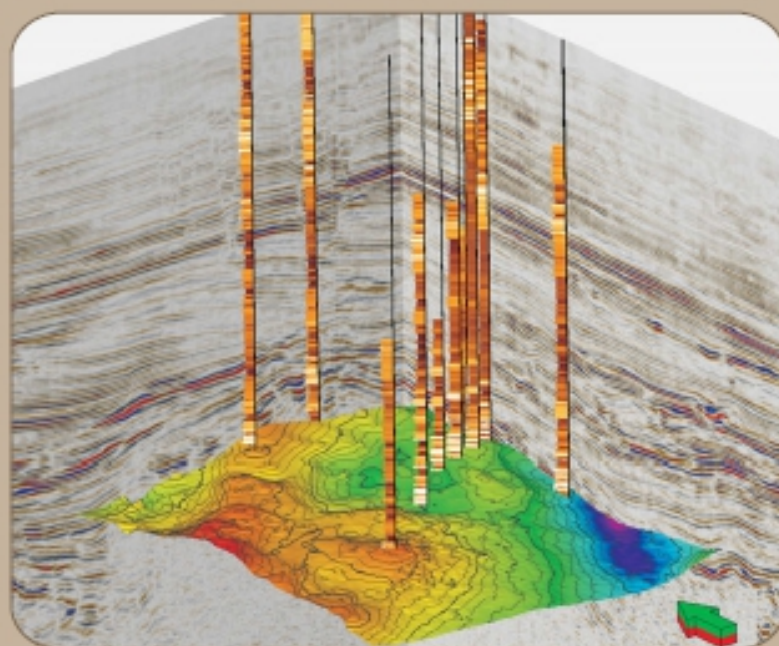


Földtani Közlöny



A Magyarhoni Földtani Társulat folyóirata
Bulletin of the Hungarian Geological Society



Budapest, 2020

150/4

Felelős kiadó

BUDAI Tamás, az MFT elnöke

Főszerkesztő

SZTANÓ Orsolya

Műszaki szerkesztőkBABINSZKI Edit
KOVÁCS Zoltán
BARTHA István Róbert,**Nyelvi lektor**

Philip RAWLINSON

SzerkesztőbizottságBUJTOR László, CSERNY Tibor, FODOR
László, PAPP Gábor, SZAKMÁNY György,
SZANYI János, TÖRÖK Ákos**Főtámogató**

Mol Nyrt.

TámogatókBaumit Kft., Biocentrum Kft., Colas
Északkő Kft., Elgoscar 2000 Kft.,
Geo-Log Kft., Geoproduct Kft.,
Geoteam Kft., Josab Hungary Kft.,
Mecsekérc Zrt., Mineralholding Kft.,
OMYA Hungária Kft., O&G
Development Kft., Perlit-92 Kft.,
Terrapeuta Kft., VIKUV Zrt., ANZO
Perlit Kft., Kvarchomok Bányászati és
Feldolgozó Kft.**A kéziratokat az alábbi felületen kérjük
benyújtani**

www.foldtanikozlony.hu

* * *

Responsible publisherTamás BUDAI,
President of the Hungarian Geological
Society**Editor-in-chief**

Orsolya SZTANÓ

Technical editorsEdit BABINSZKI
Zoltán KOVÁCS
István Róbert BARTHA,**Language editor**

Philip RAWLINSON

Editorial boardLászló BUJTOR, Tibor, CSERNY, László
FODOR, Gábor PAPP, György SZAKMÁNY,
János SZANYI, Ákos TÖRÖK**Sponsors**Mol Nyrt.
Baumit Kft., Biocentrum Kft., Colas
Északkő Kft., Elgoscar 2000 Kft.,
Geo-Log Kft., Geoproduct Kft.,
Geoteam Kft., Josab Hungary Kft.,
Mecsekérc Zrt., Mineralholding Kft.,
OMYA Hungária Kft., O&G
Development Kft., Perlit-92 Kft.,
Terrapeuta Kft., VIKUV Zrt., ANZO
Perlit Kft., Kvarchomok Bányászati és
Feldolgozó Kft.**Submission of manuscripts through**

www.foldtanikozlony.hu

Földtani Közlöny is abstracted and indexed in**Crossref.org****Scopus****GeoRef** (Washington),**Pascal Folio** (Orleans),**Zentralblatt für Paläontologie**

(Stuttgart),

Referativny Zhurnal (Moscow) and**EPA, MTA REAL** (Budapest)**Tartalom — Contents**

- VALLNER Zsolt, BAJNAI David, PÁLFY József: A ciklussztratigráfia és az asztro-
kronológia korszerű módszerei és alkalmazásuk. – *Modern methods of
cyclostratigraphy and astrochronology and their applications.* 489
- PÓSFAI Mihály: A Balaton üledékének ásványai. – *Minerals in the sediments of
Lake Balaton.* 511
- MINDSZENTY Andrea: A magyarországi bauxitok kutatásának rövid története
(1903–2020). – *The short history of exploration for bauxite reserves in
Hungary (1903–2020).* 529
- CZAUNER Brigitta, MÁDLNÉ SZÓNYI Judit: Szemelvények az elmúlt két évtized
ELTE-n végzett medenceléptékű hidrogeológiai kutatásaiból. – *Short over-
view of basin-scale hydrogeological research conducted at ELTE in the last
two decades.* 545
- LEMBERKOVICS Viktor, KISS Károly, VÁRY Miklós, KISS Balázs, KOVÁCS Gábor:
A jó, a rossz és a csúf? – avagy a szénhidrogén-kutatás dicső múltja, (még)
létező jelene és bizonytalan jövője a Pannon-medencében – *Szemle – The
good, the bad and the ugly? – or the past, the (still) existing present and the
uncertain future of the hydrocarbon exploration in the Pannonian Basin –
Review.* 571
- Rövid közlemény**
- KÖRMÖS, Sándor, LUKOCZKI, Georgina, SCHUBERT, Félix: *Indication of hydro-
carbon migration in the Western Mecsek Mountains evidenced by fluid
inclusion chemostratigraphy.* 611
- Hírek, ismertetések** (összeállította: CSERNY Tibor) 615

*Első borító: 3D szeizmikus adattömb és fúrások vizualizációja a Pannon-medence központi részéről – Tóth
Péter (OGD Central Kft.) szíveségéből.*

*Hátsó borító: Kovaalgák kvarcon, mellettük a tóból kivált Mg-tartalmú kalcit kisebbszemcséi, egy Sajkodon
kihelyezett üledécsapdából (SEM-felvétel).*

Budapest, 2020**ISSN 0015-542X**

Rövidített útmutató a Földtani Közlöny szerzői számára

Kérjük olvassa el részletes útmutatónkat a www.foldtanikozlony.hu weboldalon.

A Földtani Közlönybe a földtudományok széles köréből várunk a Kárpát–Pannon térség földtani felépítésével foglalkozó magyar vagy angol nyelvű kéziratokat. Magyar nyelvű cikkek esetében annak címét, kulcsszavait, összefoglalóját, az ábrák és táblázatok címét, feliratait angol nyelven is meg kell adni, angol nyelvű cikkek esetén fordítva. Az angol nyelvű szövegek elkészítése a szerző feladata.

A kéziratot bírálatra pdf formátumban, egyetlen fájlként kell benyújtani, a szöveg mögé sorrendben elhelyezett számozott ábraanyaggal. A fájl neve a szerző nevéből és a cikk témáját lefedő néhány szóból álljon (pl. *szujo_etal_villanyi_kavicsok*). Kéziratok a fenti honlapon keresztül küldhetők be. Bármilyen technikai probléma esetén forduljon a technikai szerkesztőhöz (piros.olga@mbfsz.gov.hu) vagy a főszerkesztőhöz (szitano.orsolya@gmail.com).

Az **értekezések** eddig publikálatlan adatokat, új eredményeket következtetéseket közölnek, széles tudományterületi képbe helyezve. A rövid közlemények célja az adatközlés, adatmentés, vagy az új eredmény gyors közzététele. A szemle széleskörű, szakmailag közérthető áttekintést nyújt egy tudományterület új eredményeiről, vagy kevésbé ismert, új módszereiről, annak alkalmazásáról. Vitákat a vitatott cikk megjelenésétől számított hat hónapon belül küldhető be. A vitatott cikk szerzője lehetőséget kap arra, hogy válasza a vitázó cikkel együtt jelenjen meg. A gyakorlati rovatba a földtani kutatással – bányászattal kapcsolatos kéziratok kerülnek, melyek eredménye nem elsősorban tudományos értékű, hanem a szakközösség tájékoztatását, szolgálja. **A tömör fogalmazás, az állításokat alátámasztó adatszolgáltatás, a szabatos szaknyelv használata és a nem specialista olvasók érdekében a közérthetőség mindegyik műfajban alapkövetelmény.**

A KÉZIRAT TAGOLÁSA ÉS AZ EGYES FEJEZETEK JELLEMZŐI (kötelező, javasolt)

a) Cím (magyarul, angolul) Rövid, informatív és tárgyira tördő, utal a fő mondandóra.

b) Szerző(k), munkahelye, postacímmel (e-mail cím)

c) Összefoglalás (magyarul, angolul) Kizárólag a tanulmány célját, az alkalmazott módszereket, az elért legfontosabb új eredményeket és következtetéseket tartalmazza, így önállóan is megállja a helyét. Hossza legfeljebb 300 szó. Az angol nyelvű összefoglaló lehet bővebb a magyarnál (max. 1000 szó).

d) Targyszavak (magyarul, angolul) Legfeljebb 8 szó / egyszerű kifejezés e) Bevezetés A munkához kapcsolódó legfontosabb korábbi szakirodalmi eredmények összefoglalása, és ebből következően a tanulmány egyértelműen megfogalmazott célja.

f) Anyag és módszerek A vizsgált anyag, esetleg korábról származó adatok, a mérési, kiértékelési eszközök és módszerek ismertetése. Standard eljárások esetén csak a hivatkozott módszertől való eltérést kell megfogalmazni.

g) Eredmények Az új adatok és kutatási eredmények ismertetése, dokumentációja ábrákkal és táblázatokkal.

h) Diskusszió A kapott eredményeknek a saját korábbi eredményekkel és a szakirodalmi ismeretekkel való összevetése, beágyazása a tágabb tudományos környezetbe.

i) Következtetések Az új következtetések tézisszerű, rövid ismertetése az eredmények és a diskusszió ismétlése nélkül.

j) Köszönetnyilvánítás

k) Hivatkozott irodalom Csak a szövegközi, az ábrákhoz és táblázatokhoz kapcsolódóan megjelenő hivatkozásokat foglalja magába (se többet, se kevesebbet).

l) Ábrák, táblázatok és fényképtáblák (magyar és angol felirattal) A szemléltetni kívánt jelenség, vagy összefüggés megértéséhez szükséges mennyiségű.

m) Ábra-, táblázat- és fényképmagyarázatok (magyarul és angolul) Az illusztrációk rövid, összefogott, tartalmában érdemi magyarázata.

FORMAI KÖVETELMÉNYEK

Értekezés, szemle maximális összesített **terjedelme** 20 nyomdai oldal (szöveg, ábra, táblázat, fénykép, tábla együttesen). Ezt meghaladó tanulmány csak abban az esetben közölhető, ha a szerző a többletoldal költségének térítésére kötelezettséget vállal. A rövid közlemények összesített terjedelme maximálisan 4 nyomdai oldal.

A **szöveg** doc, docx vagy rtf formátumban készüljön. Az alcímeknél ne alkalmazzanak automatikus számozást vagy ábécés jelölést, csak a tipográfiával jelezzék a címrendet. A hivatkozásokban, irodalomjegyzékben a SZERZŐK nevét kis kapitálissal, ősmaradványok faj- és nemzetségeit dőlt betűvel, fajok leíróit szintén kis kapitálissal kell írni. A kézirat szövegében az ábrákra és a táblázatokra számozásuk növekvő sorrendjében a megfelelő helyen hivatkozni kell.

A szövegközi **hivatkozások** formája RADÓCZ 1974, vagy GALÁCS & VÖRÖS 1972, míg három vagy több szerző esetén KUBOVICS et al. 1987. Több hivatkozás felsorolásakor ezek időrendben kövessék egymást. Az irodalomjegyzék tételei az alábbi minta szerint készüljenek, szoros ábécében, ezen belül időrendben álljanak. Kérjük a folyóiratok teljes nevének dőlt betűvel történő kiírását. Ezen kívül, ha a hivatkozott műnek van DOI száma, azt meg kell adni teljes URL formátumban. Hivatkozott egyedi kiadványok esetén a mű címét kérjük dőlt betűvel szedni. Magyar szerzők idegen nyelvű publikációi esetén a vezetőknév után vesszőt kell tenni.

CSONTOS, L., NAGYMAROSY, A., HORVÁTH, F. & KOVÁCS, M. 1992: Tertiary evolution of the intra-Carpathian area: A model. — *Tectonophysics* **208**, 221–241. [http://dx.doi.org/10.1016/0040-1951\(92\)90346-8](http://dx.doi.org/10.1016/0040-1951(92)90346-8)

JÁMBOR Á. 1998: A Tiszai nagyszerkezeti egység karbon üledékes képződményei rétegtanának ismertetése. — In: BÉRCZI I. & JÁMBOR Á. (szerk.): *Magyarország geológiai képződményeinek rétegtana*. MOL Rt. — MÁFI kiadvány, Budapest, 173–185.

VARGA A. 2009: A dél-dunántúli paleozoos–alsó-triász sziliklasztos kőzetek kőzettani és geokémiai vizsgálatának eredményei. — PhD értekezés, ELTE Kőzettan–Geokémiai Tanszék, Budapest, 150 p.

WEAVER, C. E. 1989: *Clays, Muds, and Shales*. — *Developments in Sedimentology* 44, Elsevier, Amsterdam, 819 p. [http://dx.doi.org/10.1016/s0070-4571\(08\)7036-0](http://dx.doi.org/10.1016/s0070-4571(08)7036-0)

Az **ábrákat** a szerzőknek kell elkészíteni, nyomdakész állapotban és minőségben a tükörméretben (170×240 mm) álló, vagy fekvő helyzetben beilleszthetően. A fotótábla maximális magassága 230 mm lehet. Az ábrákon a vonalvastagság 0,3 pontnál, a betűméret 6 pontnál ne legyen kisebb. Az illusztrációkat X4-nél nem frissebb CorelDraw ábraként, az Excel táblázatokat és diagramokat word vagy cdr formátumban tudjuk elfogadni. Egyéb esetben a fekete és színes vonalas ábrákat 1200 dpi felbontással, tif kiterjesztéssel, a szürkeárnyalatos fényképeket 600, a színes fényképeket 300 dpi felbontással, tif vagy jpg kiterjesztéssel kérjük beküldeni. A színes illusztrációkat a megfelelő nyomdai minőség érdekében CMYK színprofillal kérjük előállítani, ezért az online megjelenő pdf esetben előfordulhat némi színváltozás. A színes ábrák, fotótáblák nyomtatási költségeit a szerzőknek kell fedezniük. Ha a költséget a szerzők nem tudják vállalni, már benyújtáskor szürkeárnyalatos illusztrációkat használjanak.

A cikk benyújtásakor, kérjük a szerzőket, hogy **nevezzenek meg legalább négy olyan szakértőt**, akik annak tartalmáról érdemi véleményt adhatnak, és adják meg e-mail címüket. A bírálatot követően a szerzőtől egy vagy két hónapon belül várjuk vissza a javított változatot, ekkor **még mindig egyetlen összesített pdf-ben** (eredeti fájl név_átdolgozott megjelöléssel). E mellé kérünk csatolni egy **tételes jegyzéket**, melyben bemutatják, hogy lektoraik megjegyzéseit, tanácsait hogyan vették figyelembe, valamint esetleges egyet nem értésüknek milyen szakmailag alátámasztható indokai vannak.

A közlésre elfogadott kéziratok szövegét, ábráit, táblázatait egyesével kérjük a szerkesztőségi felület megfelelő menüpontját használva feltölteni. Tördelést követően a szerzők feladata a korrekktúrázás. Különlönyomatokat még külön költségt sem tudunk biztosítani.

A ciklussztratigráfia és az asztrokronológia korszerű módszerei és alkalmazásuk

A Milutin MILANKOVIĆ-féle cikluselmélet
matematikai alapjainak 100. évfordulójára.

VALLNER Zsolt^{1,2}, BAJNAI Dávid³, PÁLFY József^{1,4}

¹Eötvös Loránd Tudományegyetem, Általános és Alkalmazott Földtani Tanszék, 1117 Budapest, Pázmány Péter sétány 1/C

²MTA ATOMKI, Izotóp Klimatológiai és Környezetkutató Központ, 4026 Debrecen, Bem tér 18/c

³Institut für Geologie und Mineralogie, Universität zu Köln, Zùlpicher Str. 49b, 50674 Köln, Németország

⁴MTA–MTM–ELTE Paleontológiai Kutatócsoport, 1117 Budapest, Pázmány Péter sétány 1/C

Vallner Zsolt: email: zsolt.vallner@gmail.com, ORCID: 0000-0002-6060-061X

Bajnai Dávid: email: david.bajnai@uni-koeln.de, ORCID: 0000-0002-4053-5056

Pályfy József: email: palffy@elte.hu, ORCID: 0000-0001-9686-1849

Modern methods of cyclostratigraphy and astrochronology and their applications

Abstract

To measure time is fundamental in geology for the temporal context of various Earth processes, whereas reconstruction of past climate changes is of outstanding relevance today. One hundred years ago in 1920, Milutin Milankovitch laid down the mathematical foundations of the theory of astronomically forced changes in insolation of Earth's surface. Cyclostratigraphy, the science of reading the stratigraphic record of Milankovitch cycles, i.e., climate cycles driven by periodic changes in orbital parameters, both provides a means to measure geological time (astrochronology) and to reconstruct paleoclimate. Although the scientific literature of this field has experienced exponential growth recently, the application of its modern methods has remained limited in Hungary. The aim of this review is, therefore, to encourage and facilitate that the Hungarian stratigraphic community embrace cyclostratigraphic methods. We review the basic characteristics of precession, obliquity, and eccentricity cycles and their climatic effects. We list the lithological, paleontological, physical, and geochemical proxies that can be utilized as time series for cyclostratigraphic studies. We present the steps of data pre-processing, spectral analysis, cycle identification and interpretation, together with modes of visualization and construction of age models. Among the available software solutions, the free Acycle is recommended as a versatile and user-friendly choice. We review the history of cyclostratigraphic studies in Hungary, with attention to the earlier methods applied. A summary of selected international case studies seeks to provide examples of works with a focus on astrochronology in order to improve the calibration of the time scale, studies of cyclic deposits that reflect different sedimentary environments, and milestone papers that demonstrate the close ties with palaeoclimatology. Hopefully, increasing use of cyclostratigraphic methods in Hungary will lead to significant advances in stratigraphy, sedimentology and paleoclimate research.

Keywords: Milankovitch cycles, spectral analysis, stratigraphy, orbital forcing, palaeoclimate

Összefoglalás

A geológia számára alapvető a Föld folyamatai időbeliségének feltárása, a földtörténeti múltbeli változások között pedig ma kitüntetett jelentőségű az éghajlatváltozások megismerése. Éppen száz éve, 1920-ban fektette le Milutin Milankovitch a Földet érő napsugárzás csillagászatilag meghatározott változásainak matematikai alapjait. A Milankovitch-ciklusok, vagyis a Föld pályaelemeinek periodikus változásai által vezérelt klímacyklusok üledékes kőzetekben rögzült nyomainak vizsgálatával foglalkozó ciklussztratigráfia egyszerre nyújt lehetőséget a földtörténeti idő mérésére (asztrokronológia), illetve a paleoklíma rekonstrukciójára. Bár a szakterület nemzetközi irodalma igen gyors ütemben gyarapodik, korszerű módszereinek alkalmazása Magyarországon mindeddig szűk körű maradt, ezért elterjedését ezzel a szemlével kívánjuk segíteni. Áttekintést adunk a precessziós, tengelyferdeségi és excentricitási ciklusokról és a Föld éghajlatára gyakorolt hatásokról. Számba vesszük azokat a litológiai, paleontológiai, fizikai és geokémiai adatsorokat, amelyek a ciklussztratigráfiai elemzés alapjául szolgálhatnak. Lépésről lépésre tárgyaljuk az adatelőkészítést, spektrálanalízist, ciklusazonosítást és -értelmezést, valamint az eredmények ábrázolásának módjait, melynek végén kormodell állítható elő. Mindez különböző szoftverkörnyezetben történhet, például az ingyenesen elérhető és felhasználóbarát Acycle program segítségével. Képet adunk a magyarországi képződmények ciklussztratigráfiai vizsgálatának történetéről, kitérve a korábban alkalmazott módszerekre. Rövid nemzetközi kitékintésünk példákat ad az időskála pontosítását segítő asztrokronológiai alkalmazásokról, különböző üledékképződési környezetek ciklusos képződményeinek vizsgálatáról és a paleoklimatológiával való elválaszthatatlan kapcsolatról. Nem kétséges, hogy a modern ciklussztratigráfia módszereinek bővülő hazai alkalmazása további izgalmas rétegtani, szedimentológiai és paleoklimatológiai eredményekhez vezethet.

Tárgyszavak: Milankovitch-ciklusok, spektrálanalízis, rétegtan, éghajlati kényszer, paleoklíma

Bevezetés

Az üledékes kőzettestek litológiai, fizikai, geokémiai, paleontológiai és más sajátosságai a rétegsoron belül gyakran ciklusos mintázattal rendelkeznek. A ciklussztratigráfia célja a rétegsorokban észlelhető ciklusos változások felismerése, jellegének meghatározása, a ciklusos változásokat létrehozó folyamatok értelmezése elsősorban a rétegsorok korrelálása és képződésük időtartamának meghatározása céljából (STRASSER et al. 2007). Ezek közül a legfontosabb a Milanković-ciklusok, vagyis a Föld pályaelem-változásai-ból származó ciklusok vizsgálata (MILANKOVICH 1920). Azonban a ciklussztratigráfia tudományága ennél tágabb, hiszen számos olyan folyamat ismert, amely ciklusos rétegsorok kialakulásához vezet, pl. árapályciklusok (SZTANÓ 1995), El Niño-jelenség (KENNEDY & BRASSELL 1992) (*I. táblázat*). A ciklussztratigráfia segítségével nyerhető koradatot, azaz az egyes rétegsorok által képviselt földtörténeti idő számított hosszát az asztrokronológia hasznosítja (WEEEDON 2003, HINNOV & HILGEN 2012, HINNOV 2013). Mivel a kormeghatározás szempontjából a Milanković-ciklusok néhány tíz–százezer éves sávba eső periódusideje kiemelkedő jelentőségű, az asztrokronológia pedig az elmúlt évtizedekben rendkívül dinamikus fejlődő tudományterületté vált, tanulmányunkban a fő figyelmet ennek szenteljük.

A ciklussztratigráfia több mint másfél évszázados múltra tekinthet vissza (ADHÉMAR 1842). CROLL (1864) és GILBERT (1895) ismerték fel először, hogy a Föld keringésének változásai befolyásolhatják a különböző szélességi körökön és a különböző évszakokban a Földet érő napsugárzás mennyiségét (STRASSER et al. 2007, HILGEN 2010). Elméletük nem vált elfogadottá, mert azt számításokkal nem tudták alátámasztani. Évtizedekkel később, Milutin MILANKOVIC úttörő tanulmányában szolgált az első egzakt matematikai bizonyítékokkal (MILANKOVICH 1920), így 2020-ban a Milanković-ciklusok centenáriumát is ünnepelhetjük (CVIIA-

NOVIC et al. 2020). Még teljesebben mutatja be MILANKOVICH (1941) későbbi, közismertebb műve és BACSÁK (1940) tanulmánya a matematikai módszerekkel megalapozott összefüggést a Föld pályaelemeinek változásai és a besugárzás megoszlása között (MAJOR 2006). Az elmélet ezek után egyre elfogadottabbá vált (SCHWARZACHER 1947, 1954; FISCHER 1964). A ciklusos mintázatot mutató üledékek vizsgálata az 1970-es években kapott újabb lendületet a mélytengeri DSDP-fúrások által szolgáltatott folytonos adatok következtében, melyek új empirikus bizonyítékot adtak a negyedidőszaki klímaváltozásoknak (HAYS et al. 1976, IMBRIE & IMBRIE 1979, IMBRIE & IMBRIE 1980). A ciklussztratigráfia elnevezést FISCHER et al. (1990) vezette be. A szekvenciasztratigráfia megjelenése és térhódítása nyomán a ciklussztratigráfia hosszú időre összekapcsolódott ezzel a tudományterülettel (GOLDHAMMER et al. 1990, VAIL et al. 1991, NAISH & KAMP 1997, STRASSER et al. 1999, SCHLAGER 2005). Leegyszerűsítve, a bevetté vált módszer szerint a kutatók megszámozták, hogy az adott rendű szekvenciából hány található az általuk vizsgált rétegsorban, majd ezzel a számmal osztották a rétegsor által képviselt, ismert vagy becsült időtartamot. Az eredmény megadta, hogy egy adott rendű szekvencia mennyi időt reprezentál, és az így kapott periódusidő alapján párosították azt a valószínűsített ismert ciklusok, általában a Milanković-ciklusok egyikéhez.

A modern ciklussztratigráfia matematikai alapjait SCHWARZACHER (1975, 1992) fektette le, aki a korábban használt, bizonytalanabb módszer helyett jóval kvantitatívabb szemléletet vezetett be. A 2000-es évek elejére kialakuló modern ciklussztratigráfiához vezető úton további fontos mérföldkövet jelentettek az EINSELE et al. (1991) és DE BOER & SMITH (1994) által szerkesztett kötetek, melyekben a szerzők a ciklusos üledékek leíró vizsgálatát alapozták meg. Az igazi áttöréshez azonban elsősorban a geomatematika és a számítástechnika fejlődésére volt szükség. A 90-es évektől kezdődően számos, a ciklikus rétegsorokból nyert idősorok matematikai, statisztikai vizsgálatára hivatott módszer fejlődött párhuzamosan, egymástól függetlenül is. Meghatározó jelentőségű a geokémiai módszerek fejlődése is, melyek eredményeiből pontos és nagy felbontású adatok képezhetők. Ezek segítségével sok esetben a szabad szemmel látható ciklicitást nem mutató üledékekből is kimutathatóak ciklusok. Óriási előrelépést jelentett továbbá a csillagászati modellek folyamatos fejlődése és a ciklusokat létrehozó, irányító természetes folyamatok egyre pontosabb megismerése. A modern ciklussztratigráfia először a ciklikus változások meglétét azonosítja az üledékes rétegsorokban, majd ezeket frekvenciájuk és periódusuk segítségével statisztikai módszerekkel felelteti meg az ismert időtartamú ciklusoknak. Így abból, hogy egy adott frekvenciájú ciklus periódusa a rétegsorban hányszor ismétlődik és ennek a ciklusnak mi a periódusideje, kiszámítható a rétegsor képződésének időtartama. Ezt az eljárást alkalmazza az asztrokronológia, melynek a célja nem csupán a ciklusok létének bizonyítása, hanem az adott rétegsor által reprezentált időtartam meghatározása. A ciklussztratigráfiából levezetett asztrokronológia ezáltal a geológiai kormeghatározás fon-

I. táblázat. A ciklusos folyamatok időtartama és oka
Table 1. Cycles in the geologic record

Időskála	Esemény
másodperc	hullámzás
nap	árapály
hét	szökőár- és vakárciklusok
hónap	évszakok váltakozása
év	El Niño
10 év	napciklusok
1000 év	Dansgaard-Oeschger ciklusok
10.000 év	Milanković-ciklusok (precesszió, tengelyferdeség)
100.000 év	Milanković-ciklusok (excentricitás)
1.000.000 év	nagy pályaelem ciklusok (pl. 9 millió éves excentricitás)

tos eszközévé vált. A ciklussztratigráfia továbbá alkalmas lehet az üledékbehordás mértékének és változásainak meghatározására, vagy más módszerekkel nem észlelhető hiátusok kimutatására is (WEEDON 2003, HINNOV & HILGEN 2012, HINNOV 2013).

A ciklussztratigráfia művelésében új kihívást jelent a számítástechnika rohamos fejlődésének köszönhetően fejlesztett számos algoritmus és program közül a célnak legjobban megfelelőek és legmegbízhatóbbak kiválasztása, valamint a modern, matematikai alapokon nyugvó módszerek reprodukálhatóságának és eredményeik hitelességének bizonyítása. Ennek érdekében végezték el azt a kísérletet, melyben a szervezők mesterségesen generált adatsorokat adtak át a résztvevőknek, melyekbe zajjal terhelt ciklusos jeleket kódoltak (SINNESAEI et al. 2019). A résztvevők ezeket azt feltételezve kapták meg, hogy valódi, természetes rétegsorok adatairól van szó. A teszt arra a meglepő eredményre vezetett, hogy a megoldások átlaga minden esetben visszaadta az eredetileg kódolt jelet, valamint a kevésbé pontos megoldások hibája is elfogadhatónak bizonyult. A teszt kimutatta továbbá, hogy az eredmények pontossága nem függ számottevően a kutató tapasztaltságától. Tehát a ciklussztratigráfia gyorsan és hatékonyan tanulható, valamint az adott problémának megfelelő módszer alkalmazása esetén az egyes módszerek eredményei között nincs számottevő különbség.

Az utóbbi évtizedek során a ciklussztratigráfia önálló tudományterületté fejlődött, mely egyre inkább elfogadottá vált, és módszereit egyre szélesebb körben használják. Eredményei már eddig is rengeteg fontos új ismerethez vezettek, módszertana pedig továbbra is folyamatosan fejlődik. Mindezek ellenére Magyarországon mindeddig kevés tanulmány született a szakterület modern eszköztárának alkalmazásával. Dolgozatunk célkitűzése ezért a ciklussztratigráfia és asztrokronológia alapjainak, korszerű módszereinek és alkalmazásainak összefoglalása, meghonosításuk ösztönzése érdekében.

A Milanković-ciklusok

Milanković-ciklusoknak nevezzük a Föld bizonyos pályaelem-paramétereinek periodikusan bekövetkező változását (WEEDON 2003, HINNOV & HILGEN 2012, HINNOV 2013). A kb. 20-tól 405 ezer évig terjedő periódusú Milanković-ciklusoknál léteznek nagyobb (akár 9 millió vagy 36 millió éves hosszúságú), ún. nagy pályaelem ciklusok (*grand orbital cycles*) (MARTINEZ & DERA 2015, BOULILA 2019) és a Milanković-ciklusoknál kisebb, részben szintén pályaelem-paraméterekhez köthető szub-Milanković-ciklusok is, de ezek jelentősége kisebb (WEEDON 2003), tárgyalásuk túlmutatna ennek a tanulmánynak a keretein (*I. táblázat*). A Föld három pályaeleme a Nap körüli keringési pálya ellipszisének lapultsága (excentricitása), a Föld forgási tengelyének ferdesége a keringés síkjához képest, valamint egy összetett mutató, a precesszió (*I. ábra*). A pályaelemek minden időpillanatban számszerűsíthetőek a pályaelem-

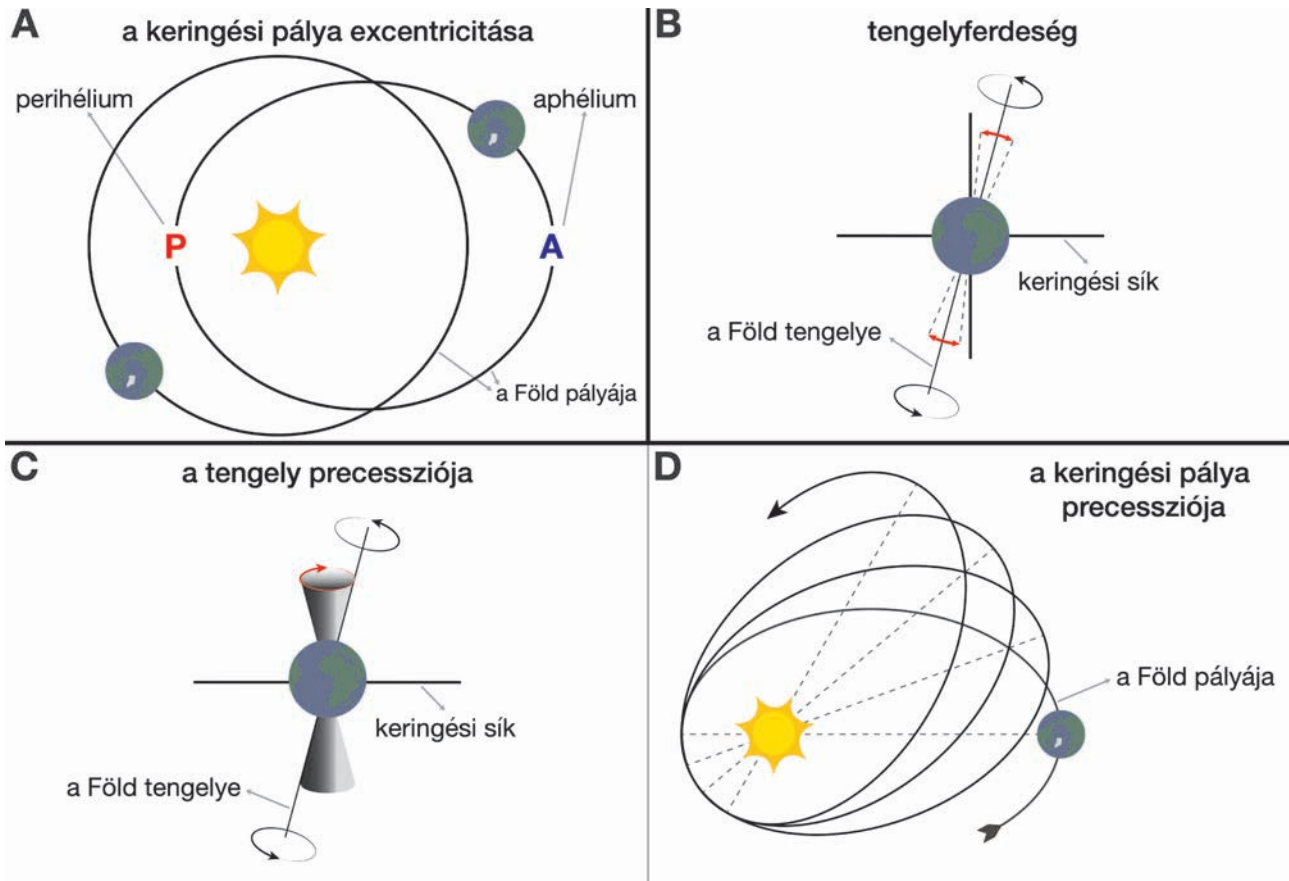
paraméterek révén. Ezek azonban nem állandóak, a Naprendszer égitestei közötti gravitációs kölcsönhatások következtében a földtörténet során folyamatosan, kváziperiodikusan változnak. Ahogy több pályaelem, úgy több pályaelem-paraméter ciklus is létezik, melyek periódusa eltérő hosszúságú, és relatív teljesítményük sem azonos. A Milanković-ciklusok alatt három ilyen ciklust értünk (WEEDON 2003, HINNOV & HILGEN 2012, HINNOV 2013).

A Föld pályájának excentricitása, vagyis lapultsága a keringési elliptikus pálya középpontja és egyik fókuszpontja közötti távolságnak, valamint az ellipszishez tartozó fél nagytengely hosszának hányadosaként adható meg, kb. 0–0,07 között változik (*I. ábra, A*). A Milanković-ciklusokon belül két fő excentricitási ciklust, rövid és hosszú excentricitást különítünk el. A hosszú excentricitás a Jupiter és a Vénusz gravitációs kölcsönhatásából adódik. Mivel a Jupiter tömege a többi bolygóéhoz, így a Vénuszéhoz képest is óriási, így ennek a ciklusnak a 405 ezer éves periódusa kvázi állandónak tekinthető legalább az elmúlt 250 millió évben. Ezzel szemben a rövid excentricitás periódusa kevésbé stabil, de jó közelítéssel 100 ezer év körül mozog. Ez a hossz azonban sokkal inkább több különböző relatív teljesítményű ciklus átlagának tekinthető, amelyek periódusideje ma 131 ezer, 124 ezer, 99 ezer és 95 ezer év, melyek közül csak a 124 ezer és 95 ezer év periódusú ciklusok jelentősek (LASKAR et al. 2004, HINNOV & HILGEN 2012, HINNOV 2013).

A tengelyferdeség paramétere az ekliptika síkjára állított merőleges és a forgástengely által bezárt szög (*I. ábra, B*). A Föld esetében ennek értéke 22–24,5° között változik, a ciklusait a Hold Föld körüli keringése stabilizálja. A tengelyferdeség nagy felbontás mellett szintén több kisebb ciklusból adódik össze, melyek közül teljesítmény tekintetében két, közelítően 40 ezer éves ciklus emelkedik ki (LASKAR et al. 2004, HINNOV & HILGEN 2012, HINNOV 2013).

A precessziós index a korábban említetteknél összetettebb paraméter. A Föld forgástengelyének az ekliptikához viszonyított „búgócsigaszerű” mozgása (*I. ábra, C*) ugyanúgy szerepet játszik benne, mint a Föld keringési pályájához tartozó nagytengely rotáló mozgása (*I. ábra, D*). Előbbi az északi sarkról nézve az állócsillagokhoz képest óramutató járása szerint billeg körbe, míg utóbbi szintén az állócsillagokhoz képest óramutató járásával ellentétesen fordul körbe, minek következtében folyamatosan változik a Föld pályájának térbeli elhelyezkedése az állócsillagokhoz képest. Az így származtatható pályaelem-paraméter ciklusainak periódusidőit ma jó közelítéssel 20 ezer év körül mozognak, a két domináns precessziós ciklus kb. 23,5 ezer és 19 ezer éves periódusidővel bír (LASKAR et al. 2004, HINNOV & HILGEN 2012, HINNOV 2013).

A Milanković-ciklusok régmúlta történő kiszámítása a csillagászati modellek egyenleteinek megoldása (*astronomical solution*) segítségével történik. Többfajta ilyen modell létezik, mert eltérő, hogy az egyes modellek milyen földtörténeti időtávlatban tekinthetőek megbízhatóknak, valamint, hogy az egyes kutatók hány tényezőt és milyen tényezőket vesznek figyelembe a Föld egykori mozgásának rekonstruálásához és ezeket milyen pontosan képesek meg-



1. ábra. A Föld pályaelemei. (A) A földpálya excentricitása. A Föld keringési pályájának a Naphoz legközelebb eső pontját perihéliumnak (piros „P”-vel jelölve), a Naptól legtávolabb eső pontját pedig aphéliumnak (kék „A”-val jelölve) nevezzük. (B) A tengelyferdeség. A precesszió két komponense, (C) a forgástengely „búgócsigaszerű” mozgásához kapcsolódó komponens és (D) a földpálya nagyfőtengelyének, vagyis az ekliptika síkjának mozgásához kapcsolódó komponens

Figure 1. The orbital parameters of Earth. (A) The eccentricity of the orbit. The point of the Earth's orbit closest to the Sun is called perihelion (marked by a red "P"), and the point farthest from the Sun is called aphelion (marked by a blue "A"). (B) The obliquity. The two components of precession are (C) the component related to the gyroscope-like motion of the axis and (D) the component related to the motion of the semi-major axis of the orbit, i.e., the plane of the ecliptic

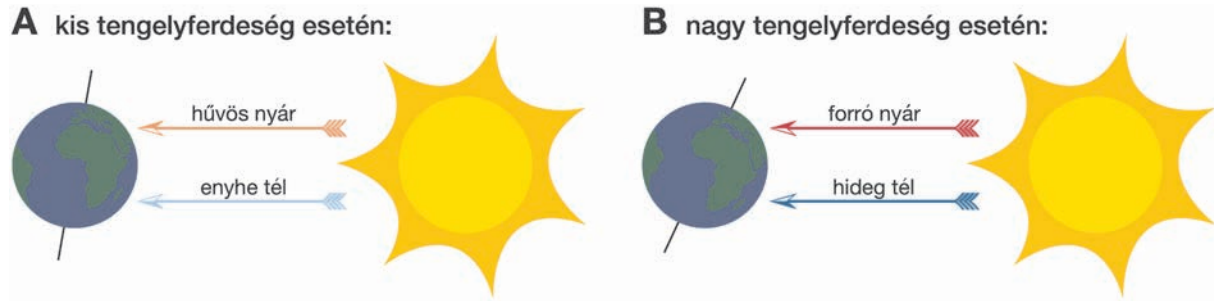
becsülni. A jelenleg legprecízebbnek tekintett és legszélesebb körben használt csillagászati modellekre a La2004 és La2010 rövidítéssel szokás hivatkozni (LASKAR et al. 2004, LASKAR et al. 2011). Az utóbbi időben több egyéb modell is megjelent, mint pl. a ZB17a vagy a ZB18a modell (ZEEBE 2017, ZEEBE & LOURENS 2019).

A paraméterek és így a ciklusok is, a viszonylag stabil hosszú excentricitás kivételével, a jelenlegi modellekkel maximum 50 millió évre visszamenőleg rekonstruálhatóak teljes biztonsággal. Vagyis az utolsó 50 millió évre a csillagászati modellek nagy megbízhatósággal és pontossággal képesek kiszámítani a Milankovič-ciklusokat, míg ennél korábbra az eredmények kevésbé tekinthetőek pontosnak, nagyobb a hiba lehetősége. Az 50 millió éves határ áttörését jelenleg sok tényező hátráltatja. Ilyen a bolygók forgása következtében bekövetkező kilapulás és dinamikus alakváltoztatás, a sarki jégsapkák megjelenése és elolvadása, illetve ezek bizonytalan ismerete a régmúltra nézve, az árapályjelenség és nem utolsósorban a Naprendszer kaotikus viselkedése (LASKAR et al. 2004, LASKAR et al. 2011, HINNOV & HILGEN 2012, HINNOV 2013).

A Milankovič-ciklusok hatása az éghajlatra és az üledékes rendszerekre

A Föld pályaelem-paramétereinek Milankovič-ciklusok szerinti változása befolyásolja a Föld atmoszférájának tetejét elérő, a Naptól származó besugárzás mennyiségét és térbeli eloszlását, ami az éghajlatra is hatással van. A pályaelemek változásainak klímára gyakorolt hatását nézve a tengelyferdeség szerepe érthető meg a legegyszerűbben. Mindkét féltéken annak nyarán a Naptól érkező sugarak meredekebb szög alatt esnek be a Földre, mint ugyanakkor az ellentétes féltéken, ahol ekkor épp tél van. Minél nagyobb a tengelyferdeség szögértéke, annál nagyobb lesz a különbség az északi és déli féltékére érkező napsugarak beesési szöge között az adott évszakban, ezáltal az évszakok közötti különbségek élesednek (2. ábra) (BERGER & LOUTRE 1994).

Az excentricitás és a precesszió összekapcsolt módon hat a klímára (3. ábra). Mivel a Nap nem a Föld ellipszis alakú pályájának középpontjában, hanem az egyik gyújtópontjában helyezkedik el, ezért a Föld keringése során napközeli (perihélium) és naptávolsági (aphélium) helyzetbe kerül (1. ábra). Az ellipszis alakú pálya lapultsága, vagyis az ex-

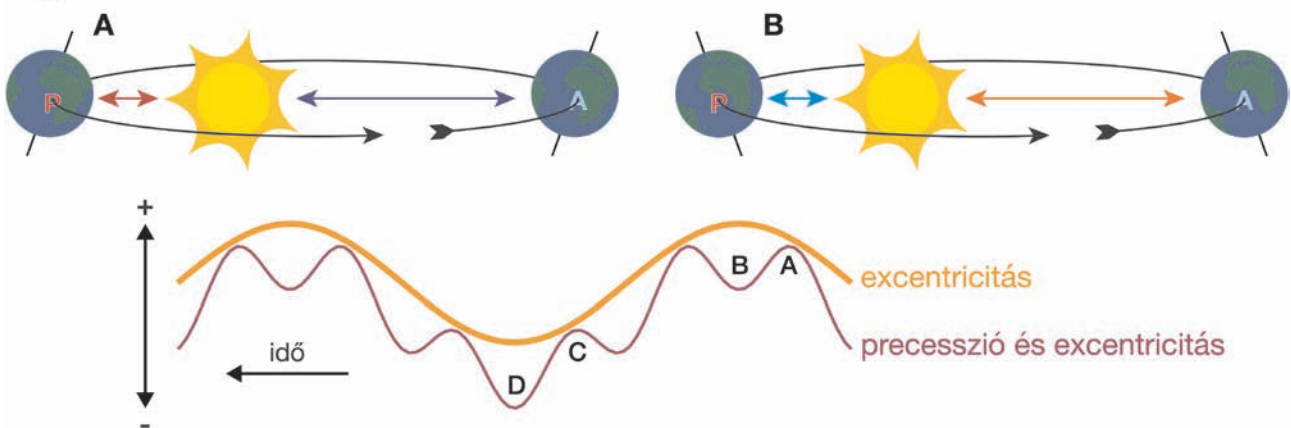


2. ábra. A tengelyferdeség hatása a klímára
 Figure 2. Impact of Earth's obliquity on the climate

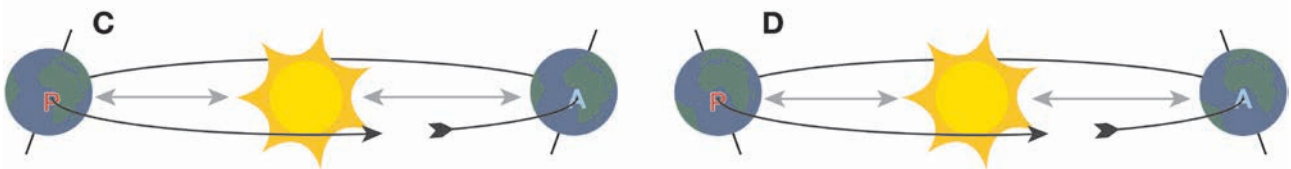
centricitása befolyásolja a Nap–Föld távolság mértékét a Föld keringése során, így a peri- és aphélium idején is. A besugárzás erőssége a Nap–Föld távolságtól függ. Minél kisebb a távolság, annál erősebb a besugárzás. A precesszió azt befolyásolja, hogy az adott féltekén melyik évszak következik be perihéliumban és aphéliumban. Ez azért fontos, mert például, ha az északi félteke nyara perihéliumban következik be, akkor a nyár melegebb, „nyáriásabb” lesz, míg

ugyanakkor a déli félteke tele enyhébb, kevésbé lesz „téli” (3. ábra, A). Ugyanez történik megfordítva a naptávoli pozícióban is. Ha az északi féltekén a nyár napközelen következik be, akkor naptávolban tél lesz, míg a déli félgömbön nyár. Az északi féltekén a Nap távolsága miatt a tél hidegebb, „téliesebb” lesz, míg a déli félteke nyara hűvös, kevésbé „nyáriás” lesz. Pontosán fél precessziós ciklussal (ami jelenleg kb. 11 ezer év) később az északi félteke tele fog bekö-

nagy excentricitás esetén:



kis excentricitás esetén:



3. ábra. Az excentricitás és a precesszió együttes hatása az éghajlatra. A precessziótól függ, hogy melyik féltekén milyen évszakban éri el a Föld a peri- (piros „P”-vel jelölve), vagy aphéliumi (kék „A”-val jelölve) helyzetet, míg ezekben a pontokban Nap–Föld távolságot az excentricitás határozza meg. Az A) esetben az északi félteke nyara a perihéliumban, tele az aphéliumban van, ami forróbb nyarat és hidegebb telet eredményez. A B) esetben az északi félteke tele a perihéliumban, nyara pedig az aphéliumban következik be, ami enyhébb télhez és hűvösebb nyárhoz vezet. A C) és D) esetekben, kis excentricitás idején, a közel kör alakú pálya miatt nincsen nagy különbség a Nap–Föld távolságában aphélium és perihélium között. Ekkor az évszakok nyáriás és téliés vonásainak sem erősítésére, sem pedig tompítására nem kerül sor (MARTÍNEZ-BRACERAS et al. 2017 alapján)

Figure 3. The combined effect of eccentricity and precession on the climate. The precession controls both the hemisphere and the season at the time when the Earth reaches the peri- (marked by a red „P”) or aphelion (marked by a blue „A”), whereas the eccentricity determines the Sun–Earth distance at these points. In case A), the summer of the northern hemisphere is in the perihelion and winter is in the aphelion, which results in a hotter summer and a colder winter. In case B), the winter of the northern hemisphere occurs in the perihelion and the summer occurs in the aphelion, which leads to a milder winter and a cooler summer. In cases C) and D), at times of low eccentricity, due to the nearly circular orbit, there is no significant difference in the Sun–Earth distance between aphelion and perihelion. At such configuration, the summer and winter features of the seasons are neither strengthened nor dampened (Inspired by MARTÍNEZ-BRACERAS et al. [2017])

vetkezni a perihéliumban és az északi félteke nyara az aphéliumban (3. ábra, B). A hatások ekkor a két félgömbre nézve pont megfordulnak az előzőekben leírtakhoz képest. Minél nagyobb az excentricitás értéke, ezek a különbségek annál jobban kiéleződnek, annál nagyobb a precesszió hatásainak amplitúdója. Kis excentricitás esetén az évszakok közötti különbség alacsony (3. ábra, C–D). A két paraméter együttes, a klímára gyakorolt hatását nevezik szezonálisnak is, hiszen tőlük függ, hogy a nyarak mennyire „nyáriak”, a telek pedig mennyire „téliések”, azaz mennyire erős a kontraszt az egyes évszakok között (BERGER & LOUTRE 1994, MARTÍNEZ-BRACERAS et al. 2017).

Összefoglalva, az excentricitás a Föld–Nap távolságot és így a besugárzás mértékét befolyásolja, a tengelyferdeség a besugárzás beesési szögét, így annak szélesség szerinti eloszlását határozza meg, a precesszió pedig a Föld pályájához képest az évszakok időzítését irányítja. A Milanković-ciklusok vizsgálatakor figyelembe kell venni az adott rétegsor képződésének egykori földrajzi szélességét, mivel az excentricitás, a tengelyferdeség és a precesszió dominanciája a szélesség függvényében változik. Míg az alacsony szélességek precessziódomináltak, vagyis klímájukra a precesszió és az excentricitás sokkal nagyobb hatással bír, addig a magasabb szélességek inkább a tengelyferdeségi ciklus által domináltak, ennek a ciklusnak sokkal nagyobb a hatása az éghajlatukra (BERGER & LOUTRE 1994, WEEDON 2003, HINNOV & HILGEN 2012, HINNOV 2013). Előfordulhat azonban, hogy az óceán és a légkör áramlásainak közvetítésével a tengelyferdeség dominanciája az alacsonyabb szélességek felé is lehúzódik (D'ARGENIO et al. 2004).

Mivel a pályaelemciklusok jelentősen befolyásolják az éghajlatot, beleértve az éghajlati övek elrendeződését is, így áttételes hatással vannak az üledékképződést meghatározó számos paraméterre, amelyeknek köszönhetően jelük megőrződhet az üledékes kőzetrétegekben. A Milanković-ciklusok hatást gyakorolnak a légköri hőmérsékletre, illetve cirkulációs rendszerekre, ami szabályozza a víztömegek felszíni hőmérsékletét. Ezek a hatások továbbgyűrűznek az óceáni cirkulációs rendszerekre, és a szárazföldön is változásokat idéznek elő a csapadék mennyiségében és évszakos, valamint területi eloszlásában. Az éghajlat és a cirkulációs rendszerek megváltozása tükröződik többek között a folyók által szállított víz mennyiségében, a gleccserek jégtömegének mennyiségében, valamint a szelek erősségében és irányában. Ezek a tényezők, kiegészülve a felszíni növényborítottság változásaival, illetve a mállás intenzitásában és minőségében bekövetkező változásokkal, erősen befolyásolják az üledékgyűjtőkbe érkező üledék mennyiségét és összetételét. A folyók által az üledékgyűjtőkbe szállított édesvíz és tápanyag mennyisége, az evaporáció, valamint az atmoszféra kölcsönhatása vízkémiai változásokat idéz elő, amelyek megőrződhetnek a biogén és nem biogén eredetű üledékek elem- és izotópösszetételében, geokémiai jeleket hozva létre (STRASSER et al. 2007). Emellett ezek a változások a bioszférára is hatással vannak, befolyásolva egyebek közt a plankton és bentosz szervezetek karbonáttermelését és az elsődleges biológiai produkciót.

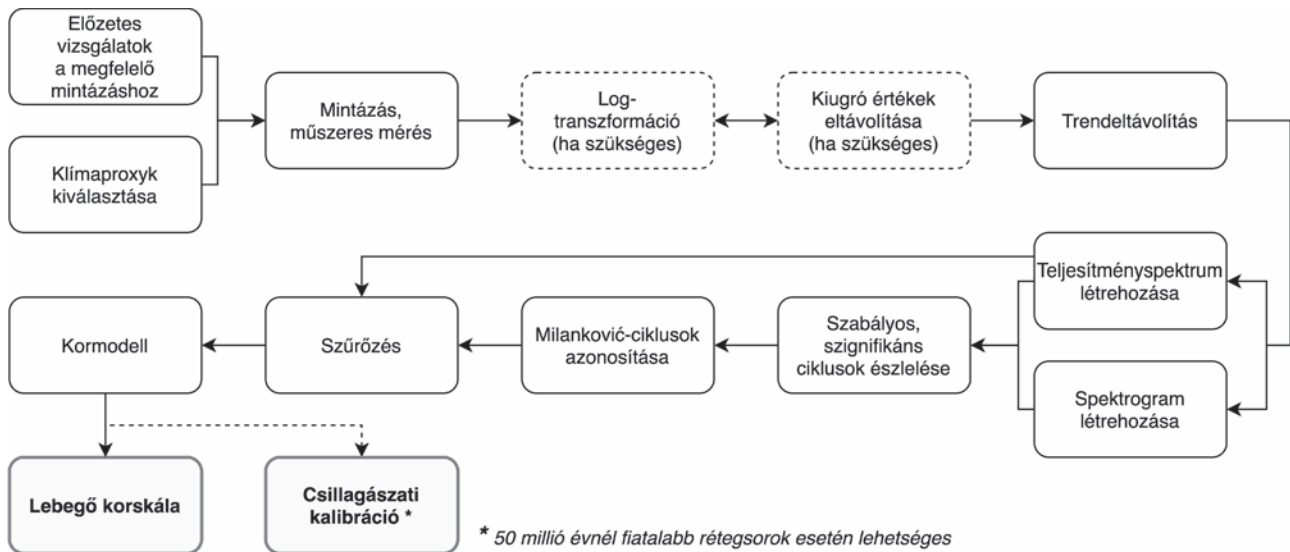
Fontos tényező továbbá az euszatikus tengerszint változása, mely szintén kapcsolatban állhat a pályaelem ciklusokkal. Jégkorszakok idején a sarki jégsapkák, illetve a gleccserek jégtömegének változása, míg melegebb periódusokban a magashegységi gleccserek olvadása és növekedése, az óceáni víztömegek hőtágulása és összehúzódnása (STRASSER et al. 2007), valamint az akvifer-eusztázia (WENDLER et al. 2016) szabályozhatja ezt. Az üledékes és biológiai rendszerek tehát érzékenysüktől függően rendkívül szerteágazó és összetett módokon őrizhetik meg a Milanković-ciklusok jelét.

A ciklussztratigráfiai vizsgálat menete

A ciklussztratigráfiai vizsgálat megkezdése előtt tisztázandó kérdés a vizsgált rétegsor hozzávetőleges kora, ugyanis a csillagászati modellek által megszabott 50 millió éves határ miatt némileg más protokoll vonatkozik az ennél fiatalabb, illetve idősebb rétegsorokra (LASKAR et al. 2011, HINNOV 2013). Az 50 millió évnél idősebb szelvényekben is vizsgálható a Milanković-ciklusok megőrződése, azonban míg a kb. 50 millió évnél fiatalabb rétegsorok esetében ún. csillagászati kalibráció (*astronomical tuning*) is lehetséges és ezáltal a ciklusok segítségével számszerű kor is megadható, addig az ennél idősebb rétegsorok esetén csak ún. lebegő korszála (*floating timescale*) hozható létre (4. ábra). A csillagászati kalibráció alkalmazása során először célgörbét (*target curve*) választunk, ami lehet valamelyik csillagászati modell vagy ma már egyre gyakrabban a nem túl távoli múltra szintén pontosan kiszámítható besugárzási görbe. A rétegsorból kinyert adatsort a célgörbéhez hasonlítjuk. Többféle statisztikai módszer áll rendelkezésre a célgörbével való legjobb egyezés megállapítására vagy a megfelelő szintű egyezés hiányában a Milanković-ciklusok meglétének elvetésére. A célgörbe ismert korú pontjainak segítségével a vizsgált adatsor pontjaihoz számszerű kor kapcsolható. Ezzel szemben a lebegő korszála esetén csak az egyes pontok közötti időkülönbség, vagyis az üledékképződés időtartama számítható a ciklusok segítségével, amihez számszerű kor nem rendelhető. Amennyiben egy pont kora független módszer (pl. radiometrikus kormeghatározás) segítségével ismert, ezáltal a lebegő korszála lehorgonyozásra kerül, akkor az időkülönbségek segítségével minden pont kora kiszámítható, feltéve hogy folytonos rétegsorról van szó (WEEDON 2003, HINNOV 2013). Mivel a módszertan a két esetben csak az utolsó lépésben tér el, ezért a következőkben mindaddig együtt mutatjuk be az 50 millió évnél idősebb és fiatalabb rétegsorok feldolgozását.

Vizsgálható adatsorok és adatelőkészítési műveletek

Az éghajlat Milanković-ciklusokhoz kapcsolható kvázi-periodikus változásai nemcsak a rétegek vastagságának és összetételének változásaiban, hanem az egyes klímaelemek változására utaló jellegek, ún. klímaproxyk jelében is meg-



4. ábra. A ciklussztratigráfiai és astrokronológiai vizsgálatok folyamatábrája. Melléktermékként meghatározható az üledéklérakódási sebesség és annak változásai
 Figure 4. Flowchart of cyclostratigraphic and astrochronological studies. The sedimentary rate and its changes can be determined as a by-product

örződhetnek. A klímaproxyk olyan változók, melyek az egykori éghajlat bizonyos tényezőire (pl. hőmérséklet, csapadék stb.) engednek közvetett módon következtetni (WEEDON 2003, MARTINEZ 2018, LI et al. 2019b).

A ciklussztratigráfiában számos klímaproxyt és egyéb, az üledékképződési folyamatokkal szoros kapcsolatban álló proxyt használnak. Ilyen a litofációs, a rétegvastagság, a kőzet színe és fényessége, a szemcseméret, a porozitás és a permeabilitás, az agyag vagy por mennyisége, a természetes gammasugárzás, az agyagfrakció ásványos összetétele, a titanomagnetit tartalom, a mágneses szuszceptibilitás, a Fe-tartalom, a diagenetikusan inert, elsősorban agyagokhoz kapcsolódó elemek, pl. K, Rb vagy Ti, a ritkaföldfémek, a Mo-tartalom, az Al/Ti arány, a nem karbonát frakció mennyisége, az U, Th, Th/U, Th/K arány, a redox-érzékeny elemek, pl. Mn, a Si és a szerves eredetű széntartalom, a szén és oxigén stabilizotóp-összetétele ($\delta^{13}\text{C}$ és $\delta^{18}\text{O}$), a Sr és Mg, a karbonáttartalom, a palinológiai adatok, a mikrofosszília közösségek és a mikrofossziliák gyakorisága, valamint az egyéb ősmaradvány, akár nyomfosszília közösségek. A felsoroltak közül több proxy is egy másikkal összefüggésben változik, pl. a természetes gamma jele utal a K-tartalomra, ami viszont az agyagtartalommal korrelálhat, így az egyes proxyk között átfedés tapasztalható. A vizsgált proxyk kiválasztásakor tehát fontos annak figyelembevétele, hogy az egyes proxyk milyen környezeti folyamat(ok)ra reagálnak (WEEDON 2003, D'ARGENIO et al. 2004, WESTPHAL et al. 2010, MARTINEZ 2018, LI et al. 2019b). Emellett fontos annak felismerése és kiszűrése is, ha egy proxyt diagenetikus változás ért, és emiatt nem használható megbízhatóan.

A klímaproxyk időbeli változásait idősorokon (*time-series*) keresztül vizsgálhatjuk. Klasszikus értelemben idősoroknak csak az idő függvényében tanulmányozott változók értékei nevezhetők, de hagyományosan a ciklussztratigráfiában ez a térfüggő adatsorok elnevezésére is használatos.

Az idősorban nem csak a mintapont saját értéke lényeges, hanem annak térbeli és/vagy időbeli függése is. Az idősorokat gyakran jelként emlegetik, sokszor azonban a jel fogalmát csak az idősorok szabályos komponenseire használják. Az idősorok jellemzően szabályos és szabálytalan komponensekből és/vagy zajból állnak. A ciklussztratigráfia számára csupán a szabályos komponens keresése a cél (WEEDON 2003).

A ciklussztratigráfia szempontjából matematikai és geológiai értelemben is két fő jeltípust különíthetünk el az idősorokon belül. Folytonos jel (*continuous signal*) esetében a mért változó időben folyamatos, tetszőleges ponthoz tartozik érték, azaz a változó az idő vagy a tér (azaz cm vagy m értékkel kifejezett rétegtani helyzet) függvényében ábrázolható. Ilyen jelet szolgáltatnak pl. a különféle geokémiai mérések eredményei, ahol a mintavételi távolságot a kutató határozza meg. Diszkrét jel (*discrete signal*) esetében a mért változó időben nem folytonos. Diszkrét jelet szolgáltat például az egymást követő rétegek vastagsága; ebben az esetben az egyik tengelyen a rétegvastagság, míg a másikon a rétegek száma (a rétegsorban felfelé haladva egyesével számozzuk őket) ábrázolandó. A mintavételi távolságot ilyenkor az egyes rétegek vastagsága szabja meg, hiszen minden mintapont maga az adott réteg. Ebben az esetben nem valósulhat meg, hogy a mintavételi távolság minden mintapont között ugyanakkora, vagyis egyenközű legyen (WEEDON 2003). Litofációs-elemzés útján meghatározott kategóriák alkalmazásával is előállítható a kőzetminőséget leíró diszkrét jel, amire éghajlatvezérelt vízmélységváltozásokat tükröző tavi üledékek vizsgálata szolgáltat példát (OLSEN & KENT 1996).

Bár a nem egyenközű idősorok elemzésére is vannak megfelelő matematikai módszerek (pl. interpoláció vagy Lomb–Scargle periodogram használata (LOMB 1976, SCARGLE 1982)), a ciklussztratigráfiában mégis általában az egyenközű idősorok használata a bevett (WEEDON 2003, LI et al. 2019a).

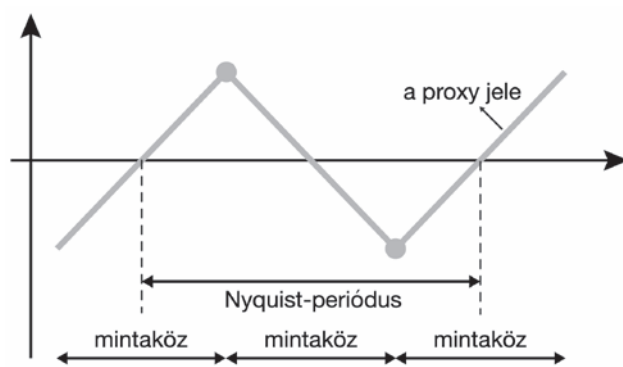
A mintavételezés megkezdése előtt, az információvesztés elkerülése végett fontos a Nyquist-frekvencia figyelembevétele. Definíciója szerint a Nyquist-frekvencia az adott mintaköz mellett az idősből kimutatható legnagyobb frekvencia, ami, mivel a periódus a frekvencia reciproka, egyben meghatározza a kimutatható legrövidebb periódust (WHITTAKER 1915, NYQUIST 1928, KOTELNIKOV 1933, SHANNON 1949). Mivel egy ciklus azonosításához hullámhosszonként minimum két mintapont szükséges (5. ábra), ezért a Nyquist-frekvencia (f_{Ny}) hullámhossza kétszerese a mintavételi távolságnak (Δd), vagyis a Nyquist-periódus (p_{Ny}) kétszer olyan hosszú lesz, mint a választott mintaköz által képviselt üledékképződési időtartam:

$$p_{Ny} = 2 \times \Delta d$$

$$f_{Ny} = \frac{1}{2 \times \Delta d}$$

A gyakorlatban a mintegy 20 ezer éves periódusidejű precesszió kimutatásához a mintaköznek kevesebb mint 10 ezer évet kell átfognia. Mivel a Milanković-ciklusok periódusideje a földtörténet során változik, figyelembe kell venni a mintázni kívánt rétegsor korát és az annak megfelelő precessziós ciklus hosszát. Mivel a rétegsor néhány 10 ezer éves pontosságú időbeli felbontását éppen a ciklussztratiográfival szeretnénk elérni, gyakori probléma, hogy nehéz előre megmondani, mekkora vastagság képviselhet kb. 10 ezer évet a vizsgált képződményben. Ilyenkor független adatok, mint pl. rendelkezésre álló radiometrikus korok, szekvenciasztratiográfia vagy egyéb rétegtani módszerek segítségével próbáljuk megbecsülni az ideális mintaközt (WEEDON 2003, SINNESAEEL et al. 2019).

A Nyquist-frekvencia által megszabottnál nagyobb mintavételi közök esetében a legnagyobb frekvenciájú ciklus, azaz Milanković-ciklusok esetében a precesszió, kimutathatatlanná válik. Ugyanakkor, ha pontosan a Nyquist-frekvencia által megszabott mintaközt használjuk, vagyis periód-



5. ábra. A Nyquist-frekvencia az idősből kimutatható legmagasabb frekvencia. Az ehhez a frekvenciához tartozó, az idősből kimutatható legkisebb periódus a Nyquist-periódus. Mivel egy ciklus kimutatásához hullámhosszonként legalább két mintapontra van szükség (szürke pontok), így a Nyquist-periódus hossza a mintaköz hosszának kétszerese

Figure 5. The Nyquist-frequency is the highest frequency that can be detected from a time-series. The period which belongs to this frequency is the smallest period that can be detected from a time-series, called the Nyquist period. Because a cycle requires at least two data points per wavelength (grey dots) to become detectable, the length of the Nyquist-period is twice the length of the sample interval

dusonként csak két mintapontot rögzítünk, az a jel nem kívánt alul-mintavételezését (*aliasing*) okozhatja. Az alul-mintavételezés eredményeként a nagyobb frekvenciájú ciklusok nem lesznek kimutathatóak a jelben. Ennek megelőzése érdekében tehát fontos, hogy a Nyquist-frekvencia által meghatározott mintaköznél sűrűbben mintázzunk. Bár a kimutathatatlanná vált ciklusok utólag nem nyerhetők ki a simított jelből, arra van mód, hogy a simítás kisebb frekvenciákra gyakorolt negatív hatását minimalizáljuk. Ilyen hatású természetes folyamat a bioturbáció a konszolidálatlan üledék átkeverése során, de ún. csatornamintázással (*channel sampling*) magunk is átlagolhatjuk az egyes proxyk értékeit adott szakaszonként, sőt egyes adatelemző programok is kínálnak erre lehetőséget (pl. *anti-aliasing* szűrő) (WEEDON 2003). A mintavételezés szempontjából nemcsak a legnagyobb, hanem a legkisebb kimutatni kívánt frekvencia is különös figyelmet érdemel. Egy ciklusnak a jelben legalább négyszer, de inkább hatszor ismétlődnie kell ahhoz, hogy megbízhatóan és pontosan ki lehessen azt mutatni (WEEDON 2003).

Az adatsor vizsgálatra való előkészítése a jel-zaj arány növelését szolgálja. Először a kiugró értékeket kell eltávolítani, ugyanis ezek az egységimpulzus hatásán keresztül erősen megnövelhetik a később előállított spektrumok zajosságát, bizonyos szakaszokon akár értelmezhetetlenné is tehetik azokat. A kiugró értékek eltávolítására ugyan vannak statisztikai módszerek, ám a ciklussztratiográfiában ez időnként mégis szubjektív. Fontos a nagyon zavaró vagy a mérési hibából adódóan téves értékek kiszűrése, azonban ha meggondolatlanul túl sok értéket távolítunk el a vizsgált idősből, az egy idő után károsan befolyásolja az eredményt, mert a ciklusok egyre kevésbé válnak észlelhetővé, vagy el is tűnhetnek. Érdekes először a kiugró, hibásnak vélt értékekkel együtt is elvégezni a vizsgálatot és megfigyelni, melyek vannak a legrosszabb hatással az eredményre. A kiugró értékek eltávolítását az interpoláció követi. A lineáris interpoláció a mintapontokat egyenes vonalakkal köti össze, és az így létrejött görbét egyenként újramintázza úgy, hogy az új mintapontok közötti mintaköz az általunk meghatározott érték lesz. Természetesen más típusú interpoláció is használható. Az új mintaköz ideális esetben nem térhet el az eredeti mintaköztől, nem egységes eredeti mintaközök esetén azok átlagát célszerű új mintaközként megadni. Az interpolációra főleg azért van szükség, mert a vizsgálat későbbi lépései során a legtöbb módszer egyenközü mintázást követel meg (WEEDON 2003, LI et al. 2019a).

A zaj csökkentését szolgálja a trendeltávolítás (*detrending*) eljárása is. A trendeltávolítás célja egy nagyjából 0 körül oszcilláló idősor létrehozása. Ez nem csak a fenti okból, de a jelben szereplő periodicitások amplitúdója szempontjából is fontos. Ehhez szintén több matematikai módszer áll rendelkezésre az adatelemző programokban. Egyszerű (pl. folyamatos növekvő vagy csökkenő) trendek esetén kielégítő lehet a lineáris regresszió számítása és ennek kivonása az idősből, ám gyakran ennél bonyolultabb eljárások szükségesek. Az összetett, pl. hol növekvő, hol csökkenő trendek eltávolításához többszörös lineáris regresszió, polinomiális

regresszió, illetve Lowess- és Loess-simítás, valamint ezek robusztus, a kiugró értékek hatására kevésbé érzékeny változatai is használhatóak. Körültekintően kell azonban eljárni annak elkerülése érdekében, hogy a trendeltávolítás során óvatlanul a nagyobb periódusidővel rendelkező periodicitásokat is eltávolítsuk az idősből (WEEDON 2003, LI et al. 2019a).

A fenti három adatelőkészítési módszer kötelezően végrehajtandó a ciklussztratigráfiai vizsgálatok során. Ezek mellett igen gyakran alkalmazott eljárás a log-transzformáció, amelyet azonban nem szükséges minden esetben elvégezni. A trendeltávolítás során az adatsor átlaga stabilizálódik, stacionáriusává válik, azonban bizonyos idősorok megkövetelhetik a variancia stabilizálását is. Erre például akkor lehet szükség, ha a jel hosszú távú amplitúdócsökkenést vagy növekedést mutat. Ezt a problémát a log-transzformáció oldja fel, melynek során a mintapontok értékeit azok tízes alapú logaritmusával helyettesítjük. A log-transzformációt, amennyiben szükség van rá, legelső lépésként kell elvégezni az idősor előkészítése során, esetleg követheti a kiugró értékek eltávolítását, de fontos, hogy a transzformáció után újra ellenőrizzük, nem keletkeztek-e újabb kiugró értékek (WEEDON 2003, LI et al. 2019a).

Spektrálanalízis

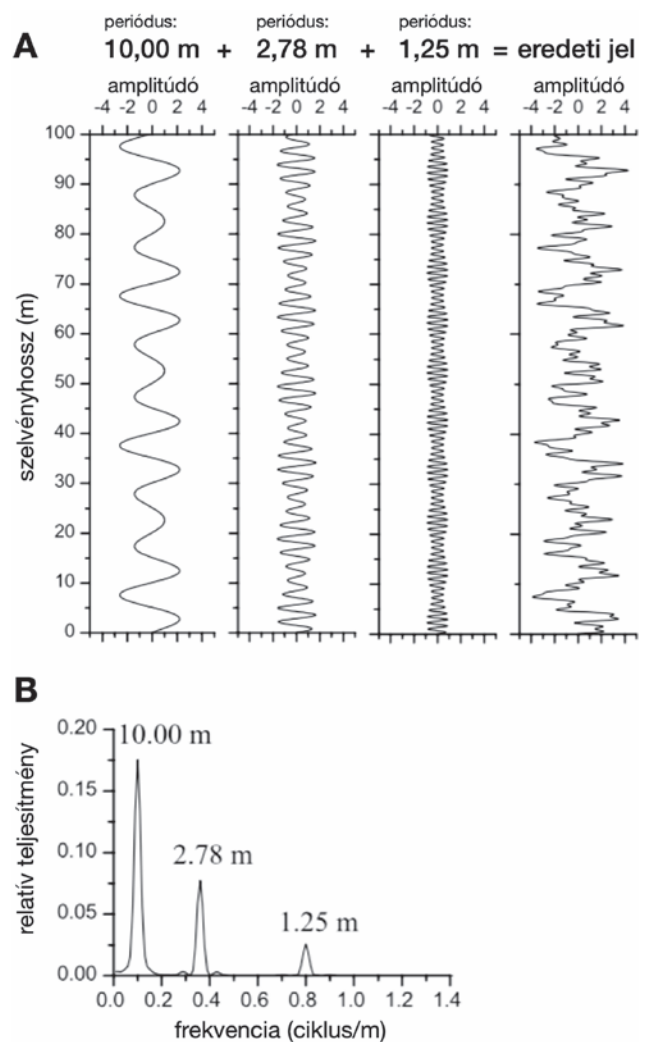
Az egyes ciklusok felismeréséhez az idősort fel kell bontani különböző hullámokra, ezt végzi el a Fourier-transzformáció. A Fourier-transzformáció azon az elven alapul, hogy minden idősor előállítható megfelelő amplitúdójú és hullámhosszú szinusz és koszinusz hullámok összegéből. A matematikai művelet eredménye megmutatja, hogy az adott frekvencián milyen teljesítményű szinuszoid hullámok vannak jelen a vizsgált idősből. Emellett a Fourier-sorfejtés során az időtől függő változókat frekvenciától függő változóba transzformálja. Egy adott frekvenciához mindig tartozik egy szinusz és egy koszinusz hullám, melyek átlagos amplitúdóértékeinek négyzetösszegét nevezzük az adott frekvencia teljesítményének (BLOOMFIELD 2000, WEEDON 2003).

A diszkrét Fourier-transzformáció, vagy röviden DFT (*Discrete Fourier Transform*) a Fourier-transzformáció egy olyan fajtája, mely egyenként, folytonos jelű idősorokra ideális (COOLEY & TUKEY 1965). A DFT azonban igen nagy számításigényű, így ennek a sokkal gyorsabb és hatékonyabb változata, az ún. gyors Fourier-transzformáció, vagy FFT (*Fast Fourier Transform*) jóval elterjedtebbé vált. Mivel a legtöbb ciklussztratigráfiai bemenő adatsor egyenként és folytonos jelű, ezért a vizsgálatokhoz általában ezeken az eljárásokon alapuló módszereket alkalmaznak (WEEDON 2003, LI et al. 2019a).

Az FFT alkalmazásához az adatsornak kettő egész számú hatványával megegyező darabszámú (pl. 256, 512, 1024 stb.) pontja kell legyen. Ha szükséges, az idősor mindkét vége kipótolható megfelelő számú 0 értékű mintaponttal, ezt nevezzük *zero-padding*-nek. A *zero-padding* azért is hasznos eljárás, mert a teljesítményspektrum felbontása a mintaszámtól függ, így a mintaszám virtuális megnövelésével a teljesítményspektrum felbontása is javítható (WEEDON 2003, LI et al. 2019a).

A Fourier-transzformáció eredményének grafikus ábrázolása a teljesítményspektrum (*power spectrum*) (6. ábra), ami a teljesítmény eloszlását a frekvencia függvényében mutatja. Az x tengelyen a frekvencia értékei 0-tól a Nyquist-frekvenciáig terjednek. Az eredeti idősor a teljesítményspektrumon ábrázolt frekvenciájú és teljesítményű hullámokra bontható fel. Ekképpen minél nagyobb egy adott frekvenciához tartozó teljesítmény, az azzal a frekvenciával bíró ciklus annál inkább vesz részt az eredeti jel alakjának kialakításában. Amelyik frekvenciánál a teljesítményspektrumon nagy teljesítményértékű, kiemelkedő csúcs látható, az a frekvencia a jelben rejlő fontos periodicitást jelent (WEEDON 2003, LI et al. 2019a).

A fenti módon létrehozott teljesítményspektrumoknak azonban van egy lényeges hibája, a spektrális szivárgás



6. ábra. A) A Fourier-transzformáció egy idősor jelét szinuszoid görbékre bontja szét úgy, hogy ezek összege kiadja az eredeti jelet. B) A Fourier-transzformáció eredményének grafikus ábrázolása a teljesítményspektrum. (WEEDON 2003 alapján)

Figure 6. A) The Fourier transform is a mathematical process to break down a time-series signal into sinusoid waves, so the sum of these waves is the original signal. B) The graphic interpretation of the Fourier transform is the power spectrum. (Based on WEEDON 2003)

(*spectral leakage*) jelensége. A teljesítményspektrumok csúcsairól bizonyos mennyiségű teljesítmény elszivárog és más frekvenciáknál jelenik meg. A teljesítményvesztés elsősorban a kis frekvenciákat érinti, míg a nem valódi teljesítmény általában a nagy frekvenciáknál jelenik meg. A szivárgás arra vezethető vissza, hogy a vizsgált idősorok véges kiterjedésűek, és hirtelen végződnek el. Ezt a problémát az ablakolás (*tapering*) módszerével lehet kiküszöbölni. Ennek során az eredeti jelet különböző súlyfüggvényekkel szorozzuk be, majd az így létrejött új jelen végezzük el a Fourier-transzformációt. A leggyakrabban használt súlyfüggvény a jelet középen 1-gyel, a két végén pedig 0-val szorozza meg, így az elvégződés folyamatossá válik. Az eljárás hátulütője, hogy adatvesztéssel és így simítással, valamint a felbontás csökkenésével jár együtt (WEEDON 2003, LI et al. 2019a).

A legjobb kompromisszumos megoldást a szivárgási hiba minimalizálása mellett az eredeti jel és felbontás lehető legjobb megőrzésére az ún. *multitaper* módszer, vagy rövidítve MTM (*Multi-Taper Method*) adja. Az eljárás során az eredeti jelet három különböző ortogonális (azaz egymásra merőleges) függvénnyel szorozzuk be, majd mindegyiken külön-külön elvégezzük a diszkrét Fourier-transzformációt, illetve gyakrabban annak gyors Fourier-transzformáció változatát. Az így létrehozott három teljesítményspektrum értékeinek átlagából áll elő a 2π -MTM teljesítményspektrum, vagyis a *multitaper* módszer teljesítményspektruma. A π a használt súlyfüggvények számát jelenti. A súlyfüggvények számának kétszerese, vagyis 2π a szabadságfok. Minél nagyobb ennek értéke, vagyis minél több súlyfüggvényt használunk, a 2π -MTM teljesítményspektrum felbontása annál jobban leromlik (THOMSON 1982, 1990; PERCIVAL & WALDEN 1993; LEES & PARK 1995; MANN & LEES 1996; WEEDON 2003).

A teljesítményspektrumok előállítására több további módszer is létezik, mint például a Welch-módszer (WELCH 1967) vagy a Blackman–Tukey módszer (BLACKMAN & TUKEY 1958), ám ezek ismertetésétől itt két okból eltekintünk. Egyrészt a ciklussztratigráfiában a leginkább elismert és széles körben használt eljárás a *multitaper* módszer, másrészt a többi módszer is hasonló elvek alapján és hasonló módon működik, viszont valamilyen más problémára specializálva fejlesztették ki azokat, a *multitaper* módszer elterjedése előtt (PERCIVAL & WALDEN 1993).

Ahhoz, hogy meg tudjuk ítélni, a teljesítményspektrum mely csúcsai emelkednek ki a háttérzajból, vagyis mely csúcsok szignifikánsak és tartozhatnak tényleges, szabályos periodicitáshoz, fontos a háttérzaj megállapítása. A ciklussztratigráfia során a zaj két tényezőtől tevődik össze. Az ún. fehér zaj (*white noise*) a mérési hibából adódik. Minden mérési pont nagyjából ugyanakkora hibával terhelt, így a fehér zajból adódó teljesítmény minden frekvencián nagyjából azonos teljesítménnyel jelenik meg. A nevét onnan kapta, hogy a fehér fényben minden frekvencia azonos teljesítménnyel bír. Tulajdonságából adódóan ez a zaj kevésbé zavaró, hiszen hiába növeli meg a zajhoz tartozó csúcsok teljesítményét és így magasságát, arányosan ugyanannyival megnöveli a szignifikáns, kiugró csúcsok magasságát is, így azok könnyen elkülöníthetőek maradnak (WEEDON 2003).

Nagyobb problémát okoz az ún. vörös zaj (*red noise*), mely nagyságrendekkel nagyobb mértékben van jelen a ciklussztratigráfiai idősorokban. Ezt a zajt a Föld pályaelemei által hajtott éghajlati tényezők okozzák. A légkör vagy az óceánok természetes módon, tehetetlenségükből adódóan késve reagálnak a pályaelemek változására. Ennek következtében a vizsgált idősor adott értéke nem független az előtte lévőktől. Az elsőrendű autoregressziós modellben egy adott változó függ az azt megelőző változótól, így idősorok esetében alkalmas a vörös zaj modellezésére. Tulajdonságaiból fakadóan a vörös zaj sokkal erősebb a kis frekvenciák tartományában, és ereje a nagyobb frekvenciák felé lényegesen csökken. Nevét is onnan kapta, hogy a vörös fényben a kis frekvenciák az uralkodóak (MANN & LEES 1996, WEEDON 2003, MEYERS 2012, LI et al. 2019a).

A ciklussztratigráfiában hagyományosan nem távolítjuk el a háttérzajt, bár vannak rá módszerek (pl. előfehérítés, *pre-whitening*). Ehelyett a zaj a teljesítményspektrumokon megbízhatósági szintek segítségével kerül kifejezésre. Az ez alatt a szint alatt maradó csúcsok adott valószínűséggel a háttérzajhoz tartoznak, míg az ezt átlépő csúcsok valószínűleg szabályos periodicitásokat (pl. Milanković-ciklusokat) képviselnek. Konvencionálisan a teljesítményspektrumokon a 90%-os, 95%-os és 99%-os megbízhatósági szintek kerülnek ábrázolásra (MANN & LEES 1996, WEEDON 2003, MEYERS 2012, LI et al. 2019a).

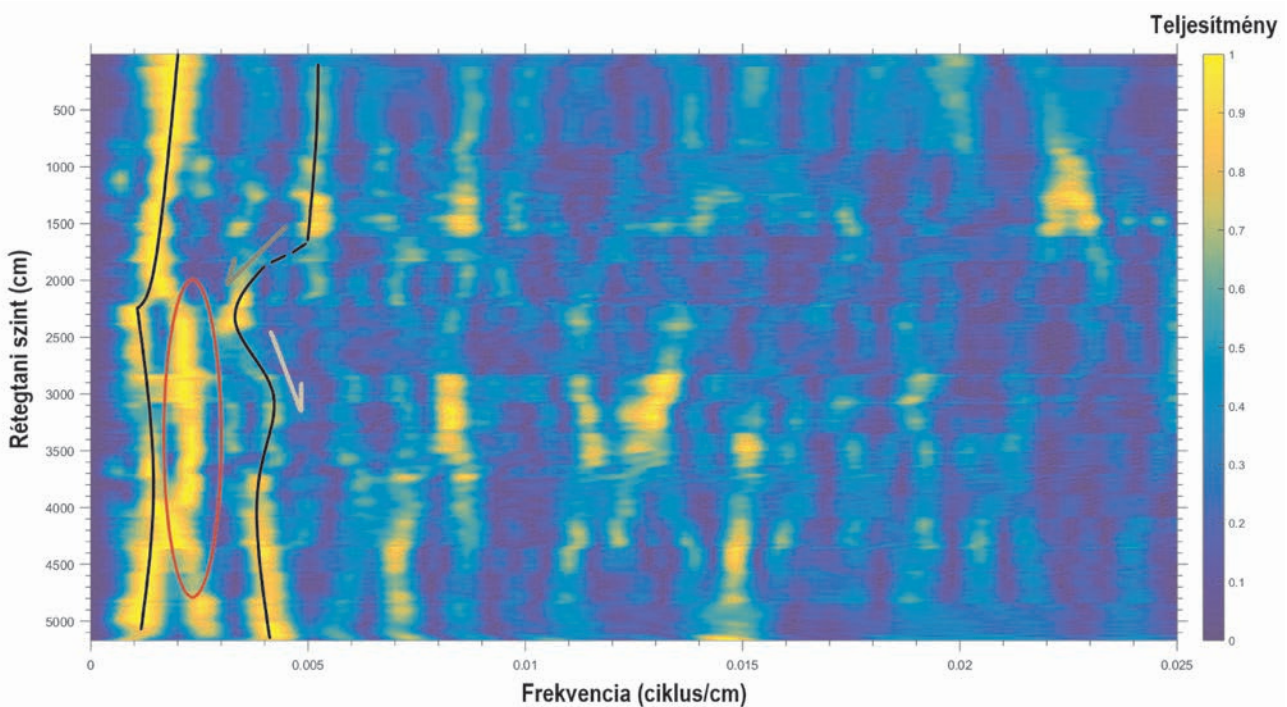
Bár a megbízhatósági szintek általában jól használhatóak, a természetben gyakran előfordul eltérés az ideális esettől. A periodicitások teljesítményét számos tényező befolyásolhatja, pl. a zaj, a spektrális szivárgás vagy a nem megfelelő proxy, de adott földtörténeti korban és környezetben természetesen is megőrződhet gyenge jellel egy ciklus. Előfordulhat, hogy egy létező periodicitás nem lépi át a megbízhatósági szinteket, illetve egy háttérzajból származó csúcs akár több megbízhatósági szint fölé is emelkedik. Ilyen esetekben segíthet az F-teszt. Ez az eljárás konstans fázissal rendelkező, kvázi szabályos ciklicitásokat keres és megmutatja, hogy a teljesítményspektrum csúcsai közül melyek rendelkeznek ilyen tulajdonságokkal. Azonban az F-teszt eredménye sem alkalmas a kérdés egyértelmű eldöntésére, és így a csúcsok értelmezésében a vizsgálatot végző személy mérlegelése is szerepet kap. Gyakori módszer ezenkívül, hogy az idősort két vagy több, át nem fedő részre vágják szét és mindegyikre elkészítik a teljesítményspektrumot. Amennyiben a szignifikánsnak vélt csúcs mindegyik teljesítményspektrumon közel azonos frekvencián megjelenik, figyelembe véve, hogy helyzete a felbontás és a rétegsor menti üledéklarakódási sebesség változása miatt eltolódhat, úgy a csúcs valós ciklust reprezentál. Azonban, ha az adott csúcs csak egy teljesítményspektrumon jelenik meg, úgy megnő annak a valószínűsége, hogy csak a háttérzajhoz tartozó csúcsról van szó. Hasonló megfontolásból, a megbízhatóság növelése érdekében érdemes egy-egy rétegsor vizsgálatát több klímaproxyra is kiterjeszteni és ezek eredményeinek összehasonlítása az előbbiekkal megegyező módon erősítheti vagy gyengítheti a feltételezéseket (THOMSON 1982, 1990; LEES & PARK 1995; WEEDON 2003).

Míg a teljesítményspektrum átlagolt képet mutat, addig a teljesítményspektrum időbeli változását a spektrogram (*evolutionary spectra*) (7. ábra) segítségével tudjuk megfigyelni. A spektrogram függőleges tengelyén legtöbbször a rétegtani szint, ritkábban a relatív idő szerepel, míg a vízszintes tengelye megegyezik az ugyanabból az adatsorból készített teljesítményspektrumével, vagyis frekvencia értékeket mutat. A színek a teljesítményspektrum függőleges tengelyének, vagyis a teljesítménynek felelnek meg (WEEDON 2003, HINNOV & HILGEN 2012, MARTINEZ et al. 2015, LI et al. 2019a). A spektrogram sok egymás utáni, az idősor más és más szakaszain, azaz egymást követő ablakokban elvégzett FFT-vel hozható létre. Az ablakok szélessége azt jelöli, hogy milyen hosszú szakaszt vizsgálunk az időorból egy-egy ablakban, az ablakok lépésköze pedig azt határozza meg, hogy az egymást követő ablakok középpontjai között mekkora a távolság. Az egyes ablakok szélessége nagyobb a lépésköznél, biztosítva az ablakok átfedését. A lépésköz és ablakszélesség méretét a vizsgálatot végző kutatónak kell megállapítania, ugyanis az minden egyes idősor és vizsgálat esetében eltérő, az adott feladatra jellemzően testre szabható. Széles ablakok esetén nagy felbontású képet kapunk az idősor nagy részéről, viszont a spektrogram elkészítésének eredeti célja, hogy a jel kisebb szakaszairól kapjunk információt. Ehhez szűk ablakok szükségesek, ami viszont a felbontás romlásával jár. Túl széles ablakok esetén a nagy

frekvenciákhoz tartozó periodicitások válhatnak láthatatlanná, míg túl keskeny ablakszélesség esetén a kis frekvenciák tűnhetnek el a spektrogramról. A lépésköz mértékét a mai ciklussztratigráfiai programok automatikusan és jórészt helyesen (általában a mintavételi távolsággal egyenlően) határozzák meg. Az ablakszélesség választásánál egy tapasztalaton alapuló ajánlást érdemes követni, a teljesítményspektrum szignifikáns csúcsai közül a legkisebb frekvenciával rendelkezőt figyelembe véve. Ennek a frekvenciaértéknek a reciproka az adott ciklus periódusa, ablakszélességnek pedig ennek a periódusnak a másfélszeresét érdemes beállítani (WEEDON 2003, LI et al. 2019a).

A spektrogramon az egyes frekvenciához tartozó sávok többnyire nem teljesen egyenesek és függőlegesek. Ez egyrészt a mérési hibának, kiugró értékeknek, azaz a zajnak, másrészt az üledéklerakódási sebesség változásainak köszönhető. Amennyiben a sáv rétegtani értelemben felfelé haladva a kisebb frekvenciák irányába mozdul el, az az üledéklerakódási sebesség növekedését jelenti a vonatkozó szakaszon, megfordítva pedig a magasabb frekvenciák felé mozdulása az üledéklerakódási sebesség csökkenésére utal (7. ábra) (WEEDON 2003, MARTINEZ et al. 2015).

A teljesítményspektrumon szignifikánsnak adódó periodicitások a spektrogramon ellenőrizhetőek. Amennyiben a periodicitás valós ciklushoz tartozik, úgy az idősor teljes hosszán vagy legalábbis hosszú szakaszain keresztül meg



7. ábra. A spektrogram a jel ablakszélesség által meghatározott szakaszaira készült teljesítményspektrumokból áll össze. A spektrogramon a két szignifikáns periodicitás lefutását feketével jelöltük. Jól látható, hogy a két sáv nem teljesen függőleges, lefutása hajladozó. A vörössel bekarikázott interferenciajelenség esetében a két sáv túl közel került egymáshoz, ezért közöttük megjelent egy új, hamis sáv. A sötétbarna nyíl az üledéklerakódási sebesség növekedésének, míg a világosbarna nyíl az üledéklerakódási sebesség csökkenésének szakaszait jelöli. (Az ábra az Acycle program [LI et al. 2019a] segítségével készült)

Figure 7. The spectrogram consists of power spectra made for sections of the signal defined by the window width. In this spectrogram, the two significant periodicities are marked with black lines. Clearly, the two bands are not strictly straight and vertical but bending. Circled in red, an interference pattern occurs where the two bands closely approach each other and a new, false band appears between them. The dark brown arrow indicates an increase, whereas the light brown arrow indicates a decrease in sedimentary rate. (The figure was produced using the Acycle program of Li et al. 2019a)

kell jelennie a spektrogramon is. Ennek értelmezése azonban tapasztalatot igényel, mivel a spektrogram egyes szakaszain a keresett jel eltűnhet a zaj vagy egyéb matematikai problémák miatt, mint pl. túl sok interpolációval adatpótoló mintapont jelenléte egy szakaszon belül. Továbbá, ha egy gyenge periodicitás egy erősebbhez túl közel kerül, pl. az üledéklerakódási sebesség változása miatt, interferencia léphet fel. Az interferencia abban nyilvánul meg, hogy erősségével fordított arányban mind a két sáv elmozdul egymás irányába az adott szakaszon, vagy akár a két sáv közé eső frekvencián egy hamis sáv jelenhet meg. A hamis sáv erősségének függvényében a két eredeti, valós sáv teljesítményt veszít, vagyis gyengül (7. ábra) (WEEDON 2003, MARTINEZ et al. 2015, MARTINEZ et al. 2016).

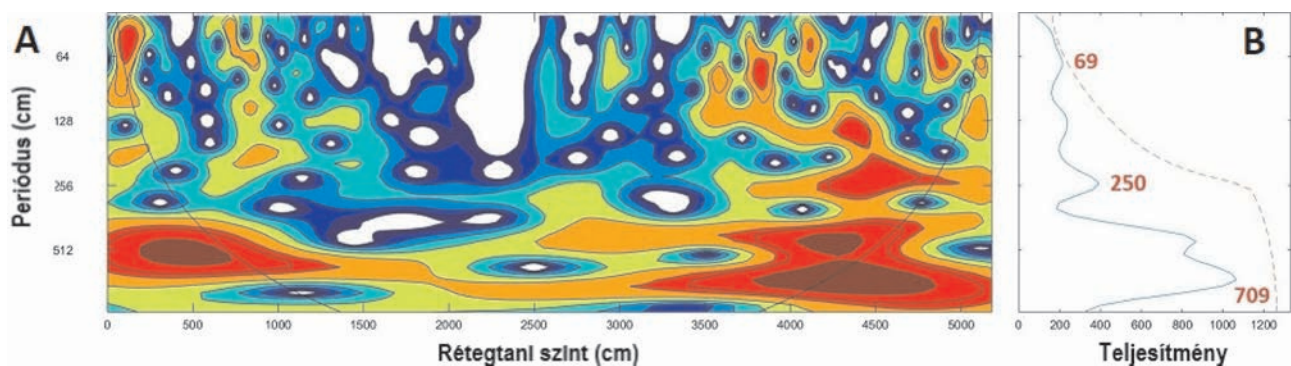
A wavelet-analízis ugyan nem tartozik szigorúan a spektrálanalízis módszertanához, azonban alkalmazása hasznos információkkal szolgálhat. A már bemutatott módokhoz hasonlóan hoz létre teljesítményspektrumot és spektrogramot (8. ábra), azonban nem szinusz és koszinusz hullámok, hanem ún. wavelet-hullámok felhasználásával. Ezek sajátágaiból adódóan a frekvenciafelbontás a kis frekvenciák esetében lényegesen jobb lesz, a rétegtani helyzet azonban a spektrogramon gyakorlatilag azonosíthatatlanná válik. Fontos előnye a módszernek, hogy segítségével a mintaköznél nagyobb hiátusok kimutathatóvá válnak, ugyanis a spektrogramon a rétegtani hiányt tartalmazó szakaszon eltűnik minden jel, minek következtében a spektrogramon keresztben egy fehér sáv jelenik meg (8. ábra) (WEEDON 2003, HAMMER & HARPER 2006, LI et al. 2019a).

A Milanković-ciklusok azonosítása és kormodell készítése

A vizsgálat során felismert periodicitások Milanković-ciklusoknak való megfeleltetésére több módszer létezik, melyek közül a legegyszerűbb az ún. aránymódszer. Mivel a periodicitásokhoz tartozó frekvenciák reciproka megadja a periódusukat, ezek arányát összehasonlíthatjuk a Milanko-

vić-ciklusok periódusidőinek arányaival. Kitétetett jelentőségű a 20:5:2:1 arány keresése, ahol az 1 a precesszió periódusidejét (kb. 20 ezer év) jelöli. Ennek kétszerese (kb. 40 ezer év) a tengelyferdeség, ötszöröse (kb. 100 ezer év) a rövid excentricitás, húszszorosa (kb. 400 ezer év) pedig a hosszú excentricitás periódusidejének felel meg. A keresett arányokat a vizsgált rétegsor korának megfelelően kismértékben szükséges lehet módosítani. Számolni kell azzal is, hogy az üledéklerakódási sebesség változásának függvényében a periodicitások átvándorolhatnak más frekvenciára, így amennyiben a spektrogram lehetőséget nyújt rá, vizsgáljuk meg, hogy a periodicitások végig megtartják-e ezt az arányt (WEEDON 2003, MEYERS & SAGEMAN 2007, LI et al. 2019a).

A ciklussztratigráfia fejlődése során felmerült egy kifinomultabb kvantitatív azonosítási mód igénye, amit először az ASM (*Average Spectral Misfit*) módszerrel valósítottak meg (MEYERS & SAGEMAN 2007, MEYERS 2014). Ennek újabb alternatívája az Acycle programban implementált korrelációs együttható, vagy röviden COCO (*CORrelation COefficient*) funkció, mely az ASM-módszer továbbfejlesztésén alapul (LI et al. 2019a). A COCO kiszámítja a korrelációs együttható értékét a felhasználó teljesítményspektruma (a rétegtani szint függvényében ábrázolva) és egy csillagászati modell teljesítményspektruma (az idő függvényében ábrázolva) között, több üledéklerakódási sebesség mellett is. Ezzel egy időben a felhasználó idősorát térfüggőből időfüggővé transzformálja. Eredményeképpen a legmagasabb korrelációs együtthatóval rendelkező üledéklerakódási sebesség valószínűsíthető a rétegsorra. Eközben a program Monte Carlo-szimulációt is végez, mely során az adott üledéklerakódási sebesség mellett több, random frekvenciájú és amplitúdójú hullámokból álló teljesítményspektrum csillagászati modellel való korrelációs együtthatóját is vizsgálja, feltételezve, hogy a periodicitások nem a Milanković-ciklusokhoz tartoznak. Ennek a feltételezésnek a megbízhatósági szintje így megmutatja, hogy az adott korrelációs együtthatók milyen valószínűséggel fordulnak elő véletlenül. Amennyiben például a feltételezés megbízhatósági



8. ábra. A wavelet-analízis eredményeképp létrejött wavelet spektrogram (A) és wavelet teljesítményspektrum (B). A kb. 2300 cm-nél megfigyelhető fehér sáv ebben az esetben egy megmintázatlan szakasz miatt jött létre. Amennyiben a rétegsorban lenne hiátus, egy ehhez hasonló, ám az egész spektrumot keresztülvágó fehér sáv jelenne meg. (Az ábra az Acycle program [LI et al. 2019aG segítségével készült.)

Figure 8. Results of wavelet analysis: wavelet spectrogram (A) and wavelet power spectrum (B). The white band hanging from above approx. at 2300 cm was created in this case due to an unsampled section. If there were a sedimentary gap in the succession, a similar white band would appear, but cut across the entire spectrum. (The figure was produced using the Acycle program of LI et al. 2019a)

szintje 1%, úgy adott üledéklerakódási sebesség mellett a vizsgált idősor teljesítményspektruma és a csillagászati modell teljesítményspektruma közötti korrelációs együttható értéke a tesztelt esetek korrelációs együtthatóinak 99%-át meghaladja. Ez alapján feltételezhetjük a teljesítményspektrum és a csillagászati modell jó egyezését, vagyis a Milanković-ciklusok jelenlétét a vizsgált jelben (HINNOV & HILGEN 2012, LI et al. 2019a). Amennyiben több különböző üledéklerakódási sebességnél is magas a korrelációs együttható (a tapasztalatok alapján ciklussztratigráfiában már a korrelációs együttható kb. 0,4 értéke is magasnak számít az el nem távolított zaj miatt), vagy eleve sejtethető az üledéklerakódási sebesség megváltozása a vizsgált rétegsor mentén, úgy ezt is lehetőségünk van tesztelni a COCO eCOCO funkcióval, amelynek implementációja a spektrogramhoz hasonlóan ablakolással történik (LI et al. 2019a).

A COCO vagy az ASM használatakor figyelembe kell venni, hogy ezek a módszerek a csillagászati kalibráción alapulnak, amelynek használata 50 millió évnél idősebb rétegsorokon téves megállapításokhoz vezethet. 50 millió évnél fiatalabb rétegsorok esetén ezután nincs szükség további lépések végrehajtására, a Milanković-ciklusok azonosítása után sor kerülhet a csillagászati kalibrációra. Ennek ellenére az ilyen szelvények esetében is ajánlatos lehet inkább lebegő korszaklát létrehozni a kevesebb és kisebb hibalehetőség miatt, különösen a pleisztocénál idősebb képződmények esetében (WEEDON 2003, HINNOV 2013, LI et al. 2019a).

50 millió évnél idősebb rétegsor esetén a Milanković-ciklusok azonosítása után a kormodell elkészítéséhez ki kell választani azt a ciklust, amely a legjobban őrződött meg a jelben, vagyis amelyik a rétegsor lehető legnagyobb hossz-szában megfelelő erősséggel van jelen, majd ezt ki kell szűrni az idősből. Bár a szűréshez korábban alul és felül áteresztő szűrőket (*low-pass* és *high-pass filter*) is alkalmaztak, mára általánossá vált az ún. sáváteresztő szűrők (*band-pass filter*) használata, melyek közül leggyakrabban a Gauss-, a Taner- és a Taner–Hilbert-szűrőket választják (WEEDON 2003, ZEEDEN et al. 2018, LI et al. 2019a). Az alul áteresztő szűrők az alacsony frekvenciákat engedik át, tartják meg, és a magasakat távolítják el, míg a felül áteresztő szűrőknél ez pont fordítva van. A sáváteresztő szűrők segítségével ezzel szemben a teljesítményspektrumról pontosan kiválasztható az a frekvenciatartomány, amelyhez a fenti szempontok szerint kiválasztott ciklus társul. A sáváteresztő szűrők ezek után kiszűri a jelből az ehhez a frekvenciához tartozó szinuszoid jelet. Ennek amplitúdója a korábban ismertett okok miatt nem állandó, sőt az üledéklerakódási sebesség miatt frekvenciája is változni fog a korábban beállított frekvenciatartományon belül. A kiszűrt jel csúcsaihoz ezek után a ciklushoz tartozó Milanković-ciklus periódusidejének ismeretében rendelkezünk relatív időt. Például, ha a kiválasztott ciklus a 405 ezer éves periódusidejű hosszú excentricitás, akkor minden következő csúcs a kiszűrt jelen 405 ezer év elteltét jelenti az előző csúcshoz képest. Ezen az úton hozható létre a lebegő korszakla (WEEDON 2003, ZEEDEN et al. 2015, LI et al. 2019a).

Szoftverkörnyezet

Jelenleg több szoftver segítségével is végezhető ciklussztratigráfiai vizsgálatok. Az Acycle program rendkívül felhasználóbarát és egyszerűen kezelhető (LI et al. 2019a). Ezen felül az Acycle ingyenes, és Mac, illetve Windows operációs rendszerben is futtatható MATLAB, vagy annak szintén ingyenesen elérhető MATLAB Runtime környezetben. Ugyancsak nyílt hozzáférésű alternatívája az R környezetben fejlesztett *astrochron*-csomag (MEYERS 2014). Mindkét program részletesen dokumentált, így könnyen tanulható.

A ciklussztratigráfia hazai alkalmazásai

Magyarországon nemzetközi összehasonlításban kevés ciklussztratigráfiai témájú tanulmány született, és bár ezek mindegyike a maga idejében előremutató volt, közülük mindössze kettő (BAJNAI et al. 2017, MÜLLER et al. 2017) használta az itt bemutatott modern módszertant. Az alábbiakban rövid ismertetést adva időrendben tekintjük át a tudományterület hazai eredményeit.

BACSÁK GYÖRGY elévülhetetlen érdemeket szerzett a Milanković-ciklusok elméletének korai kidolgozásában, fejlesztésében és magyarországi bevezetésében (MAJOR 2006). Ebben közrejátszott az is, hogy évtizedeken át szakmai levelezésben állt Milankovićcsal. BACSÁK (1954) a pliocén és pleisztocén idején bekövetkezett glaciálisok és interglaciálisok összefüggését vizsgálta a pályaelemek változásából következő eltérő besugárzással, meglátásait részletes égi mechanikai számításokkal is alátámasztva.

SZEDERKÉNYI (1963) a Szilágy környékén mélyített Szilágy–II és Martonfa–I fúrásban vizsgált mikrorétegzett diatomit és márga váltakozásából álló szarmata rétegsorokat. Feltételezte, hogy egy diatomit-márga mikrorétegpár egy évet képvisel, a márga nyáron, míg a diatomit télen rakódott le. Ezek alapján számításai szerint a két rétegsor valamivel kevesebb mint 700 ezer év alatt rakódott le. Megvizsgálta továbbá azt is, hogy egy-egy mikrorétegpár esetében mennyire éles az elkülönülés, és ennek segítségével hosszabb távú ciklusokat is ki tudott mutatni, melyek szerinte közel azonos periódusidővel rendelkeznek, mint a BACSÁK (1954) által bemutatottak.

SCHWARZACHER & HAAS (1986) a Dachsteini Mész-kő Formációt harántoló egyes dunántúli mélyfúrások (Po–89, Ut–8 és T–5) és ausztriai szelvények rétegsoraiban előforduló Lofér-ciklusokat vizsgálta ciklussztratigráfiai szempontból, a vastagságarányok tekintetében. A vizsgálat során abban az időben korszerű matematikai módszereket is használtak, melyek segítségével több ciklust sikerült kimutatniuk. A legalacsonyabb rendű ciklust a precessziós ciklusnak feleltették meg, így a periódusok aránya alapján a többi, magasabb rendű ciklus periódusideje közel esett a tengelyferdeség és a rövid excentricitás ciklusainak periódusidejeihez.

HAAS et al. (1994) Sümegen a felső jura – alsó kréta Mogyorósdombi Mész-kő Formáció feltárását vizsgálták. Vékonycsiszolatok segítségével kimutatták a képződmény-

ben a calpionellák és a radiolariák mennyiségének egymással ellentétes, antifázisú, de ciklikus változását. A ciklussztratigráfiai vizsgálathoz az akkoriban rendelkezésre álló egyik legmodernebb, a ma használatos módszertan elődjének tekinthető módszertant alkalmazták, melynek segítségével három szignifikáns csúcsot sikerült kimutatniuk. Ezeket, tekintve hogy a vizsgált rétegsor nagyjából a berriasi emeletnek feleltethető meg, és ennek hosszára akkoriban mintegy 6 millió évet valószínűsítettek, sorban az 1 millió éves, 410–570 ezer éves és a 120–190 ezer éves ciklusoknak feleltették meg, melyek közül az utóbbi kettő periódusideje közel esik az excentricitási ciklusokhoz. A ciklusok hosszának kiszámítása úgy történt, hogy a 6 millió évet képviselő, 144 m vastag rétegsort arányosan elosztották a ciklussztratigráfiai vizsgálat során kapott periódusokkal.

A magyarországi alsó kréta jellegzetes, a franciaországi Voconti-árok sokat tanulmányozott márga-mészke rétegeihez hasonló üledékeit, a Berseki Márga Formációt két ciklussztratigráfiai tanulmány is vizsgálta. FOGARASI (1995) a Berseki Márga Formáció legfelső és az azt fedő Lábatlani Homokkő Formáció alsó szakaszának rétegein becsülte meg az üledékképződés sebességét a feltárt rétegsor vastagságára és annak feltételezett képződési időtartamára alapozva. A ciklussztratigráfiai vizsgálatot később BAJNAI et al. (2017) terjesztette ki az itt bemutatott korszerű módszertan felhasználásával, a Berseki Márga mélyebb helyzetű szürke márga rétegcsoportjára fókuszálva. Mivel a szürke márgában az egyes rétegek közötti litológiai kontraszt kicsi, és így a rétegvastagságok mérése nehezen lehetséges, BAJNAI et al. (2017) négy geokémiai proxy jelét vizsgálta egyenként mintavételt követően. A $\delta^{13}\text{C}$, a mágneses szuszeptibilitás és a természetes gamma sugárzás jelében kimutatta a rövid excentricitási, a tengelyferdeségi, illetve a precessziós ciklusokat, amelyek segítségével meghatározta, hogy a vizsgált rétegsor 1,49 millió év alatt rakódott le. BAJNAI et al. (2017) további fontos megállapítása, hogy a Berseki Márgában mért $\delta^{13}\text{C}$ -értékek a Voconti-árokban vizsgált rétegsorokkal való összehasonlítás alapján a Weissert-esemény pozitív szénizotóp-anomáliájának platójával korrelálhatók, így általuk az anomália időtartama meghatározható.

BALOG et al. (1997) bakonyi és gerecei mélyfúrások felső triász rétegsorát (Földolomit és Dachsteini Mészke Formációk) tanulmányozták, és mutattak ki bennük méterskálájú ciklusokat (melyek a peritidális karbonátokra jellemző Lofér-ciklusok), valamint ezek nagyobb kötegekbe rendeződését. Az elemi, méterskálájú ciklusokat ezek után a precesszióhoz kapcsolták, feltételezve, hogy a rhaeti hossza 2 millió év (ma is vitatott, OGG (2012) 4–9 millió évnél kevesebb), ugyanis az egyik vizsgált rétegsorban (tatai Kálvária-domb, T-5 sz. fúrás) 100 ilyen ciklusból áll a rhaeti emelet, ami kb. 20 ezer éves periódusidőt jelentene. Megfigyelték továbbá, hogy ezek az elemi ciklusok periódusidő tekintetében a rövid és hosszú excentricitási Milankovič-ciklusoknak megfelelő arányokban rendeződnek nagyobb kötegekbe vastagság szerint. Elvégeztek egy akkoriban modernnek számító spektrálanalízist is, mely tovább erősítette eredményeiket, és kimutattott egy, az elemi cik-

lusnál kb. 2,5-szer nagyobb ciklust is, mely a tengelyferdeségi ciklust jelentheti.

JUHÁSZ et al. (1997) és JUHÁSZ et al. (1999) pannóniai rétegsorokon (Kask-2, Tp-1, SzH-II, Ib-1 fúrások) végeztek ciklussztratigráfiai témájú vizsgálatokat. A fúrásokban a homok-, aleurit-, agyag- és szén-rétegek vastagságát használták kiindulási adatként, majd ezekből az adatsorokból matematikai módszerekkel különböző frekvenciával bíró ciklikus trendeket simítottak ki. Az egyes trendekben észlelhető ciklusokat magnetosztratigráfiai korreláció során látták el időadattal. Az így kapott ciklusok periódusideje: 19 ezer év (precesszió), 71, illetve 50 ezer év (tengelyferdeség), 370, illetve 400 ezer év (hosszú excentricitás). Ezek mellett bizonytalanul észleltek még egy egymillió évnél hosszabb periódusidővel rendelkező ciklust is.

REZESSY (1998) az alsó jura Pisznicai Mészke Formáció három rétegsorát vizsgálta a tatai Kálvária-dombon és a Gerecsében (Tölgyháti-kőfejtő, tardosi Bánya-hegy). A képződési rétegeinek ciklikus, vastagság szerinti kötegekbe rendeződését főként litológiai bélyegek (pl. a rétegek és kötegek közti agyag vastagsága) alapján igazolta, de megerősítette vékonycsiszolatos és stabilizatópos vizsgálatokkal is. A vizsgálat során azonban több nagyvonalú egyszerűsítést is tett, feltételezve, hogy a sztililitosodás során minden azonos rendű ciklustag között ugyanannyi karbonát oldódott fel, illetve egy ciklustag sem hiányzik teljesen feloldódás miatt. A terepi megfigyelések alapján a három szelvényben 65–68 köteget sikerült elkülöníteni, melyekhez kb. 200–210 ezer éves periódusidőt rendelt. A periódusidőket úgy származtatta, hogy a rétegsorok biosztratigráfiai korreláció révén és a kalibrált geológiai időskála alapján valószínűsített képződési időtartamát elosztotta a kötegek számával. A jura időskála azonban azóta jelentős pontosításon ment át (PÁLFY et al. 2000, OGG et al. 2012), az eredmények revíziója a kora jura korszakok hosszának mai ismerete alapján is indokolt.

WILLIS et al. (1999a, b) a Pulai Alginiten végeztek ciklussztratigráfiai vizsgálatokat, és a boreális, valamint szubtrópusi pollenek mennyiségének változásából sikeresen mutatták ki a precesszió, a tengelyferdeség és a rövid excentricitás Milankovič-ciklusait, továbbá szub-Milankovič-tartományba eső változásokat is. Vizsgálatuk során elsősorban a csillagászati kalibráció módszerét alkalmazták a spektrálanalízis mellett, amihez ilyen fiatal üledékek esetében már 1999-ben is rendelkezésre álltak megfelelő módszerek és adatok.

NÁDOR et al. (2003) a magnetosztratigráfiai adatok szerint folyamatos és teljes pleisztocén folyóvízi rétegsort hárántoló dévaványai (D-1) és vésztői (V-1) fúrásokban a mágneses szuszeptibilitás és szemcseméret-eloszlás változásai alapján vélték felismerni a Milankovič-ciklicitást. Korszerű matematikai módszerek alkalmazása nélkül, az oszcilláló jeleket egy mélytengeri fúrásból közölt $\delta^{18}\text{O}$ referenciagörbével csupán vizuálisan korrelálva érveltek a tengelyferdeségi és az excentricitási periódusok kimutathatósága mellett. A fluviális üledékképződés éghajlati meghatározottságának támogatására az egyes magnetozónákba eső

szuszceptibilitási maximumok számát és a környezetváltozásokat alátámasztó szedimentológiai, palinológiai és molluszká paleoökológiai adatokat használták.

SACCHI & MÜLLER (2004) az iharosberényi Ib–1 fúrásban, pannóniai üledékekben mutatták ki a precessziós és excentricitási ciklusokat elsősorban a szemcseméret változása alapján. Munkájuk során továbbfejlesztettek egy korábbi, ugyancsak az iharosberényi adatsoron alapuló tanulmányt (SPROVIERI et al. 2003). A vizsgálat során a korábbi spektrálanalízis-eredmények mellett egyéb rétegtani módszereket (szekvenciástratigráfia, magnetosztatigráfia, biosztatigráfia), illetve egy akkoriban elég korszerű, a csillagászati kalibráción alapuló módszert használtak.

MÜLLER et al. (2017) alsó jura, toarci rétegeket vizsgált a mecseki Réka-völgyben. Ciklussztatigráfiai vizsgálatokat a szerves anyagon mért $\delta^{13}\text{C}$ jelében, illetve a rétegsor karbonáttartalmán végeztek. Ugyan a mért adatok egyértelmű ciklicitást mutattak, ezt nem lehetett minden kétséget kizáróan a Milanković-ciklusok bármelyikéhez kötni. Ezért a rövid excentricitással, tengelyferdeséggel és precesszióval számolva három lehetséges üledékképződési időtartamot adtak meg a toarci óceáni anoxikus esemény (TOAE, vagy más néven Jenkyns-esemény) hosszára, amelyek csökkenő sorban 1 millió év, 350 ezer év és 200 ezer év.

PÜSPÖKI et al. (2019) a Jászsági-medence kvarter folyóvízi rétegsorát harántoló jászladányi és hevesvezekényi fúrások ciklussztatigráfiai elemzésével egészítette ki a korábban is tanulmányozott (NÁDOR et al. 2003) Kőrös-medencei, dévaványai magfúrás vizsgálatát. A mágneses szuszceptibilitás mellett a jászsági fúrómagokon az üledék színét és fajlagos ellenállását is felhasználták a spektrálanalízishez. A *multitaper* módszerrel előállított teljesítményspektrumokat a La2004 csillagászati modell alapján várható, illetve kínai löszszelvényeken kimutatott frekvenciákhoz próbálták illeszteni. Bár a 100 ezer éves excentricitást kimutatni vélték, a viszonylag alacsony teljesítményértékek alapján jogosan vetik fel a folyóvízi üledékes rendszer szabályostól eltérő viselkedését.

MAROS et al. (2020) az ibafai Ib–4 jelű fúrás alsó triász Jakabhegyi Homokkő Formációt harántoló szakaszát vizsgálták. Magszkenneléssel lemez-, illetve rétegvastagság, dőlésirány, valamint dőlésszög adatsorokat állítottak elő. Ezekben az adatsorokban vizuálisan különböző rendű, dm-skálájútól egészen 8 m vastagságig terjedő ciklusokat ismertek fel. Vizsgálatukat geometematikai ciklicitáselemzéssel is kiegészítették, mely során hibakorrigált Lomb-Scargle periodicitás vizsgálatot használtak. Ennek segítségével sikerült kimutatniuk egy 1,3 m és egy 4,5 m periódussal rendelkező ciklust, azonban ezek ismert Milanković-ciklusokhoz kapcsolására, valamint további következtetések levonására nem vállalkoztak.

Nemzetközi kitekintés

Az alábbiakban néhány kiválasztott, földtörténeti sorrendben röviden bemutatott esettanulmány segítségével szemléljük a korszerű ciklussztatigráfia jelentőségét. Az

idézett tanulmányok nemcsak fontos lépést jelentettek a tudományág fejlődésében, de rávilágítanak az asztrókronológia növekvő szerepére is a földtörténeti időskála pontosításában, továbbá a csillagászati kényszer fontosságára a Föld bonyolult éghajlati rendszerének működésében és az éghajlati tényezők meghatározó szerepére a különböző üledékes rendszerekben.

A Déli-Alpokban, a Dolomitokban található középső triász Latemar-platform régóta fontos ciklussztatigráfiai tanulmányok tárgyát képezi, és az egymásnak ellentmondó eredmények heves vitákat váltottak ki. A karbonátplatform képződési idejére vonatkozó asztrókronológiai és a biosztatigráfiai, illetve radiometrikus adatok jelentősen eltértek egymástól, ami sokak szemében megkérdőjelezte a ciklussztatigráfia megbízhatóságát. A Latemar szembeötlő, méterskálájú peritidális ciklusait az első ciklussztatigráfiai vizsgálatok (GOLDHAMMER et al. 1987, 1990; HINNOV & GOLDHAMMER 1991; PRETO et al. 2001) a precesszióhoz kapcsolták, és így a teljes platform képződési idejét 9–12 millió éves időtartamúnak tartották. Ezzel szemben a karbonátos rétegsor vulkanoklasztit közbetelepüléseinek cirkon U-Pb koradatai legfeljebb néhány millió éves időtartamot jeleztek (BRACK et al. 1996, MUNDIL et al. 2003). Az ellentmondást az okozta, hogy a korai ciklussztatigráfiai vizsgálatokhoz még nem állt rendelkezésére megfelelő kvantitatív módszer az egyes felismert ciklusok ismert periódusidejű ciklusokhoz kapcsolására (ZÜHLKE et al. 2003). KENT et al. (2004) később igazolta, hogy a korábban precessziósnak vélt ciklus valójában egy kb. 1,7 ezer éves szub-Milanković ciklus, míg az addig ismeretlen eredetűnek és kb. 200 ezer éves periódusúnak tartott ciklus valójában precessziós eredetű. A sikeres párosítás után kimutathatóvá vált a rövid és a hosszú excentricitás is. Az új eredmények alapján a Latemar-platform rétegsorának lerakódása kb. 800 ezer évet vett igénybe, mely immár összhangban van a radiometrikus korokkal, illetve az integrált magnetosztatigráfiai és biosztatigráfiai eredményekkel is.

Szintén klasszikus ciklussztatigráfiai tanulmányok színtere az Észak-Amerika keleti partvidékén húzódó Newark-medence. A triász végén és jura elején ez az egykori rift medence az Egyenlítőhöz közel helyezkedett el. Rétegsora zömmel tavi üledékekből áll, a ciklicitás az egykori tó vízszintváltozásaihoz kapcsolódóan az üledékrétegek színének változásában is megfigyelhető (OLSEN & KENT 1996, OLSEN et al. 1999). A kifejezetten szedimentológiai és ciklussztatigráfiai vizsgálatok céljából mélyfúrású rétegsorok, kiegészítve a szomszédos, minden tekintetben hasonló Hartford-medence adataival (KENT & OLSEN 2008, KENT et al. 2017) magukba foglalják a teljes felső triászt és legalsó jurát. Ezáltal az egyik leghosszabb ciklussztatigráfiai szempontból vizsgált folytonos szelvényt és az abból származtatott csillagászati korszaklát jelentik (HINNOV & HILGEN 2012). A Newark-Hartford-medence rétegsorán nagy felbontású magnetosztatigráfiai vizsgálatokat is végeztek, az integrált eredményekből csillagászati kalibrációjú pólusátfordulási skála (*Astronomical Polarity Time Scale*, APTS) is készült, meg-

teremtve a globális korreláció lehetőségét tengeri szelvényekkel is (KENT et al. 2017). A Colorado-platón mélyült, hasonló korú rétegsorokat harántoló fúrások vizsgálati eredményeivel összehasonlítva megnyíltn látszik az út a Naprendszer kaotikus viselkedéséből származó kb. 50 millió éves korlát áttörésére is, amennyiben a csillagászati modell helyett empirikus úton, jól megőrződött ciklusos rétegsorok vizsgálata alapján kiszámíthatóak a 405 ezer éves hosszú excentricitásnál kevésbé állandó ciklusok periódusidője is (OLSEN et al. 2019).

A kainozoikum ciklussztratigráfiája számára a csillagászati modell elérhetősége mellett a mélytengeri fúrómagok vizsgálatának lehetősége is döntő jelentőségű. WESTERHOLD et al. (2020) tanulmánya széles nemzetközi összefogás keretében az egész kainozoikum legjobb bentosz foraminifera stabilizotóp-adatsoraiból ($\delta^{13}\text{C}$ és $\delta^{18}\text{O}$) megalkotott új kompozit szelvényt ismertet (9. ábra). A kompozit szelvényen végzett ciklussztratigráfiai vizsgálatok alapján a paleocén–eocén szakaszra ± 100 ezer, az oligocén–középsőmiocén szakaszra ± 50 ezer, a késő-miocén és fiatalabb szakaszra pedig ± 10 ezer éves hibahatárral hoztak létre korszaklát. A rendkívüli hosszúságú és pontosságú korszaklá megalakításán túl jellemezték a paleoklíma csillagászati kényszer által vezérelt változásait a kainozoikum során. A sarki jég térfogata és a légköri CO_2 koncentrációja alapján négy különböző klímaállapotba (üvegház – *hothouse*, melegház – *warmhouse*, hűtőház – *coolhouse*, jégkorszak – *icehouse*) sorolták a kainozoikum egyes szakaszait. Kimutatták, hogy üvegház vagy melegház állapotban az éghajlat sokkal kiszámíthatóbban viselkedik, azaz sokkal egyértelműbben reagál a Milanković-ciklusok jelentette csillagászati kényszerre, mint hűtőház állapotban vagy jégkorszak idején.

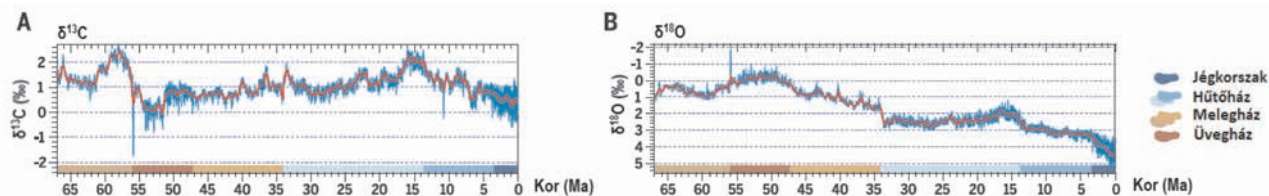
Végül LISIECKI & RAYMO (2005) nagy jelentőségű munkájának ismertetésével kanyarodhatunk vissza a Milanković-ciklusok bölcsőjéhez, vagyis a plio-pleisztocén eljegesedés ciklikusságának vizsgálatához. Összesen 57 kiválasztott mélytengeri fúrómag bentosz foraminiferáinak $\delta^{18}\text{O}$ adataiból hoztak létre olyan kompozit szelvényt, melyet az általuk a besugárzási görbe alapján előállított, a sarki jég-sapka térfogatváltozásait tükröző célgörbével kalibráltak. A negyedidőszak rétegtanában mára elsőrendű jelentőségű tengeri izotópos szakaszokat (*Marine Isotope Stages*, MIS) sikerrel terjesztették ki a pliocén kezdetéig, 5,3 millió évre visszamenően, újból és meggyőzően igazolva az eljegesedések és a Milanković-ciklusok kapcsolatát.

Összefoglalás

Noha a rétegtan a geológia egyik legkorábban kialakult tudományága, fejlődése új módszereknek köszönhetően az elmúlt évtizedekben ismét lendületet vett. Az egyik leglátványosabban fejlődő terület a ciklussztratigráfia és asztronológia, melyek áttekintésére vállalkoztunk. Éppen 100 évvel ezelőtt fektette le Milutin MILANKOVIĆ annak az elméletnek a matematikai alapjait, amely a pleisztocén jégkorszak ismétlődő eljegesedéseit a Föld csillagászati pályaelemeinek periodikus változásai által vezérelt éghajlatváltozásokhoz kötötte. Azóta sokrétű bizonyítást nyert a Milanković-ciklusok, a precesszió, a tengelyferdeség és az excentricitás periodikus változásai által a besugárzás ingadozásából fakadó egykori klímaváltozások nyomainak megőrződése az üledékes kőzetek rétegsoraiban, nem csupán a legutolsó jégkorszak idején.

A paleoklíma indikátorainak egyre bővülő tárháza segítségével, litológiai, paleontológiai, fizikai és geokémiai adatsorok vizsgálata révén ciklusosnak bizonyultak olyan, nagyon különböző környezetekben keletkezett rétegsorok is, melyekről ez szabad szemmel nem állapítható meg. Az időszorelemzés matematikai módszerei rohamosan fejlődtek az elmúlt évtizedekben, széles körű alkalmazásukat pedig a számítástechnika forradalma tette lehetővé. Elterjedten használt protokollok állnak rendelkezésre az adatsorok előkészítésére, a gyors Fourier-transzformáció segítségével elvégzett spektrálanalízisre, majd az eredmények ábrázolására teljesítményspektrum és spektrogram segítségével. Az értelmezés során a meghatározott megbízhatósági szinteket meghaladó frekvenciacsúcsok periódusainak aránya ismeretében azonosíthatjuk a Milanković-ciklusokat. Az utolsó kb. 50 millió évre megbízható csillagászati modell segítségével végezhető kalibráció, de az idősebb rétegsorokban a Naprendszer kaotikus viselkedése miatt csak a hosszú excentricitási ciklus 405 ezer éves periódusa megbízható. Mindazonáltal a jel szűrése után tetszőleges korú vizsgált szelvényhez készíthető lebegő korszaklá. A ciklussztratigráfiai elemzés többek között a közelmúltban fejlesztett, felhasználóbarát Acycle szoftver segítségével, belátható mértékű tanulási folyamat után speciális előképzettség nélkül is elvégezhető.

A nemzetközi szakirodalomban exponenciálisan nő a ciklussztratigráfiai tanulmányok száma. Ezek egyik fő célja az asztronológia, a rétegsorok keletkezési időtartamának



9. ábra. A kainozoikum klímaállapot-változásai asztronológiai kormodellre illesztett mélytengeri bentosz $\delta^{13}\text{C}$ (A) és $\delta^{18}\text{O}$ (B) kompozit adatsorok alapján. (WESTERHOLD et al. 2020 alapján)

Figure 9. Changes of Cenozoic climate states based on an astronomically dated composite of deep-sea benthic foraminifera $\delta^{13}\text{C}$ (A) és $\delta^{18}\text{O}$ (B) data. (Based on WESTERHOLD et al. 2020)

meghatározása. Más rétegtani módszerekkel kombinálva ennek egyre növekvő szerepe van a földtörténeti időskála mind pontosabb kalibrálásában. A kormodellek megalkotása mellett hasonlóan fontos a ciklussztratigráfia szerepe a paleoklíma-kutatásban is. Ezek a kutatások egyben hozzájárultak az üledékképződési rendszerek klimatikus meghatározott változásainak jobb megértéséhez is.

Hazánkban a 20. század derekán MILANKOVIĆ kortársa, BACSÁK György sokat tett az elmélet fejlődéséért és elfogadtatásáért, hatásának köszönhetőek az első magyarországi geológiai alkalmazások is. Ezeket szórványosan követték továbbiak, a szemlénken ismertetett korszerű módszertannal mindeddig csak két tanulmányban találkozhatunk. Abban a reményben foglaltuk össze a módszer alapjait, használatának lépéseit és geológiai alkalmazásait, hogy ezzel elősegíthetjük a modern ciklussztratigráfia és asztrokronológia hazai elterjedését. Egyrészt a felsorolt hazai példák némelyikének korszerű újvizsgálata új eredményekkel kecsegtet, másrészt számos további magyarországi képződmény

ciklicitásának vizsgálatából várhatók jelentős, új rétegtani eredmények.

Köszönetnyilvánítás

Köszönjük SZTANÓ Orsolya biztatását ennek a magyar nyelvű összefoglaló tanulmánynak az elkészítésére és hasznos szerkesztői megjegyzéseit. Mathieu MARTINEZ (Université de Rennes) segítsége nélkülözhetetlen volt az itt ismertetett módszerek használatának elsajátításához. Köszönet illeti HAAS Jánost és KOVÁCS Józsefet bírálóként tett építő kritikai megjegyzéseikért. A kutatást az Európai Unió és Magyarország támogatta az Európai Regionális Fejlesztési Alap társfinanszírozásában a GINOP-2.3.2.-15-2016-00009 azonosítószámú 'IKER' pályázatban, valamint az NKFIH OTKA K135309 pályázatban. Ez a tanulmány az MTA–MTM–ELTE Paleontológiai Kutatócsoport 336. publikációja.

Irodalom — References

- ADHÉMAR, J. 1842: *Révolutions de la mer*. — Carilion-Goeury & V. Dalmont, Paris, 112 p.
- BACSÁK G. 1940: Az interglaciális korszakok értelmezése. — *Az Időjárás* **44/1–2, 3–4, 5–6**, 8–16, 62–69, 105–108.
- BACSÁK G. 1954: A pliocén és a pleisztocén az égi mechanika megvilágításában. — *Földtani Közlöny* **85/1**, 70–105.
- BAJNAI, D., PÁLFY, J., MARTINEZ, M., PRICE, G. D., NYERGES, A. & FÖZY, I. 2017: Multi-proxy record of orbital-scale changes in climate and sedimentation during the Weissert Event in the Valanginian Bersek Marl Formation (Gerecse Mts., Hungary). — *Cretaceous Research* **75**, 45–60. <https://doi.org/10.1016/j.cretres.2017.02.021>
- BALOG, A., HAAS, J., READ, J. F. & CORUH, C. 1997: Shallow marine record of orbitally forced cyclicity in a Late Triassic carbonate platform, Hungary. — *Journal of Sedimentary Research* **67/4**, 661–675. <https://doi.org/10.1306/d426860d-2b26-11d7-8648000102c1865d>
- BERGER, A. & LOUTRE, M. F. 1994: Precession, eccentricity, obliquity, insolation and paleoclimates. — In: DUPLESSY, J.-C. & SPYRIDAKIS, M.-T. (eds): *Long-term Climatic Variations. NATO ASI Series 22*. Springer Berlin, Heidelberg, 107–151. https://doi.org/10.1007/978-3-642-79066-9_5
- BLACKMAN, R. B. & TUKEY, J. W. 1958: *The Measurement of Power Spectra from the Point of View of Communication Engineering*. — Dover Publications, 190 p.
- BLOOMFIELD, P. 2000: *Fourier Analysis of Time Series: An Introduction (2. ed.)*. — Wiley & Sons Ltd., 272 p.
- BOER, P. L. DE & SMITH, D. G. (eds) 1994: Orbital Forcing and Cyclic Sequences. — In: *Special Publication of The International Association of Sedimentologists 19*. Blackwell Scientific Publications, 559 p. <https://doi.org/10.1002/9781444304039>
- BOULILA, S. 2019: Coupling between Grand cycles and Events in Earth's climate during the past 115 million years. — *Scientific Reports* **9**, 327. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-36509-7>
- BRACK, P., MUNDIL, R., OBERLI, F., MEIER, M. & RIEBER, H. 1996: Biostratigraphic and radiometric age data question the Milankovitch characteristics of the Latemar cycles (Southern Alps, Italy). — *Geology* **24/4**, 371–375. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1996\)024<0371:Baradq>2.3.Co;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1996)024<0371:Baradq>2.3.Co;2)
- COOLEY, J. W. & TUKEY, J. W. 1965: An algorithm for the machine calculation of complex Fourier series. — *Mathematics of Computation* **19**, 297–301. <https://doi.org/10.1090/S0025-5718-1965-0178586-1>
- CROLL, J. 1864: On the physical cause of the change of climate during geological epochs. — *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science* **28/187**, 121–137. <https://doi.org/10.1080/14786446408643733>
- CVJANOVIC, I., LUKOVIC, J. & BEGG, J. D. 2020: One hundred years of Milanković cycles. — *Nature Geoscience* **13**, 524–525. <https://doi.org/10.1038/s41561-020-0621-2>
- D'ARGENIO, B., FISCHER, A. G., PREMOLI SILVA, I., WEISSERT, H. & FERRERI, V. (eds) 2004: Cyclostratigraphy: Approaches and Case Histories. — In: *SEPM Special Publication 81. SEPM (Society for Sedimentary Geology)*. Tulsa, Oklahoma, USA, 311 p. <https://doi.org/10.2110/pec.04.81>
- EINSELE, G., RICKEN, W. & SEILACHER, A. 1991: *Cycles and Events in Stratigraphy*. — Springer-Verlag, 995 p.
- FISCHER, A. G. 1964: The Lofer cyclothem of the alpine Triassic. — *Kansas Geological Survey Bulletin* **169**, 107–149.

- FISCHER, A. G., DE BOER, P. L. & PREMOLI SILVA, I. 1990: Cyclostratigraphy. — In: GINSBURG, R. N. & BEAUDOIN, B. (eds): *Cretaceous Resources, Events and Rhythms: Background and Plans for Research. Nato ASI Series C 304*. Springer Dordrecht, 139–172. https://doi.org/10.1007/978-94-015-6861-6_8
- FOGARASI, A. 1995: Ciklussztratiográfiai vizsgálatok a gerecsei krétában: előzetes eredmények (Cretaceous cyclostratigraphy of Gerecse Mts: Preliminary results). — *Általános Földtani Szemle* **27**, 43–58.
- GILBERT, G. K. 1895: Sedimentary measurement of Cretaceous time. — *The Journal of Geology* **3/2**, 121–127. <https://doi.org/10.1086/607150>
- GOLDHAMMER, R. K., DUNN, P. A. & HARDIE, L. A. 1987: High frequency glacio-eustatic sealevel oscillations with Milankovitch characteristics recorded in Middle Triassic platform carbonates in northern Italy. — *American Journal of Science* **287/9**, 853–892. <https://doi.org/10.2475/ajs.287.9.853>
- GOLDHAMMER, R. K., DUNN, P. A. & HARDIE, L. A. 1990: Depositional cycles, composite sea-level changes, cycle stacking patterns, and the hierarchy of stratigraphic forcing: Examples from Alpine Triassic platform carbonates. — *Geological Society of America Bulletin* **102/5**, 535–562. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1990\)102<0535:Dccslc>2.3.Co;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1990)102<0535:Dccslc>2.3.Co;2)
- HAAS, J., Ó. KOVÁCS, L. & TARDI-FILÁCS, E. 1994: Orbitally forced cyclical changes in the quantity of calcareous and siliceous microfossils in an upper Jurassic to lower Cretaceous pelagic basin succession, Bakony Mountains, Hungary. — *Sedimentology* **41/4**, 643–653. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3091.1994.tb01415.x>
- HAMMER, Ø. & HARPER, D. A. T. 2006: *Paleontological Data Analysis*. — Blackwell Publishing, 351 p. <https://doi.org/10.1002/9780470750711>
- HAYS, J. D., IMBRIE, J. & SHACKLETON, N. J. 1976: Variations in the Earth's orbit: Pacemaker of the ice ages. — *Science* **194/4270**, 1121–1132. <https://doi.org/10.1126/science.194.4270.1121>
- HILGEN, F. J. 2010: Astronomical dating in the 19th century. — *Earth-Science Reviews* **98/1–2**, 65–80. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2009.10.004>
- HINNOV, L. A. 2013: Cyclostratigraphy and its revolutionizing applications in the earth and planetary sciences. — *Geological Society of America Bulletin* **125/11–12**, 1703–1734. <https://doi.org/10.1130/B30934.1>
- HINNOV, L. A. & GOLDHAMMER, R. K. 1991: Spectral analysis of the Middle Triassic Latemar Limestone. — *Journal of Sedimentary Research* **61/7**, 1173–1193. <https://doi.org/10.1306/d4267861-2b26-11d7-8648000102c1865d>
- HINNOV, L. A. & HILGEN, F. J. 2012: Cyclostratigraphy and Astrochronology. — In: GRADSTEIN, F. M., OGG, J. G., SCHMITZ, M. D. & OGG, G. M. (eds): *The Geologic Time Scale 2012*. Elsevier, 63–83. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-59425-9.00004-4>
- IMBRIE, J. & IMBRIE, K. P. 1979: *Ice Ages: Solving the Mystery*. — Enslow Publishers, 224 p.
- IMBRIE, J. & IMBRIE, J. Z. 1980: Modeling the climatic response to orbital variations. — *Science* **207/4434**, 943–953. <https://doi.org/10.1126/science.207.4434.943>
- JUHÁSZ, E., Ó. KOVÁCS, L., MÜLLER, P., TÓTH-MAKK, Á., PHILLIPS, L. & LANTOS, M. 1997: Climatically driven sedimentary cycles in the Late Miocene sediments of the Pannonian Basin, Hungary. — *Tectonophysics* **282/1–4**, 257–276. [https://doi.org/10.1016/s0040-1951\(97\)00222-9](https://doi.org/10.1016/s0040-1951(97)00222-9)
- JUHÁSZ, E., PHILLIPS, L., MÜLLER, P., RICKETTS, B., TÓTH-MAKK, Á., LANTOS, M. & Ó. KOVÁCS, L. 1999: Late Neogene sedimentary facies and sequences in the Pannonian Basin, Hungary. — In: DURAND, B., JOLIVET, L., HORVÁTH, F. & SÉRANNE, M. (eds): *The Mediterranean Basins: Tertiary Extension within the Alpine Orogen. Geological Society, London, Special Publications* **156**, Geological Society London, UK, 335–356. <https://doi.org/10.1144/gsl.Sp.1999.156.01.16>
- KENNEDY, J. A. & BRASSELL, S. C. 1992: Molecular records of twentieth-century El Niño events in laminated sediments from the Santa Barbara basin. — *Nature* **357**, 62–64. <https://doi.org/10.1038/357062a0>
- KENT, D. V., MUTTONI, G. & BRACK, P. 2004: Magnetostratigraphic confirmation of a much faster tempo for sea-level change for the Middle Triassic Latemar platform carbonates. — *Earth and Planetary Science Letters* **228/3–4**, 369–377. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2004.10.017>
- KENT, D. V. & OLSEN, P. E. 2008: Early Jurassic magnetostratigraphy and paleolatitudes from the Hartford continental rift basin (eastern North America): Testing for polarity bias and abrupt polar wander in association with the central Atlantic magmatic province. — *Journal of Geophysical Research* **113**, B06105. <https://doi.org/10.1029/2007jb005407>
- KENT, D. V., OLSEN, P. E. & MUTTONI, G. 2017: Astrochronostratigraphic polarity time scale (APTS) for the Late Triassic and Early Jurassic from continental sediments and correlation with standard marine stages. — *Earth-Science Reviews* **166**, 153–180. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2016.12.014>
- KOTELNIKOV, V. A. 1933: On the carrying capacity of the ether and wire in telecommunications. — *Proceedings of the first All-Union Conference on the technological reconstruction of the communications sector and the development of low-current engineering*.
- LASKAR, J., ROBUTEL, P., JOUTEL, F., GASTINEAU, M., CORREIA, A. C. M. & LEVRARD, B. 2004: A long-term numerical solution for the insolation quantities of the Earth. — *Astronomy & Astrophysics* **428/1**, 261–285. <https://doi.org/10.1051/0004-6361:20041335>
- LASKAR, J., FIENGA, A., GASTINEAU, M. & MANCHE, H. 2011: La2010: A new orbital solution for the long-term motion of the Earth. — *Astronomy & Astrophysics* **532**, A89. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201116836>
- LEES, J. M. & PARK, J. 1995: Multiple-taper spectral analysis: A stand-alone C-subroutine. — *Computers & Geosciences* **21/2**, 199–236. [https://doi.org/10.1016/0098-3004\(94\)00067-5](https://doi.org/10.1016/0098-3004(94)00067-5)
- LI, M., HINNOV, L. & KUMP, L. 2019a: *Acycle*: Time-series analysis software for paleoclimate research and education. — *Computers & Geosciences* **127**, 12–22. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2019.02.011>
- LI, M., HUANG, C., OGG, J., ZHANG, Y., HINNOV, L., WU, H., CHEN, Z.-Q. & ZOU, Z. 2019b: Paleoclimate proxies for cyclostratigraphy: Comparative analysis using a Lower Triassic marine section in South China. — *Earth-Science Reviews* **189**, 125–146. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.01.011>

- LISIECKI, L. E. & RAYMO, M. E. 2005: A Pliocene-Pleistocene stack of 57 globally distributed benthic $\delta^{18}\text{O}$ records. — *Paleoceanography* **20/1**, PA1003. <https://doi.org/10.1029/2004pa001071>
- LOMB, N. R. 1976: Least-squares frequency-analysis of unequally spaced data. — *Astrophysics and Space Science* **39/2**, 447–462. <https://doi.org/10.1007/Bf00648343>
- MAJOR G. 2006: A Milankovics-Bacsák elmélet és az éghajlatváltozások. — *Légkör* **51/Különszám**, 20–23.
- MANN, M. E. & LEES, J. M. 1996: Robust estimation of background noise and signal detection in climatic time series. — *Climatic Change* **33/3**, 409–445. <https://doi.org/10.1007/BF00142586>
- MAROS G., SZABADOSNÉ SALLAY E., ÁDÁMNÉ INCZE S., HATVANI I. G., PALOTÁS K., KOVÁCS J., GYENIS Á., GRÓF G., PÁSZTOR S., ANDRÁSSY L., MARA J., VIHAR L. & SZONGOTH G. 2020: Az ImaGeo magszkennelés módszerei egy mecseki fúrás nagyfelbontású értelmezésének példáján. — *Földtani Közlemények* **150/1**, 81–102. <https://doi.org/10.23928/foldt.kozl.2020.150.1.81>
- MARTINEZ, M. 2018: Mechanisms of preservation of the eccentricity and longer-term Milankovitch cycles in detrital supply and carbonate production in hemipelagic marl-limestone alternations. — In: MONTENARI, M. (ed.): *Stratigraphy & Timescales* **3**, 189–218. <https://doi.org/10.1016/bs.sats.2018.08.002>
- MARTINEZ, M. & DERA, G. 2015: Orbital pacing of carbon fluxes by a approximately 9-My eccentricity cycle during the Mesozoic. — *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* **112/41**, 12604–12609. <https://doi.org/10.1073/pnas.1419946112>
- MARTINEZ, M., DECONINCK, J.-F., PELLENARD, P., RQUIER, L., COMPANY, M., REBOULET, S. & MOIROUD, M. 2015: Astrochronology of the Valanginian–Hauterivian stages (Early Cretaceous): Chronological relationships between the Paraná–Etendeka large igneous province and the Weissert and the Faraoni events. — *Global and Planetary Change* **131**, 158–173. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2015.06.001>
- MARTINEZ, M., KOTOV, S., DE VLEESCHOUWER, D., PAS, D. & PÄLIKE, H. 2016: Testing the impact of stratigraphic uncertainty on spectral analyses of sedimentary series. — *Climate of the Past* **12/9**, 1765–1783. <https://doi.org/10.5194/cp-12-1765-2016>
- MARTÍNEZ-BRACERAS, N., PAYROS, A., MINIATI, F., AROSTEGI, J., FRANCESCHETTI, G. & REIJMER, J. 2017: Contrasting environmental effects of astronomically driven climate change on three Eocene hemipelagic successions from the Basque-Cantabrian Basin. — *Sedimentology* **64/4**, 960–986. <https://doi.org/10.1111/sed.12334>
- MEYERS, S. R. 2012: Seeing red in cyclic stratigraphy: Spectral noise estimation for astrochronology. — *Paleoceanography* **27/3**, PA3228. <https://doi.org/10.1029/2012PA002307>
- MEYERS, S. R. 2014: *Astrochron: An R package for astrochronology (0.9)*. <https://cran.r-project.org/package=astrochron>
- MEYERS, S. R. & SAGEMAN, B. B. 2007: Quantification of deep-time orbital forcing by average spectral misfit. — *American Journal of Science* **307/5**, 773–792. <https://doi.org/10.2475/05.2007.01>
- MILANKOVICH, M. 1920: *Théorie Mathématique des Phénomènes Thermiques Produits Par la Radiation Solaire*. — Gauthier-Villars, Paris, 340 p.
- MILANKOVICH, M. 1941: *Kanon der Erdbestrahlungen und seine Anwendung auf das Eiszeitenproblem*. — Königlich Serbische Akademie, Belgrade, 626 p.
- MUNDIL, R., ZÜHLKE, R., BECHSTÄDT, T., PETERHÄNSEL, A., EGENHOFF, S. O., OBERLI, F., MEIER, M., BRACK, P. & RIEBER, H. 2003: Cyclicities in Triassic platform carbonates: Synchronizing radio-isotopic and orbital clocks. — *Terra Nova* **15/2**, 81–87. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3121.2003.00475.x>
- MÜLLER, T., PRICE, G. D., BAJNAI, D., NYERGES, A., KESJÁR, D., RAUCSIK, B., VARGA, A., JUDIK, K., FEKETE, J., MAY, Z. & PÁLFY, J. 2017: New multiproxy record of the Jenkyns Event (also known as the Toarcian Oceanic Anoxic Event) from the Mecsek Mountains (Hungary): Differences, duration and drivers. — *Sedimentology* **64/1**, 66–86. <https://doi.org/10.1111/sed.12332>
- NÁDOR, A., LANTOS, M., TÓTH-MAKÁ, Á. & THAMÓ-BOZSÓ, E. 2003: Milankovitch-scale multi-proxy records from fluvial sediments of the last 2.6 Ma, Pannonian Basin, Hungary. — *Quaternary Science Reviews* **22/20**, 2157–2175. [https://doi.org/10.1016/S0277-3791\(03\)00134-3](https://doi.org/10.1016/S0277-3791(03)00134-3)
- NAISH, T. & KAMP, P. J. J. 1997: Sequence stratigraphy of sixth-order (41 k.y.) Pliocene–Pleistocene cyclothems, Wanganui basin, New Zealand: A case for the regressive systems tract. — *Geological Society of America Bulletin* **109/8**, 978–999. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1997\)109<0978:Ssosok>2.3.Co;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1997)109<0978:Ssosok>2.3.Co;2)
- NYQUIST, H. 1928: Certain topics in telegraph transmission theory. — *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers* **47/2**, 617–644. <https://doi.org/10.1109/T-AIEE.1928.5055024>
- OGG, J. G. 2012: Triassic. — In: GRADSTEIN, F. M., OGG, J. G., SCHMITZ, M. D. & OGG, G. M. (eds): *The Geologic Time Scale 2012*. Elsevier, 681–730. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-59425-9.00025-1>
- OGG, J. G., HINNOV, L. A. & HUANG, C. 2012: Jurassic. — In: GRADSTEIN, F. M., OGG, J. G., SCHMITZ, M. D. & OGG, G. M. (eds): *The Geologic Time Scale 2012*. Elsevier, 731–791. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-59425-9.00026-3>
- OLSEN, P. E. & KENT, D. V. 1996: Milankovitch climate forcing in the tropics of Pangaea during the Late Triassic. — *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* **122/1–4**, 1–26. [https://doi.org/10.1016/0031-0182\(95\)00171-9](https://doi.org/10.1016/0031-0182(95)00171-9)
- OLSEN, P. E., SHACKLETON, N. J., MCCAVE, I. N., WEEDON, G. P. & KENT, D. V. 1999: Long-period Milankovitch cycles from the Late Triassic and Early Jurassic of eastern North America and their implications for the calibration of the Early Mesozoic time–scale and the long-term behaviour of the planets. — *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* **357/1757**, 1761–1786. <https://doi.org/10.1098/rsta.1999.0400>
- OLSEN, P. E., LASKAR, J., KENT, D. V., KINNEY, S. T., REYNOLDS, D. J., SHA, J. & WHITESIDE, J. H. 2019: Mapping Solar System chaos with the Geological Orrery. — *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* **116/22**, 10664–10673. <https://doi.org/10.1073/pnas.1813901116>
- PÁLFY, J., SMITH, P. L. & MORTENSEN, J. K. 2000: A U-Pb and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ time scale for the Jurassic. — *Canadian Journal of Earth Sciences* **37/6**, 923–944. <https://doi.org/10.1139/e00-002>

- PERCIVAL, D. B. & WALDEN, A. T. 1993: *Spectral Analysis for Physical Applications: Multitaper and Conventional Univariate Techniques*. — Cambridge University Press, 612 p. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511622762>
- PRETO, N., HINNOV, L. A., HARDIE, L. A. & DE ZANCHE, V. 2001: Middle Triassic orbital signature recorded in the shallow-marine Latemar carbonate buildup (Dolomites, Italy). — *Geology* **29/12**, 1123–1126. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(2001\)029<1123:Mtosri>2.0.Co;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(2001)029<1123:Mtosri>2.0.Co;2)
- PÜSPÖKI, Z., FOGARASSY PUMMER, T., THAMÓ BOZSÓ, E., BERÉNYI, B., CSERKÉSZ NAGY, Á., SZAPPANOS, B., MÁRTON, E., LANTOS, Z., NÁDOR, A., FANCSIK, T., STERCEL, F., TÓTH MAKK, Á., MCINTOSH, R. W., SZŐCS, T. & FARAGÓ, E. 2019: High resolution stratigraphy of a Quaternary fluvial deposit based on magnetic susceptibility variations (Jászság Basin, Hungary). — *Boreas* **49/1**, 181–199. <https://doi.org/10.1111/bor.12412>
- REZESSY A. 1998: A Pisznicei Mészke ciklussztratigráfiai vizsgálata gerecsei szelvényeken. — *Földtani Közlöny* **128/2–3**, 297–320.
- SACCHI, M. & MÜLLER, P. 2004: Orbital cyclicity and astronomical calibration of the Upper Miocene continental succession cored at Iharosberény-I well site, western Pannonian basin, Hungary. — In: D'ARGENIO, B., FISCHER, A. G., PREMOLI SILVA, I., WEISSERT, H. & FERRERI, V. (eds): *Cyclostratigraphy: Approaches and Case Histories. SEPM Special Publication 81. SEPM (Society for Sedimentary Geology) Tulsa, Oklahoma, USA*, 275–294. <https://doi.org/10.2110/pec.04.81.0275>
- SCARGLE, J. D. 1982: Studies in astronomical time series analysis. II. Statistical aspects of spectral analysis of unevenly spaced data. — *Astrophysical Journal* **263**, 835–853. <https://doi.org/10.1086/160554>
- SCHLAGER, W. 2005: Carbonate Sedimentology and Sequence Stratigraphy. — *Concepts in Sedimentology and Paleontology* **8**, SEPM, 200 p. <https://doi.org/10.2110/csp.05.08>
- SCHWARZACHER, W. 1947: Über die sedimentäre Rhythmik des Dachsteinkalkes von Lofer. — *Verhandlungen der Geologischen Bundesanstalt* **1947**, 175–188.
- SCHWARZACHER, W. 1954: Die Großrhythmik des Dachsteinkalkes von Lofer. — *Tschermaks mineralogische und petrographische Mitteilungen* **4**, 44–54. <https://doi.org/10.1007/BF01140374>
- SCHWARZACHER, W. 1975: Sedimentation Models and Quantitative Stratigraphy. — *Developments in Sedimentology* **19**, Elsevier Science, 382 p. [https://doi.org/10.1016/s0070-4571\(08\)x7020-7](https://doi.org/10.1016/s0070-4571(08)x7020-7)
- SCHWARZACHER, W. 1992: Cyclostratigraphy and the Milankovitch Theory. — *Developments in Sedimentology* **52**, Elsevier Science, 225 p.
- SCHWARZACHER, W. & HAAS, J. 1986: Comparative statistical analysis of some Hungarian and Austrian Upper Triassic peritidal carbonate sequences. — *Acta Geologica Hungarica* **29/3–4**, 175–196.
- SHANNON, C. E. 1949: Communication in the presence of noise. — *Proceedings of the IRE* **37/1**, 10–21. <https://doi.org/10.1109/JRPROC.1949.232969>
- SINNESAE, M., DE VLEESCHOUWER, D., ZEEDEN, C., BATENBURG, S. J., DA SILVA, A.-C., DE WINTER, N. J., DINARČS-TURELL, J., DRURY, A. J., GAMBACORTA, G., HILGEN, F. J., HINNOV, L. A., HUDSON, A. J. L., KEMP, D. B., LANTINK, M. L., LAURIN, J., LI, M., LIEBRAND, D., MA, C., MEYERS, S. R., MONKENBUSCH, J., MONTANARI, A., NOHL, T., PÄLIKE, H., PAS, D., RUHL, M., THIBAUT, N., VAHLENKAMP, M., VALERO, L., WOUTERS, S., WU, H. & CLAEYS, P. 2019: The Cyclostratigraphy Intercomparison Project (CIP): Consistency, merits and pitfalls. — *Earth-Science Reviews* **199**, 102965. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.102965>
- SPROVIERI, M., SACCHI, M. & ROHLING, E. J. 2003: Climatically influenced interactions between the Mediterranean and the Paratethys during the Tortonian. — *Paleoceanography* **18/2**, 1034. <https://doi.org/10.1029/2001PA000750>
- STRASSER, A., PITTET, B., HILLGARTNER, H. & PASQUIER, J.-B. 1999: Depositional sequences in shallow carbonate-dominated sedimentary systems: concepts for a high-resolution analysis. — *Sedimentary Geology* **128/3–4**, 201–221. [https://doi.org/10.1016/S0037-0738\(99\)00070-6](https://doi.org/10.1016/S0037-0738(99)00070-6)
- STRASSER, A., HILGEN, F. J. & HECKEL, P. H. 2007: Cyclostratigraphy concepts, definitions, and applications. — *Newsletters on Stratigraphy* **42/2**, 75–114. <https://doi.org/10.1127/0078-0421/2006/0042-0075>
- SZEDERKÉNYI T. 1963: Üledékképződési időszámítás a délmeceki szarmata rétegekben. — *Földtani Közlöny* **93/1**, 54–62.
- SZTANÓ, O. 1995: Palaeogeographic significance of tidal deposits: an example from an early Miocene Paratethys embayment, Northern Hungary. — *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* **113/2–4**, 173–187. [https://doi.org/10.1016/0031-0182\(95\)00054-p](https://doi.org/10.1016/0031-0182(95)00054-p)
- THOMSON, D. J. 1982: Spectrum estimation and harmonic analysis. — *Proceedings of the IEEE* **70/9**, 1055–1096. <https://doi.org/10.1109/PROC.1982.12433>
- THOMSON, D. J. 1990: Quadratic-inverse spectrum estimates: applications to palaeoclimatology. — *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* **332/1627**, 539–597. <https://doi.org/10.1098/rsta.1990.0130>
- VAIL, P. R., AUDEMARD, F., BOWMAN, S. A., EISNER, P. N. & PEREZ-CRUZ, C. 1991: The stratigraphic signatures of tectonics, eustasy and sedimentology - an overview. — In: EINSELE, G., RICKEN, W. & SEILACHER, A. (eds): *Cycles and Events in Stratigraphy*. Springer-Verlag, 617–659.
- WEEDON, G. 2003: *Time-Series Analysis and Cyclostratigraphy: Examining stratigraphic records of environmental cycles*. — Cambridge University Press, 276 p. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511535482>
- WELCH, P. 1967: The use of fast Fourier transform for the estimation of power spectra: A method based on time averaging over short, modified periodograms. — *IEEE Transactions on Audio and Electroacoustics* **15/2**, 70–73. <https://doi.org/10.1109/tau.1967.1161901>
- WENDLER, J. E., WENDLER, I., VOGT, C. & KUSS, J. 2016: Link between cyclic eustatic sea-level change and continental weathering: Evidence for aquifer-eustasy in the Cretaceous. — *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* **441/3**, 430–437. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2015.08.014>
- WESTERHOLD, T., MARWAN, N., DRURY, A. J., LIEBRAND, D., AGNINI, C., ANAGNOSTOU, E., BARNET, J. S. K., BOHATY, S. M., DE VLEESCHOUWER, D., FLORINDO, F., FREDERICH, T., HODELL, D. A., HOLBOURN, A. E., KROON, D., LAURETANO, V., LITTLER, K., LOURENS, L. J., LYLE, M., PÄLIKE, H., RÖHL, U., TIAN, J., WILKENS, R. H., WILSON, P. A. & ZACHOS, J. C. 2020: An astronomically dated record of Earth's climate and its predictability over the last 66 million years. — *Science* **369/6509**, 1383–1387. <https://doi.org/10.1126/science.aba6853>

- WESTPHAL, H., HILGEN, F. & MUNNECKE, A. 2010: An assessment of the suitability of individual rhythmic carbonate successions for astrochronological application. — *Earth-Science Reviews* **99/1–2**, 19–30. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2010.02.001>
- WHITTAKER, E. T. 1915: On the functions which are represented by the expansions of the interpolation-theory. — *Proceedings of the Royal Society of Edinburgh* **35**, 181–194. <https://doi.org/10.1017/S0370164600017806>
- WILLIS, K. J., KLECZKOWSKI, A., BRIGGS, K. M. & GILLIGAN, C. A. 1999a: The role of sub-Milankovitch climatic forcing in the initiation of the northern hemisphere glaciation. — *Science* **285/5427**, 568–571. <https://doi.org/10.1126/science.285.5427.568>
- WILLIS, K. J., KLECZKOWSKI, A. & CROWHURST, S. J. 1999b: 124,000-year periodicity in terrestrial vegetation change during the late Pliocene epoch. — *Nature* **397**, 685–688. <https://doi.org/10.1038/17783>
- ZEEBE, R. E. 2017: Numerical solutions for the orbital motion of the solar system over the past 100 Myr: Limits and new results. — *The Astronomical Journal* **154/5**, 193. <https://doi.org/10.3847/1538-3881/aa8cce>
- ZEEBE, R. E. & LOURENS, L. J. 2019: Solar System chaos and the Paleocene–Eocene boundary age constrained by geology and astronomy. — *Science* **365/6456**, 926–929. <https://doi.org/10.1126/science.aax0612>
- ZEEDEN, C., MEYERS, S. R., LOURENS, L. J. & HILGEN, F. J. 2015: Testing astronomically tuned age models. — *Paleoceanography* **30/4**, 369–383. <https://doi.org/10.1002/2014pa002762>
- ZEEDEN, C., KABOTH, S., HILGEN, F. J. & LASKAR, J. 2018: Taner filter settings and automatic correlation optimisation for cyclostratigraphic studies. — *Computers & Geosciences* **119**, 18–28. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2018.06.005>
- ZÜHLKE, R., BECHSTÄDT, T. & MUNDIL, R. 2003: Sub-Milankovitch and Milankovitch forcing on a model Mesozoic carbonate platform - the Latemar (Middle Triassic, Italy). — *Terra Nova* **15/2**, 69–80. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3121.2003.00366.x>

Kézirat beérkezett: 2020. 09. 28.

A Balaton üledékének ásványai

PÓSFAI Mihály

Pannon Egyetem, Bio-nanotechnológiai és Műszaki Kémiai Kutatóintézet, Nanolab
mihaly.posfai@gmail.com
ORCID: 0000-0001-9355-3533

Minerals in the sediments of Lake Balaton

Abstract

As the largest water body in landlocked Hungary, Lake Balaton is often affectionately referred to as the “Sea of Hungary”. Given the economic, touristic and cultural significance of the lake, the preservation of its good ecological state under increasing anthropogenic pressure has always been a priority. This has been the trigger for intense scientific research over the last 130 years. Concerns about silting and eutrophication-related water quality deterioration have directed attention to the Holocene lake sediments. As a result of intense research efforts, by the end of the second half of the 20th century the processes governing sediment accumulation were fairly well understood. This can also be said with respect to the mineralogical composition and the role of the sediment in nutrient cycles. Nevertheless, current research using modern geochemical and mineralogical techniques can reveal important new details about the major mineral components of the sediment. This review focuses on some recently-discovered features of carbonate precipitation, including the roles of clay minerals in the nucleation of calcite. Furthermore, it discusses certain groups of minerals that form under biological control. There are several lines of ongoing research that aim at obtaining a better understanding of atomic-scale details of mineral-forming processes in the lake. These efforts will also try to decipher the respective roles of mud minerals in phosphorus mobilization (a process that resulted in an unexpected algal bloom event in 2019).

Keywords: Lake Balaton, Holocene, sediment, Mg-bearing calcite, protodolomite, biomineral, phosphorus

Összefoglalás

A Balaton holocén üledékének tudományos kutatása közel 130 éve kezdődött. Az üledék felhalmozódásának törvényszerűségeit, az iszap összetételét, a tavi tápanyagforgalomban betöltött szerepét a 20. század második felében viszonylag alaposan megismertük. Ennek ellenére a mai, modern geokémiai és ásványtani módszerekkel végzett vizsgálatok mindig újabb érdekes részletekkel gazdagítják ismereteinket. A jelen összefoglalásban elsősorban a tavi karbonátképződés jellegzetességeit, az agyagásványok kalcitképződésben játszott szerepét, valamint a biológiai folyamatok révén képződő ásványok egyes csoportjait tárgyalom. Jelenleg is több irányú, intenzív kutatás folyik egyrészt a Balatonban lejátszódó ásványképző folyamatok, másrészt az iszap ásványai és a tavi tápanyag (elsősorban a foszfor) mobilitása közötti összefüggések megértése érdekében.

Tárgyszavak: Balaton, holocén, üledék, Mg-tartalmú kalcit, protodolomit, bioásvány, foszfor

Bevezetés

Ismeretterjesztő és idegenforgalmi kiadványokban a Balatont gyakran a „magyar tenger”-ként emlegetik. Bár közhelesnek tűnhet ez a kifejezés, mégis találó a magyar földtani kutatás perspektívájából. Tenger híján a Balaton a legnagyobb vizes üledékgyűjtőnk, amelyben folyamatukban vizsgálhatók olyan geológiai és geokémiai jelenségek, mint –

sok egyéb mellett – a karbonátképződés, biogén ásványkiválás, üledékáthalmozás, ásványok és mikroorganizmusok, üledék és tápanyagok, illetve üledék és éghajlatváltozás kapcsolatai. Nem meglepő, hogy nagy tudósaink szívesen foglalkoztak a Balatonnal vagy a környékével, könyvtárnyi irodalmat hagyva maguk után (LÓCZY 1913). Sok esetben új módszerek tökéletesítésére is a Balaton nyújtott megfelelő természeti hátteret vagy kutatási célt Eötvös Loránd ingá-
jára



1. ábra. Francois-Sulpice BEUDANT, EÖTVÖS Loránd, LÓCZY Lajos és CHOLNOKY Jenő emléktáblája a „Balatonfüredi Pantheon” falán

Figure 1. Plaques on the walls of the “Balatonfüredi Pantheon”, commemorating famous scientists: Francois-Sulpice BEUDANT, Loránd EÖTVÖS, Lajos LÓCZY and Jenő CHOLNOKY

tól (SZABÓ & BODOKY 2019) a legutóbbi vízi szeizmikus méresekig (Tóth et al. 2010, VISNOVITZ et al. 2019). Neves elődeink nemcsak szűk szakmai körben ismertek, hanem máig – joggal – valóságos kultusz is övezi munkásságukat: oktatási és kutatási intézmények, utcák és emléktáblák őrzik nevüket (1. ábra). A Balaton kutatására kezdettől jellemző volt az inter- és multidiszciplinaritás, amely nemcsak intézmények, hanem különböző tudományágakat művelő szakemberek közötti hosszútávú, sikeres együttműködések révén valósult meg. A tihanyi intézet (mai nevén Ökológiai Kutatóközpont, Balatoni Limnológiai Intézet) hidrobiológusainak, a VITUKI mérnökeinek, a MÁFI geológusainak, a MÁELGI és az ELTE geofizikusainak és sok más intézet kutatóinak közös munkája vezetett a legérdekesebb tudományos eredményekre.

A Földtani Közlöny 150 évvel ezelőtti születése nagyjából egybeesik a Balaton és környéke tudományos vizsgálatának kezdetével. A kutatás intenzitása periodikusan változott, és az egyes ciklusokat általában összefoglaló tanulmányok zárták le, kezdve a híres Lóczy-féle sorozattal („A Balaton tudományos tanulmányozásának eredményei”; LÓCZY 1913), bezárva a Magyarhoni Földtani Társulat kiadásában épp megjelent, ismeretterjesztő célzatú Lóczy-emlékkötettel (BABINSZKI & HORVÁTH 2020). A jelen írásnak nem célja mindezen kutatások eredményeinek áttekintése. Így nem térünk ki sem a Balaton-felvidék földtanával (BUDAI & Csillag 1998), sem a tó hidrobiológiájával foglalkozó óriási irodalomra (pl. ENTZ & SEBESTYÉN 1942). Kizárólag a Balaton holocén üledékével, azon belül is ennek ásványtani vonatkozásaival foglalkozunk, elsősorban a jelenleg is zajló kutatások fő irányait felvázolva.

Az iszap több évtizedes kutatását az alapvető tudományos kíváncsiságon túl néhány speciális, konkrét cél motiválta: (1) a tó fejlődéstörténetének tisztázása (CSERNY et al. 1991a), (2) a holocén éghajlatváltozások vizsgálata (CSERNY 2002, SÜMEGI et al. 2008), (3) a tó üledékfelhalmozódása miatti aggodalom (SZESZTAY 1966), valamint (4) az üledék szerepének megértése a tó tápanyagforgalmában, ezáltal eutrofizációjában (SOMLYÓDY & VAN STRATEN 1986). E célokat tekintve a balatoni iszap vizsgálata sok szempontból sikertörténet. Meglehetősen pontossággal ismerjük a tó keletkezésé-

nek idejét, kialakulásának fázisait, az iszap felhalmozódásának ütemét (CSERNY 2002, TULLNER 2002). Paleontológiai (NAGYNÉ BODOR & SZUROMINÉ KORECZ 2002, BUCZKÓ et al. 2005) és izotópgeokémiai (CSERNY et al. 1995, SCHÖLL-BARNA et al. 2012) vizsgálatok készültek az éghajlatváltozások elemzésére. A legnagyobb sikernek azonban az eutrofizáció megfékezése tekinthető: a tudományos kutatások eredményeire (SOMLYÓDY & VAN STRATEN 1986, HERODEK & ISTVÁNOVICS 1986, ISTVÁNOVICS et al. 1989) alapozva készültek el a 20. század végére azok a vízügyi és vízminőség-védelmi beavatkozások, amelyeknek általában mind a szakma, mind a közvélemény a Balaton utóbbi két évtizedben tapasztalt kiváló vízminőségét tulajdonítja.

Mindezek ellenére a fenti kutatási témák ma is aktuálisak. Ennek oka egyrészt a vizsgálati módszerek rohamos fejlődése, amelynek révén a korábbiaknál mindig pontosabb és részletesebb adatok nyerhetők az iszap mennyiségéről, koráról, anyagáról, az élővilággal való kölcsönhatásairól (PÓSFAI et al. 2019a). De a balatoni iszap mai kutatásának van egy fontosabb ösztönzője: az 1994-et követő „békeidő” után először 2019-ben tapasztalt algavirágzás. Az idei nyáron (2020-ban) már a napi hírek között is rendszeresen jelennek meg a Balaton vizéről és planktoni kékalgáiról szóló tudósítások, amelyek hol vészharangot kongatnak, hol nyugtatják a közvéleményt. Valójában nem tudjuk, mi okozta a 2019-es és a kisebb 2020-as virágzásokat, és azt sem, hogy várható-e hasonló események a jövőben. Annyi biztosnak tűnik, hogy az algák számára nélkülözhetetlen tápanyagok – elsősorban a foszfor – az iszaptól szabadulhattak fel (ISTVÁNOVICS et al., közlésre benyújtva). Nemcsak a planktonikus algák okoztak mostanában riadalmat, hanem a fenéken élő, bevonatot alkotó szervezetek is: 2020 tavaszán Balatonalmádi strandján a vízfelszín az üledékről felszakadt algagyeppdarabok borították (2. ábra). Ezek a témák jól illusztrálják, hogy a Balaton iszapját, az iszap tápanyagforgalomban betöltött szerepét még mindig nem ismerjük eléggé, és az iszap ásványainak kutatása nemcsak szakmai kíváncsiságunk kielégítését szolgálja, hanem rendkívül fontos a tó (számunkra) kedvező állapotának megőrzése érdekében is.

A balatoni iszap vizsgálatának tehát új lendületet adott a sajnálatos vízminőségromlás, és a kutatás jelenleg is nagy



2. ábra. Az iszap felszínéről felszakadt algaszőnyegdarabok Balatonalmádi kikötőjében, 2020. május 23-án. (A világos foltok a vízben tükröződő felhők.)

Figure 2. Pieces of algal mats released from the sediment surface, floating on the water in the harbor of Balatonalmádi on 23rd May, 2020. (The whitish areas are reflections of clouds.)

intenzitással folyik. Sok új eredmény vár még feldolgozásra és publikálásra, amelyekről ebben az összefoglaló tanulmányban legfeljebb csak érintőlegesen lehet szó. Az alábbiakban az üledék kutatástörténetének vázlatos áttekintése után tárgyaljuk a tóban lezajló ásványképző folyamatokat, az ezekkel kapcsolatos aktuális kérdéseket, utalva a jelenleg is folyamatban lévő kutatásokra.

Mennyi az iszap? Kutatástörténeti áttekintés

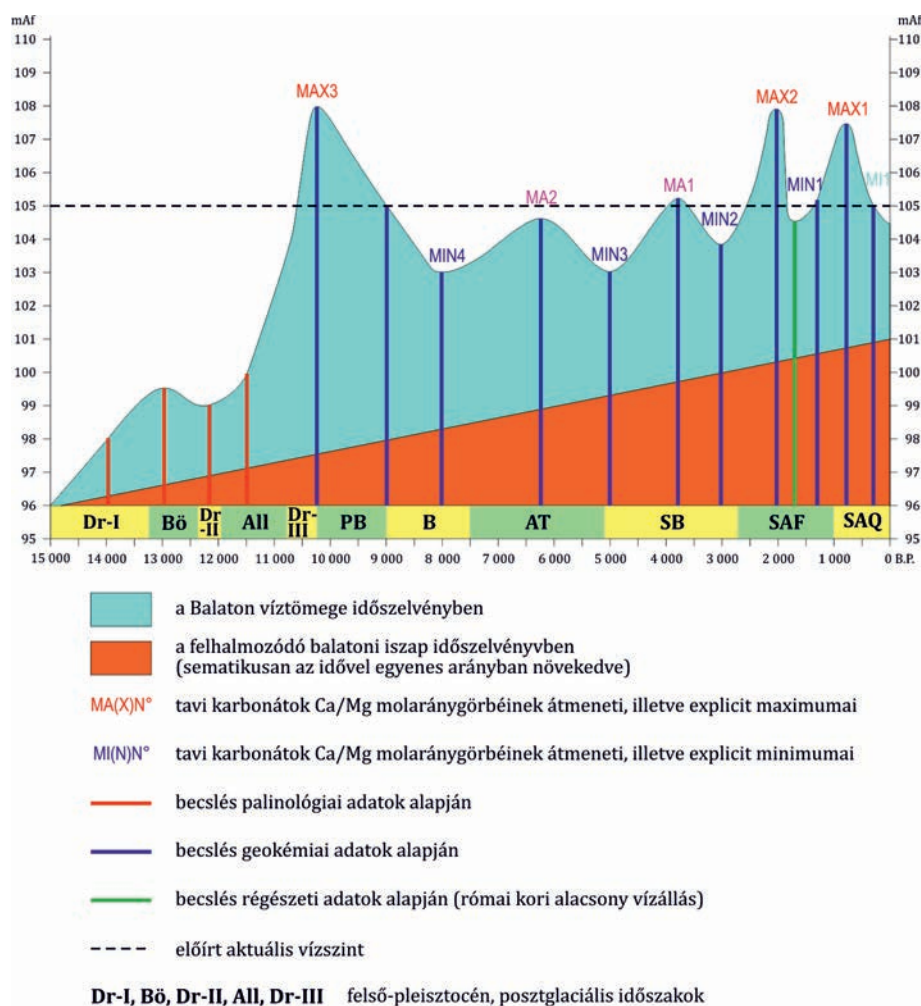
A Balaton kutatásának kezdeteitől az egyik fő cél a tó korának megállapítása volt, ehhez pedig a nyilvánvaló kulcsot az üledék adja. Ezért az üledék vastagságának meghatározása már id. LÓCZY Lajos idejében is alapvető kérdés volt. LÓCZY hajóról több fúrást mélyített a tó aljzatába az akkori technológia szerinti legmodernebb eszközökkel. A következő fúrásokat 1948-ban mélyítették (ZÓLYOMI 1952), majd az 1960-as években egy újabb sorozatot a VITUKI kutatói (SZESZTAY 1966). A modern, 20. századi geokémiai módszerek alkalmazását hozták el az 1970-es évek, amikor German MÜLLER heidelbergi kutató vezetésével újabb hat fúrással harántolták a holocén iszapot. Az ásványtani szempontból máig alapműnek tekinthető 1978-as munkájukban (MÜLLER & WAGNER 1978) írták le először világosan, hogy az iszap felét-kétharmadát a tóban képződő karbonátásványok adják. Az iszap felső 10 cm-ének alapvető tulajdonságait (szemcseszerkezet, karbonátartalom, szervesszén-, nitrogén- és oldhatófoszfor-tartalom) 5000 minta alapján MÁTÉ (1987) térképezte fel.

A Balaton üledékének kutatásában a legintenzívebb és legeredményesebb fázist a MÁFI által, CSERNY Tibor veze-

tésével végzett kutatás képviselte. 1981-től kezdődően 33 magfúrással és 373 fkm-nyi geofizikai szelvényvel az egész tó területén feltérképezték a laza üledék vastagságát. A fúrások anyagát sokoldalúan, szedimentológiai, ásványtani, geokémiai és palinológiai vizsgálatokkal feldolgozták (CSERNY 2002). Ezek a vizsgálatok alapozták meg a tó kialakulására és fejlődésére vonatkozó megállapításokat (3. ábra), amelyekkel azóta is – nemcsak a szakirodalomban, hanem az ismeretterjesztő médiában és a nemzeti park tájékoztató tábláin is – számtalan helyen találkozhatunk. Szintén CSERNY Tibor kezdeményezésére kubai szakemberek végezték az első vízi szeizmikus méréseket a Balatonon, ezek eredményeként elkészült egy újabb, a korábbinál pontosabb iszapvastagság-térkép (CSERNY & CORRADA 1990). Megállapították, hogy az idősebb pleisztocén és pannóniai korú rétegekre diszkordánsan települő holocén iszap vastagsága átlagosan 5 m körüli, de helytől függően 0 és 9 m között változik. A felső, néhány cm-es réteg anyaga könnyen felkavarodik, és az áramlások áthalmozhatják – így fordulhat elő, hogy az állandó, erős áramlásnak kitett Tihanyi-szorosban alig van üledék, míg a tóközépi részeken 6–7 m, a Zala torkolatában pedig 10 m vastagságot is elérhet (4. ábra).

A vízi szeizmikus mérések új lendületet kaptak a 2000-es években (CSERNY et al. 2005) és jelenleg is zajlanak az ELTE geofizikusai koordinálásában (ZLINSZKY et al. 2010; VISNOVITZ et al. 2017, 2019). Az egyre fejlettebb eszközök és sűrűbb szelvények által mind precízebbé váló mérések eredményeként minden eddiginél pontosabb adataink vannak az iszappmelységről, és a korábbi mérésekkel összehasonlítva az iszap áthalmozódásáról, dinamikájáról is fogalmat alkothatunk (KISS et al. 2018).

Nemcsak az iszapvastagság, hanem a szemcseméret is

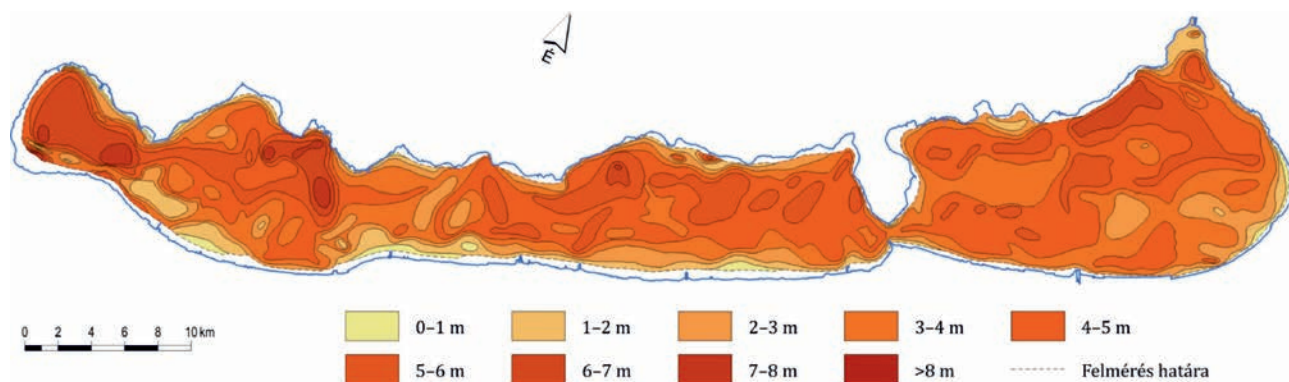


3. ábra. A Balaton vízszintjének változásai és iszapjának felhalmozódása paleontológiai, geokémiai és régészeti adatok alapján, TULLNER (2002) és TULLNER & CSERNY (2003) nyomán. (Bár az iszapfelhalmozódás üteme valószínűleg nem volt egyenletes, megfelelő adatok híján az ábra így ábrázolja.)

Figure 3. Changes in water level and the accumulation of bottom sediment in Lake Balaton, according to paleontological, geochemical and archaeological data, based on TULLNER (2002) and TULLNER & CSERNY (2003). (In lack of appropriate data the rate of sediment accumulation is shown as uniform, even though it likely changed over time.)

jellegzetes változatosságot mutat (CSERNY 2002). Még a laikus fürdőzők számára is jól ismert tény, hogy az uralkodó északi szelek a déli part mentén egy néhány száz m széles homokzónát alakítottak ki, míg az északi part mentén és a tó

nyagot. Mai tudásunk tükrében abnormálisan nagy értéket kapott (LÓCZY 1920, in: VIRÁG 1998). Később, az 1930-as évektől parázs vita bontakozott ki arról, mennyiben járul hozzá a befolyó vizek, elsősorban a Zala hordaléka az iszaphoz.



4. ábra. A Balaton holocén iszapjának vastagsági térképe (CSERNY 2002 nyomán)

Figure 4. Thickness map of the Holocene sediment in Lake Balaton (according to CSERNY 2002)

belsejében az iszap szemcsemérete sokkal kisebb (főleg a kőzetliszt-, kisebb részben az agyagfrakcióba tartozik). Az talán kevésbé köztudott, hogy a Zala és a Tapolca-patak által behordott nagyobb szemcseméretű hordalék lerakódása miatt egy kisebb mértékű nyugat-kelet irányú szemcseméret-csökkenés is megfigyelhető. A homok- és kőzetliszt-frakció ásványos összetétele is eltérő, a durvább szemcsék elsősorban allocton eredetűek, ezért több bennük a kvarc, földpát és csillám, mint a finom iszapban, amely elsősorban karbonátásványokból áll (TOMPA et al. 2014).

Az iszap ásványainak eredete

A kutatások kezdetétől fontos kérdés volt, honnan ered az iszap anyaga, milyen arányban alkotják az allocton és autocton komponensek. LÓCZY idejében úgy tartották, hogy a tó iszapja elsősorban a levegőből ülepedő porból származik (TREITZ 1911, EMSZT 1911). Ezt a nézetet erősítette az a kísérlet is, amelynek során LÓCZY a Kerekedi-öbölben egy tutajra kihelyezett egy kádat, és mérte a benne felhalmozódó szilárd a-

Egészen szélsőséges becslések is megjelentek az irodalomban (VIRÁG 1998), míg a század második felében pontosabb mérésekkel megállapították, hogy a hulló por és a befolyók hordaléka azonos nagyságrendű anyaggal járul az iszaphoz (SZESZTAY 1961). Felmerült, hogy a biogén szerves anyag az üledék fő alkotója, azonban hamarosan tisztázódott, hogy az elpusztult szervezetek anyaga a Balatonban gyorsan lebomlik, és a szerves anyag még az iszap felső 10 cm-ében is legfeljebb az iszap 1–5 tömeg%-át teszi ki (MÁTÉ 1987). SZESZTAY (1966) számításaiiban már a befolyókkal beérkező oldott ionokból kicsapódó karbonátot tekintette az iszap fő komponensének, majd MÜLLER & WAGNER (1978) tisztázta, hogy a Balaton 15 ezer éves történetében a vízből kiváló karbonátok uralták az üledékképződést. Ezt a képet tovább finomították a CSERNY Tibor vezette vizsgálatok (CSERNY et al. 2020), különösen a Mg-tartalmú kalcit képződésére vonatkozóan (TULLNER 2002, CSERNY et al. 1991b).

Felmerülhet a kérdés, miért volt szükség több évtizedre annak megértéséhez, hogy az iszap kb. kétharmada autochton ásvány. A válasz egyszerű: a Balaton iszapjában nincs semmi különös, épp azok a „közönséges” ásványok alkotják – karbonátok, kőzetalkotó szilikátok – amelyek a hulló porral, a befolyók által szállított hordalékkal vagy a partelhabolás révén is érkeznek. A Tapolca-patak által szállított triász kalcitszemcse, a Szaharából érkező porban lévő kalcit és a Balatonban kicsapódó kalcit között első közelítésben nem látunk különbséget: mindhárom kalcit. Ha azonban részletesebben megvizsgáljuk a szemcseméret és -morfológia, az összetétel (elsősorban a Mg-tartalom) és esetleg a kristályszerkezet összefüggéseit, akkor kirajzolódnak a kalcit és kalcit közötti különbségek, és nemcsak a kalcit eredetere, hanem a tavi karbonátképződés sok apró részletére is fény derül (TOMPA et al. 2014, NYIRŐ-KÓSA et al. 2018; FODOR et al. 2020). Az iszap különböző eredetű alkotóelemeinek azonosítását, arányaik pontosabb becslését célozza egy jelenleg is folyó kutatás (ROSTÁSI et al. 2020). Az előzetes eredmények nagyjából alátámasztották az ismert arányokat a légköri ülepedésre és befolyók által szállított anyagra vonatkozóan, azonban a tavi kalcitkicsapódás esetében a korábbiaknál jelentősen nagyobb értéket adtak (ROSTÁSI et al. 2019). Az eltérésnek sok oka lehet, de ezeket korai lenne a jelen közleményben tárgyalni.

Az allochton, általában nagyobb szemcseméretű ásványok tehát beérkeznek a Balatonba, leülepednek, időnként felkavarodnak és áthalmazódnak, majd nagyrészt eltemetődnek az iszapban (egy elhanyagolható hányaduk távozik a Sión). Ezekkel az ásványokkal a továbbiakban nem foglalkozunk. Bár fontosak a Balaton vízminősége szempontjából, az üledék antropogén eredetű fémek és szerves szennyezőit (MÜLLER 1981, HLAVAY & POLYÁK 2002) sem tárgyaljuk részletesen. Ásványtani szempontból kétségkívül a legérdekesebb frakció az autochton ásványoké, és jelenlegi tudásunk szerint ezek játszanak szerepet a tápanyagok, elsősorban a foszfor megkötését és felszabadítását eredményező folyamatokban. Ezért a továbbiakban a tóban képződő ásványokról lesz szó.

A Balaton vizében és üledékében lezajló ásványképző-

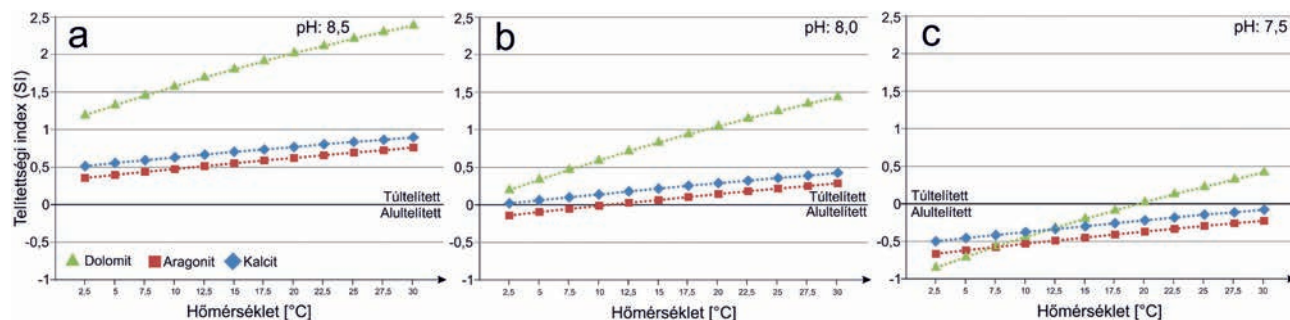
désben – még ha többnyire közvetve is – biológiai folyamatok játszanak fontos szerepet. Jellege szerint a bioásványképződést általában két nagy csoportra osztja a szakirodalom: a „biológiailag indukált” (*biologically-induced mineralization*, BIM) és „biológiailag szabályozott” (*biologically-controlled mineralization*, BCM) módokra (PÓSFAI & DUNIN-BORKOWSKI 2006). A BIM esetében az élőlények hatása elsősorban a vízkémia szabályozásában, finomhangolásában mutatkozik meg (pl. a fotoszintézis vagy az elpusztult szervezetek bomlása révén). Az ásványkiválás tehát az életműködés közvetett következményeként, az általa okozott kémiai változások miatt következik be. Szintén a BIM kategóriába sorolhatók azok a folyamatok, melyek során az élőlény felszíne passzívan elősegíti a kristálycsírák képződését, mivel heterogén nukleációs felületet biztosít az oldatban. A BCM kategóriába tartoznak azok a folyamatok, melyek során az élőlény aktívan, valamely életfunkciójának betöltése céljából választ ki ásványt. Ezekben az esetekben a képződő ásvány fizikai és kémiai tulajdonságai szigorúan szabályozottak, mint ahogy például a balatoni kagylóhéjak és kovaalgavázak példája is mutatja. Az alábbiakban a Balaton iszapja szempontjából fontosnak tekinthető, biológiailag indukált, illetve szabályozott módon képződő ásványok jellegzetességeit és jelentőségét tárgyaljuk.

Karbonátásványok biológiailag indukált képződése heterogén felületen

A Balaton rendkívül sekély (+115 cm vízállásnál átlagosan 3,55 m mély), hidrogénkarbonátos-meszes tó, amelynek vizére jellemző a 8,5 körüli pH, valamint a nagy (1 és 4 között változó) oldott Mg/Ca molarány (lásd például TOMPA et al. 2014). Ilyen vízkémia mellett mind a dolomit, mind a kalcitra nézve túltelített az oldat, tehát kiválásuk termodinamikailag szükségszerű lenne (5. ábra). Mint az jól ismert, a dolomit közvetlen kiválása kinetikailag gátolt (GREGG et al. 2015, HAAS & HIPS 2020), a kalcit kicsapódását pedig a jelenlévő, inhibitorként ismert Mg akadályozhatja (SUN et al. 2015). Ezért tehát, bár a víz nincs kémiai egyensúlyban, a karbonátok kicsapódásához további „segítség” van szükség – ezt biztosítja a fotoszintézis és a heterogén nukleáció.

A fotoszintézis szerepe miatt tekinthetjük a balatoni karbonátkiválást BIM folyamatnak. Mind a plankton, mind az üledékfelszín borító bevonatalkó algák hozzájárulnak ahhoz (a szél okozta átkeveredés mellett), hogy a Balatonban jellemzően az egész vízoszlopban van oldott oxigén, és a pH az említett 8,5 körüli. Nagy elsődleges termelés, pl. algavirágzás esetén lokálisan megnövekedhet a pH, ami intenzív kalcitkiválást, fehér csóvák megjelenését eredményezheti a vízben. Ez a *whitening* néven emlegetett jelenség jól ismert a Balatonnál nagyobb tavakban, sőt az óceánokban is (THOMPSON et al. 1997). A Balatonon olykor nemcsak csóvákban jelenik meg a fehéredés, hanem – különösen tavasszal – szinte az egész víztestre jellemző a „tejfölösség”, köszönhetően a karbonátok kicsapódásának (6. ábra).

A karbonátok kiválását azonban nemcsak a vízkémia,



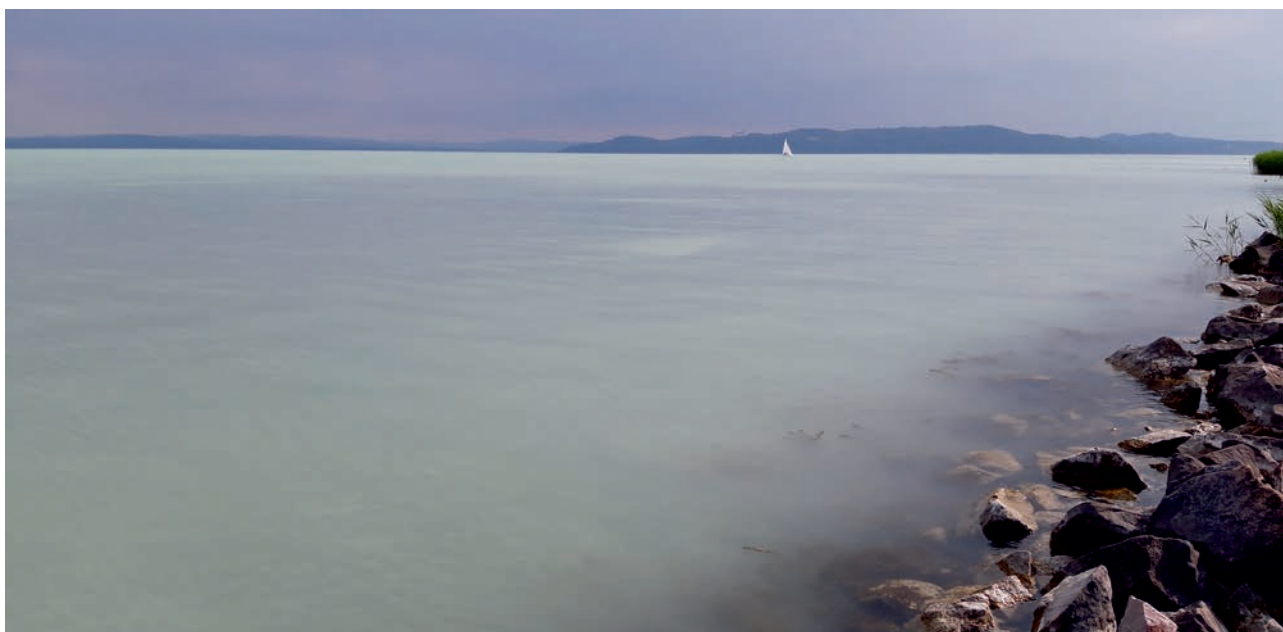
5. ábra. A telítettségi index változása a hőmérséklet függvényében, három különböző pH-érték mellett a dolomit, kalcit és aragonit ásványokra a Balaton vízkémiai viszonyai között. (a) és (b) inkább a nyílt vízre, míg (c) az üledékre jellemző. (MOLNÁR Zsombor számításai alapján.)

Figure 5. Variation in saturation indices of the carbonate minerals dolomite, calcite and aragonite as a function of temperature, at three different pH values, under water chemical conditions typical for Lake Balaton. (a) and (b) show conditions that are characteristic for the open water, whereas (c) is representative of the sediment. (Calculations by Zsombor MOLNÁR.)

hanem a már jelenlévő egyéb szilárd anyagok, a Balaton esetében elsősorban az agyagásványok is befolyásolják. Az agyagásványok szerepének megértése érdekében ki kell tekintenünk egy jelenleg rendkívül intenzíven vizsgált alap-kutatási téma, a kristálycsíra-képződés problémájára. A „klasszikus nukleációs elmélet” értelmében az oldat ionjából és molekuláiból folyamatosan képződnek és visszaoldódnak csírák mindaddig, amíg a statisztikus fluktuációk nem eredményeznek egy kritikus méretnél nagyobb magot, amely már spontán növekedni képes az egyedi ionok vagy molekulák (monomerek) hozzáadásával (Sosso et al. 2016). Ezzel szemben az újabb, „nem klasszikus” elméletek szerint az oldatban eleve vannak termodinamikailag stabil ion-asszociációk (klaszterek), és ezek aggregálódása eredményezi az első kristálycsírákat (GEBAUER et al. 2018). Mindkét esetben nagy jelentősége van, hogy az oldat telje-

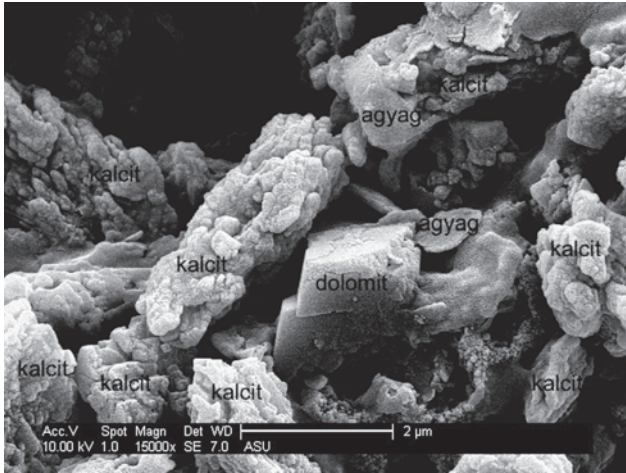
sen homogén (azaz csak a csíráképző anyagok vannak jelen) vagy heterogén (azaz jelen van valamilyen más szilárd felület): a csíráképződés aktivációs energiáját (vagy másképpen a kritikus méretet) csökkenti, ha a monomerek vagy klaszterek egy meglévő felületen megkötődhetnek (HU et al. 2012).

A világ nagy tavaiban több helyen megfigyelték, hogy a karbonátok kristálycsírái a planktoni kékalgák felületén válnak ki (DITTRICH & OBST 2004). Érthető, hiszen a feljebb említett vízkémiai változás is a fotoszintetizáló szervezetek közelében a legkifejezettebb, egyúttal a sejtfelszín kiváló heterogén nukleációs felület. Ezzel szemben a Balaton iszapját alkotó kalcit esetében nem karbonát/kékalga, hanem kalcit/szmektit aggregátumokat találtunk (NYIRŐ-KÓSA et al. 2018) (7. és 8. ábra). A Balaton egyik különleges tulajdonsága a sekélysege, aminek következtében még enyhe szelek is felkavarhatják az üledékét. A legfinomabb, tipikusan csak



6. ábra. Intenzív karbonátkicsapódás miatti „fehéredés” a Balaton vizében, 2020. május 15-én

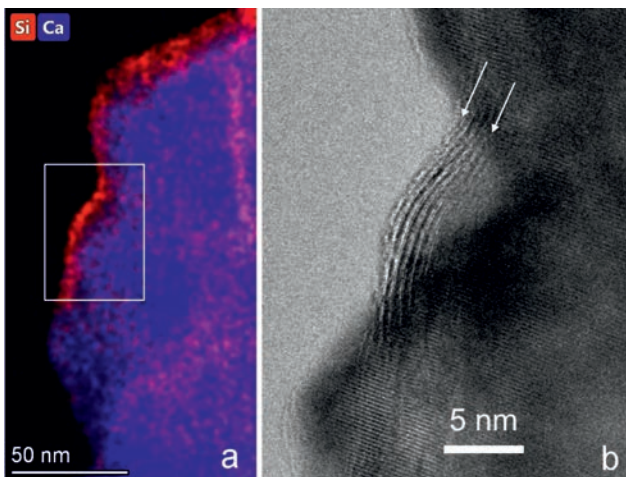
Figure 6. “Whitening” in the water of Lake Balaton on 15th May 2020, as a result of intense carbonate precipitation



7. ábra. Tipikus balatoni üledék pásztazó elektronmikroszkópos (SEM-) felvétele: hosszúkás, aggregátumszerű Mg-tartalmú kalcitcsempék, egy saját alakú dolomitszemcse és néhány, jellemzően a karbonátokra tapadó agyagásvány-lemez

Figure 7. Scanning electron microscopy (SEM) image of typical bottom sediment from Lake Balaton: elongated, aggregate-looking grains of calcite ("kalcit"), a euhedral grain of dolomite ("dolomit"), and flakes of clay minerals ("agyag", typically attached to the carbonates)

néhány atomi réteg vastagságú szmektitcsempék – vagy inkább nanofoszlányoknak lehet nevezni ezeket – szinte soha nem tudnak leülepedni, a vízoszlopban mindig megtalálhatók. Negatív töltésű felületük kiválóan alkalmas lehet arra, hogy a pozitív töltésű ionokat vagy ionklasztereket

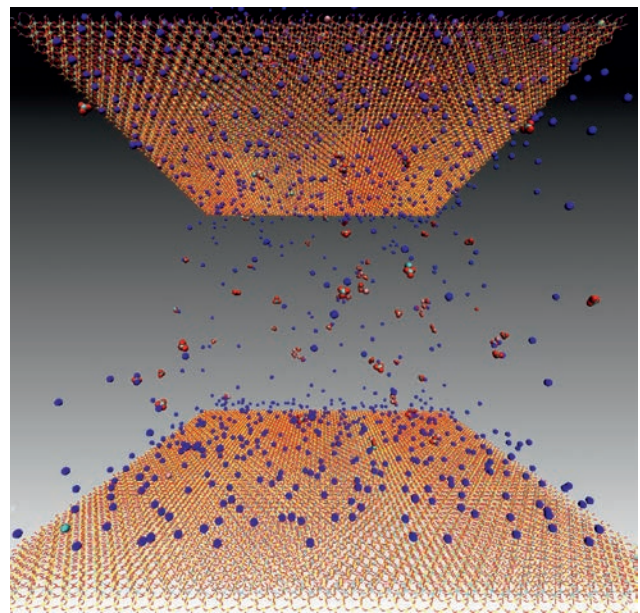


8. ábra. Mg-tartalmú kalcit és szmektit agyagásvány szoros kapcsolata. (a) Pásztazó transzmissziós elektronmikroszkópos (STEM-) módban, energiadiszipatív röntgenspektrometria (EDS) alkalmazásával készült elem térkép, amelyen a Ca és a Si eloszlása mutatja a kalcitkristály, illetve a „szmektitleplek” kapcsolatát. (b) Nagy felbontású TEM- (HRTEM-) felvétel az (a) ábrán fehér téglalappal jelölt területről. A fehér nyilak egy néhány elemi réteg vastagságú szmektitleplet jelölnek. Mind a szmektit, mind a kalcit rácsirjai láthatók

Figure 8. Transmission electron microscopy (TEM) results illustrating the tight association of Mg-bearing calcite with smectite. (a) Elemental map obtained using energy-dispersive X-ray spectrometry in scanning transmission (STEM) mode, showing the distributions of Ca (in calcite) and Si (in smectite). (b) High-resolution TEM image of the boxed area in (a); the white arrows mark a smectite flake with a thickness of a few atomic layers. Lattice fringes of both calcite and smectite are visible

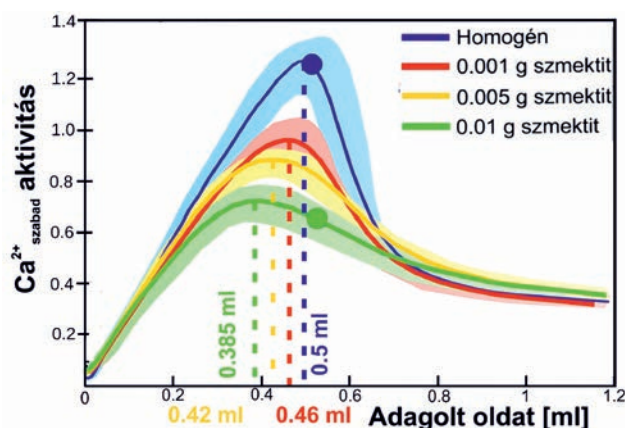
megkösse, ezzel beindítva a kristályképződést. A Balatonban megfigyelt kalcit/szmetit aggregátumok azonban elvileg úgy is képződhetnek, hogy a már kialakult kalcitcsírák koaguláltak a vízben lebegő szmetitpelyhekkel. Ezért laboratóriumi kísérleteket és elméleti számításokat is végeztünk, hogy megértsük, a kétféle lehetőség közül – kristálynukleáció a szmektiten vagy koaguláció – melyik valószínűbb.

Molekuladinamikai számításokkal modelleztük a Balaton vizéhez hasonló összetételű oldatban a kristálycsírák képződését (FODOR et al. 2020), összehasonlítva a homogén oldatban lejátszódó klaszterképződést a kaolinit és a szmektit két-két elemi rétege közötti oldatban zajló folyamatokkal (9. ábra). Mindhárom rendszerben úgy találtuk, hogy az ionklaszterek nem az agyag felületén, hanem elsősorban az oldatban képződnek, ami a fent említett, „nem klasszikus” kristálycsíra-képződésre utal. Az oldatban létrejött klasztereket azonban a szmektit nagy hatékonysággal „befogja” (szemben a kaolinnal), azaz a klaszterek a két agyagréteg közötti térből a szmektit felületére migrálnak és azon adszorbeálódnak. Laboratóriumi kísérleteink (MOLNÁR et al. 2020a) az elméleti számításoknál még látványosabban igazolták a szmektit szerepét a kristálycsíra-képződésben (10. ábra). Karbonátos oldathoz Ca^{2+} -ionokat tartalmazó oldatot adagolva a Ca^{2+} -koncentráció hirtelen esése jelzi a kristálycsíráképződés pillanatát. A homogén oldathoz képest ez a pillanat szmektit jelenlétében hamarabb, azaz kisebb mennyiségű hozzáadott Ca^{2+} és kisebb Ca^{2+} -aktivitás mellett következik be. Minél több agyag van a rendszerben, a nukleáció annál korábban következik be. Tehát a balatoni karbo-



9. ábra. Pillanatfelvétel egy molekuladinamikai szimulációról, két montmorillonitréteg között a Balatonéhoz hasonló összetételű oldatban kialakuló ionklaszterekről, 30 ns után (CO_3^{2-} : piros, Mg^{2+} : zöld, Ca^{2+} : mályva, Na^+ : kék; a vízmolekulák nincsenek feltüntetve)

Figure 9. Snapshot from a molecular dynamics simulation of ion cluster formation after 30 ns in a solution that approximately represents lakewater composition, enclosed between two montmorillonite layers (CO_3^{2-} : red, Mg^{2+} : green, Ca^{2+} : pink, Na^+ : blue; water molecules are not shown)



10. ábra. Kalcium-karbonát képződés homogén oldatban és szmektit agyagásvány jelenlétében (a heterogén kísérleteket három különböző agyagmennyiséggel végeztük). A kísérlet során karbonátionokat tartalmazó oldatot titrálunk Ca^{2+} -ionokat tartalmazó oldattal. Szmektit jelenlétében a kristálycsíra-képződés korábban megtörténik, mint homogén oldatban. (A színes sávok a kísérletek szórását jelzik, a kék és zöld kör a TEM-vizsgálatokhoz történt mintavétel helyét.)

Figure 10. Calcium carbonate formation in titration experiments in a homogeneous solution (blue curve) and in the presence of three different amounts of smectite (red, yellow and green curves, in the order of increasing amounts). In the experiments a solution containing carbonate ions was titrated with Ca^{2+} -bearing solution. In the presence of smectite nucleation takes place earlier (at a lower amount of dosed solution, as shown on the horizontal axis) than in the homogeneous solution, as indicated by the drop in the Ca^{2+} activity (vertical axis). (The colored bands mark the scatter in three experiments, whereas the blue and green dots indicate the positions where samples were taken for TEM studies.)

nátképződés egyik érdekessége, hogy míg a kalcit kicsapódásához szükséges termodinamikai hajtóerőt egy biológiai folyamat, a fotoszintézis biztosítja, a kristálycsíra-képződés energiagátjának átlépését egy – feltehetően allochton – ásvány, a szmektit nanométeres pelyhei segítik.

A kicsapódó karbonátok összetétele és ásványfázisa

A Balaton különlegességei közé tartozik – sekélysege mellett – a víz nagy oldott Mg/Ca molaránya, és ennek nyugat-kelet irányú változása. Mivel a Zala hozza a beérkező víz legalább felét, és a többi jelentősebb hozamú befolyó (Nyugati-öcsatorna és Tapolca-patak) torkolata is a tó nyugati végén van, az egyetlen kifolyó, a Sió-csatorna pedig a keleti végén hagyja el a tavat, a Balatonra nyugat-kelet irányú kémiai gradiensek jellemzők. A feljebb részletezett kalcitkiválás során kis Mg-tartalmú kalcit csapódik ki (7. ábra), ezért nyugatról kelet felé haladva az oldott Mg relatív mennyisége nő a Ca-hoz képest. Ezenkívül a keleti tómedencébe folyó kisebb patakok a dolomitos lehordási területükről Mg-ban dús vizet szállítanak a tóba. Ennek megfelelően előfordulhat, hogy Keszthelynél az oldott Mg/Ca molaránya kb. 1, ugyanakkor Balatonkenesénél 3,5 (TOMPA et al. 2014). Ez a Ny-K irányú vízkémiai gradiens a kicsapódó karbonát összetételére is hat: míg Keszthelynél a lebegő anyagban lévő kalcit átlagos MgCO_3 -tartalma 2,5 mol% körüli, Balatonkenesénél 8%-ot is elérhet (NYIRÓ-KÓSA et al. 2018).

A kalcit Mg-tartalmának környezetjelző szerepére már MÜLLER & WAGNER (1978) is felhívta a figyelmet, majd CSERNY et al. (1991b) és TULLNER (2002) dolgozta fel részletesen az iszapban lévő kalcit Mg-tartalmának idő- (azaz mélység-) és térbeli (azaz Ny–K irányú) változását. Megállapításaik szerint kisvízi körülmények között a bepárlódó, nagyobb ionerősségű vízből Mg-ban dúsabb, míg magas vízállásnál, hígabb oldatból Mg-szegényebb kalcit válik ki. Ennek megfelelően az iszap Mg/Ca arányából az éghajlat (nedves/száraz időszakok) fluktuációjára lehet következtetni. A környezeti változások felderítésében további érdekes eredményeket ígér a MAGYARI Enikő vezetésével jelenleg is folyó kutatás, melynek keretében 2017 januárjában a Balaton jegéről fúrták át a holocén iszapot (MAGYARI et al. 2019). Az 1970-es és 1990-es években végzett hasonló vizsgálatokhoz képest (MÜLLER & WAGNER, 1978, CSERNY et al. 1991b) a műszeres analitikai lehetőségek óriási fejlődése minden korábbinál részletesebb elemzést tesz majd lehetővé.

A kicsapódó karbonát Mg-tartalmával kapcsolatban a fentiekben túl feltétlenül említendő a (proto)dolomit képződése. A Balatonról szóló számtalan tudományos publikáció közül mindeddig alighanem egyetlen cikk jelent meg a Nature-ben, és ez a protodolomitról szól (MÜLLER 1970). Bár a protodolomit fogalma nem egészen tisztázott (GAINES 1977), amint ezt a Földtani Közlöny egyik ünnepi cikke is kifejti (HAAS & HIPS 2020), itt olyan karbonátásványra használjuk, amelynek összetétele a dolomitét közelíti, de a Mg és Ca legfeljebb csak részlegesen rendeződik szerkezetében. MÜLLER & WAGNER (1978) és később CSERNY et al. (1991b) illetve TULLNER (2002) is ebben az értelemben használták a fogalmat. Az idézett szerzők egyetértettek abban, hogy a protodolomit az iszapban a Mg-tartalmú kalcit átalakulásával képződik „bepárlódó”, azaz kisvízi körülmények között, amikor az iszap pórusvizének különösen nagy a Mg-koncentrációja.

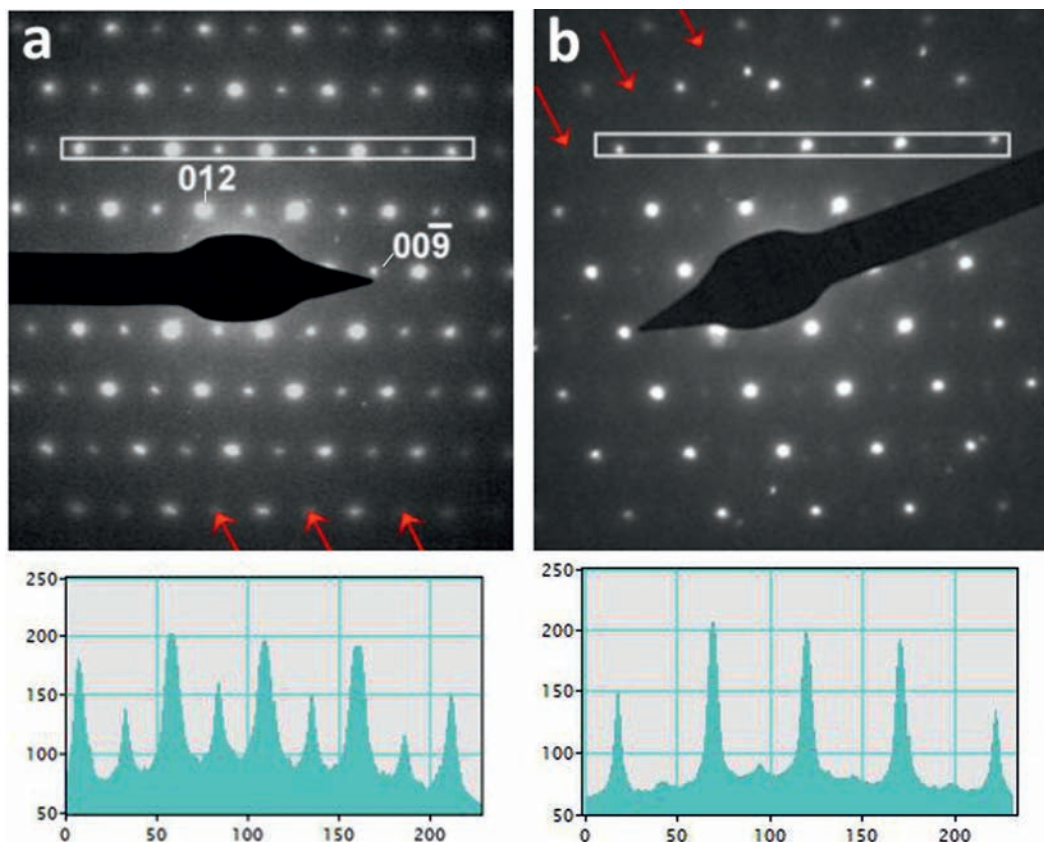
Saját vizsgálataink felvetették a lehetőségét, hogy közel dolomit összetételű karbonátásvány a vízből is kiválhat (TOMPA et al. 2014). Az iszapról, de különösen a lebegő anyagról készült röntgen-pordiffraktogramok ugyanis két-féle dolomit jelenlétére utaltak: egy sztöchiometrikus (valószínűleg allochton, triász eredetű) és egy Ca-gazdag változatra (amilyen például a 7. ábrán látható romboéderes dolomit). Mivel az utóbbi a nagy oldott Mg/Ca aránnyal jellemezhető keleti medencéből vett iszap- és lebegőanyag-mintákban fordult elő (TOMPA et al. 2014, ROSTÁSI et al. 2019, ROSTÁSI et al. 2020), nagy a valószínűsége, hogy a Ca-gazdag dolomit képződése a pillanatnyi vízkémia függvénye, tehát közvetlenül a vízből válik ki.

Mivel a jelenleg képződő balatoni iszapban ez a nem sztöchiometrikus dolomit egészen kis mennyiségben fordul elő, érdemes a Balatonhoz sok tekintetben hasonló, de még Mg-dúsabb Fertő iszapját is megvizsgálnunk. A Fertőben azonosítottak egy dolomitösszetételű fázist, amelyről sokféle (kémiai, stabil- és radiogén izotópos) vizsgálat alapján megállapították, hogy nem az iszapban, hanem a vízoszlopban képződik (FUSSMANN et al. 2020). Saját TEM-méréseink szerint a Fertő iszapjában – a Balatonhoz hasonlóan – a

karbonátásványok szmektitpelyheken képződnek. A kis szemcseméretű ($< 2 \mu\text{m}$) frakcióban a karbonátásványok összetételének eloszlása a kis (2%) MgCO_3 -ot tartalmazó kalcitból a dolomitig (50% MgCO_3) terjedő tartományban folyamatos. Sőt, jellemzően egy-egy szemcsén belül is előfordulnak kis Mg-tartalmú kalcitból és dolomitból álló zónák (PÓSFÁI et al. 2019b). A Mg-tartalom szempontjából „tarka” képet mutató szemcsék képződésének értelmezése jelenleg is folyik; úgy véljük, hogy mind a kristálycsíra-képződés, mind a kristálynövekedés (sőt feltételezhetően visszaoldódás/növekedés) szerepet játszhatott a komplex összetétel kialakításában.

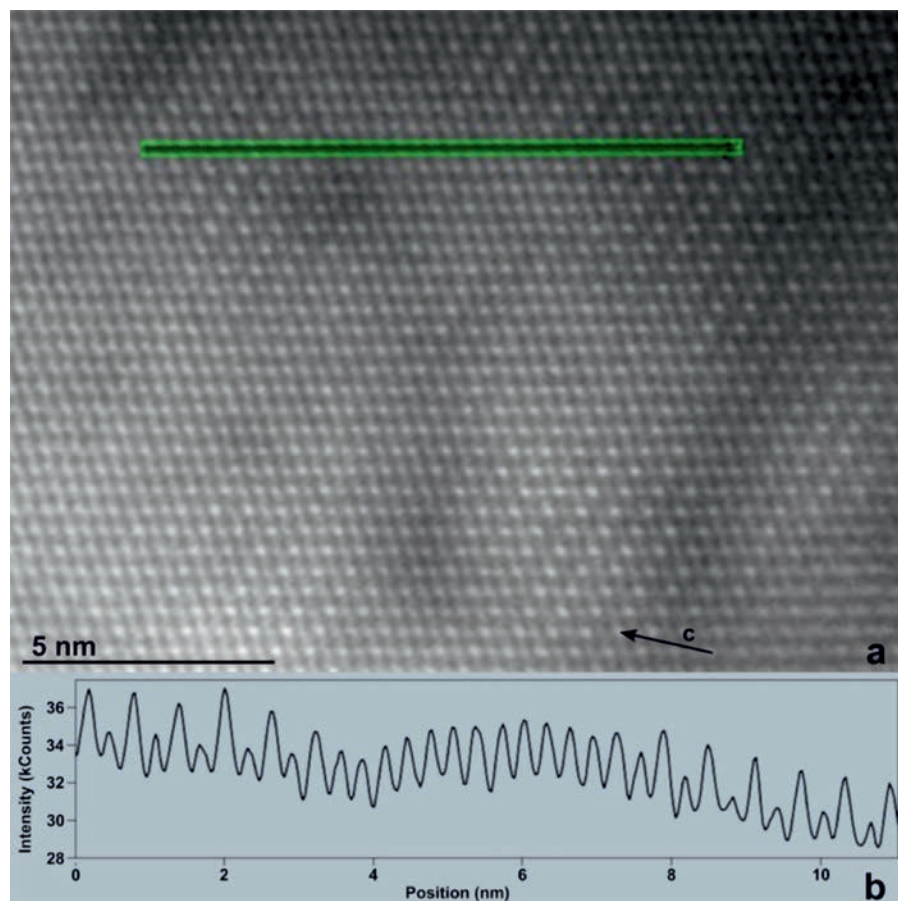
Mindaddig csak a (proto)dolomit összetételéről volt szó, de természetesen a kristályszerkezet vizsgálata ad választ arra a kérdésre is, hogy egy rendezetlen, nagy Mg-tartalmú kalcitról van-e szó, vagy dolomitról, amelyben a Mg és Ca rendeződik és a c tengely mentén váltakozva tölti be a kationrétegeket. A szakirodalom azt a fázist tekinti dolomitnak, amelynek diffrakciós felvételein a „rendezettségi reflexiók” – mint például az 105 és 10-1 Miller-indexűek –

megjelennek (GREGG et al. 2015). A feljebb ismertetett Fertő tavi, dolomitos összetételű szemcsék jellemzően mutatnak ilyen reflexiókat az elektrondiffrakciós felvételeken, azonban ezeknek a (kalcitban is megjelenő) szubcella-reflexiókhoz viszonyított intenzitása meglehetősen változatos (11. ábra). Ez a megfigyelés előrevetíti, hogy a Mg/Ca rendeződés nem tökéletes, és szemcséről szemcsére változhat (PÓSFÁI et al. 2019b). Nagy felbontású, sötét látóterű STEM-(pásztázó TEM-) felvételek még több információt hordoznak a szemcsén belüli rendeződésről (12. ábra). Ezeknek a felvételeknek a jellegzetessége, hogy a kontraszt az átlagrendszámmal négyzetesen arányos. Leegyszerűsítve: a világosabb pöttyök Ca-ban gazdagabb, a kevésbé világosak Mg-gazdag kationoszlopokat reprezentálnak. A 12. ábra felvételén látható, hogy a szemcse egyes részein minden második pontsor intenzívebb – azaz ezekben a doménekben láthatóan van Ca/Mg rendeződés –, míg máshol a pontsorok intenzitása homogén, azaz nincs rendeződés. A képintenzitás alapján számolható a kationoszlopok betöltöttsége. Ez alapján a rendezett területen sem kizárólag Mg-mal, ill. Ca-mal



11. ábra. Fertő tavi, dolomithoz közeli összetételű karbonátaszemcsékről, $[100]$ vetületben készült elektrondiffrakciós felvételek, a fehér téglalappal jelölt területeken belüli reflexiók intenzitásprofiljaival együtt. Mindkét felvételen a piros nyilakkal jelölt reflexiósorok megjelenése a Ca és Mg rendeződésére, dolomitszerkezetre utal. Az (a) ábrán a rendeződést jelző reflexiók jóval nagyobb intenzitásúak, mint a (b) esetében. Az (a) ábrán a könnyebb térbeli tájékozódás érdekében két reflexió Miller-indexét feltüntettük.

Figure 11. Electron diffraction patterns from two carbonate grains (obtained along $[100]$) with compositions close to that of dolomite, collected from the sediments of Lake Fertő, another shallow, calcareous lake with Mg-rich water. The intensity distributions of the boxed rows of reflections are also shown. The red arrows point to rows of reflections the presence of which suggests a dolomite-like ordering of Ca and Mg in the structures of both grains; however, in pattern (a) the intensities of the ordering reflections are much stronger than in (b) For easier orientation in space, the Miller indices of two reflections are shown in panel (a)



12. ábra. Nagy felbontású, sötét látóterű STEM-felvétel egy Fertő tavi, dolomit összetételű karbonátszemcséről, [100] vetületben, a zöld téglalappal jelölt területen belüli intenzitásprofittal együtt. Míg a profil két szélén kis és nagy képintenzitást eredményező kationpozíciók váltakoznak (a Mg/Ca rendeződés miatt), a profil közepén közel azonos intenzitást eredményező kationpozíciók vannak. (PEKKER Péter felvétele)

Figure 12. High-resolution, high-angle annular dark-field STEM image of a carbonate grain with dolomitic composition from Lake Fertő sediments, viewed with the electron beam parallel to [100]. The intensity profile of the boxed area is shown below the image. Whereas cation positions with low and high contrast alternate in the left and right sides of the intensity profile, positions with approximately equal contrast occur in the middle. (Image courtesy of Péter PEKKER.)

betöltött pozíciók vannak, hanem szemcsétől függően pl. 70%Mg+30%Ca-ot és 30%Mg+70%Ca-ot tartalmazó kationoszlopok váltakoznak. A feljebb már sok helyen említettekhez hasonlóan a Mg/Ca rendeződés vizsgálata is folyamatban van, eredményeinket még csak előadáskivonatokban jelentettük meg. Annyi azonban már kijelenthető, hogy a 11. és 12. ábrához hasonlókat nemcsak a Fertő, hanem a Balaton iszapjában lévő karbonátok esetében is látunk. A néhány nm-es méretű, (részlegesen) rendezett, illetve rendezetlen domének váltakozása magyarázza a protodolomit diffrakciós tulajdonságait, és új megvilágításba helyezheti a tavi dolomitképződés folyamatát.

A Balaton iszapjának uralkodó ásványa a Mg-tartalmú kalcit, amint ezt sok korábbi kutatás is megállapította. Ez a tény azonban egyáltalán nem triviális, hiszen – bár a tiszta CaCO_3 polimorfok között a kalcit a stabil fázis (5. ábra) – a Balaton vizének jelentős Mg-tartalma miatt termodinamikailag az év nagyobb részében a dolomit lenne a stabil karbonátásvány. Mint ismert, a dolomit kiválása kinetikailag gátolt,

viszont ebben az esetben is – ugyancsak a Mg-tartalom miatt – az aragonit kiválása sem lenne meglepő (SUN et al. 2015). BIDLÓ (1960) le is írta a Balaton vizéből közvetlen aragonit-kiválást, mégpedig vízínövények levelein, és mi is tapasztaltuk aragonititűk keletkezését Balaton-vízben tenyésztett algákon. A kristálycsíra-képződésről szóló részben említettem, hogy a „nem klasszikus” csíráképződés során amorf ionklaszterek aggregálódnak. Ezek kristályosodására jellemző az Ostwald-féle lépcsőszabály: az oldatból előbb a legkevésbé stabil fázis válik ki, amely sorozatos fázisátalakulással végül a termodinamikailag stabil szerkezetté kristályosodik. A CaCO_3 esetében ez azt jelenti, hogy először amorf kalcium-karbonát válik ki, amely több lépésben, vateriten és aragoniton át végül Mg-tartalmú kalcitá alakul. Valószínűleg ez a folyamat a Balatonban is lejátszódik, azonban olyan gyors lehet, hogy az eddigi mintavételek már csak a végtermék kalcitot tudták kimutatni. Laboratóriumi kísérleteink alátámasztják a fenti állítást, és arra utalnak, hogy a szmektit agyagásványnak fontos szerepe van a folyamat gyorsításában: Mg-mentes oldatból szmektit

nélkül vaterit, szmektit jelenlétében viszont közvetlenül kalcit kiválását figyeltük meg (MOLNÁR et al. 2020a). Ellenben a Balaton vizéhez hasonló, Mg-dús oldatból laboratóriumi körülmények között előbb aragonit vált ki, amely szmektit jelenlétében több hónapos érlelés után alakult át részben Mg-tartalmú kalcit és rendezetlen dolomit aggregátumává (MOLNÁR et al. 2020a). Ezek a kísérletek jelenleg is zajlanak, és remélhetőleg mind a balatoni karbonátképződésre, mind a protodolomit képződésére vonatkozóan új ismereteket eredményeznek.

A Balatonban többnyire BIM-folyamatok révén képződő ásványok közül a karbonátásványokon kívül említésre méltók a vas-oxidok és -szulfidok. Ezekről jelenleg nagyon keveset tudunk, pedig a vas-oxidokról ismert, hogy fontos szerepet játszanak a foszfor körforgalmában (SMOLDERS et al. 2017), a vas-szulfidok között pedig az üledék mágneses tulajdonságait meghatározó fázisok is lehetnek (MÁRTON et al. 2007). A vas-oxidok feltehetően oxidált fázisokban, goethit és ferrihidrit formájában vannak jelen az iszapban, de ennél többet pillanatnyilag nem tudunk róluk. A framboidális pirit az üledék redukív zónájában képződik, jelenlétét CSERNY et al. (1991b) és HÁMOR (1994) pásztázó elektronmikroszkópos felvételekkel igazolta. Az általunk elemzett röntgendiffrakciós felvételeken a pirit szinte minden mintában megjelent, de kis (0,5–1,5%) mennyiségben. A balatoni iszap mágneses tulajdonságait MÁRTON et al. (2007) vizsgálta. A szárazra kerülő iszap elveszíti mágnességét, ami vas-szulfidokra (pl. a greigitre) lehet jellemző, azonban ezt az ásványt eddig nem sikerült azonosítani (MÁRTON, szóbeli közlés). A foszfort a képletükben is tartalmazó ásványok közül az apatitot sikerült egyszer, a nehézásvány-frakcióban kimutatni (DOBOLYI & BIDLÓ 1980), de nem világos, hogy nem autochton eredetű szemcséről van-e szó.

Biológiailag szabályozott ásványképződés (BCM) a Balatonban

Kétségtelen, hogy a Balaton legismertebb BCM ásványa a kagylók (és kisebb részben csigák) héját alkotó aragonit. A puhatestű-faunával az elmúlt 90 évben behatóan foglalkoztak a Balatoni Limnológiai Intézet munkatársai, de természetesen nem az ásványtani jellegzetességekre, hanem a biológiai és ökológiai vonatkozásokra koncentrálnak. Az elmúlt évtizedek fejleményei közül számunkra a legfontosabb két *Dreissena* faj inváziója: a *Dreissena polymorpha* még az 1930-as években, míg a *Dreissena bougensis* 15 éve jelent meg a Balatonban (BALOGH et al. 2018). Az előbbi elsősorban a parti kőszórásokat, míg az utóbbi már a nyíltvízi iszap felszínét is kolonizálta. Jelenleg a *Dreissena* kagylók akkora biomasszával vannak jelen a vízben, hogy szűrő tevékenységük révén még a víz átlátszóságának növekedéséhez is jelentősen hozzájárulnak (PÓSFÁI & G.-TÓTH 2020).

Felvetődött, hogy a *Dreissena bougensis* megjelenésével és rohamos elterjedésével felhalmozódó aragonithéjak gyorsítják a Balaton feliszapolódásának folyamatát. BÁLDI et al. (2019) különböző scenáriókat modellezett, amelyek többsége igen jelentős héjfelhalmozódással járt. Feltűnő azonban, hogy az iszap felső 10 cm-éről kapott röntgendiffraktogramjaink egyáltalán nem, vagy csak elenyésző mennyiségű aragonitot mutattak ki. Bár egyes helyeken látványos zátonyok alakulnak ki a kagylóhéjakból (13. ábra), időnként ezek eltűnnek. Az eltűnés oka természetesen a vízmozgás is lehet, de felmerült a gyanú, hogy a kagylóhéjak vissza is oldódhatnak. Az utóbbi néhány évben magasan tartott vízszint és csapadékosabb időjárás „hígabb” vizet eredményezett, amely – különösen télen és a víznél savasabb üledékben (lásd 5. ábra c) – az aragonitra nézve alulteltett



13. ábra. *Dreissena*-héjak part menti felhalmozódása a tihanyi révénél, 2020. februárjában

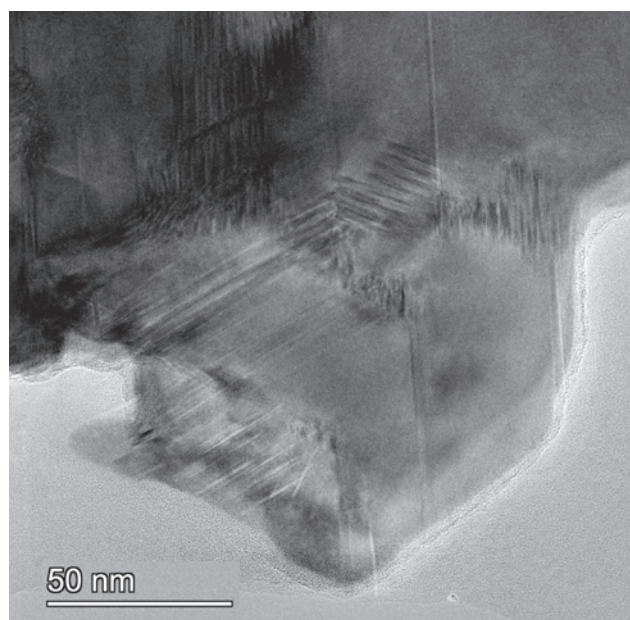
Figure 13. An accumulation of *Dreissena* shells along the shore at the ferry port of Tihany, in February of 2020

viszonyokat hozott létre. Egy egyetemi szakdolgozat keretében alaposabban is vizsgáltuk ezt a kérdést, és a Balatonba kihelyezett kagylóhéjakon néhány hónap után ugyanolyan oldási nyomokat (és tömegcsökkenést) figyeltünk meg, mint a laboratóriumban, szénsavval oldott héjakon (NYOKABÍ 2020). Durva becslésünk szerint a kagylóhéjak felezési ideje kb. 4 év, ami azt jelenti, hogy bár egy részük valószínűleg eltemetődhet és megmaradhat az üledékben – hiszen kagylóhéjakat a korábbi fúrásokban is szép számmal találtak (CSERNY 2002) –, a héjak okozta feliszapolódással aligha kell számolni.

Ásványtani érdekesség, hogy a *Dreissena*-héjak aragonitja kivétel nélkül sűrűn ikresedett (14. ábra). Mivel az aragonitra – nemcsak a biogén eredetűre – általában is jellemző az ikresedés (GAVRYUSHKIN et al. 2019), nem biztos, hogy a több irányú és sűrű ikerhatárok csak a kagylóhéjak különlegességei. Van azonban olyan tanulmány, amely szerint az ikresedés növeli a héj mechanikai stabilitását, mert az ikerhatárok megakadályozzák a repedések terjedését (JI et al. 2020).

A kagylóhéjak nagyon hasznosak lehetnek a környezeti változások kutatásában. SCHÖLL-BARNA (2011) a balatoni *Unio pictorum* kagyló növekedési sávjából vett minták oxigén stabilizotóp-elemzésével kalibrálta az elmúlt két évtized időjárásának hatásait, és ennek segítségével, régészeti feltárásokból származó kagylók vizsgálatával ki tudta mutatni a késő rézkorszak éghajlati változásait (SCHÖLL-BARNA et al. 2012).

A Balatonban nemcsak egysejtűek és puhatestűek, hanem gerincesek is választanak ki BCM karbonátásványokat. A halak otolitjai (hallócsontjai) főleg aragonitból állnak, de kisebb részben a ritkább CaCO_3 -polimorf, a vaterit is előfor-

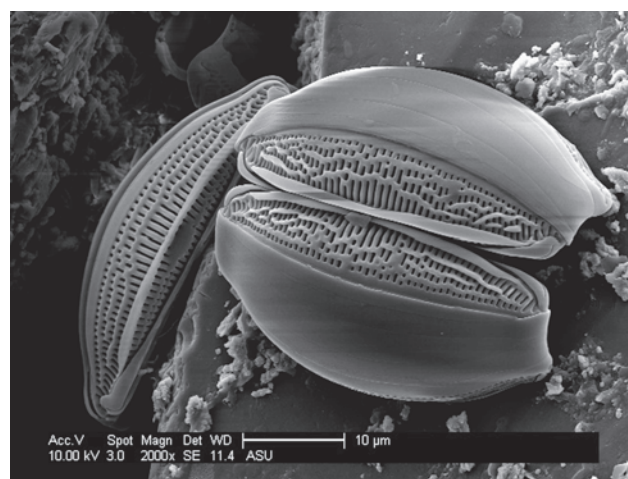


14. ábra. TEM-felvétel egy *Dreissena*-héjtöredékről; a vonal menti kontrasztok az aragonit ikerhatárait jelölik

Figure 14. TEM image of a fragment of a *Dreissena* shell; the linear contrast features represent twin boundaries in the aragonite structure

dul bennük (CAMPANA 1999). Az otolitok potenciális környezetjelzőként használhatók, hiszen folyamatosan nőnek, és így a fák évgyűrűihez hasonlóan információt hordoznak a környezeti változásokról. Elvileg a növekedési sávok nyomelem- és stabilizotóp-vizsgálata utalhat a hal élete során bejárt környezet kémiai és fizikai jellemzőire. A valóság azonban ennél bonyolultabb: balatoni halak otolitjain végzett előzetes vizsgálataink szerint egyáltalán nem egyértelmű, melyik irányban nő a hallócsont. Világos és sötét sávok ugyan elkülöníthetők, ezek azonban időnként elvégződnek vagy elágaznak, tehát mégsem adnak a fa évgyűrűihez hasonló, egyértelmű információt. Valószínűleg különböző időszakokban más-más irányok mentén nő a hallócsont. Szerkezetileg viszont sok érdekesség is megfigyelhető az aragonitban (MOLNÁR et al. 2020b), ám ezekről még korai lenne a jelen dolgozatban beszámolni. A balatoni halak közül tudtommal egy angolna hallócsontjáról készült eddig tudományos közlemény (KERN et al. 2017), amelyben Raman-vizsgálattal vateritszektorok jelenlétét mutatták ki a túlnyomórészt aragonitból álló csontban.

A kagylóhéjak mellett a másik, nagy mennyiségben lévő BCM-ásvány az amorf kova, amely elsősorban a kovaalgák vázáként vagy a vázak töredékeiként egyik fő alkotója az iszapnak. Az iszap elektronmikroszkópos felvételein szinte elkerülhetetlenül szemünkbe tűnik egy-egy díszes héj vagy akár egy egész kovaalga-kolónia (15. ábra). A kovaalgák a limnológusok egyik kedvelt taxonómiai célcsoportja, hiszen a különböző fajok jelenléte olykor érzékenyen tükrözi a környezetük változásait. Különböző csoportjaikon (planktoni és bevonatalkotó) belül is további funkcionális csoportok különíthetők el (TAPOLCZAI et al. 2016), amelyek más-más környezeti tényező vizsgálatára adnak lehetőséget. Geológus szemmel azt gondolhatnánk, hogy az elpusztult kovaalgák vázai „örökre” az iszap alkotóivá válnak. A balatoni iszapfúrások kovaalgaanyagát alaposan feldolgozták (CSERNY et al. 1991b, BUCZKÓ et al. 2005), amiből látható,



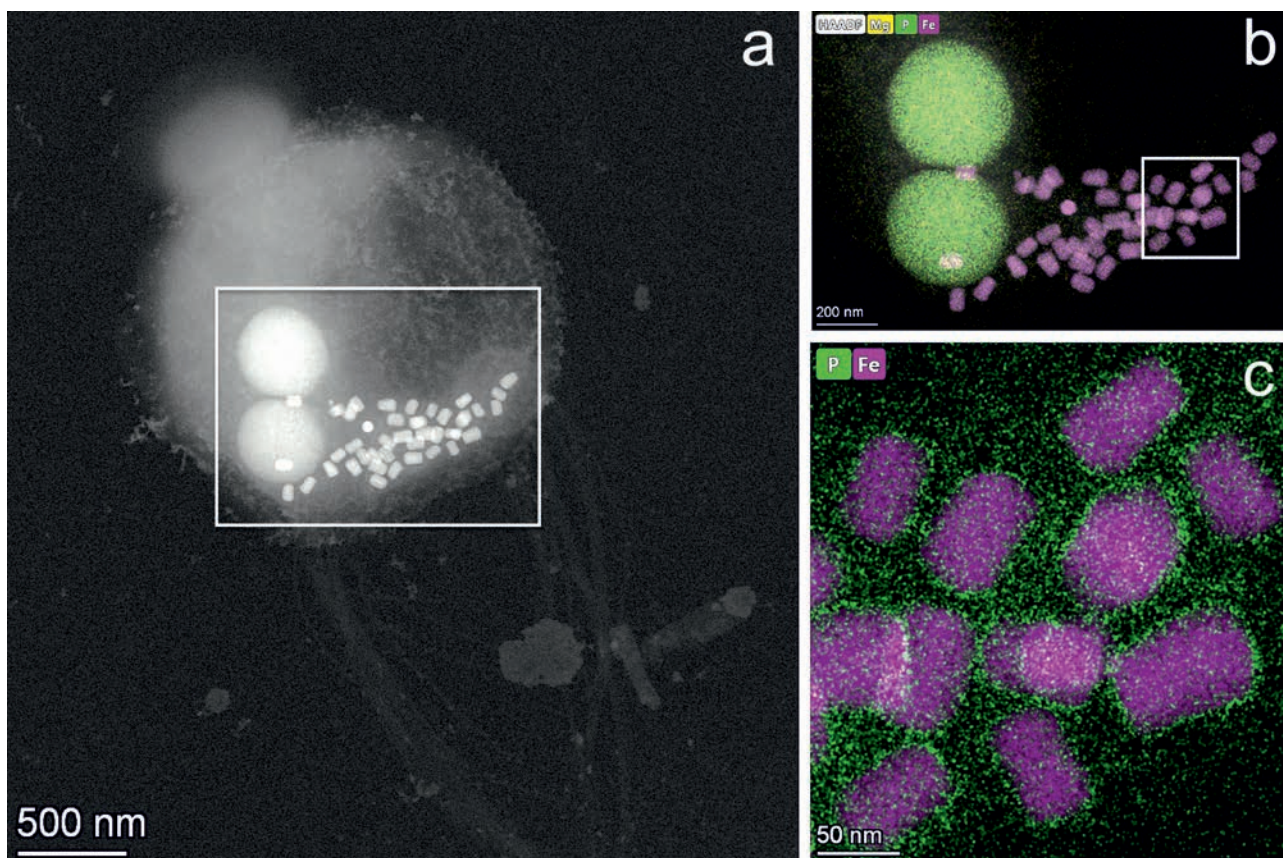
15. ábra. Kovaalgák kvarcon, mellettük a tőből kivált Mg-tartalmú kalcit kisebb szemcséi, egy Sajkodon kihelyezett üledécsapdából (SEM-felvétel)

Figure 15. SEM image of diatoms on a grain of quartz, with smaller grains of Mg-bearing calcite that precipitated from the lake, collected in a sediment trap at Sajkod

hogyan valóban vannak teljesen érintetlennek tűnő kovavázak az iszap mélyebb rétegeiben is. Azonban a kagylóhéjakhoz hasonlóan a kovaalgák vázai sem feltétlenül élnek túl a tavakban gyakori és sokszor biológiailag indukált vízkémiai változásokat, elsősorban a lúgosabb pH-t. Általában 50 napra becsülik a tavi kovaalgavázak felezési idejét, de ennél még jóval rövidebb (8 napos) felezési időt is megfigyeltek (PADISÁK et al. 2003). A szilícium tehát állandó körforgásban van az élő és az elpusztult szervezetek vázai között, ami felveti akár annak a lehetőségét is, hogy a feljebb sokszor említett, nm-es méretű szmektitpelyhek esetleg nem is allochton eredetűek, hanem a vízben képződnek.

Végül a BCM-ásványok egyik egzotikus képviselője a magnetit, amely a mágneses baktériumok sejtjeiben képződik (16. ábra). A Balaton esetében tudtommal csak saját vizsgálatainkra hivatkozhatunk (PÓSFÁI & ARATÓ 2000, NYIRÓ-KÓSA & PÓSFÁI 2007). A magnetit kiválasztó mágneses baktériumok mikroaerofilek, azaz életterük az oxikus-anoxikus átmeneti zóna (BAZYLINSKI & FRANKEL 2004), amely a Balatonban általában az üledék legfelső né-

hány mm-ében húzódik. A sejten belül, genetikai szabályozás által meghatározott módon, egy „magnetoszóma-membrán” határolta térben (16. ábra c) képződő mágneses nanokristályok láncai a Föld mágneses erővonalai mentén pasz-szívan orientálják a sejtet, amely ezáltal kénytelen le- vagy felfelé úszni. Ez a vonal menti, liftező mozgás segíti a baktériumot abban, hogy a függőleges kémiai (elsősorban oxigén-) gradiensek mentén hamarabb megtalálja a számára kedvező koncentrációt. Többféle helyről és különböző időszakokban vett iszapmintákban mágneses dúsítással vizsgáltuk a különböző sejt morfológiai típusok előfordulását, majd az egyes sejt típusok magnetit-magnetoszómáinak jellegzetességeit. Sokféle mágneses sejt típus (cococcus, spirillum, vibrio) előfordul a Balatonban, amelyekben változatos magnetitláncok (egyes, kettős, rendezetlen) és nanokristály morfológiák (kubooktaéderez, hasáb és nyílhegy alakúak) figyelhetők meg (NYIRÓ-KÓSA & PÓSFÁI 2007). Különösebb rendszert azonban nem sikerült felfedeznünk az egyes típusok eloszlásában, és a képződő magnetit mennyiségét sem tudtuk becsülni. Érdekes azonban, hogy sokféle cococcus



16. ábra. Balatonudvari strandjának iszapjából izolált, cococcus morfológiájú mágneses baktérium sejt. (a) Sötét látóterű STEM-felvétel a teljes sejtről, rajta a sejt mozgását biztosító két köteg flagellum, a sejten belül két kerek zárvány és hasáb alakú magnetit-magnetoszómák rendezetlen láncja is látható. (b) Sötét látóterű STEM-felvétel és EDS-elemtérképek (Mg, P és Fe) kompozíciója az (a) táblán bekeretezett részről; a két zárvány foszfor- és magnéziumtartalmú, és csak a magnetit-magnetoszómák tartalmaznak vasat. (c) A vas és a foszfor eloszlását mutató elem térkép a (b) táblán bekeretezett részről. A magnetit-részecskéket keretező foszfordúsulás a magnetoszóma-membrán (foszfolipid kettősréteg) jelenlétének köszönhető

Figure 16. A cell of a magnetotactic bacterium with cococcus morphology, isolated from the sediment of the beach in Balatonudvari. (a) Dark-field STEM image of the whole cell, showing two bundles of flagella that are used by the cell for motion, two round-shaped inclusions and a band of prismatic-shaped magnetite magnetosomes. (b) A composite of a dark-field STEM image and EDS elemental maps (for Mg, Fe and P), obtained from the boxed area in (a); the two large inclusions are P- and Mg-rich, and Fe is present in the magnetite magnetosomes only. (c) EDS elemental map of Fe and P from the boxed area in (b); the P enrichment around the magnetite particles is due to the presence of a magnetosome membrane (a phospholipid bilayer)

morfológiájú baktériumra jellemző a nagymértékű foszforfelhalmozás, a sejtmérethez képest két óriási polifoszfát zárványt tartalmaznak (16b. ábra). Az iszap mélyebb rétegeiben is kerestük a „magnetofosziliákat”, azaz az elpusztult mágneses baktériumok sejtjeiből származó magnetitkristályokat, ilyeneket azonban nem találtunk. Feltehetően a redukív közegben a magnetit-nanokristályok visszaoldódnak, anyaguk hozzájárulhat a feljebb említett framboidális pirit képződéséhez.

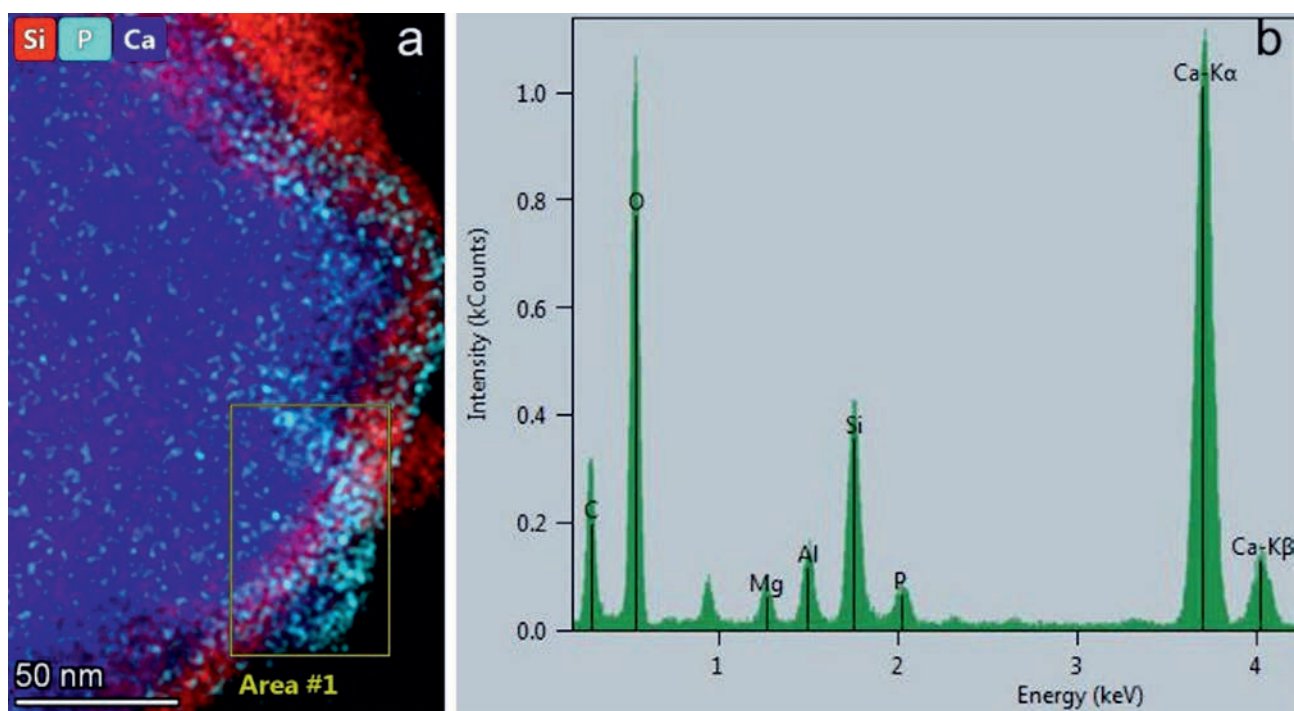
Zárógondolatok

A Balaton kutatása kezdettől szolgálta mind alapvető általános (alapkutató) tudományos kérdések megválaszolását, mind konkrét, alkalmazott feladatok megoldását. Ma sincs másképp, a sokszor öncélúnak tűnő, részletekbe menő vizsgálatok később – olykor előre nem várt módon – gyakorlati szempontból is hasznosulhatnak. Egy friss példa: a szmektit karbonátkicsapódást elősegítő szerepéről szóló munkáinkra (is) hivatkozva oldottak meg egy geotechnikai problémát, a durva homok karbonátos cementálását bentonit hozzáadásával (MA et al. 2020). A Balaton ökológiai rendszerének – beleértve az iszap ásványait is – minél alaposabb, tudományos igényű ismerete szükséges ahhoz, hogy a tó számunkra annyira fontos „jó” állapotát, azaz fürdésre, sportolásra alkalmas vízminőségét hosszú távon fenntartani lehessen.

Visszatérve a Bevezetésben említett, a Balaton vízmi-

nősége szempontjából jelenleg legfontosabb problémára: a 2019-es algavirágzás okait még nem ismerjük. A kulcsfontosságúnak tartott tápanyag, a foszfor az üledékben raktározódik, de a kémiai formájáról csak műveletileg definiált, sorozatos oldási módszerek adtak eddig információt. Attól függően, hogy mely oldószerrel lehet kivonni az üledékből, a foszfort különböző kategóriákra osztják: „felvehető”, „vashoz kötött”, „karbonáthoz kötött”, „szerves anyaghoz kötött” (ISTVÁNOVICS et al. 1989). A Balaton üledékében a legnagyobb frakció a karbonáthoz kötött foszfor, de nem elhanyagolható – különösen a Keszthelyi-öbölben – a vashoz kötött foszfor sem. Fontos lenne azonban közvetlenebb módszerek alkalmazásával megismernünk a foszfor megkötődésének módját, mert csak akkor tudjuk megérteni a felszabadulásának feltételeit is. A probléma a foszfor viszonylag kis koncentrációja, diszperz eloszlása és legfőképpen a rendkívül bonyolult körforgalma a bióta egyes elemein belül (PADISÁK & REYNOLDS 1998, ISTVÁNOVICS 2008). Ezért elektronmikroszkópos módszerekkel próbáljuk megtalálni az üledékben a foszfort, elsősorban a karbonáthoz és a vashoz kötött részét. A kezdeti próbálkozások ígéretesek (17. ábra), de ennek a kutatásnak még csak az elején járunk. Remélhetőleg a karbonátképződésről eddig felhalmozott információ segítséget nyújt majd a foszfor speciációjának, valamint az üledék és algák közötti forgalmának megértéséhez is.

A balatoni iszap rendkívül dinamikus rendszer, nemcsak fizikai, hanem kémiai értelemben is. Mint láttuk, a kagylók aragonitkéjének és valószínűleg a kovaalgák szilikavázának



17. ábra. (a) STEM EDS-elemntérkép egy kalcitcsemcséről (Ca: sötétkék), amelyet szmektitréteg burkol (Si: piros), a kalcit és az agyag határan foszfordúsulással (világoskék). (b) Az (a) táblán jelölt terület átlagos összetételét mutató EDS-spektrum; a foszfor koncentrációja mindössze 1.8 atom%

Figure 17. (a) STEM EDS elemental map obtained from a calcite grain (Ca: dark blue), covered by a smectite flake (Si: red), with a minor P enrichment (in light blue) at the boundary between calcite and smectite. (b) EDS spectrum showing the composition of the boxed area in (a); the concentration of P is only 1.8 atom%

anyaga is körforgásban van a tavon belül. Az 5c. ábra szerint azonban évszaktól és időjárástól függően rendszeresen előfordulnak olyan kémiai körülmények, amelyek mellett nemcsak az aragonit, hanem a kalcit, sőt akár a dolomit is visszaoldódhat. Ekkor a kalcithoz kötött foszfor, magnézium vagy egyéb elemek ismét mobilizálódhatnak. A víz-szaoldódás/kicsapódás ciklusai olykor egy új egyensúlyi állapot kialakulását, és különösen az ásványok felületén új fázisok megjelenését eredményezik (RUIZ-AGUDO et al. 2014). A Balatonban ezek a folyamatok biztosan szerepet játszanak a karbonátok Mg-tartalmának megfigyelt változékonyságában és esetleg a protodolomit képződésében. A jövő kutatási feladata, hogy pontosabban felderítsük az iszapásványok felületén lejátszódó jelenségeket.

A Balaton kutatása alighanem addiktív: aki egyszer „belekóstolt” a Balatonba, nehezen hagyja abba a vizsgálatát. Amíg az egyik kérdésre úgy-ahogy kielégítő választ kapunk, számtalan újabb megoldandó problémát találunk. Ez persze nagyjából minden tudományos kutatásra igaz, de a Balaton mégis különleges: épp megfelelő méretű ahhoz, hogy remélhessük, hogy egyszer tökéletesen megértjük a benne zajló folyamatokat, ugyanakkor kellően bonyolult rendszer ahhoz, hogy aztán belássuk, ez mégsem fog sikerülni. A balatoni iszapról legalább száz éve halmozódik a tu-

dás, amelynek gyarapítása nemcsak élményekben gazdag tudományos munka, hanem kötelességünk is.

Köszönetnyilvánítás

A jelen dolgozatban említett tudományos eredményekhez sok munkatársam kutatómunkája járult hozzá. Másoktól konzultációk, irodalmi útbaigazítás formájában kaptam segítséget. Hálásan köszönöm MOLNÁR Zsombor, NYIRŐ-KÓSA Iлона, ROSTÁSI Ágnes, BEREZK-TOMPA Éva, FODOR Melinda, PEKKER Péter, DÓDONY István, RÁCZ Kornél, Winfred NYOKABI, HATÓ Zoltán, KRISTÓF Tamás, CSERNY Tibor, HAAS János, BALOGH Csilla, Patrick MEISTER, Silvia FRISIA, TOPA Boglárka, WEISZBURG Tamás, ISTVÁNOVICS Vera, PADISÁK Judit, MAGYARI Enikő, PÁLFI Ivett, KOVÁCS András, CORA Ildikó és Maja KOBLAR segítségét. Köszönöm a kézirat átnézését és bírálatát, CSERNY Tibor, HAAS János, ISTVÁNOVICS Vera, PAPP Gábor és SZTANÓ Orsolya hasznos megjegyzéseit. A kutatást az OTKA K116732 és az NKFIH GINOP-2.3.2-15-2016-00017 és GINOP-2.3.3-15-2016-0009 számú projektjei támogatták. Az elektronmikroszkópos vizsgálatokhoz a Pannon Egyetem, Nanolab műszereit használtuk.

Irodalom – References

- BABINSZKI E. & HORVÁTH F. (szerk.) 2020: *A Balaton kutatása Lóczy Lajos nyomdokán*. – Magyarhoni Földtani Társulat, Budapest, 339 p.
- BÁLDI, K., BALOGH, C., SZTANÓ, O., BUCZKÓ, K., B. MUSKÓ, I., G.-TÓTH, L. & SERFŐZŐ, Z. J. 2019: Sediment contributing invasive dreissenid species in a calcareous shallow lake – Possible implications for shortening life span of lakes by filling. – *ELEMENTA – Science of the Anthropocene* 7/1, 42 p. <https://doi.org/10.1525/elementa.380>
- BALOGH, C., VLÁCILOVÁ, A., G.-TÓTH, L. & SERFŐZŐ, Z. 2018: Dreissenid colonization during the initial invasion of the quagga mussel in the largest Central European shallow lake, Lake Balaton, Hungary. – *Journal of Great Lakes Research* 44/1, 114–125. <https://doi.org/10.1016/j.jglr.2017.11.007>
- BAZYLINSKI, D. A. & FRANKEL, R. B. 2004: Magnetosome formation in prokaryotes. – *Nature Reviews Microbiology* 2/3, 217–230. <https://doi.org/10.1038/nrmicro842>
- BIDLÓ G. 1960: Balatoni aragonit-kiválás. – *Földtani Közlöny* 90, 224–225.
- BUCZKÓ, K., VÖRÖS, L. & CSERNY, T. 2005: The Diatom flora and vegetation of Lake Balaton from sediment cores according to Marta Hajós's legacy. – *Acta Botanica Hungarica* 47/1–2, 75–115. <https://doi.org/10.1556/abot.47.2005.1-2.10>
- BUDAI T. & CSILLAG G. 1998: A Balaton-felvidék középső részének földtana. – *A Bakony természettudományi kutatásának eredményei* 22, 118 p.
- CAMPANA, S. E. 1999: Chemistry and composition of fish otoliths: pathways, mechanisms and applications. – *Marine Ecology Progress Series* 188, 263–297. <https://doi.org/10.3354/meps188263>
- CSERNY, T. 2002: A balatoni negyedidőszaki üledékek kutatási eredményei. – *Földtani Közlöny* 132, 193–213.
- CSERNY T. & CORRADA R. 1990: A Balaton aljzatának szedimentológiai térképe. – *A Magyar Állami Földtani Intézet Évi Jelentése az 1988. évről*, 169–176.
- CSERNY, T., NAGY-BODOR, E. & HAJÓS, M. 1991a: Contributions to the sedimentology and evolution history of Lake Balaton. – In: PÉCSI, M. & SCHWEITZER, F. (szerk.): *Quaternary Environment in Hungary*. Studies in Geography in Hungary. Akadémiai Kiadó, Budapest, 75–84.
- CSERNY T., FÖLDVÁRI M., IKRÉNYI K., NAGY-BODOR E., HAJÓS M., SZUROMI-KORECZ A. & WOJNÁROVITS L. 1991b: A Balaton aljzatába mélyített Tó–24. sz. fúrás földtani vizsgálatának eredményei. – *A Magyar Állami Földtani Intézet Évi Jelentése az 1989. évről*, 177–239.
- CSERNY, T., HERTELENDI, E. & TARIÁN, S. 1995: Results of isotope-geochemical studies in the sedimentological and environmental geologic investigations of Lake Balaton. – *Acta Geologica Hungarica* 38, 355–376.
- CSERNY T., PRÓNAY Zs. & NEDUCZA B. 2005: A Balatonon végzett korábbi szeizmikus mérések újraértékelése. – *MÁFI Évi Jelentése a 2004. évről*, 273–283.
- CSERNY T., PRÓNAY Zs., NAGYNÉ BODOR E., SZUROMINÉ KORECZ A. & SÁRDY J. 2020: A Balaton földtani kutatása a XX. század végéig. – In: BABINSZKI E. & HORVÁTH F. (szerk.): *A Balaton kutatása Lóczy Lajos nyomdokán*. Magyarhoni Földtani Társulat, Budapest, 189–213.

- DITTRICH, M. & OBST, M. 2004: Are picoplankton responsible for calcite precipitation in lakes? – *Ambio* **33**, 559–564. <https://doi.org/10.1579/0044-7447-33.8.559>
- DOBOLYI, E. & BIDLÓ, G. 1980: Contribution to the study on bottom sediment in Lake Balaton. I. Determination of phosphorus minerals in the sediment. – *Internationale Revue der gesamten Hydrobiologie* **65**, 489–497.
- EMSZT K. 1911: A Balaton fenékszajpájának és altalajának chemiai alkata. – In: LÓCZY L. (szerk.): *A Balatonnak és környékének fizikai földrajza*. Magyar Királyi Földrajzi Társaság Balaton-bizottsága, Budapest, 1–16.
- ENTZ G. & SEBESTYÉN O. 1942: *A Balaton élete*. – Királyi Magyar Természettudományi Társaság, 366 p.
- FODOR, M. A., HATÓ, Z. & PÓSFAI, M. 2020: The role of clay surfaces in the heterogeneous nucleation of calcite: Molecular dynamics simulations of cluster formation and attachment. – *Chemical Geology* **538**, 119497. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2020.119497>
- FUSSMANN, D., VON HOYNINGEN-HUENE, A. J. E., REIMER, A., SCHNEIDER, D., BABKOVÁ, H., PETICZKA, R., MAIER, A., ARP, G., DANIEL, R. & MEISTER, P. 2020: Authigenic formation of Ca-Mg carbonates in the shallow alkaline Lake Neusiedl, Austria. – *Biogeosciences* **17/7**, 2085–2106. <https://doi.org/10.5194/bg-17-2085-2020>
- GAINES, A. M. 1977: Protodolomite redefined. – *Journal of Sedimentary Petrology* **47**, 543–546.
- GAVRYUSHKIN, P. N., RECNİK, A., DANEU, N., SAGATOV, N., BELONOSHKO, A. B., POPOV, Z. I., RIBIC, V. & LITASOV, K. D. 2019: Temperature induced twinning in aragonite: transmission electron microscopy experiments and ab initio calculations. – *Zeitschrift für Kristallographie-Crystalline Materials* **234/2**, 79–84. <https://doi.org/10.1515/zkri-2018-2109>
- GEBAUER, D., RAITERI, P., GALE, J. D. & CÖLFEN, H. 2018: On classical and non-classical views on nucleation. – *American Journal of Science* **318/9**, 969–988. <https://doi.org/10.2475/09.2018.05>
- GREGG, J. M., BISH, D. L., KACZMAREK, S. E. & MACHEL, H. G. 2015: Mineralogy, nucleation and growth of dolomite in the laboratory and sedimentary environment: A review. – *Sedimentology* **62/6**, 1749–1769. <https://doi.org/10.1111/sed.12202>
- HAAS J. & HIPS K. 2020: A rejtelmes dolomit. – *Földtani Közlöny* **150/2**, 233–233. <https://doi.org/10.23928/foldt.kozl.2020.150.2.233>
- HÁMOR, T. 1994: The occurrence and morphology of sedimentary pyrite. – *Acta Geologica Hungarica* **37**, 153–181.
- HERODEK, S. & ISTVÁNOVICS, V. 1986: Mobility of phosphorus fractions in the sediments of Lake Balaton. – *Hydrobiologia* **135**, 149–154. <https://doi.org/10.1007/bf00006466>
- HLAVAY, J. & POLYÁK, K. 2002: Investigation on the pollution sources of bottom sediments in the Lake Balaton. – *Microchemical Journal* **73/1–2**, 65–78. [https://doi.org/10.1016/s0026-265x\(02\)00053-x](https://doi.org/10.1016/s0026-265x(02)00053-x)
- HU, Q., NIELSEN, M. H., FREEMAN, C. L., HAMM, L. M., TAO, J., LEE, J. R. I., HAN, T. Y.-J., BECKER, U., HARDING, J. H. & DOVE, P. M. 2012: The thermodynamics of calcite nucleation at organic interfaces: Classical vs. non-classical pathways. – *Faraday Discussions* **159/1**, 509–523. <https://doi.org/10.1039/c2fd20124k>
- ISTVÁNOVICS, V. 2008: The role of biota in shaping the phosphorus cycle in lakes. – *Freshwater Reviews* **1**, 143–174. <https://doi.org/10.1608/frj-1.2.2>
- ISTVÁNOVICS, V., HERODEK, S. & SZILÁGYI, F. 1989: Phosphate adsorption by different sediment fractions in Lake Balaton and its protecting reservoirs. – *Water Research* **23**, 1357–1366. [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(89\)90074-2](https://doi.org/10.1016/0043-1354(89)90074-2)
- ISTVÁNOVICS, V., HONTI, M., TORMA, P. & KOUSAL, J. 2020: Climate change driven regime shift and record-setting algal bloom in large, shallow Lake Balaton, Hungary. – *Harmful Algae közlésre benyújtva*.
- Ji, H. M., YANG, W., CHEN, D. L. & LI, X. W. 2020: Natural arrangement of fiber-like aragonites and its impact on mechanical behavior of mollusk shells: A review. – *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials* **110**, 103940. <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2020.103940>
- KERN, Z., KÁZMÉR, M., MÜLLER, T., SPECZIÁR, A., NÉMETH, A. & VÁCZI, T. 2017: Fusiform vateritic inclusions observed in European eel (*Anguilla anguilla* L.) sagittae. – *Acta Biologica Hungarica* **68/3**, 267–278. <https://doi.org/10.1556/018.68.2017.3.4>
- KISS A., VISNOVITZ F., TIMÁR G., HÁMORI Z. & HORVÁTH F. 2018: A Tihanyi-kút morfológiája ultranagy felbontású balatoni szeizmikus mérések alapján. – *Magyar Geofizika* **59/2**, 53–64.
- LÓCZY L. 1913: *A Balaton tudományos tanulmányozásának eredményei*. – Magyar Királyi Földrajzi Társaság, Budapest, 617 p.
- LÓCZY L. 1920: *A Balaton földrajzi és társadalmi állapotainak leírása*. – Hornyánszky Nyomda, Budapest, 194 p.
- MA, G., HE, X., JIANG, X., LIU, H., CHU, J. & XIAO, Y. 2020: Strength and permeability of bentonite-assisted biocemented coarse sand. – *Canadian Geotechnical Journal*, in press. <https://doi.org/10.1139/cgj-2020-0045>
- MAGYARI E., SZÁDOVSZKY L., KONES P., ABRAHAM V., SZABÓ Z., CSÜLLÖG G. & BIHARI, Á. 2019: A dunántúli táj felszínborítás változása a középkortól napjainkig pollen alapú kvantitatív rekonstrukciók alapján. – In: BOSNAKOFF M. & FŐZY I. (szerk.): *22. Magyar Őslénytani Vándorgyűlés, Program, előadás-kivonatok, kirándulásvezető*. Magyarhoni Földtani Társulat, Döbrönte, 24–25.
- MÁRTON P., BABINSZKI E., DÖVÉNYI P., DRAHOS D., GALSA A., HORVÁTH F., LIPOVICS T., MÁRTONNÉ SZALAY E., PUSZTA S., SALÁT P., SURÁNYI G., SZÉKELY B., TÓTH T. & WINDHOFFER G. 2007: *Integrált kutató módszer kifejlesztése negyedidőszaki környezeti állapotok geofizikai vizsgálatára. Zárójelentés a T44765 sz. OTKA pályázathoz (2003–2005)*. – Budapest.
- MÁTÉ F. 1987: A Balaton-meder recens üledékeinek térképezése. – *A Magyar Állami Földtani Intézet Évi Jelentése az 1985. évről*, 367–379.
- MOLNÁR, Z., PEKKER, P. & PÓSFAI, M. 2020a: Clay minerals affect calcium (magnesium) carbonate precipitation and aging. – *Earth and Planetary Science Letters*, közlésre benyújtva.
- MOLNÁR, Z., PEKKER, P., JAKAB, M., DÓDONY, I., VITÁL, Z. & PÓSFAI, M. 2020b: Nanostructure of biogenic aragonite: a study of otoliths and bivalve shells from a freshwater environment. – EGU General Assembly Conference Abstracts, 21996. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu2020-21996>
- MÜLLER, G. 1970: High-magnesian calcite and protodolomite in Lake Balaton (Hungary) sediments. – *Nature* **226**, 749–750. <https://doi.org/10.1038/226749a0>
- MÜLLER, G. 1981: Heavy metals and nutrients in sediments of Lake Balaton, Hungary. – *Environmental Technology* **2/1**, 39–48. <https://doi.org/10.1080/09593338109384020>

- MÜLLER, G. & WAGNER, F. 1978: Holocene carbonate evolution in Lake Balaton (Hungary): a response to climate and impact of man. – In: MATTER, A. & TUCKER, M. E. (szerk.): *Modern and ancient lake sediments*. Special Publications of the International Association of Sedimentologists. Blackwell Scientific Publications, 57–81. <https://doi.org/10.1002/9781444303698.ch4>
- NYIRŐ-KÓSA I. & PÓSFAL M. 2007: Mágneses baktériumok a Balatonban. – *Hidrológiai Közlöny* **87**, 90–92.
- Nyirő-Kósa, I., ROSTÁSI, Á., BERECKZ-TOMPA, É., CORA, I., KOBLAR, M., KOVÁCS, A. & PÓSFAL, M. 2018: Nucleation and growth of Mg-bearing calcite in a shallow, calcareous lake. – *Earth and Planetary Science Letters* **496**, 20–28. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2018.05.029>
- NYOKABI, W. 2020: *Potential dissolution of calcium carbonate shells in a freshwater environment*. —MSc Thesis, University of Pannonia, Veszprém, 76 p.
- PADISÁK, J., SCHEFFLER, W., SÍPOS, C., KASPRZAK, P., KOSCHEL, R. & KRIENITZ, L. 2003: Spatial and temporal pattern of development and decline of the spring diatom populations in Lake Stechlin in 1999. – *Archiv für Hydrobiologie Beiheft Advances in Limnology* **58**, 135–155.
- PÓSFAL, M. & ARATÓ, B. 2000: Magnetotactic bacteria and their mineral inclusions from Hungarian freshwater sediments. – *Acta Geologica Hungarica* **43/4**, 463–476.
- PÓSFAL, M. & DUNIN-BORKOWSKI, R. E. 2006: Sulfides in biosystems. – *Reviews in Mineralogy and Geochemistry* **61/1**, 679–714. <https://doi.org/10.1515/9781501509490-014>
- PÓSFAL M. & G.-TÓTH L. 2020: A Balaton iszapjának ásványai. – In: BABINSZKI E. & HORVÁTH F. (szerk.): *A Balaton kutatása Lóczy Lajos nyomdokán*. Magyarhoni Földtani Társulat, Budapest, 233–249.
- PÓSFAL M., MOLNÁR Z., ROSTÁSI Á., FODOR M. & CSERNY T. 2019a: A Balaton üledékének kutatása. – In: BUDAI T., PALOTÁS K. & PIROS O. (szerk.): *Földtani és Geofizikai Vándorgyűlés*. – Magyarhoni Földtani Társulat és Magyar Geofizikusok Egyesülete, Balatonfüred, 16–19.
- PÓSFAL, M., MOLNÁR, Z., PEKKER, P., DÓDONY, I., FRISIA, S. & MEISTER, P. 2019b: Microstructure of magnesium-bearing carbonates precipitating from shallow freshwater lakes. – *GSA Annual Meeting in Phoenix, Arizona*, 335892. <https://doi.org/10.1130/abs/2019am-335892>
- ROSTÁSI Á., FODOR M., RÁCZ K., TOPA B., WEISZBURG T. & PÓSFAL M. 2019: A Balaton üledékképződésének ásványmérlege. – In: T. BUDAI, K. PALOTÁS & O. PIROS (szerk.): *Földtani és Geofizikai Vándorgyűlés*. Magyarhoni Földtani Társulat és Magyar Geofizikusok Egyesülete, Balatonfüred, 115–117.
- ROSTÁSI, Á., RÁCZ, K., FODOR, M., TOPA, B., MOLNÁR, Z., WEISZBURG, T. & PÓSFAL, M. 2020: Pathways of carbonate sediment accumulation in a large, shallow lake. – manuscript in preparation.
- RUIZ-AGUDO, E., PUTNIS, C. V. & PUTNIS, A. 2014: Coupled dissolution and precipitation at mineral-fluid interfaces. – *Chemical Geology* **383**, 132–146. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2014.06.007>
- SCHÖLL-BARNA, G. 2011: An isotope mass balance model for the correlation of freshwater bivalve shell (*Unio pictorum*) carbonate ^{18}O to climatic conditions and water ^{18}O in Lake Balaton (Hungary). – *Journal of Limnology* **70/2**, 272–282. <https://doi.org/10.4081/jlimnol.2011.272>
- SCHÖLL-BARNA, G., DEMÉNY, A., SERLEGI, G., FÁBIÁN, S., SÜMEGI, P., FÓRIZS, I. & BAJNÓCZI, B. 2012: Climatic variability in the Late Copper Age: stable isotope fluctuation of prehistoric *Unio pictorum* (Unionidae) shells from Lake Balaton (Hungary). – *Journal of Paleolimnology*, 1–14. <https://doi.org/10.1007/s10933-011-9561-6>
- SMOLDERS, E., BAETENS, E., VERBEECK, M., NAWARA, S., DIELS, J., VERDIEVEL, M., PEETERS, B., DE COOMAN, W. & BAKEN, S. 2017: Internal loading and redox cycling of sediment iron explain reactive phosphorus concentrations in lowland rivers. – *Environmental Science & Technology* **51/5**, 2584–2592. <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b04337>
- SOMLYÓDY, L. & VAN STRATEN, G. 1986: *Modeling and managing shallow lake eutrophication – with application to Lake Balaton*. – Springer, Berlin, 388 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-82707-5>
- SOSSO, G. C., CHEN, J., COX, S. J., FITZNER, M., PEDEVILLA, P., ZEN, A. & MICHAELIDES, A. 2016: Crystal nucleation in liquids: Open questions and future challenges in molecular dynamics simulations. – *Chemical Reviews* **116/12**, 7078–7116. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.5b00744>
- SUN, W., JAYARAMAN, S., CHEN, W., PERSSON, K. A. & CEDER, G. 2015: Nucleation of metastable aragonite CaCO_3 in seawater. – *Proceedings of the National Academy of Sciences* **112/11**, 3199–3204. <https://doi.org/10.1073/pnas.1423898112>
- SÜMEGI, P., GULYÁS, S. & JAKAB, G. 2008: Holocene paleoclimatic and paleohydrological changes in Lake Balaton as inferred from a complex quantitative environmental historical study of a lacustrine sequence of the Szigliget embayment. – *Documenta Praehistorica* **35/1**, 33–43. <https://doi.org/10.4312/dp.35.3>
- SZABÓ Z. & BODOKY T. 2019: Eötvös Loránd, a geofizikus, a műszeres geofizikai kutatások „atyja”. – In: DOBSZAY T., ESTÓK J., GYÁNI G. & PATKÓS A. (szerk.): *Eötvös Loránd Emlékalbum*. Kossuth Kiadó, Budapest, 45–58.
- SZESZTAY K. 1961: A Balaton medrének feltöltődéséről. – *Hidrológiai Tájékoztató*, 1961. dec., 48.
- SZESZTAY K. 1966: A Balaton medrének feltöltődésével kapcsolatos kutatások 1963–64. Beszámoló a kutatások koordinálására létesült intézetközi munkaközösség tevékenységéről. – VITUKI adattára.
- TAPOLCZAI, K., BOUCHEZ, A., STENGER-KOVÁCS, C., PADISÁK, J. & RIMET, F. 2016: Trait-based ecological classifications for benthic algae: review and perspectives. – *Hydrobiologia* **776/1**, 1–17. <https://doi.org/10.1007/s10750-016-2736-4>
- THOMPSON, J. B., SCHULTZE-LAM, S., BEVERIDGE, T. J. & DES MARAIS, D. J. 1997: Whiting events: biogenic origin due to the photosynthetic activity of cyanobacterial picoplankton. – *Limnology and Oceanography* **42/1**, 133–141. <https://doi.org/10.4319/lo.1997.42.1.0133>
- TOMPA, É., NYIRŐ-KÓSA, I., ROSTÁSI, Á., CSERNY, T. & PÓSFAL, M. 2014: Distribution and composition of Mg-calcite and dolomite in the water and sediments of Lake Balaton. – *Central European Geology* **57**, 113–136. <https://doi.org/10.1556/ceugeol.57.2014.2.1>

- TÓTH, Z., TÓTH, T., SZAFIÁN, P., HORVÁTH, A., HÁMORI, Z., DOMBRÁDI, E., FEKETE, N., SPIESS, V. & HORVÁTH, F. 2010: Szeizmikus KUTATÁSOK a Balatonon. – *Földtani Közlöny* **140/4**, 355–366.
- TREITZ P. 1911: A Balaton tó fenékszajjának és altalajának fizikai alakulása és ásványtani összetétele. – In: LÓCZY L. (szerk.): *A Balatonnak és környékének fizikai földrajza*. Magyar Királyi Földrajzi Társaság Balaton-bizottsága, Budapest, 1–26.
- TULLNER T. 2002: *A Balaton vízszintváltozásai földtudományi adatbázisának térinformatikai feldolgozása tükrében*. – PhD Thesis, Eötvös Loránd University, Budapest, 142 p.
- TULLNER, T. & CSERNY, T. 2003: New aspects of lake-level changes: Lake Balaton, Hungary. – *Acta Geologica Hungarica* **46/2**, 215–238.
- VIRÁG Á. 1998: *A Balaton múltja és jelene*. – Egri Nyomda Kft., Eger, 904 p.
- VISNOVITZ F., HORVÁTH F., SURÁNYI G., MAGYARI Á., SANT, K., CSOMA V., SUJAN, M., BRAUCHER, R., MAGYAR I. & SZTANÓ O. 2017: A Balaton alatti pannóniai rétegeket mintázó TFM-1/13 kutatófúrás komplex vizsgálatának eredményei. – *Földtani Közlöny* **147/3**, 283–296. <https://doi.org/10.23928/foldt.kozl.2017.147.3.283>
- VISNOVITZ F., HORVÁTH F., HÁMORI Z. & TÓTH T. 2019: Szeizmikus kutatások a Balatonon: az elmúlt három évtized balatoni vízi szeizmikus kutatásai az ELTE-GEOMEGA szemszögéből. – In: BUDAI T., PALOTÁS K. & PIROS O. (szerk.): *Földtani és Geofizikai Vándorgyűlés*. Magyarhoni Földtani Társulat és Magyar Geofizikusok Egyesülete, Balatonfüred.
- ZLINSZKY A., MOLNÁR G. & SZÉKELY B. 2010: A Balaton vízmélységének és tavi üledékvastagságának térképezése vízi szeizmikus szelvények alapján. – *Földtani Közlöny* **140/4**, 429–438.
- Zólyomi B. 1952: Magyarország növénytakarójának fejlődéstörténete az utolsó jégkorszaktól. – *Az MTA Biológiai Tudományok Osztálya Közleményei* **1/4**, 491–543.
- Kézirat beérkezett: 2020. 09. 01.

A magyarországi bauxitok kutatásának rövid története (1903–2020)

MINDSZENTY ANDREA

ELTE Általános és Alkalmazott Földtani Tanszék
1117 Budapest, Pázmány Péter sétány 1/C.
mindszenty@caesar.elte.hu

The short history of exploration for bauxite reserves in Hungary (1903–2020)

Abstract

The history of exploration for and mining of domestic bauxite reserves in Hungary ended in 2013 when the Bakony Bauxite Ltd. closed down its last large-scale underground bauxite mine in Halimba. Scientific interest in bauxites has, however, survived and will hopefully continue also in the future. However, it will miss the field-information formerly always provided by the cores of exploratory boreholes and by the mining operations. The first research papers published on Hungarian bauxites are almost exactly coeval with the discovery of the Királyerdő bauxite in Transylvania (1903) and since then the study of various aspects of bauxites has never ceased. This paper gives a concise account of the most important events of the development of large-scale bauxite mining in Hungary and the results of geological research and exploration related to it.

The list of references includes all notable contributions published on the subject.

Keywords: bauxite reserves, history of exploration, Hungary

Összefoglalás

A hazai bauxitok bányászati célú kutatása a halimbai bauxitbánya 2013-ban bekövetkezett bezárásával – úgy tűnik végérvényesen – lezárult. Tudományos tanulmányozásuk, amely szinte egyidős a 110 évet megélt ipari kutatással, remélhetőleg folytatódik, bár kétségtelen, hogy a bányászat és az azt megelőző mélyfúrásos kutatás révén szinte naponta keletkező újdonságértékű feltárásokat ezentúl legfeljebb a mintaraktárakban megőrződött(?) anyagok fogják jól-rossz-szul helyettesíteni. A visszatekintés, az eddigi eredmények számbavétele mindenképp időszerű. Erre tesz kísérletet a cikk, amely a királyerdei bauxit 1903. évi felfedezésétől kezdve a Vértes, a Bakony a Villányi-hegység, majd végül a Gerecse bauxitkincsének kutatásán-feltárásán át az ipari és a tudományos igényű vizsgálatokig, a sokoldalú őslénytani, ásványtani, közettani, geokémiai felismerésekig és az ezek alapján megfogalmazódott paleogeográfiai, szerkezetföldtani, geodinamikai szintézisekig villantja fel a történet legfontosabb elemeit. Mindezek részletes kifejtésére természetesen a rövid áttekintés nem ad lehetőséget, a terjedelmes irodalomjegyzék segítségével azonban az érdeklődők kielégíthetik kíváncsiságukat.

Az irodalomjegyzék – a hivatkozott irodalmon túl – tartalmazza a témában megjelent mérvadó közleményeket.

Tárgyszavak: bauxit előfordulások, kitermeléstörténet, Magyarország

A kutatás kezdetei és az első bányanyitások

A tudománytörténet a bauxit felfedezését a 19. sz. elejére (1821) teszi és a nagy francia geológus-mineralógus-vegyész, Pierre BERTHIER nevéhez köti. A feljegyzések szerint egy kis provence-i település, Le Baux közeléből származott az a minta, amelyet egy M. BLAVIER nevű ember azzal küldött be BERTHIER laboratóriumába, hogy a minta feltehetően vasérc. Erről a vöröses színű, agyagosnak tűnő mintáról állapította meg BERTHIER, hogy az ugyan valóban

tartalmaz vasat is, de alumíniumban gazdagabb, mint vasban, és minden bizonnyal valamilyen ásványkeverék. Az anyagot a lelőhely neve után beauxit-nak nevezte el (mely név később módosult bauxittá). Tartozunk azonban az igazságnak azzal, hogy mindezt több mint 100 évvel megelőzte egy különös, piritesedett, majd elmállott, szürke bauxit bányászata és ipari hasznosítása anélkül, hogy a felhasználók sejtették volna a kibányászott anyag valódi természetét. Egy P. TURINI nevű mérnök 1808-ban Velencében publikált írásából tudjuk, hogy Isztrián a 16. sz. végétől egészen 1857-ig

Sovignacco (ma Sovinjak) település határában, a pirites bauxit alunitos málladékból készített timsót a környék bányáiban bőrcserző anyagként hasznosították. A történet részleteit a Földtani Közlöny 1997. évi kötetében, BÁRDOSY György rendkívül olvasmányos cikkében tárgyalja. A már hivatalosan a 20. sz. emblemikus nyersanyagának, az alumínium ércének tekinthető bauxit bányászata azonban teljesen Franciaországban, a provence-i lelőhelyen indult meg az 1860-as években. A gyorsan fejlődő alumíniumipar érdeklődése azután Provence-tól csakhamar a kiterjedt francia gyarmatbirodalom trópusi területei (pl. Guinea) felé fordult, ahol a felszín borító mállási takaróban már korábban, viszonylag könnyen hozzáférhető helyzetben ugyancsak ércminőségű, alumíniumban dús anyagot találtak.

Magyarországon bauxitot elsőként, 1903-ban, az erdélyi Királyerdő vasérctelepeinek anyagában MIKÓ Béla kohómérnök és FABINYI Rudolf kolozsvári egyetemi tanár vizsgálatai azonosítottak: az ott is, akkor is gyenge minőségű vasércnek gondolt, vöröses színű mintában, a kolozsvári laboratórium mindössze 4–9%-nyi SiO_2 mellett 50–55% Al_2O_3 tartalmat elemzett. A leletről az első tudományos közlemény – SZÁDECZKY Gyula tollából – 1905-ben a Földtani Közlöny hasábjain látott napvilágot (SZÁDECZKY 1905). A későbbiekben – nyilván az ipari-gazdasági vonatkozások miatt többnyire inkább a Földtani Intézet Évi Jelentése kötetében, valamint a Bányászati Lapokban és a Természettudományi Közlönyben találunk általában a bauxitra vonatkozó híradásokat. A termelés – kis volumenben – 1915-ben indult meg a Jád völgyében. A termelvényt Németországba exportálták (POSGAY 1981). A világháborút lezáró, egész Magyarországra, s így az épp kibontakozni készülő magyar bauxitbányászatra nézve is sérelmes békeszerződést követően az új nyersanyag iránti hazai érdeklődés jobb híján a Dunántúli-középhegység, majd a Villányi-hegység felé kellett forduljon.

A kutatás csaknem egy időben – 1919–20-ban – a Bakonyban Halimbán és a Vértesben Gánton kezdődött meg. Halimbán, illetve Halimba tágabb körzetében Zalatnai STÜRMER József és Aknaszlatinai GYÖRGY Albert; Gánton BALÁS Jenő volt a kezdeményező. STÜRMER valójában kőszénkutató fúrásban, a Malom-árokban már 1908-ban felfedezett vörösvagyra, melyről – mint annyian mások – először ő is azt hitte, vasércel van dolga. Bár az hamarosan kiderült, hogy a vöröses színű anyagnak alumíniumtartalma is van, az érc gyenge minőségére való tekintettel a geológusok – KORMOS Tivadar, TAEGER Henrik és VADÁSZ Elemér – az akkor már az érdeklődés fókuszában lévő gánti telep megnyitását szorgalmazták, amelyen BALÁS Jenő kezdeményezését követően egyre intenzívebbé vált a kutatás.

BALÁS Jenő első gánti zártkutatmányának bejegyzési dátuma 1920 volt. A bihari bauxit kutatásában kezdetektől jeleskedő gyergyóremetei bányamérnök az I. világháborút követően jött át a románok által megszállt Erdélyből Csonka-Magyarországra. Itthon sok más neves geológussal és bányamérnökkel együtt fogott hozzá a maradék ország ásványi kincseinek felkutatásához. Különös konjunktúrahelyzetbe hozta ez az időszak a hazai földtani kutatást.

A bányáitól, nyersanyagtelepeitől megfosztott országban létkérdés volt új telepek felfedezése és mielőbbi termelésbe vonása, hogy ezzel megteremtődjék az ipar újrászervezésének lehetősége. A Gánton és általában a magyarországi bauxittelepeken megindult feltáró kutatás ennek a konjunktúrahelyzetnek a sikertörténete.

1920–26 között – az akkori technológiai színvonalat figyelembe véve – varázslatos gyorsasággal jutott el a gánti telepek megkutatása a bányanyitáshoz. A TAEGER Henrik 1908-as földtani térképének adatain nyugvó részletező céltérképezés, a bagolyhegyi kutatóvázat, kutatóaknákat, kézi fúrások, BALÁS Jenő prospektori tapasztalatai, majd a kutatásirányításba bevont geológus professzor, TELEGDY RÓTH Károly tudása és az általa végzett készletbecslés adta meg az alapot arra, hogy BORTNYÁK István bányamérnök kiválasztassa a minőségét és települési viszonyait tekintve bányanyitásra legalkalmasabb teleprészeket. Meleges–Hosszúharasztos–Bagoly-hegy–Újfeltárás volt a sorrend. A termelés gyors felfutása egycsapásra a világ élvonalába emelte a trianoni Magyarországot. 1936-ra, évi 500 000 tonnával, a világ 2. legnagyobb bauxittermelői lettünk. A feltárás beindításának költségeit főként német (VAW), kisebb részben svájci (ALUSUISSE) tőkével rendelkező konzorcium (ALUÉRC Rt.) finanszírozta (1. ábra). Közben megkezdődött az Északi-Bakonyban Alsópere, a Déli-Bakonyban Halimba; ÉK felé haladva a Vértes–Gerecse területén Bicske – Szár környékén az újbarok–óbaroki; majd Dél-Magyarországon, a Villányi-rögökön a nagyharsányi telepek kutatása és feltárása is (1. táblázat és 2. ábra)

A II. világháború alatt a termelvény túlnyomó többsége a német hadiipar szükségleteit szolgálta. A háború végső szakaszában a bányüzemek berendezéseinek többségét leszerelték, nyugatra szállították. A háború után, a potsdami egyezmény értelmében a bányák és a megmaradt létesítmények a győztes Szovjetunió tulajdonába kerültek. 1950 januárjában létrejött a MASZOBAL Rt., majd februárban a Bauxitkutató Expedíció. Gyakorlatilag innen számíthatjuk a szervezett, rendszeres bauxitkutatás kezdetét.



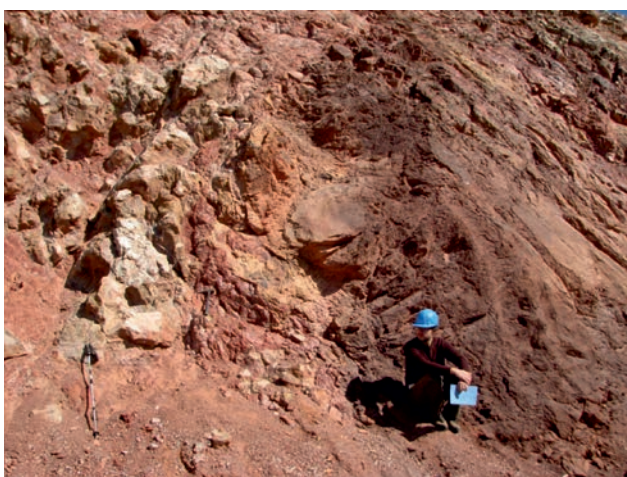
1. ábra. Egy 1923-ban a gánti bauxitbányászati pénzügyi háttérnek megteremtése érdekében Zürichben kibocsátott részvény faksimile másolata

Figure 1. One of the shares issued in 1923 in Zürich in order to attract capital to finance the exploitation of the Gánt bauxites

I. táblázat. A bauxitterületek kutatásának megindulása időrendi sorrendben
Table I. Date of beginning of the exploration at major bauxite occurrences of Hungary

A lelőhely neve	Felfedezése (a kutatás kezdete)
Királyerdő (Erdély)	1903
Gánt (Meleges, Hosszúharasztos, Bagoly-hegy)	1920
Halimba-Malomárok	1920 (1908)
Halimba–(Cseres, II., III., II–DNy*)	1943 (1920) (1993–1999)
Isztimér	1922
Bakonyszentlászló	1922
Nagynémetegyháza	1922
Eplény	1922, 1925
Alsópere	1926
Fenyőfő	1927
Dudar	1927
Piliscsaba	1927
Nyirád (Deáki-h., Iza, Darvastó, Deáki stb.)	1937 (1928)
Nagyharsány	1930
Nézsza	1935
Sümeg (Surgoth-tanya)	1938
Szóc (Félix, Határvölgy, Nyíreskút stb.)	1938
Óbarok–Vázsonypusztá	1938
Iszkaszentgyörgy (Kincses, József, Bitó)	1940
Nagyegyháza	1940 (1971)
Szár	1940
Kislőd	1953
Fenyőfő	1959
Csordakút	1966
Csabpuszta	1967 (1982)
Iharkút–Németbánya	1950 (1990*)
Bakonyoszlop	1968–(1999*)
Lengyelmajor	1984
Csetény	1985
Óbarok–É és –DK, Szár (Új kutatás)	1987–(2000)

*Az új kutatások adatai JANKOVICS B., DRÓSZEGI S. és TÓTH K. szerint.



2. ábra. A kora-kréta (berriasi) Nagyharsányi Bauxitnak a szársomlyói kőbányában feltáródott részlete 2019-ben (a kép baloldalán a fekvő jura mészkő karsztos felszíne látható)

Figure 2. The Early Cretaceous (Berriasian) Nagyharsány Bauxite exposed by stone-quarrying on the Szársomlyó Hill, Villány (note the intensely karstified cliffs of the Late Jurassic bedrock on the left side of the photo)

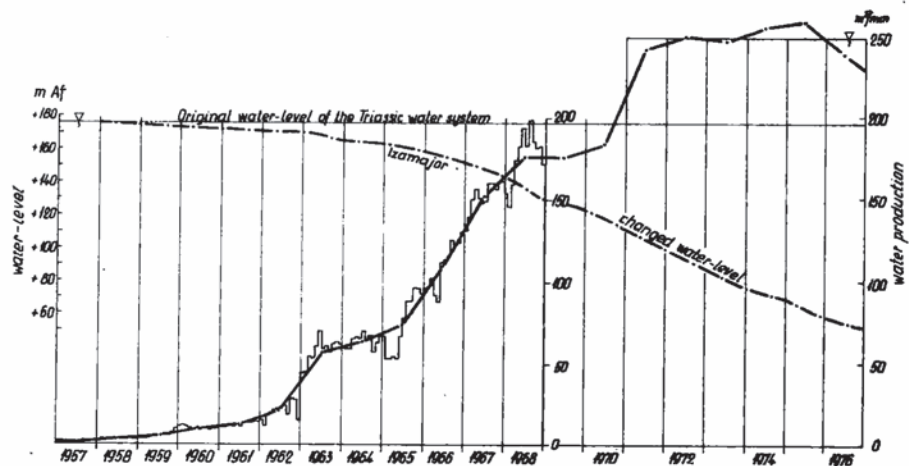
A szervezett bauxitkutatás

A szovjet nyersanyagkutatási rendszer – bár állítólagos merevsége miatt sokan, sokat kritizálták – voltaképp ma is, bárhol a világban megállja a helyét. Alapját – jól érzékelhetően – a nyersanyagkutatás nagy öregjének, az angolszász H. E. MCKINSTRYnek az elvei képezik (MCKINSTRY 1961). Az elő-, felderítő, részletes és előzetes fázisokra tagolódó tevékenységet, a reménybeli készletmérleg éves karbantartását s számos más, ezekkel összefüggésben szükségessé váló kamerális munkát először a fent említett Bauxitkutató Expedíció, majd annak utódjaként 1954-től 1991-ig a Bauxitkutató Vállalat, ezt követően pedig, 1995-ig, a Geoprospect Kft. végezte. A szakmai (geológiai) irányítás 1957-től folyamatosan SZANTNER Ferenc főgeológus kezében volt. Egymás után fedezték fel és kutatták meg a kislódi, nyirádi, halimbai, Iszkaszentgyörgy környéki, fenyőfői, bakonyoszlopi, a 70-es évektől az iharkúti és németbányai, majd a 80-as években a Nagyegyháza–Csordakút–Mány környéki valamint a Nyirád csabpusztai kettős bauxitszintű területet. A kutatási tevékenység spektruma a '80-as évek végéig állandóan bővült. A 70-es évekre Balatonalmádiban, a „főhadiszálláson” már önálló Kutatás-előkészítési (vezetője KNAUER József), Kutatási (vezetője KÁROLY Gyula, helyettese BAROSS Gábor), Hidrogeológiai (vezetője HÓRISZT György), Geofizikai (vezetője NYERGES Lajos) és Kamerális Osztály (SZABÓ Elemér, KOMLÓSSY György és R. SZABÓ István), valamint jelentős szellemi kapacitást foglalkoztató és – ifj. Dr. DUDICH Endre laborszervező tevékenységének köszönhetően – nemzetközi színvonalú és felszereltségű anyagvizsgáló laboratórium működött (HORVÁTH István, SZEKÉR Zoltán, TÓTH Kálmán, KNAUERNÉ GELLAI Mária, TÓTHNÉ GECSE Éva, SELÉNYINÉ SZOMJAS Eszter és mások). Felfejlődött a fúrógéppark és általában a műszaki háttér is (ebben jelentős része volt MECSNÓBER Miklósnak és SZAKÁLY Áronnak, valamint közvetlen munkatársaiknak és a mindenkori igazgatóknak, akik közül kiemelendő 1963–1971 között VIZY Béla, ill. 1986–1995 között, a végső szakaszban, TÓTH Béla tevékenysége). A kezdeti, részben kézzel működtetett Craelius gépeket 1960–62-ben a szovjet ZIF-ek, majd a '70-es években korszerű, köteles magvevővel, dupla falú magcsövekkel ellátott Wirth berendezések váltották fel. A kezdetben gépenként 10–11 főt foglalkoztató fúrási üzem a Wirth-korszak jelentős részben automatizált gépei mellé már gépenként mindössze 2 fős személyzetet igényelt. Ráadásul ugrásszerűen megnőtt a fúrási kapacitás: az 1950–59 közötti 298 900 fm-rel szemben 1960–76 között 1 236 100 fm. 1977–1990 között már összesen 1 802 000 fm volt. A géppark karbantartása, sőt a Wirth céggel kötött szerződés értelmében végül egyes fődarabok készítése, valamint teljes fúrógépek összeszerelése is a Kutató Vállalat saját műhelyében folyt. A terepi fúrócsoportok (Nyirád, Iszkaszentgyörgy, Farkasgyepű, Bakonyoszlop, Nagyegyháza) számára korszerű „főhadiszállások” létesültek, amelyek a korra jellemző telefonos, majd telexes, később állandó rádiótelefonos összeköttetésben voltak a Balatonalmádiba telepített központtal.

Mivel a külszíni kibúvásokon indult kutatások nyomán megismert területek készletei fokozatosan csökkentek, egyre újabb, de már nehezebben megtalálható telepek után kellett nézni. Ehhez új, komplexebb és az eddig megismert telepek tudományos tanulmányozásának eredményeire is támaszkodó kutatási módszereket kellett bevetni. A mélyfúrások optimális telepítése érdekében az alapos geológiai előkészítés mellé felzárkóztak a különféle geofizikai módszerek. Ezek alkalmazását eleinte csak az Eötvös Loránd Geofizikai Intézettel (SZABADVÁRY László, KAKAS Kristóf, BODRI Gyula, FARKAS István) való együttműködés tette lehetővé (OTTLIK & SZABADVÁRY 1969). Idővel azonban már a Bauxitkutató Vállalat saját geofizikusai is érdemben járultak hozzá mind a módszerfejlesztéshez, mind pedig – elsősorban a fúróluk-geofizikai módszerek – kivitelezéséhez és a mérések értelmezéséhez (ennek szervezéséből és irányításából elsősorban NYERGES Lajos, URAY Szabolcs és BALOGH Iván vették ki részüket). 1960–1990 között összesen mintegy 3 000 000 fm kutatófúrás mélyült s ennek eredményeként a készletgyarapodás elérte a 170 millió tonnát. Az éves mélyfúrásos kutatási teljesítmény jellemzően 100–120 ezer folyóméter körül volt, a bányák termelése pedig a 80-as évek végére elérte az évi 3 millió tonnát.

Mivel a termelésbe vonható készletek 70%-a már a '60-as évek második felére csak mélyműveléssel volt elérhető, ezért egyre nagyobb hangsúlyt kapott a hidrogeológia. A közvetlenül a karsztos fekvével érintkező, sokhelyütt törésekkel szabdalta telepek biztonságos, gépesített mélyművelésű bányászata csak száraz környezetben látszott megvalósíthatónak. Ehhez ki kellett dolgozni az ún. aktív vízvédelmi eljárást. Ebben az ALUTERV-es ALLIQUANDER Endre, POHL Károly és BALKAY Bálint (ALLIQUANDER 1966; POHL 1966, 1973; BALKAY 1966), valamint a VITUKI szakemberei – BÖCKER Tivadar és SCHMIEDER Antal (BÖCKER 1965a, b, BÖCKER et al. 1986, SCHMIEDER & POHL 1971, GRUBER & PAPP 1969) és mások – mellett a Bauxitkutató Vállalat Hidrogeológiai Osztályának vezetője, HÓRISZT György vállalt fontos szerepet (HÓRISZT 1971). A karsztvízszintet fúrt aknába telepített búvárszivattyúkkal úgy süllyesztették le, hogy mire a bányaműveletek a telepet elérték, ott a kialakult depresszió következtében a környezet már száraz volt. A kiemelt vizet (1985-ben összesen már kb. 300 m³/min – csak a Nyirádi-medencében pl. 70 m³/min!) a tágabb környék vízellátásába bekapcsolva enyhíteni tudták a bányászat miatt bekövetkezett víznívócsökkenés káros hatásait. Ami a káros hatásokat illeti: pontosan tudták, hogy a cél elérése érdekében hozzá kell nyúlniuk a statikus vízkészlethez, azaz világos volt előttük, hogy az ún. „aktív vízvédelem” sikerének záloga az

utánpótlódást meghaladó mértékű vízkivétel. A csúcsideszakban ez a DKH egészére nézve mintegy 800 m³/min-re rúgott. A víznívó-csökkenés átlagosan elérte a 40 m-t, de pl. Nyirádon és Iszkaszentgyörgy-Kincsesbányán meghaladta a 100 m-t is! (CSEPREGI 2007). A depresszió mértékének és időbeli alakulásának a tervezés követelményeit kielégítő kiszámolása az ismeretesség '60-as évekbeli szintjén (amikor rutinszerű számítógépes modellezésre sem volt még lehetőség) igen komoly szellemi erőfeszítést igényelt. A vízemelés szigorúan ellenőrzött körülmények között zajlott. A vállalkozás részleteit ALFÖLDI L. és CSEPREGI A. (in ALFÖLDI & KAPOLYI 2007) a bányászat szempontjait is szem előtt tartva utólag kimerítő részletességgel és tudományos igényességgel elemezték. A földtani felépítés (tektonizáltság foka, az egyes képződmények vízvezetőképessége, a beszívargás/utánpótlódás) szerepét JOCHÁNÉ EDELÉNYI Emőke (MÁFI) is részletesen vizsgálta (JOCHÁNÉ EDELÉNYI 1997, JOCHÁNÉ EDELÉNYI et al. 1996). Kiemelendő a vízszint-süllyesztés lokális és regionális hatásának ellenőrzésére, a VITUKI-val közösen megtervezett és telepített vízszint-megfigyelő kúthálózat létrehozása, a rendszeres hidrogeológiai adatgyűjtés és az adatok tárolása. Ebben jelentős szerepe volt többek között KESSLER Hubertnek (pl. KESSLER 1954). Az iparág részéről a vízszint-süllyesztésben és a kapcsolódó hidrogeológiai jelenségek nyomon követésében a '80-as években az ALUTERV FKI (BÖCKER Tivadar és „csapata”), a BKV-tól HÓRISZT György és HEGEDŰSNÉ KONCZ Margit, a bányavállalatok részéről FARKAS Sándorné vállalt fontos feladatokat (BÖCKER & HÓRISZT 1992, FARKASNÉ 1992). (3. ábra). Megjegyzendő, hogy az ALUTERV-es POHL Károly és munkatársai a tervezési fázisban azt is előre kiszámolták, hogy a bányászati műveletek befejeztével megszűnő vízkivételt követően mennyi idő alatt fog kismulni a létrehozott depresszió (POHL 1973). Ezt 1990 után JOCHÁNÉ EDELÉNYI Emőke elemzése is visszaigazolták!



3. ábra. A bányászati célú vízemelés mértékének hatása a karsztvízszint alakulására 1957–1976 között nyirádi-izamajori adatok alapján HÓRISZT Gy. 1969 szerint. (Bal oldalt a függőleges tengelyen a vízszintadatok (m Af); Jobb oldalt a vízemelés (m³/perc); folytonos vonal: a vízemelés mértékének időbeli alakulása; eredményvonal: vízszintváltozás az izamajori megfigyelőkútban)

Figure 3. The effect of active water-protection as observed in the Nyirád Izamajor bauxite-mining area (numbers on the left: vertical axis of the diagram show the elevation of the water-table (m asl), on the right the pumping rate (m³/min), continuous line: change of water-production with time, dotted line: change of the elevation of the water-table)

A recesszió

A bauxitbányászat sikertörténetének végül az egyre inkább környezettudatos gazdálkodás szükségessége vetett véget: a '90-es évek elejétől gyakorlatilag megszűnt a karsztvízszint alatti bányászokodás. Kivételt Halimba–II. DNY és a fenyőfői előfordulás egy része élvezett, ahol a geológiai viszonyok biztosították, hogy a felszín alatti műveleteknek regionális hatása nem lesz. Minden egyéb kutatási és termelési aktivitást a külfejtésre alkalmas készletekre kellett összpontosítani. Így került sor a '90-es években Halimba–Nyirád térségében néhány, korábban mélyműveléssel termelt sekély teleprész (Táncsics, József, Ferenc) külszínről való újrantítására (*I. tábla B*): (a pillérben otthagytott anyag letermelésére); az Óbarok XI. és III. lencsék, valamint a Magas-Bakonyban az iharkúti területen a még külfejthető telepek (Németbánya II., III. lencsék) feltárására. Erre az időszakra már a hazai alumíniumipar egyértelmű recessziója nyomta rá a bélyegét. A kutatási tevékenység egyre inkább beszűkült, a minimumra korlátozódott. Az 1991-ben Geoprospect Kft.-vé alakult, majd 1995-ben teljesen megszűnt, önálló kutatóvállalat szerepét a Bakonyi Bauxitbánya Kft. vette át, ahol a korábbi BKV kiemelkedő szakemberei (BÖRÖCZKY Tamás, R. SZABÓ István, RAUSCH Péter, MÁTÉFI Tibor) a Bakonyi Bauxitbánya Kft. tapasztalt bányageológusaival (TISZAY János, PATAKI Attila, JANKOVICS Bálint, NOVÁK Sándor, FEKETE István, DIÓSZEGI Sándor) együtt 2003-ig a kft.-n belül önálló kutatási osztályként végezték mind a külszíni, mind a bányabeli kutatásokat. 2004-ben a külszíni kutatással foglalkozó néhány szakembert kiszervezték a bányától. Ettől kezdve a – PATAKI Attila vezetésével működő – GeoÁsz Kft.-re hárult a még szükséges hazai és – a minőségi követelmények miatt bekapcsolt – boszniai (Jajce környéki) telepek megkutatása is. A vértesi kutatások „hattyúdala” a '70-es évek végén elkészült ún. sekélykutatási program volt, amely részletező geomorfológiai céltérképezést követően erős felszíni geofizikai támogatottságú sekélyfúrású tevékenységet irányzott elő a Gánt falutól ÉNy-ra eső Pátrácos és a Vértess-plató területén. Ezt a programot azonban végül is az iparág már nem hajtotta végre.

1988-ban az 1926 óta összesen 13,5 millió tonna bauxitot adó gánti terület utolsó külfejtsége, a Bagoly-hegy is végleg bezárt. A kötelező rekultiváció keretében Bagoly-hegyen Bauxitföldtani Park létesült. A park tanösvényének terveit az egykori Bauxitkutató Vállalat geológusai, KNAUER József és KNAUERNÉ GELLAI Mária készítették el. A kiviteltető a Bakonyi Bauxitbánya volt. A bemutató terület voltaképp az 1976-ban létesített, de azóta az enyészete lett melegebb tanösvény utóda, és jól illeszkedik a hosszú időn keresztül az Országos Bányászati Múzeum által üzemeltetett Bagoly-hegyi Bányászati Múzeumhoz, amely méltó emléket állít nemcsak a gánti, hanem az egész hazai bauxitbányászatnak, valamint az azt annak idején előkészítő és sikeresen szolgáló bauxitkutatásnak. A múzeum és a Bauxitföldtani Park kezelését néhány éve átvette és azt a hagyományok dicséretes ápolásának jegyében megőrizni, valamint a lehetőségek adta keretek közt fejleszteni igyekszik Gánt község

önkormányzata. A 1926-ban kezdődött bauxitbányászat végére 2013-ban Halimba–II. DNY bezárásával került pont – ezzel lényegében megszűnt a hazai nyersanyagbázisra támaszkodó vertikálisan integrált alumíniumipar is. Hogy a megkutatott, de ki nem termelt bauxitkincset fogják-e még valaha valamire (pl. esetleg ritkaföldfémek kinyerésére) hasznosítani, az a jövő titka marad.

A bauxitkutatással kapcsolatos tudományos eredmények rövid összefoglalása

A tudományos és a nyersanyag-kutatási célú tevékenység egymásra utaltsága és – mindkét terület számára – gyümölcsöző kölcsönhatása jól tükröződik a bauxittal kapcsolatos hazai tudományos eredményekben és azok ipari hasznosulásában. A kutatófúrások mélyítése és a bányászati műveletek során keletkező adatok, valamint a nyersanyagtelepek felszíni és felszín alatti feltárásokban vizsgálható jellegei a tudomány számára kiváló lehetőséget kínáltak a szóban forgó nyersanyag genetikájának, korának, valamint számos – a feldolgozóipar szempontjából is lényeges – technológiai tulajdonságának megismerésére és pontosítására. Ugyanakkor a tudományos tanulmányozás eredményei fontosnak bizonyultak az ipari kutatás, valamint a megtalált telepek kitermelésére irányuló bányászati műveletek tervezéséhez/irányításához, továbbá elengedhetetlenül szükségesek voltak a kutatások szempontjából távlatilag reménybelinek minősülő területek körvonalazásához (nyersanyag-prognózis). Ezt felismerve a magyar bauxitkutatás a kezdetektől gondot fordított a hazai tudományos műhelyekkel (egyetemekkel, kutatóintézetekkel) való együttműködésre, és jelentős anyagi forrásokat is mozgósított a nyersanyagkutatásban várhatóan hasznosuló alapkutatások finanszírozására. Mi több, számos alapkutatási témát a Bauxitkutató Vállalat (BKV) alkalmazott kutatásra szakosodott saját laboratóriumában, illetve terepi kutatócsoportjainál dolgozó szakemberek (pl. KOMLÓSSY György, VÖRÖS István, DUDICH Endre, T. GECSE Éva, KNAUERNÉ GELLAI Mária, TÓTH Kálmán, TÓTH Álmos, SZABÓ Elemér, SZANTNER Ferenc és mások is) megoldottak, s eredményeiket a szakterület hazai és külföldi kiadványaiban közkinccsá tették. Nevezetesen – a Földtani Közlöny hasábjain megjelent – közlemények voltak: VADÁSZ 1943, 1966; VÖRÖS 1958; SZANTNER & SZABÓ 1962; KOMLÓSSY 1967; DUDICH & KOMLÓSSY 1969, de kiemelendő BALKAY Bálintnak a Bányászati Lapokban közölt áttekintő értekezése is (BALKAY 1966).

Az elsőként megismert gánti bauxit tudományos tanulmányozásának eredményei

A gánti bauxittelep (*4. ábra*) faunagazdag fedőrétegsora („fornai rétegek”) már a 19. század fordulóján felkeltette a kutatók érdeklődését. Nem kisebb tekintélyű szakemberek foglalkoztak vele, mint a paleontológus HANTKEN Miksa (1861), PAPP Károly (1897), a térképező geológus TAEGER Henrik (1909) és a geológus professzor TELEGDY ROTH Ká-

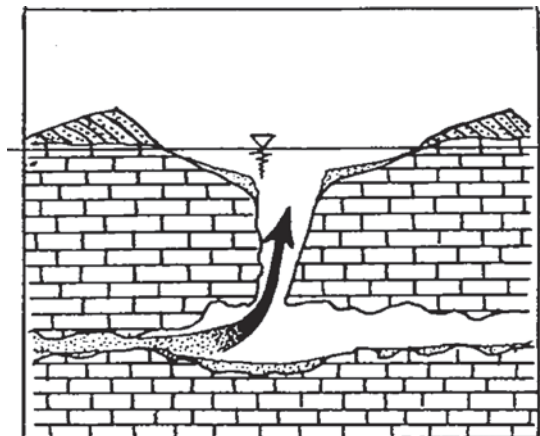


4. ábra. A Gánt bagoly-hegyi felhagyott külfejtés távlati képe (jobb oldalt a bauxitfedő késő-középső-eocén transzgressziós rétegsora látszik)

Figure 4. Panoramic view of the abandoned open-pit of Gánt Bagoly-hegy (yellowish scarp on top right is the late Mid-Eocene cover)

roly (1923). A bauxittlepről az első részletes tudományos leírást TELEGDY ROTH közölte 1927-ben. A Bányászati és Kohászati Lapokban közzétett cikkében írja: „Alig néhány éve jutottunk azon nagy nemzeti kincs megismerésére, melylyel Csonkamagyarország a dunántúli bauxittlepekben rendelkezik és immár kivitelünk jelentős tétele a gánti bauxit...” TELEGDY ROTH közleményét követték VADÁSZ (1927), POBOZSNY (1928), DITTLER (1930), VITÁLIS (1931), GEDEON (1932) munkái, majd a II. világháború után – egyebek mellett – VADÁSZ (1946), J.G. DE WEISSE (1948), KISS (1955), KOPEK et al. (1965), KISS & VÖRÖS (1965), BÁRDOSSY (1961), SZANTNER & SZABÓ (1969), VÖRÖS (1969) dolgozatai. A gánti bauxit keletkezésével kapcsolatban számos egymásnak ellentmondó elmélet látott napvilágot, míg végül a '80-as évek második felére, nem utolsósorban (akkor) fiatal kutatók (VATAI 1988, MINDSZENTY et al. 1989, GERMÁN-HEINS 1994) vizsgálatai nyomán kialakult a ma általánosan elfogadott vélemény. Eszerint a gánti bauxit telepméreteiben áthalmozott képződmény, mely végleges leülepedési helyére az eocén transzgressziót bevezető szerkezeti mozgások és a paleocén–eocén termális maximumot követő klímaromlás együttes hatásának köszönhető nagyarányú talajerózió eredményeként került. Szállítási mechanizmusként a mállásnak kitett szárazulati térszínen végbement, iszapos törmelékfolyást jelölték meg (MINDSZENTY et al. 1989 és SZARKA A. egykori doktorandusz kéziratai)

Bár a gánti Bagoly-hegy (5. ábra) a hazai eocén litostratigráfiai beosztás szerinti Gánti Bauxit Formáció típuslelőhelyeként van számon tartva, üledékföldtani sajátosságait tekintve alapvetően különbözik a legtöbb, ugyancsak a Gánti Bauxit Formációba sorolt hazai eocén bauxittleptől. Felépítését alapvetően kétféle litológiájú (pelitomorf és bauxitkavicsos) kifejlődés meglehetősen kaotikus váltakozása uralja: a világosvörös, pelitomorf bauxitba sárgás-sárgászöld, szabálytalan, hullámos rétegfelszínű, laterálisan gyakran szétseprűződő, szubhorizontális konglomerátum közbetelepülések ágyazódnak. A konglomerátum nagy része osztályozatlan, a szemnagyság gyerekfej nagyságú



5. ábra. A karsztjáratokon keresztül alulról érkező „blue-hole”-típusú transzgresszió sematikus képe.

Figure 5. Cartoon showing the concept of transgression „from below” (the rise of the water-table is realized through the karstic channelways of the bedrock)

hömpölyöktől 0,5 cm-ig változik. A kavicsok/gömböscsémák (nem pizoidok!) belseje általában barna, barnászöld, és talajosodott szövetet mutat, felületüket porszerű, sárga, goethites bevonat borítja, ezért tűnik messziről minden kavicsos réteg sárgának. A bauxit mátrixának általánosan fakövörös, sárga, fehér, szürke színárnyalatai, a vasmobilizációs képletek feltűnő gyakorisága hívta fel a figyelmet arra, hogy a gánti telep esetében a telepméreteiben sötétvörös színű bauxitokkal szemben kevésbé oxidatív felhalmozódási (és korai diagenetikus) körülményeket kell feltételezni. Ennek nyomán alakult ki a bauxitok geokémiai fáciesének vadózus és szemivadózus/freatikus csoportokba sorolása, és fogalmazódott meg, hogy a bauxittlepek ásványtani/litológiai sajátosságai és a befogadó karsztmorfológia együttesen fontos öskörnyezetjelző szereppel bír (KOMLÓSSY 1967, MINDSZENTY 1989, D'ARGENIO & MINDSZENTY 1995). A bauxit és a dolomitfekü határán megjelenő, a többi hazai bauxittlepnel megszokotthoz képest vastagabb és azoktól eltérő textúrájú – jelen állapotában vasoxidos – kéreg részletes vizsgálata kiderítette, hogy az korai diagenetikus eredetű, kezdetben pirites volt, a sajátalakú piritkristályok utóbb, a késői diagenézis/epigenézis során alakultak át hematit-pseudomorfózákká (GERMÁN-HEINS 1994).

A bauxit ásványtani összetétele – a többi hazai eocén bauxithoz hasonlóan – boehmites-gibbsites, goethites, hematitos, nyomokban diaszporral és klorittal (chamosit) (KISS 1955; BÁRDOSSY 1961, 1977; MINDSZENTY et al. 1989) Fő agyagásványa a kaolinit. A mikromineralógiai frakcióban (0,06–0,2 mm) az ultrastabilok (rutil, turmalin, metamikt cirkon) mellett, szép, sajátalakú, vulkanogén cirkonszemcséket, valamint változatos magmás-metamorf ásványokat (disztén, szillimanit is!) és közettörmelék-darabkákat tartalmaz (VÖRÖS 1969, MINDSZENTY et al. 1991). A cirkonszemcsékből DUNKL (1992) fission track módszerrel eocén kort határozott, bizonyítva ezzel a bauxitfelhalmozódással egyidejű vulkáni tevékenységre utaló piroklaszt eredetű anyaghozzájárulást. Ezt pontosították a legújabb vizsgálatok, amelyek szerint a cirkonszemcsék kora 45–40,5 M

év (lutetiai), és minden bizonnyal – közvetlenül vagy áthalmozva – a periadriai vulkanizmushoz köthető tufaszórás emlékét őrzik (KELEMEN et al. 2020 in press).

A telep eltemetődéstörténetének és a bauxittest fedő alatti elváltozásának alapos vizsgálata nyomán egy korábban már (pl. MUNTYÁN I. által is) észlelt, de részleteiben nem magyarázott különleges transzgressziós jelenségre, az *ingresszióra* (VADÁSZ 1930, 1946; GEDEON 1932; KISS & VÖRÖS 1965) és annak értelmezésére derült fény. Ingresszióról akkor beszélünk, amikor az erózióbázis közelében lévő, egyenetlen topográfiájú, sekélykarszt térszínen a transzgressziót bevezető fokozatos tengerszint-emelkedés egyre feljebb kényszerítve a karsztos járatokat kitöltő édesvizet, a korábbi dolinák/ovalák/poljék területén édesvízi tavacsák, mocsarak képződését eredményezi. E tavacsákban Characea-termésekben és édesvízi csigákban (*Brodiaea distincta*) gazdag, helyenként kőszenes agyag betelepülésekkel váltakozó, meszes üledék (édesvízi mészkő/márga) halmozódik fel (6. ábra), amelyet az alulról érkező transzgresszió előrehaladtával először brakk, majd schizohalin, végül – amint az előrenyomuló tenger már a karsztos domborzat által képviselt akadályokat legyőzve felülről is eléri a területet – normál tengeri üledékek váltanak fel. A rétegsor jellegzetességeit VADÁSZtól SZÓTS Endrén keresztül BIGNOT et al.-ig, a gánti eocénnel foglalkozó paleontológusok a legnagyobb részletességgel dokumentálták (VADÁSZ 1946, SZÓTS 1953, BIGNOT et al. 1985). Arra azonban csak a '90-es-es évek elején irányult rá a figyelem (CARRANANTE et al. 2004), hogy ez a transzgressziós rétegsor leginkább a Bahama-szigetokről ismert „blue-hole” típusú transzgressziós rétegsorokhoz hasonlít, s azt jelzi, hogy a jól fejlett karsztjáratokon keresztül a transzgresszió Gánton is alulról érkezett (5. ábra). Az így megemelkedett karsztvízszint végül a bauxittal kitöltött töbrök elmocsarasodását, kőszenes agyag képződését eredményezte (PÁLFALVI 2007, MINDSZENTY 2010). A Characeae-specialista Khaled TRABELSI és munkatársai legutóbbi vizsgálatai megerősít-



6. ábra. A Fódolomit Formáció felszínének a Németszánya-XI. lencse kréta időszaki bauxitjának letermelését követően feltáródott karsztos formakincse

Figure 6. Paleokarst morphology developed on the surface of the Triassic bedrock exposed by mining activity in the open-pit of Németszánya-XI. (Late Cretaceous bauxite, Itharkút)

teni látszanak, valamint árnyalják és rétegtanilag pontosítják az eddigi elképzeléseket (TRABELSI et al. 2020 in press). Jól beleillik a képbe a telep alján kifejlődött, eredetileg pirités vaskéreg is. A piritképződéshez szükséges kén-tartalom így módon jelentős részben az üledék pórusait kitöltő, a transzgresszió előrehaladtával már részben tengeri (SO_4 -ionokat is tartalmazó, brakk) pórusvízből származtatható. Az áthalmozott bauxit alá beszorult növényi anyagot lebontó anaerob mikrobák indíthatják be a szulfátredukciót, s így a piritképződést (GERMÁN-HEINS 1994).

A gánti telepet átszelő, részben szinszediment, részben utólagos törések (I. tábla C) tanulmányozása (ALMÁSI 1993, FODOR 2007) ugyancsak érdekes új eredményeket hozott. A bagoly-hegyi külfejtésben feltáródott egy klasszikus, ún. váltórampa („relay ramp”) amely a kulisszaszerűen elrendeződő, uralkodóan jobbos oldaleltolódások közötti kapcsolatot teremt meg. E törések elemzése derítette ki, hogy a mozgások már a fedő rétegsor lerakódását megelőzően elkezdődtek. Feltehetően az ezekkel együtt járó szeizmikus tevékenység indíthatta el a bauxit nagyarányú áthalmozódását is. Ugyanezen törések mentén azután később több ütemben újabb mozgások mentek végbe – a legfiatalabbak már az eocén rétegsor közötté válását követően, az oligocén/miocén folyamán (MINDSZENTY & FODOR 2002).

A gánti bauxittelep tehát PAPP (1897) munkájától napjainkig hazai és külföldi geológusok generációi számára vetett fel tudományos kérdéseket. A paleontológiától az ásványtanon, kőzettanon, geokémián, szedimentológián és paleotalajtanon keresztül egészen a szerkezetföldtanig a geológia csaknem minden tudományterületén jelentős eredményeket hozott, és a vele foglalkozó kutatókat hozzásegítette a bauxitgenetika kérdéseinek jobb megértéséhez.

A telepről kialakított képet mutatja be – igényes rajzos és fényképes magyarázó táblákon – a KNAUER József és KNAUER GELLAI Mária által a '90-es évek elején megtervezett és fentebb már említett bagoly-hegyi „Bauxitföldtani Park”. A létesítés során a generálkivitelező Bakonyi Bauxitbánya Kft.-t hathatósan támogatta az Országos Természetvédelmi Hivatal, a Vértesi Tájvédelmi Körzet, valamint Gánt önkormányzata is. A Bauxitföldtani Park elődje a Meleges- és Angerréti-külfejtések bezárását követően a bányavállalat által a bauxitbányászat 50. évfordulójára létesített magyarázó tábla-sorozat volt, amely azonban a '90-es évekre elpusztult. A Park még jelenlegi, meglehetősen leromlott állapotában is jól kiegészíti a Bagolyhegyi-külfejtés északi csücskében található (eredetileg a soproni Országos Bányászati Múzeumhoz tartozott) Bányamúzeumot. A két látnivaló közkedvelt úti célja a földrajz témájú iskolai kirándulásoknak, és számos egyéni turista számára is maradandó élményt nyújtanak. Újabban Gánt község önkormányzata (SPERGELNÉ RÁDL Ibolya polgármester, MÉCS Csaba és társaik, valamint a község díszpolgára, dr. PATAKI Attila), „fogadta örökbe” a bemutató-helyet, és tervezik a tanösvény felújítását. Első lépésként a területet bekerítették, megkezdődött a túlburjánzó vegetáció gyérítése, felépült egy minden igényt kielégítő, tájba illő fogadóépület, és tervezték a magyarázó táblák felújítását is.

A többi hazai lelőhely tudományos tanulmányozásának eredményei

A Déli- és az Északi-Bakonyban Halimba–Nyirád, Iharkút (6. ábra), Fenyőfő, Iszkaszentgyörgy–Kincsesbánya, valamint a Gerecse hegység délkeleti előterében Óbarok–Újbarok (I. tábla D, E), Nagyegyháza–Csordakút–Mány térségében az 1940–42-ben felfedezett, majd 1971-től intenzíven kutatott bauxitlepek tanulmányozása ugyancsak jelentős előrelépést jelentett e területek mezozoos/tercier fejlődéstörténetének megismerésében, és hozzájárult a bauxitlepek feltárására irányuló ipari kutatási tevékenység optimalizálásához.

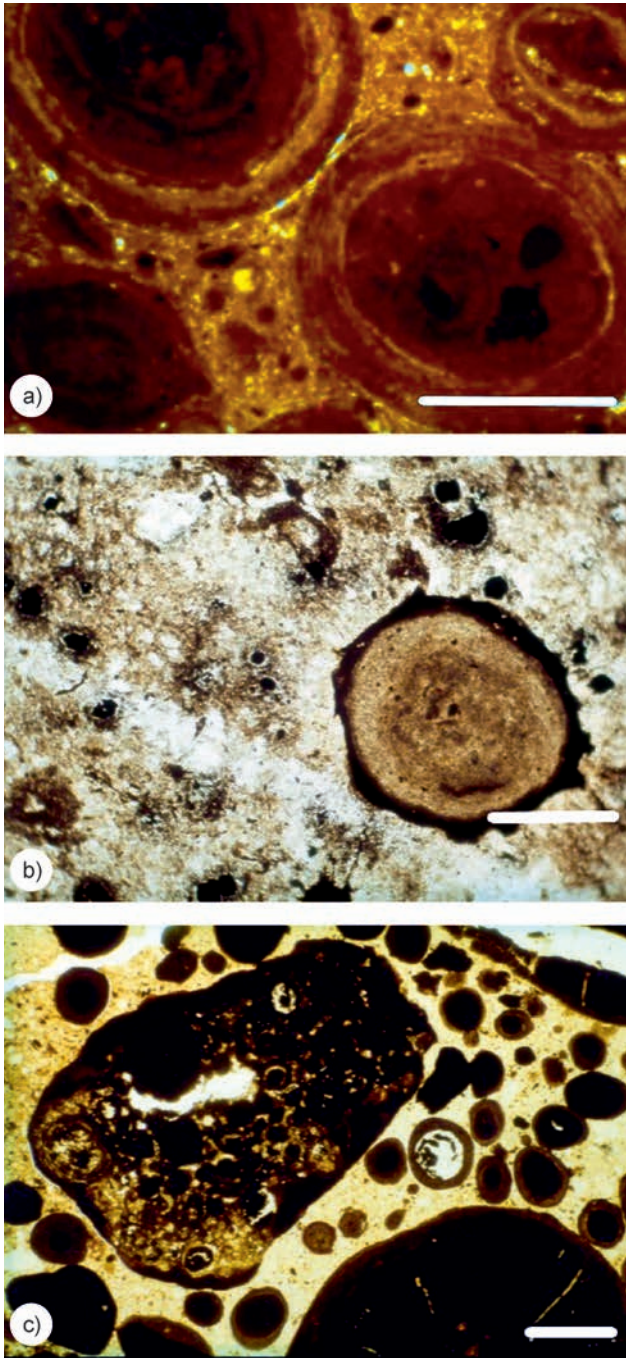
VADÁSZ (1927, 1946), J. G. de WEISSE (1948), majd VADÁSZ (1951) általános bauxitföldtani ihletésű munkáit a bauxitfeküvel és -fedővel foglalkozó, elsősorban paleontológiai/biosztratigráfiai megközelítésű tanulmányok, valamint néhány korai szedimentológiai mű követték (SZÓTS 1956, KOPEK et al. 1965, KÁROLY et al. 1970, ORAVECZ & VÉGHNE NEUBRANDT 1961, KOPEK 1980). Az ismeretek szaporodásával a tektonikának a bauxitlepek képződésében és utó-történetében betöltött szerepét elemző munkák is napvilágot láttak (ERDÉLYI 1965; SZANTNER & SZABÓ 1962, 1969; DUDICH & KOMLÓSSY 1969). Magának a bauxitnak, mint üledékes kőzetnek, részletes tudományos tanulmányozása BÁRDOSSY György vizsgálataival indult, melyeket *A magyar bauxit geokémiai vizsgálata* c. monográfiájában foglalt össze (BÁRDOSSY 1961). Ezzel részben egyidejűleg, részben ezt követően jelentek meg KISS (1955), VÖRÖS (1958, 1969), GECSE & MINDSZENTY (1968) mikromineralógiai vizsgálatainak eredményei, majd KOMLÓSSY György az iszkaszentgyörgyi bauxittal foglalkozó, számos új ásványgenetikai eredményt felmutató dolgozatai. KOMLÓSSY kimutatta, hogy a hazai közfelfogással ellentétben a fekü karbonátos kőzetek a bauxitlepek képződésére alkalmas *anyakőzetként* (is) szolgálhattak (KOMLÓSSY 1967, 1970).

Az 1964-ben Zágrábban, magyar és horvát kezdeményezésre megalakult ICSOBA – a bauxit-tímföld-alumínium tárgyú alap- és alkalmazott kutatásokat összefogó nemzetközi szervezet (International Committee of Studies on Bauxite, Alumina and Aluminium) – jelentős lendületet adott a magyarországi bauxitok tudományos tanulmányozásának is. Sorra jelentek meg a legújabb rétegtani, ásványtani/geokémiai eredményeket s az azokra épülő szintéziseket bemutató cikkek (DUDICH & KÁROLY 1964, KOMLÓSSY 1970, VÖRÖS 1969, VÖRÖS & GECSE 1976, SZANTNER et al. 1981). DUDICH & KOMLÓSSY (1969) a részeredményekből kiindulva már ekkor paleogeográfiai és szerkezeti szempontok alapján kísérelték meg a bauxitosodás és telepkepződés korának pontosítását. Ebben az időszakban sokasodtak meg a közvetlenül a bányászathoz (annak előkészítéséhez) kapcsolódó, hidrogeológiai tárgyú elemzések (pl. HÓRISZT 1969 és a fentebb már hivatkozott többi vízszinttűllyesztéssel foglalkozó tanulmány). Kiemelendő BALKAY Bálintnak az ICSOBA Travaux 1973. évi kötetében közzétett írása („Bauxitization and underground drainage” (BALKAY 1973), amelyben számos későbbi tudományos cikkben ismétlődően felbukkanó összefüggésre mutatott rá a bauxitosodás és a

hidrogeológia között. Hazai és külföldi karsztbauxitos és lateritbauxitos példákkal illusztrálta, hogy a vízvezetés mechanizmusának kulcsfontosságú szerepe van a mállási szelvényben, illetve a karsztos üledécsapkákban felhalmozódó anyag bauxittá vagy csak tűzálló (kaolinites) agyaggá alakulásában. A tudományos munkát illetően a Bauxitkutató Vállalat geológusai mindvégig élvezték a szakvezetés (a főgeológus SZANTNER Ferenc és az Anyagvizsgáló Laboratórium vezetői, az alapító DUDICH Endre, majd HORVÁTH István és SZEKÉR Zoltán) hathatós támogatását. Eredményeiket a Magyarhoni Földtani Társulat Közép- és Északdunántúli Területi Szervezetének, valamint az MTA Veszprémi Akadémiai Bizottságának szakülésein mutatták be, és a Földtani Közlönyben vagy a MÁFI Évi Jelentése kötetekben, valamint az ICSOBA Travaux folyóiratában tették közzé, ezzel is biztosítva az ipari bauxitkutatás révén keletkező új földtani ismeretek bekapcsolását a hazai és nemzetközi tudományos élet vérkeringésébe.

A közös kutatások eredményeként vált ismertté a bauxit közvetlen fekü- és fedőképződményeinek számos őslénytani, biosztratigráfiai és paleoökológiai sajátossága (ORAVECZ & VÉGHNE NEUBRANDT 1961, KÁROLY et al. 1970, KOPEK & KECSKEMÉTI 1965, VÉGHNE NEUBRANDT et al. 1978, CZABALAY 1983, KOMLÓSSY 1970, KNAUER & KNAUERNE GELLAI 1978, HAAS 1979, TÓTH 1981), amelyek később a közvetlen fedő fáciesének elemzése révén hasznos gyakorlati útmutatóul szolgáltak a részletes fázisú kutatófúrások optimális telepítéséhez. Kiemelendő a felszíni- és fúróluk-geofizikai mérések alkalmazásának a kutatás sikerességét kedvező irányban befolyásoló alkalmazása (SZABADVÁRY et al. 1978), valamint a sekélykutatási területeken (kiemelten Iharkút) bevetett felszíni geomorfológiai térképezés KNAUER József nevéhez fűződő rutinszerű bevezetése. Ez utóbbi a bauxit és a befogadó kőzet vízvezető-képességének különbözőségén, valamint azon alapul, hogy a bauxit kompakciója folytán a bauxittal kitöltött töbrök felszíne mindig konkáv alakzatot mutat. Ha az eredeti fedőrétegek lepusztulása következtében a bauxitot másodlagosan csak mintegy 10 m-nél nem vastagabb laza üledék (löss vagy homok) fedi, akkor ezen a laza fedőn átsejlik a bauxit felett kialakult morfológiai mélyedés, ráadásul a tálalakú mélyedésben (az alatta lévő bauxit rossz vízvezető-képessége miatt) nedvességkedvelő növényzet telepedik meg (lásd még SZANTNER & MINDSZENTY 1979). E jelek felismerése segítséget jelent a felszín közeli bauxitlepek felkutatását célzó geofizikai, majd az azt követő fúrási műveletek tervezésekor.

A Bauxitkutató Vállalatnál T. GECSE Éva által kidolgozott vékonycsiszolatos bauxit-petrográfiai–szedimentológiai vizsgálati módszereknek a MÁFI (JUHÁSZ Erika), az MTA GKL (POLGÁRI Márta) és az ELTE kutatóival való rendszeres, közös alkalmazása vezetett el az első áttekintő mikromineralógiai és bauxitszedimentológiai szintézisek megalkotásához, melyek eredményeként ismeretessé váltak a Dunántúli-középhegység különböző rétegtani szintekben megjelenő bauxitjait jellemző litológiai és mikromineralógiai bélyegek (T. GECSE 1974, 1982; JUHÁSZ et al. 1986; MINDSZENTY & GAL SÓLYMOS 1988; MINDSZENTY et al.



7. ábra. Fontosabb bauxitszöveti típusok mikroszkópi képe (1N, aránymérték mindhárom képnél: ~250 μ m)

A) Pelitomorf-mikrotörmelék alanyagba ágyazódó akkréciós ooidok, autochtonooidos szövetű, vadózus fációs bauxitban (Iharkút)

B) A lefedődést eredményező transzgresszió miatt reduktívá változott közegben kifakult, immár freatikus fációs, kaolinites, pirites bauxit mikroszkópi képe (1N) (Nagyvárkonypuszta)

C) Fakó, pelitomorf alanyagba ágyazódó osztályozatlan gömbszemcsék és bauxitkavicsok allochton bauxitkonglomerátumban (Gánt)

Figure 7. Major lithological types of bauxites of the Transdanubian Range (plain light, scale bars all ~250 μ m)

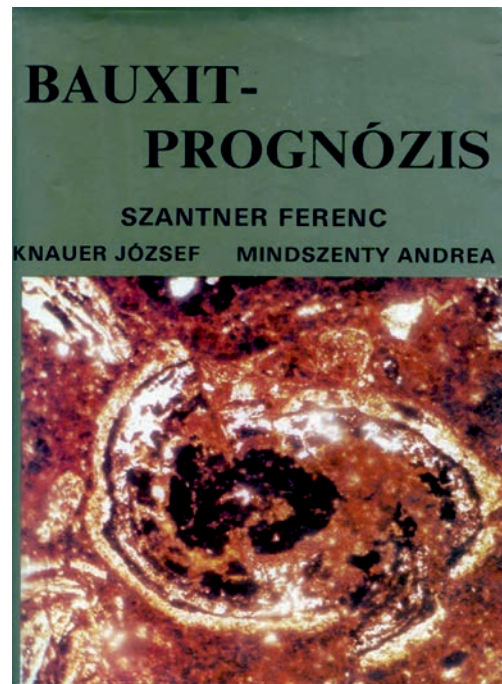
A) Accretional ooids embedded in pelitomorph-microclastic matrix of a typical „vadose” bauxite (Iharkút)

B) Pale-coloured kaolinitic-pyritic bauxite formed under reducing conditions brought about by saturation of the pore-spaces on incipient transgression followed by shallow burial (Nagyvárkonypuszta)

C) Ill-sorted round grains and bauxite pebbles embedded in pale-coloured pelitomorph matrix on an allochthonous bauxite-conglomerate (Gánt)

1991). Évek múltán ezek a szedimentológiai megfigyelések képezték az alapot a karsztbauxitok litofacieselméletének kidolgozásához, a vadózus és freatikus bauxitfációs felismeréséhez (D'ARGENIO & MINDSZENTY 1995, MINDSZENTY 1999) (7. ábra)

A nagygyháza–csordakút–mányi terület nagy mélységben, karsztvízszint és szenes fedő alatt, bonyolult tektonikájú környezetben települő bauxitjának szennyeződései (siderit, pirit, Al-szulfátok) és a kitermelés várható nehézségei a tektonikai-szedimentológiai elemzések mellett a szokásosnál részletesebb, elmélyült ásványtani-geokémiai vizsgálatokat igényeltek. Az e témakörben megjelent tudományos munkák (pl. T. GECSE 1974, TÓTH & GECSE 1981, TÓTH et al. 1983) nagyban hozzájárultak e különleges karsztbauxittelepek genetikájának megértéséhez. A kutatás során kiemelkedő szerep jutott VÉGH Sándornénak, az ELTE Alkalmazott Földtani Tanszéke vezetőjének és közvetlen munkatársainak (ORAVECZ János, FÁY Miklósné, HIDASI János). VÉGH professzor asszony elméleti és gyakorlati ismereteire támaszkodva, a többnyire breccsás triász karbonátos fekképződmény in situ vagy áthalmazott mivoltának eldöntésében és az áthalmazott dolomit valódi természetének (fanglomerátum) felismerésében, területi elterjedésének prognosztizálásában tudtak segítséget nyújtani a Bauxitkutató Vállalat geológusainak. A terület kiemelt fontosságú része lévén az Eocén-programnak, VÉGH Sándorné 1983-ban az akkor legnagyobb számú kitüntetésben: Állami Díjban részesült. A tudományos és ipari megközelítésben fogant ismeretanyag nagy részét a Bauxitkutató Vállalat kutatói közössége a Veszprémi Akadémiai Bizottság kiadásában megjelent *Bauxitprognózis* c. könyvben (8. ábra) foglalta össze (SZANTNER et al. 1986).



8. ábra. A *Bauxitprognózis* c. könyv címlapja

Figure 8. Front page of the book on *Bauxite-Prognosis*

A MÁFI és a Bauxitkutató Vállalat szoros együttműködésének fontos eredménye volt a bauxitföldtani térképsorozat megjelenése (CSÁSZÁR et al. 1978, HAAS & JOCHÁNE EDELENYI 1978, HAAS et al. 1985), amely összefoglalását adta az ipari bauxitkutatás adatain, valamint az iparági és az intézeti geológusok egyeztetett véleményén alapuló földtani értelmezésnek, s évtizedekig jól hasznosult a geológusképzésben is.

Nemzetközi hírnevet a magyar bauxitkutatásnak és tudományos bauxitföldtannak elsősorban BÁRDOSSY György *Karsztbauxitok* című (BÁRDOSSY 1977) könyve szerzett (9. ábra), melyet a világ számos nyelvére lefordítottak (1981-ben oroszul, 1982-ben angolul, 1994-ben kínaiul is napvilágot látott).

A '90-es évek második felében a karsztvízszint alatti bányászkodás már említett megszűntével ismét felértékelődtek a külfejtetű készletek, s így a geológia érdeklődése is megint a sekélykutatási területek (Iharkút, Némethánya) felé irányult. Ezt az érdeklődést azonban a korábbiakban megszo- kott, konkrét, szervezett ipari kutatási tevékenység már nem követte. A korábbiakban megkutatott németbányai lencsék (II–III.) a '90-es évek végén még letermelték. Ennek során vált ismertté, az elhivatott paleontológus ŐSI Attila munkássága révén, hogy az iharkúti bauxit közvetlen fedője rendkívüli fontosságú, gazdag kréta időszaki gerinces leleteket (köztük dinoszaurusz-maradványokat) rejt (10. ábra). A tudomány szempontjából fontos és különösen pozitív fejlemény volt, hogy a leletanyag feltárásában hathatósan és segítőkészen közreműködő bányavállalat a rekultivációt a paleontológia igényeit szem előtt tartva hajtotta végre. A lelőhely így máig hozzáférhető, és évente rendszeres fossziliagyűjtő tevékenységet tesz lehetővé. A begyűjtött leletanyag tudomá-



10. ábra. A dinoszauruszleleteket is tartalmazó Csehbányai Formáció paleotalaj-szintekkel tagolt ártéri kifejlődése a Némethánya II-III. lencsét feltáró külfejtés oldalfalában

Figure 10. Fine-grained overbank sediments of the Dinosaur-bearing Late Cretaceous Csehbánya Formation covering the bauxite in the open-pit of Némethánya II-III. The dark-red bed is one of the numerous intercalated palaeosoils

nyos feldolgozásának eredményeit számos hazai és nemzetközi folyóirat és könyv őrzi (pl. ŐSI 2005; ŐSI & MAKÁDI 2009; ŐSI 2012; BOTFALVAI et al. 2015, 2016; ŐSI et al. 2019).

Az ezredforduló után az ipari igények csökkenése felgyorsult, és miután 2013-ban a bauxitbányászat gyakorlatilag megszűnt, a további nyersanyagkutatás teljes mértékben ellehetetlenült. Érdekes módon azonban eközben a bauxitföldtan iránti tudományos érdeklődés megélénkült. Már 1989–1994 között – amikor pedig a re-



9. ábra. BÁRDOSSY Gy. és BÁRDOSSY & ALEVA nagy sikerű kézikönyveinek címlapjai

Figure 9. Front pages of the two most popular textbooks on bauxites

cesszió első jelei már mutatkoztak – az UNESCO és az IUGS támogatásával, nem kis mértékben az akkor az UNESCO titkárságán vezető beosztásban tevékenykedő ifj. DUDICH Endre ösztönzésére, a tethysi régió karsztbauxitjainak átfogó tanulmányozásával foglalkozó nemzetközi korrelációs projekt (IGCP–287) indult, melyben a magyar bauxitgeológia kezdeményező és mindvégig vezető szerepet játszott. Előzménye volt ennek a vezető szerepnek az a '80-as években kezdődött (STEGENA Lajos és HORVÁTH Ferenc professzorok által kezdeményezett) olasz–magyar egyetemközi együttműködési program, amely – többek között – lehetővé tette a dunántúli-középhegységi bauxitoknak a Keleti-Alpok és Appenninek bauxitjaival való tételes összehasonlítását és az első kísérleteket a nagytektonikai értelmezésre (MINDSZENTY et al. 1986, MINDSZENTY & D'ARGENIO 1987). Az IGCP-projekt résztvevői végül eredményeiket az *Acta Geologica c. folyóirat* 1991. évi 34. kötetének 3. és 4. számában tették közzé (HAAS, BÁRDOSSY & MINDSZENTY 1991). Ezt követően felélénkült a hazai bauxitok szisztematikus szedimentológiai vizsgálata és a vizsgálati eredményeknek a TARI Gábor által felvázolt (TARI 1994) geodinamikai keretbe illesztésének kísérlete is (MINDSZENTY 1999, MINDSZENTY et al. 2000). Az így kialakult képet a későbbiekben TARI módosította és jelentősen továbbfejlesztette (TARI & LINZER 2018).

A hazai alumíniumipar kezdődő hanyatlásával egy időben, annak eredményeire is támaszkodva született, kiemelkedő tudományos eredményként kell említenünk BÁRDOSSY Györgynek a MÁFI alkalmi kiadványaként, jelentős részben az MTA X. (Földtudományok) Osztályának anyagi támogatásával megjelent kismonográfia-sorozatát, mellyel maradandó emléket állított a hazai bauxittelepek tudományos tanulmányozásának. E kismonográfiák (Halimba, Halimba–Malomvölgy, Nyirád-K., Szóc, Iharkút) továbbfejlesztve, tudományosan értelmezve őrzik mindazokat a geológiai adatokat, amelyek hosszú évtizedek alatt az iparági kutatás keretei közt gyűltek össze (BÁRDOSSY 2007, 2009, 2010, 2011 és BÁRDOSSY & MINDSZENTY 2013).

A legutóbbi, ipari adatokon alapuló, érdemi tudományos feldolgozás TÓTH Kálmán és VARGA Gusztáv tollából egy olyan bauxittelepről (a diszeli bauxitról) született, amely már bányászat tárgyát nem képezte, hiszen a 2013-as bányabezárás után került nyilvánosságra (TÓTH & VARGA 2014). Tudományos értékét jelzi, hogy a benne foglalt információra kiemelten támaszkodik egy olyan munka, amely a bauxitra már nem mint nyersanyagra, hanem mint klíma-, illetve környezetjelző képződményre koncentrálna (KELEMEN et

al. 2017). Ennek szerzői a Déli-Bakony bauxitkavicsokat is tartalmazó vörös agyagjának (Vöröstői Formáció) ásványos összetételét és származását tárgyalják. Egyre jelentősebb eredményeket hoz a bauxitok mikromineralógiai frakciójában jelen lévő detritális ásványszemcsék egyedi kormeghatározásán alapuló geokronológiai megközelítés, mely a bauxit kiinduló anyagát szolgáltató lepusztulási területekről és a bauxitfelhalmozódás tényleges koráról képes adatokkal szolgálni (DUNKL 1990, 1992; KELEMEN et al. 2017, 2020). Ezek a vizsgálatok minőségi előrelépést jelentenek a korábban a mikromineralógiai frakció ásványszemcséinek pusztán azonosításán alapuló feltételezésekhez képest. Az egykori Bauxitkutató Vállalatnál felgyülemlett adattári anyagok „leletmentő” feldolgozásával az utóbbi években KNAUER József kezdett foglalkozni. 2018-ban az albai ciklus bázisán bauxitkutatás közben megismert és a Tési Formáció „Kepekői Tagozatába” sorolt, kovás-agyagos szárazföldi képződmény üledéktani sajátosságait foglalta össze, s arra a következtetésre jutott, hogy a képződmény az Alsóperai Bauxit heteropikus fáciése (GELLAI et al. 2018).

A klimatikus körülmények alakulása és a bauxittelepek globális gyakoriságának a földtörténet folyamán megfigyelhető „csúcsidőszakai” közötti összefüggést elemezve, BÁRDOSSY Gy. nyomdokain haladva, MINDSZENTY (2016) a bauxitos (ferrallitos) mállásnak az üvegház-periódusok idején megnyilvánuló szerepét mint visszacsatolási mechanizmust vázolja fel. Ezzel a bauxitos üledékeknek nyersanyag mivoltukon túlmutató, általános földtani jelentőségét hangsúlyozza.

Jelenleg (2020) Magyarországon egyetlen helyen, Bakonyoszlopon, a kő-hegyi bányáüzemben folyik kis volumenű (évi mintegy 40–50 kt) bauxittermelés. A bánya az EOSZÉN Kft. tulajdona. A termelést FEKETE István és DIÓSZEGI Sándor, az egykori BBV bányageológus-mérnökei irányítják. A bányát eredetileg a bauxit fedőjében települő eocén kőszénre nyitották, de a lakossági szénigény csökkenése következtében a széntermelésről átálltak a még meglévő bauxitkészletek kitermelésére. A termelvényt kohászati adalékanyagként értékesítik.

Köszönetnyilvánítás:

A szöveg alapos és hozzáértő átnézését/javítását Dr. HAAS János és Dr. FÖLDESSY János professzoroknak, a kézirat áldozatkész gondozását és az irántam tanúsított végtelen türelmet Dr. SZTANÓ Orsolya főszerkesztő asszonynak köszönöm.

Irodalom — References

- ALFÖLDI L. 2007: A Dunántúli-középhegység felszínalatti vízrendszere. 2.2. alfejezet. — In: ALFÖLDI L. & KAPOLYI L. (szerk.): *Bányászati karsztvízszint-süllyesztés a Dunántúli-középhegységben*. MTA Földrajztudományi Intézet kiadványa Budapest, 138 p.
- ALFÖLDI L. & KAPOLYI L. (szerk.) 2007: *Bányászati karsztvízszint-süllyesztés a Dunántúli-középhegységben*. — MTA Földrajztudományi Intézet kiadványa Budapest, 138 p.
- ALLIQUANDER E. 1966: A magyar bauxitbányák művelésének és vízvédelmének fejlődése. — *Bányászati Lapok* 99/9, 604–606.

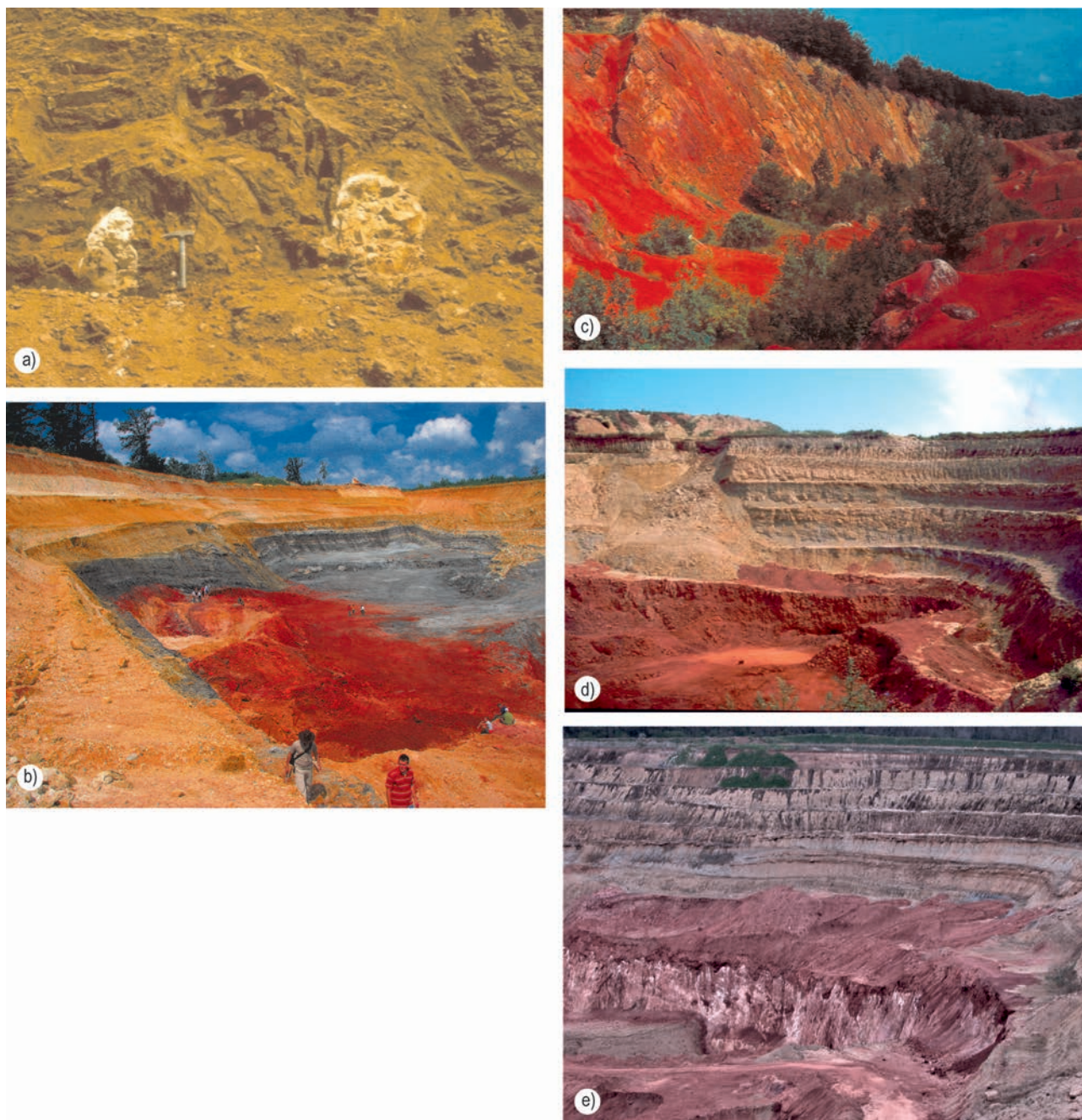
- ALMÁSI I. 1993: A Gánt környéki bauxitterület szerkezetföldtani vizsgálata. — Szakdolgozat, ELTE, Alkalmazott és Környezetföldtani Tanszék, 94 p.
- ANTAL, S. 1973: Micromineralogical and textural features in relation to the genesis of bauxite of Iszkaszentgyörgy. — *Acta Mineralogica et Petrographica* **30/1**, 3–16.
- BALKAY B. 1966: A magyar bauxittelepek megismerésének története és földtani sajátosságai. — *Bányászati Lapok* **99/9**, 590–603.
- BALKAY, B. 1973: Bauxitization and underground drainage. — *ICSOBA Travaux* **9**, 151–162.
- BÁRDOSY GY. 1961: *A magyar bauxit geokémiai vizsgálata*. — A Magyar Állami Földtani Intézet alkalmi kiadványa, Budapest, 233 p.
- BÁRDOSY GY. 1977: *Karsztbauxitok*. — Akadémiai Kiadó, Budapest, 413 p.
- BÁRDOSY GY. 1997: Berthier és a bauxit kalandos története. — *Földtani Közlöny* **127/3–4**, 483–492.
- BÁRDOSY GY. 2007: *A halimbai bauxit-előfordulás*. — A Magyar Állami Földtani Intézet alkalmi kiadványa, Budapest **208**, 119 p.
- BÁRDOSY GY. 2009: *A halimbai Malom-völgy bauxit-előfordulása*. — A Magyar Állami Földtani Intézet alkalmi kiadványa, Budapest **210**, 88 p.
- BÁRDOSY GY. 2010: *A szőci bauxit-előfordulás*. — A Magyar Állami Földtani Intézet alkalmi kiadványa, Budapest, **211**, 126 p.
- BÁRDOSY GY. 2011: *A nyirádi bauxit-előfordulás keleti része*. — A Magyar Állami Földtani Intézet alkalmi kiadványa, Budapest, **212**, 117 p.
- BÁRDOSY GY. & MINDSZENTY A. 2013: *Az iharkúti bauxit-előfordulás*. A Földtani és Geofizikai Intézet alkalmi kiadványai, **1**, 133 p.
- BÁRDOSY GY., DÓZSA L.-NÉ, GECSE É., KENYERES J.-NÉ & SIKLÓSI L.-NÉ 1979: Bassanit és metabasaluminit a magyarországi bauxitban. — *Földtani Közlöny* **109**, 11–129.
- BIGNOT, G., BLONDEAU, A., GUERNET, G., PERREAU, M., POIGNANT, S. A., RENARD, M., RIVELINE, J. DUDICH, E., GRUAS, C. & KÁZMÉR, M. 1985: Age and characteristics of the Eocene transgression at Gánt (Vértes Mts., Transdanubia, Hungary). — *Acta Geologica Hungarica* **28**, 29–48.
- BOTFALVAI, G., ŐSI, A. & MINDSZENTY, A. 2015: Taphonomic and Paleoecologic investigation of the Late Cretaceous (Santonian) Iharkút vertebrate assemblage (Bakony Mts., Northwest Hungary). — *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* **417**, 379–405. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2014.09.032>
- BOTFALVAI, G., HAAS, J., MINDSZENTY, A. & ŐSI, A. 2016: Facies architecture and palaeoenvironmental implications of the Upper Cretaceous (Santonian) Csehbánya Formation at the Iharkút vertebrate locality (Bakony Mts., Northwest Hungary). — *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* **441**, 659–678. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2015.10.018>
- BÖCKER T. 1965a: A nyirádi bauxitbányászat vízvédelme. — *Bányászati Lapok* **98/1**, 25–35.
- BÖCKER T. 1965b: A nyirádi bauxitbányászat vízvédelme. — *Bányászati Lapok* **98/2**, 99–117.
- BÖCKER T. & HÖRISZT GY. 1992: A Dunántúli-középhegység fő-karsztvízszintjének előrejelzése 1992–2010 között. — *Hidrológiai Közönlöny* **72/5–6**, 345–360.
- BÖCKER T., LIEBE P., LORBERER Á. & SZILÁGYI G. 1986: A Dunántúli-középhegység fő-karsztvíztárolójában és a kapcsolódó vízrendszerekben bekövetkezett változások. — *Földtani Kutatás* **29/4**, 85–90.
- BÖCKER, T. & VIZY, B. 1989: Hydrogeological Problems of Hungariaqn Bauxite and Coal Deposits. — In: BOSAK, P. (ed.): *Paleokartst — a systematic and regional review*. 533–548.
- CARANNANTE, G., MINDSZENTY, A., NEUMANN, A. C., RASMUSSEN, K. A., SIMONE, L. & TÓTH, K. 2004: Inland blue-hole-type ponds in the Mesozoic–Tertiary karst-filling sequences. — *Abstracts, 15th IAS Regional Meeting, April, 1994, Ischia, Italy*, 25–59.
- CZABALAY, L. 1983: Faunen des Senons im Bakony Gebirge und ihre Beziehungen zu den Senon-Faunen der Ostalpen und anderem Gebiete. — *Zitteliana* **10**, 183–190.
- CSÁSZÁR G., HAAS J. & JOCHÁNÉ EDELÉNYI E. 1978: A Dunántúli-középhegység bauxitföldtani térképe 1:100 000. — Magyar Állami Földtani Intézet, Budapest.
- CSEPREGI A. 2007: A karsztvízszint emelés hatása a Dunántúli-középhegység vízháztartására. — In: ALFÖLDI L. & KAPOLYI L. (szerk.): *Bányászati karsztvízszint-süllyesztés a Dunántúli-középhegységben*. MTA Földrajztudományi Intézet, Budapest, 77–105.
- D'ARGENIO, B. & MINDSZENTY, A. 1995: Bauxites and related paleokarst, Tectonic and climatic event markers at regional unconformities. — *Eclogae Geologicae Helvetiae* **88/3**, 453–499.
- DITTLER, E. 1930: Die Bauxite der Lagerstätte von Gánt in Westungarn. — *Berg- und hüttenmännisches Jahrbuch* **78**, 45–51.
- DUDICH, E. jr. & KÁROLY, GY. 1969: Subsurface geologic maps in Hungarian bauxite prospecting. — *Travaux ICSOBA, Zagreb, I.*, 235–249.
- DUDICH E. ifj. & KOMLÓSSY GY. 1969: Ősföldrajzi szempontok a magyar bauxit kerkérdéséhez. — *Földtani Közönlöny* **99/2**, 155–165.
- DUDICH, E. jr. & SIKLÓSI, K.-NÉ 1970: A comparative geochemical study of some major and minor elements in four bauxite deposits of Transdanubia, Hungary. — *A Magyar Állami Földtani Intézet Évkönyve* **54/3**, 319–345.
- DUNKL, I. 1992: Origin of the Eocene-covered karst bauxites of the Transdanubian Central Range of Hungary: evidence from early Eocene volcanism. — *European Journal of Mineralogy* **4**, 435–438.
- DURN, G., OTTNER, F., TISLJAR, J., MINDSZENTY, A. & BARUDZIJA, U. 2003: Regional Subaerial unconformities in Shallow-Marine Carbonate sequences of Istria. — *Field Trip P8, 22nd IAS Meeting, Opatija*, 209–254.
- ERDÉLYI, M. 1965: Geological studies in the Halimba basin. — *Acta Geologica Hungarica* **9**, 339–362.
- FARKAS S.-NÉ 1992: A Dunántúli-középhegység vízföldtana és a karsztvízszint emelés hatása a hévízi forrásra. — *Bányászati és Kohászati Lapok, Bányászat* **125/1–2**, 7–14.
- FARKAS S.-NÉ 2006: Hévíz–Nyirád története. — *Bányászati és Kohászati Lapok, Bányászat* **139/6**, 40–44.
- FAZEKAS J. 2002: A bauxitbányászat 75 éve Magyarországon. — *Miskolci Egyetem Közleménye* **62**, 57–66.
- FODOR, L. 2007: Segment linkage and the state of stress in transtensional transfer zones: Field examples from the Pannonian Basin. — *Geological Society Special Publications* **290/1**, 417–431. <https://doi.org/10.1144/sp290.16>
- GECSE É. 1969: A Nagygyháza–Óbarok környéki bauxit-terület ásvány-közettani vizsgálata. — Diplomadolgozat, ELTE Ásványtani Tanszék, kézirat.

- GECESE É. & MINDSZENTY A. 1968: Bauxit telep-szelvények ásványos összetételének mikromineralógiai vizsgálata. — In: KISS J. (szerk.): *ELTE Tudományos Diákkörei, Tanulmányok a természettudományok köréből*. 6–26
- GEDEON T. 1932: A gánti bauxit-telep fedőrétegéről. — *Földtani Közlöny* **62**, 95–102.
- GELLAI M., KNAUER J. & MINDSZENTY A. 2018: Kovadúsulásos és alumíniumdúsulásos mállási és üledékképződési folyamatok a korábbi folyamán a Csehbányai-medencében. — *Földtani Közlöny* **148/4**, 341–354. <https://doi.org/10.23928/foldt.kozl.2018.148.4.341>
- GERMÁN-HEINS, J. 1994: Iron-rich encrustation on the footwall of the Gánt bauxite (Vértes Hills, Hungary) — evidence for preservation of organic matter under exceptional conditions. — *Sedimentary Geology* **94**, 763–783. [https://doi.org/10.1016/0037-0738\(94\)90147-3](https://doi.org/10.1016/0037-0738(94)90147-3)
- GRUBER GY. & PAPP GY. 1969: Karsztvízszint süllyedés és vízemelés összefüggéseinek vizsgálata a nyirádi területen. — *Bányászati és Kohászati Lapok, Bányászat* **102/10**, 678–680.
- HAAS J. 1979: A felső-kréta Ugodi Mészke Formáció a Bakonyban. — *A Magyar Állami Földtani Intézet Évkönyve* **61**, 1–17.
- HAAS J. 1988: Upper Triassic carbonate platform evolution in the Transdanubian Mid Mountains. — *Acta Geologica Hungarica* **31/3–4**, 299–312.
- HAAS J. & JOCHÁNE EDELENYI E. 1978: A Dunántúli középhegység bauxitföldtani térképe. Felső kréta bauxitszint. — MÁFI, Budapest.
- HAAS J. & JOCHÁNE EDELENYI E. 1979: A dunántúli-középhegységi felsőkréta üledékciklus ősföldrajzi elemzése. — *A Magyar Állami Földtani Intézet Évi Jelentése 1977-ről*, 217–244.
- HAAS J., TÓTH Á., JOCHÁNE EDELENYI E., KNAUER J. & TÓTH K. (szerk.) 1985: A Dunántúli-középhegység bauxitföldtani térképe. — MÁFI, Budapest.
- HANTKEN M. 1861: Geológiai tanulmányok Buda és Tata között. — *Mathematikai és Természettudományi Közlemények* **1**, 213–278.
- HIDAS, J. & MENSÁROS, P. 1976: Electron microprobe analysis of karstic and lateritic bauxites. *Annales Universitatis Scientiarum Budapestinensis de Rolando Eötvös Nominatae. Sectio geologica* **18**, 3–28.
- HÓRISZT, GY. 1971: Hydrogeology of the Nyirád bauxite region and the results of active waterprotection. — Proc. 2nd Intern. Congr. *ICSOBA* **2**, 99–112.
- JOCHÁNE EDELENYI E. 1981: A halimbai bauxit számítógépes vizsgálatának eredményei. — *A Magyar Állami Földtani Intézet Évi Jelentése 1979-ről*, 561–582.
- JOCHÁNE EDELENYI E. 1997: A geológiai felépítés hatása a Dunántúli-középhegységi karsztvízdepressziók visszatöltődésében. — *A Magyar Geológiai Szolgálat 1996. évi beszámolója*, 25–27.
- JOCHÁNE EDELENYI E., TÓTH GY., SÁSDI L. & ROTÁRNÉ SZALKAI Á. 1996: Karsztvízföldtani vizsgálatok a Magyar Állami Földtani Intézetben. — *A Magyar Állami Földtani Intézet Évi Jelentése 1996-ről*, I–II., 47–151.
- JUHÁSZ, E. 1988: Sedimentary features of the Halimba bauxite and paleogeographic reconstruction. — *Acta Geologica Hungarica* **31/1–2**, 111–136.
- JUHÁSZ E., Ó. KOVÁCS L. 1990: A halimbai bauxit kémiai és szedimentológiai típusainak kapcsolata. — *A Magyar Állami Földtani Intézet Évi Jelentése 1988-ről*, I, 327–333.
- JUHÁSZ E. & SZENTANDRÁSSY NÉ POLGÁRI M. 1986: A mangán egyik megjelenési formája és a konkretióképződés néhány kérdése a németbányai bauxitban. — *Földtani Közlöny* **116**, 267–282.
- KAKAS, K. PÁPA, A., SZABADVÁRY, L. & SZANTNER, F. 1977: A geophysical prospecting procedure for near-surface bauxite bodies. — *21st Geophys. Symp., Leipzig, Proceedings* **1**,
- KÁROLY GY., ORAVECZ J., KOPEK G. & DUDICH E. 1970: Stratigraphic horizons of the footwall and hangingwall formations of bauxite deposits in Hungary. — *A Magyar Állami Földtani Intézet Évkönyve* **54/3**, 95–107.
- KELEMEN, P., DUNKL, I., CSILLAG, G., MINDSZENTY, A., VON EYNATTEN, H. & JÓZSA, S. 2017: Tracing multiple resedimentation on an isolated karst plateau: The bauxite-bearing Miocene red clay of the Southern Bakony Mountains, Hungary. — *Sedimentary Geology* **358**, 84–96. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2017.07.005>
- KELEMEN, P., CSILLAG, G., DUNKL, I., MINDSZENTY, A., KOVÁCS, I., VON EYNATTEN, H. & JÓZSA, S. 2020: Development of terrestrial kaolin deposits trapped in Miocene karst sinkholes on planation surface remanants (Transdanubian Range, Pannonian Basin, Hungary). *Geological Magazine*. <https://doi.org/10.1017/S0016756820000515>
- KELEMEN P. et al. 2020: Paleogene ferrallitic weathering events inferred by volcanogenic zircon ages — time of formation and origin of karst bauxites in the Vértes Hills, Transdanubian Range (Hungary) (in prep.)
- KESSLER H. 1954: A karsztból tartósan kiemelhető vízmennyiség és a beszivárgási százalék megállapítása. — *Hidrológiai Közlöny* **34/5–6**, 213–222.
- KISS, J. 1955: Recherches sur les bauxites de la Hongrie, I. Gánt. — *Acta Geologica Hungarica* **3**, 45–88.
- KISS, J. & VÖRÖS I. 1965: La bauxite lignitifère du Mont Bagolyhegy (Gánt) et le mécanisme de la sédimentation de la bauxite. — *Annales Universitatis Scientiarum Budapestinensis de Rolando Eötvös nominatae. Sectio geologica* **8**, 67–90.
- KNAUER J. & GELLAI, M. B. 1978: A szén képződmények elrendeződése és kapcsolata az ősdomborzattal a Sümeg-Káptalanfa bauxitkutató területén. — *Földtani Közlöny* **104/4**, 444–475.
- KOMLÓSSY, GY. 1967: Contribution à la connaissance de la genèse des bauxites hongroises. — *Acta Geologica Hungarica* **11**, 477–489.
- KOMLÓSSY, GY. 1970: The Iszkaszentgyörgy bauxite (SE Bakony Mts, Hungary). Problems of genesis and mineral formation. — *A Magyar Állami Földtani Intézet Évkönyve* **54**, 347–358.
- KOPEK G. 1980: A Bakony-hegység északi részének eocénje. — *A Magyar Állami Földtani Intézet Évkönyve* **63/1**, 7–176.
- KOPEK G. & KECSKEMÉTI T. 1965: Felsőlutéciai transzgresszió az északi Bakonyban. — *Földtani Közlöny* **95/3**, 320–327.
- KOPEK, G., KECSKEMÉTI, T. & DUDICH, E. 1965: Stratigraphische Probleme des Eozän in Transdanubischen Mittelgebirge Ungarns. — *Acta Geologica Hungarica* **9**, 411–426.
- KOVÁCS J., NEMES V. & ÖRSI A. 1976: Bauxitbányászat Fejérmegyében 1926–1976. — Fejérmegyei Bauxitbányák Vállalat kiadványa 202 p.
- MAKSIMOVIC, Z., MINDSZENTY, A. & PANTÓ, GY. 1991: Contribution to the geochemistry of Hungarian karst bauxites and the allochthon/autochthon problem. — *Acta Geologica Hungarica* **34/4**, 317–334.

- McKINSTRY, H. E. 1961: *Mining Geology*. — Prentice Hall, Inc, Englewood Cliff, New Jersey, US, 7th Edition, 680 p.
- MINDSZENTY A. 1969: Az Ujbarok–Vázsonypusztai bauxit-előfordulás ásvány-kőzettani és teleptani vizsgálata. — Diplomadolgozat. ELTE, Ásványtani Tanszék, kézirat.
- MINDSZENTY A. 1984: The lithology of some Hungarian bauxites. A contribution to the paleogeographic reconstruction. — *Acta Geologica Hungarica* **27/3–4**, 441–455.
- MINDSZENTY, A. 1989: New trends in Karst Bauxite Geology. — *Abstracts volume, IAS 10th Regional Meeting, Budapest*, 160–161.
- MINDSZENTY, A. 2010: Bauxite deposits of Gánt (Vértes Hills, Hungary). — *IMA 2010 Field trip guide HU3, Acta Mineralogica Petrologica* **11**, *Field Guide Series, Szeged*, 1–11.
- MINDSZENTY, A. 2016: Bauxites: Feedbacks of System Earth at Greenhouse times. — *Geologia Croatica* **69/1**, 79–87, <https://doi.org/10.4154/gc.2016.07>
- MINDSZENTY A. & FODOR L. 2002: A Gánti Bauxit felhalmozódásának tektonosedimentológiai értelmezése. — In: *Hegységek és előterek földtani kutatása. Az MFT vándorgyűlése, Bodajk, Hungary, 27/06/2002–29/06/2002* p. 23.
- MINDSZENTY A. & GÁLNÉ SÓLYMOS K. 1988: A halimbai bauxit extraklasztjainak földtani jelentősége. — *A Magyar Állami Földtani Intézet Évi Jelentése 1986-ról*, 452–467.
- MINDSZENTY A., KNAUER J. & SZANTNER F. 1984: Az iharkúti bauxit üledékföldtani jellegei és felhalmozódási körülményei. — *Földtani Közöny* **114/1**, 19–48.
- MINDSZENTY A., SZINTAI M., TÓTH K., SZANTNER F., NAGY T., K. GELLAI M. & BAROSS G. 1988: Sedimentology and depositional environment of the Csabpuszta Bauxite (Paleocene/Eocene) in the South Bakony Mts. (Hungary). — *Acta Geologica Hungarica* **31/3–4**, 339–370.
- MINDSZENTY, A., SZÓTS, A. & HORVÁTH, A. 1989: Karstbauxites in the Transdanubian Mid-Mountains. — *Excursion A3, Guidebook IAS*, 11–48.
- MINDSZENTY A.; GÁL-SÓLYMOS K.; CSORDÁS-TÓTH A.; IMRE, I.; FELVÁRI, GY.; RUTTNER A. & BÖRÖCZKY, T. 1991: Extraclasts from Cretaceous/Tertiary bauxites of the Transdanubian Central Range and the Northern Calcareous Alps. Preliminary results and tentative geological interpretation. — *Jubiläumsschrift 20 Jahre Geologische Zusammenarbeit Österreich–Ungarn* **1**, 309–345.
- MINDSZENTY A., CSOMA A., TÖRÖK Á., HIPS K. & HERTELENDI E. 2000: Flexura-jellegű előtéri deformációhoz köthető karsztbauxit szintek a Dunántúli-középhegységben. — *Földtani Közöny* **131/1–2**, 107–152.
- NYERGES L. & MINDSZENTY A. 1979: Bauxit teleptani jellegzetességek vizsgálata mélyfúrás, geofizikai mérésekkel és ezek jelentősége az ipari bauxitkutatásban. — *Magyar Geofizika* **20/5**, 161–166.
- Ó. KOVÁCS L., JUHÁSZ E. & HUSZÁR GY. 1990: Sokváltozós matematikai módszerek alkalmazása a bauxitkutatásban. — *Földtani Kutatás* **33**, 19–25.
- ORAVECZ J., VÉGHNÉ NEUBRANDT E. 1961: A Vértes- és Bakony-hegységi triász rétegtani és szerkezeti kapcsolata. — *Földtani Közöny* **91**, 162–169.
- OTTLIK, P. & SZABADVÁRY, L. 1969: Geophysics on bauxites prospecting. — *Proc. 2nd Intern. Symp. of ICSOBA* **2**, 157–168
- ŐSI, A. 2005: *Hungarosaurus tormai*, a new ankylosaur (*Dinosauria*) from the Upper Cretaceous of Hungary. — *Journal of Vertebrate Palaeontology* **25**, 370–383. [https://doi.org/10.1671/0272-4634\(2005\)025\[0370:htanad\]2.0.co;2](https://doi.org/10.1671/0272-4634(2005)025[0370:htanad]2.0.co;2)
- ŐSI A. 2012: *Dinoszauruszok Magyarországon*. — Geolitera, Szeged, 168 p.
- ŐSI, A. & MAKÁDI, L. 2009: New remains of *Hungarosaurus tormai* (*Ankylosauria*, *Dinosauria*) from the Upper Cretaceous of Hungary: skeletal reconstruction and body mass estimation. — *Paläontologische Zeitschrift* **83**, 227–245. <https://doi.org/10.1007/s12542-009-0017-5>
- ŐSI, A., BOTFALVAI, G., GÁSPÁR, A. & HAJDU, Zs. 2019: The dirty dozen: taxonomical and taphonomical overview of a unique ankylosaurian (*Dinosauria*, *Ornithischia*) assemblage from the Santonian Iharkút locality (Hungary). — *Palaeodiversity and Palaeoenvironments* **99**, 195–240. <https://doi.org/10.1007/s12549-018-0362-z>
- PÁLFALVI, S. 2004: Paleoenvironment on a Middle Eocene carbonate ramp in the Vértes Mts., Hungary. — *Hantkeniana* **4**, 63–81.
- PÁLFALVI S. 2007: A Vértes-hegység eocén üledékképződési környezetének rekonstrukciója mikrofácies-elemzés alapján. — PhD értekezés, ELTE Őslénytani Tanszék.
- PAPP K. 1897: A fornai eocén medence a Vértesben. — *Földtani Közöny* **27**, 417–423.
- POBOZSNY I. 1928: A Vértes hegység bauxitlepei. — *Földtani Szemle* **1/5**, 215–252.
- POHL K. 1962: Az aktív vízszint-süllyesztéssel elért eredmények. — *III. Karszthidrológiai konferencia. Balatonalmádi 1962. május 22–23*, Bányászati Kutató Intézet kiadványa, 134–142.
- POHL K. 1966: A bányavíz-termelés jelenlegi helyzete és várható alakulása a Közép-Dunántúlon. — *Hidrológiai Közöny* **46/6**, 246–254.
- POHL K. 1970: A magyar bauxitbányászat története és a felszabadulás utáni fejlődés. — *Bányászati és Kohászati Lapok, Bányászat* **103/6**, 361–376.
- POHL, K. 1973: Procédes speciaux de prevention d'inondations souterraines et d'exploitation miniere des eaux de karst employes en Hongrie. — *Travaux ICSOBA* **9**, Part II (Bauxite mining), 69–76, Zagreb, Yugoslavia.
- POSGAY K. id. 1981: Az első magyar bauxitelőfordulás kutatástörténete és földtani-teleptani viszonyai (Királyerdő, Erdélyi-középhegység, Román SzK). — *Földtani Közöny* **111**, 1–25
- SCHMIEDER A-WILLEMS T. 1968: A bányászattal kapcsolatos karsztvízkutatás jelenlegi állása. — *MTA X. Osztály Közleményei* **2/1–2**, 71–79.
- SCHMIEDER A. & POHL K. 1971: Geohidrológiai kutatások eredményei a magyar szén és bauxitbányászatban. — *Bányászati és Kohászati Lapok, Bányászat* **104/4**, 227–239.
- SZABADVÁRY L., HOFFER E., KAKAS K., NYITRAI T., PÁPA A., PINTÉR A., RÁNER G. & REZESSY G. 1978: Komplex geofizikai kutatás a Dunántúli-középhegységben. — *MÁELGI Évi Jelentése 1977-ről*, 11–18.
- SZÁDECZKY GY. 1905: A Bihar-hegység alumíniumércéről. — *Földtani Közöny* **33/5**, 213–231.

- SZANTNER, F. & MINDSZENTY, A. 1979: Prospecting for karstic bauxites. — In: KOMLÓSSY, GY., SZANTNER, F. & VÖRÖS, I. (eds): *UNIDO Group Training in Production of Alumina Vol I. Principles and methods of bauxite prospecting*. — ALUTERV-FKI, Budapest 201–218.
- SZANTNER F. & SZABÓ E. 1962: Új tektonikai megfigyelések az utóbbi évek bauxitkutatásai alapján. — *Földtani Közlöny* **92/4**, 416–451.
- SZANTNER, F. & SZABÓ, E. 1969: The structural geological conditions and history of development of Hungarian bauxite deposits. A *Magyar Állami Földtani Intézet Évkönyve* **54**, 109–130 pp.
- SZANTNER, F., SZABÓ, E. & KÁROLY, GY. 1981: Latest results of bauxite geological research and prospecting in Hungary. — Proc. ICSOBA Symp, Tihany, 237–257.
- SZANTNER F., KNAUER J. & MINDSZENTY A. 1986. *Bauxitprognózis*. — VEAB kiadvány, 472 p.
- SZEKÉR GY. 1975: *Alumíniumiparunk és a szocialista gazdasági integráció*. — Kossuth Könyvkiadó, 234 p
- SZÓTS E. 1956: Magyarország eocén (paleogén) képződményei. — *Geologica Hungarica Series Geologica* **9**, 320 p.
- TAEGER H. 1909: A Vérteshegység földtani viszonyai. — *A Magyar Királyi Földtani Intézet Évkönyve* **17**, 256 p.
- TARI, G. & LINZER, H. G. 2018: Austrian versus Hungarian bauxites in an Alpine context — a tribute to prof. Andrea Mindszenty. — *Földtani Közlöny* **148/1**, 35–44. <https://doi.org/10.23928/foldt.kozl.2018.148.1.35>
- TELEGDI ROTH K. 1923: Paleogén képződmények elterjedése a Dunántúli-középhegység északkeleti részén. — *Földtani Közlöny* **53**, 5–14.
- TELEGDI ROTH, K. 1927a: Die Bauxitlager des Transdanubischen Mittelgebirges in Ungarn. — *Földtani Szemle* **1**, 33–45.
- TELEGDI ROTH K. 1927b: A dunántúli bauxittelepek elterjedése és kutatása. — *Bányászati és Kohászati Lapok* **60**, 347–351.
- T. GECSE É. 1974: A nagygyeházi A/Ia kutatási részterület fő bauxitszintjének és egyéb bauxitos képződményeinek vékonycsiszolatos és mikromineralógiai vizsgálata. — Kézirat, BKV Adattár (MBFSz).
- T. GECSE É. 1982: A nagygyeházi bauxittelep mikromineralógiai vizsgálata. — *A Magyar Állami Földtani Intézet Évi Jelentése 1980-ról*, 435–448.
- TÓTH Á. & T. GECSE É. 1981: Dedolomitizált telérszerű kőzetestek a Nagygyeházi-medence felsőtriász dolomitlajzatában. — *A Magyar Állami Földtani Intézet Évi Jelentése 1979-ről*, 181–200.
- TÓTH Á., T. GECSE É. & PÓPITY J. 1983: Alunit és basalunit a csordakúti bauxitban. — *A Magyar Állami Földtani Intézet Évi Jelentése 1982-ről*, 423–430.
- TÓTH Á. 1985: A Gerecse-hegység délkeleti előterének eocén ősföldrajzi övezetei és kapcsolatuk a bauxittelepek elterjedésével. — *A Magyar Állami Földtani Intézet Évi Jelentése 1983-ról*, 51–61.
- TÓTH K. 1981: Összefüggések a bauxit előfordulása és a közvetlen fedő eocén rétegek kifejlődése között. — *Általános Földtani Szemle* **14**, 133–150.
- TÓTH K. & VARGA G. 2014: A diszeli bauxit. — *Földtani Közlöny* **144/4**, 483–510.
- TRABELSI, K., SAMES, B., WAGREICH, M., KÁZMÉR, M., MINDSZENTY, A. & MARTIN-CLOSAS, C. 2020: Eocene Charophytes from the bauxite-cover sequence at the Gánt section (Vértes Hills, Hungary). — *Advances in taxonomy and high-resolution biostratigraphy* (in prep).
- VADÁSZ E. 1927: A magyar bauxit jelentősége. — *Bányászati és Kohászati Lapok* **60**, 376–379.
- VADÁSZ E. 1930: Szénképződés, hegységképződés és bauxitkeletkezés Magyarországon. — *Bányászati és Kohászati Lapok* **63/10**, 213–224.
- VADÁSZ E. 1943: Alunit a magyarországi bauxitban. — *Földtani Közlöny* **73/1**, 169–170.
- VADÁSZ E. 1946: A magyar bauxitelőfordulások földtani alkata. — *A Magyar Állami Földtani Intézet Évkönyve* **37/2**, 173–286.
- VADÁSZ E. 1951: *Bauxitföldtan*. — Akadémiai Kiadó, Budapest, 129 p.
- VADÁSZ E. 1966: A bauxitképződés újabb, dialektikus szemlélete. — *Földtani Közlöny* **96/2**, 227–230.
- VARGA J. (szerk.) 2020: *Emlékkönyv a magyar bauxitbányászatról (A magyar bauxitbányászat története)*. — VARGA J. kiadása, Alaphypréss Nyomda, Székesfehérvár ISBN 978-615-00-7745-1, 224 p.
- VATAI J. 1988: Bauxit-szöveti vizsgálatok a Gánt-bagolyhegy-i előfordulás területén. — Szakdolgozat. ELTE, Ásványtani Tanszék, kézirat.
- VÉGH S.-né, FÁYNE TÁTRAY M., MENSÁROS P. & BALÁSHÁZY L. 1978: A Nagygyeháza–Mányi terület kőszénfekvő képződményeinek és alaphegységének földtani kérdései. — *Földtani Közlöny* **108**, 7–17.
- VÉGH S.-né, KOVÁCS J. & MENSÁROS P. 1987: Rátolódás a Csordakút–II. bauxitlencse területén. — *Földtani Közlöny* **117**, 93–99.
- VICZIÁN M., DUDICH E. & TÓTH Á. 1985: A Dunántúli-középhegység bauxitjának ólomizotóp vizsgálata. — *A Magyar Állami Földtani Intézet Évi Jelentése 1983-ról*, 111–116.
- VITÁLIS I. 1931: A hazai bauxitokkal kapcsolatos alumíniumvasércsek. — *Bányászati és Kohászati Lapok* **64**, 511–517.
- VITÁLIS I. 1939: A magyar bauxitok és értékesítésük. — *Földtani Értesítő* **4/2**, 33–50.
- VIZY B. 1999: Bauxitkutatás Magyarországon. — Magyar Alumíniumipari Múzeum kiadványa, Székesfehérvár 148 p.
- VIZY B. 2005: 50 év a bauxitkutatás szolgálatában. — In: HORN J. (szerk.): Élet–Hivatás (Földtan, bányászat, energetika) — Főgeológusok visszaemlékezései. 9–38.
- VIZY B. & HÓRISZT GY. 2005: Vízföldtani kutatások a bauxitbányászatban. — *Földtani Kutatás* **42/3–4**, 12–14.
- VÖRÖS I. 1958: Iszkaszentgyörgyi bauxitszelvények mikromineralógiai és nyomelem vizsgálata. — *Földtani Közlöny* **88/1**, 48–56.
- VÖRÖS I. 1969: Micromineralogical investigation of the bauxite sections of Gánt, Hungary. — Proc. 2nd Intern. Congr. ICSOBA, 311–337.
- VÖRÖS I. & GECSE É. 1976: Micromineralogical and sedimentological study of some Hungarian bauxites. — *Travaux ICSOBA* **13**, 175–183.
- WEISSE, J. G. de 1948: Les bauxites de l'Europe Centrale (Province Dinarique et Hongrie). — *Mémoires Société Vaudoise des Sciences Naturelles* **58/9**, 1–162.

I. tábla — Plate I.



Képek egykori hazai bauxitkölfejtésekről.

a) A Csabpusztai Bauxit alól kibukkanó Ugodi Mésző anyagú karrok (Csabpuszta), b) A bauxit és a bauxitfedő Darvastói Formáció feltárása a nyirádi Táncsics-kölfejtés területén, c) Az Újfeltárás K-Ny-i csapású vetőfala az előtérben, a lezökkent rögön a bauxit alól kibukkanó dolomitbörccökkel (Gánt), d) Az oligocén fedős Óbaroki Bauxitot feltáró egykori külfejtés távlati képe (2003), e) A Földolomit karros felszínére jól látható eróziós és szögdiszkordanciával települő oligocén bauxit az Óbarok-XI. lencsét feltáró külfejtésben

Snapshots of onetime Hungarian bauxite mines.

a) Karst-pinnacles of Late Cretaceous Ugod Limestone cropping out from below the Csabpuszta Eocene Bauxite (Csabpuszta), b) Bauxite and its immediate cover (Darvastó Formation) exposed by the Táncsics open pit (Nyírád), c) East-West striking major fault in the Újfeltárás open-pit (Gánt). In front, on the downthrown block some karstic cliffs of the bedrock crop out from below the bauxite, d) Panoramic view of one of the open-pits exposing the Oligocene bauxite of Óbarok, e) Serrate karst surface developed on Triassic dolomite, overlain by Oligocene bauxite in the Óbarok-XI open-pit., Note the obvious erosional and angular unconformity between bauxite and its bedrock.

Szemelvények az elmúlt két évtized ELTE-n végzett, medenceléptékű hidrogéológiai kutatásaiból

CZAUNER Brigitta, MÁDLNÉ SZŐNYI Judit

Eötvös Loránd Tudományegyetem, Általános és Alkalmazott Földtani Tanszék

Short overview of basin-scale hydrogeological research conducted at ELTE in the last two decades

Abstract

The research and educational activity of the hydrogeological group (József & Erzsébet Tóth Endowed Hydrogeology Chair) of the Department of Physical and Applied Geology of the Eötvös Loránd University (ELTE, Budapest, Hungary) focuses on the basin-scale system approach of groundwater flow and the related natural phenomena based on the theory of hydraulic continuity. The paper presents this approach with its historical background as compared to the earlier aquifer-based artesian paradigm. The background of basin-scale hydrogeological research approach and methodology under continuous development is shortly explained, while less emphasis is placed on technical minutiae. Among the methods, basin hydraulics are fundamental as these provide the “real groundwater flow system model” based on the basin-scale analysis and interpretation of measured hydraulic data from wells. Accordingly, the basin-scale and particularly the basin hydraulics’ results of our research history are reviewed, but the related phenomena investigated by other methods are also mentioned. Our studies covered most areas of Hungary and revealed everywhere the hydraulic continuity of the rock framework and the existence of gravity-driven regional groundwater flow systems irrespectively of the topography and rock type (i.e., siliciclastic or carbonate). The pressure regime in these flow systems is near to hydrostatic, while the flow field is regionally unconfined and recharged from rainwater. In the deeper sub-basins, the gravitational regime is underlain by an overpressured regime (e.g., in the Duna–Tisza Interfluve, Derecske Trough, Békés Basin, Battonya High, Dráva Basin) or underpressured regime (e.g., in the Hungarian Paleogene Basin). Both anomalous pressure regimes are confined with non-renewable resources (overpressured) or with limited recharge (underpressured). This complex hydraulic situation, as well as the geologic and environmental agency of groundwater flows account for several surface (e.g., salinization, groundwater dependent ecosystems (GDEs)) and subsurface (e.g., hypogene caves, hydrocarbon entrapment) phenomena and processes.

Keywords: groundwater flow, hydraulic continuity, basin hydraulics, gravity-driven flow systems, overpressure, underpressure, flow-related phenomena

Összefoglalás

Az Eötvös Loránd Tudományegyetem (ELTE) Általános és Alkalmazott Földtani Tanszékének hidrogéológiai kutató- és oktatócsoportja (Tóth József és Erzsébet Hidrogéológia Professzúra) tevékenységének középpontjában a felszín alatti víz-áramlásoknak és kapcsolódó jelenségeknek a hidraulikus folytonosság alaptételére épülő medenceléptékű és rendszerszemléletű megközelítése áll. A jelen tanulmány e megközelítést történeti felvezetéssel és a korábbi, rétegtani (hidrosztratigráfiai) alapú „artézi” paradigmával szembeállítva mutatja be. A folyamatosan fejlesztett medenceléptékű hidrogéológiai kutatási módszertant röviden tárgyaljuk, a technikai részletek helyett kiemelve az alkalmazott módszertani megközelítések magyarázatát. Ezek közül legnagyobb jelentőséggel a kutakban mérhető hidraulikai adatok medenceléptékű, azaz medencehidraulikai elemzése bír, amelynek eredménye a „valós vízáramlási rendszermodell” felállítása. Ennek megfelelően kutatástörténetünkben a medenceléptékű és különösen a medencehidraulikai eredményeket szemléljük a továbbiakban, említve az ezek által összefüggésrendszerbe helyezett és egyéb módszerekkel vizsgált jelenségeket is. Az ország területének nagy részét lefedő kutatásaink domborzattól és kőzettípustól (sziliciklasztos vagy karbonátos) függetlenül kimutatták a közvetváz hidraulikus folytonosságát és a gravitáció vezérelte regionális felszínalatti vízáramlási rendszerek jelenlétét. Ezek medenceléptékben fedetlen, csapadékvízből utánpótlódó és közel hidrosztatikus nyomásrezsimű tartománya alatt a mélymedencékben abnormális nyomásrezsimű (túlnyomásos vagy alulnyomásos) fedett, és nem vagy csak korlátozottan utánpótlódó tartományai találhatóak. E komplex hidraulikai helyzettel és a felszínalatti vízáramlások földtani és környezeti hatótényező szerepével számos felszíni (szikesedés, felszín alatti víztől függő ökoszisztémák, FAVÖKO-k stb.), és felszín alatti (hipogén barlangképződés, szénhidrogén csapdázódás stb.) jelenség és folyamat nyert magyarázatot.

Tárgyszavak: felszín alatti vízáramlások, hidraulikus folytonosság, medencehidraulika, gravitációs áramlási rendszerek, túlnyomás, alulnyomás

Bevezetés

Az Eötvös Loránd Tudományegyetem (ELTE) Általános és Alkalmazott Földtani Tanszékének hidrogeológiai kutatócsoportja közel húsz éve foglalkozik a medencebeli felszínalatti vízáramlások és kapcsolódó jelenségek kutatásával. 2016 óta az említett tanszék szervezeti keretein belül működik a Tóth József és Erzsébet Hidrogeológia Professzúra, mely kutatásaiban geofizikus szakemberekkel is kiegészült. Csoportunk oktatási és kutatási tevékenységének középpontjában a hidraulikus folytonosság (TÓTH 1995a,b) alapvetelére épülő medenceléptékű megközelítés áll. Ez számos ponton eltér a korábbi, a víztartó rétegeket, a bennük tárolt és belőlük kitermelhető vizet középpontba helyező rétegtani (hidrosztratigráfiai) avagy „artézi” megközelítéstől (JIANG et al. 2020). Kutatásaink jelentőségét felértékeli, hogy napjainkban a felszín alatti vízkészletek jelentősége egyre nő világszerte a népességrobbanás és klímaváltozás nyomán kibontakozó vízválság okán. De hazánkban is egyre inkább előtérbe kerül a felszín alatti térrész sokirányú használata és az igény ennek összehangolására (pl. célzott felszín alatti vízpótlás, talajjavítás, öntözés, csatornázás, szennyezések kontrollálása, szénhidrogén-termelés, geotermikus energiahasznosítás, szén-dioxid-besajtolás, mélységi érckutatás stb.). E feladatok megoldásához elengedhetetlen a felszín alatti vízáramlási rendszerek és működési mechanizmusaik megismerése és megértése.

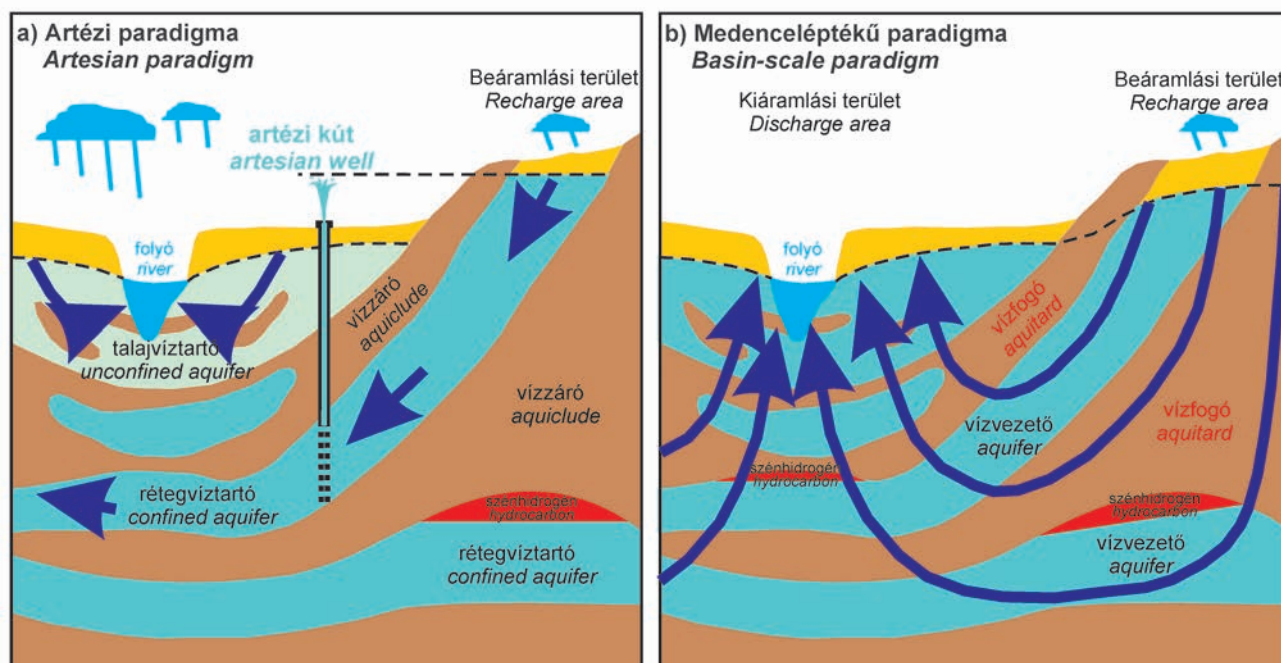
A jelen tanulmány célja egyrészt rövid történeti felvezetést követően kiemelni az alkalmazott megközelítések és módszerek újdonságait, másrészt szemelvényesen bemutat-

ni a medenceléptékű kutatásaink eddig többnyire angol nyelven közölt főbb eredményeit. Nem törekszünk a téma hazai műhelyekben született eredményeinek szisztematikusan áttekintésére, ez ugyanis messze meghaladná e cikk kereteit. Saját kutatásaink leírása is vázlatos, mellyel célunk, hogy felkeltjük az olvasók érdeklődését az eredeti munkák elolvasása iránt. E munkánkkal a Földtani Közöny 150 éves jubileuma alkalmából tisztelgünk a jeles elődök előtt.

Az artézi paradigmától a medenceléptékű felszín alatti vízáramlási rendszereig

Az „artézi mechanizmus” a hidrogeológia első egysége – empirikusan levezetett – paradigmája (JIANG et al. 2020), mely a mélyfúrásos feltárásnak köszönhetően született meg és a XIX. század folyamán vált általánosan elfogadottá. Az artézi szó két vízzáró réteg közötti vízvezető rétegben tárolt vizet jelent, a föld felszíne fölé emelkedő vízszinttel. Fogalomhasználata szerint a talajvíz a legfelső vízzáró réteg fölött helyezkedik el és csapadékból utánpótlódik. A rétegvíz két vízzáró réteg közötti vízvezető (permeábilis) rétegben tárolt vizet jelent. A rétegvíz a réteg felszíni kibukkanásánál pótlódik a csapadékvízből, míg vízszintje a vízvezető bármely pontján fúrt kútban a felszíni kibukkanás vízszint magasságáig emelkedik. Ha ez a felszín fölé szökő vizet ad, akkor artézi vízről beszélünk (*1.a ábra*).

Ez a nézetrendszer a „hidraulikus folytonosság” felismerésével vált túlhaladottá a XX. század második felétől kezdődően (*1.b ábra*). A hidraulikus folytonosság a kőzet-



1. ábra. Az a) elkülönült víztartókra épülő artézi paradigma és a b) medenceléptékű, vízvezetők és vízfogók vertikális kapcsolatain alapuló, rendszerszemléletű hidrogeológia összevetése

Figure 1. Comparison of a) the separated aquifer-based artesian paradigm and b) the basin-scale system approach of hydrogeology based on the vertical connections of aquifers and aquitards

vázban tározott víznek az a tulajdonsága, hogy nyomásának (hidraulikus emelkedési magasságának) tetszőleges pontban bekövetkező megváltozása más pontokban is megváltoztatja a víz nyomását (hidraulikus emelkedési magasságot) (TÓTH 1995a,b). A hidraulikus kapcsolatok természetes hatásokra (tér felszín magasság különbségei, éghajlati körülmények vagy erózió/üledékképződés) és emberi beavatkozások eredményeként (szivattyúzás) is kialakulnak. Ugyanakkor mivel a porús vízben fellépő nyomásváltozások a kőzetvázban véges sebességgel terjednek annak átteresztős/vagy tárolóképessége függvényében, így a hidraulikus folytonosság észlelését megnehezíti a túl nagy távolság, a túl rövid megfigyelési idő. De akadályozhatja az is, ha a víz kémiai összetételében, hőmérsékletében, izotóposztételében, korában stb. bekövetkező jelentősebb változások egybeesnek a vízrekesztő képződmények határfelületeivel. Ezeknek a hidraulikus folytonosságot elfedő tényezőknek köszönhetően a folytonosság felismerése, valamint ebből következően a fogalomrendszer átalakulása és teljes átérté- se sok helyen még napjainkban is zajlik.

A hidraulikus folytonosság felismerése és következményei

Elsőként CHAMBERLAIN (1885) írta le, hogy „tökéletesen vízzáró rétegek nincsenek”, s már MUNN (1909) is a rétegek vízzáróságát „hagyományokon alapuló tévhit”-nek minősítette. Jóval később sikerült ezeket az állításokat mért permeabilitás értékekkel is alátámasztani (BRACE 1980, NEUZIL 1994). Ugyanakkor „indirekt” bizonyítékokkal a hidrogeológia két, egymással párhuzamosan fejlődő irányzata is szolgált. A „mérnöki” irányzat vízáadó vagy kúthidraulikai (helyi próbaszivattyúzási-) vizsgálatainak eredményeként az „ideálisan zárt vízáadó réteg” helyére a „többrétegű vízáadó” lépett (pl. HANTUSH & JACOB 1955; HANTUSH 1956; NEUMANN & WHITERSPOON 1969a,b, 1972; HALÁSZ 1975; SZÉKELY 1977). A „tudományos” hidrogeológiai irányzat regionális vízkészlet-kutatási eredményei rávilágítottak, hogy a hosszú idejű próbaszivattyúzások, regionális nyomáseloszlások, az egész medencére kiterjedő vízmérlegek és nagy léptékű áramlási modellek számszerű értékelése csak a regionális és az egyes képződményeken túlmutató hidraulikus folytonosság feltételezésével lehetséges (pl. WALTON 1960; TÓTH 1963, 1978; FREEZE & WITHERSPOON 1966, 1967, 1968; MARTON & SZANYI 2000; SZANYI 2004; MARTON 2009). Végeredményben tehát a hidrogeológia „mérnöki” és „tudományos” irányzata is felismerte egymástól függetlenül a medenceléptékű, regionális hidraulikus folytonosságot. Ezzel megkezdődhetett a két irányzat közeledése, mely folyamat eredménye egy új, medencékben gondolkodó hidrogeológiai szemlélet kialakulása lett. Mi is ennek a jelentősége? Felismertük (i) a folyadékok általános jelenlétét a földkéregben, (ii) a medenceléptékű vízáramlási rendszereket, (iii) a kőzet-víz kölcsönhatás révén a folyadékok és áramlásuk mint földtani hatótényezők jelentőségét valamennyi földtani folyamatban, (iv) a kőzetváz deformációja által okozott tranzienst áramlási viszonyokat, (v) a tér- és

időskálák teljes spektrumában való gondolkodás jelentőségét, (vi) ezáltal a gyakorlati problémák okainak és megoldásainak (regionális) térbeli és (földtörténeti) időbeli léptékben történő kezelésének szükségességét.

Természetesen ezek a felismerések nem jelentették azt, hogy a változás mindenhol egyszerre és egy időben bekövetkezett, sokkal inkább egyes kutatók és nemzetközi kutatócsoportok (többek között az USA, Kanada, Kína, Mexikó, Ausztrália, Japán, Hollandia, Kolumbia és közöttük Magyarország) tették azt magukévá. 2011 óta a Hidrogeológusok Nemzetközi Szövetsége (IAH) Regionális Vízáramlási Bizottsága (RGFC) fogja össze a témában zajló kutatókat, és szorgalmazza világszerte a medenceléptékű szemlélet elterjedését és a vízáramlási rendszerek kutatását, elméleti és gyakorlati téren egyaránt.

A medencebeli vízáramlások rövid nemzetközi történeti áttekintése

A hidraulikus folytonosság fennállásának meghatározó következménye a kiterjedt medencebeli felszín alatti vízáramlási rendszerek felismerése. Ezek hajtóerőinek, térbeli mintázatának és kontrolláló tényezőinek spekulatív értékelése már a XX. század elejétől felmerült. Elsőként KING (1899) ismerte fel, a felszín alatti vizek felső határfelületét képező talajvíztükör domborzata nagyjából a földfelszínt követi. Továbbá a csapadékból utánpótlódó felszín alatti vizek a domborzati magaslatoktól a mélyedések felé áramlanak, majd a völgyek felszíni vízfolyásait táplálva csapolódnak meg. A formáción keresztüli vízáramlást elsőként MUNN (1909) feltételezte. A legkorábbi elképzelést hierarchikus eloszlású felszín alatti vízáramlási rendszerekről FOURMARIER (1939) publikálta.

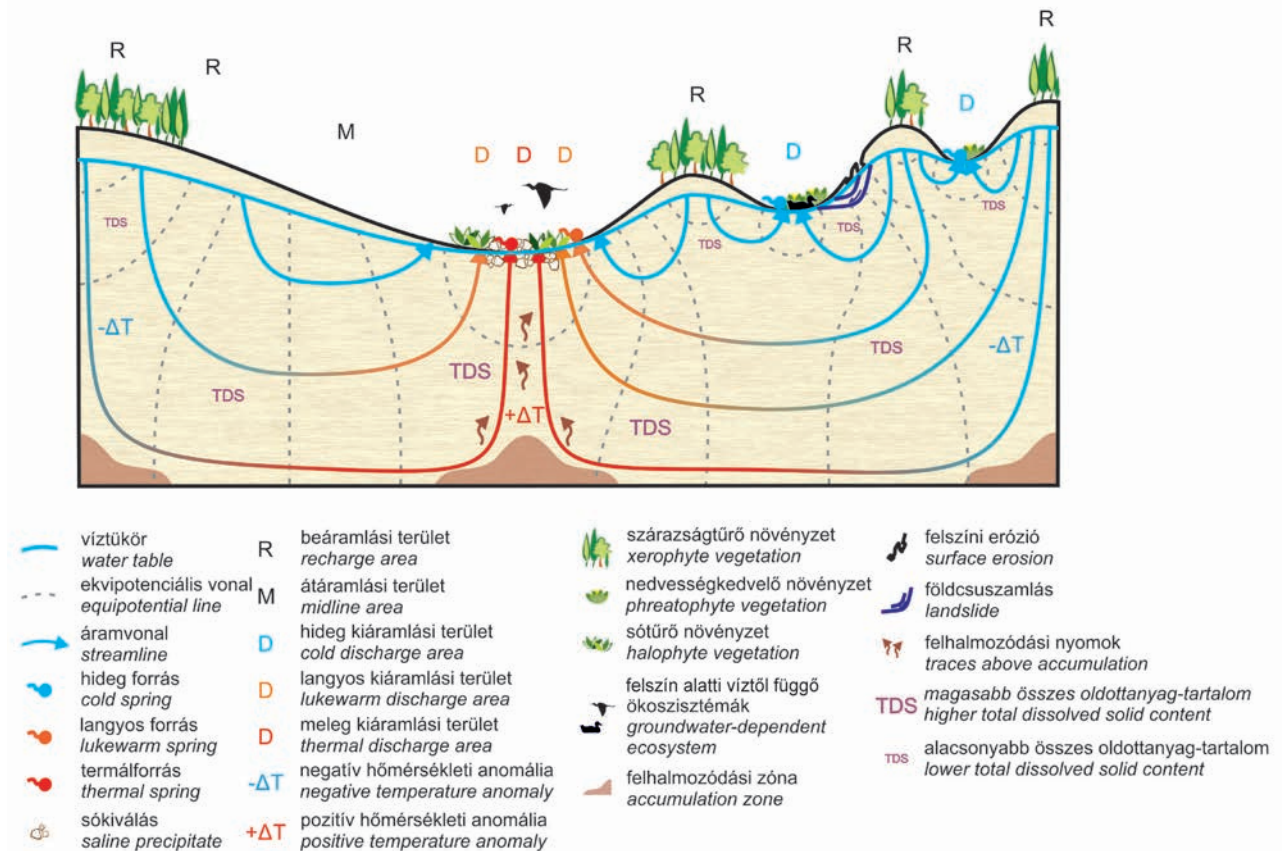
A vízáramlási rendszerek adatfeldolgozáson nyugvó és korszerű matematikai leírásához szükséges alapot HUBBERT (1940) klasszikus tanulmánya teremtette meg. Ebben bevezette a folyadékpotenciál (az egységnyi tömegű folyadékra jutó összes mechanikai energia mennyisége) fogalmát a vízföldtanba. Továbbá rámutatott annak összefüggésére a kutakban mérhető hidraulikus emelkedési magassággal (ahol g gravitációs állandó, h hidraulikus emelkedési magasság). Ezáltal a hajtóerőtér (nagysága és iránya – a folyadék a nagyobbtól a kisebb folyadékpotenciálú pont felé áramlik) kiszámíthatóvá és modellezhetővé vált. A hidraulikus hajtóerőt a kőzetváz hidraulikai tulajdonságaival (permeabilitás, hidraulikus vezetőképesség, tározás) kombinálva (DARCY, 1856) az áramtér (áramlási irányok és intenzitások) is leképezhetővé vált. HUBBERT (1940) folyadékpotenciál fogalomra alapozott felszín alatti áramképén KING (1899) felismeréseiből kiindulva a talajvíztükör domborzata nagyjából a földfelszínt követi és a felszín alatti víz csak a völgyekben csapolódik meg.

Annak felismerése, hogy a megcsapolódás völgyekben koncentrációja hibás posztulátum, TÓTH József magyar származású kanadai hidrogeológus professzor nevéhez fűződik. TÓTH (1962, 1963) tanulmányaival kezdődött a hidrogeológia ma már „Tóth-féle forradalom”-ként (BREDEHOEFT 2018) emlegetett korszaka, mely a „medenceléptékű hidrogeológia” kialakulásához vezetett. Ezekben TÓTH a HUB-

BERT (1940) által bevezetett folyadékpotenciál fogalmát elsőként alkalmazta medenceméretű vízáramlási folyamatok matematikai leírására. A stacioner vízáramlást leíró Laplace-egyenletet analitikusan oldotta meg a kétdimenziós egyszerű medence („unit basin”) és a kis vízgyűjtő vagy összetett medence („composite basin”) geometriai viszonyai és homogén-izotróp közeg feltételezése mellett. Az egyszerű medencében felső peremfeltételként a topográfiát követő talajvíztükröt alkalmazta lineáris lejtéssel, míg a medence oldalai szimmetriai okokból, az alja pedig idealizált impermeabilis határ. A számított folyadékpotenciál-értékekből az egyszerű medencében egy áramlási rendszer rajzolódik ki, melyben a megcsapolódás már nemcsak a völgyben koncentrálódik, hanem a medence teljes alsó szakaszán jelentkezik a felszínen is (2. ábra). Az „egységmedenceként” ismertté vált áramképen belül három különböző hidraulikai rezsimjellegű területet és medencerészt különített el, amelyek eltérő hidraulikai paraméterekkel jellemezhetők. Ezek a beáramlási (utánpótlódási), átáramlási és kiáramlási (megcsapolódási) területek, illetve medencerészek. Ebből adódóan „artézi” vízviszonyok homogén kőzetvázú egységmedencében is kialakulhatnak annak kiáramlási területén. Ez pedig a mélységgel növekvő hidraulikus emelkedési magasság és nem a vízzáró rétegek jelenlétének

következménye (JIANG et al. 2020). Az összetett medence (TÓTH 1963) felszíne már egy a valósághoz közelebb álló, szinuszos függvénnyel írható le, míg az ezt nagyjából követő vízszint hierarchikusan fészkelte áramlási rendszereket hoz létre, melyek különböző léptékű típusai a lokális, intermedier és regionális áramlási rendszerek (2. ábra).

Már az egység- és összetett medence összehasonlítása alapján megállapítható, hogy a valós medencék felszín alatti vízáramlási képe az egységmedence környezeti hatások miatt módosult változataként fogható fel. Az elméleti megoldás valós hidrogeológiai helyzetekre történő alkalmazására TÓTH maga is utalt korai munkáiban a „hidrogeológiai környezet” (domborzat, klíma, földtani felépítés) és a felszín alatti vízrezsím ok-okozati összefüggésrendszerének bevezetésével (TÓTH 1970). A környezeti körülmények megváltozásának hatására az áramlási rendszerek tranziens állapotba kerülnek, és megkezdődik átalakulásuk (pl. TÓTH & MILLAR 1983, HAVRIL et al. 2016, SZIJÁRTÓ et al. 2019b). Amennyiben ilyen változásokkal nem számolunk vizsgálataink során, akkor medenceléptékben feltételezhető a kvázi stacioner vízáramlási helyzet, azaz az áramlási pályák viszonylagos „állandósága”. Emiatt a víz és a kőzetváz tartós kölcsönhatásba kerülnek egymással, és ennek következtében a víz mint földtani hatótényező valamennyi felszín alatt



2. ábra. Üledékes medencékben kialakuló gravitációsan vezérelt felszín alatti vízáramlási rendszerek és a hatásukra kialakuló természeti jelenségek idealizált helyzetekben (bal oldali félmedence: „egységmedence”, jobb oldali félmedence: összetett medence) (TÓTH 1999 nyomán TÓTH et al. 2016)

Figure 2. Gravity-driven groundwater flow systems in sedimentary basins and the related natural phenomena (half-basin on the left-hand side: unit basin, half-basin on the right-hand side: composite basin) (TÓTH et al. 2016 after TÓTH 1999)

zajló folyamatban szerepet játszik. E folyamatok és a határukra kialakuló jelenségek rendkívül szerteágazóak az ásvány- és szénhidrogéntelepek képződésétől a barlangok kialakulásán, biogeokémiai kiválásokon, ökoszisztémákon és a geotermális jelenségeken át egészen a tektonikai mozgásokig (pl. TÓTH 1999, INGBRITSEN et al. 2006, KLIMCHOUK 2007, TÓTH 2009a, ERŐSS et al. 2012a, Kovács-BODOR et al. 2018). Ez egyúttal felkínálja a felszín alatti víz- és fluidumáramlások közvetett, az általuk okozott földtani és környezeti jelenségek megértésén alapuló kutatási lehetőségét.

Más szerzők arra is felhívták a figyelmet, hogy a vízszintkülönbségek (azaz atopográfiai hajtóerő) mellett egyéb hajtóerők (pl. kompaktió, tektonikus kompresszió, hőmérséklet- vagy sótartalom-különbségből adódó felhajtóerő) szerepével is számolni lehet, különösen az aktívan deformálódó üledékes medencékben (GARVEN 1995, INGBRITSEN et al. 2006, SIMMONS et al. 2001). Azonban ezek megértésében is alkalmazhatók a vízszintkülönbségek által vezérelt áramlási rendszerekre kidolgozott megközelítések és módszerek.

Napjainkban a modern hidrogeológia differenciálódása, azaz más tudományterületekre specializált ágazatainak (pl. olaj-, környezeti, öko-, városi, paleo-hidrogeológia) kialakulása (DEMING 2002) zajlik. De az elmélet fejlődése is nyomon követhető, így számos olyan tanulmány napvilágot látott az utóbbi években, amelyek a vízszintkülönbségek által vezérelt vízáramlási rendszerek mechanizmusainak és jellemzőinek jobb megértését célozták analitikus módszerekkel (pl. JIANG et al. 2011, WANG et al. 2017, ROBINSON & LOVE 2014) vagy a numerikus szimuláció eszközeivel (pl. GLEESON & MANNING 2008, CARDENAS & JIANG 2010, JIANG et al. 2010, ZHOU & LI 2011 stb.). Az elméleti fejlődés eredményeképpen mára a medencebeli vízáramlásokat földfelszín alatti energiaáramlási rendszereknek tekintik (ENGELEN 2013), azaz tágabb értelmezésben a transzport rendszerek közé sorolják (ZIJL 1999), melyek nagyobb viszkozitású folyadékáramlási rendszerekre szuperponálódnak (ZIJL 2019). E felismeréseknek köszönhetően a hidrogeológia a dinamikus folyamatok medenceléptékű megértésének korszakába lépett, követve a földtudományokban, a meteorológiában, az óceánológiában bekövetkezett fejlődést (BREDEHOEFT 2018).

A kérdéskör gyakorlati jelentősége

Mindennek a gyakorlati jelentősége különösen kiemelkedő napjainkban, amikor a felszín alatti vizek fontossága egyre nő a népességnövekedés és klímaváltozás nyomán kibontakozó globális vízválság révén. A medenceléptékű és az összefüggések megértésén alapuló hidrogeológia innovatív, rendszerszemléletű és fenntartható megoldásokat kínál (ld. IAH 2020) a szűk értelemben vett hidrológiai és hidrogeológiai kérdéseken, a vízkincsek felkutatásán és védelmén túl számos más területen is. Így környezetvédelmi, területtervezési, szikesedési, erdő- és mezőgazdasági, valamint ökológiai kérdések tudományos igényű kezeléséhez is. Ezen túlmenően új szemléletű megközelítéseket ígér a geotechnikai (pl. szén-dioxid-besajtolás), geotermikus, ásványfeltárási (pl. mélységi érckutatás) és szénhidrogén kutatási megoldásokhoz.

A magyarországi paradigmaváltás főbb lépései röviden

A hazai hidrogeológusok az 1950–1960-as években kezdték a kutakban mért vízszintadatok feldolgozását felszín alatti vízáramlási rendszerek térképezésére használni (SZEBÉNYI 1955, 1965; SCHMIDT ELIGIUS & ALMÁSSY 1962; URBANCSEK 1963; RÓNAI 1963). Ezek az empirikus tanulmányok felismerték a topográfiai magaslatok és mélyedések, a vízáramlás vertikális komponense és a hőmérséklet-eloszlás közti összefüggést, sekély mélységre (max. 400 m) korlátozódva.

TÓTH József professzor RÓNAI (1963) tanulmánya nyomán ismerte fel, hogy áramlási rendszer elmélete az Alföldre is alkalmazható. Kapcsolatfelvétele a magyarországi hidrogeológusokkal 1963-as, RÓNAI Andrásnak írott levelével kezdődött. Később már ERDÉLYI Mihály tartotta fontosnak, hogy elküldje TÓTHnak a Pannon-medence hidrodinamikájáról 1971-ben készült tanulmányának (ERDÉLYI 1976) kéziratát. Ebben mért adatok feldolgozásával igazolta TÓTH gravitációs vízáramlási rendszer modelljének fennállását az Alföldön, s egyúttal az alföldi kvarter vízadó és vízfogó képződmények egyetlen nagy rétegzett víztartó rendszerként történő viselkedését (levelezések adatait ld. MÁDL-SZŐNYI 2008). Keresztszelvényeinek logaritmikus skálájú vertikális tengelyével a sekélyebb mélységek gravitációs áramlási mintázatát hangsúlyozta. A mélységi túlnyomás eredetének és eloszlásának kérdéseivel azonban nem foglalkozott.

Az új, „rétegzett víztartó rendszer” avagy „hidraulikus folytonosság” szemléletet az 1970-80-as évektől többen alkalmazták (MARTON 2012) matematikai (HALÁSZ 1975), hidrogeológiai (RÓNAI 1975, 1985), kúthidraulikai (SZÉKELY 1977) és izotóphidrológiai (PAPP 1974, MARTON & MIKÓ 1989, STUTE & DEÁK 1989) alátámasztást szolgáltatva annak.

TÓTH József professzor 1994-től kapcsolódott be személyesen a hazai hidrogeológiai oktatásba és kutatásba. Az ELTE Általános és Alkalmazott Földtani Tanszékén, MÁDLNÉ SZŐNYI Judit vezetésével és TÓTH József személyes közreműködésével (ELTE, címzetes egyetemi tanár) elinduló képzés és iskolateremtés nyomán a hidrogeológiai csoport (2016 óta Tóth József és Erzsébet Hidrogeológia Professzúra) a 2000-es évektől már nemzetközi érdeklődésre számot tartó kutatásokat indított. Ezek mindegyike a Pannon-medence – mint természetes „kutatólaboratórium” – felszín alatti vízáramlási rendszereinek megértését célozta.

Az Alföld regionális áramlási rendszereinek, valamint a mélységi túlnyomás eredetének és eloszlásának vizsgálatára elsőként ALMÁSI (2001) PhD-dolgozatában és TÓTH & ALMÁSI (2001) publikációjában vállalkozott. Az egész Alföldre nagyjából 3000 m mélységig kiterjedően mintegy 16 000 folyadékpotenciál-adat szisztematikus medencehidraulikai feldolgozását végezték el. A hidraulikai adatfeldolgozás értelmezéséhez elsőként végezték el az Alföld neogén képződményeinek regionális hidrosztratigráfiai tagolását a következők szerint: Preneogén képződmények (hidraulikus vezetőképesség, $K=10^{-5}$ m/s), Prepannoniai Vízvezető (pannoniaiánál idősebb neogén képződmények, $K=10^{-6}$ m/s),

Endrődi Vízfogó (Endrődi Márga Formáció, $K=10^{-9}$ m/s), Szolnoki Vízvezető (Szolnoki Homokkő Formáció, $K=10^{-7}$ - 10^{-6} m/s), Algyői Vízfogó (Algyői Formáció, $K=10^{-8}$ - 10^{-7} m/s), Nagyalföldi Vízvezető (Algyői Formációnál fiatalabb képződmények, $K=10^{-5}$ m/s). Tanulmányukban két különböző hajtóerő által vezérelt folyadékáramlási rezsimit különítettek el. Egy felső, a földfelszín eleváció különbségei által vezérelt (gravitációs) rezsimit és egy, az előbbi hidraulikusan alátámasztó, tektonikai kompresszió által vezérelt (ALMÁSI 2003) (túlnyomásos) rezsimit. Megállapították, hogy a gravitációs rezsimit normál nyomásállapotú, regionálisan fedetlen, és csapadékból utánpótlódik, míg a kompressziós rezsimit túlnyomásos (1–35 MPa többletnyomás) és regionálisan fedettnek tekinthető. A két rendszer közti átmenet üledékes ablakokon és vezető vetőkön keresztül valószínűleg meg. Az azonosított folyadékpotenciál-anomáliák szénhidrogén csapadázódásban betöltött szerepét is elemezték (ALMÁSI 2001, TÓTH 2003).

Végeredményben ezek a nagyszabású, mért adatokon nyugvó munkák az új paradigma további hazai alkalmazási és fejlesztési lehetőségeinek útját is megnyitották számos hazai hidrogeológiai műhelyben. Többek között vízkémiai-izotóp-hidrogeológiai (VARSÁNYI 2000, VARSÁNYI & Ó. KOVÁCS 2009), geomatematikai (MARTON & SZANYI 2000), numerikus modellezési (SZANYI 2004), vízbázisvédelmi és geotermikusenergia-hasznosítási (TÓTH et al. 2016, SZŐCS et al. 2018) és számos, itt külön nem említett területen és munkában.

Jelen tanulmány céljaival összhangban a továbbiakban az ELTE hidrogeológiai kutatócsoportjának az elmúlt két évtizedben Magyarország területére vonatkozó, többnyire csak angol nyelven publikált medencehidraulikai eredményeinek szemelvényes bemutatására törekszünk. Ugyanakkor megjegyezzük, hogy bár itt nem térünk ki rá, de a hazai intézmények hidrogeológus kutatói ugyanebben az időszakban számos munkában és tanulmányban alkalmazták a medencehidraulikai közelítést és gazdagították a Pannon-medencére vonatkozó eredményeket. Kutatásaink bemutatását megelőzően a medencehidraulikai megközelítést és módszertant vázoljuk.

Medenceléptékű hidrogeológiai módszertan

Az alkalmazott módszertan rövid tárgyalására azért van szükség, mert a medencehidraulikai feldolgozásokban a víztartó rétegekre használt („artézi”) megközelítéshez képest eltérő módon, a hidraulikus folytonosság elvéből kiindulva végezzük az elemzéseket. Ennek értelmében minden kőzetnek van valamennyi permeabilitása, így medenceléptékben nem számolhatunk tökéletes vízzárók jelenlétével (DEMING 2002), csak a modellezések során (matematikai értelemben) a határfeltételek megadásánál. Így a medenceléptékű vizsgálatokban a cél a víz útjának megismerése. Ez pedig a medencét felépítő vízvezető és vízfogó egységek hidraulikai kapcsolataitól függ. Mindezekből az is következik, hogy medenceléptékű (terület: 1000–10 000 km², mélység: több 1000 m) összefüggések hatást gyakorolnak nemcsak a

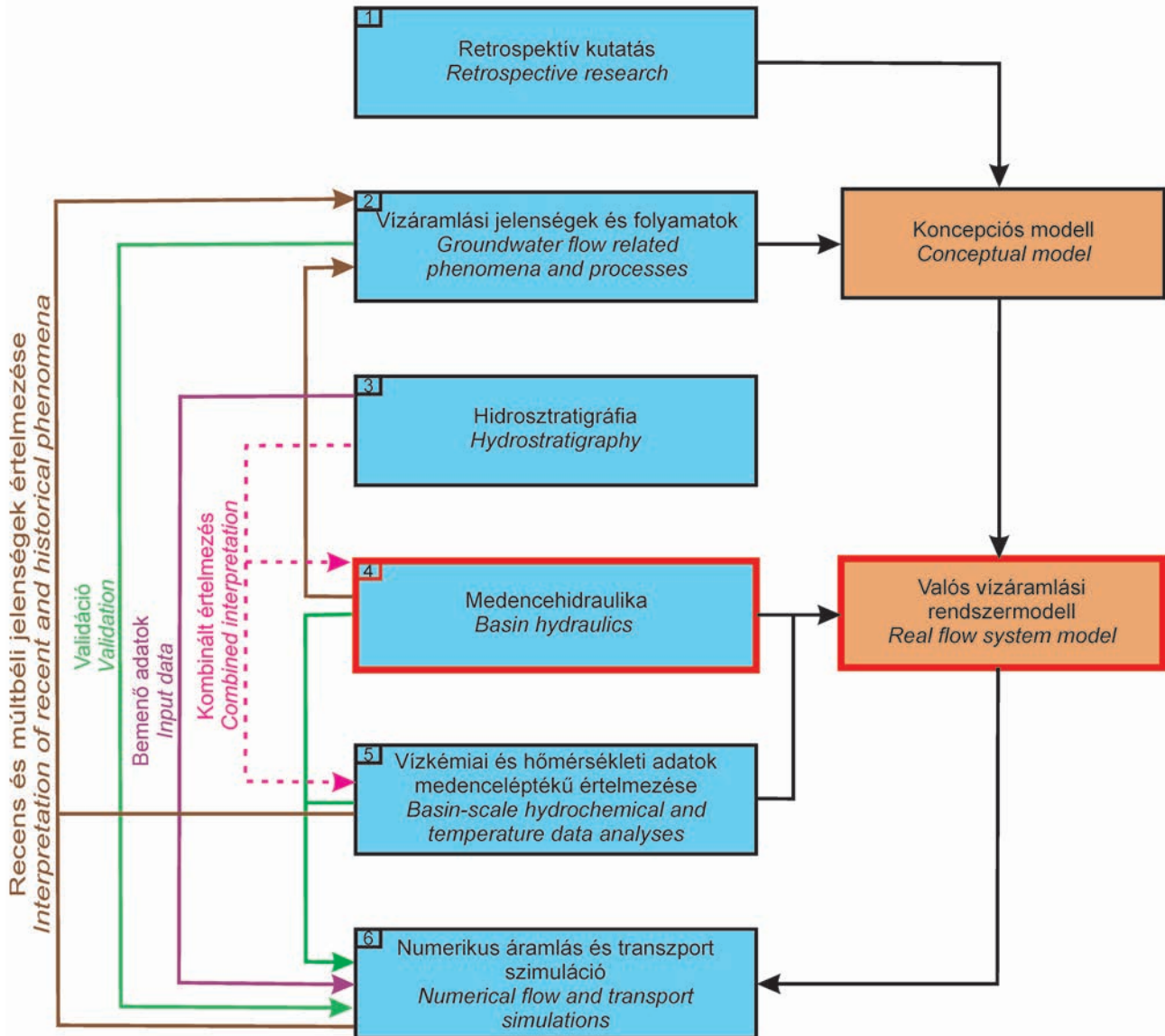
regionális léptékű, de a felszín alatti vizek lokális folyamataira is. Így lokális kérdéseket is célszerű a medenceléptékű kutatás eredményeibe ágyazva értékelni.

Egy munkafolyamatot dolgoztunk ki a felszín alatti víz-áramlási rendszerek medenceléptékű vizsgálatára (3. ábra). Ez részben TÓTH (2009) módszertánán alapul, melyet saját kutatási tapasztalataink alapján továbbfejlesztettünk. A tapasztalatokon nyugvó kutatási munkafolyamat az elvégzett fázisok visszacsatolásai révén újraindítható. Ezzel biztosítja a hipotézisek, adatfeldolgozások és modellek, és ezáltal a kutatási eredmények folyamatos fejlesztését és megújítását. A munkafolyamat alapsémája további módszerekkel és kimenetekkel bővíthető.

A munkafolyamat első lépéseként a víz-áramlási rendszerekhez kapcsolódó földtani és környezeti jelenségek és folyamatok retrospektív (3. ábra/1) és jelenlegi állapotának (3. ábra/2) vizsgálata zajlik, ami megalapozza az előzetes „hipotézis vagy koncepcionális víz-áramlási modellt”. A következő lépés a hidrosztratigráfiai értelmezés (3. ábra/3). A munkafolyamatban a legnagyobb hangsúllyal szereplő központi elem a kutakban mérhető hidraulikai adatok medenceléptékű, azaz medencehidraulikai elemzése (3. ábra/4), melyet kiegészíthet a kutak vízkémiai és hőmérsékleti adatainak feldolgozása (3. ábra/5). A medencehidraulikai eredményeket a hidrosztratigráfiával kombinálva felállítható a „valós víz-áramlási rendszermodell”. Ezt úgy értelmezhetjük, mint az adott terület víz-áramlási rendszereit az elérhető valós adatok háromdimenziós medencehidraulikai feldolgozása és rendszerszerű értelmezése alapján leíró modellt. A kezdeti „hipotézis vagy koncepcionális modell” a medencehidraulikai értelmezés „valós víz-áramlási rendszermodellje” által nyerhet megerősítést vagy akár cáfolatot. A vízkémiai és hőmérsékleti adatfeldolgozás (3. ábra/5) eredményei visszacsatolhatók a víz-áramlási rendszerek által előidézett jelenségekhez, így az 1. és 2. lépésben (3. ábra/1,2) értékelt jelenségekkel együtt a „valós víz-áramlási rendszermodell” révén nyerhetnek értelmezést. De megfordítva felhasználhatók recens és múltbéli, a víz-áramlásokhoz köthető jelenségek értelmezésére (például a nyersanyag és geotermikus energia kutatásában). Végül a numerikus áramlás és transzport modellezés (3. ábra/6) a valós rendszer ismerete és megértése, azaz a medencehidraulikai elemzés után következhet, mivel annak absztrakciójaként tekinthető. Ez az absztrakció teszi lehetővé a medenceléptékben meghatározó folyamatok megragadását a numerikus szimuláció révén. De látjuk a 3. ábra alapján, hogy bemenő adatait és validációját a munkafolyamat során felállított és értelmezett adatrendszerekből nyeri.

Retrospektív kutatás, víz-áramlási jelenségek és folyamatok

A felszín alatti víz-áramlási rendszerek felszínen nyomonkövethető környezeti következményeinek (hidrológiai, talajtani, növénytani, szállítási, felhalmozási, geomorfológiai stb. jelenségek (TÓTH 1999)) vizsgálata egyrészt a jelenségek és folyamatok recens terepi lenyomatainak térképezés-



3. ábra. A felszín alatti vízáramlási rendszerek medenceléptékű vizsgálatának munkafolyamata (MÁDLNÉ SZÖNYI 2019 nyomán módosítva)

Figure 3. Workflow for the basin-scale analysis of groundwater flow systems (after MÁDLNÉ SZÖNYI 2019)

sén alapul (3. ábra/2). De magában foglalja a retrospektív vagy történeti dokumentumokon (katonai térképek, levéltári anyagok stb.) alapuló visszatekintő kutatást is (ENGELEN & KLOOSTERMAN 1996) (3. ábra/1). Utóbbi célja a felszín alatti vizek kvázi „természetes”, emberi befolyástól (pl. víztermelések által okozott depresszió) mentes állapotának rekonstruálása, ezáltal a vízáramlási rendszerek természetes működési mechanizmusának megismerése.

Hidrosztratigráfia

A kőzetváz hidrosztratigráfiai jellemzése (3. ábra/3) annak litológiájától függ, így medenceléptékben a litosztratigráfiai egységek egyúttal hidrosztratigráfiai egységként is kezelhetők. A tagolás során a cél a kőzetváz vízvezető és vízfogó képződményeinek elkülönítése (MAXEY 1964), e-

zért medenceléptékben a hasonló hidraulikai viselkedésű (hidraulikus vezetőképességű és permeabilitású) képződményeket összevonjuk (TÓTH 1978). Fontos megjegyezni, hogy a vízkémiai és hőmérsékleti jellemzők nem tartoznak a hidrosztratigráfiai értékelésbe a definíció értelmében. Szintén fontos kiemelni, hogy a hidrosztratigráfia közvetlenül nem része a hidraulikai adatfeldolgozáson nyugvó elemzésnek (3. ábra/4). Azonban a 3. ábra értelmében segítséget nyújt a „valós vízáramlási rendszermodell” felállításához. A hidrosztratigráfia ugyanis genetikusan befolyásolja a folyadékpotenciál eloszlását (TÓTH 2009a), mivel a folyadékpotenciál térben észlelhető anomáliák, rendszerint földtani heterogenitások (azaz jelentősebb permeabilitásváltozások, pl. záró vetők) jelenlétére vezethetők vissza (pl. ROSTRON & TÓTH 1996; ALMÁSI 2001; TÓTH 2003, 2009a; CZAUNER & MÁDL-SZÖNYI 2011, 2013; MÁDLNÉ SZÖNYI 2019a). Ezek

vizsgálata céljából a hidrosztratigráfiai értelmezést úgy kombináljuk a medencehidraulikai módszerekkel, hogy a profilokon, térképeken és szelvényeken a hidraulikai adatok mellett a hidrosztratigráfiai felépítést is feltüntetjük. Emiatt az adatfeldolgozáson nyugvó medencehidraulikai munkák esetén – figyelembe véve az elérhető hidraulikai adatmennyiséget és adateloszlást – a nagyobb léptékű heterogenitásokat hangsúlyozó litosztratigráfiai tagolás és regionális szerkezeti helyzet többnyire elegendő alapot nyújt a hidraulikai és a kapcsolódó értelmezésekhez. Ugyanakkor a medenceléptékű kiinduló és egyre részletesebb numerikus modellezések a hidrosztratigráfiai feldolgozás finomítását igénylik (MÁDL-SZŐNYI & TÓTH 2009, BALOGH 2016, KAPILLER 2016). Ezekben ugyanis a hidraulikus vezetőképesség-értékek már bemenő paraméterként szolgálnak az áramlási irányok és intenzitások meghatározásához.

Medencehidraulika

A hidraulikai kútdatok medenceléptékű, azaz medencehidraulikai elemzése (3. ábra/4) során a teljes vizsgált területet a felszíntől a medencealjzatig (beleértve a víztartókat és vízfogókat is) egységesen kezeljük és értékeljük. Itt a cél a stacioner áramlási tér feltérképezése, ugyanis az áramképek ennek megjelenítésére alkalmasak. Ezért a vízkutak és szénhidrogén-kutató fúrások eredeti kútdokumentációban rögzített, létesítéskor mért vízszint, illetve pórusnyomás adatait elemezzük, mivel ezek tükrözik leginkább a „kvázi természetes”, azaz fluidumtermelés előtti állapotot. Magyarországon az 1970-80-as évektől kezdődő intenzív vízkivétel előtti állapot tekinthető „kvázi természetesnek” a vízszintek szempontjából. Fontos megjegyezni, hogy mivel ezek a kútdatok különböző időpontokból származnak, így a stacioner áramlási tér értelmezhetőségéhez feltételezzük, hogy a hidraulikus emelkedési magasság változásainak különbségei (Δh) az adott léptékben vizsgálva beleférnek a medenceléptékű probléma hibahatárába. A körütekintő adatszűrés követő hidraulikai számításokhoz (hidraulikus emelkedési magasságok átszámítása pórusnyomás-adatokká és fordítva) meg kell határozni egy átlagos vízszűrősség-értéket, mivel a különböző pontokra meghatározott folyadékpotenciál-értékek csak azonos sűrűséggel számítva hasonlíthatók össze (HUBBERT 1940, LUSZYNSKI 1961). Számításaink és regionális kutatási tapasztalataink szerint az 1000 kg/m³ vízszűrősség alkalmazható a Pannon-medencében. CZAUNER (2012) számításai rámutattak, hogy a magas geotermikus gradiens (50 °C/km) és a relatíve alacsony (max. 40 g/l) oldottanyag-tartalom hatása nagyjából kiegyenlíti egymást. A kimutatható eltérések a medencehidraulikai feldolgozás szempontjából elhanyagolhatóak (CZAUNER & MÁDL-SZŐNYI 2013, ERHARDT et al. 2017).

A hidraulikai adatok medenceléptékű megjelenítésének és elemzésének módjai közül három tekinthető alapvetőnek. Ezek a nyomás vs. eleváció profilok [$p(z)$], tomografikus potenciál térképek [$h(x,y)$], és hidraulikus kereszt-szelvények [$h(s,z)$]. A $p(z)$ profilokon a nyomásrezsím (közel hidrosztatikus, túlnyomásos vagy alulnyomásos) és az adatpon-

tokra illeszthető vertikális nyomásgradiensek (γ) értékelhetők az egyensúlyi, hidrosztatikus értékhez képest. Utóbbi határozza meg a hajtóerő vertikális komponensének irányát: a szuperhidrosztatikus vertikális nyomásgradiens feláramlást, a szubhidrosztatikus leáramlást jelez, míg a közel hidrosztatikus érték a vertikális komponens (és nem a hajtóerő, avagy áramlás) hiányára utal. Ezen túl a nyomásrezsím és a vertikális nyomásgradiens mélységgel történő változásainak mértékéből és jellegéből következtetni lehet a kőzetváz heterogenitásainak hidraulikai szerepére is (CZAUNER & MÁDL-SZŐNYI 2013, ERHARDT et al. 2017, MÁDLNÉ SZŐNYI 2019a; CSONDOR et al. 2020). Ezért érdemes a profilokon a hidrosztratigráfiai felépítést is jelölni.

A víztartóléptékben készülő „hagyományos” potenciométrikus térkép definíció szerint egy horizontális és fedett víztartóra szerkeszthető, ez a kritérium azonban ritkán teljesül a valóságban (dőlt rétegek, szerkezeti tagoltság miatt), ami igaz a Pannon-medencére is. Ezzel szemben a medencehidraulikai megközelítés szerint a tomografikus potenciál térkép egy adott elevációtartományban mért hidraulikus emelkedési magasság értékeinek (vízszintes, X-Y síkban történő) kontúrozásával állítható elő (ALMÁSI 2001). A tomografikus térképeket egymás alatti eleváció intervallumokra (a kutak szűrőközép-értékei mint mérési pontok eleváció szerinti eloszlása alapján) szerkesztjük, és míg az egyes térképeken a hajtóerő horizontális komponensét lehet meghatározni, addig az egymás alatt következő térképek összehasonlításával a vertikális áramlási komponensekre lehet következtetni. (A hajtóerő-vektorokat az egyszerűség kedvéért áramlási irányként jelöljük.) A módszer másik előnye, hogy indirekt módon lehet következtetni a szerkezetek és vízfogó képződmények hidraulikai viselkedésére az általuk okozott folyadékpotenciál- anomáliák alapján. Ezért érdemes a tomografikus potenciál térképekével azonos eleváció intervallumokra hidrosztratigráfiai térképeket (szerkezeti elemekkel kiegészítve) is készíteni (MÁDL-SZŐNYI et al. 2019). A függőleges és lehetőleg a hidraulikus gradiens irányának megfelelő síkban szerkesztett hidraulikus kereszt-szelvényeken a szelvény síkjába eső vertikális és horizontális hajtóerő komponensek értelmezhetők, míg az azonos nyomvonalon szerkesztett hidrosztratigráfiai és a szerkezeteket is bemutató szelvények nagyban segítik az értékelést.

Vízkeimiai és hőmérsékleti adatok medenceléptékű értelmezése

A medencehidraulikai értelmezést érdemes a kutakból származó vízkémiai és hőmérséklet adatok értékelésével is kiegészíteni (3. ábra/5), mivel ezen paraméterek eloszlását a felszín alatti vízáramlások, mint földtani hatótényezők, alapvetően befolyásolják. Annak érdekében, hogy az elemzések összevethetőek legyenek a hidraulikai értelmezéssel, lehetőleg itt is létesítéskori adatokat használunk, és ugyanazon adatfeldolgozási módszereket alkalmazzuk, mint a hidraulikai adatoknál (elevációprofilok, tomografikus térképek, kereszt-szelvények), lehetőleg azonos területekre, eleváció intervallumokra és szelvény nyomvonalakra. Ezek

mellett a „hagyományos” módszerek (Stiff-diagram, STIFF 1951), Piper-diagram (BACK 1966), vízkémiai fáciések meghatározása stb.) alkalmazása is célravezető lehet. Fontos azonban megjegyezni, hogy a felszín alatti víz kémiai jellege, izotópos összetétele vagy kora nemcsak a vízáramlási rendszerek jellemzőitől (pl. rezsimjelleg, rendűség) függ, hanem a földtani környezettől (pl. kőzetösszetétel), az éghajlattól és a keveredési folyamatoktól is. Ezért csupán ezen paraméterek alapján nem lehet a valós „vízáramlási rendszermodell” felállítani, legfeljebb koncepciók modell alkotható.

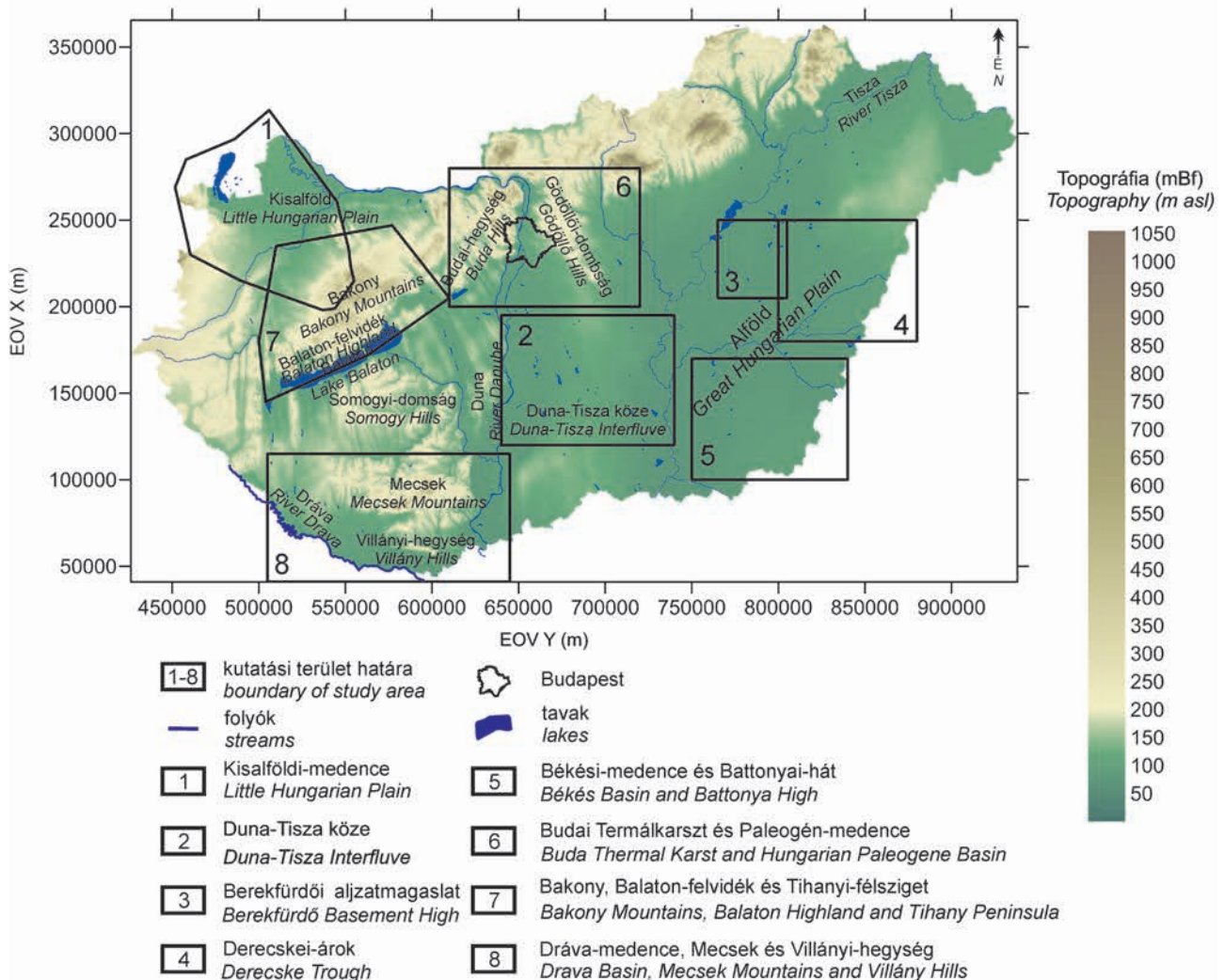
Numerikus áramlás és transzport szimuláció

A „valós vízáramlási rendszermodell” megalkotása után következhet a felszín alatti vízáramlási tér kvantitatív (numerikus) térbeli szimulációja (3. ábra/6). Ennek célja a felszín alatti vízáramlási rendszerek működésének, fizikai folyamatainak megértése, ami megalapozza a kvantitatív értékelést. Az ilyen jellegű modellezésekhez koncepciók hátteret, permfeltételeket és validációs lehetőséget nyújt a

„valós vízáramlási rendszermodell”. Ugyanakkor a medencehidraulikai vizsgálatok és eredmények, valamint a medenceléptékű vízáramlási és transzport modellezés együttesen segít számos vízáramláshoz köthető jelenség recens és geológiai időskálán történő értelmezésében (3. ábra). Érdekes még megjegyezni, hogy míg a medencehidraulikai elemzések célja a hajtóerőtér feltérképezése (3. ábra/4), addig az áramlási intenzitások és irányok egzakt értékelése csak a numerikus modellezéssel lehetséges.

Eredmények az ELTE-n

A következőkben a Magyarország területének jelentős részét lefedő (4. ábra) medenceléptékű kutatásaink összegzett eredményeit mutatjuk be. A hangsúlyt nem annyira a konkrét eredményekre, mint inkább a medencehidraulikai megközelítés szemléltetésére helyezzük. A változott témakörökben további részletek a hivatkozott publikációkban olvashatók.



4. ábra. A bemutatott kutatási területek elhelyezkedése Magyarországon

Figure 4. Position of the presented study areas

Kisalföldi-medence

Az első medenceléptékű hidrogeológiai kutatásokat az OVF (Országos Vízügyi Főigazgatóság) megbízásából – vízbázisvédelmi intézkedések megalapozása céljából – végeztük a Kisalföldi-medence magyarországi részére vonatkozóan (4. ábra) (PETHŐ et al. 2004). Ennek során igazolást nyert vízkutatási célú kutak hidraulikai adatainak feldolgozásával a Kisalföldi-medence rétegösszleteinek hidraulikus folytonossága és a gravitációs, azaz felszíni topográfia által vezérelt áramrendszerek működése –1000 mBf (méter a Balti-tenger szintje felett) elevációig. E csapadékból utánpótlódó vízáramlási rendszerek beáramlási területei a medence peremén fekvő dombok és előtereik, míg ezek irányából a víz a medence belsejében fekvő kiáramlási területek felé áramlik. Azonban a –1000 (–1800) mBf eleváció intervallumban változás tapasztalható, ahol a medence mély, központi részein jelentkeznek a legnagyobb hidraulikus emelkedési magasság értékei. A kimutatott túlnyomás magyarázatával a kutatás nem foglalkozik, de jelentkezési helye és szintje kijelöli a gravitációsan vezérelt vízáramlási rendszerek alsó határát. A feldolgozás egyúttal igazolta a kisalföldi Duna-szakasz mentén a beáramlási (felső Szigetköz) és a kiáramlási területek (alsó Szigetköz) folyó menti megjelenését, ami a folyó és a felszín alatti vizek kapcsolatának (rátápláló, illetve megcsapoló) megváltozását medencehidraulikai feldolgozással bizonyítja. Továbbá rámutatott arra is, hogy erre az eltérő, de permanens hidraulikai kapcsolatra szuperponálódik a Duna vízszintváltozásából adódó tranzienst hatás.

Duna–Tisza köze

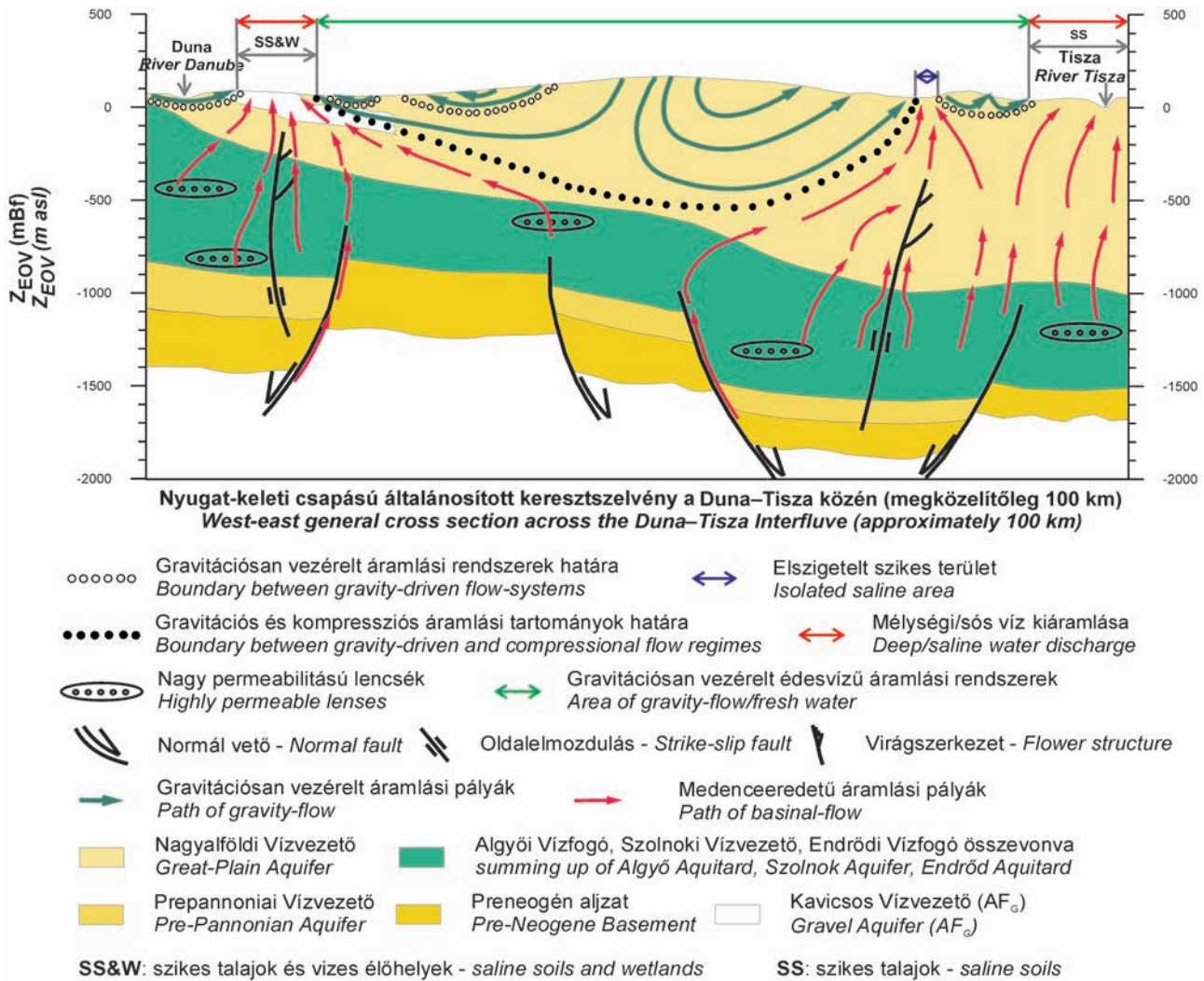
Az alföldi részterületek kutatásának ALMÁSI (2001) és TÓTH & ALMÁSI (2001) az Alföldre kiterjedő medencehidraulikai tanulmánya biztosított hátteret. E tanulmányok sorozata szemlélteti, hogy a medencehidraulikai kutatások növekvő léptékben és csökkenő területre végezve a vízáramlási rendszerek szisztematikus és egyre alaposabb megértését teszik lehetővé. A Duna–Tisza közti tanulmányokat a Duna-völgyben a folyóval közel párhuzamosan megfigyelt magas TDS (összes oldott anyag) tartalom, valamint a vízszintben megmutató kémiai sokszínűség, „foltosság” okainak kutatása inspirálták (KUTI & KÓRÖSSY 1989). A kérdés az volt, hogy mi lehet az oldottanyag-tartalom forrása és annak felszínközeli elosztási mechanizmusa. Továbbá ennek összefüggése a felszínközeli szikesedési jelenségekkel (szikes talajok), a tavak, vizenyős területek elhelyezkedésével, jellegével és vizük sótartalmával. A Duna–Tisza köze középső részére (4. ábra) e kérdések megválaszolása érdekében egy OTKA-kutatás keretében végeztük el a medencehidraulikai elemzést és értelmezést, melyet kiegészítettük a kutakból rendelkezésre álló vízkémiai adatok (TDS, Na⁺, K⁺, Cl⁻) feldolgozásával. A feltett kérdésekre adott választ és a medenceléptékű kutatás eredményeit a 'Duna–Tisza köze hidrogeológiai típusszelvénye' formájában összegeztük (5. ábra) (MÁDL-SZŐNYI & TÓTH 2009).

Vízáramlási rendszerek és a szikesedési mintázat

Az eredmények megerősítették ALMÁSI (2001) valamint TÓTH & ALMÁSI (2001) felismeréseit az Alföld két különböző, de egymással hidraulikai kapcsolatban álló áramlási tartományát illetően. A gravitációsan (a talajvízszint magasságkülönbségei által) mozgatott, csapadék eredetű vizek felső áramlási tartományát alátámasztja egy túlnyomásos tartomány (ennek vízkészletei nem utánpótlódók). A két eltérő eredetű vízrendszer közötti hidraulikai kapcsolat a neogén Endrődi és Algyői Vízfogókon – mint regionális kiterjedésű vízrekesztőkön – keresztül szerkezeti elemeken és nagy permeabilitású homokkőlelencséken keresztül valósul meg. A két tartomány vizeinek oldottanyag tartalma is jelentős különbséget mutat: a gravitációs rendszerben TDS = 420–2 500 mg/L (vízkémiai fációs: Ca, Mg(HCO₃)₂ típus), míg a túlnyomásos rendszer vizeiben a TDS = 10 000–38 000 mg/L (vízkémiai fációs: NaCl típus). A mélységi, nagy sótartalmú vizek feláramlását a teljes vizsgálati területen kimutattuk, melynek lehetséges forrása a preneogén aljzat, míg a preferált áramlási pályát az aljzattól induló és felszínközeli nyúló vetőrendszerek biztosítják. Erre a regionális feláramlásra szuperponálódik a felszíntől nagyjából 500 m mélységig a meteorikus vizek gravitációs áramlási tartománya, amelynek beáramlási területe a Duna–Tisza közti hátság. Innen a kelet és nyugat felé tartó gravitációs áramlások hierarchikus rendszereket formálnak (lokális, intermedier és regionális), a mélységből feláramló vizeket is eltérítik ezekben az irányokba, így azok csak keveredve tudnak megcsapolódni a hátsági gravitációs kiáramlási területektől (lokális és intermedier) nyugatra és keletre (5. ábra).

Ez az áramlási mintázat magyarázatul szolgál a hátság menti, nagy kiterjedésű vizenyős területek (gravitációs áramlások lokális és intermedier kiáramlási területei) és az azoktól nyugatra és keletre elhelyezkedő szikes területek (a mélységi eredetű, magas oldottanyag-tartalmú és a meteorikus eredetű regionális áramlási rendszerek kevert vizeivel) elhelyezkedésére. A preneogén medencealjzat a Duna-völgyi szikesek zónájában közelíti meg leginkább a felszínt, továbbá a felszín közelében található, folyóvízi kavicsréteg is segít a mélységi eredetű, magas oldottanyag-tartalmú vizek és a hozzá keveredő gravitációsan mozgatott vizek észak-déli csapás mentén történő felszínre jutásának. Ez magyarázatul szolgál a vízszintben a magas oldottanyag-tartalmú sávok relatíve éles határára a Duna-völgyben. A szikes zóna a Tisza-völgyben inkább foltoszerűen, kevésbé élesen jelentkezik hidrosztratigráfiai okok és a preneogén aljzat nagyobb mélysége miatt. Fontos megjegyezni, hogy a megcsapolódó mélységi és a meteorikus eredetű vizek energiája (folyadékpotenciálja) a Nagyalföldi Vízvezetőbe jutva hasonló nagyságrendű. Ennek oka, hogy a mélységi túlnyomás disszipálódik az Endrődi és Algyői Vízfogókon történő átáramlás során, így a medence eredetű vizeket csak kémiai jellegük különbözteti meg a gravitációs rendszerek meteorikus vizeitől.

A hipotézismodell, az adatfeldolgozás és a „valós vízáramlási rendszermodell” kialakítását, valamint a kapcsolható hidrológiai, vegetációs és szikesedési jelenségek meden-



5. ábra. A 'Duna-Tisza köze hidrogeológiai típus szelvénye' (MÁDL-SZŐNYI & TÓTH 2009)

Figure 5. The Duna-Tisza Interfluve Hydrogeological Type Section (MÁDL-SZŐNYI & TÓTH 2009)

celéptékű feldolgozását követően készült numerikus modellezés (COMSOL Multiphysics) alátámasztotta a medencehidraulikai értelmezés során feltárt hajtóerőteret és a módszertan létjogosultságát. Továbbá a hőtranszport-modellzés kimutatta az advektív hőszállítás szerepét is a területen (BALOGH et al. 2017a,b).

A Duna–Tisza közti kutatások alapvető jelentőségükön túl felhívták a figyelmet a Víz Keretirányelv végrehajtása kapcsán a felszíni és felszín alatti víztestek lehatárolása során felmerülő kérdésekre (PADISÁK et al. 2006). Az eredményeik felhasználhatók a Duna–Tisza közti vízellátási problémák kezelése, a mezőgazdasági területhasználat megtervezése, szikes talajok javítása, a lápok és szikes tavak védelme során.

Az Ágasegyházi-, Kolon- és Kelemenszék-tó hidraulikai viszonyai és annak következményei

A regionális elemzés mellett lokális léptékű kutatások is zajlottak a Duna–Tisza közén három tó és a felszín alatti vizek kapcsolatának feltárása céljából. Itt is a kvázi természete-

tes állapotot reprezentáló retrospektív kutatásokból indulunk ki. A megközelítőleg azonos kelet-nyugati vonalba és egymástól nagyjából 11–15 km-re eső Ágasegyházi-, Kolon- és Kelemenszék-tó eltérő hidraulikai viszonyai (beáramlási, átáramlási és kiáramlási hidraulikai helyzet), valamint a kapcsolódó felszíni és felszínközeli jelenségek (talajtípusok, vegetáció) alátámasztják a mélységi feláramlás és a gravitációs áramlási rendszerek medencehidraulikai értelmezés során feltárt mintázatát, és lehetővé teszik azoknak a tavak környezetében történő értelmezését (ZSEMLE et al. 2002, MÁDLNÉ SZŐNYI et al. 2005). A legnyugatabbra eső Kelemenszék-tó környezetében végzett átfogó kutatások bizonyították, hogy a Kelemenszék egy feláramló felszín alatti vizekkel táplált tó (azaz FAVÖKO vagy felszín alatti víztől függő ökoszisztéma), amely a Duna-völgyi szikesek zónájába tartozó „hidraulikai ablakban” található, ahol a mélységi eredetű, magas oldottanyag-tartalmú feláramlás meteorikus eredetű vizekkel keveredve, koncentráltan jut felszínre (MÁDLNÉ SZŐNYI et al. 2005; CZAUNER et al. 2008; SIMON et al. 2008, 2011).

Geotermikuspotenciál-értékelés

A medencehidraulikai feldolgozás eredményei geotermikuspotenciál-értékelésre is használhatók. Ennek módszertanát a Duna–Tisza közti kutatási eredmények alapján dolgozta ki MÁDL-SZŐNYI & SIMON (2016). Később az eredményeket MÁDLNÉ SZŐNYI (2019b) a Budai Termálkarsztra is adaptálta. A módszertan a „természetes geotermikus rendszer” elemeit (hő, megfelelő tározó kőzet, fluidum, DICKSON & FANELLI 2013) medenceléptékben értékeli, kiegészítve azt a hidraulikai, azaz a víztartó és a vízfogó rétegek között fennálló összefüggések megismerésével. Az 1993. évi XLVIII. törvény a bányászatról jelenleg a 2500 m-es felső mélység határral definiálja a zárt, koncesszió alá eső geotermikus rendszereket (melyekbe a kizárólag energetikai célra használt termálvíz visszasajtolása kötelező). Továbbá elkülöníti a fölötté lévő nyitott tározókat. Ezzel szemben a regionális nyomásrészes mért adatokra alapozott (medencehidraulikai) feltárása lehetőséget kínál a geotermikus készletek – mélységtől független – zárt és nyitott jellegének, valamint a visszasajtolás előzetes hidraulikai értékelésére (MÁDL-SZŐNYI & SIMON 2016, MÁDLNÉ SZŐNYI 2019b). A regionálisan fedetlen gravitációs áramlási tartomány nyitott tározónak tekinthető és a csapadék utánpótlás mértékében termelhető. Besajtolás szempontjából az át- és kiáramlási területeken kisnyomású besajtolás lehetséges, míg a beáramlási területeken energia befektetés nélkül üzemeltethető nyelő kút. Ezzel szemben a túlnyomásos tározók esetében nem számolhatunk természetes utánpótlással (a termelés a víz és a kőzetváz rugalmas tulajdonságainak, azaz a fajlagos tározás függvénye), ezért ezek zártnak tekinthetők és csak (nagynyomású) visszasajtolás mellett termelhetők. Az alulnyomásos tározók szintén zártnak tekinthetők abból a szempontból, hogy az alulnyomás és az utánpótlás hiánya miatt nem termelhetők, ellenben nyelő kút energiabefektetés nélkül üzemeltethető. Fontos megjegyezni, hogy az értékelési séma nemcsak a geotermikus készletekre, hanem általában a fluidumkészletek (felszín alatti víz, szénhidrogén) termelhetőségére és visszasajtolási lehetőségeire (víz, CO₂-elhelyezés) is vonatkoztatható.

Berekszentmiklósi aljzatmagaslat, Derecskei-árok, Békési-medence, Battonyai-hát

A medencehidraulikai megközelítés a szénhidrogén-földtani kutatásokban is hasznos, a gyakorlatban rutinszerűen nem használt megközelítéssel szolgál. A K- és DK-Alföldön a MOL Nyrt. támogatása mellett végzett medencehidraulikai kutatásaink a vetők és alacsony permeabilitású képződmények – különösen az Algyői Vízfogó – felszín alatti folyadék áramlási rendszerekben és szénhidrogén-csapadékosztásban betöltött szerepére összpontosított.

Szerkezeti elemek lokális hidraulikai szerepe

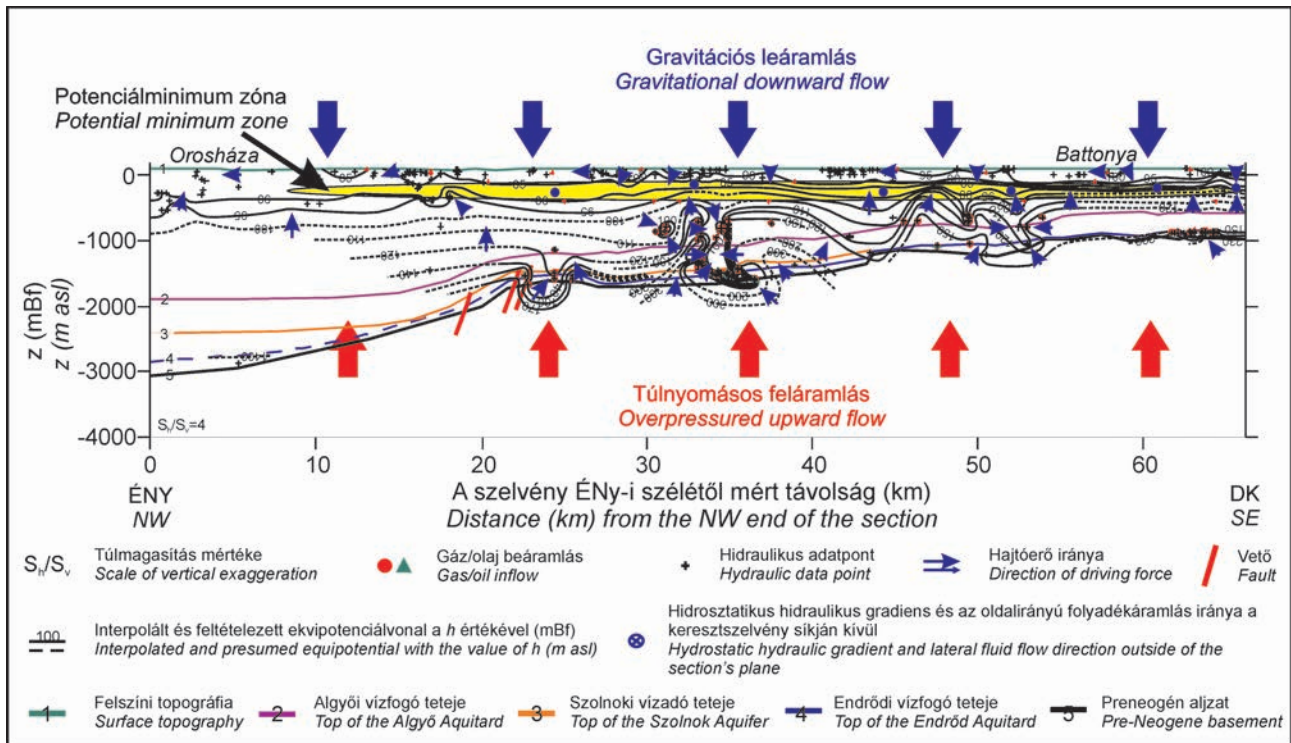
Ennek a kutatásnak előfutára volt egy jóval kisebb terület lokális vizsgálata, ahol a vetők hidraulikai szerepének tisztázása volt a cél a preneogén aljzatmagaslat fölötti termálvíz (Berekszentmiklósi) és szénhidrogén (Kunmadarasi földgázmező) előfordulás létrejöttében (4. ábra). Az elvégzett

szeizmikus, medencehidraulikai és kapcsolódó vízkémiai elemzések kombinált értelmezése feltárta az aljzatmagaslatot határoló oldalelmozdulási zónák irányonként változó hidraulikai szerepét és hozzájárulását a gázfelhalmozódáshoz, valamint a vetőkereszteződésben a „Pávai-Vajna-féle” egykori termálvízfeltáráshoz (CZAUNER et al. 2008, CZAUNER & MÁDLNÉ SZŐNYI 2008, CZAUNER & MÁDL-SZŐNYI 2011).

Szerkezeti elemek és kis permeabilitású képződmények regionális hidraulikai szerepe

A Derecskei-árok, Békési-medence és Battonyai-hát területén (4. ábra) a vetőrendszereknek és az alacsony permeabilitású képződményeknek a mélységi túlnyomás lecsengésében (disszipálódásában) játszott regionális hidraulikai szerepét elemeztük, különös tekintettel a szénhidrogén csapadékosztás feltételeire (CZAUNER & MÁDL-SZŐNYI 2013). A víz és szénhidrogén kutak adatainak bevonásával végzett medencehidraulikai és olajhidrogeológiai értelmezés, valamint a kapcsolódó vízkémiai és hőmérsékleti adatfeldolgozás eredményeként itt is sikerült azonosítani a gravitációs áramlási tartományt és annak különböző rezsimszerű területeit. Továbbá kimutattuk az ezt hidraulikusan alátámasztó túlnyomásos rendszert, amelyben a feláramlás dominál. A két tartomány hidraulikai elkülönítése ott volt lehetséges, ahol a túlnyomásos rendszer feláramlása a gravitációs tartomány beáramlási területei alatt azok lefelé irányuló áramlásaival találkozott. Az ilyen összetartó vertikális áramlások zónáit folyadékpotenciál-minimum jellemzi, ami hidraulikus csapadékosztás szolgálhat a felszín alatti víz által szállított anyagok számára (TÓTH 1980). Mivel a kutatás a szénhidrogénekre koncentrált, így azok vertikális migrációjának felső határaként definiáltuk ezeket a folyadékpotenciál-minimum zónákat a Derecskei-árok északkeleti részén, illetve a Battonyai-hát mentén (6. ábra).

A kutatás a hidrosztratigráfiai egységeket tekintve megerősítette, hogy a Nagyalföldi Vízevezető medenceléptékben megközelítőleg hidrosztatikus nyomásállapotú ($\gamma = 9,81 \pm 0,5$ MPa/km, ezen belül gravitációs fel- és leáramlások működnek). Ugyanakkor a Prepannóniai és Preneogén Vízevezetők erősen túlnyomásosak (a túlnyomás mértéke a 200%-ot is meghaladhatja). Eközben a vertikális nyomásgradiens csak enyhén szuperhidrosztatikus, ami vízevezető jellegükre és a laterális áramlás dominanciájára utal. Ezzel szemben a közbeeső Endrődi Vízfogó, Szolnoki Vízevezető és Algyői Vízfogó területenként változó nyomásviszonyokat, de jellemzően szuperhidrosztatikus vertikális nyomásgradienseket (akár >20 MPa/km) mutat. Ebből következik, hogy ennek a három egységnek és különösen az Algyői Vízfogónak a szerkezeti és üledékföldtani heterogenitásai határozzák meg a túlnyomás lecsengésének módját a Nagyalföldi Vízevezető irányába. Mivel e heterogenitások igen gyakran egybeesnek folyadékpotenciál, hőmérsékleti és vízkémiai anomáliákkal, valamint szénhidrogén-felhalmozódásokkal, ezért diagnosztikus összefüggést lehetett kimutatni a jelenségek együttes előfordulása közt. Kapcsolatrendszerükben a geológiai felépítésnek a túlnyomás lecsengésében játszott szerepe bizonyult meghatározónak. Fontos



6. ábra. Hidraulikus keresztmetsvény a Battonyai-hát mentén a feltárt felszín alatti vízáramlási rendszerekkel és a folyadékpotenciál-minimum (hidraulikai csapda) zónával (CZAUNER & MÁDL-SZŐNYI 2013)

Figure 6. Hydraulic cross-section along the Battonya High with the interpreted groundwater flow systems and fluid-potential minimum (hydraulic entrapment) zone (CZAUNER & MÁDL-SZŐNYI 2013)

azonban megjegyezni, hogy ez a kapcsolat kétirányú, ugyanis a folyadékpotenciál-tér is hatással van a kőzetvázra a porúsnomás változásai révén (TERZAGHI 1923).

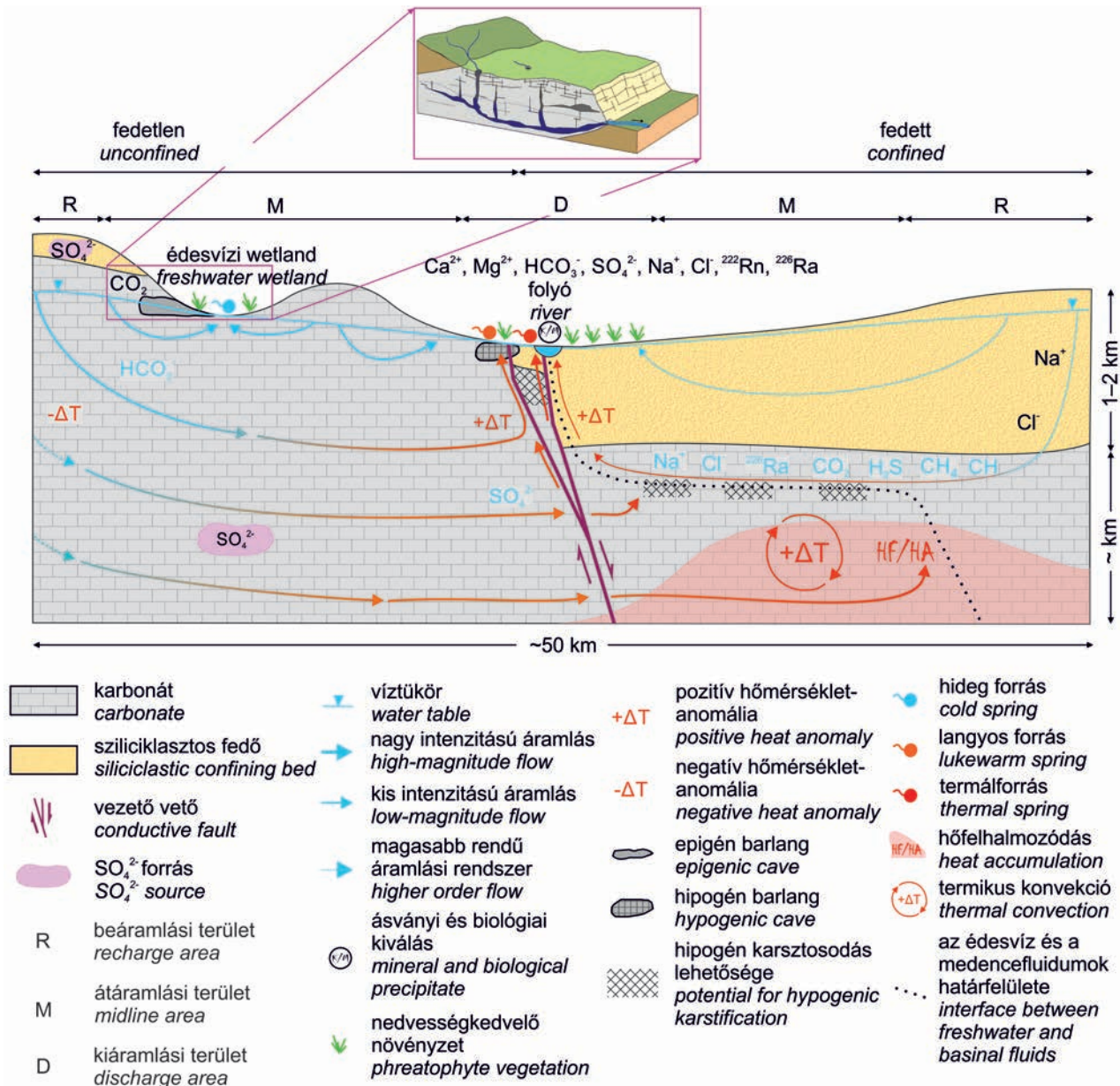
Míndezek alapján végül hét régiót különítettünk el a kutatási területeken belül, amelyek geológiai felépítésbeli eltéréseikre visszavezethetően különböző túlnyomás-lecsengési módokkal jellemezhetők. Így például a Derecskei-árok északi peremén az Algyői Vízfogó nagyfokú heterogenitást mutat a sűrű vetőhálózatnak köszönhetően, így a nyomáscsökkenés az egységen keresztül fokozatos, ezért a szénhidrogén-előfordulások az Algyői Vízfogó teljes vastagságintervállumból ismertek. Ezzel szemben az árok déli peremén jóval ritkább a vetőhálózat, így a nyomáscsökkenés lokalizáltan és ugrásszerűen történik az Algyői Vízfogót hátrántoló vetők mentén. Eközben a mátrix hatékonyan gátolja a nyomásdisszipációt (azaz a folyadékáramlást), azaz tartja fent a túlnyomást. Ennek eredményeként szénhidrogénmezők itt legsekélyebben az Algyői Vízfogó mélyebb zónáiból ismertek. Azaz ennél magasabb zónákba hidraulikai értelemben gátolt a migráció. A Battonyai-hát területe a hat másik régiótól jelentősen eltérő viszonyokat mutat a preneogén aljzat kiemelt helyzetének, valamint a neogén rétegek kis vastagságának és relatíve nagy permeabilitásának köszönhetően. Ezért túlnyomás itt csak a preneogén aljzatban, nagyjából 2000 m mélységtől jelentkezik. Ugyanakkor szénhidrogén-előfordulások a teljes neogén rétegsorból (és az aljzattól is) ismertek, a hidraulikus csapdázódás már említett zónájánál nagyobb mélységben.

Budai-termálkarszt és Paleogén-medence

Háttér

A vastag karbonátos víztartó rendszerek, a bennük zajló vízáramlások és a kapcsolódó hipogén karsztosodási és kiválási folyamatok medencehidraulikai szemléletű kutatásának bevezetésében nemzetközi szinten is kezdeményező szerepet vállaltunk (GOLDSCHIEDER et al. 2010, MÁDL-SZŐNYI & TÓTH 2015). Ezért ennek háttérét bővebben ismertetjük. Ebben nagy szerepet játszott, hogy az 1950 és 1990 között zajló intenzív bányászati célú víztelenítés következményei felhívták a figyelmet a Dunántúli-középhegység triász karbonátjaiban fennálló regionális hidraulikus folytonosságra (MÁDLNÉ SZŐNYI 1997, ALFÖLDI & KAPOLYI 2007 stb). E régió belül a Budai-termálkarszt (BTK) természetes „kutatólaboratórium” több mint húsz éve szolgál hidrogeológiai kutatásaink színteréül. Kezdetben a Barlangtani Intézet természetvédelmi, barlang- és forrásvédelmi szempontjai vezéreltek, majd a Shell Ltd. támogatásával a karbonátos rezervoár képződés recens analógiájaként elemeztük a területet. Ezek keretében elvégeztük a retrospektív kutatást, a vízáramláshoz köthető jelenségek és folyamatok vizsgálatát, a hipotézismodell megalkotását (ERŐSS et al. 2008; ERŐSS et al. 2012a,b; MÁDL-SZŐNYI & TÓTH 2015; MÁDL-SZŐNYI et al. 2019) (7. ábra).

A medencehidraulikai értelmezés több lépésben és lépésekben zajlott, melyre egy interdiszciplináris OTKA-kutatás és a MOL Nyrt. támogatásával a Paleogén-medencét is



7. ábra. Vastag fedetlen (ill. részben fedett), és csatlakozó sziliciklasztos képződményekkel fedett karbonátos vízadó rendszer vízáramlási hipotézismoddellje - melyet a medencehidraulikai adatfeldolgozás alátámasztott -, a kapcsolódó jelenségekkel együtt (MÁDLNÉ SZŐNYI 2019a MÁDL-SZŐNYI & TÓTH 2015 után módosítva). A sekély karsztok lokális vízáramlási rendszerekként (GOLDSCHIEDER & DREW 2014 nyomán) illeszthetők be a medenceléptékű modellbe

Figure 7. Conceptual groundwater flow model, which was confirmed by the basinhydraulic data analysis, and its consequences of flow-related manifestations for the interface of confined and unconfined carbonates (MÁDLNÉ SZŐNYI 2019a modified after MÁDL-SZŐNYI & TÓTH 2015). The shallow karst aquifer (modified after GOLDSCHIEDER & DREW 2007) is embedded into the regional flow pattern as a local system

magában foglaló (4. ábra) kutatás teremtett alapot (ERHARDT et al. 2017, MÁDL-SZŐNYI et al. 2019). Ezek eredményeképpen került sor a hidraulikus folytonosság módszertani érvényesítésére és egyben bizonyítására, valamint a „valós vízáramlási rendszermodell” megalkotására (MÁDLNÉ SZŐNYI 2019a). Ezek alapozták meg a területre vonatkozó vízáramlási és transzport szimulációkat (HAVRIL et al. 2016, SZUJÁRTÓ et al. 2020), valamint a vízáramláshoz köthető jelenségek, elsődlegesen a megcsapolódási jelenségként értelmezett biogeokémiai kiválások további vizsgálatát (KOVÁCS-BODOR et al. 2018, 2019). A BTK-n végzett kutá-

tásaink így reprezentálják a medenceléptékű kutatások munkafolyamatának teljes ciklusát (3. ábra). Az alábbiakban ezekből a kutatásokból sokrétűségük folytán csak a medencehidraulikai eredményekre koncentrálunk.

A vastag karbonátos víztartó rendszerek medencehidraulikai sajátosságai

Az eddigiekben bemutatott alföldi és kisalföldi kutatási területekhez képest a BTK és Paleogén-medence esetében jelentős különbség mutatkozik a topográfia, a fejlődéstörténet és a hidrosztratigráfiai felépítés komplexitását tekintve

is. Egyrészt az eddigi síkvidéki kutatási területekhez képest a domborzat itt változatos, magában foglalja többek között a Budai-hegységet (max. 559 mBf), a Gödöllői-dombságot (max. 344 mBf) és a Pesti-síkságot (95–120 mBf) is. A másik különbség, hogy míg az eddigi példákban egy medence süllyedéstörténetével, addig itt a süllyedés mellett a hegység és dombságok kiemelkedésével is számolni kell. Végezetül a hidrosztratigráfiai felépítés is eltérő, hiszen a sziliciklasztos medencékben a pannóniai vízfogók hidraulikai szerepe volt meghatározó, míg itt a kutatás elsődlegesen a pretercier karbonátos képződmények vízármlási rendszerére irányult. A földtani felépítés változatosságát jelzi, hogy ezek a karbonátok a BTK területén részben fedetlen helyzetben találhatók, míg a Paleogén-medencében – annak pretercier aljzatát képezve – akár 2000 m vastag, uralkodóan sziliciklasztos fedő alatt találhatók. E kutatás során módszertant dolgoztunk ki arra vonatkozóan, hogy az egyedi képződményekre levezetett hidrosztratigráfiai tagolásból a medenceléptékű feldolgozáshoz azok összevonásával csoportokat (Hidrosztratigráfiai Csoport – HCS) vezessünk le (MÁDL-SZŐNYI et al. 2019, GARAMHEGYI et al. 2020). A képződmények közül a pretercier karbonátok alkotta HCS1 Vízvezető (VV) jellemezhető a legnagyobb hidraulikus vezetőképesseggel, míg a fedőképződmények közt az oligocén sziliciklasztos (Tardi és Kiscelli Agyag dominálta) HCS3 Vízfogó (VF) képviseli a legalacsonyabb vízvezető-képességi értékeket. Így ennek a hidraulikai szerepe a leghangsúlyosabb a medenceléptékű vízármlási rendszerek mintázatában. Ugyanakkor a korábbi példák esetén hangsúlyos pannóniai és fiatalabb képződmények itt egy csoportba (HCS5 Vízvezető-Vízfogó (VV-VF)) kerültek.

A medencehidraulikai kutatás során a főnti eltérések miatt módszertani fejlesztésekre is szükség volt, mivel az eredetileg sziliciklasztos medencékre lett kidolgozva. Ennek következtében a BTK és Paleogén-medence területén folytatott adatfeldolgozás egyik legfőbb eredménye, hogy bizonyította a medencehidraulikai módszerek alkalmazhatóságát vastag karbonátos víztartó rendszerek környezetében is (ERHARDT et al. 2017, MÁDL-SZŐNYI et al. 2019, MÁDLNÉ SZŐNYI 2019a).

A BTK vízármlási rendszerei és felszín alatti határa

A kutatás eredményeként kimutattuk, hogy a gravitációs hajtóerő, azaz a vízszintkülönbségek mozgatják döntően a vizeket –500 mBf elevációs szintig. Meghatároztuk a vízármlások vertikális komponenseit, melyek az áramlások hierarchizáltságát (lokális/intermedier/regionális áramlások) előidézik, és lehatároltuk a különböző rendű áramlási rendszerek utánpótlódási területeit a Pilis, a Budai-hegység és a Gödöllői-dombság területén (MÁDLNÉ SZŐNYI 2019a). Az ezekhez tartozó megcsapolódási területek kijelölésénél a medencehidraulikai értelmezést a források hierarchikus klaszterezéséből levezetett lokális, intermedier és regionális áramlásokhoz köthető jellegével is kiegészítettük (MÁDL-SZŐNYI & TÓTH 2015, MÁDLNÉ SZŐNYI 2019). A BTK fő megcsapolódási területe 0 mBf eleváció szintig Visegrádtól

a Duna völgyében húzódik, majd a Csepel-sziget északi csúcsától déli irányban kiszélesedik. A 0 mBf elevációs szint alatt keleti-délkeleti irányú átáramlás figyelhető meg a Duna alatt (ERHARDT et al. 1017, MÁDL-SZŐNYI et al. 2019). Mindezek alapján javaslatot tettünk a BTK felszín alatti vízgyűjtőjének hidraulikai lehatárolására, ami vízminőségi és vízkészlet gazdálkodási szempontból is meghatározó jelentőségű (MÁDLNÉ SZŐNYI 2019a).

Hidraulikus folytonosság és elkülönülés a BTK és a Paleogén-medence vízármlási rendszerén belül

A 500 mBf eleváció alatt a domborzat hatása már nem észlelhető, a folyadékpotenciál-eloszlás hidrosztatikushoz közeli viszonyokat tükröz, azaz az átáramlás dominanciáját. Mindez egybevágg azzal, hogy az áramlási rendszer elsődlegesen utánpótlásvezérelt (HAITJEMA & MITCHELL-BRUKER 2005, HAVRIL et al. 2016). A víztükördomborzat hatásának kisebb mértékű érvényesülése a karbonátos víztartóknak a sziliciklasztos kőzetekkel összevetve nagyobb hidraulikus diffuzivitásával (a pórusnyomás-változás terjedését leíró formációtulajdonság) magyarázható, ami a hidraulikus kapcsolatok erősödését és így a potenciálkülönbségek kiegyenlítődsét okozza (MÁDL-SZŐNYI & TÓTH 2015). Ebből adódóan a vízszintdomborzat kevésbé követi a térfelszín lokális változékonyságát, sokkal inkább regionális lejtése meghatározó, míg az áramlási rendszerek kevésbé hierarchizáltak, és az áramtérben az átáramlás domináns. A nagyobb hidraulikus diffuzivitás további következménye, hogy mivel a hidraulikai kapcsolat vagy összefüggés (azaz folytonosság) a karbonátos víztartókban jóval hatékonyabb, így ezen a folytonos téren belül a torlasztó vetők és a regionális vízfogó képződmények (HCS3 VF) hatékony hidraulikai elkülönülést tudnak okozni. Ezt az ekvipotenciálok besűrűsödése, valamint a vízkémiai és hőmérsékleti különbségek is jelzik (MÁDL-SZŐNYI & TÓTH 2015, MÁDL-SZŐNYI et al. 2019; MÁDLNÉ SZŐNYI 2019a). A legmarkánsabb vízfogó, a HCS3 VF regionális hidraulikai szerepét tekintve eltérő hatású a vastagsága függvényében. A budai oldalon, ahol kisebb vastagságú a vízfogó (200-400 m) vagy hiányzik, a hidraulikai kapcsolat a fekü (HCS1-2) víztartóval intenzívebb, ami a (felső sziliciklasztos és karbonátos HCS4-5) víztartók potenciálértékeinek regionális kiegyenlítődsében jelentkezik. Ahol azonban nagy vastagságban van jelen a vízfogó, ott nagyobb potenciálkülönbség tud fennmaradni a fedő és fekü vízadók közt, így például a Gödöllői-dombság területén (MÁDLNÉ SZŐNYI 2019a).

Potenciálanomáliák az áramlási térben

A 1000 mBf eleváció alatti tartományban továbbra is az átáramlás dominál, mégis jelentős változások figyelhetők meg a potenciáeloszlásban. Az átáramlás oka, a beszivárgásvezérelt rendszerben kialakult regionális vízszintkülönbségekből adódik. A potenciáeloszlásban tapasztalt anomáliák az eddigi alföldi példák mélységi túlnyomásával szemben a Paleogén-medence fedett pretercier karbonátjában és paleogén vízvezetőiben (HCS1-2 VV) jellemzően inkább alulnyomásként jelentkeznek (1–2 MPa nyomásdefi-

cit) (8. ábra) (MÁDL-SZŐNYI et al. 2015, MÁDL-SZŐNYI et al. 2019). Ez egyrészt leáramlást generál a fedőből a fekü HCS1-2 víztartókba, amit ebben a mélységben a vízszintkülönbségek már nem indokolnak (MÁDLNÉ SZŐNYI 2019a). Másrészt a sekélyebb szintekben a BTK kiemelt területei felől érkező, Pest alatt megforduló és a Duna felé irányuló horizontális (át)áramlási komponens a mélyebb szintekben a BTK felől a Paleogén-medence felé irányul az ott jelentkező nyomásdeficit miatt. Az oligocén HCS3 Vízfogón keresztüli leszivárgás további következménye, illetve indirekt bizonyítéka a hidrosztratigráfiai csoporton belül ismert anyagokzetekből (Tardi Agyag) a szénhidrogén lefelé történő migrációja és a feküképződményekben való felhalmozódása. Az alulnyomás előidézésében feltehetően több jelenség, ill. folyamat együttes hatása játszhat szerepet (MÁDL-SZŐNYI et al. 2015, MÁDL-SZŐNYI et al. 2019, MÁDLNÉ SZŐNYI 2019a). Így a HCS3 Vízfogó (200–1000 m vastagságú) jelenléte geológiai időskálán vertikális, míg a Tóalmás-vonal és a Szada-vető hidraulikai zárása kelet-délkeleti irányban laterális utánpótlódási hiányt okozhat a HCS1-2 víztartókban. Szintén szerepe lehet az alulnyomás kialakulásában a Gödöllői-dombság 4 millió éve megkezdődött kiemelkedésének és az ezzel együtt járó erózióknak, ami megbontva a pórusnyomás és a hatékony feszültség egyensúlyát eróziós dekompakciót idézhetett elő (MÁDL-SZŐNYI et al. 2015). De elméleti modellezéseinkben kimutattuk, hogy a gravitációs hajtóerő és kényszerkonvekció mellett jelen lévő hőmérséklet-különbség és a sótartalom-különbség (ld. később) hatására fellépő szabad konvekció is felelőssé tehető hasonló mértékű potenciálanomáliák kialakításáért az áramlási térben (GALSA et al. 2019, SZIJÁRTÓ et al. 2019a).

Hőmérsékleti és vízkémiai jellemzők medencehidraulikai értékelése

A medencehidraulikai értelmezést a hőmérsékleti és vízkémiai (TDS, Cl) adatfeldolgozás eredményei is megerősítették. Az oldottanyag-tartalom eloszlásában is tükröződik a domborzat, a hidrosztratigráfia, a szerkezetek és ebből következően a hidraulikai kapcsolatok áramlási képre gyakorolt hatása (MÁDL-SZŐNYI et al. 2019, MÁDLNÉ SZŐNYI 2019a). Így például a Tóalmás-vonaltól DK-re a fedett karbonátos víztartókban drasztikusan megnövekedett oldottanyag-tartalom alátámasztja a szerkezeti vonal hidraulikai vízrekesztő szerepét. A BTK szempontjából kiemelkedő jelentőségű eredmény, hogy sikerült térben és a hidraulikához köthetően elkülöníteni a „karsztvíz” és a korábban feltételezett „medencefluidum” (ALFÖLDI 1979) jelenlétét a rendszerben (ERŐSS et al. 2011, 2012a, b; POROS et al. 2010, 2012; MÁDL-SZŐNYI & TÓTH 2015; MÁDLNÉ SZŐNYI et al. 2018). Továbbá a medencehidraulikai feldolgozás alapján a karsztvízkomponens mellett egy „hidrotermális” komponens jelenlétét is ki tudtuk mutatni (MÁDLNÉ SZŐNYI et al. 2018, MÁDLNÉ SZŐNYI 2019a).

A budai oldalon a (1) karsztkomponens (TDS < 1000 mg/l; Cl < 30 mg/l) meteorikus eredetű, és a Budapesttől nyugatra fekvő és hidraulikailag is kimutatott utánpótlódási területeken jut a felszín alá, majd helyi és intermedier áram-

lások révén jut a felszínre a Duna vonalában. A (2) medencekomponens a karbonátos víztartót fedő oligocén (HCS3 VF) és főként az alsó- és középső-miocén (HCS4 VV-VF) képződmények tengeri eredetű, átalakult (NaCl-os) pórusfolyadékából származtatható. Ez a budai oldalon az utánpótlódási területek leáramlásai, a Paleogén-medencében pedig az alulnyomás generálta leáramlás révén jut a karbonátos víztartóba (HCS1 VV). A (3) hidrotermális komponens a budai oldal regionális beszivárgási területein jut a felszín alá, eredetét tekintve ez is meteorikus karsztvíz, behatolása a mélység irányában, a Duna és a pesti oldal alatt „édesvíz” front formájában kelet felé nyomozható. A hosszú felszín alatti tartózkodási ideje és a víz-kőzet kölcsönhatás miatt átalakuláson esik át, majd a megcsapolódás során medencekomponens is hozzákeveredik.

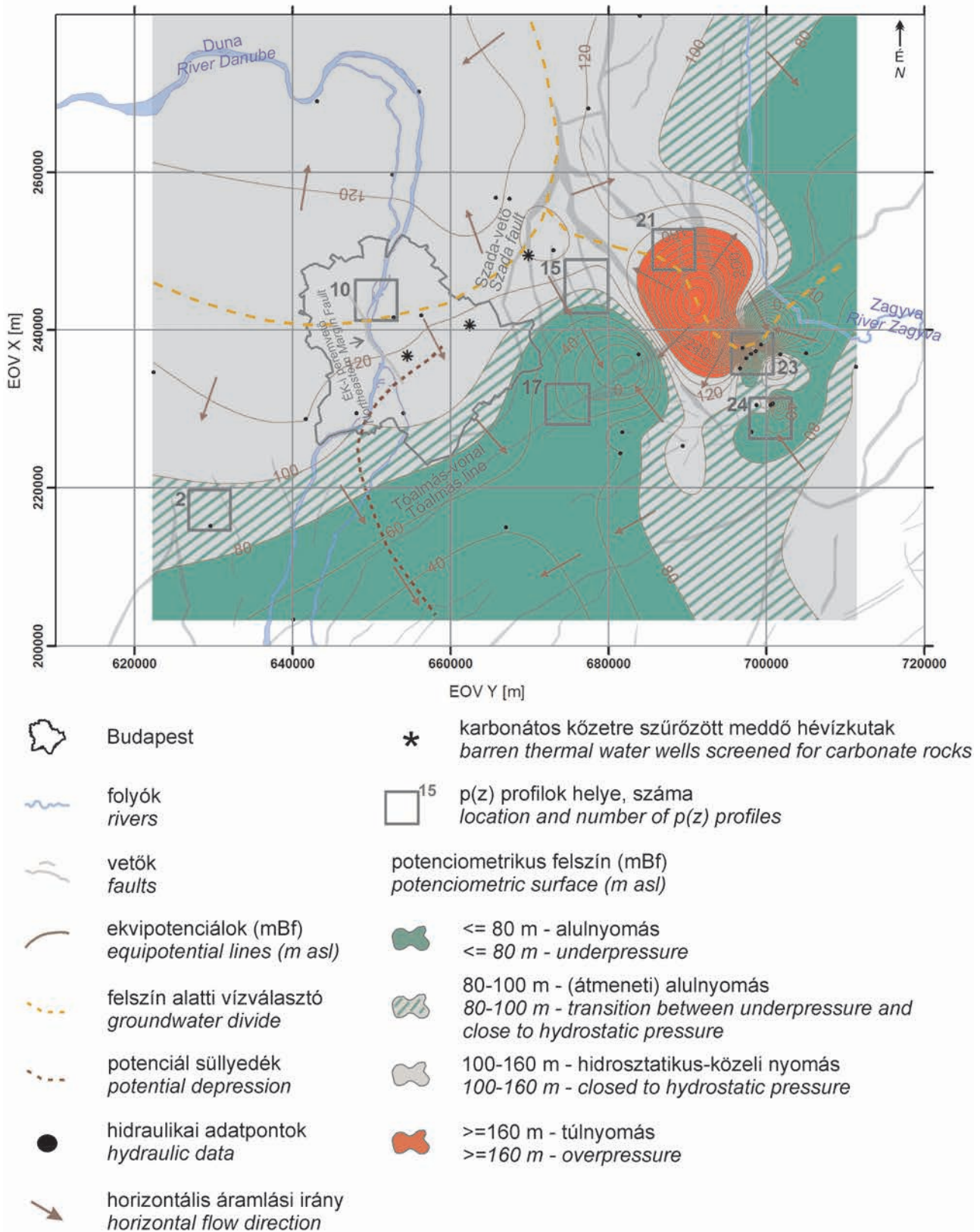
Aszimmetrikus áramlási kép

A vízáramlási pályák aszimmetrikus jellege, azaz a nyugatról érkező Duna alatti átáramlás, majd a nyugat felé történő visszatérülés a BTK-ra vonatkozó korábbi – tisztán hipotézisen alapuló – koncepcionális modellek mindegyikében megjelent (SCHAFARZIK 1928, VENDEL & KISHÁZI 1964, KOVÁCS & MÜLLER 1980, ALFÖLDI 1981 stb.). E kérdést ismét felvetve a jelenséget medencehidraulikai feldolgozással és medenceléptékű numerikus modellezéssel (ekvivalens porózus közeg megközelítéssel) is sikerült kimutatnunk (MÁDL-SZŐNYI & TÓTH 2015). E tanulmányban tisztáztuk a jelenség hidrosztratigráfiai okát, melynek következménye a budai és pesti oldal közti hajtóerő és beszivárgás különbség (7. ábra). Az előzőekben hivatkozott koncepcionális modellek a sziliciklasztos fedőrétegeket ab ovo impermeabilisként kezelték, ezért nem számoltak medencefluidum hozzájárulásával sem. Ebben az értelemben mind a medencehidraulikai feldolgozás, mind pedig a medenceléptékű modellezés új eredményeket hozott.

Végül a mért adatok medencehidraulikai és kapcsolódó vízkémiai értelmezése az aszimmetrikus áramlási képet a budapesti központi megcsapolódási rendszer (Rózsadomb előtere) hidrotermális vízkomponensére vonatkozóan igazolta (MÁDLNÉ SZŐNYI et al. 2018, MÁDLNÉ SZŐNYI 2019a). Az aszimmetrikus áramkép kérdését azóta általánosságban is kiterjesztettük, és elemeztük kialakulását különböző medencealakulatok és hidrosztratigráfiai adottságok mellett (TÓTH et al. 2020).

Következmények

Módszertani szempontból a medenceléptékű adatfeldolgozás és numerikus modellezés közös eredménye tehát, hogy keretbe helyezte a BTK kútjaiban és forrásaiban felszínre jutó vizek ismert különbözőségét (ld. 3. ábra, „recens jelenségek értelmezése”). Erre építve tágabb összefüggésben tudtuk értelmezni nemcsak a Budapestnél megcsapolódó vizek fenti-ekben leírt lehetséges eredetét (az utánpótlódási területeket és áramlási rendszereket figyelembe véve), valamint azok hőmérsékleti, kémiai és izotóppösszetételében megnyilvánuló különbözőségét, hanem a mindezek következményeként értelmezhető biogeokémiai és ásványkiválásokat, valamint poro-



8. ábra. Anomáliák (alul- és túlnyomás) és normál nyomásrezsimek a potenciáltérben a $z < -1000$ mBf szintben a HCS1-2 Vízvezetőre szűrözött kutak potenciáladatai alapján (MADLNÉ SZÓNYI 2019)

Figure 8. Anomalies (under- and overpressure) and normal pressure regimes in the fluid-potential field below 1000 m asl based on the hydraulic data of wells screened for the HCS1-2 Aquifer (MADLNÉ SZÓNYI 2019)

zításfejlődési folyamatokat, így a jelenleg is zajló hipogén karsztosodási folyamatokat (pl. ERŐSS et al. 2011, 2012a, b; ÖTVÖS et al. 2017; KOVÁCS-BODOR et al. 2018, 2019).

A medencehidraulikai értelmezés kapcsán végzett hőmérsékleti adatfeldolgozás szerint a hőmérséklet-eloszlás a HCS3 Vízfógó hőfelhalmozó hatását tükrözi, míg a szilicikus fedő- és a karbonátos feképződményekre jellemző gradiensek egy függély mentén is számottevő eltérése különböző hőtranszport folyamatokra utal (MÁDLNÉ SZŐNYI 2019a). Így ezek az eredmények további medenceléptékű transzportmodellezéseket inspiráltak. Az áramlási és transzportmodellezések kimutatták, hogy a domborzatilag vezérelt áramlások mellett a késő-miocéntől máig egyre csökkenő mértékben, de a termikus hajtóerő befolyásával is kell számolni (HAVRIL et al. 2016). Mi több, a jelenlegi állapotra vonatkozó tranzienst áramlási és hőtranszport-modellezés erre vonatkozó kvantitatív eredményekkel is szolgált (SZIJÁRTÓ et al. 2019b). Ezek a medenceléptékű modellezések a valós vízáramlási rendszermodellből indulnak ki, és validálásuk is a medencehidraulikai és hőmérsékleti adatfeldolgozáson alapul (3. ábra).

Bakony, Balaton-felvidék, Tihanyi-félsziget

A Dunántúli-középhegységen belül a Bakony és a Balaton-felvidék, valamint a Tihanyi-félsziget (4. ábra) vízáramlási rendszereinek kutatása az utóbbi tíz évben került érdeklődésünk középpontjába. Itt olyan alapvető kérdések merültek fel, mint a Bakony–Balaton-felvidék rendszer és a Balaton lehetséges összefüggései, a források hierarchizáltsága és annak vízáramlási oka, továbbá a tihanyi tavak és a felszín alatti vízáramlások kapcsolata. A vastag karbonátos víztartókra kidolgozott hipotézismodellünk az itteni kutatásokhoz is jó kiindulási alapot szolgáltatott (MÁDL-SZŐNYI & TÓTH 2015) (7. ábra)

Hidraulikus folytonosság és a források hidraulikai jelentősége

A Bakony és a Balaton-felvidék hidrogeológiailag egy komplex, fedetlen, karbonátos vízáadó rendszerként kezelhető (TÓTH & MÁDL-SZŐNYI 2016). A rendszer hidraulikus folytonosságát és az utánpótlás által vezérelt regionális vízszintkülönbségek okozta vízáramlási rendszerek működését hidraulikai adatok medenceléptékű elemzésével TÓTH (2018) bizonyította. Az itt elvégzett medencehidraulikai feldolgozás módszertani újszerűségét nemcsak a karbonátos rendszerre való alkalmazás, hanem a kisszámú kútadat mellett a források adatainak (az összes hidraulikai adat 57%-a) a hidraulikai értékelésbe történő bevonása is jelentette. Mivel a források az áramlási rendszerek végpontjait tükrözik (TÓTH 2009b) (2. ábra), így a felszínalatti víztükör természetes megnyilvánulásainak tekinthetők, és fakadási szintjük megfeleltethető a hidraulikus emelkedési magasságnak (TÓTH 2018).

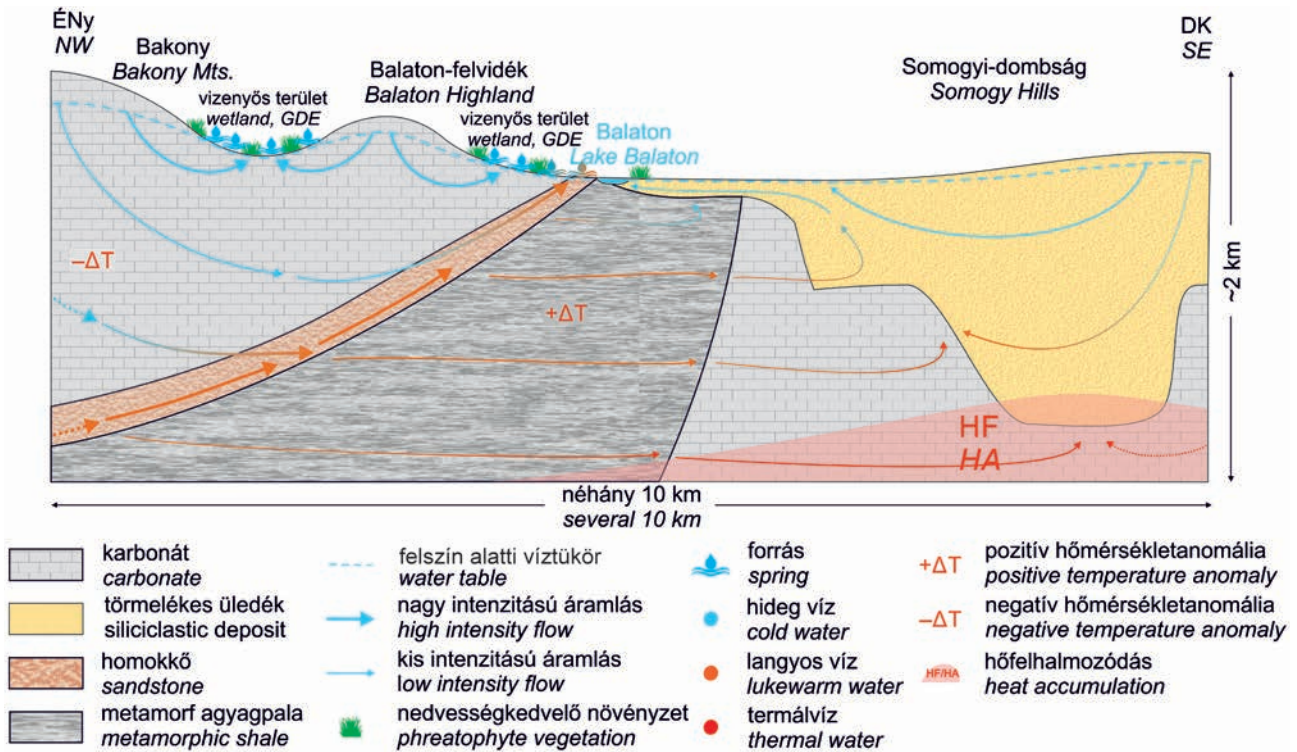
Vízáramlási rendszerek

A területen elvégzett medencehidraulikai, vízkémiai és hőmérsékleti adatelemzés kimutatta, hogy az utánpótlásvezérelt, gravitációs felszín alatti vízáramlások itt is közel hid-

rosztatikus nyomásviszonyokat idéznek elő. Ennek hatására az áramló vizek a Bakony beáramlási területeitől ÉNy és DK felé az alacsonyabb térszínnek irányába tartanak. Hierarchizált áramlások 150–200 mBf szintig fordulnak elő, ennél nagyobb mélységben a horizontális áramlások dominanciája mutatható ki. A Bakony és a Balaton-felvidék között kétirányú a hidraulikai kapcsolat: felszínközépen (>250 mBf) a Balaton-felvidék felől szivárog víz a Bakony felé, ennél nagyobb mélységben viszont ellentétes irányban, a Balaton felé zajlik a vízmozgás. Továbbá sikerült bizonyítani, hogy a Bakony és Balaton-felvidék felszín alatti vizei is megcsapódnak a Balaton északi partja mentén és a Balatonban. Emellett a térség felszíni vízfolyásai is szállítanak felszín alatti eredetű vizet, így összességében közel 25%-ban járulnak hozzá a felszín alatti vizek a tó vízkészletéhez (TÓTH 2018, TÓTH et al. 2020). A mélyebb regionális áramlások a Balaton medencéje alatt továbbhaladnak déli irányba. Ott a Somogyi-dombságból érkező felszín alatti vízáramlásokkal találkozza a két oldal közti hajtóerő-különbség eredményeként itt is aszimmetrikus áramkép alakul ki (TÓTH & MÁDL-SZŐNYI 2019). A medencehidraulikai feldolgozás alapján megismert valós vízáramlási rendszermodell (3. ábra) két, a Bakonyt és Balaton-felvidéket harántoló, ÉNy–DK csapású szelvény mentén végzett numerikus áramlásszimuláció és a kapcsolódó felszíni jelenségek értelmezése révén validáltuk (TÓTH 2018). A hidraulikai, hőmérsékleti és vízkémiai adatelemzés, valamint áramlási és hőtranszport-modellezés (ekvivalens porózus közeg megközelítéssel) eredményeként egy új, a Bakony–Balaton-felvidék–Balaton rendszerre vonatkozó, felszín alatti vízáramlási modellt sikerült megalkotni (9. ábra) (TÓTH & MÁDL-SZŐNYI 2019, TÓTH et al. 2020).

A Tihanyi-félsziget és a tavak hidraulikai helyzete

Érdemes kiemelni a vizsgálati területen belül a Tihanyi-félszigetet, amelynek felszín alatti vízáramlási rendszereit részletesen tanulmányoztuk (TÓTH et al. 2016). Itt a kútadatok és a források szinte teljes hiányában felszíni elektromágneses geofizikai mérések és a tavak körül létesített potenciométerek alapján határoztuk meg a 3D numerikus áramlásszimulációhoz szükséges hidrosztratigráfiai felépítést, geometriát és peremfeltételeket. A numerikus szimuláció alapján levezetett 3D áramképet a felszín alatti vízáramlások által előidézett felszíni jelenségek előfordulása segítségével (3. ábra) validáltuk. A Tihanyi-félszigeten kialakult áramlási rendszerek a Bakony és Balaton-felvidék felől érkező megcsapoló-átáramló felszín alatti vízáramlásba fészkelődnek, és hidraulikusan alátámasztott helyzetben vannak nagyjából –200 mBf eleváció szint fölött (TÓTH 2018). Az áramképet tekintve a félsziget topográfiai magassalatai lokális és intermedier áramlások utánpótlódási területeiként szolgálnak, míg a fő megcsapoló a Balaton, a tihanyi „tavak” (Külső- és Belső-tó, Rátai-csáva) pedig vízszintjüktől függő hidraulikai kapcsolatban állnak egymással, de rátáplálnak a Balatonra is. Ezáltal bizonyítottuk, hogy a tihanyi vizes élőhelyek felszín alatti víztől függő ökoszisztémák (FAVÖKO-k) (TÓTH et al. 2016), amelyek hidraulikai helyzetüktől függően eltérő mértékben érke-



9. ábra. A Bakony-Balaton-felvidék-Balaton rendszer felszín alatti vízáramlásainak, valamint a kapcsolódó folyamatoknak és jelenségeknek elvi vázlata (TÓTH & MÁDL-SZÓNYI 2019)

Figure 9. Generalized model of the groundwater flow systems and the related processes and phenomena in the Bakony-Balaton Highland - Lake Balaton system (TÓTH & MÁDL-SZÓNYI 2019)

nyek a klímaváltozás (csapadék, hőmérséklet, evapotranszpiráció) hatásaira (HAVRIL et al. 2018).

Dráva-medence, Mecsek és Villányi-hegység

Gravitációs és túlnyomásos rendszerek

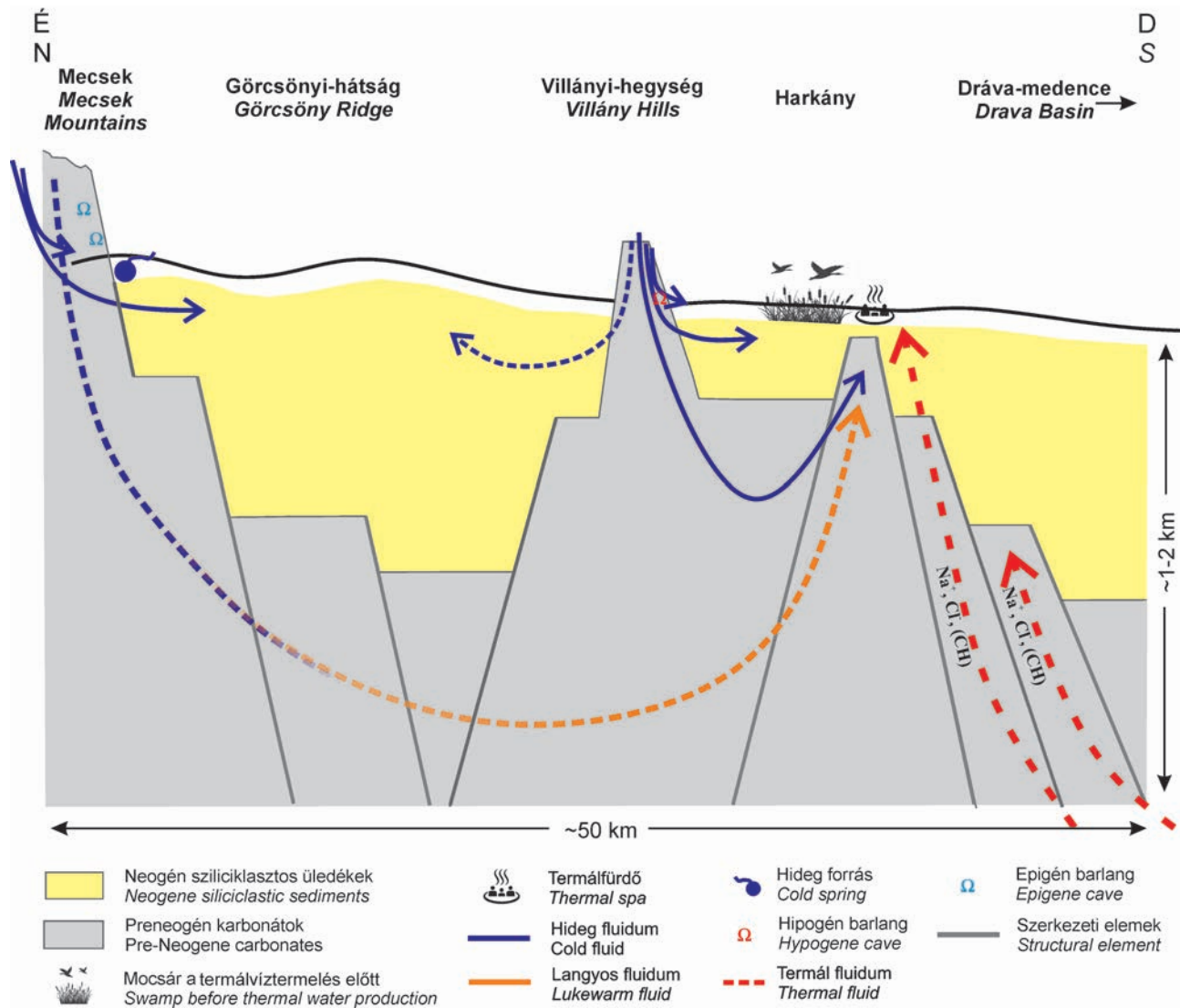
A Dráva-medence magyarországi részének medencehidraulikai kutatása a Magyar Horizont Energia Kft. megbízásából kezdődött. Ezt egy PD OTKA kutatás keretében kiterjesztettük egészen a Mecsekig és a Villányi-hegységig (4. ábra). A fő kérdés ismét a pannóniai képződmények regionális hidraulikai viselkedése volt. Ugyanakkor lokális jelenségeket is értelmeztünk a regionális áramlási képbe helyezve a Villányi-hegység déli előterében. Ez a terület a fedetlen és kapcsolódó fedett karbonátos víztartó rendszerek peremterületeinek újabb példaként szolgált (CSONDOR et al. 2020).

A medencehidraulikai értelmezés eredményeként a felszíntől –500 mBf elevációs szintig vízszintkülönbségek által vezérelt gravitációs áramlási rendszereket tudtunk kimutatni. A –500 – (–1000) mBf elevációintervallumban már a laterális áramlások dominálnak gyenge feláramló vertikális komponenssel. Ezek a hegy- és dombvidékektől a Dráva és Duna irányába zajló dél-délkeleti áramlásirányt, valamint továbbra is a gravitációs hajtóerőt reprezentálják. A –1500 – (–2000) mBf elevációintervallumban kimutatott átmeneti zóna alatt azonban már a korábban vizsgált medencékhez hasonlóan (a Paleogén-medence kivételével) egy túlnyomá-

sos tartomány (maximum 66% túlnyomás) jelentkezik a Dráva-medence (magyarországi részének) északnyugati felében. Ezen belül a feláramlás dominál a vertikális áramlási komponens tekintetében. A laterális áramlások a mélyebb medencerészekről azok peremei felé mutatnak, jellemzően északkeleti és keleti irányba. A túlnyomás lecsengésében itt is meghatározónak bizonyult az Algyői Vízfogó szerepe. Az eredmények gyakorlati alkalmazhatóságát tekintve lehatároltunk egy szénhidrogének hidraulikai csapdázódására alkalmas területet és elevációintervallumot a Dráva-medence északnyugati részén. Ez képezi a szénhidrogének vertikális migrációjának felső hidraulikai határát, amit a területen ismert szénhidrogén-előfordulások helyzete is alátámaszt.

Vízáramlási komponensek

A Dráva-medence délkeleti feléből hidraulikai adat csak a felszíntől –200 mBf elevációs szintig állt rendelkezésre, így az ennél mélyebb áramlási tartományról csak analógia alapján tudtunk következtetéseket levonni. A medence északnyugati és délkeleti fele közt nincs jelentős (víz) földtani eltérés a rétegsort és a fejlődéstörténetet tekintve. Így a mélységi túlnyomásos tartomány jelenléte a délkeleti részben is valószínűsíthető. Ezt támasztja alá, hogy a feltételezett mélységi túlnyomás hatására a medence központi részeitől a peremei felé tartó „medenceeredetű” – fluidumok hatásai a Villányi-hegység déli előteréből, különösen Harkány térségéből ismert hidraulikai, vízkémiai és barlangképződési jelenségekben is kimutathatók (10. ábra). Ezek alapján a



10. ábra. A felszín alatti vízáramlások, valamint a kapcsolódó folyamatok és jelenségek elvi vázlata Harkány térségében (CSONDOR et al. 2020 után módosítva)
Figure 10. Generalized flow field model of the Harkány area with the related processes and phenomena (after CSONDOR et al. 2020)

Villányi-hegység déli előterének kiáramlási területein megcsapolódó felszín alatti vizeknek van egy meteorikus eredetű „karsztvíz” komponense, amelynek utánpótlódási területeit a Villányi-hegység fedetlen pretercier karbonátjai képezik. Ugyanakkor a medencehidraulikai értelmezés alapján Harkánynál a Mecsek felől érkező regionális áramlások „hidrotermális” fluidumjainak megcsapolódása is valószínűsíthető. Ezek mellett Harkánynál feltételezhető a „medencekomponens” is. Ez megmutatkozik a termákvíz kémiai összetételében (Ca-Na, $\text{HCO}_3\text{-Cl-SO}_4$ -fácies magas klorid és nátrium tartalommal), ami átmenetet képez a karsztvizek Ca-Mg, HCO_3 és a Dráva-medence északnyugati részéből kimutatható Na-K, $\text{Cl-SO}_4\text{-HCO}_3$ -fáciesű „medencekomponens” közt. Továbbá egy kimutatott pozitív hidraulikai (folyadékpotenciál) anomália intenzív vető menti feláramlásra utal. Ezen jelenségek kialakulása éppen Harkánynál feltehetően azzal is magyarázható, hogy a Villányi-hegység déli előterén belül ez a terület van legközelebb a Dráva-

medence pereméhez. Mindezek alapján Harkány térségében is számolhatunk a fedett és fedetlen karbonátos peremterületekre a BTK-analógia alapján (MÁDLNÉ SZŐNYI et al. 2018) azonosított fluidumkomponensekkel. Azonban a karsztvíz és medenceeredetű fluidum keveredési zónájának kiterjesztése Harkánytól keletre, tehát a teljes Villány-előterre a recens vízkémiai és hőmérsékleti adatok alapján nem indokolható.

Barlangképződési következmények

A medencehidraulikai eredményeket itt is felhasználtuk a vízáramlási jelenségek értelmezésére (3. ábra). Földtani időskálán vizsgálva a barlangképződési jelenségek arra utalnak, hogy a fejlődéstörténet korábbi szakaszaiban intenzívebb lehetett a medenceeredetű feláramlás, ami az északról érkező karsztvízzel együtt generált keveredési korrózió révén hipogén barlangok kialakulását eredményezte. Ezek a barlangok magasabb rendű áramlási rendszerek kiáramlási

területeire jellemzőek (KLIMCHOUK 2007) ott, ahol a fedettség és medencekomponens hatásával is számolni lehet (MÁDL-SZŐNYI & TÓTH 2015) (7. ábra). Azonban a Villányi-hegység déli előterében a hipogén barlangok ma már átáramlási területeken, fedetlen és sekély helyzetű fedett karbonátokban találhatóak, gyakran a talajvíztükör szintje felett. Mindezek, valamint a recens vízkémiai és hőmérsékleti adatok szerint Harkánytól keletre már nem azonosítható fluidumkeveredési zóna. Ennek alapján e hipogén barlangok képződése nem köthető a jelen áramlási rendszerekhez, hanem a medencefejlődés valamely korábbi szakaszához, amikor a gravitációs vízármlások intenzitása kisebb, a medenceeredetű áramlásoké pedig nagyobb mértékű volt a mainál. Később a gravitációs áramlások dominanciája a Mecsek és Villányi-hegység kiemelkedésével és a pretercier karbonátok – mint utánpótlódási területek – exhumálódásával megerősödhetett. Így a medenceeredetű áramlások viszább szorulásával a hipogén barlangképződés egyelőre befejeződött. Ezt a folyamatot a Beremendi-kristálybarlang esetén ERŐSS et al. (2020) vízkémiai és izotóp ($\delta^2\text{H}$, $\delta^{18}\text{O}$) mérésekkel, valamint numerikus áramlás- és hőtranszportmodellezéssel is alátámasztotta. Érdemes megjegyezni, hogy az analógiaként kezelhető BTK területén – ahol ráadásul a részleges fedettség a budai oldalon is fennáll – ma is aktívak a hipogén barlangképződési folyamatok. Így bár a medenceeredetű feláramlás itt is erősebb lehetett a fejlődéstörténet korábbi szakaszaiban (POROS et al. 2012), de még most is intenzívebb, mint a recens Villányi-hegység–Drávamedence rendszerben.

Összegzés és kitekintés

Az ELTE-n folyó medencehidraulikai kutatások az utóbbi két évtizedben beépültek a hazai földtani kutatásba. Munkánk során az 1950-es évektől kezdődő hazai empirikus medencehidraulikai kutatások eredményeiből indultunk ki, majd építettünk a nemzetközi tapasztalatokra, és az ún. „Tóthiskola” hazai képviselőjévé váltunk. Működésünk során a medencehidraulikai alapelveket alkalmaztuk, de egyúttal elméleti és módszertani értelemben tovább is fejlesztettük a kezdeti eljárásokat. Kutatási tevékenységünket a Pannon-medencében folytatva és közben nemzetközi kapcsolatokat építve, a hazai területekre vonatkozó eredmények a publikációink révén szervesen beépültek a nemzetközi szakmai ismeretanyagba, ezzel is öregbítve a hazai földtan nemzetközi hírnevét.

A bemutatott eredmények alapkutatói jelentőségén túl többször is utaltunk gyakorlati alkalmazhatóságukra, melyet fontos kiemelni. A kezdeti empirikus magyarországi medencehidraulikai értelmezéseket követően az utóbbi évtizedek nagy, medenceléptékű modellezései már építettek ezekre az eredményekre és számos gyakorlati kérdés és megoldás alapjául szolgáltak a vízbázisvédelemtől a geotermikus energia hasznosításáig (TÓTH et al. 2016, SZŐCS et al. 2018 stb.). Megállapítható, hogy a legtöbb hazai és régiós kutatás gyakorlati indítékú regionális munka, melyben alap-

kutatási kérdések is felmerülnek, de céljuk többnyire gyakorlati feladatok hatékony megoldása. Ezekhez alap-, ill. felfedező medencekutatással járul hozzá az ELTE. A kutatások szisztematikusan fejlesztett megközelítésen alapulnak, a természetes vízármlási rendszerek megértése, hipotézis-alkotás, következetes medencehidraulikai feldolgozás, valós vízármlási rendszermodell” kialakítása, az áramlások által előidézett jelenségek és a numerikus modellezés szerves egységét kialakítva (3. ábra). Azaz munkánk során egyrészt a medencehidraulikai módszertan fejlesztése zajlik, másrészt olyan elméleti kérdéseket elemzünk, mint a különböző fluidum hajtóerők és azok kölcsönhatásai. De célzott figyelmet kapnak a fluidum-közet kölcsönhatás révén kialakult jelenségek, melyek végtelen tárháza kapcsolható a vízármlásokhoz. Így a bemutatott szikesedés, barlangképződés, szénhidrogén-cspadázódás, biogeokémiai kiválások és még sok egyéb. E jelenségek, valamint a vízármlási rendszerek és a numerikus elemzések összekapcsolása további összefüggések felismerését teszik lehetővé a jövőben. Végezetül ezen eredmények sajátossága, hogy a Pannon-medence „kutatólaboratóriumában” kerülnek leírásra és bemutatásra. Így válhatott a Tihanyi-félsziget a félsziget jellegű vízármlási rendszerek típusterületévé vagy a BTK a vastag fedett és fedetlen karbonátos víztartó rendszerek és áramlási rendszereik nemzetközileg elismert mintaterületévé.

A hidrogeológiai fejlődési trendekből kiindulva a jövőben várhatóan egyre több alkalmazási területtel foglalkozunk. Így az utóbbi évek újdonságai például a felszín alatti vizek radionuklid-tartalmának vízármlási szemléletű értékelése, de a mesterséges vízpótlás, azaz a MAR-ok (Managed Aquifer Recharge) kérdései, de a biogén (szénhidrogén) gázok felszín alatti vízármlás kontrollálta migrációjának és csapadázódásának kérdései is ide sorolhatók. 2018-ban indult hároméves kutatás a geofluidumok és az azokhoz kapcsolódó erőforrások (felszín alatti víz, geotermikus energia, hidrotermális ércesedések) rendszerszemléletű értékelésére ENeRAG (Excellency Network Building for Comprehensive Research and Assessment of Geofluids H2020) címen. A projekt célja az ELTE (mint konzorciumvezető) kutatói és innovációs kapacitásának további erősítése nemzetközi kiválósági központ létrehozásával és hálózatépítéssel a felszín alatti fluidumok oktatása és kutatása területén. Célunk a felszín alatti víz, valamint a geotermikus és hidrotermális fluidumok összefüggéseinek jobb megértése, ezáltal a fenntartható kinyerésükre alkalmazott – vízgazdálkodási, geotermikus energiahasznosítási, ásványi nyersanyag feltárási és hasznosítási – technológiák hatékony fejlesztése.

Az elmúlt húsz év kutatói eredményeinek oktatásfejlesztési hasznosulása is látható a CHARM (Challenge-driven, Accessible, Research-based, Mobile) European University (CHARM-EU) „Víz” témájú mesterszakos programjában is, mely pilot képzés nemzetközi kooperációban 2021-től indul meg egyetemünkön. Emellett az ismeretek kommunikációjára is egyre nagyobb figyelmet fordítunk, ezért indítottuk el magyar és angol nyelvű blogjainkat

(<https://felszinalattiviz.blogspot.com/>; <https://geofluids.blogspot.com/>). A jövő tehát egyre több lehetőséggel és feladattal kecsegtet a medencehidraulikai kutatás, oktatás és tudáskommunikáció terén is, ami a globális vízválság korában különösen jelentőséggel bír és egyúttal felelősséget is jelent.

Köszönetnyilvánítás

A cikk szerzői ezúton mondanak köszönetet mindazoknak a hazai elődöknek, akik Magyarországon lefektették az empirikus medencehidraulika alapjait, közülük is kiemelten ERDÉLYI Mihálynak. TÓTH József professzornak köszönjük, hogy hazahozta tudását Kanadából és megosztotta a magyar

szakemberekkel. MINDSZENTY Andrea egykori tanszékvezető jóindulatú támogatása és Tóth professzor folyamatos segítségével az ELTE lehetett az az intézmény, ahol a medencehidraulika elismert kutató és képző helye kialakult. Köszönjük továbbá mindazoknak, akik az elmúlt húsz évben munkájukkal hozzájárultak az elvégzett és itt bemutatott kutatások megvalósításához. ERHARDT Ildikónak köszönjük az ábrák elkészítése kapcsán nyújtott segítségét. Dr. SZANYI János szakszerkesztőnek, Dr. ALMÁSI Istvánnak és két további lektornak köszönjük az építő jellegű kritikákat. A cikk az ENeRAG-projekt keretein belül készült, amelyet az Európai Unió Horizont 2020 kutatási és innovációs programja támogatott a 810980 azonosító számú támogatási megállapodás alapján.

Irodalom – References

- ALFÖLDI L. 1979: Budapesti hévizek. – *VITUKI kiadvány*, Budapest, 102 p.
- ALFÖLDI L. 1981: A budapesti geotermikus áramlási rendszer modellje. – *Hidrologiai Közöny* **9**, 1–7.
- ALFÖLDI L. & KAPOLYI L. (szerk.) 2007: *Bányászati karsztvízszintsüllyesztés a Dunántúli-középhegységben*. – Magyar Tudományos Akadémia Földrajztudományi Kutatóintézet, Budapest, 139 p.
- ALMÁSI, I. 2001: Petroleum Hydrogeology of the Great Hungarian Plain, Eastern Pannonian Basin, Hungary. – PhD Thesis, University of Alberta, Department of Earth and Atmospheric Sciences, Edmonton, Alberta, 312 p.
- ALMÁSI, I. 2003: Evaluation of the possible mechanisms able to generate and maintain the overpressured regime in the Pannonian Basin, Eastern Hungary. – *Journal of Geochemical Exploration* **78–79**, 139–142. [https://doi.org/10.1016/s0375-6742\(03\)00084-0](https://doi.org/10.1016/s0375-6742(03)00084-0)
- BACK, W. 1966: Hydrochemical facies and ground-water flow patterns in northern part of Atlantic Coastal Plain. – *USGS Professional Paper* **498-A**, 42 p. <https://doi.org/10.3133/pp498A>
- BALOGH V. 2016: A Duna–Tisza köze áramlási rendszereinek és a hajtóerők szerepének vizsgálata numerikus modellezéssel. – Szakdolgozat, ELTE TTK Általános és Alkalmazott Földtani Tanszék, Budapest, 103 p.
- BALOGH, V., SIMON, SZ. & TÓTH, Á. 2017a: Role of fluid driving forces in large sedimentary basins – case study from the Pannonian Basin, Hungary. – In: POSAVEC, K. & MARKOVIC, T. (eds): *44th Congress of International Association of Hydrogeologists – Book of abstracts*. Paper: T3.4.22.
- BALOGH, V., TÓTH, Á. & SIMON, SZ. 2017b: Effect of different driving forces in large sedimentary basins. – In: SMERDON, B., TÓTH, Á. & MÁDL-SZŐNYI, J. (eds): *Characterizing regional groundwater flow systems: Insight from practical applications and theoretical development: Symposium Agenda and Abstracts*, 36 p.
- BRACE, W. F. 1980: Permeability of crystalline and argillaceous rocks. – *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* **17**, 241–251. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(81\)90784-1](https://doi.org/10.1016/0148-9062(81)90784-1)
- BREDEHOEFT, J. D. 2018: The Toth Revolution. – *Groundwater* **56/1**, 157–159. <https://doi.org/10.1111/gwat.12592>
- CARDENAS, M. B. & JIANG, X. W. 2010: Groundwater flow, transport, and residence times through topography-driven basins with exponentially decreasing permeability and porosity. – *Water Resources Research* **46/11**, W11538. <https://doi.org/10.1029/2010wr009370>
- CHAMBERLAIN, T. C. 1885: *The requisite and qualifying conditions of artesian wells*. – US Geological Survey 5th Annual Report, 131–175.
- CZAUNER, B. 2012: Regional hydraulic function of structural elements and low-permeability formations in fluid flow systems and hydrocarbon entrapment in eastern-southeastern Hungary. – PhD disszertáció, ELTE TTK Általános és Alkalmazott Földtani Tanszék, Budapest, 189 p.
- CZAUNER B. & MÁDL-SZŐNYI J. 2008: A berekfürdői mélyszerkezet és vízföldtani vonatkozásai. – *Hidrologiai Tájékoztató* **48/1**, 32–34.
- CZAUNER, B. & MÁDL-SZŐNYI, J. 2011: The function of faults in hydraulic hydrocarbon entrapment: Theoretical considerations and a field study from the Trans-Tisza region, Hungary. – *AAPG Bulletin* **95/5**, 795–811. <https://doi.org/10.1306/11051010031>
- CZAUNER, B. & MÁDL-SZŐNYI, J. 2013: Regional hydraulic behavior of structural zones and sedimentological heterogeneities in an overpressured sedimentary basin. – *Marine and Petroleum Geology* **48**, 260–274. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2013.08.016>
- CZAUNER, B., MÁDL-SZŐNYI, J., ERŐSS, A. & VOJNITS, A. 2008: Mapping vegetational and salinization phenomena to evaluate the extent of Lake Kelemenszék. – *Central European Geology* **51/3**, 231–240. <https://doi.org/10.1556/ceugeol.51.2008.3.5>
- CZAUNER, B., MÁDL-SZŐNYI, J., TÓTH, J. & POGÁCSÁS, GY. 2008: Hydraulic potential anomaly indicating thermal water reservoir and gas pool near Berekfürdő, Trans-Tisza Region, Hungary. – *Central European Geology* **51/3**, 253–266. <https://doi.org/10.1556/ceugeol.51.2008.3.7>
- CSONDOR, K., CZAUNER, B., CSOBAI, L., GYÓRI, O. & ERŐSS, A. 2020: Characterization of the regional groundwater flow systems in south

- Transdanubia (Hungary) to understand karst evolution and development of hydrocarbon and geothermal resources. – *Hydrogeology Journal* **28**, 2803–2820. <https://doi.org/10.1007/s10040-020-02216-9>
- DARCY, H. 1856: *Les fontaines publiques de la ville de Dijon*. – Victor Dalmont, Paris.
- DEMING, D. 2002: *Introduction to hydrogeology*. – McGraw-Hill, New York, 480 p.
- DICKSON, M. H. & FANELLI, M. 2013: *Geothermal Energy: Utilization and Technology*. – Routledge, London, 224 p. <https://doi.org/10.4324/9781315065786>
- ENGELEN, G. B. 2013: Hierarchically nested energy flow systems of planet Earth. – *Proceedings of the International Symposium on Regional Groundwater Flow: Theory, Applications and Future 116 Development, Xi'an, China, 21–23 June 2013, China Geological Survey, Commission on Regional Groundwater Flow, IAH 225*.
- ENGELEN, G. B. & KLOOSTERMAN, F. H. 1996: *Hydrological systems analysis: methods and applications*. – Kluwer, Dordrecht, 152 p.
- ERDÉLYI, M. 1976: Outlines of the hydrodynamics and hydrogeochemistry of the Pannonian Basin. – *Acta Geologica Academiae Scientiarum Hungaricae* **20/3–4**, 287–309.
- ERHARDT, I., ÖTVÖS, V., ERŐSS, A., CZAUNER, B., SIMON, SZ. & MÁDL-SZŐNYI, J. 2017: Hydraulic evaluation of the hypogenic karst area in Budapest (Hungary). – *Hydrogeology Journal* **25/6**, 1871–1891. <https://doi.org/10.1007/s10040-017-1591-3>
- ERŐSS, A., MÁDL-SZŐNYI, J. & CSOMA, A. É. 2008: Characteristics of discharge at rose and Gellért Hills, Budapest, Hungary. – *Central European Geology* **51/3**, 267–281. <https://doi.org/10.1556/ceugeol.51.2008.3.8>
- ERŐSS, A., POROS, ZS., MÁDL-SZŐNYI, J., MINDSZENTY, A., MOLNÁR, F., RONCHI, P. & CSOMA, A. É. 2011: Role of karstic and basinal fluids in porosity evolution in the Buda Hills, Hungary. – *AAPG International Conference and Exhibition 2011: Following DaVinci's Footsteps to Future Energy Resources: Innovations from Outcrops to Assets AAPG*, Paper 1071554.
- ERŐSS, A., MÁDL-SZŐNYI, J. & CSOMA, A. É. 2012a: Hypogenic karst development in a hydrogeological context, Buda Thermal Karst, Budapest, Hungary. – *Groundwater quality sustainability: IAH selected papers on hydrogeology* **17**, 119–133. <https://doi.org/10.1201/b12715-12>
- ERŐSS, A., MÁDL-SZŐNYI, J., SURBECK, H., HORVÁTH, Á., GOLDSCHIEDER, N. & CSOMA, A. É. 2012b: Radionuclides as natural tracers for the characterization of fluids in regional discharge areas, Buda Thermal Karst, Hungary. – *Journal of Hydrology* **426–427**, 124–137. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.01.031>
- ERŐSS, A., CSONDOR, K., CZUPPON, GY., DEZSŐ, J. & MÜLLER, I. 2020: Groundwater flow system understanding of the lukewarm springs in Kistapolca (South Hungary) and its relevance to hypogene cave formation. – *Environmental Earth Sciences* **79**, Article number: 132, 15 p. <https://doi.org/10.1007/s12665-020-8870-3>
- EURÓPAI PARLAMENT & AZ EURÓPAI UNIÓ TANÁCSA 2000: Az Európai Parlament és a Tanács 2000/60/EK irányelve (2000. október 23.) a vízpolitika terén a közösségi fellépés kereteinek meghatározásáról. – *Official Journal L 327*, 22/12/2000, p. 1–73, Special edition in Hungarian Chapter 15, Volume 005 P. 275 – 346.
- FOURMARIER, P. F. J. 1939: *Hydrogéologie*. – Masson, Paris.
- FREEZE, R. A. & WITHERSPOON, P. A. 1966: Theoretical analysis of regional groundwater flow: 1. Analytical and numerical solutions to the mathematical model. – *Water Resources Research* **2/4**, 641–656. <https://doi.org/10.1029/wr002i004p00641>
- FREEZE, R. A. & WITHERSPOON, P. A. 1967: Theoretical analysis of regional groundwater flow: 2. Effect of water table configuration and subsurface permeability variation. – *Water Resources Research* **3/2**, 623–634. <https://doi.org/10.1029/wr003i002p00623>
- FREEZE, R. A. & WITHERSPOON, P. A. 1968: Theoretical analysis of regional groundwater flow: 3. Quantitative interpretations. – *Water Resources Research* **4/3**, 581–590. <https://doi.org/10.1029/wr004i003p00581>
- GALSA, A., SZIJÁRTÓ, M., TÓTH, Á., LENKEY, L. & MÁDL-SZŐNYI, J. 2019: Interaction of topography- and salinity-driven groundwater flow in synthetic numerical models and a real geological situation. – *Geophysical Research Abstracts* **21**, EGU2019-9960, 2019.
- GARAMHEGYI, T., SZÉKELY, F., CARRILLO-RIVERA, J. J. & MÁDL-SZŐNYI, J. 2020: Revision of archive recovery tests using analytical and numerical methods on thermal water wells in sandstone and fractured carbonate aquifers in the vicinity of Budapest, Hungary. – *Environmental Earth Sciences* **79**, Article no. 129. <https://doi.org/10.1007/s12665-020-8835-6>
- GARVEN, G. 1995: Continental-scale groundwater flow and geologic processes. – *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* **23/1**, 89–117. <https://doi.org/10.1146/annurev.ea.23.050195.000513>
- GLEESON, T. & MANNING, A. H. 2008: Regional groundwater flow in mountainous terrain: three-dimensional simulations of topographic and hydrogeologic controls. – *Water Resources Research* **4/10**, W10403. <https://doi.org/10.1029/2008wr006848>
- GOLDSCHIEDER, N. & DREW, D. (eds) 2014: *Methods in Karst Hydrogeology*. – Taylor & Francis, London, 280 p. <https://doi.org/10.1201/9781482266023>
- GOLDSCHIEDER, N., MÁDL-SZŐNYI, J., ERŐSS, A. & SCHILL, É. 2010: Review: Thermal water resources in carbonate rock aquifers. – *Hydrogeology Journal* **18**, 1303–1318. <https://doi.org/10.1007/s10040-010-0611-3>
- HAIJEMA, H. M. & MITCHELL-BRUKER, S. 2005: Are water tables a subdued replica of the topography? – *Ground Water* **43/6**, 781–786. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2005.00090.x>
- HALÁSZ, G. 1975: A study of the behaviour of orifice in a quasistationary flow. Proceedings of the Fifth Conference on Fluid Machinery. – In: *5th Conference on Fluid Machinery, Proceedings*, Volume 1. (A76-22978 09-02). Akadémiai Kiadó, Budapest, 389–392.
- HANTUSH, M. S. 1956: Analysis of data from pumping tests in leaky aquifers. – *Eos, Transactions American Geophysical Union* **37/6**, 702–714. <https://doi.org/10.1029/tr037i006p00702>
- HANTUSH, M. S. & JACOB, C. E. 1955: Nonsteady radial flow in an infinite leaky aquifer. – *Eos, Transactions American Geophysical Union* **36/1**, 95–100. <https://doi.org/10.1029/tr036i001p00095>
- HAVRIL, T., MOLSON, J. W. & MÁDL-SZŐNYI, J. 2016: Evolution of fluid flow and heat distribution over geological time scales at the margin of unconfined and confined carbonate sequences – A numerical investigation based on the Buda Thermal Karst analogue. – *Marine and Petroleum Geology* **78**, 738–749. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2016.10.001>

- HAVRIL, T., TÓTH, Á., MOLSON, J. W., GALSA, A. & MÁDL-SZŐNYI, J. 2018: Impacts of predicted climate change on groundwater flow systems: Can wetlands disappear due to recharge reduction? – *Journal of Hydrology* **563**, 1169–1180. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.09.020>
- HUBBERT, M. K. 1940: The theory of ground-water motion. – *The Journal of Geology* **48/8**, 785–944. <https://doi.org/10.1086/624930>
- IAH: Strategic Overview Series. <https://iah.org/education/professionals/strategic-overview-series> Utolsó megtekintés időpontja: 2020.07.19.
- INGEBRITSEN, S., SANFORD, W. & NEUZIL, C. 2006: *Groundwater in Geologic Processes*. – Cambridge University Press, Cambridge, UK, 536 p.
- JIANG, X. W., WAN, L., CARDENAS, M. B., GE, S. & WANG, X. S. 2010: Simultaneous rejuvenation and aging of groundwater in basins due to depth-decaying conductivity and porosity. – *Geophysical Research Letters* **37/5**, L05403. <https://doi.org/10.1029/2010gl042387>
- JIANG, X. W., WANG, X. S., WAN, L. & GE, S. 2011: An analytical study on stagnation points in nested flow systems in basins with depth-decaying hydraulic conductivity. – *Water Resources Research* **47/1**, W01512. <https://doi.org/10.1029/2010wr009346>
- JIANG, X. W., CHERRY, J. & WAN, L. 2020: Flowing wells: history and role as a root of groundwater hydrology. – *Hydrology and Earth System Sciences Discussion*, in review. <https://doi.org/10.5194/hess-2020-270>
- KAPILLER R. 2016: Hidrogeológiai modellezés a bemenő földtani paraméterek változékonyságának függvényében. – Diplomamunka, ELTE TTK Általános és Alkalmazott Földtani Tanszék, Budapest, 85 p.
- KING, F. H. 1899: Principles and conditions of the movement of groundwater. – *US Geological Survey Annual Report* **19** (Part II), 59–294.
- KLIMCHOUK, A. B. 2007: Hypogene speleogenesis: hydrogeological and morphogenetic perspective. – *Special paper no. 1, National Cave and Karst Research Institute*, Carlsbad, NM, 106 p.
- KOVÁCS-BODOR, P., ANDA, D., JURECSKA, L., ÓVÁRI, M., HORVÁTH, Á., MAKK, J. & MÁDL-SZŐNYI, J. 2018: Integration of in situ experiments and numerical simulations to reveal the physicochemical circumstances of organic and inorganic precipitation at a thermal spring. – *Aquatic Geochemistry* **24/3**, 231–255. <https://doi.org/10.1007/s10498-018-9341-2>
- KOVÁCS-BODOR, P., CSONDOR, K., ERŐSS, A., SZIEBERTH, D., FREILER-NAGY, Á., HORVÁTH, Á. & MÁDL-SZŐNYI, J. 2019: Natural radioactivity of thermal springs and related precipitates in Gellért Hill area, Buda Thermal Karst, Hungary. – *Journal of Environmental Radioactivity* **201**, 32–42. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2019.01.020>
- KOVÁCS J. & MÜLLER P. 1980: A budai-hegyek hévizes tevékenységének kialakulása és nyomai. – *Karszt és Barlang* **2**, 93–98.
- KUTI L. & KÓRÖSSY L. 1989: *Az Alföld Földtani Atlasza: Dunaújváros–Izsák*. – Magyar Állami Földtani Intézet, Budapest, 19 p.
- LUSCZYNSKI, N. J. 1961: Head and flow of ground water of variable density. – *Journal of Geophysical Research* **66/12**, 4247–4256. <https://doi.org/10.1029/jz066i012p04247>
- MÁDLNÉ SZŐNYI J. 1997: Vízartó rendszerek sérülékenységi vizsgálata a dunántúli-középhegységi főkarsztvíztároló rendszer (DNy-i rész) példáján. – *Földtani Közlöny* **127/1–2**, 19–83.
- MÁDL-SZŐNYI, J. 2008: The contribution of József Tóth to modernization of Hungarian hydrogeology. – *Central European Geology* **51/3**, 189–201. <https://doi.org/10.1556/ceugeol.51.2008.3.2>
- MÁDLNÉ SZŐNYI J. 2019a: *Felszínalatti vízáramlások mintázata fedetlen és kapcsolódó fedett karbonátos víztartó rendszerekben a Budai-termálkarszt tágabb környezetének példáján*. – MTA Doktori értekezés, Budapest, 131 p.
- MÁDLNÉ SZŐNYI J. 2019b: A regionális pórusnyomásviszonyok jelentősége a termálvíz feltárásban és a készletek megújulásában. – *Magyar Tudomány* **180/12**, 1796–1807. <https://doi.org/10.1556/2065.180.2019.12.6>
- MÁDLNÉ SZŐNYI J., SIMON SZ., TÓTH J. & POGÁCSÁS GY. 2005: Felszíni és felszín alatti vizek kapcsolata a Duna–Tisza közti Kelemen-szék és Kolon-tó esetében. – *Általános Földtani Szemle* **30**, 93–110.
- MÁDLNÉ SZŐNYI J., ERŐSS A., HAVRIL T., POROS ZS., GYÓRI O., TÓTH Á., CSOMA A., RONCHI P. & MINDSZENTY A. 2018: Fluidumok, áramlási rendszerek és ásványtani lenyomataik összefüggései a Budai Termálkarszton. – *Földtani Közlöny* **148/1**, 75–96. <https://doi.org/10.23928/foldt.kozl.2018.148.1.75>
- MÁDL-SZŐNYI, J. & SIMON, S. 2016: Involvement of preliminary regional fluid pressure evaluation into the reconnaissance geothermal exploration – Example of an overpressured and gravity-driven basin. – *Geothermics* **60**, 156–174. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2015.11.001>
- MÁDL-SZŐNYI, J. & TÓTH, Á. 2015: Basin scale conceptual groundwater flow model for an unconfined and confined thick carbonate region. – *Hydrogeology Journal* **23/7**, 1359–1380. <https://doi.org/10.1007/s10040-015-1274-x>
- MÁDL-SZŐNYI, J. & TÓTH, J. 2009: A hydrogeological type section for the Duna–Tisza Interfluve, Hungary. – *Hydrogeology Journal* **17/4**, 961–980. <https://doi.org/10.1007/s10040-008-0421-z>
- MÁDL-SZŐNYI, J., PULAY, E., TÓTH, Á. & BODOR, P. 2015: Regional underpressure: a factor of uncertainty in the geothermal exploration of deep carbonates, Gödöllő Region, Hungary. – *Environmental Earth Sciences* **74/12**, 7523–7538. <https://doi.org/10.1007/s12665-015-4608-z>
- MÁDL-SZŐNYI, J., CZAUNER, B., IVÁN, V., TÓTH, Á., SIMON, SZ., ERŐSS, A., BODOR, P., HAVRIL, T., BONCZ, L. & SÓREG, V. 2019: Confined carbonates – Regional scale hydraulic interaction or isolation? – *Marine and Petroleum Geology* **107**, 591–612. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2017.06.006>
- MARTON L. 2009: *Alkalmazott hidrogeológia*. – ELTE Eötvös Kiadó Kft., Budapest, 626 p.
- MARTON L. 2012: Az Alföld ásványi kincse a felszín alatti víz. – *Magyar Tudomány* **2**, 206–215.
- MARTON L. & MIKÓ L. 1989: Izotóp-adatok interpretálása az Alföld hidrogeológiai kutatásában. – *Hidrologiai Közlöny* **69/1**, 50–58.
- MARTON L. & SZANYI J. 2000: A talajvíztükör helyzete és a rétegvíz termelés kapcsolata Debrecen térségében. – *Hidrologiai Közlöny* **80/1**, 2–18.
- MAXEY, G. B. 1964: Hydrostratigraphic units. – *Journal of Hydrology* **2/2**, 124–129. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(64\)90023-x](https://doi.org/10.1016/0022-1694(64)90023-x)
- MUNN, M. J. 1909: The anticlinal and hydraulic theories of oil and gas accumulation. – *Economic Geology* **4**, 509–529. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.4.6.509>
- NEUMAN, S. P. & WITHERSPOON, P. A. 1969a: Theory of flow in a confined two aquifer system. – *Water Resources Research* **5/4**, 803–816. <https://doi.org/10.1029/wr005i004p00803>

- NEUMAN, S. P. & WITHERSPOON, P. A. 1969b: Applicability of current theories of flow in leaky aquifers. – *Water Resources Research* **5/4**, 817–829. <https://doi.org/10.1029/wr005i004p00817>
- NEUMAN, S. P. & WITHERSPOON, P. A. 1972: Field determination of hydraulic properties of leaky multiple aquifer systems. – *Water Resources Research* **8/5**, 1284–1298. <https://doi.org/10.1029/wr008i005p01284>
- NEUZIL, C. E. 1994: How permeable are clays and shales? – *Water Resources Research* **30/2**, 145–150. <https://doi.org/10.1029/93wr02930>
- ORSZÁGOS VÍZÜGYI FŐIGAZGATÓSÁG 2016: Vízyűjtő-gazdálkodási Terv – A Duna-vízgyűjtő magyarországi része, 676 p.
- ÖTVÖS V., ERHARDT I., ERŐSS A., CZAUNER B., SIMON SZ. & MÁDLNÉ SZŐNYI J. 2017: A Budai Termálkarst hidraulikai viszonyainak barlangképződési vonatkozásai. – *Karsztfelődés* **22**, 5–33.
- PADISÁK J., ÁCS É., BORICS G., BUCZKÓ K., GRIGORSZKY I., KOVÁCS CS., MÁDLNÉ SZŐNYI J. & SORÓCZKI-PINTÉR É. 2006: A Víz Keretirányelv és vízi habitatdiverzitás konzervációbiológiai vonatkozásai. – *Magyar Tudomány* **167**, 663–669.
- PAPP B. 1974: Felszínalatti vizek oxigén-18 és deutérium összetevőinek regionális vizsgálata. – *Kézirat*, Budapest.
- PETHŐ S., MÁDLNÉ SZŐNYI J. & TÓTH J. 2004: A Kisalföldi-medence regionális felszín alatti gravitációs vízáramlási képe hidraulikai adatfeldolgozás alapján. – *Földtani Kutatás* **41/2**, 13–20.
- POROS, ZS., ERŐSS, A., MÁDL-SZŐNYI, J., MINDSZENTY, A., MOLNÁR, F., RONCHI, P. & CSOMA, E. A. 2010: Mixing of karstic and basinal fluids affecting hypogene cave formation and mineralization in the Buda Thermal Karst, Hungary. – In: ZAHARIA, L., KIS, A. TOPA, B., PAPP, G. & WEISZBURG, T. (eds): *Acta Mineralogica Petrographica Abstract Series*, Budapest, 864 p.
- POROS, ZS., MINDSZENTY, A., MOLNÁR, F., PIRONON, J., GYÓRI, O., RONCHI, P. & SZEKERES, Z. 2012: Imprints of hydrocarbon-bearing basinal fluids on a karst system: mineralogical and fluid inclusion studies from the Buda Hills, Hungary. – *International Journal of Earth Sciences* **101/2**, 429–452. <https://doi.org/10.1007/s00531-011-0677-8>
- ROBINSON, N. I. & LOVE, A. J. 2014: Hidden channels of groundwater flow in Tóthian drainage basins. – *Advances in Water Resources* **62**, 71–78. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2013.10.004>
- RÓNAI A. 1963: Az Alföld negyedkori rétegeinek vízföldtani vizsgálata. – *Hidrológiai Közlöny* **43/5**, 378–391.
- RÓNAI A. 1975: A talajvíz és rétegvizek kapcsolata az Alföldön. – *Hidrológiai Közlöny* **55/2**, 49–53.
- RÓNAI A. 1985: Az Alföld negyedidőszaki földtana. – *Geologica Hungarica Series Geologica* **21**, 1–412.
- ROSTRON, B. J. & TÓTH, J. 1996: Ascending fluid plumes above Devonian pinnacle reefs: numerical modeling and field example from west-central Alberta, Canada. – In: SCHUMACHER, D. & ABRAMS, M. A. (eds): *Hydrocarbon migration and its near-surface expression*. AAPG Memoir **66**, 185–201.
- SCHAFARZIK F. 1928: Budapest székesfőváros ásványvízforrásainak geológiai jellemzése és grafikus feltüntetése. – *Hidrológiai Közlöny* **4-6**, 14–20.
- SCHMIDT ELIGIUS R. & ALMÁSSY E. (szerk.) 1962: *Magyarország vízföldtani atlasza*. – Magyar Állami Földtani Intézet, 78 p.
- SIMON, SZ., MÁDL-SZŐNYI, J., MÜLLER, I. & ZSEMLE, F. 2008: Identification of near-surface saline water in the Lake Kelemenszék area, Danube–Tisza Interfluvium, Hungary. – *Central European Geology* **51/3**, 219–230. <https://doi.org/10.1556/ceugeol.51.2008.3.4>
- SIMON, SZ., MÁDL-SZŐNYI, J., MÜLLER, I. & POGÁCSÁS, GY. 2011: Conceptual model for surface salinization in an overpressured and a superimposed gravity-flow field, Lake Kelemenszék area, Hungary. — *Hydrogeology Journal* **19**, 701–717. <https://doi.org/10.1007/s10040-011-0711-8>
- SIMMONS C. T. & SHARP J. 2001: Variable-density groundwater flow and solute transport in heterogeneous porous media: Approaches, resolutions and future challenges. — *Journal of Contaminant Hydrology* **52**, 245–275. [https://doi.org/10.1016/S0169-7722\(01\)00160-7](https://doi.org/10.1016/S0169-7722(01)00160-7)
- STIFF, H. A. 1951: The interpretation of chemical water analysis by means of patterns. – *Journal of Petroleum Technology* **3/10**, 15–17. <https://doi.org/10.2118/951376-g>
- STUTE, M. & DEÁK, J. 1989: Environmental isotope study (^{14}C , ^{13}C , ^{18}O , D, noble gases) on deep groundwater circulation systems in Hungary with reference to paleoclimate. – *Radiocarbon* **31/3**, 902–918. <https://doi.org/10.1017/S0033822200012522>
- SZANYI J. 2004: Felszín alatti víztermelés környezeti hatásai a Dél-Nyírség példáján. – PhD disszertáció, Szegedi Tudományegyetem, Ásványtani, Kőzettani és Geokémiai Tanszék, Szeged. 88 p.
- SZEBÉNYI L. 1955: Artézi vizek függőleges irányú mozgásáról. – *Hidrológiai Közlöny* **35/11–12**, 437–440.
- SZEBÉNYI L. 1965: Az artézi víz forgalmának mennyiségi meghatározása. – *Hidrológiai Közlöny* **45/3**, 125–130.
- SZÉKELY F. 1977: Víztermelés hatására kialakuló regionális vízszintsüllyedés számítógépes vizsgálata negyedkori képződményeinkben. – *Hidrológiai Közlöny* **57/3**, 118–125.
- SZIJÁRTÓ, M., GALSA, A., TÓTH, Á. & MÁDL-SZŐNYI, J. 2019a: 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., TÓTH, Á., LENKEY, L. & MÁDL-SZŐNYI, J. 2019b: Numerical investigation of the interaction of different driving forces on groundwater flow and temperature pattern in a theoretical basin and in the Buda Thermal Karst, Hungary. – *Geophysical Research Abstracts* **21**, EGU2019-5830, 2019.
- SZÓCS, T., RMAN, N., ROTÁR-SZALKAI, Á., TÓTH, GY., LAPANJE, A., ČERNÁK, R. & NÁDOR, A. 2018: The upper pannonian thermal aquifer: Cross border cooperation as an essential step to transboundary groundwater management. – *Journal of Hydrology: Regional Studies* **20**, 128–144. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2018.02.004>
- TERZAGHI, K. 1923: Die berechnung der durchlässigkeitsziffer des tones aus dem verlauf der hydrodynamischen spannungsscheinungen. – *Akademie der Wissenschaften in Wien, Sitzungsberichte, Mathematisch-naturwissenschaftliche Klasse Part IIa*, **132/3–4**, 125–138. (Reprinted in BJERRUM, L., CASSAGRANDE, A., PECK, R. B. & SKEMPTON, A. W. [eds] 1960: *From Theory to Practice in Soil Mechanics*. John Wiley, New York, 133–146).
- TÓTH Á. 2018: A Balaton-felvidék felszínalatti vizeinek hidraulikai kapcsolata a Bakonnyal és a Balatonnal. – PhD disszertáció, Eötvös Loránd Tudományegyetem, Budapest, 202 p.

- TÓTH, Á. & MÁDL-SZŐNYI, J. 2016: Scale-dependent evaluation of an unconfined carbonate system – Practical application, consequences and significance. – *Karst without boundaries, IAH – Selected papers on hydrogeology* **23**, 199–214. <https://doi.org/10.1201/b21380-17>
- TÓTH, Á. & MÁDL-SZŐNYI, J. 2019: Where does the drinking water come from? – Interrelationship between surface water and groundwater in a carbonate area, Hungary. – *Geophysical Research Abstracts* **21**, EGU2019-8902, 2019.
- TÓTH, Á., GALSA, A. & MÁDL-SZŐNYI, J. 2020: Significance of basin asymmetry and regional groundwater flow conditions in preliminary geothermal potential assessment – Implications on extensional geothermal plays. – *Global and Planetary Change* **195**, 103344. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2020.103344>
- TÓTH, Á., HAVRIL T. & MÁDLNÉ SZŐNYI J. 2020: Rejtőzködő vizek nyomában a Balaton térségében – Mi hiányzik a Balatonból? – In: BABINSZKI E. & HORVÁTH F. (szerk.) *A Balaton kutatása Lóczy Lajos nyomdokán*. – MFT, Budapest, 287–311.
- TÓTH, Á., HAVRIL, T., SIMON, SZ., GALSA, A., SANTOS F. A. M., MÜLLER, I. & MÁDL-SZŐNYI, J. 2016: Groundwater flow pattern and related environmental phenomena in complex geologic setting based on integrated model construction. – *Journal of Hydrology* **539**, 330–344. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.05.038>
- TÓTH, GY., RMAN N., ROTÁR-SZALKAI, Á., KERÉKGYÁRTÓ, T., SZÓCS, T., LAPANJE A., ČERNÁK R., REMSÍK A., SCHUBERT G. & NÁDOR, A. 2016: Transboundary fresh and thermal groundwater flows in the west part of the Pannonian Basin. – *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **57**, 439–454. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.021>
- TÓTH, J. 1962: A theory of groundwater motion in small drainage basins in central Alberta, Canada. – *Journal of Geophysical Research* **67/11**, 4375–4387. <https://doi.org/10.1029/jz067i011p04375>
- 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>
- TÓTH, J. 1970: A conceptual model of the groundwater regime and the hydrogeologic environment. – *Journal of Hydrogeology* **10/2**, 164–176. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(70\)90186-1](https://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90186-1)
- TÓTH, J. 1978: Gravity induced cross-fundamental flow of formation fluids, Red Earth Region, Alberta, Canada: Analysis, patterns, and evolution. – *Water Resources Research* **14/5**, 805–843. <https://doi.org/10.1029/wr014i005p00805>
- TÓTH, J. 1980: Cross-formational gravity-flow of groundwater: A mechanism of the transport and accumulation of petroleum (The generalized hydraulic theory of petroleum migration). – In: ROBERTS, W. H. & CORDELL, R. J. (eds): *Problems of Petroleum Migration. AAPG Studies in Geology* **10**, Tulsa, Oklahoma, USA, 121–167.
- TÓTH, J. 1995a: Hydraulic continuity in large sedimentary basins. – *Hydrogeology Journal* **3/4**, 4–16. <https://doi.org/10.1007/s100400050250>
- TÓTH J. 1995b: A nagy kiterjedésű üledékes medencék felszín alatti vizeinek hidraulikai folytonossága. – *Hidrologiai Közlemények* **75/3**, 153–159.
- TÓTH, J. 1999: Groundwater as a geologic agent: An overview of the causes, processes, and manifestations. – *Hydrogeology Journal* **7/1**, 1–14. <https://doi.org/10.1007/s100400050176>
- TÓTH, J. 2003: Fluid-potential patterns and hydrocarbon deposits in groundwater flow-fields induced by gravity and tectonic compression, Hungarian Great Plain, Pannonian Basin. – *Journal of Geochemical Exploration* **78–79**, 427–431. [https://doi.org/10.1016/s0375-6742\(03\)00024-4](https://doi.org/10.1016/s0375-6742(03)00024-4)
- TÓTH, J. 2009a: *Gravitational Systems of Groundwater Flow – Theory, Evaluation, Utilization*. – University Press, Cambridge, UK, 310 p.
- TÓTH, J. 2009b: *Springs seen and interpreted in the context of groundwater flow-systems*. – GSA Annual Meeting, 2009. október 18–21., Portland, USA.
- TÓTH, J. & ALMÁSI, I. 2001: Interpretation of observed fluid potential patterns in a deep sedimentary basin under tectonic compression: Hungarian Great Plain, Pannonian Basin. – *Geofluids* **1**, 11–36. <https://doi.org/10.1046/j.1468-8123.2001.11004.x>
- TÓTH, J. & MILLAR, R. F. 1983: Possible Effects of Erosional Changes of the Topographic Relief on Pore Pressures at Depth. – *Water Resources Research* **19/6**, 1585–1597. <https://doi.org/10.1029/wr019i006p01585>
- URBANCSEK J. 1963: A földtani felépítés és rétegvíznyomás közötti összefüggés az Alföldön. – *Hidrologiai Közlemények* **43/3**, 205–218.
- VARSÁNYI Z. 2000: Felszín alatti vízmozgási rendszerek elkülönítése a Dél-Alföldön kémiai és izotópos vizsgálatok alapján. – *Hidrologiai Közlemények* **80/3**, 145–156.
- VARSÁNYI, I. & Ó. KOVÁCS, L. 2009: Origin, chemical and isotopic evolution of formation water in geopressed zones in the Pannonian Basin, Hungary. – *Chemical Geology* **264**, 187–196. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2009.03.006>
- VENDEL M. & KISHÁZI P. 1964: Összefüggések melegforrások és karsztvizek között a Dunántúli-középhegységben megfigyelt viszonyok alapján. – *MTA Műszaki Tudományos Osztályának Közleményei* **32**, 393–417, **33**, 205–234.
- WALTON, W. C. 1960: Leaky artesian aquifer conditions in Illinois. – *Illinois Water Survey Report of Investigations* **39**, 27 p.
- WANG, X. S., JIANG, X. W., WAN, L., GE, S. & LI, H. 2011: A new analytical solution of topography-driven flow in a drainage basin with depth dependent anisotropy of permeability. – *Water Resources Research* **47/9**, W09603. <https://doi.org/10.1029/2011wr010507>
- ZHOU, Y. & LI, W. 2011: A review of regional groundwater flow modeling. – *Geoscience Frontiers* **2/2**, 205–214. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2011.03.003>
- ZIJL, W. 1999: Scale aspects of groundwater flow and transport systems. – *Hydrogeology Journal* **7/1**, 139–150. <https://doi.org/10.1007/s100400050185>
- ZIJL, W. 2019: Creep Flow Systems in the Earth Crust: A Complement to Groundwater Flow Systems. – *Geophysical Research Abstracts* **21**, EGU2019-1790-3, 2019.
- ZSEMLE F., MÁDLNÉ SZŐNYI J. & ANGELUS B. 2002: Felszíni hidraulikai rezsimjelleg térképezése az izsáki Kolon-tó környezetében. – *Hidrologiai Közlemények* **82**, 110–119.

Kézirat beérkezett: 2020. 07. 19.

A jó, a rossz és a csúf? – avagy a szénhidrogén-kutatás dicső múltja, (még) létező jelene és bizonytalan jövője a Pannon-medencében – Szemle

LEMBERKOVICS Viktor¹, KISS Károly², VÁRY Miklós³, KISS Balázs⁴, KOVÁCS Gábor⁵

¹lemerkovic36@outlook.hu

²Miskolci Egyetem Alkalmazott Földtudományi Kutató Intézet (afkkiss@uni-miskolc.hu)

³Magyar Olaj- és Gázipari Múzeum (ni.bapu@gmail.com)

⁴MOL Nyrt. (bakiss@mol.hu)

⁵Magyar Bányászati és Földtani Szolgálat, 1145 Budapest, Columbus utca 17–23. (kovacs.gabor@mbfsz.gov.hu)

The good, the bad and the ugly? – or the past, the (still) existing present and the uncertain future of the hydrocarbon exploration in the Pannonian Basin – Review

Abstract

The history of hydrocarbon exploration in Hungary now covers more than a century. Starting with the simple tools used initially and surface maps, the domestic hydrocarbon exploration grown by now into a multidisciplinary, complex industry, following and applying international trends and techniques. From time to time, new exploration techniques have been introduced in the constantly “maturing” Pannonian Basin, and significant discoveries have been made, which indicate the continuous development and success of the professionals involved. In this paper, the authors do not aim to summarise all exploration results or applied technological innovations in chronological order. Nevertheless, we would like to present the ones that have significantly contributed to the current effectiveness of the exploration as milestones, at least in our opinion. All eras have had and have such significant technological development and discoveries which further development could not have taken place, or would have followed a much more difficult path. It is enough to think of the Eötvös pendulum, the routine application of 2D and – much later – 3D reflection seismic measurements, the spread of computers in the exploration workflow, or today’s complex geological models not to mention the significant breakthrough, such as Hajdúszoboszló, Nagylengyel, Algyő, or the recently discovered fields.

Past, present, future. There is concrete knowledge and factual material about the former two, regardless of whether we have to talk about good or bad things. However, the future is challenging both for the global and for the Hungarian oil and gas industry. Exploration of a mature hydrocarbon province is difficult not only because of the remaining undiscovered field sizes are expected to be rather small, which are mostly at the limit of commercial success and requires a complex technology. Despite the increasing demand of resources as supply chains are “short-circuited” due to globalization, high economic dependence, the energy policy chosen by the European Union as a whole it is a significant challenge that is becoming increasingly difficult for E&P companies and professionals. We also try to outline some possible technical solutions to these challenges, some of which may really lead to a not so ugly future.

Keywords: hydrocarbon exploration & production, field geophysics, 2D–3D seismic data, geo-modelling, drilling, HC discovery, DHI, underexplored plays

Összefoglalás

A magyarországi szénhidrogén-kutatás története immár több mint egy évszázados távlatra tekint vissza. A kezdeti egyszerű eszközökkel, felszíni térképek alapján történő kutatásból mára – követve és alkalmazva a nemzetközi trendeket és technikákat – egy sok tudományágat felölelő, komplex iparágá nőtt ki magát a honi szénhidrogénipar is. A kutatási szempontból folyamatosan „érő” Pannon-medencében időről-időre kerültek bevezetésre újabb kutatási technikák, történetek jelentős felfedezések, melyek jelzik a szakemberek folyamatos fejlődését és sikereit. Cikkünkben nem célunk minden kutatási eredményt vagy alkalmazott technológiai újítást kronológiai sorrendben bemutatni, azonban azokat, melyek megítélésünk szerint jelentősen hozzájárultak a kutatás mindenkorai eredményességéhez mint mérföldköveket szeretnénk ismertetni. Minden korszaknak voltak és vannak olyan nagy jelentőségű technológiai újításai és felfedezései, amelyek nélkül a további fejlődés nem, vagy sokkal rögzöbber úton ment volna végbe. Elég csak az Eötvös-ingára, a 2D majd – jóval később – a 3D szeizmikus mérések rutinszerű alkalmazására, a számítógépek kutatásban való térhódítására vagy a mai komplex geológiai modellekre gondolni, hogy a jelentősebb eredményeket, mint például a hajdúszoboszlói, nagylengyeli, algyői vagy a közelmúltban felfedezett mezőket ne is említsük.

Múlt, jelen, jövő. Előbbi kettőről konkrét tudás, értékelhető tényanyag áll rendelkezésre, függetlenül attól, hogy jó vagy rossz dolgokról kell beszélnünk. A jövő azonban számos kihívást jelent a nemzetközi és a hazai olajipar számára. Egy érett szénhidrogén-medence kutatása nemcsak a komplex technológiát igénylő, többnyire éppen csak a gazdaságosság határán mozgó, kis méretű, reménybeli mezők miatt van nehéz helyzetben. A növekvő nyersanyagigény ellenére a globalizáció miatt „rövidre zárt” ellátási láncok, a nagymértékű gazdasági függőség, az Európai Unió által választott energiapolitika összességében olyan méretű kihívást jelent, amellyel egyre nehezebb a kutatásban részt vevő cégeknek és szakembereknek megbirkózniuk. E kihívásokra is megpróbálunk néhány lehetséges kutatás-technikai megoldást felvázolni, amelyek közül némelyik elvezethet oda, hogy a jövő mégse legyen olyan csúf.

Tárgyszavak: szénhidrogén-kutatás és -termelés, terepi geofizika, 2D–3D szeizmikus adatok, geomodellezés, fúrás, szénhidrogén-felfedezés, direkt szénhidrogén indikátor, alulkutatott felhalmozódási egységek

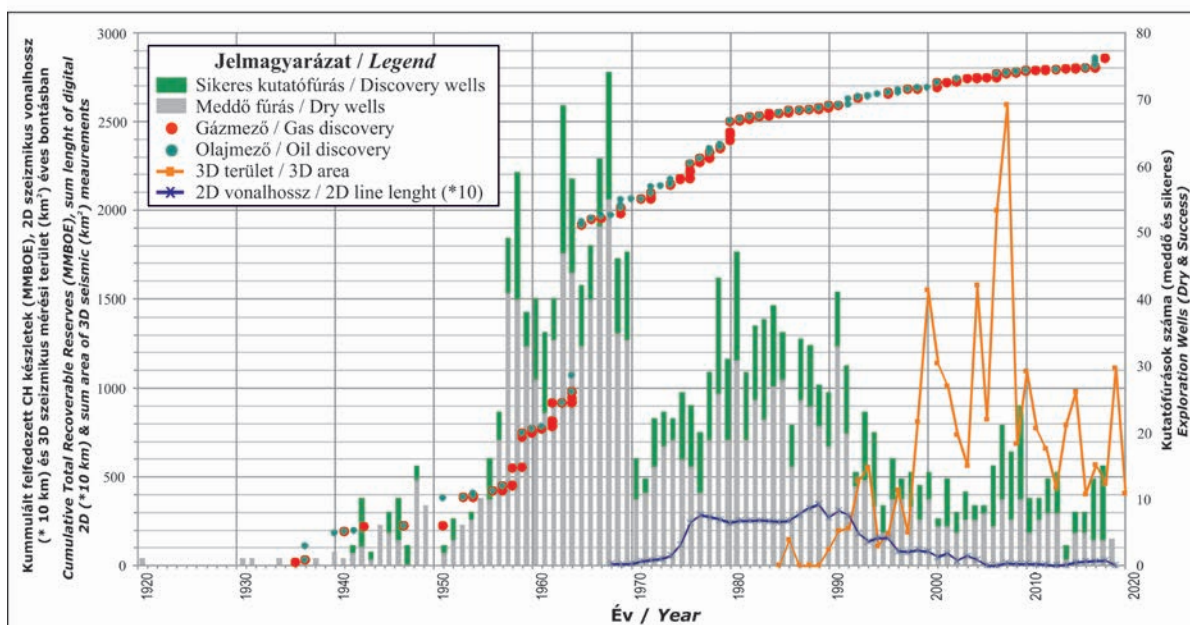
Bevezetés

A mai Magyarország területén az elmúlt több mint 8 évtized során több mint 300 mezőt fedeztek fel, melyek összesített kitermelhető szénhidrogénvagyona megközelítőleg 2,9 milliárd hordó olajegyenérték (1. ábra). A máig feltárt kitermelhető vagyon körülbelül kétharmadát a gáz-nemű és egyharmadát a folyékony (kőolaj és gázkondezátum) szénhidrogének teszik ki, amelyek azonban az egyes szénhidrogéntípusok kihozatali tényezőinek figyelembevételével az 50%-hoz közelebbi arányú földtani mennyiségekből származnak. A termelési diagramon (2. ábra) is látható, a kitermelt kb. 2,4 milliárd hordó olajegyenérték szénhidrogén nagyobb része földgáz, kisebb része kőolaj. A két diagram görbéit megfigyelve számos következtetésre juthat az olvasó. Megfigyelhető, hogy a találatok milyen mérettartományba esnek, milyen trendet alkot a lefutásuk (1. ábra, gáz- és olajmezők görbék – kutatástörténeti diagram / creaming curve). Látható, hol és mikor volt az első találat, mikor volt a kutatás aranykora, mikortól vált éretté a medence, vagy akár az is, hogy az egyes kutatási eszközök, módszerek bevezetése, felfutása milyen hatással volt a talá-

lati arányokra. Ugyanez leolvasható a termelési diagramról is (2. ábra), csak itt egy időbeli elcsúszást tapasztalhatunk a kutatásra jellemző görbékhez képest, hiszen a telepek, mezők termelésbe állításához időre van szükség.

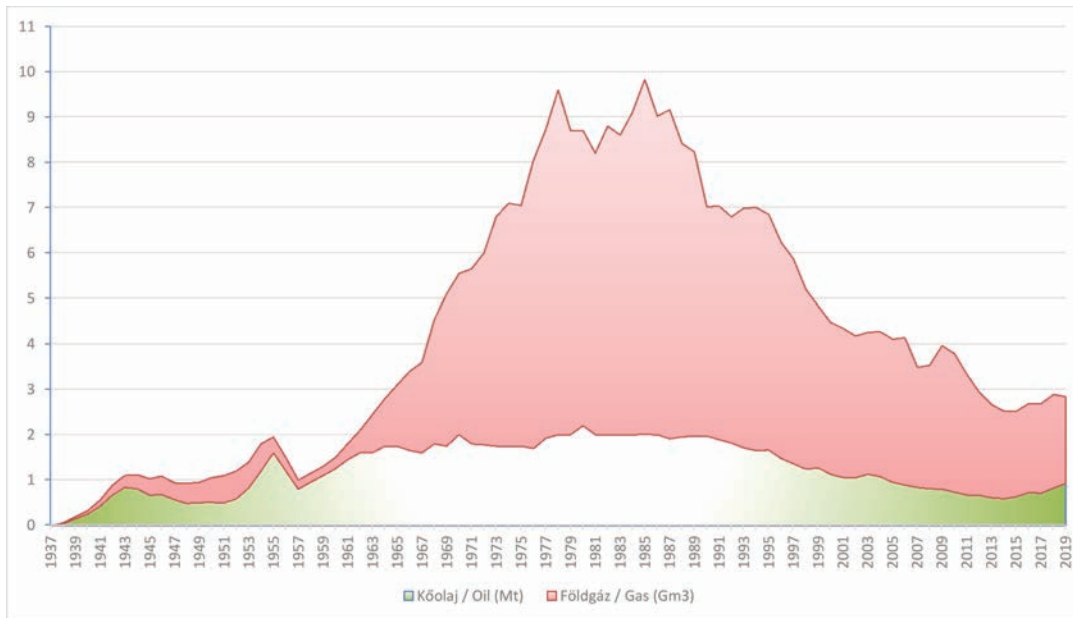
A hazai szénhidrogén-kutatás történetét és jövőképét három fejezetre bontottuk. A felbontás alapja nem feltétlenül a találatok számosságához köthető, sokkal inkább egy-egy domináns kutatási technológia bevezetéséhez, valamint az adott korszak kutatási aktivitására és annak sikerességére gyakorolt hatásához.

A legnagyobb szelet a **múlt**, hiszen számos jelentős technológiai és eredményességi mérföldkő emelhető ki a szénhidrogén-kutatás kezdeti éveiből és aranykorából. A kezdetek domináns kutatási eszköze a gravimetria volt, legfontosabb éve, az **áttörés** pedig 1937, amikor az első gazdaságosan kitermelhető szénhidrogén-felhalmozódás termelése megkezdődött a Budafapuszta–2 jelű kúttal. Ezt követően egymást érték a találatok Dunán innen és túl: Lovászi, Nagylengyel, Pusztaföldvár, Battonya és Hajdúszoboszló, hogy csak a legnagyobbakat említsük. A kutatás **aranykora** a 60-as – 70-es évekre tehető. Az alapvető kutatási eszköz nem változott, de kiegészült a kezdeti analóg 2D szeizmikus



1. ábra. Kombinált kutatástörténeti diagram – Magyarország – 2020. augusztusi állapot (forrás: MBFSZ adattár, IHS Markit)

Figure 1. Combined creaming curve - Hungary - as of August, 2020 (source: MBFSZ database, IHS Markit)



2. ábra. Magyarország kőolaj- és földgáztermelése 1937–2019 között (forrás: MBFSZ adatbázis)

Figure 2. Oil and gas production of Hungary between 1937–2019 (source: MBFSZ database)

módszerrel, és ekkorra érett be igazán az a tudás és tapasztalat, amely a korábbi évtizedekben felhalmozódott: felfedezték a Szegedi-medence környezetének jelentős mezőit, Szankot, Üllést, Algyőt, Kiskundorozsmát és Szeged-Móravárost. Mennyire volt sikeres ez az időszak? Magáért beszél a tény, hogy mire megtörtént a paradigmaváltás a kutatásban (amelyet a szerzők a digitális jelrögzítésű és feldolgozású 2D szeizmika térnyerésével azonosítottak) és véget ért az analóg korszak, a máig felfedezett teljes szénhidrogén-vagyon több mint 75%-át (!) már megtalálták (1. ábra). A korszak végén, már a modern 2D szeizmikus mérések uralta kutatási aktivitás során történtek még jelentős felfedezések (Szeghalom, Sávoly, Földes-Kelet, Mezősas), de ezek már egy új szakaszt jeleztek előre a medence életében: az érett kutatási fejezetet.

A szénhidrogén-kutatás **jelenét** egyértelműen a szeizmikus 3D mérések – mint legfőbb kutatási eszköz – dominanciája jellemzi. Ennek az eszköznek a széleskörű alkalmazása a 90-es években kezdődött, akkor, amikor a medence kutatása érett fázisba fordult. Ettől kezdve már leginkább a készletpótlás, nem pedig a készletek további növelése jelenti a legnagyobb kihívást a szakemberek számára. Az egyre fejlettebb és részletesebb kutatási eszközök ellenére egyre kisebb méretű szerkezeteket, felhalmozódásokat kutatunk meg és fogunk termelésbe, amelyek rövid távon gazdaságosan művelhetők, azonban a korábban kitermelt készletek pótlására csak részben alkalmasak. Ezért is látható a termelési diagramon (2. ábra) egy kezdetben erőteljes, majd némiképp ellaposodó termeléseszkökenés a 80-as évek végétől. A kutatástörténeti diagramon (1. ábra) is megfigyelhető, hogy a találati szám és a sikeres kutatófúrások részaránya ugyan növekszik, de a felfedezett szénhidrogénvagyon – a korábbiakhoz képest – szerényebb. Ugyanakkor ennek a kutatási korszaknak is megvannak a saját sikerei, gondoljunk

csak a Paleogén-medencében elért eredményekre, ahol a Magyar Olaj és Gázipari Nyrt. (MOL) több millió tonnányi kitermelhető kőolajvagyonot fedezett fel (Gomba, Tóalmás, Nagykáta). A másik ilyen sikertörténet a különböző szeizmikus attribútumok sikeres értelmezése alapján új lendületet kapott földgázkutatás, amely különösen a Tiszántúlon hozott új találatokat (Hosszúpályi-Dél, Dévaványa környezete, Körösújfalú és Komádi térsége, hogy csak néhányat említsünk). Ugyanezen – attribútum alapú – kutatási módszertan alapján a Magyar Horizont Energia Kft. (HHE) a Dunántúlon, a Dráva-medence északkéleti peremvidékén csupán pár éve fedezte fel az elmúlt 30 év legjelentősebb méretű kőolajmezőjét (Pettend). A 2000-es években újdonságként megjelenő *nem hagyományos szénhidrogén-előfordulások* kutatásában is történtek előrelépések, és értünk el részeredményeket (Berettyóújfalú, Lovászi–Petisovci, Nyékpusztá, Kiskunhalas környezetében). Mindezek a sikerek azonban csak arra voltak elegendőek, hogy a termelés csökkenésének ütemét tompítsák, rövid időszakokra – mint például az említett pettendi felfedezés hatása – némileg megfordítsák (2. ábra).

Mit tartogat a **jövő** a szénhidrogénipar számára egy olyan érett szénhidrogén provinciában, mint amilyen a Pannon-medencében található? Munkánkban igyekszünk rávilágítani, hogy milyen *szénhidrogén-földtani, technológiai és üzleti lehetőségeket* vehetünk figyelembe, aknázhatunk ki a jövőbeli kutatás-termelés sikeressége érdekében.

Annak ellenére, hogy ez a munka nem új eredmények közlése szándékával készült, mégis nagy mennyiségű publikus, valamint – cégek hozzájárulásaival – ipari adatot és tapasztalatot használtunk fel a bemutatott diagramok, ábrák, térképek és statisztikák összeállításához és értékeléséhez.

A fúrási és mezőbeli alapadatokat az IHS Markit adatbázisa szolgáltatta, míg a szeizmikus és kutatási-termelési

területek térképi ábrázolásához szükséges adatokat elsősorban a Magyar Bányászati és Földtani Szolgálat (MBFSZ) adattára biztosította számunkra. A közel 9000 fúrás, a több ezer szeizmikus 2D, a száznál is több 3D mérés, nem beszélve a több mint 300 mező adatainak átnézése, osztályozása alapján ugyanakkor tudatában vagyunk annak, hogy egy ennyire összetett adatbázis esetén maradnak pontatlanságok. A szeizmikus adatok tekintetében meglehetősen nagy pontosságot sikerült elérni, kivéve az 1968 előtti (analog) 2D méréseket, amelyekről valójában nem áll rendelkezésre adatbázis. A kutatási területek, bányatelkek, jövőbeli kutatható területek ábrázolásához felhasznált adatok 2020. augusztusi állapotnak felelnek meg, így pontosnak tekinthetők. A fúrási adatok osztályozása nem egyszerű, helyenként már annak az alapvető kérdésnek a tisztázása is nehézséget okoz, hogy egy régebbi fúrás kutató jellegű volt vagy esetleg lehatároló, termelő. A legnagyobb pontatlanságokkal mégis a mezők adatai terheltek. A mezőadatok tekintetében ugyanis csak azokat vehettük figyelembe, amelyek feldolgozásra kerültek, vagy jelentés készült róluk. Egy-egy nagyobb szénhidrogénmező vagyont többször felülvizsgálják a termelés során, és nem minden esetben áll rendelkezésünkre a legfrissebb vagyonbecslés.

Elsőként röviden tekintsük át a szénhidrogén-kutatás és -termelés szabályozási hátterét.

Bányatörvények és ellenőrző szervezetek

A bányászati tevékenység kereteit a hatályos jogszabályok és az illetékes hatóságok határozzák meg.

A kőolaj- és földgázkutatás kezdete a 19. század közepére tehető, ennek megfelelően azt az 1854-ben kibocsátott Osztrák Általános Bányatörvény keretei szabályozták. Bár magyar törvénnyel való kiváltására számos kísérlet történt (1870, 1884, 1889, 1903), anakronisztikus módon – világháborúk és rendszerváltozások ellenére – 1960-ig alkalmazni kellett. A törvény szerint a legfontosabb „fenntartott ásványok” kutatását és termelését csak engedély alapján lehetett végezni. Egy területre kizárólagos kutatási jogot (ún. zárt kutatómánt) lehetett szerezni, amit az illetékes bányakapitányságon kellett bejelenteni. Kezdetben a bányakapitányságokat a császári kamarák, a földtani munkálatokat a bécsi Földtani Intézet irányították. A kiegyezés után főbányahatóságként az illetékes minisztérium (amely időről-időre változott) működött. Jelentős jogalkotási változás volt az ásványolaj-félékről és a földgázról szóló, 1911. évi VI. törvénycikk elfogadása. Ennek alapján az állam kizárólagos bányászati jogot biztosított magának, de lehetővé tette, hogy a kormány a parlament jóváhagyásával a kutatás, kitermelés és értékesítés jogát meghatározott időre, meghatározott feltételek mellett másokra is átruházhassa.

A II. világháború utáni időszakot a végrehajthatatlan és végrehajthatatlan jogszabályok tömege, valamint a gyorsan változó intézmények jellemezték. 1955. február 1-jén felállították az Országos Földtani Főigazgatóságot, ekkor

alakult meg az Országos Bányaműszaki Felügyelőség és ebben az évben hozták létre az Országos Ásványvagyon Bizottságot is.

Az új magyar bányatörvény 1960-ban lépett életbe, melynek alapján a bányászat felügyeletét, a bányavagyon és az ásványi nyersanyagok védelmét az Országos Bányaműszaki Főfelügyelőség látta el.

1964. július 1-jén jött létre a Központi Földtani Hivatal (KFH), ennek felügyelete alá került a Földtani Intézet és a Geofizikai Intézet. A KFH látta el a földtani kutatások felügyeletét, dolgozta ki a kutatások távlati és éves tervét, kezelte a kutatásokra fordítható költségvetési előirányzatokat és irányította, ellenőrizte az ásványi nyersanyagmérlegek elkészítését, az ásványvagyon-gazdálkodási szabályok megtartását.

1993. június 12-én lépett hatályba az 1993. évi XLVIII. törvény a bányászatról (Bányatörvény), amely a törvény V. részének 20. pontjában definiált „nyílt” területeken engedélyhez, a 24. pontban meghatározott „zárt” területeken pedig koncessziós szerződéshez kötötte az ásványi nyersanyagok kutatását és kitermelését. Ekkor az általános másodfokú hatóság a Magyar Bányászati Hivatal lett, az elsőfokú bányahatóság feladat- és hatáskörét a bányakapitányságok látták el, míg a Magyar Geológiai Szolgálat hatáskörébe utalta a törvény az Országos Ásványvagyon Nyilvántartást és alá rendelte a Földtani Intézetet és a Geofizikai Intézetet.

2006-ban hozták létre a Magyar Bányászati és Földtani Hivatalt (MBFH), majd 2015-től a bányakapitányságok az illetékes megyei kormányhivatalok Műszaki Engedélyezési és Fogyasztóvédelmi Főosztályának Bányászati Osztályaként működtek tovább.

A Bányatörvény 2010. év elejei módosítása alapján az ország területe „zárt” területeknek számít a szénhidrogének kutatása és kitermelése vonatkozásában.

2012. április 1-jével összevonták a Földtani és a Geofizikai Intézetet (MFGI). 2017-ben pedig a MBFH és a MFGI egyesítésével létrehozták a Magyar Bányászati és Földtani Szolgálatot (MBFSZ). A hatóság irányítója az információs és technológiai miniszter.

A zárt területté nyilvánítást követő években, 2010–2014 között a koncessziós eljárás jogi szabályozatlansága miatt látványosan lecsökkent az aktív kutatási területek nagysága. Az időközben kidolgozott koncessziós pályázati rendszerben 2013-tól a miniszter évente pályázati felhívásokat hirdet meg a koncesszióra előkészített területekre, melyet követően az aktív kutatási területek nagysága ismét növekedni kezdett, és ezeken a területeken újraindul a kutatás.

A törvények és szakterületek történetét és szerepét részletesen mutatják be ZELENKÁ (1993), IZSÓ (2007, 2010a, b, 2019) és HÁMOR (2020) tanulmányai.

A kutatások finanszírozása – vállalkozók és vállalatok

A kezdetektől 1906-ig POSEWITZ Tivadar (1906), 1896-tól az I. világháború végéig WAHLNER Aladár (1897–1920),

a két világháború közötti időszakról PAPP Simon (1963, 1964) munkái adnak részletes tájékoztatást.

Az 1850-es években a kutatásokat többnyire kevés tőkével rendelkező, gyors meggazdagodásra számító vállalkozók kezdték. A külföldről behozott petróleum olcsó volt, nem érte meg a bizonytalan kutatásba jelentős tőkét fektetni. A vámtörvény 1882. évi bevezetése után a nagyobb tőkével rendelkező bankok, uradalmak is próbálkoztak. Kellő hozzáértés, szakértelem hiányában ezek sem vezettek látványos eredményre, így ezek a társaságok is felhagytak az ilyen irányú tevékenységgel.

Az 1880-as évek legtevékenyebb kutatója STAVENOV lovag volt, aki Sáros vármegyétől Háromszékig végigkutatva a Kárpátokat, sőt a Zala vármegyei Szelencéig is eljutott. Összesen 70–80 aknát mélyített (néhány a 60 m-t is elérte), de kutatófúrások is fűződnek a nevéhez. Biztató eredmények esetén zárt kutatmányait továbbadta más vállalkozóknak.

A földtani kutatások költségeinek fedezetéről az 1885. évi XIV. törvénycikk rendelkezett. Ennek értelmében minden zárt kutatómunka után felügyeleti díj fizetendő, ebbe a körbe tartozott a szénhidrogén-kutatás is. Kettős célja a bányagazgatás költségeinek fedezése, másrészt „a nem komoly célú bányászat mérséklése” volt. A felügyeleti díj fizetése azonban nem volt visszatartó erő, a feleslegesen, nyereszkes céljából lefoglalt területek sok esetben akadályozták az eredményes kutatásokat.

1893-ban WEKERLE Sándor pénzügyminiszter előterjesztést nyújtott be, és 100 000 koronát szavaztatott meg az országgyűléssel a hazai kőolajkutatás fejlesztésére. Ekkor fontos szerepet kapott a Földtani Intézet, mert a kőolajkutató társaságok csak az intézet pozitív szakvéleménye alapján kaphattak állami támogatást. Ez sem hozta meg a várt eredményt, gombamód szaporodtak a zárt kutatómunkák (néhány százról több mint 30 000-re nőtt a számuk 1910-re), amelyek zömén érdemi tevékenység nem folyt, csak arra vártak, hogy haszonnal túladhassanak rajta.

Más szempontból volt negatív példa a Magyar Általános Hitelbank tevékenysége. BANTLIN Ágoston Luhon (Ung vármegye) négy fúrást kezdett, és az I. számú Anna-aknából termeltethető mennyiségű kőolajat nyert. A Hitelbank bíróságon bizonyította, hogy a területen zárt kutatómunka van, azonban a per megnyerése után nem folytatta a munkálatokat. Komarnikon (Sáros vármegye) a Hitelbank kutató részvénytársasága 820 m-ig mélyített le egy fúrást, amely két produktív szintet is harántolt és 81 tonna kőolajat termelt, de a kedvező eredmény ellenére felhagyott a további kutatással (POSEWITZ 1906).

Nem vették figyelembe a galíciai tapasztalatokat, ahol felhagytak a fúrások szubvencionálásával, és inkább a gyakorlati földtani kutatást támogatták (Heinrich WALTER – idézi BÖCKH 1908). Az eltelt időszak eredménytelenségét egyrészt az erők szétforgácsolásának (RÉZ 1908), másrészt annak tulajdonították, hogy a tudományos igényű földtani előkészítés után nem volt lehetőség a munkálatok folyamatos figyelemmel kísérésére (BÖCKH 1908). Ezek a javaslatok és minden bizonnyal a mezősegi földgázincs megtalálása vezettek az 1911. évi VI. tc. elfogadásához. A törvény csökkenteni igye-

kezett a visszaélések lehetőségét, pontosan meghatározta a fogalmakat a szilárd és légnemű szénhidrogének vonatkozásában. A szénhidrogének állami monopóliumok körébe történő besorolásával jelentősen elősegítette azok tervszerű kutatását. Ezt a célt szolgálta a kolozsvári m. kir. Kutató Bányahivatal létrehozása is.

A zárt kutatómunkák nagy része megszűnt, és csak nagyon kevesen éltek a törvény által biztosított moratórium jogával. A vállalkozások egy-két fúrással folytatták tevékenységüket, számottevő siker nélkül. SINGER Viktor muraközi kutatását a London and Budapest Oil Syndicate folytatta, és az 1911 júliusától lemélyített 14 fúrás közül 5 termelő-kutatást tudtak kiképezni. Az első világháború kitérésével a tevékenységet beszüntették, a régi kutatókban kanalizációval termeltek kőolajat.

A törvény alapján első ízben a Magyar Kárpáti Petróleum Rt. nyert koncessziót izaszacsalai fúrásaira, 1912-ben már négy fúróberendezéssel dolgoztak, és a 9 fúrásból 7 kanalizációval olajtermelést eredményezett.

Az erdélyi kutatásokat az államkincstár sikerrel folytatta tovább, azonban a gáz értékesítése gondot okozott. Ennek megoldására a kormány a berlini Deutsche Banknak nyújtott koncessziót, amely 1915-ben megalapította a Magyar Földgáz Rt.-t. A vállalat a feltárási fúrások mélyítésén kívül a gáz hasznosítására, elosztására távvezetéseket épített.

Sikeres kincstári kutatások folytak még Egbell környékén és Szlavóniában (Bujavica).

Az I. világháború utáni időszak kőolaj-kutatói tevékenységét nagyban korlátozta a korábban eredményes vagy ígéretesnek tartott területek elvesztése, valamint a tőke és a nagyrészt szintén elveszített felszerelés hiánya. Az Anglo-Persian Oil Company leányvállalata, a D'Arcy Exploration Company a Dunántúlról és az Alföld déli részére (mintegy 60 000 km²) szerzett koncessziót 1920-ban. A kutatást a Hungarian Oil Syndicate végezte, amelyre mintegy 150 000 koronát költöttek, azonban elkövették azt a hibát, hogy korán váltották át tőkéjüket koronára, így az körülbelül 35%-kal devalválódott. A harmadik fúrást csak magyar tőke bevonásával tudták befejezni, és a sikertelenség miatt lemondtak a magyar olajvállalat megalapításáról.

A dunántúli kutatást közel tíz évre megszakították, csak a European Gas and Electric Company-val (EUROGASCO) 1933-ban kötött koncessziós szerződéssel indult újra. A fúrásos kutatás 1935-ben kezdődött, szinte egy időben azzal, amikor a kincstári fúrások elindultak a Mátra vidékén.

A budafai ipari értékű felfedezés után az EUROGASCO átruházta jogait leányvállalatára, a Magyar–Amerikai Kőolajipari Rt. (MAORT)-ra. Ekkor már a Standard Oil Company of New Jersey volt a tényleges tulajdonos.

A sikereken felbuzdulva a Wintershall AG vezette, öt vállalatból álló konzorcium 1940. augusztus 26-án koncessziós jogokat kapott az Alföld délkeleti részén, amelyet rövidesen átadott leányvállalatának, a Magyar–Német Ásványolajművek Kft. (MANÁT)-nak. A bécsi döntések és a Jugoszlávia elleni támadás után az olaszok engedélyes jogokat szereztek a Kárpátokban Magyar–Olasz Ásványolajipari Rt. (MOLÁRT) néven, és a Muraközben, ahol a kuta-

tást az Olasz–Német Ásványolajipari Rt. (ONÁRT) végezte. Közben 1941. XII. 20-én a MAORT-üzemek a Kincstár használatába (1945. XI. 21-ig), majd ismét amerikai tulajdonba (1948. IX. 24-ig) kerültek (DALLOSNÉ 2001).

1945 után a német érdekeltségű MANÁT a Szovjetunió tulajdonába került. A MANÁT egykori koncessziós területéhez hozzácsatolták a magyar kincstár kutatási területét, itt kezdte meg működését a Magyar–Szovjet Nyersolaj Rt. (MASZOVOL). A MAORT szerepét a Dunántúli Ásványolajipari Központ (DÁIK) vette át az államosítás után. 1950-ben létrehozták a Magyar–Szovjet Olaj Rt.-t (MASZOLAJ), amely 1952–1954 között egy szervezetben egyesítette a magyar szénhidrogénipar teljes vertikumát. Mindkét magyar–szovjet vállalat 50–50%-os tulajdonban volt.

A MASZOLAJ 1954 októberében – kártalanítás után – kivonult a magyar szénhidrogéniparból, szervezetéből 1954 végén önálló magyar vállalatok alakultak, a kutatást a Kőolajkutató és Feltáró Vállalat vette át. Ettől az időponttól a kutatási tevékenységet a felügyeleti hatóságnak benyújtott területi kutatási programok alapján az állami költségvetésből fedezték. 1957. január 1-jével létrehozták a Kőolajipari Trösztöt (KT) majd a gázipar csatlakozásával 1960. október 1-jétől létrejött az Országos Kőolaj- és Gázipari Tröszt (OKGT), amely egybefogta az iparág teljes vertikumát. Ezekben a szervezetekben a kutatás hármas tagolása (felszíni geofizika osztály, Alföld, Dunántúl régiók) – némi névváltoztatással – a hetvenes évek végéig megmaradt (DALLOSNÉ 2001). A szénhidrogénkutatás az elődök eredményeit felhasználva folyt tovább most már teljesen magyar állami irányítás alatt.

Az OKGT megalakulása után az ötéves tervekhez igazodva ún. Prognózisokat készítettek. Ebben határozták meg a kutatási célokat és a szükséges eszközöket, és ez alapján döntöttek a kutatás folyamatáról. A 1980-as évek elején lehetővé vált világbanki kölcsön felvétele, amelyre kutatás-fejlesztési programot készítettek elő. Ennek keretében eszközbeszerzésekre, medenceanalízisekre (Kisalföld, Békési-medence), szakember-továbbképzésekre és alapfúrások mélyítésére nyílt lehetőség. Végezetül a Világbank ajánlásai alapján sor került vállalatok kiszervezésére (gázszolgáltató, gépgyártó, mélyfúró, szénsavtermelő és -értékesítő stb.), illetve az OKGT jogutódjaként a Magyar Olajipari Részvénytársaság (MOL) létrehozására.

Az 1993. évi XLVIII. törvény életbelépése óta a kutatást a bányavállalkozó finanszírozza. A rendszerváltást követően egyre több, alapvetően külföldi tőkéből finanszírozott bányavállalkozó kezdett szénhidrogén-kutatási, majd -termelési tevékenységet Magyarországon. E szemlének nem célja, hogy ezeket a bányavállalkozásokat akár csak felsorolás szintjén nevesítse, ugyanakkor a munka releváns részeiben utalunk a szénhidrogén kutatás-termelésben részt vevő cégekre. A cégek szerepvállalásának fontosságára nem lehet konkrétabb bizonyíték, minthogy az általuk befektetett jelentős mennyiségű szellemi és pénzügyi tőke nélkül ma jelentősen kisebb lenne a hazai szénhidrogén-termelés mérete és mára még inkább exportfüggők lennénk e fosszilis energiahordozók tekintetében.

A múlt... – A jó...

A kezdetek

A Kárpát-medencében emberemlékezet óta ismertek voltak szénhidrogén-előfordulások. Különösen az ország északkeleti részén a Kárpátok övében (Trencsén, Sáros, Zemplén, Ung, Máramaros és Háromszék vármegyékben), valamint délnyugaton (Zala vármegyében és Horvátország–Szlavóniában) a kőolaj-, illetve Kis-Küküllő vármegyében a földgázszivárgások. Az emberi találmányosság felhasználási módjukat is megtalálta. A feljegyzések szerint eredeti állapotában állati és emberi gyógyászatra, harcászati célokra, de legfőképpen kocsikenőcsként alkalmazták. A kőolajat lepárlás után világításra, szigetelésre és útburkolásra is használták. Az aknaszlatinai sóbányában már 1786-tól néhány éven keresztül földgázzal világítottak. A 18. század végén a szénhidrogének összetételét is elemezték. Nagyobb mérvű felhasználásukra a 19. század közepétől került sor.

A kőolaj és a földgáz ismeretéről, alkalmazásáról számos forrásmű tanúskodik, de legtöbbjük nem foglalkozik bővebben a petróleumelőfordulással, hanem csak megemlíti a lelőhelyeket. Az első hiteles közleményeket a bécsi földtani intézet geológusainak köszönhetjük (POSEWITZ 1906). Megemlíthetők azonban korai magyar nyelvű földtani tanulmányok is: PETTKÓ János 1852 őszén földtani vizsgálatokat végzett a Magyarhoni Földtani Társulat megbízásából Magyarországon March (Morva) folyóval határos részen. Jelentésében a Nyitra vármegyei Holics és Egbell között levő forrásban *könszéneg* (mocsárlég/mocsárgáz) jelenlétét írja le, Smrdák (Büdöskő, Smrdáky) fürdőjének vizében pedig a *könszéneg* előfordulásán kívül megjegyzi, hogy „*Naphta jelenléte kétséget nem szenved*” (PETTKÓ 1856).

A Magyar Orvosok és Természetvizsgálók Társasága 1863. évi vándorgyűlésén RÓZSAY József előadásában ismertette a szénhidrogén-képződési folyamatát, és felhívta a figyelmet gazdasági jelentőségére is:

„*Láttuk értekezésünk elején, hogy az újvilágban mily roppant szorgalom és ipar fordítatik e természeti adomány kizsákmányolására és alkalmazására, míg nálunk észrevétel nélkül, senki által figyelembe nem vétevve, hever a természeti kincs, mely tán kellő gond fordítatván rá, mind a tulajdonosnak, mind a közös kereskedelem és iparnak jelentékeny előnyére leendett.*” (RÓZSAY 1864)

Az ipari értékű nyersolajtermelés azonban nem az északkeleti és délnyugati olajövekben kezdődött, hanem az ezektől függetlenül előforduló bitumenes palák és homokkövek bányászatával. A Krassó-Szörény vármegyei Stájerlakaninán a felső-liász széntelepek fedőjében megjelenő bitumenes palák száraz desztillációjából nyerték a nyersolajat, amelyet a közeli Oravica finomítójában paraffinná és világító olajjá dolgoztak fel. A termelés 1860–1882 között folyt, majd gazdaságtalanná vált, és beszüntették. A Bihar vármegyei Felsőderna, Tataros és Bodonos környékének pliocén bitumenes homokkőbányáit már az 1850-es évek előtt ismerték. Többszöri próbálkozás után 1889-ben részvénytársaság alakult a kitermelésére. A bányászati módszer-

rekkel termelt kőzetet felaprítás után forró vízben áztatták, a lehűlés után a „földkátrány” elkülönült a víztől, amiből desztillációval könnyű olajat, kenőolajat és aszfaltot állítottak elő.

A kutatás a régóta ismert olaj- és gázszivárgások közepében aknák ásásával kezdődött, majd az 1880-as évektől már a mélyfúrások kivitelezése is elindult. A fúrások zömét a Galíciában használatos ejtőkészülékes, száraz ütőfúrással (merek rudazatos kanadai berendezéssel) mélyítették. Puskás Tivadar Zsibón fúrt négy kútjához, valamint a szelencei fúrásokhoz pennsylvaniai kötél-fúróberendezést használtak. 1893-ig mintegy 180 aknát és fúrást mélyítették le az ország északkeleti (Kárpátok vidéke) és délnyugati (Muraköz, Horvátország) részén. Az aknák átlagos mélysége megközelítette a 70 m-t, 21 fúrás pedig 100 m-nél mélyebb volt. Egyetlen vállalkozás sem járt számottevő eredménnyel, így az 1890-es évek elejére leállt a kutatás (ALLIQUANDER 1968, 1986).

Az 1890-es években a Földtani Intézet a további kutatások megalapozása érdekében részletesen tanulmányozta a legismertebb területeket (BÖCKH János – Iza-völgy, Sósmező, TELEGGI RÓTH Lajos – Zsibó, Recsk, POSEWITZ Tivadar – Kőrösmező, GESELL Sándor – Luh, ADDA Kálmán – Sáros és Zemplén vármegye). Az anyagilag támogatott és nagyobb mélységet elérő fúrások sem hoztak jelentős eredményt, pedig 1890 és 1910 között 98 db 100 m-nél mélyebb kutat fúrtak le, amelyek közül kettő már túlhaladta és több megközelítette az 1000 m mélységet (POSEWITZ 1906).

A műtrágyagyártáshoz szükséges kálisótelepek kutatása során id. LÓCZY Lajos indítványára 1908-ban fúrások kutatás kezdődött. Az első fúrás Nagysármás határában különösebb eredményekkel nem szolgált, ezért a kissármási Bolygó-réten egy újabb fúrást tűztek ki. Az 1908 novemberében megkezdett fúrásban már 22 m-nél gáznyomok jelentkeztek, majd 144 m-től a 301,9 m-es végleges mélységig csak nagy nehézségek árán tudtak lefúrni a harántolt miocén homokkövekből belépő nagy nyomású és mennyiségű gáz miatt. A napi 864 000 m³ gázt termelő kutat csak 26 hónap múlva sikerült lezárni. A kutatások folytatásaként BÖCKH Hugó és munkatársai 36 boltozatot mutattak ki 529,8 km² összterülettel. A világháború végéig 42 fúrást mélyítették le, amelyek közül 37 produktív lett, napi 20 000–850 000 m³-es kapacitással. A fúrásokat gyors ütésű, fordított öblítéses (Fauck express, Trauzl rapid) berendezésekkel mélyítették, melyek szabályozható sűrűségű öblítővizével a túlnyomás leküzdhető és a gázkitörés megakadályozható (ALLIQUANDER 1968, 1986). Ekkor és itt született meg a trianoni döntés előtti Nagy-Magyarország szénhidrogénipara.

Olajkutatás terén az első jelentős eredményeket Egberlen érte el a kincstári kutatás, ahol a gázfeltörésekre a helyi hatóságok hívták fel a figyelmet 1911-ben – miután egy helyi gazda saját céljaira használta a szántóföldjén talált földgázt. A földtani kutatással a selmecbányai Akadémia geológiai tanszékét bízta meg a Pénzügyminisztérium, az első három fúrást BÖCKH Hugó professzor tűzte ki. Az Egberlen-1 fúrás kedvező eredménye (160,5–163,5 m közötti szarmata homokkőből 15 t/nap kőolaj és 10–12 000 m³/nap gázter-

melés) után kezdődött meg a tényleges térképezési munka és a további kutak helyének kitzúzése, ezt a munkát és a fúrások ellenőrzését PAPP Simon végezte. A megélt tevékenységre jellemző, hogy 1918-ban már 18 fúróberendezés dolgozott ezen a területen. 1918 végéig összesen 72 fúrást mélyítették le, és 28 748 t kőolajat termelt a mező (PAPP 1963). Az egbelli mezőn bizonyította be a szénhidrogén-kutatásban való alkalmasságát a torziós inga. BÖCKH Hugó elképzelésének megfelelően az Eötvös Intézet 1916-ban PEKÁR Dezső vezetésével végzett mérései olyan szerkezetet mutattak ki, amely csaknem teljesen megfeleltethető PAPP Simon fúrásokkal és több mint kétéves termeléssel bizonyított földtani térképének (BÖCKH 1917, PAPP 1963).

Még a háború alatt a kincstár kiterjesztette kutató tevékenységét Horvátországra is. BÖCKH Hugó azoknak a területeknek a vizsgálatával bízta meg kollégáit, ahol felszíni olaj- és gázszivárgások voltak ismertek. Az első kutatófúrást 1918-ban a bujavicai boltozaton mélyítették. A fúrással 360 m mélységben egy napi 250 000 m³ földgázt adó, 396 m-ben pedig egy olajtelített réteget találtak, amelyből vizsgálata során 100 t olajat termeltek. A további vizsgálatokat a világháború eseményei megakadályozták (PAPP 1963).

A magánkutatások közül a moratórium jogával élő ANDRÁSSY Gyula Izbügyaradványban – Magyarországon az elsők között – 1913-ban Parker-Rotary rendszerű forgatva működő berendezést használt (WAHLNER 1913). Korábban kísérleteztek ugyan a Mezőségen egy amerikai forgatva működő berendezéssel – az Ingersoll Rand Co. Davis Calix berendezésével –, de az az ottani kőzetviszonyoknak nem felelt meg (BÖHM 1939).

BÖCKH Hugó az Alföldre is felhívta a geológusok és geofizikusok figyelmét, javaslatára 1917-ben Eötvös-inga méréseket végeztek a Hortobágyon. A következő évben megbízta PAPP Simont, hogy a kimutatott maximumra és minimumra tűzzön ki két mélyfúrást. A gravitációs minimumon megtelepített Nagyhortobágy-1 fúrást 1918-ban kezdték mélyíteni, azonban a mostoha körülmények (megszállítás, anyagihiány, szállítási nehézségek) miatt csak 1924 júniusában érte el az 1115,4 m talpmélységet, és bizonyította, hogy valóban szinklinálisba mélyült.

Az I. világháború végéig mintegy 112 500 t kőolajat termeltek az országban. Ennek döntő részét Felsőderna–Tataros (42,3%) adta, Stájerlakanináról származott az összes termelés 26,7%-a. Egbell szűk öt év alatt hasonló arányban (25,6%) vette ki a részét, míg a Muraközből származott 5%. A nagy reményekkel kutatott északkeleti területek termelése nem érte el a 0,5%-ot (POSEWITZ 1906, WAHLNER 1897–1920, ALLIQUANDER 1931, PAPP 1963).

Az I. világháború végétől 1980-ig terjedő időszak szénhidrogén-kutatásának földtani eredményeiről részletes tájékoztatást adnak KÖRÖSSY László munkái. Az Általános Földtani Szemlében kilenc részben kerültek publikálásra a részmedencénkenti összefoglalók úgy, hogy halála után a hiányzó területek kéziratát KÁZMÉR Miklós rendezte sajtó alá.

1918 végén és 1919 elején nagyon korlátozott kutatási tevékenység folyt, majd az év végére ismét megkezdődött a megmaradt területek tanulmányozása. PÁVAI VAJNA Ferenc

a dél-dunántúli, PAPP Simon a Letenye–Alsólendva–Páka–Tófej által határolt területet vizsgálta. Felismerték a terület gyűrődéses jellegét, és átnézetes földtani térképet készítettek. A Hungarian Oil Syndicate budafapusztai fúrását e térkép alapján tűzte ki CUNNINGHAM CRAIG, az Anglo–Persian Oil Company geológus szakértője és BÖCKH Hugó. A fúrást a Hajdúszoboszlóról átszállított Fauck expressz berendezéssel 1737,5 m-ig mélyítették, azonban csak olaj- és gáznyomokat találtak. Szintén meddő lett a 623 m-es kurdi és az 1369 m-es bajai fúrás (KÖRÖSSY 1990, 1993). A szindikátus a fúrásokon és geológiai térképezésen kívül több mint 500 km²-es területen végeztetett magyar szakemberekkel Eötvös-inga méréseket. Ez utóbbiakat a Dunántúl változatos domborzatától tartva kizárólag az Alföldön hajtották végre (PAPP 1963).

Az Alföldön ebben az időszakban mélyített fúrások ipari értékű kőolaj- és földgáztermelés szempontjából meddők lettek, de ezek szolgáltatják Hajdúszoboszló, Bereksziget és Debrecen fürdői számára a gyógyvizet. A termálvízzel együtt termelt földgázt Hajdúszoboszlón áramfejlesztésre és vasúti kocsik világítására, Berekszigeten az üvegyárban hasznosították.

Az alföldi kincstári fúrások sikertelensége miatt az észak-magyarországi Paleogén-medencére helyezték át a kutatást. A lemélyített fúrások többsége csak olaj- és gáznyomokat eredményezett (SCHMIDT 1939). A Geofizikai Intézet 1936-ban szeizmikus mérésekkel próbálkozott a Budapest környéki kutatási területen, azonban nem sikerült reflektáló felületet kimutatni (PAPP 1963).

Az első eredményeket SCHRÉTER Zoltán vizsgálatai alapján a kincstári kutatás Bükkszék környékén érte el. Már az 1936 decemberében megkezdett első fúrás bízató olajnyomokat talált a Kiscelli Agyagba települt vulkáni tufában. A 286,2 m-es talpmélységű Bükkszék–2 fúrásból 1937 áprilisában indult meg az olajtermelés. Tíz év alatt összesen 69 fúrást mélyítettek le, és 11 600 t kőolajat termeltek. Ráadásul megtalálták a forrásokból már ismert sósvizet (Salvus) is, a –27-es fúrára alapozva készült el 1939-ben a strandfürdő (KÖRÖSSY 2004).

A Dunántúlon közel tíz év szünet után folytatódott a kutatás. Az EUROGASCO-val modern technika és szervezetség lépett be az országba. Tekintettel arra, hogy a mélyfúrásokhoz használt rotary-rendszerű berendezések hazánkban még ismeretlenek voltak, engedélyezték amerikai, angol és német fúró mesterek alkalmazását azzal a feltétellel, hogy mindegyik köteles betanítani 1-1 magyar fúró mestert. Kezdetben a magyar mérnökök is néhány hónapig fúró munkásként dolgoztak. A munkások részére pedig magyar mérnökök és geológusok tartottak tanfolyamokat, amelyeken nemcsak szaktárgyakat, de az általános műveltséghez tartozó tárgyakat is oktattak. Minden fúróluknál állandó geológiai felügyelet volt. A fúrások kitérését az Eötvös-ingán kívül graviméteres, mágneses és szeizmikus mérésekkel készítették elő. Az Eötvös-ingával (illetve RYBÁR István által készített automatikus változatával) magyar geofizikusok dolgoztak. A külföldről hozott graviméterek és magnetométerek használatára angol és osztrák szakértők tanították meg magyar kol-

légáikat. A gravitációs mérés a kőolajkutatásban vezető szerepet játszott, az akkor még csak első lépéseit próbálgató szeizmikát a gravitációs maximumokon a dőlésviszonyok megismerésére használták. Az EUROGASCO (később a MAORT) állandó geofizikai csoportot tartott fenn, amelyhez külföldön tapasztalatot szerzett magyar szakemberek csatlakoztak.

Az első fúrást a Kisalföldön, a Mihályi szerkezeten, egy északkelet–dél nyugat irányú, kétmaximumos, mintegy 60 km hosszú boltozaton mélyítették. Az 1935. február 20-án megkezdett és július 26-án, 1603,6 m-ben befejezett fúrás kristályos palákat ért el. A rétegvizsgálat nagy mennyiségű benzinszagú gázt eredményezett, amely 95–96%-ban széndioxidnak bizonyult. 1937–38-ban az EUROGASCO, majd a MAORT megkezdte a gáz felhasználására vonatkozó kísérleteit, szárazjeget állítottak elő élelmiszer szállításhoz.

Másodikként a Dráva-medence területén, Lábod–Görgeteg–Babócsa térségében kimutatott boltozatra mélyítették fúrást. A Görgeteg–1 2059 m talpmélységnél elszerencsétlenedett, csak égethető gáznyomokat észleltek fúrása közben.

Inke környékén Eötvös-ingás, graviméteres, magnetométeres és szeizmikus mérésekkel egy északkelet–dél nyugat irányú szerkezetet térképeztek ki. A 2140 m-ig mélyített Inke–1 fúrás felső-pannóniai turbidit homokkövekből 100 000 m³/nap kevert gázt adott. A mező 1964-ben felújított kutatása eredménnyel járt, azonban a gáz alacsony fűtőértéke miatt hasznosítására nem került sor.

Az alkalmazott technológiai és metodikai eljárások ekkor már előrevetítették a régóta várt sikert.

Az „áttörés”

Az Inke–1 fúrással szinte egy időben mélyült a – szintén geofizikai módszerekkel pontosított – budafai szerkezeten a B–1 jelű fúrás, amely 1936. december 2-án érte el az 1764 m-es talpmélységet. 1937. február 9-én napi 418 000 m³ gáz mellett kőolajat és vizet kezdett termelni az 1066–1085 m közötti szakaszból. A rendszeres olajtermelés 1937. november 21-én indult a B–2 fúrás tároló homokköveinek megnyitásával. Innentől számítjuk a Trianon utáni Magyarország olajtermelésének kezdetét (3. ábra). A mező feltárása gyorsan haladt, közben a geofizikai mérésekre alapozva újabb mezőket fedeztek fel: Lovászi (1940), Újfalva (1941), Hahót–Pusztaszentlászló (1942). Pusztadericsen 1946-ban párlatos gáztelepet találtak, amely 1979 óta gáztárolóként működik. A zalai olajmezők termelése rohamosan emelkedett, 1943-ban 837 710 t kőolajat termeltek. Az olajjal kitermelt gáz hasznosítására 1939-től megkezdték a visszasajtolást, propán-bután gáz és gazolin leválasztást, valamint Lovásziban koromgyárat létesítettek (PAPP 1964, DANK 1985).

A háború alatt koncessziót szerzett MANÁT részére 1941–1944 között a Seismos és a Prakla (Praktische Lagerstättenforschung) végzett graviméteres és szeizmikus méréseket a Geofizikai Intézet Eötvös-ingás felvételeivel egy időben (KÖRÖSSY 2005a, b, 2014). Az előkészítés után a MANÁT 22 fúrást mélyített Tótkomlós, Sándorfalva, Ferencszállás, Kőrösszegapáti környékén és a Muraközben.



3. ábra. Az első magyar olaj. Budafapuszta-2 fúrás, 1204-1208 és 1168-1179 m mélységből, az ún. Kerettye pannóniai korú homokrétegből. A kezdeti olajtermelési ütem 12 mm-es fűvőkán napi 65 m³ volt (PAPP 1965)

Figure 3. The first hungarian oil. From Budafapuszta-2 well, 1204-1208 and 1168-1179 m depth, "Kerettye" Pannonian age sandstone reservoir. Initial production rate was 65 m³/d oil on 12 mm choke (PAPP 1965)

Gyakorlati eredményt ugyan nem értek el, de fontos információkat szolgáltatottak a pliocén rétegek vastagságáról és a medencealjzatról. A tótkomlói és kőrösszegapáti fúrások megerősítették azokat a feltételezéseket, hogy az Alföldön is reményteljes kőolaj- és földgáz-előfordulások lehetnek. Lovászi mező nyugati folytatásában – Petesházán – földgázt tartalmazó mélyvízi pannóniai rétegeket nyitottak meg, amelyek gázát a Lovászi mező rétegenergiajának megóvása érdekében meg akarta venni a MAORT. Ki is fizetett 6 millió pengőt, majd a kivonuló németek a Magyar Általános Hitelbank szombathelyi fiókjából önkényesen elvittek további 4 milliót 1945. április első napjaiban (PAPP 1964).

A II. világháború során visszacsatolt területeken végzett kutatások (földtani térképezés, Eötvös-inga és graviméteres mérések, fúrások) eredményei kárba veszttek.

A háború után a MASZOVOL – illetve annak megalakulásáig (1946. április 8.) a Vörös Hadsereg Olajipari Parancsnoksága – „örökölte” a MANÁT alföldi területeit. Az időszak viszonyaira jellemző, hogy a MANÁT volt alkalmazottai gyűjtötték össze a nagyrészt széthordott felszerelésből a még használható eszközöket, és ezekkel folytatták a korábban megkezdett Kőrösszegapáti-5 fúrás mélyítését (KÖRÖSSY 2014).

A MANÁT 1941. évi graviméteres méréseit 1944-ben szeizmikával egészítette ki Biharnagybajom térségében, azonban a fúrásos kutatásra csak a háború után kerülhetett sor. A Biharnagybajom-1 fúrás badeni rétegekben és a kristályos alaphegység felső törmelékében találta meg az Alföld első kőolajtelepét. A MASZOVOL 1949. év végéig tartó működése alatt 36 fúrás mélyített, 3 449 t kőolajat és közel 47 millió m³ földgázt termelt. A kutatás a MASZOLAJ szervezetében folytatódott, és a korábban Eötvös-inga mérésekkel kimutatott mezőkeresztes maximumon 1951-ben megtalálták az Alföld második olajtermelő területét. Az új vállalatnál azonban már a szeizmikus mérések vették át a vezető szerepet, regionális vonalak menti

mérésekkel kiterjesztették a kutatást a gravitációs maximumok közötti területekre is. Kutatási szemléletük kettős célja: kiszorgálni a jelent és biztosítani a jövőt (KÉSMÁRKY 2002). A gravitációs mérések eredményeit a vonalak tervezéséhez és az értelmezéshez továbbra is felhasználták.

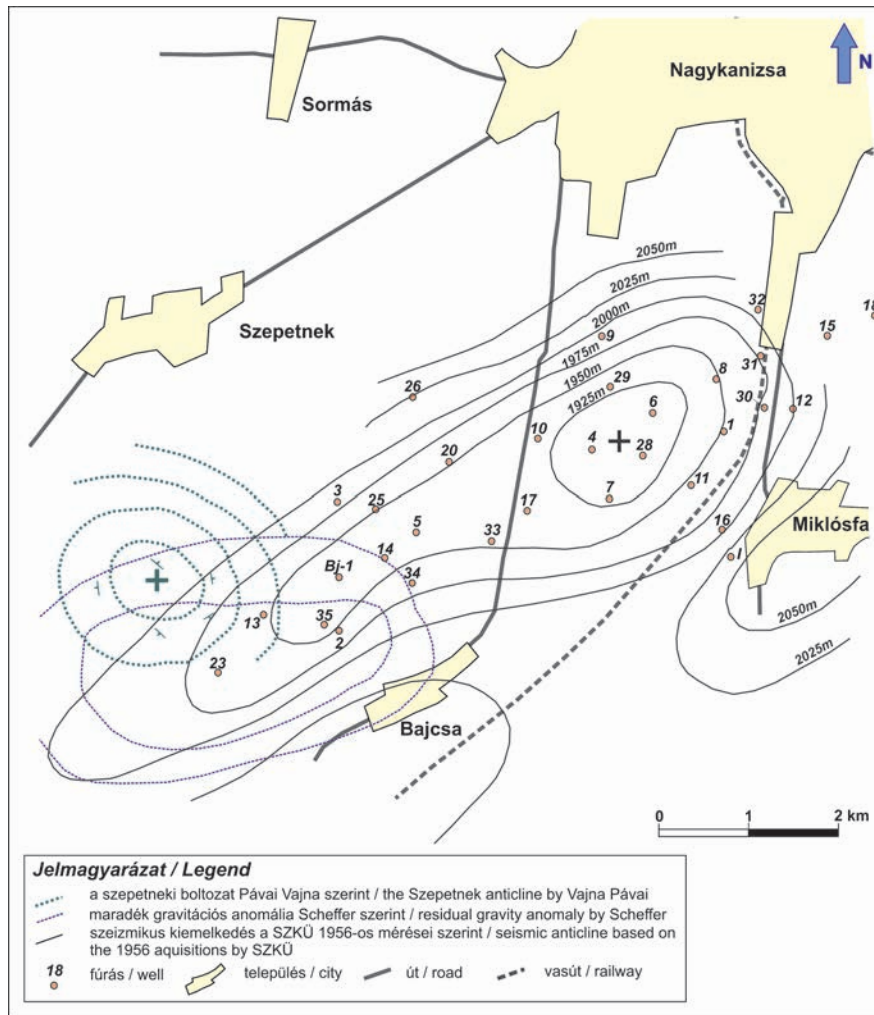
Az AR-V regionális szelvényen mutatkozó kiemelkedésnél kitűzött Szolnok-1 fúrás 1953-ban kis méretű olajtelepet talált (KÖRÖSSY 1993).

A Dunántúlon a világháború befejezése után a természetes módon csökkenő termelésre, a kutatási eredmények hiányára a politika koncepciók perrel, szakszerűtlen beavatkozással reagált. Az erőltetett termelési eljárások, a nagyobb fűvőkák alkalmazása rövid időn belül hozamcsökkenést eredményezett, így csak új előfordulás felfedezése pótolhatta a csökkenő termelést. A salomvári szerkezet sikertelen fúrásai (1943, 1947) után a gravitációs maximum délkeleti előterében mutatkozó pihenőn tűzték ki a Nagylengyel-1 fúrás. 1940 m talpmélységnél teljes iszapvesztés lépett fel, és kanalizással csak vízbeáramlást kaptak. Keleti irányban, mintegy 600 m távolságban mélyítették a második fúrás, a badeni glaukonitos homokkő elérésekor 1859 m-ben béléscsővel biztosították a lyukat. Ezután 1918 m talpmélységnél rétegvizsgálatot tartottak, amely mintegy 10 m³ kőolaj-beáramlást eredményezett. A következő fúrások is – béléscsővezés után – megálltak az iszapvesztésnél, csak 1954-ben a Nagylengyel-28 fúrás harántolta a kréta mészkőtárolót. Az addig végzett magfúrások, markolások csak néhány cm magnyereséget eredményeztek, így az elért képződményt badeni mészkőnek vagy triász mészkőnek tartották. Két év után derült ki, hogy a badenivel egy hidrodinamikai rendszert alkotó felső-kréta mészkő jelenti a jelentősebb és produktívabb tárolóteret. Az eredményes fúrások után nagy ütemben indult a feltárás és lehatárolás, ennek során felső-kréta mészkőben és triász dolomitban 16 hidrodinamikailag különálló blokkot ismertek meg (DANK 1985, KÖRÖSSY 1988).

A Zala-medencében, a Balaton-vonaltól délre, Szeptenek környékén PÁVAI VAJNA Ferenc 1919-1920-ban felszíni térképezéssel lapos boltozatot mutatott ki. SCHEFFER Viktor 1948-as térképén gravitációs anomália rajzolódott ki a közelében. A Bajcsa-1 fúrásban talált kedvező olajnyomok alapján 1956-ban szeizmikus méréseket végeztek, amelyek értékelése egy 2,5×6 km-es, NyDny-KÉK tengelyirányú boltozatot jelzett. Jól követhető a mező megismerésének folyamata, a különböző módszerek megoldóképessége a 4. ábrán. A mélyvízi pannóniai összletben 8 gáztelepet fedeztek fel és termeltettek, azonban a Bajcsa-1 fúrással a badeni lithothamniumos mészkőben talált könnyűolaj és kevert gáz nem ipari értékű (KÖRÖSSY 1989).

Órszentmiklóson korábbi mérések és földtani térképezés alapján 1954-55-ben 42 db sekélyfúrással két kisebb gáztelepet tártak fel, amelyek letermelése után Budapest ellátására itt alakították ki az ország első föld alatti gáz-tárolóját.

Az 1953-ban végzett mangánkutatás fúrásaiban észlelt olajnyomok alapján találták meg 1954-ben a Demjén környéki olajtelepeket. Ennek ellenére, hogy a 17 km² méretű



4. ábra. A bajcsai földgáz-előfordulás térképvázlata (módosítva KÖRÖSSY 1989 után)

Figure 4. Combined exploration map of the Bajcsa gas discovery (modified after KÖRÖSSY 1989)

szerkezetben a gyenge áteresztőképességű oligocén homokkötőanyagokat sűrű kúthálózattal tárták fel, az egyes produktív rétegek korrelálása nehézkes azok nagyfokú változékonysága miatt. A kis mélységben megtalált telepek szinte gázmentesek, termeltetésük változatos technológiákkal történik (DANK 1985, KÖRÖSSY 2004).

A további kutatások is a graviméteres, regionális és részletező szeizmikus méréseken alapultak, azonban évekig csupán kis készletű (pl. Törtel, Kaba, Furta) mezőket vagy nagy szén-dioxid-tartalmú gáztelepeket (pl. Rákóczifalva, Püspökladány, Jászkarajenő) fedeztek fel.

Az ötvenes évek végén következett Pusztaföldvár, Bottonya, végül Hajdúszoboszló megismerése. A hajdúszoboszlói maximumon az Eötvös-inga mérésekkel kimutatott boltozat közepére kitérűt, de le nem mélyített fúrópont helyén 1961-ben telepített Hsz-36 jelű fúrás produktív lett, vad gázkitörés lépett fel, és a kitörés krátere körül képződött tó ma már különleges flórával és faunával rendelkező természetvédelmi terület (ALLIQUANDER 1986).

A következő időszakban a Nagykanizsán jelentősebb előfordulásokat találtak Ebess, Tatárülés–Kunmadaras és

Szarvas térségében. Hosszú idő után a Kisalföldön is értek el kisebb eredményeket. 1963-ban a Mihályi–Répcelak szerkezeten Uraiújfalusi térségében kisebb éghető gáztelepeket tártak fel a pannóniai delta homokkövekben. Ölbőn badeni üledékekben és az alaphegység repedezett zónáiban széndioxidtelepet találtak (KÖRÖSSY 1987).

Az aranykor

Szank környékén a Geofizikai Intézet a MANÁT megbízásából 1942–43-ban végezte az első gravitációs méréseket, majd 1958–62 között graviméteres mérésekkel egészítette ki az OKGT részére. Együttes értelmezésük záródó maximumot jelzett, amelyet az ún. Elkins-maradék-anomália térkép is megerősített. Az 1963-ban a területen végzett szeizmikus mérések értelmezésében, de még az 1958–1965 közötti mérések eredményeit összefoglaló jelentésben is ÉNy felé emelkedő horizontokat tüntettek fel. A fúrások kutatás 1964-ben kezdődött, és már a Szank-1 rétegvizsgálata eredményes volt (10 mm-es fúvókán 159,3 m³/nap olaj és 55 030 m³/nap gáz). A kutatás folytatódott, amit azonban késleltetett, hogy a Szank-4 kúton kitörés lépett fel, a 920 m-ig

beépített 9 5/8"-os beléscső alatti szakasz a felszín felé elzáródott és a gáz a csővezetlen szakasz áteresztőképes rétegeibe fejtődött át. A későbbi fúrások bizonyították, hogy másodlagos gáztelepek jöttek létre, melyek később letermelésre kerültek. Az alaphegység mállott–repedezett zónái a rátelepült miocén konglomerátum, breccsa, homokkő és mészkő képződményekkel együtt tárolják a nagy gázsapkás kőolajtelepet. A mező nyugati folytatásában a badeni összletben további olaj- és gáztelepek halmozódtak fel (DANK 1985, KÖRÖSSY 1993).

Az 1960-as évek közepétől fúrással kutatott mezők korábbi gravitációs méréseit a Geofizikai Intézet, esetleg a MANÁT megbízásából a Seismos készítette. A korai szeizmikus mérések hagyományos fotoregisztrálással történtek. Az ilyen kombinált előkutatás alapján felfedezett jelentősebb mezők a Nagykanizsán Nagykörű, Kisújszállás és Fegyvernek, a Duna–Tisza közén és a Szegedi-medencében Tázlár, Kiskunhalas–Északkelet, Eresztő, valamint a „nagyok”, amelyekről külön szakaszban lesz szó.

1966-tól a fotoregisztrálású szeizmikus technikát felváltotta az analóg mágneses jelrögzítés. Az analóg terepi műsz-

rek és a számítóközpont használata lehetővé tette a többszörös fedés elvének (CDP) alkalmazását. Ez a módszer segítette elő Kelebia és Sarkadkeresztúr mezők megismerését.

Ortaháza mezőt a MAORT graviméteres mérései után analóg szeizmikus mérések alapján a hetvenes évek elején, a kisebb jelentőségű Orthaháza-Kelet és -Nyugat előfordulásokat már digitális szeizmikus mérésekkel a nyolcvanas években fedezték fel (KÖRÖSSY 1988).

Az 1970-es évek végén megtalált Kiskunmajsa-Dél, Sávoly, Barcs-Nyugat és Zsana-Észak mezőket digitális terepi műszerekkel és számítógépes adatfeldolgozással mutatták ki.

Az „aranykor” legékesebb ékkövének tekinthető Szege-di-medence 60-as évekre és 70-es évek elejére tehető kutatását külön fejezetben tárgyaljuk.

Az út Algyőig – a Szege-di-medence kutatási eredményei

Az algyői szerkezet kutatásának legelső lépése még EÖTVÖS Loránd személyéhez kapcsolódik. Torziós inga méréseinek eredményei az 1908–1911. évekhez kötődnek, bár ezek a mérések még nem adtak összefüggő képet a terület gravitációs viszonyairól. Volt azonban valaki – CHOLNOKY Jenő, a Magyar Földrajzi Társaság Alföldi Bizottságának elnöke –, aki már 1918-ban, visszatekintve az akkori technikai és geológiai ismeretekre, hihetetlennek tűnő pontossággal előre vetítette a Szeged környéki szénhidrogének létezését, amit a Szeged város tanácsához címzett levelében az alábbiak szerint tett: „...Alföldünket a geológiai harmadkorban, amikor az Erdélyi medencében is lerakódtak a gáztartalmú rétegek, az erdélyihez hasonló és meglehetősen elzárt és jóval nagyobb tenger borította. Ebben az elzárt tenger részben éppen olyan rétegek rakódhattak le, mint az Erdélyi medencében, ti. éppen úgy itt is keletkezhetnek kősó, földgáz és petróleum tartalmú rétegek... Így tehát véleményemet röviden akként fejezhetem ki, hogy:

Szeged környékén igen nagy bátorsággal fúrhatunk bárhol gázra.

A fúrásokat mintegy 2 000 m-re kell tervezniünk.

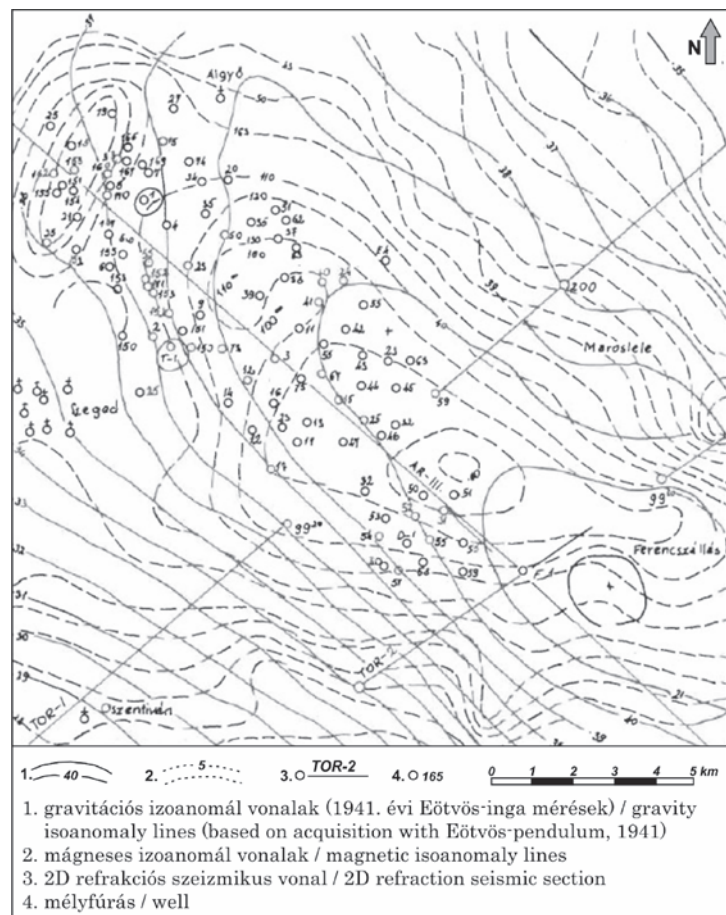
Szeged vidéke gazdasági szempontból is elsősorban figyelembe jöhet gázkút fúrására.”

CHOLNOKY szakvéleményével a Földtani Intézet igazgatója, LÓCZY Lajos is egyetértett (JURATOVICS 1995). Fenti szakvélemények birtokában Szeged város tanácsa a földművelési miniszterhez fordult a földgázkutatás elrendelése végett, majd 1921-ben a pénzügyminiszternél is sürgették az ügy elintézését. A kormány azonban az olaj- és földgázkutatás jogát átruházta a Hungarian Oil Syndicate-re, ezzel a Szeged környéki kutatás ügye évtizedekre háttérbe került.

A két évtizeddel későbbi – az Eötvös Loránd Geofizikai Intézet által 1942-ben kiadott – részletesebb mérési eredmények mutatták ki először azt a két gravitációs maximumot, melyek közül a

Kiszombor–Sándorfalva közötti ÉNy–DK-i csapású, és amelyre 1942-ben a MANÁT lefúrta a terület első kutatófúrását, a Ferencszállás–1-et (5. ábra). A kút a ferencszállási és algyői szerkezet közötti „nyerget” találta meg, így meddőnek bizonyult. Ez jelentős mértékben visszavetette a terület továbbkutatását. A másik, sándorfalvai gravitációs maximum ÉK–DNy-i csapást mutatott, szintén aljzati kiemelkedést jelzett. E szerkezet ÉK-i részén mélyült a Sándorfalva–1 fúrás (1942), amely ugyancsak gáznyomokat talált, és a pannóniai alsó szakaszában fejeződött be.

Hosszú éveket kellett várni a folytatásra. 1959-ben mérték azokat a reflexiós és fáziskorrelációs refrakciós szeizmikus 2D szelvényeket Szeged környékén, melyek az aljzati kiemelkedéseket már megbízhatóan, a mai ismereteinknek is megfelelően leképezték. Részletező mérések folytatódtak a következő években is, 1960–62 között graviméteres mérésekkel kiegészítve. Az eredmények alapján 1962-ben mélyült Üllés–1 fúrás olajat talált a sekélyvízi pannóniai rétegekben, igazolva ezzel a terület szénhidrogén-potenciálját. Az Üllés–3 és –4 fúrásokban a jól záró alsó-pannóniai márga, mészmárga rétegei alatt 60% túlnyomást tapasztaltak, és mindkét kúton vadkitörés következett be. Fentiek miatt a további kutatásokat Üllésen kétfelé választották, egyrészt a



5. ábra. Szeged környékének Eötvös-ingás gravitációs és mágneses mérése egyesített térképe (módosítva JURATOVICS 1995 után)

Figure 5. Integrated gravity (measured by Eötvös-pendulum) and magnetic map around Szeged city (modified after JURATOVICS 1995)

megtalált Üllés-Felső olajtelep irányába, másfelől pedig a mélysztint felé. Az 1963/64 fordulóján mélyített Ü-7-es fúrás jelentett újabb fordulópontot a mélysztint megismerésében, mert bár a kút a tervezett triász tetőt nem érte el, de a vele egy hidrodinamikai rendszert alkotó miocén abráziós konglomerátumban váratlanul igen nagy nyomású gázt talált. Ekkor még nem gondolták, hogy a terület legnagyobb gáztelepét érte el a kút. A fő tároló kőzetet – a triász dolomitot – csak mintegy tíz évvel később, a hetvenes évek közepén fúrták meg (DANK 1985). Az évtizedes „késlekedést” az 1965-ös év nyarának történései bizonyára befolyásolták...

Algyő környékén a szeizmikus adatok alapján várható nagy mélység, valamint az üllési és szanki fúrásokban észlelt nagy túlnyomás és gázkitörés miatt a Bányaműszaki Felügyelőség utasítása szerint meg kellett várni nagy nyomású zárószervezetek és nagy teljesítményű berendezések beszerzését a dél-alföldi mélyfúrások kutatás biztonságos folytatásának érdekében. Emiatt csak 1964. december 9-én tűzték ki az első fúrás (Algyő-1), melynek megkezdésére csak 1965. június 20-án került sor. A kütüzési jegyzőkönyv szerint: „Az eddigi földtani–geofizikai ismeretek alapján a szegedi medencét jelentős perspektívájú kutatási területnek ítéljük meg. Ezért 1965-ben a kutatási volumen jelentős részét ide koncentrálnuk. A nagyobb berendezés kapacitással végzett kutatást indokolja az, hogy mélyfúrás geofizikai adatok alapján nagyvastagságú üledékek várhatók ezen a területen, több jól záródó gravitációs–szeizmikus maximum ismeretes és az árok nyugati szegélyén már mélyfúrásokkal is feltárt eredményes szerkezetek vannak (Üllés, Szank, Soltvadkert).” (Kütüzők: DANK V., KÖRÖSSY L., CSIKY G., SCHEFFER V., VÖLGYI L., KOMJÁTI J., KERTAI GY. – I. CSATH 1975).

Az Algyő-1 fúrás 1456 m-nél tartott, amikor hirtelen a Tápé-1 vízkutató fúrás került a figyelem középpontjába. A kutat – KÖRÖSSY László saját kezű feljegyzése szerint – 1965. február 26. és július 7. között mélyítették, célja vízfeltárás volt a Tápé Tiszatáj MGT SZ részére. Az 1953–1962,5 m közötti nagy ellenállású, valamint az 1940–1949 m, 1923–1930 m és 1906–1911 m közötti víztároló rétegek együttes megnyitásokor előbb olajos vizet, majd tiszta olajat termelt a kút. Megfelelő kitorésgátló hiányában 1965. július 7-én reggel a kút kitört (6. ábra), amelyet 22 óra alatt tudtak elzárni az Alföldi Kőolajfúrás Üzem szakemberei (CSATH 1975). Tápé nevű kütönyvből csak egyet őriznek az adattárak, az utolsó feljegyzés szerint: „Az OVF. hatáskörében mélyült fúrás az OKGT átvette és olajtermelésre képezte ki. A kút termeltetése folyik. Olajtermelő kütként átadandó a NKV-nak.” Amilyen hirtelen jött a „tápai” olajtalálathíre, olyan gyorsan véget is ért (több Tápé nevű szénhidrogén-kutató fúrás nem született).

Az Algyő-1 kút fúrását a befejező jelentés szerint október 2-án állították le, a kút végleges mélysége pedig 2262 méter lett. A fúrás célja a szerkezet maximumán az alaphegység elérése volt, a 2262 m-ben bekövetkezett fúrórudszakadás akadályozta meg a cél elérését. Persze a 26 db rétegvizsgálat és annak eredményei azt mutatták, hogy ebben az esetben, bár a célt nem érték el, ezért senkit sem fognak elmarasztalni... VADÁSZ Ernő a befejező jelentést az aláb-



6. ábra. A vízkutató Tápé-1 fúrás vadkitörése 1965-ben (forrás: HORVÁTH Janina tudományos munkatárs, Szegedi Tudományegyetem, Földtani Tanszék)

Figure 6. Blow out of the Tápé-1 water exploratory well in 1965 (source: Janina HORVÁTH, research associate, Szeged University, Geological Department)

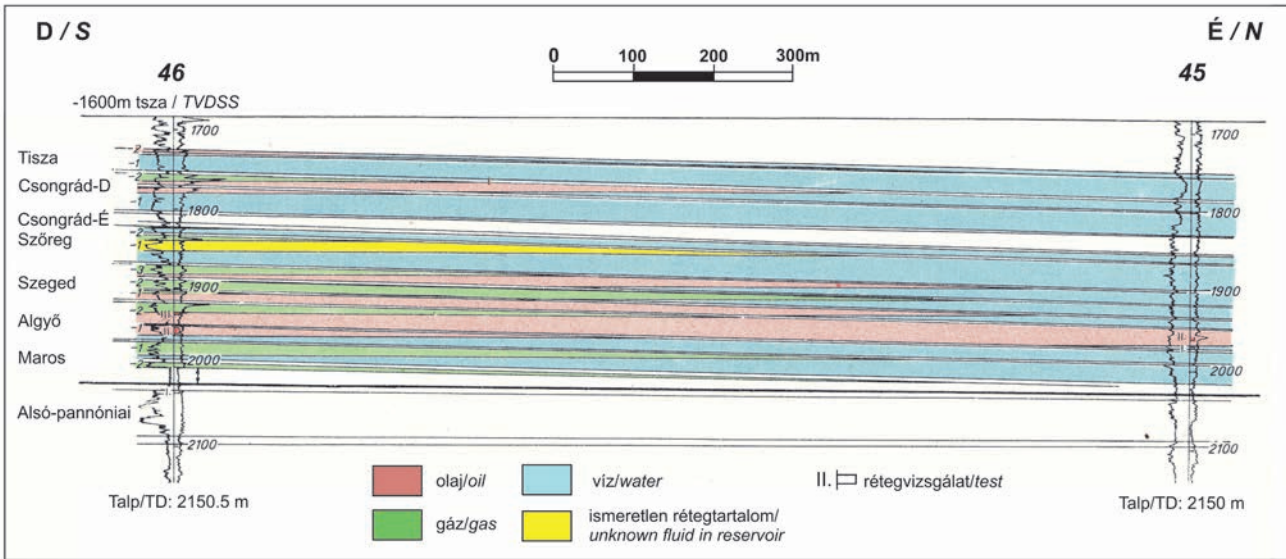
biakkal zárta: „1779–2198 m között gáztároló homokköveket tártunk fel, amik a környező fúrások megfelelő rétegeivel jól azonosíthatók. Tekintve, hogy a környező fúrások közül az Algyő-1 van legmagasabb szerkezeti helyzetben, ezek a homokkövek mind gáztárolók.” A kút átharántolta tehát a teljes pannóniai tárolóösszletet, és ezzel eldöntötte a következő évtizedek szénhidrogén-ipari fejlesztéseinek irányát.

A területen ezidőben tizenkét fúróberendezés üzemelt, egy pontkütüzés alkalmával harminc fúrópontot jelöltek ki. Két évvel a felfedezést követően már részletes geológiai metszetek és térképek álltak rendelkezésre a legfontosabb telepekről (VÖLGYI et al. 1970, 7–8. ábrák). Ezzel egy időben a felszíni technológiai munkálatok is nagy ütemben folytak. Mindezek eredményeként öt év alatt sikerült az olajtermelést évi egy millió tonna fölé emelni, és több mint húsz éven keresztül tartani ezt a szintet. Ilyen éves nagyságrendet Algyőn kívül csak Nagylengyel mező tudott elérni a hatvanas évek első felében.

Az 1965-ös év – Algyőhöz nem mérhető, magyar viszonylatban azonban számottevő – másik találatot is adott a Szegedi-medencében. A Dorozsma-2 jelű kút alsó-pannóniában állt meg, és a sekélyvízi pannóniai rétegsorban kisebb jelentőségű olajtelepet talált. Az algyői munkálatok miatt öt évet kellett várni a terület továbbkutatására, így az 1970-es évhez kapcsolhatjuk a metamorf aljzatban lévő jelentős olajtelep felfedezését, amivel egy teljesen új tárolótípusban is igazolódott a szénhidrogének jelenléte a medencében.

1966. az ásothalmi szerkezet első kutatófúrásának éve. A kutat nem sikerült a szerkezeti maximumra telepíteni, ezért egy évvel később, az Ás-2-es számú kúthoz köthetjük a felfedezést. Az olajtelep paleozoos metamorfiban és a rátelepült miocén összletben halmozódott fel. Ez a Szegedi-medence legmagasabb szerkezeti helyzetben lévő előfordulása.

1970-ben folytatódott az „újabb” földtani kutatás Ferencszálláson is (1942, F-1). A folytatást az tette lehetővé, hogy erre az időre már szabadultak fel fúró- és lyukbefejező berendezések Algyőn. A kutatások a magyar–román határ



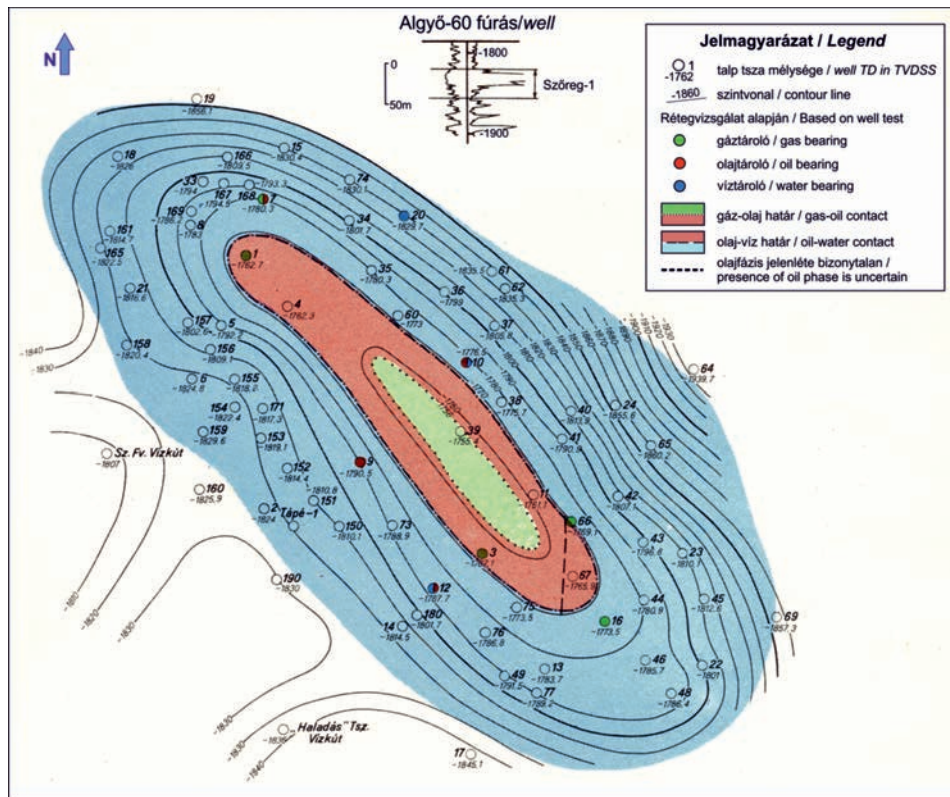
7. ábra. Részletes földtani szelvény az Algyő-46, -45 számú fúrásokon keresztül (VÖLGYI et al. 1970)

Figure 7. Detailed geological cross-section across the Algyő-46 and -45 wells (VÖLGYI et al. 1970)

mentén, mindkét országban, „egymástól függetlenül” kőolaj- és földgáztelepeket tártak fel. A telepek egyrészt pannóniai homokkövekben, másrészt az aljzatra települt abráziós, durvatörmelékes összletben helyezkednek el.

Azonban még mindig nem volt vége a sorozatnak... 1971-ben kezdődött a Szeged-1 szerkezetkutató fúrás mélyítése, melynek célja az algyői és dorozsmai területek

közötti gravitációs anomália megismerése volt. 1972. év végére fejeződtek be a rétegvizsgálatok. Ez a fúrás találta meg az ún. Szeged-Móráváros telepet, amelynek a fő tárolóközetei triász dolomit (Szegedi Dolomit Formáció), homokkő breccsa (Jakabhegyi Formáció), valamint miocén durvatörmelékes és karbonátos üledékek (DANK 1985). A kút először bizonyította a mezozoos medencealjzat meglétét



8. ábra. A Szőreg-1 telep talptérképe fázishatárokkal (VÖLGYI et al. 1970)

Figure 8. Structural basemap of the Szőreg-1 hydrocarbon pool with hydrocarbon contacts (VÖLGYI et al. 1970)

Szeged város közvetlen környékén, valamint a város egy része alatt. Az 1-es kút kivizsgálását követő egy éven belül már tíz lefúrt kút állt rendelkezésre.

Az 1965 és 1972 közötti „fekete aranykor” felfedezései több mint 100 millió tonna olaj és 120 Mrd m³ gáz (a Makói-árok nélkül) földtani vagyont adtak a szűkebb értelemben vett Szegedi-medencében. A teljes magyarországi termelés közel fele a Szegedi-medence mezőjéhez köthető, ezen belül csak Algyő egyharmadot képvisel. Nem véletlen tehát, hogy ez a terület kutatási szempontból a mai napig kitüntetett figyelmet kap.

Kutatási eszközök fejlődése – analógból digitális világ

A kutatásban alkalmazott eszközök a 70-es évektől kezdve egyre növekvő tempóban fejlődtek. Erre a 80-as évektől megjelenő digitalizáció robbanásszerű elterjedése adott lehetőséget. Az analóg egységeket felváltották a digitális jelrögzítésű eszközök, melyekkel több, jobb minőségű adat felvételére volt lehetőség. A számítógépek fejlődésével és elterjedésével a feldolgozó és értelmező rendszerek egyre jobb és integráltabb módszertani lehetőségeket adtak a kutatók kezébe, amelyek megváltoztatták az iparágat. Az olajipar, és benne a kutatás, a 90-es évektől beköltözött a számítógépek adta digitális világba.

A múlt és jelen közötti átmenetet a szemlében a 3D szeizmikus mérések megjelenéséhez mint a kutatást megváltoztató módszertani eszközhöz kötjük.

Ebben a fejezetben összefoglaljuk a reflexiós szeizmikus mérések – mint az utóbbi 50–60 év legfontosabb kutatási eszközének – magyarországi fejlődését, és röviden bemutatjuk a mélyfúrás geofizikai mérések, valamint a fúrások során használt iszapszelvényezés (mudlogging) szerepét is. Habár ez a téma átível a tanulmány múlt-jelen-jövő alapú időbeli tagolásán, mégis úgy gondoljuk, hogy célszerű e módszeregyüttes gyors ütemű fejlődését külön fejezetben felvázolni.

Szeizmikus mérések

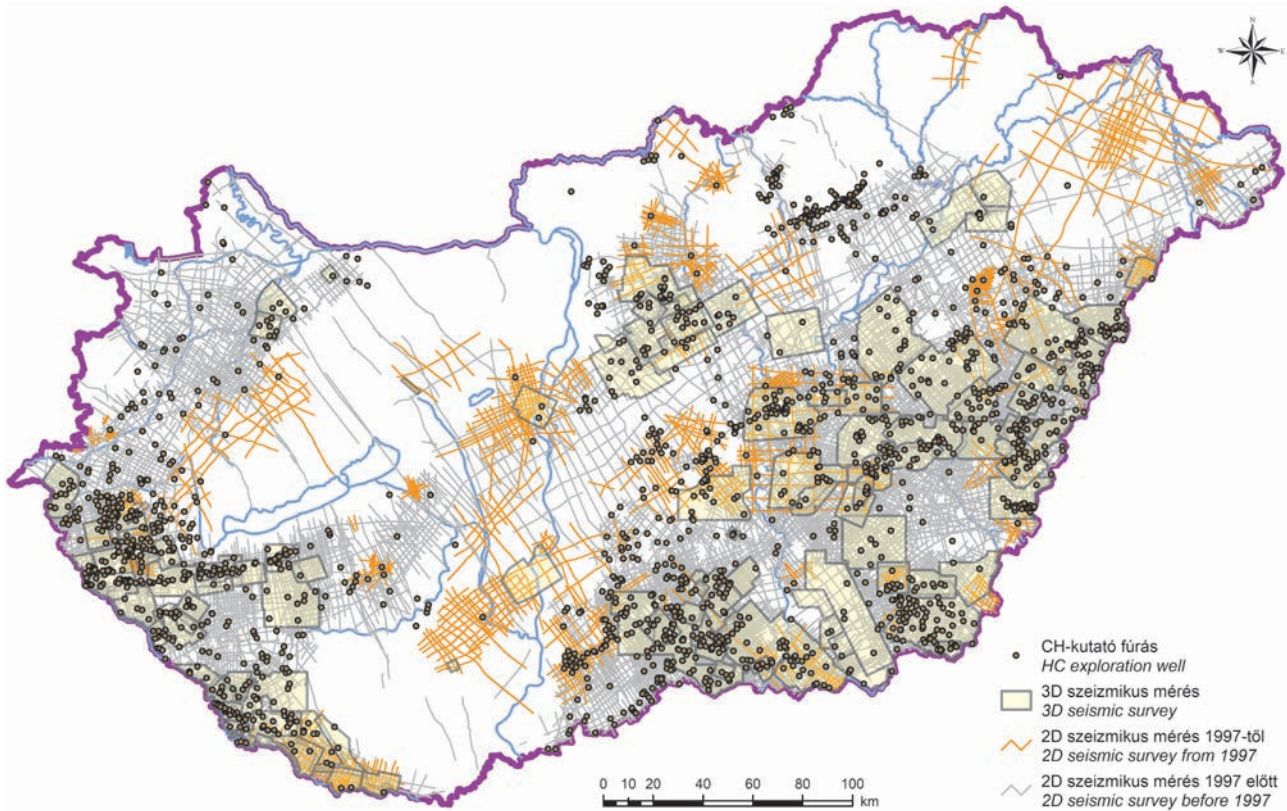
Az első kísérleti jellegű szeizmikus mérések már a 30-as években megtörténtek a Dunántúl területén. Egészen a 60-as évekig azonban a különböző erőter-geofizikai – főként gravitációs – mérésekre alapozott fúrásos kutatás volt jellemző, amelyet az egyre inkább teret nyerő, de analóg jelrögzítésű 2D refrakciós és reflexiós szeizmikus mérések eredményeivel egészítettek ki. Mi volt ennek az oka? Egyrészt a szeizmikus szelvények mérése és feldolgozása még gyermekcipőben járt (technológiai ok), másrészt ebben az időszakban elsősorban a nagy méretű aljzati szerkezeteket és azok közvetlen környezetét kutatták (sikeresen), így valójában nem is volt szükség a dominánsan szeizmikus alapon történő kutatásra. A részletes földtani modellezést inkább a nagyszámú kutató- és lehatároló fúrások alapján végezték. Ugyanakkor elődeink tisztában voltak azzal, hogy a szeizmikus eszközök segítségével pontosan azt az információhiányt lehet kitölteni, amely a gravitációs mérések és a fúrásos

információk közötti felbontásbeli különbség miatt létezik. A kutatási paradigmaváltást egy egyszerű tény is kikényszerítette: egyre inkább megfogyatkoztak a nagy méretű, erőter-geofizikával könnyen kimutatható kutatási objektumok, és a medence kutatási szempontból elkezdett éretté válni. Ennek eredményeként szükségessé vált a kisebb, rejtettebb objektumok kutatása, amelyhez jó alapot nyújtott a rohamléptekkel fejlődő szeizmikus módszer.

Magyarország szeizmikus felmértéséről a Magyar Bányászati és Földtani Szolgálat (MBFSZ) vezet átfogó nyilvántartást (KOVÁCS G. et al. 2018). Ez a nyilvántartás a 2D típusú mérések közül a digitális jelrögzítésű reflexiós mérések terepi és feldolgozott adatait tartalmazza, amelyek nyersanyag-kutatási és tudományos szempontból is fontosak, míg a korábbi, fotoregisztrációs és analóg jelrögzítésű szelvények, illetve a refrakciós mérések már inkább csak tudomány- és ipartörténeti jelentőségűek. Az MBFSZ adatbázisában 1968-tól napjainkig mintegy 6800 2D szelvény található. Digitális szeizmikus észlelőrendszert hazánkban az OKGT GKÜ használt először, 1971-ben (GOMBÁR & KÉSMÁRKY 2002). Az első évekből azonban szerepel a nyilvántartásban az a néhány tucat alföldi szelvény is, amelyet a hazai fejlesztésű, mágnesszalagos regisztrálású SzM-24+6 műszerrel mértek (BODOKY & POLCZ 2016) és a számítógépes feldolgozás céljára utólag digitalizáltak. Különböző tárolási, technológiai okok miatt jelenleg a digitális mérések mintegy 85%-a található meg az adattárakban.

A mérési jelentések szerint a nyilvántartásban szereplő vonalak közül 5980-at mértek kifejezetten szénhidrogén-kutatási céllal. További 222 olyan vonalat azonosítottunk az adatbázisban, amelyet elsősorban alap- és szerkezetkutatás céljából mértek (pl. „kéregkutatási”, alapszelvény-, mélyszerkezet-kutatási, litoszféra-kutatási program keretében), de e szelvények „eredményei”, mint a Pannon-medencét kitöltő kainozoos összlet felépítésének, a medencealjzat helyzetének részletesebb megismerése, vagy a nagyszerkezeti modellezések is főként a szénhidrogén-kutatásban hasznosultak. Munkánkban e 6202 szelvény adatai alapján vázoljuk fel a 2D szeizmika hazai fejlődését és a szénhidrogén-kutatásban betöltött szerepét (9. ábra). Ezek közül 5434 vonalat mért a GES Kft., illetve jogelődjei, 662-t az ELGI, és 106-ot egyéb cég. Az adatbázisban található kb. 600 db további szelvényt nagyrészt különböző szilárd nyersanyagok – szén, bauxit, uránérc, színesérc, evaporitok –, valamint víz, illetve hévíz, újabban geotermális energia kutatása keretében mérték, zömmel az ELGI szakemberei (BODOKY & POLCZ 2016).

A szeizmikus módszerek jelentősége már a digitális korszak előtt is egyértelmű volt a szénhidrogén-kutatásban, melyek rohamléptű hazai térhódítása az 1950-es években indult el, és fokozatosan átvették a vezető szerepet a kutatásban a gravimetriától (MOLNÁR et al. 1995). Ezekről a korai munkákról azonban – elektronikus nyilvántartás híján – nem tudunk átfogó képet adni. Ugyanakkor hangsúlyozzuk, hogy a szakmai adattárakban (MBFSZ, MOL) a vonatkozó jelentések, szelvények fellelhetők, tehát szükség esetén ezek a régi adatok – papírformátumban – elérhetők, felhasználhatók.



9. ábra. Kutatási alaptérkép - 2020. augusztusi állapot (forrás: MBFSZ adatbázis, IHS Markit)

Figure 9. Exploration basemap of Hungary - as of August, 2020 (source: MBFSZ database, IHS Markit)

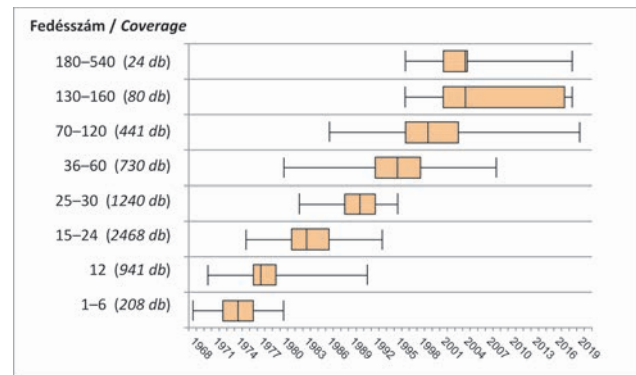
A szeizmikában a digitális terepi műszerek alkalmazása és a számítógépes adatfeldolgozás bevezetése (DFS-III, TIOPS) 1971-ben kezdődött. 1977-ben kezdődtek meg a rutinszerű vibroseis mérések, közben 1979–1985 között „land air-gun” energiaforrásokat is használtak jelgerjesztésre. A kutakban végzett „Vertical Seismic Profiling” (VSP) mérést 1982-től alkalmazzák a szeizmikus adatok mélységkonvertálására. Az 1980-as években állították üzembe az első nyugati feldolgozórendszereket (GeoMax, GeoMaster), és 1986-tól kezdték meg a modern, telemetrikus digitális terepi műszerek használatát, amelyek lehetővé tették a 3D mérési és feldolgozási technika bevezetését (KÉSMÁRKY 2002).

A mennyiségi mutatók alapján a 2D szeizmikus kutatások fénykora 1976-tól 1992-ig tartott (1. ábra), utána a felszíni geofizikában a főszerepet a 3D technika vette át. A 2D mérések minőségi paraméterei az évek során – követve a kutatási igényeket és az információtechnológiai lehetőségeket – folyamatosan (olykor szédületes iramban) javultak. Ezt illusztrálja a 10. ábra a fedésszámok eloszlásának bemutatásával.

A 2D–3D technológiai váltás nem jelentette a 2D mérések teljes leállítását, de a mérési volumen radikálisan csökkent (1. ábra) és a 2D mérések szerepköre megváltozott. Míg korábban (a 90-es évekkel bezárólag) az előkutatást és a részletező kutatást is a vonal menti mérésekkel oldották meg a szakemberek, a 3D szeizmika 2000-es évek elejétől történő „tömeges” megjelenésével a 2D mérések szerepe az

előkutatás és/vagy egy-egy speciális kérdés, probléma megoldására korlátozódott (9. ábra).

Az MBFSZ felmérési adatbázisa az 1986-os első, kí-



10. ábra. A digitális 2D szeizmikus mérések során elért fedésszámok evolúciója Magyarországon (forrás: MBFSZ adatbázis)

Egy-egy box-plot teljes hossza mutatja a teljes időintervallumot, amikor az adott fedésszámot alkalmazták; a téglalapok előtti vonalszakasz jelöli az éveket, amikor e szelvények első negyedrészt mérték, a téglalappal kihangsúlyozott szakasz szemlélteti a 2. és 3. negyedrészek lemérésének időszakát, végül a téglalaptól jobbra húzódó vonalszakasz az utolsó negyedrészt éveit mutatja

Figure 10. Evolution of fold numbers of digital 2D seismic acquisitions in Hungary (source: MBFSZ database)

The full length of each box-plot represents the full time-range, during the actual fold number was applied for seismic acquisitions; the line length before the rectangles represents the timeframe the first quarter, the rectangles the 2nd and 3rd quarters and the line after the rectangles the last quarter of the acquisitions

sérleti méréstől 2020-ig 113 olyan 3D szeizmikus mérési programot tart nyilván, amelyet szénhidrogén-kutatási céllal indítottak (ezenkívül végeztek 3D mérést szén- és geotermikus kutatás keretében, valamint a paksi nukleáris erőmű bővítésének tágabb környezetében is; 9. ábra). A mérések túlnyomó többségét az OKGT/MOL finanszírozta (77 mérést, ebből 3-at más céggel partnerségben). Jelentős a Magyar Horizont Energia Kft. (HHE) hozzájárulása (20 mérés, ebből 2 közös a MOL-lal). A többi 18 terület felmérése 7 további cég nevéhez fűződik, amelyek egyenként 1–5 mérést rendeltek meg.

A szénhidrogén-kutatás keretében végzett terepi mérések zöme, 81 a GES Kft., illetve jogelődjei kivitelezésében készült. Az Acoustic Geophysical Services Kft. (AGS) 22 területen végzett 3D mérést, míg 10 területet lengyel, illetve német cégek mértek fel. A 3D szeizmikus mérések által lefedett terület a nem szénhidrogén-kutatás keretében végzett méréseket is beszámítva közel 21 000 km², ami az ország területének 22,5%-a. Egyes területek újramérése, illetve a szomszédos területek határán alkalmazott átfedések miatt a mérési blokkok összterülete ennél nagyobb, több mint 23 000 km²-t tesz ki.

A 3D mérési technika is nagy ütemben fejlődött a kezdetektől napjainkig. A méréseket az 1990-es évek közepéig nagyrészt 480-as csatornaszámmal végezték. A felvételek csatornaszáma 1999-ben elérte az 1000-et, majd 2007-ben a 2000-et. 1000 alatti csatornaszámmal 2005-ben, 2000 alattival 2012-ben mértek utoljára. A 4000-es értéket 2015-ben lépte túl ez a paraméter, és az eddigi legmagasabb alkalmazott csatornaszám 5400 volt. A 3D mérések során elért névleges fedésszámokat a felmért területek nagyságával együtt, éves bontásban a 11. ábrán mutatjuk be.

Ezeket az adatokat grafikusan összevetve a fúrásszámokkal és a megtalált CH-készletekkel (1. ábra) jól látható a szeizmikus módszer térnyerése, az, hogy hogyan befolyá-

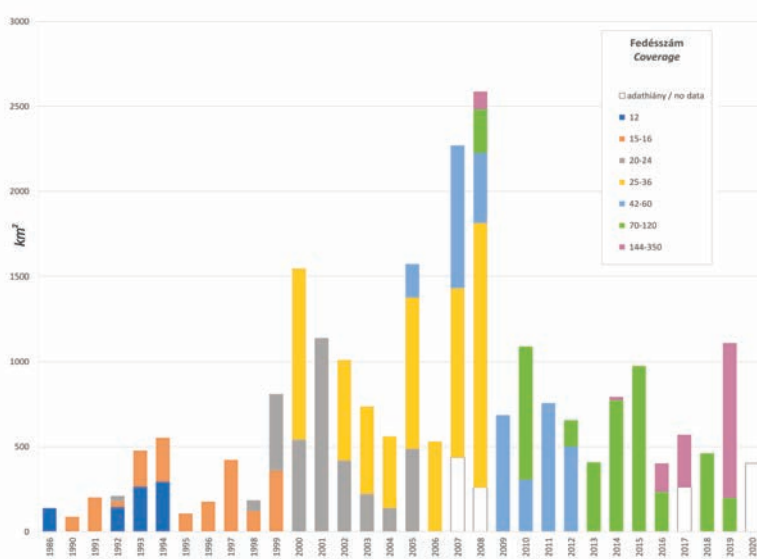
solta a 2D mérések általánossá váló alkalmazása a szénhidrogén-ipari „múlt” végét, és hogyan kapott új lendületet a kutatás a 3D mérések elterjedésével az utóbbi két évtizedben. Szintén leolvasható a kombinált diagramról, hogy a szeizmikus mérések elterjedéséhez az is erősen hozzájárult, hogy elfogytak a nagy méretű, könnyen kutatható szerkezetek. A máig feltárt szénhidrogénvagyon közel 75%-át már a digitális jelrögzítésű 2D szeizmikus mérések aranykora előtt felfedezték. Figyelemre méltó az is, hogy a megtalált mezők száma jóval nagyobb a szeizmikus korszakban, de a mezők mérete jelentősen elmarad a korábbiaktól. Ez azonban már a jelen és a jövő kutatási sikere, lehetősége és egyben problémája...

Mélyfúrési geofizikai eszközök

Az első mélyfúrési geofizikai mérésre a Görgeteg–1 fúrásban került sor 1935. december 21-én. Folyamatos, kézi regisztrálású ellenállás- és természetes potenciál (SP) görbéket mértek. A mérési lehetőségek 1936-ban hőmérséklet-szelvényezéssel, 1937-ben mélyebb behatolású ellenállással és gölyös perforálással bővültek. Az első magyarországi mérőcsoportot 1939-ben hozták létre Nagykanizsán, amely az egész országban tevékenykedett. A technológiai fejlődés eredményeként 1939-ben történt az első oldalfal-mintavételezés, 1943-ban az első kútpálya-meghatározás (ferdeség- és azimutmérés), 1952-ben pedig az első rétegdőlésmérés (BARÁTH et al. 1994, 2004). A kezdeti mérésekre szolgáltatásként, illetve eszközök vásárlásával és alkalmazásával került sor.

1949 tavaszán Biharnagybajomban is megalakult a karotázscsoport, amelyhez 1952-ben megérkezett az első, majd 1954–55-ben további három szovjet automata szelvényező berendezés. Megnyílt a lehetőség a dunántúli (nyugati technikával felszerelt, Schlumberger-eszközpark) és az alföldi (szovjet eszközökkel ellátott) csoportok között a két technika összehasonlítására. A továbbiakban mindkét csoport a maga törvényei szerint fejlődött, de a két egység nemcsak felszereltségben, hanem szemléletében sem volt egységes (BARÁTH et al. 1994).

Az 50-es évek elejétől elindult az eszközök magyarországi fejlesztése is az ELGI-ben, nem csupán olajipari, hanem víz, szilárd ásványi nyersanyagok, szén kutatásának, vizsgálatának biztosítására is. Bővült a szelvényválaszték, 1955-től természetes gamma, 1958-tól gammagamma, különböző behatolású ellenállás, lyukátmérő, saját fejlesztésű ferdeség- és azimutmérő, valamint oldalfal mintavevő eszközöket fejlesztettek ki. Elkezdődött a mérések kvantitatív értelmezése, az akkori Szovjetunióból átvettünk egy mélyfúrás-geofizikai minősítési rendszert. 1968 óta használjuk az akusztikus mérőeszközöket (előbb német, majd hazai gyártását). A 70-es évektől az újabb igények kielégítésére – mint feladatorientált szelvényezési programok, nagy hőmérsékletű mélyfúrások, radioaktív mérések kivitelezése – további fej-



11. ábra. A 3D szeizmikus méréssel lefedett területek nagysága és az elért fedésszámok évenkénti bontásban Magyarországon (forrás: MBFSZ adatbázis)

Figure 11. Annual areal and fold number distribution of 3D seismic acquisitions in Hungary (source: MBFSZ database)

lesztések történtek, valamint 1977-ben újabb szelvényező eszközök vásárlására is sor került. A termelésgeofizikai méréseket 1975 óta használják a termelési és besajtolási profil, valamint a termelvény összetételének meghatározására, kútproblémák felderítésére és felszámolására.

Időközben folyamatosan fejlődött a feldolgozás és a kiértékelés is. 1974 óta alkalmazták az értelmezésben a kis-számítógépeket, majd kifejlesztették a Karotázs Értelmezési Rendszert (KÉR).

A valódi digitális váltás a mélyfúrás geofizika területén a 80-as években történt meg. A hazai fejlesztési kapacitások és ipari háttér már nem volt elégséges, ami komplett szelvényező berendezés vásárlását tette szükségessé a Dresser Atlastól. A Kőolajkutató Vállalatnál 1983-ban alakították ki a Karotage Interpreter Subsystems (KISS) rendszert TPA-70 számítógépre, majd 1988-tól Perkin Elmer (PE) számítógéppel, IBM PC terminálokkal és megfelelő perifériákkal, főként Western Atlas szoftverekkel (PE és PC változatú szoftverekkel) alkalmazták. A Kőolaj- és Földgázbányászati Vállalat (KFV) és a Szénhidrogénipari Kutató és Fejlesztő Intézet (SZKFI) a Petroleum Computing Inc. értelmező rendszerét vásárolta meg (BARÁTH et al. 1994, 2004).

A 90-es évektől megváltozó magyarországi helyzetben az ELGI mint fejlesztői központ háttérbe szorult egyes nyersanyagok kutatásával egyetemben. Megalakult a MOL, és a világban elérhető legmodernebb fejlesztések, szelvényezések is megrendelhetővé és alkalmazhatóvá váltak, ami számos szolgáltató megjelenéséhez vezetett a magyarországi piacon. Elterjedtek a világon alkalmazott új mérések, mint a teljes akusztikus hullámkép-, nukleáris mágneses rezonancia-, kábelteszteres mérések vagy lyukfal-leképezési eljárások, hogy csak néhányat említsünk.

Fúrás közben szerzett információk

A fúrás közben szerzett adatok jelentik a legközvetlenebb információszerzést a mélyben található geológiai és szénhidrogén-földtani viszonyokról, így elsődleges fontosságúak. Az adatok felvétele, a minták elemzése a geológiai megismerés mellett az operatív döntési folyamatok egyik legfontosabb támogató rendszere. Jellemző eszköze a műszerkabin a benne található ún. iszapszelvényezési (mudlogging) eszközökkel. A műszerkabinban a fúrás paraméterek (terhelés, haladás stb.) folyamatos figyelése mellett többek között a furadékok gyors közzétani elemzése, a megjelenő szénhidrogénnyomok regisztrálása történik, amelyet ma már hálózati kapcsolatokon keresztül, akár távolról is, valós időben követni, elemezni lehet. Az iszapszelvényezés megjelenése rendkívüli mértékben megkönnyítette a fúrás eseményeinek követését és az operáció irányítását.

Az első magyarországi műszerkabinban történt fúrásra 1976-ban került sor. Az első egység egy amerikai rendszerű Unit Dat kabin (Dresser Magcobar Data Unit) volt, mely az akkor modern eszközök mellett (analóg csatlakozások, digitális displayek) még offline rendszerben működött. A rögzített adatokat thermopapírra nyomtatták, és a gázszelvények felvétele mellett képesek voltak az egységgel túlnyomás-előjelzést is biztosítani.

A fúrások során hasznosnak bizonyuló eszközök hazai fejlesztése ezt követően gyorsan elindult. 1976 és 1983 között a műszerkabinos szolgáltatásra a bővülő igények miatt olyan egység kialakítására került sor (DATA BOX), amely először csak a geológiai információk és a gázszint mérésére volt kialakítva. Az egységgel minimális fúrás adat került a mudlog-szelvények mellé, amely a fúróberendezés által mért paramétereiből került megjelenítésre. Ez a szolgáltatás egy, a maihoz képest egyszerűsített változat volt, de elegendő információforrásnak bizonyult.

A növekvő igényeknek és a technológiai fejlődésnek köszönhetően 1983-ban egy új, már online működésű rendszer (ún. TDC kabin) került beszerzésre, és sikeresen bevezették a mindennapi használatba. Ezt követően rövid idő alatt több új műszerkabinnal is bővült a Geológiai Üzem, biztosítva ezzel a fúrások hatékonyabb információszerzését.

A következő jelentősebb mérföldkő a magyarországi mudlogging-szerviz életében az 1992-ben megvásárolt első ALS (Advanced Logging System) rendszerű kabin volt (VÁGÓ 2006). Ezeknél az egységeknél az online adatgyűjtés már az időadatok folyamatos rögzítésére is kiterjedt.

A rendszer továbbfejlesztésével 1995-ben bevezetésre került az ALS-2 rendszer, amely már egy kezelhetőbb Microsoft Windows rendszer alatt futott, majd 2005-ben újabb frissítés következett (Windows 2000). Jelenleg a legfrissebb magyarországi rendszer egy 2009-ben vásárolt, ALS-3 néven futó egység, amelyen az adatgyűjtési rendszer korszerűsítése is megtörtént (SOMLAI Ottó 2020, szóbeli közlés). Az elmúlt két évtizedben a mudlogging üzletágban is megjelentek a külföldi szervizcégek, akik az elérhető legmodernebb eljárásokkal és eszközökkel szolgálják ki a kutatás igényeit.

A mélyfúrás geofizikai mérések és az iszapszelvényezés alapvető információforrássá váltak, olyannyira, hogy a jogszabályok kötelező minimális szelvényezési programot írnak elő fúrások esetében, nemcsak a szénhidrogén-, de a geotermikus és egyéb nyersanyagkutató fúrások esetében is.

A jelen... – A rossz...

Szögezzük le az elején, a fejezet címével sugaltakkal némileg ellentétben, a szénhidrogén-kutatási történetünk jelenét a rossz szerepével párhuzamosítani egyáltalán nem helyénvaló. Több szempontból is kiemelkedő időszak ez a kutatók számára. A fúrás, információszerzési eszközök, mérési technológia fejlődése, a berobbanó és teret hódító digitális eszközök, számítógépes programok olyan arzenált adnak a kutatók számára, amilyennel előtte soha nem látott részletességű és integrációjú, medenceszintű földtani és szénhidrogén-földtani modelleket lehet elkészíteni. Ez magával hozza a sikeresség növekedését egyes kutatható szénhidrogén-felhalmozódási trendek, egységek (playek, BAKER et al. 1986) esetében, emellett arra is lehetőséget ad, hogy olyan helyzetű és típusú kutatási objektumokat is ki lehessen mutatni, amelyeket korábban nem sikerült. A szénhidrogén-termeléstörténeti diagram (2. ábra) alapján érzékelhető leginkább, hogy ez az időszak már mégis más –

rosszabb –, mint a múlt. A nagyobb szerkezetek megkutatottá váltak, a termelési profil alapján pedig látható, hogy az aranykorban felfedezett nagy méretű mezők termelése a 80-as évek végétől kezd visszaesni, és ezt a trendet már csak rövid időszakokra sikerül visszafordítani vagy akár csak szinten tartani új találatokkal. Egy egyre érettebbé váló medencében ez természetes folyamat, a kutatást a készletpótlás érdekében mégis egyre nagyobb találati kényszer alá helyezi, aminek idővel egyre kevésbé tud megfelelni. A „lélektani határ” valahol a 2000-es évek közepénél van, amikor a fúrási program nagy részét éveken keresztül inkább a kis-méretű, de nagy találati aránnyal bíró pannóniai objektumok adják, amelyek önmagukban ugyan jövedelmezőek, de méretüket tekintve készletpótlásra már nem alkalmasak. Természetesen a Pannon-medence szintjén értendők az előzőekben leírtak, hiszen akadnak azért példák szerencsésen felfutó területekre és ebben a környezetben jelentős méretűnek számító találatokra is.

A szerzők a szénhidrogén-kutatás jelenét egy hozzávetőlegesen 30 éves időtartamban határozták meg. A szeizmikus mérési technológia fejlődésével a 80-as évek második felében megjelenő, majd a 90-es évek elejétől egyre gyakoribbá és általánosabbá váló 3D szeizmikus adattömbök hoznak el egy olyan metodikai váltást, mely meghatározza és jellemzi a jelenkornak tekintett időszakot. Természetesen a váltás, hasonlóan a 2D szeizmikus szelvények egykori térhódításához, nem éles. A 2D mérések továbbra is aktív szerepet játszanak a kutatási feladatok megoldásában, de elsősorban az addig megkutatatlan területekre koncentrálnak, egyre kisebb mérési volumen mellett (*I., 9–10. ábrák*).

Mivel a 3D mérések költségesek, kezdetben kutatási célokra nemigen használták. Az első kísérleti mérést (Kiskunhalas 3D, 1986) követően a 90-es évek elején a 3D mérések elsősorban ismert telepek rezervoár-geológiai, illetve rezervoár-mérnöki problémáinak megoldására kerülnek bemérésre (pl. Ruzsa, Csólyospálos, Szank, Szarvas, Endrőd, Sávoly, Vizvár-É térségében). A jellemzően célorientált mérések ebben az időben kis területeket fednek le (20–70 km²), melyek önmagukban nem elegendők kutatási feladatok elvégzésére.

Az első, már kutatási célokra is szolgáló, nagyobb méretű 3D mérésekre az ország keleti felén került sor (pl. Medgyesbodzás 1994, Bagamér 1997), majd a 2000-es évektől általános gyakorlattá válik a kutatási célú 3D szeizmikus adattömbök mérése. A már korábban eredményes kutatási területeken a jelentős mennyiségű korábbi 2D adat értelmezését követően új 3D szeizmikus mérésekre kerül sor. Mondhatjuk, hogy a szénhidrogén-kutatás szempontjából bizonyított potenciállal rendelkező terület nagy része bemérésre került az elmúlt 30 év során (*I., 9, 11. ábrák*).

A 3D szeizmikus mérések kutatáson belüli alkalmazási területe is változott idővel. A kezdetben az ismert szerkezetek, telepek/mezők környezetében végzett 3D mérések inkább lehatároló kutatási feladatokra kerültek bevetésre. A cél ilyen esetekben egy-egy konkrét probléma megoldása volt, mint például a Furta–Mezősas–Komádi térségében 1993–95 között lemerített 3D-k esetében, ahol a fúrási program során megismert rendkívül összetett teleptani–geológiai problémakör megol-

dására, tektonikai blokkok lehatárolására és szatellit mezőrész kutatására szolgáltak a mérések. Hasonló helyzetben volt a 2000-ben mért algyői adattömb, amely amellelt, hogy 3D-s adatokkal fedte le a már ismert telepeket, szatellit telepeket, esetlegesen nem ismert mezőrészek kutatására is szolgált. Ez már részben átvezetett a 3D alkalmazási területének egy további irányába, a nagyszerkezetek oldalában található potenciális csapdalehetőségek mint kiékelődések, lezökent blokkok kimutatására és kutatására.

A következő lépcső az aljzati maximumoktól való ellépés volt, amelyre jó példa a már korábban is említett Bagamér 3D (1997), amely a későbbiekben további 3D mérésekkel kiegészítésre került (Földes-K, Ebes, Létavértes), és lefedte a Derecskei-árok mint jelentős gázprovincia teljes területét. A 2001-ben felfedezett Hosszúpályi-D gázmező és a környezetében felfedezett további gázelőfordulások (Monostorpályi-D mezőrész, Álmosd-É, Létavértes) volt talán az első olyan jelentős, nagyszabású 3D alapján megkutatott előfordulássorozat, amely szerkezeti magasslatoktól távol, szeizmikus sztratigráfiai, illetve részben már szekvencia-sztratigráfiai módszerekkel és emellett szeizmikus attribútumvizsgálatokkal megtámogatva került felfedezésre.

A 3D mérési metodika, és a nyers adatok feldolgozásának fejlődésével lehetővé vált és bevezetésre került a nemzetközi olajiparban a 80-as évektől már a gyakorlatban is alkalmazott (OSTRANDER 1984) AVO (Amplitude Variation with Offset) analízis, valamint a szeizmikus attribútumok (SHERIFF 2002) általános használata a földtani modellekben, az objektumok szénhidrogén- (elsősorban gáztelítettség-) vizsgálatában.

A kezdeti tapogatózó próbálkozásokat követően az attribútum- és AVO-alapú kutatás nagyon sikeressé vált, elsősorban az Alföld területén, és főként a pannóniai üledékek kutatásában. A 3D adatok segítségével a legkisebb objektumok is azonosíthatókká váltak, ezek fúrások kutatása pedig kimagasló találati arányokat hozott (egyes részterületeken a találati arány 90%), azonban a felfedezések kitermelhető mennyiség tekintetében többnyire meglehetősen szerény méretűek (*I. ábra*).

Az attribútum- és AVO-alapú kutatás fejlődésével és elsősorban a gázkutatásban sikeres alkalmazásával együtt járt a kutatási stratégia átalakulása egyes – reménybeli pannóniai telepeket tartalmazó – medencékben, főként a Tiszántúlon és a Dél-Alföldön. A 2000-es évek közepétől jelentős 3D szeizmikus mérési kampány zajlik a potenciális területeken. A munkamenet ezeken a területeken egyszerű, gyors és kiszámítható. A bemérést, majd a speciális feldolgozásokat követően, a területeken már ismert előfordulások jellemzőinek vizsgálatán alapuló gyors AVO-/attribútum-alapú objektumazonosítás, azokból kutatási portfólióépítés, gazdaságossági vizsgálat történik, majd indul is a fúrások mélyítése, akár a mérés befejezésétől számított egy éven belül. Miután az érett területeken a földtani felépítés általánosan és részleteiben is ismert, nincs igazán szükség bonyolult modellépítésre, a „kutatási” folyamat rendkívüli mértékben felgyorsul, futószalagszerűvé válik és sikeresen működik. *Olyannyira sikeres módszerről beszélhetünk, hogy megkérdőjeleződik e programok kutatási jellege, sokan inkább lehatároló vagy akár mezőfejlesztő kutatásnak tekintik ezeket a fúrásokat és felfedezéseket.*

A kutatás ebben az időszakban teljesen átalakul. Az előkészítési munkálatok, a modellépítés során a súly átbillen a geofizikai modellezések irányába, amelyhez a földtani modellek inkább háttértámogatást adnak. A megcélzott vagyonméretek, a költségek alacsonyan tartása, a gyors termelésbeállítási ütem okán a fúrások során az információszerzési programok nagyon visszafogottak, például magminta-vételekre egyre csökkenő mértékben kerül sor, a fúrásokat követő tesztek legtöbb esetben a fúrási fázis végén egy rövid vizsgálatban merülnek ki.

Ugyanez a stratégia a posztrift rétegeken kívül azonban nem működik ennyire sikeresen. A területenként eltérő vastagságú színrift rétegekben az AVO és más DHI (Direct Hydrocarbon Indicator) attribútumok nem mutatják ki egyértelműen a telített szakaszokat. Ennek az eltérő, változatos és változékony rétegsorok lehetnek a fő okai, ezzel pedig a miocén rétegek kutatása nem kap a pannóniai rétegek kutatásához hasonló lökést. A miocén és idősebb objektumok kutatása továbbra is megköveteli az aprólékos geológiai és geofizikai modellépítést.

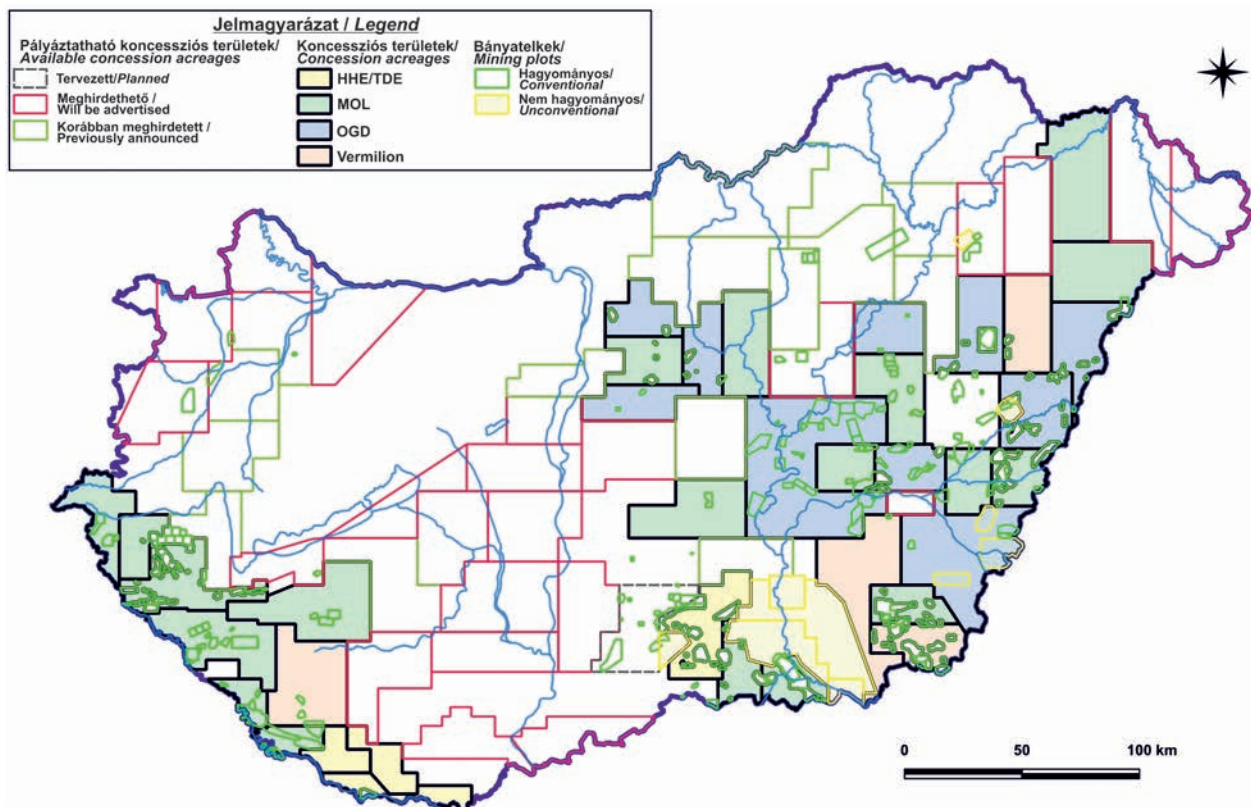
A kutatástörténeti diagram 1990–2020 közötti szakaszát kiemelve látható (1. ábra), hogy önmagában sikeres évtizedről beszélhetünk, hiszen az időszakban felfedezett előfordulások száma 100 feletti, amelyhez a felfedezett ipari vagyonrész 200 millió hordó egyenérték körül van. Ugyanakkor szem előtt kell tartani, hogy ez a – kutatás szempontjából már „érett” – időszak az ezt megelőzően felfedezett kitermelhető vagyon kevesebb mint 10%-át jelenti. Az álta-

lunk meghatározott 30 éves „jelen” a felfedezett, kitermelhető vagyon szempontjából további szakaszokra bontható.

A 90-es évektől 2007–2008-ig a kutatási programokkal még történnék jelentősebb gáz- (Csólyospálos-K 1990, Hosszúpályi-D 2001, Zaláta 2007, Kőrösújfalú 2007) és kőolaj-felfedezések (Mezősas-Nyugat 1992, Sávoly-DK és D 1997, Gomba 2003), de ezt az időszakot követően a görbe szinte teljesen kisimul. 2008–2017 között 32 gáz- és 10 olajfelfedezés történt, ugyanakkor a felfedezett kitermelhető összesített mennyiség csak mintegy 20 millió hordó egyenérték. A legnagyobb találatok is csak ritkán haladják meg a 2 millió hordó egyenérték mennyiségét. Ezen a meglehetősen lehangoló képen 2017-ben a Dráva-medence északi előterében, Pettend környékén felfedezett jelentős kőolajvagyon javít, melynek gyors termelésbe állítása szinte megduplázza az elmúlt évek magyarországi kőolaj-termelését (2. ábra).

Az elmúlt évek eredményeit néhány, a korábbiakban nem tárgyalt, de egy érett területen meghatározó tényező befolyásolta.

Az egyik tényező a kutatási licencek helyzete. A korábbi, főként jogadományon alapuló kutatási területi hozzáférés 2010-ben megszűnt (az ország zárt területté vált), helyét egy kizárólag koncessziós alapon működő rendszer vette át 2013-tól. A közbeeső 2-3 évben az aktív kutatási területek nagysága nagyon lecsökkent, amivel együtt járt a kutatási programok leállása is, amely a koncessziós rendszer elindulásával lassanként visszaépül (12. ábra). Jelentős új talála-



12. ábra. Az érvényes és meghirdethető szénhidrogén-kutatási koncessziós területek Magyarországon – 2020. augusztusi állapot (forrás: <https://mbfsz.gov.hu/>, módosítva)
Figure 12. Valid and advertisable CH exploration concession acreages of Hungary – as of August, 2020 (source: <https://mbfsz.gov.hu/>, modified)

tok az említett pettendi felfedezés kivételével azonban egyelőre nem történtek.

Ugyancsak a kutatási programokat befolyásoló tényező az olaj- és gázárak igen nagymértékű ingadozása. Ahogy arról szó volt, a „jelen” 30 éves időszakának második felében a találatok átlagos mérete meglehetősen kicsi, így gazdasági értékük nagyban függ az éppen aktuális olajpiaci áráktól. Ez nagymértékű fluktuációt is okoz a kutatási programokban, különösen a gázkutatás terén. Az árak okozta bizonytalanság mellé még időszakos különadók is társulnak, amelyek tovább rontják a kutatási programok megvalósíthatóságának esélyeit. Érdekes, bár a fent leírtakból következő ellentmondás, hogy nagyobb gazdaságossági kockázatot rejt ma gázt kutatni, mint olajat.

Még egy lényegi, a kutatást befolyásoló tényező jelent meg az elmúlt 30 esztendőben. 1995-ben Nagylengyel-Nyugat és Inke területeken kutatási jogot kapott a Blue Star Corporation ezzel az addig évtizedeken keresztül egyszerű magyarországi olajipar kinyílt és több szereplőssé vált. Számos vállalkozás lépett be Magyarországra, ahol önállóan és partnerségben dolgozott és dolgozik jelenleg is a Pannon-medence területén. A különböző cégek kultúrák, az eltérő kutatási stratégiák egyfajta szakmai együttműködést és egyben versenyhelyzetet is teremtettek, amely jól hatott az olajiparra és azon belül a kutatásra.

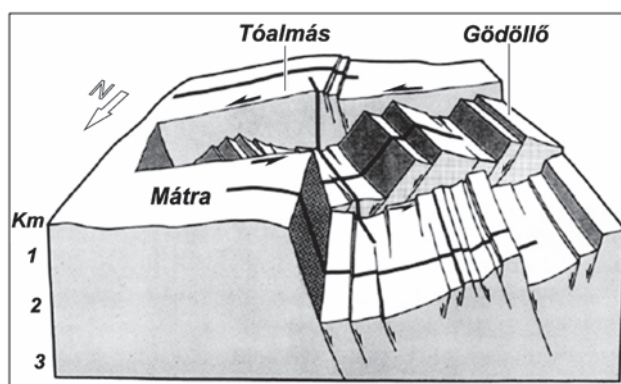
A Paleogén-medence

Szénhidrogén-történeti „jelenünk” kétségtelenül egyik sikerterülete a Paleogén-medence kutatása.

A Paleogén-medence északkeleti részmedencéje (Vata–Maklári-árok) már a magyarországi olajipari történelem kezdetén, illetve korai fázisában megkutatás alatt állt. Ehhez a medencéhez tartozik az egyik legelső (és a „Dunán innen” elsőként termelésbe állított) olajtelep-felfedezés a Bükk délnyugati előterében, Bükkszéken (1937), továbbá a demjéni és a mezőkeresztesi, mint jelentősebb korai felfedezésű kőolaj-előfordulások (KÖRÖSSY 2004). A medence jelenben sikeres, ún. középső részének kutatása a turai területen kezdődött el az 50-es években (Tura–1, 1954), majd folytatódott a 60-as években (Tura–Tóalmás). A kezdeti kisebb, többnyire nem ipari értékű felfedezéseket, valamint nyomokat szolgáltató kutatási szakasz után a terület kutatása az 1980-as években újult fel Tura, Mogyoród, Dány környékén. A turai fúrások ekkor már kisebb kőolaj-, szabadgáz-, illetve gázszapkás kőolajtelepeket tártak fel többnyire miocén korú homokkőtárolókban. Az áttörést az 1994-ben, 2D szeizmikus értelmezésen alapuló Dány–1 kút lefúrása hozta meg, mely a Zagyvai-árokra nyugatra elhelyezkedő kibillent triász blokk tetőzónájában található karsztos tárolóban tárta fel a területre az addig legjelentősebb kőolaj-előfordulását. A fúrás újdonságát az adta, hogy a korábban a területen elsődlegesen kutatott miocén rétegek helyett az idősebb, aljzati objektumok kutatását célozta meg, sikerrel. Így kezdett kibontakozni egy új play lehetősége a területen.

A Dány–1 fúrást követően 1995-ben került bemérésre a Dány 3D szeizmikus mérés. A mérés alapján további kutatófúrásokat mélyítették (Isaszeg–1, Valkó–1), de ezek a dányihoz hasonlóan kedvező pozíciókban nem tártak fel szénhidrogén-előfordulásokat.

A medence területén futó Balaton-vonal jellegében kétváltásztja a Paleogén-medencét. A vonaltól északra hozzávetőlegesen É–D-i csapású, kelet felé dőlő, kibillent aljzati blokk sorozatok jellemzők, míg attól délre ÉK–DNy-i vergenciájú szerkezetek találhatók (13. ábra, TARI et al. 1992). A déli területen 2D szeizmikus szelvény értelmezése alapján mélyült 1996-ban a Monor–É–1 fúrás, mely eocén homokkőben tárt fel szénhidrogéntelepét, de a tároló rossz minősége miatt az olaj termeltetése ipari értelemben nem volt sikeres. Ugyancsak ezen a területrészén, 2D szeizmikus értelmezés eredményeként mélyült a Tóalmás–D–1 kutató-



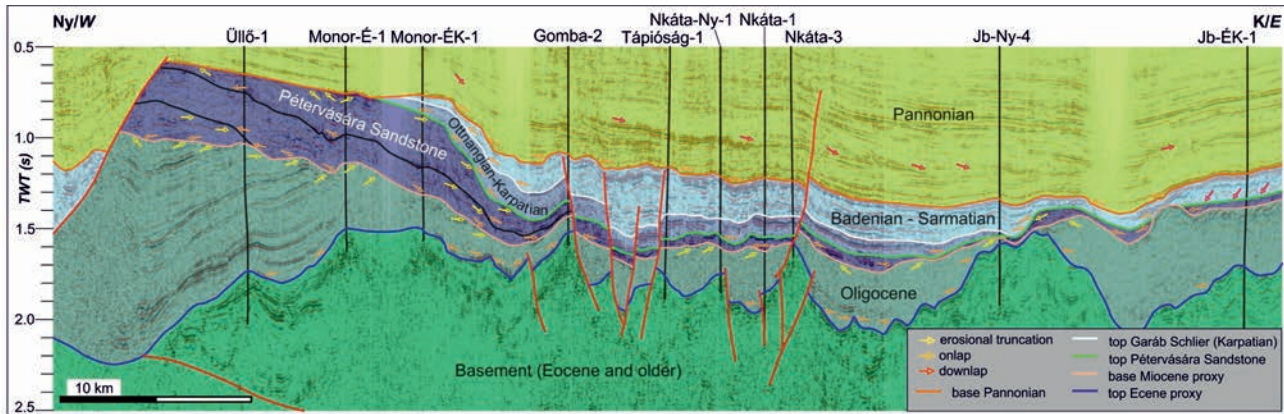
13. ábra. A miocénnél idősebb képződmények szerkezeti értelmezése a Paleogén-medence területén (TARI et al. 1992)

Figure 13. 3D structural interpretation of the pre-Miocene formations in the Palaeogene Basin (TARI et al. 1992)

fúrás, mely egy meredek aljzati repedésrendszerben tárt fel ipari értékű kőolaj-előfordulást 1999-ben.

A Tóalmás–D-i eredményeket követően több fázisban 3D szeizmikus adattömbök bemérése történt meg a déli területrészén, Tóalmás, majd Monor, Jászberény környezetében 2000–2005 között. A 3D mérésekre alapozott modellalkotás alapján több jelentős kőolaj-előfordulást fedeztek fel: Tóalmás–D, Nagykáta, Nagykáta–Ny, Gomba, Süllyáp–É, Ócsa, Monor (14. ábra, PALOTAI 2013). Az intenzív kutatási program során felfedezett kitermelhető vagy az ezen a területrészeken mintegy 21 millió hordó egyenérték szénhidrogén, nagyjából kőolaj, amely a területet Algyő mögött a második helyre tette olajtermelés szempontjából a 2000-es évek derekától.

A siker több tényezőre is visszavezethető. Egyrészt a korábbi eredmények alapján kijelenthető, hogy a terület a 90-es éveket megelőzően alulkutatott volt. A Dány, majd a Tóalmás–D-i találatok rávilágítottak az eocén/oligocén anyakőzetek és az aljzati/eocén tárolók közötti kapcsolatra, ez pedig újra elindította a terület kutatását. A sikerességhez emellett nagyban hozzájárult a 3D szeizmikus mérések alkalmazása.



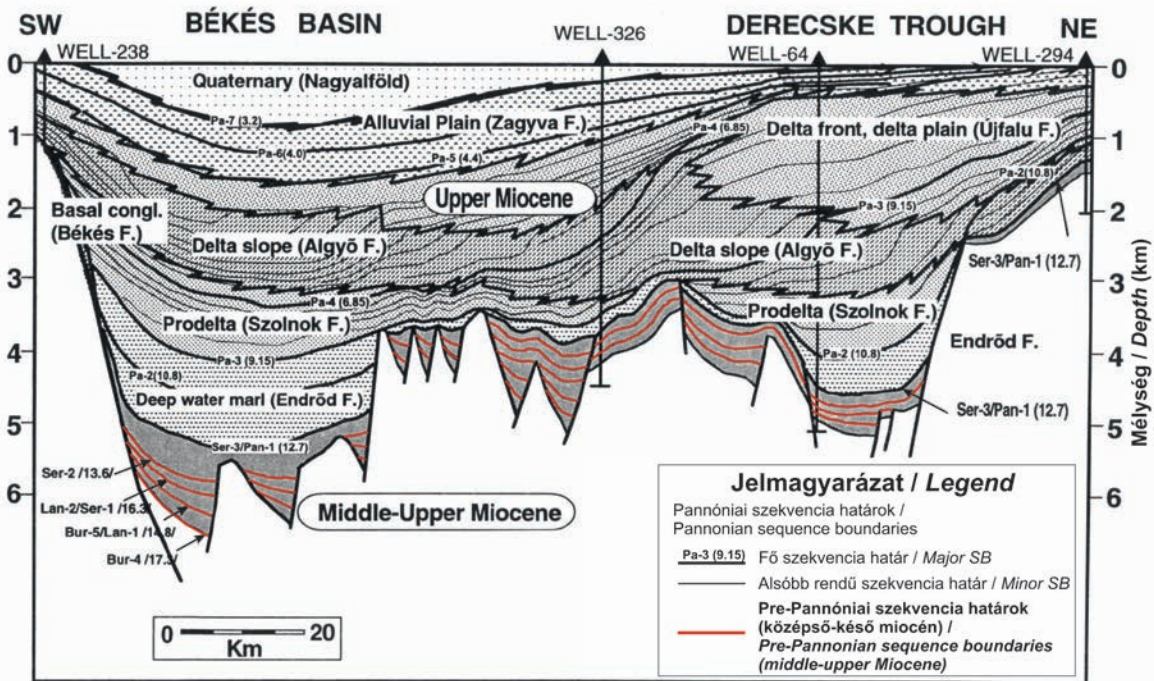
14. ábra. Kompozit szeizmikus szelvény és értelmezése a Paleogén-medence déli területén keresztül (PALOTAI 2013)

Figure 14. Interpreted composite seismic section across the south part of the Palaeogene Basin (PALOTAI 2013)

Tiszántúli gázkutatás

A legnagyobb szénhidrogén-előfordulásaink pannon rétegekben (Algyő, Hajdúszoboszló) található, amelyeket aljzati nagyszerkezetek felett boltozódó szerkezeti csapdákban fedeztek fel. A 60-as évektől a pannóniai sztratigráfia fejlődése (GAJDOS et al. 1983, JUHÁSZ 1992, JUHÁSZ & MAGYAR 1992, PHILLIPS et al. 1994) során az „alsó”- (az olajiparban használt rövidítéssel P11) – „felső”-pannóniai (az olajiparban használt rövidítéssel P12) litológiai felosztástól az 1990-es években eljutottunk a dinamikus deltafeltöltő-

dési modellig (VAKARCS 1997, 15. ábra). Az új alapokra helyezett pannóniai üledékes rendszer kutatása pedig nem kapcsolódik szükségszerűen nagyszerkezetek környezetének kutatásához. A lemért 3D szeizmikus adattömbökön szeizmikus, valamint szekvencia-sztratigráfiai alapon kidolgozott modellek alapján önálló pannóniai szénhidrogén-földtani egységek meghatározására és kutatására nyílt lehetőség. Annak ellenére, hogy csapdázódást tekintve nagyrészt nem sztratigráfiai felhalmozódásról beszélhetünk, ennek a megközelítésnek és módszertannak az eredménye a 2001-ben felfedezett Hosszúpályi-D gázmező, mely az



15 ábra. Középső-miocén-pliocén üledékképződési modell a Pannon-medencében, részletes szeizmikus szekvencia-sztratigráfiai értelmezésen alapuló földtani metszet a Derecskei-árkon és a Békési-medencén keresztül (VAKARCS 1997)

Figure 15. Middle Miocene-Pliocene depositional model of the Pannonian Basin. Geologic cross-section is derived from detailed seismic sequence stratigraphic interpretation across the Derecske Trough and Békés Basin (VAKARCS 1997)

elmúlt 30 év egyik legnagyobb gáztalálata. A hozzávetőlegesen 2005–2006-ig tartó időszakban 3D mérésekkel megtámogatva nagyon részletes földtani és szénhidrogén-földtani modelleket dolgoztak ki a Tiszántúlon és a Dél-Alföld egyes részein. Az ezen alapuló kutatás további felfedezéseket hozott a Derecskei-árokban Létavértes és Álmosd környékén. A további sikereket azonban nem ezek a modellek hozták meg önmagukban, ahhoz a korábbiakban már említett, szeizmikus adatokból kinyerhető attribútumok és a szénhidrogén jelenlétére közvetlenül utaló AVO-hatás vizsgálata nagyban hozzájárult. A módszertan már az 1980-as évektől ismert, de az AVO-jelenségekre alapozott kutatás Magyarországon csak 2006 után jelent meg. A gyakorlati alkalmazást a Magyar Horizont Energia Kft. (HHE) vezette be a Tiszántúlon, amikor is Dévaványa, Túrkeve, Komádi környékén indított el önálló, illetve partnerségi kutatási programokat és ért el találatokat. A következő években, egészen napjainkig a területen dolgozó vállalkozások ezzel a módszertannal a Tiszántúlon hozzávetőlegesen 30 regisztrált gázfelfedezést értek el a pannóniai rétegekben.

Dunántúli kutatási eredmények

A Dunántúlon a kutatás egy nagyon szép találattal – az Őriszentpéteri, mintegy 8 millió hordó egyenértékű gázfeldedéssel – fordult a szénhidrogén-kutatási történetünk jelenébe (1989).

Az első 3D szeizmikus felvételezésekre már igen korán, 1992-ben sor került a Dunántúlon. Az első mérésekkel már ismert előfordulásokat, mint Nagylengyel, illetve Sávoly területét fedték le. A célterületek nagysága néhány tíz négyzetkilométer volt, amellyel a mezők és közvetlen környezetük bemérésére került sor. A mérési stratégia a Dunántúlon hasonlóan alakul az ország más részeihez, vagyis egészen a 90-es évek végéig kis területű mérések történtek. A szeizmikus 3D adatok kutatási feladatokban való használhatóságát azonban már a Sávoly környékén végzett program is igazolta. 1992–1999 között négy, egymást kiegészítő 3D mérést végeztek. Az adattömbök alapján Sávoly környékén új telepeket, mezőrészeket fedeztek fel: 1995–97 között Sávoly-DK, Sávoly-D területeken, majd további szatellit telepeket, 1998–1999-ben Szőcsénypuszta, Kápolnapuszta, Zalakomár térségében. A 3D szeizmikus mérésekkel 2007-ben kelet felé tovább haladva Tatárvár környezetében tártak fel újabb ipari értékű kőolaj-előfordulást.

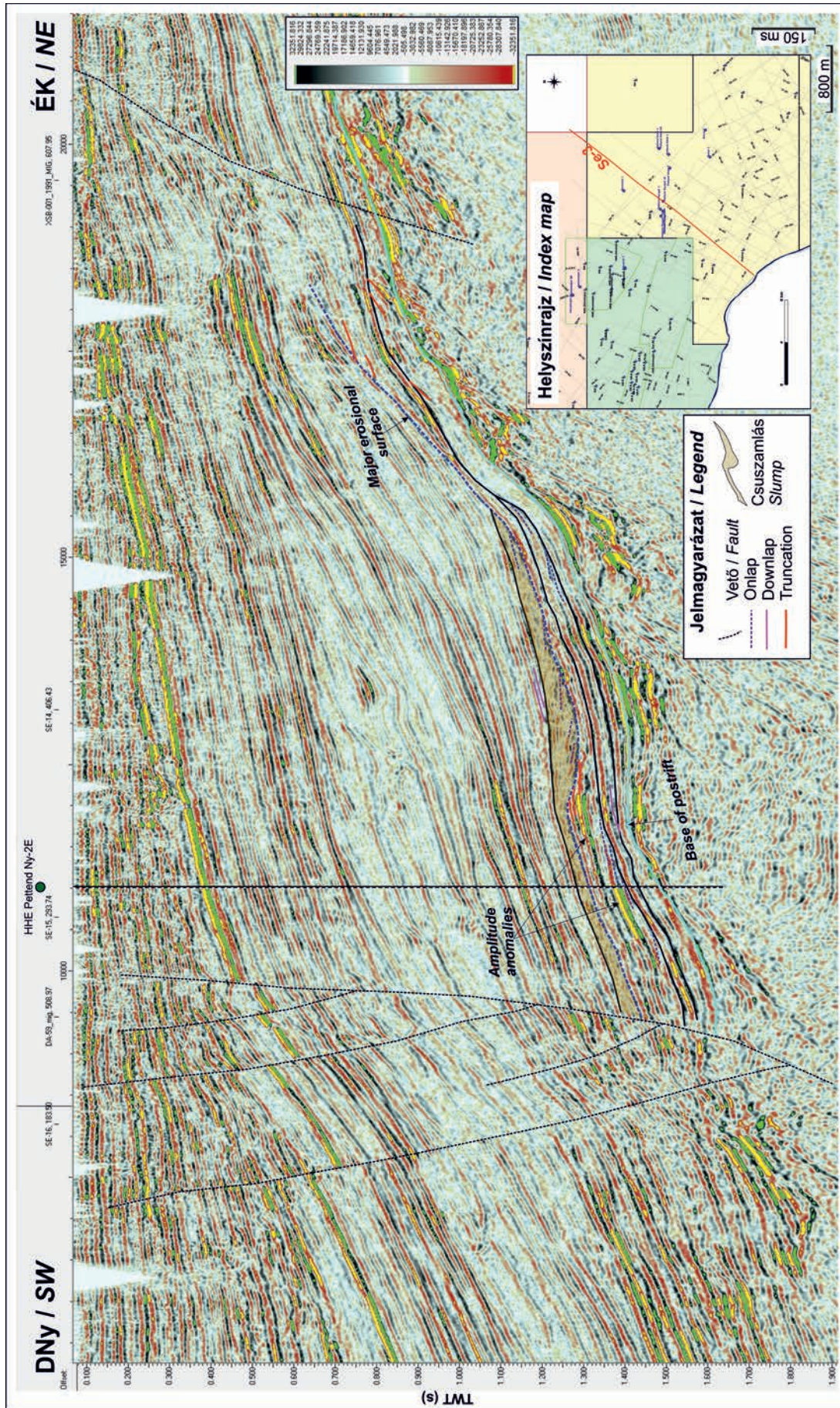
A 3D mérések mellett a kutatási programok 2D mérésekkel lefedett területeken is sikerrel zajlottak a 90-es években. Csombárd, Nagybakonak, valamint Jankapusza környékén történt szénhidrogén-felfedezés.

A 2000-es évektől a 3D mérés mint kutatási eszköz ugyanúgy elterjedt a Dunántúlon, mint az ország többi részén. A nagy mezők környezetének kutatási „érettségét” jól jelzi, hogy a régóta ismert területeken végzett intenzív mérési programot követő fúrési program nem hozott jelentős eredményeket sem számszámokban, sem felfedezett mennyiségben. Látható, hogy a hagyományosan kutatott playek lehetőségei kifogyóban vannak.

A Dunántúl leginkább sikeres területrésze a délvidék, a Horvátországgal határos zóna. Amellett, hogy az elmúlt 30 esztendőben Belezna, Vízvár környezetében történtek az országhatárhoz közel eső szénhidrogén-felfedezések, a már korábban is példaértékű, évtizedekre visszatekintő horvát-magyar határmenti együttműködés egy új szakaszába fordult, mely az INA és a MOL Nyrt. együttműködésével jelentős kutatási sikerhez vezetett. A határmenti előfordulások kutatása, termelése, a közös mezők kezelése mindig is a magyar és a szomszédos olajipar (és országvezetés) érzékeny pontja volt. Az említett közös határmenti kutatás azonban meglehetősen egyedi, miután közös érdekeltségi területeken a magyar és a horvát fél együttműködésében közös modellépítés és kutatási program történik a 2000-es évek elejétől. A programban közös 3D szeizmikus mérésekre, valamint fúrásos kutatásra került sor. A közös kutatás legjelentősebb eredménye a 2007-ben Zalátán és a horvát oldalon Dravica térségében felfedezett, mintegy 8,6 millió hordó egyenértékű kitermelhető mennyiséget tartalmazó földgázmező. Az előfordulás kutatására, lehatárolására mindkét ország területén mélyült kutatófúrás, közös fejlesztési és termelési stratégiát határoztak meg. A határmenti kutatási területek jogosítottjai időközben változtak mindkét oldalon, de – miután a geológia nem ismer határokat – a határokon átívelő együttműködés továbbra is a sikerhez vezető egyik legfontosabb út.

A Dunántúl hagyományos kutatási területein a pannóniai rétegek sztratigráfiai csapdáinak kutatása sokáig nem volt általános. Az Alföldön a pannóniai rétegsorokban sikeres attribútum- és AVO-alapú kutatási metodika a Dunántúlon is megjelent az elmúlt bő évtizedben. Az alapot a 2008-ban bemért Barlahida 3D adja, amelyen a pannóniai üledékek geológiai és geofizikai modellezését követően több pannóniai célobjektum kutatása is megtörtént (Tófej-1, Gutorfölde-1, Rádiháza-1, Tófej-Ny-1). A play koncepció és az alkalmazott metodika működik, gáztelepek felfedezésére került sor, de a megismert vagyonok kicsik, jelezve, hogy a pannóniai üledékek potenciálja nem túl magas ezen a területen.

A Dráva-medence magyarországi részén (északi peremén) 2008-ban bemért Barcs 3D területén attribútum vizsgálatok alapján 2010-ben Jánosmajor, Istvándi, Fannimajor környezetében gázfelfedezésekre került sor. Az előfordulások termelése során nemcsak gáz-, hanem olajtermelés is történt, amely jelezte a tágabb környezet szénhidrogén-kutatási perspektíváit. A 2016-ban kiírt Lakócsa blokk kutatása az itt megkezdett kutatási program folytatása, mely meghozta azt a sikert a Dunántúl számára, amely nagyon sokat adott a terület rész lehetőségeinek megítéléséhez, valamint akár szénhidrogén-történetünk jövőjéhez is. A HHE által elnyert blokkon 2017-ben és 2018-ban mélyült pettendi kutatófúrások pannóniai rétegekben fedeztek fel jelentős mennyiségű kőolajat (*16. ábra*). A mező és a blokk még kutatási, illetve korai termelési fázisban tart, és kevés a publikált adat, így részletes képet a földtani modellről, illetve a felfedezett vagyon nagyságáról nem ismerünk. A felfedezés jelentőségét azonban jól mutatja, hogy gyors termelésbeállítást követően a mező jelenleg csaknem megduplázza a magyarországi olajtermelést.



16. ábra. SE-3 részlegesen értelmezett szeizmikus 2D szelevény a Pettend olajmező környezetéből, Dráva-medence DK-i rész, Magyarország (forrás: szeizmika - OGD Central Kft., kút lokáció IHS adatbázis). Az amplitűde anomáliák jelezik a telepek helyét
 Figure 16. Partially interpreted SE-3 seismic 2D section in the vicinity of Pettend oil field, SE Dráva Basin, Hungary (source: seismic - OGD Central Ltd., well location: IHS database). The location of amplitude anomalies shows the discovered oil reservoirs

Nem hagyományos előfordulások kutatása

Szénhidrogén-földtani értekezésünk múlt–jelen–jövő felosztásában a nem hagyományos előfordulások kutatását nem egyszerű elhelyezni, több szempontból sem.

Abban, hogy egyáltalán felismerjük ezeket az előfordulásokat, gondolkodjunk a kutatásukon, illetve hasznosíthatóságukon, sokat segített, hogy nevet tudtunk adni neki. Ez pedig olajipari történelmünk eléggé késői időszakában, valamikor a 2000-es évek első évtizedében következett be, amikor is az észak-amerikai kontinensről elindultak a hírek, hogy valami egészen forradalmi dolog kezdődött ott, és amelyről azóta tudjuk, hogy ténylegesen megváltoztatta az ipar és a világ gondolkodását az elérhető szénhidrogének mennyiségével kapcsolatban. Az időpont alapján azt gondolhatjuk, hogy a nem hagyományos előfordulások kutatása olajipari jelenünk része. Ugyanakkor mihelyt a típusokat és a meghatározható kritériumokat felállítottuk (HOLDITCH 2013), szinte mindjárt be is tudtuk azonosítani a fejünkben azokat a már régóta ismert képződményeinket, amelyek potenciálisan beleillettek egyik vagy másik előfordulástípusba. Olyan képződményekről, medencékről, előfordulásokról beszélünk, amelyeket régóta kutattunk, legyen szó akár földtani vagy fúrás/termelés technológiai vonatkozásokról, és amelyeket korábban nem tartottunk ipari értelemben érdemlegesnek arra, hogy foglalkozzunk vele. Egész egyszerűen nem volt része az addigi általános olajipari gyakorlatunknak.

Az eddig felsorolt érvek a téma múltba és jelenbe tartozása mellett eléggé fajsúlyosak, de lássuk a nem hagyományos előfordulások kutatásának jövőhöz való viszonyát pro és kontra. Az eddigi kutatási programok eredményei nem hoztak forradalmi változást a magyarországi termelésben. Ugyanakkor nem kérdés, hogy a nem hagyományos „megközelítés” a jövőnk részévé válik, hiszen a világban működő projektek igazolják, hogy nem kell elvetnünk egy-egy lehetőséget csak azért, mert elsőre nem tűnnek hasznosíthatónak, hiszen akár technológiai, akár projektoldalon van megoldás arra, hogy kutassuk és kiaknázzuk ezeket a forrásokat.

A szénhidrogén-piramison (17. ábra) belül azon típusokat sorolhatjuk be a nem hagyományos előfordulások közé, amelyek a rendelkezésre álló eszközökkel termeltethető, jobb tárolótulajdonságokkal rendelkező, a világ termelésének domináns részét adó „hagyományos” előfordulásoktól valamely tulajdonságukban oly módon eltérnek, hogy nem termeltethetők gazdaságosan és/vagy korábban nem volt megfelelő technológia a hasznosításukra. Számosságukat tekintve jóval többféle típusról beszélhetünk, és ezen előfordulásokhoz rendelhető földtani vagy is sokkal nagyobb, mint a hagyományos előfordulások esetében. A kulcs a megfelelő technológia és a gazdaságos termeltethetőség.

A piramison megtalálható típusok közül Magyarországon elsősorban a pelitekhez kötődő szénhidrogének, vagy – ahogy a magyar nevezéktanban elterjedt – márga- vagy palagáz/olaj (shale gas/oil), az alacsony áteresztőképességű homokkövekhez kapcsolódó gázok (tight gas), illetve a szénhez kötött metán (coal bed methane, CBM) előfordulásokkal kapcsolatban folytak kutatások (18. ábra).

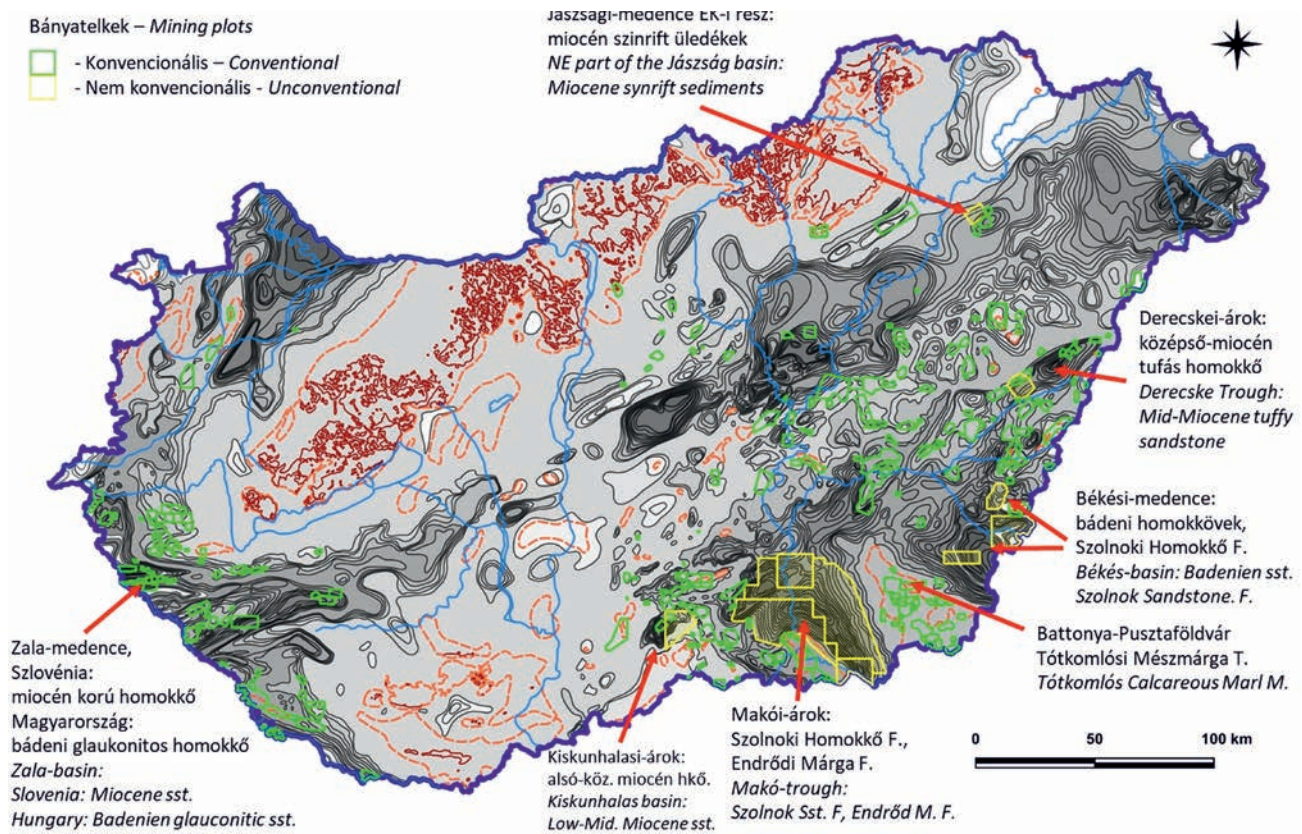
A szén- és szénhidrogénipar érdekes ötvözeteként értelmezhető szénhez kötött metán vizsgálata, hasznosíthatósága a mecseki jura feketeszén előfordulása kapcsán már többször is felmerült, sőt konkrét mezőbeli kísérletek is történtek a 90-es években a gáz felszabadítására és termeltetésére, de végül ezeket a próbálkozásokat nem követte nagyobb volumenű program.

A Makói-árokban a 2000-es évek elején megkezdett munkaprogram volt az első olyan dedikált projekt, amely területi nagyságával, illetve a megcélzott vagyon méretével felhívta a figyelmet az itthoni lehetőségekre és azok potenciális ipari, gazdasági hatására. A cél ebben a fiatal árokban (TARI et al. 1999) egy ún. medenceközponti gázfelhalmozódási rendszer (BCGA; LAW 2002) kutatása volt. A rendszer földtani hátterét az árkot kitöltő, nagy vastagságú pannóniai üledékes összlet adja. Részei az Endrődi Márga Formáció mint potenciális anyakőzet és egyben márgagáz/olaj előfordulás, valamint a Szolnoki Homokkő Formáció mint alacsony áteresztőképességű homokkövekhez kapcsolódó gázelőfordulás. Az előfordulások igazolására, hasznosíthatóságuk vizsgálatára elvégzett munkaprogram az árok teljes területét lefedte. Az árok és környezetének újraértékelésén túl jelentős volumenű szeizmikus mérésre került sor, mely lehetővé tette az árok nagy részletességű feldolgozását. A fúrási tevékenység is jelentős volt, hiszen korábban összesen nem mélyült annyi kút az árok területén, mint ebben a pár évben (9 db fúrás). A folyamatos előfordulás igazolására peremi és centrális helyzetekben is mélyültek fúrások a Szolnoki és az Endrődi Formációkban, minden pozícióban értékes, új adatokat szerezve az árok földtani és szénhidrogén-földtani viszonyairól (KOVÁCS Zs. et



17. ábra. Szénhidrogén-piramis (módosítva HOLDITCH 2013 után). A magas-közepes minőségű rezervoárok a háromszög csúcsán tekinthetők a konvencionális, míg a többi előfordulás a nem konvencionális rezervoároknak (vagyonoknak)

Figure 17. Resource triangle (modified after HOLDITCH 2013). The high to medium-quality reservoirs in the upper region of the triangle are generally considered to be conventional resources; the other resources in the larger part of the triangle are considered to be unconventional reservoirs



18. ábra. Magyarországi nem hagyományos szénhidrogének kutatási térképe (módosítva KOVÁCS Zs. et al. 2018 után)
Figure 18. Exploration map of unconventional hydrocarbon resources in Hungary (modified after KOVÁCS Zs. et al. 2018)

al. 2018). Ugyancsak ennek a programnak köszönhető egy hazai „rekord”. A kutatás keretében mélyült a jelenleg legmélyebb magyarországi fúrás, a Makó-7, melynek egyik fontos földtani vonatkozású eredménye, hogy elérte a Makói-árok alját, és abban metamorf képződményeket tárt fel, ismertté téve egy addig ismeretlen foltot Magyarország kainozoos aljzatának térképén (HAAS et al. 2010).

A fúrások teszt- és rétegrepesztési programjairól, illetve azok eredményeiről sok publikált adat, információ nem érhető el, de az tudható, hogy mind az Endrődi, mind pedig a Szolnoki Formációkban történtek vizsgálatok a képződmények szénhidrogén-földtani értékeinek meghatározására (BADICS et al. 2011). A program kutatási „eredményét” közvetlenül abból mérhetjük le, hogy a területeken igen jelentős szénhidrogénvagyron került dokumentálásra (Magyarország Ásványi Nyersanyagvagyona), amelyre később bányatelek-alapítások történtek, biztosítva ezzel a cégek számára a további tevékenység lehetőségét. A tevékenység folytatása azonban még várat magára.

Kevésbé ismert, de pannóniai rétegek nem hagyományos potenciáljának kutatására a Békési-medence területén is történt erőfeszítés (KOVÁCS Zs. et al. 2018). Habár itt az elvégzett munkaprogram volumene kisebb volt, miután mindösszesen két kutatófúrás mélyítésére és az egyik rétegrepesztésére került sor, a szénhidrogén-földtani vonatkozások és eredmények a Makói-árokéhoz hasonlóan alakultak.

A Makói-árok és a Békési-medence kutatási programjai

nemcsak önmagukban voltak jelentősek. Képet kaphattunk több, pannóniai üledékekkel kitöltött részmedence szénhidrogén-földtani viszonyairól, potenciális lehetőségeiről és a Pannon-medence olyan világméretű ipari résztvevők számára is érdeklődést váltott ki, mint a Shell vagy a kutatási programokban aktívan részt vevő ExxonMobil.

A pannóniai Endrődi Formáció bazális Tótkomlói Mészmarga Tagozata a szénhidrogénipar egyfajta svájci bicskája. Egyszerre fontos marker a fúrások során, záróközet a prepannóniai rétegek felett, gyenge/jó minőségű anyakőzet, és részterületenként eltérő fluidumokat tartalmazó tároló. Mint képződmény általános jellemzője, hogy önmagában nagyon rossz tároló tulajdonságokkal rendelkezik, amely csak a közbetelepülő durvább szemű, aleurolitos szakaszokon javul fel. Emiatt – talán egyedül a battonyai területen található mészmarga olajelődfordulásait kivéve – nagyon kis kihatással vagy egyáltalán nem termeltethető a mészmargában található telepek.

A mészmarga szénhidrogén-potenciáljának kiaknázásához vezető kulcs a képződmény nem hagyományos előfordulásként (márgagáz/olaj) való megközelítése lehet. Ez nem csupán azt jelenti, hogy a termeltetés megoldásához a nem hagyományos előfordulások esetében alkalmazott technológiák bevetésére van szükség, hanem azt is, hogy a potenciál továbbkutatása során a hagyományos előfordulásokra jellemző kritériumok – mint fázishatár, szerkezeti csapdák – helyett a mészmarga elterjedését, vastagságát, szénhidrogén-

generáló képességét kell figyelembe venni, ami jelentősen megnövelheti a már eddig ismert, mészmárgákhoz kapcsolódó földtani vagyonokat. Ezen a rendkívül izgalmas területen tudásunk szerint jelenleg egy projekt van folyamatban.

A mészmárgáról mint földtani–szénhidrogén-földtani képződményről összefoglaló ankét megrendezésére került sor a Magyarhoni Földtani Társulat Alföldi Területi Szervezete szervezésében 2016-ban (<https://foldtan.hu/hu/node/184>).

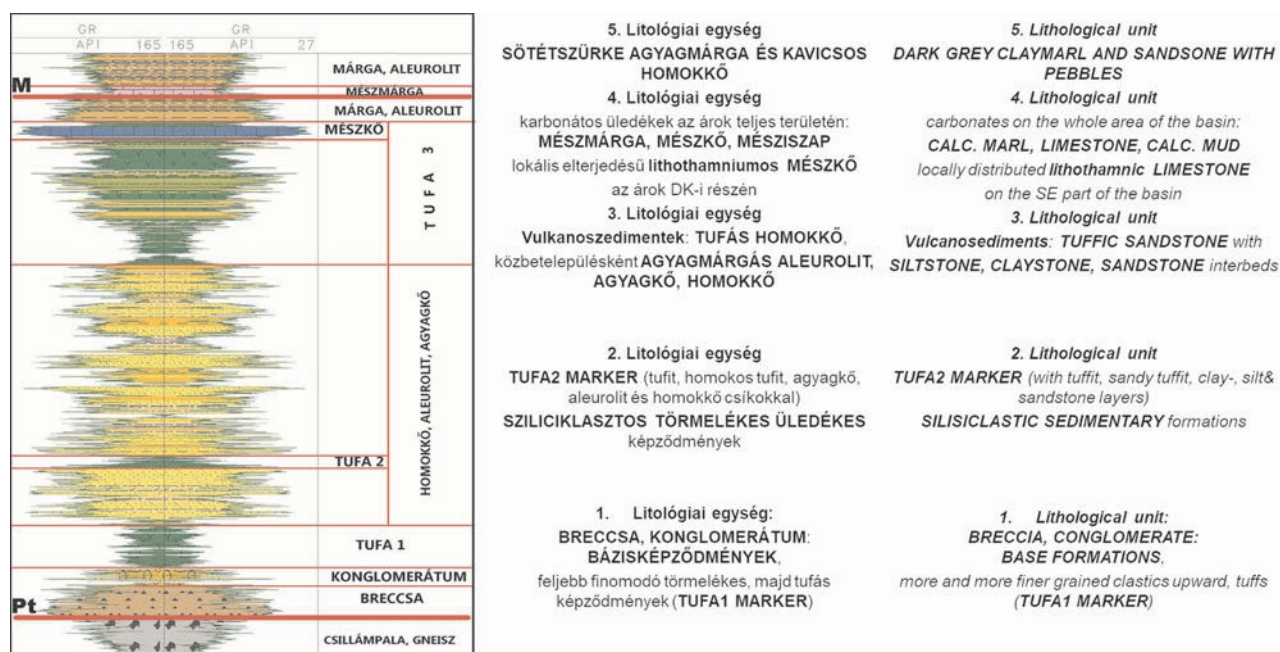
A méreteiben kétségtelenül legnagyobb potenciált ígérő pannóniai rétegek kutatása mellett további projektek is indultak a Pannon-medence területén.

Az alsó–középső-miocén rétegsorok a magyarországi szénhidrogénipar történetében sokáig alulkutatottak voltak. Amellett, hogy számos miocén korú tárolót ismerünk, ezek a rétegek döntően a jelentősebb aljzati magaslatok és a felettük esetleg boltozódó fiatalabb képződmények között kerültek megfúrásra. Ezekben a pozíciókban a vastagságuk sok esetben néhány vagy néhányszor tíz méter, litológiai kifejlődésük rendkívül változékony, jellemzően vulkanikus betelepüléssel. Önálló egységként való kutatásuk nem egyszerű feladat. Mindemellett több olyan program is folyt a 2000-es években, amelynek fúrásai jelentős vastagságban tártak fel alsó- és/vagy középső-miocén rétegeket, bennük szénhidrogén-előfordulásokat felfedezve. A Kiskunhalasi és a Derecskei-árok miocén rétegeinek kutatásai is ilyenek voltak (KISS & MAGYAR 2012, LEMBERKOVICS 2017, LEMBERKOVICS et al. 2018). Az itt felfedezett előfordulások azonban nem voltak gazdaságosan termeltethetők. Az ok az összlet rossz tárolótulajdonságaiban keresendő, melyek mindkét területen kielégítik az alacsony áteresztőképességű tárolók kritériumait (<0,1 mD). Az előfordulások

hasznosítására külön projekt indult, melynek során további fúrásokra, rétegrepszítésekre, majd próbatermelésekre került sor. Az idősebb miocén, alacsony áteresztőképességű tárolókban végzett programok, bár vagyonukat tekintve nem érik el a pannóniai rétegekre becsült vagyon mennyiségét, eljutottak oda, hogy érdemi mennyiségű adatot szolgáltatottak a tárolók rétegrepszítés utáni termeltethetőségére vonatkozóan. Sajnos egyelőre ezek a projektek sem léptek tovább egy vízszintes vagy nagy ferdeségű fúrás mélyíté-sének irányába, így a valós termelési potenciál nem ismert.

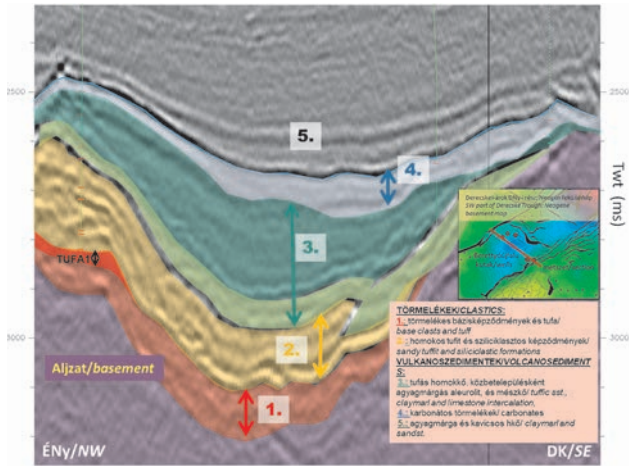
A Derecskei-árokból megfúrt közel 700 m vastagságú középső-miocén rétegsorban (19–20. ábrák) több száz méteres vastagságban a badenire általában nem jellemző csökkent sós vízi – édesvízi környezetben lerakódott, döntően üledékes rétegsort ismertek meg, addig főként pannóniai üledékekre jellemző ősmaradvány-együttessel. Ebben az üledékes összletben, erősen túlnyomásos környezetben végzett hagyományos rétegvizsgálatokkal jó minőségű nedvesgáz-előfordulást fedeztek fel, mely azonban az alacsony áteresztőképességű tárolóból nem volt ipari szempontból gazdaságosan termeltethető. Új kutak fúrása és rétegrepszítése történt, mely jelentősen megnövelte egy-egy kút termelését. A tároló termeltetése kb. 8 éve folyik, igazolva ezzel annak működőképességét.

A Kiskunhalasi-árokból a 2009-ben lefúrt THL-Ba-É-1 jelű fúrás közel 2 km vastag kárpáti korú, édesvízi környezetben lerakódott, túlnyomórészt finomszemű üledéket hárított, majd ismeretlen, bár vélhetőleg ottngai korú üledékekben állt meg (21. ábra). A rétegsor alsó 400 métere tekinthető egy erősen túlnyomásos, alacsony áteresztőképességű



19. ábra. Az alacsony áteresztőképességű színrift homokkőtárolók rétegsora a Derecskei-árok DNY-i részén, Berettyóújfalú térségében (módosítva KISS & MAGYAR 2012 után)

Figure 19. Lithological column of the synrift tight gas sandstone series, SW part of Derecske trough, around Berettyóújfalú (modified after KISS & MAGYAR 2012)



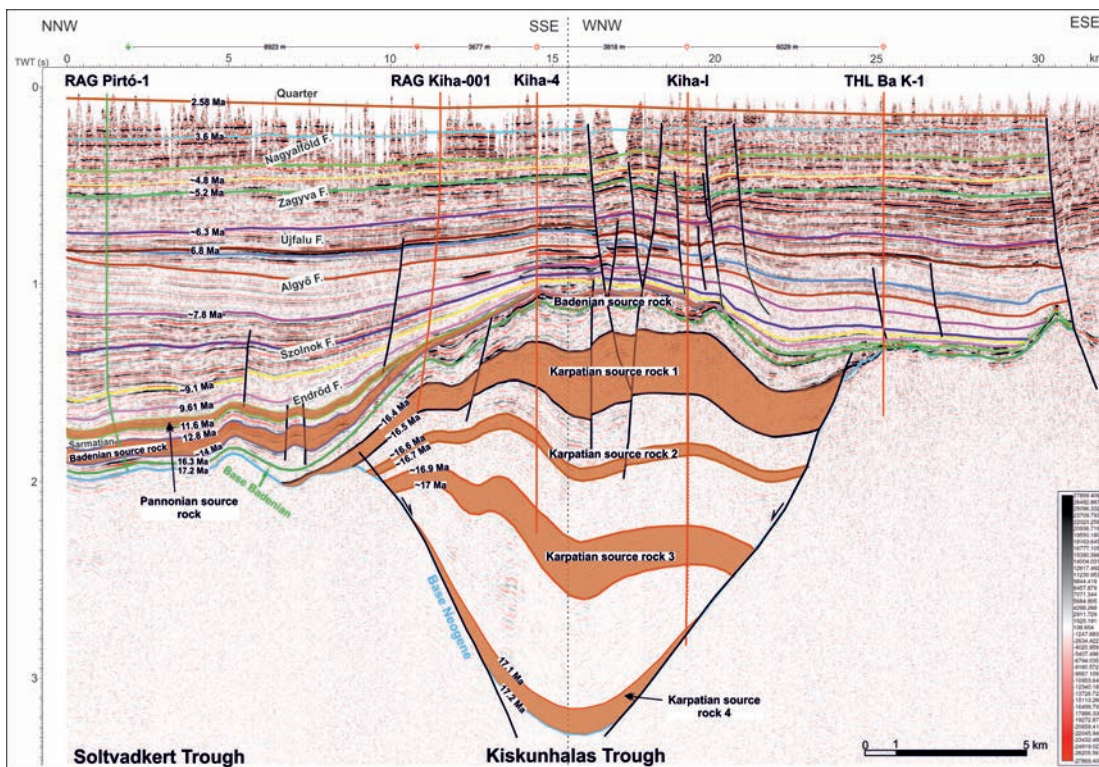
20. ábra. Értelmezett 3D szeizmikus metszet a Derecskei-árok DNy-i részén, Berettyóújfalu térségében (módosítva KISS & MAGYAR 2012 után)
 Figure 20. Interpreted 3D seismic cross-section in the SW part of Derecske Trough, around Berettyóújfalu (modified after KISS & MAGYAR 2012)

szerű homokkő/agyag típusú, nem hagyományos tárolóknak. Ebből többszöri repesztéssel sikerült párlatdús gáztermelést elérni, azonban – sajnos – a kapott termelési ütem nem érte el a gazdaságosságához elvárt mértéket.

További kutatások folytak a miocén korú, szinrift ciklus során lerakódott nem konvencionális rezervoárok szénhid-

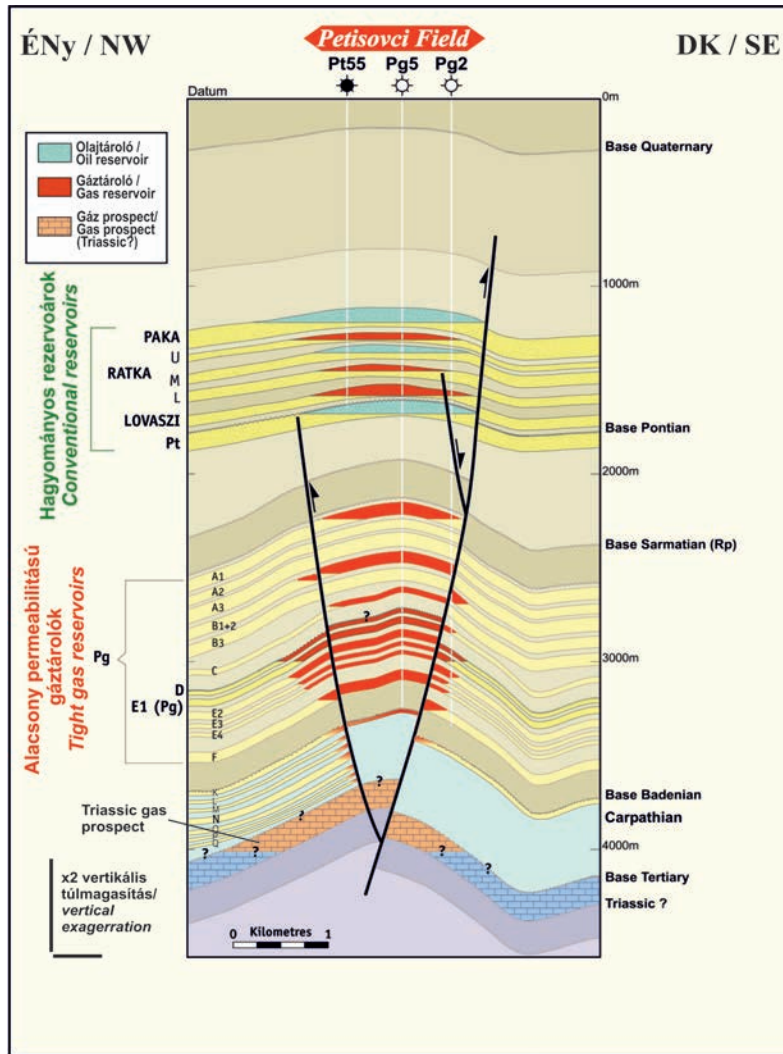
rogén-potenciáljának megismerésére a Békési-medence északi peremén (két fúrás Nyékpusztá környezetében), valamint az Észak-Alföld területén, ahol a Jászsági-medence keleti peremén található, lokális, nagy geotermikus gradienssel jellemezhető részmedencében fúrták le és vizsgálták ki a HHEN-Tiszavasvári–6 jelű fúrást (18. ábra).

A dunántúli területek közül a Zala-medencében, közvetlenül a határ túoldalán, a szlovéniai Petisovci–Globoki mezőben folyt célzott kutatás az Ascent Resources Ltd. által. Ezen a területen a nem hagyományos tárolók továbbkutatása céljából két fúrás lemélyítésére és rétegrepszítésére került sor a Lovászi–Petisovci antiklinális DNy-i elvégződésében. Ezek eredménye a rövid termeltetés miatt kérdéses, átütő sikert a kutak nem hoztak. Megjegyzendő azonban, hogy ezen a területen már 1949-től megindult – igaz, akkor még nem tudatosan – a kutatás, majd a termelés is, amikor először az L–158 fúrással felfedezték, majd az 1960-as években több lovászi és petisovci fúrással, repesztéssel stimulálva, termelésbe is állították az alacsony áteresztőképességű badeni korú homokkőtárolókat (TÓTH & TARI 2014; 22. ábra). A medence magyar oldalán a MOL Nyrt. 3D szeizmikus mérések felhasználásával kutatási programot hajtott végre a Budafa–Újfalui szerkezettől északra, Tormafölde környezetében 2004-ben, ahol a 3350 méter mélységű Vetyem–I fúrással badeni glaukonitos homokkőben tárt fel gázt. A tesztek során a kezdeti magas hozam gyorsan lecsökkent, és



21. ábra. Értelmezett szeizmikus szelvény a részben invertált Kiskunhalasi-árok tengelyére merőlegesen. A feltüntetett kárpáti korú anyakőzetszintek (különösen a 3–4) adják a közberetegzett alacsony áteresztőképességű homokkőtárolók gáztelítettségét (módosítva PÁVEL & LEMBERKOVICS 2015 után)

Figure 21. Interpreted seismic section perpendicular to the axis of the partially inverted Kiskunhalasi Trough. The highlighted Karpatian age source rock layers (especially the no. 3–4) generated the accumulated gas in the interstratified tight sandstone reservoirs (modified after PÁVEL & LEMBERKOVICS 2015)



22. ábra. Geológiai szelvény a Petisovci-Dolina antiklinálison keresztül, kiemelve a fő konvencionális és alacsony permeabilitású homokkötő tárolókat (módosítva TÓTH & TARI 2014 után)

Figure 22. Geological cross-section showing main conventional and tight gas reservoirs of Petisovci-Dolina anticline (modified after TÓTH & TARI 2014)

a vizsgálati eredmények alapján a homokkő alacsony permeabilitású gáztárolóként működik.

A miocén üledékek kutatása számos új eredményt szolgáltatott. Földtani értelemben pontosítani lehetett az egyes árkok geológiai fejlődéstörténetét. A modern szemlélettel és eszközökkel végzett kút- és anyagvizsgálatok segítettek jobban megérteni az egyes medencék anyakőzeteinek eloszlását és süllyedéstörténetét, mi több, akár összevethetővé is váltak a részmedencék ebből a nézőpontból (LEMBERKOVICS 2017, LEMBERKOVICS et al. 2018, HAROLD et al. 2019a). Regionális léptékben ezek az eredmények előmozdítják a miocén árkok fejlődéstörténeti különbségeinek megértését, beleértve a szinfrift fázis időbeli eltolódását a Pannon-medence különböző részein (BALÁZS et al. 2016, SEBE et al. 2019).

A számos konkrét fúrési és rétegvizsgálati tevékenység mellett több földtani képződmény mint potenciális, nem hagyományos előfordulás elemzése is megtörtént (BADICS & VETŐ 2012). Ilyenek – a teljesség igénye nélkül – a Dunántúlon

a nagylengyeli mező anyakőzeteként számontartott Kösseni Formáció, vagy a Paleogén-medence területén a Tardi Agyag mint potenciális palaolaj lehetőség. Ezekkel kapcsolatban azonban ez ideig nem került sor további kutatásra.

A nem hagyományos kutatás eredményeképpen a vizsgált területek földtani és szénhidrogén-földtani megismerése ugrás-szerűen fejlődött, jelentős mennyiségű új mérési adat, kézzelfogható minta került a kezünkbe. A nem hagyományos előfordulások kutatása beépült a napi olajipari gyakorlatba. Olyan korszerű technológiák kerültek itthon is bevezetésre, mint a passzív szeizmikus monitoring. Néhány „rekord” is született, mint a már említett legmélyebb magyarországi fúrás vagy az európai szinten legmélyebb környezetben végzett rétegrepszetés (209 °C, Berettyóújfalú).

Az elvégzett munkaprogramok eredményei alapján tudomásul kell vennünk, hogy a nem hagyományos előfordulások mérete, mindenkor gazdasági értéke, mutatói – jelen tudásunk és az eddig elvégzett programok alapján – nem közelítik meg a már jól ismert és termelésbe fogott észak- és dél-amerikai mezők, medencék értékét, lehetőségeit. Ez az állapot nem csupán Magyarországon, hanem a környező országokban is fennáll, Lengyelországban, a világ nagy olajcégeinek figyelmét is felkeltő, kiemelkedő potenciálúnak tartott paleozoos rendszerekben sem tudtak jelentősebb ipari eredményeket, termelést elérni.

... és a jövő – ... és a csúf (?)

A kutatásban részt vevő szakemberek egyetértenek abban, hogy az ismert, működő és kis kockázattal kutatható szénhidrogén-felhalmozódási trendek, egységek (playek), objektumok java része már megfúrásra került a Pannon-medence hazai területén. Jövőbeli, nagyobb találati lehetőséget ígérő kutatási célpontok csak nagyobb kockázattal lesznek kutathatók. Ugyanakkor a kezdeti magasabb kutatási kockázatok a megismerés és sikeresség növekedésével, a kutatás technológiai fejlődésével természetszerűleg csökkenni fognak. Bizonyos esetekben egy-egy új kutatási vagy technológiai lehetőség már jelenleg is létezik vagy fejlesztés alatt áll, de eredményei inkább a jövőben fognak megtérülni, míg más esetekben a valós kutatást még meg sem kezdtük, mert vagy a tudás, vagy a technológia nem áll még rendelkezésre (KISS 2016, PÁVEL et al. 2016).

A lehetőségeket alább három csoportra bontottuk, ugyanakkor megjegyzendő, hogy a kutatásban a csoportok elemei mindig kombináltan fognak megjelenni.

Szénhidrogén-földtani lehetőségek

Alulkutatott vagy újraértékelt területek kutatása

Mondhatnánk, hogy már nincs olyan terület hazánkban, ahol számottevő kutatási eredmény kecsegtetne, de gondoljunk csak a Tiszántúlon a közelmúltban felfedezett jelentős földgáz- (Dévaványa, Körösújfalú, Mezőtúr stb.) vagy a Dráva-medence délkeleti részén felfedezett kőolaj- (István-di, Jánosmajor, Pettend) vagyonokra (SZENTGYÖRGYI 2010, MAGYAR HORIZONT ENERGIA KFT. 2011). A közös pont mindkét esetben az volt, hogy olyan területeken történtek, ahol a múltbeli kutatási eredmények azt sugallták, hogy már kevés a remény ipari mennyiségű szénhidrogén felfedezésére. Bebizonyosodott, hogy a kutatási súlypont elmozdulása a klasszikus 4-irányú záródásoktól a sztatigráfiai–tektonikai csapdák irányába, ötvözve a megfelelő a szeizmikus attribútumvizsgálatokkal, volt a kulcs ezeknek a területeknek a sikeres kutatásához.

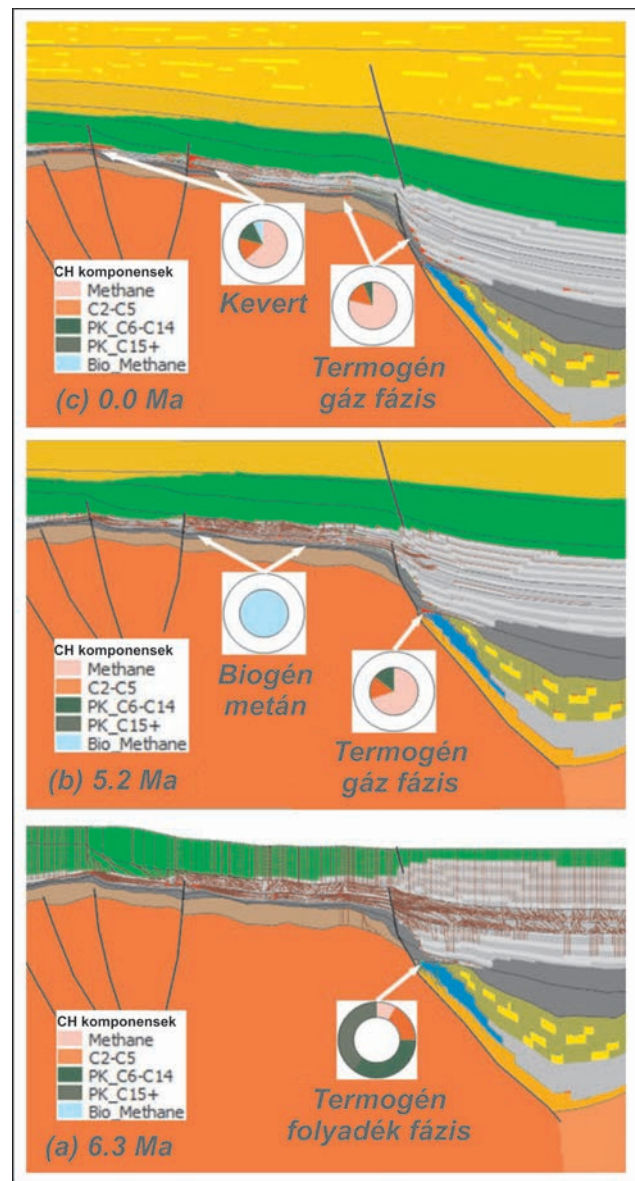
A „friss szem”, a sok esetben igen régi kútinformációk újraértékelése, a korábban megalkotott geológiai és teleptani modellek újragondolása sikeresen kombinálva a modern geofizikai eszközökkel és eljárásokkal ilyen területeken kutatási sikereket és gazdaságos termelést eredményeztek és eredményezhetnek a jövőben is. Mindaddig, amíg vannak ilyen területek vagy ismert, de alulkutatott playek, addig van remény további sikeres kutatásra is az ország területén.

Példaként hozhatjuk fel a Mecsek északi és nyugati előterét, ahol a jelentős mértékű kiemelkedés miatt jó csapadékkepződési lehetőségek lehetnek a biogén gázok számára. Jobban meg kellene értenünk az elmúlt két évtizedben csak marginálisan kutatott szinrift üledékeket, ahol a legnagyobb kihívást a megfelelő méretű és minőségű tárolóképződmények és csapdák (véltetleg részben sztratigráfiai) megtalálása jelenti. Tovább kellene kutatni az alföldi flis üledékeket (Nádudvari Komplexum), amelyek szerepéről a szénhidrogénrendszerben csak hozzávetőleges és részben már elavult módszerekkel megalkotott modellek állnak rendelkezésre. Végül fontolóra kellene venni a szubvulkáni lehetőségek intenzívebb kutatását a Nyírség és a Paleogén-medence területén, ahol máig a legnagyobb probléma a hagyományos szeizmikus módszerek vulkáni tömegek alá belátó képességének hiánya. A felvázolt kutatási lehetőségek egy részéhez már rendelkezésre áll hatékonyabb kutatási módszer vagy megfelelő, de eddig itthon még nem alkalmazott kutatási eszköz.

A biogén szénhidrogén rendszer

A biogén gázok szerepének valódi jelentőségét csak mostanában kezdjük megérteni. Egyre több vizsgálat és modellezési eredmény mutatja azt, hogy a biogén eredetű gázok jóval nagyobb részarányban vettek részt az ismert és reménybeli gáztelepek feltöltésében, mint azt korábban gondoltuk. Sokan foglalkoztak a biogén gázok képződése és felhalmozódása törvényszerűségeivel a múltban (többek között BRUCKNER-VEIN & SAJGÓ 1990; VETŐ et al 2004; SZALAY 2014, PALCSU et al. 2014; VETŐ 2014; HAROLD et al. 2019a, b), azonban BARTHA et al. (2018) modellezési ered-

ményei az elsők, ahol a süllyedés- és éréstörténeti modellben ezeket is figyelembe vették mint a teljes szénhidrogénrendszer szerves elemét. Munkájukban rámutattak arra, hogy a biogén gáz képződése és felhalmozódása hogyan is történhetett térben és időben az általuk modellezett területen, hogyan keveredhetett a biogén és termogén eredetű gáz, és megbecsülték, hogy milyen részarányban lehet jelen a biogén eredetű metán a mai földgáz-felhalmozódásokban (23. ábra). Modellezési eredményeikkel jól kor-



23. ábra. Szimulált migrációs útvonalak (bordó vonalak, vektorok), előre jelzett felhalmozódások (piros és mélyzöld poligonok) és azok összetételei, valamint a fázisváltozások az éréstörténet során mind a biogén, mind a termogén szénhidrogén-keletkezést figyelembe véve. A kördiagramok külső határa a keletkezett folyadék, belső határa a keletkezett gáz mennyiségét mutatja minden modellezett szénhidrogén-komponensre (BARTHA et al. 2018 nyomán)

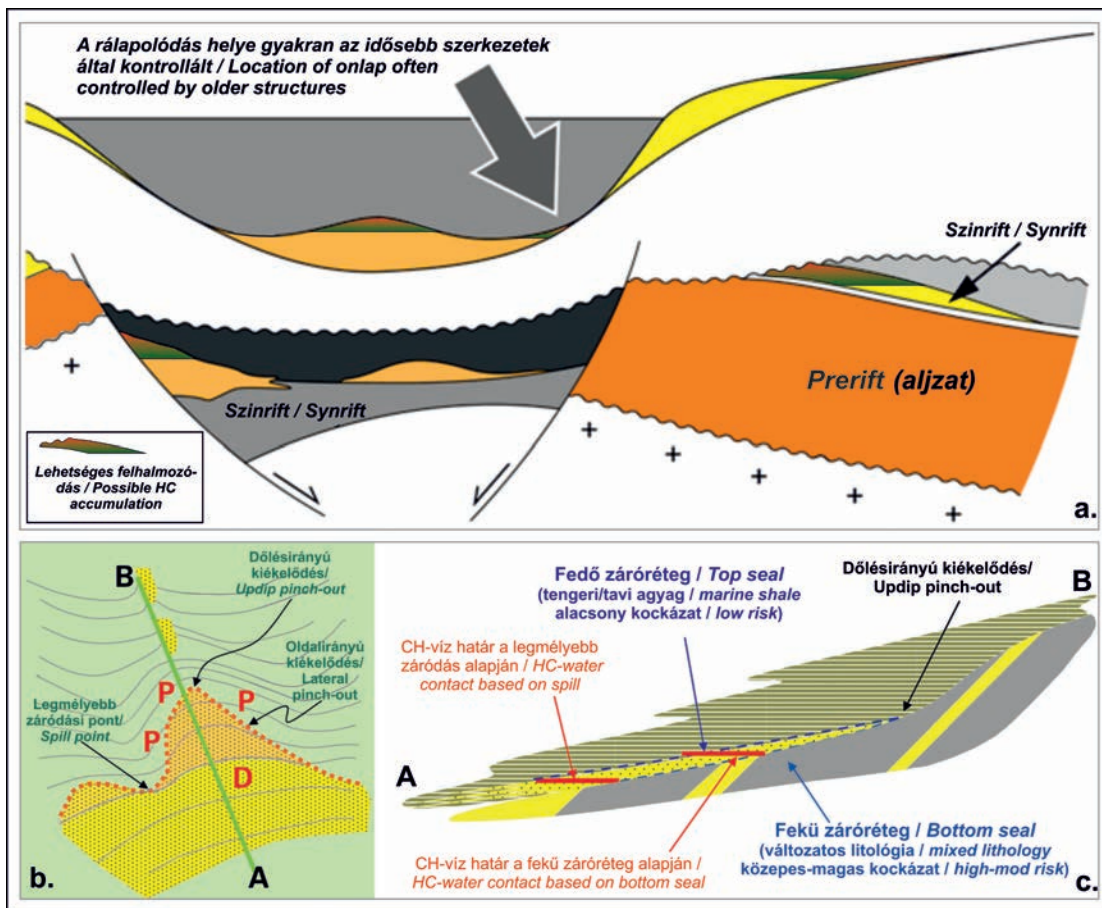
Figure 23. Simulated migration pathways (claret lines, vectors), predicted hydrocarbon accumulations (red and deep green polygons) and composition, and phase changes through geologic time considering both biogenic and thermogenic hydrocarbon generation. Note that the outer circle of the pie chart represents the liquid masses of each component, and the inner circle represents the vapour masses (after BARTHA et al. 2018)

relál a vizsgálati területük közelében levő Törökszentmiklós–1 fúrás pannóniai korú turbidit homokkő tárolójából, 1570 m mélységből mintázott földgáz metánjának $\delta^{13}\text{C} = -53,9\%$ értéke, ami jelentős mennyiségű biogén metán jelenlétére utal (SZENTGYÖRGYI 1994). A biogén gázokról és az egykor abból keletkezett metán-hidrátokról publikált modellezési eredményeket HAROLD et al. (2019b) a kelet-magyarországi neogén medencék esetében. Munkájukban bizonyították, hogy a gyorsan süllyedő árkokban, részmedencékben a gyors szedimentáció miatt kialakulhattak olyan körülmények, melyek során – hasonlóan a mai Fekete-tengerhez – időszakosan metán-hidrát alakulhatott ki a sekélyen betemetett rétegsorban. Az ilyen módon időszakosan felhalmozódó biogén metán szerepéről a későbbi felhalmozódások kialakulásában egyelőre még nincsenek megfelelő modellek. Ezek a kutatási eredmények azonban rávilágítanak arra, hogy olyan területeken, olyan csapdahelyzetekben is van remény ipari méretű földgáz-felhalmozódások feltárására, ahol ez

ideig – pusztán a termikus szénhidrogén-keletkezés törvényszerűségei miatt – azt nem, vagy csak kis valószínűséggel tartottuk lehetségesnek.

A sztratigráfiai/rejtett csapdák

A változatos szerkezeti stílussal jellemezhető szénhidrogén-medencékben rendszerint a kutatás utolsó fázisában találják meg a szerkezeti elemektől független rétegtani csapdákban (hidden traps) felhalmozódott szénhidrogéntelepeket (STIRLING et al. 2017). A korábban említett gázfelfedezések egy részében is tisztán sztratigráfiai csapdákban találták meg az érdemi felhalmozódásokat. Az ipari gyakorlatba Magyarországon az áttörést a HHE Kft. által rutinszerűen bevezetett, de ma már szinte minden cég által alkalmazott eljárás, a szeizmikus adatokon végzett AVO- és attribútumvizsgálatok alapján direkt szénhidrogén-indikátorok (DHI) kimutatása és értékelése hozta meg. Ez a technika, kombinálva az üledékképződési környezetek részletes értelmezésével, elvezetett olyan, addig nem kutatott csapdák felfede-



24. ábra. (a) Lehetséges sztratigráfiai csapdahelyzetek és szénhidrogén-felhalmozódások szinrift és korai posztrift üledékekben, (b) a bal oldali térkép egy batimetrikus kiöblösödést ábrázol, amelyen belül egy rezervoár homokkőtest kiékelődik, így egy sztratigráfiai csapda-geometriát hoz létre (a csapda szegélyei jelölve vannak, P = kiékelődés, D = dőlés általi záródás). Ha a rezervoár fekéje egynél több közettípust tartalmaz, például egy szögdiszkordancia miatt, amint az a (c) metszeten látható, akkor a talpi zárás fogja az egyik legjelentősebb kockázatot hordozni (STIRLING et al. 2017 nyomán)

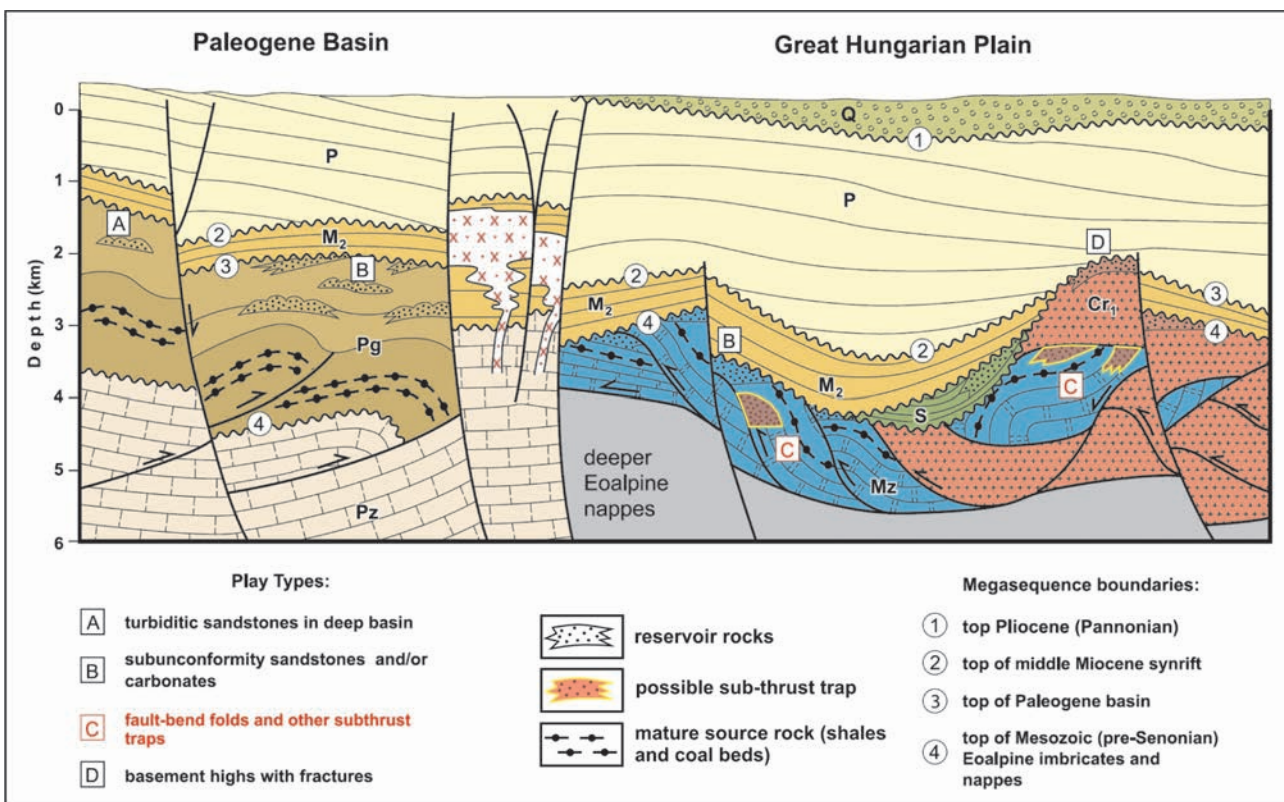
Figure 24. (a) Possible geometries of stratigraphic traps and their HC accumulations in the syn- and early postrift sediment succession. (b) the map on the left shows a bathymetric embayment within which a reservoir sand is onlapping, creating a stratigraphic trapping geometry (trap edges labelled, P = pinch-out, D = dip). If the bottom seal comprises more than one lithology -e.g. across an angular unconformity, as shown in the (c) cross-section -, the sealing units upon which the proposed hydrocarbon column/volume depends must each be risked (after STIRLING et al. 2017)

zéséhez is, mint például a pannóniai deltasíksági medrek (Battonya–Pusztaföldvár környezete), a pannóniai turbidit rendszerekben megtalált gáztelített csatorna-homokkővek (Túrkeve térsége), vagy regionális méretű lejtőcsuszamláshoz köthető „lefejezett” vagy kiékelődő homokkőtestekben talált kőolaj-felhalmozódások a Dráva-medence területén (16. ábra). Látható, hogy ez már a jelenünk és a közeljövők is egyben, hiszen elérkeztünk ezeknek a rejtett csapdákak a kutatásához a Pannon-tó többnyire posztrift üledékeinek tekintetében. Ugyanakkor még csak tapogatózó lépések történnek az idősebb és sokkal változatosabb prepannóniai miocén, szinrift üledékek vonatkozásában (BALÁZS et al. 2017, FARKAS & LEMBERKOVICS 2017). Utóbbi bizonylat tartogat komolyabb lehetőségeket. Erre lehetséges példákat mutat be a 24. ábra.

Aljzati takarós szerkezetek kutatása (sub-trust play by Vienna Basin)

A neogén aljzat takarós felépítése nem új keletű információ. Korábban számos fúrás tárt fel felpikkelyezett rétegsorokat az Alföld aljzatában (PAP 1990), így létezésükre kézzelfogható módon is következtetni lehetett. Bár többször felmerült, a mélyebb helyzetű takarók olajpari célzatú érdemi kutatására a korábbiakban nem került sor. Az alpi takarós szerkezetek fontosságára, szénhidrogén-kutatási potenciáljára a Pannon-medence magyarországi

részén elsőként TARI & HORVÁTH (2006) hívták fel a figyelmet (25. ábra). Ugyanakkor a Bécsei-medencében jelentős mennyiségű szénhidrogént – főként földgázt – sikerült feltárni olyan csapdákban, elsődlegesen repedezett tárolókban, amelyek nem a neogén fekvő alkotó legfelső, hanem az az alatt lévő, felülről a második alpi takaróban vagy annak tetőzónájában alakultak ki (HAMILTON et al. 2000, ARZMÜLLER et al. 2006, ROEDER 2010, RUPRECHT et al. 2018). A takarók belüli helyzetük miatt hívjuk ezeket a kutatási objektumokat, csapdák takaró alatti vagy takarón belüli csapdákak. A legismertebb találatok a Schönkirchen-Gänsersdorf Übertief triász dolomit tárolóiban felhalmozódott gázmezők (26. ábra). Annak ellenére, hogy a Pannon-medence periferiáján elhelyezkedő Bécsei-medence különbözik a hazai részmedencéktől különösen aljzati geológia, szénhidrogénrendszer és hőmérsékleti viszonyok tekintetében, mégis az ország egyes területein – különösen a Dunántúlon vagy az Alföld aljzatában – lehet remény a takarós szerkezetek sikeres kutatására. A bonyolult tektonikai és szénhidrogén-földtani helyzet azonban rendkívül kockázatosá teszi e csapdák kutatását. Ehhez jelentős technológiai kockázat is társulhat, hiszen ezeknek a csapdákak a leképezése a mai, fejlett szeizmikus technológia mellett is jelentős kihívásokat tartogat, nem is beszélve a várható fúrás-műszaki nehézségekről.



25. ábra. Idealizált keresztmetszely a szénhidrogén-rendszer elemeivel az észak magyarországi Paleogén-medence üledékei, valamint a Nagyalföld alatti mezozoos–paleozoos rétegek kiemelésével. Pirossal kiemelve (az ábrán is) a lehetséges takaró alatti csapdalehetőségek (TARI & HORVÁTH 2006 nyomán)

Figure 25. Idealized cross-section showing the petroleum system of the Palaeogene Basin fill in North Hungary and of the Mesozoic–Palaeozoic substrata below the Great Hungarian Plain – the possible subthrust traps are highlighted with red polygons on the cartoon (after TARI & HORVÁTH 2006)

azt a szinrift vagy akár az idősebb képződményekre is (BADICS & VETŐ 2012). Nem utolsósorban kombinálni lehet a nem hagyományos tárolók kutatását a korábban említett sztratigráfiai csapdák hagyományos tárolóinak kutatásával, különösen a szinrift üledékek esetében, amely ígéretes kutatási stratégia lehet a jövőben.

Technológiai lehetőségek

A korábbi kutatási eredmények modern szemléletű felülvizsgálata, újraértékelése

Számos olyan szénhidrogénmezőt fedeztek fel az elmúlt egy-két évtizedben, amelyek alapja a korábban megszerzett geológiai és geofizikai információ újraértelmezése volt. Hazánkban jelentős mennyiségű, ám különböző minőségű szeizmikus mérés valósult meg, és ezek értelmezése alapján közel 9000 szénhidrogén kutató- és termelőfúrás lett lemélyítve. Ezek jó része a 90-es éveket megelőzően történt (1. és 9. ábrák), a digitális „forradalom” előtt. Óriási adatpotenciál van a kezünkben, melyet megfelelően előkészítve, digitalizálva, újra feldolgozva és a modern olajipari szoftverek segítségével integrált adatbázisba foglalva olyan geológiai–geofizikai lehetőségek, összefüggések is könnyebben észrevehetőek, amelyek korábban az analóg adatrendszeren láthatatlanok maradtak. Számos új telep, mező rész került feltárássra vagy termelésbe állításba pusztán annak eredményeként, hogy egy-egy fúrás geofizikai szelvényei, geológiai adatai újraértelmezésre kerültek (pl. a penészléki torkolati zátony homokkőtestben talált földgáztelep). Más esetekben a régi szeizmikus adatot modern eszközökkel újra feldolgozták, és más szemlélettel – pl. az említett DHI- és AVO-módszerek alkalmazásával – értelmezték. Ilyen volt többek között a MOL–HHE közös projekt Körösladány–Körösújfalú területen. A közeljövőben is ez az egyik legolcsóbb és talán leghatékonyabb módja új kutatási–termelési potenciál felfedezésének a korábban már kutatott területeken.

A megnövekedett számítógépes kapacitások kihasználása

Ma már és a jövőben várhatóan még inkább olyan szoftverek és számítógépes kapacitások állnak rendelkezésre, amelyekről még 20 éve is csak álmodni mertünk. Több terabájtnyi adatbázisokat kezelő, integrált olajipari szoftverek, a vizualizáció (mely a kutatási szakmában mára elsődlegessé vált) rohamléptű fejlődése és a térinformatika (GIS) rutinszerű használata mind arra mutatnak, hogy a jövőben még inkább a minden részletre kiterjedő geomodellezés és vizualizáció fogja adni a reménybeli találatokhoz szükséges geológiai–geofizikai háttérrel. Mindezek mellett a már közel két évtizede bevezetett neurális hálózat alapú tanítható/programozható algoritmusok (NNA) és a gépi tanulás (Machine Learning, ML), valamint a még úttörő szerepű mesterséges intelligencia (Artificial Intelligence, AI) alkalmazása is várhatóan egyre nagyobb teret fog nyerni az olajiparban. Ennek oka, hogy már jelenleg is akkora és olyan változatos adatrendszerrel dolgoznak az olajipari szakemberek, melyek feldolgozása,

értelmezése és rendszerszintű megértése feszegeti a humán agy feldolgozóképeségének határát. A kezdeti lépéseket már idehaza is megtettük, az NNA és ML segítségével fációs-elemzéseket, geofizikai–geológiai adatok többszörös összefüggéseinek analizálását, osztályozását és inverzióját végezzük. Jó példa e feladat komplexitásának bemutatására KLARNER et al. (2020), mely egy – a Pannon-tó progradáló self-rendszeréhez nagyon hasonló – hollandiai üledékes egységről készült inverziós esettanulmány. Az AI érdemi használata azonban egyértelműen ennek az évtizednek a lehetősége a földtani modellezés több területén (vetőértelmezés, szekvenencia-sztatigráfia stb.) is. Nagy valószínűséggel a jövőben ezek a technikák még szélesebb körben kerülnek alkalmazásra, remélhetőleg az idősebb miocén üledékek vizsgálatában is. Ugyanakkor nem szabad elfeledkezni arról, hogy a szakértő elme nélkül ezek is csak haszontalan eszközök maradnak.

A kutatási eszközök továbbfejlesztése – szeizmikus mérés és feldolgozás

A szeizmikus mérések technológiája, valamint a rögzített adatok feldolgozása az egyik dinamikusan fejlődő ágazata a szénhidrogén-kutatásnak. A terepi mérések során a jelregisztrálásban történnek a legnagyobb fejlesztések (TÓTH 2016). Néhány éve még a terepi szakemberek több száz kilogramnyi vezeték, kapcsolót és egyéb felszerelést voltak kénytelenek a mérés során mozgatni akár csak egy 2D szeizmikus vonal leméréséhez. A geofonok is kisebb határfokkal működtek, ezért egy regisztrálási pontra akár 6–24 geofont is kihelyeztek a megfelelő jelrögzítés érdekében. Mindezek az eszközök a mérőkabinnal voltak kábeles kapcsolatban, az adatok rögzítése, tárolása abban történt. Hol tartunk ma? A geofonok érzékenysége az alkalmazott gyorsulásmérő-szenzoroknak (27. ábra a) köszönhetően oly mértékben javult, hogy regisztrálási pontonként sokszor már csak egy (!) geofont alkalmazunk (27. ábra b). A vezeték nélküli technológia fejlődésével a jövő már az integrált rendszereké. Az ilyen integrált egységekben a geofonokhoz indukciósan tölthető akkumulátor és adatrögzítő egység tartozik, a műszerkabinnal pedig az egység rádióval vagy vezeték nélküli internetcsatornán (wifi) keresztül tartja a kapcsolatot (DEAN & SWEENEY 2019; 27. ábra c). Látható, hogy csak ezek a változások mennyivel könnyebbé és gyorsabbá teszik a terepi felvételek rögzítését, arról nem is beszélve, hogy a fent említett fejlesztések révén jelentősen javult a terepi mérések minősége, adattartalma. Ez a fejlődés azt is eredményezte, hogy sok esetben a jelgerjesztéshez sem szükséges már akkora energia, mint a korábbi technológiáknál, így a vibrátorok nem is töltenek el annyi időt egy jelgerjesztési ponton, mint korábban. Mindez időmegtakarítást, végeredményben fajlagos költségsökkenést is jelent. A szeizmikus attribútumok analízisének térnyerése miatt megnövekedett az igény a több komponensű (3C/4C) szeizmikus adatok mérése iránt, ugyanis az ilyen mérésekből kinyerhető P- és S-hullám adatok – megfelelően feldolgozva – olyan, eddig kevésbé leképezett vagy megértett képződmények kutatását is elősegíthetik, mint a repedezett tárolók vagy a sztratigráfiai csapdák (CRISTIANSEN & WAGGONER 2004).

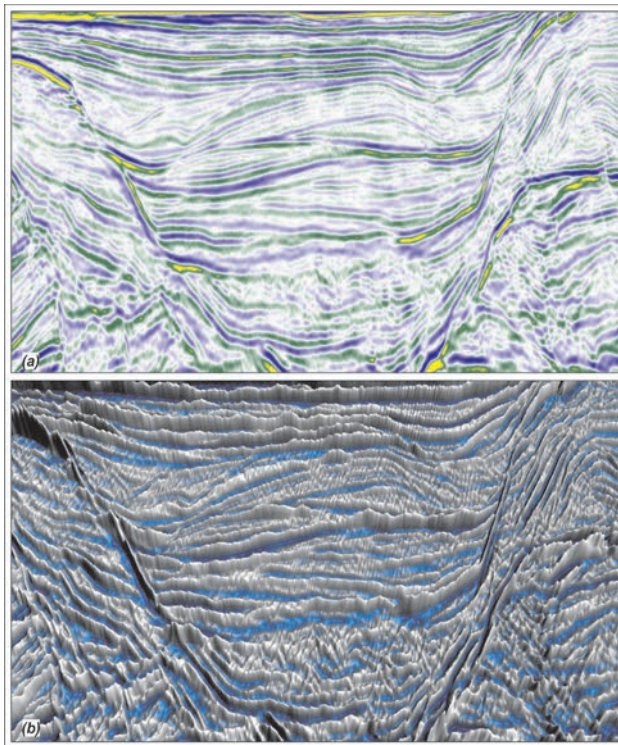


27. ábra. (a) Egy hagyományos tekercses érzékelő és egy modern gyorsulás-mérő szenzor méretbeli viszonyai (TÓTH 2016 nyomán); (b) szőlő geofon, adatgyűjtővel és akkumulátorral egy közelmúltbeli mérésen; (c) öt különböző integrált nodális rendszer (geofon+elem+adattároló) DEAN & SWEENEY (2019) nyomán

Figure 27. (a) Dimensional relations between a conventional coil sensor and a modern acceleration sensor (following TÓTH 2016); (b) planted single geophone with data storage box and battery in a recent measurement; (c) five different integrated nodal systems (geophone + battery + data storage „all in”) following DEAN & SWEENEY (2019)

A szeizmikus feldolgozási technológia is rengeteget fejlődött az elmúlt időszakban. A számítógépes kapacitások növekedése erre a területre is erőteljes hatással van. A rutin feldolgozások időigénye jelentősen csökkent, és – a kutatás igényeinek megfelelően – egyre inkább elmozdult a speciális feldolgozások felé. A jelenleg és várhatóan a jövőben is teret nyerő részletes szeizmikus (és geológiai) fácies-, valamint a DHI-kutatáshoz speciális feldolgozásokra van szükség. Ilyenek a szögtartomány stackek és az azokból nyerhető derivátumok (az AVO értelmezésekhez), a több komponensű szeizmikus mérésekből kinyerhető S-hullám, a megfelelően feldolgozott szeizmikus anyagból inverzióval (sebesség, sűrűség, impedancia stb.) vagy az anyag spektrális kiegyenlítésével (spectral balancing) kinyerhető fácieselemzéshez használható attribútumadatok többek között, de a lehetőségek tárháza szinte végtelen. A feldolgozás/vizualizáció tekintetében is vannak olyan úttörő jellegű fejlesztések, amelyek hasznos eszközei lehetnek a jövőbeli kutatásnak. Ilyen például az ún. „wavefield” megjelenítés (28. ábra), ahol a szeizmikus amplitúdók erőssége nemcsak színként, hanem térben is megjelenítésre kerül (2,5D), elősegítve ezzel a régi és új adatok más szemléletű vizualizációját és részletesebb értelmezését (LYNCH 2008), vagy az azimutális feldolgozási eljárások, amelyek a repedezett tárolók értelmezésében és leképezésében nyújthatnak jövőbeli perspektívát (TREADGOLD et al. 2008).

Mindezt összefoglalva láthatjuk, hogy a szeizmikus mérések és feldolgozás terén hatalmas előrelépés történt az el-



28. ábra. (a) Változó sűrűség hullámképpel kijátszott és (b) „wavefield” 2,5D vizualizáció ugyanazon a szeizmikus szelvényen (forrás: www.visualwavefiled.com)

Figure 28. (a) Variable density display and (b) 2.5D „wavefield” visualization of the same seismic section (source: www.visualwavefiled.com)

múlt egy-két évtizedben, és további erőteljes fejlődés várható. E fejlődés egyes lépcsőfokait már meglettük. Ilyenek például a már rutinszerűen készülő szeizmikus újrafeldolgozások, az AVO- és attribútumalapú kutatás vagy az inverziós eljárások egyre szélesebb körű alkalmazása. A következő szint alapja lehet, hogy

a) a hazai 3D szeizmikus adattömbök egy része (5–8000 km²) még a 2000-es évek előtt (1. és 11. ábrák), a mai szemmel nézve elavult mérési és jelrögzítési technikával került lemerésre;

b) a frissebb mérések egy jelentős része pedig többnyire a fiatal, posztrift üledékekre van mérés technológiailag „kihagyozva”, különösen az Alföld területén.

Mindezt összevetve azzal, hogy a szénhidrogén-kutatásban dolgozó szakemberek a Pannon-medencében az idősebb miocén és preneogén (dominánsan repedezett) képződmények kutatásában látják a lehetséges jövőt, magában hordozza, hogy a fent említett mérések még adatszinten sem tartalmazzák azokat az információkat, amelyekre szükség lenne a további sikeres kutatáshoz. Így – ahogy az megtörtént már számos, érett szénhidrogén-medence esetében – a jövő egyik lehetőségét jelentheti a mérések megismétlése a régi 3D szeizmikus mérési területeken modern szemlélettel és technológiai háttérrel. Ez extra potenciált adhat olyan területeken is, melyek a régmúltban a kutatás–termelés fókuszában voltak, de mára – a korábbi kutatási szemléletet alkalmazva – nem rendelkeznek jövőbeli perspektívával.

Üzletpolitikai lehetőségek

Hibrid kutatás, avagy a CH- és a geotermikus kutatás kombinálása már a kezdeti lépésektől

Az érett medencékben a kutatási objektumok méretének csökkenésével és/vagy a növekvő kockázattal párhuzamosan folyamatosan felmerül a kérdés, hogy meddig lehet még a szénhidrogén-kutatást, -termelést gazdaságosan folytatni. Ugyanakkor – különösen a kisebb méretű szereplők esetében – felmerülhet a kérdés, hogy miért nem próbáljuk (már a tervezés szintjén is) kombinálni a nagyobb kockázatú, de gyorsabb megtérülést biztosító szénhidrogén-kutatást a kisebb kockázatú, de hosszabb megtérülést – és jelenleg nagyobb politikai támogatottságot, különösen EU szinten – előrevetítő geotermikusenergia-kutatással. A két üzletág alapvetően azonos vagy nagyon hasonló kutatási eszközöket használ, tehát a kérdés jogosságához nem férhet kétség. Jelenleg a legtöbb szénhidrogén-kutató cégnek abban merül ki a geotermikus energiához fűződő kapcsolata, hogy felajánlja a meddő, de meleg víz termelésére még hasznosítható fúrásait geotermikus energiatermelés céljára, de az esetek többségében ez a kutak felszámolásával végződik, ugyanis legtöbbször a kút technikailag alkalmatlan a geotermia céljaira. Megfelelő üzletpolitikával, kezdve a kutatási területek gondos, több szempontot is figyelembe vevő megválasztásával, a mindkét üzletág szükségleteit figyelembe vevő kutatástervezésen keresztül, a több szempontnak megfelelő műszaki kivitelezésig bezárólag azonban egy több lábon álló, hibrid kutató-termelő céget lehetne kialakítani. Egy ilyen típusú sikeres kutatás-termelés magasabb határfokkal és gazdaságosabban működhetne, kihasználva két iparág előnyeit, valamint olyan területeken is fenntartható lenne, mint az érett és fokozottan költségérzékeny szénhidrogén-provinciák.

Más típusú megközelítés lehetne a kimerülőben levő, jelentős vízhányaddal termelő szénhidrogénmezők termelt vízeiben rejtőző hőenergia hasznosítása (GLUYAS et al. 2018). Ilyenre több példa is van, különösen Anglia területén (HIRST et al. 2015), ahol mind a lakossági ellátásban, mind egy-egy mező termelési infrastruktúrájának elektromos energiaellátásában is megtalálták (vagy megtalálhatták volna) a helyét az ilyen módon termelt energiának, így csökkentve a működési költségeket (OPEX) és növelve a hatékonyságot, valamint a mezők élettartamát (GLUYAS 2020).

A téma megközelítéséből adódóan kevesebb szó esik azokról a gazdasági, szabályozási háttérű kérdésekről, amelyek egy ilyen érett medence esetében meghatározzák a kutatás lehetőségeit és egyben az olajipar jövőjét. Az előzőekben felsorolt jövőbeli földtani lehetőségek vagy méretükből, vagy földtani kockázatukból adódóan gazdasági értelemben véve is kockázatosak. Ahhoz, hogy egy vállalkozás e jelentős kockázatokat felvállalja, olyan támogató, rugalmas és hosszú távon kiszámítható jogi és gazdasági környezet szükséges, amelyben a befektetők jó lehetőséget látnak a jövő tekintetében is. A nem túl régen elindult koncessziós rendszerben való működés mellett a szabályozások rendsze-

res felülvizsgálata, a rugalmas együttműködés, az egyes szereplők érdekeinek folyamatos egyeztetése, esetenként az állam direkt szerepvállalása lennének a kutatásban az olajipar jövőjének ugyancsak meghatározó alapkövei.

Konklúzió

Mit is lehetne egy ilyen léptékű áttekintés végén konklúzióként, tanulságként levonni?

A Pannon-medence, azon belül a magyarországi medencérek egy érett kutatási medence jellemvonásait viselik magukon (1–2. és 9. ábrák). A mai napig sikeres kutatási-termelési tevékenység eredményeként az idáig megismert és termelésbe fogott playekből évi 6–900 000 tonna olaj, valamint 1,9–2,1 milliárd m³ földgáz kerül kitermelésre és hasznosításra. Mindez azonban jelenleg csak 15–17%-át fedezi hazánk éves szénhidrogén-szükségletének.

Tudomásul kell vennünk, hogy az aranykor már a múlt. Látható, hogy a szénhidrogén-kutatás az ismert playekben a jelenlegi kis/közepes kockázatok mellett egyre kisebb és kisebb reménybeli és felfedezett méretekkel jellemezhető már napjainkban is, és csak elvétve remélhetünk hazai viszonylatban jelentős méretű találatokat. Új koncepciókra, playekre van szükség ahhoz, hogy a kutatás és vele a termelés közep-távon meg tudjon újulni és fennmaradjon.

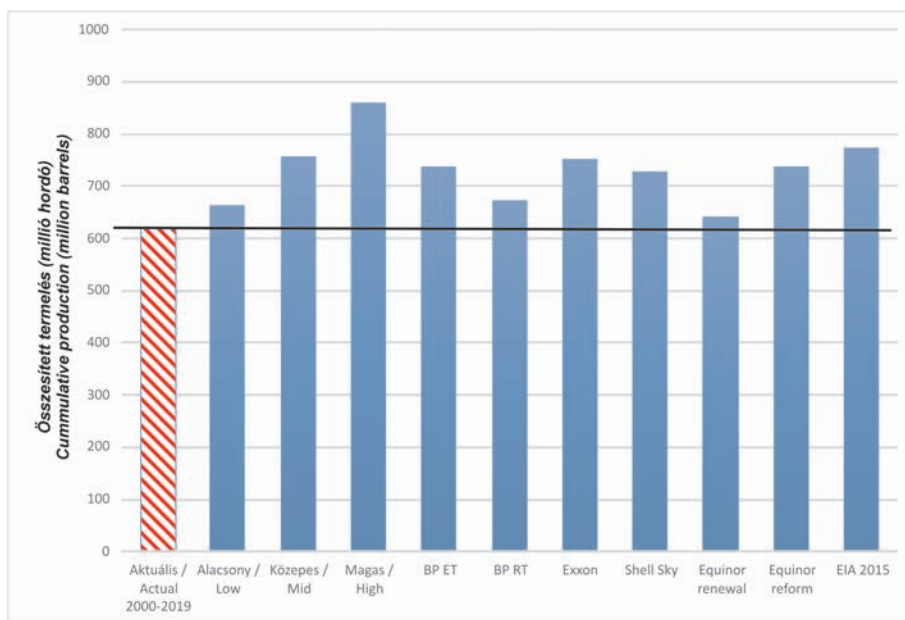
A jövőről szóló fejezetben igyekeztünk összefoglalni, bemutatni azokat a szénhidrogén-földtani, technológiai és üzletpolitikai lehetőségeket, amelyeket a jövő reménybeli mezőinek sikeres kutatása és termelésbe állítása érdekében alkalmazhatunk. A lehetőségek adottak, a koncessziós területek egy része az aktuális piaci szereplők által kutatásban van és számos terület lett előkészítve arra, hogy a közeljövőben pályáztatásra kerüljön (12. ábra).

A jövő azonban nehéz kérdés más szempontból is, amit nem tárgyaltunk ebben az alapvetően geoszakmai munkában, mégis néhány szót kell róla ejtenünk.

Jelentős kihívásokkal küszködik nemcsak a hazai, de a globális olajipar is. A globalizáció miatt „rövidre zárt” ellátási láncok, az olajárban jelen lévő nagymértékű gazdasági és politikai függőség, az Európai Unió által választott energiapolitika és a megújuló energia üdvözlendő előretörése hosszú távon lesz komoly kihívás az olajipar számára. Egy világméretű (de elég csak egy nagy fogyasztó vagy termelő régiót érintő) járványhelyzet miatt (is) indukált gazdasági válság pedig rövid és középtávon olyan méretű kihívást jelent, amellyel egyre nehezebb a kutatásban részt vevő cégeknek és szakembereknek napi szinten megbirkózniuk.

Ugyanakkor figyelemre méltó az a középtávú előrejelzés, amelyet a világ vezető olajipari cégei, valamint a Nemzetközi Energiaügyi Hivatal (EIA) jelentései alapján foglalt össze FOM (2020). A 29. ábrán látható, hogy még a zöld energia legnagyobb mértékű előretörésével számoló modell (Equinor renewal) sem számol globális szinten csökkenéssel az olaj iránti kereslet tekintetében az elkövetkező 20 évben. Sőt inkább növekedéssel számolnak.

A földgáz esetében az előrejelzések (BP és Exxon Energy



29. ábra. Kumulált olajigény-előrejelzés 2020 és 2040 között a legfőbb publikus előrejelzések és Fom saját modellezési eredményei alapján. A világ kumulált olajtermelése 615 milliárd hordó volt 2000 és 2020 között (FOM 2020 nyomán)

Figure 29. Forecast of cumulative oil demand 2020-2040 based on main public forecasts and Fom modelling. Cumulative production from 2000-2020 was 615 billion barrels (after FOM 2020)

Outlooks, IEA) még jelentősebb növekedést prognosztizálnak. Ennek oka, hogy a földgáz növekvő felhasználása a jelenlegi szénalapú villamosenergia-termelés helyett bizonyítottan drasztikusan csökkenti a szén-dioxid kibocsátást, gondoljunk a palagáz-forradalom hatására az Amerikai Egyesült Államokban (TINKER 2017, 2019). A megújuló energiaforrásokra való áttéréshez a földgáz mint „transition fuel” kiemelt szerepet fog kapni több évtizeden keresztül (LEONARD 2020).

Látható, hogy a szénhidrogénekre még jó ideig szükség lesz a világ egyre növekvő energiaigényének ellátása érdekében, és ez jelenti a reményt az érett medencék kutatás-termelését és a hazai olajipar jövőjét tekintve is.

Köszönetnyilvánítás

A cikk szerzői szeretnék köszönetüket kifejezni Dave WESTLUNDnak és VÁRKONYI Attilának, az OGD Central Kft.-nek, valamint Scott SCHULZnak és a Magyar Hori-

zont Energia Kft.-nek, akik adatokhoz való hozzáféréssel, valamint szakmai véleményezéssel segítettek e munka létrejöttét. Köszönet illeti TARI Gábort, Pete NOLANT és FÜLÖP Katalint, akik szakmai véleményükkel, tapasztalataikkal segítettek. Külön köszönet az IHS Markit részére, amely cég biztosította a fúrási és mezőszintű adatbázist analíziseinkhez. A cikkben felhasznált és bemutatott IHS Markittól származó adatok a cég tulajdonában maradtak (Copyright © IHS Markit, 2020. All rights reserved). Köszönet dr. CSEH Valentinnak, GÁL Krisztinának és SIMON Istvánnak, a Magyar Olaj- és Gázipari Múzeum munkatársainak a könyvtár és az irattár használatában nyújtott segítségükért és a konzultáció lehetőségéért. Köszönet HORVÁTH Janinának és HORVÁTH Tibornak a kitérésekről készült felvételekért, valamint SOMLAI Ottónak az iszapszelvényezés rész elkészüléséhez nyújtott segítségéért. Végezetül köszönettel tartozunk a munka bírálóinak, KIRÁLY Andrásnak, NÉMETH Andrásnak és TARI Gábornak, akik alapos lektorálásukkal emelték e munka színvonalát.

Irodalom – References

- ALLIQUANDER Ö. 1931: Magyarország bányá- és kohóipara az 1912–1926. évben II. rész (Táblázatok). – Magyar Királyi Állami Nyomda, Budapest, 557 p., https://mek.oszk.hu/09000/09058/pdf/mo_bk_2.pdf
- ALLIQUANDER Ö. 1968: Adalékok a magyarországi mélyfúrás történetéhez, különös tekintettel a szénhidrogén kutató- és feltárási fúrásokra. – *Bányászati és Kohászati Lapok, Bányászat* **101/1**, 82–92, https://en.mandadb.hu/common/file-servlet/document/458952/default/doc_url/bklkoolajfoldg_1968_01szpdf.pdf

- ALLIQUANDER Ö. 1986: A magyarországi szénhidrogénkutatás vázlatos története (1935-ig). – *Bányászati és Kohászati Lapok, Bányászat* **119/10**, 289–294, https://en.mandadb.hu/common/file-servlet/document/436258/default/doc_url/bklkoolajjesfoldgaz_1986_10.pdf
- ARZMÜLLER, G., BUCHTA, S., RALBOVSKY, E. & WESSELY, G. 2006: The Vienna basin. In: GOLONKA, J. & PICHA, F. J. (eds): *The Carpathians and their foreland: Geology and hydrocarbon resources. – AAPG Memoir* **84**, 191–204. <https://doi.org/10.1306/985608M843068>.
- BADICS, B. & VETŐ, I. 2012: Source rocks and petroleum systems in the Hungarian part of the Pannonian Basin: The potential for shale gas and shale oil plays. – *Marine and Petroleum Geology* **31**, 53–69. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2011.08.015>.
- BADICS, B., UHRIN, A., VETŐ, I., BARTHA, A. & SAJGÓ, Cs. 2011: Basin-centered gas in the Makó Trough, Hungary: A 3D basin and petroleum system modelling investigation. – *Petroleum Geoscience* **17**, 405–416. <http://dx.doi.org/10.1144/1354-079310-063>.
- BAKER, R. A., GEHMAN, H. M., JAMES, W. R. & WHITE, D. A. 1986: Geologic Field Number and Size Assessment of Oil and Gas Plays. – In: RICE, D. D. (ed.): *Oil and gas assessment – Methods and applications. – AAPG Studies in Geology* **21**, 25–31, <https://doi.org/10.1306/St21460C2>
- BALÁZS, A., MATENCO, L., MAGYAR, I., HORVÁTH, F. & CLOETINGH, S. 2016: The link between tectonics and sedimentation in back-arc basins: New genetic constraints from the analysis of the Pannonian Basin. – *Tectonics* **35/6**, 1526–1559. <http://dx.doi.org/10.1002/2015TC004109>.
- BALÁZS, A., GRANJEON, D., MATENCO, L., SZTANÓ, O. & CLOETINGH, S. 2017: Tectonic and Climatic Controls on Asymmetric Half-Graben Sedimentation: Inferences From 3-D Numerical Modeling. – *Tectonics* **36/10**, 2123–2141. <https://doi.org/10.1002/2017TC004647>.
- BARÁTH I. & KISS B. 2004: A mélyfúrési geofizika története Magyarországon (avagy „a világszínvonalról a világszínvonalig”). – *Magyar Geofizika* **45**, jubileumi különszám, 49–58.
- BARÁTH I., JESCH A., KISS B. & LAKATOS S. 1994: A mélyfúrési geofizikai kutatás története Magyarországon. – *Magyar Geofizika* **35/2**, 95–102, http://epa.oszk.hu/03400/03436/00140/pdf/EPA03436_magyar_geofizika_1994_02_095-102.pdf
- BARTHA, A., BALÁZS, A. & SZALAY, Á. 2018: On the tectono-stratigraphic evolution and hydrocarbon systems of extensional back-arc basins: inferences from 2D basin modelling from the Pannonian basin. – *Acta Geodaetica et Geophysica* **53**, 369–394. <https://doi.org/10.1007/s40328-018-0225-0>.
- BODOKY T. & POLCZ I. (szerk.) 2016: A Magyar Állami Eötvös Loránd Geofizikai Intézet története, II. rész: 1965–2012. – *MFGI*, 1–726, <http://real.mtak.hu/id/eprint/46825>.
- BÖCKH H. 1917: Brachiantiklinálisok és dómok kimutatása torziós mérleggel végzett nehézségi mérések adatai alapján. – *Bányászati és Kohászati Lapok* **50(1)/9**, 265–273, http://bkl.uni-miskolc.hu/1917_1/index.php
- BÖCKH J. 1908: A petróleumra való kutatások állása a magyar Szent Korona országában. – *A Magyar Kir. Földtani Intézet Évkönyve* **16/6**, 370–479, http://epa.oszk.hu/03200/03274/00238/pdf/EPA03274_mafi_evkonyv_1908_06.pdf
- BÖHM F. 1939: Ásványolaj- és földgázbányászat Magyarországon 1935-ig. – *Bányászati és Kohászati Lapok* **72/9**, 153–189, <http://bkl.uni-miskolc.hu/1939/index.php>
- BRUKNER-WEIN, A. & SAJGÓ, Cs. 1990: Diagenesis in Neogene coal sequence. A study on soluble organic matter. – *Organic Geochemistry* **16**, 219–227. [https://doi.org/10.1016/0146-6380\(90\)90042-X](https://doi.org/10.1016/0146-6380(90)90042-X)
- CRISTIANSEN, P. & WAGGONER, J. 2004: Using multicomponent seismic data to better understand reservoir characteristics. – *5th Conference and Exposition on Petroleum Geophysics*, Hyderabad-2004, India, 628–636.
- CSATH B. 1975: 10 éve tört fel az olaj a tápéi termálfűrészből. – *Kőolaj és Földgáz*, **8(108)/7**, 207–214, https://mandadb.hu/common/file-servlet/document/444766/default/doc_url/koolaj_es_foldgaz_1975_07.pdf
- DALLOS F-NÉ 2001: A magyar szénhidrogénipar gazdálkodó és irányító szervezetei a MOL Rt megalakulása előtti időszakban: 1933. VI. 8 és 1991. X. 1 között. – *Kőolaj és Földgáz* **34(134)/8**, 101–114, https://www.ombkenet.hu/bkl/koolaj/2001/bklkoolaj2001_08_01.pdf
- DANK, V. 1985: Hydrocarbon exploration in Hungary. In: HÁLA, J. (ed.): *Neogene Mineral Resources in the Carpathian Basin. – Magyar Állami Földtani Intézet, Budapest*, 107–213.
- DEAN, T. & SWEENEY, D. 2019: Recent advances in nodal land seismic acquisition systems. – *ASEG Extended abstracts*, **2019/1**, 1–4. <https://doi.org/10.1080/22020586.2019.12073232>.
- FARKAS, K. & LEMBERKOVICS, V. 2017: New concepts in HC exploration of Miocene sequence in the Pannonian Basin. – *Nosztalgeo Konferencia*, Algyő – előadás.
- FOUM, A. 2020: Petroleum Perspectives, Past Present and Future. – *AAPG Europe Region Webinars*, https://www.aapg.org/videos/webinar/er/articleid/57419/alan-foum-petroleum-perspectives-past-present-and-future?utm_medium=website&utm_source=Right3Pane
- GAJDOS I., PAP S., SOMFAI A. & VÖLGYI L. 1983: Az Alföld pannóniai (s. l.) képződményei. – *MÁFI alkalmi kiadvány*, 1–70, ISBN 963 10 5785 2, <https://mek.oszk.hu/20100/20142/>
- GLUYAS, J. G. 2020: Some like it hot, for others warm is sufficient: exploiting waste heat. – *AAPG webinar* 29th June 2020
- GLUYAS, J. G., AULD, A., ADAMS, C., HIRST, C. M., HOGG, S. & CRAIG, J. 2018: Geothermal Potential of the Global Oil Industry. – *Intechopen*, <https://doi.org/10.5772/intechopen.81062>.
- GOMBÁR L. & KÉSMÁRKY I. 2002: A szeizmikus terepi mérési technológia története (1972–). – In: KÉSMÁRKY, I. (szerk.): *A felszíni geofizikai kutatás 50 éve a kőolajiparban. – GES Kft.*, 187–200.
- HAAS J., BUDAI T., CSONTOS L., FODOR L. & KONRÁD Gy. 2010: *Magyarország prekainozoos földtani térképe, 1:500 000 [Pre-Cenozoic geological map of Hungary, 1:500 000]*. – A Magyar Állami Földtani Intézet kiadványa.
- HAMILTON, W., WAGNER, L. & WESSELY, G. 2000: Oil and gas in Austria: Aspects of geology in Austria. – *Mitteilungen der Österreichischen Geologischen Gesellschaft* **92**, 235–262.
- HAROLD, Zs., BARTHA, A., CSIZMEG, J. & SZTANÓ, O. 2019a: Petroleum systems analysis based on simulation results of a 2D numerical

- model, eastern Pannonian Basin. – *AAPG Europe Region, Paratethys Petroleum Systems Regional Conference*, 26–27 March, 2019, Vienna, Austria – *Abstract Book*, 71.
- HAROLD, ZS., BALÁZS, A., BARTHA, A. & SZALAY, Á. 2019b: The potential for gas hydrate formation in the Pannonian basin. – *AAPG GTW: Exploration and Production in the Black Sea, Caucasus, and Caspian Region Conference*, 18–19 September 2019, Batumi, Georgia – *Abstract book*.
- HÁMOR T. 2020: A földtani szakigazgatás története. – *Földtani Közlöny* **150/1**, 195–208, <https://doi.org/10.23928/foldt.kozl.2020.150.1.195>.
- HIRST, C. M., GLUYAS, J. G. & MATHIAS, S. A. 2015: The late field life of the East Midlands Petroleum Province; a new geothermal prospect? – *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology* **48**, 104–114. <https://doi.org/10.1144/qjegh2014-072>.
- HOLDITCH, S. A. 2013. Unconventional oil and gas resource development – Let’s do it right. – *Journal of Unconventional Oil and Gas Resources* **1–2**, 2–8. <https://doi.org/10.1016/j.juogr.2013.05.001>.
- IZSÓ I. 2007: A magyar bányajog történetének főbb állomásai. – *Bányászattörténeti Közlemények* III. (III/1), 3–16, <http://epa.oszk.hu/01400/01466/00003/pdf/01.pdf>
- IZSÓ I. 2010a: A magyar bányajog fejlődésének átmeneti korszaka (1945–1958) Okmánytári kiegészítéssel I. kötet. – Miskolc, 152 p., <https://mek.oszk.hu/09000/09009/pdf/banyajog1.pdf>
- IZSÓ I. 2010b: A magyar bányajog fejlődésének átmeneti korszaka (1945–1958) Okmánytári kiegészítéssel II. kötet. – Miskolc, 163 p.
- IZSÓ I. 2019: A bányahatóság története Magyarországon. – Magyar Bányászati és Földtani Szolgálat, Budapest, 129 p., <https://mek.oszk.hu/19700/19786/19786.pdf>
- JUHÁSZ Gy. 1992: A pannóniai (s.l.) formációk térképezése az Alföldön: elterjedés, fácies és üledékes környezet. – *Földtani Közlöny* **122/2–4**, 133–165, <http://epa.oszk.hu/html/vgi/kardexlap.phtml?id=1635>
- JUHÁSZ, Gy. & MAGYAR, I. 1992: A pannóniai (s.l.) litofáciesek és molluszka-biofáciesek jellemzése és korrelációja az Alföldön. – *Földtani Közlöny* **122/2–4**, 167–194, <http://epa.oszk.hu/html/vgi/kardexlap.phtml?id=1635>
- JURATOVICS A. 1995: A Szeged–Algyői szénhidrogénmezők kutatási-művelési története 1965–1990. – Szeged, Móra Ferenc Múzeum, 495 p.
- KÉSMÁRKY I. (szerk.) 2002: A felszíni geofizikai kutatás 50 éve a kőolajiparban a felszíni geofizika szerepe és jelentősége a hazai szénhidrogénkutatásban. – Budapest: *Geofizikai Szolgáltató Kft.*, 260 p.
- KISS K. 2016: Jelen, jövő – magyarországi szénhidrogén kutatás. – *Nosztalgeo Konferencia*, Szeged – előadás.
- KISS K. & MAGYAR I. 2012. Derecskei süllyedék Miocén képződményeinek új kutatási eredményei. – *Nosztalgeo Konferencia*, Szeged – előadás.
- KLARNER, S., KIRNOS, D., IVANOVA, N., GRITSENKO, A. & MALINOVSKAYA, O. 2020: Comparing Bayesian and neural network supported lithotype prediction from seismic data. – *First Break* **38**, 75–80. <https://doi.org/10.3997/1365-2397.fb2020053>
- KOVÁCS G., VÉRTESY L., OROSZ L., BAUER M., GULYÁS Á., KISS J., LENDVAY P., MAIGUT V. & KOVÁCS Zs. 2018: Az MBFSZ adatszolgáltatásai a szénhidrogén-kutatás támogatására. – In: KOVÁCS Zs. (szerk.): *Szénhidrogének Magyarországon*. – Magyar Energetikai és Közmű-szabályozási Hivatal, Budapest, 279–286.
- KOVÁCS Zs., CSERKÉSZ-NAGY Á., JENCSEL H. & THAMÓNÉ BOZSÓ E. 2018: Nem hagyományos szénhidrogén-előfordulások. – In: KOVÁCS Zs. (szerk.), *Szénhidrogének Magyarországon*. – Magyar Energetikai és Közmű-szabályozási Hivatal, Budapest, 205–222.
- KÖRÖSSY L. 1987: A kislalföldi kőolaj- és földgázkutatás földtani eredményei. – *Általános Földtani Szemle* **22**, 99–174, https://epa.oszk.hu/02700/02751/00022/pdf/EPA02751_alt_foldt_szemle_1987_22_099-174.pdf
- KÖRÖSSY L. 1988: A Zala-medencei kőolaj- és földgázkutatás földtani eredményei. – *Általános Földtani Szemle* **23**, 3–162.
- KÖRÖSSY L. 1989: A Dráva-medencei kőolaj- és földgázkutatás földtani eredményei. – *Általános Földtani Szemle* **24**, 3–121, https://epa.oszk.hu/02700/02751/00024/pdf/EPA02751_alt_foldt_szemle_1989_24_003-121.pdf
- KÖRÖSSY L. 1990: A Délkelet-Dunántúl kőolaj- és földgázkutatásának földtani eredményei. – *Általános Földtani Szemle* **25**, 3–53, https://epa.oszk.hu/02700/02751/00025/pdf/EPA02751_alt_foldt_szemle_1990_25_003-053.pdf
- KÖRÖSSY L. 1993: A Duna–Tisza köze kőolaj- és földgázkutatásának földtani eredményei. – *Általános Földtani Szemle* **26**, 3–161, https://epa.oszk.hu/02700/02751/00026/pdf/EPA02751_alt_foldt_szemle_1993_26_003-161.pdf
- KÖRÖSSY L. (sajtó alá rendezte: KÁZMÉR M.) 2004: Az észak-magyarországi paleogén medence kőolaj- és földgázkutatásának földtani eredményei. – *Általános Földtani Szemle* **28**, 9–120, https://epa.oszk.hu/02700/02751/00028/pdf/EPA02751_alt_foldt_szemle_2004_28_009-120.pdf
- KÖRÖSSY L. (sajtó alá rendezte: KÁZMÉR M.) 2005a: Az Alföld délkeleti része kőolaj- és földgázkutatásának földtani eredményei I. – *Általános Földtani Szemle*, **29**, 41–132, https://epa.oszk.hu/02700/02751/00029/pdf/EPA02751_alt_foldt_szemle_29_041-132.pdf
- KÖRÖSSY L. (sajtó alá rendezte: KÁZMÉR M.) 2005b: Az Alföld délkeleti része kőolaj- és földgázkutatásának földtani eredményei II. – *Általános Földtani Szemle* **30**, 7–92, https://epa.oszk.hu/02700/02751/00030/pdf/EPA02751_alt_foldt_szemle_30_007-092.pdf
- KÖRÖSSY L. (sajtó alá rendezte: KÁZMÉR M.) 2014: Az Észak-Tiszántúl kőolaj- és földgázkutatásának földtani eredményei. – *Általános Földtani Szemle* **31**, 51–178, http://epa.niif.hu/02700/02751/00031/pdf/EPA02751_alt_foldt_szemle_31_2014_051-178.pdf
- LAW, B. E. 2002: Basin-Centered Gas Systems. – *AAPG Bulletin* **86/11**, 1891–1919. <https://doi.org/10.1306/61EEDDB4-173E-11D7-8645000102C1865D>.
- LEMBERKOVICS, V. 2017: An alternative technique to determine source layers without direct geochemical measurements – case study from the Pannonian Basin, southern Hungary. – *Nosztalgeo Konferencia* – Szeged – előadás.
- LEMBERKOVICS, V., PÁVEL, E., BADICS, B., LÓRINCZ, K., RODIONOV, A. & GALIMULLIN, I. 2018: Petroleum system of Miocene troughs of the Pannonian Basin in southern Hungary, based on 3D basin modelling. – *Interpretation* **6/1**, SB37–SB50. <http://dx.doi.org/10.1190/INT-2017-0075.1>.
- LEONARD, R. 2020: Climate Change and COVID–19: Their Effect on Energy’s Future. – AAPG Let’s Connect Series, Webinar – June 2020, <https://na.eventscloud.com/website/13538/webinar-recordings/>

- LYNCH, S. 2008: *More than meets the eye – A study in seismic visualization*. – PhD Thesis, University of Calgary, Department of Geoscience, Calgary, 419 p.
- MAGYAR HORIZONT ENERGIA KFT. 2011: Kutatási zárójelentés a Barcs–Lenti–Letenye–Csurgó szénhidrogén kutatási blokkokra, I. fejezet, 1–57, T.22490.
- MAGYARORSZÁG ÁSVÁNYI NYERSANYAGVAGYONA, https://mbfsz.gov.hu/asvanyvagyon_nyilvantartas
- MOLNÁR K., KLOSKA K., NAGY Z., RUMPLER J. & TÓTH J. 1995: A szénhidrogén-kutatásban alkalmazott geofizikai módszerek fejlődésének főbb állomásai a kezdetektől napjainkig. – *Magyar Geofizika* **36/1**, 77–79, <http://epa.oszk.hu/03400/03436/00143/pdf/>
- OSTRANDER, W. J. 1984: Plane wave reflection coefficients for gas sands at non-normal angles of incidence. – *Geophysics* **49**, 1637–1648, <https://doi.org/10.1190/1.1441571>
- PALCSÚ, L., VETŐ, I., FUTÓ, I., VODILA, G., PAPP, L. & MAJOR, Z. 2014: In-reservoir mixing of mantle-derived CO₂ and metasedimentary CH₄–N₂ fluids – Noble gas and stable isotope study of two multistacked fields (Pannonian Basin System, W-Hungary). – *Marine and Petroleum Geology* **54**, 216–227. <http://dx.doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2014.03.013>
- PALOTAI, M. 2013: Oligocene–Miocene Tectonic Evolution of the Central Part of the Mid-Hungarian Shear Zone. – PhD Dissertation, ELTE TTK, Budapest, 147 p.
- PAP S. 1990: Felpikkelyezett rétegsorok a Közép-Tiszántúlon. – *A Magyar Állami Földtani Intézet alkalmi kiadványa*, Budapest, 1–36, <http://mek.oszk.hu/20100/20177/20177.pdf>
- PAPP S. 1963: A magyarországi kőolaj és földgázkutatás az 1780-tól 1945-ig terjedő időszakban I. rész. – *Magyar Tudományos Akadémia Közleményei* **32/1–4**, 449–465, http://real-j.mtak.hu/1761/1/MUSZTUD_32.pdf
- PAPP S. 1964: A magyarországi kőolaj és földgázkutatás az 1780-tól 1945-ig terjedő időszakban II. rész. – *Magyar Tudományos Akadémia Közleményei* **33/1–4**, 421–437, http://real-j.mtak.hu/1762/1/MUSZTUD_33.pdf
- PAPP S. 1965: A magyarországi földolaj- és földgázkutatás története az utolsó 60 év alatt. – *Kézirat*, MOGIM, 157 p., 32 tábla
- PÁVEL, E. & LEMBERKOVICS, V. 2015: New results of geological and geochemical investigations and basin modelling of the Neogene sequence, Southern part of the Great Hungarian Plain, Hungary. – *RCMNS 6th workshop on the Neogene of central and south-eastern Europe, Orfű, Hungary, Abstract book*, 68–69.
- PÁVEL E., FARKAS K. & LEMBERKOVICS V. 2016: A miocén rétegek kutatása az Alföldön – kihívások és lehetőségek a hazai szénhidrogénkutatás jövőjében. – *Nosztalgeo Konferencia*, Szeged – előadás.
- PETTKÓ J. 1856: Jelentés Magyarországnak March folyóval határos részéről. – *A Magyarhoni Földtani Társulat munkálatai* **1**, 53–68, <https://epa.oszk.hu/02000/02013/00001/pdf/>
- PHILLIPS, R. L., RÉVÉSZ, I. & BÉRCZI, I. 1994: Lower Pannonian Deltaic–Lacustrine Processes and Sedimentation, Békés Basin. – In: TELEKI, P. G., MATTICK, R. E. & KÓKAI, J. (eds): *Basin Analysis in the Exploration. A case study from the Békés basin, Hungary*. Kluwer Academic Publishers, 67–82, <https://doi.org/10.1007/978-94-011-0954-3>
- POSEWITZ T. 1906: Petroleum és aszfalt Magyarországon. – *A Magyar Kir. Földtani Intézet Évkönyve* **15/4**, 210–444, <https://epa.oszk.hu/03200/03274/00205/pdf/>
- RÉZ G. 1908: Adatok a Magyarországon eddig végzett petroleum kutatások eredményeiről. – *Bányászati és Kohászati Lapok, Bányászat*, **41(1)/3**, 145–150, http://bkl.uni-miskolc.hu/1908_1/index.php
- ROEDER, D. 2010: Fold-thrust belts at Peak Oil. – *Geological Society, London, Special Publications* **348**, 7–31. <https://doi.org/10.1144/SP348.2>
- RÓZSAY J. 1864: A Pekleniczai hegyi kátrány Muraközben. – *A magyar orvosok és természetvizsgálók 1863. September 19–26. Pesten tartott IX. nagygyűlésének történeti vázlatja és munkálatai* – Pest, nyomtatott Emich Gusztáv M. Akad. Nyomdásznál, 326–337, <https://core.ac.uk/reader/35136585>
- RUPRECHT, B. J., SACHSENHOFER, R. F., ZACH, C., BECHTEL A., GRATZER, R. & KUCHER F. 2018: Oil and gas in the Vienna Basin: hydrocarbon generation and alteration in a classical hydrocarbon province. – *Petroleum Geoscience* **25**, 3–29. <https://doi.org/10.1144/petgeo2017-056>
- SCHMIDT E. R. 1939: A Kincstár csonkamagyarországi szénhidrogénkutató mélyfúrásai. – *Magyar Állami Földtani Intézet Évkönyve* **34/1**, 3–204, http://epa.oszk.hu/03200/03274/00043/pdf/EPA03274_mafi_evkonyv_1939_01_003-204.pdf
- SEBE, K., SELMECZI, I., SZUROMI-KORECZ, A. HABLY, L., KOVÁCS, Á. & BENKÓ, ZS. 2019: Miocene syn-rift lacustrine sediments in the Mecsek Mts. (SW Hungary). – *Swiss Journal of Geosciences* **112**, 83–100. <https://doi.org/10.1007/s00015-018-0336-1>
- SHERIFF, R. E. 2002: *Encyclopedic Dictionary of Applied Geophysics* (4 ed.). – *Society of Exploration Geophysicists* **13**, 429 p., <http://dx.doi.org/10.1190/1.9781560802969>
- STIRLING, E. J., FUGELLI, E. M. & THOMPSON, M. 2017: The edges of the wedges: a systematic approach to trap definition for stratigraphic, combination and sub-unconformity traps. – In: BOWMAN, M. & LEVELL, B. (eds): *Petroleum Geology of NW Europe: 50 Years of Learning*. – Proceedings of the 8th Petroleum Geology Conference. <https://doi.org/10.1144/PGC8.19>
- SZALAY Á. 2014: Biogén szénhidrogén rendszerek Magyarországon. – *Geokémiai előadóülés*, MTA kutatóház, Budapest – előadás.
- SZENTGYÖRGYI K-NÉ 1994: Zárójelentés a 14. Kengyel és környéke területen végzett szénhidrogénkutatási tevékenységről. – MOL US Üzletsoport, Hazai Kutatási Üzletág, 1–142, T.20127
- SZENTGYÖRGYI K-NÉ 2010: Zárójelentés a 100. Darvas–Komádi kutatási területen végzett szénhidrogénkutatási tevékenységről. – MOL Kutatás–Termelés Divízió, Eurázsiai Kutatás–Termelés, Eurázsiai Kutatási Projektek, I–V, 1–231, T.22416
- TARI, G. & HORVÁTH, F. 2006: Alpine Evolution and Hydrocarbon Geology of the Pannonian Basin: An Overview. – In: GOLONKA, J. & PICHA, F. J. (eds): *The Carpathians and their foreland: Geology and hydrocarbon resources*. – *AAPG Memoir* **84**, 605–618. <https://doi.org/10.1306/985733M843141>
- TARI, G., HORVÁTH, F. & RUMPLER, J. 1992: Styles of extension in the Pannonian Basin. – *Tectonophysics* **208**, 203–219, [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(92\)90345-7](https://doi.org/10.1016/0040-1951(92)90345-7)

- TARI, G., DÖVÉNYI, P., DUNKL, I., HORVÁTH, F., LENKEY, L., STEFANESCU, M., SZAFIÁN, P. & TÓTH, T. 1999: Lithospheric structure of the Pannonian basin derived from seismic, gravity and geothermal data. – *Geological Society Special Publication* **156**, 215–250, <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1999.156.01.12>.
- TINKER, S. 2017: Energy Security and Energy Poverty. – Adapted from oral presentation given at Forum, “The Next 100 Years of Global Energy Use: Resources, Impacts and Economics,” at AAPG Annual Convention and Exhibition, Houston, Texas, April 4, 2017, http://www.searchanddiscovery.com/pdfz/documents/2017/70268tinker/ndx_tinker.pdf.html
- TINKER, S. 2019: Sustainable Energy Transitions. – Oklahoma City University, oral presentation. <https://www.youtube.com/watch?v=BSAwvHFYn-w>
- TÓTH T. 2016: Szeizmikus mérések anno, ma és holnap – egy százéves geofizikai kutatási módszer jövője. – *Nosztalgeo Konferencia*, Szeged. előadás.
- TÓTH, T. & TARI, G. 2014: Structural Inversions in Western Hungary and Eastern Slovenia: Their Impact on Hydrocarbon Trapping and Reservoir Quality. – *AAPG International Conference & Exhibition*, Istanbul, Turkey, September 14–17, 2014 – Oral presentation.
- TREADGOLD, G., SICKING, C., SUBLETTE, V. & HOOVER, G. 2008: Azimuthal Processing for Fracture Prediction and Image Improvement. – *Recorder* **33/ 5**, 40–45. <https://csegrecorder.com/articles/view/azimuthal-processing-for-fracture-prediction-and-image-improvement>
- VÁGÓ J. 2006: A műszerkabinok szerepe és működése a szénhidrogén-kutatásban. – *A Miskolci Egyetem Közleménye, A sorozat, Bányászat* **69**, 31–38. https://matarka.hu/koz/ISSN_1417-5398/69k_2006/ISSN_1417-5398_69k_2006_031-038.pdf
- VAKARCS, G. 1997: Sequence stratigraphy of the Cenozoic Pannonian basin, Hungary. – PhD Dissertation, RICE University, Houston, Texas, 386 p.
- VETŐ I 2014: Biogén metán a Pannon medence üledékeiben és felszínalatti vizeiben. – In: PÁL-MOLNÁR E. (ed.): *Medencefejlődés és geológiai erőforrások*. – GeoLitera, Szeged, 99–108.
- VETŐ, I., FUTÓ, I., HORVÁTH, I. & SZÁNTÓ, Zs. 2004: Late and deep fermentative methanogenesis as reflected in the H-C-O-S isotopy of the methane-water system in deep aquifers of the Pannonian Basin (SE Hungary). – *Organic Geochemistry* **35/6**, 713–723. <https://doi.org/10.1016/j.orggeochem.2004.02.004>
- VÖLGYI L., SUBA S., BALLA K. & CSALAGOVITS I. 1970: *Magyarország szénhidrogén telepei: Algyő*. – Budapest, OKGT kiadvány, 423 p. és 64 melléklet
- WAHLNER A. 1897–1920: Magyarország bányá- és kohóipara 1896–1916 évben. – *Bányászati és Kohászati Lapok, Bányászat* **30/13–19**, – **53/1/különszám**, <http://bkl.uni-miskolc.hu/1897/index.php> ... http://bkl.uni-miskolc.hu/1920_1/index.php
- ZELENKA T. 1993: A magyarországi állami földtani-geofizikai kutatások története (1868–1949). – *Földtani Közlöny* **123/1**, 99–105, https://epa.oszk.hu/01600/01635/00271/pdf/EPA01635_foldtani_kozlony_1993_123_1_099-105.pdf

Kézirat beérkezett: 2020. 09. 07.

Indication of hydrocarbon migration in the Western Mecsek Mountains evidenced by fluid inclusion chemostratigraphy

KÖRMÖS, Sándor¹, LUKOCZKI, Georgina², SCHUBERT, Félix³

^{1,3}University of Szeged, Department of Mineralogy, Geochemistry and Petrology, H-6722 Szeged, Egyetem u. 2.

²University of Kentucky, Kentucky Geological Survey, 504 Rose Street, Lexington, KY 40502

¹corresponding author, sandor.kormos@geo.u-szeged.hu, <https://orcid.org/0000-0003-4439-6804>

²gina.lukoczki@uky.edu, <https://orcid.org/0000-0002-0661-0198>

³schubert@geo.u-szeged.hu, <https://orcid.org/0000-0001-8647-5354>

Abstract

Primary and secondary hydrocarbon-bearing fluid inclusion (HCFI) assemblages occur in the Middle Triassic Lapis Limestone in the Szuadó Valley of the Western Mecsek Mts. The primary HCFIs were trapped in saddle dolomite crystals, and the secondary HCFIs were enclosed in calcite neospar and fracture-filling calcite. Solid bitumen is also present along fractures. The volatile compounds liberated from fluid inclusions are characterized by non-hydrocarbon and hydrocarbon species. The fluorescent properties of HCFIs, the occurrence of the solid bitumen, as well as the composition of inclusion oils indicate the migration of light oils through the Lapis Limestone. Petrographic observations suggest a prolonged oil charge event, which resulted in HCFIs being trapped under evolving diagenetic conditions.

Keywords: fluid inclusion chemostratigraphy, Lapis Limestone, Mecsek Mountains, petroleum inclusions, solid bitumen

Introduction

Hydrocarbon (HC) exploration has taken place in Southern Transdanubia since the 1930s. The first major HC reservoir along the Drava Basin was discovered in the 1950s. Since then, geological research focusing on petroleum has expanded to areas towards the Mecsek Mts. Nowadays, several oil companies are involved in the exploration, development and setting-up of hydrocarbon fields in order to boost production in the area of SSW Mecsek Mts. (SELMECZI 2018).

In Southern Transdanubia, Mesozoic and Cenozoic rocks have long been known to contain sufficient amounts of organic matter that had reached the oil window in some parts of the area. Therefore, such rocks can be considered as potential source rocks for the production of hydrocarbons (BADICS & VETŐ 2012, SELMECZI 2018). There are no commercial HC reservoirs in the Mecsek Mts.; however, traces of HC migration can be followed in outcrops in the Central and Eastern Mecsek Mts. (LUKOCZKI & SCHUBERT 2014). In general, the presence of HCs is usually indicated by fluid inclusions (FI) trapped in healed vacuoles within (cement) crystals, by tightly-held fluids in nano-pores, or by confined pores/spaces in and between other components of a rock. In the Mecsek Mts., near Pécsvárad, the Hosszúhetény Calcareous Marl hosts hydrocarbon-bearing fluid

inclusions (HCFI) in fracture-filling calcite (LUKOCZKI et al. 2012). BERÉNYI (2017) described HCFIs in fracture-filling calcite and euhedral quartz crystals in the partings of Mecsek Coal at Pécs-Vasas. LUKOCZKI & SCHUBERT (2014) reported HCFIs in planar-s dolomite crystals, in fracture-filling calcite, and in void-filling saddle dolomite and euhedral quartz crystals in the Middle Triassic dolostones at Árpádtető. Towards the west, near the Kantavár quarry, SZIGETI (2013) documented HCFIs in fracture-filling calcite (Figure 1a, b). Up until now indications of HC migration in the Western Mecsek Mts have not been documented. However, a characteristic petroleum odour can be observed in the Western Mecsek Mts. while breaking debris of the Middle Triassic Lapis Limestone in the Szuadó Valley.

Fluid inclusion chemostratigraphy (FiCs) is used to characterize ancient diagenetic fluid systems. This method is based on a procedure that is called FIS (Fluid Inclusion Stratigraphy) or FIV (Fluid Inclusion Volatiles; VOLK & GEORGE 2019). With FiCs the bulk of the respective organic and inorganic volatile compounds from FIs and other tightly-held fluids can be analysed. The results provide essential information for the documentation of HC paleo-accumulation, migration, or reservoir compartmentalization (VOLK & GEORGE 2019).

The objective of this study was to determine the origin of

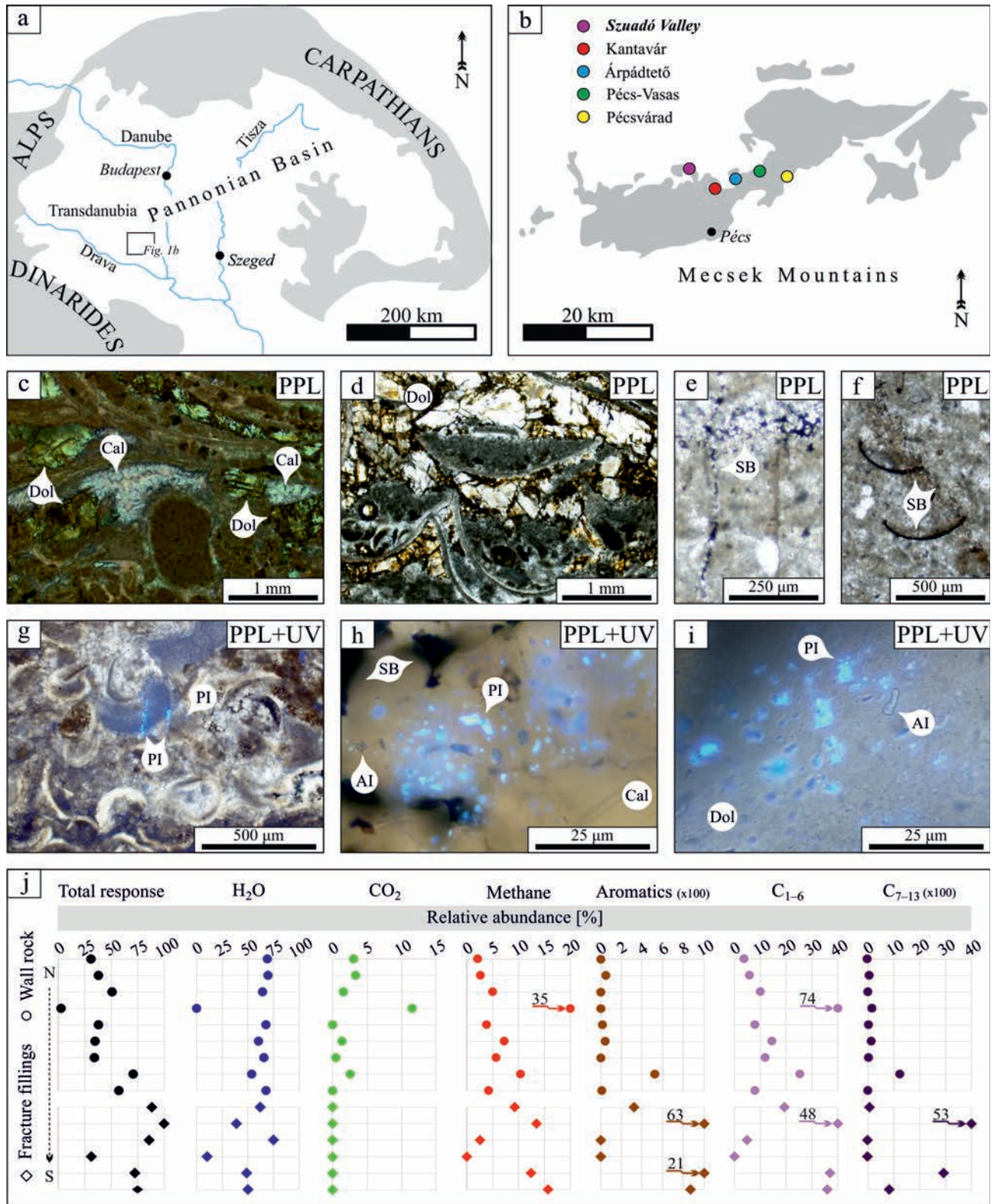


Figure 1. a) and b) Location of the study area and the sites of the previously published petroleum inclusion-bearing formations in the Mecsek Mountains (modified after LUKOCZKI & SCHUBERT 2014). c) Packstone. Nonplanar (saddle) replacive dolomite (Dol), and equant, purple-stained calcite (Cal) in sheltered pores, stained thin section. Plane-polarized light (PPL). d) Packstone. Nonplanar (saddle) replacive dolomite (Dol) among skeletal grains filled with sediment. Plane-polarized light (PPL). e) Bedding-parallel and perpendicular fractures filled by calcite and solid bitumen (SB). Plane-polarized light (PPL). f) Solid bitumen filled fractures and skeletal grains. Plane-polarized light (PPL). g) Trails of secondary petroleum inclusions (PI) crosscutting several grains in neomorphic bioclastic packstone. Plane-polarized light and UV excitation (PPL+UV). h) Primary petroleum (PI) and aqueous inclusions (AI) in granular fracture-filling calcite (Cal) and intercrystalline pore-filling solid bitumen (SB). Plane-polarized light and UV excitation (PPL+UV). i) Primary petroleum (PI) and aqueous inclusions (AI) in the nonplanar (saddle) dolomite (Dol). Plane-polarized light and UV excitation (PPL+UV). j) Fluid inclusion chemostratigraphy log of the studied fracture fillings and wall rock samples along the Szvadó Valley. The samples on the vertical axes are ordered according to their location to the south along the valley

the petroleum odour of the Lapis Limestone in the Szuadó Valley using micropetrography and FiCs. The results obtained revealed that the detected hydrocarbon signal (i.e., the petroleum odour) is caused by remnants of natural HC-bearing fluids that once migrated through the area.

Samples and analytical methods

Nine samples from the debris of the Lapis Limestone, which is characterised by petroleum odour, were collected along the Szuadó Valley. A representative sample was selected and stained to distinguish calcite, Fe-calcite, dolomite, Fe-dolomite/ankerite, using the method of DICKSON (1966). Detailed micropetrography was prepared using an Olympus BX41 polarization microscope. A Reliotron VII cathodoluminescence (CL) device assembled on an Olympus BX63 polarising microscope was applied for CL microscopy. UV-fluorescence microscopy was used to characterize the HCFIs. The Olympus BX41 polarization microscope was used for the analysis. It was equipped with a 100 W high-pressure Hg lamp and an Olympus U-MNU-2 filter set for blue-violet (400–440 nm) and ultraviolet (360–370 nm) excitation. Terms and symbols suggested by DIAMOND (2003) were employed in this study for the FI analysis. The volume fractions of the vapour phases (ϕ_v) were estimated at room temperature. The petroleum odour was inspected with FiCs analysis that involved mass spectrometry without chromatographic pre-separation. The analytical workflow was based on KÖRMÖS et al. (2017), and it included the following steps: fracture-filling calcite and sidewall limestone were separated under a stereomicroscope, and they were then cleaned rigorously in an ultrasonic bath using rea-sol detergent. The bulk samples together with internal standards were loaded and crushed in a vacuum-pneumatic crushing chamber at 100 °C. The liberated volatile compounds were electron ionized and swept into a quadrupole PFEIFFER PrismaPlus™ QMG 220 mass spectrometer. The molecular species were analysed in scanning mode by an electron multiplier according to their mass-to-charge ratio (m/z) in the range of m/z 2–180. The obtained non-hydrocarbon and hydrocarbon species were normalized against the total response of each sample. Moreover, to make the signals comparable between the individual samples the total response was normalized against the maximum reading.

Results and discussion

The analysed Lapis Limestone sample is made up of <3 mm-thick layers of various limestone microfacies, including bioclastic-peloidal wackestones and packstones (Figure 1c, d). Microscale gradation and bedding are highlighted by differences in the grain-size and matrix content. The packstones consist of peloids and bioclasts, and the matrix has been replaced by non-ferroan neomorphic sparry calcite.

The bioclasts include ostracods, crinoids, echinoderms, gastropods and foraminifers. Some bioclasts and peloids are marked by micritic envelopes. In a few cases, the skeletal grains have been replaced by non-ferroan calcite. These calcite crystals show bright orange CL colour, mimicking the precursor bioclasts. The vug pores contain partially ferroan calcite neospar (Figure 1c). Locally, medium to coarse crystalline nonplanar (saddle) dolomite (30 to 500 μm) appears to preferentially replace the calcite neospar (Figure 1c, d). This replacive saddle dolomite is non-ferroan and exhibits non-luminescent CL signal. Spots and patches of iron oxyhydroxides are distributed unevenly throughout the sample and are especially associated with the saddle dolomite where (locally) they cause brownish colouration of the dolomite (Figure 1c, d). Micro-stylolites occur in the sample, and branching fractures intersect the limestone. These fractures are filled with equant granular, non-ferroan calcite that exhibits a dull orange CL colour. Solid bitumen is, where present, the final phase filling fractures and moldic pores after skeletal grains adjacent to the bitumen-filled fractures (Figure 1e, f). The fractures, containing bitumen, locally touch and cease in micro-stylolites, but the healed fractures crosscut the latter without any sign of solid bitumen.

The HCFIs are present in matrix and skeletal grain replacive non-ferroan neospar and fracture-filling calcite, as well as in the replacive nonplanar (saddle) dolomite (Figure 1g, h and i). The petroleum inclusions are colourless and locally brownish in plane-polarized light, and they show a uniform blue fluorescent colour under UV excitation (Figure 1g, h and i). The inclusions are characterised by their irregular shape and range in size up to 10 μm .

In the non-ferroan neospar calcite, HCFIs take the form of a few mm-long trails, which crosscut several crystals and grains, suggesting a secondary origin (Figure 1g). There are one-phase, liquid hydrocarbon (L_{hc}) and two-phase liquid-dominant, liquid and gas hydrocarbon inclusions ($L_{hc}+V$; ϕ_v : 0.2–0.3). Spatially rare cogenetic, two-phase liquid-dominant, aqueous FIs ($L_{aq}+V$; ϕ_v : 0.1–0.2) also occur within fluid inclusion assemblages (FIA).

HCFIs are present in the fracture-filling calcite. The crystals, that host the HCFIs are associated with solid bitumen that fills fractures (Figure 1h). The FIs are present as one-phase (L_{hc}) and two-phase liquid-dominant ($L_{hc}+V$; ϕ_v : 0.2–0.3), as well as spatially rare cogenetic, two-phase liquid-dominant aqueous inclusions ($L_{aq}+V$; ϕ_v : 0.2–0.3). The FIAs can be followed in trails along the solid bitumen-filled fractures, suggesting secondary origin. The solid bitumen is characterized by black and brownish colouring in plane-polarized light depending on the thickness of the secondary macerals.

The dolomite hosted FIs are one- (L_{hc}), two- ($L_{hc}+V$; ϕ_v : 0.1–0.3), and three-phase ($L_{aq}+L_{hc}+V$) liquid-dominant HCFIs with locally co-occurring two-phase liquid-dominant ($L_{aq}+V$; ϕ_v : 0.2–0.3) aqueous FIs. They occur in the core of the crystals and along growth zones, suggesting a primary origin (Figure 1i).

Based on FiCs, the investigated samples contain the fol-

lowing inorganic and organic compounds (*Figure 1j*): Higher amounts of volatiles were liberated from the fracture-filling calcites relative to the wall rock samples. The non-hydrocarbon species, especially H₂O and CO₂, dominate in the obtained mass spectra of wall rock samples. In contrast, CO₂ is absent in the fracture-filling calcite. HCs were present in all analysed samples, gaseous HC species (C₁₋₆), notably methane, predominate the HC fraction. Beside the methane, HCs containing up to six carbon atoms were also present in all samples. The abundance of aromatic hydrocarbons, such as benzene, toluene and xylene, as well as of heavier organic compounds, containing a maximum 13 carbon atoms is lower than the total amount of C₁₋₆. The contribution of HCs to the total response is highly variable. There are samples in which the amounts of heavier HCs containing more than six carbon atoms are negligible.

The presence of solid bitumen, UV-fluorescent (i.e., hydrocarbon-bearing) fluid inclusions and the geochemical signature of the volatile compounds liberated from the samples indicate ancient HC migration through the Lapis Limestone in the Szuadó Valley. The uniform blue fluorescent colour of the HCFIs, the presence of the solid bitumen and

the composition of the inclusion oils in all studied samples probably represent light oils trapped in fluid inclusions (cf., VOLK & GEORGE 2019). Oil migration probably persisted over a prolonged period and this allowed HCFIs to be trapped under evolving diagenetic conditions. This, in turn, presumably led to the observed variation in the composition of the liberated volatiles.

The Szuadó Valley represents the westernmost location in the Mecsek Mts., which is affected by the syn- or post-Triassic HC migration. A detailed investigation of the diagenetic evolution of the Lapis Limestone, as well as thorough analysis of the cogenetic aqueous and HC fluid inclusions, are necessary to specify the physicochemical conditions of fluid migration and to accurately place the timing of HC emplacement in the diagenetic history.

Acknowledgements

The authors thank the editor-in-chief Orsolya SZTANÓ and the reviewers Orsolya GYÓRI and Zsolt BENKÓ for their constructive comments. This study was supported by NTP-NFTÖ-19-B-0152.

References

- BADICS, B. & VETŐ, I. 2012: Source rocks and petroleum systems in the Hungarian part of the Pannonian Basin: The potential for shale gas and shale oil plays. – *Marine and Petroleum Geology* **31**, 53–69. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2011.08.015>
- BERÉNYI B. 2017: *Szénhidrogén-migráció nyomai a pécs-vasasi külfejtésben (Mecsek hegység)*. – MSc Diplomadolgozat, SZTE Ásványtani, Geokémiai és Kőzettani Tanszék, Szeged, 62 p.
- DIAMOND, W. L. 2003: Glossary: Terms and symbols used in fluid inclusion studies. – In: SAMSON, I., ANDERSON, A. & MARSHALL, D. (szerk.): Fluid inclusions: analysis and interpretation. – *MAC Short course series* **32**, 363–372.
- DICKSON, J. 1966: Carbonate identification and genesis as revealed by staining. – *Journal of Sedimentary Research* **36**, 491–505. <https://doi.org/10.1306/74d714f6-2b21-11d7-8648000102c1865d>
- KÖRMÖS S., CZIRBUS N., & SCHUBERT F. 2017: Furadékminták gáz és illékony komponenseinek vizsgálatához szükséges minta-előkészítési és -feltárási protokoll fejlesztésének eredményei. – *Földtani Közlemény* **147**, 399–414. <https://doi.org/10.23928/foldt.kozl.2017.147.4.399>
- LUKOCZKI, G. & SCHUBERT, F. 2014: Traces of hydrocarbon migration in the Central Mecsek Mountains. – *Földtani Közlemény* **144**, 403–407.
- LUKOCZKI G., SCHUBERT F. & HÁMORNÉ VIDÓ M. 2012: Szénhidrogén-migráció nyomai Pécsvárad környékén (Mecsek hegység). – *Földtani Közlemény* **142**, 229–242.
- SELMECZI I. 2018: Magyarország szénhidrogén-kutatási területei – Dél-Dunántúl – Zala- és Dráva-medence. – In: KOVÁCS Zs. (szerk.): *Szénhidrogének Magyarországon*. – MEKH kiadvány, Budapest, 51–77.
- SZIGETI M. 2013: *A Kantavári Formáció szénhidrogén-tartalmú kalcitereinek petrográfiai vizsgálata*. – BSc Szakdolgozat, SZTE Ásványtani, Geokémiai és Kőzettani Tanszék, Szeged, 42 p.
- VOLK, H. & GEORGE, S. C. 2019. Using petroleum inclusions to trace petroleum systems – A review. – *Organic Geochemistry* **129**, 99–123. <https://doi.org/10.1016/j.orggeochem.2019.01.012>

Manuscript received: 04/03/2020

Események, rendezvények

Beszámoló a 23. Magyar Őslénytani

Vándorgyűlésről

2020. szeptember 25.

A jelenleg is zajló COVID pandémia miatt – rendhagyó módon – egynapos előadóülés formájában rendeztük meg a 23. Magyar Őslénytani Vándorgyűlést a Magyar Természettudományi Múzeum Semsey előadótermében.

A rendezvényt évről évre más helyszínen szervezi meg a szakosztály, így az eredeti tervek szerint 2020 májusában a négynapos vándorgyűlésre a lengyelországi Szentkereszt-hegységbeli Chęciny-i Geológiai Bázison került volna sor a lengyel kollégák közreműködésével. Sajnos, a vírus miatt a négynapos külföldi rendezvény egy terepi program nélküli budapesti előadónappá redukálódott. A vezetőség a múzeum szigorú járványügyi szabályait betartva tartotta meg a vándorgyűlést. Az előadónap sikeres volt: összesen 11 intézményből 51 résztvevő regisztrált. Az idén először a végzett szakemberek és a földtudós hallgatók mellett professzionálisan felkészült ősmaradványgyűjtők is nagy számban képviseltették magukat. Őket a szervezők elsősorban a Paleotóp nevű őslényblogon keresztül érték el. Az elhangzott előadások és poszterek rövid összefoglalói a konferencia kiadványkötetében olvashatók.

A korábbi vándorgyűlésekhez minden évben kapcsolódott egy úgynevezett „Nulladik napi” ismeretterjesztő programsorozat, amelynek tervezett helyszíne a Magyar Természettudományi Múzeum lett volna. A 2020-as évben rendhagyó módon ez utóbbi a budapesti Fazekas Mihály Gyakorló Iskola „Fazekas + Fesztivál” programsorozatában került meghirdetésre és megtartásra SZIVES Ottilia: „Mire jók az ősmaradványok: alkalmazott őslénytan” című előadása formájában.

A vándorgyűlésen négy blokkban 19 tudományos előadás és 6 poszter szóbeli bemutatása hangzott el. Ebben az évben először – szintén a rendkívüli helyzet miatt – két kolléga online jelentkezett be rövid beszélgetésre, valamint az eredetileg meghívott lengyel előadók hangalámondásos előadást küldtek maguk helyett. A változatos program során a roncslásmentes 3D-leképező módszerektől a dinoszauruszok koponyadíszítségén át az éghajlat által vezérelt tájelméletig ismerhettük meg az aktuális eredményeket.

A konferenciát anyagilag a Nemzeti Kulturális Alap (NKA) támogatta. A megítélt összeg egyrészt a részt vevő kollégák étkeztetésére, másrészt az ISBN-számmal ellátott 31 oldalas absztraktkötet megjelenítésre fordítottuk; a maradék összeget pedig visszautaltuk. Az NKA pályázati keretből lehetőségünk volt hat hallgató teljes részvételi költségének fedezésére is. A hallgatói támogatásra a diákok a beadott előadás vagy poszter kivonatával pályázhattak. Az előadás-összefoglalókat a Magyarhoni Földtani Társulat Őslénytani–Rétegtani Szakosztályának vezetősége bírálta el. A támogatásra jelentkezett diákok listája: ANDA Tamás (ELTE, MSc), BOTKA Dániel (ELTE, PhD), CSORBA Réka (ELTE, MSc), MIZSEI Regina (ELTE, MSc), PÁLFI Ivett (ELTE, MSc) és SZABÓ

Zoltán (ELTE, PhD). A vándorgyűlésen bemutatott hallgatói előadásokat és posztereket zsűri értékelt, a díjakat idén is a Hantken Miksa Alapítvány ajánlotta fel. A pályázók BSc/MSc és PhD kategóriában versenyeztek. Ez alkalommal mindkét kategóriában csak egy-egy első helyezést osztott ki a zsűri a jelentkezők kis létszáma miatt. A hallgatói kategória I. díját ANDA Tamás (ELTE) poszterbemutatása nyerte el. A PhD kategóriában SZABÓ Zoltán (ELTE) előadását találta a zsűri a legjobbnak.

A rendezvényt a Magyarhoni Földtani Társulat Őslénytani és Rétegtani Szakosztályának vezetősége szervezte FÖZY István elnök és SZIVES Ottilia titkár vezetésével.

Köszönjük a Magyar Természettudományi Múzeumnak, hogy rendelkezésünkre bocsátotta a helyszínt és az informatikai infrastruktúrát, továbbá hálásak vagyunk a Nemzeti Kulturális Alapnak és a Hantken Miksa Alapítványnak anyagi támogatásukért!

SZIVES Ottilia
titkár

In memoriam Lóczy Lajos, Balatonfüreden

2020. november 4.

Dr. LÓCZY Lajos geológus, geográfus akadémikus halálának 100. évfordulója alkalmából 2020. november 4-én a Magyarhoni Földtani Társulat és a Balatonfüredi Önkormányzat magyar juhar emlékfát ültetett és füredi mészkőből készült táblát avatott Balatonfüreden, a Tagore sétányon, Kisfaludy Sándor szobra mellett. CSERNY Tibor köszöntő beszédében méltatta a tudós szakmai pályafutásának legfontosabb eredményeit, és megemlékezett a Mester „A Balaton földrajzi és társadalmi állapotainak leírása” című összefoglaló kötete és a „Balaton tó környékének részletes földtani térképe (M=1:75 000)” megjelenésének 100. évfordulójáról is. Kiemelte, hogy 65 évvel ezelőtt alapították meg Balatonfüreden az ország egyetlen, LÓCZY Lajos nevét felvevő gimnáziumát, amely szintén idén ősszel ünnepelte a felújított iskolaépület átadását. Tolmácsolta a szervezők ószról elhalasztott, és 2021 tavaszára Balatonfüredre tervezett háromnapos ünnepi eseménysorozatra történő meghívását. Felhívta a figyelmet a 2020. évi Magyar Tudomány Ünnepe keretében az Akadémián megrendezésre kerülő „A Balaton kutatása LÓCZY Lajos nyomdokán” – könyvbemutatóval egybekötött emlékülésére is.

Az ünnepi megemlékezés végén az emléktáblánál koszorút helyeztek el a Balatonfüredi Önkormányzat nevében HÁRI Lenke és HOLCZER András alpolgármesterek, a Magyarhoni Földtani Társulat részéről CSERNY Tibor, az ELTE földtudományi tanszékeinek nevében MINDSZENTY Andrea, valamint a Lóczy Gimnázium képviselőjében PESUTHNÉ FERENCZ Zsuzsanna és a gimnázium tanulója.

Az eseményről hírt adott Balatonfüred honlapja és a Füred TV, az elhangzott köszöntő a Társulat honlapján olvasható.

CSERNY Tibor

**LÓCZY Lajos id. emlékezete a
Magyar Tudomány Ünnepe
(2020. november 11.)**

A Magyar Tudományos Akadémia Földtudományok Osztálya és a Magyarhoni Földtani Társulat 2020-ban LÓCZY Lajos, minden idők talán legkiemelkedőbb magyar geológusának és geográfusának emléke előtt tisztelgett a Magyar Tudomány Ünnepe, halálának 100. évfordulóján. A szakmai program BABINSZKI Edit (szerk.): *A Balaton kutatása Lóczy Lajos nyomdokán című*, az évfordulóra, a Magyarhoni Földtani Társulat kiadásában megjelent könyv ismertetésével kezdődött. Az ülésre a járványhelyzet miatt online formában, Zoom meeting keretében került sor. A programról készült összefoglaló ismertetés megtekinthető az MTA honlapján (<https://mta.hu/tudomanyunnepe2020/a-balaton-kutatasa-es-a-legnagyobb-magyar-geologus-is-tema-volt-a-magyar-tudomany-unnepe-111090>), ahonnan elérhető a rendezvényről készült videófelvétel is (<https://www.youtube.com/watch?v=36qpB0eKtIY&t=8450s>).

BUDAI Tamás (a Földtani Társulat elnöke) megnyitja után BABINSZKI Edit, a könyv szerkesztője ismertette a kötet felépítését és megszületésének történetét, kiemelve HORVÁTH Ferenc szerepét, aki megálmodta ezt a kiadványt, de megjelenését már nem érthette meg.

LÓCZY Lajos életét és munkásságát GÁBRIS Gyula ismertette, majd a halála óta eltelt időszak Balaton-kutatásának eredményeit sorakoztatták fel az előadók. FODOR László a Balaton-felvidék tektonikájáról beszélt, SZTANÓ Orsolya és MAGYAR Imre közértően magyarázta el a „nagy testvér”, a Pannon-tó és a Balaton kapcsolatát, ismertette a tó környékén megmaradt pannóniai üledékeket.

Az üledékes kőzetek mellett a környékbeli vulkánok egykori működése és annak termékei, a vulkáni magmás és törmelékes kőzetek voltak a témája HARANGI Szabolcs előadásának. SEBE Krisztina a felszínt koptató, erodáló szélnek a tóra és a környékére gyakorolt hatásáról adott elő, és kitért a tó keletkezésével kapcsolatos elméletekre is.

A környék földtana, geomorfológiája után következő előadások már magával a tóval foglalkoztak. PÓSFAL Mihály az alga-*virágzás és az ásványkiválások kapcsolatával foglalkozott, elemezte a szervesetlen környezetnek az élővilágra gyakorolt hatását.* VISNOVITZ Ferenc a Balaton iszapjában található gázok kimutatásának új, sekély geofizikai módszerét ismertette.

A rendhagyó előadóülést PÁLFY József zárszava keretezte. Az online ülést több mint 70-en követték a virtuális térben, közöttük FREUND Tamás, a Tudományos Akadémia elnöke, valamint LÓCZY Lajos leszármazottai is. A hallgatóság visszajelzései azt igazolják, hogy a kényszerű körülmények ellenére sikerült méltóképpen megemlékeznünk LÓCZY Lajosról és életművéről.

Piros Olga

Személyi hírek

Az október 23-i nemzeti ünnep alkalmából ÁDER János köztestületi elnök Magyar Arany Érdemkereszt kitüntetéssel adományozott Dr. SOLTÍ Gábornak a Kárpát-medencei Ökógazdálkodók Szövetsége és a Sárközy Péter Alapítvány a Biokultúráért kuratóriumi elnökének, a bio- és ökógazdálkodás Kárpát-medencei, illetve magyarországi meghonosítása, valamint fejlesztése érdekében végzett munkája elismeréseként.

Magyar Ezüst Érdemkereszt kitüntetéssel adományozott Dr. KOPEK Annamária, a Balaton-felvidéki Nemzeti Park Igazgatóság osztályvezetőjének a Balaton-felvidéki ökoturisztika és a természetvédelem területén végzett szervezőmunkája elismeréseként.

Gyászír

Fájdalommal tudatjuk, hogy Dr. VITÁLIS György tagtársunk november 3-án, egy hónappal 91. születésnapja után tragikus hirtelenséggel elhunyt.

Emléke szívünkben és munkáiban tovább él!

Tartalom — Contents

VALLNER Zsolt, BAJNAI David, PÁLFY József: A ciklussztratigráfia és az asztrokronológia korszerű módszerei és alkalmazásuk. — <i>Modern methods of cyclostratigraphy and astrochronology and their applications.</i>	489
PÓSPAI Mihály: A Balaton üledékének ásványai. — <i>Minerals in the sediments of Lake Balaton.</i>	511
MINDSZENTY Andrea: A magyarországi bauxitok kutatásának rövid története (1903–2020). — <i>The short history of exploration for bauxite reserves in Hungary (1903–2020).</i>	529
CZAUNER Brigitta, MÁDLNÉ SZÓNYI Judit: Szemelvények az elmúlt két évtized ELTE-n végzett medenceléptéki hidrogeológiai kutatásaiból. — <i>Short overview of basin-scale hydrogeological research conducted at ELTE in the last two decades.</i>	545
LEMBERKOVICS Viktor, KISS Károly, VÁRY Miklós, KISS Balázs, KOVÁCS Gábor: A jó, a rossz és a csúf? – avagy a szénhidrogén-kutatás dicső múltja, (még) létező jelene és bizonytalan jövője a Pannon-medencében – Szemle — <i>The good, the bad and the ugly? – or the past, the (still) existing present and the uncertain future of the hydrocarbon exploration in the Pannonian Basin – Review.</i>	571
Rövid közlemény	
KÖRMÖS, Sándor, LUKOCZKI, Georgina, SCHUBERT, Félix: <i>Indication of hydrocarbon migration in the Western Mecsek Mountains evidenced by fluid inclusion chemostratigraphy.</i>	611
Hírek, ismertetések (összeállította CSERNY Tibor)	615

