

MAGYAR GEOFIZIKA

HUNGARIAN GEOPHYSICS

A MAGYAR
GEOFIZIKUSOK
EGYESÜLETÉNEK
FOLYÓIRATA



JOURNAL OF THE
ASSOCIATION
OF HUNGARIAN
GEOPHYSICISTS

Köszönet
Helyreigazítás

A Bangui-mágneses anomália értelmezése inverzióval
a Swarm A mesterséges hold mérései alapján
Termohalin konvekció numerikus vizsgálata porózus közegmodellben
Magyarország földradar- (GPR) alkalmazhatósági térképe,
fizikai és talajtani paraméterek alapján
Kicsiny kvadrupólus mágnes paramétereinek meghatározása
spinner-magnetométeres mérési adatokból

Egy kutatási jelentés margójára
Közterület-elnevezés és szoborállítás
Eötvös Loránd emlékére

Kárpátmedencei Természettudományi Verseny – 2021
Országos Geotermikus Rendszer
A Magyarhoni Földtani Társulat közleménye
Rendezvénynaplár



MAGYAR GEOFIZIKA

HUNGARIAN GEOPHYSICS

61. évfolyam (2020) 4. szám



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

TARTALOM • CONTENTS

SZERKESZTŐSÉGI ROVAT • EDITORIAL

- 167 A Szerkesztőség köszönete (Acknowledgments) – *Szerkesztőség*
167 Helyreigazítás (Erratum) – *Szerkesztőség*

TANULMÁNY • PAPER

- 168 A Bangui-mágneses anomália értelmezése inverzióval a Swarm A mesterséges hold mérései alapján (A new map of the Bangui magnetic anomaly produced by an inversion method using Swarm A data) – *Kis K., Taylor P. T., Toronyi B., Pusztai S.*
177 Termohalín konvekció numerikus vizsgálata porózus közegmodellben (Thermohaline convection in a homogeneous porous medium) – *Szijártó M., Galsa A.*
191 Magyarország földradar- (GPR) alkalmazhatósági térképe, fizikai és talajtani paraméterek alapján (Ground Penetrating Radar (GPR) soil suitability map of Hungary based on physical and pedological parameters) – *Nádasi E., Dobos E., Pecsmány P., Turai E.*
199 Kicsiny kvadrupólus mágnes paramétereinek meghatározása spinner-magnetométeres mérési adatokból (Direct analytical solution for the parameters of a small-sized magnetic quadrupole measured on a suitable spinner magnetometer) – *Márton P.*

TUDOMÁNYTÖRTÉNET • SCIENCE HISTORY

- 203 Egy kutatási jelentés margójára (Remarks on a research report) – *Bodoky T. J.*
214 Közterület-elnevezés és szoborállítás Eötvös Loránd emlékére (Naming a public place and erecting a statue for Roland Eötvös) – *Baráth I., Pályi A., Szabó Z.*

HÍREK • NEWS

- 219 Kárpátmedencei Természettudományi Verseny – 2021 – *Zelei G.*
222 Országos Geotermikus Rendszer – *Magyar Bányászati és Földtani Szolgálat*
223 A Magyarhoni Földtani Társulat közleménye – *Magyarhoni Földtani Társulat*
224 Rendezvénytár – *Szerkesztőség*

MAGYAR GEOFIZIKA

HUNGARIAN GEOPHYSICS

61. évfolyam (2020) 4. szám

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

Főszerkesztő • Editor-in-Chief

DR. BODOKY TAMÁS

E-mail: mageofedit@gmail.com

Szerkesztőbizottság • Editorial Board

DR. BARÁTH ISTVÁN, DR. GALSA ATTILA, DR. KISS JÁNOS,

DR. PETHŐ GÁBOR, DR. SZABÓ NORBERT PÉTER

Technikai szerkesztő • Technical Editor

HOCK GÁBOR

E-mail: mageoftechn@gmail.com



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

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

Kiadja a Magyar Geofizikusok Egyesülete
A kiadásért felel: 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
print HU ISSN 0025-0120
online HU ISSN 2677-1497

A Szerkesztőség köszönete

A *Magyar Geofizika* szerkesztősége köszönetét fejezi ki a lap olvasóinak nevében is azoknak, akik a lap szerkesztésében, illetve színvonalának megőrzésében, javításában az elmúlt 2020. évben közreműködtek.

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

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

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

Abordán Armand, Bodoky Tamás, Drahos Dezső, Gyulai Ákos, Hegedűs Endre, Kis Márta, Kiss Anett, Kiss János, Kovács Péter, Pethő Gábor, Takács Ernő, Verő László, Zilahi-Sebess László

Köszönet a hátlapon közölt képek beküldőinek! Köszönjük, hogy kérésünkre vették a fáradságot, hogy sok évtizeddel ezelőtti fényképeket keressenek elő és juttassák el hozzánk, valamint köszönjük az Egyesület rendezvényeiről beküldött fényképeket is. A képeket következő kollégáinktól kaptunk:

Baráth István, Deres János, Kovács Attila Csaba, Pályi András, Petró Erzsébet, Szabó Zoltán, Zelei Gábor.

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

Szerkesztőség

Helyreigazítás

A *Magyar Geofizika* előző, 2020/3. számában egy sajnálatos hiba történt. Szabó Zoltán: „Az ELGI-székház megnyitásának ötvenedik évfordulójára” című tudománytörténeti cikkének végéről a szerkesztés során lemaradt a „Köszönetnyilvánítás”. Elnézést kérve a Szerzőtől, a köszönet címzettjeitől és tisztelt Olvasóinktól ezt most pótlólagosan közöljük:

Köszönetnyilvánítás

Ezúton szeretném kifejezni hálás köszönetemet azoknak, akik elősegítették munkámat, elsősorban *Mészárosné Jelinek Beáta* könyvtárosnak sűrű könyv- és cikk-kéréseim gyors és pontos teljesítéséért. Hálával tartozom a KÖZTI Zrt. *igazgatójának* és *helyettesének*, hogy engedélyezték az archivált tervezetekbe való betekintést, valamint a *dokumentációs részleg dolgozóinak*, hogy segítségemre voltak a mikrofilmen őrzött anyag előkeresésében és a technika kezelésében. *(Szabó Zoltán)*

Szerkesztőség

A Bangui-mágnesesanomália értelmezése inverzióval a Swarm A mesterséges hold mérései alapján

KIS K.^{1,®}, P. T. TAYLOR², TORONYI B.³, PUSZTA S.⁴

¹Ötvös Loránd Tudományegyetem, Geofizikai és Űrtudományi Tanszék,
1117 Budapest, Pázmány Péter sétány 1/C

²Hydrospheric, Biosphere and Geophysics Laboratory NASA/GSFC,
Greenbelt, MD 20771, USA

³Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Általános és Felsőgeodézia Tanszék,
1111 Budapest, Műegyetem rakpart 1–3.

⁴Fractal Bt. 1155 Budapest, Óda u. 37.

®E-mail: kisk@caesar.elte.hu

Az első részben összefoglaljuk az ismereteket a Bangui-mágnesesanomáliáról. Ezt követően bemutatjuk a korábbi kutatásokat és értelmezéseket a vizsgált területről. Részletesen összefoglaljuk az adatkezelés lépéseit a Swarm A mesterséges holdra vonatkozóan. A meghatározott anomáliák vonatkoztatási szintje az IGRF 12. generációja. Az inverz feladat megoldása mindig igényli a direkt feladat megoldását, ez jelen esetben vízszintes alap- és fedőlappal határolt poligon. A direkt feladat egyenletei derékszögű Descartes-féle koordináta-rendszerben adóttak, ezért szükséges a gömbkoordináta-rendszerben regisztrált totális Bangui-mágnesesanomáliák transzformálása derékszögű koordináta-rendszerbe. A mágnesezettséget és annak irányát a szakirodalomban elfogadott értéknek tekintettük. A Simplex-eljárással a poligon 14 paraméterét kellett meghatározni, így az inverz feladatot, azaz a minimum meghatározását 14 dimenziós térben szükséges elvégezni. Az inverz feladat megoldása a 12 horizontális koordináta és a poligon alsó és felső mélysége. A szakirodalomban részben földtani eredetű, részben becsapódásból származó totális mágneses anomáliaként értelmezik a Bangui-anomáliát. Az elvégzett inverziós számítások szerint nem dönthető el egyértelműen az anomália eredete. A Gauss-féle hibaterjedési törvény alapján kiszámítottuk a meghatározott anomália-térkép hibáját.

Kis, K., Taylor, P. T., Toronyi, B., Puszt, S.: A new map of the Bangui magnetic anomaly produced by an inversion method using Swarm A data

We wanted to make a satellite altitude magnetic anomaly map of the large magnetic anomaly in the Central African Republic, the Bangui magnetic anomaly, with data from the Swarm A satellites. In the first part of our study we summarize the earlier investigations and their interpretation. In the second we discuss our data processing applied to produce magnetic anomaly map. We used the IGRF 12th to remove the long-wavelength regional anomaly. We will use an inverse procedure, they always require the solution of the direct problem, a horizontal polygonal prism given in the Descartes coordinate system. For this reason the total magnetic anomaly was transformed into the Descartes coordinate system. The magnetization and its direction were used from our previous paper. The inverse problem is solved by the Simplex procedure. Our selected polygon has 14 geometrical parameters however, the inverse problem that is the numerical determination of the minimum problem is solved in the 14 dimensions. The result of our inverse problem was the 12 horizontal coordinates and the two upper and lower data of the polygon. The origin of the Bangui anomaly has been discussed in several scientific reports, either as a deep crustal tectonic feature or the result of a large external impactor. However, according to our inversion computations we cannot make any unambiguous finding for the origin of this feature. The inaccuracy in our total anomaly map is given by the Gaussian error propagation.

Beérkezett: 2020. december 18.; *elfogadva:* 2021. március 1.

Bevezetés

A mesterséges holdak által meghatározott mágneses mérések feldolgozása lehetővé teszi a földkéregben található mágneses anomáliák globális értelmezését. A magnetométerrel felszerelt mesterséges holdak (Kozmosz-49, POGO-2,4,6, Magsat, Oersted, CHAMP, SAC-C) detektáltak több, már ismert anomáliát, és elvégezték azok értelmezését. Ezeknek a mágneses méréseknek és anomáliáknak az összefoglalása megtalálható Langel és Hinze (1998) könyvében. A SWARM mesterséges holdak (l. később) további részletes méréseket tettek lehetővé.

Taylor et al. (1989) és Taylor és Schnetzler (1990) korai tanulmányukban felhívták a figyelmet arra, hogy a mesterséges holdak által detektált mágneses anomáliák felhasználhatók a nyersanyagkutatásban is. Kifejtették azt is, milyen magasságban keringő holdakat lehet felhasználni, az ezektől megkívánt pontosságot és a hibaanalízis fontosságát.

A Bangui-mágneses anomália

A Földön előforduló mágneses anomáliák közül egyik legnagyobb a Közép-afrikai Köztársaságban található Bangui-mágneses anomália. A Bangui-mágneses anomália Bangui városától kissé északra található.

Ezt a mágneses anomáliát először szárazföldi mérésekkel detektálták az ORSTOM (Office de la Recherche Scientifique et Technique Outer-Mer) project keretében 1953-ban (Godivier, Le Donche 1956). Ez a mágneses anomália prekambriumi pajzson található a Csád és Kongó

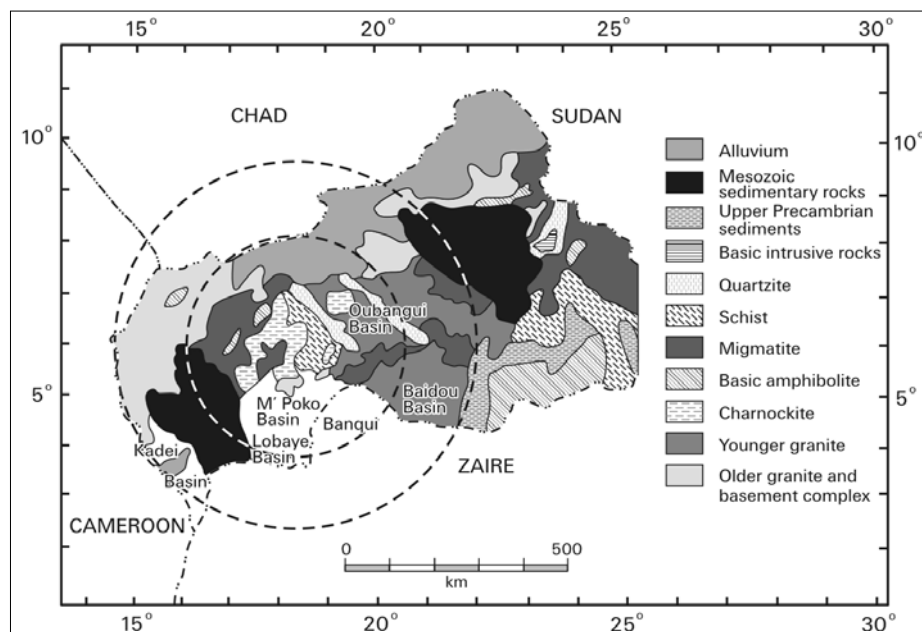
medencék között, több prekambriumi medence található a mágneses anomália középső részén (1. ábra).

A Project Magnet keretében végzett totális mágneses mérések között, a 3 km magasságban mért szelvények közül a T 204 jelű keresztezte a Bangui-mágneses anomáliát (Green 1976). A légi mágneses szelvény -1500 nT-t mutat (2. ábra). Green (1976) értelmezése szerint nagy mélységig kiterjedő, vas meteorit becsapódása okozhatta a negatív értékű anomáliát.

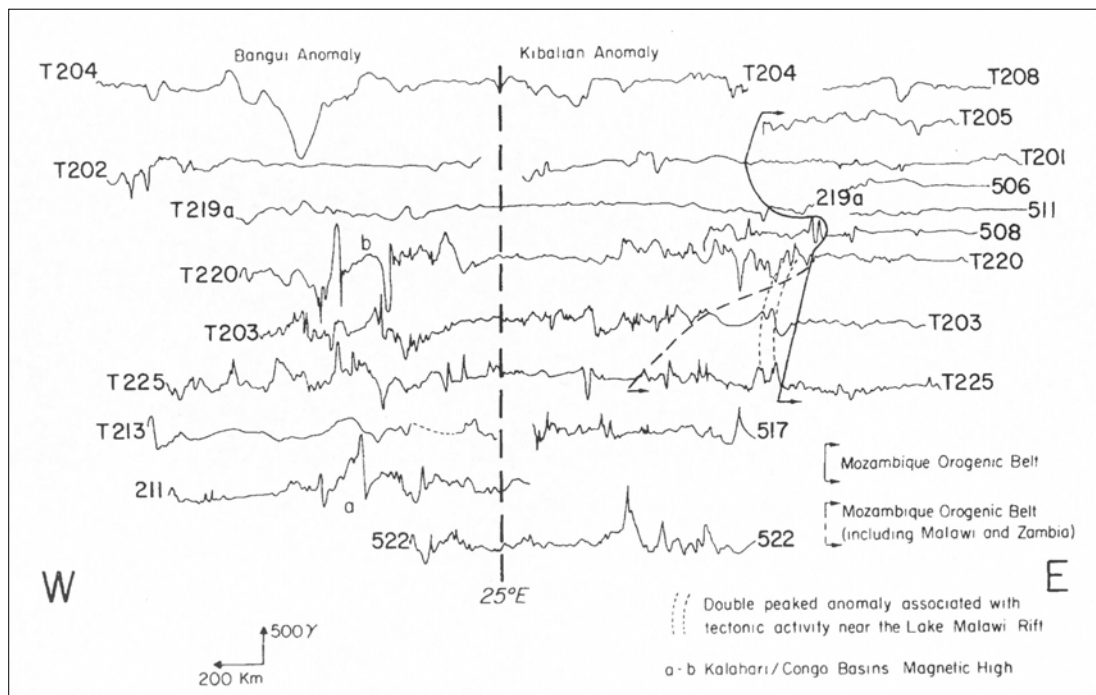
Hastings (1982) bemutatta a Magsat (a mesterséges hold 1979. X. 30. és 1980. VI. 11. között végezte méréseit) előzetes értelmezését az afrikai kontinensre vonatkozóan. Véleménye szerint a prekambriumi kiemelkedés okozhatta a Bangui-mágneses anomáliát. Közel vízszintesen mágnesezett ható hozta létre a jellegzetesen negatív mágneses anomáliát.

Ravat (1989) az afrikai régióra vizsgálta a mágneses anomáliák eloszlását a Magsat mérései alapján.

Regan és Marsh (1982) úgy interpretálta a Bangui-mágneses anomáliát, hogy azt a földkéregbe benyomult, nagyméretű mafikus pluton hozta létre. Az értelmezést a Magsat mérései alapján végezték. Tanulmányukban bemutatták a különböző magasságban és szélességeken jelentkező anomáliákat (3. ábra). A szelvények közül több helyezkedett mágneses ható fölött. A benyomulás izosztatikusan kompenzált. A negatív Bouguer-anomáliát a medencét kitöltő üledékes kőzet okozza. A ható mélysége 3 km-től 35 km-ig terjed. A ható mágneses szuszceptibilitása 0,01 (SI) a ható és környezete közötti sűrűségeltérés 100 kgm^{-3} . Az üledékes kőzet – amely a hatót fedi – szuszceptibilitása 10^{-6} (SI), a sűrűségeltérés -150 kgm^{-3} értékűnek tekinthető.



1. ábra A Közép-afrikai Köztársaságban található Bangui-mágneses anomália környezetének egyszerűsített geológiai környezete. A kettős kör mutatja a később tárgyalt becsapódási szerkezetet (Girdler et al. 1992)
Figure 1 Simplified geological map in the region of the Bangui magnetic anomaly in the Central African Republic. The double circles show (later discussed) the position of the impact structure (Girdler et al. 1992)

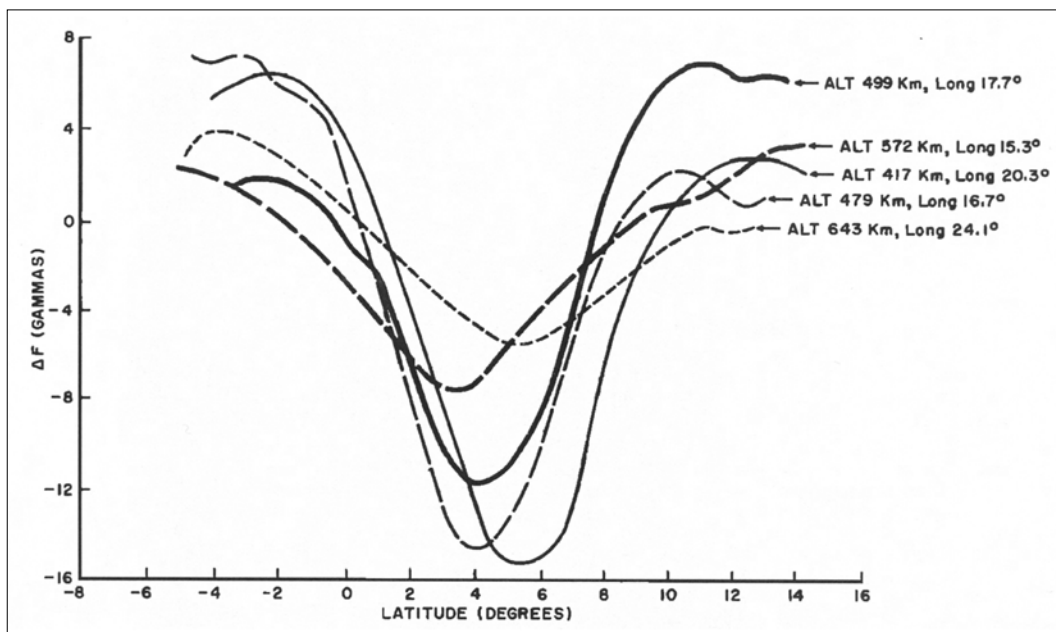


2. ábra A Bangui-mágnesesanomália felett 3 km-es magasságban regisztrált anomália. Az ábra több szelvényt mutat. Az ábrán látható T 204 szelvény mutatja a totális Bangui-mágnesesanomáliát (Green 1976)

Figure 2 Bangui magnetic anomaly at 3 km altitude. Several profiles are presented with profile T 204 showing the Bangui total magnetic anomaly (Green 1976)

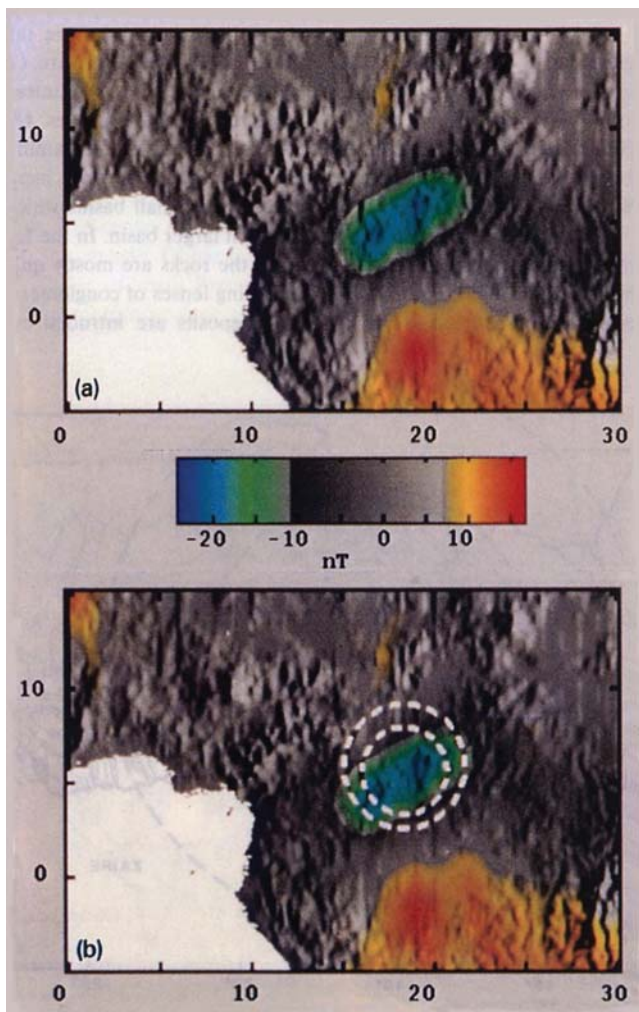
Girdler et al. (1992) geológiai térképe szerint a mágneses anomália középpontja közel helyezkedik el az Oubangui-medencéhez. Migmatitok, charnockitok, idősebb és fiatalabb gránitok jellemzik az alsó földkérget, míg prekambriumi metaszedimentek töltik ki a medencét, ezek

fedik a becsapódási szerkezetet. Girdler et al. (1992) egybevetette a LANDSAT felszint ábrázoló felvételét a Magsat méréseiből levezetett mágnesesanomália-képpel (4. ábra). A felszint ábrázoló felvétel kettősgyűrű-szerkezetet mutatott, a külső gyűrű átmérője 810 km, míg a



3. ábra A Magsat által regisztrált, a Bangui-mágnesesanomália szelvénye különböző magasságban és hosszúság mentén (Regan, Marsh 1982)

Figure 3 Magsat data indicating the Bangui magnetic anomaly at different altitudes and longitudes (Regan, Marsh 1982)



4. ábra A Magsat Bangui-mágneses anomália a topográfiai térképre vetítve (felső ábra), a Bangui-mágneses anomália a topográfiai térképre vetítve a kettős gyűrűs szerkezetet kiemelve (alsó ábra) (Girdler et al. 1992)

Figure 4 The Bangui Magsat magnetic anomaly superimposed on a topographic image (upper panel), the Bangui Magsat anomaly map superimposed on the topographic image with the double ring structure (lower panel) (Girdler et al. 1992)

belső gyűrű átmérője 491 km. A külső gyűrű nagy átmérője arra utal, hogy az anomália forrása becsapódásból származhat. A becsapódó meteorit nagyméretű lehetett, átmérője nagyobb, mint 80 km. Ha a szerkezetet becsapódás hozta létre, akkor a szerkezet egyike a Földön található legnagyobbaknak. Girdler et al. (1992) az anomália forrását korong alakúnak modellezte, amelynek átmérője 800 km, vastagsága 4,5 km. Felső lapja 3 km mélységben helyezkedik el. A ható mágneszettségét 10 Am^{-1} nagyságrendűnek tételezték fel, amelynek deklinációja -18° , inklinációja 25° . Az indukált mágneszettség iránya $D = -3^\circ$ és $I = -12^\circ$. Az inverziós számítások során ezeket a paramétereket fogadtuk el. A negatív Bouguer-anomáliát a hatót fedő üledékes kőzet okozhatja, amely kisebb sűrűséggel rendelkezik, mint a környezete.

A Bangui-anomáliát sok szerző vizsgálta (Taylor 2007) és (Kim 2007). Kim (2007) a Bangui-mágneses anomáliát a CHAMP mágneses méréseiből vezette le.

Ouabego et al. (2013) a kőzetek mágneszettségének eloszlását vizsgálta a Bangui-mágneses anomália okának meghatározására. Vizsgálatuk szerint nem találtak becsapódás következtében létrejött mágneszettséget. A mágneses anomália lehetséges forrásának oka: az Afrikai-lemez mozgása során lépett kölcsönhatásba az ősi, Gondvánához tartozó afrikai kratonokkal. Az anomália kialakításában a neoproterozoikumi vasban gazdag meta-szedimentek játszhatnak szerepet.

A Bangui-mágneses anomáliával kapcsolatban felmerülő kérdés: az anomália eredete. A szakirodalomban két eredetet tárgyalnak: egyik az anomália meteoritbecsapódásból származik (Green 1976, Girdler et al. 1992); másik megközelítés az anomália földtani szerkezetet tükröz (Godivier, Le Donche 1956, Hastings 1982, Regan, Marsh 1982, Ouabego et al. 2013). A következtetés: az anomália alakja, kiterjedése és beágyazódása alapján geológiai folyamat hatására jött létre.

Adatkezelés

A SWARM holdakat Rokot rakétával bocsátották Föld körüli pályára a Plesetsk űrbázisról 2013. november 22-én. A SWARM küldetést az Európai Űrügynökség (ESA) irányította a Living Planets Program keretében.

A SWARM holdakat közel kör alakú pályára állították. Két mesterséges hold (A és C) közel keringett egymáshoz képest, kezdeti magasságuk 460 km volt, míg a harmadik hold (B) kezdeti magasságának 530 km-t választottak. A pályák inklinációja az A és C hold esetében $87,4^\circ$ míg a B hold inklinációja 88° . Az A és C holdak közel párhuzamos pályával rendelkeztek, gömbi távolságuk $1,5^\circ$ az Egyenlítőn.

A feldolgozás során 2015. február 27. és 2015. július 20. közé eső adatokat használtuk fel.

A SWARM holdak flux-gate vektor-magnetométerrel és Overhauser skalár-magnetométerrel voltak felszerelve (Leger et al. 2015). A skalár- és vektor-magnetométerek minden másodpercben végeztek méréseket, így egy magnetométer egynapi regisztrátuma 86400 rekordot tartalmazott. Ha az átlagos 90 perces keringési időt vesszük figyelembe, akkor az egynapos regisztráció közel 16 pályamenti fordulatnak felel meg.

A SWARM holdak mágneses mérései a Level 1B folderben találhatóak. Az A, B, és C holdak mérései CDF (Content Definition File) formátumban adóttak. Az adatkezelés első fázisa a CDF-fájlok konverziója ASCII (American Standard Code for Information Interchange) formátumba, mivel a későbbi FORTRAN számítások ezt a formátumot teszik szükségessé. A letöltött fájlok tartalmazzák az adatok keltjét és idő voltát, az adatok gömbi koordinátáit (szélesség, hosszúság és gömbi távolság). A mágneses tér X , Y , Z komponenseit, a totális T mágneses

méréseit és a mérések hibáit. Ezek az adatok szükségesek a további számításokhoz.

Azok az adatok kerültek további felhasználásra, amelyekre vonatkozó Kp index ≤ 1 . A Kp indexeket az IAGA International Service of Geomagnetic Indices táblázatai tartalmazzák.

Az adatkezelés következő lépése az anomáliák meghatározása. Az anomáliák vonatkoztatási szintjét az International Geomagnetic Reference Field 12. generációja adta meg (Thébaud et al. 2015). Susan Macmillan (British Geological Survey) dolgozott ki FORTRAN programot az IGRF számítására, amely az IAGA honlapján található. Ennek kicsit módosított változatát használtuk fel. A vonatkoztatási szint a mesterséges holdak méréseinek idejére és pozíciójára vonatkozik. A számításokkal meghatároztuk a ΔX , ΔY , ΔZ és ΔT anomáliákat. Az anomáliákat a teljes pályára számítottuk ki.

A Kp index alapján és az IGRF által megadott referenciaértékhez viszonyított totális Bangui-mágneses anomáliákat a $-9,75^\circ \leq \varphi \leq 19,25^\circ$ és $0,25^\circ \leq \lambda \leq 29,5^\circ$ területre szelektáltuk.

A Bangui-mágneses anomália meghatározása

A Bangui-mágneses anomália meghatározásakor a mesterséges hold pályáit szeparálni kellett felszálló és leszálló ágra. A pályák közel észak-déli irányúak. A pályákra külön-külön mediánszűrőt alkalmaztunk a kilógó adatok eltávolítására. A jellegében eltérő pályaszakaszokat kizártuk a további feldolgozásból. Mindegyik pályaszakaszra különböző fokszámú trendet illesztettünk. Ezek közül a lineáris trend mutatkozott dominánsnak. Így, lineáris trendet illesztettünk a különálló pályaszakaszokra. A li-

nearis trendet levontuk a pályaszakaszokból. Külön számítottuk a felszálló és leszálló pályákból álló térképeket. A két térkép jellege hasonló volt, azoknak átlagát vettük. Utolsó lépésként aluláteresztő szűrést alkalmaztunk. A szűrő paraméterét úgy választottuk meg, hogy a 460 km magasságban a lokális dipólus tér még az áteresztett tartományba essen. A totális Bangui-mágneses anomáliát Transverse Mercator vetületben ábrázoltuk (5. ábra).

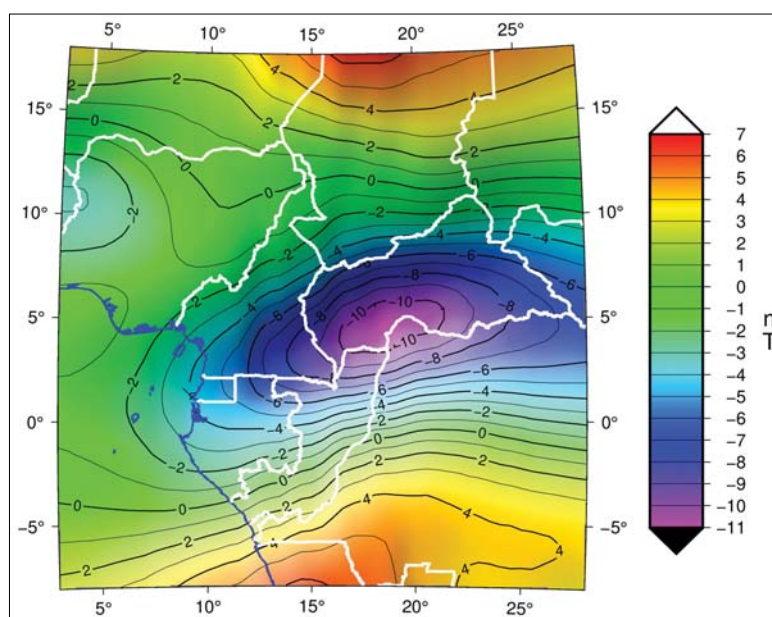
Az inverzióhoz redukált méretű ($-3^\circ \leq \varphi \leq 13^\circ$ és $5^\circ \leq \lambda \leq 29,5^\circ$) anomáliát használtunk. A redukált méretű totális mágneses anomáliát Transverse Mercator vetületben ábrázoltuk (6. ábra).

Gyakran szükséges a gömbi polárkoordináta-rendszerben meghatározott adatok transzformálása a xyz Descartes-féle koordináta-rendszerbe. Ez az eljárás korábbi számításaink során effektívnek bizonyult (Kis et al. 2010, Kis et al. 2011). Ez azért szükséges mivel a mérési adatok gömbi polárkoordináta-rendszerben adóttak, a számításokat leíró egyenletek xyz koordináta-rendszerben adóttak. Ezt a transzformációt a redukált méretű anomália-adatokra alkalmaztuk.

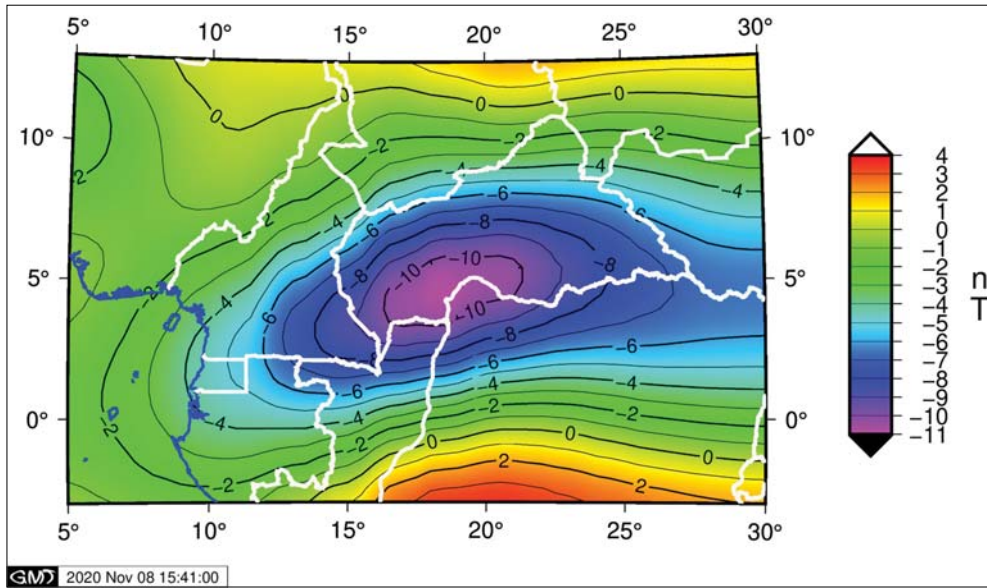
Ez a transzformáció két lépésben hajtható végre: egy transláció és egy rotáció alkalmazásával lehet végrehajtani. Az XYZ koordináta-rendszer origója legyen a Föld középpontjában! Az X tengely helyezkedjen el az Egyenlítő síkjában és irányuljon a greenwichi meridián irányába! A Z tengely essen egybe a Föld forgástengelyével és irányuljon felfelé! Az Y tengely szintén az Egyenlítő síkjában helyezkedik el, legyen merőleges az XZ síkra és keleti irányba mutat. A mesterséges hold XYZ koordinátái:

$$X = r \sin \theta \cos \lambda, \quad Y = r \sin \theta \sin \lambda, \quad Z = r \cos \theta,$$

θ jelölje a pólustávolságot és λ a gömbi hosszúságot!



5. ábra | A totális Bangui-mágneses anomália Transverse Mercator projekcióban ábrázolva
Figure 5 | Bangui total magnetic anomaly plotted on a Transverse Mercator projection



6. ábra Az inverzióhoz használt redukált kiterjedésű totális Bangui-mágneses anomália Transverse Mercator projekcióban ábrázolva

Figure 6 Reduced extension Bangui total magnetic anomaly applied for the inversion procedure, the anomaly is plotted on a Transverse Mercator projection

A derékszögű xyz koordinátatengelyek legyenek párhuzamosak az X , Y és a Z tengelyekkel, és helyezzük el az r_0 , θ_0 és a λ_0 pontba (ahol r_0 = a Föld sugara + a mesterséges hold magassága, jelen esetben r_0 legyen = 6371,2 km + 460 km)! A θ_0 és λ_0 koordinátákat válasszuk a redukált méretű anomália-térkép középső részéhez $\theta_0 = 86^\circ$ (pólustávolság) és $\lambda_0 = 19^\circ$ (hosszúság)! Vezessük be a következő koordinátákat:

$$t_x = r_0 \sin \theta_0 \cos \lambda_0, \quad t_y = r_0 \sin \theta_0 \sin \lambda_0, \quad t_z = r_0 \cos \theta_0.$$

A translációt az

$$x' = X - t_x, \quad y' = Y - t_y, \quad z' = Z - t_z$$

egyenletek írják le. Mutasson az x tengely az északi, az y tengely keleti irányba, míg a z tengely függőlegesen lefelé! A rotáció egyenletei:

$$x = -x' \cos \theta_0 \cos \lambda_0 - y' \cos \theta_0 \sin \lambda_0 + z' \cos \theta_0,$$

$$y = -x' \sin \lambda_0 - y' \cos \lambda_0,$$

$$z = -x' \sin \theta_0 \cos \lambda_0 - y' \sin \theta_0 \sin \lambda_0 + z' \cos \theta_0.$$

Ezzel a translációval és rotációval tudjuk a mérési adatokat a derékszögű xyz koordináta-rendszerbe transzformálni. Ez a transzformáció az inverzió során felhasznált adatok esetében az adatrendszer szélén mintegy 10 km-es magasságtérést okoz. Ezt az eltérést mint teoretikus hibát vettük figyelembe az inverz feladat megoldása során.

Mágneses direkt feladat

A mágneses inverz feladat megoldásának alapeleme a mágneses direkt feladat kiválasztása, azaz a mágneses teret leíró egyenlet meghatározása. Több lehetőség közül a mágneses

direkt feladat leírására a Plouff (1976) által megadott modellt választottuk. Ez az egyenleteket xyz Descartes-féle koordináta-rendszerben írja le. A Plouff-féle modell poligonon határolt vízszintes prizma formájában írja le a totális mágneses teret. A poligonon határolt prizma vízszintes fedő- és alaplappal rendelkezik, amelyeknek a mélysége z_1 és z_2 . A poligonon határolt prizma totális mágneses terét a

$$T(x, y, z) = (\mu_0 / 4\pi) [J_x(lV_1 + mV_2 + nV_3) + J_y(lV_2 + mV_4 + nV_5) + J_z(lV_3 + mV_5 + nV_6)]$$

egyenlet adja meg, ahol μ_0 a vákuum mágneses permeabilitása; J_x, J_y és J_z a ható mágnesezettségének három komponense; l, m és n a földi mágneses tér iránykoszinuszai, azaz

$$l = \cos I \cos D, \quad m = \cos I \sin D \quad \text{és} \quad n = \sin I,$$

ahol I és D a földi mágneses tér inklinációja és deklinációja; V_1, V_2, \dots, V_6 a ható térfogatára vonatkozó numerikus integrálások eredményét tartalmazzák.

A ható mágnesezettségének három komponensét a következő összefüggések adják meg:

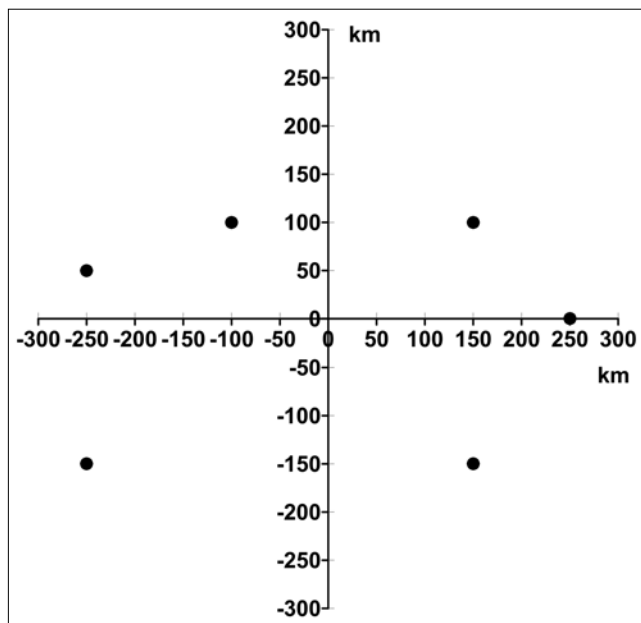
$$J_x = \kappa Tl + J_r L,$$

$$J_y = \kappa Tm + J_r M,$$

$$J_z = \kappa Tn + J_r N,$$

ahol a ható mágneses szuszceptibilitása, T a ható környezetének mágneses tere, J_r a ható remanens mágnesezettségének értéke, L, M és N a ható remanens mágnesezettségének iránykoszinuszai, azaz

$$L = \cos \alpha \cos \beta, \quad M = \cos \alpha \sin \beta, \quad N = \sin \alpha,$$



7. ábra Az inverzió során alkalmazott direkt feladat kiválasztott pontjainak horizontális koordinátái derékszögű Descartes-féle koordináta-rendszerben. A Descartes-féle koordináta-rendszer kezdőpontja (pólustávolság) $\theta = 86^\circ$, (hosszúság) $\lambda = 19^\circ$

Figure 7 The horizontal coordinates of the applied points of direct problem are plotted in Descartes coordinate system. The origin of the Descartes coordinate system is positioned in the point of (polar distance) $\theta = 86^\circ$ and (longitude) $\lambda = 19^\circ$

ahol α és β a remanens mágnesezettség inklinációja és deklinációja.

A későbbi számítások során a következő rögzített paraméterek közül a Girdler et al. (1992) által megadott adatokat használtuk fel: a totális földi tér értéke $T = 33000$ nT az indukált mágneses tér a ható környezetében; a ható átlagos mágneses szuszceptibilitása, $\kappa = 0,63$ SI; indukált mágneses tér inklinációja -12° és deklinációja -3° ; rema-

nens mágnesezettség 10 Am^{-1} értékű; a remanens mágnesezettség inklinációja 25° , deklinációja -18° .

A poligonon határolt prizmat hat csúcspont határolja, amelyet 6 pontpár (x és y koordináta) ad meg (7. ábra) és a felső és alaplapp mélysége: z_1 és z_2 . A kiválasztott ható 14 koordinátáját mint geometriát kívánjuk az inverzió alapján meghatározni. Az ábrán bemutatott 6 koordináta- (x és y koordináta-) pár és az alsó és felső mélységadat jelentik az iterációval 14 geometriai adat kezdeti értékét. A mágnesezettséget leíró adatok rögzítettek, és a geometriát leíró adatok helyzetét kívánjuk az inverz feladat megoldásaként iterációval meghatározni. A később bemutatott eredményekből jól látható, hogy a 14 geometriai adat jól leírja a kiválasztott hatót.

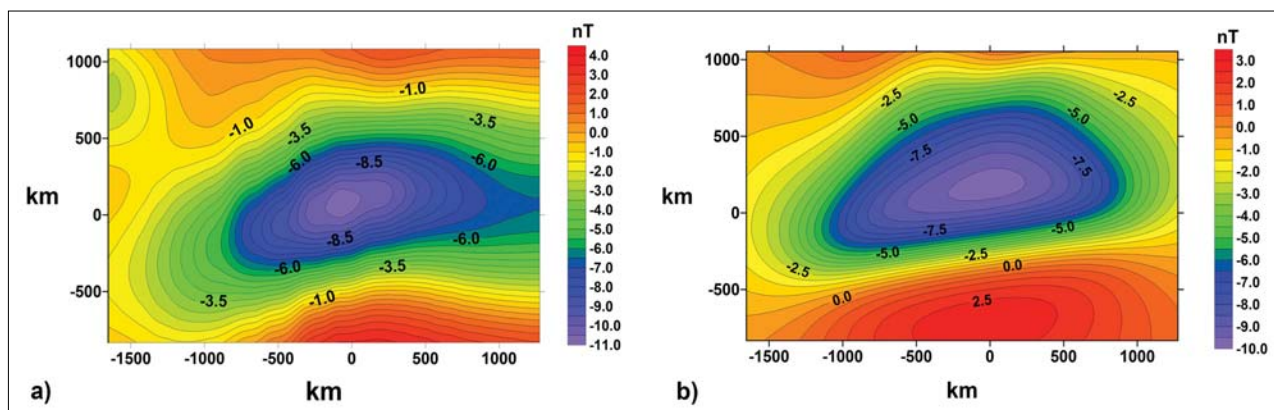
Az inverz feladat megoldása

Amennyiben a Bayes-elméletet használjuk, az inverz feladatot leíró *a posteriori* függvényt kell maximalizálni (Tarantola 1987, Menke 1989). Az *a posteriori* függvényt a következő egyenlet

$$E(\mathbf{m}) = \text{konst.} \times \exp\left\{-\frac{1}{2}\left[(\mathbf{m} - \mathbf{m}_{a \text{ priori}})^T \mathbf{C}_M^{-1} (\mathbf{m} - \mathbf{m}_{a \text{ priori}}) + (\mathbf{g}_{\text{modell}}(\mathbf{m}) - \mathbf{d}_{\text{megfigyelt}})^T \mathbf{C}_D^{-1} (\mathbf{g}_{\text{modell}}(\mathbf{m}) - \mathbf{d}_{\text{megfigyelt}})\right]\right\}$$

írja le, ahol \mathbf{m} jelöli a meghatározandó paraméterek vektorát, $\mathbf{m}_{a \text{ priori}}$ az értelmező által meghatározott előzetes paraméterek vektorát, \mathbf{C}_M az *a priori* paraméterek kovarianciamátrixa; $\mathbf{g}_{\text{modell}}(\mathbf{m})$ a direkt feladat megoldásából a modellter a megfigyelés helyén; $\mathbf{d}_{\text{megfigyelt}}$ a mérési adatok vektora; \mathbf{C}_D a megfigyelési adatok kovarianciamátrixa; a T kitevő a transzponáltat jelenti. Az inverzióhoz redukált méretű ($\mathbf{d}_{\text{megfigyelt}}$) adatsort használtunk (6. ábra).

Az *a posteriori* egyenletnek ott van maximuma, ahol az exponenciális résznek minimuma van, így a következő egyenlet minimumát kell keresni:



8. ábra A redukált kiterjedésű totális Bangui-mágneses anomália (az inverzió bemenete) (a) és az inverzióval meghatározott totális Bangui-mágneses anomália (b). Az anomáliaképek Descartes-féle koordináta-rendszerben ábrázolva, a koordináta-rendszer kezdőpontja (pólustávolság) $\theta = 86^\circ$, (hosszúság) $\lambda = 19^\circ$

Figure 8 The reduced extension of the Bangui total magnetic anomaly (the input of the inversion) (a) and the anomaly map determined by the inversion (b), the anomalies are plotted in the Descartes coordinate system. The origin of the Descartes coordinate system is positioned in the point of (polar distance) $\theta = 86^\circ$ and (longitude) $\lambda = 19^\circ$

$$E(\mathbf{m}) = [(\mathbf{m} - \mathbf{m}_{a\text{ priori}})^T \mathbf{C}_M^{-1} (\mathbf{m} - \mathbf{m}_{a\text{ priori}}) + (\mathbf{g}_{\text{modell}}(\mathbf{m}) - \mathbf{d}_{\text{megfigyelt}})^T \mathbf{C}_D^{-1} (\mathbf{g}_{\text{modell}}(\mathbf{m}) - \mathbf{d}_{\text{megfigyelt}})].$$

A minimumfeladatot a nemlineáris *Simplex*-módszerrel oldottuk meg (Walsh 1975). A 14 változós függvény minimumát kell meghatározni iterációval. Az alkalmazott módszer esetében az *a priori* adatok szórása négyzete $(10 \text{ nT})^2$ volt. A mérési adatok kovarianciája két részből származik:

$$\mathbf{C}_D = \mathbf{C}_d + \mathbf{C}_T,$$

ahol \mathbf{C}_d a mérési adatok kovarianciája, ezt a mérési hibával tekintettük azonosnak (maximum) 2 nT, \mathbf{C}_T a mérési adatok elméleti hibája. Az elméleti kovarianciára a transzformáció során meghatározott $(3 \text{ nT})^2$ értéket használtuk. A minimumfeladat megoldása a direkt feladatban szereplő 6 pont koordinátája, valamint a tető- és talpmélységeket megadó adatok. E koordináták alapján meghatározott totális anomáliát jelölje T_M ! A *8a ábrán* a redukált méretű, azaz a bemenő anomália-térkép és a minimumfeladat megoldásából származó koordinátákból meghatározott totális-anomália-térkép látható a *8b ábrán*. A két totális-anomália-térkép jó egyezést mutat. Bár az anomália nagy kiterjedésű, az inverziós számítások alapján nem dönthető el egyértelműen az anomália eredete. Az eredmények bizonyos egyezést mutatnak a Girdler et al. (1992) által meghatározott anomáliával.

A Bangui-anomália mélységi kiterjedésére különböző adatok találhatók a szakirodalomban. Green (1976) szerint az anomália 30 km-es mélységig terjed, a ható tetejét metaszedimentek alkotják, Regan és Marsh (1982) 3 km-es tetőmélységet és 35 km-es talpmélységet határozott meg a mágneses hatóra, Girdler et al. (1992) a ható alsó és felső mélységekre 3 km, illetve 7,5 km állapított meg, a jelen inverziós számításaink alapján pedig 5,2 km illetve 6,4 km mélységek adódnak.

Hibaszámítás

A nemlineáris Simplex-módszerrel meghatározott paraméterek alapján, jelölje ΔT_M a direkt feladat segítségével kiszámított totális mágneses anomáliát! Ennek az anomália-térképnek hibáját a Gauss-féle hibaterjedési törvény alapján határozzuk meg (Clifford 1973). Az anomália-térkép az $x_1, y_1, x_2, y_2, \dots, z_1, z_2$ mennyiségektől (14 paramétertől) függ, amelyeknek közepes hibája legyen $\Delta x_1, \Delta y_1, \dots, \Delta z_2$. A közepes hibákat becsüljük meg a számítás során elkövetett, a mintavételtől függő pontatlanságokból, amelyeket túlbecsülve 5 km értékűnek tekintettünk.

Az első 12 paraméter horizontális elhelyezkedését a *7. ábra* mutatja. A hibaszámítás egyenletében szereplő, horizontális koordinátáktól függő deriváltakat a direkt feladat alapján határoztuk meg. Azt vizsgáltuk meg, hogy a mintavételi egység x és y irányú változásra mekkora nT/km eltérés adódik. Ezek relatíve kis értékűek, nagyságrendjük 0,02 nT/km.

A magasságokból adódó változásokat a SWARM mérési adatait megadó honlap felhasználásával határoztuk meg. A magasságokból adódó változások két tényezőtől függenek: egyrészt a kis excentricitású ellipszis alakú pályából adódnak, másrészt a mesterséges hold pálya menti légköri sűrűlódási hatásból származnak.

A vízszintes alsólap és felsőlap mélységek a mesterséges hold pályájától mérve, kerültek meghatározásra, azaz a hold pálya menti helyzetétől függenek. A hibaszámítás adataiból megállapítható, hogy a mérési hiba elsősorban a mesterséges hold magasságának változásából adódik, és az eljárás kevésbé érzékeny a horizontális koordinátákra. Ezeknek a nagyságrendje 1 nT/km. Ekkor a meghatározott totális mágneses anomália-térkép ΔT_M hibája:

$$\Delta T_M = \pm \{ [(\partial T / \partial x_1) \Delta x_1]^2 + [(\partial T / \partial y_1) \Delta y_1]^2 + [(\partial T / \partial x_2) \Delta x_2]^2 + [(\partial T / \partial y_2) \Delta y_2]^2 + [(\partial T / \partial x_3) \Delta x_3]^2 + [(\partial T / \partial y_3) \Delta y_3]^2 + [(\partial T / \partial x_4) \Delta x_4]^2 + [(\partial T / \partial y_4) \Delta y_4]^2 + [(\partial T / \partial x_5) \Delta x_5]^2 + [(\partial T / \partial y_5) \Delta y_5]^2 + [(\partial T / \partial x_6) \Delta x_6]^2 + [(\partial T / \partial y_6) \Delta y_6]^2 + [(\partial T / \partial z_1) \Delta z_1]^2 + [(\partial T / \partial z_2) \Delta z_2]^2 \}^{1/2},$$

amennyiben a geometriai paramétereiktől függő anomália-adatsort ΔT_M jelöli. Így a ΔT_M hibája ± 7 nT. Meg kell állapítani, hogy a hiba dominánsan a ható alap- és felsőlapjának mélységét megadó koordinátáktól függ.

Következtetések

Meg kell állapítani, hogy a 14 paraméterből álló, az inverz feladat során meghatározott koordináták kellő pontossággal leképezik a totális anomáliákat. Az inverzióval meghatározott ΔT_M totális anomáliák jól tükrözik az elvárt anomáliaképet. Az inverzióval meghatározott totális mágneses anomália bár nagy kiterjedésű, de az anomália földtani eredetére vonatkozó kérdés nem dönthető el ezek alapján. A hiba jelentős része a mesterséges holdtól számított mélységadatoktól függ. Meg kell jegyezni, hogy a meghatározott hibákat kissé túlbecsültük.

A tanulmány szerzői

Kis Károly, Patrick T. Taylor, Toronyi Bence, Pusztai Sándor

Hivatkozások

- Clifford A. A. (1973): Multivariate Error Analysis. Applied Science Publishers Ltd., London
 Girdler R. W., Taylor P. T., Frawley J. J. (1992): A possible impact origin for Bangui magnetic anomaly (Central Africa). *Tectonophysics*, 201, 45–58.
 Godivier R., Le Donche L. (1956): Réseau magnétique remené au 1re Janvier 1956. République Cenrafricaine Tchad Méridional, ORSTOM, Paris.
 Green A. G. (1976): Interpretation of project magnet aeromagnetic profiles across Africa. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 44, 203–228.
 Hastings D. A. (1982): Preliminary correlations of Magsat anomalies with the tectonic features of Africa. *Geophysical Research Letters*, 9, 303–306.

- Kim H. R. (2007): CHAMP Satellite Magnetic Anomaly Map. Encyclopedia Geomagnetism and Paleomagnetism, 1002.
- Kis K., Taylor P. T., Wittmann G., Toronyi B., Pusztai S. (2010): A CHAMP mesterséges hold méréseinek értelmezése a Pannonmedence és annak környezetében. Magyar Geofizika, 51, 1–9.
- Kis K. I., Taylor P. T., Wittmann G., Toronyi B., Pusztai S. (2011): Inversion of magnetic measurements of the CHAMP satellite over the Pannonian Basin. Journal of Applied Geophysics, 75, 412–415.
- Langel R. A., Hinze W. J. (1998): The Magnetic Field of the Earth's Lithosphere. Cambridge University Press.
- Léger J.-M., Jager T., Bertrand F., Hulot G., Brocco L., Vigeron P., Lalanne X., Chulliat A., Fratter L. (2015): In-flight performance of the Absolut Scalar Magnetometer vector mode on board the Swarm satellites. Earth, Planets and Space (Open Access) 67, 57, DOI: 10.1186/s40623-015-0231-1.
- Menke W. (1989): Geophysical Data Analysis: Discrete Inverse Theory. Academic Press, Inc., San Diego, New York, Boston, Sydney, Tokyo, Toronto.
- Ouabego M., Quesnel Y., Rochette P., Demory F., Fozing E. M., Njanko T., Hippolite J.-C., Affton P. (2013): Rock magnetic investigation of possible sources of the Bangui magnetic anomaly. Physics of the Earth and Planetary Interiors, 224, 11–20. DOI: org/10.1016/j.pepi.2013.09.003.
- Plouff D. (1976): Gravity and magnetic fields of polygonal prisms and application to magnetic terrain corrections. Geophysics, 41, 727–741.
- Ravat D. N. (1989): Magsat investigations over the greater African region. PhD Thesis, Purdue University.
- Reagan R. D., Marsh B. D. (1982): The Bangui magnetic anomaly: its geological origin. Journal of Geophysical Research, 80/B2, 1107–1120.
- Tarantola A. (1987): Inverse Problem Theory. Methods for Data fitting and Model Parameter Estimation. Elsevier, Amsterdam, Oxford, New York, Tokyo.
- Taylor P. T. (2007): Bangui anomaly. In: Encyclopedia of Geomagnetism and Paleomagnetism, pp. 39–40.
- Taylor P. T., Schnetzler C. C., Reagan R. D. (1989): Satellite magnetic data: How useful in exploration? Geophysics: The Leading Edge of Exploration, Nov. 26–28.
- Taylor P. T., Schnetzler C. C. (1990): Satellite magnetic data: The exploration industry rates their usefulness. Geophysics: The Leading Edge of Exploration, Oct. 42–43.
- Thébault E., Finlay Ch. C., Beggan C. D., Alken P., Aubert J., Barrois O., Bertrand F., Bondar T., Boness A., Brocco L., Canet E., Chambodut A., Chulliat A., Coïsson P., Civet F., Du A., Fournier A., Fratter I., Gillet N., Hamilton B., Hamoudi M., Hulot G., Jager T., Korte M., Kuang W., Lalanne X., Langlais B., Léger J.-M., Lesur V., Lowes F. J., Macmillan S., Manda M., Manoj Ch., Maus S., Olsen N., Petrov V., Ridley V., Rother M., Sabaka T. J., Saturnino D., Schachtschneider R., Sirol O., Tangborn A., Thomson A., Toffner-Clausen L., Vigneron P., Wardinski I., Zvereva T. (2015): International Geomagnetic Reference Field: the 12th generation. Earth Planets and Space, 67, 79, DOI: 10.1186/s40623-015-0228-9.
- Walsh G. R. (1975): Methods of Optimization. John Wiley & Sons, London, New York, Sydney, Toronto.

Termohalin konvekció numerikus vizsgálata porózus közegmodellben

SZIJÁRTÓ M.^{1,2,@}, GALSA A.¹

¹Eötvös Loránd Tudományegyetem, Geofizikai és Űrtudományi Tanszék, Budapest

²Tóth József és Erzsébet Hidrogeológia Professzúra Alapítvány

@E-mail: mark.szijarto@ttk.elte.hu

A porózus közegben lejátszódó hő- és tömegtranszport-folyamatok teoretikus vizsgálata miatt fontos, hogy jobban megérthessük a termohalin konvekció folyamatát, legyen szó lokális vagy medenceléptékű felszín alatti vízáramlási rendszerekről. Kétdimenziós numerikus számításokat végeztünk, hogy megvizsgáljuk a hőmérséklet- (ΔT) és a (só) koncentrációkülönbség (Δc) okozta, felhajtóerő hajtotta természetes konvektív áramlást porózus közegben. Szisztematikus paraméterteszteléssel tanulmányoztuk a dimenziótlan hőtágulás ($\alpha' = \alpha \Delta T = 10^{-3} - 1$) és a sókoncentráció-különbség okozta dimenziótlan relatív sűrűségkülönbség ($\beta' = \beta \Delta c = 10^{-7} - 0,1$) hatását a hőmérséklet- és koncentrációeloszlásra, valamint az áramlás intenzitására vonatkozólag. A felhajtóerő és a konvekciós áramlást akadályozó erők viszonyát kifejező Rayleigh-számok, így a termikus (Ra_t) és a halin Rayleigh-szám (Ra_h) értéke, valamint a felhajtóerő-arány (buoyancy ratio – BR) a következő intervallumokon változtak: $1,4 \leq Ra_t \leq 1400$; $0,1 \leq Ra_h \leq 10^5$; $10^{-7} \leq BR \leq 100$. Mindeközben a hődiffúziós tényezőt (κ) és a molekuláris diffúziós együtthatót (D_0) – valós értékeken alapulva – rögzítettük, így a kettő hányadosából képzett Lewis-szám állandó ($Le = 714$). A szimulációk eredményeként kiszámítottuk a Darcy-fluxust (U) a modelltartományon, a teljes és a konduktív hőfluxus viszonyát kifejező dimenziótlan Nusselt-számot (Nu), illetve a teljes és a diffúziós koncentrációfluxus arányát mutató Sherwood-számot (Sh) a modell felszínén. A bemutatott modellrendezésben mindkét felhajtóerő elősegítette a természetes konvekció megindulását. Az eredmények alapján hat különböző jellegű – α' és β' paraméterektől erősen függő – áramlást tudunk elkülöníteni, amikor 1) nem történt áramlás, 2) stacionárius, 3) időfüggő halin, 4) kényszertermohalin, 5) stacionárius termohalin és 6) időfüggő termohalin konvekció alakult ki. Általánosan elmondható, hogy a hőtranszport erősen befolyásolta – majdhogynem felülírta – az anyagtranszportot. Ez annak köszönhető, hogy a közeg hődiffúziós tényezője két nagyságrenddel nagyobb a víz molekuláris diffúziós együtthatójánál ($\kappa \gg D_0$). Az elvégzett szimulációk felhívják a figyelmet a termohalin konvekciós áramlás fizikai hátterének megértésére. A jelenség előfordulhat például sódomok közelében lévő vízáradó rétegekben, mély (hipogén) karsztosodott karbonátos vízáradókban (pl. Budai-termálkarszt), geotermikus erőművek termelő- és visszajuttató kútjainak környezetében, vagy szennyezett felszínalatti víz transzportja során.

Szijártó, M., Galsa, A.: Thermohaline convection in a homogeneous porous medium

The theoretical examination of the combined effect of heat and mass transfer in porous media is relevant to improve understanding thermohaline natural convection in both local- and basin-scale groundwater flow systems. Numerical model calculations were carried out to investigate the interaction of the temperature- (ΔT) and salinity-driven (Δc) natural convection in a synthetic model, as in a two-dimensional homogeneous porous medium. Effects of the non-dimensional thermal expansion ($\alpha' = \alpha \Delta T = 10^{-3} - 1$) and the non-dimensional relative density contrast ($\beta' = \beta \Delta c = 10^{-7} - 0,1$) were systematically studied in order to examine their influence on the temperature, the concentration and the Darcy flux field. Thus, the thermal (Ra_t) and the haline (Ra_h) Rayleigh number, and the Buoyancy ratio (BR) were varied within the following ranges: $1.4 \leq Ra_t \leq 1400$, $0.1 \leq Ra_h \leq 10^5$, $10^{-7} \leq BR \leq 100$, while the Lewis number was fixed, $Le = 714$. As the results of simulations, the Darcy flux (U), the Nusselt (Nu) and Sherwood numbers (Sh) were computed. In the examined cases, both effects facilitated the onset of natural convection. Depending on the studied parameters (α' and β'), six types of flow systems were separated in the numerical model including: 1) no convection, 2) steady-state haline convection, 3) time-dependent haline convection, 4) forced thermohaline convection, 5) steady-state thermohaline convection, 6) time-dependent thermohaline convection. However, the effect of haline term was strongly influenced by the heat transport mechanism due to the relation between the thermal and the molecular diffusivity ($\kappa \gg D_0$). These simulations draw attention to the importance of understanding the physical background of thermohaline convection, for instance, in aquifers separated by salt domes, in the deep (hypogene) karstified carbonates (e.g. the Buda Thermal Karst), in the case of groundwater flow induced by water pumping/injection of deep geothermal power plants, or in contaminated groundwater transport process.

Beérkezett: 2020. december 21.; *elfogadva:* 2021. február 16.

Bevezetés

Földünkön tapasztalható globális és regionális természeti jelenségek működését – mint például a légköri ciklonok/ anticiklonok mozgását, az óceáni áramlásokat vagy a felszín alatti áramlási rendszereket – első közelítésben megpróbáljuk analitikus összefüggésekkel leírni. A földkéregben kialakuló hőmérséklet-különbségek (ΔT) és a szaturált pórufolyadékban tapasztalható (só)koncentrációkülönbségek (Δc) olyan felhajtóerőt indukálnak, amelynek hatására természetes konvekció alakulhat ki a felszín alatti vízáramlási rendszerekben. Annak érdekében, hogy megérthessük a különböző rendszerekben létrejövő összetett fizikai folyamatokat, először fontos megvizsgálni az egyes hajtóerők kölcsönhatását olyan egyszerű numerikus modellekben, amelyeknek létezik analitikus megoldása.

Kétdimenziós, horizontálisan végtelen kiterjedésű, homogén és izotróp modellekben analitikus módszerekkel külön-külön már vizsgálták a hőmérséklet-különbség (ΔT) okozta termikus és az oldott sótartalom miatt fellépő koncentrációkülönbség (Δc) által előidézett halin konvekciót (Lapwood 1948, Wooding 1957). A két szeparált fizikai probléma matematikai leírása hasonló, természetes/szabad konvektív áramlás alakul ki, ha a rendszerben definiált termikus (Ra_t) vagy halin Rayleigh-szám (Ra_h) meghaladja a kritikus értéket: $Ra_t > 4\pi^2$, $Ra_h > 4\pi^2$ (Nield, Bejan 2013). A kialakult áramlás a modell dimenziójának, vastagságának, permeabilitásának és az áramlás intenzitásának függvényében, illetve a dimenziótlan Rayleigh-szám segítségével jellemezhető. Egyszerűsített porózus közegmodellekben, különböző Rayleigh-számok mellett numerikusan vizsgálták mind a termikus (pl. Cserepes, Lenkey 2004, Yang et al. 2010, Szijártó et al. 2019), mind a halin konvektív áramlás (pl. Diersch, Kolditz 2002, Weatherill et al. 2004, Post, Simmons 2010) típusait stacionárius és időfüggő megoldások esetén. A teoretikus vizsgálatokon túl mindkét jelenség kialakulását alátámasztották helyszíni megfigyelésekkel, illetve területspecifikus numerikus modellezések segítségével: termikus konvekció (pl. Lenkey 1993, Pasquale et al. 2013, Lopez et al. 2016, Szijártó et al. 2021), halin konvekció (pl. Sharp et al. 2001, van Dam et al. 2009, Soboleva 2017).

Ugyanakkor előfordulnak olyan fizikai folyamatok, amelyekben a termikus és a halin felhajtóerők együttesen alakítanak ki egy összetett áramlási rendszert, melyet termohalin konvekciónak nevezünk. A jelenség kialakulási feltételének matematikai leírását Nield (1968) adta meg, melyet később laborkísérleteivel Caldwell (1974) támasztotta alá. Az elméletet először karsztosodott vízadókban történő (Rubin 1976), majd ténylegesen porózus közegben létrejövő felszín alatti vízáramlási rendszerek (Rubin, Roth 1983) vizsgálatára alkalmazták stacionárius esetben. Később Rosenberg és Spera (1992) végeztek olyan számításokat, melyekben vizsgálták a porózus közegmodellekben kialakuló termohalin konvekció karakterisztikáját, miközben a Rayleigh- (Ra_t), a Lewis-számot (Le) és a felhajtóerő-arányt (BR – buoyancy ratio) a követ-

kező tartományokon változtatták: $100 < Ra_t < 600$; $10 < Le < 100$; $0 < BR < 0,4$. Azonban a jelenség részletes, elméleti leírása továbbra is nyitott kérdés maradt, hiszen már maga a modellalkotás sem egyszerű feladat. A két felhajtóerő bizonyos esetekben segíti, máskor gátolja egymás hatását (Nield, Bejan 2013), ami nagyban megnehezíti a jelenség általános tárgyalását. Termohalin konvekció fordulhat elő olyan hidrogeológia helyzetekben, ahol mind a szaturált pórufolyadék sótartalma magas, mind a kontinentális kéregben tapasztalható geotermikus gradiens meghaladja az átlagértéket ($\nabla T > 25\text{--}30$ °C/km). Potenciális zónák lehetnek például a sódómközelében elhelyezkedő vízadórétegek, a karsztosodott mély (hipogén) karbonátos rendszerek és a hidrotermális ércképződéses rendszerek is. Speciális esetekben nem tekinthetünk el a termohalin konvekció hatásától termelő- és visszasajtoló kutak által megnyitott vízadó rétegek esetében, illetve a felszín alatti vízáramlási rendszerbe bekerülő szennyezőanyagok transzportfolyamatai során.

Jelen tanulmányban a dimenziótlan hőtágulási együttható (α') és a dimenziótlan relatív sűrűségkülönbség (β') szisztematikus változtatásával vizsgáltuk a termohalin konvekció létrejöttének feltételeit, illetve kategorizáltuk a kialakuló áramlást, hogy az eredmények segítségével általános érvényű információkkal szolgálhassunk a különböző hidrogeológiai rendszerekben kialakuló összetett áramlások alaposabb megértéséhez. A munka során a termikus (Ra_t), a halin Rayleigh-számot (Ra_h) és a felhajtóerő-arányt (BR) a következő tartományokon változtattuk: $1,4 \leq Ra_t \leq 1400$; $0,1 \leq Ra_h \leq 10^5$; $10^{-7} \leq BR \leq 100$. Az eredményeket kvalitatívan, a hőmérsékleti, a koncentrációs és a Darcy-fluxus-eloszlások segítségével, illetve kvantitatívan, a kontrollparaméterek (Darcy-fluxus, Nusselt-szám, Sherwood-szám) követésével értelmeztük.

A numerikus modell

Abból a célból, hogy megvizsgáljuk a porózus közegben kialakuló termohalin konvekció létrejöttének feltételeit, illetve jellemezzük az összetett áramlást, kétdimenziós modellszámításokat végeztünk. A munka során egy olyan parciális differenciálegyenlet-rendszert oldottunk meg, amely a kontinuitási, a Darcy-, a hő- és a tömegtranszport-egyenlettel írható fel (pl. Delgado 2012, Nield, Bejan 2013):

$$\frac{\partial \varphi \rho_w}{\partial t} + \nabla[\rho_w \mathbf{u}] = 0, \quad (1)$$

$$\mathbf{u} = -\frac{k}{\mu} [\nabla p - \rho_w \mathbf{g}], \quad (2)$$

$$\begin{aligned} & \left[\varphi \rho_w c_{pw} + (1-\varphi) \rho_m c_{pm} \right] \frac{\partial T}{\partial t} + \rho_w c_w \mathbf{u} \nabla T \\ & = \nabla \cdot \left\{ \left[\varphi \lambda_w + (1-\varphi) \lambda_m \right] \nabla T \right\}, \quad (3) \end{aligned}$$

$$\frac{\partial \varphi c}{\partial t} = -\mathbf{u}\nabla c + \nabla(D_0\nabla c), \quad (4)$$

ahol \mathbf{u} (u_x, u_y), p , T és c az ismeretlen Darcy-fluxus, a nyomás, a hőmérséklet és az oldott anyag koncentrációja. A vízsűrűség hőmérséklet- és koncentrációfüggését – a Boussinesq-approximációnak megfelelően – a

$$\rho_w = \rho_r[1 + \beta c - \alpha T] \quad (5)$$

lineáris összefüggéssel írtuk le, ahol $\rho_r = 1000 \text{ kg/m}^3$ a referencia-vízsűrűség $T_r = 4 \text{ }^\circ\text{C}$ hőmérsékleten, $\alpha [1/^\circ\text{C}]$ a víz hőtágulás-együtthatója, míg $\beta [\text{m}^3/\text{mol}]$ a sótartalom okozta relatív sűrűségkülönbség. Az (1)–(4) parciális differenciálegyenleteket a vízsűrűség ($\rho_w(c, T)$) csatolásával oldottuk meg. Az egyenletekben feltüntetett paramétereket az 1. táblázatban összegeztük.

A kétdimenziós, horizontális, homogén és izotróp porózus közegmodell geometriáját Weatherill et al. (2004) munkájával analóg módon építettük meg, ahol a modell szélessége $L = 200 \text{ m}$, míg vastagsága $H = 10 \text{ m}$ volt. A modell felépítését az 1. ábra szemlélteti.

A szimulációk során eltekintettünk a valós hidrogeológiai rendszerekben fellépő topográfia vezérelt – vagy más néven – felszín alatti víztükör által vezérelt áramlások szerepétől (pl. Tóth 1963, Person 1996, Szijártó et al. 2019), azaz a „kényszerkonvekció” megjelenésétől. Fókuszálva a

modellben zajló fizikai folyamatok értelmezésére, a számításokat impermeábilis határokkal szegélyezett véges elemes modellben végeztük el (1. ábra). Ilyen feltételek mellett a modell egy hidraulikai értelemben zárt rendszernek tekinthető. A felső és az alsó határon állandó hőmérsékletet ($T_s = 0 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_b = 1 \text{ }^\circ\text{C}$) és koncentrációt ($c_s = 1 \text{ mol/m}^3$, $c_b = 0 \text{ mol/m}^3$) írtunk elő. Így a horizontális határok közötti hőmérséklet- és koncentrációváltozás egységnyinek adódott, $\Delta T = T_b - T_s = 1 \text{ }^\circ\text{C}$ és $\Delta c = c_s - c_b = 1 \text{ mol/m}^3$. A modell oldalsó határait szimmetrikusnak, illetve hőszigetelőnek tekintettük. Jelen elrendezésben mind a hőmérséklet-, mind a koncentrációkülönbség okozta felhajtóerő segítette a természetes konvekció kialakulását a porózus közegben (Nield, Bejan 2013).

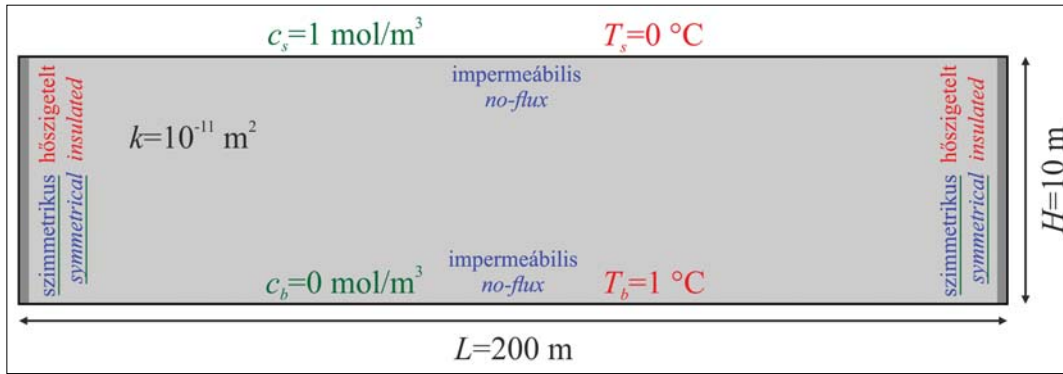
Az időfüggő modellszámítások nyomás-, hőmérséklet- és koncentrációeloszlására vonatkozó kezdeti feltételek:

$$p_{in} = \rho_r g \left\{ (H - y) + \beta \Delta c \left[\left(\frac{H^2 - y^2}{2H} \right) + 1 \right] - \alpha \Delta T \left[(H - y) - \left(\frac{H^2 - y^2}{2H} \right) + 1 \right] \right\}, \quad (6)$$

$$T_{in} = \left(1 - \frac{y}{H} \right) \Delta T + A_t \cos\left(\frac{\pi x}{H}\right) \sin\left(\frac{\pi y}{H}\right), \quad (7)$$

1. táblázat | Modellparaméterek. A szimulációk során változtatott paraméterek félkövér stílusban vannak kiemelve
Table 1 | Model parameters. Bold typeface marks the studied parameters

Paraméterek	Jelölés	Érték	Mértékegység
A modell vastagsága	H	10	m
A modell szélessége	L	200	m
A modell permeabilitása	k	10^{-11}	m^2
A mátrix porozitása	φ	0,2	–
A mátrix hővezető-képessége	λ_m	3,6	W/(m·K)
A mátrix fajhője ($p = \text{állandó}$)	c_{pm}	900	J/(kg·K)
A mátrix sűrűsége	ρ_m	2450	kg/m^3
A víz hővezető-képessége	λ_w	0,6	W/(m·K)
A víz fajhője ($p = \text{állandó}$)	c_{pw}	4200	J/(kg·K)
A víz referencia sűrűsége	ρ_r	1000	kg/m^3
A víz referencia hőmérséklete	T_r	4	$^\circ\text{C}$
A víz dinamikus viszkozitása	μ	10^{-3}	Pa·s
A víz molekuláris diffúziós együtthatója	D_0	10^{-9}	m^2/s
A porózus közeg hődiffúziós tényezője	κ	$7,14 \cdot 10^{-7}$	m^2/s
A víz hőtágulási együtthatója	α	$10^{-3} - 10^0$	$1/^\circ\text{C}$
A dimenziótlan hőtágulási együttható	$\alpha' = \alpha \Delta T$	$10^{-3} - 10^0$	–
A termikus Rayleigh-szám	Ra_t	1,4–1400	–
A sótartalom okozta relatív sűrűségkülönbség	β	$10^{-7} - 10^{-1}$	m^3/mol
A dimenziótlan relatív sűrűségkülönbség	$\beta' = \beta \Delta c$	$10^{-7} - 10^{-1}$	–
A halin Rayleigh-szám	Ra_h	$10^{-1} - 10^5$	–
A nehézségi gyorsulás	g	10	m/s^2



1. ábra | A véges elemes numerikus modell geometriája az áramlásra (kék), a hő- (piros) és a tömegtranszportra (zöld) vonatkozó határfeltételekkel
Figure 1 | The model geometry with boundary conditions for flow (blue), heat (red) and mass transfer (green)

$$c_{in} = \left(\frac{y}{H} \right) \Delta c - A_c \cos \left(\frac{\pi x}{H} \right) \sin \left(\frac{\pi y}{H} \right), \quad (8)$$

ahol x a vízszintes, y a függőleges koordináta. A levezetés során felhasználtuk, hogy az a kritikus horizontális hullámhossz, amelyenél porózus közegben megindul a természetes konvekció, $\lambda_{kr} = 2H$ (Turcotte, Schubert 2014). A szimuláció gyorsítása végett a konduktív hőmérséklet- és a diffúziós koncentrációeloszlást horizontálisan és vertikálisan is perturbáltuk, melynek amplitúdója $A_t = 0,05$ °C és $A_c = 0,05$ mol/m³ volt. A kezdeti, másodfokú nyomáseloszlást a T_{in} kezdeti hőmérséklet- és c_{in} kezdeti koncentrációeloszlás alapján számítottuk ki.

Ahhoz, hogy megvizsgáljuk a termikus és a halin felhajtóerő következtében létrejövő összetett áramlást, a dimenziótlan hőtágulást ($\alpha' = \alpha \Delta T = 10^{-3}-1$) és a dimenziótlan – koncentráció okozta – relatív sűrűségkülönbséget ($\beta' = \beta \Delta c = 10^{-7}-0,1$), szisztematikusan változtattuk a szimulációk során (Szijártó, Galsa 2020). A vizsgált paramétereket az 1. táblázatban félkövér betűkkel emeltük ki. A vizsgált tartományt a víz molekuláris diffúziós együtthatójának ($D_0 = 10^{-9}$ m²/s), illetve a közeg hődiffúziós tényezőjének ($\kappa = 7,14 \cdot 10^{-7}$ m²/s) figyelembevételével határoztuk meg. Így a két felhajtóerő mértéke összehasonlíthatóvá vált. Az utóbbi konstans érték a következő

$$\kappa = \frac{\varphi \lambda_w + (1-\varphi) \lambda_m}{\rho_r c_{pw}} \quad (9)$$

összefüggés segítségével határozható meg (1. táblázat). A szimulációk során a hődiffúziós tényező és a molekuláris diffúziós együttható arányát kifejező Lewis-számot nem változtattuk:

$$Le = (\kappa/D_0) = \text{konst.} \quad (10)$$

A termikus és a halin konvekció intenzitása a dimenziótlan termikus (Ra_t) és a dimenziótlan halin Rayleigh-szám (Ra_h) segítségével írható le, melyek értéke az α' és a β' paraméterek változtatásával módosult (1. táblázat). Ha a két felhajtóerő hatását el lehet különíteni, akkor a kialakuló áramlás két – a matematikai szintaktika szempontjából hasonló – összefüggés segítségével jellemezhető:

$$Ra_t = \frac{k \rho_r g H \alpha \Delta T}{\mu \kappa} = \frac{k \rho_r g H \alpha'}{\mu \kappa}, \quad (11)$$

$$Ra_h = \frac{k \rho_r g H \beta \Delta c}{\mu D_0} = \frac{k \rho_r g H \beta'}{\mu D_0}. \quad (12)$$

A legegyszerűbb szintetikus modellek esetében a kritikus termikus és halin Rayleigh-számok megegyeznek: $Ra_{hkr} = Ra_{tkr} = 4\pi^2$ (Lapwood 1948, Diersch, Kolditz 2002).

Az időfüggő termohalin konvektív áramlás jellemzése céljából olyan kontrollparamétereket definiáltunk, melyek egyszerre írják le a rendszer tér- és időbeli változásait, illetve a két hajtóerő arányát. A különböző modellelrendezésekben tapasztalt áramlások karakterisztikája az átlagnégyzetes Darcy-fluxus (U), a Nusselt-szám (Nu), a Sherwood-szám (Sh), illetve a két felhajtóerő arányát kifejező felhajtóerő-arány (BR) segítségével írható le:

$$U = [u_x^2 + u_y^2]^{1/2}, \quad (13)$$

$$Nu = \frac{q_t(y=H)}{[\varphi \lambda_w + (1-\varphi) \lambda_m] (\Delta T/H)}, \quad (14)$$

$$Sh = \frac{q_c(y=H)}{D_0 (\Delta c/H)}, \quad (15)$$

$$BR = (\beta \Delta c / \alpha \Delta T) = (\beta' / \alpha'), \quad (16)$$

ahol u_x a horizontális, u_y a vertikális irányú Darcy-fluxus, $q_t(y=H)$ a modell felső határán számított teljes hőfluxus, míg $q_c(y=H)$ a felső határon számított teljes koncentrációfluxus. A kontrollparamétereket a 2. táblázatban foglaltuk össze.

Az (1)–(4) egyenletekkel leírt csatolt parciális differenciálegyenlet-rendszert a COMSOL Multiphysics® 5.3a véges elemes numerikus szoftver segítségével oldottuk meg (Zimmermann 2006). A kétdimenziós modell diszkretizálásánál háromszögelemekre osztottuk fel a modell tartományt. Az elemméretet a modell teljes területén 0,5 m értéken maximalizáltuk, ennek következtében az összes elemszám 20034 darabnak adódott. A véges elemeken belül a nyomást Lagrange-féle kvadratikus polinommal,

2. táblázat | Kontrollparaméterek
 Table 2 | Monitoring parameters

Kontrollparaméterek	Jelölés	Mértékegység
Átlagnégyzetes Darcy-fluxus nagysága	U	m/s
Nusselt-szám	Nu	–
Sherwood-szám	Sh	–
Felhajtóerő-arány	BR	–

míg a hőmérsékletet és a koncentrációt lineárisan közeli-tettük. A szimulációkat – az M10 szcenárió kivételével (3. táblázat) – $t = 10^4$ napig végeztük. Az időfüggő modell-

számítások megoldása 5–2000 perc CPU-időt és 4 GB RAM memóriát igényelt, mely értékeket a beállított α' és β' paraméterek erősen befolyásoltak.

3. táblázat | Modellszimulációk (M1–M28) az α' (Ra_t), β' (Ra_h), BR paraméterek szerint. Jelölések: nc – nincs termohalin konvekció, sh – stacionárius halin konvekció, ih – időfüggő halin konvekció, fth – kényszertermohalin konvekció, sth – stacionárius termohalin konvekció, ith – időfüggő termohalin konvekció. A 3–10. ábrán bemutatott esetek félkövér betűtípussal kiemelve
 Table 3 | Models (M1–M28) applied for different values of α' (Ra_t), β' (Ra_h), and BR . Abbreviations: nc – no convection, sh – steady-state haline convection, ih – time-dependent haline convection, fth – forced thermohaline convection, sth – steady-state thermohaline convection, ith – time-dependent thermohaline convection. Simulations in Figs 3–10 are marked by boldface

ID	$\log_{10}\alpha'$	$\log_{10}\beta'$	$\log_{10}BR$	Ra_t	Ra_h	Karakter
M1	–3	–7	–4	1,4	10^{-1}	nc
M2	–2	–7	–5	14	10^{-1}	nc
M3	–1	–7	–6	$1,4 \cdot 10^2$	10^{-1}	sth
M4	0	–7	–7	$1,4 \cdot 10^3$	10^{-1}	ith
M5	–3	–6	–3	1,4	1	nc
M6	–2	–6	–4	14	1	nc
M7	–1	–6	–5	$1,4 \cdot 10^2$	1	sth
M8	0	–6	–6	$1,4 \cdot 10^3$	1	ith
M9	–3	–5	–2	1,4	10	nc
M10	–2	–5	–3	14	10	nc
M11	–1	–5	–4	$1,4 \cdot 10^2$	10	sth
M12	0	–5	–5	$1,4 \cdot 10^3$	10	ith
M13	–3	–4	–1	1,4	10^2	sh
M14	–2	–4	–2	14	10^2	sh
M15	–1	–4	–3	$1,4 \cdot 10^2$	10^2	sth
M16	0	–4	–4	$1,4 \cdot 10^3$	10^2	ith
M17	–3	–3	0	1,4	10^3	ih
M18	–2	–3	–1	14	10^3	ih
M19	–1	–3	–2	$1,4 \cdot 10^2$	10^3	sth
M20	0	–3	–2	$1,4 \cdot 10^3$	10^3	ith
M21	–3	–2	1	1,4	10^4	ih
M22	–2	–2	0	14	10^4	ih
M23	–1	–2	–1	$1,4 \cdot 10^2$	10^4	sth
M24	0	–2	–2	$1,4 \cdot 10^3$	10^4	ith
M25	–3	–1	2	1,4	10^5	fth
M26	–2	–1	1	14	10^5	fth
M27	–1	–1	0	$1,4 \cdot 10^2$	10^5	sth
M28	0	–1	–1	$1,4 \cdot 10^3$	10^5	ith

Eredmények

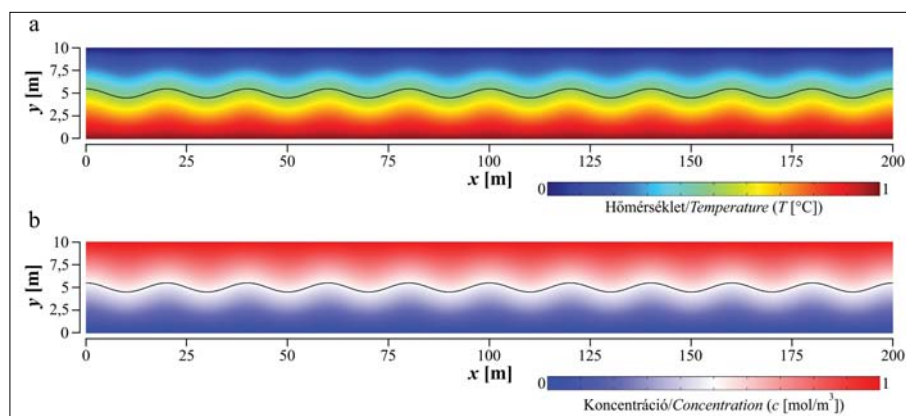
A szimulációk során az $\alpha' \sim Ra_i$ és $\beta' \sim Ra_h$ paraméterek szisztematikus változtatásával vizsgáltuk a porózus közegmodellben kialakuló hőmérséklet-, koncentrációeloszlást és az áramlás karakterét. Összesen 28 különböző esetben (M1–M28) végeztünk szimulációt, melyeket a 3. táblázat mutat be. Az eredmények értelmezését először kvalitatív, majd kvantitatív megközelítés szerint prezentáljuk (Szijártó, Galsa 2020).

A számítási eredmények kvalitatív értelmezése

A kétdimenziós, homogén és izotróp modellekben alkalmazott kezdeti feltételek hőmérséklet- ((7) egyenlet) és koncentrációeloszlását ((8) egyenlet) a 2. ábra mutatja, amelyen a $\Delta T/2 = 0,5$ °C és $\Delta c/2 = 0,5$ mol/m³ értékeket fekete kontúrvonalak szemléltetik. Az eloszlásprofilok függőleges tengelye – a jobb áttekinthetőség kedvéért –

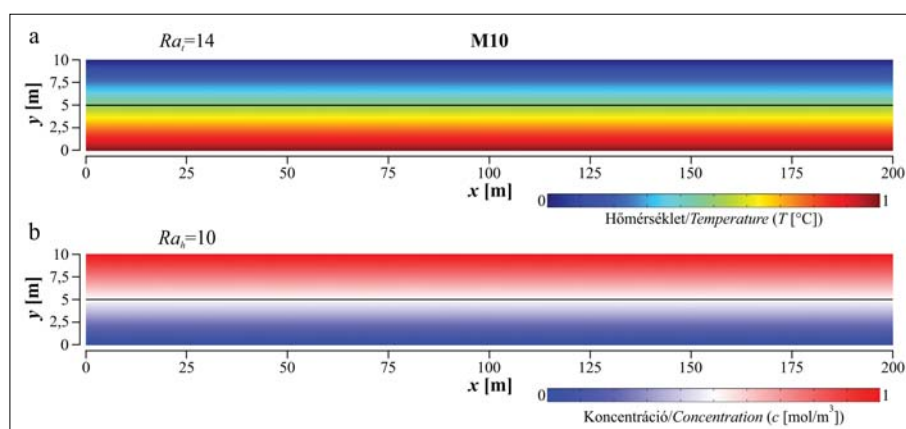
4,83-szorosan túlmagasított. Az eredmények legegyszerűbb értelmezése, ha a hőmérséklet- és a koncentrációter változását vizsgáljuk a kezdeti feltételekhez, illetve a konduktív és diffúziós eloszlásokhoz képest a kvázistacionárius állapot elérését követően. A hat kiválasztott esetet a 3. táblázatban (M10, M14, M18, M23, M26, M28) félkövér betűtípussal emeltük ki.

Az első esetben (M10 – 3. táblázat), ahol $\alpha' = 10^{-2}$ és $\beta' = 10^{-5}$ volt, az 5%-os perturbációval ellátott (A_i, A_c) kezdeti eloszlások $t = 10^5$ napra teljes mértékben módosultak. A 3. ábra alapján elmondható, hogy eme szimulációt tisztán konduktív (T) és diffúziós (c) hő-, illetve tömegtranszport-folyamatok jellemzik. A Darcy-fluxus értéke ugyan az $U = 10^{-13}$ m/s nagyságrendbe esik, de az áramlás intenzitása folytonosan csökken a perturbáció lecsengésével. Ebben az esetben a numerikus modellben nem alakul ki permanens áramlás, melyet a kritikus Rayleigh-számok is mutatnak: $Ra_i = 14 < Ra_{i,kr}$, $Ra_h = 10 < Ra_{h,kr}$ (3. táblázat – nc).



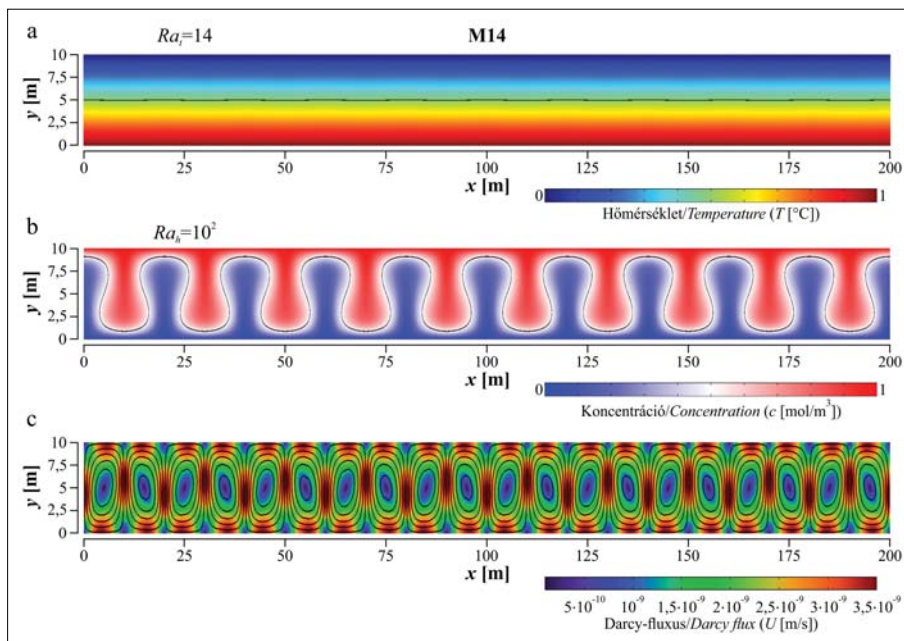
2. ábra A kezdeti (a) hőmérséklet- és (b) koncentrációeloszlás a (7) és a (8) összefüggések alapján. A $\Delta T/2 = 0,5$ °C és a $\Delta c/2 = 0,5$ mol/m³ értékeket fekete kontúrvonal jelöli

Figure 2 Initial (a) temperature and (c) concentration distribution based on equation (7) and (8). The black contour represents the values of $\Delta T/2 = 0.5$ °C and $\Delta c/2 = 0.5$ mol/m³



3. ábra (a) A hőmérséklet és a (b) a koncentráció eloszlása $t = 10^5$ nap után, $\alpha' = 10^{-2}$ és $\beta' = 10^{-5}$ ($BR = \beta'/\alpha' = 10^{-3}$) esetén (M10 – 3. táblázat). Fekete kontúrvonal jelöli (a) a $\Delta T/2$, (b) a $\Delta c/2$ értékeket. A függőleges tengely 4,83-szeresen túlmagasított

Figure 3 Snapshots of (a) the temperature and (b) the concentration after $t = 10^5$ d at the values of $\alpha' = 10^{-2}$ and $\beta' = 10^{-5}$ ($BR = \beta'/\alpha' = 10^{-3}$) (Table 3 – M10). The black contour represents the value of (a) $\Delta T/2$ and (b) $\Delta c/2$. The vertical exaggeration is 4.83

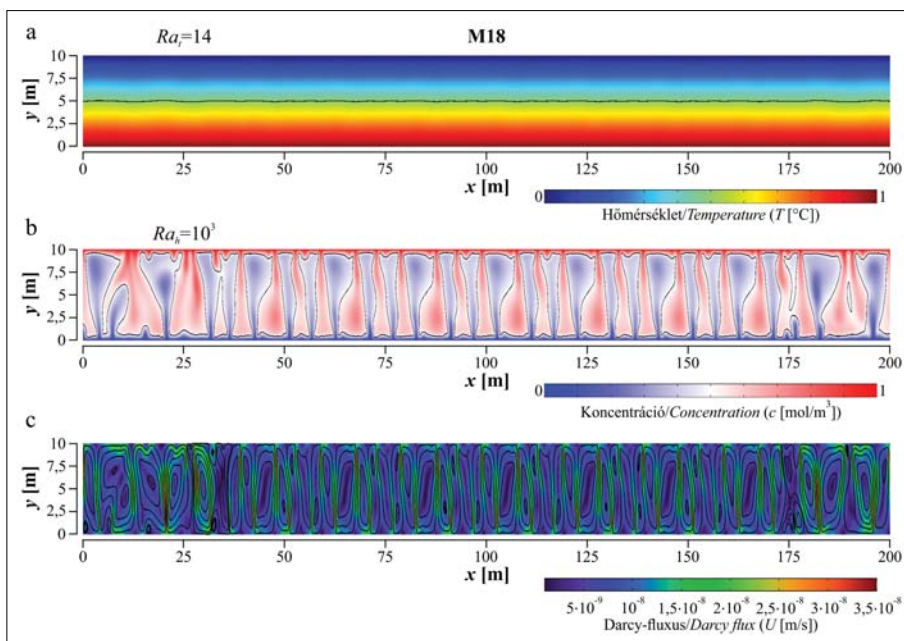


4. ábra (a) A hőmérséklet, (b) a koncentráció és (c) a Darcy-fluxus eloszlása $t = 10^4$ nap után $\alpha' = 10^{-2}$ és $\beta' = 10^{-4}$ ($BR = \beta'/\alpha' = 10^{-2}$) esetén (M14 – 3. táblázat). Fekete kontúrvonal jelöli (a) a $\Delta T/2$, (b) a $\Delta c/2$ értékeket, továbbá (c) illusztrálja az áramvonalakat. A függőleges tengely 4,83-szeresen túlmagasított

Figure 4 Snapshots of (a) the temperature, (b) the concentration and (c) the Darcy flux after $t = 10^4$ d at the values of $\alpha' = 10^{-2}$ and $\beta' = 10^{-4}$ ($BR = \beta'/\alpha' = 10^{-2}$) (Table 3 – M14). The black contour represents the value of (a) $\Delta T/2$, (b) $\Delta c/2$ and (c) it illustrates the Darcy flux stream lines, as well. The vertical exaggeration is 4.83

A koncentrációeloszláson sűrűbb le-, illetve hígabb fel-áramlásokra utaló anomáliák jelentek meg (4b ábra), amikor a dimenziótlan relatív sűrűségkülönbség értékét egy nagyságrenddel megnöveltük ($\beta' = 10^{-4}$) (M14 – 3. táblá-

zat). Ekkor a halin felhajtóerő két nagyságrenddel felülmúlja a termikus felhajtóerőt ($BR = 10^{-2}$). Azonban a hőmérséklet-eloszlás a számítás végére ($t = 10^4$ d) konduktív profilt vesz fel (4a ábra). A kérdés nyilvánvaló: létrejön



5. ábra (a) A hőmérséklet, (b) a koncentráció és (c) a Darcy-fluxus eloszlása $t = 10^4$ nap után $\alpha' = 10^{-2}$ és $\beta' = 10^{-3}$ ($BR = \beta'/\alpha' = 10^{-1}$) értéke esetén (M18 – 3. táblázat). Fekete kontúrvonal jelöli (a) a $\Delta T/2$, (b) a $\Delta c/2$ értékeket, továbbá (c) illusztrálja az áramvonalakat. A függőleges tengely 4,83-szeresen túlmagasított

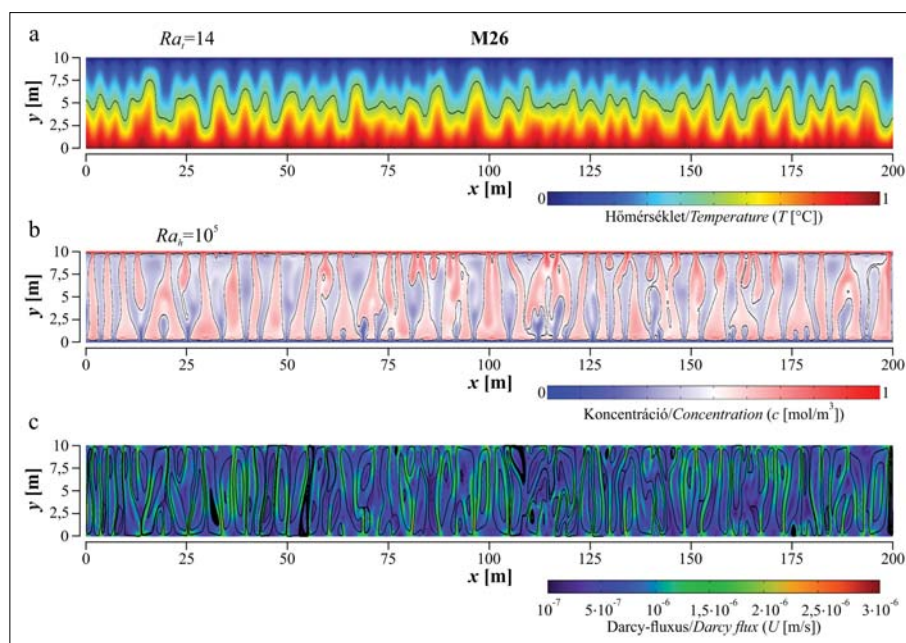
Figure 5 Snapshots of (a) the temperature, (b) the concentration and (c) the Darcy flux after $t = 10^4$ d at the values of $\alpha' = 10^{-2}$ and $\beta' = 10^{-3}$ ($BR = \beta'/\alpha' = 10^{-1}$) (Table 3 – M18). The black contour represents the value of (a) $\Delta T/2$, (b) $\Delta c/2$ and (c) it illustrates the Darcy flux stream lines, as well. The vertical exaggeration is 4.83

halin konvekció, termikus pedig nem? Habár az ellentmondásosnak tűnő eredményeket a két Rayleigh-szám látólag alátámasztja ($Ra_t = 14 < Ra_{tkr}$ és $Ra_h = 100 > Ra_{hkr}$), stacionárius konvekció alakul ki a numerikus modellben (4c ábra). Az $U \sim 10^{-9}$ m/s nagyságrendű áramlás – a jelentős hődiffúzió miatt – nem képes módosítani a konduktív hőmérsékleti eloszlást, így visszaáll a konduktív hőmérséklet-eloszlás (4a ábra). Az analitikus megoldásnak megfelelően $l = L/2H = 10$ konvekciós cella alakul ki a numerikus modellben (Turcotte, Schubert 2014). Tehát szigorú értelemben véve, az M14 modellelrendezésnél stacionárius termohalin konvekció alakul ki, azonban az áramlást a termikus felhajtóerő érdemben nem segíti. Az ilyen eseteket a továbbiakban *stacionárius halin konvekciónak* nevezzük az egyszerűbb megfogalmazás miatt (3. táblázat – sh).

Az 5. ábra $\alpha' = 10^{-2}$ ($Ra_t = 14$) és $\beta' = 10^{-3}$ esetén mutatja be a kialakult hőmérséklet- és koncentrációeloszlást, valamint a Darcy-fluxust (M18 – 3. táblázat). A dimenzióatlan relatív sűrűségkülönbség (β' , $BR = 10^{-1}$) emelkedésének hatására az áramlás intenzitása egy nagyságrenddel tovább növekszik ($U \sim 10^{-8}$ m/s) az előző modellhez képest (M14). Azonban az ilyen intenzitású áramlás még mindig nem képes módosítani érzékelhetően a konduktív hőmérsékleti eloszlást (5a ábra) a porózus közeg jó hődiffuzivitása okán. A koncentrációeloszláson állandó pozícióban elhelyezkedő konvekciós cellák felbomlanak (5b ábra), a modellben erősen időfüggő halin konvekció alakul ki, melyet a halin Rayleigh-szám is mutat: $Ra_h = 10^3 \gg Ra_{hkr}$ (3. táblázat – ih).

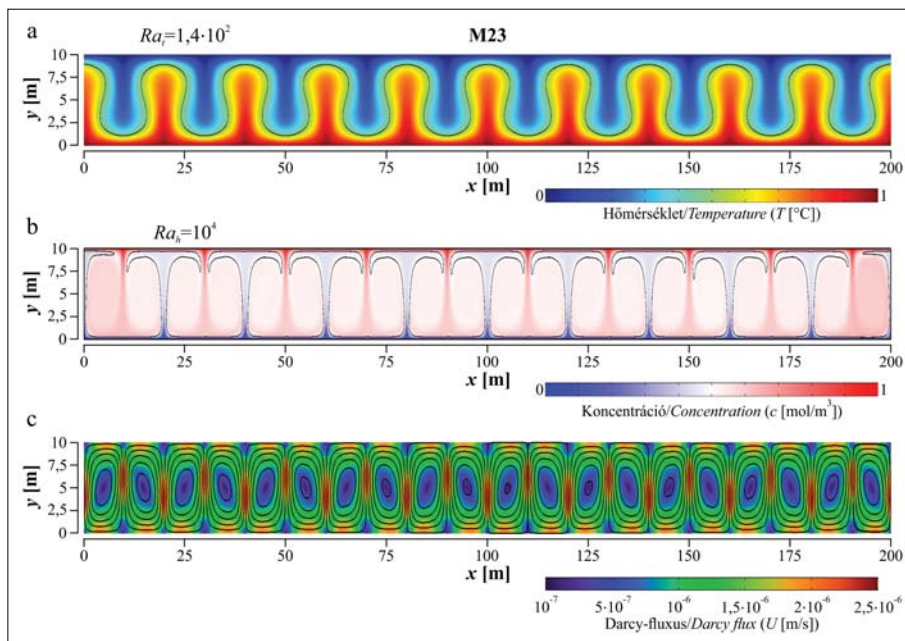
Abban az esetben, amikor a dimenzióatlan relatív sűrűségkülönbséget $\beta' = 10^{-1}$ értékre növeltük ($Ra_h = 10^5 \gg Ra_{hkr}$) (M26 – 3. táblázat), a Darcy-fluxus értéke $U = 10^{-7}$ -re és $3 \cdot 10^{-6}$ m/s-ra változott (6c ábra). Ez az érték már összemérhető a porózus közeg egységnyi távolságára vonatkozó hődiffúziós tényezőjének értékével ($\kappa/1 \text{ m} \approx 10^{-6} \text{ m/s}$), vagyis a hődiffúzió sebessége és a koncentrációváltozás miatt fellépő halin konvekció áramlási sebessége összemérhető. A jelenség úgy is megfogalmazható, hogy a sótartalom miatt kialakuló szabad konvekció a hőmérséklet szempontjából egyfajta kényszerkonvekciónak tekinthető. Az áramlás karakterisztikája ismételtelen időfüggő jelleget mutat a koncentrációeloszlás esetében (6b ábra). Továbbá, a konduktív hőmérsékleteloszlás is módosult a két felhajtóerő arányának egyenlősége miatt ($BR = \beta'/\alpha' \approx 1$) (6a ábra). Ebben az esetben a kialakuló áramlást *indukált vagy kényszertermohalin konvekciónak* hívhatjuk (3. táblázat – fth).

A 7. ábra a kialakult hőmérséklet- és koncentrációeloszlást, valamint a Darcy-fluxus stacionárius eloszlását illusztrálja $\alpha' = 10^{-1}$ és $\beta' = 10^{-2}$ esetén ($BR = 0,1$) (M23 – 3. táblázat). A hőmérsékleti eloszláson hideg le-, illetve meleg feláramlások, míg a koncentrációeloszláson sűrűbb/sósabb le- és hígabb feláramlások azonosíthatók. A kialakuló jelenséget a termikus Rayleigh-szám is jól jellemzi, mely ez esetben már meghaladja a kritikus értéket ($Ra_t = 140 > Ra_{tkr}$). Habár az $Ra_h = 10^4$ önmagában időfüggő megoldásra engedne következtetni, $Ra_t = 140$ mellett *stacionárius termohalin konvekció* (3. táblázat – sth) formálódik. A konvekciós cellák száma ebben az esetben



6. ábra (a) A hőmérséklet, (b) a koncentráció és (c) a Darcy-fluxus eloszlása $t = 10^4$ nap után $\alpha' = 10^{-2}$ és $\beta' = 10^{-1}$ ($BR = \beta'/\alpha' = 10$) értéke esetén (M26 – 3. táblázat). Fekete kontúrvonal jelöli (a) a $\Delta T/2$, (b) a $\Delta c/2$ értékeket, továbbá (c) illusztrálja az áramvonalakat. A függőleges tengely 4,83-szeresen túlmagasított

Figure 6 Snapshots of (a) the temperature, (b) the concentration and (c) the Darcy flux after $t = 10^4$ d at the values of $\alpha' = 10^{-2}$ and $\beta' = 10^{-1}$ ($BR = \beta'/\alpha' = 10$) (Table 3 – M26). The black contour represents the value of (a) $\Delta T/2$, (b) $\Delta c/2$ and (c) it illustrates the Darcy flux stream lines, as well. The vertical exaggeration is 4.83



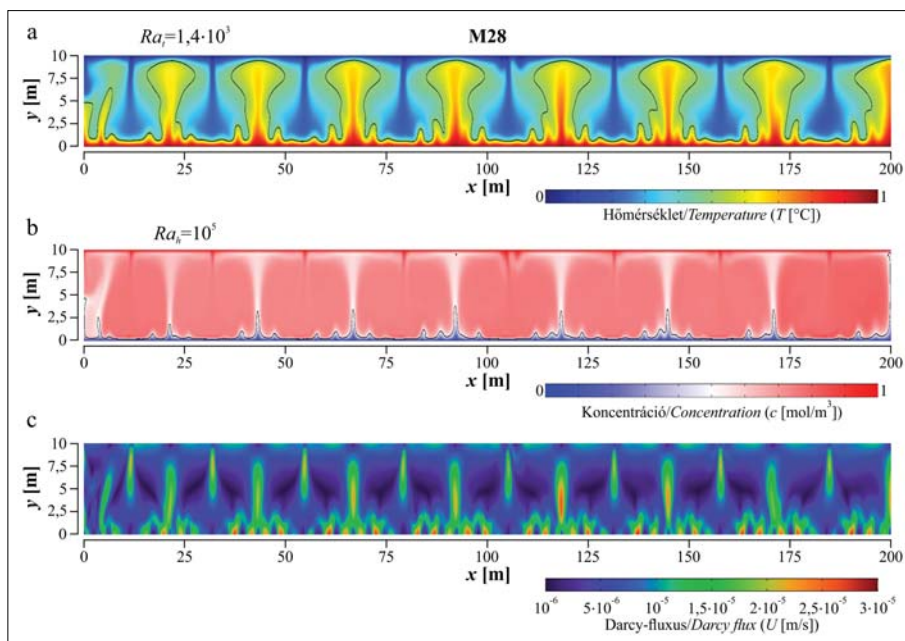
7. ábra (a) A hőmérséklet, (b) a koncentráció és (c) a Darcy-fluxus eloszlása $t = 10^4$ nap után $\alpha' = 10^{-1}$ és $\beta' = 10^{-2}$ ($BR = \beta'/\alpha' = 10^{-1}$) értéke esetén (M23 – 3. táblázat). Fekete kontúrvonal jelöli (a) a $\Delta T/2$, (b) a $\Delta c/2$ értékeket, továbbá (c) illusztrálja az áramvonalakat. A függőleges tengely 4,83-szeresen túlmagasított

Figure 7 Snapshots of (a) the temperature, (b) the concentration and (c) the Darcy flux after $t = 10^4$ d at the values of $\alpha' = 10^{-1}$ and $\beta' = 10^{-2}$ ($BR = \beta'/\alpha' = 10^{-1}$) (Table 3 – M23. The black contour represents the value of (a) $\Delta T/2$, (b) $\Delta c/2$ and (c) it illustrates the Darcy flux stream lines, as well. The vertical exaggeration is 4.83

is $l = 10$, ami megfelel a leginstabilabb dimenziótlán hullámszámnak (Turcotte, Schubert 2014). A Darcy-fluxus nagysága lényegében megegyezik az előző, M26 modell esetén tapasztalt értékekkel (6c ábra), habár az áramvona-

lak szimmetriája jelen esetben egyértelműen stacionárius áramlást mutat (7c ábra).

Az utolsó esetben (M28 – 3. táblázat), ahol $\alpha' = 1$ és $\beta' = 0,1$ ($BR = 0,1$), mely értékek mellett mind a termikus,



8. ábra (a) A hőmérséklet, (b) a koncentráció és (c) a Darcy-fluxus eloszlása $t = 10^4$ nap után $\alpha' = 1$ és $\beta' = 10^{-1}$ ($BR = \beta'/\alpha' = 10^{-1}$) értéke esetén (M28 – 3. táblázat). Fekete kontúrvonal jelöli (a) a $\Delta T/2$, (b) a $\Delta c/2$ értékeket, továbbá (c) illusztrálja az áramvonalakat. A függőleges tengely 4,83-szeresen túlmagasított

Figure 8 Snapshots of (a) the temperature, (b) the concentration and (c) the Darcy flux after $t = 10^4$ d at the values of $\alpha' = 1$ and $\beta' = 10^{-1}$ ($BR = \beta'/\alpha' = 10^{-1}$) (Table 3 – M28. The black contour represents the value of (a) $\Delta T/2$, (b) $\Delta c/2$ and (c) it illustrates the Darcy flux stream lines, as well. The vertical exaggeration is 4.83

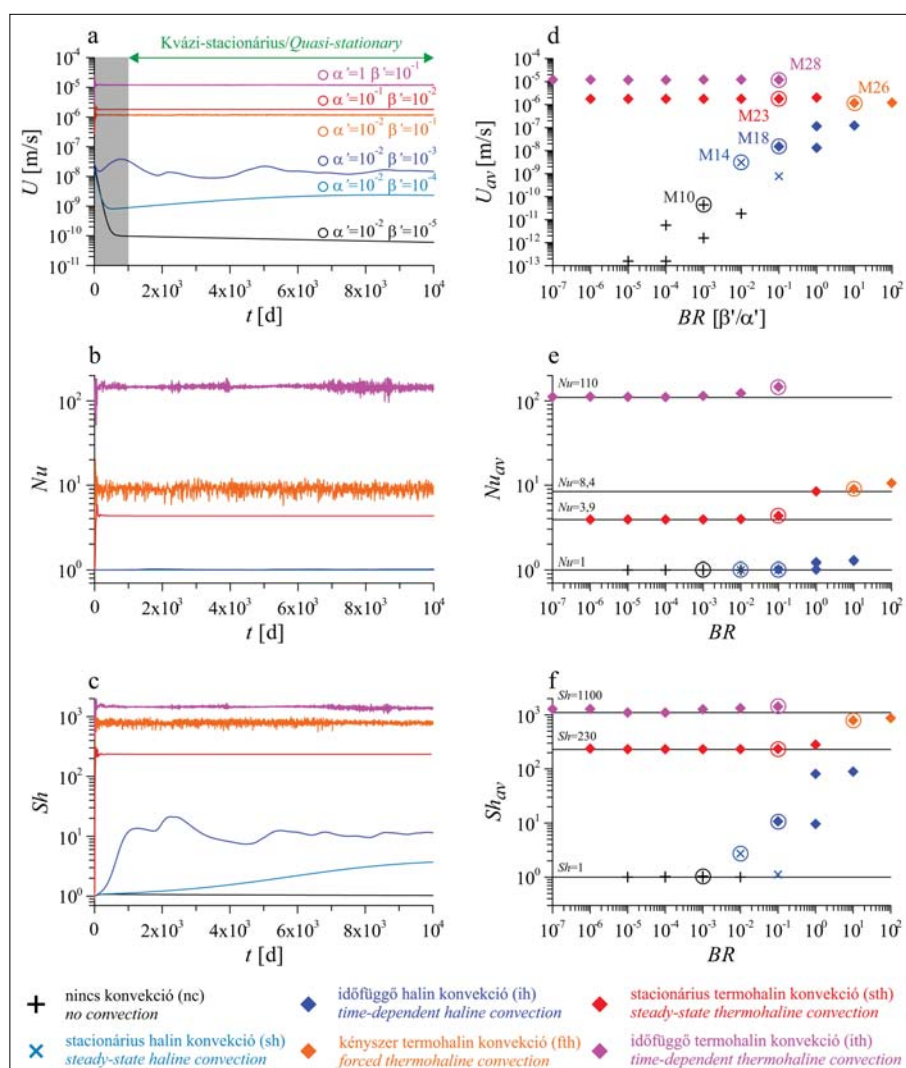
mind a halin Rayleigh-szám jóval meghaladja azok kritikus értékét: $Ra_t = 1400 \gg Ra_{kr}$ és $Ra_h = 10^5 \gg Ra_{hkr}$. A modellben kialakuló áramlás erős időfüggéssel jellemezhető, amit mind a három eloszlásprofil kellőképpen érzékeltet (8. ábra). Elmondható, hogy az áramlás rendkívül intenzív ($U = 10^{-6}$ – 10^{-7} m/s), ezzel meghaladva D_0 és κ értékeit egyaránt (1. táblázat). Az előző modellhez képest a konvekciós cellák helyzete is megváltozik, a fel- és leáramlások karakterisztikus hullámszáma lecsökken, a modellben időfüggő termohalin konvekció alakul ki (3. táblázat – ith).

A számítási eredmények kvantitatív értelmezése

A numerikus szimulációkat a dimenziótlan α' és β' paraméterekkel a 3. táblázat foglalja össze. Az előző szakasz-

ban hat olyan kitüntetett esetet mutattunk be, amelyek mindegyikében különböző karakterű áramlási rendszer alakult ki. Azonban a kvantitatív értelmezést már minden eredmény esetén elvégeztük (9. ábra).

A 9a–c ábra a modelltartományon számított átlagnégyzetes Darcy-fluxus (U), az átlagos Nusselt-szám (Nu) és Sherwood-szám (Sh) értékek változását mutatja az idő függvényében $t = 0$ és 10 000 nap között a kitüntetett szimulációk esetében (3–8. ábra; 3. táblázat – M10, M14, M18, M23, M26, M28). Először azokat a modelleket vizsgáltuk, ahol a dimenziótlan hőtágulási együttható értéke $\alpha' = 10^{-2}$ ($Ra_t = 14$) volt. A dimenziótlan relatív sűrűségkülönbséget $\beta' = 10^{-5}$ -ről 10^{-1} értékig növelve az átlagnégyzetes Darcy-fluxus (U) értéke négy nagyságrendet változott (9a ábra). Azokban az esetben, amikor az áramlás lényegesen alulmaradt a modell egységnyi távolságára vo-



9. ábra (a) Az átlagnégyzetes Darcy-fluxus (U), (b) az átlagos Nusselt-szám (Nu) és (c) az átlagos Sherwood-szám (Sh) az idő függvényében a 3–8. ábrán bemutatott esetekben. A kontrollparaméterek kvázistacionárius időtartományára ($t > 10^3$ nap) számított átlaga: (d) U_{av} , (e) Nu_{av} és (f) Sh_{av} a felhajtóerő-arány ($BR = \beta'/\alpha'$) függvényében. Az (a–c) ábrán bemutatott és a (d–f) ábrán körrel kiemelt esetek félkövér betűtípussal kiemelve a 3. táblázatban (M10, M14, M18, M23, M26, M28)

Figure 9 Time series showing (a) the magnitude of the Darcy flux (U), (b) the average Nusselt number (Nu) and (c) the average Sherwood number (Sh) in accordance with Figs 3–8. Time-averaged values of the time series during the quasi-stationary time interval ($t > 10^3$ d) of the monitoring parameters: (d) U_{av} , (e) Nu_{av} és (f) Sh_{av} plotted against the Buoyancy ratio ($BR = \beta'/\alpha'$). Time series presented in (a–c) and model results encircled in (d–f), are marked in bold in Table 3 (M10, M14, M18, M23, M26, M28)

natkozó molekuláris diffúziós együttható értékéhez képest ($D_0/1 \text{ m} = 10^{-9} \text{ m/s} \ll U$), a halin felhajtóerő nem járult hozzá a konvektív áramlás kialakuláshoz (3. *ábra*, M10). (Megjegyezzük, hogy $\beta' = 10^{-5}$ esetén a modellben kialakuló áramlás még $t = 10^5$ napnál sem érte el a stacionárius állapotot, amikor a Darcy-fluxus $U \sim 10^{-13} \text{ m/s}$ nagyságrendű volt, és folyamatosan csökkent.) Ebben az esetben mind a Nusselt-szám, mind a Sherwood-szám értéke $Nu = Sh = 1$ -nek adódott, ami a rendszer konduktív hő-, illetve a diffúziós tömegtranszport dominanciáját mutatja (9b,c *ábra*). Tehát a numerikus modellben nem alakult ki termohalin konvekció.

A sótartalom okozta $\beta' = 10^{-4}$ relatív sűrűség-növekedés mellett stacionárius (4. *ábra*, M14), míg $\beta' = 10^{-3}$ (5. *ábra*, M18) esetén időfüggő halin konvekció fejlődött a numerikus modellben (9a *ábra*). Habár a Sherwood-szám $Sh = 1-20$ között ingadozott, a Nusselt-szám állandó, $Nu \approx 1$ értéken maradt (9b,c *ábra*). Ebben az esetben a termikus felhajtóerő nem járult hozzá a konvekció kialakításához. Abban az esetben, amikor a dimenziótlan relatív sűrűségkülönbséget további két nagyságrenddel megnöveltük ($\beta' = 10^{-1}$, $\alpha' = 10^{-2}$), a számított átlagnégyzetes Darcy-fluxus már egybeesett az egységnyi távolságra vonatkozó hődiffúziós tényező nagyságrendjével ($\kappa/1 \text{ m} \sim U \approx 10^{-6} \text{ m/s}$). Ennek köszönhetően erősen időfüggő, kényszertermohalin konvekció alakult ki a rendszerben, amit $Nu \approx 10$ és $Sh \approx 800$ értékei is mutatnak. A termikus felhajtóerő mértékének fokozását az α' paraméter szisztematikus növelésével értük el. $\alpha' = 10^{-1}$ és $\beta' = 10^{-2}$ esetén stacionárius (7. *ábra*, M23), majd $\alpha' = 1$ és $\beta' = 10^{-1}$ mellett időfüggő (8. *ábra*, M28) termohalin konvekció alakult ki, amit a kontrollparaméterek ($U(t)$, $Nu(t)$, $Sh(t)$) idősorai is egyértelműsítenek (9a-c *ábra*).

Habár a 9a-c *ábra* csak a hat kiválasztott eset idősorait mutatja, a 9d-f *ábrán* a kontrollparaméterek időbeli átlagértékét tüntettük fel az összes szimulációra vonatkozólag (3. táblázat – M1–M28). A kezdeti tranzienst jelenségek kiküszöbölése miatt az átlagolást az idősorok kvázi-stacionárius szakaszára, $t = 1000$ és 10000 nap között végeztük el. A kontrollparaméterek átlagértéke (U_{av} , Nu_{av} , Sh_{av}) a felhajtóerő-arány ((17) egyenlet) függvényében került ábrázolásra. A különböző scenáriókhoz tartozó BR értékek szintén a 3. táblázatban találhatók.

A numerikus modellben nem alakult ki felhajtóerő okozta áramlás, amikor $\alpha' \leq 10^{-2}$ ($Ra_t \leq 14$) és $\beta' \leq 10^{-5}$ ($Ra_h \leq 10$) volt. Azonban amikor a dimenziótlan relatív sűrűségkülönbség értékét egy nagyságrenddel megnöveltük ($\beta' = 10^{-4}$, $Ra_h = 100$), a Sherwood-szám $1 < Sh \leq 3$ értékűnek adódott, ami stacionárius halin konvekcióra utal (9f *ábra*). Ezekben az esetekben a koncentráció okozta felhajtóerő nem képes módosítani a konduktív hőmérsékleti eloszlást, amit az átlagos Nusselt-szám is mutat ($Nu_{av} = 1$) (9e *ábra*). Abban az esetben, amikor a β' paramétert 10^{-3} és 10^{-2} ($Ra_h = 10^3-10^4$) között változtattuk ($\alpha' \leq 10^{-2}$, $Ra_t \leq 14$), először gyengébb, majd egyre erősebb intenzitású időfüggő halin konvekció alakult ki a numerikus modellben. A koncentrációkülönbség okozta fel-

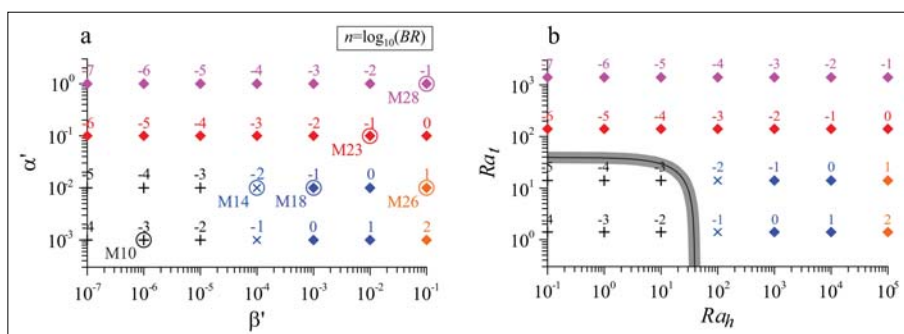
hajtóerő $\beta' = 10^{-2}$ értéknél $U_{av} \approx 10^{-7} \text{ m/s}$ Darcy-fluxusú áramlást indukált ($Sh_{av} = 80-100$), ami csupán kis mértékben, de megjelent a modell felső határán kiszámított hőfluxus értékében is, $1 < Nu_{av} < 2$ ($BR = 10^0$ és 10^1 , kék).

Másrésről, $\alpha' \geq 10^{-1}$ ($Ra_t \geq 140$) modellek esetén a kialakuló áramlási rendszer jellegét egyértelműen a termikus felhajtóerő határozta meg. E szimulációkban már nem a hővezetés, hanem az advekció volt az elsődleges hőtranszportfolyamat a numerikus modellben. Abban az esetben, amikor $\alpha' = 10^{-1}$ ($Ra_t = 140$) volt, s a dimenziótlan relatív sűrűségkülönbség értékét $\beta' = 10^{-7}$ ($Ra_h = 0,1$) és 10^{-1} ($Ra_h = 10^5$) között változtattuk, stacionárius termohalin konvekció alakult ki a porózus közegmodellben. A permanens áramlást $Nu_{av} = 3,9$ és $Sh_{av} = 230$ dimenziótlan számok jellemezték (9e,f *ábra*). Tehát β' növelése érdekében nem befolyásolta a kialakuló áramlás karakterét, habár $\beta' = 10^{-1}$ esetén a Nusselt-szám 8,4, míg a Sherwood-szám 280 értékre emelkedett. Ám ennek hatására az áramlás intenzitása nem változott jelentős mértékben (9d *ábra*). $\alpha' = 1$ ($Ra_t = 1400$) mellett már minden modellben időfüggő termohalin konvekció formálódott. Az áramlás hevességét a kontrollparaméterek emelkedő értékei is jól jellemzik: $U_{av} \approx 10^{-5} \text{ m/s}$; $Nu_{av} = 100-200$; $Sh_{av} = 1000-1500$ (9d-f). $\beta' = 0,1$ ($Ra_h = 10^5$) és $\alpha' = 10^{-3}$, 10^{-2} ($Ra_h = 1,4; 14$) paraméteregyüttes esetén a kialakuló áramlást indukált vagy kényszertermohalin konvekciónak neveztük el. Ilyen esetekben az áramlás több értelemben is átmeneti típusnak tekinthető, hiszen összekapcsolja a stacionárius és időfüggő termohalin konvekcióval jellemzett csoportot, valamint információt szolgáltat olyan áramlási rendszerekre, ahol a felhajtóerő-arány $BR \geq 10^2$. Megjegyezzük, hogy az utóbbi megállapítás megfelelő alátámasztásához további számítások szükségesek.

Az eredmények alapján hat különböző típusú áramlás különíthető el a vizsgált paramétertartományon ($\alpha' = 10^{-3}-1$ és $\beta' = 10^{-7}-10^{-1}$), ahol 1) nem alakul ki áramlás (nc), 2) stacionárius halin (sh), 3) időfüggő halin (ih), 4) indukált/kényszertermohalin (fth), 5) stacionárius termohalin (sth) és 6) időfüggő termohalin konvekció (ith) fejlődik a modellben (3. táblázat, 9. *ábra*). Megjegyezzük, hogy a 2)–6) scenáriók mindegyikében konvektív áramlás alakult ki, azonban a konduktív hőmérsékleti eloszlás nem minden esetben módosult (4., 5. *ábra*).

Diszkusszió

A vizsgált modelleket α' vs. β' és Ra_t vs. Ra_h paraméterterben ábrázoltuk, ahol a hozzájuk tartozó felhajtóerő-arányt is feltüntettük (10. *ábra*). A hat különböző karakterű áramlástípus a paraméterterekben is jól elkülöníthető egymástól. Természetes konvekció alakul ki a numerikus modellben, ha akár csak az egyik Rayleigh-szám meghaladja a kritikus értéket (10b *ábra*). $\alpha' \leq 10^{-2}$ ($Ra_t \leq 14$) esetén csupán a sótartalom okozta halin felhajtóerő indukál áramlást a rendszerben ($10^{-9} \text{ m/s} < U < 10^{-7} \text{ m/s}$), amely mellett a konduktív (hővezetés) irányította hőmér-



10. ábra A kialakuló konvekciós áramlás típusa (a) a dimenzióatlan hőtágulási együttható (α') és a dimenzióatlan (sótartalom okozta) relatív sűrűségkülönbség (β') függvényében; valamint (b) a termikus Rayleigh-szám (Ra_t) a halin Rayleigh-szám (Ra_h) függvényében. A feliratok értékei az $n = \log_{10}(BR)$ összefüggést mutatják. A színek megegyezik a 9. ábrán található jelöléssel. (a) A körrel kiemelt szcenáriókat a 9. ábra és a 3. táblázat is jelöli (M10, M14, M18, M23, M26, M28)

Figure 10 Convection types formed in the model plotted against (a) the non-dimensional thermal expansion (α') and the non-dimensional relative density contrast (β'), as well as (b) thermal Rayleigh number (Ra_t) and the haline Rayleigh number (Ra_h) for the studied simulations. Labels show the values of expression of $n = \log_{10}(BR)$. Color code is the same as in Figure 9. (a) Marked scenarios (colored circle) are presented in Figure 9 and listed in Table 3 (M10, M14, M18, M23, M26, M28)

sékleti eloszlás nem módosul. β' növelésével először stationárius, majd időfüggő halin konvekció, végül kényszertermohalin konvekció alakul ki. Azonban, ha a dimenzióatlan hőtágulási együttható értékét legalább egy nagyságrenddel megnöveljük ($\alpha' \geq 10^{-1}$) ($Ra_t \geq 140$), teljes mértékben a termikus tag fogja uralni a kialakuló áramlási képet, melynek intenzitása $U > 10^{-6}$ m/s lesz. A modellezett paraméterértékek mellett csupán termikus felhajtó erő okozta áramlás nem alakul ki. A felhajtóerő-arány (BR) hasznos paraméter az adatok vizualizációja szempontjából, azonban önmagában nem hordoz többletinformációt a kialakuló áramlás jellegéről, dinamikájáról. Megjegyezzük, hogy a vizsgált paraméterek (α' , β') mellett a modell permeabilitásának (k), vastagságának (H), illetve a közeg hődiffúziós tényezőjének (κ) és a víz molekuláris diffúziós együtthatójának (D_0) megváltozása is befolyásolhatja a konvektív áramlást ((11) és (12) összefüggés).

A szimulációk során nem vettük figyelembe a diszperziós tömegtranszport hatását, hogy a parciális differenciálegyenlet-rendszer ((1)–(4) egyenlet) analitikus megoldásával összhangban értelmezhetjük a numerikus eredményeket. Azonban nem minden esetben hanyagolhatjuk el a mechanikai diszperzió jelenségét (pl. Wen et al. 2018), különösképpen, ha medencéléptékű felszín alatti vízáramlási rendszerek transzportfolyamatait vizsgáljuk (pl. Simmons et al. 2001, Galsa et al. 2019). Ezenkívül a termohalin konvekció megindulásának pontos matematikai leírása is alapos vizsgálatra szorul. Nield és Bejan (2013) a kritikus termohalin Rayleigh-számot (Ra_{thkr}) a termikus és a halin Rayleigh-számok ((11) és (12) egyenletek) összegeként írja fel:

$$Ra_{thkr} = Ra_t + Ra_k = 4\pi^2, \quad (17)$$

melyet a 10b ábra is szemléltet (fekete vonal). Azonban akad még néhány tisztázatlan kérdés az Ra_{thkr} érték kiszámításával és magával az Ra_{th} definiálásával kapcsolatban: 1) milyen feltételek mellett érvényes a (17) összefüggés,

2) kialakulhat-e egyáltalán termohalin konvekció olyan esetben, ha $Ra_t < 4\pi^2$ és $Ra_h < 4\pi^2$, de $Ra_t + Ra_h > 4\pi^2$?

A jelenség fizikai vizsgálata érdekében a szisztematikus tesztelést dimenzióatlan paraméterekkel végeztük (α' , β'), ám az eredményeket alkalmazhatjuk valós vízáramlási rendszerek vizsgálatára, ha azok paraméterei megegyeznek a numerikus modell geometriai és fizikai tulajdonságaival (1. táblázat). Az átszámításra a következő sorokban található egy példa. Felhasználva a víz hőtágulási tényezőjének értékét: $\alpha(T = 20 \text{ °C}) = 2,07 \cdot 10^{-4} \text{ 1/°C}$ (Freeze, Cherry 1979), $\alpha' = 0,01$ ($Ra_t = 14$) esetén a modell teteje és alja közötti hőmérséklet-különbség $\Delta T = 48 \text{ °C}$ -nak adódik. Ha $\beta' = 10^{-3}$ ($Ra_h = 10^3$) és a modell teljes vastagságán előírt egységnyi koncentrációkülönbség ($\Delta c = 1 \text{ mol/m}^3$), akkor $\beta = 10^{-3} \text{ m}^3/\text{mol}$, azaz a koncentráció mértéke 1%-kal csökken az oldott anyagtartalom miatt a mélységgel. Ilyen modellparaméterek mellett időfüggő halin konvekció megjelenése valószínűsíthető a rétegben (M18).

Megjegyezzük, hogy e szimulációk alapján levont következtetések nem helyettesítik a valós rendszerek numerikus modelljein elvégzett számításokat, azonban kiváló alapot biztosítanak a kutatás kezdeti fázisában! Mint például: sódómk közelében elhelyezkedő vízáradó rétegekben (Evans, Nunn 1989, Sarkar et al. 1995, Holczer et al. 2010), karsztosodott mélykarbonátos vízáradókban (Rubin 1976, Galsa et al. 2019) kialakuló felszín alatti vízáramlási rendszerek vizsgálatában, hidrotermális ércképződéses folyamatok kutatásában (Yang et al. 2009), valamint szennyezőanyagok terjedésének monitorozásában.

Következtetések

A tanulmányban egy szintetikus szimulációsorozatban bemutattuk a termikus és halin felhajtóerő együttes hatását a kialakuló komplex áramlási rendszer tulajdonságára vonatkozólag. A dimenzióatlan hőtágulás együttható ($\alpha' = 10^{-3}-1$) és a dimenzióatlan relatív sűrűségkülönbség

($\beta' = 10^{-7}-0,1$) szisztematikus tesztelésével követtük a koncentrációban, a hőmérsékletben, illetve a Darcy-fluxusban tapasztalható változásokat (3–8. ábra). Az eredmények értelmezését kvantitatív formában is elvégeztük, melynek során az átlagnégyzetes Darcy-fluxus (U), az átlagos Nusselt- (Nu) és Sherwood-szám (Sh) idősorait és időbeli átlagukat (U_{av} , Nu_{av} , Sh_{av}) vizsgáltuk meg különböző modellszenáriók esetén (3. táblázat, 9. ábra). Az eredmények alapján hat különböző karakterű áramlást sikerült elkülöníteni, nevezetesen amikor 1) nem alakul ki konvekció, 2) stacionárius halin, 3) időfüggő halin, 4) kényszertermohalin, 5) stacionárius termohalin és 6) időfüggő termohalin konvekció alakul ki (3. táblázat, 9–10. ábra). A legfontosabb megállapítások:

- 1) $\alpha' \leq 10^{-2}$ ($Ra_i \leq 14$) és $\beta' \leq 10^{-5}$ ($Ra_i \leq 10$) esetén nem alakul ki áramlás a modellben, transzportfolyamatot csak a hővezetés és a diffúzió okoz (pl. M10).
- 2)–3) $\alpha' \leq 10^{-2}$ ($Ra_i \leq 14$) és $10^{-4} \leq \beta' \leq 10^{-2}$ ($Ra_i \leq 100$) esetén először stacionárius (pl. M14), majd időfüggő (pl. M18) halin konvekció alakul ki. Az áramlás intenzitása $U = 10^{-9}$ és 10^{-7} m/s között változik, a hővezetés marad a domináns hőtranszportfolyamat ($\kappa = 7,14 \cdot 10^{-7}$ m²/s), így a felhajtóerő hatása csak a koncentrációeloszlásban okoz anomáliát a diffúziós profilhoz képest.
- 4) Ha a dimenziótlan relatív sűrűségkülönbséget további egy nagyságrenddel növeljük ($\beta' \leq 10^{-1}$, $Ra_i = 10^3$), a porózus közegben tapasztalható Darcy-fluxus már azonos nagyságrendbe esik a hődiffúzió mértékével. Ezért kényszertermohalin konvekció alakul ki a szintetikus modellben (pl. M26).
- 5) Stacionárius termohalin konvekció alakul ki, bármely vizsgált β' paraméter esetén, ha a dimenziótlan hőtágulás értéke $\alpha' = 10^{-1}$ ($Ra_i = 140$) (pl. M23).
- 6) Ha α' értékét további egy nagyságrenddel megnöveljük ($Ra_i = 1400$), akkor időfüggő termohalin konvektív áramlás fejlődik a rendszerben.

Általánosan elmondható, hogy $\alpha' \leq 10^{-2}$ esetén a kialakuló áramlást a koncentrációkülönbség okozta halin, míg $\alpha' \geq 10^{-1}$ mellett teljes egészében a hőmérséklet-különbségből adódó termikus felhajtóerő irányítja. Habár az összetett termohalin konvekció a két hajtóerő együttes hatására alakul ki, utóbbi esetben a β' paraméter változtatása csak kis mértékben befolyásolja a modellben kialakuló áramképet. A vizsgált modellelrendezésben tisztán szabad termikus konvekció nem alakult ki. A porózus közegben kialakult termohalin konvekciót érdemes a Lewis-szám (Le), a felhajtóerő-arány (BR) és a Rayleigh-számok (Ra_i , Ra_n) együttes paraméterterében vizsgálni.

Összességében kijelenthető, hogy a bemutatott numerikus szimulációkészlet általános érvényű információkkal szolgálhat olyan hidrogeológiai rendszerek tanulmányozására, ahol termohalin konvekció alakulhat ki. Ilyenek lehetnek azok a sódómok közelében lévő vízádók, a karsztosodott mély karbonátos rendszerek, illetve a nagy sókoncentrációval rendelkező rétegek, ahol jelentős a geo-

termikus gradiens értéke, például a Pannon-medencében (Dövényi, Horváth 1988, Lenkey et al. 2002). Ezenkívül összetett konvekciós áramlások alakulhatnak ki a felszín alatti vízbe bekerülő szennyezőanyagok transzportfolyamatai során, illetve olyan geotermikus erőművek környezetében, ahol a szivattyúzás és a visszasajtolás magas sótartalmú rétegből/rétegbe történik.

Köszönetnyilvánítás

Jelen kutatás az Információs és Technológiai Minisztérium ÚNKP-19-3 és ÚNKP-19-4 kódszámú Új Nemzeti Kiválóság Programjának szakmai támogatásával készült. A kutatómunka az ENeRAG projekt keretein belül készült, amelyet az Európai Unió Horizon 2020 kutatási és innovációs programja támogatott 810980 azonosító számú támogatási megállapodás alapján. További támogató: az OTKA K 129273 sz. pályázata. A szerzők köszönettel tartoznak Pethő Gábor és Zilahi-Sebes László bírálóknak a precíz lektorálásért, valamint a cikk megértését segítő javaslaikért.

A tanulmány szerzői

Szijaártó Márk, Galsa Attila

Hivatkozások

- Caldwell D. (1974): Experimental studies on the onset of thermohalin convection. *Journal of Fluid Mechanics*, 64/2, 347–367, <https://doi.org/10.1017/S0022112074002436>
- Cserepes L., Lenkey L. (2004): Forms of hydrothermal and hydraulic flow in a homogeneous unconfined aquifer. *Geophys. J. Int.* 158/2, 785–797, <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2004.02182.x>
- Delgado J. M. P. Q. (2012): Heat and Mass Transfer in Porous Media. Springer Int., pp. 266., <https://doi.org/10.1007/978-3-642-21966-5>
- Diersch H.-J. G., Kolditz O. (2002): Variable-density flow and transport in porous media: approaches and challenges. *Advances in Water Resources*, 25, 899–944, [https://doi.org/10.1016/S0309-1708\(02\)00063-5](https://doi.org/10.1016/S0309-1708(02)00063-5)
- Dövényi P., Horváth F. (1988) A review of temperature, thermal conductivity and heat flow data for the Pannonian Basin. In: Horváth, F., Royden, L. H. (eds.), *The Pannonian Basin: A Study in a Basin Evolution*. AAPG Memoir. 45, 195–233, ISBN: 9781629811345
- Evans D., Nunn J. (1989): Free thermohaline convection in sediments surrounding a salt column. *Journal of Geophysical Research*, 94, 12413–12422
- Freeze A., Cherry J. (1979): *Groundwater*. 1st edition, Prentice Hall, 604. ISBN-10: 0133653129
- Galsa A., Szijaártó M., Tóth Á., Mádlné Szőnyi J. (2019): Interaction of topography- and salinity-driven groundwater flow in synthetic numerical models and a real geological situation. EGU General Assembly, Vienna. EGU2019-9960
- Holczer E., Kohfahl M. M., Baçık A., Dobies M., Schneider M. (2010): The sensitivity of thermohaline groundwater circulation to flow and transport parameters: A numerical study based on double-diffusive convection above a salt dome. *Transport*

- in Porous Media, 88, 771–791, <https://doi.org/10.1007/s11242-009-9480-4>
- Lapwood E. (1948): Convection of a fluid in a porous medium. *Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, 44, 508–521, <http://dx.doi.org/10.1017/S030500410002452X>
- Lenkey L. (1993): A tiszakécskei hőanomália vizsgálata termikus konvekció numerikus modellezésével. *Magyar Geofizika*, 34/1, 30–46
- Lenkey L., Dövényi P., Horváth P., Cloetingh S. A. P. L. (2002): Geothermics of the Pannonian basin and its bearing on the neotectonics. *EGU Stephan Mueller Special Publication Ser.*, 3, 29–40
- Lopez T., Antoine R., Kerr Y., Darrozes J., Rabinowicz M., Ramillien G., Cazenave A., Genthon P. (2016): Subsurface hydrology of the Lake Chad Basin from convection modelling and observations. *Surveys in Geophysics*, 37, 471–502, <https://doi.org/10.1007/s10712-016-9363-5>
- Nield D. A. (1968): Onset of thermohaline convection in a porous medium. *Water Resources Research*, 4/3, 553–560, <https://doi.org/10.1029/WR004i003p00553>
- Nield D. A., Bejan A. (2013): *Convection in Porous Media*. Springer Int., p. 778, <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-5541-7>
- Pasquale V., Chiozzi P., Verdoya M. (2013): Evidence for thermal convection in the deep carbonate aquifer of the eastern sector of the Po Plain, Italy. *Tectonophysics*, 594, 1–12, <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2013.03.011>
- Person M., Raffensperger J. P., Ge S., Garven G. (1996): Basin-scale hydrogeologic modeling. *Reviews of Geophysics*, 34/1, 61–87, <https://doi.org/10.1029/95RG03286>
- Post V. E. A., Simmons C. T. (2010): Free convective controls on sequestration of salts into low-permeability strata: Insights from sand tank laboratory experiments and numerical modeling. *Hydrogeology Journal*, 18/1, 39–54, <https://doi.org/10.1007/s10040-009-0521-4>
- Rosenberg N. D., Spera F. J. (1992): Thermohaline convection in a porous medium heated from below. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 35/5, 1261–1273, [https://doi.org/10.1016/0017-9310\(92\)90183-S](https://doi.org/10.1016/0017-9310(92)90183-S)
- Rubin H. (1976): Onset of thermohaline convection in a cavernous aquifer. *Water Resources Research*, 12/2, 141–147, <https://doi.org/10.1029/wr012i002p00141>
- Rubin H., Roth C. (1983): Thermohaline convection in flowing groundwater. *Advances Water Resources*, 6/3, 146–156, [https://doi.org/10.1016/0309-1708\(83\)90027-1](https://doi.org/10.1016/0309-1708(83)90027-1)
- Sarkar A., Nunn J., Hanor S. J. (1995): Free thermohaline convection beneath allochthonous salt sheets: An agent for salt dissolution and fluid flow in Gulf Coast sediments. *Journal of Geophysical Research*, 100, 18085–18092
- Sharp J. M., Fenstermaker T. R., Simmons C. T., McKenna T. E., Dickinson J. K. (2001): Potential salinity-driven free convection in a shale-rich sedimentary basin: Example from the Gulf of Mexico Basin in South Texas. *AAPG Bulletin*, 85/12, 2089–2110, <https://doi.org/10.1306/8626D351-173B-11D7-8645000102C1865D>
- Simmons C. T., Fenstermaker T. R., Sharp J. M. (2001): Variable-density groundwater flow and solute transport in heterogeneous porous media: approaches, resolutions and future challenges. *Journal of Contaminant Hydrology*, 52/1–4, 245–275, [https://doi.org/10.1016/S0169-7722\(01\)00160-7](https://doi.org/10.1016/S0169-7722(01)00160-7)
- Soboleva E. (2017): Numerical investigations of haline-convective flows of saline groundwater. *Journal of Physics Conference Series*, 891/1, 012104, <https://doi.org/10.1088/1742-6596/891/1/012104>
- Szijártó M., Galsa A., Tóth, Á., Mádlné Szőnyi J. (2019): Numerical investigation of the combined effect of forced and free thermal convection in synthetic groundwater basins. *Journal of Hydrology*, 572, 364–379, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.03.003>
- Szijártó M., Galsa A. (2020): Interaction of temperature- and salinity-driven natural convection in homogeneous porous media. *EGU General Assembly, Sharing Geoscience Online*, EGU2020-9896
- Szijártó M., Galsa A., Tóth Á., Mádlné Szőnyi J. (2021): Numerical analysis of the potential for mixed thermal convection in the Buda Thermal Karst, Hungary. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 34, 100783, <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2021.100783>
- Tóth J. (1963): A theoretical analysis of groundwater flow in small drainage basins. *Journal of Geophysical Research*, 68/16, 4795–4812, <https://doi.org/10.1029/JZ068i016p04795>
- Turcotte D. L., Schubert G. (2014): *Geodynamics*. 3rd edition, Cambridge University Press, UK, p. 636, <https://doi.org/10.1017/CBO9780511843877>
- van Dam R. L., Simmons C. T., Dydman D. W., Wood W. W. (2009): Natural free convection in porous media: first field documentation in groundwater, *Geophysical Research Letter*, 36/11, L11403, <https://doi.org/10.1029/2008GL036906>
- Weatherill D., Simmons C. T., Voss C. I., Robinson N. I. (2004): Testing density-dependent groundwater models: two-dimensional steady-state unstable convection in infinite, finite and inclined porous layer. *Advances in Water Resources*, 27, 547–562, <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2004.01.003>
- Wen B., Chang K. W., Hesse M. A. (2018): Rayleigh–Darcy convection with hydrodynamic dispersion. *Physical Review Fluids*, 3, 12308, <https://doi.org/10.1103/PhysRevFluids.3.123801>
- Wooding R. A. (1957): Steady state free thermal convection of liquid in a saturated permeable medium. *Journal of Fluid Mechanics*, 2, 273–285, <https://doi.org/10.1017/S00222112057000129>
- Yang J. W., Feng Z. H., Luo X. R., Chen Y. R. (2009): On the role of buoyancy force in the ore genesis of SEDEX deposits: Example from Northern Australia. *Science in China Series D: Earth Science*, 52, 452, <https://doi.org/10.1007/s11430-009-0043-x>
- Yang J. W., Feng Z. H., Luo X. R., Chen Y. R. (2010): Numerically quantifying the relative importance of topography and buoyancy in driving groundwater flow. *Science China Earth Sciences*, 53/1, 67–71, <http://dx.doi.org/10.1007/s11430-009-0185-x>
- Zimmermann W. B. J. (2006): *Multiphysics Modelling with Finite Element Methods*. World Scientific Publishing Company, Singapore, p. 432, <https://doi.org/10.1142/6141>

Magyarország földradar- (GPR) alkalmazhatósági térképe, fizikai és talajtani paraméterek alapján

NÁDASI E.^{1,®}, DOBOS E.², PECSMÁNY P.², TURAI E.¹

¹Miskolci Egyetem, Geofizikai és Térinformatikai Intézet, 3515 Miskolc-Egyetemváros

²Miskolci Egyetem, Földrajz-Geoinformatika Intézet, 3515 Miskolc-Egyetemváros

®E-mail: gfne@uni-miskolc.hu

A földradar- (GPR – Ground Penetrating Radar) mérések hatékonysága erősen függ a talaj fajlagos vezetőképességétől. A nagy fajlagos vezetőképességű talajokban gyorsan csillapodik a radarhullámok energiája, ami korlátozza az elérhető behatolási mélységet, és ezáltal határt szab a GPR-mérések használhatóságának. Magyarország földradar-alkalmazhatósági térképét készítettük el, melyen öt osztály került elkülönítésre. Az I-es osztály a legalkalmasabb, míg az V-ös osztály az alkalmatlan talajokat tartalmazza. A kategóriákat az 1:100 000-es méretarányú agrotopográfiai adatbázis alapján alakítottuk ki. A fajlagos vezetőképesség mellett textúra-, kémhatás- (pH-) és talajtípus-információkat használtunk fel az alkalmazhatósági térkép elkészítéséhez. Bár Magyarországon megtalálhatók a GPR-mérések alkalmazhatósága szempontjából „jó” (I-es) természetes talajtakarók, többségében közepes (III-as) vagy annál rosszabb területek jellemzőek. Az alkalmazhatóság mértéke időben nem tekinthető állandónak, hiszen a fajlagos vezetőképesség és az ezt kialakító paraméterek dinamikusan változnak, függenek az aktuális évszaktól és az időjárástól is. Viszont a relatív alkalmazhatósági skála létrehozása külföldi példák alapján is megalapozott. A bemutatott térkép támpontot nyújthat a Magyarországon GPR-méréseket tervező szakemberek számára.

Nádasi, E., Dobos, E., Pecsmany, P., Turai, E.: Ground Penetrating Radar (GPR) soil suitability map of Hungary based on physical and pedological parameters

The efficiency of Ground Penetrating Radar (GPR) measurements strongly depends on the soil conductivity. The energy of the radar waves attenuates quickly in high conductive soils which limits the achievable penetration depth and the applicability of GPR measurements. The soil suitability map of Hungary has been created which differentiates five classes. Class I contains the most suitable, class V contains the unsuitable soils. The categories have been created based on the biggest soil database, the 1:100 000 scale agrotopographical database of Hungary. Besides conductivity, soil texture, pH and soil type information have been used to prepare the suitability map. However, the “good” (I) natural soils can be found in Hungary in terms of GPR applicability, mostly moderate (III) or worse areas are frequent. The suitability cannot be considered as constant in time, because conductivity and the connecting parameters change dynamically and depend on the current season and weather. But the relative suitability scale is well-founded based on international examples. The presented map can be a reference for professionals who design their GPR projects in Hungary.

Beérkezett: 2021. január 20.; *elfogadva:* 2021. február 24.

Bevezetés

A földradar (GPR – Ground Penetrating Radar), illetve a magyar műszaki gyakorlatban gyakran talajradarnak is nevezett eljárás egy aktív gerjesztésű elektromágneses geofizikai kutatómódszer. A sekély mélységű kutatásokban használható eredményesen, hiszen az antennából kibocsátott hullámok a vizsgált közegbe (talaj, kőzet, beton stb.)

érve viszonylag gyorsan csillapodnak. Az alkalmazott frekvenciatartomány a kutatási céltól függően tág, mintegy 10 MHz és 2 GHz között mozog. Nagy előnye a roncsolásmentesség és a gyors képalkotás. Mára az üregkutatástól (Lyu et al. 2020) a mérnöki létesítmények vizsgálatán át (Pajewski et al. 2013) a régészeti kutatásokig (Trinks et al. 2012) számos területen nyert alkalmazást. Jelen tanulmány a természetes talajtakarón elvégezni kívánt GPR-

mérések tervezéséhez nyújt támpontot a hazai szakemberek számára.

A földradar (GPR) módszer hatékonysága nagymértékben területspecifikus, és a talaj fizikai paramétereitől függ. A mérést végző szakember egyik legfontosabb kérdése a felhasználást megelőzően, hogy az adott területen mennyire alkalmazható sikerrel az eljárás. Vagyis, hogy elérhető-e a kívánt kutatási mélység és felbontóképesség. Ezek mellett persze a megfelelő kontrasztra is szükség van a kimutatni kívánt objektum és a háttér között. A behatolási mélységet és a felbontóképességet a frekvencián kívül a vezetőképesség, a relatív permittivitás és a relatív mágneses permeabilitás határozzák meg, tehát az „alkalmasságot” ez a három fizikai paraméter alakítja ki. Ezek persze gyakran tág határok között mozognak, és összetett kapcsolatban állnak a talaj ásványi összetételével, nedvességtartalmával, az agyagtartalommal, a pH-val, a hőmérséklettel stb. Tovább árnyalja a képet, hogy beszélhetünk statikus és dinamikus talajtani paramétereikről is. Utóbbiak időben változnak, tehát ilyen módon az „alkalmasság” sem állandó időben.

Az Amerikai Egyesült Államok területére létezik ún. GPR talajalkalmassági térkép (GPR Soil Suitability Map), melyet időről időre felülvizsgálják és finomítanak (Doolittle et al. 2002, 2003, 2006, 2007, 2010). Ehhez hasonló térképi állományt mutat be jelen tanulmány Magyarország területére. Az alkalmassági osztályok kialakítása a helyi talajtani adottságok figyelembevételével, valamint a rendelkezésre álló adatok és információk alapján történt.

Természetesen a bemutatott térkép akkor alkalmazható, ha a tervezett GPR-mérések célpontja az eredeti talajtakaró alatt található. Tehát amennyiben nem mesterséges fel-

töltésről, gátról, út- és vasúti töltésről vagy egyéb épített struktúráról van szó.

Fizikai alapok

A földradar módszer alapösszefüggései az elektromágneses (EM) hullámelméletben ismert Maxwell-egyenletekből vezethetők le. A radarhullámok diffúzióval terjednek a szilárd közegben, így a talajban is. Itt energiájuk és amplitúdójuk exponenciálisan csillapodik, ennek mértéke a csillapodási tényező (a) segítségével adható meg:

$$a = \left\{ \frac{\mu\epsilon}{2} \left[\left(1 + \frac{\sigma^2}{\epsilon^2 \omega^2} \right)^{1/2} - 1 \right] \right\}^{1/2}, \quad (1)$$

ahol

a – a csillapodási tényező,

ω – a körfrekvencia,

μ – a mágneses permeabilitás,

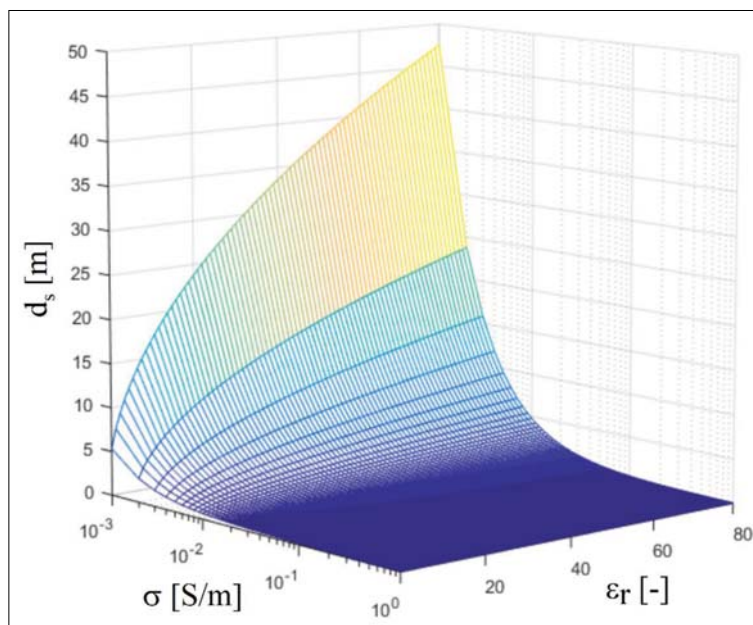
ϵ – a permittivitás (v. dielektromos állandó),

σ – a fajlagos vezetőképesség.

A hullámok behatolási mélységét jellemezhetjük a szkinmélység (d_s) segítségével, mely a csillapodási tényező reciprokával egyezik meg. Definíció szerint azt a mélységet jelenti, amelynél az EM hullám energiája a felszíni értékéhez képest e -ad részére csökken

$$d_s = 1/a. \quad (2)$$

A fajlagos vezetőképesség növekedésével a szkinmélység jelentősen csökken. A relatív dielektromos állandó nö-



1. ábra A szkinmélység (d_s) változása a fajlagos vezetőképesség (σ) és a relatív dielektromos állandó (ϵ_r) függvényében, 100 MHz antennafrekvencia mellett

Figure 1 The change of skin depth (d_s) as a function of conductivity (σ) and relative dielectric constant (ϵ_r), in case of 100 MHz antenna frequency

vekedésével, állandó fajlagos vezetőképesség mellett, nő a szkinmélység. E két paraméter behatolási mélységre gyakorolt hatását mutatja be az 1. ábra, 100 MHz frekvencia esetére. A szkinmélység EM paraméterektől való függését Nádasi és Turai (2018) mutatja be részletesen.

Egy hullám visszaverődésének mértéke, egyúttal a beérkező jel amplitúdója a reflexiók együttható (R) nagyságával arányos. A reflexiók együtthatót az impedanciakontraszt befolyásolja, amely szintén a három elektromágneses közetfizikai paramétertől, elsősorban a dielektromos állandótól függ.

$$R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} = \frac{(\omega\mu_2/k_2) - (\omega\mu_1/k_1)}{(\omega\mu_2/k_2) + (\omega\mu_1/k_1)} \quad (3)$$

$$\approx \frac{\sqrt{\varepsilon_{r1}} - \sqrt{\varepsilon_{r2}}}{\sqrt{\varepsilon_{r1}} + \sqrt{\varepsilon_{r2}}},$$

ahol

R – a reflexiók együttható,

Z_1 – az első közeg impedanciája,

Z_2 – a második közeg impedanciája,

μ_1 – az első közeg mágneses permeabilitása,

μ_2 – a második közeg mágneses permeabilitása,

k_1 – az első közeg hullámszáma,

k_2 – a második közeg hullámszáma,

ε_{r1} – az első közeg relatív dielektromos állandója,

ε_{r2} – a második közeg relatív dielektromos állandója.

A fajlagos vezetőképesség (illetve annak reciproka, a fajlagos ellenállás) kulcsszerepet játszik a földradarméréseknél. Minél nagyobb a fajlagos vezetőképesség egy adott közegben, annál gyorsabban csillapodnak és abszorbeálódnak az EM hullámok. A talajok fajlagos ellenállása tág határok között, néhány Ωm -tól több száz Ωm -ig változhat, több nagyságrendet is lefedve. A talaj ásványi összetételén túl elsősorban a porozitás, a nedvességtartalom, a sótartalom, az agyagtartalom, de a hőmérséklet és a pH is befolyásolja. A hullámok behatolási mélységére és ezáltal a GPR használhatóságára leginkább a fajlagos vezetőképesség van hatással.

A permittivitás (dielektromos állandó) szintén kritikus paraméter a földradarméréseknél, mivel nagymértékben befolyásolja a hullámok terjedési sebességét, a reflexiók együtthatókat, valamint hatással van a felbontóképességre is. Elsősorban az ásványi összetétel, a porozitás, a nedvesség és a sótartalom függvénye. Utóbbi kettőt az ásványi és szerves kolloidok mennyisége is befolyásolja. Komplex mennyiségről van szó, mely az elektromos télerősségvektor és az elektromos eltolásvektor közötti kapcsolatot írja le, és a közeg jellemzőitől függ. Valós része a relatív dielektromos állandó, mely egy anyag elektromos télerősségtárolási kapacitását adja meg a vákuumhoz viszonyítva. A képzetes rész a csillapodást és az abszorpciót fejezi ki, a veszteségekkel kapcsolatos (Martinez, Byrnes 2001). A vákuum permittivitása $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ F/m. A levegő relatív dielektromos állandója egy ($\varepsilon_{r, \text{levegő}} = 1$), a legtöbb ásványé kisebb mint húsz ($\varepsilon_{r, \text{ásvány}} < 20$), a vízé nyolcvan ($\varepsilon_{r, \text{víz}} \sim 80$).

A gyakoribb ásványok közül néhány szulfid (galenit, pirrotin), a montmorillonit és a grafit rendelkezik 80-nál nagyobb relatív dielektromos állandóval (Olhoft 1989). A talajok relatív dielektromos állandója 1 és 80 közé esik, és leginkább a nedvességtartalomtól függ. A dielektromos állandó kevésbé mozog tág határok között, mint a fajlagos ellenállás.

A mágneses permeabilitás, mely a mágneses indukció és a mágneses télerősséget összekapcsoló arányossági tényező, nem befolyásolja jelentősen a radarhullámok terjedését, amennyiben a közeg nem ferromágneses anyag. A vákuum abszolút mágneses permeabilitása $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Vs/Am. A földradarmérések során jellemző közegek relatív mágneses permeabilitása többnyire 1-hez közeli ($\mu_r = 1$), vasbeton szerkezeteknél emelkedik meg ez az érték jelentősen. Talajok esetében a permeabilitás megváltozása nem jellemző, ez alól bizonyos gyevasércek lehetnek kivételek.

A GPR gyakorlatában gyakran dielektrikumként kezelik a vizsgált közeget, és ennek alapján becsülnek bizonyos paramétereket (hullámterjedési sebesség, felbontóképesség, behatolási mélység stb.). A talajok esetében azonban nem célszerű ezt a közelítést használni, hanem a veszteséges közeg általános formuláival ajánlott végezni a becsléseket. Így elkerülhető az egyébként jelentős mértékű becslési hiba (Nádasi, Turai 2017, 2018) megjelenése.

Módszertan

Az Amerikai Egyesült Államok területére kidolgozott (NRCS – Natural Resources Conversation Service, USDA – United States Department of Agriculture) módszertan hat csoportot alakított ki a megfelelőségi index (SI – Suitability Index) alapján. A gyakorlatilag kontinens méretű ország hazánkhoz képest rendkívüli változatosságot mutat a talajok terén. Ez persze a jóval nagyobb kiterjedésnek és ezzel összefüggésben a változatos földtani, éghajlati, domborzati viszonyoknak köszönhető.

Az amerikai módszer az SI-index alapján kategorizál, melyek különböző attribútumindex-értékek (AIV – Attribute Index Value) összegzésével állnak elő. Az alacsonyabb attribútumindex-értékek kisebb mértékű jelcsillapodást és nagyobb várható behatolási mélységet jeleznek előre. Az SI számítása a textúra, agyagtartalom, agyagfelhalmozódási szint jelenléte, agyagásványok típusa, pH és a kilúgozottság, a sótartalom és a Ca-karbonát- vagy Ca-szulfát-tartalom alapján történik. Az agyagtartalomra 1-től 5-ig változnak az attribútumindex-értékek. 10% alatti agyagtartalom esetén AIV = 1, 10–18% esetén AIV = 2, 18–35% között AIV = 3, 35–60% között AIV = 4, 60% feletti AIV = 5 (Doolittle 2007). A felszíntől szikes talajoknak 6-os értéket adtak. Ez az 1–6-ig terjedő skála a többi paraméterhez rendelt pozitív vagy negatív előjelű korrekciós értékkel tovább módosul az 1. táblázat alapján. Az attribútumindexekhez hasonlóan az SI-érték is annál alacsonyabb, minél megfelelőbbek a talaj tulajdonságai a földradarmérések kivitelezéséhez.

I. táblázat | Módosító talajtényezők és a hozzájuk rendelt korrekciós érték (Doolittle et al. 2010)
Table 1 | Modifying soil factors and the assigned correction value (Doolittle et al. 2010)

Talajparaméter	Korrekciós érték
Kandic- vagy Oxicszint jelenléte (erősen mállott, kilúgozott szintek)	-1
Savanyú tőzeganyag jelenléte	1
Lúgos tőzeganyag jelenléte	2
50 cm alatt szikesedés	1
Magas mész- vagy gipsztartalom 1 méteren belül	1
Egyszerre meszes és szikes 0,5–1 méter mélységben	1

Első közelítésben Magyarország területére is egy ehhez hasonló relatív alkalmassági besorolást hoztunk létre. A földradarmérések hatékonyságát a közeg növekvő fajlagos vezetőképessége korlátozza, így egyértelműen ez a kulcsparaméter az alkalmassági osztályok kialakításánál. A fajlagos vezetőképességet növeli a növekvő agyagtartalom, nedvességtartalom és oldott ionkoncentráció is. Fontos tényező a kilúgozottság mértéke, amely meghatározza az oldott ion koncentrációját és együtt változik a kémhatással. E változók ismeretében hozhatók létre a GPR-alkalmassági osztályok.

Magyarország GPR-alkalmassági térképének megalkotásánál Doolittle et al. (2010) módszertanát alkalmaztuk, adaptálva a magyarországi viszonyokra és az adatbázisokban elérhető információra. Az alkalmasságot magyarországi viszonyok között a vízmegkötést befolyásoló agyagtartalom és agyagásvány-összetétel, a vezetőképességet erősen befolyásoló só-, mész- és gipsztartalom, illetve a kilúgozottság mértéke határozza meg. Ez utóbbi információk részben a talajtípusból, részben a talajok kémhatásából vezethetők le. A GPR-alkalmassági térképet az AGROTOPO talajtani adatbázis (Várallyay et al. 1980) felhasználásával készítettük el.

Módszertanunk a talajok fizikai féleségéből indult ki, hiszen ez a tényező alapvetően befolyásolja az alkalmazhatóságot. Doolittle (2007) módszertana alapján az agyagtartalom szerint 1-től 5-ig csoportosítottuk a textúrát. Az így kapott alapskála a relatív fajlagos ellenállás csoportosításának felel meg, ahol az 1-es osztály (homok) a legnagyobb, míg az 5-ös (agyag) a legkisebb fajlagos ellenállással rendelkezik (2. táblázat). A fizikai féleség esetében a „tőzeg és kotu”, valamint a „nem vagy részben mállott kőzetek” csoportot nem vettük figyelembe, ezeket a végleges térképen is külön kategóriában jelenítettük meg. A lápos területeken a talajok a felszínig vízzel telítettek, így alkalmatlanok GPR-vizsgálatokra. A szilárd kőzeteket fedő törmelék szintén erősen szórja a radarhullámokat, így ezek a felszínnek sem igazán alkalmasak talajradarmérésekre. A szálban álló kőzetek esetén a módszer hasznos adatokat tud szolgáltatni, ez utóbbi közeg jellemzése viszont ebben a munkában nem volt célunk.

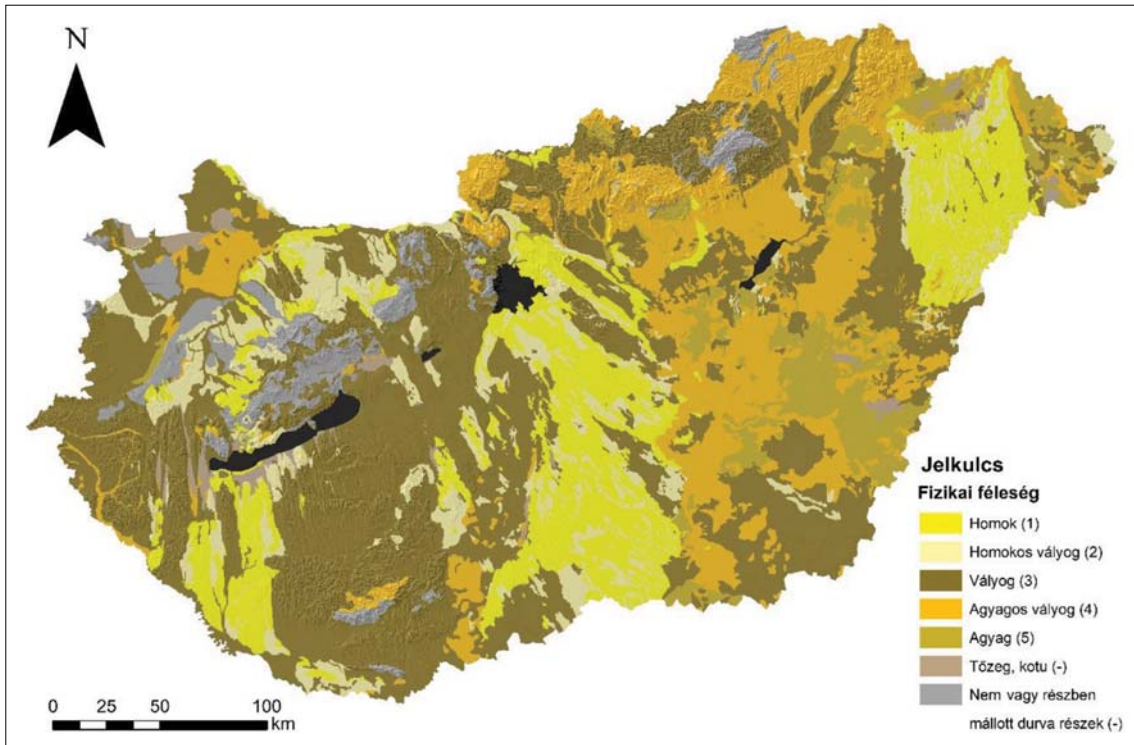
A fizikai féleséget követően a talajokat kémhatásuk és mészállapotuk alapján is osztályokba soroltuk, és alkalmazhatósági értékkel újrakódoltuk ezeket (2. táblázat). Általánosságban elmondható, hogy a savanyú kémhatású, alacsony pH-val rendelkező talajoknak az erős kilúgozás miatt kisebb a vezetőképessége (50–150 dS/m). A gyengén savanyú, illetve semleges kémhatású talajok vezetőképessége 150–200 dS/m, míg az enyhén lúgos (7–8,5 pH) talajok már meszesek, így vezetőképességük is 250–300 dS/m-re emelkedik. 8,5 pH feletti értékeket csak szikes talajok esetén kapunk, ahol a vezetőképesség természetesen emelkedik, 500–600-tól több ezer dS/m vezetőképességet is elérhet. Ezeket szem előtt tartva rendeltünk a kémhatáshoz korrekciós értéket.

Az Agrotopográfiai adatbázisból a textúra (2. ábra), a pH (3. ábra) és a talajtípusok (4. ábra) változóit emeltük ki, ezeket használtuk az alkalmassági térkép elkészítéséhez a 2. táblázatban bemutatott paraméterek alapján. Az első két változó esetén az eredeti osztályokat hagytuk meg és használtuk fel, míg a talajtípusok esetén a talajradar-alkalmazhatósági kritériumok alapján csoportosítottuk az ere-

2. táblázat | A fizikai féleség (FFI), a kémhatás és mészállapot (PHI), valamint a talajtípus- (TTI) indexek összefoglalása, melyek együttesen határozzák meg a földradar-alkalmazhatósági indexet (SI)

Table 2 | Summary of the texture (FFI), pH (PHI) and soil type (TTI) indexes which jointly determine the GPR suitability index (SI)

Fizikai féleség (FFI)		Kémhatás és mészállapot (PHI)		Talajtípus (TTI)	
Név	Index	Érték	Index	Név	Index
Homok	1	<5,5	-1	Homok szövetű fejletlen talajok	0
Homokos vályog	2	5,5–7	0	Közethatású talajok	0
Vályog	3	7–8,5	1	Felszínhez közel agyagfelhalmozódás	1
Agyagos vályog	4	8,5<	2	Erős agyagfelhalmozódás és pangóvíz	2
Agyag	5			Csernozjom talajok	0
				Réti csernozjomok	1
				Szikes talajok	2
				Réti és láptalajok	3



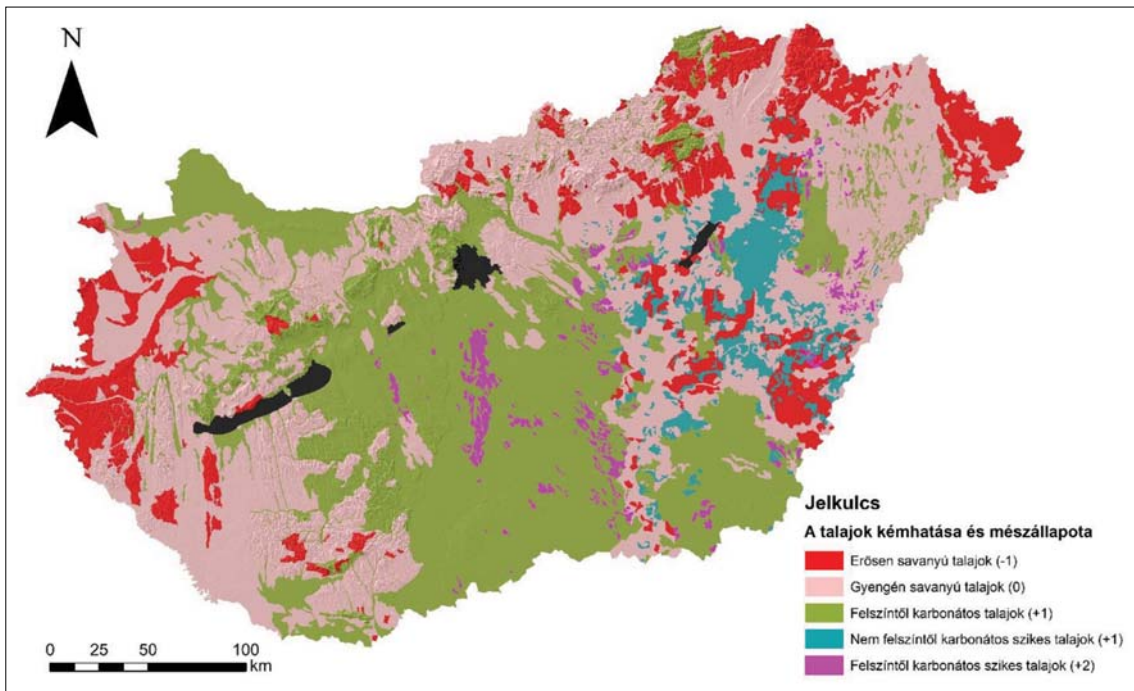
2. ábra | Magyarország talajai fizikai féleség alapján (az 1:100 000-es Agrotopográfiai adatbázis alapján szerkesztve)

Figure 2 | The soils of Hungary based on texture (edited based on the 1:100 000 agrotopographical database)

deti típusokat típuscsoportokba. Itt elsősorban a vízhatás meglétét, illetve mélységét, az agyagfelhalmozódási szintek meglétét és kifejezettségét, a szikesedést, a homokos

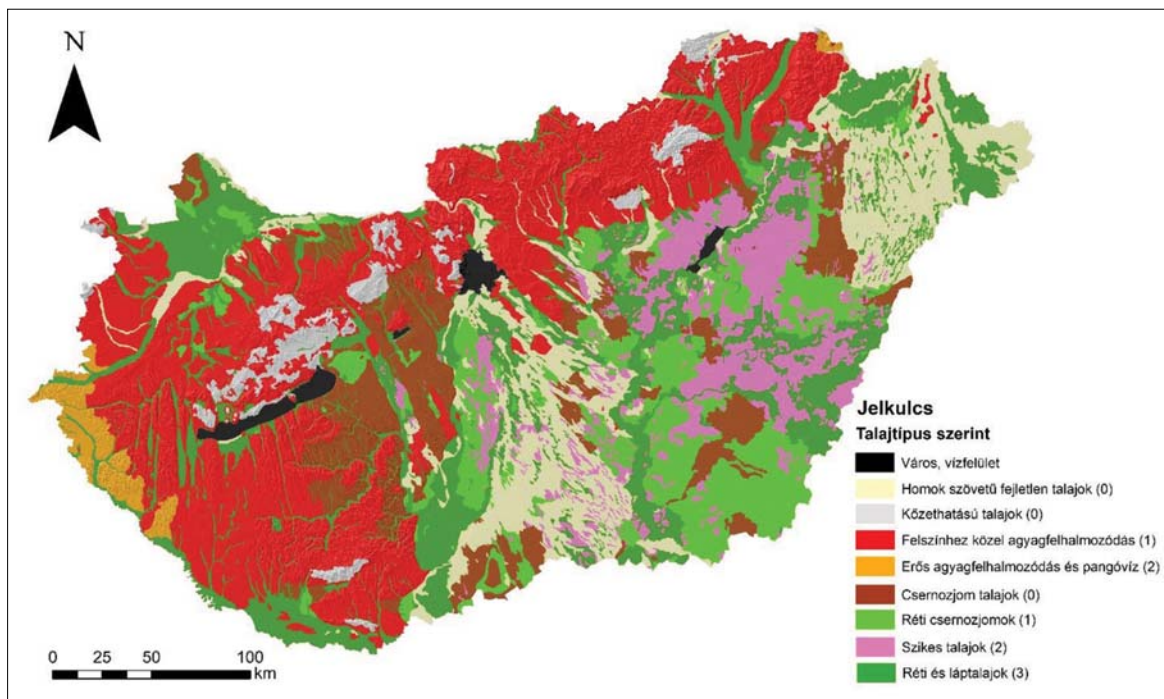
szövetet és a felszínhez közeli szilárd kőzettel rendelkező talajokat vettük egy csoportba.

A méretarányból fakadóan a térképek csoportjai, feltjai a valóságban nem teljesen homogének, változatosságot



3. ábra | Magyarország talajainak kémhatása és mészállapota (az 1:100 000-es Agrotopográfiai adatbázis alapján szerkesztve)

Figure 3 | The soils of Hungary based on pH and calcium-carbonate content of the soils of Hungary (edited based on the 1:100 000 agrotopographical database) texture (edited based on the 1:100 000 agrotopographical database)



4. ábra Magyarország egyszerűsített talajtérképe (az 1:100 000-es Agrotopográfiai adatbázis alapján szerkesztve)
 Figure 4 Simplified soil map of Hungary (edited based on the 1:100 000 agrotopographical database)

mutatnak, viszont a csoport neve jól jellemzi az átlagos, illetve az adott területen legnagyobb valószínűséggel megjelenő talajtípust. A földradar-alkalmasság megjelenítéséhez nem tartottuk szükségesnek az ennél részletesebb, finomabb beosztású térképi állományból való kiindulást. A 4. ábrán bemutatott talajtípusok közül a homok szövetű fejletlen talajok és a közethatású talajok rendelkeznek a legnagyobb várható fajlagos ellenállással. Ezek, valamint a csernozjom talajok is 0 indexet kaptak, tehát nem befolyásolják tovább az első két szempont alapján létrejött alkalmassági osztálybesorolást. 1-es talajtípusindex került a felszínközeli agyagfelhalmozódáshoz és a réti csernozjomokhoz, melyeknél növekszik a fajlagos vezetőképesség, ezáltal rontják a GPR-alkalmazhatóságot. Az erős agyagfelhalmozódást mutató és pangóvízes talajok, valamint a szikes talajok 2-es talajtípusindexet kaptak, mivel jelentősen csökkentik az alkalmazhatóságot. 3-as index került a réti és láptalajokhoz, mivel itt a magas talajvízszint nagyon megnehezíti, nagy valószínűséggel alkalmatlanná teszi a GPR-mérések elvégzését.

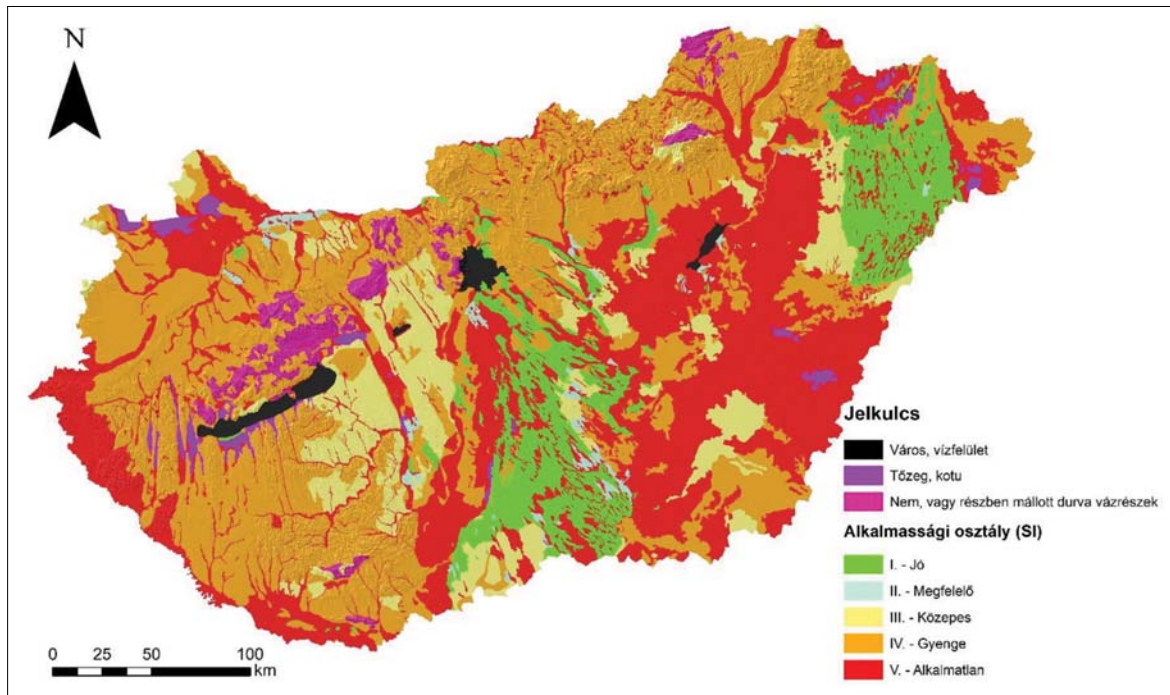
A GPR talajalkalmassági térkép

A földradar-talajalkalmassági osztályokat a fizikai féleség index (FFI), a kémhatás és mészállapot index (PHI) és a talajtípusindex (TTI) összegzésével kaptuk meg. Az így kialakult skála elméletileg 0-tól 10-ig terjedő lehet. A 0 vagy 1 skála értékeket az I-es osztályba, az 5, vagy a feletti összegeket az V-ös osztályba soroltuk a 3. táblázat szerint.

3. táblázat Az alkalmassági index (SI) és az alapindexek (FFI, PHI, TTI) kapcsolata
 Table 3 The connection between the suitability index (SI) and the basic indexes (FFI, PHI, TTI)

FFI+PHI+TTI	Alkalmassági index (SI)
0	I – Jó
1	
2	II – Megfelelő
3	III – Közepes
4	IV – Gyenge
5	V – Alkalmatlan
6	
7	
8	
9	
10	

Közép-Európa, így hazánk is változatos tájegységekkel, ezzel együtt különféle talajtípusokkal rendelkezik. A talajképző kőzet az ország legnagyobb részén folyóvízi üledék, lösz, áthalmazott lösz. Az alkalmassági térképen (5. ábra) látható, hogy hazánkban többségben vannak a földradarmérésekre közepesen vagy kevésbé alkalmas területek. Jó területeknek számítanak azonban a Duna-Tisza köze, illetve a Nyírség homok szövetű taljai. Az Alföld közel felét finom szövetű, agyagos vályog, agyag textúrájú alluviális üledékek fedik, melyek az esetek jelentős részében mélyfekvésűek, magas kapilláris vízemeléssel jellemez-



5. ábra Magyarország földradar- (GPR) talajalkalmassági térképe. Öt alkalmassági osztályt (I–V) különítünk el az alábbiak szerint: I – Jó; II – Megfelelő; III – Közepes; IV – Gyenge; V – Alkalmatlan. A városok területei, a vízfelületek és a műtárgyak nem kerültek besorolásra egyik osztályba sem

Figure 5 Ground penetrating radar soil suitability map of Hungary. Five suitability classes are distinguished: I – Good; II – Appropriate; III – Moderate; IV – Weak; V – Unsuitable. The areas of cities, lakes are not classified

hetők, így nemcsak a magasabb agyagtartalom, de a felszínhez közeli víz is jelentősen csökkenti a talajradar-alkalmazhatóságot. A hátságok löszfelszínei, illetve a rajtuk képződött csernozjom talajok közepesnek értékelhetőek. A nyugati országrészre hullott löszök sokkal intenzívebb málláson mentek keresztül, ezeken agyagbemosódásos barna erdőtalajok képződtek. Az agyagfelhalmozódási szint átlagosan 20–30 cm-től 1 méteres mélységig terjed. Ez a vastag agyagos szint – ami általában nedvesebb a magasabb csapadék miatt – erősen korlátozza a radarhullámok behatolását. A vulkáni (pl. Börzsöny, Mátra) és karsztos mészkőhegységi területek (pl. Bükk, Budai-hegység, Mecsek) is kutatásra alkalmasak lehetnek, amennyiben a kőzet a felszínhez közel van, és nem alakultak ki agyagos szintek a felszínen. Ebből a szempontból a savanyú kőzetek kedvezőbbek, mert a bázikus szilikátos kőzetek mállása sok agyagot eredményez. A savanyú kőzetek fajlagos ellenállás szempontjából kiválóak is lehetnek, viszont figyelembe kell vennünk ezek heterogenitását, töredezettségét, különböző mállottsági fokát.

Összefoglalás

A földradar (GPR) módszer fizikai törvényszerűségeinek ismeretében – az agrotópográfiai talajtani adatbázist felhasználva – megpróbáltunk a valóságot minél jobban leíró GPR-alkalmazhatósági térképet összeállítani Magyarország területére. Az osztályozás módszertanát az Amerikai Egyesült Államok területére készített alkalmassági térkép-

hez kidolgozott rendszer adaptációjával készítettük el a hazai talajtani adottságok és a talajtani adatbázisokból elérhető változók figyelembevételével. Öt alkalmassági osztályt hoztunk létre I-től („Jó”) V-ig („Alkalmatlan”), bizonyos területeket (városok, vízfelületek, tőzeg, kotu és szilárd vagy mállott kőzet fizikai féleséggel rendelkező talajok) nem soroltunk be. Az alkalmassági osztályok meghatározásánál a radarhullámok terjedését gátló tényezőket vettük alapul, elsősorban a víz felszínközeli jelenlétét, az agyagtartalmat, illetve az oldott ionok potenciális mennyiségét a szikesedés és a kémhatás mint jelző faktorok alkalmazásával.

A Magyarországra létrehozott talajalkalmassági térkép (5. ábra) áttekintést kíván nyújtani a földradar (GPR) módszer alkalmazhatóságáról. A kialakított alkalmassági osztályok természetesen tájékoztató jellegűek. Elsődleges célunk a nemzetközileg alkalmazott minősítési rendszer meghonosítása és a módszerfejlesztés elindítása. A módszer, illetve a súlyozó faktorok a későbbiekben tovább finomíthatók, terepi mérésekkel ellenőrizhetők, pontosíthatók.

Az alkalmassági térkép a földradarméréseket végző szakemberek számára nyújthat támpontot az egyes projektek megtervezése során.

Köszönetnyilvánítás

A cikkben/előadásban/tanulmányban ismertetett kutatómunka az EFOP-3.6.1-16-2016-00011 jelű „Fiatalodó és Megújuló Egyetem – Innovatív Tudásváros – a Miskolci Egyetem intelligens sza-

kosodást szolgáló intézményi fejlesztése” projekt részeként – a Széchenyi 2020 keretében – az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósult meg.

A tanulmány szerzői

Nádasi Endre, Dobos Endre, Pecsmány Péter, Turai Endre

Hivatkozások

- Doolittle J. A., Minzenmayer F. E., Waltman S. W., Benham E. C. (2002): Ground-penetrating radar soil suitability map of the conterminous United States. In: 9th International Conference on Ground-Penetrating Radar, Koppenjan S. K., Hua L. (eds.), Proceedings of SPIE 4158, pp. 7–12.
- Doolittle J. A., Minzenmayer F. E., Waltman S. W., Benham E. C. (2003): Ground-penetrating radar soil suitability maps. *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, 8/2, 49–56
- Doolittle J. A., Minzenmayer F. E., Waltman S. W., Benham E. C., Tuttle J. W., Peaslee S. (2006): State ground-penetrating radar soil suitability maps. In: Proceedings of the 11th International Conference on Ground Penetrating Radar, Daniels J. J., Chen C.-C. (eds.), Columbus, Ohio, Paper HYD; 13_mdx, pp. 1–8.
- Doolittle J. A., Minzenmayer F. E., Waltman S. W., Benham E. C., Tuttle J. W., Peaslee S. (2007): Ground-penetrating radar soil suitability map of the conterminous United States. *Geoderma*, 141/3–4, 416–421
- Doolittle J. A., Dobos R., Waltman S. (2010): Revised ground-penetrating radar soil suitability maps. *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, 15/3, 111–118
- Lyu Y., Wang H., Gong J. (2020): GPR detection of tunnel lining cavities and reverse-time migration imaging. *Applied Geophysics*, 17/1, 1–7
- Martinez A., Byrnes A. P. (2001): Modeling dielectric-constant values of geologic materials: An aid to ground-penetrating radar data collection and interpretation. *Current Research in Earth Sciences*, Bulletin 247, Part 1
- Nádasi E., Turai E. (2017): Elektromágneses közefizikai paraméterek vizsgálata georadarmérések esetében. *Magyar Geofizika*, 58 (4), pp. 253–258.
- Nádasi E., Turai E. (2018): Increasing the accuracy of GPR measurements. *Geoscience and Engineering*. A Publication of the University of Miskolc, 6/9, 142–150
- Olhoeft G. R. (1989): Electrical properties of rocks. In: *Physical Properties of Rocks and Minerals*, Y. S. Touloukian, W. R. Judd, and R. F. Roy (eds.): New York, New York, Hemisphere Publishing Corporation, pp. 257–329
- Pajewski L., Dérobert X., Benedetto A., Giannopoulos A. (2013): Applications of ground penetrating radar in civil engineering – COST action TU1208. In: 7th International Workshop on Advanced Ground Penetrating Radar (IWAGPR 2013)
- Trinks I., Kucera M., Hinterleitner A., Löcker K., Nau E., Neubauer W., Zitz T. (2012): Large-scale, high-definition ground penetrating radar prospection in archaeology. *Geophysical Research Abstracts*, 14, 13447, EGU General Assembly, April 2012.
- Várallyay Gy., Szűcs L., Murányi A., Rajkai K., Zilahy P. (1980): Magyarország termőhelyi adottságait meghatározó talajtani tényezők 1:100 000 méretarányú térképe II. *Agrokémia és Talajtan* 29, 35–76

Kicsiny kvadrupólus mágnes paramétereinek meghatározása spinner-magnetométeres mérési adatokból

Rövid közlemény

MÁRTON P.

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

Ez a tanulmány megmutatja, hogy a vonatkozó mérési adatokból nemcsak a geomágneses kvadrupólusnak, hanem egy kis laboratóriumi kvadrupólus mágnesnek a paramétereit is meg lehet határozni közvetlenül, egy egzakt analitikai eljárás alkalmazásával.

Márton, P.: Direct analytical solution for the parameters of a small-sized magnetic quadrupole measured on a suitable spinner magnetometer

The paper shows that not only the parameters of the geomagnetic quadrupole but those of a small quadrupole magnet measured on a suitable spinner magnetometer in the laboratory can be determined directly using an exact analytical method besides numerical approximation by fixpoint iteration.

Beérkezett: 2021. február 16.; elfogadva: 2021. február 26.

Bevezetés

Pontszerű kvadrupólus mágneset forgatunk egyenletes ω szögsebességgel sorbakapcsolt tekercspár (Helmholtz-tekercs) belsejében, és regisztráljuk a tekercspár sarkain mérhető indukált elektromos feszültséget. Nulla mágneses térben végezve a kísérletet, zajmentes esetben a kimenő feszültség nulla lesz. Szembekapcsolt tekercspár mellett (anti-Helmholtz-tekercs) a kísérlet folytonos, 2ω frekvenciájú V váltófeszültséget eredményez, amelynek A amplitúdója és LA fázisa a kvadrupólus m_2 momentumának és két tengelyirányát jellemző (ϑ_1, λ_1) , (ϑ_2, λ_2) szögeknek függvénye:

$$V = A \sin(2\omega t + LA). \quad (1)$$

A vonatkozó alábbi összefüggések levezetése megtalálható Márton (2018) cikkének Appendix A1 című részében. Az eredményül kapott (A19)–(A21) egyenletek (op. cit.), arra az esetre vonatkoznak, amikor a mérést a magneto-

metriában szokásos módon, a mágnes három ortogonális helyzetében végezzük, azaz rendre a z , x és y tengelye körül forgatjuk. Ezáltal elegendő számú adatot kapunk a mérendő mágnes paramétereinek meghatározásához.

$$A_1 = Km_2 \sin \vartheta_1 \sin \vartheta_1, \quad (2.1)$$

$$\operatorname{tg} LA_1 = \operatorname{tg}(\lambda_1 + \lambda_2), \quad (2.2)$$

$$A_2 = Km_2 [(1 - \sin^2 \vartheta_1 \cos^2 \lambda_1)(1 - \sin^2 \vartheta_2 \cos^2 \lambda_2)]^{1/2}, \quad (2.3)$$

$$\operatorname{tg} LA_2 = \left[\frac{\cos \vartheta_1 \sin \vartheta_2 \sin \lambda_2 + \sin \vartheta_1 \cos \vartheta_2 \sin \lambda_1}{\sin \vartheta_1 \sin \lambda_1 \sin \vartheta_2 \sin \lambda_2 - \cos \vartheta_1 \cos \vartheta_2} \right], \quad (2.4)$$

$$A_3 = Km_2 [(1 - \sin^2 \vartheta_1 \sin^2 \lambda_1)(1 - \sin^2 \vartheta_2 \sin^2 \lambda_2)]^{1/2}, \quad (2.5)$$

$$\operatorname{tg} LA_3 = \left[\frac{\sin \vartheta_1 \cos \vartheta_2 \cos \lambda_2 + \cos \vartheta_1 \sin \vartheta_2 \cos \lambda_1}{\cos \vartheta_1 \cos \vartheta_2 - \sin \vartheta_1 \cos \lambda_1 \sin \vartheta_2 \cos \lambda_2} \right]. \quad (2.6)$$

Az egyenletek bal oldalán az A amplitúdók (voltban, V) és LA fázisok ($^\circ$ -ban) indexei az 1–3. mérési helyzetre utalnak. K a felvevő tekerecs állandója, dimenziója volt/Am^3 . A jobb oldalon a változók indexei a kvadrupólus 1. és 2. tengelyére vonatkoznak (ϑ a tengelyirány pólustávolság, λ a hosszúság koordinátája). A tengelyek sorrendje láthatóan közömbös.

Bizonyítást nyert (op. cit.), hogy a fenti egyenletek számítógép segítségével numerikusan tetszőleges pontossággal megoldhatók. A jelen munkában a (2.1)–(2.6) egyenletek közvetlen analitikai megoldásával foglalkozunk. Ez utóbbi előnye a numerikus megoldással szemben, hogy matematikailag pontos, és a kiinduláshoz nem kell ismerni (vagy keresni) egy közelítő megoldást.

Az analitikus megoldás lehetőségének felvetése

Mágneses multipólusok paramétereinek meghatározása a földmágnességben először a geomágneses potenciál Gauss-koefficienseinek geometriai értelmezése céljából merült föl. A földmágneses multipólusok paraméterei a James-algoritmus (1968) segítségével felállított (felállítható) egyenletek egy szintén általa kidolgozott numerikus módszerrel történő megoldásával számíthatók ki (James, ib.). A probléma közvetlen analitikai megoldására először Umow (1904) tett kísérletet. Umow az első három földmágneses multipólus paramétereinek meghatározásával foglalkozott, amelyek közül a dipólus esete triviális. Kifogástalan analitikai megoldás azonban mindössze a földmágneses kvadrupólusra ismeretes (Willis 1982).

A másodrendű Gauss-koefficiensek ($g_2^0, g_2^1, h_2^1, g_2^2, h_2^2$) és a földmágneses kvadrupólus paraméterei (M_2 : erősség és a tengelyek (ϑ_1, λ_1), (ϑ_2, λ_2) koordinátájú dőféspontjai a földgömb felszínén) között fennálló

$$g_2^0 = 2M_2[\cos\vartheta_1\cos\vartheta_2 - 0,5\sin\vartheta_1\sin\vartheta_2\cos(\lambda_1 - \lambda_2)], \quad (3.1)$$

$$g_2^1 = \sqrt{3}M_2(\cos\vartheta_1\sin\vartheta_2\cos\lambda_2 + \sin\vartheta_1\cos\vartheta_2\cos\lambda_1), \quad (3.2)$$

$$h_2^1 = \sqrt{3}M_2(\cos\vartheta_1\sin\vartheta_2\cos\lambda_2 + \sin\vartheta_1\cos\vartheta_2\sin\lambda_1), \quad (3.3)$$

$$g_2^2 = \sqrt{3}M_2\sin\vartheta_1\sin\vartheta_2\cos(\lambda_1 + \lambda_2), \quad (3.4)$$

$$h_2^2 = \sqrt{3}M_2\sin\vartheta_1\sin\vartheta_2\sin(\lambda_1 + \lambda_2) \quad (3.5)$$

egyenletekből kiindulva, $g_2^2 \neq 0$ és $h_2^2 \neq 0$ esetén definiálhatjuk M_2^* -ot és $LA_1 = \lambda_1 + \lambda_2$ -t:

$$M_2^* = \{[(g_2^2)^2 + (h_2^2)^2]/3\}^{1/2}, \quad \text{tg } LA_1 = h_2^2/g_2^2. \quad (3.6)$$

Láthatóan

$$M_2^* = M_2\sin\vartheta_1\sin\vartheta_2, \quad (3.7)$$

ahol $M_2 = (\mu_0/4\pi)/(m_2/a^4)$ a földmágneses kvadrupólus erőssége. Ebben a képletben μ_0 a vákuum permeabilitása, m_2 a földmágneses kvadrupólus momentuma és a a földgömb sugara.

Bevezetve még az

$$x = \text{ctg } \vartheta_1 \quad \text{és} \quad y = \text{ctg } \vartheta_2 \quad (4)$$

változókat is, a (3.1)–(3.5) egyenletek a következő háromra redukálhatók:

$$g_2^0 = 2M_2^*[xy - 0,5\cos(\lambda_1 - \lambda_2)], \quad (5.1)$$

$$g_2^1 = \sqrt{3}M_2^*(x\cos\lambda_2 + y\cos\lambda_1), \quad (5.2)$$

$$h_2^1 = \sqrt{3}M_2^*(x\sin\lambda_2 + y\sin\lambda_1), \quad (5.3)$$

Umow (1904), Willis (1982), Márton (2020).

Az (5.1)–(5.3) egyenletek célszerű kombinációjával előállított három egyenletről az x és az y változók kiküszöbölése után a $\Delta = \lambda_1 - \lambda_2$ változó koszinuszára harmadfokú egyenlet állítható fel, amelynek az

$$|(\cos\Delta)_0| \leq 1 \quad (6)$$

feltételt kielégítő egyetlen valós gyöke szolgáltatja az alapmegoldást (Willis 1982).

Noha a fenti formalizmus planetáris méretű kvadrupólus mágnesre vonatkozik, a (2.1)–(2.6) egyenleteknek az (5.1)–(5.3) alakra hozásával és megoldásával kicsiny kvadrupólus mágnes laboratóriumi mérési eredményeinek kiértékelésére is alkalmazható lehet.

A (2.1)–(2.6) egyenletek átalakítása és közvetlen analitikai megoldása

Feltéve, hogy $A_1 \neq 0$, kiszámítjuk az

$$\begin{aligned} S_2 &= (A_2/A_1)\sin LA_2, & S_3 &= (A_3/A_1)\sin LA_3, \\ C_2 &= (A_2/A_1)\cos LA_2, & C_3 &= (A_3/A_1)\cos LA_3, \end{aligned} \quad (7)$$

$$m_2^* = A_1/K$$

értékeket. Megmutatható, hogy

$$(C_3 - C_2) = 2[xy - 0,5\cos(\lambda_1 - \lambda_2)], \quad (8.1)$$

$$S_3 = y\cos\lambda_1 + x\cos\lambda_2, \quad (8.2)$$

$$S_2 = x\sin\lambda_2 + y\sin\lambda_1, \quad (8.3)$$

azaz a (8.1)–(8.3) egyenletek

$$(C_3 - C_2)m_2^* = g_2^0, \quad \sqrt{3}S_3m_2^* = g_2^1, \quad (9)$$

$$\sqrt{3}S_2m_2^* = h_2^1, \quad \text{és} \quad M_2^* = m_2^*$$

esetén azonossá válnak az (5.1)–(5.3) egyenletekkel. Willis (1982) követve, az x és az y változók kiküszöbölése nyomán $\cos\Delta$ -ra a következő harmadfokú egyenlet írható fel:

$$\begin{aligned} F(\cos\Delta) &= \cos^3\Delta + (C_3 - C_2)\cos^2\Delta \\ &- (1 + S_3^2 + S_2^2)\cos\Delta + S_3^2 + S_2^2 - C_3 + C_2 \\ &- 2[S_3\sin(LA_1/2) - S_2\cos(LA_1/2)]^2 = 0. \end{aligned} \quad (10)$$

A (10) egyenletnek egyetlen olyan megoldása van, amely a (6) feltételt kielégíti. Legyen ez $(\cos\Delta)_0$. Ekkor

$$\pm\Delta = \arccos(\cos\Delta)_0, \quad (11.1)$$

ahol $\Delta = \lambda_1 - \lambda_2$. Összevetve ezt $LA_1 = \lambda_1 + \lambda_2$ -vel, pozitív előjel mellett

$$\lambda_1 = (LA_1 + \Delta)/2, \quad \lambda_2 = (LA_1 - \Delta)/2, \quad (11.2)$$

negatív előjel mellett

$$\lambda_1 = (LA_1 - \Delta)/2, \quad \lambda_2 = (LA_1 + \Delta)/2. \quad (11.3)$$

A sorrend láthatóan közömbös. $x = \text{ctg } \vartheta_1$ és $y = \text{ctg } \vartheta_2$ értékeit az

$$x + y = \{[S_3 \sin(LA_1/2) - S_2 \cos(LA_1/2)]^2(1 - \cos\Delta)^{-1} + (S_3 - S_2) + \cos\Delta\}^{1/2}, \quad (12)$$

$$x - y = [S_3 \sin(LA_1/2) - S_2 \cos(LA_1/2)] / \sin(\Delta/2) \quad (13)$$

egyenletek jobb oldalai összegének, illetve különbségének fele szolgáltatja. Ha $x + y = \pm a$ és $x - y = b$, akkor

$$\text{ctg } \vartheta_1 = (a + b)/2 \quad \text{és} \quad \text{ctg } \vartheta_2 = (a - b)/2, \quad (14.1)$$

illetve

$$\text{ctg } \vartheta_1 = -(a - b)/2 \quad \text{és} \quad \text{ctg } \vartheta_2 = -(a + b)/2, \quad (14.2)$$

a helyes $(\vartheta_1, \vartheta_2)$ értékpár pedig az lesz, amelyik a (11.2) vagy (11.3) szerinti λ -kkal együtt kielégíti a (8.2) és (8.3) egyenleteket.

Az m_2 paraméter kiszámítása a (2.1) egyenlet alapján történik, ui. $m_2^* = m_2 \sin\vartheta_1 \sin\vartheta_2$, ahol (7) utolsó egyenlete szerint $m_2^* = A_1/K$.

A fentebb kifejtett Willis-féle algoritmus a legtöbb reális esetben alkalmazható a magnetométeres mérések egzakt analitikai kiértékelésére. A megmaradó egyetlen, $A_1 = 0$ esetben vagy az egyik, vagy mindkét tengelyirány pólustávolságának szinuszja egyenlő zérussal.

Például a $\sin\vartheta_1 = 0$ helyettesítéssel előálló (2.1)–(2.6) egyenletek kombinálásával a másik pólus paraméterei a

$$\cos\vartheta_2 = \left[\frac{A_3^2 - A_2^2}{A_3^2 \text{tg}^2 LA_3 - A_2^2 \text{tg}^2 LA_2} \right]^{1/2} \quad (15.1)$$

és a

$$\text{tg } \lambda_2 = -(\text{tg } LA_2 / \text{tg } LA_3) \quad (15.2)$$

egyenletekből, a momentum pedig az

$$m_2 = [(A_2^2 + A_3^2) / (1 + \cos^2\vartheta_2)]^{1/2} \quad (16)$$

egyenletből számítható ki.

Ha mindkét pólustávolság szinuszja egyenlő zérussal, akkor az axiális (z tengellyel parallel és antiparallel tengelyekkel rendelkező) kvadrupólus mágnes triviális esetével állunk szemben, amelynek momentuma az utolsó egyenletből $\vartheta_2 = 0$ helyettesítéssel kapható meg.

Számítási példa

Egy ismert paraméterekkel rendelkező kvadrupólus mágnes magnetométeres mérése a következő eredményeket adja:

$$A_1 = 13,743488 \mu\text{V}, \quad LA_1 = 105,00000^\circ,$$

$$A_2 = 17,519437 \mu\text{V}, \quad LA_2 = 88,418058^\circ,$$

$$A_3 = 12,855950 \mu\text{V}, \quad LA_3 = 76,159998^\circ.$$

A mérőtekerics állandója $K = 998,099 \text{ V/Am}^3$.

Ezekből az adatokból a (7) képletek alapján

$$S_2 = 1,274259, \quad S_3 = 0,908264,$$

$$C_2 = 0,0351913, \quad C_3 = 0,223763$$

$$\text{és } m_2^* = 0,0137697.$$

értékek számíthatók ki. A (10) egyenlet a fenti adatokkal számszerűsített együtthatókkal így fest:

$$F(\cos\Delta) = \cos^3\Delta + 0,188572 \cos^2\Delta - 3,448679 \cos\Delta + 2,254026 = 0,$$

amelynek a (6) feltételt kielégítő megoldása:

$$\cos\Delta = 0,965989, \text{ tehát } \Delta = \pm 14,986^\circ.$$

A (11.2) egyenletből

$$\lambda_1 = 59,993^\circ \quad \text{és} \quad \lambda_2 = 45,007^\circ.$$

A (11.3) egyenletből ugyanezek az értékek állnak elő λ_2 -re és λ_1 -re.

A további számítás a (12) és (13) egyenletek alapján történik.

$$(x + y) = \pm 1,577304 \quad \text{és} \quad (x - y) = 0,422891,$$

ahonnan az első képlet jobb oldalán pozitív előjel mellett

$$x = 1,000098 \quad \text{és} \quad y = 0,577207,$$

negatív előjel mellett

$$x = -0,577207 \quad \text{és} \quad y = -1,000098$$

értékeket kapjuk az $x = \text{ctg } \vartheta_1$ és $y = \text{ctg } \vartheta_2$ változókra.

Az első esetben x -hez válasszuk a fenti λ_1 -et, y -hoz pedig a fenti λ_2 -t. Ezeket a (8.2) és (8.3) képletekbe helyettesítve, $S_3 = 0,9957$ és $S_2 = 1,207$ adódik, míg ha x -hez a λ_2 -t, y -hoz a λ_1 -et választjuk, akkor $S_3 = 0,90825$ és $S_2 = 1,27424$ az eredmény. Minthogy S_3 és S_2 utóbbi értékei egyeznek meg ezeknek a (7) képletek szerint kiszámított értékeivel, a mért kvadrupólus szögparaméterei:

$$\vartheta_1 = \arctg(1/1,000098) = 45,00^\circ \quad \text{és} \quad \lambda_1 = 45,00^\circ,$$

$$\vartheta_2 = \arctg(1/0,577207) = 60,00^\circ \quad \text{és} \quad \lambda_2 = 60,00^\circ.$$

A második esetben ugyanígy eljárva a (8.2) és (8.3) feltételeket a fenti kvadrupólus tengelyirányainak megfordításával létrejövő kvadrupólus paramétereit kapjuk meg:

$$\vartheta_1 = \arctg(1/(-1,000098)) = 135,00^\circ \quad \text{és} \quad \lambda_1 = 225,00^\circ ;$$

$$\vartheta_2 = \arctg(1/(-0,577207)) = 120,00^\circ \quad \text{és} \quad \lambda_2 = 240,00^\circ .$$

A két kvadrupólus mágnes tere azonos, a második eset tárgyalása szükségtelen.

A kvadrupólus m_2 momentumára ϑ_1 és ϑ_2 ismeretében a (7) képletsor utolsó összefüggésének felhasználásával kapjuk:

$$m_2 = \frac{m_2^*}{\sin \vartheta_1 \sin \vartheta_2} = \frac{0,0137697}{0,612372} = 2,2486\text{E-}02 \mu\text{Am}^3 .$$

A fenti eredmények a számítások pontosságán belül visszaadják a kvadrupólus eredetileg ismert paramétereit, hasonlóan a Márton (2018) által javasolt iteratív módszerrel elvégzett számítás eredményeivel.

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. (2018): Simple method of the complete result measurement of an inhomogeneously magnetised palaeomagnetic sample on a spinner magnetometer with a coil sensor. Measurement., 127, 501-511
- Márton P. (2020): Az első öt földmágneses multipólus IGRF-13 koefficiensek értékeiből számolt paramétereinek táblázatai (1900-2020). Magyar Geofizika, 61/2, 1-15
- Umow N. (1904): Die Construction des geomagnetischen Bildes des Gauss'schen Potentials, als Methode zur Erforschung der Gesetze des Erdmagnetismus. Terr. Magn. Atmos. Elect., 9, 1005-1012
- Willis D. M. (1982): A direct analytical method of calculating the quadrupole parameters of a planetary magnetic field. Geophys. J. R. Astr. Soc., 68, 751-764

Egy kutatási jelentés margójára

Bodoky T. J.

E-mail: bodokytamasjanos@gmail.com

Bevezetés

Magyarország kormánya úgy határozott, hogy a kifutóban lévő Paksi Atomerőmű pótlására újabb atomerőművet építtet a meglévő közvetlen szomszédságában (tőle É-ra) Paks-II néven. Az építkezésekkel kapcsolatos teendőket, így a kiválasztott helyszín földrengésbiztonságának vizsgálatát is, a Paksi Atomerőművet is üzemeltető Magyar Villamosági Művekre (MVM) bízta. Ennek a vizsgálatnak a telephely körül mintegy 50 km sugarú körre kellett kiterjednie. Az MVM a vizsgálatokat elvégeztette, és a szakértői vizsgálatok eredményeiből összeállított egy úgynevezett *Telephely Biztonsági Jelentést (TBJ)*, amelynek alapján kérte az illetékes hatóságokat a telephelyre vonatkozó engedély kiadására. Az MVM által összefoglalt vizsgálati eredmények alapján a hatóságok a telephely engedélyét 2017. március 30-i dátummal kiadták [1].

Az MVM a teljes vizsgálati és engedélyezési anyagot nyilvánossá tette [2–12]. A hazai geofizikus közösség számára ezekből az anyagokból elsősorban a földtani és a geofizikai zárójelentések lehetnek érdekesek [3, 10].

Közvetlenül a rendszerváltást követően, a Paksi Atomerőmű földrengésbiztonságának vizsgálata során ismertté vált, hogy az ország egyik legnagyobb, valószínűleg a teljes földkérget átszelő törésvonala, a Kapos-vonal szerkezeti kapcsolatban van a Paksi Atomerőmű telephelye alatt húzódó, vele egyenrangú, neotektonikus Dunaszentgyörgy-Harta (DH) vetőzónával [10]. Azt, hogy a DH vetőzóna aktív szerkezet, már 1997-ben, az első paksi földrengésbiztonsági kutatások során megállapították [14]. A vetőzóna alapvetően balos oldalelmozdulás, amelyhez helyenként transzzenziós és transzpressziós elemek kapcsolódnak.¹⁾ Az MVM Telephely Biztonsági Jelentése ismét megállapítja, hogy a DH vetőzónát aktív szerkezetnek kell tekinteni [13].²⁾

A kérdés tehát ebben az esetben az, hogy milyen feltételek mellett lehet egy aktív vetőzónára nukleáris létesítményt telepíteni. Erre a Nemzetközi Atomenergia Ügynökség (IAEA – International Atomic Energy Agency) és az egyes országok saját szabályzásai, Magyarországon a 118/2011. (VII. 11.) Kormányrendelet azt a választ adják, hogy akkor, ha az egyébként aktív vetőnek nincsen meg az a képessége – a nemzetközi szóhasználat szerint nem „capable” –, hogy a felszínen olyan mértékű elmozdulást hozzon létre, amelyet megfelelően méretezett mérnöki eszközökkel már nem lehet ellensúlyozni.³⁾

A következő kérdés, hogy hogyan állapítjuk meg egy vető ilyen jellegű képességét, illetve képességének hiányát? Erre is a fent említett szabályzások adnak iránymutatást. A hazai szabályozás lényege az, hogy ha bizonyos időn belül történt a kutatásba bevont területen a felszínre, illetve annak közvetlen közelébe kifutó elmozdulás, akkor a vetőnek ez a képessége megvan.⁴⁾ A telephelyre magára ugyanez a szabályzás szigorúbb kritériumot ad meg, nevezetesen, ha a felszínre kifutó vető lehetőségét nem lehet megbízhatóan cáfolni, akkor a telephelyet alkalmatlannak kell nyilvánítani.⁵⁾

Ennél konkrétabb az orosz szabályozás [19], amely egy-millió évben (ez a negyedkort jelenti) és 0,5 m-ben határozza meg az időintervallum és a megengedett maximális elmozdulás mértékét.⁶⁾

A fentiek értelmében tehát a földrengésbiztonsági kutatásoknak azt kellett bizonyítaniuk, hogy a DH zóna elmozdulásai a negyedkori rétegeket nem érik el, azokba nem hatolnak be, illetve, ha mégis, akkor a hatásuk ott elhanyagolhatóan csekély (az orosz szabályzás szerint az elmozdulások fél méter alatt maradnak). A zárójelentések szerint a geológiai, geofizikai, paleoszeizmológiai kutatások során ugyan találtak a negyedkori rétegeket is érintő elmozdulásokat, de sehol sem volt bizonyítható, hogy ezek elérik a veszélyesnek tekintett mértéket. Erre a megállapításra épül az MVM Telephely Biztonsági Jelentése, és erre hivatkozik az Országos Atomenergia Hivatal által kiadott telephelyengedély is.

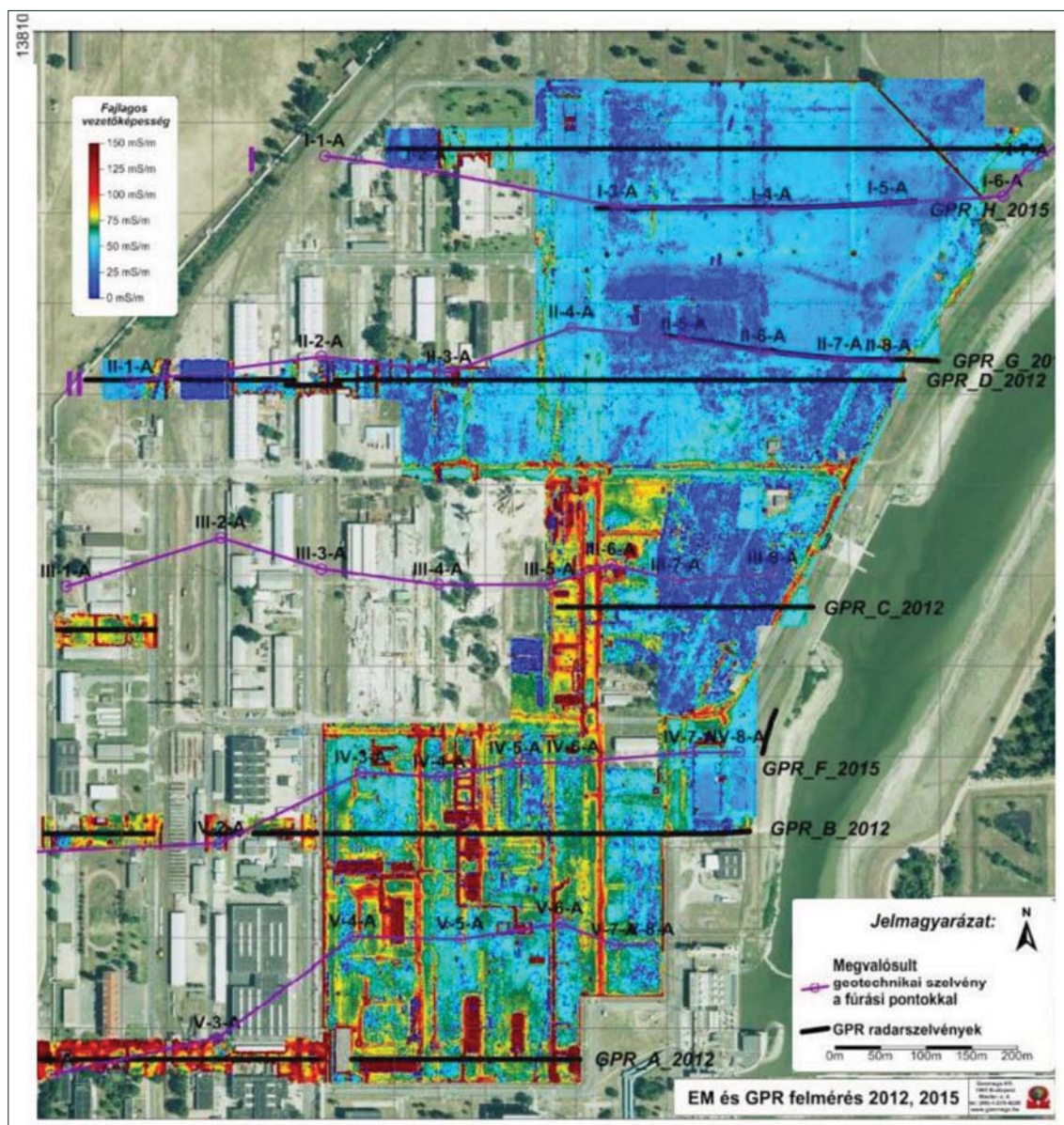
Tekintettel az egész kutatás rendkívül nagy volumenére a következőkben csak egy szűk, de igen fontos területre szeretnék összpontosítani, vagyis az engedélyezett telephelyen belüli felszíni geofizikai kutatásokat szeretném áttekinteni a megfogalmazott alapkérdés, azaz a neotektonikai mozgások szemszögéből. Vajon az ott elvégzett kutatások alapján el lehet-e megbízhatóan vetni a felszínre kifutó elmozdulások lehetőségét?

A telephelyen belüli felszíni geofizikai kutatások

A telephelyen belüli kutatásra a hazai szabályzás a következőt írja elő: „A telephelyen a felszínre kifutó elvetődés lehetőségét elemezni, értékelni kell. A vizsgálatnak elegendően részletesnek kell lennie ahhoz, hogy a felszínre kifutó elvetődés lehetőségének kérdését érdemben el lehessen dönteni” ([15], 7.3.1.0800. pont).

Az alapkérdés tehát a felszínre kifutó elmozdulás lehetősége. Ennek a szemszögéből nézve a telephely földtani felépítése elég egyszerű, egy vastagabb, tömörebb, pannóniai összletre települ diszkordánsan a lazább, szemcsésebb, negyedkori üledéksor. Geofizikai szempontból ez egy kétréteges modell, amit némileg bonyolultabbá tesz a felszínen található emberi tevékenység által megbolygatott, feltöltött vékony réteg. Fúrásos és karotázsinformációk alapján a lazább szemcsés negyedkori rétegek alsó határa a felszíntől számítva mintegy 25–30 m mélyen található. A karotázsmérések természetesgamma-görbéje elég egyértelműen kijelöli ezt a határt. A felszíni bolygatott rész vastagsága a terület legnagyobb részén 0 m és 4 m között változik, de a változások lassúak, általában nem lépik túl az 1-2 m/100 m értéket. Ezt az értéket a feltöltések előtt készült szintvonalas térképek és a jelenlegi térszint összehasonlításával határozták meg.

Az alapkérdést megválaszolandó tervezték meg és végezték el a telephelyen belüli felszíni geofizikai kutatásokat. A kutatások első fázisában elektromágneses (EM) és georadar- (GPR-) mérésekre került sor [3, 10]. Ezek feladata a felszíni és közvetlenül a felszín alatti talajrétegekben található, főként emberi tevékenységhez köthető tárgyak, inhomogenitások kimutatása, különös tekintettel a területen lévő épületalpozásokra, közművekre vagy azok maradványaira. Az EM mérések behatolási mélysége körülbelül 1 m, a nagyon ritka vonalhálózat mentén inkább csak ellenőrzési céllal végzett radarméréseké körülbelül 2 m volt. Ezek a mérések valóban csak az emberi tevékenység által megbolygatott legfelső vékony réteg megismerésére voltak alkalmasak, viszont ezeknek az ismerete a további kutatások szemszögéből igen fontos. A mérések eredményeképpen elkészült térképet Tóth et al. (2016) nyomán az 1. ábránk mutatja be. Az ábrán látható, hogy a



1. ábra. Az EM mérések eredménytérképe (Tóth et al. (2016) nyomán)

jelenleg is működő erőműhöz közelebb eső D-i területre szívesen „szennyezett”. Az É-i, ÉK-i részek azonban ezektől a felszíni vagy közvetlen felszínközeli zavaró objektumoktól vagy legalábbis az EM mérésekkel kimutatható részüktől többnyire mentesek.

A mérések következő fázisában geoelektromos multi-elektrodás szelvényezést végeztek Wenner–Schlumberger-elrendezésben, 4 m-es elektrodátávolsággal, 8,1 km hosszban [3, 10]. A jelentésekből nem derült ki számomra, hogy pontosan, mi is volt ezeknek a méréseknek a célja. Az alapfeladat megoldására, vagyis a neotektonikus elmozdulások észlelésére ezek a mérések ugyanis alkalmatlanok. A negyedkori rétegeken belül egy elmozdulás mindkét oldalán ugyanazok az anyagok (ugyanazok a fajlagosellenállás-értékek) találhatók, vagyis egy ellenállás-szelvényezés számára ezek az elmozdulások láthatatlanok. Elképzelhető lett volna, hogy a negyedkori rétegek talpánál egy hirtelen ellenállás-változás lép fel, és akkor egy viszonylag nagy vertikális elmozdulást ki lehet mutatni, de ezt az ellenállás-változást a szelvények egyikén sem lehet látni (Ács et al. 2016, 09. melléklet), vagy nem érték el a mérések ezt a szintet, vagy – ami inkább valószínű – nincsen ilyen ugrás a negyedkori rétegek talpán. Még egy további tényezőt is említhetünk, nevezetesen, ha van olyan mérés, amelyet az eltemetett fémcsövek és betonvasak igazán zavarnak, akkor ez éppen a geoelektromos ellenállás-szelvényezés.

Ezután egy szeizmikus refrakciós mérésre került sor ugyanezen a vonalhálózaton. A kiinduló feltételezés feltehetőleg itt is az volt, hogy a negyedkori rétegek talpán elegendően nagy, ugrásszerű paraméterváltozás jelentkezik, azaz növekedés a szeizmikus longitudinális hullámok terjedési sebességében. Ennek teljesülése esetén ugyanazt lehetett volna remélni, mint az ellenállás-szelvényezésnél. Azonban ez a feltételezés sem teljesült, és így a méréssel a Duna vízállásváltozásait is korrekcióba véve sikerült a telephely alatti talajvíztükröt kimutatni. Ez mindenestre érdekes eredmény még akkor is, ha semmi köze sincs az alapfeladathoz.

Végül történt még egy harmadik mérés is a már említett méréseknél használt vonalháló mentén, egy szeizmikus transzverzális hullámokkal végzett reflexiós mérés. A mérésnél hullámforrásként egy transzverzális hullámok kelésére alkalmas vibrátort alkalmaztak 20-tól 80 Hz-ig futó, 10 s hosszú vibrojelekkel, a szeizmométer és a forrásponthoz távolság 2 m, a felvételek csatornaszáma 96, és ennek megfelelően a fedésszám a mélység függvényében 48-szorosig terjedt.⁷⁾

Ács et al. (2016) kimerítő leírást adnak a reflexiós mérések eszközeiről, a mérési metodikáról, a mérések feldolgozásáról és a mérések minőségét befolyásoló okokkal kapcsolatos tapasztalatokról, majd a jelentés ezt a következő mondattal zárja: „Az eredményül kapott migrált mélységszelvények – értelmezés nélkül – a jelentéshez csatolt mellékletként kerülnek közlésre (4. és 6. melléklet).”

Tóth et al. (2016) bővebben tárgyalják ugyan a reflexiós S-hullám-méréseket, ám az alapfeladatot tekintve ők is következő következtetésre jutnak: „A telephely területe

alatt a rendelkezésre álló adatok alapján teljes bizonyossággal kijelenthetjük, hogy a vetőzóna a teljes megőrzött pannon rétegsort harántolja. Nincs azonban semmi olyan adat, mely biztos választ tud adni a negyedidőszakú üledékek tektonikai érintettsége kérdésében. Sajnos nem kivétel e tekintetben az S-hullám sekélyreflexiós szeizmikus mérése sem. Ennek a fennmaradó bizonytalanságnak fő oka a szelvények gyenge jel/zaj aránya, a felszíni zavaró hatások torzítása, valamint magának a területet jellemző negyedidőszakú folyóvízi összletnek a bonyolult, laterálisan gyorsan változó belső szerkezete.”

Összefoglalva, a telephelyen belüli felszíni geofizikai mérésekről megállapíthatjuk, hogy az alapfeladat szempontjából eredménytelenek voltak. A geoelektromos szelvényezés és a szeizmikus refrakciós mérés esetében ez már eredetileg is nyilvánvaló volt, mert ha még teljesülnék is a paraméterugrásra vonatkozó remények, a pannon rétegek felszínének töréséből még nem következik az üledékhézaggal rátelepülő negyedkori rétegek érintettsége. Maradnak a szeizmikus reflexiós mérések, ezek – mint azt a nagyobb mélység tartományt átfogó szelvényekből jól ismerjük – nemcsak egy vető létének, de lefutásának kimutatására is alkalmasak. Ám ahogy azt a fenti idézet állítja, a különböző zavaró tényezők miatt a reflexiós szelvényeket nem lehetett biztonságosan értelmezni.

Itt megjegyezném, hogy sajnos egy bizonytalan vagy nagyon bizonytalan értelmezésre tett kísérletet sem tartalmaznak a jelentések.

Kísérlet a telephelyen belüli szeizmikus S-hullám-reflexiós szelvények értelmezésére

A telephelyen belül lemerített szeizmikus S-hullám-reflexiós szelvények teljes sorozatát közlik Ács et al. (2016) a Földtani Zárójelentés mellékleteiben [12]. A 4. és 5. mellékletben a TWT (Two Way Time) időszelvények, míg a 6. és 7. mellékletben a migrált mélységszelvények sorozata található helyszínrajzokkal együtt. A szelvényekről csak annyit kell megemlíteni, hogy erősen túlmagasítottak. A szelvények helyszínrajza a terület légi fényképére vetítve a 2. ábrán látható.

A szelvényeket végignézve arra a meggyőződésre jutottam, hogy indokolatlan a teljes mérési anyag kategorikus elutasítása. Jól ismert tény, hogy a közvetlen felszín alatti 50 m-es régió szeizmikus reflexiós kutatása sokkal nehezebb feladat, mint egy néhány ezer m-ig terjedő (általában olajipari) kutatás. Nagyon nehéz a szeizmikus hullámok hullámhosszát annyira összehúzni, hogy ilyen kis mélységekről is elfogadható felbontást nyújtsanak. Ennél a kutatásnál pedig – véleményem szerint – éppen ez sikerült egy innovatív, új technika alkalmazásával. Ez indított arra az elhatározásra, hogy közelebbről is megvizsgáljam ezt a mérési anyagot.

A szelvények igen jó felbontású PDF formátumú képként jelennek meg a mellékletekben, teljes képernyőméretre történő nagyításuk nem okoz problémát, és így



2. ábra. Az SRef jelű sekély szeizmikus S-hullám-mérések helyszínrajza (Tóth et al. (2016) adatainak felhasználásával)

számítástechnikai eszközökkel elmenthető a képernyőről. Ennek eredményképpen képként rendelkezésre állnak,⁸⁾ ami azt jelenti, hogy a szokásos szeizmikusadatfeldolgozás eszközeivel – amelyek egy otthoni gépen amúgy sem állnak rendelkezésre – nem férünk hozzájuk, de az ismert képfeldolgozó programokat használhatjuk.

Első lépésként felhasználva az EM mérések nyújtotta információkat megvizsgáltam, hogy milyen mértékben tehető felelőssé az emberi tevékenységhez köthető objektumok a szelvényekben megjelenő jelenségekért, és milyen mértékben tételezhetjük fel, hogy ezeknek a jelenségeknek valós földtani okai vannak.

Milyen módon kell megjelennie a zavaró felszíni objektumok képének a szelvényeken?

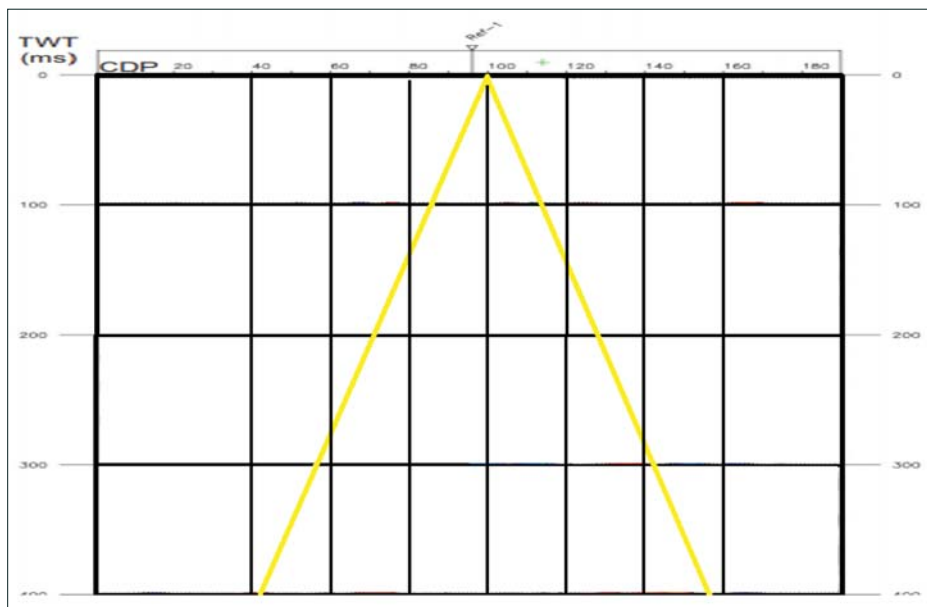
A vizsgálathoz a TWT (kétszeres futásidejű) időszelvényeket választottam, mert nem ismerem a mélységzel-

vények feldolgozásánál megadott „implicit FD időtartománybeli migrációt” [10].

S-hullám-terjedési sebességadatokat nem ad meg egyik jelentés sem, de ezeket a TWT időszelvények és a migrált mélységzelvények összehasonlításával meg lehetett becsülni. Nekem ez a felső negyedkori összletben közelítőleg 280 m/s-nak, az alatta lévő pannóniai rétegekben közelítőleg 400 m/s-nak adódott, így ezeket az értékeket használom a következőkben.

Mi történik, ha egy szeizmikus vonalra merőlegesen, közvetlenül a felszín alatt egy reflektáló felület (pl. egy beton alapozás) helyezkedik el?

Ha mind a szenzor, mind a forrás az akadály ugyanazon oldalán van, akkor a közös mélységpontos csatornagyűteményekben minden csatornán azonos időben érkezik be az akadályról reflektált jel, vagyis egy dőlésmentes, egyenes beérkezést kapunk, amelyet az összegzés hasonlóan



3. ábra. A felszínen, vonal mentén terjedő S-hullámok sebességképe

csillapít mint a többszörös reflexiókat. Ha feltesszük, hogy az összegcsatorna elején az összegzésben részt vevő csatornák kis száma vagy egyéb ok miatt a zavar nem tűnik el, akkor a szelvények itt használt léptékében a 3. ábrán bemutatott sárga vonalaknak megfelelő irányban (ez a kétszeres terjedési idő – forrásponthoz távolság koordináta-rendszerben 140 m/s meredekséget jelent) zavarja meg a többi jelet, ugyanis ez egy vízszintesen, a vonal mentén terjedő transzverzális hullám képe.

Könnyű belátni, hogy ha a közvetlen felszíni vonalas akadály nem derékszöveget zár be a vonallal, vagy teljesen kívül, a vonaltól oldalra esik, az összegzés akkor is a már előbb említett módon csillapítja ezeket az álszinteket, amelyeknek a meredeksége (vagy az interferáló zavarai látszólagos sebessége⁹⁾) nem lehet alacsonyabb az összegszelvényeken, mint 140 m/s. Pontszerű akadályok esetén olyan hiperbola alakú beérkezéseket kapunk, amelyeknek az aszimptotái megfelelnek a 140 m/s látszólagos sebességnek. Ezekre a hiperbolákra is igaz, hogy az összegzés csillapítani fogja ezeket.

Végül, ha az akadály a szenzor és a forrás közé esik, akkor legfeljebb némi energiacsökkenést okoz a legfelső szinteknél.

A fentiekből az következik, hogy a 140 m/s látszólagos sebességgel vagy annál gyorsabban terjedő zavarokat (interferenciákat, fázisugrásokat) valóban a közvetlen felszíni akadályok számlájára írhatjuk, ezzel szemben a nagyobb dőlésű, ebben a léptékben közel függőleges jelenségek így nem magyarázhatók, ezért nem zárható ki, hogy valós földtani okokra vezethetők vissza. Az okok meghatározásánál segítségül szolgálhat még, az EM térkép és a légi felvétel vizsgálata is.

A szelvények vizsgálata

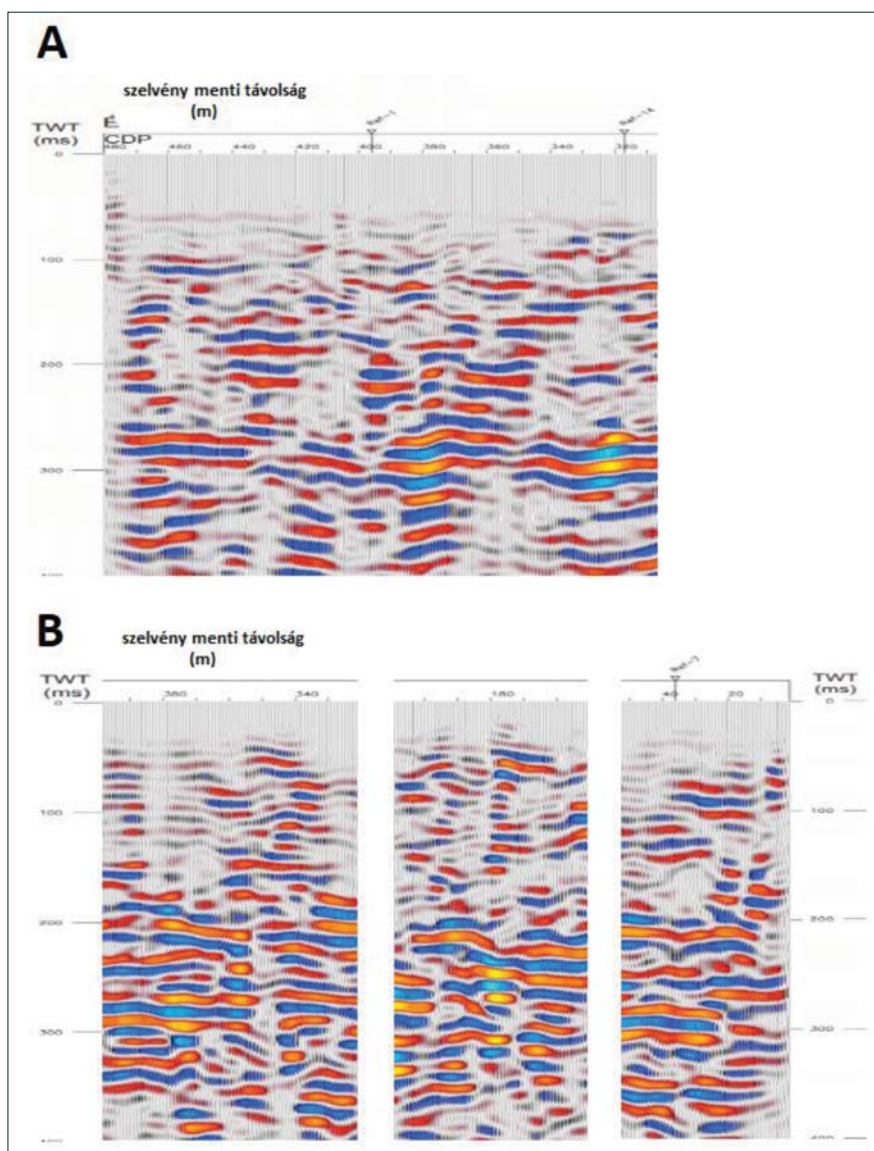
Figyelembe véve az EM mérések fontos információit a terület zavartságára vonatkozóan (1. ábra) érdemes a

szelvények vizsgálatát a szelvényhálózat É-i oldalán kezdeni.

A szelvényeken a legfelső összefüggő, legalábbis szakaszokként követhető szintek általában 40 és 80 ms között kezdődnek, ami 6–12 m-es mélységnek felel meg. Ez a mélység már bőven a bolygatott réteg alja alá esik, így jelenségei az eredeti talajhoz köthetők.

„Jelenség” alatt azt értem, amikor egy követhető szeizmikus szint mentén hirtelen megváltozik a fázis, a fázisugrásokat rendszerint a szint teljes kimaradása kíséri két-három csatornán keresztül. Az ilyen fázisugrásokat okozhatja a reflektáló szintek elmozdulása, azaz egy vető vagy a felszíni zavarok interferenciája. A két jelenséget a fent leírt módon a kétszeres terjedési idő – forrásponthoz távolság koordináta-rendszerben mutatott látszólagos sebességük alapján próbáltam elkülöníteni. A 4. ábra egy tipikus felszíni zajjelenséget (A) és felszíni zajként nem értelmezhető jelenségeket (B) mutat be. A B jelenségek közül balra az első valószínűleg egy csak a pannon-kvarter határig futó elmozdulás, a következő két példa viszont a mért adatok tetejéig, tehát a kvarteren is végigfutó jelenség.

Még egy kérdést kellett körüljárni, nevezetesen a mérések felbontóképességét. Mekkora az az elmozdulás, amelyet az SRef szelvények még jelezni képesek? A mérések felbontóképességét, a hullámhossz negyedével vagy felével szokás definiálni. Ezt egy frekvenciaanalízis és a hullámterjedési sebességek ismeretében könnyen eldönthetnénk, ám ezek a lehetőségek a bemutatott „képernyőszeizmikának” nem állnak rendelkezésére, ezért ezt a szelvényképekből kellett leolvasni. Az 5. ábra egy migrált szelvény felső (negyedkori) részéből (A) és két mélyebb (pannon) részéből (B és C) vett mintát mutat be. A mintákból leolvasható, hogy a fiatalabb rétegekben a hullámhossz 3 m körül, az idősebb részben pedig 5 m körül van, ennek megfelelően a felső összletben a mérések felbontása 0,75–1,5 m, míg az alsóban 1,25–2,5 m. Így ha egy fázisugrás az



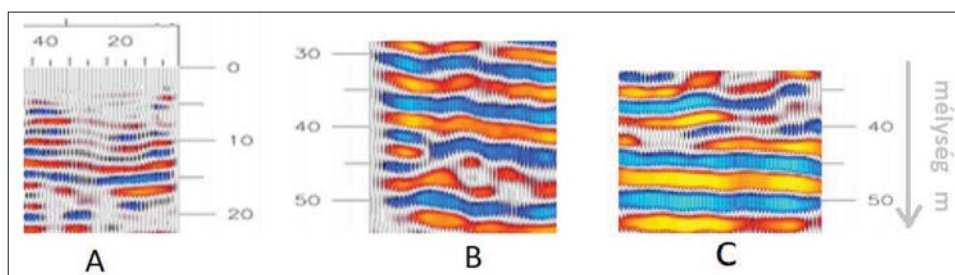
4. ábra. A felszínen terjedő hullámok képe (A), illetve a zajnak nem minősíthető jelenségek képe a szelvényeken

alsó összeteben eltűnik, akkor csak egy 1 m körüli elmozdulásról beszélhetünk, ha nem tűnik el, akkor az elmozdulás mértéke meghaladja a 2 m-t. Mindez azt jelenti, hogy az 1 m-nél kisebb elmozdulások – tehát a jogi szabályzás értelmében érdektelenül kis elmozdulások – ezekkel a mérésekkel nem mutathatók ki, tehát a szelvényeken megjelenő és a fent tárgyalt sebességekritériumoknak eleget tevő jelenségeket, ha a felszínt megközelítik, úgy kell te-

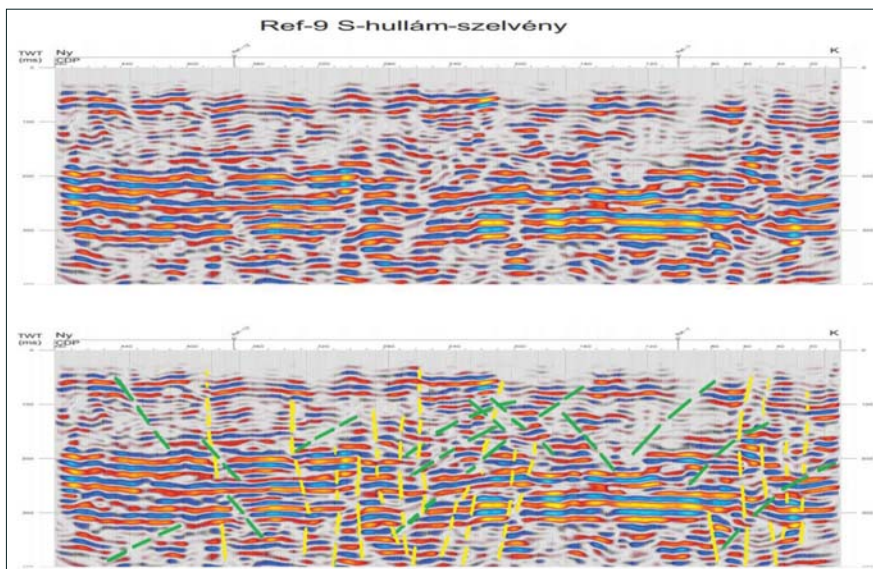
kinteni, mint jelzést arra, hogy a DH vetőzóna aktivitása valószínűleg „capable”.

Az É-i vonalak vizsgálata

Ács et al. (2016) zárójelentésének 101. oldalán bemutatott 30. ábrája a helyszínrajzzal, illetve különböző paraméter-térképekkel összerajzolva mutatja be a SRef-9-es szel-



5. ábra. A hullámhosszak meghatározása a migrált szelvények szakaszaiból



6. ábra. az SRef-9 TWT időszelvény nyers és értelmezett változata

vényt. Erre az ábrára egyetlen pillantást vetve is látszik, hogy itt nem valami zajokba és zavarokba fulladt szelvényről van szó, másrészt a helyszínrajz üres, a paramétertérképek pedig nyugodt területet mutatnak. Így ezzel a szelvényvel kezdtem az SRef szelvények értelmezésére tett kísérletemet.

Ha a kutatás alapkérdéséből indulunk ki, akkor az értelmezés során elsősorban elmozdulásokat jelző jelenségeket keresünk. Mint már említettük, az elmozdulást egy reflexiós szelvényen a szeizmikus reflexiós szintek vagy felületek mentén megjelenő fázisugrás jelzi. Ám tudatában kell lennünk, hogy egy reflexiós szelvényen egy vető elmozdulásvektorának csak a vertikális komponense jelenik meg, ez pedig oldaleltolódás esetén minden valószínűség szerint a legkisebb komponens. Tehát egy, a szelvényben megjelenő egész kis fázisugráshoz is tartozhat jelentős méretű elmozdulás. (Igaz ez persze az árkolásban kimutatott törésekre is, mert mindkét módszer csak vertikális metszetet eredményez [6]).

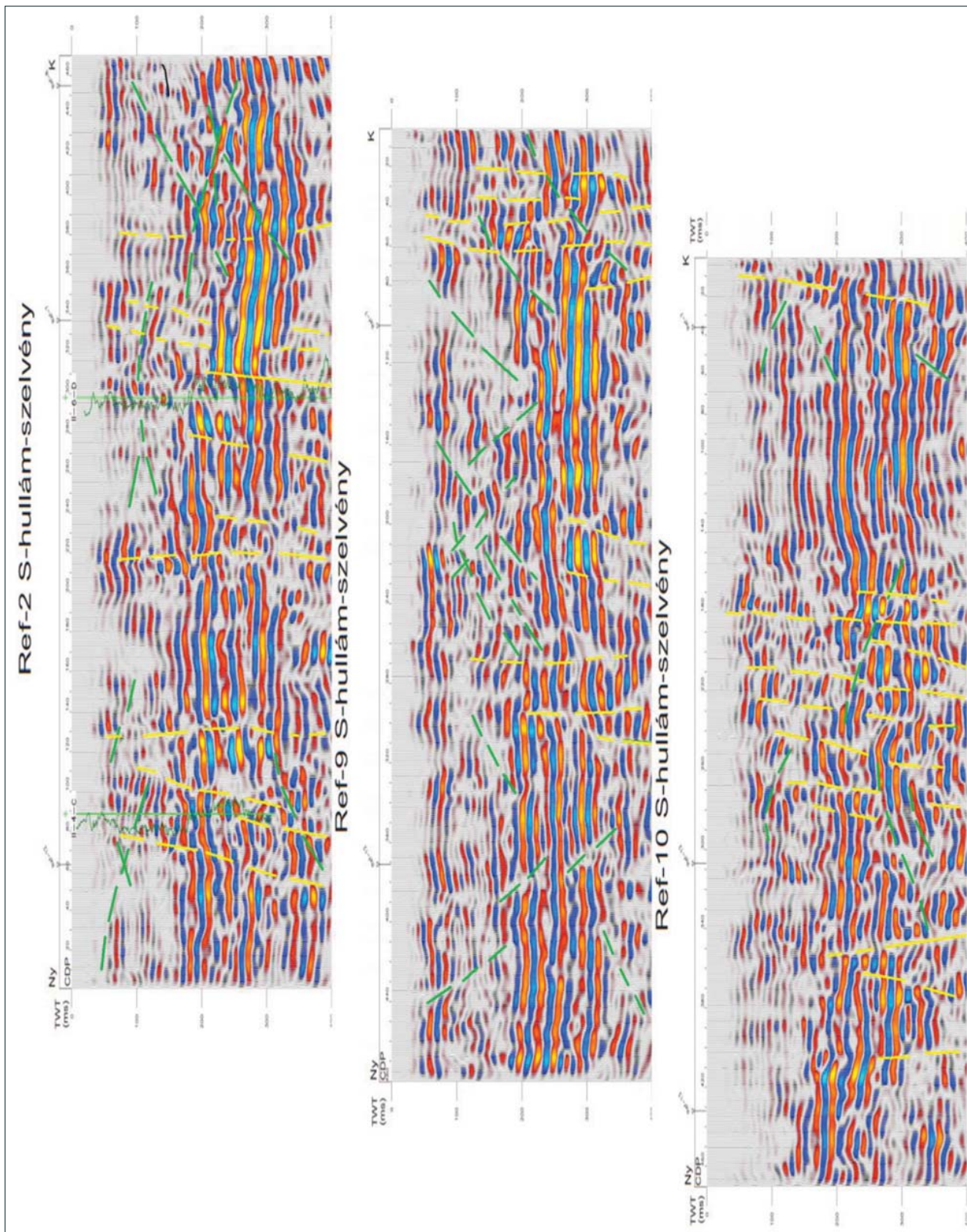
400 ms alatt levágtam a szelvény alját, mert a mérések behatolási mélysége ennél biztosan nem több. Az 6. ábrán a szelvény eredeti, Ács et al. (2016) által közölt alakja alá egy vetőkre (sárga vonalak) és felszíni zavarokra (zöld vonalak) értelmezett változatot tettem. A szelvényen két zavart, összetördelt zóna figyelhető meg a 20 és a 100 szelvényméter (a továbbiakban csak m), illetve 200 és 340 m között. Az elmozdulásra utaló jelenségek egy része csak a pannon tetejéig terjed, ám másik részük követhető tovább felfelé a negyedkori rétegekben is. Estenként az elmozdulásra utaló jelenségek egészen a mérési adatok tetejéig terjednek, ami gyakorlatilag azonos értékűnek vehető a felszínre való kifizásukkal (6. ábra). A különböző magasságokig futó vetők a vetőzónák ismétlődő felújulásaival magyarázhatók.¹⁰⁾

A szelvény Ny-i vége és a két tört zóna közti rész nyugodtabb szinteket mutat, az utóbbiban enyhe domborulat látható. A szelvényben legnagyobb amplitúddal és a leg-

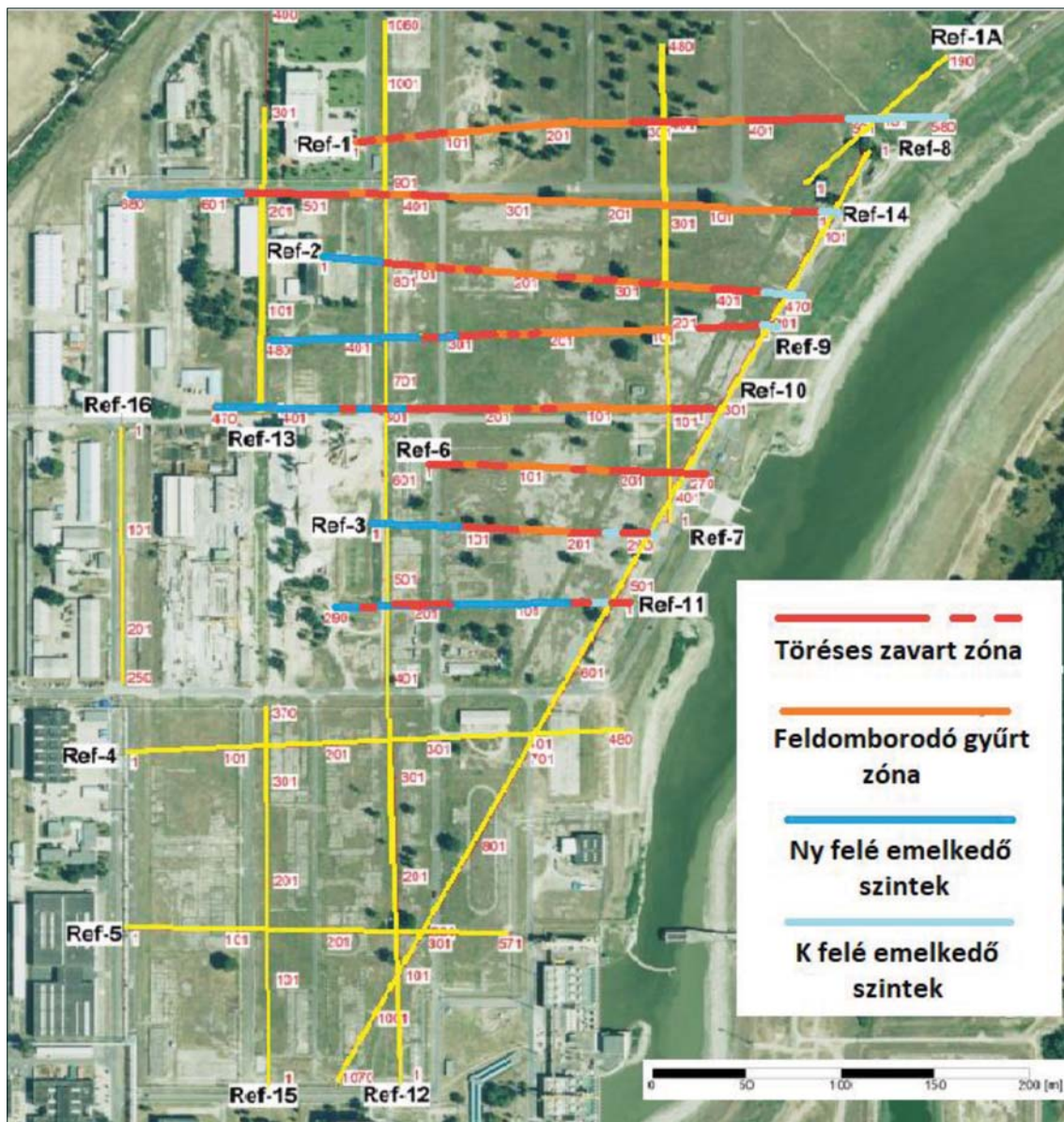
jobb követhetően a pannon összlet felső szintjei jelentkeznek – gondolom – részben azért, mert a konszolidáltabb rétegsort alkotó pannon rétegek jobban reflektálnak, részben pedig azért, mert az összegzés ebben a mélységben már eléri a teljes fedésszámot. A negyedkori rétegeknél az összegzett csatornák száma felfelé gyorsan csökken, így a reflexiós szinteknél sem várható el ugyanaz a minőség, mint a pannon rétegeknél, de ennek ellenére és az esetenkénti energiahiányos szakaszok (képernyő módban nincs lehetőség erősítésre) ellenére is jól megkülönböztethetők a nyugodt és a zavart részek.

Hogy ez a szelvény, illetve értelmezése mennyire fogadható el hitelesnek, azt elsősorban a szomszédos szelvényekkel történő összehasonlításból láthatjuk. Ezért a bemutatott szelvény mellé másoltam a tőle É-ra eső SRef-2 és a tőle D-re eső SRef-10 szelvényeket olyan módon, hogy az É-D-i irányú SRef-12-es és SRef-7-es szelvényvel való kereszteződéseik pontosan egymás alá kerüljenek (7. ábra). Látható, hogy a szelvények jellege nagyon hasonló. Persze meg kell jegyezni, hogy szoros korrelációt a szelvények egymástól mért távolsága miatt – amely jóval nagyobb, mint a kutatási mélység – nem várhatunk.

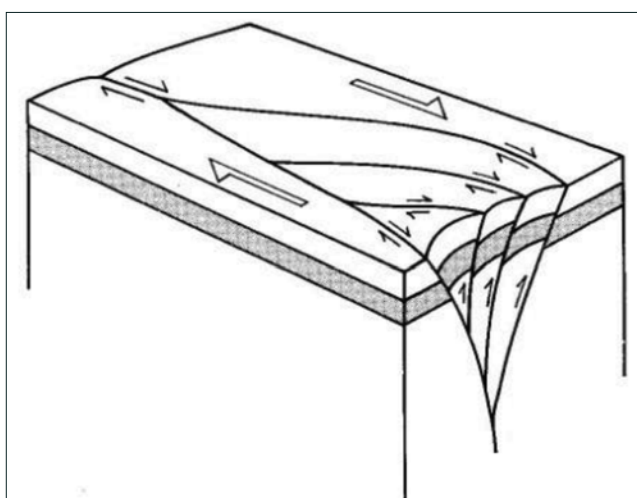
Hasonló módon egymás mellé illeszthetők a SRef-1 szelvénytől D-re futó K-Ny-i, illetve Ny-K-i irányú szelvények egészen az SRef-11-es szelvényvel bezárólag. Megpróbáltam értékelni ezeket egymástól függetlenül, és utána feltenni a helyszínrajzra a töréses zavart zónáknak ítélt részeket piros színnel, a feldomborodó köztes részt narancssárgával. Ezt mutatja be a 8. ábra. Első pillanatra elég meglepő eredményt kaptam, ugyanis a két (szerintem) tektonikailag zavart zóna körülbelül 30°-os szöget zár be egymással, közbezárván az ilyen módon szintén V alakot mutató feldomborodó, esetenként gyűrt zónát. Majd az egész szerkezet mintha a 11-es vonal környékén, ahol a V csúcsa van, megszűnne. (A karotázsadatokból látható, hogy innen a pannon teteje D felé gyorsan mélyülni kezd, mert a természetesgamma-mérések görbéi



7. ábra. Az SRef-2, -9, -10 szelvények eltoláshelyes egymás mellé illesztése



8. ábra. Az É-i vonalak értelmezése a helyszínrajzon



9. ábra. Egy „virágszerkezet” vázlatos rajza

vékony zöld vonallal rá vannak rajzolva a mélységszelve-nyekre.)

Egy ennyire sekély behatolású mérés nem mutat többet, mint amit egy 3D-s szeizmikus adattömb legfelső idő-metszete, vagyis gyakorlatilag csak egy síkban látjuk a telephely alatti földtani szerkezetet, és ráadásul azt is csak egy viszonylag ritka hálózat mentén. (Ezért az eddigi a mérést zavaró tényezők okozta bizonytalansághoz hozzáadódik még a ritka adatrendszerből adódó bizonytalanság is.) Ám mégis érdemes megpróbálni magyarázatot találni a kapott eredményre.

A szakirodalomból jól ismert a DH típusú oldal-eltolódásos vetőzónák „lélektana” [16–18]. Tudjuk, hogy az ilyen zónákhoz velük szöglet bezáró oldalirányú törések kapcsolódhatnak, és hogy ez ebben az esetben is tényleg így van, azt maga az MVM-TBJ is említi [13]. Úgy gondolom, hogy a kapott eredmény egy ilyen oldalirányú törés

D-i végének a felszín közelében megjelenő képét idézi. A 9. ábra egy „virágszerkezet” vázlatos képét mutatja be (sajnos éppen az ellenkező – jelen esetben É-i – irányból), ennek a szerkezetnek a közelfelszíni vízszintes metszete ráillik az eredményekre. A szerkezet iránya is megfelel a Földtani Zárójelentésben ([10] 418. és 426. ábra) szereplő mellékvetők irányának.

Tanulságok

- A Földtani Zárójelentésnek nem volt véleménye a fent tárgyalt mérésekkel kapcsolatban, így tulajdonképpen egyszerűen csak köszönettel tartozunk nekik, hogy mégis betették a mérési anyagot a Zárójelentésbe.
- A cikk elején már idézett Tóth et al. (2016) „Felszíni geofizikai kutatások értékelő jelentés”-ében megfogalmazottakkal egyet lehet érteni annak ismeretében, hogy egy ilyen nehéz kutatási feladatban általában soha sincs 100%-osan biztos válasz. Ám úgy gondolom, hogy az SRef sekélyreflexiós hálózat sokkal több figyelmet érdemelt volna, mert bár teljesen biztos választ valóban nem ad a negyedidőszakú üledékek tektonikai érintettségére vonatkozóan, de elég határozottan valószínűsíti azt!¹¹⁾
- Az eredmények biztonságát jelentősen lehetett volna javítani a reflexiós hálózat sűrítésével. Gondolom, hogy ez a kutatási feladat nemzetgazdasági súlyához és a teljes kutatás összköltségéhez képest igen jelentéktelen ráfordítást kívánt volna.¹²⁾

Köszönetnyilvánítás

Köszönet illeti a Magyar Villamos Műveket a Paks-II program kutatási és engedélyezési anyagainak nyilvánossá tételéért.

A cikk szerzője

Bodoky Tamás János

Jegyzetek

- ¹⁾ „A felszíni és a mélyfúrású geofizika, valamint a fúrások földtani eredményei alapján megbízhatóan definiálni lehetett az 50 km-es körzetben található vetős szerkezeteket, különös pontossággal a tervezett telephely alatt húzódó, és a Kapos-vonaltól kiágazó Dunaszentgyörgy-Harta (DH) vetőt. A szerkezeti jegyek (másodlagos törések) analízise alapján megállapítható, hogy a neotektonikus stílus alapvetően balos oldalelmozdulás, amelyhez helyenként transztenziós és transzpressziós elemek kapcsolódnak.” (MVM Paks-II Zrt., TBJ, 2016, 186. old.) [13]
- ²⁾ „A neotektonikus aktivitás mintegy 7-8 millió éve megkezdődött, és az utóbbi 5 millió év (pliocén-kvarter) során kulminálódott. A nagy felbontású sekély-geofizikai vizsgálatok, a speciális fúrások (Pa 21 A-G4) és az árkolások alapján egyértelmű, hogy a DH vetőt aktív szerkezetnek kell tekinteni.” (MVM Paks-II Zrt., TBJ, 2016, 186. old.) [13]
- ³⁾ Ehhez csak annyit fűznék hozzá, hogy valószínűleg mindnyájan elismerjük a japán mérnökök és munkások kiválóságát. Ezen az alapon japán tudással, japán alapossággal és japán pénzzel ter-

veztek meg és építették fel a fukusimai erőmű védelmét, amely valóban nagyszerűen működött (egyetlen eset kivételével).

- ⁴⁾ „7.3.1.0900. A törésvonalat a felszínre kifutó elvetődés szempontjából veszélyesnek kell tekinteni, ha a geológiai, geofizikai, geodéziai és szeizmológiai adatok az alábbiak közül egy vagy több ismérvnek megfelelnek:
 - a) az adatok ismétlődő jelleggel mozgásra, szignifikáns deformációkra vagy diszlokációkra vagy mind a háromra utalnak, olyan időintervallumban, amely alapján nem kizárható, hogy a következő mozgás a felszínre vagy a felszín közelébe kifut;
 - b) szerkezeti kapcsolat létezik egy ismert felszínre kifutó elvetődés szempontjából veszélyes törésvonallal, amelynek mozgása kiválthatja a telephely környezetében lévő törésvonal mozgását;
 - c) a szeizmogén szerkezetről feltehető, hogy a maximális lehetséges földrengés elegendően nagy és olyan félszékélyességű, hogy feltételezhető – a telephely geodinamikai sajátosságai alapján – a felszínre kifutó elvetődés.” [15]
- ⁵⁾ „7.3.1.1100. Ha a telephelyen a felszínre kifutó elvetődés lehetőségét tudományos evidenciák alapján megbízhatóan nem lehet elvetni, és az elmozdulás érintheti a nukleáris létesítményt, a telephelyet alkalmatlannak kell nyilvánítani.” [15]
- ⁶⁾ „Active fault – tectonic fault along which relative displacement of the earth crust’s adjacent blocks by 0.5 m and more took place during the last 1 bln. [million] years (quaternary period).” [19]
- ⁷⁾ A 2 m-es szeizmométer-távolság egy járulékos előnye, hogy a feldolgozott szelvények csatornaszáma egyben a vonal menti távolság m-ben mért értékét is jelenti.
- ⁸⁾ Jelen esetben én a PNG formátumot választottam.
- ⁹⁾ Itt nem a szeizmikában szokásos értelemben használok a „lát-szólagos sebesség” fogalmát, amiért is elnézést kérek, de a szelvények koordináta-rendszerében a jelenségek „meredeksége” sebesség dimenziójú mennyiség.
- ¹⁰⁾ A kutatás tapasztalatai szerint a neotektonikus vető(zóná)k uralkodóan korábban keletkezett vető(zóná)k felújulásával jöttek létre ([10] 3.1.1.5.1 fejezet, illetve 14., 15., 18. és 21. mellékletek)
- ¹¹⁾ Az idézett Kormányrendelet 7.3.1.1100. pontja szerint a felszínre kifutó vetők létét nem kell megcáfolni, elég, ha nem tudjuk meglétüket megbízhatóan kizárni. Egy eredménytelen kutatás pedig sajnos nem zár ki semmit, következésképpen a Kormányrendelet 7.3.1.0800. pontjában előírt alapkérdés válasz nélkül maradt.
- ¹²⁾ De ez megtehető lett volna az első vonalak után láthatóan feleslegesnek bizonyuló ellenállás-szelvényezés, illetve refrakciós mérések rovására a kutatási költségek növelése nélkül is! Egyébként a vonalak sűrítése vagy legalább annak ajánlása az MVM számára az építkezés jelenlegi helyzetében még ma sem késett el.

Hivatkozások

- [1] Országos Atomenergia Hivatal (2017): Tárgy: Az MVM Paks II. Atomerőmű Fejlesztő Zrt. kérelmére telephelyengedély. Ügyszám OAH-2016-01001/2016 – Határozatszám P2-HA0008 – Iktatószám OAH-2016-01001-0072/2017.
- [2] Bodoky Tamás (2017): Nem földrengésmentes a paksi atomerőmű telephelye: megszereztük a földtani kutatás eltitkolt eredményeit. <https://atlatszo.hu/2017/07/10/nem>

- foldrengesmentes-a-paksi-atomeromu-telephelye-
megszereztuk-a-foldtani-kutatas-elitkolt-eredmenyeit/
- [3] Tóth Tamás et al. (2016): Felszíni geofizikai kutatások értékelő jelentése. <https://drive.google.com/file/d/0B1ObjabIdVkmQXpJWWFadVFEQ28/view>
- [4] Mónus Péter et al, 2016: Szeizmotektonikai modell – paleo / speleo-szeizmológiai vizsgálatok a paksi atomerőmű telephely tágabb környezetében. <https://drive.google.com/file/d/0B1ObjabIdVkmSUt4aDkyLTIwbWM/view>
- [5] Földtani fúrások laboratóriumi vizsgálati jegyzőkönyvei. <https://drive.google.com/drive/folders/0B1ObjabIdVkmMHJzWFP0S3EydXc>
- [6] Magyarai Árpád (2016): Késő-pleisztocén üledékföldtani, neotektonikai és paleoszeizmológiai megfigyelések Paks tágabb környezetében. <https://drive.google.com/file/d/0B1ObjabIdVkmEXNyc3lnb1Y0a1k/view>
- [7] Halász Amadé et al. (2016): Kutatóárkok dokumentáló és értelmező jelentése. <https://drive.google.com/file/d/0B1ObjabIdVkmDJJaE9Cd2xkQjQ/view>
- [8] Pa-21-I Kutatóárkok-szelvény. <https://drive.google.com/file/d/0B1ObjabIdVkmDJJaE9Cd2xkQjQ/view>
- [9] Pa-21-II Kutatóárkok-szelvény. <https://drive.google.com/file/d/0B1ObjabIdVkmSmlSMi13RzRpTDg/view>
- [10] Ács Tamás et al. (2016): Földtani kutatási program zárójelentése. <https://drive.google.com/file/d/0B1ObjabIdVkmU2ZmeVJOckdsZzQ/view>
- [11] A Földtani Kutatási Program zárójelentésének függelékei. <https://drive.google.com/drive/folders/0B1ObjabIdVkmYmd1OEVXdFYwNHc>
- [12] A Földtani Kutatási Program zárójelentésének mellékletei. <https://drive.google.com/drive/folders/0B1ObjabIdVkmR2lmR1hjbHJoM3M>
- [13] MVM Paks-II. Zrt. (2016): Telephely biztonsági jelentés II. kötet 5. fejezet geológia, geofizika, szeizmológia, geotechnika és hidrogeológia 2016. <https://adoc.pub/queue/telephely-biztonsagi-jelentesdc834933e536d424dba024b0f1ed013c61093.html>
- [14] Tóth Tamás, Horváth Ferenc (1977): Neotectonic investigations by high resolution seismic profiling. In: Seismic Safety of the Paks Nuclear Power Plant, eds Sándor Marosi and Attila Meskó, Akadémiai Kiadó, Budapest, ISBN-963-05-7452-7
- [15] 118/2011. (VII. 11.) Korm.rendelet: a nukleáris létesítmények nukleáris biztonsági követelményeiről és az ezzel összefüggő hatósági tevékenységről. Magyar Közlöny, 2011/78. <https://net.jogtar.hu/jogszabaly?docid=a1100118.kor>
- [16] Philip Kearey, Frederic J. Vine (1990): Global Tectonics. Blackwell Scientific Publications, Oxford, ISBN 0-632-02425-9
- [17] Philip A. Allen, John R. Allen (1990): Basin Analysis – Principles & Applications. Blackwell Scientific Publications, Oxford, ISBN 0-632-02423-2
- [18] Cathy J. Bushby, Raymond V. Ingersoll (1995): Tectonics of Sedimentary Basins. In: Tectonics of Sedimentary Basins, ed. by Cathy J. Bushby, Raymond V. Ingersoll, Blackwell Science, Oxford, ISBN 0-86542-245-1
- [19] Gosatomnadzor of Russia (Federal Nuclear and Radiation Safety Authority of Russia) (2002): NP-032-01, Federal Codes and Standards in the Area of Atomic Energy Applications, Nuclear Power Plant Siting, Main Criteria and Safety Requirements. Bulletin of Russian Gosatomnadzor, No. 1(20).

Közterület-elnevezés és szoborállítás Eötvös Loránd emlékére

Baráth I., Pályi A., Szabó Z.

2019-ben, Eötvös Loránd halálának 100. évfordulóján országsszerte megemlékezéseket tartottunk a világhírű természettudós és kiváló ember tiszteletére. A megemlékezések egyik kiemelkedő eseménye volt az Eötvös Loránd Geofizikai Alapítvány (ELGA) címben szereplő tevékenysége.

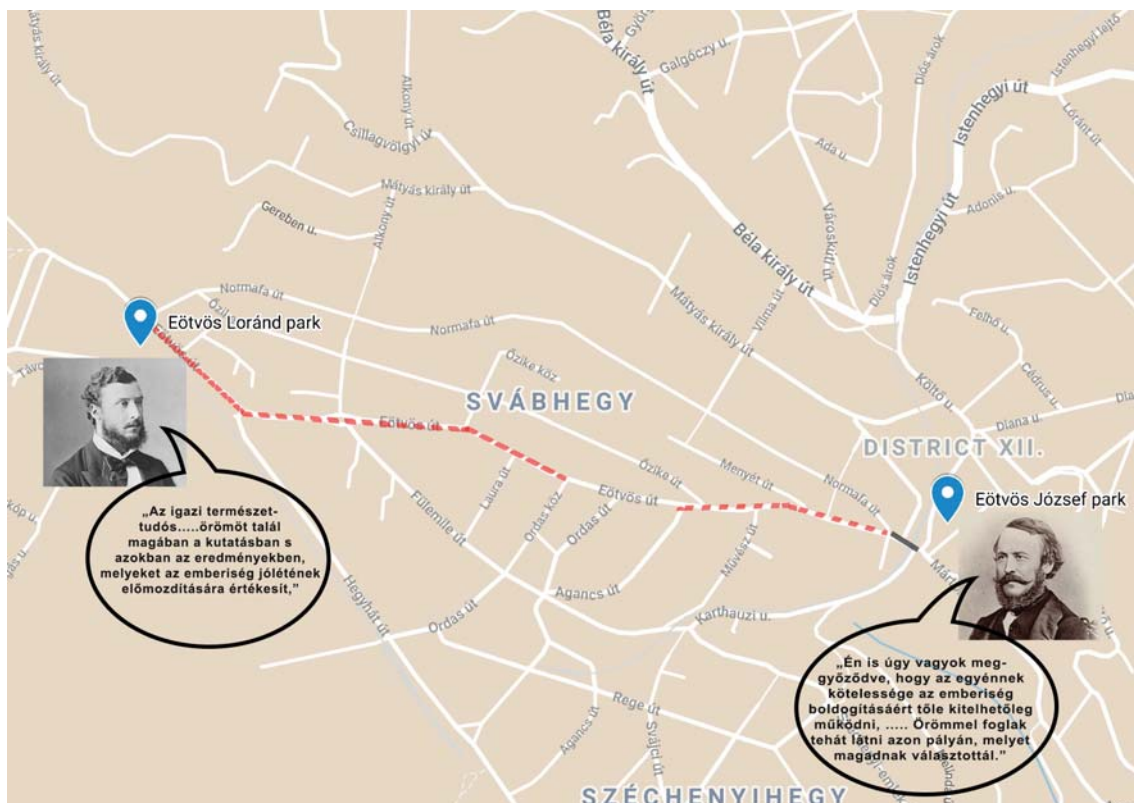
Budapest főváros területén közterület elnevezése Eötvös Lorándról

Budapesten Eötvös Loránd nevét viselő, méltó helyen lévő közterület eddig nem létezett. Az emlékévé lehetőséget adott arra, hogy ezt a visszas helyzetet megváltoztassuk. Eötvös Loránd a Svábhegyen született. A terület a mai XII. kerület része. Adott volt a gondolat, hogy itt legyen közterület róla elnevezve.

A hegyvidéki Önkormányzat, élén Pokorni Zoltán polgármesterrel, támogatóan fogadta javaslatunkat. Adódott

a lehetőség, hogy az egykori Hotel Olimpia lebontása után a helyén kialakított parkosított közterület legyen elnevezve Eötvös Lorándról. Az Önkormányzat úgy határozott, hogy demokratikus módon, helyi népszavazással dönti el ennek az új, rangos közterületnek a nevét. A népszavazáson a három induló közül – legnagyobb örömmünkre és várakozásunknak megfelelően – biztos többséggel Eötvös Loránd győzött (1. ábra).

Az Eötvös Loránd parkot 2020. május 22-én Gulyás Gergely Miniszterelnökséget vezető miniszter, a kerület országgyűlési képviselője és Pokorni Zoltán polgármester nyitotta meg. Alapítványunk köszönetét fejezi ki mindazoknak, akik szavazatukkal segítettek a számunkra kedvező önkormányzati döntés létrejöttét. Mindannyiunk számára öröm, hogy Budapest egy rangos közterülete nevével is öregbíti Eötvös Loránd hírnevét, és a jövőben is folyamatosan emlékeztet mindenkit nemzetünk neves tudósára (2. ábra).



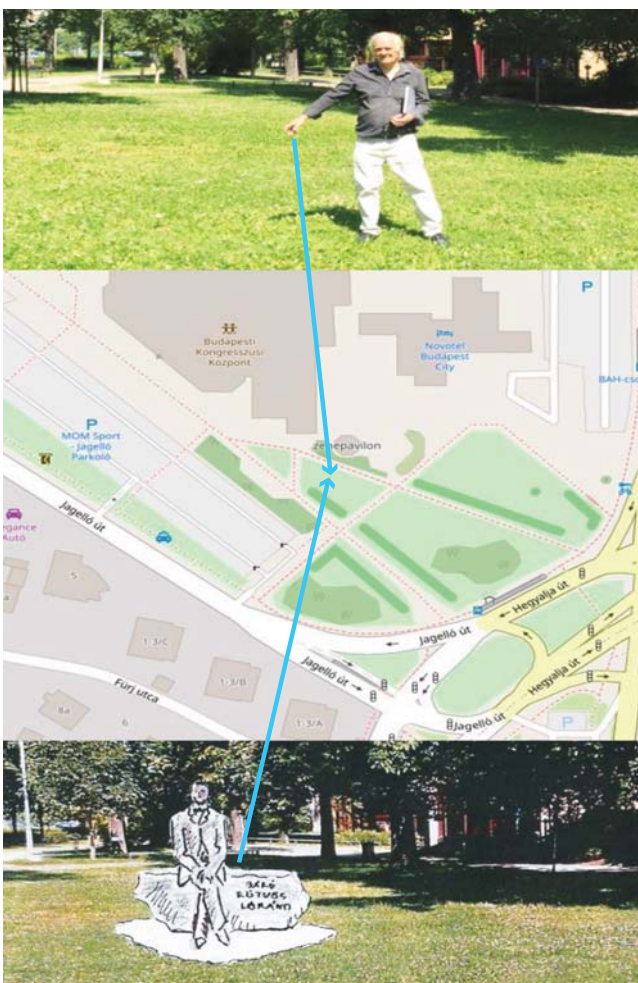
1. ábra. Közterület elnevezése – az új Eötvös Loránd parkot az Eötvös út köti össze a régi Eötvös József parkkal



2. ábra. A park avatása. Avatók Gulyás Gergely és Pokorni Zoltán és Vágó István, valamint a park kialakításában vezető szerepet betöltő szakemberek

Eötvös Loránd Gesztenyés kertben felállított bronzszobra

Az Eötvös-emlékév gondolatának megszületésekor Alapítványunk legfőbb szándéka volt, hogy meg kell ragadnunk



3. ábra. Az alkotó kijelöli a szobor pontos helyét

az alkalmat arra, hogy az emlékév keretein belül pótolhassunk egy évszázados nemzeti mulasztást azáltal, hogy egész alakos bronzszobrot állítsunk fővárosunkban hazánk világhírű természettudósának, Eötvös Lorándnak. Természetes volt tehát, hogy legfőbb programpontunknak tekintettük a szobor létrehozását, és ezáltal nagyobb ismertséget teremtsünk számára. A szobor megvalósítása az Emlékév Operatív Bizottságához (OB) beadott programunk kiemelkedő jelentőségű részét képezte. A több fordulón keresztül kialakult és állami támogatást igénylő központi programból azonban, a szoborállítás ügye túl nagy méretű anyagi támogatási igénye miatt kimaradt. Az Országos Bizottság azonban az Emberi Erőforrás Minisztériumhoz (EMMI) felterjesztett programcsomag mellett támogatásra érdemes javaslatként jelölte meg.

Ez a folyamat 2018 első félévében zajlott le. Közben az EMMI élén miniszterváltás történt, és létrejött az Innovációs és Technológiai Minisztérium (ITM). Ebben az átmeneti helyzetben kezdődött meg tehát küzdelmünk a szobor megvalósításáért. Alapítványunk beadványban fordult a szobor külön keretből történő támogatásáért Kásler Miklós EMMI miniszterhez. Az OB Koordinációs Testület (KT) alakulása 2018. november elején lezajlott. A vezetőváltás után a Szarka László akadémikus vezette testület is támogatta a külön keretből történő szoborállítását. A beadványok eredményeként Kásler Miklós végül jóváhagyta a szobor megvalósításához szükséges pénzügyi keretet. Megkezdhettük tehát a szükséges adminisztratív lépéseket. Közben azonban megtörtént az EMMI és az ITM közötti profiltisztítás, melynek során az a szervezeti egység, ahová a szobor ügye is tartozott, átkerült az ITM-be. Az alapítványi Eötvös Bizottság (EB) csapata – Pályi András, Baráth István, Szabó Zoltán – az eddigi kitartó erőfeszítése után újra kezdhette a lobbizást!

Közben, a fentiekkel párhuzamosan, a szoborelhelyezés ügyét is intézni kellett. Eredeti elképzelésünk az volt, hogy az új közterület – az Eötvös Loránd park – adjon helyet a szobornak. A gyermekjátszóter formájában megvalósuló parkot azonban nem találtuk alkalmasnak arra, hogy abban méltó módon lehessen elhelyezni Eötvös Loránd szobrát. A szobor elhelyezésére új, megfelelő, történelmileg indokolt helynek mutatkozott a Gesztenyés kert BAH-csomópont felé eső része (3. ábra). Ugyanis Eötvös Loránd az Alkotás utca és Csörsz utca kereszteződésénél települt, Süss Nándor vezette Precíziós Mechanikai Intézetben (jogutóda a MOM) készítette kutatási és oktatási eszközeit. A két terület közelsége és a szobor várható nagy látogatottsága, valamint a kert ezen részének „szoborhiánya” miatt alapítványunk Eötvös Bizottsága ezt a helyet találta a legmegfelelőbbnek.

A szobor telepítéséhez szükséges előzetes műszaki, adminisztrációs eljárások után 2020. szeptember végén a kerület testületi határozattal befogadta a szobrot is. A befogadás mellett azonban még a testülettel szemben újabb csatát kellett megvívni, mert a bárói cím feltüntetése miatt egy kerületi képviselő interpellált. Pokorni polgármester az MTA állásfoglalását kérte a vitában. A MTA pozitív vá-

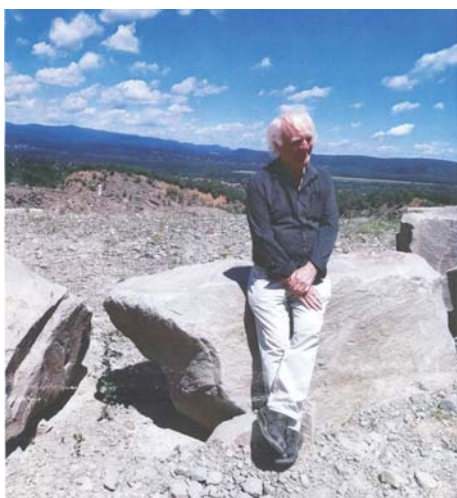


4. ábra. A szobor 1:5 méretű plasztilin modellje

lasza és az EB következetes álláspontja eldöntötte a kérdést. A szobrot „báró Eötvös Loránd” felirattal fogadta be a Hegyvidék.

Az Önkormányzat közreműködésével megismerkedtünk néhány szobrászművésszel. A megbeszélések, ismerkedések eredményeként Rieger Tibor Kossuth-díjas szobrászművészt választottuk. A művésszel 2018 nyárutóján egyeztetünk a szoborral kapcsolatos elvárásainkat, és el láttuk Eötvössel kapcsolatos dokumentumokkal, ismeretekkel. Hamar nagyon jó emberi és munkakapcsolat alakult ki az EB tagjai és a művész között. A művész Eötvös iránti mély alázattal és nagy munkakedvvel látott munkához, jól lehet az anyagi háttér még mindig rendezetlen volt. Elkészítette a szobor 1:5 méretű első változatát. A távolba révedő tekintetű portré azonnal elnyerte az EB tagjainak tetszését (4. ábra).

Közben folyt a leendő szobor alapzatát képező sziklatömb keresése is. Az Eötvös-emlékén során jó kapcsolat alakult ki Dobbiaco (Toblach) város vezetőivel. Eötvös kedvelt nyári pihenőhelye, hegymászásainak kiindulópontja, az egykori Schluderbach most Toblachhoz tartozik. Az ottani városvezetők, Eötvös hegymászó érdemeire



5. ábra. Az alkotó a kiválasztott andezittömbön

tekintettel felajánlották,¹ hogy a Dolomitokból ajándékoznak egy sziklatömböt a szobor alapzatához posztamens céljára. A közben fellángolt COVID-19-járvány azonban megakadályozta ennek a nemes felajánlásnak a megvalósulását.

Mikor végérvényessé vált, hogy a vírushelyzet miatt valóban nincs semmilyen mód a dolomitömb ideszállítására, a művész végül a Dunabogdány melletti Csódi-hegy kőbányájában találta meg azt az andezittömböt, mely elképzelésének megfelelt, és amelyen a kőszobrászati munkákat azután sikeresen és szépen meg is valósították (5. ábra).

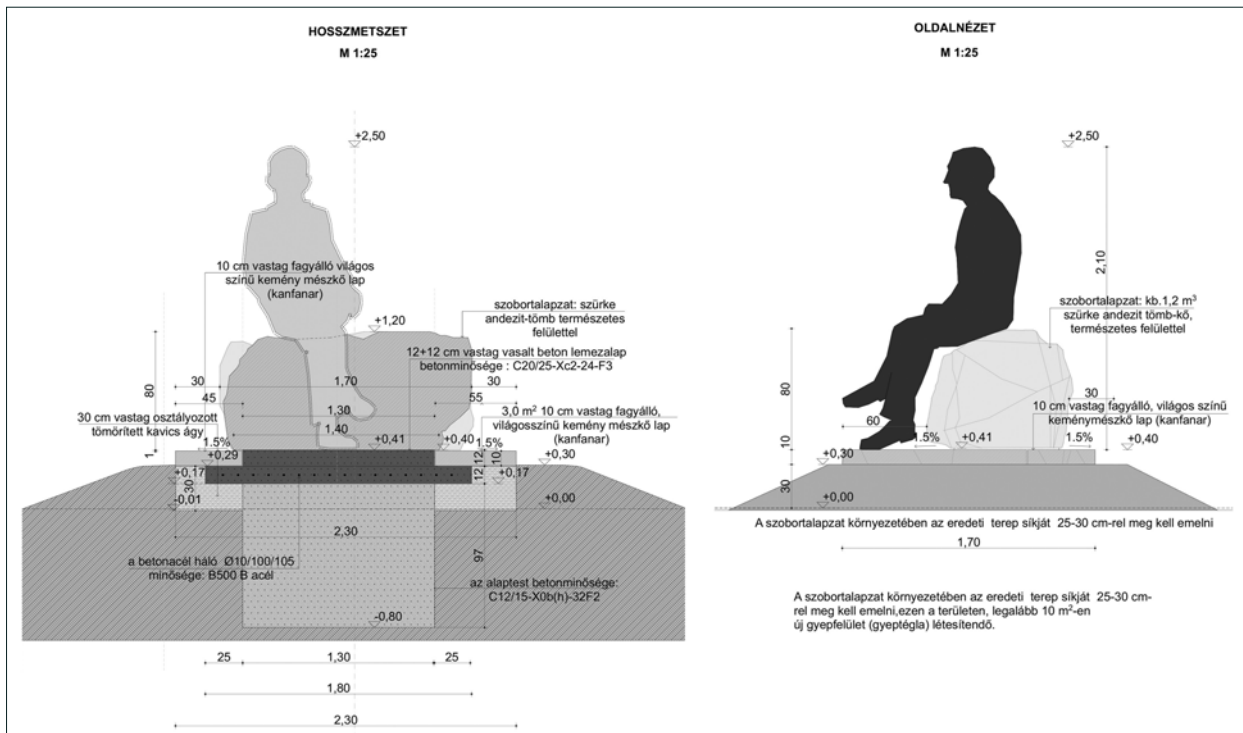
Visszatérve a szoborkészítéshez, miután a művész felajánlotta Alapítványunknak a szobor M=1:5 arányú, plasztilinból készült első változatát, az a szándékunk, hogy a modellt az Eötvös Loránd Emlékgyűjtemény gyarapítása céljából átadjuk alapítónk, az Eötvös Loránd Geofizikai Intézet jogutódjának, a Magyar Bányászati és Földtani Szolgálatnak. Reméljük, hogy a pandémia elmúltával megérkezik Schluderbachból az a modellnek megfelelő méretű dolomitdarab, amelyet a Dobbiaco polgármestere, Guido Bocher által eredetileg felajánlott tömb helyett kérünk. Így a múzeumban már az fogja képezni a modell alapzatát (6. ábra).



6. ábra. A szobor és környezetének modellje

A szobor tervezése mellett a 2019. év nagyobb részében a támogatás megszerzéséért folyt a lobbizás. Jóllehet a minisztériumok részéről a kedvező döntés májusban már megszületett, az adminisztratív lebonyolítás elhúzódott. Az ITM-ben a Támogató Okiratot december 19-én írták alá, a támogatási keretet december 30-án utalták bankszámlánkra. A jóváhagyási procedúra következtében a Támogató Okiratban rögzített teljesítési határidő a szobor elkészítési időigényéhez képest irreálisan rövidre volt

¹ Még Eötvös életében, 1902-ben, róla nevezték el a Cadin-csoport második legmagasabb (2837 m) csúcsát.



7. ábra. A szobor műszaki terve

szabva. Elkerülhetetlenné vált a módosítási kérelem beadása, mely újabb adminisztratív nehézségekkel járt. Közben az Önkormányzat, a szobrászművész és az EB intenzív együttműködése eredményeként kiválasztottuk a szobor telepítési helyét. A minden szempontból jó helyszínt, közös megegyezésünk alapján, a BAH-csomópontnál lévő Gesztenyés kertben, a Kongresszusi Központ felé vezető sétány mellett, a Zene Pavilonnal szemben találtuk meg, ahol ráirányulhat a magyar és külföldi vendégek figyelmére Eötvös Lorándra. A szobor pontos helyét a művész jelölte ki (7. ábra).



8. ábra. A teljes méretű gipszmodell

A támogatási összeg birtokában megkötöttük a szerződést a szobrászművésszel. Az agyagminta alapján a művész elkészítette az életnagyságú szobornak megfelelő méretű gipszmintát. A gipsz minta és a telepítési hely művészeti szempontú szűritése 2020. július 14-én megtörtént. A kiadott pozitív szakvélemény alapján megkezdődött a szobor öntése. A szobor öntése, cizellálása október végére készült el (8. ábra).

A szobor felállítása most már kézzelfogható közelségbe került. A szobor avatására felkértük Gulyás Gergely Miniszterelnökséget vezető minisztert és Pokorni Zoltán polgármestert, akik a felkérést örömmel elfogadták. Elkészítettük a szoboravatás forgatókönyvét és meghívóját. A szobor alapozási munkáit az Önkormányzat – a művész tervei és helyszíni vezetése mellett – elkészítette. A szobor alapra helyezése 2020. november 11-én megtörtént (9. ábra).



9. ábra. Megérkezett a szobor



10. ábra. A szobor a turisták koszorújával

A szobor körüli tereprendezést az Önkormányzat végezte. Az ünnepélyes avatóra terveink szerint november 17-én került volna sor. A COVID-19 azonban itt is közbeszólt. Akadályozta egész éven át a normális kapcsolattartás lehetőségét, a gondtalan munkavégzést, és az ünnepélyes befejezést is lehetetlenné tette. A szobor azonban áll sokunk örömeire és büszkeségére, még ha hivatalosan nincs is felavatva! Az első koszorút már a felállítását követő vasárnapon az érdeklődő turisták el is helyezték a talapzaton (10. ábra).

Nehéz volna felsorolni, ki mindenki segítette munkánkat, így csak összefoglalóan fejezzük ki hálás köszönetün-



11. ábra. Ez az Eötvös-idézet olyan szép, hogy fel kell jegyeznem! – nyilatkozta a képen látható lelkes látogató

„Csak az az igazi tudomány, amely világra szól s azért, ha igaz tudósok – és amint kell – jó magyarok akarunk lenni, úgy a tudomány zászlaját oly magasra kell emelnünk, hogy azt hazánk határán túl is megláthassák és megadhassák neki a kellő tiszteletet.”

ket mindazoknak, akik hozzájárultak a szobor megvalósításához.

A cikk szerzői

Baráth István, Pályi András, Szabó Zoltán

A fotókat készítette

Baráth István és Kilényi Éva



AZ NKFI ALAPBÓL
MEGVALÓSULÓ
PROGRAM

1. KÁRPÁT-MEDENCEI TERMÉSZETTUDOMÁNYI VERSENY 2021

A VERSENY KIÍRÓJA ÉS RENDEZŐJE: **Földtudományi Civil Szervezetek Közössége** továbbiakban: **FÖCIK**

A VERSENY VÉDNÖKE: **UNESCO** Magyar Nemzeti Bizottság

SZAKMAI EGYÜTTMŰKÖDŐK: Magyar Földmérési, Térképészeti és Távérzékelési Társaság, Magyar Földrajzi Társaság, Magyar Geofizikusok Egyesülete, Magyar Hidrológiai Társaság, Magyar Karszt- és Barlangkutató Társulat, Magyar Meteorológiai Társaság, Magyar Természettudományi Társulat, Magyarhoni Földtani Társulat, Országos Magyar Bányászati és Kohászati Egyesület

SZAKMAI PARTNEREK: MTA Könyvtár és Információs Központ, Számítástechnikai és Automatizálási Kutató Intézet

TÁMOGATÓK: Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal; Magyar Bányászati és Földtani Szolgálat; Miskolci Egyetem Műszaki Földtudományi Kar; MOL Nyrt; CSFK Geodéziai és Geofizikai Intézet (a leendő Földfizikai és Űrtudományi Kutatóintézet)

A VERSENY SZERVEZÉSÉVEL ÉS LEBONYOLÍTÁSÁVAL KAPCSOLATOS INFORMÁCIÓK, a FÖCIK honlapján www.focik.hu olvashatók. A versenyt a FÖCIK tagegyesületei földrajz–földtan témakörben magyarországi és külföldi magyar anyanyelvű középiskolák 9–13. évfolyamos tanulói számára hirdeti meg egy kategóriában. A verseny online fordulóra és a Kárpát-medencei döntőre a FÖCIK központi feladatlapokat készít a versenykiírásban megadott forrásokra és szakirodalomra, illetve a középiskolai ismeretanyagra támaszkodva.

A VERSENY ÖT FORDULÓBÓL ÁLL:

- Élettelen természeti értékeink: Kő kövön megmarad** kőzetburokkal (belső erők, földtan, földtörténet, geofizika és bányászat stb.) kapcsolatos feladatok
- Nemcsak térkép e táj** térképészettel, geoinformatikával, tájföldrajzzal, a külső erők felszínformálásával és barlangokkal kapcsolatos feladatok
- Az időjárólástól a klímaváltozásig** légköri jelenségekkel, meteorológiával, klimatológiával, vízrajzzal, a földrajzi övezetességgel és a vonatkozó természettudományi ismeretekkel kapcsolatos feladatok
- A Kárpát-medence csodás tájai** Csoportfeladat, melyben a versenyző csapatok fel lesznek kérve, hogy készítsenek egy legfeljebb 1 perces „fiatalos” bemutató filmet és egy 4 perces kisfilmet a földrajzi/földtani környezetük bemutatásáról. A kisfilmek címe: „A Kárpát-medence csodás tájai és a saját település vagy tájegység neve”. A csapatok által benyújtott versenyfilmeket a Szervezők a FÖCIK honlapján közzé kívánják tenni.
- Döntő** Fizikai jelenléttel megrendezésre kerülő forduló

REGISZTRÁCIÓ: Minden, a versenyen részt vevő csapatnak az első fordulót megelőzően regisztrálnia kell a FÖCIK honlapján az ott leírt útmutató szerint. A nevezés ingyenes. A csapatok regisztrációját **2021. február 15. és 2021. április 15. között** várjuk. Határidőn túli regisztrációra nincs lehetőség!

A VERSENY ÜNNEPÉLYES MEGNYITÓJA: A Föld Napja rendezvényen kerül sor a Verseny ünnepélyes, sajtónyilvános megnyitására 2021. április 23-án a Magyar Bányászati és Földtani Szolgálat Stefánia úti „Art Geo” szecessziós palotájában (Budapest, XIV. ker. Stefánia út 14.).

A Föld Napja rendezvényre és a Verseny megnyitójára a FÖCIK honlapján lehet regisztrálni. A részvétel díjtalan, az utazás egyénileg történik, ehhez a Szervezők nem tudnak támogatást biztosítani.

1. KÁRPÁT-MEDENCEI TERMÉSZETTUDOMÁNYI VERSENY 2021

CSAPATOK: Egy-egy csapatot **3 diák** alkot, akiknek felkészítését felkészítő tanár támogathatja. A diákok **9–13. évfolyam**os tanulók lehetnek. A felkészítő tanárok nem vehetnek részt a feladatsorok megoldásában. A verseny során a csapatok – *indokolt esetben* – egyszer cserélhetnek maximum 1 csapattagot a Versenybizottság engedélyével.

AZ ONLINE FORDULÓK STRUKTÚRÁJA: Minden forduló két szakaszból áll: a **felkészülés**ből és a **feladatkitöltés**ből. A felkészüléshez a felkészítő anyagok az aktuális forduló teljes időszaka alatt, a forduló kezdetétől a végéig (*szombat 0 órától a következő péntek éjfélig*) lesznek elérhetőek. A feladatok kitöltésére, megoldásához az online felületen az adott hét csütörtök 0 órától péntek éjfélig lesz lehetőség. A fordulók feladatsorának megoldására az adott feladatsortól függően 45–90 perc áll rendelkezésre. A feladatsor kitöltését csak egyszer lehet elkezdni, de az egyes kérdésekre a választ a kitöltési idő befejezéséig vagy a feladatsor beküldéséig akár többször is lehet módosítani.

A FORDULÓK IDŐPONTJAI:

1. forduló **2021. április 24–30.**

2. forduló **2021. május 01–07.**

3. forduló **2021. május 08–14.**

4. forduló A kisfilmek feltöltési határideje: **2021. május 28.**

Döntő a „Geoforgatag” időpontjához igazítva, **2021. novemberében** kerül megrendezésre.

Helyszíne: Budapest, a Magyar Bányászati és Földtani Szolgálat Stefánia úti „Art Geo” palotája. A Döntőben részt vevő határon túli csapat(ok) utazási és szállás költségeit a Szervezők állják.

A VERSENY ISMERETANYAGA: Mind az online fordulók, mind a döntő a megadott forrásokra, szakirodalomra, illetve a középiskolai ismeretanyagra támaszkodik.

A VERSENYFILMEK MŰSZAKI PARAMÉTEREI: *fájlformátum:* mp4 vagy mov, *képarány:* 4:3 vagy 16:9, *tájolás:* fekvőkép
felbontás: minimum HD (1280×720), maximum full HD (1920×1080),
képkocka szám: minimum 30, maximum 60 fps.

FELADATOK PONTOZÁSA: Az online fordulók során egy-egy feladatlap megoldásával, illetve a kreatív feladattal elérhető maximális pontszám 50–50 pont, **összesen** tehát 4×50, azaz **200 pont.** A 12 csapatos Döntőbe a legmagasabb pontszámot elérő tizenegy csapat automatikusan bekerül. Amennyiben a legjobb 11 csapat között van határon túli csapat, úgy a legjobb 12-ikkel egészül ki a döntő, különben a legjobb határon túli csapattal. A döntőbe kerülésnél pontegyenlőség esetén a versenyfilmre kapott magasabb pontszám dönt. Az online fordulókon való részvétel feltétele a stabil- és széles sávú internetes kapcsolat, az online fordulók során bekövetkező műszaki problémák nem képezik jogorvoslati lehetőség alapját. A csapatok „tisztá lappal” indulnak a döntőben, tehát a kvalifikációs fordulók során szerzett összpontszám, vagy az ott elért sorrend nem kerül figyelembevételre. Az eredmények mindvégig nyilvánosan követhetőek lesznek, a feladatsorok megoldókulcsa is elérhetővé válik az egyes online fordulók után 5 munkanappal. Az online fordulók végeredménye és a **döntős csapatok névsora június 11-én** kerül kihirdetésre.

1. KÁRPÁT-MEDENCEI TERMÉSZETTUDOMÁNYI VERSENY 2021

A VERSENY DÍJAZÁSA A DÖNTŐN

az **első** helyezést elért csapat tagjai és a felkészítő tanáruk **fejenként 100 ezer Ft**,
összesen 400 ezer Ft összértékű elektronikai utalványban,
a **második** helyezést elért csapat tagjai és a felkészítő tanáruk **fejenként 75 ezer Ft**,
összesen 300 ezer Ft összértékű elektronikai utalványban,
a **harmadik** helyezést elért csapat tagjai és a felkészítő tanáruk **fejenként 50 ezer Ft**,
összesen 200 ezer Ft összértékű elektronikai utalványban,
a **legjobb kisfilm**et elkészítő döntős csapat tagjai és a felkészítő tanáruk **fejenként 25 ezer Ft**,
összesen 100 ezer Ft összértékű elektronikai utalványban,
az egyes **FÖCIK** taggyesületek és támogatóink tematikájához köthető feladatokban legmagasabb
összpontszámot elért csapatok az adott taggyesület vagy támogatóink **különdíj**ában részesülnek.

KAPCSOLAT: szakmai kérdésekben: szakmai@focik.hu
szervezési kérdésekben: szervezesi@focik.hu

JOGI KITÉTELEK: A Szervezők a COVID-19 pandémiával kapcsolatban fenntartják a jogot, hogy a kiírás feltételeit, időpontját vagy a döntő személyes megjelenéssel kapcsolatos kitételét megváltoztassák. A Szervezők mind a regisztráció, mind a verseny során a GDPR előírásokat maximálisan figyelembe fogják venni. A csapatok a nevezésükkel hozzájárulnak, hogy a versenyfilmeket a Szervezők a FÖCIK honlapján közzétegyék. A Szervezők a rendszeradatokat folyamatosan figyelik és értékelik. Esetleges visszaélések észlelése esetén a Versenybizottság az adott csapatot kizárja. A csapatok a nevezésükkel a versenyfeltételeket elfogadják.

SZERETETTEL VÁRJUK A NEVEZŐ ISKOLÁKAT, TANÁRAIKAT ÉS DIÁKJAIKAT.

Jó felkészülést és sikeres versenyzést kívánunk!

BUDAPEST, 2021. FEBRUÁR 1.

Zelei Gábor
okleveles geofizikus mérnök
a FÖCIK elnöke

Országos Geotermikus Rendszer

Nyilvánosan elérhető az Országos Geotermikus Rendszer (OGRe), az ország első interaktív geotermikus portálja

A Magyar Bányászati és Földtani Szolgálat 2020-ban készítette el az „Országos Geotermikus Rendszer”-t (OGRe), amely egységes szerkezetben, egy könnyen kezelhető és mindenki számára elérhető internetes felületen keresztül szolgáltat áttekinthető léptékű, hiteles és naprakész földtani, vízföldtani, geofizikai információkat adatokat az ország geotermikus energiavagyonával kapcsolatban magyar és angol nyelven: <https://map.mbfisz.gov.hu/ogre>.

Bízunk benne, hogy az itt található adatok nemcsak az újabb geotermikus projekteket előkészítő hazai és nemzetközi konzorciumok számára jelentenek fontos információkat, de segítik a szakterületi döntéshozók munkáját, támogatják a témában folyó felsőfokú oktatási tevékenységet, valamint számos érdekességgel szolgálnak minden, a geotermikus energia iránt érdeklődő számára.

A rendszer két fő részből áll: egy interaktív webes térképi rendszerből és tematikus modulokból.

A térképi rendszer alapvetően különböző, ebből a célból speciálisan szerkesztett országos térképek (pl. a legjelentősebb termálvízadó képződmények mélybeli elterjedését határoló földtani szintek, a mélybeli hőmérséklet-viszonyokat jellemző izotermatérképek, a különböző típusú potenciális geotermikus rezervoárok mélybeli elterjedését mutató térképek stb.); pontszerű elemek (pl. hévízkutak, egyéb fúrások, már megvalósult geotermikus projekthelyszínek stb.); illetve területi sokszögek (pl. termálvíztestek, koncessziós területek stb.) halmazából áll, amelyek különböző tematikus rétegcsoportokba rendezve tetszés szerint jeleníthetők meg, illetve kombinálhatóak egymással.

A portálon bemutatott térképek országos léptékben készült regionális modellek eredményeire épültek, így áttekinthető jelleggel bírnak egy-egy térség földtani-geotermikus adottságai tekintetében, ugyanakkor fel kell hívni a figyelmet arra, hogy nem helyettesítik egy-egy konkrét beruházás előkészítését és megvalósíthatóságát megalapozó részletes vizsgálatokat!

Ugyanakkor a rendszer részletes geofizikai felmértései (mégkutatottsági) térképsorozattal, illetve az 500 méternél mélyebb fúrások, valamint a szénhidrogén-kutató fúrások helyének feltüntetésével egyedülálló lehetőséget biztosít arra, hogy egy-egy terület további részletes kutatásához az eddig rendelkezésre álló információkról át-

tekintést adjon. További részletező információk a *Magyar Állami Földtani, Geofizikai és Bányászati Adattárban* érhetőek el.

Az egyes rétegcsoportok és ezen belüli rétegek általában az ott megjelenített információk alapadatait tartalmazzák. Ez alól kivételt képeznek a hévízkutak, ahol a rendszer összesen 1695 db hévízkútra tartalmaz az alapadatokon túlmenő részletes információt (pl. szűrőzött szakaszok mélysége és litológiája, vízszint, hozam, hőmérséklet, vízkémiai jelleg, hasznosítás módja), illetve a Borsod–Abaúj–Zemplén megyei pilotterület, ahol az egyes földtani fúrások egyszerűsített rétegsora, különböző geofizikai mérések (pl. 2D szeizmikus szelvények, mélyfúrás-geofizikai logok) képei is elérhetőek.

Az interaktív térképi részen túlmenően az OGRe 3 tematikus modult is tartalmaz, amelyek a geotermikus projektfejlesztést támogatják különböző szempontok szerint. A benchmarking modul 12 független, a jelenlegi termálvíz-hasznosítás gyakorlatának erősségeit és gyengeségeit jellemző indikátort tartalmaz, amelyek mindegyike egy adott képlet szerint számítható. A végeredményt öt kategóriába lehet sorolni, amely megmutatja, hogy a különböző vizsgált témakörökben (pl. engedélyezés, monitoring, termálkutak működése és hatékonysága, visszasajtolás, túltermelés stb.) milyen fokú erőfeszítés szükséges a jobb állapot eléréséhez. A döntési fa modul összesen 49 db igen/nem eldöntendő kérdéssel vezeti végig a használatát a projektfejlesztés teljes fázisában a négy legfontosabb témakörben: 1) geotermikus erőforrások, 2) piac, 3) engedélyek, 4) pénzügyi erőforrások és a válaszok függvényében listázza a főbb döntéseket és azok megbízhatóságának mértékét. A kockázatkezelés modul először információkat gyűjt a tervezett projektről 4 egymást követő egyszerű kérdőív alapján (általános információk, elérhető adatok / megkutatottság, rezervoártulajdonságok, fluidumtulajdonságok). Ezután az adott projekt fejlesztési szakasz kiválasztását követően a modul összegzi a javasolt kockázatkezelési módokat, amelyekkel a projektfejlesztés egyes fázisaiban felmerülő káresemények elkerülhetőek.

A portál tartalmával kapcsolatos bármilyen észrevételt, esetleges javításra vonatkozó javaslatot szívesen várunk az info@mbfisz.gov.hu címre!

Magyar Bányászati és Földtani Szolgálat

A Magyarhoni Földtani Társulat közleménye

Megjelent a „Kőbe zárt világok” c. filmsorozatunk újabb filmje

Kedves Tagtársak, Érdeklődők!

Társulatunk elnöksége 2020. évben elhatározta, hogy rövidfilmekben kívánja bemutatni a földtudományok jelentőségét a szélesebb társadalmi rétegek számára. A sorozat első filmjét decemberben adtuk közre, melynek címe:

Budapest felszínalatti vizei

(<https://www.youtube.com/watch?v=jHCt2wTI31U>)

A „Kőbe zárt világok” sorozat további filmjeit kéthetente tárjuk a nyilvánosság elé, a megjelent filmeket elérhetik a honlapon is (<https://foldtan.hu/hu/kisfilmek>)

1. Régi bányák új köntösben (<https://www.youtube.com/watch?v=6h5cmL3oo3I>)
2. Kárpát-medence vulkánjai
3. Stabilizotópok
4. Fosszilis energiahordozók
5. Dinók a Bakonyban
6. Vulkáni veszélyforrások
7. Budapest barlangjai
8. A bányászat jövője
9. Geotermia

Filmjeink nem csak a szakmának szólnak, népszerű ismeretterjesztő jellegüknél fogva alkalmasak a fiatalok, a felnőttek érdeklődésének felkeltésére is. Bízunk benne, hogy a földtudományok jelentőségét a járványhelyzetet követő gazdasági megújulásban a döntéshozók is felismerik.

Kérjük, lehetőség szerint terjesszék a filmeket szélesebb ismeretségi körükben, küldjék el tanárok, diákok számára!

Közreműködésüket ezúton is hálásan köszönjük!

Magyarhoni Földtani Társulat

Rendezvénynaptár (helyett)

Tisztelt Kollégák!

A jövőben elhagyjuk a *Magyar Geofizika* megszokott kalendáriumából a nem saját Egyesületünk által rendezett rendezvények listáját, mert ezeket sokkal bővebben megtalálhatják az interneten, ahogy azt előző számunkban már jeleztük (*Magyar Geofizika*, 61/3, 162.).

Egyesületünk következő rendezvénye:

A Magyar Geofizikusok Egyesületének rendes évi közgyűlését az Egyesület Elnöksége 2021. április 30-án 13.30 órai kezdettel hirdette meg. A közgyűlés helyszíne Budapest, XIV. kerület, Stefánia út 14. a Magyar Bányászati és Földtani Szolgálat díszterme.

Szerkesztőség

2020 – A siker éve



Sikerült báró Eötvös Lorándnak köztéri szobrot állítani Budapesten

Balszélen Rieger Tibor, aki megalkotta,
mellette, akiknek a siker köszönhető: Szabó Zoltán, dr. Baráth István és Pályi András
Köszönet érte!

MAGYAR GEOFIZIKUSOK EGYESÜLETE

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

E-mail: postmaster@mageof.t-online.hu; Honlap: www.mageof.hu

