavétellel kezdődik, amelynek a segítségével később a minták mágneses irányai a földrajzi koordináta-rendszerbe átszámolhatók. Ezután a minták laboratóriumi feldolgozása következik. A mérések a remanens mágnesezettség természetes állapotának magnetómeteres mérésével kezdődnek. A műszer a minták mágnesezettségének  $x$ ,  $y$  és  $z$  kom-



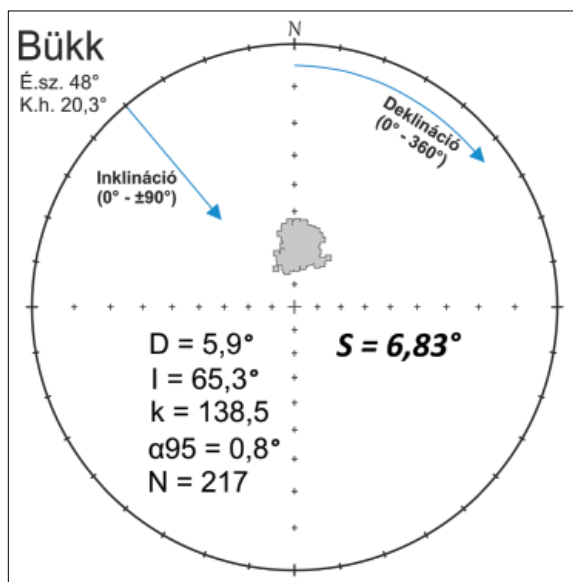
**2. ábra** | Archeomágneses eredményekre illesztett szekulárisváltozás-görbék Magyarország területére az elmúlt bő 2000 évre. A halvány körvonalak a görbék 95%-os pontosságát jelzik (Márton 2010, módosítva)

**Figure 2** | Secular variation curves fitted to archeomagnetic results for the past 2000 years at Hungary. Light outlines indicate the 95% confidence limits (Márton 2010, modified)

ponensét méri, majd ezekből számolunk mágneses intenzitást, deklinációt és inklinációt. Ezután az elsődleges mágnesezettség meghatározásához a mintákat lemágnesezzük. A lemágnesezésre leginkább elterjedt két módszer a váltóterű és a termikus lemágnesezés. A lemágnesezést lépésenként végezzük, és minden lépés után újra megmérjük a minta mágnesezettségét. Ezt az eljárást addig folytatjuk, amíg a minta intenzitása körülbelül tizedére csökken. Teljes lemágnesezés után a mágnesezettség irányának meghatározása következik a fő komponens analízisével (pl.: Kirschvink 1980). Az elsődleges komponensek meghatározása után mintacsoportonként középirányt számítunk (Fisher 1953), amely már statisztikailag értékelhető adat az adott kőzet és hely mágneses irányára nézve (pl.: Butler 1992).

*Az évszázados változás mértékének becslése: magyarországi archeomágneses eredmények*

Magyarországra vonatkozóan 217 régészeti objektum adataiból készült deklináció- és inklinációgörbe (Márton



**3. ábra** | A magyar archeomágneses eredmények az évszázados változásra sztereografikus projekción ábrázolva. Az adatok a Bükk koordinátáira lettek átszámítva (Márton, Márton 1996; Márton et al. 2019 alapján). *Jelmagyarázat:* *D* – mágneses deklináció; *I* – mágneses inklináció; *k* – párhuzamossági statisztikus paraméter (Fisher 1953);  $\alpha_{95}$  – 95%-os konfidenciakör sugara; *N* – a felhasznált régészeti leletek száma (archeomágneses eredményeknél) / mintacsoportok száma (paleomágneses eredményeknél) / generált irányok száma (mágneses térmodelleknél); *s* – irányok szórása szög távolságban

**Figure 3** Secular variation from Hungarian archeomagnetic results illustrated on stereographic projection. Data are computed to the coordinates of the Bükk Mountains (N 48°, E 20,3°) (modified Márton, Márton 1996; Márton et al. 2019). *Key:* *D* – magnetic declination; *I* – magnetic inclination; *k* – precision parameter (Fisher 1953);  $\alpha_{95}$  – radius of the 95% confidence limit; *N* – the number of applied archeological objects (archeomagnetic studies) / the number of sampling sites (paleomagnetic studies) / the number of generated directions (field models); *s* – angular standard deviation

2010) i.e. 300-ig visszamenőleg (2. ábra), amely globális viszonylatban is igen nagy adatrendszer. Az adatok a Bükk koordinátáira lettek átszámítva virtuális geomágneses pólusok segítségével. Az eredmény sztereografikus projekción a 3. ábrán látható. A többi módszer esetében is sztereografikus projekción lettek ábrázolva az eredmények, mivel ebben az ábrázolási módban szemléletesebben látszik az irányok szórása.

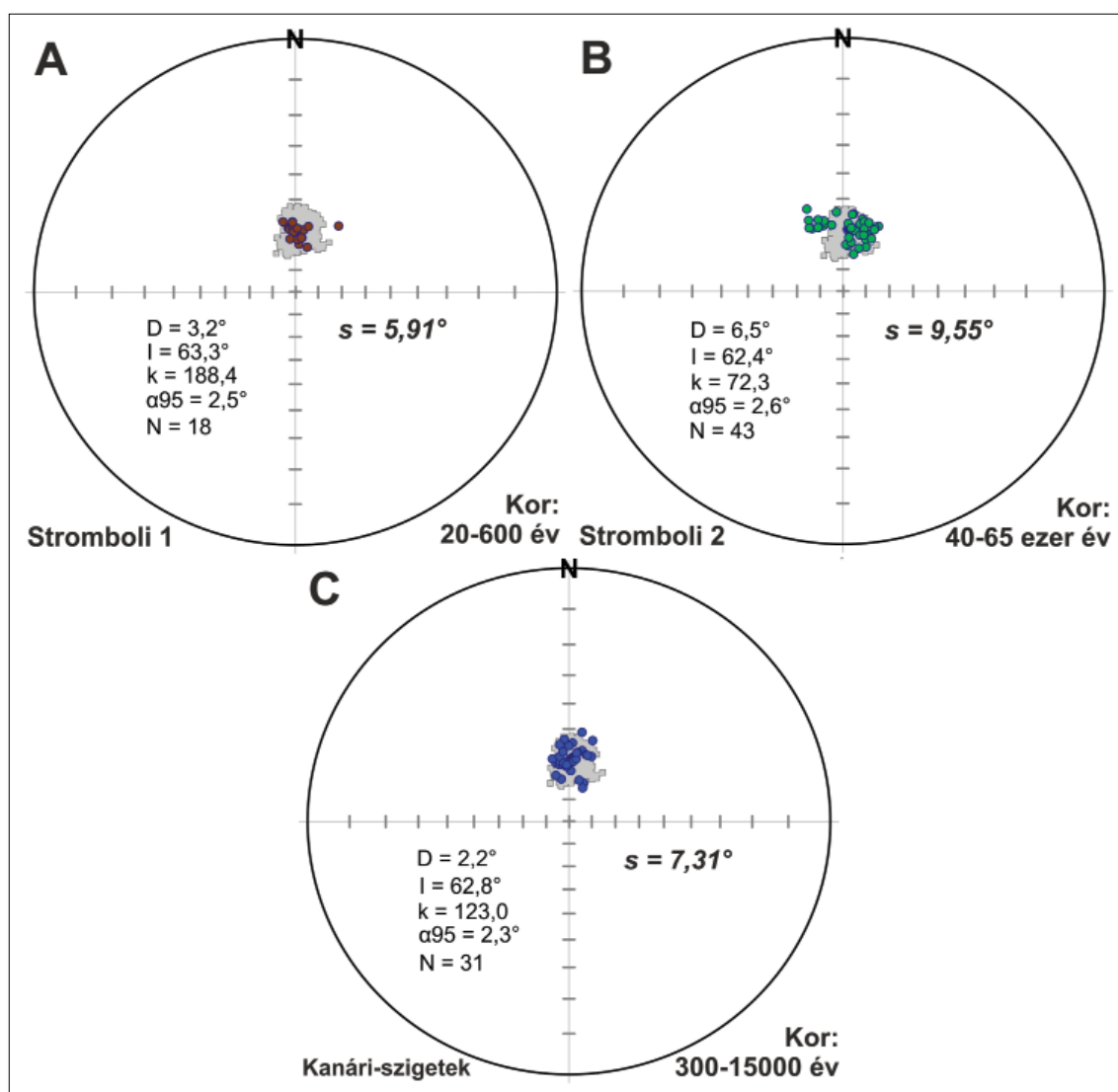
*Az évszázados változás mértékének becslése: Paleomágneses eredmények*

Az évszázados változás mértékének meghatározására olyan kőzetek lehetnek a legalkalmasabbak, amelyek rövid idő alatt mágneseződhetnek (pl. lávaárak, telérek), nem mállottak szét, és tektonikailag stabil területekről származnak. A témában készült paleomágneses tanulmányok többsége vulkáni kiömlési kőzeteket vizsgált. Ezek mellett tavi üledékek paleomágneses vizsgálatával is próbálták a szekuláris változás mértékét megbecsülni (pl.: Creer et al. 1983; Turner, Thompson 1981). Hátrányuk a vulkáni kőzetekkel szemben, hogy üledékes kőzetekben gyakori az utólagos mágnesezettség a diagenetikus folyamatok hatására. Jelen tanulmányban néhány jellegzetes példát mutatunk be az évszázados változás vizsgálatát célzó paleomágneses kutatásokból. Az összehasonlíthatóságához a különböző helyről származó adatok minden esetben a Bükk koordinátáira vannak átszámítva, valamint az ábrákon látszik az archeomágneses eredményekből származó körvonal.

Az első eredmény sor a Stromboli vulkán kitöréstörténetét vizsgáló cikkből származik (Speranza et al. 2004), amelyben 20–600 éves lávákat vizsgáltak. Adataikból a Bükk hegységre számított szekuláris variáció mértéke lényegesen kisebb, mint az archeomágneses irányoké (4A. ábra).

A Stromboli idősebb kőzeteiről is született tanulmány az évszázados változás témájában (Quidelleur et al. 2005). K-Ar-kormeghatározással a vizsgált vulkanitok kora kb. 40–65 ezer év. Az irányok nagy többsége az archeomágneses adatok által kijelölt mezőbe esik (4B. ábra), de vannak irányok, melyek nyugatabbra lévő deklinációval rendelkeznek, ezek a kőzetek legfiatalabb csoportjából származnak. Ez a csoport nem pontosan azt a területet képviseli, mint a keleties deklinációt mutató irányok, ezért felvetődik a tektonika befolyásoló szerepe a területen.

A következő eredmény a Kanári-szigetektől származik (Kissel et al. 2015). A vizsgált lávafolyások kora 300–15 000 év radiokarbon-módszerrel becsülve. Ebben az időintervallumban szinte minden évezredre esik mintacsoport, így az adatsor jól reprezentálhatja az évszázados változást (4C. ábra). A szigetcsoporthoz adatai nagyon hasonló szórást mutatnak, mint a magyar archeomágneses eredmények. Az 5. ábrán látható összehasonlítás a Kanári-szigeteken mért irányokat mutatja az eredeti földrajzi helyen, és a Bükk koordinátáira átszámolva. A szórás lényegesen kisebb



4. ábra | A szekuláris változás mértéke vulkáni kőzetek paleomágneses eredményeiből a Bükk koordinátáira (Jelkulcs: 3. ábra)

Figure 4 | Secular variation from paleomagnetic results of volcanic rocks at the coordinates of the Bükk (Key: see Fig. 3)

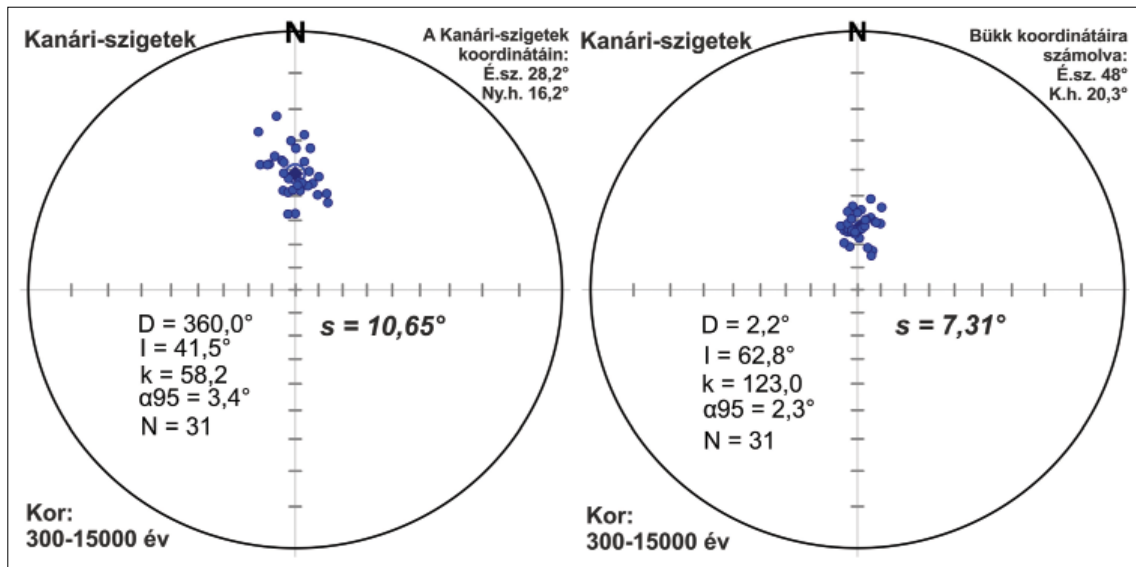
az átszámítás után, ami a matematikai transzformációnak köszönhető.

Idősebb vulkáni területeken, ahol ráadásul normál és reverz polaritású képződmények is előfordulnak, az évszázados változás mellett más tényezők is szerepet játszhatnak az irányszórásban. Erre jó példa a Balaton-felvidéki bazaltok és a Keleti-Kárpátok Hargita vulkáni területe.

A Balaton-felvidék bazaltjait képviselő irányok Márton E. 1985-ös munkája nyomán a 6. ábrán láthatók (6A. ábra). A bazaltok kora K-Ar-kormeghatározásból 2,8 és 6 millió év között változik. Ebben az időintervallumban több mágneses pólusátfordulás is történt, ezért a paleomágneses irányok között van olyan, amelyik mágnesesen instabil időszakban keletkezhetett. Ezek az eredmények nem tartoznak az évszázados változáshoz, ezért igyekszünk kiszűrni ezeket. Az egyik eljárás, amely ebben segítségünkre van, hogy nem vesszük figyelembe a továbbiakban azokat az irányokat, melyek számolt pólusai minimum 45°-kal eltértek az összes pólus középirányától (pl.: Watkins 1973).

Ezt a Balaton-felvidék esetében nem iteratív módon, hanem 1 lépésben alkalmaztuk. Ennek eredményeképp 3 mintacsoportot nem vettünk figyelembe a továbbiakban. A több millió éves vulkáni kőzetek között vannak reverz és normál paleomágneses irányral rendelkező csoportok, amelyek az ábrán különböző színnel vannak megjelenítve. Az ábrázolás során minden reverz irány a normál megfelelőjére lett átfordítva. A Balaton-felvidékről 13 db normál irány és 22 db reverz irány áll rendelkezésre. Látható, hogy a reverz irányok szórása meghaladja a normál irányokét. Mivel az adatok olyan kőzeteket képviselnek, amelyek nagy valószínűséggel nem mozdultak ki eredeti helyzetükből, a reverz polaritású adatok nagyobb szórása arra utal, hogy egy esetleges normál polaritású és tökéletesen el nem távolítható utólagos mágnesezettség nagyobb szórást okozott, mintha a normál irányú elsődleges mágnesezettséget fedné ugyanez az overprint.

A Kárpátok Hargita vulkáni egységéből származó példában (Panaiotu et al. 2012) (6B. ábra) a magmás kőzetek



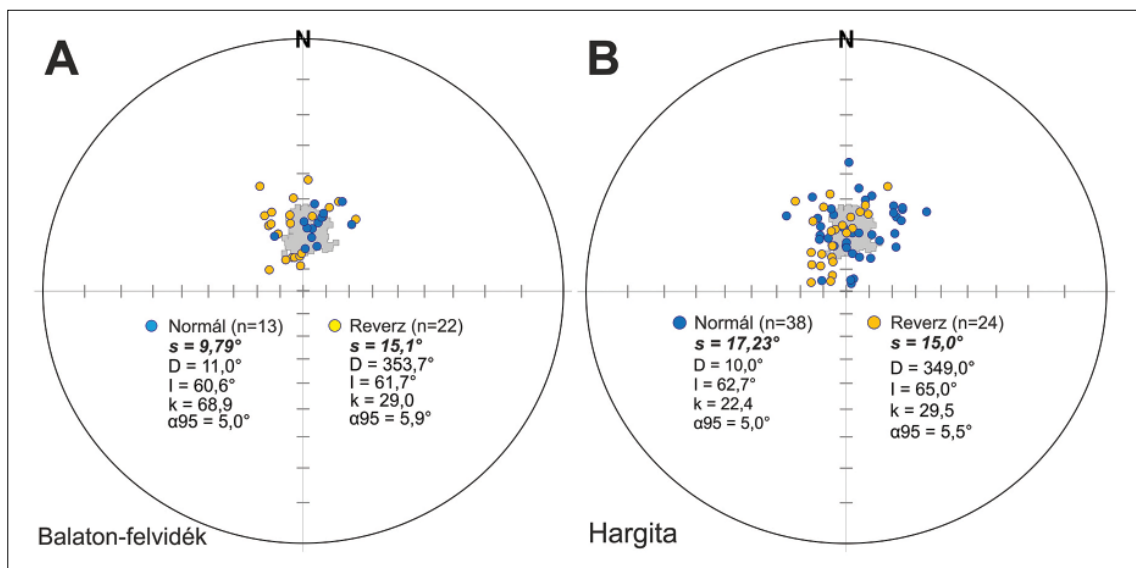
5. ábra A Kanári-szigetek paleomágneses eredményei (Kissel et al. 2015) a hely koordinátáin, valamint a Bükk területére átszámolva. Az évszázados változásból adódó irányászórás lényegesen kisebb a Bükk területére átszámítva (Jelkulcs: 3. ábra)

Figure 5 Paleomagnetic results from the Canary Islands at the coordinates of the locality compared to the converted results at the coordinates of the Bükk. The dispersion from secular variation is much lower converted to the area of the Bükk (Key: see Fig. 3)

korát szintén K-Ar-módszerrel becsülték. A legfiatalabb kőzetek körülbelül félmillió, míg a legidősebbek körülbelül 5 millió évesek. Az előző csoporthoz hasonlóan több pólusátfordulás is esik ebbe az időintervallumba, ezért az irányok között valószínűsíthető olyan, amelyek instabil időszakokra esik. Itt hat olyan mintacsoport volt, amelyek pólusainak iránya minimum 45°-kal eltért a pólusok középirányától. Panaiotu et al. (2012) tanulmányában leírják, hogy a TK03-as szekuláris változást leíró modellnek (Tauxe, Kent 2004) megfelelnek az eredmények, azonban az adatok nagyobb szórást adnak az évszázados

változásra, mint ami ezen a szélességen várható egy paleomágneses adatbázis alapján (Johnson et al. 2008). A 38 normál és 24 reverz irány összehasonlításából az látszik, hogy itt lényeges különbség nincs a két csoport szórása között, valószínűleg a tektonika vagy a mágnesesen instabil időszakok befolyása játszik fontos szerepet a kép kialakításában.

Argentína (Creer et al. 1983) és Nagy-Britannia (Turner, Thompson 1981) tavi üledékeinek paleomágneses kutatásai során is vizsgálták az évszázados változást. Az argentin minták három tó üledékeiből származtak, me-



6. ábra Szekuláris változás a Balaton-felvidék és a Hargita normál és reverz csoportjainak irányáiból a Bükk koordinátájára számolva. Minden irány a normál polaritással van ábrázolva (Jelkulcs: 3. ábra)

Figure 6 Secular variation from the normal and reversed polarity groups of the Balaton Highland and the Hargita Mountains at the coordinates of the Bükk. All of the directions are plotted with normal polarity (Key: see Fig. 3)

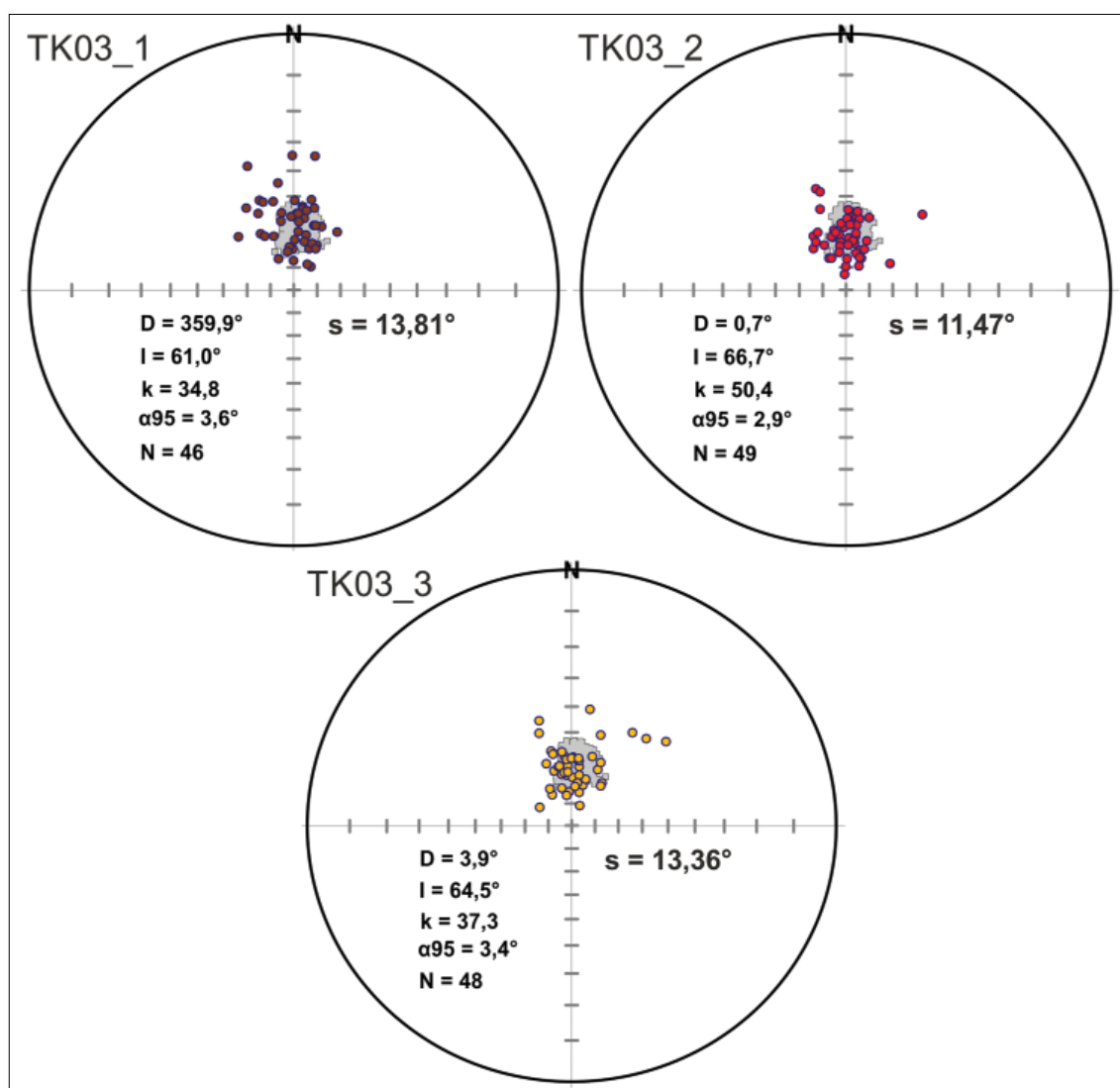
**1. táblázat** | A tavi üledékek eredményeiből becsült maximális eltérések az évszázados változásra  
**Table 1** | The results of lacustrine deposits. Estimated extremes for the secular variation

	Földrajzi koordináták	Deklinációgörbék szélsőértékei	Inklinációgörbék szélsőértékei
Argentína	D.sz. 42° Ny.h. 72°	-30° és +28°	-68° és -40°
Nagy-Britannia	É.sz. 54,5° Ny.h. 4°	-8° és +6° *	-8° és +8° *

\* A nagy-britanniai eredményeknél a 0 érték a magminták közepes deklinációja és inklinációja  
 Zero values at the British results are the core samples' mean declination and inclination

lyek kora 0 és 6000 év közötti. Részletes paleomágneses adat nem állt rendelkezésre, így a Bükk koordinátáira való átszámítás nem volt lehetséges ebben az esetben. A deklináció- és inklinációgörbék szélsőértékeiből tudjuk az adott szélességre becsülni az évszázados változás mértékét (1. táblázat). A brit minták kora radiokarbon kor-meghatározással 0 és 10 000 év között változik, és az adatokból erre az időszakra készült évszázados változást mu-

tató görbe. Az előzőhöz hasonlóan itt is szélsőértékbecsléssel láthatjuk a szekuláris változás mértékét (1. táblázat). Az összehasonlító táblázatban az is látszik, hogy nagyobb szélességen kisebb a különbség a szélsőértékekben. Ezekből az adatokból az is levonható, hogy a Bükk szélességére várt szélsőértékek nem haladják meg az archeomágneses eredményekét, azonban figyelembe kell venni, hogy ez a becslés csak korlátozottan hasonlítható



**7. ábra** | A TK03 időfüggetlen modell által számolt évszázados változás a Bükkre három futtatási kísérletből (Jelkulcs: 3. ábra)

**Figure 7** | Three realizations of the TK03 simplified statistical model for the secular variation at the coordinates of the Bükk (Key: see Fig. 3)



össze a többi mérés eredményeivel, például a különböző korlefedettség miatt.

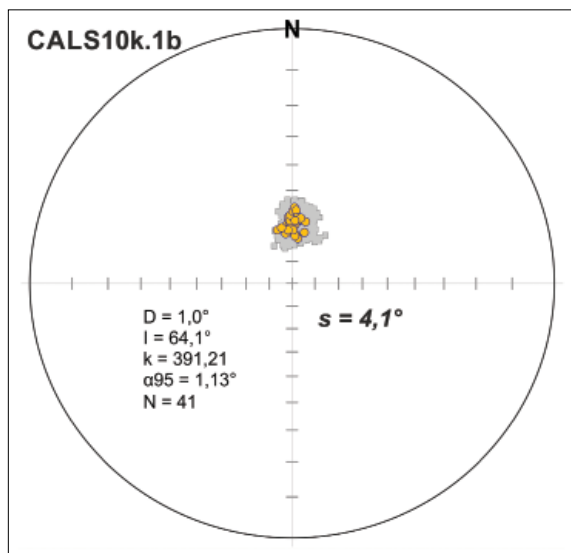
### Mágneses térmodellek

Az utóbbi évtizedekben statisztikus módszerrel is megpróbálták leírni a mágneses tér évszázados változásait. Ezekben a modellekben a Föld mágneses terét leíró Laplace-egyenletben szereplő Gauss-koefficienseknek definiálják a nagyságát és a szórását (Tauxe, Kent 2004). Léteznek időfüggő és időtől független térmodellek, melyeket paleomágneses és archeomágneses eredményekhez illesztettek. Az időfüggő azt jelenti, hogy a modellt a kívánt korra adja meg a mágneses tér komponenseit, míg az időfüggetlen az évszázados változásból eredeztethető irányszórást kortól függetlenül becsüli meg.

Ez a tanulmány 3 példát vizsgál ezek közül. Az első a TK03 jelzésű időfüggetlen modellt (Tauxe, Kent 2004), amelyben az évszázados változás mértékét a modellben definiált szórás adja. Ezt a modellt az elmúlt 5 millió év paleomágneses adataira illesztették, így a modell tartalmazhatja mindazokat a hatásokat, amelyekkel a több millió éves paleomágneses adatok rendelkeznek. A modell python-kódja a „Pmagpy” (Tauxe et al. 2016) nevű, ingyenesen elérhető szoftvercsomag része. A modell gömbharmonikus sorfejtéssel generál mágneses irányokat úgy, hogy a sorfejtés együtthatóinak értékeit együtthatónként különböző szórású és átlagértékű normálosztás mintájából származtatja. Ebből következik, hogy a modellek többszöri futtatásai egy adott pontra vonatkozóan különböző irányokat eredményeznek oly módon, hogy a kapott irányok statisztikai szórása a vizsgált pont szélességén ér-

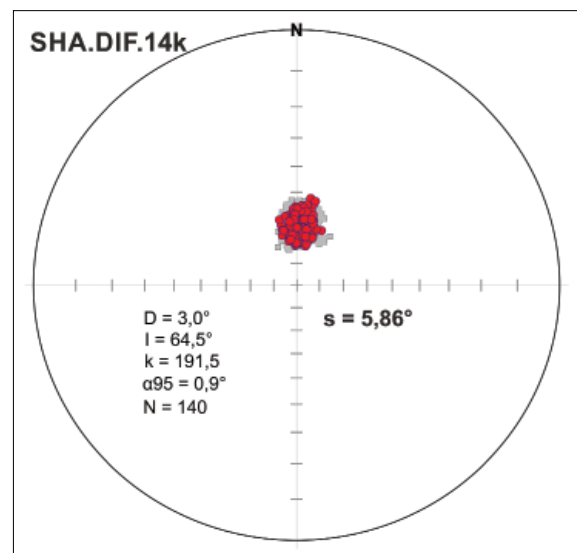
vényes szekuláris változás mértékéhez illeszkedjen. A szekuláris változást mindig az adott szélességre vonatkozó valószínű mérési eredmények eloszlásának szórása definiálja. Bemeneti paraméterei a földrajzi szélesség, a mágneses deklináció, a generálandó irányok száma, valamint a kvadrupól és oktapól tér súlya a dipólushoz képest. Három futtatás eredménye a 7. ábrán látható. A futtatásokban bemenő paraméterként a Bükk koordinátáit adtuk meg és a dipól térnél magasabb rendű multipól momentumok átlagértékét nullának állítottuk be. Ezután a korábbiakhoz hasonlóan a 45°-nál nagyobb eltérésű irányok kivágásra kerültek. A szórások a *cutoff* után is meglehetősen nagyok ( $s > 11^\circ$ ), de nagyjából megegyezik a Hargita és a Balatonfelvidék paleomágneses adatainak szórásával, ami nem meglepő, hiszen hasonló korú eredményekhez illesztették a modellt.

A következő modell az időfüggő CALS10k.1b (Korte et al. 2011), amely paleomágneses és archeomágneses eredményekre lett illesztve. A felhasznált adatok nagy része az északi félgömből származik, így a modell is itt pontosabb. A CALS10k.1b 2000 db modell átlagaként készült, optimális illesztéssel. A paramétereknél megadhatjuk az évet, a terület tengerszint feletti magasságát, földrajzi szélességét, valamint hosszúságát. A modell tehát lehetővé teszi a mágneses tér irányának becsülését a Föld bármely pontjára i.e. 8000 és i.sz. 2000 között. Bemeneti adatnak a Bükk koordinátái lettek megadva, valamint a korok 200 évenként i.e. 6000-tól i.sz. 2000-ig (8. ábra). Ez a modell sokkal kisebb szórást mutat az átlagolások miatt, mint az archeomágneses eredmények. Ezek alapján a modell eredményei nem érik el az évszázados változást jellemző szórás maximumát.



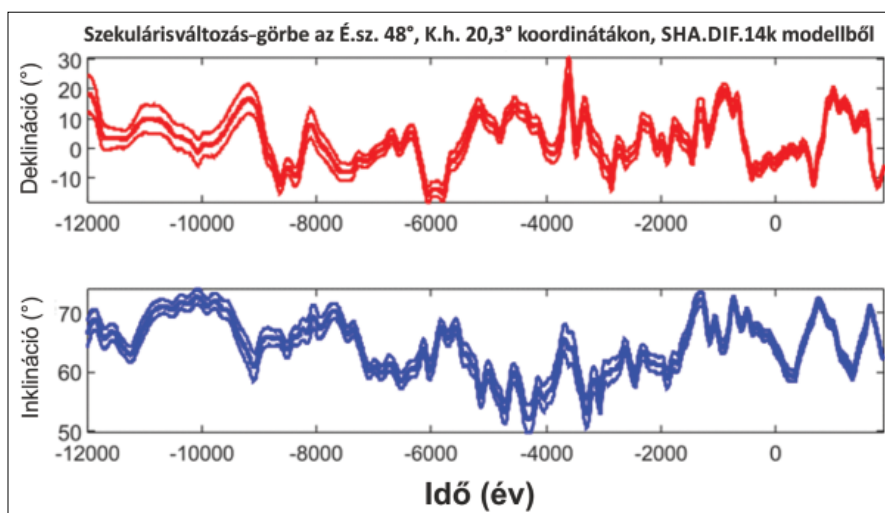
8. ábra | A CALS10k.1b időfüggő modelltől kapott eredmények az évszázados változásra az elmúlt 8000 évre a Bükk koordinátáiban (Jelkulcs: 3. ábra)

Figure 8 | Results of the CALS10k.1b geomagnetic field model for the secular variation for the past 8000 years at the coordinates of the Bükk (Key: see Fig. 3)



9. ábra | Az SHA.DIF.14k időfüggő modell eredményei a Bükk koordinátáira, az elmúlt 14000 évre (Jelkulcs: 3. ábra)

Figure 9 | Results of the SHA.DIF.14k geomagnetic field model for the past 14000 years at the coordinates of the Bükk (Key: see Fig. 3)



**10. ábra** Az SHA.DIF.14k modellből kapott deklináció és inklináció görbe a Bükk koordinátáira, az elmúlt 14000 évre. A vékony vonalak az adatok 95%-os pontosságát jelzik

**Figure 10** Declination and inclination curves from the SHA.DIF.14k model for the past 14000 years at the coordinates of the Bükk. The narrow lines indicate the 95% confidence limits

Egy újabb időfüggő modell az SHA.DIF.14k (Pavón-Carrasco et al. 2014), amely jobb térbeli és időbeli felbontással rendelkezik, mint az előbb említett átlagolt modell. A modellt archeomágneses eredményekre és lávafolyások paleomágneses eredményeire illesztették. A felhasznált adatok nagy része itt is az északi félgömből származik. A modell az elmúlt 14000 évre érvényes, és bemeneti adatai szintén a földrajzi szélesség, hosszúság, valamint a kívánt kor. A futtatás 100 éves felosztásközzel ismét a Bükk koordinátáira történt (9. ábra), és a sztereografikus projekción kívül a szélsőértékeket jól szemléltető deklináció- és inklinációgörbéket is létrehoz a modell (10. ábra). Az irányok eloszlása nagyon hasonlít az archeomágneses eredményekből kapott körvonalra, és a két adatsor szórása is hasonló (archeomágneses adatok szórása:  $s = 6,87^\circ$ ).

## Összefoglalás

A legtöbb szerző egyetért abban (pl.: Quidelleur et al. 2005), hogy az archeomágneses eredmények megfelelő felbontásúak az évszázados változás vizsgálat céljára, ezért elsősorban ezzel célszerű a többi eredményt összevetni.

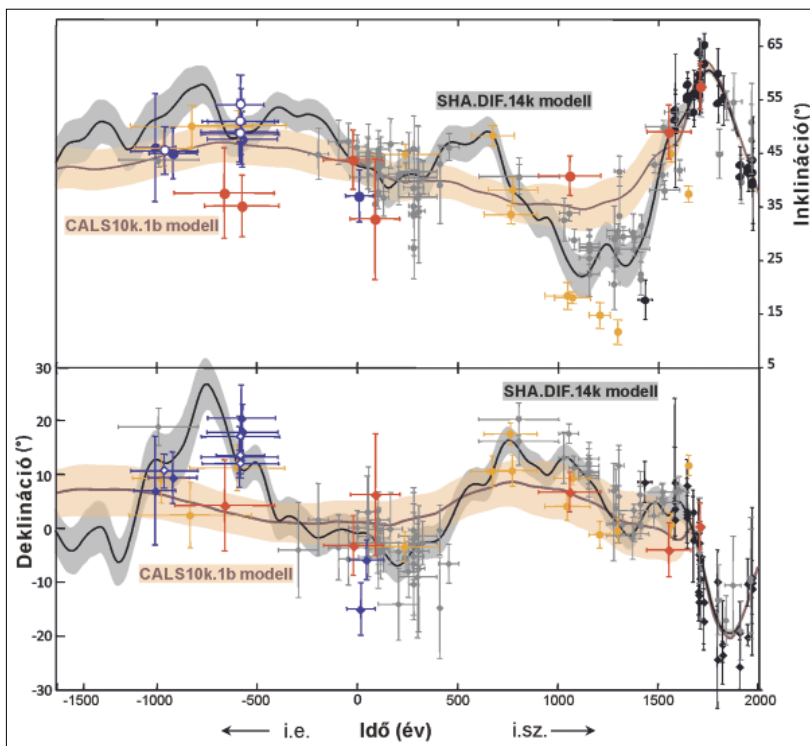
Az archeomágneses eredmények hátránya lehet a rövidebb időtartam, amelyből a vizsgált leletek származnak. Azok a paleomágneses eredmények, amelyek néhány száz éves kőzeteket vizsgáltak, alulbecsülték az évszázados változásból adódó irányszórást. A sztereografikus projekciók, valamint a szórásértékek is azt mutatják, hogy a paleomágneses eredmények közül a néhány tízezer évet átölelő korú kőzetek adatai közelítik legjobban az archeomágneses eredményeket. Több millió éves kőzetek irányai ellenben túl nagy szórást mutatnak, a mágneses irányt befolyásoló tényezőknek köszönhetően (pl.: 6. ábra, Hargita). Ez különösen igaz a reverz időszakokból származó kőzetekre, mivel ezekben az esetlegesen megmaradt utólagos normál komponensek nagyobb szórást okozhatnak az irányokban. A Balaton-felvidék esetében például csak a normál mágnesezettségű csoportot figyelembe véve, az archeomágneses adatokhoz hasonló szórást kapunk, míg a reverz mágnesezettséggel rendelkező irányok szórása lényegesen nagyobb.

A mágneses térmodellek esetében az időfüggetlen (TK03) modell hasonló szórást mutat, mint a több millió éves kőzetek paleomágneses eredményei. Ez a szórás valószínűleg túlbecsüli az évszázados változás mértékét,

**2. táblázat** Összefoglaló táblázat a legjobbnak vélt eredményekről (Jelkulcs: 3. ábra)

**Table 2** Summary table with the most promising results (Key: see Fig. 3)

Felhasznált adat	Kor (év)	$N$	$D$ (°)	$I$ (°)	$k$	$s$ (°)
Magyarországi archeomágneses eredmények (2. ábra)	200–2300	217	5,9	65,3	138,5	6,9
Kanári-szigetek paleomágneses eredményei (3. ábra, Kanári-szigetek)	300–15000	31	2,2	62,8	123,0	7,3
A Balaton-felvidék normál mágnesezettségű csoportjának paleomágneses eredményei (5. ábra, Balaton-felvidék)	2,8–6 millió	13	11	60,6	68,9	9,8
SHA.DIF.14k időfüggő térmodell eredményei (9. ábra)	0–14000	140	3	64,5	191,5	5,9



**11. ábra** | A mágneses tér időbeli változása: Paleomágneses adatok a Kanári-szigetokről (kék, piros és fekete pontok), valamint a szigetcsoport 2000 km-es körzetéből (sárga és szürke pontok). A barna és fekete vonalak a CAL510k.1b (Korte et al. 2011) és SHA.DIF.14k (Pavón-Carrasco et al. 2014) időfüggő térmodellek eredményei a Kanári-szigetek koordinátáira (lat: 28° N; lon: 344° E). Ezek a modellek globális archeomágneses és paleomágneses adatrendszerre lettek illesztve. Az évszázados változásból adódó iránykülönbségek ezen a szélességen lényegesen nagyobbak, mint a Bükk szélességén (5. ábra). A paleomágneses adatok és a modellek pontatlanságát jelzik a vízszintes, függőleges hibásávok, valamint a halvány háttér (módosítva: Kissel et al. 2015) Londonban és Párizsban, obszervatóriumi mérések alapján, a 16. és 20. század között. (Malin, Bullard 1981 és Alexandrescu et al. 1996 alapján)

**Figure 11** | Paleomagnetic data obtained from the Canary Islands (blue, red and black dots) and from different regions within a 2000 km radius around the islands (yellow and grey dots). The brown and black curves are predictions for the Canary Islands (lat: 28° N; lon: 344° E) of models CAL510k.1b (Korte et al. 2011) and SHA.DIF.14k (Pavón-Carrasco et al. 2014) which were fitted to global paleomagnetic and archeomagnetic databases. The dispersion of the magnetic directions caused by the secular variation is significantly bigger than at the latitude of the Bükk (Fig. 5). The horizontal and vertical bars and the light background show the precision of the data. (Kissel et al. 2015, modified)

ezek az eredmények tektonikai mozgásokkal, valamint instabil mágneses időszakokkal terheltek lehetnek. Az időfüggő CAL510k.1b modell jobban közelíti az archeomágneses adatrendszer szórását, azonban a modell túlsimított az évszázados változás teljes szórásának becsléséhez. A 11. ábrán ennek a modellnek az összehasonlítása szerepel az SHA.DIF.14k újabb időfüggő modellel. Látszik, hogy a paleomágneses adatok alapján több olyan deklináció- és inklinációváltozás van, amelyet nem követ a CAL510k.1b modell, míg az újabb modell megteszi ezt. Az SHA.DIF.14k a magyar archeomágneses adatokra is kitűnően illeszkedik.

A mágneses tér évszázados változásának a mértékét a Bükk területére a vizsgált adatok közül a Kanári-szigetek és a Balaton-felvidék normál irányú csoportjának paleomágneses eredményei; valamint az SHA.DIF.14k időfüggő modell közelítik a legjobban (2. táblázat). Ezeknek az eredményeknek a szórása körülbelül 6 és 10 fok között van.

**Köszönetnyilvánítás**

Megköszönöm dr. Mártonné dr. Szalay Emőkének a támogatását és kritikáit, amelyek nélkül a tanulmány nem

jöhetett volna létre. Köszönöm dr. Kovács Péternek a tanácsait és az irodalomgyűjtésben nyújtott segítségét. Köszönöm továbbá Szilágyi Zsanettnek a fogalmazási és stilisztikai segítséget, valamint Pásztor Marcellnek a python kódok kezelésében nyújtott nélkülözhetetlen segítségét.

A tanulmány az OTKA NKFIH K-F128625 számú projektének keretein belül készült.

**A tanulmány szerzője**

Velki Máté

**Hivatkozások**

Alexandrescu M., Courtillot V., Le Mouél J. L. (1996): Geomagnetic field direction in Paris since the mid-sixteenth century. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 98, 321–360. DOI: 10.1016/s0031-9201(96)03194-9.

Butler R. F. (1992): *Paleomagnetism: Magnetic Domains to Geologic Terranes*. Blackwell Scientific Publications, Boston, p. 319. DOI: 10.5860/choice.29-5708.

Cox A. (1970): Latitude dependence of the angular dispersion of the geomagnetic field. *Geophysical Journal of the Royal Astro-*

- nomical Society, 20, 253–269. DOI: 10.1111/j.1365-246X.1970.tb06069.x.
- Creer K. M., Valencio D. A., Sinito A. M., Tucholka P., Vilas J. F. A. (1983): Geomagnetic secular variations 0–14 000 yr bp as recorded by lake sediments from Argentina. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 74/1, 199–221. DOI: 10.1111/j.1365-246X.1983.tb01877.x.
- Fisher R. (1953): Dispersion on a sphere. In: *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 217, 295–305. DOI: 10.1098/rspa.1953.0064.
- Glatzmaier G. A., Roberts P. H. (1995a): A three-dimensional convective dynamo solution with rotating and finitely conducting inner core and mantle. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 91, 63–75. DOI: 10.1016/0031-9201(95)03049-3.
- Glatzmaier G. A., Roberts P. H. (1995b): A three-dimensional self-consistent computer simulation of a geomagnetic field reversal. *Nature*, 377, 203–209. DOI: 10.1038/377203a0.
- Johnson C. L., Constable C.G., Tauxe L., Staudigel H., Barendregt R., Brown L.L., Coe R.S., Lauer P., Stone D.B., Mejia V., Opdyke N.D., Singer B.S. (2008): Recent investigations of the 0–5 Ma geomagnetic field recorded by lava flows. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 9/4. DOI: 10.1029/2007GC001696.
- Kirschvink J. L. (1980): The least-squares line and plane and the analysis of palaeomagnetic data. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 62, 699–718. DOI: 10.1111/j.1365-246X.1980.tb02601.x.
- Kissel C., Rodriguez-Gonzalez A., Laj C., Perez-Torrado F., Caracado J. C. (2015): Paleosecular variation of the earth magnetic field at the Canary Islands over the last 15 ka. *Earth and Planetary Science Letters*, 412, 52–60. DOI: 10.1016/j.epsl.2014.12.031.
- Korte M., Constable C., Donadini F., Holme R. (2011): Reconstructing the Holocene geomagnetic field. *Earth and Planetary Science Letters*, 312, 497–505. DOI: 10.1016/j.epsl.2011.10.031.
- Kovács P., Csontos A., Heilig B., Hegymegi L., Merényi L., Vadász G., Koppán A. (2012): Földmágnesség: A Tihanyi Geofizikai Observatórium. *Magyar Geofizika*, 53, 3, 191–203.
- Malin S. R. C., Bullard E. (1981): The direction of the Earth's magnetic field at London, 1570–1975. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*. DOI: 10.1098/rsta.1981.0026.
- Márton E. (1985): Tying the basalts from the Transdanubian Central Mountains (Hungary) to the standard polarity time scale. *Problems of the Neogene and Quaternary in the Carpathian Basin, Akadémiai Kiadó*, pp. 99–108.
- Márton E., Márton P. (1996): Large scale rotations in North Hungary during the Neogene as indicated by palaeomagnetic data. In: Morris, A., Tarling, D.H. (eds), *Palaeomagnetism and Tectonics of the Mediterranean Region*, Geological Society Special Publication No. 105, 153–173.
- Márton E., Karátson D., Bíró T., Hencz M. (2019): Észak-magyarországi miocén ignimbritek korrelációja paleomágnesezés vezérszintek és polaritás alapján: új eredmények a Mátra és a Bükkalja területéről. Előadás. Magyar Tudományos Akadémia Földtudományok Osztálya, Természetföldrajzi Tudományos Bizottság. Új vulkanológiai, geokémiai és geomorfológiai eredmények az NKFIH-OTKA K115472. és K128122. számú kutatási pályázatából. MTA Székház, 2019. január 16. Budapest.
- Márton P. (2010): Two thousand years of geomagnetic field direction over central Europe revealed by indirect measurements. *Geophysical Journal International*, 181, 261–268. DOI: 10.1111/j.1365-246X.2010.04507.x.
- Panaiotu C. G., Vişan M., Ţugui A., Seghedi I., Panaiotu A. G. (2012): Palaeomagnetism of the South Harghita volcanic rocks of the East Carpathians: Implications for tectonic rotations and palaeosecular variation in the past 5 Ma. *Geophysical Journal International*, 189, 369–382. DOI: 10.1111/j.1365-246X.2012.05394.x.
- Pavón-Carrasco F. J., De Santis A., Osete M. L., Torta J. M. (2014): A geomagnetic field model for the Holocene based on archaeomagnetic and lava flow data. *Earth and Planetary Science Letters*, 388, 98–109. DOI: 10.1016/j.epsl.2013.11.046.
- Quidelleur X., Gillot P-Y., Filoche G., Lefèvre J-C. (2005): Fast geochemical changes and rapid lava accumulation at Stromboli island (Italy) inferred from K-Ar dating and paleomagnetic variations recorded at 60 and 40 ka. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 141, 177–193. DOI: 10.1016/j.jvolgeores.2004.10.004.
- Speranza F., Pompilio M., Sagnotti L. (2004): Paleomagnetism of spatter lavas from Stromboli volcano (Aeolian Islands, Italy): Implications for the age of paroxysmal eruptions. *Geophysical Research Letters*, 31, L02607. DOI: 10.1029/2003GL018944.
- Tauxe L., Kent D. V. (2004): A simplified statistical model for the geomagnetic field and the detection of shallow bias in paleomagnetic inclinations: Was the ancient magnetic field dipolar? in *Geophysical Monograph Series*, 145, 101–115. DOI: 10.1029/145GM08.
- Tauxe L., Shaar R., Jonestrask L., Swanson-Hysell N. L., Minnett R., Koppers A. A. P., Constable C. G., Jarboe N., Gaastra K., Fairchild L. (2016): PmagPy: Software package for paleomagnetic data analysis and a bridge to the Magnetism Information Consortium (MagIC) Database, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 17, DOI:10.1002/2016GC006307.
- Turner (Ingham) G. M., Thompson R. (1981): Lake sediment record of the geomagnetic secular variation in Britain during Holocene times. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 65, 703–725. DOI: 10.1111/j.1365-246X.1981.tb04879.x.
- Watkins N. D. (1973): Brunhes epoch geomagnetic secular variation on Reunion Island. *Journal of Geophysical Research*, 78, 7763–7768. DOI: 10.1029/jb078i032p07763.

# Kétdimenziós magnetotellurikus modellezés – irányanizotrópiából származó hatások vizsgálata

KISS J.<sup>@</sup>, PRÁCSER E.

Magyar Bányászati és Földtani Szolgálat (MBFSZ),  
1145 Budapest, Columbus u. 17–23.

<sup>@</sup>E-mail: kiss.janos@mbfsz.gov.hu

A magnetotellurikus mérési adatok  $E$  és  $H$  polarizációs inverziójából többnyire különböző eredményeket, eltérő lát-szólagos fajlagosellenállás-szelvényeket kapunk. A két irány közötti eltérés vajon hiba vagy földtani információ? A kérdés költői, hiszen nyilvánvalóan olyan földtani okai vannak a jelenségnek, amellyel eddig érdemben nem foglalkoztunk.

Az eltérést irányanizotrópiának hívjuk (ezt két- és háromdimenziós hatások okozzák), amelyet eddig csak a földtani közeg vezetőképességének irányfüggő megváltozásával hoztunk kapcsolatba. A határátmeneti jelenségek vizsgálata alapján (Kiss et al. 2020) azonban mást is találtunk, nemcsak a vezetőképességtől, hanem a közeg mágneses tulajdonságaitól és/vagy dielektromos permittivitásától is függő irányanizotrópiát. Mivel az elektromágneses, azaz elektromos és mágneses teret mérjük, ez tulajdonképpen nem is meglepő. Ez viszont óvatosságra kell, hogy intsen minket!

Korábban, amikor a mágneses permeabilitás szerepét vizsgáltuk a Curie-hőmérséklet tartományában, szerteágazó magnetotellurikus modellezést folytattunk házi fejlesztésű programokkal. Ezeknek a futtatásoknak az eredményeit elővéve számos, akkor érthetetlen jelenség magyarázatát adták meg a feltárt határátmeneti törvényszerűségek. Jelen tanulmányunkban az adatokat leporolva, a 2009-ben félbehagyott tanulmányt kibővítve mutatjuk be modellezési eredményeinket.

A CEL08 szelvény mentén, a Kab-hegynél egyértelmű kapcsolat tételezhető fel a bazaltsapka és az anizotrópia-maximum megjelenése között (lásd Kiss et al. 2020). Az anizotrópia maximumhelye a magnetotellurikus szelvényen sokkal mélyebben van, és sokkal nagyobb kiterjedésű, mint amit eddigi földtani ismereteink alapján a bazaltok lehetséges mélybeli helyzetéről és méretéről tudunk.

Lehet, hogy ennek a jelenségnek is földtani – pontosabban az elektromágneses tér terjedésében keresendő – okai vannak? A természetben minden a fizika törvényei szerint működik, csak eddig lehet, hogy nem ismertük fel ezeket a törvényszerűségeket? Cikkünkben ennek járunk utána kétdimenziós direkt modellezéssel, majd terepi szondázási görbék vizsgálatával.

## Kiss, J., Prácser, E.: Two-dimensional magnetotelluric modelling – investigation of effects due to directional anisotropy

From the  $E$  and  $H$  polarization inversion of magnetotellurics, we obtain mostly different results, with different specific resistivity sections. Is the difference between the two directions an error or geological information? The question is theoretical, since there are obvious geological reasons for the phenomenon, which we have perhaps not addressed enough so far. We call the divergence directional anisotropy (caused by two- and three-dimensional effects), which we have so far only associated with directional changes in the conductivity of the geological medium. However, based on the study of boundary transition phenomena (Kiss et al. 2020), we have found something else, a directional anisotropy that depends not only on conductivity but also on the magnetic properties and/or dielectric permittivity of the medium. Since we measure the electromagnetic, i.e. electric and magnetic fields, this is actually not surprising. But this should make interpretative geophysicists and geological users cautious!

In our previous studies, when investigating the role of magnetic permeability over the Curie temperature range, we have also performed a wide range of modelling using in-house developed programs. By re-examining the results of these runs, the boundary transition laws that were discovered explained many phenomena that were then incomprehensible. In the present paper, we have presented our results by dusting down the data and extending the paper, which was abandoned in 2009.

Along the CEL08 profile at Kab Hill a clear connection between the basaltic cap and the maximum anisotropy can be assumed (see Kiss et al. 2020). The location of the anisotropy maximum in the section is much deeper and much larger than what we know about the possible position and size of the basalts based on our geological knowledge. Is it possible to assume that this phenomenon also has geological causes – more precisely, that it is due to the propagation

of the electromagnetic field? Could it be that everything in nature happens according to the laws of physics, but that we have not yet recognised these laws? In this article, we investigate this too; using two-dimensional direct modelling and then examining field sounding curves.

*Beérkezett:* 2021. április 4.; *elfogadva:* 2021. június 3.

## Alapok

A magnetotellurikus mérések során az észak–déli ( $x$ ) és a kelet–nyugati ( $y$ ) irányban mért elektromos ( $E_x$ ,  $E_y$ ) és mágneses ( $H_x$ ,  $H_y$ ) térkomponensekből a legegyszerűbb (homogén, vízszintes rétegezetséget feltételező) függvénykapcsolatból kiindulva határozzuk meg a frekvenciától és a közeg paramétereitől függő impedanciát (Nemesi, Hobot 1981, Kiss et al. 2005):

$$Z_{x,y}(\omega) = \frac{E_x(\omega)}{H_y(\omega)} \quad \text{és} \quad Z_{y,x}(\omega) = \frac{E_y(\omega)}{H_x(\omega)}, \quad (1)$$

ahol

$\omega$  – körfrekvencia ( $\omega = 2\pi f$ ,  $f$  – frekvencia)

$E_x(\omega)$ ,  $E_y(\omega)$  – a felszínen mért  $\omega$  frekvenciájú elektromos térváltozás  $x$  és  $y$  irányú horizontális komponense,

$H_x(\omega)$ ,  $H_y(\omega)$  – a felszínen mért  $\omega$  frekvenciájú mágneses térváltozás  $x$  és  $y$  irányú horizontális komponense.

Az impedanciákból a gyakorlati felhasználás céljából jobban elterjedt látszólagos fajlagos ellenállás<sup>1)</sup> kiszámításához a Cagniard-féle képletet (1953) alkalmazzuk:

$$\rho_{x,y}(\omega) = \frac{|Z_{x,y}(\omega)|^2}{\omega\mu_0\mu_r}, \quad \text{ill.} \quad \rho_{y,x}(\omega) = \frac{|Z_{y,x}(\omega)|^2}{\omega\mu_0\mu_r}, \quad (2)$$

ahol

$\mu_0$  – a vákuum mágneses permeabilitása,

$\mu_r$  – a közeg relatív mágneses permeabilitása.

Két közeg határfelületén, ha a határfelületi áramsűrűség és töltéssűrűség nulla értékű, akkor az elektromos és mágneses térkomponensek

– érintő irányú összetevői folytonosak lesznek:

$$E_{t_2} = E_{t_1} \quad \text{és} \quad H_{t_2} = H_{t_1}, \quad (3)$$

– normál irányú összetevői ugrást szenvednek:

$$E_{n_2}/E_{n_1} = \varepsilon_{r_1}/\varepsilon_{r_2} \quad \text{és} \quad H_{n_2}/H_{n_1} = \mu_{r_1}/\mu_{r_2}, \quad (4)$$

ahol

$\varepsilon_{r_1}$ ,  $\varepsilon_{r_2}$  – az első és a második közeg relatív dielektromos permittivitása,

$\mu_{r_1}$ ,  $\mu_{r_2}$  – az első és a második közeg relatív mágneses permeabilitása.

Mivel a vezetési áramsűrűséget a közeg vezetőképessége és a mért elektromos tér együttesen határozza meg ( $J = \sigma E$ ), így a vezetési áramsűrűség függése is érdekes:

– érintő irányú összetevője ugrást szenved:

$$J_{t_2}/J_{t_1} = \sigma_2/\sigma_1, \quad (5)$$

– normál irányú összetevője is ugrást szenved, de másképpen:

$$J_{n_2}/J_{n_1} = \varepsilon_{r_1}\sigma_2/\varepsilon_{r_2}\sigma_1, \quad (6)$$

ahol

$\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  – az első és a második közeg elektromos vezetőképessége.

Két közeg határfelületén tehát a (3) érintő és a (4) normál irányú térkomponensek eltérően fognak viselkedni, ami az (1) impedancia meghatározáskor eltérő értéket eredményez:

$$Z_{x,y} = [E_x(\varepsilon_{r_1}/\varepsilon_{r_2})]/H_y \quad \text{és} \quad Z_{y,x} = [H_x(\mu_{r_1}/\mu_{r_2})]/H_y. \quad (7)$$

Ez természetesen a (2) alapképletek alapján kiszámolt látszólagos fajlagos ellenállásokra is hatással lesz.

A vízszintes, rétegzett vezető modell határfelületének törvényszerűségeivel Szarka (1988) részletesen foglalkozott. Itt most egy általánosabb ismertetést adtunk, amelyben a közeg mágneses és dielektromos paramétereinek megváltozásával és a határfelületeken ezek hatására bekövetkező változásokkal foglalkoztunk (részletesebben lásd Kiss et al. 2020).

## Előzmények

2005 és 2011 között több cikkünk is megjelent a mágneses fázisátalakulás vizsgálata témakörben (Kiss et al. 2005a, 2005b, 2010, 2011). A komplex értelmezések és a terepi magnetotellurikus adatok vizsgálata során úgy tűnt, hogy a mágneses tulajdonságok hatással vannak az elektromágneses mérési eredményekre. Gyakorlati tapasztalataink azt mutatták, hogy a mágneses képződményekhez „jól vezető” hatások kapcsolódnak, viszont a hagyományos magnetotellurikus direkt feladat megoldása során éppen ellenkező, szigetelő hatást, azaz ellenállás-növekedést mutattunk ki!

Kezdetben csak a „legegyszerűbb” homogénfeltér-modell, illetve az egydimenziós (pl. vízszintesen rétegzett) modell klasszikus képletei alapján történt az ellenőrzés. Meg kellett vizsgálni azonban a bonyolultabb, kétdimenziós és háromdimenziós modellek esetét is.

Kétdimenziós modellekre az „MTFWDGP” direktfeladat-megoldó saját fejlesztésű programmal (forráskód: Prácsr Ernő) 2009-ben végeztünk olyan kétdimenziós

számításokat, amelyek a mágneses permeabilitást is figyelembe vették. A futtatások célja a mágneses fázisátalakulás jelenségének kimutatása volt MT mérési adatok alapján, azon belül a mágneses permeabilitás hatásának vizsgálata, különböző elvi 2D modellek felett, a jelenség jobb megértése céljából.

Az eredményeinket akkor nem publikáltuk, mivel a három típusmodell (1. ábra) alapján elvégzett számítások nem jelezték egyértelműen a mágnesezettség hatását. Nem is értettük, hogy az egyik modell esetében „miért igen”, a másokban pedig „miért nem” a válasz a hatások kimutatása során. Mivel csak a Curie-hőmérsékleti mélységben megjelenő Hopkinson-effektusra koncentráltunk, így a többi eredményt, amelyek a felszíni megnövekedett mágnesezettséggel lehettek kapcsolatban, akkor közömbösen vettük tudomásul. A remanens mágnesezettség miatt bevezetett virtuális remanens mágneses szuszceptibilitás (Kiss et al. 2020) magas Königsberger-koefficiens esetén azonban már a felszínen is érezhető változásokat fog okozni, tehát a modellezéseink nem voltak hiábavalóak.

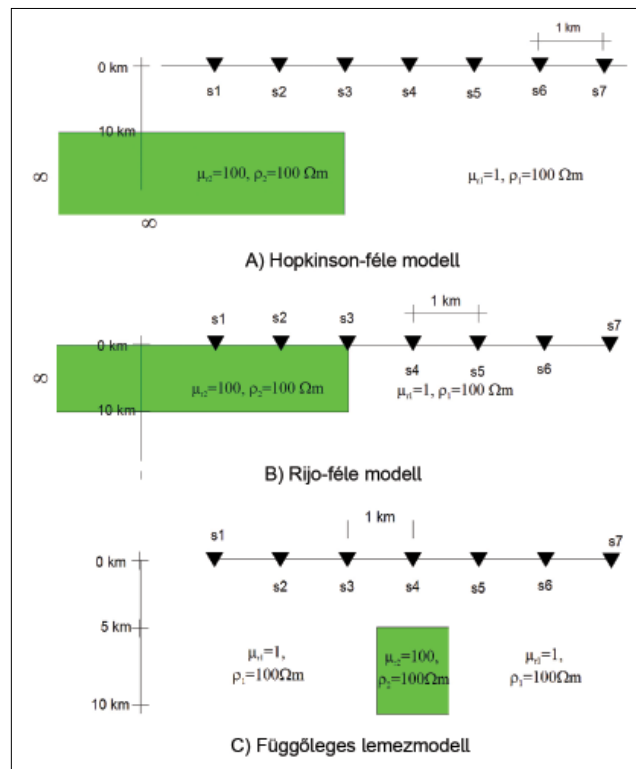
A 2020-ban publikált „AniMax”<sup>2)</sup> eljárással kapcsolatban figyelmünk a határátmeneti jelenségekre, két- és háromdimenziós hatásokra terelődött (Kiss et al. 2020, 2021). Ebben az esetben levezetéseink alapján már nem a közegre jellemző relatív mágneses permeabilitást kellett számításba venni, hanem a határfelület két oldalán lévő anyagok relatív mágneses permeabilitásának az arányát(!), mert részben ez határozza meg az impedancia- és ezen keresztül az ellenállásugrás mértékét. Be kellett vezetni a virtuális mágneses szuszceptibilitást (illetve permeabilitást), amivel a remanens mágnesezettséget is figyelembe tudtuk venni. Ez azért volt szükséges, mert a remanens mágnesezettség értéke egy-két nagyságrenddel nagyobb lehet az indukált mágnesezettségnél (Clark 1997), s így hatása felszíni földtani körülmények között is megjelenhet. A valós mágneses szuszceptibilitásnak – az indukált mágnesezettséget kiváltó paraméternek – jelentős megnövekedése és ebből adódóan a mágneses permeabilitásnak érezhető megnövekedése, elvileg csak a Curie-hőmérséklet mélységtartományában jelentkezhet (a Hopkinson-effektus miatt). Nagy Königsberger-arány esetén azonban már a felszínen is jelentős „remanens mágneses permeabilitás”-növekedés várható.<sup>3)</sup> Az anomális remanens mágnesezettség ( $\mu_r > 1$ ) miatt a magnetotellurikus mérésekben a felszíni mágneses képződmények torzító hatásával – amint azt a határátmeneti jelenségek vizsgálatkor már igazoltuk – számolni kell!

A határfelületek esetén a relatív mágneses permeabilitások arányának fontos szerepe van, így a permeabilitás megváltozása növelheti (kvázihomogén féltér felett), de akár csökkentheti (két közeg kontaktusa mentén) is a mért impedanciát és a látszólagos fajlagos ellenállást.

Az irányanizotrópiát két gyakorlati példán is bemutatuk, a CEL07 és a CEL08 magnetotellurikus szelvények TE és TM módú invertált fajlagosellenállás-szelvényeinek összevetése révén.

## Modellek

Az 1. ábra mutatja az alkalmazott modelleket. A szondázási pontokat fekete háromszögek (egymástól 1 km távolságra) jelzik, a fajlagos ellenállás szempontjából homogén közegben elhelyezett mágneses réteget zöld szín emeli ki.



**1. ábra** Kiindulási modellek kétdimenziós magnetotellurikus direkt feladat megoldásakor, A) Hopkinson-féle modell, B) Rijo-féle modell, C) függőleges lemezmodell

**Figure 1** Initial models for solving a two-dimensional magnetotelluric direct problem A) Hopkinson model, B) Rijo model, C) vertical plate model

A mágneses réteg az első esetben 10 km mélységben kezdődik (Hopkinson-féle modell, Hopkinson 1889), balra és lefelé végtelen kiterjedésű, a második esetben a felszíntől 10 km mélységig tart, és balra végtelen kiterjedésű (Rijo-féle modell, Rijo 2003). Ezután a függőleges lemezmodell következett. Vizsgáltuk a mágneses permeabilitás mellett a vezetőképesség hatását is, mivel a képletek és a modellezési eredmények azt mutatták, hogy analógia van a két paraméter viselkedésében.

A felvett modellgeometriák lehetőséget adtak a mágneses permeabilitás hatásának vizsgálatára függőleges határfelület esetén úgy, hogy az egyik oldalon mágneses közeg van, a másik oldalon pedig nem mágneses. Ezek a vizsgálatok Rijo (2003) mágneses „static shift”-ről szóló publikációjának az ellenőrzését is jelentették.

## A modellező rács mérete

A modellezés egy 97×140 rácspontban készült, ahol a horizontális kiterjedés -94,5 km és 100,5 km között (1. lista),

**1. lista** | Horizontális irányú rácspontok helyzete a kétdimenziós modellezés során  
**List 1** | Horizontal position of grid points in two-dimensional modelling

-94.5000	-33.5000	-25.5000	-21.5000	-19.5000	-17.5000	-15.5000	-14.5000
-13.5000	-12.5000	-11.5000	-10.5000	-9.5000	-8.5000	-7.5000	-6.5000
-5.5000	-5.0000	-4.7500	-4.5000	-4.2500	-4.0000	-3.7500	-3.5000
-3.2500	-3.0000	-2.7500	-2.5000	-2.2500	-2.0000	-1.7500	-1.5000
-1.2500	-1.0000	-0.7500	-0.5000	-0.4000	-0.3000	-0.2000	-0.1000
0.0000	0.1000	0.2000	0.3000	0.4000	0.5000	0.6000	0.7000
0.8000	0.9000	1.0000	1.1000	1.2000	1.3000	1.4000	1.5000
1.6000	1.7000	1.8000	1.9000	2.0000	2.1000	2.2000	2.3000
2.4000	2.5000	2.6000	2.7000	2.8000	2.9000	3.0000	3.1000
3.2000	3.3000	3.4000	3.5000	3.6000	3.7000	3.8000	3.9000
4.0000	4.1000	4.2000	4.3000	4.4000	4.5000	4.6000	4.7000
4.8000	4.9000	5.0000	5.1000	5.2000	5.3000	5.4000	5.5000
5.6000	5.7000	5.8000	5.9000	6.0000	6.1000	6.2000	6.3000
6.4000	6.5000	6.7500	7.0000	7.2500	7.5000	7.7500	8.0000
8.2500	8.5000	8.7500	9.0000	9.2500	9.5000	9.7500	10.0000
10.2500	10.5000	10.7500	11.0000	11.5000	12.5000	13.5000	14.5000
15.5000	16.5000	17.5000	18.5000	19.5000	20.5000	21.5000	23.5000
25.5000	27.5000	31.5000	39.5000	100.5000			

**2. lista** | Vertikális irányú rácspontok helyzete a kétdimenziós modellezés során  
**List 2** | Vertical position of grid points in two-dimensional modelling

-4.2715	-2.8477	-1.8984	-1.2656	-0.8438	-0.5625	-0.3750	-0.2500
0.0000	0.0500	0.1000	0.1500	0.2000	0.2500	0.3000	0.3500
0.4000	0.4500	0.5000	0.6000	0.7000	0.8000	0.9000	1.0000
1.1000	1.2000	1.3000	1.4000	1.5000	1.6000	1.7000	1.8000
1.9000	2.0000	2.2500	2.5000	2.7500	3.0000	3.2500	3.5000
3.7500	4.0000	4.2500	4.5000	4.7500	5.0000	5.2500	5.5000
5.7500	6.0000	6.2500	6.5000	6.7500	7.0000	7.2500	7.5000
7.7500	8.0000	8.2500	8.5000	8.7500	9.0000	9.2500	9.5000
9.7500	10.0000	10.5000	11.0000	11.5000	12.0000	12.5000	13.0000
13.5000	14.0000	14.5000	15.0000	15.5000	16.0000	16.5000	17.0000
17.5000	18.0000	18.5000	19.0000	19.5000	20.0000	21.0000	22.0000
23.0000	24.0000	25.0000	27.0000	29.0000	33.0000	38.0000	43.0000
51.0000	59.0000	65.6737	72.3474	85.6947	99.0421	112.3895	139.0842
165.7789	166.0000						

a vertikális kiterjedés 4 km és -166 km (2. lista) között változott. A modellezés segítségével vizsgáltuk a 0, 1, 2, 3, 4, 5 és 6 km-es távolságokban az 1., 2., 3., 4., 5., 6. és 7. pontokon a hatást, és ehhez 12 diszkrét frekvencián (1. táblázat) számoltuk ki a magnetotellurikus válaszokat.

A frekvenciák durván azt a tartományt fedik le, amelyet a terepi mérések során az intézetünk (ELGI, MFGI, MBFSZ) is alkalmazni szokott.

### Homogén féltér tesztje (2–5. ábra)

A modellező rács jóságát a homogén féltér válaszgörbéi alapján tudjuk megítélni. Ellenőrzés céljából bemutatjuk, az elektromosan homogén ( $\rho = 100 \Omega\text{m}$ ), de nem mágneses ( $\mu_r = 1$ ) féltér felett kialakuló látszólagos fajlagos-ellenállás- és fázisgörbéket (2., 3. ábra). Ezután az elektromosan homogén ( $\rho = 100 \Omega\text{m}$ ), de megnövekedett per-



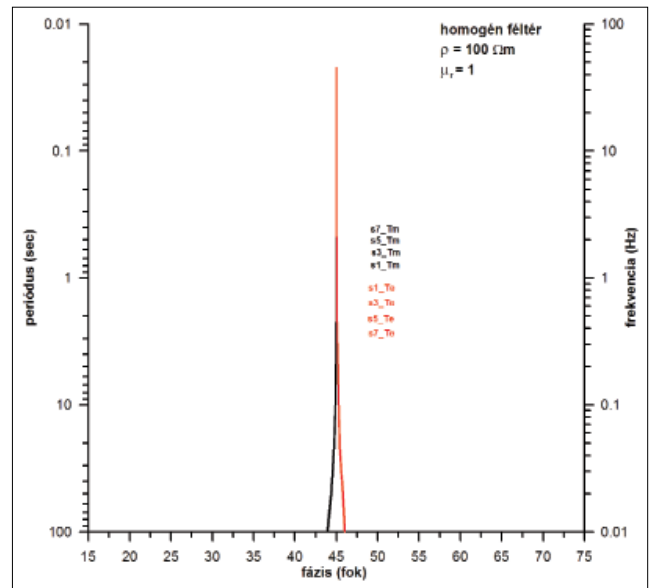
**1. táblázat** | A kétdimenziós modellezés során használt frekvenciák  
**Table 1** | Frequencies used in two-dimensional modelling

No	Frekvencia	Periódus
1	0,010	100,00
2	0,021	47,60
3	0,045	22,20
4	0,100	10,00
5	0,210	4,76
6	0,450	2,22
7	1,000	1,00
8	2,100	0,47
9	4,500	0,22
10	10,000	0,10
11	21,000	0,04
12	45,000	0,02

meabilitású ( $\mu_r = 10$ ) homogén féltér válaszgörbéit is (4., 5. ábra) megmutatjuk. A hét ponton kiszámított szondázási görbék szinte teljesen egymáson futnak, ezért minden másodikat jelenítettük meg.

Az ábrákon az eltérő polarizációjú eredményeket eltérő színnel jelöltük: az  $E$  polarizáció piros, a  $H$  polarizáció válaszgörbéje fekete színű. A periódus (illetve a frekvencia) alapján történt megjelenítéskor a görbe teteje a nagyfrekvenciás, felszínközeli értékeket mutatja, az alja pedig a kisfrekvenciás, nagy mélységből származó válaszokat, a földtani szelvények megjelenítésének megfelelően.

Az első esetben (2., 3. ábra) az látszólagos fajlagosellenállás-görbe visszaadja a homogén féltér az adott modellező rács paraméterek mellett, és a fázisgörbe is csak

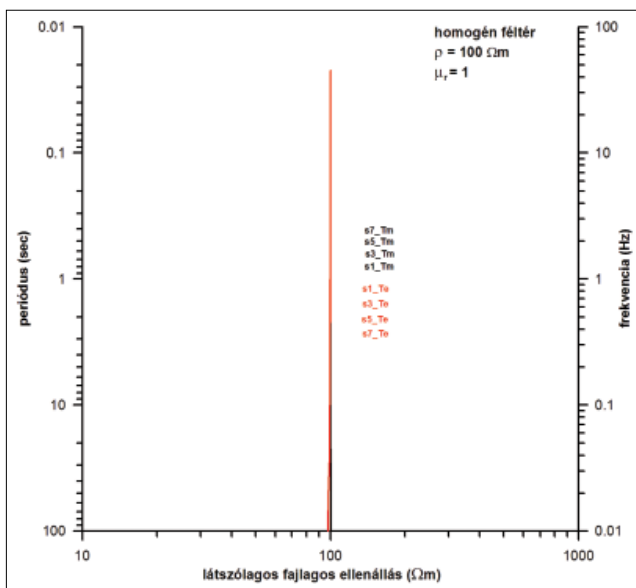


**3. ábra** | Nem mágneses homogén féltér fázisgörbéi  
**Figure 3** | Phase curves of non-magnetic homogeneous half-space

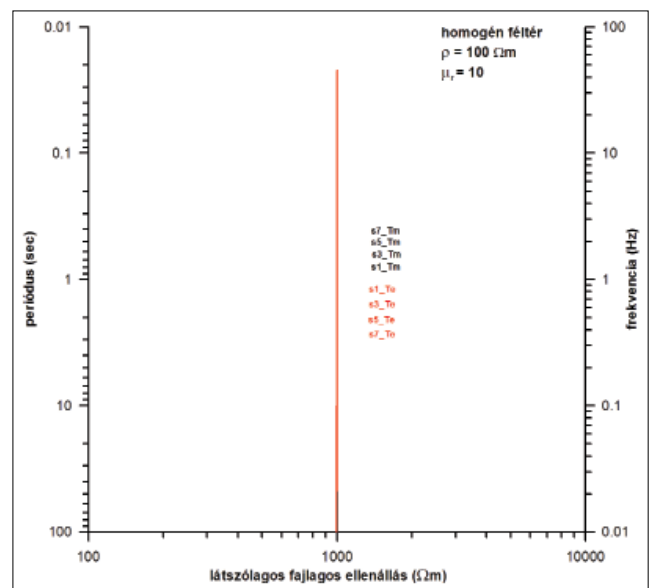
0,1 Hz-től nyílik ki, de ez a hiba 0,01 Hz-nél sem haladja meg a  $\pm 2$  fokot.

A numerikus modellezés csak véges méretű modellel működik, bármilyen nagyméretű rácsot veszünk fel, létezik olyan kis frekvencia, amelynél már romlik a számítás pontossága.

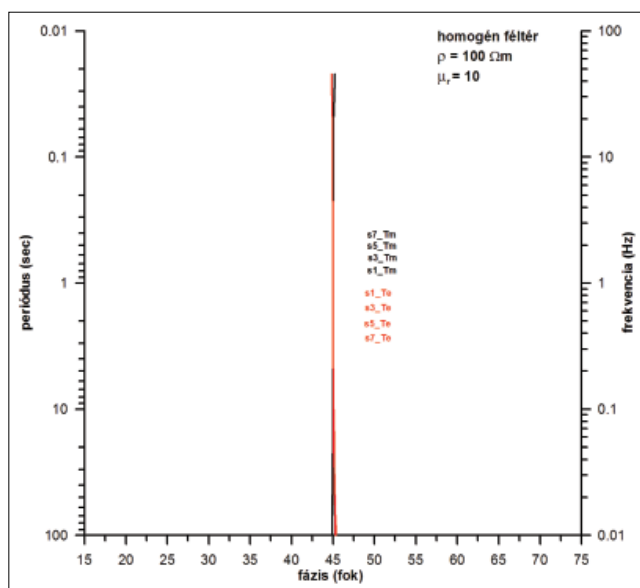
Ha megemeljük a közeg mágneses permeabilitását, akkor ez hatással van a számolt látszólagos fajlagosellenállás-görbére. Jól látszik a megnövekedett mágneses permeabilitás ( $\mu_r = 10$ ) hatása a homogén féltér ( $\rho = 100 \Omega m$ ) felett észlelt görbéken (4., 5. ábra), mivel a féltérgörbe a



**2. ábra** | Nem mágneses homogén féltér látszólagos fajlagosellenállás-görbéi  
**Figure 2** | Apparent resistivity curves of non-magnetic homogeneous half space



**4. ábra** | Mágneses homogén féltér látszólagos fajlagosellenállás-görbéi  
**Figure 4** | Apparent resistivity curves of magnetic homogeneous half-space



5. ábra | Mágneses homogén feltér fázisgörbéi  
Figure 5 | Phase curves of non-magnetically homogeneous half-space

( $\rho = 1000 \Omega\text{m}$ ) értéket adja vissza. A mágneses közegben a kis frekvenciák esetében nem látszik a zaj felerősödése. Az alkalmazott modellező rács a homogénfeltér-tesztet kiállta.

Korábbi cikkünk (Kiss et al. 2020) alapján ismert, hogy:  
– Homogén feltér esetén az elektromos vezetőképesség növekedése csökkenti az impedanciát (ellenállást), a skinmélységet és a hullámsebességet (vezetőképesség hatása). A mágneses permeabilitás növekedése növeli az impedanciát (ellenállást), viszont csökkenti a skinmélységet és a hullámsebességet (mágneszettségi hatás).

(A mágneszettségi hatás csökkenti a behatolási mélységet és a hullámsebességet, így kisebb térrészt fogunk látni, viszont az felnagyítva jelenik meg a hagyományos képletek alkalmazása esetén. Adódik tehát, hogy figyelembe kell venni a mágneszettséget a képleteinkben! A vezetőképesség és mágneszettség hatását egyszerre csak a direkt feladatnál tudjuk figyelembe venni, mert az inverz feladat esetén az egyik változót fixálni kellene ahhoz, hogy a másikat kiszámíthassuk, ehhez viszont ismernünk kellene azt!)

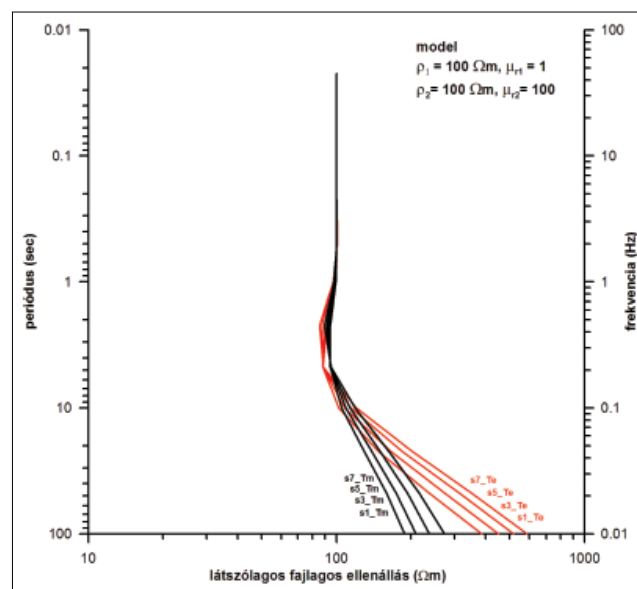
– Két közeg határfelületén az E és H térerők tangenciális összetevői folytonosan mennek át, de a J áramsűrűségvektor már nem, és az E és H normális komponensei is ugrásszerű változást fognak szenvedni, és értelemszerűen irányizotrópia alakul ki.

(Az ugrás mértéke J áramsűrűség tangenciális komponense esetén a vezetőképességek arányától, normál komponense esetén a vezetőképességek egyenes és a dielektromos állandók fordított arányától függ. Az E esetén a dielektromos állandók fordított arányától, illetve H esetén a mágneses permeabilitások fordított arányától fog függeni az ugrás mértéke! – részletesebben lásd Kiss et al. 2020)

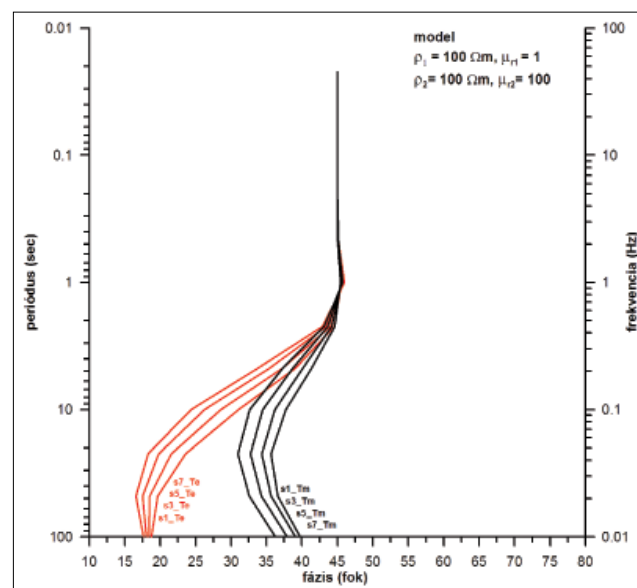
## A Hopkinson-féle modell (6., 7. ábra)

Az első modell esetén 10 km mélységtől van jelen a megnövekedett mágneses permeabilitású közeg (1. ábra, „A” modell). Ez a klasszikus Hopkinson-effektus modell, amelynél a közeg esetében a megfelelő kontraszt elérése érdekében 100-as nagyságrendű mágneses permeabilitást tételeztünk fel.

Az ábrákon feltüntetjük az egyedi szondázások látszólagos fajlagos ellenállás és fázis menetét (6., 7. ábra). Az egyes pontokon a görbemenet változása azonos tendenciát



6. ábra | Látszólagos fajlagosellenállás-görbék a Hopkinson-féle modell esetén  
Figure 6 | Apparent resistivity curves for the Hopkinson model



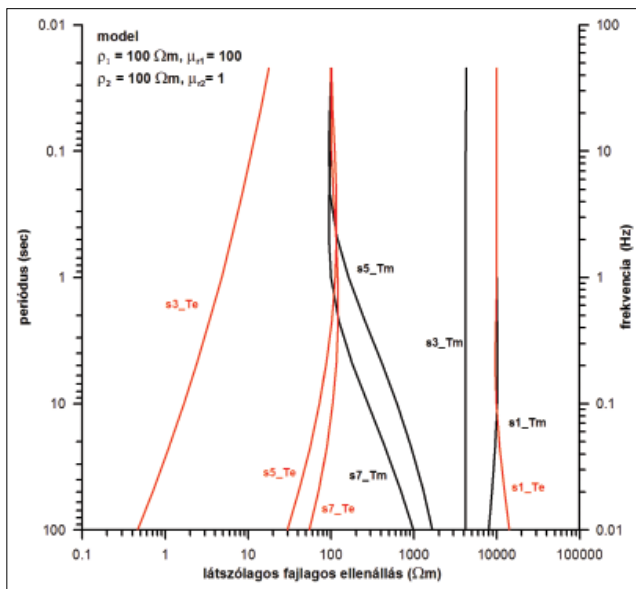
7. ábra | A fázisgörbék a Hopkinson-féle modell esetén  
Figure 7 | Phase curves for the Hopkinson model

mutat, így most is csak minden második pont görbéjét rajzoltuk ki.

A mágneses második réteg hatására kisebb ellenállás-csökkenés után különböző mértékű ellenállás-növekedést tapasztalunk mindkét polarizáció esetében. A fázisgörbék végeinek visszakanyarodása jelzi, hogy a fázis gyorsabban reagál, mint az ellenállás.

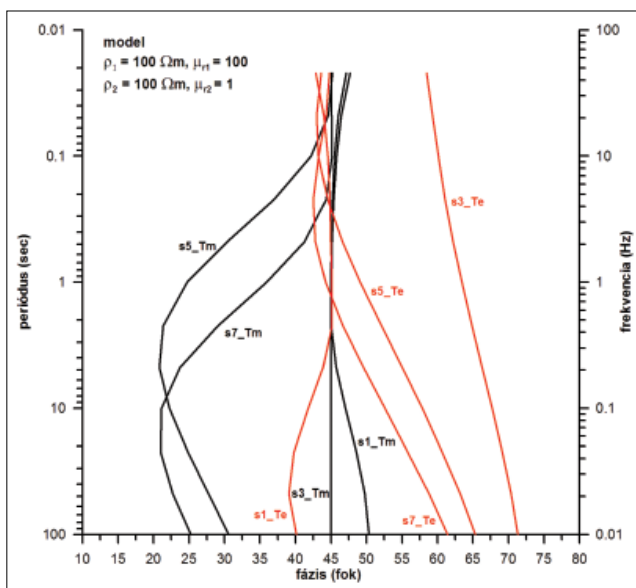
### Rijo-féle mágneses modell (8–11. ábra)

A legdurvább változásokat a felszíni mágneses paramétereknek a megváltozása okozza. Csak nagyon erős ferro-



8. ábra | Látszólagos fajlagosellenállás-görbék a Rijo-féle modell esetén

Figure 8 | Apparent resistivity curves for the Rijo-model



9. ábra | Fázisgörbék a Rijo-féle modell esetén

Figure 9 | Phase curves for the Rijo-model

mágneses anyag (vaskvarcit, szerpentinit, amfibolit) felszíni jelenléte, illetve erős remanens mágnesezettség esetében valószínűsíthető ez a modell a gyakorlatban. A remanens mágnesezettség növekedése a felszíni vulkanikus és metamorf kőzetek megjelenése esetén lehet jelentős, az előzetes vizsgálataink alapján (Kiss et al. 2020) a hatás a kontaktus környezetében várható.

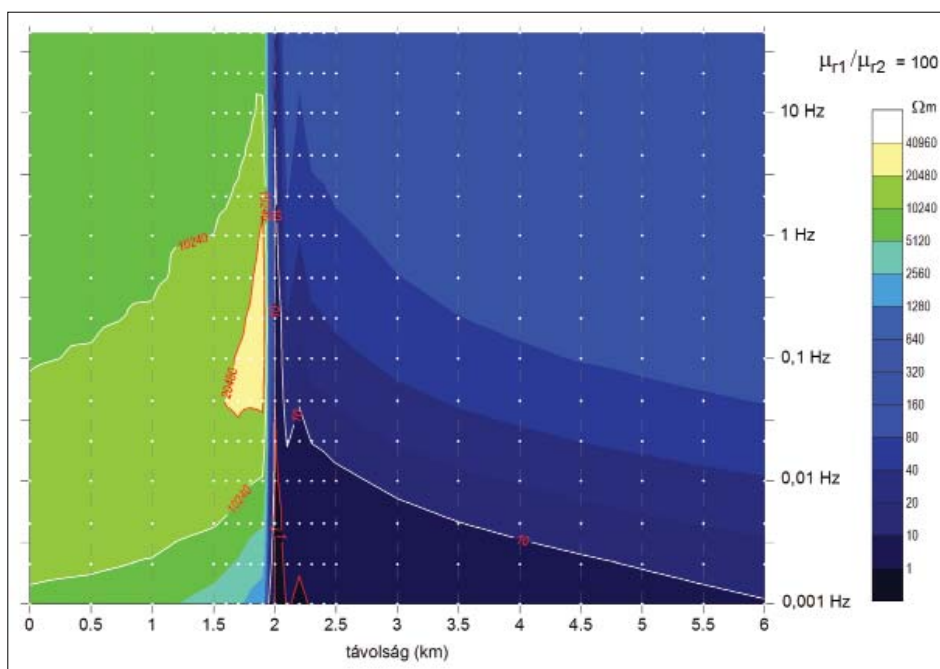
A látszólagos fajlagos ellenállás esetén TM módban folyamatos átmenetet tapasztalunk a különböző mágneses és nem mágneses félterek (100 és 10000 Ωm) között. TE módban már más a helyzet! Jelentős különbség látszik attól függően, hogy a mágneses ható felett, a mágneses – nem mágneses határvonalán, vagy a nem mágneses közeg felett van-e a szondázási pont. A mágneses ható tetején, az 1-es szondázási ponton, a  $(\rho\mu_r) = 10000 \Omega\text{m}$  határozza meg a kezdő ellenállás értéket. A mágneses ható hiánya esetén, a 4-es szondázási ponttól a  $\rho = 100 \Omega\text{m}$  jellemzi a kezdő ellenállást.

*Érdekes jelenség a 3. szondázási pont kiugróan kicsi ellenállásértéke és annak menete! Nagy frekvencián a kezdő ellenállás értéke egy nagyságrenddel kisebb ( $\rho = 10 \Omega\text{m}$ ), mint a számításba jöhető legkisebb ellenállásérték! Kis frekvenciák irányában azonban ez az ellenállás folyamatosan tovább csökken  $1 \Omega\text{m}$  alá, egészen  $0,3 \Omega\text{m}$ -ig. A harmadik szondázási ponton a fázis is hasonló rendellenességet mutat! A TE és a TM módban számolt látszólagos fajlagos ellenállások között itt van a legnagyobb eltérés, itt jelentkezik a legnagyobb eltérés (anizotrópiamaximum) a kétféle látszólagos fajlagos ellenállás értékei között (TM módban nincs hatása a mágnesezettségnek).*

A mágneses test kontaktusán észlelt jelenség erősen a határfelületre koncentrálódik. Ezt a szondázási pontok közötti távolság csökkentésével lehetett tovább vizsgálni. Az 1 km távolságban mért egyedi szondázások alapján úgy tűnt, nehéz lett volna a jelenséget tovább tanulmányozni, pontosan megjeleníteni, ezért a 100 m-es ponttávolságban kiszámolt adatokból szelvényt készítettünk az eredeti modellt megőrizve.

A TE módú szondázási eredményeket egy távolság-frekvencia síkon jelenítettük meg (kizárva a behatolási mélység különbségéből származó hatásokat). A színezést úgy választottuk ki, hogy a rétegpárparaméterek (kiindulási „elektromos ellenállás”- vagy „elektromos ellenállás × mágneses permeabilitás”-értékek) jól elkülönüljenek.

Elsőként a teljes 6 km-es szakaszt mutatjuk be (10. ábra), majd a kontaktus körüli 1 km-es zónát (11. ábra). Az ábrákon jól látszik a látszólagos fajlagos ellenállás megváltozása a kontaktushoz közeledve. Jobbról indulva minél közelebb vagyunk, annál kisebb az érték. Balról éppen ellenkező hatás látszik, mert a kontaktushoz közeledve nő az érték. A határfelület hatására a mágneses (bal oldali) közegben a látszólagos fajlagos ellenállás jóval  $20000 \Omega\text{m}$  fölé emelkedik (1,9 km, 0,1–1,0 Hz között), míg a nem mágneses (jobb oldali) közegben ez az érték  $3 \Omega\text{m}$ -re lecsökken (2 km, 0,1 Hz). *Nagyon erős a kontraszt a szélső értékek alapján, az ábra szerint legalább 6000-szeres egy szűk 100–200 m-es sávban!*

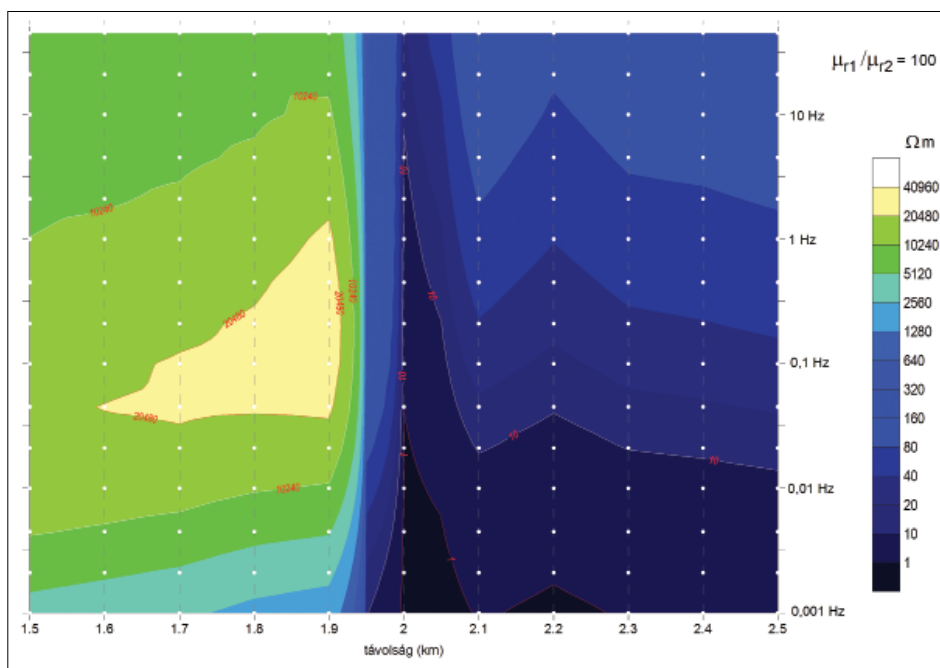


10. ábra | A látszólagos fajlagos ellenállás frekvenciafüggő metszete a 6 km hosszú szelvényen (mért érték – fehér pont)

Figure 10 | Frequency-dependent section of the apparent resistivity of 6 km long model profile (measured value – white dot)

(Itt meg kell említeni, hogy szélsőségesen nagy relatív mágneses permeabilitást használtuk a modellezés során azért, hogy a hatás minél kontrasztosabban – ha úgy tetszik –, minél jobban beazonosíthatóan jelenjen meg! A természetben ennél kisebb, de érzékelhető hatások várhatóak.)

Azaz, a relatív permeabilitások arányának megfelelően változik a kontaktus két oldalán a látszólagos fajlagos ellenállás értéke, a mágneses közegbe behatolva körülbelül 100-szorosára nő (esetünkben  $100 \times 100 \approx 10\,000 \Omega\text{m}$ ), illetve a mágneses közegből távozva pedig, 100-ad részére csökken (esetünkben  $100/100 \approx 1 \Omega\text{m}$ ).



11. ábra | A látszólagos fajlagos ellenállás frekvenciafüggő metszete a modellszelvény kontaktusa körüli 1 km-es zónában

Figure 11 | Frequency-dependent section of the apparent resistivity of the 1 km wide zone around the contact in model profile

A vezetőképesség értéke tart a nullához a kis frekvenciák irányában. Az is látszik azonban, hogy a kis frekvenciákon nagyon sokáig érezteti hatását, azaz kis frekvencián sokáig azonosítható a két közeg határfelületének a hatása. A pont-ról pontra követhető jelenség egyfajta lecsengési folyamatra emlékeztet. Ha egy ilyen határfelület megjelenik a szelvény mentén, akkor bizony a magnetotellurikus kiértékelő eléggé tanácsalanná válik, a zajos mérést hibáztatja, pedig a jelenség a természet törvényeinek megfelelően alakult ki. A jelenség – úgy tűnik – a kontaktus közvetlen közelében jelentkezik legerősebben, s attól távolodva gyengül, de szélesedik a hatása (a 10 Ωm-es érték 10 Hz-nél jelenik meg, 0,1 Hz-nél kb. 75 m széles, míg 0,01 Hz-nél 2 km szélességű tartományban azonosítható, a mágneses ható melletti nem mágneses közegben).

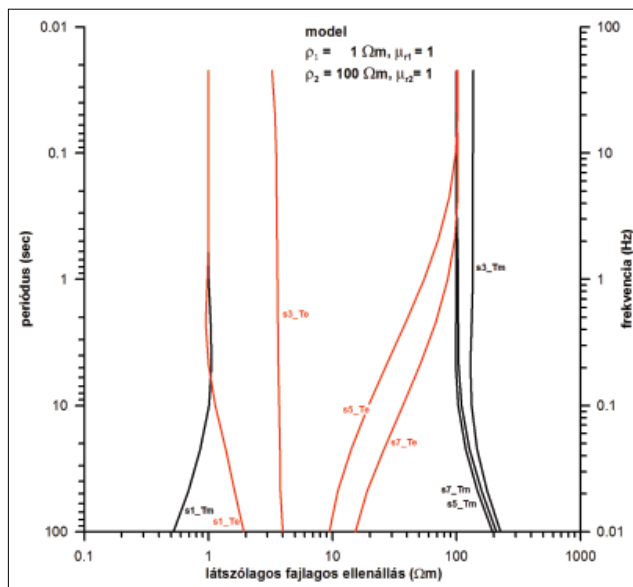
Mivel a két közeg relatív mágneses permeabilitásának arányától függ a változás mértéke, így a kontaktustól távolabb, a mágneses közeg felett csak az egyedi mágneses szuszceptibilitásból származó hatás szinte meg sem jelenik. Ennek oka, hogy a mágneses permeabilitás értéke miatt csak kevéssé nő meg ennek a közegnek a látszólagos fajlagos ellenállása, mivel a mágneses permeabilitás maximális értéke nem 100, hanem csak maximum 2 körüli, ami az ellenállás növekedésben túl nagy változást nem okoz. Csak a relatív mágneses permeabilitások egymáshoz viszonyított aránya lehet egy olyan nagyságú érték, amely viszont már megjelenik a kontaktus közvetlen környezetében a látszólagos fajlagos ellenállás-értékekben.

Ha a két közeg relatív mágneses permeabilitásának arányát 100 helyett csak 2-nek vesszük, akkor a 100 Ωm-es fajlagos ellenállású közeg a kontaktus egyik oldalán 100/2 = 50 Ωm, míg a másik oldalon 100 × 2 = 200 Ωm lesz, azaz 4-szeres kontraszttal jelentkezik a határfelület két oldalán, a kontaktus közelében. Mindeközben, ha kiszámítjuk egy vezetőképesség alapján homogén féltér ellenállását, amelynek  $\mu_r = 1$ -től különböző relatív mágneses permeabilitása van (pl.  $\mu_r = 2$ ), akkor a mért impedancia  $\sqrt{2}$ -szeresére, a számított látszólagos fajlagos ellenállás pedig 2-szeresére nő meg. Ez azért van így, mert a klasszikus Cagniard-féle képletben a relatív mágneses permeabilitás értékét konstansnak ( $\mu_r = 1$ ) kezeljük. A látszólagos fajlagos ellenállás számításakor a mágneses permeabilitás változását nem vesszük figyelembe, mivel az ismeretlen.

### Rijo-féle jól vezető modell (12., 13. ábra)

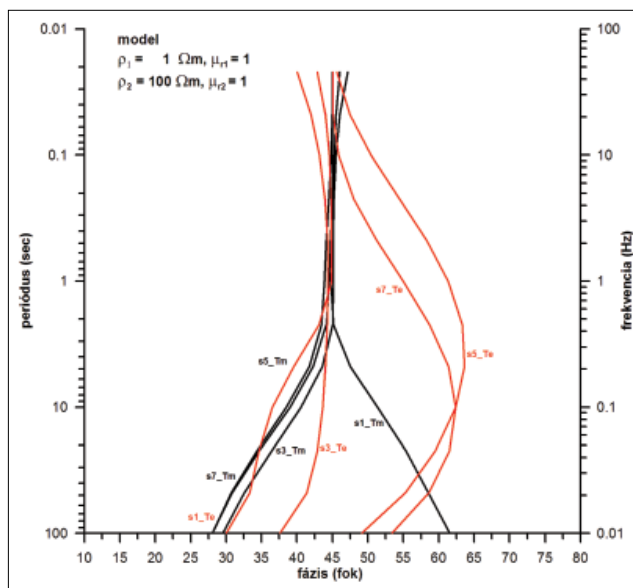
Ennél a modellnél az analógiák vizsgálata miatt kiszámítottuk, hogy egy jól vezető közeg esetén milyen választásgörbéknek kapunk (12., 13. ábra). A legszembetűnőbb jelenség az, hogy a határfelületen, a harmadik szondázási pontban nincsen jelentős eltérés az első vagy második közeg látszólagos fajlagos ellenállásához képest, hanem a két szélsőérték (1–100 Ωm) körüli/közötti görbét kapjuk eredményül.

E polarizációban folyamatos az átmenet a szélsőértékek között. H polarizációban a görbe az első ellenállásról átugrik a második ellenállásra, de a két különböző réteg ellenállásától a harmadik szondázási görbe ellenállásértéke jelen-



12. ábra | Látszólagos fajlagosellenállás-görbék a jól vezető Rijo-féle modell esetén

Figure 12 | Apparent resistivity curves for the conductive Rijo-model

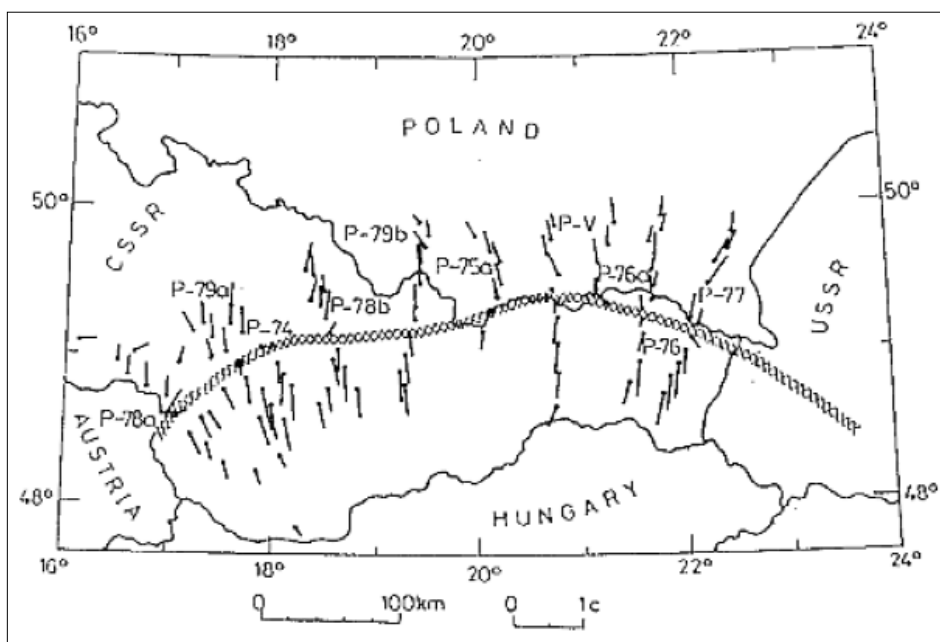


13. ábra | Fázisgörbék a jól vezető Rijo-féle modell esetén

Figure 13 | Phase curves for the conductive Rijo-model

tősen nem tér el (12. ábra). A fázisnál ugyanez a helyzet (13. ábra). A vezetőképesség szempontjából eltérő közegek közötti határfelület nem okoz olyan extrém kicsi látszólagos fajlagosellenállás-értékeket, mint amelyet a mágneses határfelület esetében tapasztaltunk.

Összességében a Rijo-féle mágneses modell esetén van olyan futtatási eredményünk (mérési pontunk), ahol a mágneses ható jelenléte nem látszólagos fajlagosellenállás-növekedést, hanem -csökkenést okozott E polarizációban! Az ellenállás-csökkenés a határfelület közvetlen környezetében a nem mágneses közegben jelentkezik!



14. ábra | Indukciós (Wiese) nyilak a Ny-Kárpátok íve mentén, a nyilak a zónától kifelé mutatnak É-on és D-en egyaránt (Jankowski et al. 1985)

Figure 14 | Induction (Wiese) arrows along W-Carpathians, the arrows are directed away from the conductivity

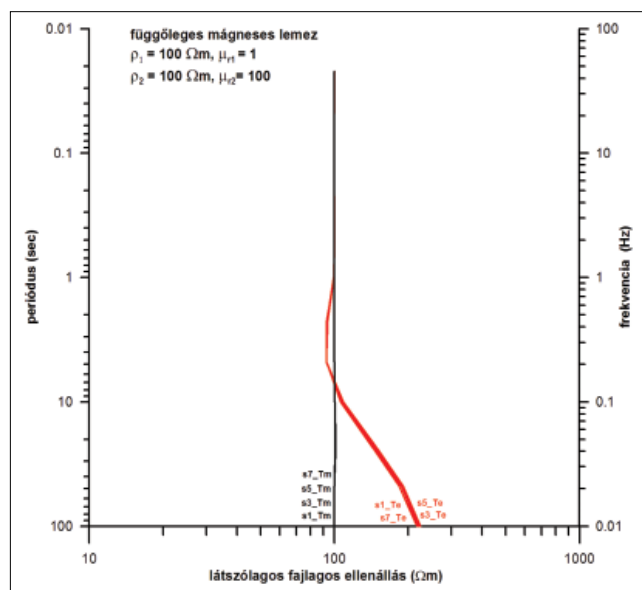
Ez azért fontos, mert a szakirodalomban nagyon sok helyen a mágneses (magmás és metamorf) kőzetek környezetében és nagyszerkezeti vonalak mentén, csökkent ellenállású zónákat mutattak ki (ilyen például a Ny-Kárpátok mentén a geomágneses indukciós vektorok alapján azonosított vezetőképesség-anomália, 14. ábra).

**Függőleges mágneses lemez hatása (15. ábra)**

Vizsgáljuk meg azt az esetet, amikor a mágneses ható a két-dimenziós modellezés irányára merőleges, függőleges mág-

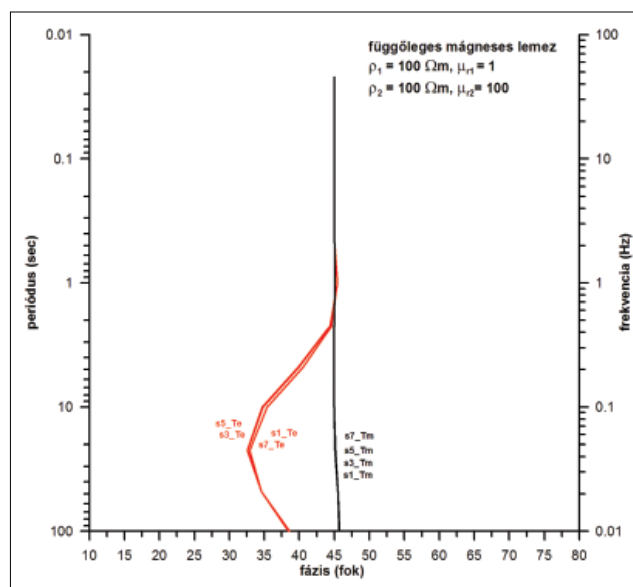
neses lemez! Mivel mágneses testről van szó, így a test hosszanti iránya (szelvényre merőlegesen) lesz a mágnesezési irány, ami a magnetotellurikában a TM mód vagy *H* polarizációs irány, és rá merőlegesen, azaz szelvényirányban pedig, az áramvezetési irány, azaz TE mód vagy *E* polarizációs irány. (Normál esetben és modellezéskor a szelvényre merőleges irány szokott a TE irány lenni, de itt a mágneses lemez miatt a TE és TM polarizációk iránya módosul a modelltől függően. A lemez mágneses tere megváltoztatja, módosítja az elektromágneses tér terjedését!)

Ebben az esetben, mivel a test 5 km-re van a felszíntől, a kontaktusok hatását a ritka állomástávolság miatt nem ér-



15. ábra | Látszólagos fajlagosellenállás-görbék függőleges, mágneses lemez esetén

Figure 15 | Apparent resistivity curves for a vertical magnetic plate



16. ábra | Fázisgörbék függőleges, mágneses lemez esetén

Figure 16 | Phase curves for a vertical magnetic plate

zékelyük. A mágneses lemez a homogén féltérnek megfelelő hatásokat mutatja, azaz megnöveli a közeg fajlagos ellenállását.

Két dolog látszik: az egyik az, hogy az ellenállásgörbe (15. ábra) alapján sokkal kisebb a hatás, mint ami a 6. ábra esetén, mert kisebb a mágneses tömeg, a másik az, hogy  $H$  polarizációban gyakorlatilag nincsen hatás. Azaz, ha a mágneses lemezre merőlegesen futó szelvényen mérünk, akkor a mágneses permeabilitásnak gyakorlatilag nincs hatása a  $H$  polarizációra.

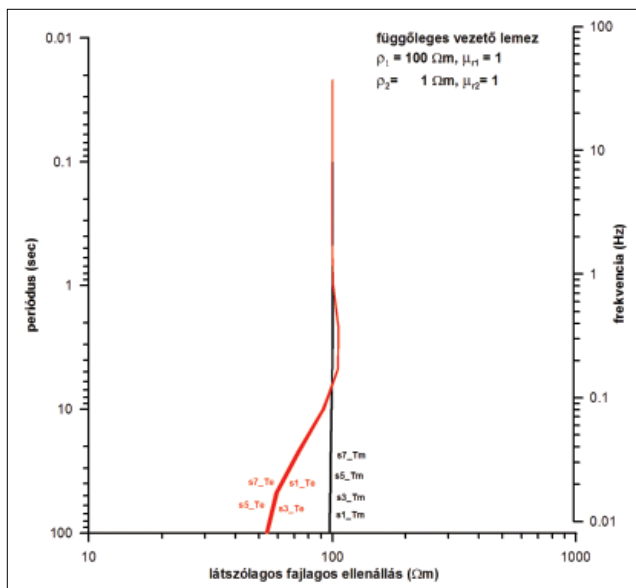
A mágneses lemez szigetelőre jellemző hatást produkál  $E$  polarizációban a látszólagos fajlagosellenállás-görbén. A 10 km mélységben lévő végtelen mágneses lemez hatását a rá merőleges irányban, azaz TE módban már megérzik a mérések, és ugyanazt a jelenséget látjuk, mint homogén féltér esetében, azaz a mágneses test jelenléte (kezdeti belengés után) növeli a látszólagos fajlagos ellenállást. A lemez helyzetéből adódóan mindez elsősorban az alacsony frekvenciákon jelenik meg. A fázisértékeknél (16. ábra) ugyanezeket a dolgokat tapasztaljuk, és ebben az esetben is szembeötlő a fázis gyorsabb reagálása.

Nézzük meg, hogy milyen hatást kapunk, ha nem mágneses, hanem egy vezető függőleges lemez hatását vizsgáljuk!

### Függőleges, jól vezető lemez hatása (17., 18. ábra)

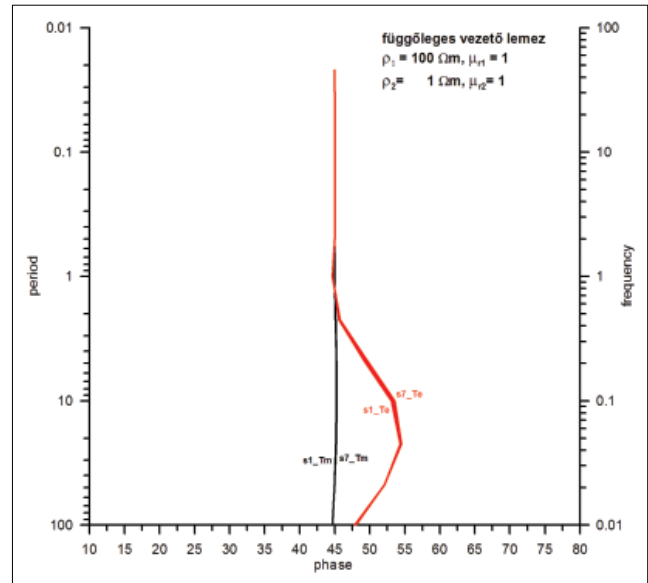
Ennél a modellnél a lemez iránya adja meg az áramvezetés irányát (TE), amely merőleges a szelvény irányára. A szelvényirány lesz a mágneses irány (azaz a TM)!

Ebben az esetben éppen az ellenkezőjét tapasztaljuk. A szelvényre merőleges, jól vezető lemez esetén a  $H$  polarizációban gyakorlatilag nincs hatás, az  $E$  polarizációban



17. ábra | Látszólagos fajlagosellenállás-görbék függőleges, jól vezető lemez esetén

Figure 17 | Apparent resistivity curves for a vertical, conductive plate



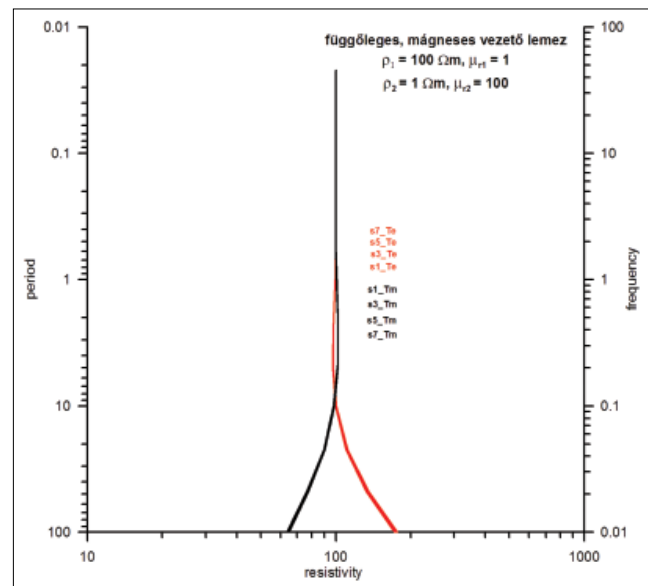
18. ábra | Fázisgörbék függőleges, jól vezető lemez esetén

Figure 18 | Phase curves for a vertical, conductive plate

viszont igen erősen jelentkezik a látszólagos fajlagos ellenállás csökkenése (17. ábra). A fázis esetében is ugyanez tapasztalható (18. ábra).

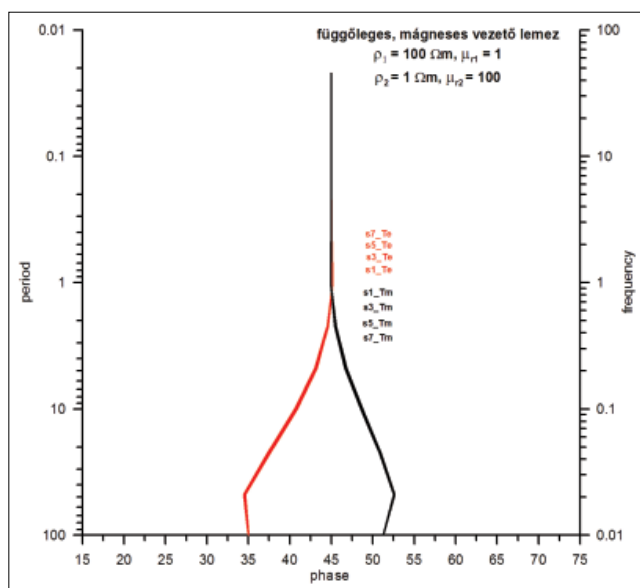
### A függőleges, jól vezető és mágneses lemez hatása

Ha a lemez mágneses és jól vezető is egyszerre, akkor az előző hatások együttesen jelentkeznek (19., 20. ábra). Ebben az esetben a különböző polarizációk esetében teljesen



19. ábra | Látszólagos fajlagosellenállás-görbék a függőleges, mágneses és jól vezető lemez esetén

Figure 19 | Apparent resistivity curves for vertical, magnetic and highly conductive plate



**20. ábra** | Fázisgörbék a függőleges, mágneses és jól vezető lemez esetén  
**Figure 20** | Phase curves for vertical, magnetic and conductive plate

ellentétes látszólagos fajlagosellenállás-változásokat kapunk, azaz jelentősen megnő a különbség az  $E$ - és  $H$ -polarizációs mérési eredmények között. Ez egyértelműen anizotrópiamaximumot okoz! A lemez mágneses tere határozza meg a TE és TM irányokat!

A hagyományos, kétdimenziós magnetotellurikus inverzió esetében ez utóbbi modell kiértékelése csak az elektromos paraméterek figyelembevétele mellett valószínűleg nem fog kielégítő eredményt adni. A nagy mágneses permeabilitású földtani képződmények hatással lehetnek az elektromágneses mérésekre, azaz a mágneses permeabilitás hatását időnként nem szabad figyelmen kívül hagyni! A

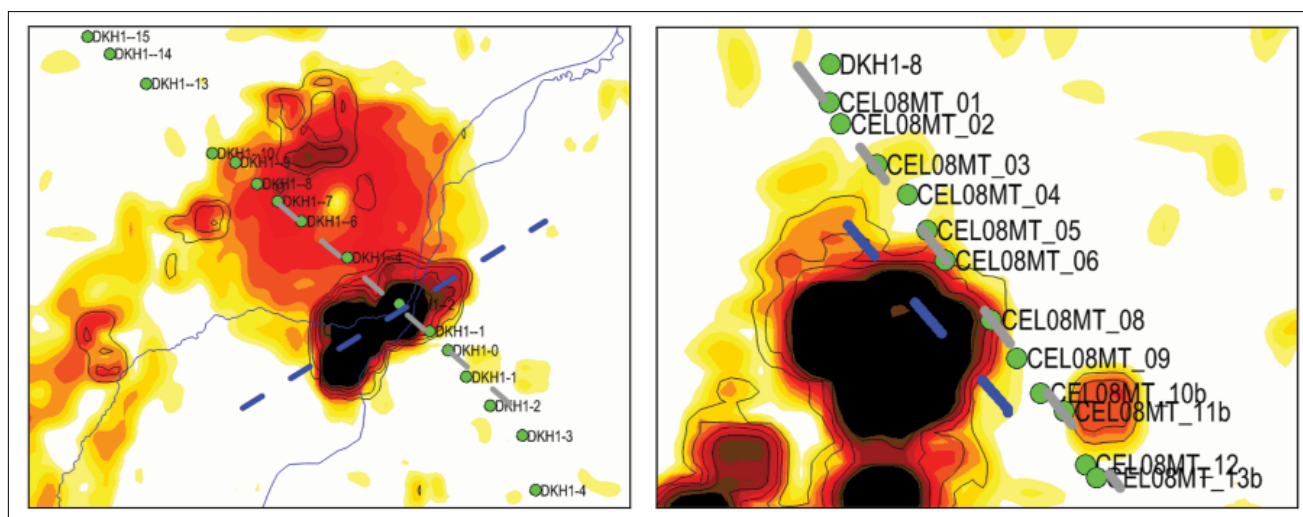
modellezési eredmények alapján a mágneses ércek rendkívül nagy anizotrópiát fognak okozni az MT mérésekben.

## Terepi adatok (Kab-hegy, Kemeneshát, Nyírség)

Az irányanizotrópia vizsgálatáról szóló első cikkünkben (Kiss et al. 2020) a CEL08 szelvény mentén, a Kemenesháton és a Kab-hegy oldalában találtunk anizotrópiamaximumokat. Mindkét esetben az erősen mágneses bazalt/bazanit-képződményhez kapcsolhatjuk a rendellenességet. Érdekes viszont, hogy nem ugyanazon arányképzéssel előállított szelvényen jelenik meg a két hatás. Ennek oka a geometriában keresendő, azaz a mágneses test (és a kontaktus) helyzete játszik szerepet a szelvényhez képest (21. ábra).

A felszínközeli bazalttest a Kemenesháton az MT szelvényre merőleges helyzetben, illetve közvetlenül a szelvény nyomvonalát alatt van. A Kab-hegynél – mivel a szelvény a hegy mellett a síkon halad (a bazaltokra nem is esik mérési pont) – a szondázási pontok a közettani kontaktussal párhuzamosan haladnak. Itt a szondázási pontok hosszan benne vannak tehát abban a kontaktuszónában, ahol a permeabilitásarányok megváltozása miatt a legnagyobb torzulással kell számolni (lásd 11. ábra kis látszólagos fajlagos ellenállású anomália a kontaktus mentén). Ez az oka annak, hogy olyan nagy és markáns eltérést látunk a különböző irányú TE és TM mérési adatok között.

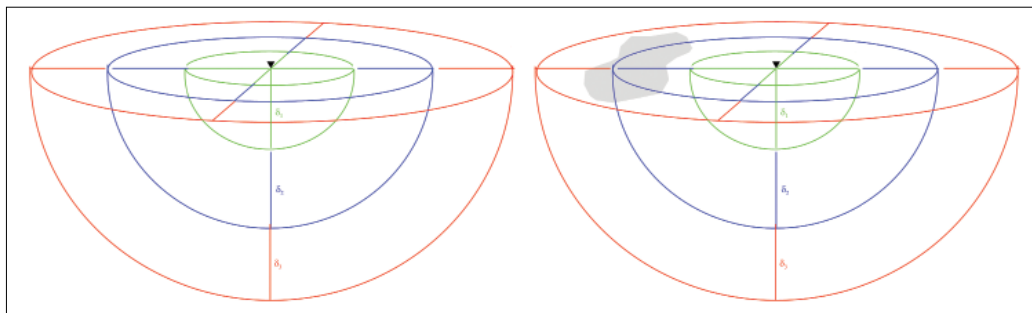
A földi mágneses mérések az 1500 m-es ritka ponttávolság, illetve a hatók felett tapasztalható nagyobb kiterjedésű mágneses anomáliák miatt a kontaktuszónát pontosan leképezni nem tudták, de annak hatását az MT szelvényen egyértelműen azonosíthatjuk.



**21. ábra** | A kemenesháti bazalt és a „Pástor vulkán” (bal oldalon) valamint a Kab-hegyi bazalt (jobb oldalon) megjelenése a mágneses változékonysági térképen (kiegészítve az 1 km-es mélységű hatók terének izovonalaival) és az MT szelvény (szondázási pontok) helyzete. Kék szaggatott vonal jelzi a mágneses irányt, ami meghatározza a TE és TM irányokat

**Figure 21** | Manifestation of Kemeneshát basalt and Pástor volcano (left side) and Kab Hill basalt (right side) on the magnetic variability map by colours and variability lines of the magnetic sources of 1 km depth with the sounding points of MT profile. Blue dashed line is the magnetic direction determining the TE and TM polarisations





22. ábra | Magnetotellurikus szondázási pontban mért információk forráskörnyezete különböző frekvenciákon  
 Figure 22 | Source surroundings of information measured at a magnetotelluric sounding point at different frequencies

A közzétanti kontaktussal párhuzamos szelvényen tapasztalt anizotrópiamaximumok nem a mágneses ható valódi vízszintes és vertikális helyzetét mutatják, hanem azt a sávot, amelyben a határátmeneti zóna hatása érződik. Ezt legkönnyebben a 21. ábra helyszínrajza és a 22. ábra háromdimenziós képe alapján érthetjük meg.

A  $\delta_1$  skinmélység az  $f_1$  frekvenciákhoz tartozó behatolási mélységet, a  $\delta_1 + \delta_2 (= 2 \times \delta_1)$  skinmélység az  $f_2$  frekvenciákhoz tartozó behatolási mélységet, a  $\delta_1 + \delta_2 + \delta_3 (= 3 \times \delta_1)$  az  $f_3$  frekvenciához tartozó skinmélységet mutatja (22. ábra, bal oldal).

A 2. táblázatban láthatjuk, hogy a mérések során használt frekvenciák milyen behatolási mélységet jelentenek. A táblázatban három különböző fajlagosellenállás-értékre számítottuk ki a skinmélységet, de ez a mélység tapasztalataink alapján a mágneses permeabilitás értékétől is függ.

Visszatérve a 22. ábra jobb oldalához, azt látjuk, hogy ha megjelenik a felszínen oldalirányból egy test (szürke poligon), akkor annak hatása van a mérésre, ami meg fog jelenni a mért szondázási görbén.

2. táblázat | A 10, 100 és 1000  $\Omega\text{m}$ -es fajlagos ellenálláshoz tartozó skinmélységek a frekvencia függvényében  
 Table 2 | Skin depths for resistivity of 10, 100 and 1000  $\Omega\text{m}$  as a function of frequency

Frekvencia (Hz)	Skinmélység (m) 10 $\Omega\text{m}$	Skinmélység (m) 100 $\Omega\text{m}$	Skinmélység (m) 1000 $\Omega\text{m}$
100 000	5	16	50
10 000	16	50	159
1 000	50	159	503
100	159	503	1 592
10	503	1 592	5 033
1	1 592	5 033	15 915
0.5	2 251	7 118	22 508
0.1	5 033	15 915	50 329
0.04	7 958	25 165	79 577
0.01	15 915	50 329	159 155
0.001	50 329	159 155	503 292
0.0001	159 155	503 292	1 591 549
0.00001	503 292	1 591 549	5 032 921

A mérések eredményeit mindig az adott szelvény nyomvonalára alá függőlegesen vetítjük be, miközben a kapott az információ a skinmélység (hatótávolság) átmérőjű féltérnek az összehatását mutatja. Nagy frekvenciákon kis térrészről van szó, és minél kisebb a frekvencia, annál nagyobb féltérnek a hatásával kell számolni. Így például a Kab-hegy felszín takaró bazaltsapkája  $\delta_1$ -nél nagyobb, de  $\delta_3$ -nél kisebb távolságból jelenik meg teljes térfogatában, amit mi  $\delta_1$  és  $\delta_3$  közötti mélységként fogunk látni, azaz az EM törvényeknek megfelelően leképezve, de általunk geometriailag hibásan megjelenítve.

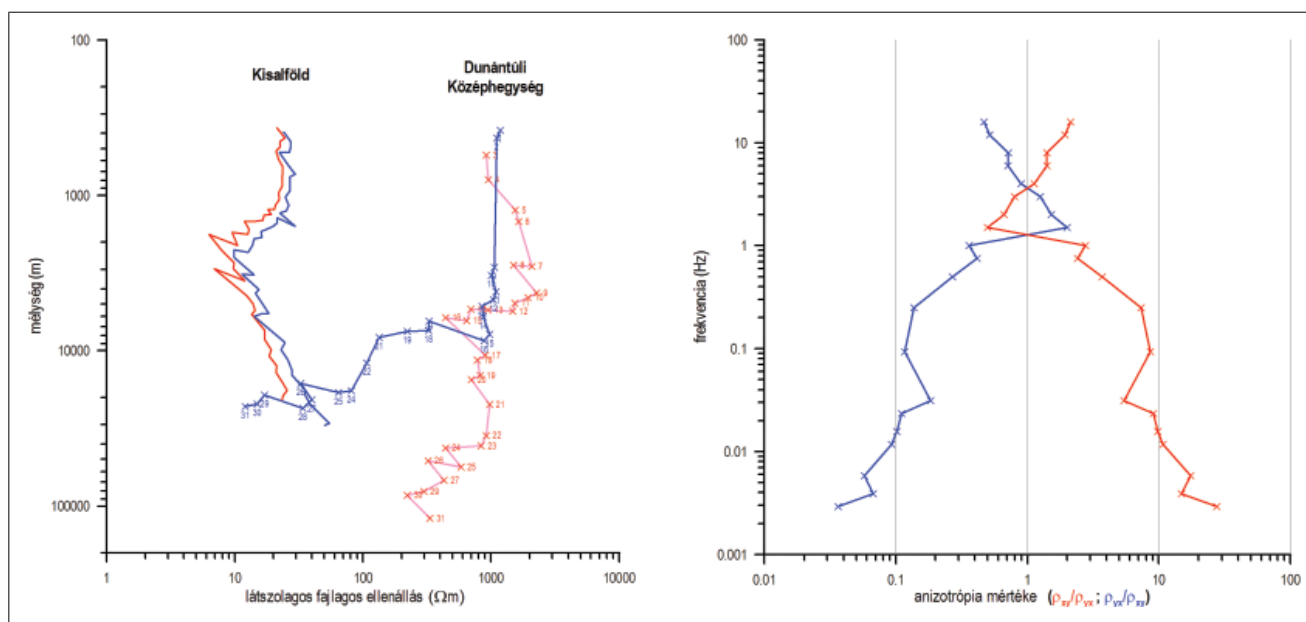
### AniMax a terepi szondázási görbéken

Az anizotrópiából származó eltérésnek az egyedi szondázási görbéken is meg kell jelennie. Ezt néhány szondázási eredmény vizsgálata alapján könnyen be is láthatjuk.

Vizsgáljuk meg először a CEL08 szelvény néhány pontját! A szelvény a Kisalföld vastag üledéke után ráfut a középhegységi medencealjzat-kibúvásokra, ami igen jelentős változást jelent a vezetőképesség (fajlagos ellenállás) kezdő értékeiben és a szondázási görbék menetében (23. ábra, balra).

A 23. ábra bal oldalán egy tipikus kisalföldi szondázási pont görbét mutatjuk (kék, piros vonalak). Az E és H polarizációs szondázási görbék párhuzamosak, közöttük nincs jelentős eltérés. A görbe 20  $\Omega\text{m}$  látszólagos fajlagos ellenállásról indul, és egy lokális csökkenő görbeszakasz után folyamatosan emelkedik.

A középhegységi görbe (23. ábra, balra, kék, piros pontozott vonalak) jelentősen eltér a kisalfölditől. A görbe a prekainozoos medencealjzat kibúvásos környezet miatt a nagy frekvencián 1000  $\Omega\text{m}$ -es fajlagos látszólagos ellenállásról indul. Kisebb frekvenciákon a görbe értéke az egyik polarizációban stagnál, vagy másik polarizációban erőteljesen csökken. A középhegységi görbék eltéréseinek az oka az irányanizotrópia, amelyet leginkább a Kab-hegy közelsége okoz, azért mert a szelvény a Kab-heggyel párhuzamosan fut kb. 5–10 km-en keresztül. Ezt a hatást az aránygörbéken lehet nyomon követni (23. ábra, jobbra). Ha a két görbe ugyanolyan lenne, akkor a görbék arányát egy egyenes vonal jelezné az 1-es értéken. A két görbe között azonban 10–30-szoros eltérés alakul ki a kis frekvenciák felé, ami az oldalhatásként megjelenő



23. ábra | Jellegzetes szondázási TE (kék) és TM (piros) görbék a CEL08 szelvény mentén (balra) és egy középhegységi, Kab-hegy melletti szondázás E és H polarizációs aránygörbéi (jobbra)

Figure 23 | Characteristic TE (blue) and TM (red) sounding curves along the CEL08 profile (left) and E and H polarization ratio curves of a Transdanubian Middle Ranges sounding near Kab Hill (right)

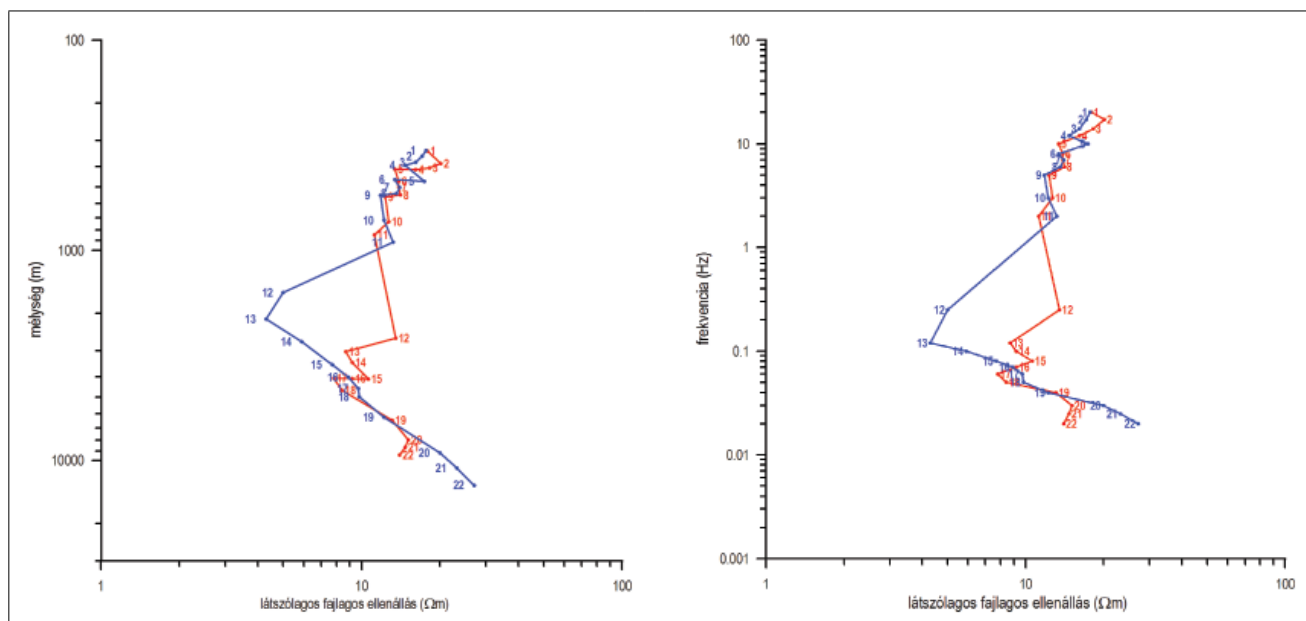
kab-hegyi bazalttal, illetve a bazalt okozta határátmeneti jelenséggel (lásd 8. ábra, s3 pont görbéi) lehet összefüggésben.

A 23. ábra bal oldalán lévő középhegységi szondázási görbén sorszámok látszanak, ennek magyarázatát a következőkben ismertetjük majd, más szondázáshoz kapcsolódóan.

Egy másik példa a Nyírség területéről, a Napkor település melletti, szeizmikus reflexiós szelvény alapján kimutatót (Nemesi et al. 1996) eltemetett vulkánnak a környeze-

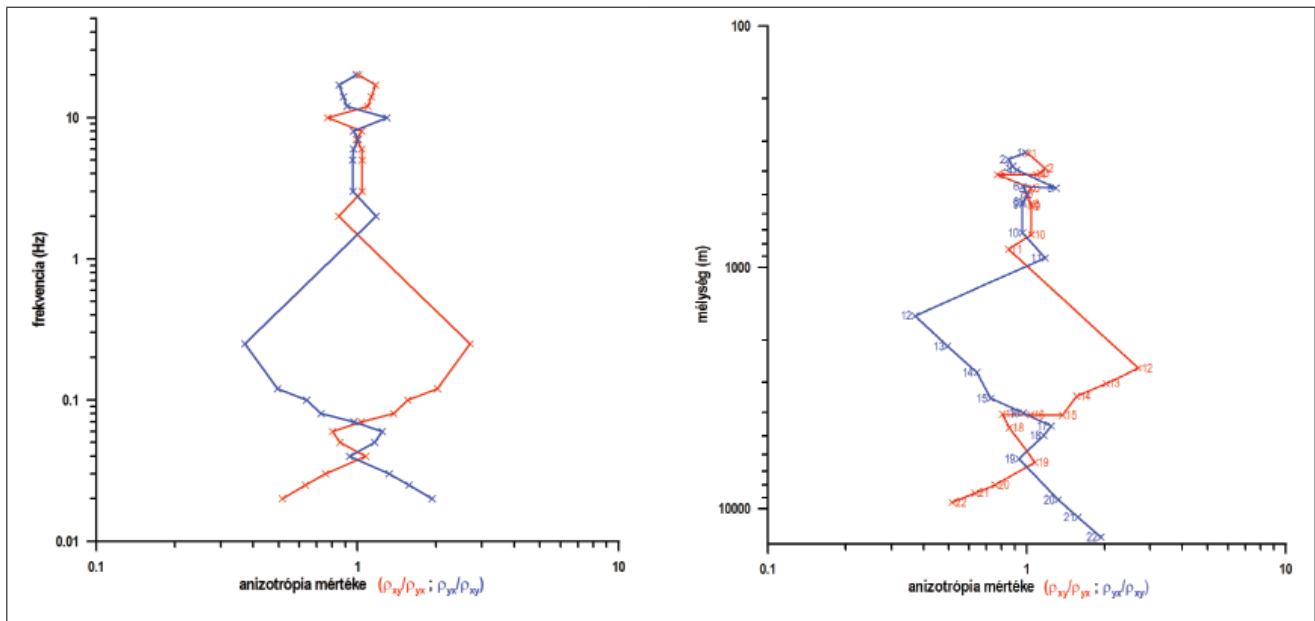
tében végzett A-18/26-os számú magnetotellurikus szondázási pont görbéi (24. ábra). Mivel eltemetett mágneses hatóról van szó, így gyengébb jelenségre számítunk.

Az 24. ábra azt mutatja, hogy az A-18/26-os ponton le-mért MT szondázási görbék szétnyílnak az 1000 m (1,5 Hz) és 3000 m (0,15 Hz) közötti mélységtartományban, ami az anizotrópia megjelenésének jele a mérési adatokban. A görbéket mélység- és frekvenciaskálán is megjelenítettük, aminek oka van, s mielőtt továbbmennénk, ennek kapcsán érdemes néhány dolgot végiggondolni:



24. ábra | Az A-18/26 szondázási pont különböző irányban mért ellenállás–frekvencia, illetve ellenállás–mélység görbéi (log-log skála mentén)

Figure 24 | Resistivity–frequency and resistivity–depth curves of the sounding point A-18/26 measured in different directions (log-log scale)



25. ábra | Az anizotrópia mértéke az A-18/26-os szondázási görbéken frekvencia és Bostick-mélység szerint

Figure 25 | Extent of anisotropy on A-18/26 sounding curves depend on frequency and Bostick depth

1. A szondázási görbék a periódusidő (frekvencia) függvényében mintázzák meg az EM teret, így diszkrét adatok állnak rendelkezésre (24. ábra, jobbra). A görbék összevetése tehát elsősorban egyszerűnek tűnik az azonos periódusidőre kiszámolt látszólagos fajlagosellenállásértékek alapján.
2. A mélység azonban a periódusidő (frekvencia) mellett a közeg elektromos vezetőképességétől, mágneses permeabilitásától is függ (Kiss et al. 2020). Az anizotrópia megjelenése esetén tehát az azonos periódusidők nem jelentenek azonos mélységet (24. ábra, balra)!
3. Az irányanizotrópia miatt az  $E$  és  $H$  polarizációban eltérő szondázási görbéket mérünk, amelyek az irányonként eltérő fizikai tulajdonságokkal és határfelületekkel vannak kapcsolatban.
4. A klasszikus alapképletek alapján az EM hullám behatolási mélysége változik, ha változik a közeg vezetőképessége vagy a mágneses permeabilitása. Ez viszont azt jelenti, hogy ugyanarra a periódusidőre (frekvenciára) – az anizotrópia, azaz a különböző fizikai paraméterek miatt – eltérő behatolási mélységek lesznek jellemzőek.
5. Az azonos periódusidőn (frekvencián) mért értékek ebből adódóan nem azonos mélységekhez tartoznak, viszont az azonos mélységpontokban nincs mért, maximum csak származtatott látszólagos fajlagosellenállásértékünk.

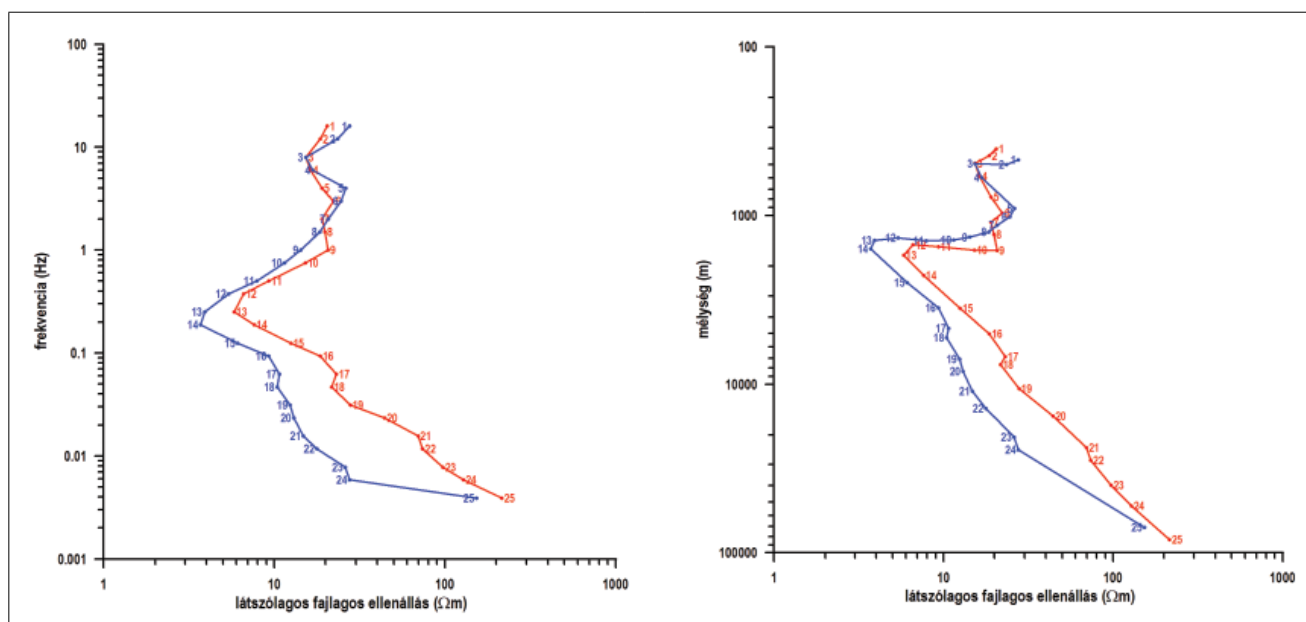
Az anizotrópia pontos beazonosítása korrekt módon – úgy tűnik – csak a frekvencia alapján végezhető el. Az azonos frekvenciájú (periódusidejű) adatok eltérő mélységhez tartoznak, így elsősorban hibának tűnik az összevetésük. De lehet, hogy az ebből adódó eltérés még jobban kiemeli

azokat a mélységtartományokat, ahol az anizotrópia jelenségével számolni kell! Sőt lehet, hogy normál megjelenítésben, a periódusidő (frekvencia) alapján végzett összevetéskor azonosnak tűnő görbék a behatolási mélységek eltérése miatt jelentős anizotrópiát fognak mutatni!

A 24. ábra bal oldala az A-18/26 pont szondázási mélységgörbéjét mutatja. A mért értékeket a frekvencia szerint sorszámoztuk (amint a 23. ábra bal oldalán a középhegységi görbét is), így látszik, hogy hol ugrik meg a behatolási mélység a fizikai paraméterek megváltozása miatt a görbék között. Az A-18/26 pont esetében a 11. és 12. frekvencia között jelentkezik eltérés a behatolási mélységben, ami a 19. frekvenciánál eltűnik. A görbe legmélyebb részénél (20.–22. pontok) az eltérések már inkább zajból származnak, de itt sem zárható ki az anizotrópia hatása. Érdeemes megnézni, hogy a két görbe aránya mit eredményez, azaz mekkora lesz az irányok közötti anizotrópia.

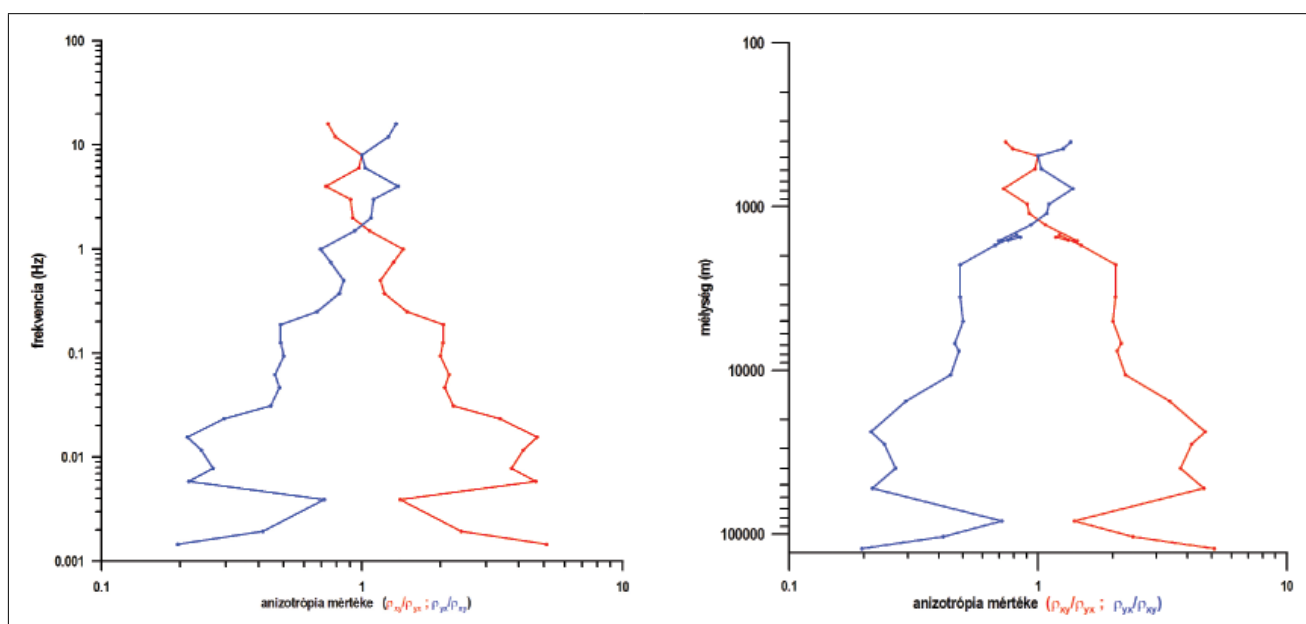
Még nincs tapasztalatunk az anizotrópia nagyságának megítélésében, de úgy tűnik, hogy az 50%-os eltérés (az anizotrópia 0,5–1,5 közé esik) még elfogadható, és nem jelez durva változást a földtani közegben, illetve a változás az elektromos vezetőképesség-változással megmagyarázható. Ezen az értéken felül viszont már 2D vagy 3D hatásokból származó anizotrópiára lehet gyanakodni, ami a határfelület mentén a mágneses permeabilitások arányában bekövetkező jelentős változást is jelezheti.

Egy ilyen hatást azonosíthatunk a 25. ábra piros anizotrópiagörbén, amely majdnem 3-szoros eltérést jelez a kétféle mérési irány között a frekvenciától (25. ábra, balra) és a mélységtől (25. ábra, jobbra) függően. A maximális anizotrópia az 1000–3000 m-es mélységtartományban (a 0,07–2 Hz frekvenciatartományban) jelentkezik. A 24. ábra is szépen mutatja ebben a mélységtartományban (frekvenciatartományban) az eltérést.



26. ábra | Az A-16/10 magnetotellurikus szondázás látszólagos fajlagosellenállás-görbéi

Figure 26 | Apparent resistivity curves of A-16/10 magnetotelluric sounding



27. ábra | Az anizotrópia mértéke az A-16/10-es szondázási görbéken frekvencia és Bostick-mélység szerint

Figure 27 | Extent of anisotropy on A-16/10 sounding curves depend on frequency and Bostick depth

Nézzünk meg egy másik példát is, a Necs-1 mélyfúrás környezetében! Ez a fúrás 1074 m-től 3760 m-ig miocén vulkanitot, majd 4000 m-ig kréta dioritot fúrt. Itt tehát durván 3000 m vastag összlet van magmás képződményekből, amelynek a felső része effuzív, alsó része intruzív.

A 26. ábra mutatja a fúrástól É-ra, 6 km távolságban mért A-16/10 MT szondázási pont látszólagos fajlagosellenállás-görbéit. A log-log skála mentén megjelenített szondázási görbén látszik az anizotrópia hatása miatti

szétnyílás, de a görbealakok alapján ez nem tűnik jelentősnek.

Ha azonban megvizsgáljuk az összetartozó értékeket, akkor a 13. értéktől jelentős eltérés van a különböző irányokban mért szondázási görbék között (ez mélységben is megjelenik, hiszen eltérő sorszámok vannak azonos mélységben). A megjelenített aránygörbéken (27. ábra) mindez már nagyon erősen jelentkezik és kb. ~2000 m-től 2-szeres, mélyebben még ennél is nagyobb anizotrópiát

jelezve. A 27. ábra bal és jobb oldala (azaz a frekvencia-ellenállás és a mélység-ellenállás görbék) között az is látszik, hogy mekkora torzulás adódik a közegparaméterektől függő változó behatolási mélységből.

## Összefoglalás

A magnetotellurikus módszer mért paraméterei ( $E_x$ ,  $E_y$ ,  $H_x$ ,  $H_y$ ,  $H_z$ ) esetén és a klasszikus feldolgozási képletek (homogénfáltér- és egydimenziós vagy rétegzett modell) miatt a dielektromos állandó és a mágneses permeabilitás szerepe eddig elhanyagolhatónak tűnt.

Korábbi cikkünkben (Kiss et al. 2020) bemutattuk, hogy két eltérő fizikai paraméterű közeg esetén a határátmeneti törvényszerűségek miatt a két közeg kontaktusa felett az elektromos vezetőképeség mellett a mágneses permeabilitás- és a dielektromos permittivitás-értékek megváltozásának mértéke (azok aránya) hatással van a magnetotellurikus mérés eredményeire. Ezt a TE és TM módú inverziós eredmények összevetéséből (anizotrópiamaximumok alapján) ismertük fel a CEL08 szelvény mentén.

Elméleti kutatások és numerikus modellezések alapján homogén féltérmodell esetén, a mágneses tulajdonságok megjelenése alapvetően növeli, de határfelületek mentén akár csökkentheti is a klasszikus módon kiszámolt impedanciát és ebből következően a látszólagos fajlagos ellenállást. Ez viszont azt jelenti, hogy egyes jól vezető zónák földtani értelmezése további lehetőségekkel, a mágneses és nem mágneses közeg kontaktzónájával bővül.

Az erősen mágneses és főleg a remanensen mágnesezett képződmények jelenlétekor ezekkel a hatásokkal a magnetotellurikus szondázásoknál – elsősorban a kontaktzónák környékén – számolni kell! A mágneses tulajdonságok a klasszikus magnetotellurikus feldolgozásokban hatással van a skinmélységre, az elektromágneses hullám terjedésére is, tehát a különböző irányokban végzett mérések behatolási mélysége is eltérő lesz.

A mágneses test jelenléte átfordíthatja a TE és TM polarizációs irányokat az anizotróphiahatás mellett. Egy erősen mágneses test az anomális mágneses terével, sokkal tágabb körben fejti ki hatását, mint a közeg mágneses közetfizikai tulajdonságai, így az elektromágneses tér torzulása nemcsak a test közvetlen környezetében, hanem a test által keltett mágneses erőter elérésekor (azaz tágabb környezetben) is érezhető lesz!

Elméleti megfontolások és numerikus modellezések eredményei után terepi görbéken, a látszólagos fajlagos ellenállások alapján is találtunk ilyen jellegzetességeket, és a CEL08 szelvényen a Kab-hegy mellett vagy a Nyír-ségben, a Napkor melletti vulkán kontaktzónájában (A-18 szelvény) és a Nagyecséd alatti vastag vulkáni összlet környezetében (A-16 szelvény). A szondázási görbék alapján kimutatható irányanizotrópia ilyen jelenségekre utal.

## Köszönetnyilvánítás

A közetfizikai paraméterek vizsgálatával a doktori képzés során kezdtem el komolyabban foglalkozni, s akkor jött a felismerés is, hogy a dolgok összefüggenek: pl. a szeizmikus hullámterjedési sebesség a sűrűséggel vagy a mágneses tulajdonságok az elektromágneses hullámterjedéssel. Nem haszontalan tehát ezekkel a kérésekkel foglalkozni.

A vizsgálatokban jó társakra találtam PhD-témavezetőm (Szarka László) és szerzőtársam (Prácsér Ernő) személyében, akiknek ezúton köszönöm meg az együttműködést. A velük folytatott konzultációk, beszélgetések gyakorlati példákon és az elméleten keresztül vezettek el miniket a magnetotellurika és a mágnesség kapcsolatához, kezdetben csak a Curie-hőmérséklet mélységében (Hopkinson-effektus), majd az elektromágneses tér elmélet elemzésének és a modellezésnek köszönhetően a remanens mágnesezettség „virtuális mágneses szuszceptibilitása” kapcsán a felszíni hatásokhoz. A téma azonban még most sem zárható le, mert még most is csak statikusan (skalárisan) vesszük figyelembe a fizikai paramétereket, miközben a gyakorlati példák alapján a mágneses és elektromágneses erők „dinamikus” kapcsolatban vannak egymással. Az anomális mágneses (indukált és/vagy remanens) tértől függ az elektromágneses tér torzulása és terjedési sebessége a közegben, amit most még nem tudunk figyelembe venni a magnetotellurikus mérések feldolgozása során.

Köszönet illeti cikkünk lektorait (Verő Lászlót és Turai Endrét), akik nyelvi botlásainkat, hibáinkat kijavították, és értékes megjegyzéseikkel növelték a cikk szakmai színvonalát.

## A tanulmány szerzői

Kiss János, Prácsér Ernő

## Jegyzetek

<sup>1)</sup> A fajlagos ellenállás egy adott homogén földtani közegre jellemző elektromos fizikai paraméter. A látszólagos fajlagos ellenállás az az ellenállás, amellyel az adott ponton, az adott frekvencián, a mérés behatolási mélységéig az adott heterogén közeget jellemezhetjük. A magnetotellurikus mérések eredményeként látszólagos fajlagos ellenállás szondázási görbéket kapunk, inverzió segítségével történik a látszólagos értékekből a közeg fajlagos ellenállásának meghatározása.

<sup>2)</sup> AniMax – anizotrópiamaximum.

<sup>3)</sup> Az indukált mágnesezettség során a külső földi mágneses tér a konszolidálódott, szilárd anyagban a mágneses domének irányba rendeződését idézi elő. Az anyag szilárdsága miatt itt meglehetősen korlátozott a mágneses domének mozgása, ezért inkább csak polaritásbeli átrendeződésről beszélhetünk.

Remanens mágnesezettség esetén viszont mindez képlékeny anyagban történik, ahol a mágneses domének fizikai mozgása is lehetséges, ezért sokkal nagyobb mértékű „térbeállítás” valószínűsíthető, azaz a domének a polaritásbeli rendezettség mellett effektív mozgással a legkedvezőbb, legkönnyebben felmágnesezhető irányba rendeződnek, ami általában a hossz tengelynek felel meg. Mágneses szempontból tehát egy rendezett,

azonos irányú mágneses doménszerkezet alakul ki. Ennek köszönhetően az indukáltnál sokkal erősebb remanens mágnesesség alakulhat ki.

### Hivatkozások

- Cagniard L. (1953): Basic theory of the magnetotelluric method of geophysical prospecting. *Geophysics*, 18, 605–635.
- Clark D. A. (1997): Magnetic petrophysics and magnetic petrology: aids to geological interpretation of magnetic surveys. *AGSO Journal of Australian Geology & Geophysics*, 17/2, 83–103.
- Hopkinson J. (1889): Magnetic and other physical properties of iron at a high temperature. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, A180, 443–465.
- Jankowski J., Tarlowski Z., Praus O., Pecova J., Petr V. (1985): The result of deep geomagnetic soundings in the West Carpathians. *Geophys. J. R. Astr. Soc.* 80, 561–574.
- Kiss J., Prácser E., Szarka L., Ádám A. (2010): Mágneses fázisátalakulás és a magnetotellurika. *Magyar Geofizika*, 51/2, 73–87.
- Kiss J., Szarka L., Prácser E. (2005a): Second order magnetic phase transition in the Earth. *Geophysical Research Letters*, 32, L24310, DOI: 10.1029/2005GL024199
- Kiss J., Szarka L., Prácser E. (2005b): A Curie-hőmérsékleti fázisátalakulás geofizikai következményei. *Magyar Geofizika*, 46/3, 102–110.
- Kiss J., Zilahi Sebess L., Szarka L. (2011): A mágnesség jelensége és a Hopkinson-effektus. *Magyar Geofizika*, 52/3, 151–169.
- Kiss J., Zilahi-Sebess L., Rádi K. (2020): MT mérési adatok nem hagyományos feldolgozása („AniMax” – anizotrópiamaximumok és analitikus fajlagos ellenállás). *Magyar Geofizika*, 61/3, 101–122.
- Kiss J., Vértesy L., Rádi K. (2021): Új ötletek az erőtér-geofizikai adatfeldolgozásban (esettanulmányok). ILP MNB online konferencia, 2021. február 10. [https://drive.google.com/drive/folders/1FU\\_87oWe3FFQ4bqv4ASStuDTuh1QnP5?usp=sharing](https://drive.google.com/drive/folders/1FU_87oWe3FFQ4bqv4ASStuDTuh1QnP5?usp=sharing)
- Nemesi L., Hobot J. (1981): A Tiszavidék és a Tiszántúl mélyszerkezetének geoelektromos kutatása. *Geofizikai Közlemények*, 27, 7–105.
- Nemesi L., Polcz I., Szeidovitz Gy.né, Stomfai R. (1996): ÉK-Magyarország vulkanikus kőzetei geofizikai mérések alapján. *Magyar Geofizika*, 37/3, 142–153.
- Rijo L. (2003): Magnetic static shift effects on 2-D TE magnetotelluric sounding. In: 8th International Congress of the Brazilian Geophysical Society, Rio de Janeiro 1, 1–6.
- Szarka L. (1988): A magnetotellurikus térösszefüggések fizikai jelentéséről. *Magyar Geofizika*, 29/5–6, 201–224.

# Vulkáni formáció szeizmikus leképezése egy Tokaj környéki kutatási területen CRS-összegzési eljárás alkalmazásával

KISS V.<sup>1</sup>, TAKÁCS E.<sup>2,@</sup>

<sup>1</sup>Miskolci Egyetem, Műszaki Földtudományi Kar, Geofizikai Tanszék,  
3515 Miskolc-Egyetemváros, A/2 épület, II. emelet

<sup>2</sup>Magyar Bányászati és Földtani Szolgálat,  
1145 Budapest, Columbus u. 17–23.

@E-mail: takacs.erno@mbfsz.gov.hu

Tanulmányunkban egy, a Tokaj várostól délre fekvő területen, a Taktaközben, végzett 2D szeizmikus reflexiók felmérés adatainak kísérleti újrafeldolgozását mutatjuk be. A szerkezetkutatási és geotermikus célú terepi méréseket, valamint az adatok korábbi feldolgozását és földtani értelmezését a Magyar Bányászati és Földtani Szolgálat (MBFSZ) hajtotta végre 2020-ban. A cikkben ismertetett újrafeldolgozás során először a hagyományos Közös Mélység Pont (CDP) szerinti összegzési eljárást alkalmaztuk. Ezután a miocén korú szekvencián belüli összetett (üledékes és vulkáni) földtani struktúrák jobb felismerése céljából egy új összegzési technikát, a Közös Reflexiók Felület (CRS) szerinti eljárást próbáltuk ki. Utóbbi elvégzéséhez feltétlenül szükséges egy hagyományos összegzéssel előállított végleges migrált szelvény, amely modell- (pilot-) szelvényként szolgál az újszerű reflexiók összegzés alkalmazása során. A tanulmány végén elemezzük az új módszer előnyeit a kutatási területen előforduló összetett miocén korú formációk esetében.

## Kiss, V., Takács, E.: Seismic imaging of a volcanic formation utilizing CRS stacking technique in a study area near the city of Tokaj

Results of an experimental 2D seismic reflection data reprocessing are presented from the area of Taktaköz, south from the city of Tokaj. Previous field survey, data processing and geological interpretation with the aim of structural and geothermal investigations were carried out by the Mining and Geological Survey of Hungary (MBFSZ) in 2020. In this study, the recent data reprocessing procedures, first the results of a conventional Common Depth Point (CDP) reprocessing is demonstrated. Later, the novel Common Reflection Surface (CRS) technique is advised to get higher quality images from the complex (sedimentary and presumably volcanic) formations of the Miocene sequence. To perform this novel stacking technique, a conventional final migrated stack is necessary which provides a model (pilot) section for the CRS processing. At the end of the study, advantages of CRS stacking are discussed from the viewpoint of imaging complicated geological formations in the Miocene sequence of the area of investigation.

*Beérkezett:* 2021. március 19.; *elfogadva:* 2021. június 16.

## Bevezetés

A geotermikus célú kutatások iránt napjainkban egyre nagyobb az igény, mivel a geotermikus energia részben megújuló és tiszta energiaforrás. A felszín alatti földtani felépítés többnyire ismeretlen, a feladat ennek feltérképezése többféle geofizikai módszer alkalmazásával (gravitációs és földmágneses térképezések, geoelektromos mérések, szeizmikus kutatások és mélyfúrás-geofizikai szelvényezések). Jelen tanulmányban egy Tokaj városához közeli 2D

szeizmikus szelvény mentén gyűjtött adatok újszerű reflexiók feldolgozásával foglalkoztunk. A szeizmikus felmérést, a korábbi adatfeldolgozást és földtani értelmezést a Magyar Bányászati és Földtani Szolgálat (MBFSZ) végezte el a 2020. évben.

A tanulmányban közölt kísérleti adatfeldolgozásunk során először a hagyományos Közös Mélység Pont (CDP) szerinti eljárást alkalmaztuk. Ezután a szeizmikus kép pontosabb tétele és főleg a miocén korú szekvencián belüli összetett földtani struktúrák egyértelműbb fel-

**I. táblázat** A szeizmikus felmérés legfontosabb paramétereit (az MBFSZ szívességéből)

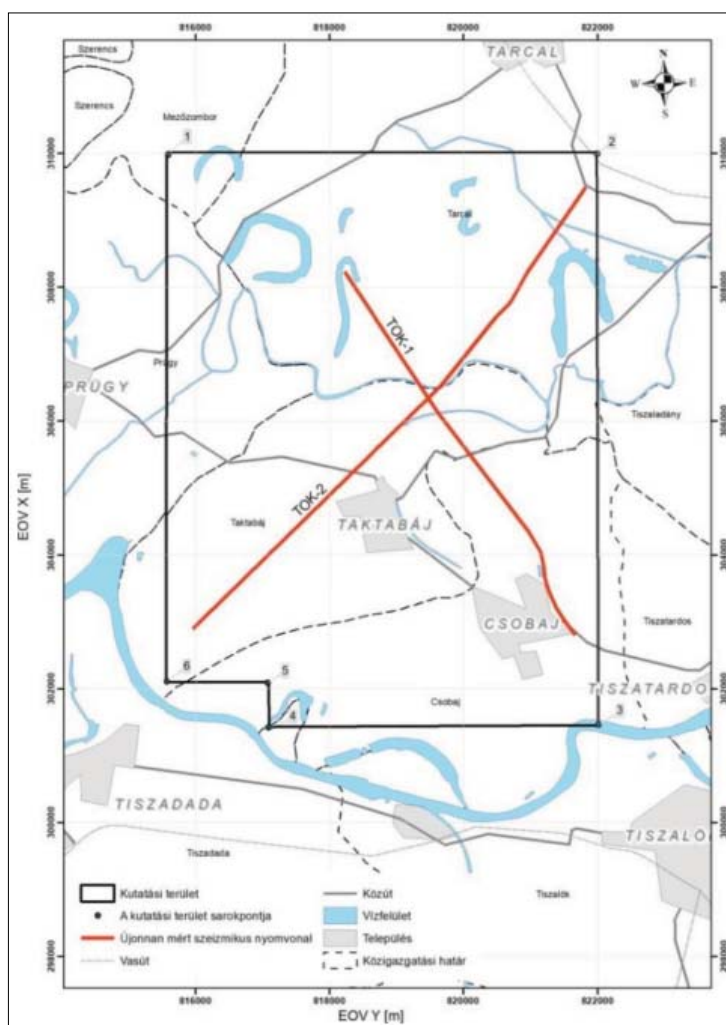
Table 1	The most important field survey parameters (by courtesy of MBFSZ)
Csatornaszám	500
Geofontávolság	10 m
Forrástávolság	10 m
Névleges fedésszám	250
Beterített földrajzi távolságok	TOK-1: 6111 m TOK-2: 8847 m
CDP-távolság	5 m
Minimális forrás–geofon távolság	2,5 m
Maximalis forrás–geofon távolság	2475 m
Sweepfrekvencia	10–100 Hz (lineáris)
Felvételhossz	4 s
Időbeli mintavétel	1 ms

ismerése érdekében egy viszonylag új technikát, a Közös Reflexiós Felület (CRS) szerinti összegzés módszerét használtuk. Megjegyezzük, hogy a kutatási területen két szelvény reflexiós adatai állnak rendelkezésre (TOK-1 és TOK-2), azonban ebben a tanulmányban részletesen csak a TOK-1 szelvény mentén elért eredményekkel foglalkozunk. Mindemellett elkészült a másik szelvény adatainak CRS összegzési eljárással való újrafeldolgozása is (Kiss 2021).

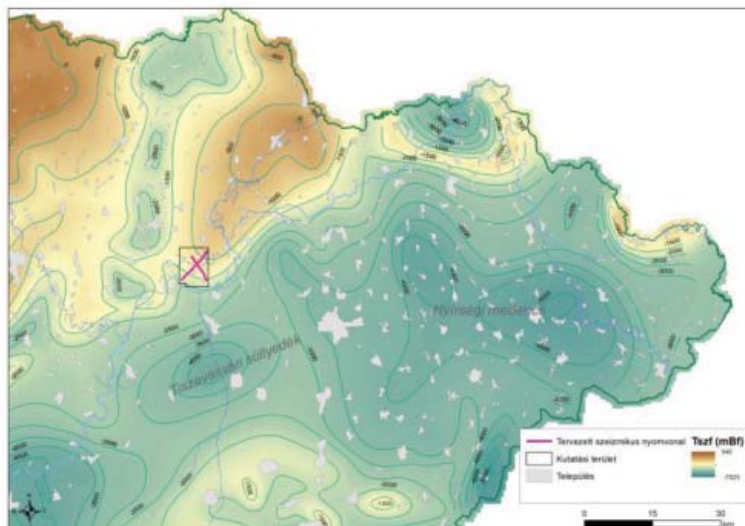
A terepi mérések legfontosabb paramétereit és a szelvények helyszínrajzát az 1. táblázatban, illetve az 1. ábrán mutatjuk be.

## Földtani környezet

A kutatás helyszíne Borsod-Abaúj-Zemplén megyében a Tokaj, Tarcál, Taktabáj és Csobaj települések által határolt kb. 54 km<sup>2</sup>-es terület, amely a Tisza árterén (Taktaköz) található 90–95 m-es tengerszint feletti magasságú síkság. A felszíni topográfia miatt gyakoriak a rossz lefolyású terü-

**1. ábra** A 2D szeizmikus szelvények helyszínrajza (az MBFSZ szívességéből)**Figure 1** Location map showing the 2D seismic profiles (by courtesy of MBFSZ)





**2. ábra** | A kutatási terület a prekainozoos medencealjzat-domborzatának térképén (az MBFSZ szívésségéből)  
**Figure 2** | Location of the study area on the topography of pre-Cenozoic basement (by courtesy of MBFSZ)

letek, melyek jelentősen megnehezítették a terepi mérések kivitelezését (Bauer et al. 2020).

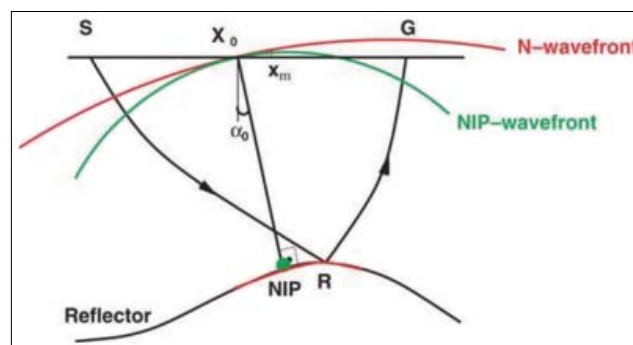
Tokaj térségében a geotermikus gradiens értéke viszonylag magas, ezért a terület adottságai miatt alkalmas lehet a geotermikus energia hasznosítására, kisebb hőigényű létesítmények energiaellátására. A jelen tanulmányban különböző kifejlődésű üledékes és feltételezhetően vulkáni formációk kerülnek bemutatásra. A két köztegyütttes hidrogeológiai tulajdonságai eltérőek, így az üledékes és a vulkanikus kőzettestek lehatárolása nyilvánvalóan fontos feladat a geotermikus kutatás szempontjából. Sajnos a kutatási területen 500 m-nél mélyebb fúrási adatok nem állnak rendelkezésre. Az MBFSZ által 2020-ban mért szeizmikus adatok azonban így is lehetőséget nyújtottak a terület földtani képződményeinek részletesebb megismerésére, a geológiai formációk dőlésének és szerkezetének meghatározására, az üledékes és a lehetséges vulkáni képződmények lehatárolására, illetve vetők kimutatására (Bauer et al. 2020). A kutatási terület tágabb környezetét a 2. ábrán közöljük.

### A CRS adatfeldolgozás

A Közös Reflexiós Felület (CRS) szerinti összegzési eljárást olyan bonyolult szerkezetű geológiai szerkezetek szeizmikus leképezésére fejlesztették ki, amelyekre a hagyományos Közös Mélység Pont (CDP) szerinti összegzés nem adhat kellően pontos képet. A hagyományos eljárás alkalmazásával jól leképezhetőek a szelvény menti földtani szerkezetek egyértelmű vonásai. A képalkotási lehetőségek, a reflektorok koherenciája azonban nem megfelelőek a meredek dőlésű (vagy például gyűrt) földtani formációk esetén. Ilyenkor a jel/zaj viszony lecsökken, ezért a reflektorok helyenként nem jól láthatók, és gyakran megszakad a folytonosságuk. Ennek oka, hogy nagyobb dőlésű határfelületek esetén a szeizmikus hullámok nem egy-

egy pontról (CDP), hanem elemi felületekről (CRS) tükröződnek vissza, ami azonban figyelembe vehető az egyedi csatornák összegzésekor, ahogy azt a későbbiekben részletezzük.

A CRS összegzési technikát az 1990-es évek végén vezették be azzal a céllal, hogy jó minőségű képeket kapjunk a fent említett geológiai szerkezetekről. A reflektált hullámok menetidőinek kiszámításához a CRS-eljárás három hullámtér-attribútumot alkalmaz, amelyek geometriai optikai alapon határozhatók meg. Mindhárom paraméter a reflektált hullámfrontokkal van összefüggésben (Hubral, Krey 1980, Hubral 1983, Höcht et al. 1999, Jäger 1999). Ezek az alapvető attribútumok a „nullaoffsetű sugár” felzési beérkezési szöge, a „normál beesési pont (NIP)



**3. ábra** | CRS attribútumok: 1) A „nullaoffsetű sugár” beérkezési szöge ( $\alpha_0$ ). 2) A „normál beesési pont (NIP) hullám” frontjának görbülete (zölddel jelölve), amely az  $X_0$  pontból a NIP pontba halad és az  $X_0$  pontba verődik vissza. 3) A „normál (N) hullám” frontjának görbülete (pirossal jelölve), amely a forrásból (S) indul, az R pontról verődik vissza és a geofonhoz (G) érkezik be (Mandal et al. 2014)

**Figure 3** | CRS attributes: 1) Emergence angle ( $\alpha_0$ ) of the zero-offset central ray. 2) Curvature of the NIP-wavefront (marked with green) of the central-ray going from  $X_0$  to NIP and reflecting back to  $X_0$ . 3) Curvature of the N-wavefront (marked with red) of the normal-ray going from the source (S) to the receiver (G) reflecting at the location of R (Mandal et al. 2014)

hulám” frontjának a görbülete és a „normál (N) hullám” frontjának a görbülete, amelyeket a 3. ábra szemlélteti (Landa et al. 1999, Mandal et al. 2014). A CRS-adatfeldolgozás során ez a három paraméter automatikus koherenciaanalízissel számítható, analitikus trajektóriákat illesztve az összegzés előtti CDP-gyűjteményekre.

A fenti sugárelmélet a reflektált beérkezésekre matematikailag az alábbi formában adható meg (Mann et al. 1999, Jäger et al. 2001, Menyoli 2002):

$$t^2(x_m, P) \approx \left[ t_0 + \frac{2 \sin \alpha_0}{v_0} (x_m - x_0) \right]^2 + \frac{2 t_0 \cos^2 \alpha_0}{v_0} \left[ \frac{(x_m - x_0)^2}{R_N} + \frac{h^2}{R_{NIP}} \right],$$

ahol  $t$  a menetidő,  $t_0$  a „nullaofsztetű menetidő”,  $x_0$  a „nullaofsztetű sugár” beékezési helye a felszínen,  $h$  a féltávolság a forrás és a vevő között,  $x_m$  a középpont koordinátája és  $v_0$  a felszínközeli sebesség. Az  $\alpha_0$ ,  $R_{NIP}$  és  $R_N$  paraméterek a fentebb megnevezett CRS-attribútumokat jelentik. Az újszerű eljárásnak számos előnye van szerkezetileg bonyolult geológiai viszonyok esetén. Egyrészt magasabb jel/zaj viszony érhető el a hagyományos CDP-összegzéshez képest, másrészt pedig a reflexiós felületeket pontosabb geometriával lehet leképezni, mivel a CRS-algoritmus figyelembe veszi a reflektorok dőlését.

A geometriai optika alapján kidolgozott módszer (Common Reflection Surface stacking) másik újdonsága, hogy olyan mélységben vátozó méretű elemi felületeket használ a szeizmikus csatornák összegzéshez (Hubral 1999, Jäger 1999, Mann et al. 1999, Yilmaz 1999, Jäger et al. 2001,

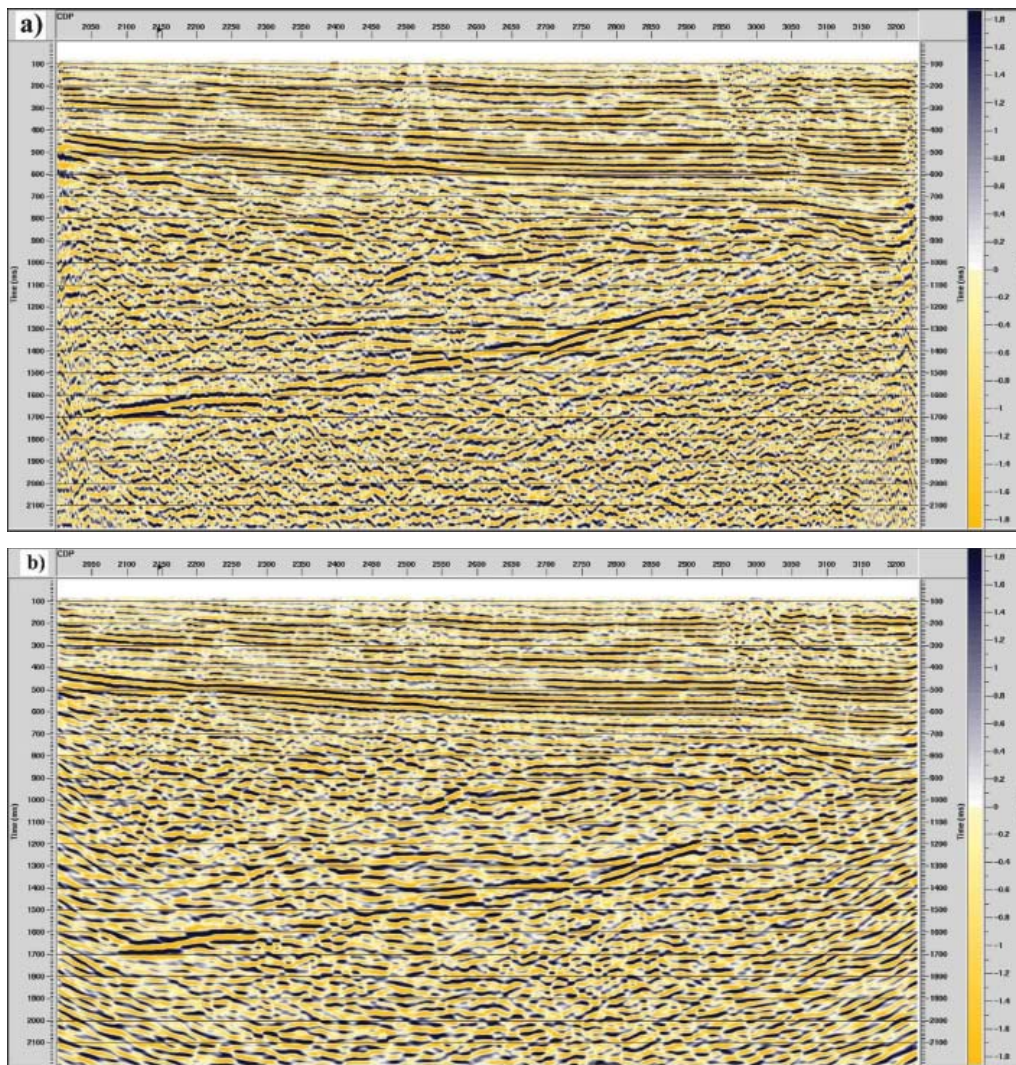
Menyoli et al. 2004), amelyek több reflexiós pontot foglalnak magukban, mint a hagyományos CDP szerinti összegzés.

A CRS-módszer alkalmazása a gyakorlatban két teljes és egymásra épülő feldolgozási folyamatot igényel. Minden CRS összegszelvény előállításához *először egy modellszelvényt kell előállítani*, a hagyományos CDP szerinti összegzési technikával és az utána végrehajtott migrációval. Ez a (pilot-) szelvény lesz az egyik bemenet a későbbi CRS-összegzéshez. A „pilot”-szelvény alapján lehetővé válik a reflexiós felületek dőlésének meghatározása, változó dőlésű egyeneseket illesztve a szelvény minden egyes mintavételi helyén és automatikus koherenciaanalízist alkalmazva (CRS  $Z_0$  Search). Ez az egyik kritikus adatfeldolgozási lépés, melynek megbízhatóságát a dölésekkel együtt számított Semblance-együtthatók segítségével ellenőrizhetjük. A dőlésmeghatározás jelentősége egyrészt az, hogy a dölt (vagy görbült) reflektorokon meg lehet határozni a merőleges beesésű visszaverődési pontok (NIP) helyzetét. Másrészt pedig a kapott értékeket a későbbi CRS-összegzés során figyelembe lehet venni az NMO-korrekción (valójában DMO-korrekción) végrehajtásakor.

A CRS összegszelvény előállításához szükséges *második adatfeldolgozási folyamat* maga a CRS szerinti összegzés (CRS Stack), melynek bemenetei a döléstáblázat és a hagyományos előfeldolgozási eljárással kapott, NMO-korrekción nélküli CDP-gyűjtemények összessége. Itt kritikus paraméter a mélységfüggő CRS operátor mérete, vagyis az a távolság, amelyen belül az összegzés történik. Ezt a paramétert a mélység (kétszeres futási idő) függvényében gondosan elvégzett tesztekkel lehet meghatározni, melyeknél a horizontális felbontóképességgel összefüggő

2. táblázat | A hagyományos CDP szerinti újrafeldolgozás lépései  
Table 2 | Steps of the conventional CDP data reprocessing

Sorszám	Adatfeldolgozási művelet	Megjegyzés
1.	Csatornaszerkesztések	KILL
2.	Automatikus erősítésszabályozás	ablakhossz: 250 ms
3.	Sávszűrés	6–10–60–70 Hz
4.	Hanghullámelnnyomás	sebesség: 340 m/s
5.	Jósló dekonvolúció	jóslási távolság: 16 ms
6.	Refrakciós statikusok alkalmazása	–
7.	Sávszűrés	6–10–60–70 Hz
8.	RMS sebességtér bevitelle	–
9.	Normál kilépési korrekció	–
10.	Automatikus erősítésszabályozás	ablakhossz: 250 ms
11.	Időben változó trim statikusok	fél ablakhossz: 100 ms
12.	Csatornaszerkesztések	MUTE
13.	CDP szerinti összegzés	–
14.	F-X dekonvolúció	ablakméret: 10 csatorna × 300 ms
15.	Időben és térben változó sávszűrés	16–20–40–50 Hz és 6–10–40–50 Hz
16.	Összegzés utáni időmigráció	Kirchhoff-féle algoritmus



4. ábra A végleges CDP-szelvények; a) végleges összszelvény, b) végleges migrált (pilot-) szelvény  
 Figure 4 Final CDP sections; a) final stack, b) final migrated stack (pilot section)

Fresnel-zóna sugarából célszerű kiindulni. Az eddigi tapasztalatok azt mutatják, hogy tanácsos ennél lényegesen kisebb méretű CRS operátorokat használni a túlságosan kevert és simított reflexiós kép elkerülése érdekében.

### A TOK–1 szelvény adatainak kísérleti újrafeldolgozása

A hagyományos CDP szerinti újrafeldolgozás során a korábbi feldolgozási folyamatból (2020) átvettük a zajos terepi csatornák kijelöléseit, a refrakciós statikus korrekció értékeit és a reflexióssebesség-analízis eredményeit. A modellszelvény előállítás céljából a 2. táblázatban közölt feldolgozási lépéseket hajtottuk végre. Az adatfeldolgozási folyamatban a legfontosabb változtatás az volt, hogy a korábbi spiking dekonvolúció helyett, részletes tesztek után jósló dekonvolúciót alkalmaztunk (5. feldolgozási lépés). Ennek megfelelően lejjebb vittük a szűrőparamétereket (3., 7. és 15. lépések), mivel elsődleges célunk a szel-

vény menti alacsonyabb frekvenciás és feltételezhetően vulkáni eredetű miocén formáció leképezésének javítása volt.

A fenti adatfeldolgozás eredményeként a 4. ábrán látható reflexiós szelvényeket kaptuk, melyek közül a migrált változat szolgált modellszelvényként a későbbi CRS-feldolgozáshoz.

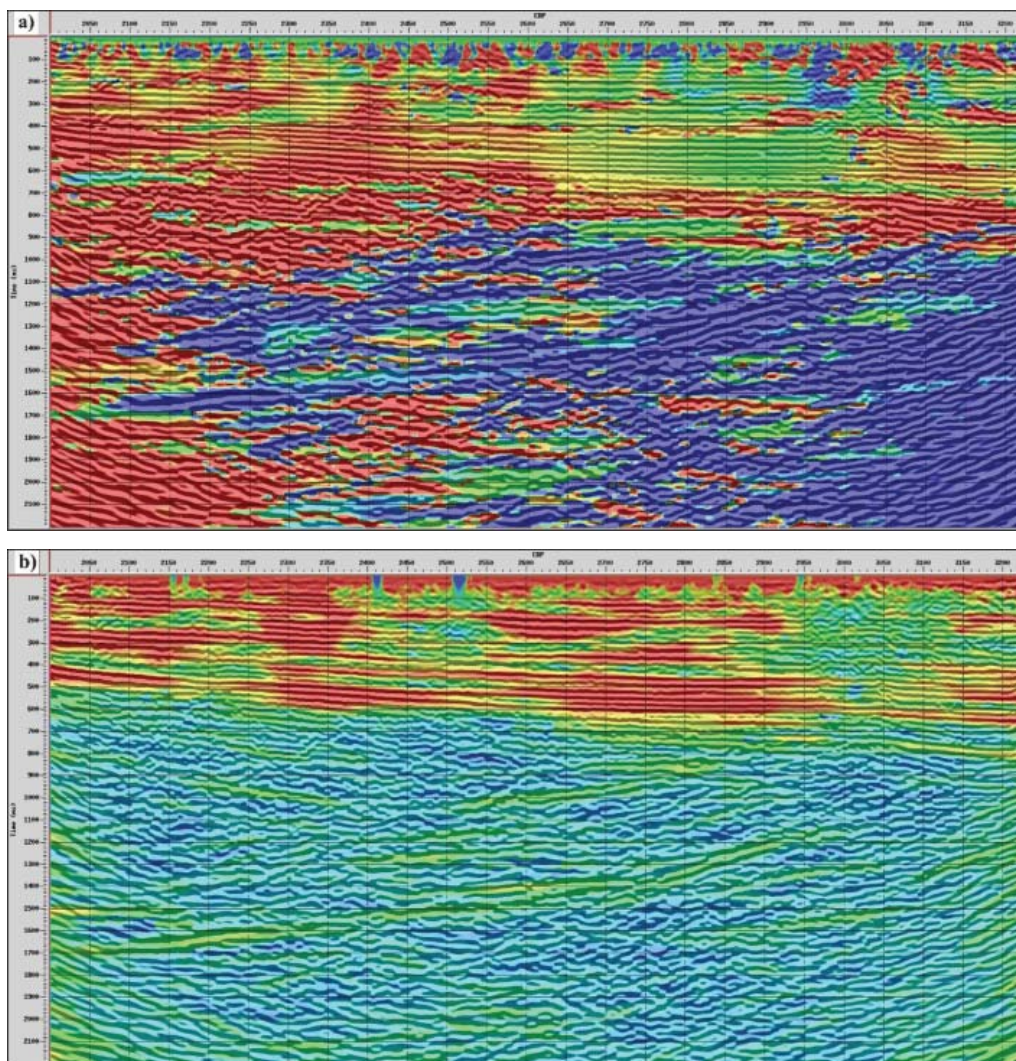
Az újszerű CRS szerinti feldolgozás végrehajtásához a 3. táblázatban feltüntetett lépéseket alkalmaztuk továbbra is a ProMAX szeizmikus adatfeldolgozó rendszer használatával (Landmark Graphics Corporation). Megjegyezzük, hogy a 100 ms szélességű időablakkal elvégzett AGC-műveletet (1. adatfeldolgozási lépés az alábbi táblázatban) csak a dőlésszámítás megbízhatóságának növelése érdekében használtuk, és a tényleges feldolgozási folyamatban sehol nem alkalmaztunk ilyen kis szélességű időkaput amplitúdószabályozás céljából.

A dőlésszámítás (2. lépés a fenti táblázatban) eredményeit, a dőlésértékeket és Semblance-együtthatókat az 5. ábrán mutatjuk be. A dőlésszelvényen a pozitív dőlésű reflexiós események piros, a negatív dőlésűek kék, a közel

**3. táblázat** | Az újszerű, CRS szerinti adatfeldolgozás lépései  
**Table 3** | Steps of the novel CRS data processing

Adatok és feldolgozási műveletek	Megjegyzés	
– Modellszelvény (migrált CDP-időszelvény)	Bemenő adatok	
1. AGC 100 ms időablakkal (később eltávolítva)	Adatfeldolgozási műveletek	
2. Dőlésszámítás ( <i>CRS Z<sub>0</sub> Search</i> )		
– Dőlés- és Semblance-együttható-táblázatok	Kimenő adatok	
– Előfeldolgozás során nyert CDP-gyűjtemények NMO-korrekció előtt, valamint dőléstáblázat és RMS-sebességtér	Bemenő adatok	
3. CRS szerinti összegzés ( <i>CRS Stack</i> )	Adatfeldolgozási műveletek	
4. F-X dekonvolúció		
5. Időben és térben változó frekvenciaszűrés		
6. Összegzés utáni Kirchhoff-féle időmigráció		
– Migrált CRS-időszelvény		Kimenő adatok

vízszintes események pedig zöld színnel (azok árnyalataival) jelennek meg. A Semblance-együtthatók estén piros árnyalatok jelzik a magasabb, a kékek pedig az alacsonyabb értékeket, azaz a dőlésszámítás megbízhatóságát.



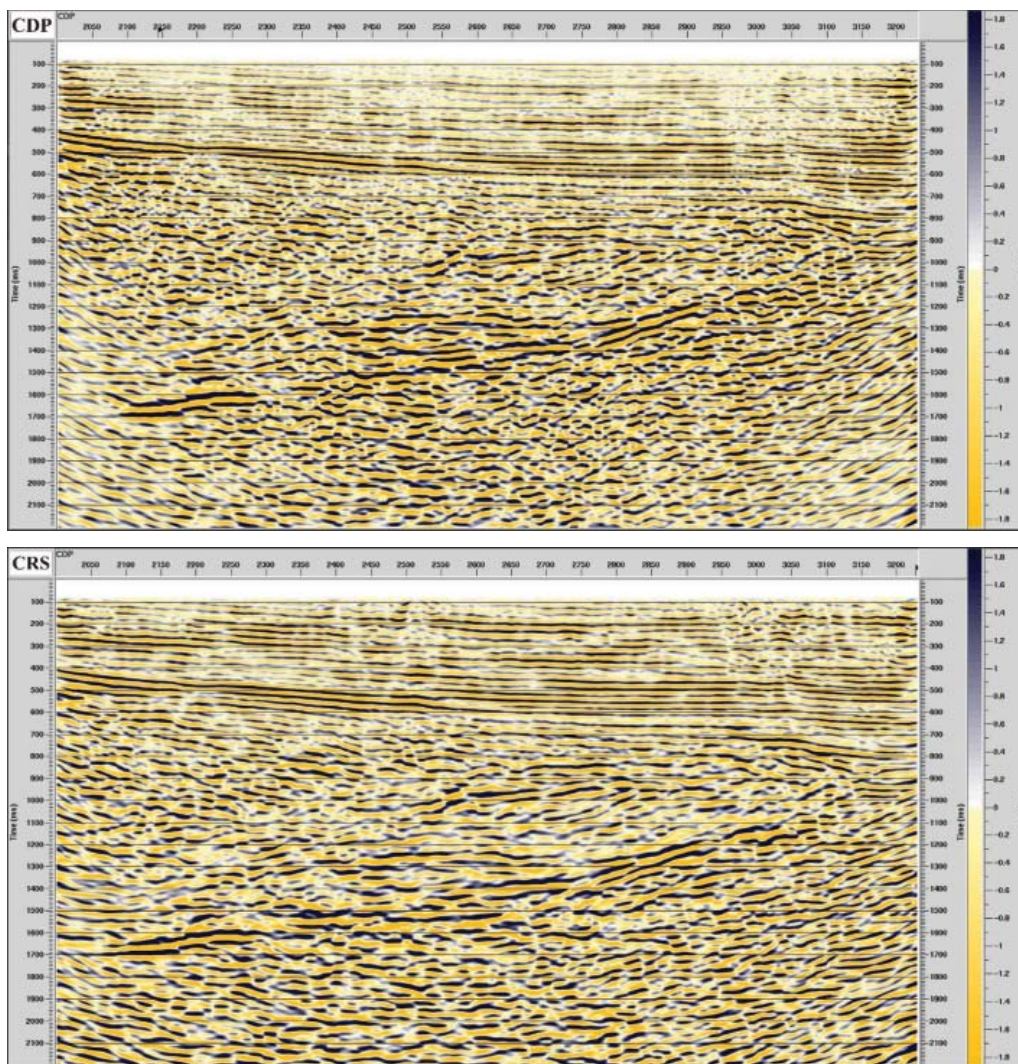
**5. ábra** | A modellszelvényre számított CRS-attribútumok; a) dőlés értékek, b) Semblance-együtthatók (a színskálákat a szövegben magyarázzuk)  
**Figure 5** | CRS attributes calculated on the pilot section; a) dip, b) Semblance-coefficients (color scales are explained in the text)

4. táblázat | A Fresnel-zóna sugara és a CRS-összegzési operátor mérete a mélység függvényében  
 Table 4ga | Radius of the Fresnel-zone and the size of CRS stacking operator versus depth

Idő [ms]	Mélység [m]	Sebesség [m/s]	Frekvencia [Hz]	Fresnel-zóna sugara [m]	CRS operátor mérete [m]
0	0	1800	-	-	75
300	307	2045	32	99	95
950	1140	2400	26	229	130
1800	2565	2850	19	439	170
3000	5198	3465	12	866	225

A dőlésszámítást (*CRS Z<sub>0</sub> Search*) célszerű a ProMAX modulban paraméterezzhető értékek szisztematikus változtatásával végrehajtani mindaddig, amíg elfogadhatóan magas Semblane-együtthatókat kapunk. Megjegyezzük, hogy az ábrán bemutatott attribútumok önmagukban is hasznos (nem szokványos) előzetes betekintést nyújtanak a szelvény mentén harántolt földtani formációk szerkezetébe.

A korábban említett másik kritikus paramétert, azaz a CRS-összegzési operátor optimális méretét (3. lépés a fenti táblázatban) számos teszt elvégzésével kaptuk meg. Ez a paraméter határozza meg, hogy különböző mélységekben milyen távolságon belül történik az összegzés. A Fresnel-zóna sugarából (horizontális felbontóképesség) célszerű kiindulni, amely a mélységtől, az aktuális sebességtől és a frekvenciától függ. A CRS operátorok méretét minden



6. ábra | A végleges migrált CDP- és CRS-szelvények összehasonlítása (a kétféle adatfeldolgozás lépéseit a 2. és 3. táblázatban részleteztük)  
 Figure 6 | Comparison of the final migrated CDP and CRS stacks (steps of the two kinds of data processing are specified in Table 2 and 3)

mélységben kisebbre választottuk, mint a Fresnel-zóna sugara, elkerülve ezzel a túlzott keverési hatást a CRS szerinti összegzés során (4. táblázat).

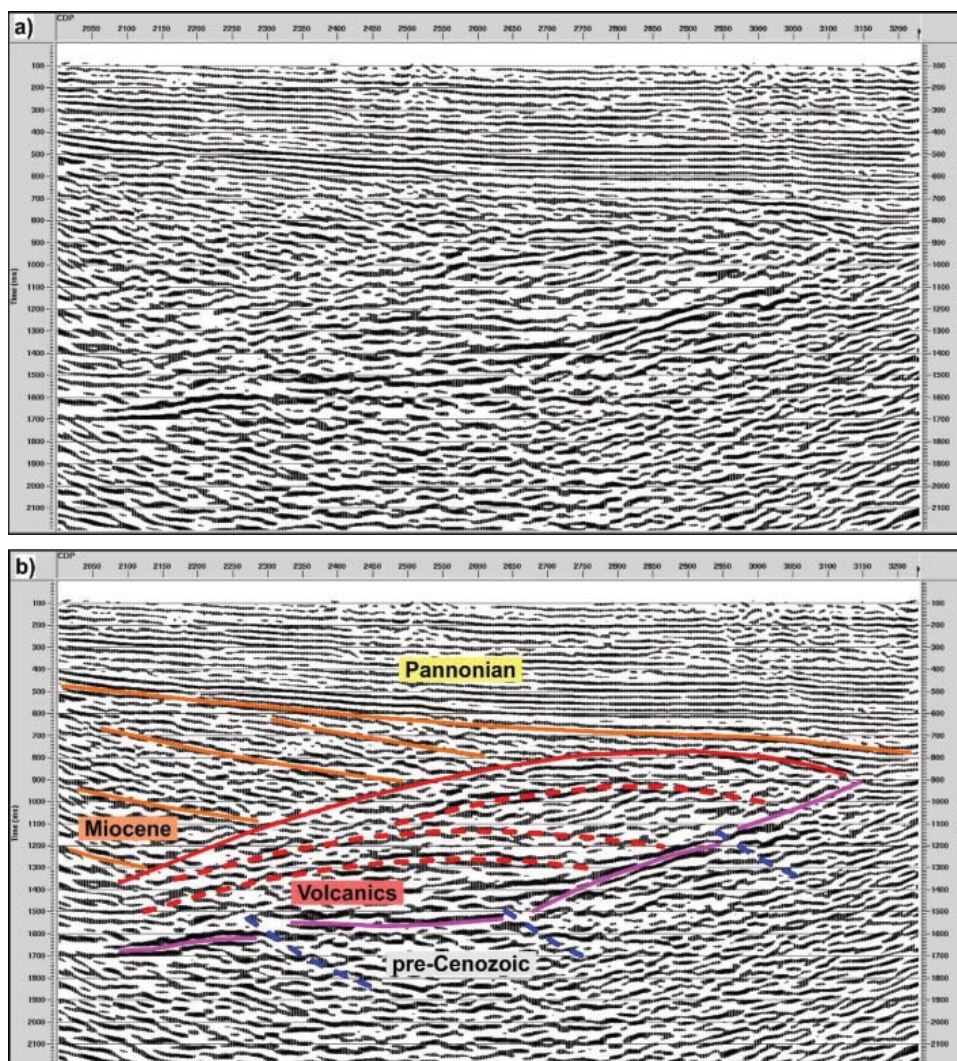
A hagyományos CDP szerinti és az újszerű CRS-eljárás eredményeként kapott végleges migrált összegszelvények a 6. ábrán hasonlíthatók össze.

### Földtani-szerkezeti értelmezés

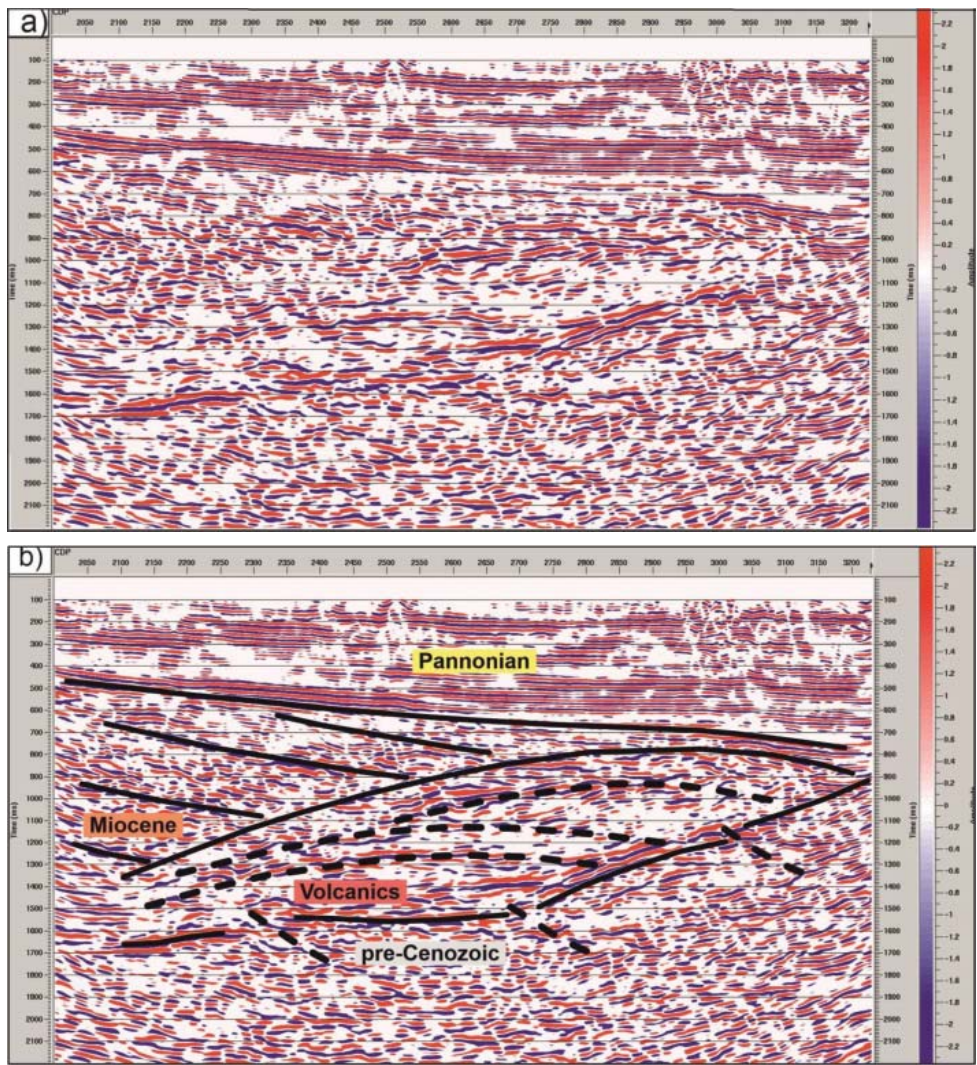
Az új összegzési eljárás lehetővé tette a miocén korú üledékek és egy feltételezhetően vulkáni eredetű képződmény közötti diszkordanciafelület kijelölését, valamint biztosította a vulkáni formáció belső szerkezetének elemzését. Ezenkívül a prekainozoos aljzat felszíne is jobban követhetővé vált ahhoz képest, mint az a hagyományos CDP-szelvényen korábban megfigyelhető volt.

A 7. ábrán a migrált CRS-időszelvény földtani értelmezését közöljük fekete-fehér megjelenítésű szelvényen. Jelöltük a pannon korú üledékek fekvését, a miocén korú képződményeken belül az üledékes és feltételezhetően vulkáni eredetű képződmények határát, valamint a feltételezett vulkáni formáció lehetséges belső szerkezetét. Utóbbi a vizsgált területtől észak-keletre elhelyezkedő egykori ciklikus vulkáni működéssel lehet összefüggésben (lávafolyások és törmelékzórások). A tanulmány tárgyát képező CRS szerinti összegzés eredményeként sikerült néhány prekainozoos, a szelvény síkjában alacsony dőlésű, valószínűsíthetően feltolódásos vetőt is bejelölni. Ezek a hagyományos CDP szerint összegzett szelvényen nem voltak szembetűnőek. Hangsúlyozzuk, hogy a kutatási területen mélyfúrási adatok nem álltak rendelkezésre.

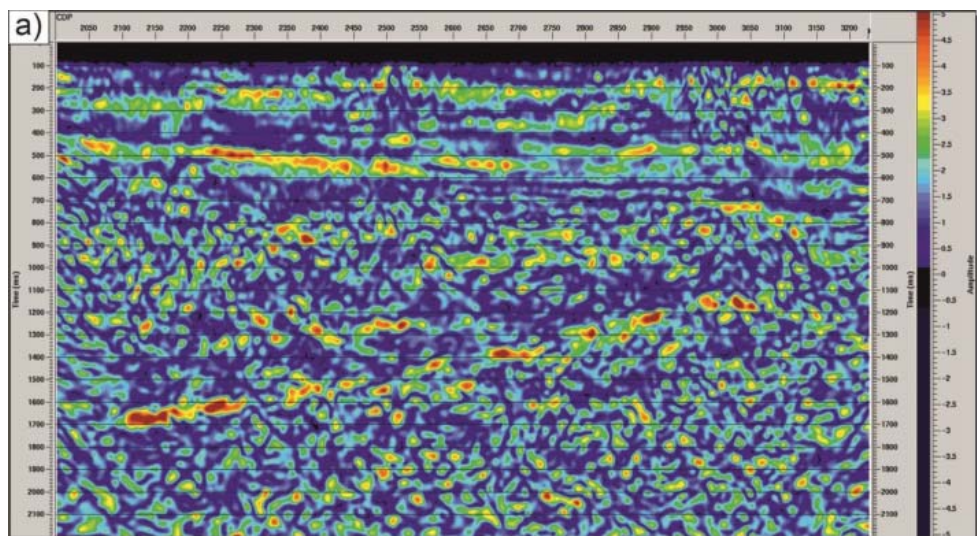
A 8–11. ábrákon a migrált CRS-időszelvény néhány olyan jellemző szeizmikus képét mutatjuk be színes megjelenítéssel, amelyek elősegítették a földtani-szerkezeti értelmezést. A „dB” szelvény decibel skálával jeleníti meg az amplitúdókat és az 1 dB-nél kisebb értékeket nullával helyettesíti (ezáltal eltávolítja a maradék véletlen zajokat). A „reflexióerősség” attribútum segítette a különböző reflektivitású zónák és blokkok elkülönítését. A „pillanat-



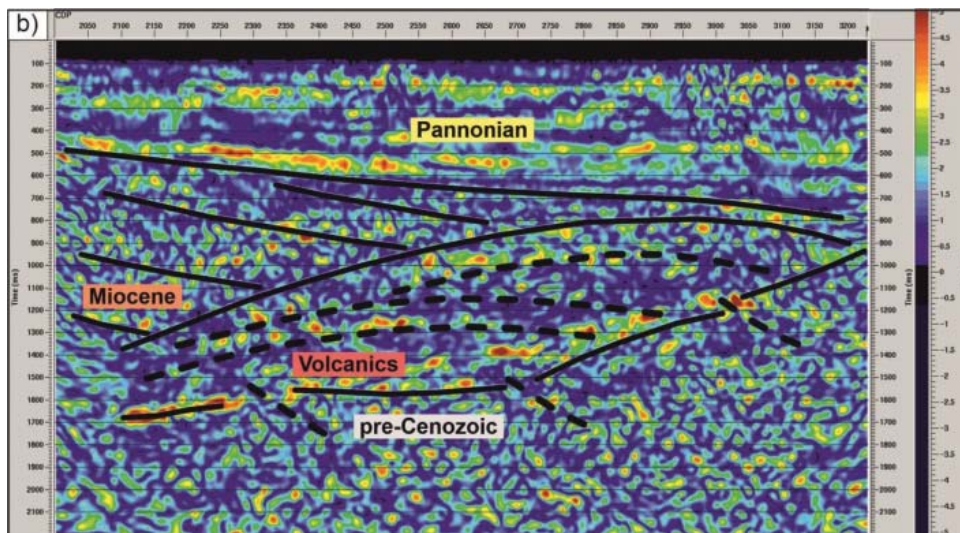
7. ábra | Földtani-szerkezeti értelmezés a fekete-fehér megjelenítésű migrált CRS-szelvényen; a) értelmezetlen változat, b) értelmezett változat  
Figure 7 | Geological-structural interpretation on the migrated CRS stack (black & white representation); a) uninterpreted version, b) interpreted version



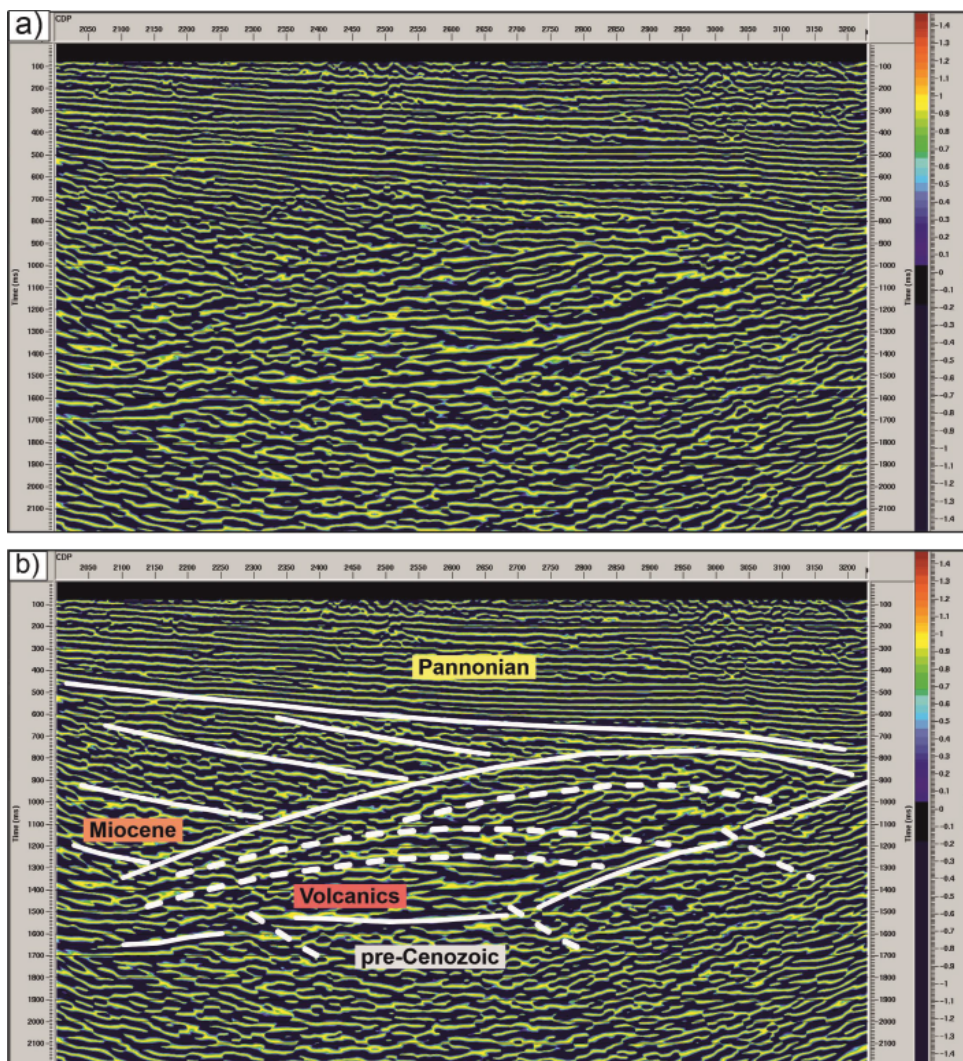
8. ábra | Decibel (dB) szelvény (migrált CRS-összszelvény); a) értelmezetlen változat, b) értelmezett változat  
 Figure 8 | Decibel (dB) section (migrated CRS stack); a) uninterpreted version, b) interpreted version



9a. ábra | Reflexióerősség-attribútum szelvény (migrált CRS-összszelvény); a) értelmezetlen változat  
 Figure 9a | Reflection strength attribute section (migrated CRS stack); a) uninterpreted version

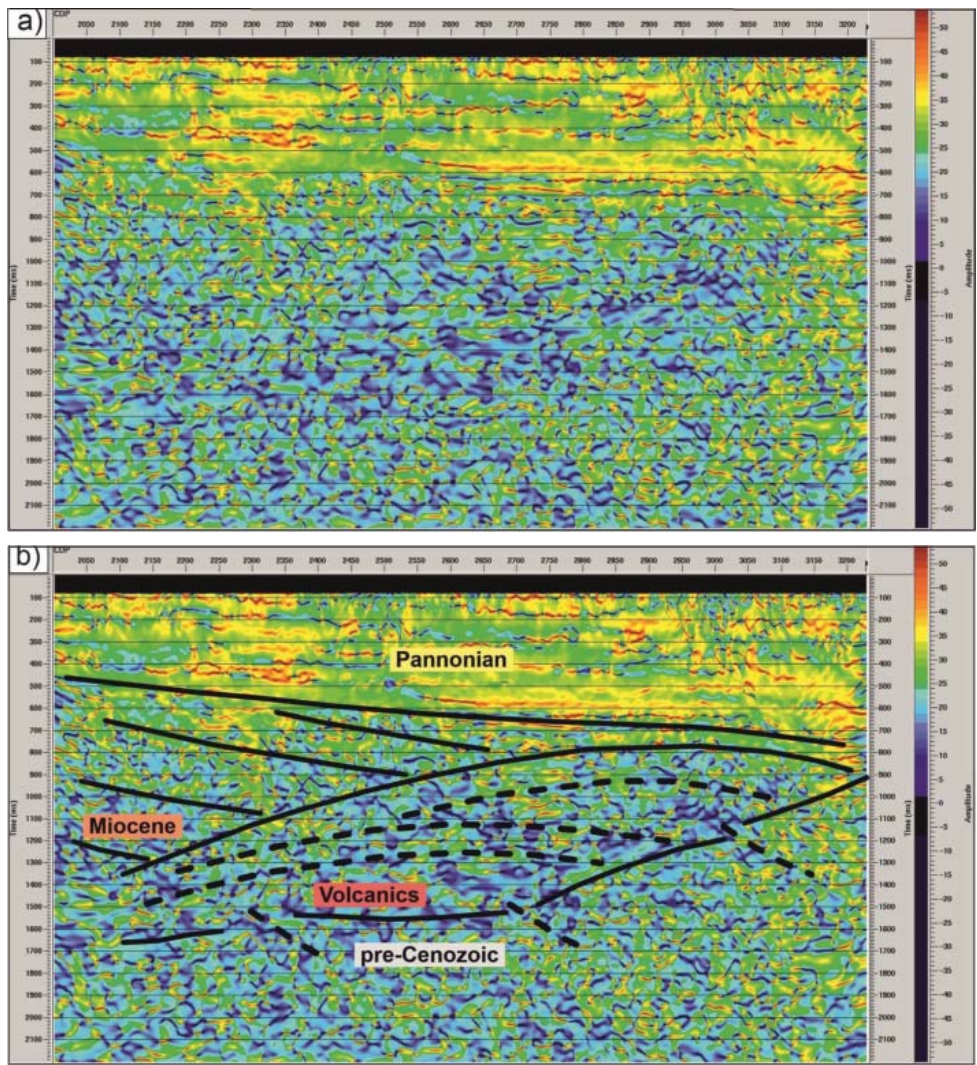


9b. ábra | Reflexióerősség-attribútum szelvény (migrált CRS-összegekszvény); b) értelmezett változat  
 Figure 9b | Reflection strength attribute section (migrated CRS stack); b) interpreted version



10. ábra | Pillanatnyifázis-attribútum szelvény (migrált CRS-összegekszvény); a) értelmezetlen változat, b) értelmezett változat  
 Figure 10 | Instantaneous phase attribute section (migrated CRS stack); a) uninterpreted version, b) interpreted version





11. ábra | Pillanatnyifrekvencia-attribútum szelvény (migrált CRS-szelvény); a) értelmezetlen változat, b) értelmezett változat  
 Figure 11 | Apparent frequency attribute section (migrated CRS stack); a) uninterpreted version, b) interpreted version

nyi fázis” attribútum, mivel független a reflexiós energiától, lehetővé tette az alacsony reflektivitású horizontok követését és a feltételezett vulkáni objektum belső szerkezetének tagolását. Végezetül a „pillanatnyi frekvencia” attribútum megkönnyítette a szelvény különböző frekvenciájú zónáinak megjelenítését. A fenti attribútumok alapján megállapítható, hogy a feltételezett vulkáni képződmény belseje helyenként magas reflektivitású beérkeztetőrétegekkel és általában véve alacsony frekvenciás képpel jellemezhető. Fontos megjegyezni, hogy a fenti szelvényváltozatokon értelmezett vulkanit jelenlétét, a hullámkép sajátosságain kívül, a *reflexiósszebesség-analízis során kapott magas értékek* is megerősítik.

### Következtetések

A cikkben közölt eredmények a TOK-1 jelű reflexiós szelvény példáján keresztül bemutatják a 90-es évek végén kidolgozott CRS-összegzési eljárás alkalmazásának előnyeit

egy hazai kutatási területen. Az újszerű algoritmus egyrészt kezelni tudja a dőlt reflektorokat, másrészt pedig a dolgozatban részletezett feltételek mellett több szeizmikus csatornát összegez, mint a hagyományos CDP-módszer, és így növeli a szelvény jel/zaj viszonyát (Jäger 1999, Yilmaz 1999, Jäger et al. 2001, Menyoli et al. 2004). Mindezek eredményeként jobb minőségű reflexiós képeket nyerünk olyan összetett földtani szerkezetek esetén, mint például a jelen tanulmányban tárgyalt Tokaj-hegység előterében, vagy akár a nyírségi vulkanitok és a Nyugat-Mecsek területén végzett korábbi vizsgálataink során is (Takács et al. 2016, 2018).

A CRS szerinti összegzés a megnövelt jel/zaj viszony által koherensebb, azonban simítottabb (kevertebb) képet eredményez, mint a hagyományos CDP szerinti eljárás. Néhány finomabb részletet elveszíthetünk a szeizmikus szelvényen (például kis elvetési magasságú vetők), azonban segít leképezni olyan földtani formációk és szerkezetek képét, amelyek felismerése bizonytalanabb a hagyományos CDP-eljárás alkalmazásával. Az adatfeldolgozás meg-

kezdése előtt célszerű tisztázni a kutatási feladat elsődleges célját, illetve mélységtartományát. Ezek ismeretében a mélységfüggő CRS-összegzési operátorok mérete alapos paraméter tesztek segítségével optimálisan megtervezhető.

Megjegyezzük, hogy a dolgozatban bemutatott egyetlen 2D reflexiók szelvény eredményei alapján nyilvánvalóan nem lehet messzemenő következtetéseket levonni a kutatási terület geotermikus potenciáljára vonatkozóan. Az új eredmények azonban azt mutatják, hogy a vizsgált terület további kutatásokra érdemes. A TOK-1 és TOK-2 szelvények adatainak CRS-feldolgozása együttes eredményei egy korábbi MSc-szakdolgozatban áttekinthetők (Kiss 2021).

### Köszönetnyilvánítás

A szerzők ezúton fejezik ki köszönetüket a Magyar Bányászati és Földtani Szolgálatnak a kísérleti adatfeldolgozás elvégzésének lehetővé tételéért egy MSc diplomadolgozat megvalósításának keretében. Köszönet illeti Gombár Lászlót, Hegedűs Endrét és Ormos Tamást a tanulmány lektorálása során tett segítőkész és hasznos javaslataikért.

### A tanulmány szerzői

Kiss Viktória, Takács Ernő

### Hivatkozások

Bauer M., Bereczki L., Héja G., Kiss J., Takács E. (2020): Kutatási jelentés a Tokaj térségében végzett geotermikus rezervoárok felderítését célzó szeizmikus földtani kutatásról. MBFSZ kutatási jelentés, Magyar Bányászati és Földtani Szolgálat, Budapest, 76 p.

Höcht, G., de Bazelaire, E., Majer, P., Hubral, P. (1999): Seismic and optics: hyperbolae and curvatures. *Journal of Applied Geophysics*, 42, 261–281.

Hubral, P. (1983): Computing true amplitude reflections in a laterally inhomogeneous earth. *Geophysics*, 48, 1051–1062.

Hubral, P. (1999): Preface. *Journal of Applied Geophysics*, 42, 137–138.

Hubral, P. and Krey, T. (1980): Interval velocities from seismic reflection traveltimes measurements. *Society of Exploration Geophysicists*.

Jäger, R. (1999): The Common Reflection Surface Stack – Introduction and Application. MSc thesis, Karlsruhe Institute of Technology.

Jäger, R., Mann, J., Höcht, G., Hubral, P. (2001): Common-reflection-surface stack: image and attributes. *Geophysics*, 66, 97–109.

Kiss V. (2021): Application of Common Reflection Surface (CRS) stacking in a study area of northeast Hungary. MSc thesis, Department of Geophysics, University of Miskolc, p. 51.

Landa, E., Gurevich, B., Keydar, S., Trachtman, P. (1999): Application of multifocusing method for subsurface imaging. *Journal of Applied Geophysics*, 42, 283–300.

Landmark Graphics Corporation (2001): ProMAX 2D, A Reference Guide for the ProMAX Geophysical Processing Software.

Mandal, B., Sen, M.K., Vaidya, V.R., Mann, J. (2014): Deep seismic image enhancement with the common reflection surface (CRS) stack method: evidence from the Aravalli–Delhi fold belt of northwestern India. *Geophysical Journal International*, 196, 902–917.

Mann, J., Jäger, R., Müller, T., Höcht, G., Hubral, P. (1999): Common-reflection-surface stack – a real data example. *Journal of Applied Geophysics*, 42, 301–318.

Menyoli, E. (2002): Structural imaging in complex geological area: Integrating model-dependent and model-independent imaging. PhD Thesis, Part II, University of Hamburg, Germany.

Menyoli, E., Gajewski, D., Hübscher, C. (2004): Imaging of complex basin structures with the common reflection surface (CRS) stack method. *Geophysical Journal International*, 157, 1206–1216.

Takács E. (szerk.) et al. (2016): Szeizmikus módszertani fejlesztések. MFGI kutatási jelentés, Magyar Földtani és Geofizikai Intézet és Földtani Szolgálat, Budapest, 28 p.

Takács E. (szerk.) et al. (2018): Közös reflexiók felületen (CRS) alapuló összegzés, mélység migráció, valamint mélységtartománybeli előzetes értelmezés a Me-105 és Me-106 szeizmikus szelvények mentén. Kutatási jelentés a Mecsekérc Zrt. megbízásából, Magyar Bányászati és Földtani Szolgálat, Budapest, 30 p.

Yilmaz, Ö. (1999): When reflections are not hyperbolas and reflectors are not points. *Journal of Applied Geophysics*, 42, 139–141.

# Rugalmassági paraméterek AVO-inverzióval történő becslése a Moho környezetében – PGT-4 szeizmikus szelvény

TAKÁCS E.<sup>@</sup>, KEMÉNY M., GÚTHY T., HEGEDŰS E., FANCSIK T.

Magyar Bányászati és Földtani Szolgálat,  
1145 Budapest, Columbus u. 17–23.

<sup>@</sup>E-mail: takacs.erno@mbfsz.gov.hu

Az 1992-ben magyar–kanadai–svájci együttműködésben DK-Magyarországon mért PGT-4 jelű szelvény mentén regisztrált mélyszeizmikus adatok az azóta eltelt három évtized során újabb és újabb vizsgálatok elvégzését és újszerű eredmények elérését tették lehetővé. Mindezek az eredmények Posgay Károly (1925–2019) nemzetközi viszonylatban is előrelátó gondolatainak köszönhetőek, mind a mélyszeizmikus mérések tervezése és megvalósítása, mind pedig az adatok feldolgozása és földtani-szerkezeti értelmezése tekintetében. A legújabb eredmények közreadásával egykori mentorunk, tanítónk és szakmai irányítónk tiszteletére szeretnénk emléket állítani.

Az elmúlt évben (2020) végrehajtottuk az archív adatok speciális, amplitúdóhú újrafeldolgozását és Amplitude Versus Offset (AVO) inverzióját a PGT-4 szelvény mentén, valamint az eredmények előzetes kőzetfizikai és reológiai értelmezését. A teljes szelvény mentén közvetlenül a Mohorovičić-diszkontinuitás felett kapott alacsony  $V_p/V_s$  arányok egy összetett szerkezetű részleges olvadék- (vagy fluidtartalmú) zóna jelenlétét valószínűsítik. Feltételezésünket kutatásunk folytatásával és újabb kőzetfizikai paraméterek szeizmikus adatokból történő meghatározásával szeretnénk igazolni (Poisson-hányados és Lamé-paraméterek), vagy elvetni és egyéb magyarázatot találni az alsókéregben kimutatott anomális zónára.

## Takács, E., Kemény, M., Gúthy, T., Hegedűs, E., Fancsik, T.: Elastic parameter estimation in the vicinity of Moho using AVO inversion – PGT-4 seismic section

Deep seismic data collected with Hungarian-Canadian-Swiss cooperation along the PGT-4 profile in SE-Hungary in 1992 enabled to obtain peculiar subsequent results in the last three decades. Those achievements are consequences of the farseeing ideas of Károly Posgay (1925–2019) both in point of planning and realizing deep seismic surveys, as well as his thoughts regarding the data processing and geological-structural interpretation. By publishing the latest results, the authors wish to honor the memory of their scientific mentor.

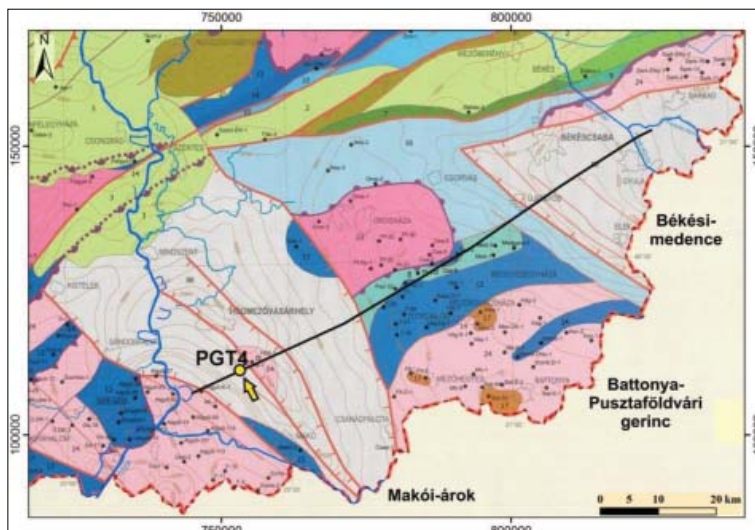
In the last year (2020) we performed true amplitude reprocessing on the archive data, carried out Amplitude Versus Offset (AVO) inversion along the PGT-4 profile, and implemented rock physical and rheological interpretations. The low  $V_p/V_s$  ratio values, obtained directly above the Moho, suggest a complex zone of lithology with partial melt (or rocks with fluid) along the whole section. To prove (or disapprove) this assumption, as a continuation of our studies, we are planning to derive other more specific rock physical parameters from the seismic data (i.e. Poisson's ratio and the Lamé parameters).

*Beérkezett:* 2021. március 24.; *elfogadva:* 2021. június 4.

## Előzmények

A Makói-árkot, a Battonya–Pusztaföldvári gerincet és a Békési-medencét összekötő, hozzávetőlegesen 90 km hosszúságú PGT-4/1992 jelű mélyszeizmikus szelvény első földtani-szerkezeti értelmezése rávilágított a DK-

magyarországi litoszféra összetett képére (Posgay et al. 1996). A szeizmikus adatok lehetővé tették mind a kainozoos üledékek, mind pedig a prekainozoos medencealzat felszíne alatti változatos földtani formációk részletes elemzését. Új felfedezés volt egy a szelvény síkjában ÉK-i dőlésű, a teljes földkérget harántoló mestervető (ve-



**1. ábra** A PGT-4/1992 mélyszeizmikus szelvény nyomvonala Haas et al. (2010) prekainozoos medencealjzat térképén a 2000-ben elvégzett AVO-inverzió helyének feltüntetésével

**Figure 1** PGT-4/1992 deep seismic profile displayed on the map of pre-Cenozoic basement (Haas et al. 2010) showing the location of the AVO inversion performed in 2000

tősorozat) kimutatása, valamint kiváló képet kaptunk a Moho-szelvény menti reflektivitásának és mélységének jelentős változásáról (többek között a földkéreg Békési-medence alatti elvékonyodásáról). A fent említett mester-  
vető térbeli helyzetének meghatározása a szénhidrogén-  
ipar által az 1994. és 1995. években mért három regionális  
szeizmikus szelvény adatainak mélykéregre fókuszált újra-  
feldolgozása után vált lehetővé (Gúthy et al. 2018). A Ma-  
gyar Földtani és Geofizikai Intézetben végrehajtott újra-  
feldolgozási folyamat legfontosabb elemei az amplitúdóhű

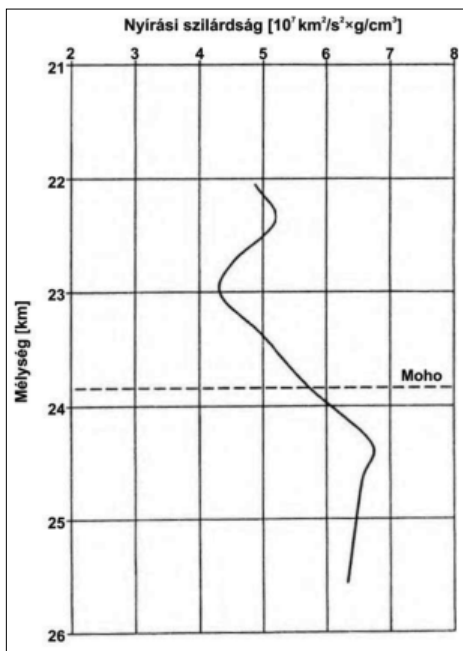
feldolgozás, az alacsony frekvenciák kiemelése és az ösz-  
szegzés előtti mélység migráció voltak.

A PGT-4 szelvény egy pontján korábban végrehajtott  
Amplitude Versus Offset- (AVO) inverzió eredményként,  
a Moho felett egy kb. 2 km szélességű csökkent nyírési  
szilárdságú zónát valószínűsítettünk (Takács, Hajnal 2000).  
A mélyszeizmikus szelvény nyomvonalát, valamint a ko-  
rábbi inverzió helyét és eredményét az 1. és 2. ábrán  
közöljük.

2020-ban végrehajtottuk az archív PGT-4-adatok ké-  
reg–köpeny határra célzott amplitúdóhű újrafeldolgozá-  
sát, és Hilbert-attribútumokat állítottunk elő a szeizmi-  
kus jellemzők további vizsgálatára. A nyírési szilárdságra  
vonatkozó 2000. évi megállapításunk megerősítésére a  
szelvény teljes hosszán AVO-inverziót hajtottunk végre  
az azóta rendelkezésünkre álló korszerűbb adatfeldolgozó  
programcsomag felhasználásával (Hampson–Russell Soft-  
ware Services, Ltd. 2006). Célunk a Moho környezetében  
feltételezhető szerkezeti, közetfizikai és reológiai visz-  
onyok eddigieknél részletesebb vizsgálata volt a mély-  
szeizmikus szelvény teljes hosszán.

### Az archív mélyreflexiós adatok újrafeldolgozása

A DK-Magyarországon magyar–kanadai–svájci együtt-  
működésben a PGT-4/1992 jelű szelvény mentén észlelt  
mélyreflexiós adatok terepi felvételezése egyidejűleg két-  
féle rendszerrel történt. Ezek egyrészt az akkori Eötvös  
Loránd Geofizikai Intézetnél rutinszerű szeizmikus kuta-  
tásra használt MDS-18 típusú észlelési rendszer (Halli-  
burton Geophysical Services, USA), másrészt pedig a ka-  
nadai PRS (Portable Recording Seismograph) adatgyűj-  
tők voltak (Posgay et al. 1996). Az utóbbi egyedi szeiz-



**2. ábra** Nyírési szilárdság változások a Moho környezetében egy ko-  
rábban elvégzett AVO-inverzió alapján (Takács és Hajnal 2000)

**Figure 2** Variation of the rigidity in the vicinity of the Moho based on  
a preliminary AVO inversion (Takács and Hajnal 2000)

**1. táblázat** | Az 1992-ben végrehajtott terepi adatgyűjtés paraméterei  
**Table 1** | Parameters of the field survey carried out in 1992

Terepi paraméter	PRS észlelési rendszer	MDS-18 észlelési rendszer
Forrás típusa/ lyukmélység	robbantás 50 kg / 70 m	robbantás 50 kg / 70 m
Lövések száma	288	288
Adatgyűjtés alulvágó frekvenciája	2 Hz csillapítatlan frekvencia	4,5 Hz csillapítatlan frekvencia
Szeizmométerek száma	195	160
Geofonköz	100 m	50 m
Maximális forrás–geofon távolság	19,5 km	8 km
Felvételek hossza	60 s	48 s

mikus érzékelők előnye az volt, hogy alacsonyabb frekvenciás jeleket – névlegesen 2 Hz alulvágó frekvenciával, de gyakorlatilag 0 Hz-től – tudtak észlelni a földkéreg legmélyebb tartományából, mint az ipari reflexiós kutatásokra általában használt érzékelők (10 Hz). A terepi adatgyűjtés legfontosabb paramétereit az 1. táblázatban foglaljuk össze.

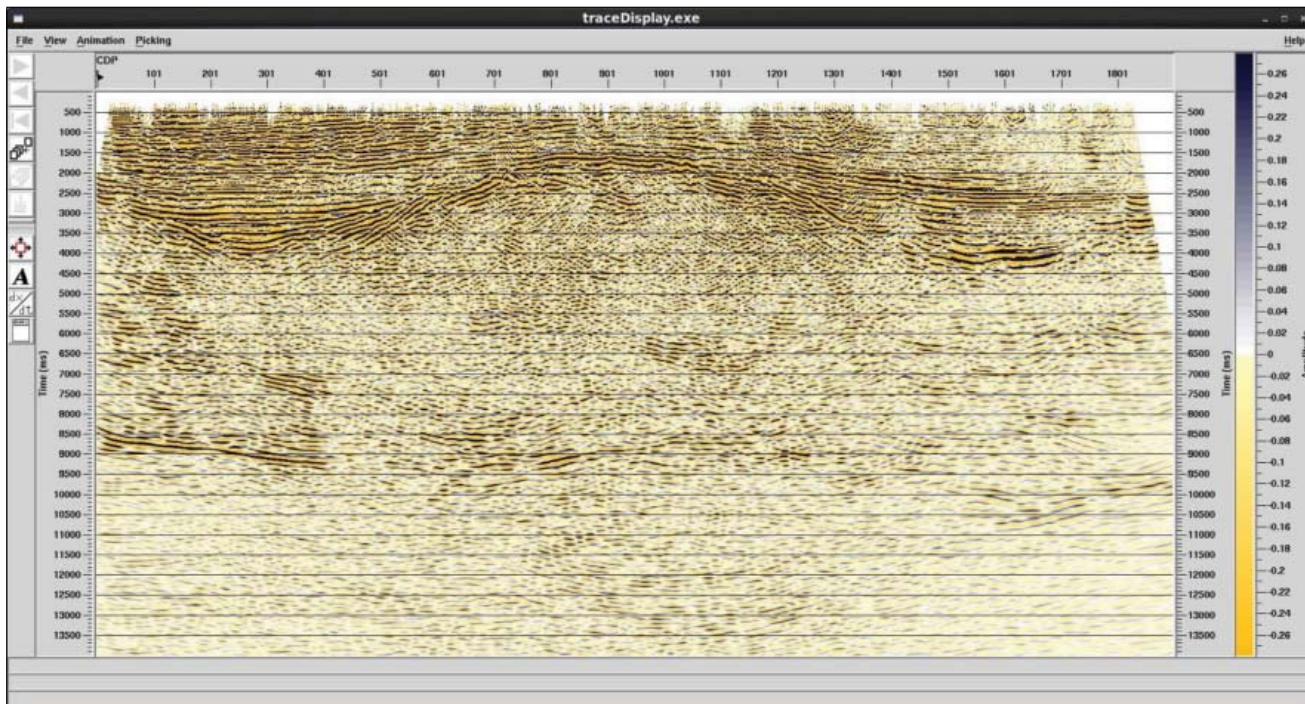
Az archív adatok 2020. évi AVO-analízisére (2000. évi elemzésünkhöz hasonlóan) a PRS adatokat választottuk egyrészt azok alacsony frekvenciás jellege, másrészt pedig a nagyobb forrás–geofon távolságok miatt. Előbbi a mélyreflexiók torzítatlan észlelése, utóbbi pedig az AVO-inverzió megbízható végrehajtása szempontjából volt fontos követelmény. Az adatfeldolgozás során mindkét alkalommal törekedtünk a valódi reflexiós amplitúdók lehetőség szerinti helyreállítására és a relatív amplitúdó viszo-

nyok megőrzésére. Másképp fogalmazva, olyan amplitúdóhű feldolgozást hajtottunk végre a mélyszeizmikus adatokon, amely után a reflexiós amplitúdók elméletileg csak a közetfizikai változásoktól függenek (Mazzotti, Mirri 1991). A 2. táblázatban a 2020. évi reflexiós adatfeldolgozás lépéseit foglaljuk össze.

Az archív szeizmikus adatok újrafeldolgozásakor egyrészt szigorúan törekedtünk a valódi reflexiós amplitúdók helyreállítására (1., 5. és 6. adatfeldolgozási lépések). Másrészt pedig kerültük a relatív amplitúdókat torzító műveletek alkalmazását (AGC, csatornaki egyenlítés és többcsatornás szűrések). A felvételenként 50 kg dinamittal keltett reflexiós beérkezések mellett képződő nagyenergiájú hang- és felszíni zavarhullámok eltávolítására az általában alkalmazott többcsatornás műveletek helyett a lineáris zajokat inkább kivágtuk a terepi felvételekből

**2. táblázat** | A PRS-adatok 2020. évi reflexiós újrafeldolgozásának lépései  
**Table 2** | Reprocessing sequence applied on the PGT-4 data in 2020

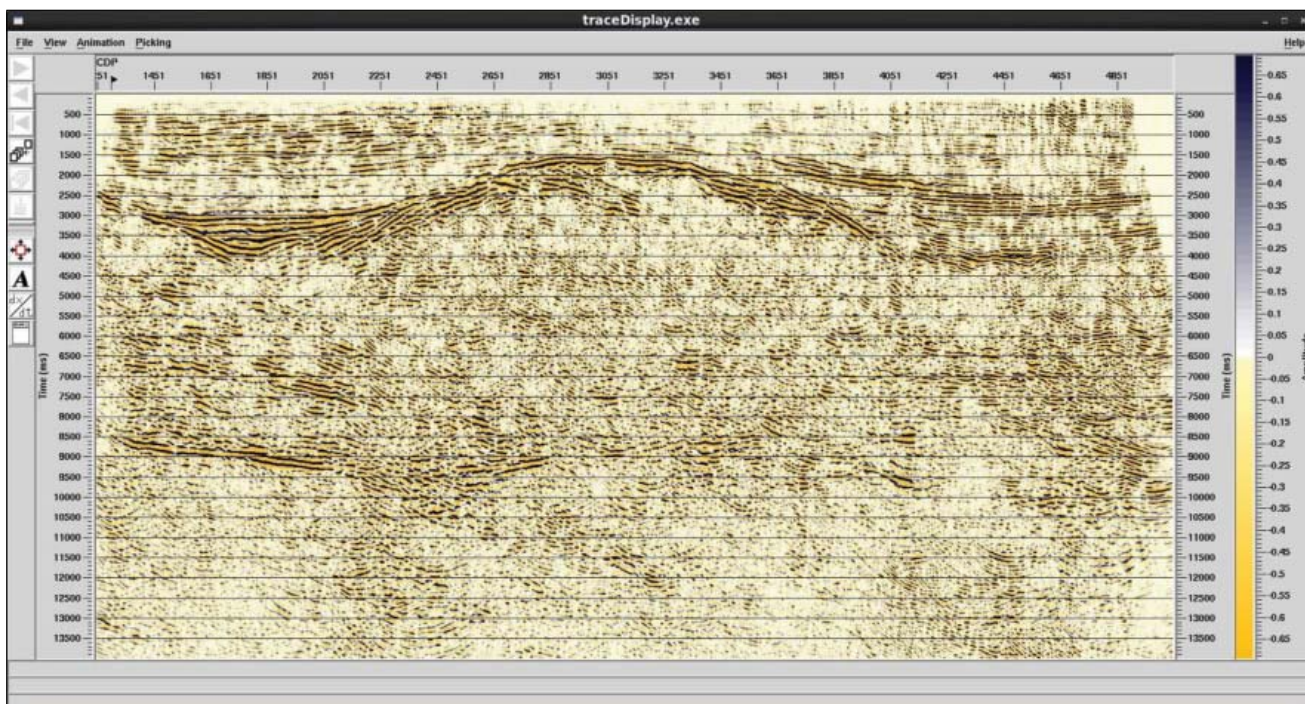
Sorszám	Adatfeldolgozási művelet	Megjegyzés
1.	Valódi amplitúdó-helyreállítás	–
2.	Sávszűrés	2–20 Hz
3.	Csatornaszerkesztések	felső MUTE
4.	Csatornaszerkesztések	belső MUTE
5.	Felszín konzisztens amplitúdókor.	–
6.	Felszín konzisztens dekonvolúció	jóslási távolság: 32 ms
7.	Sávszűrés	2–20 Hz
8.	Maradék statikus korrekciók	maximális energia szerint
9.	Sebességanalízis	–
10.	NMO-korrekció	–
11.	Időben változó trim statikusok	2000 ms-os csúszó ablakban
12.	CDP szerinti csatornaösszegzés	–
13.	F-X dekonvolúció	ablakméret: 10 csatorna × 300 ms
14.	Sávszűrés	2–18 Hz
15.	Kirchhoff-féle időmigráció	maximális dőlés 70°
16.	Sávszűrés	2–14 Hz
17.	Látszólagos dőlés szerinti szűrés	–4/+14 ms/csatornaköz



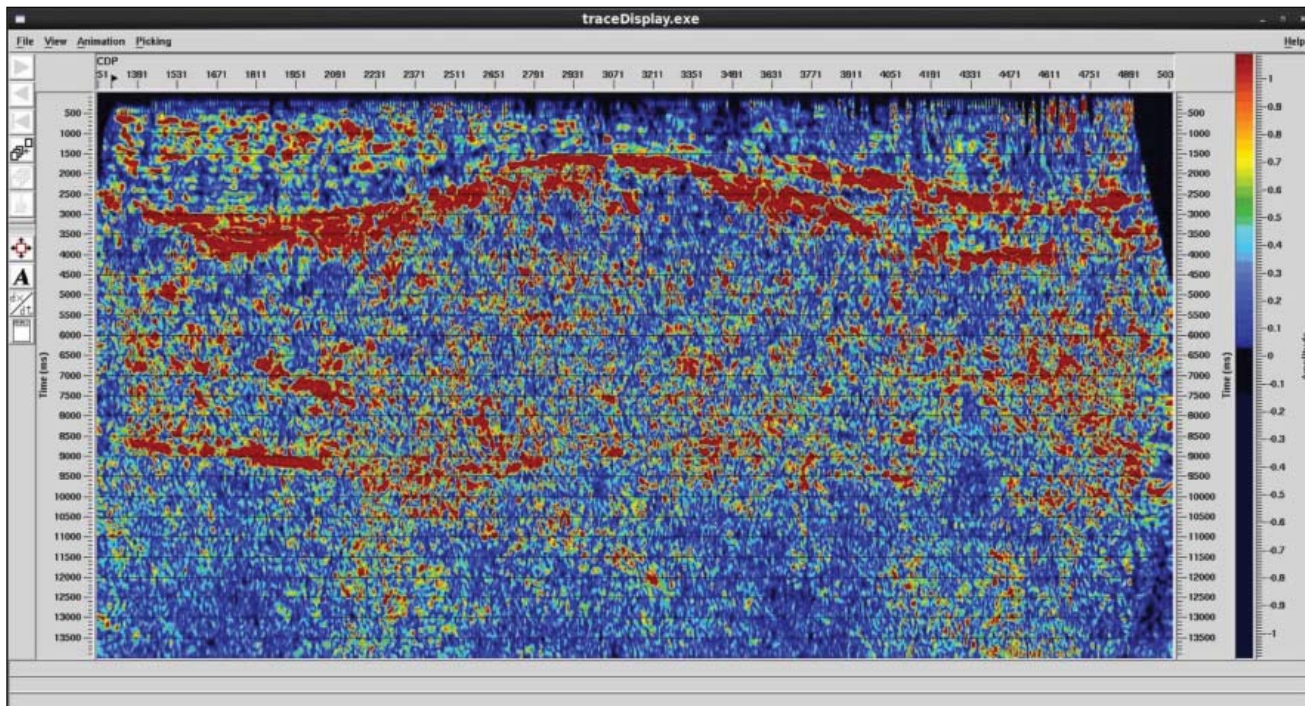
3. ábra | A PGT-4/PRS-adatok 1992. évi feldolgozásának eredménye (migrált időszelvény 14 s-ig megjelenítve)  
 Figure 3 | Result of the PGT-4/PRS data processing performed in 1992 (migrated time section displayed between 0-14 s)

(4. lépés), elkerülve ezzel az említett műveletek esetleges amplitúdótorzító hatását. Az összegzés előtti AVO-analízis szempontjából ezt megengedhetőnek tartottuk a PRS észlelési rendszer hosszú ofszet tartománya miatt (max. 19,5 km). Megjegyezzük, hogy a 13. és 17. sorszámú több-

csatornás műveletek az AVO-vizsgálatokat nem érintették, mivel azok bemenetét az összegzés (12. lépés) előtt kaptuk meg. A frekvenciatartományt a teljes feldolgozási folyamat során alacsony sávban tartottuk (2., 7., 14. és 16. lépések).



4. ábra | A PGT-4/PRS-adatok 2020. évi újrafeldolgozásának eredménye (migrált időszelvény 14 s-ig megjelenítve)  
 Figure 4 | Result of the PGT-4/PRS data processing performed in 2020 (migrated time section displayed between 0-14 s)



5. ábra | Az újrafeldolgozott szelvény reflexióerősség-attribútuma (2020)  
 Figure 3 | Reflection strength attribute of the reprocessed section (2020)

Az 1992. és 2020. évi adatfeldolgozások eredményeként kapott migrált időszelvények a 3. és 4. ábrán hasonlíthatók össze.

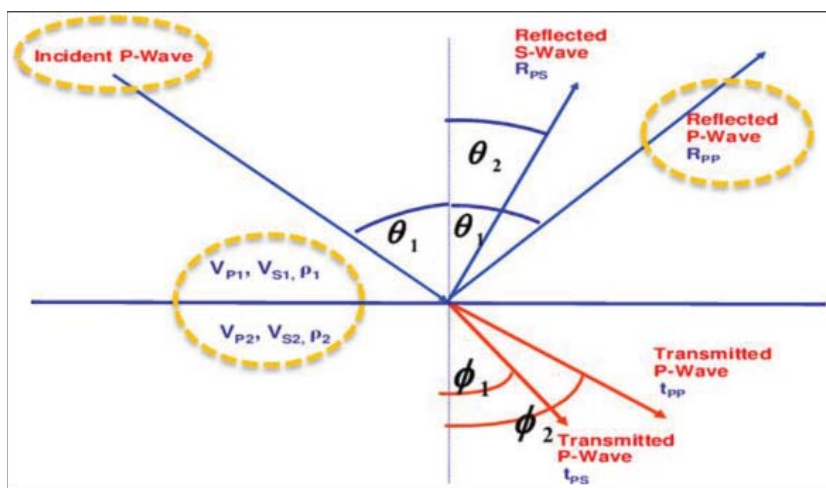
A két szelvény összevetésekor nyilvánvaló, hogy az újrafeldolgozott változat (4. ábra) a korábbinál sokkal koherensebb szerkezeti képet mutat az alsókéreg – felső köpenymélység tartományában, amely jelenlegi vizsgálataink célját képezte. Ennek terhére elvesztettük a kainozoos üledékek jobb felbontását, azonban újrafeldolgozásunk során nem az volt a célkitűzés. Az újrafeldolgozott migrált összszelvényre előállítottuk a reflexióerősség, pillanatnyi fázisattribútumokat és látszólagos frekvencia Hilbert-attribútumait. Az 5. ábrán azt a reflexióerősség-változatot közöljük, amely a földtani-szerkezeti értelmezés szempontjából a leginformatívabbnak bizonyult. A hagyományos megjelenítésű migrált időszelvényvel (4. ábra) egybevetve, mindkettő jól mutatja a prekainozoos medencealjzat felszínét, a teljes földkérget harántoló vetősorozatot és a Moho változékonyságát a szelvény mentén.

### AVO-inverzió végrehajtása a teljes szelvény mentén

Az AVO-analízis fizikai, kőzetfizikai és szeizmikus hullámterjedési alapjait egy korábbi cikkben részletesen összefoglaltuk (Takács 1996), ezért az alábbiakban csak azokra a tényekre utalunk, melyek a jelen publikációban közölt eredmények magyarázatát és alátámasztását szolgálják.

Az eljárás gyakorlati alkalmazását az teszi lehetővé, hogy beeső P-hullám esetén a szeizmikus határfelületről visszavert P-hullám amplitúdója négy paramétertől függ (6. ábra). Ezek a felület felett és alatt elhelyezkedő földtani képződmények kőzetfizikai paraméterei, azaz a P-hullám-sebesség ( $V_p$ ), az S-hullám-sebesség ( $V_s$ ) és a kőzetek sűrűsége ( $\rho$ ), valamint a P-hullám beesési szöge ( $\theta$ ). Következésképpen, ha a mért adatokból meg tudjuk határozni a visszavert P-hullám amplitúdóváltozását a beesési szög függvényében (AVO-válasz), akkor kezdeti modell felvétele után ( $V_p$ ,  $V_s$  és  $\rho$ ) inverziós algoritmus-sal ki lehet számítani a három kérdéses kőzetfizikai paramétert. Megjegyezzük, hogy a határfelületre beeső P-hullámokra és az S-hullámokra is összetett mátrix-egyenletek írják le az összes keletkező hullámtípus amplitúdójának változását a teljes 0–90° szögtartományban (Zoeppritz 1919). A gyakorlati megvalósítás során közelítő megoldások használatosak, amelyek azonban a reflexiók kutatásban előforduló ~0–40° beesési szögtartományban pontos eredményt adnak (Aki, Richards 1980, Shuey 1985).

Ostrander (1984) alapvető publikációja után világszerte elterjedt az AVO-analízis szénhidrogénipari kutatásban történő sikeres alkalmazása. Az azóta már rutinszerűen alkalmazott eljárásról bebizonyosodott, hogy nemcsak szemcséközi porozitású homokkő-formációkra használható, hanem karbonátos tárolók esetén is (Harvey 1993, Lynch et al. 1997). Az AVO-inverzió az összegzés előtti P-hullám reflexiók amplitúdóinak beesési szög függvényében történő elemzésével lehetővé teszi a P- és az S-hullám terjedési sebességek és a kőzetek sűrűségé-



6. ábra | A szeizmikus határfelületen kialakuló hullámtípusok beeső P-hullám esetén  
 Figure 6 | Wave-types generated at a seismic interface in case of incident P-wave

nek meghatározását (Chopra, Castagna 2014). Ezáltal lehetőséget ad a földtani rétegsor rugalmassági paramétereinek számítására ( $V_P/V_S$  arány, Poisson-hányados és Lamé-paraméterek), közvetlen S-hullám felvételezés nélkül.

Goodway (2001) részletesen tárgyalta a Lamé-paraméterek ( $\lambda$  és  $\mu$ ) segítségével jellemezhető litológiai összefüggéseket, Russell (2006) pedig rámutatott a szeizmikus „elasztikus impedanciainverzió” előnyeire a szénhidrogén-kutatásban. Ezzel a  $\lambda\rho$  és  $\mu\rho$  (elasztikus impedancia) attribútumok előállítása is bekerült a szénhidrogénipari kutatások eszköztárába.

Felvetődött a kérdés (Takács, Hajnal 2000, Takács 2001), hogy a fenti reflexiós adatfeldolgozási eljárások előnyeit esetleg más földtani célkitűzések megvalósítására is ki lehet aknázni – például mélyreflexiós adatokból a Moho környezetében tapasztalható rugalmassági paraméterek becslésére. A szeizmikus hullámterjedési sebességek és a kőzettani szempontból legfontosabb rugalmassági

paraméterek gyors áttekintéséhez a 3. táblázat nyújt segítséget. A 4. táblázatban pedig a PGT-4 szelvény mentén 2020-ban végrehajtott, a Moho környezetére fókuszált AVO-inverziós feldolgozásunk teljes folyamatát mutatjuk be.

Az AVO-analízis és -inverzió összegzés előtti eljárások, ezért a bemenő adatok természetesen zajosabbak, mint a végleges összegszelvény. A 4. táblázatban bemutatott adatfeldolgozási folyamatban szupergyűjtemények előállításával növeltük a bemenő, NMO- (Normal Move-out) korrigált CDP-gyűjtemények jel/zaj viszonyát (1. adatfeldolgozási lépés). A parabolikus radontranszformáció végrehajtásával célunk a véletlen zajok további elnyomása, valamint a többszörösök és a maradék NMO-hibák eltávolítása volt (2. lépés). Az észlelési távolság – beesési-szög-konverziót az AVO-inverzió végrehajtásához kellett elvégezni (3. lépés). Végül az AVO-inverzió szolgáltatta a  $V_P/V_S$  arány értékeit a teljes PGT-4 szelvény mentén (4. lépés).

3. táblázat | A hullámterjedési sebességek és a rugalmassági paraméterek összefüggései ( $\rho$  a kőzetek sűrűségét jelöli)  
 Table 3 | Relations between the wave propagation velocities and the elastic parameters ( $\rho$  is the density of the rocks)

Hullámterjedési sebesség	Összefüggés
P-hullám-sebesség	$V_P = [(\lambda + 2\mu)/\rho]^{1/2}$
S-hullám-sebesség	$V_S = (\mu/\rho)^{1/2}$
Rugalmassági paraméter	Összefüggés
A P- és az S-hullám-sebességek aránya (főleg a litoszféra kutatásban használatos)	$V_P/V_S$
Poisson-hányados (főleg a CH-kutatásban használatos)	$\sigma = (1/2)[(V_P^2 - 2V_S^2)/(V_P^2 - V_S^2)]$
Összenyomhatatlanság (első Lamé-paraméter)	$\lambda = \rho(V_P^2 - 2V_S^2)$
Nyírási szilárdság (második Lamé-paraméter)	$\mu = \rho V_S^2$



4. táblázat | A PGT-4/PRS-adatok 2020. évi AVO-feldolgozásának lépései  
 Table 4 | AVO processing sequence applied on the PGT-4/PRS data in 2020

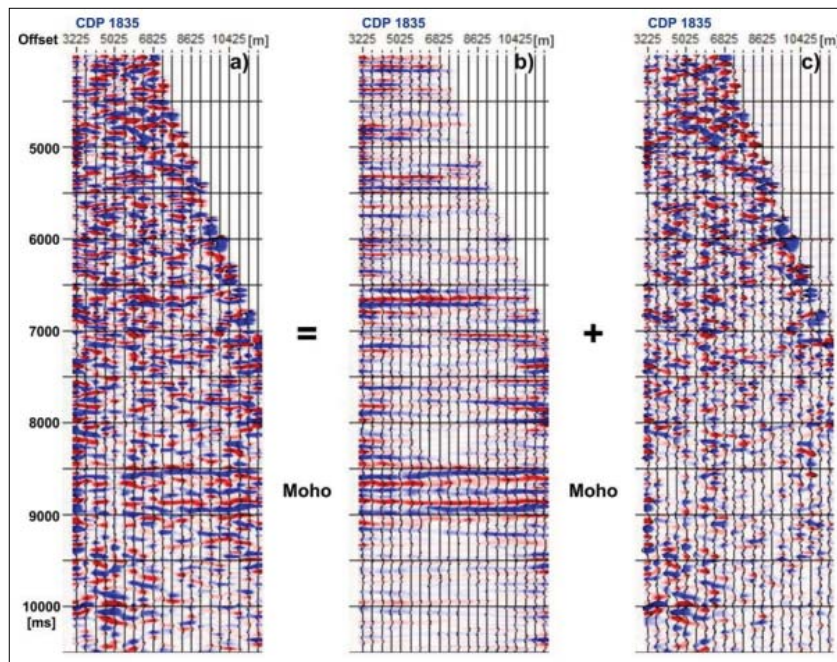
Adatok és feldolgozási műveletek	Megjegyzés
Amplitúdóhú NMO-korrigált CDP-gyűjtemények és a reflexiós adatfeldolgozás során meghatározott sebességtér	Bemenet
1. Szupergyűjtemények előállítás	AVO-adatfeldolgozási műveletek
2. Parabolikus radontranszformáció	
3. Észlelési távolság – beesési szög konverziója	
4. AVO inverzió	
$V_p/V_s$ arány attribútumszelvény	Kimenet

A fent említett adatfeldolgozási műveletek közül, az NMO-korrigált reflexiós beérkezések koherenciájának javítása szempontjából, a parabolikus radontranszformáció (Russell et al. 1990) bizonyult a leghatékonyabbnak. A 7. ábrán a művelet eredményét mutatjuk be egy CDP-szupergyűjtemény példáján keresztül (a szupergyűjteményeket hét szomszédos CDP azonos észlelési távolságú csatornáinak összegzésével állítottuk elő).

A 8. ábrán három egymás melletti közös beesési szög szerinti CDP-gyűjteményre mutatunk példát, szemléltetve az AVO-inverzióhoz előállított bemenő adatok kiváló minőségét és a Moho mélységéből észlelt reflexiós köteget (8,5 és 9,0 s között). Megjegyezzük, hogy az ábrán látható gyűjtemények egyes csatornáihoz itt már azonos beesési szögek tartoznak (0–24°) az inverzió követelményének megfelelően. E gyűjtemények előállítása megfelelően pontos P-hullám-sebességmodell ismeretében nem

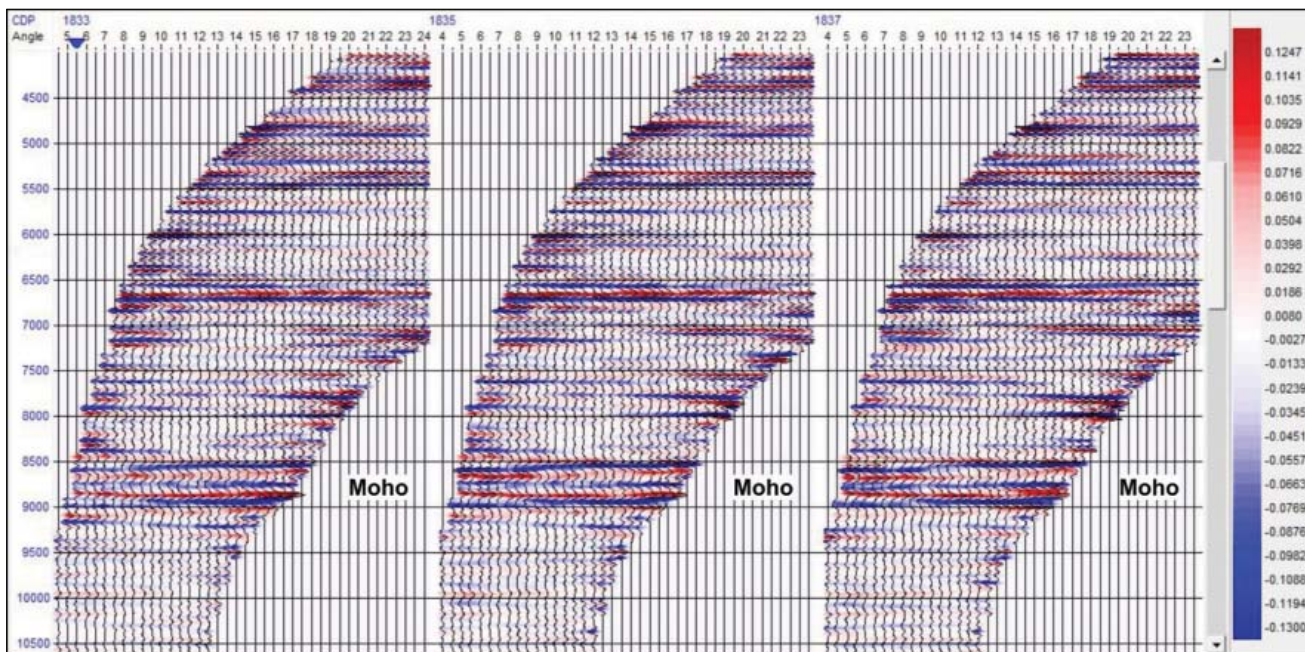
okoz problémát. Esetünkben, az észlelési távolság – beesési szög átalakításhoz a reflexiós adatfeldolgozáskor meghatározott RMS (Root Mean Square) sebességteret használtuk intervallum sebességekre való átalakítás után.

A teljes szelvény mentén végrehajtott AVO-inverzió eredményeként kapott  $V_p/V_s$  attribútum szelvény (9. ábra) mélyföldtani-szerkezeti és kőzettani értelmezésre is alkalmasnak bizonyult. A 9a. ábra a korábbi (Posgay et al. 1999, Gúthy et al. 2018) kéregmodell vázlatos megjelenítése az újrafeldolgozott migrált szelvény amplitúdó burkoló változatán. A 9b. ábra a  $V_p/V_s$  arányokat mutatja az inverzió számára szükséges és elégséges fedésszámú időtartományban (4–10 s). E tartomány fölött és alatt az inverzió nem tudott megfelelő adatokat szolgáltatni a kis fedésszámok miatt. Az ábrán a hideg színek magasabb, a meleg színek pedig alacsonyabb  $V_p/V_s$ -értékeket jelentenek. Előzetes értelmezésünk szerint a piros színű zóna



7. ábra | A parabolikus radontranszformáció eredménye a) bemenő CDP-szupergyűjtemény, b) zajtól megtisztított adatok, c) becsült zaj

Figure 7 | Result of the parabolic Radon transform a) input CDP supergather, b) noise free data, c) estimated noise

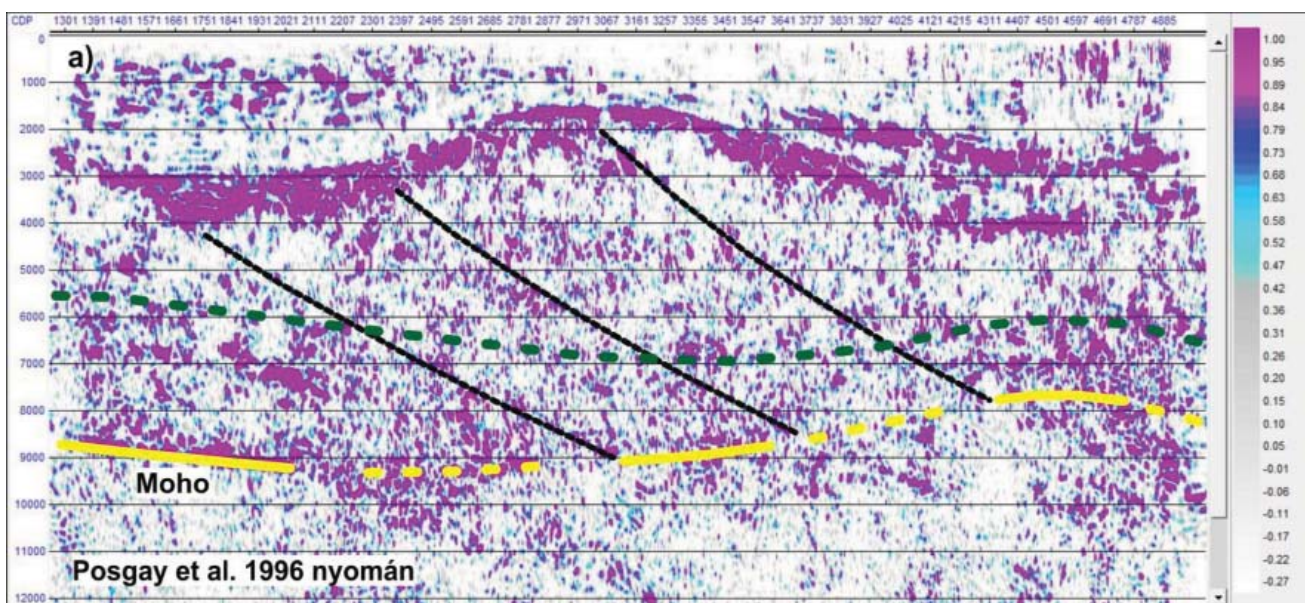


8. ábra | Amplitúdóhű feldolgozású közös beesési szög szerinti CDP-gyűjtemények (0–24°)  
 Figure 8 | CDP angle gathers after true amplitude processing (0–24°)

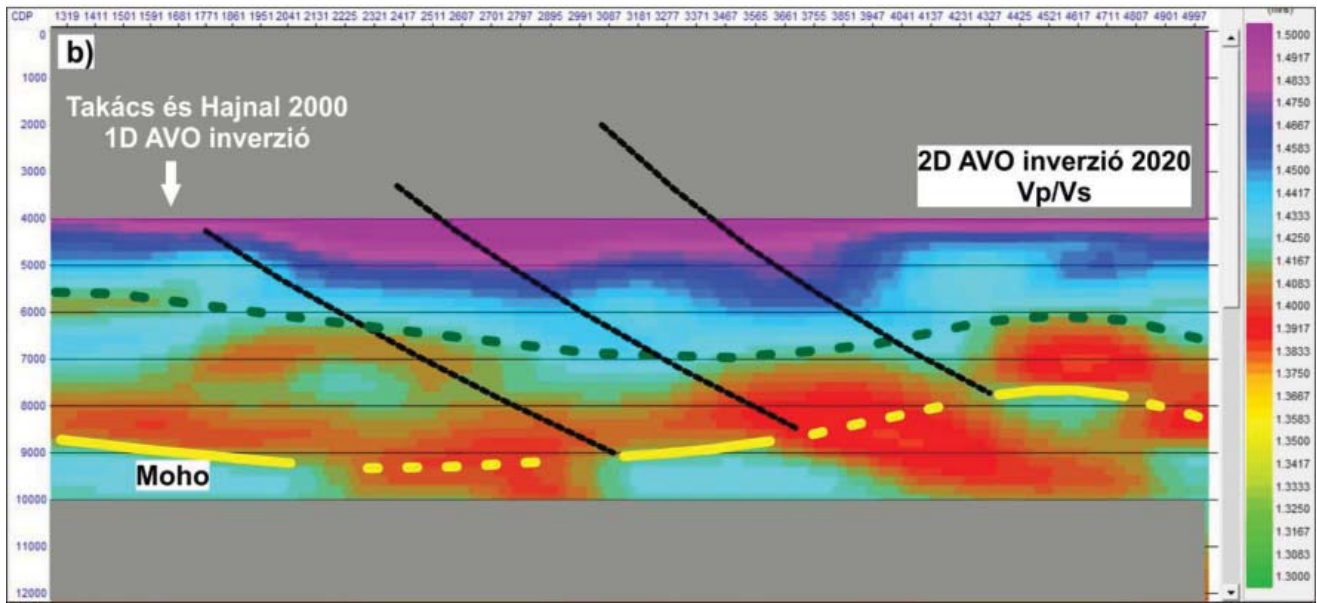
az alsó kéregbe történő magasabb hőmérsékletű és képlékenyebb (kisebb  $V_p/V_s$  arányú és szilárdságú) felsőköpeny–olvadékok benyomulását jelezheti, vagy pedig fluidtartalmat ebben a mélységtartományban. Ezen eredmények alapján a teljes szelvény mentén lehetségesnek tartjuk egy csökkent szilárdságú zóna kialakulását közvetlenül a Moho felett (vö. 2. ábra). Itt megjegyezzük, hogy a 9b. ábra feliratában a „2D AVO-inverzió” valójá-

ban a szelvény teljes hosszában végrehajtott 1D inverziók sorozatát jelenti, mivel az AVO-inverzió az előfeldolgozott CDP-gyűjtemények adatait használja.

Fenti feltételezésünket az a tény erősíti meg, hogy a Poisson-hányados nemlineáris függvénye a  $V_p/V_s$ -értékeknek és az alacsonyabb  $V_p/V_s$  arányok egyúttal alacsonyabb Poisson-hányados-értékeket is jelentenek (Chopra, Castagna 2014). A Poisson-hányados viszont mechanikai



9a. ábra | Az alsó kéreg szerkezete a korábbi és a legújabb eredmények integrálásával (PGT-4); a) amplitúdó burkoló szelvény értelmezése (Posgay et al. 1996 nyomán)  
 Figure 9a | Structure of the lower crust based on the integration of historic and recent results (PGT-4); a) interpretation of the amplitude envelope section (after Posgay et al. 1996)



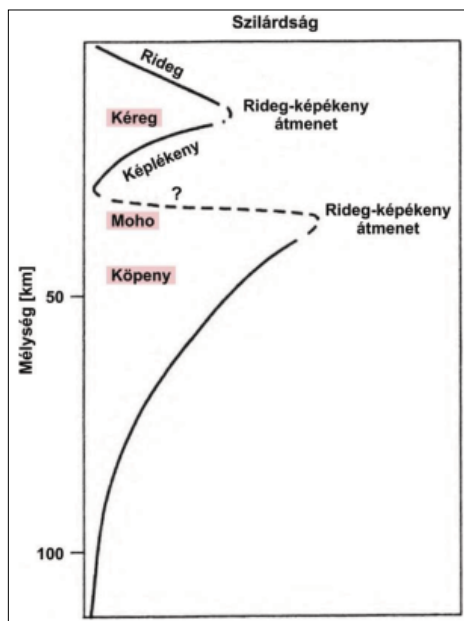
9b. ábra | Az alsó kéreg szerkezete a korábbi és a legújabb eredmények integrálásával (PGT-4); b) AVO-inverzióval kapott VP/Vs attribútumszelvény a korábbi inverzió helyének megjelölésével (Takács, Hajnal 2000)

Figure 9b | Structure of the lower crust based on the integration of historic and recent results (PGT-4); b) VP/Vs attribute section obtained by AVO inversion showing the location of the preliminary inversion (Takács, Hajnal 2000)

definíció szerint a kőzetek szilárdságával arányos, azaz alacsonyabb értékei alacsonyabb szilárdságú közeget jeleznek. Eszerint a PGT-4 szelvény Moho feletti zónájában kimutatott alacsony  $V_p/V_s$  arányok a környezetükhöz képest kisebb szilárdságú és képlékenyebb kőzetek jelenlétét valószínűsítik (pl. részleges olvadék, vagy fluidtartalom). E feltételezés igazolása vagy elvetése további

részletes vizsgálatokat igényel, melyeket a következő fejezetben foglalunk össze.

Végezetül a 10. ábrán Molnár (1988) a *Nature* című folyóiratban megjelent publikációja nyomán bemutatjuk a kontinentális litoszféra szilárdságváltozásait (rideg, képlékeny és átmeneti zónák). Ez alapján is megállapítható, hogy a cikkünk előző fejezeteiben bemutatott eredmények beleillenek az ábrán közölt reológiai modell nagyobb léptékű vázlatába (vö. 2. és 9b. ábra).



10. ábra | Szilárdságváltozások a kontinentális litoszférában (Molnár 1988 nyomán)

Figure 10 | Variation of the rigidity in the continental lithosphere (after Molnar 1988)

### Az eredmények összefoglalása és további tervek

A PGT-4 mélyszeizmikus szelvény mentén alacsony frekvenciás (2 Hz) érzékelőkkel felvett archív mélyreflexiók 2020. évi újrafeldolgozásával, a mélykéreg tartományában a korábbinál magasabb koherenciájú összegszelvényt sikerült előállítani (3. és 4. ábrák). Az újrafeldolgozott szelvényváltozat kiemeli a Makói-árok és a Battonya–Pusztaföldvári gerinc alatt korábban felismert és a szelvény síkjában ÉK-i irányú látszólagos dőléssel jelentkező, a teljes földkérget harántoló vetőket (Posgay et al. 1996, Posgay et al. 1997, Gúthy et al. 2018). A vetősorozat valószínűleg a földkéreg K-i irányú megnyúlásának eredményeként alakult ki (Tari et al. 1992, Györfi 1994, Hajnal et al. 1996, Horváth et al. 2015).

Az 5. ábrán közölt reflexióerősség-szelvény elemzésekor ezúton is megerősítést nyert a földkéreg Békésmenedce alatti elvékonyodása (Posgay et al. 1995, Posgay et al. 1996, Gúthy et al. 2018) a feltételezett extenzió következtében. Erre utal az attribútumszelvény Békésmenedce alatti részén a kis reflektivitású (sötétkék színű)

terület felemelkedése. A szelvény ugyanezen szakaszán, a felemelkedett Moho alatti alacsony reflektivitású zónában nagyobb energiájú (piros színű), de alacsony koherenciájú reflexiók is megfigyelhetők. Ezek a reflexió-törödékek a kiemelt helyzetbe került, magasabb hőmérsékletű köpenyanyag fokozatos lehülése miatt alakulhattak ki geokémiai összetételtől függően. A reflexióerősség Békési-medence alatti eloszlása alapján, riftesedésre utaló nyomok is felfedezhetők (reflexióhiányos zónák megjelenése a prekainozoos medencealjzat felszínéig és egy helyen a neogén üledékekben is).

A PGT-4 szelvény teljes hosszán 2020-ban elvégzett AVO-inverzió eredménye ( $V_p/V_s$ ) igazolta a Makói-árok területén korábban végrehajtott inverzió eredményét (Takács, Hajnal 2000), azaz a Moho felett egy kb. 2 km széles csökkent szilárdságú zóna jelenlétét (lásd 2. és 9b. ábra). Az anomális közetfizikai paraméterekkel jellemzett zónát a környezeténél kisebb szilárdságú, képlékenyebb kőzetek jelenlétével magyarázzuk (pl. részleges olvadék vagy fluidtartalom).

A Mohora fókuszált AVO-inverziós eljárásunk újdonságnak tekinthető abban a tekintetben, hogy mindeddig kevés olyan publikáció ismert, melyekben a szerzők a kéreg mélyebb tartományában észlelt reflexiók AVO-analízisével foglalkoztak (pl. Pratt et al. 1993, Simon 1998). Az amerikai COCORP és a német DEKORP projektek keretében végrehajtott elemzések csak a vizsgált reflexiók polaritásának és AVO-válaszának egyszerű tanulmányozására korlátozódtak, a közetfizikai paraméterek meghatározása nélkül. Az amerikai tanulmány azonban fluidtartalmat valószínűsített a Georgia állam DK-i területe alatt (a középső kéregben) felfedezett ún. Surrency Bright Spot kiváltó okaként.

Megjegyzendő, hogy a PGT-4 szelvény alsó kéreg és felső köpeny átmeneti zónájában kapott  $V_p/V_s$  arányok valamivel alacsonyabbak a várt értékeknél (9b. ábra). Ez azonban összhangban van azzal, hogy a szelvény hosszában 9 ponton rendelkezésre álló archív MT szondázási adatok is a szokásosnál alacsonyabb fajlagosellenállás-értékeket mutatnak a teljes szelvény mentén (Kiss János szóbeli közlése 2021).

Végezetül megemlíjtjük, hogy a jelen cikkben közölt újszerű eredményeket további vizsgálatokkal kívánjuk ellenőrizni. Elvégezzük a  $V_p/V_s$ -adatok kalibrációját más típusú elemzésekkel kapott kéregadatok szakirodalmi összefoglalásai alapján (Christensen 1996, Holbrook et al. 1992). A vizsgált mélységtartományban előállítjuk a Poisson-hányados-változás szelvényt ( $\Delta\sigma$ ) és végrehajtuk a rendelkezésre álló szeizmikus adatok „elasztikus impedanciainverzióját” (Russell, Hampson 2006). Utóbbi adatfeldolgozás eredményei a Lamé-paraméterekkel ( $\lambda$  – összenyomhatatlanság,  $\mu$  – nyírási szilárdság) arányos szeizmikus attribútumok lesznek.

Jelen írásunkat kísérleti tanulmányként szántuk közreadni a témakörben, és további vizsgálataink során néhány pontosítással is ki fogjuk egészíteni (összegzés előtti migráció alkalmazása és a kezdeti  $V_p$ ,  $V_s$  és  $\rho$  közetfizikai mo-

dellek pontosabb meghatározása a kutatott mélységtartományban).

### Köszönetnyilvánítás

A szerzők ezúton fejezik ki köszönetüket Posgay Károlynak (1925–2019), aki egykori iránymutatásaival lehetővé tette a jelen cikkben bemutatott legújabb eredmények elérését.

Posgay Károly életének utolsó kutatóéveiben is aktívan foglalkozott a hazai litoszféra reológiai tulajdonságainak megismerésével, elsősorban a mélyszeizmikus adatok és a feltételezhető hőmérséklet-, nyomás- és geokémiai viszonyok összevetésével. Ezekre vonatkozó eredményeit sajnos már nem tudta közzétenni. A cikkben bemutatott új eredmények a Magyar Bányászati és Földtani Szolgálat 2020. évi Litoszférakutatás költségvetési projektjének keretében valósultak meg, korábbi szemléletformáló útmutatásai nyomán.

Köszönet illeti Zahuczki Pétert, aki eredeti kéziratunk lektorálása során segítőkész javaslatokat tett az AVO-inverzióval kapcsolatos néhány szövegrész sokkal pontosabb megfogalmazáshoz.

### A tanulmány szerzői

Takács Ernő, Kemény Márton, Gúthy Tibor, Hegedűs Endre, Fancsik Tamás

### Hivatkozások

- Aki K., Richards P. G. (1980): Quantitative Seismology: Theory and Methods, Vol. I and II. W. H. Freeman and Co.
- Chopra S., Castagna J. P. (2014): AVO, Investigations in Geophysics, 16, Society of Exploration Geophysicist, Tulsa, Oklahoma, 288 p.
- Christensen N. I. (1996): Poisson's ratio and crustal seismology, Journal of Geophysical Research, 101, 3139–3156.
- Goodway B. (2001): AVO and Lamé constants for rock parameterization and fluid detection. CSEG Recorder, June 2001, pp. 39–61.
- Gúthy T., Takács E., Kovács A. Cs., Fancsik T., Csabafi R., Török I., Hegedűs E. (2018): Recent developments in imaging the Earth's crust by deep seismic data beneath the eastern parts of the Pannonian Basin, Interpretation, 6, SB23-SB35, 13 p.
- Györfi I. (1994): Structural development of Neogene basins in SE Hungary and the Transylvanian Central Range (in Hungarian), MSc tézisek, Eötvös Loránd Tudományegyetem, Budapest.
- Haas J., Budai T., Csontos L., Fodor L., Konrád Gy. (2010): Magyarország pre-kainozoos földtani térképe. Magyar Bányászati és Földtani Szolgálat, digitális adattár.
- Hajnal Z., Reilkoff B., Posgay K., Hegedűs E., Takács E., Asudeh I., Mueller S., Ansorge J., DeIaco R. (1996): Crustal-scale extension in the central Pannonian basin. Tectonophysics, 264, 191–204.
- Hampson-Russell Software Services, Ltd. (2006): AVO Guide, 85 p.

- Harvey P. J. (1993): Porosity identification using AVO in Jurassic carbonate, offshore Nova Scotia. *The Leading Edge*, 12, pp. 180–184.
- Holbrook S., Mooney W. D., Christensen N. I. (1992): The seismic velocity structure of the deep continental crust. In: *Continental Lower Crust*, Fountain D. M., Arculus R., Kay R. (eds.), Elsevier, Amsterdam, pp. 1–43.
- Horváth F., Musitz B., Balázs A., Végh A., Uhrin A., Nádor A., Koroknai B., Pap N., T. Tóth T., Wórum G. (2015): Evolution of the Pannonian Basin and its geothermal resources. *Geothermics*, 53, 328–352.
- Lynch S., Crook H., Peel S., Foster P., Cowan G. (1997): Carbonate reservoir characterization using 3D AVO – A case study from offshore Tunisia. In: *59th Meeting of EAGE*, Geneva.
- Mazzotti A., Mirri S. (1991): An experience in seismic amplitude processing. *First Break*, 9/2, 65–73.
- Molnár P. (1988): Continental tectonics in the aftermath of plate tectonics, *Nature*, 335/8, 131–137.
- Ostrander W. J. (1984): Plane-wave reflection coefficients for gas sands at nonnormal angles of incidence. *Geophysics*, 49/10, 1637–1648.
- Posgay K., Bodoky T., Hegedűs E., Kovácsvölgyi S., Lenkey L., Szafián P., Takács E., Tímár Z., Varga G. (1995): Asthenospheric structure beneath a Neogene Basin in southeast Hungary. *Tectonophysics*, 252, 467–484.
- Posgay K., Takács E., Szalay I., Bodoky T., Hegedűs E., J. Kántor I., Tímár Z., Varga G., Bérczi I., Szalay Á., Nagy Z., Pápa A., Hajnal Z., Reilkoff B., Mueller S., Ansorge J., R. De Iaco R., Asudeh I. (1996): International deep reflection survey along the Hungarian Geotraverse. *Geophysical Transactions*, 40/1–2, 1–44.
- Posgay K., Bardócz B., Bodoky T., Albu I., Gúthy T., Hegedűs E., Takács E. (1997): A Hódmezővásárhely–Makói árok és a Békési-medence nagy mélységű nyírási zónái térbeli elhelyezkedésének közelítő meghatározása. *Magyar Geofizika*, 38/2, 95–123.
- Pratt T. L., Brown L. D., Mondary J. (1993): AVO and fluids in the deep crust: A COCORP case study. *The Leading Edge*, 12/3, 186–192.
- Russell B., Hampson D., Chun J. (1990): Noise elimination and the Radon transform, Part 1 and Part 2. *Geophysics: The Leading Edge of Exploration*, pp. 18–23, 31–37.
- Russell B., Hampson D. (2006): The old and the new in seismic inversion. *CSEG Recorder*, December 2006, pp. 5–11.
- Shuey R. T. (1985): A simplification of the Zoeppritz equations. *Geophysics*, 50, 609–614.
- Simon M. (1998): AVO analysis by offset-limited prestack migrations of crustal seismic data. *Tectonophysics*, 286, 143–153.
- Takács E. (1996): Az észlelési távolságtól függő amplitúdók analízise (AVO) és a hazai alkalmazás lehetőségei. *Magyar Geofizika*, 37/3, 154–169.
- Takács E., Hajnal Z. (2000): Amplitude Versus Offset case study on the Moho. *Geophysical Transactions*, 43/2, 93–111.
- Takács E. (2001): Az AVO analízis alkalmazási lehetőségeinek vizsgálata. PhD-tézisek, Miskolci Egyetem, Miskolc, p. 88
- Tari G., Horváth F., Rumpler J. (1992): Styles of extension in the Pannonian Basin. *Tectonophysics*, 208, 203–219.
- Zoeppritz (1919): Über Reflexion und Durchgang seismischer Wellen durch Unstetigkeitsflächen [On the reflection and transmission of seismic waves at surfaces of discontinuity]. *Nachrichte von der Königlichen Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen*, pp. 66–84.

# Stomfai Róbert

## 1934 – 2021

Ismét elvesztettünk egy kollégát, aki gyakorlatilag teljes munkás életét az ELGI-ben töltötte. Már piarista gimnazista korában megnyilvánuló szerénysége mögött rendkívül színes egyéniség rejtőzött. Diáktársai beválasztották a frissen alakult Diákönkormányzat vezetőségébe, melynek titkáráként képviselte érdekeit. Veszületett természetszeretete mellett a sport sem állt távol tőle: a természetjárástól a barlangászásig és evezésig át a sakkig sok minden vonzotta. Magassága predesztinálta, hogy az iskolai kosárlabdacsapat oszlopos tagja legyen.

1952-ben jelesen érettségizett, és még ugyanabban az évben felvételt nyert az ELTE matematika-fizikatanár szakára. Eredeti szakmájában a II. Rákóczi Ferenc gimnáziumban mindössze egy félévet töltött. Erről az időszakról egykori tanítványa, Hegymegi László, így emlékszik: „A fegyelmzés nem volt a kenyere, fél év után felhagyott a tanári pályával, pedig nagyon érthetően és világosan tudott magyarázni. Nekem csak jó emlékeim maradtak róla.”

Csalódást okozó rövid tanári pályafutása után 1957-ben kezdett dolgozni az akkoriban komoly diplomás munkaerőhiányban szenvedő ELGI-ben. Itt találta meg azt a szellemiséget, munkatársi légkört, amely megfelelt csendes, szelíd egyéniségének. Soha nem törekedett előléptetésre, pozícióra, azonban hamarosan nélkülözhetlenné vált.

Geofizikus pályafutását az Intézet Földmágneses Osztályán kezdte. Matematikai alapképzettségével szerencsés időpontban érkezett a Geofizikai Intézetbe, mert a számítógépek megjelenése komoly távlatokat nyitott a földtani-geofizikai kutatás terén is. Az Observatóriumi Osztályon pl. részt vett az 1965-ös országos mágneses alaphálózat-mérés anyagának feldolgozásában és a normáltér számításában. 1968-ban a Gravitációs Osztályon nagy szükség lett volna egy matematikus beállítottágú munkatársra. A Tihanyi Observatóriumban viszont egy műszeres érdeklődésű emberre lett volna szükség, így kézenfekvően adódott, hogy a frissen végzett Hegymegi Laci fejében meg tudják szerezni Stomfai Robit. Ő aztán hű is maradt a gravitációs témához, ebben dolgozott egészen nyugdíjba vonulásáig. Feladata az volt, hogy számítógépre vigye a tö-

meges számítást igénylő geofizikai műveleteket: a potenciáalterek szűrését, a térfolytatásokat és a modellszámításokat. Kiemelkedő jelentőségű volt a modellszámítások gépre vitele, mert ettől kezdve gyorsan lehetett ellenőrizni egy-egy földtani elgondolás realitását. A feltételezett mélybeli hatóalakzatok kiszámított hatását össze lehetett vetni a mérési eredményekkel, és az egyezés vagy nem egyezés elemzése alapján lehetett az elgondolást finomítani. Mindig nyitott volt az újdonságokra, pl. 1959-ben a Vas Imre-barlang új bejáratának kitűzését a mágneses módszer alkalmazásával sikerült kijelölnie azáltal, hogy 2%-os pontossággal meg tudta határozni a barlang felszínhez legközelebb eső pontját.

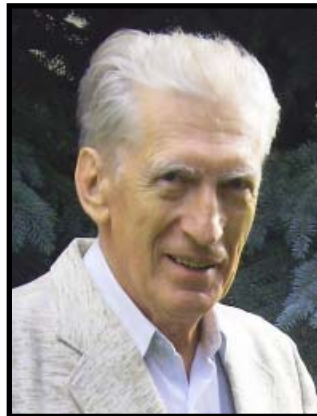
Visszahúzódo természete ellenére, ha úgy érezte, munkájával segíthet másokon, mindig készen állt a segítségre: részt vett pl. az ELGI-ben szervezett felsőfokú technikai oktatásban, továbbá számí-

tógépes programozói tanfolyamot tartott munkatársai részére. Többen az ő révén kerültek közelebbi kapcsolatba az új technikával. Egykori munkatársai el nem múló szeretettel gondolnak rá.

Már nyugdíjasként Eötvös Loránd emlékének ápolása terén fejtett ki hasznos tevékenységet, és a tudomány népszerűsítése érdekében cikkeket írt az Élet és Tudomány számára. A szakmának se mondott búcsút, még hat cikk jelent meg a Magyar Geofizikában, melyben társszerzőként ott áll Robi neve. Hiszen kollégái bármilyen vadnak tűnő ötlettel keresték meg, mindig készen állt annak számítógépes megvalósítására. Új hobbiként bejött a kertészkedés, balatoni telkükön kis paradicsomot teremtett az unokák számára.

Feleségével együtt részt vett minden évben a seniorok kirándulásán, így mondhatjuk, hogy felesége, Teri is tagja volt a seniorközösségnek. Robi élete utolsó éveiben saját betegeskedése ellenére gondosan ápolta nagybeteg feleségét. Együtt éltek szeretetben, megértésben, együtt is haltak meg néhány nap különbséggel napjaink pestisében, a COVID-19-járványban. Emléküket megőrizzük, nyugodjanak békében!

*Szabó Zoltán*



Stomfai Róbert  
1934 – 2021

# Gadó Károly

## A Magyar Geofizikusok Egyesületének alapító tagja

### 1933 – 2021

Gadó Károly geofizikus kollégánk 2021. március 2-án 88 éves korában befejezte evilági pályafutását, mindössze néhány nap késéssel követve kedves feleségét, Máriát.

Gadó Károly Pécsen született, majd a családja Budapestre költözött. 1953-ban nyert felvételt az Eötvös Loránd Tudományegyetemre, ahol 1957-ben okleveles geofizikusként fejezte be tanulmányait. Ezt követően az Országos Kőolaj- és Gázipari Tröszt (továbbiakban OKGT) Szeizmikus Kutatási Üzeménél helyezkedett el, és egészen 1993-ban történt nyugdíjba vonulásáig ennél a vállalatnál dolgozott.

Kezdeti éveit terepi munkakörökben töltötte. Munkája során volt reflexiós és refrakciós segédészlelő, észlelő, terepi csoportvezető, ahogyan ez abban az időben szokásos volt. Számtalan magyarországi kutatási programban vett részt, szó szerint bejárta, megismerte az egész országot. Munkája elismeréseként 1961–63 között annak a szakértői csoportnak a tagjává választották, amelyet a Német Demokratikus Köztársaság kérésére az NDK északi területein végzett szeizmikus mérések támogatására küldött ki Magyarországra.

Hosszú, 14 éves terepi tevékenysége során részese volt a vállalat terepi munkát érintő műszaki fejlesztéseinek. Beleértendő ebbe a kezdeti fotoregisztrációs reflexiós és refrakciós mérésekről az 1960-as évek második felében a mágnesszalagos analóg mérésekre való áttérésben, majd 1971-től a digitális jelrögzítésű, többszörös fedéses mérési technikák bevezetésében, üzemszerű alkalmazásában végzett tevékenysége is.

1971-ben – befejezve folyamatos terepi tevékenységét – a Geofizikai Műszaki Osztály állományába került, ahol területfelelős geofizikus csoportvezetőként a rábízott kutatási területek szeizmikus méréseit tervezte és ellenőrizte.

Szakmai pályájában meghatározó évnek bizonyult az 1976-os év. A hazai szeizmikus kutatásban mindaddig a rengéskeltés kizárólag fúrásos-robbantásos eljárással folyt. Ekkor került sor az annál hatékonyabb, általában jobb eredményeket biztosító és a környezetre sokkal kevésbé káros, vibrátoros gerjesztési eljárás – a vibroszeiz – eszközeinek beszerzésére majd a következő évben, 1977-ben az eljárás részleges bevezetésére az akkor éppen Geofizikai Kutatási Üzemnek nevezett vállalatnál. Az új eljárás a korábbiaknál feszelesebb tervezési és mérési technológiát igényelt.

Ennek kidolgozásában, alkalmazásában meghatározó szerepet játszott.

Az iraki kormány és az OKGT 1978-ban megállapodást kötött az iráni határ tőzomszédságában végzendő szeizmikus mérések elvégzésére, amely 1978-ban meg is kezdődött és egészen az 1980-as Irak-iráni háború kitöréséig tartott. Itt a mérések helyszíni irányítójaként, valamint a bagdadi iroda vezetőjeként tevékenykedett.

Az ekkorra már Geofizikai Kutató Vállalat névre átkeresztelt cég méréseit a háború miatt félbe kellett szakítani. Jelentős volt a szerepe abban, hogy sikerült a csoport személyzetét és fontosabb eszközeit a háborús térségből kimenekíteni és épségben hazajuttatni. Irakból hazatérve a Geofizikai Műszaki Osztályon folytatta korábbi tevékenységét.

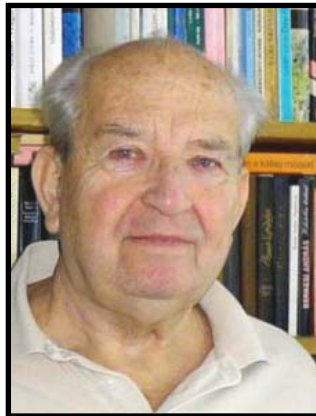
1983-tól megbízást kapott a vállalat személyzeti, majd kisvártatva munkaügyi szervezetének irányítására is, amely

egészen nyugállományba vonulásáig végzett. Személyzeti vezetői korszakán belül az 1990-et követő évek kifejezetten kritikusak voltak az OKGT részvénytársasággá alakulását előkészítő, majd a Magyar Olajipari Részvénytársaság (a MOL) megalakulását követő folyamatos átszervezések miatt. Ezek egyikeként az OKGT számos vidéki telephelyen működő teljes mélyfúrás-geofizikai és geológiai kutatóapparátusát először a GKV-val közös egységbe szervezték, MOL Rt. Geofizikai Egysége néven, majd 1992-től részben a frissen megalakult MOL Rt.-be integrálták, más részeit leányvállalatokká alakították át.

Gadó Károly mint az átmenet idejére így létrehozott egység személyzeti és munkaügyi vezetője az átszervezésekkel kapcsolatos szervezőmunkák – amely lényegét tekintve 1993 elejére fejeződött be – aktív és avatott résztvevője volt.

Személyzeti vezető szerepe ellenére is igen tevékenyen működött közre az akkorra már megalakult MOL első külföldi koncessziójához köthető, tunéziai szeizmikus mérések megszervezésében.

1993-ban történt nyugdíjba vonulása után nyugdíjas geofizikusként is széles körű ismereteit, tapasztalatait felhasználva közel egy évtizeden át támogatta a MOL hazai és külföldi koncessziós területein geofizikai méréseket szervező, irányító egységének munkáját.



Gadó Károly  
1933 – 2021

A Magyar Geofizikusok Egyesületének alapító tagja volt, 1981 és 1986 között az Oktatási Bizottság munkájában is részt vett. Érdemei múlhatatlanok az egyetemet végzett geofizikusok másoddiplomás közgazdászképzésének megszervezésében.

1985-ben az EAEG – az európai kutató geofizikusok szervezete, European Association of Exploration Geophysicists – Budapesten tartotta műszerkiállítással összekötött 47. éves konferenciáját mintegy 2300 külföldi résztvevővel. A sikeresnek bizonyult rendezvény szervezésében is komoly munkát vállalt.

Egyesületi munkásságát emléklappal majd Renner János-emlékéremmel ismerték el.

Minden szempontból sikeresnek tekintendő szakmai pályafutásának rövid összefoglalásából is kitűnik gazdag életútja, sokoldalúsága. Ilyen életutat csak megfelelő emberi tulajdonságokkal felvértezve lehetett sikeresen végigjárni. Gadó Károly szerette az életet. Ezt közismerten optimista, életigenlő szemlélete mutatta legérzékletesebben, és az, hogy környezetét is sikerrel tudta ebbe az irányba befolyásolni jó emberismeretével és kiváló kapcsolat-teremtő képességével.

Nem volt olyan – akár személyes jellegű – probléma, amellyel gyakorlatilag bárki, bárhol, bármikor ne fordul-

hatott volna hozzá segítségért, tanácsért. Komolyan vette a környezetében előforduló problémákat, és mindent megtett azok orvoslására. Jellemző volt rá a szükség esetén határozott szókimondó, ám sohasem sértő állásfoglalása, ami sokat segített abban, hogy munkatársait, beosztottait is céltudatos munkára serkentse. Mindig az aktuális feladat megoldására koncentrált elkerülve a kishitűség buktatóit.

Hivatalos tevékenysége mellett vezéralakja, sőt szervezője volt számos nem szakmai, például sportrendezvénynek, lett légyen az evezés, vitorlázás vagy bármilyen más közös tevékenység, beleértve ebbe akár a baráti összejöveteleket, vacsorákat is.

Gadó Károly jó vezető, jó barát volt. Nem könnyű tudomásul venni egy jó ismerős – egy barát – eltávozását, de sajnos meg kell hajolni a sors akarata, az élet törvénye előtt. Az itt maradottaknak: gyermekeinek, unokáinak, dédunokáinak, rokonoknak, barátoknak, ismerősöknek egyaránt, marad a gyász – és az emlékezés.

Mi, egykori munkatársai, őrizni fogjuk emlékét.  
Nyugodjon békében!

*Mód Gábor*



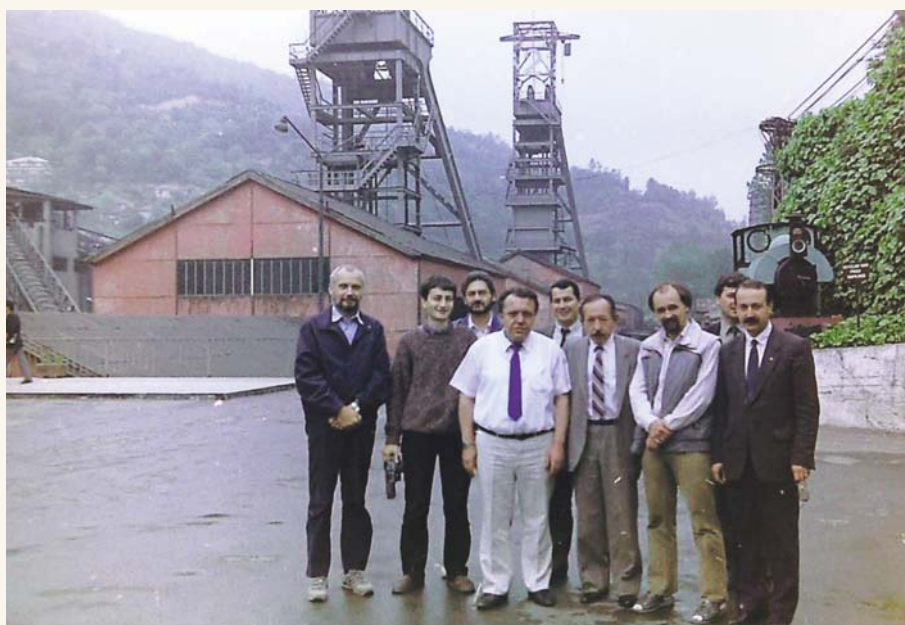


# 1987

## Bányabeli szeizmikus mérések Törökországban



Az ELGI csapata útban Zonguldak felé  
(az autó mellett Hermann László áll)



Zonguldak-Kozlu Bányáüzem  
(Balról: Bodoky Tamás, Scholtz Péter, Szabados László,  
török bányavezetők, jobbról a harmadik Kónya Albert)

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)

