

MAGYAR GEOFIZIKA

HUNGARIAN GEOPHYSICS

A MAGYAR
GEOFIZIKUSOK
EGYESÜLETÉNEK
FOLYÓIRATA



JOURNAL OF THE
ASSOCIATION
OF HUNGARIAN
GEOPHYSICISTS

Köszöntés az ELGI könyvtárában

Szeniorkirándulás, 2012. szeptember 5.

Tisztelet az éveknek

Koppenhága, 2012

Az Alkalmazott Földtudományi Klaszter részvétele a 74. EAGE konferencián

EAGE Konferencia diákszemmel

Kőzetfizikai modell az akusztikus hiszterézis leírására

Édesvíztároló rétegek agyagtartalmának meghatározása fúrólýukszelvények faktoranalízise alapján

Modern hulladéklerakók aljzatszigetelési hibáinak kimutatása 3D modellezéssel

A forrás térbeli jellemzőinek a hatása a magnetotellurikus adatokra

A Bodai Agyagkő Formáció ciklusos felépítése lyukgeofizikai szelvények alapján

Hidrogeológiai célú geofizikai térképezés egy tihanyi maar-tó környezetében

In memoriam Pekár Dezső

Agocs-díj 2012

A Nemzeti Radioaktívhulladék-tároló (NRHT) első két kamrája kialakításának földtudományi, bányászati és technológiai eredményei

In memoriam: Kubina István
Gergő György

Bodri Gyula
Fabiánncsis László



MAGYAR GEOFIZIKA

HUNGARIAN GEOPHYSICS

53. évfolyam (2012) 2. szám



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

TARTALOM • CONTENTS

SZERKESZTŐSÉGI ROVAT • EDITORIAL

63 Köszöntés az ELGI könyvtárában (Pál Müller 80) – *Bodoky T., Jánvári J.*

MGE HÍREK • NEWS OF ASSOCIATION OF HUNGARIAN GEOPHYSICISTS

64 Szenior kirándulás, 2012. szeptember 5. (Excursion of Seniors, Sept. 5, 2012)

65 Tisztelet az éveknél (Members of honoured ages) – *Hegybíró Zs.*

EAGE HÍREK • NEWS OF ASSOCIATION OF EUROPEAN GEOSCIENTISTS AND ENGINEERS

68 Kopenhága, 2012 (74th EAGE Conference & Exhibition incorporating SPE EUROPEC 2012, Copenhagen) – *Törös E.*

69 Az Alkalmazott Földtudományi Klaszter részvétele a 74. EAGE konferencián és szakkiállításon (Participation of Applied Geoscience Cluster in the 74th EAGE Conference & Exhibition) – *Temesvári R.*

71 EAGE Konferencia diákszemmel (EAGE Conference from student's view) – *Kiss F.*

TANULMÁNYOK • PAPERS

73 Kőzetfizikai modell az akusztikus hiszterézis leírására (Petrophysical model for describing acoustic hysteresis) – *Dobróka M., Somogyiné Molnár J.*

80 Édesvíztároló rétegek agyagtartalmának meghatározása fúrólúkszervények faktoranalízise alapján (Shale content of freshwater formations estimated by factor analysis of borehole logs) – *Szabó N. P., Kormos K.*

91 Modern hulladéklerakók aljzatszigetelési hibáinak kimutatása 3D modellezéssel (3D model studies for detecting the barrier system punctures of modern waste site) – *Baracza M. K.*

99 A forrás térbeli jellemzőinek a hatása a magnetotellurikus adatokra (The effect of the spatial characteristics of the source on the magnetotelluric data) – *Prácser E.*

110 A Bodai Agyagkő Formáció ciklusos felépítése lyukgeofizikai szervények alapján (Cycle stratigraphic analysis of the Boda Claystone Formation by using high-resolution well log data) – *Halász A.*

120 Hidrogeológiai célú geofizikai térképezés egy tihanyi maar-tó környezetében (Geophysical measurements to understand the hydrogeology of the maar-lake setting of the Tihany Peninsula, Hungary) – *Tóth Á., Havril T., Mádlné Szőnyi J., Müller I.*

131 In memoriam Pekár Dezső (In memoriam Dezső Pekár) – *Szabó Z.*

HÍREK • NEWS

155 Agocs-díj 2012 (Agocs award 2012) – *Kis K.*

156 A Nemzeti Radioaktív Hulladék-tároló (NRHT) első két kamrája kialakításának földtudományi, bányászati és technológiai eredményei – *Hámos G.*

IN MEMORIAM

158 Kubina István – *Déry B.*

159 Bodri Gyula – *Kakas K., Károly T.*

160 Gergő György – *Biró J.*

160 Fabiáncsics László

MAGYAR GEOFIZIKA

HUNGARIAN GEOPHYSICS

53. évfolyam (2012) 2. szám

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

Főszerkesztő • Editor-in-Chief

DR. BODOKY TAMÁS

E-mail: bodoky.tamas@mfgi.hu

Szerkesztőbizottság • Editorial Board

DR. BARÁTH ISTVÁN, KAKAS KRISTÓF, DR. LENKEY LÁSZLÓ,

DR. PETHŐ GÁBOR, DR. SZARKA LÁSZLÓ, VERŐ LÁSZLÓ

Technikai szerkesztő • Technical Editor

HOCK GÁBOR

E-mail: hockg@t-online.hu



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

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

Kiadja a Magyar Geofizikusok Egyesülete
A kiadásért felel Király András

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

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

Készült: NestPress Kft., 1116 Budapest, Vegyész u. 17–25.
Felelős vezető: Fekete Iván

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

INDEX: 26 507
HU ISSN 0025-0120

Köszöntés az ELGI könyvtárában



Nemrég múlt 80 éve: 1932. május 7.-én született *Müller Pál* a Salgótarján közelében levő Baglyasalján. Volt intézetének ma is aktív és már nyugdíjas munkatársai augusztusban baráti összejövetelen köszöntötték kedves igazgatójukat, fejezték ki tiszteletüket és mondták el jókívánságaikat e kerek születésnap alkalmából. A csendes ünnepség a volt Eötvös Loránd Geofizikai Intézet könyvtárában volt.

Dr. Müller Pál 25 éven át (1965–1990) igazgatta a Magyar Állami Eötvös Loránd Geofizikai Intézetet. Az Intézet 105 éves fennállása alatt ő töltötte be leghosszabb ideig a legfőbb vezetői posztot. E negyedszázad intézeti történései, az intézet páratlan fejlődése, sikeres működése nagyon sok emléket idézett fel a résztvevőkben. A korszak történetét a volt munkatársak most készülnek az intézettörténet második kötetében publikálni.

Müller Pál elemibe Baglyasalján, középiskolába Salgótarjánban, geofizikus mérnöki szakra Dnyepetrovcskban járt. 1955-ben kitüntetéssel szerezte meg diplomáját. Először az ELGI-hez került, majd 1955 végén a Pécsi Uránbánya Vállalatnál helyezkedett el. Bakonyán dolgozott üzemi geofizikusként, majd a Mecseki Ércbányászati Vállalat főgeofizikusának nevezték ki. 1959-től 1960-ig Leningrádban, a Bányászati Főiskolán volt aspiráns, és megszerezte a Földtani (geofizikai) Tudományok kandidátusa fokozatot.

1965 január 1-jén bízták meg az ELGI vezetésével. Igazgatósága alatt az ELGI hazai és külföldi nyersanyagkutató-sai, módszer- és műszerfejlesztései, tudományos kutatásai, földtani-geofizikai intézményekkel, továbbá műszerfejlesztő és gyártó vállalatokkal folytatott együttműködése, hazai és nemzetközi kapcsolatai és elismertsége, gazdasági teljesítménye, létszáma, elhelyezése és felszereltsége töretlenül fejlődött. A ma már legendásnak számító korszak Müller igazgató akadályt nem ismerő irányításának és az ELGI kollektíva lelkes munkájának voltak köszönhetőek.

Négy évtized távlatából visszatekintve Müller Pál gazdasági vezetőként sokszor messze a saját kora előtt járt. Évek-re vagyunk még az „új gazdasági mechanizmus” hivatalos és később – sajnos – félúton elakadt reformtörekvéseitől, amikor az Intézetben bevezeti a határozottan teljesítményelvű, szigorú beszámoltatásokhoz kötött munka- és jutalmazási rendszert, és még senki sem hallott a ma már egyetemen oktatott, „mátrix rendszerű” szervezeti felépítésről, amikor az Intézet szakmai tevékenységében megvalósítja a vertikális intézeti hierarchia mellett működő horizontális, szervezeti egységeken átnyúló kutatási témarendszert. Mindkét újítása nagyon jól működött.

Müller Pál reális helyzetfelismerésének köszönhetően 1970-ben felépült az ELGI központi épülete. Ez az addig a város területén két tucat telephelyen szétszórt intézetnek koncentrált elhelyezését és egy számítóközpont megvalósítását, valamint speciális továbbfejlesztését is lehetővé tette. Ezek az intézet fejlődésére döntő hatással voltak.

Visszatekintve fontosnak látszik az a felismerése is, hogy a geofizika a terepi és műszerkutatói eredményeket rugalmasan hasznosító kis szériás műszergyártást is igényel. Impozáns volt az a térkép, amely mutatta, hogy a nyolcvanas évekre az ELGI a kontinensek többségére, rengeteg országba szállított berendezéseket. Ez is hozzájárult ahhoz, hogy az ELGI gárdája több országban végzett nyersanyagkutató és szakértői tevékenységet.

A magyar geofizika elismertségének csúcspontja is igazgatói működésének idejére esik, ennek tekinthetjük ugyanis azt, hogy 1985-ben a European Association of Exploration Geophysicists (a mai European Association of Geoscientists & Engineers) szimpóziumát Budapesten tartották. Ennek a nagy nemzetközi eseménynek a szervezését és lebonyolítását Molnár Károllyal, a Magyar Geofizikusok Egyesületének akkori elnökével közösen irányították.

Dr. Müller Pál nyugdíjba vonulása után is figyelemmel kísérte és segítette az ELGI és a magyar geofizika tevékenységét. Szeretnénk, ha számos unokájának patronálása mellett a továbbiakban is ugyanígy jutna ideje arra a kollektívára, amelynek életét sok-sok éven át oly lelkesen irányította.

Bodoky Tamás, Jánvári János

Szeniorkirándulás, 2012. szeptember 5.

Egyesületünk 2012. évi nyugdíjaskirándulásának célja Bábaapátiban, az alacsony aktivitású radioaktív hulladékok tározója volt, ahol a szakmai ismertetéseket a MECSEKÉRC Kft. kutatói és Nagy Zoltán, az RHK Kht. geofizikusa nyújtották.

Az ebédet Palatinca község vendéglőjében fogyasztották el, majd a kulturális programot a Zsolnay Kulturális Negyed szolgáltatta.

Írásbeli beszámolót a kirándulásról nem kaptunk, viszont érkezett néhány fénykép, ezekből közlünk néhányat.

Szerkesztőség



Tisztelet az éveknek

Kedves Kollégák!

Tizenöt éve indítottuk el rovatunkat, melyben a kerek születésnapos tagtársainkat köszöntjük. Örömmel tölt el, hogy a rovat változatlanul népszerű, és köszönöm, hogy szerkesztésében az érintettek is aktívan részt vesznek. Ezúton szeretném megköszönni a fényképek kíséretében küldött kedves üzeneteket.

Idén is változatlan szeretettel és tisztelettel köszöntöm kerek évfordulót megért kollégáinkat, egyesületünk ünne-

lő tagjait, számomra ismerősöket és ismeretleneket egyaránt. Kívánok mindannyiuknak jó egészséget, sok örömet, vidámságot, derűs hétköznapokat és boldog ünnepeket! Továbbra is szeretettel várjuk Önöket az egyesület rendezvényein, összejövetelein!

A Magyar Geofizikusok Egyesülete nevében
Hegybíró Zsuzsanna

Köszöntjük:

90. születésnapja alkalmából:

Jesch Aladár, Liszt Ferenc tagtársainkat,

85. születésnapja alkalmából:

Lakatos Sándor tagtársunkat,

80. születésnapja alkalmából:

Bagi Róbert, Gondozó György, Hajagos Béla, Laczkovics József, Majoros György, Miklós Gergely, Müller Pál, Pintér Anna, Polcz Iván, Szabó Istvánné, Szabó Zoltán, Tirkala Ferenc, Városi Alfréd, Zsille Antal tagtársainkat

75. születésnapja alkalmából:

Andrássy László, Müller Imre, Schönviszky László, Szalay István, Tóth Lajosné tagtársainkat,

70. születésnapja alkalmából:

Békés Tibor, Kiss Bertalan, Pleszkáts Tibor, Pongrácz János, Simon Pál, Szabados László, Varga Péter tagtársainkat



Jesch Aladár



Liszt Ferenc



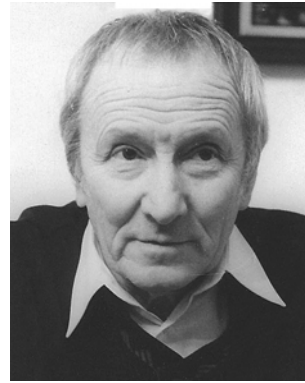
Lakatos Sándor



Bagi Róbert



Majoros György



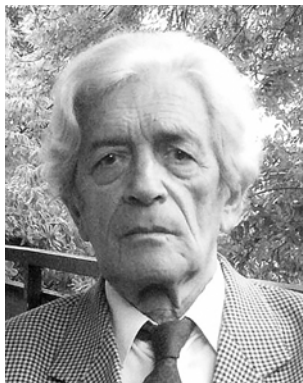
Miklós Gergely



Müller Pál



Pintér Anna



Polcz Iván



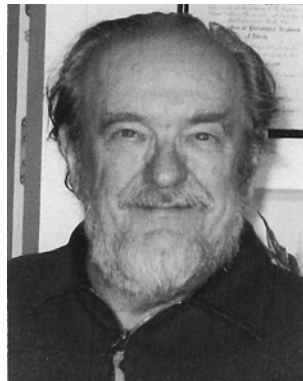
Szabó Zoltán



Zsille Antal



Andrásy László



Müller Imre



Schönviszky László



Szalay István



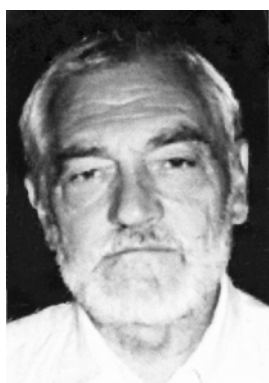
Kiss Bertalan



Pleszkáts Tibor



Simon Pál



Szabados László



Varga Péter

Koppenhága, 2012

74th EAGE Conference & Exhibition incorporating SPE EUROPEC 2012, Copenhagen

Már a címe is sok mindent elárul az EAGE szokásos éves konferenciájáról, ha meg részt is vesz rajta az ember, akkor még így két hónappal utána is tolnak az információk, amelyeket a résztvevő szívesen megosztana az olvasóval. Még ha a hazaiakat nézzük is, furcsa paradoxon, hogy felgyorsult világunkban el kell ide jönni, hogy egyes otthoni eseményekről ne maradjunk le... De menjünk sorjában és maradjunk a hazai vonatkozású híreknél!

A hagyományosan hazainak tekinthető kiállítók mellett találtunk egy újat is, az „Alkalmazott Földtudományi Klasztert”. Manapság önmagában nem hírértékű, hogy megalakul egy új gazdasági társaság, azonban itt több, a földtudományok egyes területein már bizonyított, korántsem nagy, többnyire K+F tevékenységet folytató cégek együttműködéséről van szó és így, ismerve az otthoni állapotokat, az ezen a piacon való megjelenésük feltétlenül megemléztető. Ha már eljön valaki kiállítani, egyéb módon is megmutatja magát, pl. szakmai előadást tart. Sajnos, hazai előadásokban nem bővelkedtünk, talán a klaszter tagokén és a következő cikkben olvasható egyetemista előadásán kívül másokét nem élvezhettük.



Hegybiró Zsuzsanna több éven keresztül az egyesület munkáját irányító EAGE Board tagja, „Membership and Cooperation Officer”



A Balkán Geofizikai Társulat kiállítási fülkéje előtt (jobbról Törös Endre)

Az EAGE nagy létszámú nemzetközi tudományos egyesülete mögött a hivatásos adminisztráció mellett egy egész sor, munkáját önkéntesen végző „elkötelezetten” végzi. Így volt *Hegybíró Zsuzsanna* több éven keresztül az egyesület munkáját irányító EAGE Board tagja, „Membership and Cooperation Officer”, aki nem vállalta tovább a nagy teherrel járó feladat elvégzést. Munkáját a többi leköszönő tisztségviselővel együtt egy kis ünnepség keretében köszönte meg az EAGE elnöksége. Köszönjük mi is, hogy önzetlen tevékenységével a hazai egyesület munkáját is elősegítette.

A tavalyi budapesti konferencia után már hazai vonatkozású hír az is, hogy találkoztunk a Balkán Geofizikai Társa-

ság jövő évi rendezvényének első megjelenésével. A fontosabb adatok: Tirana, október 7–10., az EAGE szponzorálásával kiadott szórólap szerint előadásokat ez év szeptember elsejétől lehet beküldeni jövő év április 30-ig. A regisztráció december elsejével nyílik. A konferenciának honlapja még nincs, de az EAGE honlapján már szerepel, mint támogatott rendezvény. A közvetlen kapcsolatfelvételhez a bgs.tirana.2013@gmail.com vagy az EAGE szokásos elérhetőségét találni a szórólapon.

Törös Endre

Az Alkalmazott Földtudományi Klaszter részvétele a 74. EAGE konferencián és szakkiállításon

Az Alkalmazott Földtudományi Klaszter első nemzetközi megjelenése a *74th EAGE Conference & Exhibition incorporating SPE EUROPEC 2012*, mérnökök és földtudományi szakemberek európai szövetsége által rendezett konferenciával egybekötött nemzetközi kiállítás volt 2012. június 4–7. között.

Az EAGE egy 1951-ben alapított, világszerte 15 000 tagot számláló szervezet, melynek tagjai földtudományokkal foglalkozó kutatók és mérnökök. A főbb szakterületek: geofizika, kőolajkutatás, geológia, bányászat és ehhez kapcsos-

ló mérnöki tevékenység. Két divíziója működik: olaj- és gáz-, illetve felszín közeli rétegek. Az évente megrendezésre kerülő program Európa legjelentősebb multidiszciplináris szakmai rendezvénye, kiváló alkalom a kapcsolatépítésre, új üzleti kapcsolatok kötésére és a klaszterszolgáltatások célközönségnek történő bemutatására.

A klaszter 4 fős küldöttség képviselőjében kiállítási pavilonnal volt jelen. A standon a klaszter tagjait és szolgáltatóit ismertető poszteren kívül 3 klasztertagunk külön poszterrel is képviseltette magát:



A klaszter kiállítási fülkéje



A GES kiállítási fülkéje

Mecsekérc Zrt., amelynek szakmai tevékenysége három területen tekinthető kiemelkedőnek: a környezetvédelmi tervezés, szakértés, kivitelezés, ellenőrző rendszerek üzemeltetése; bányászati tevékenységeket lefedő komplex kivitelezési tevékenység és radioaktív hulladékok felszín alatti elhelyezéséhez kapcsolódó szakértői, tervezői tevékenységek.

Karotázs Kft., amely 15 éve fontos szereplője a műszeres kútgeofizikai (karotázs-) méréseknek. Több kutatás-fejlesztés pályázaton szerepelt már sikeresen, és a napi munka mellett új mélyfúrás-geofizikai műszereket és elektromos impedancia mérésre szolgáló 8–256 csatornás berendezéseket (EIS, EIT) fejleszt.

Tomogeo Kft., amely a Kaposvári Egyetem Diagnosztikai és Onkoradiológiai Intézetével együttműködésben végzi tevékenységét a közvet CT-vizsgálatok fejlesztőjeként.

A *Geochem Kft.* reklámmal képviseltette magát, amelynek fő tevékenysége a kutatás-fejlesztés, mely leginkább a nagyon tömör és a konszolidálatlan anyagok komplex vizsgálatát, valamint speciális vizsgálóberendezések, eszközök fejlesztését célozza.

A standot látogatók számára a klaszter tevékenységét reklámozó CD-t osztogattak. A klaszter kiállításon való részvételéhez az Új Széchenyi Terv DDOP-1.1.3-11 számú, „Vállalati együttműködés és klaszterek támogatása” című pályázati forrása és a Nemzeti Külgazdasági Hivatal Kereskedelemfejlesztési pályázati támogatása járult hozzá.

Temesvári Rita

EAGE Konferencia diákszemmel

Koppenhágában június 4–8. között rendezték meg az idei EAGE Konferenciát és Kiállítást. Leedsi geofizikus mesterhallgatóként számomra kötelező volt a részvétel. Társaimmal már szeptember óta vártuk ezt a hetet – korábban egyikünk sem járt Koppenhágában –, de nem sejtettük, hogy életünk egyik legnagyobb élményében lesz részünk.

Két nappal a konferencia kezdete előtt érkezünk az esemény helyszínére, és a város azonnal büvükörébe ejtett minket. A dán fővárosban nincsenek ellenőrök, sem beléptető kapuk a metróállomásokon. Feltételezik ugyanis, hogy mindenki érvényes jeggyel utazik! Autóval alig találkozni: a város lakosainak többsége biciklivel közlekedik, és még a bukósisakot sem szégyellik. Ez az a város, ahol az apukák babakocsit tolva kocognak vasárnap délután a parkban...

A hétvégi városnézés során eljutottunk Európa első csillagászati obszervatóriumába is, ahol annak idején Tycho de Brache is dolgozott, ami már önmagában különleges élmény volt számomra, tekintve hogy földtudományi tanulmányaim kezdetén még csillagásznak készültem.

A program június 4-én, hétfő este állófogadással kezdődött, ami kiváló lehetőséget nyújtott a kapcsolatépítésre, korunkbeli szakmabeliekkel és munkaadókkal való kötetlen beszélgetésre.

A következő három nap során – reggel fél kilenctől délután ötig – a szakma legkiválóbbjai tartottak előadásokat és

poszterbemutatókat, egy időben több mint tíz teremben. Egyetemi hallgatóként némelyik prezentációt nehéz volt követnem, néhány viszont új információkkal szolgált a szakdolgozatomhoz. Egy-egy előadás után arra is volt lehetőség, hogy személyesen, négy szemközt tegyük fel kérdéseinket, kérjünk újabb anyagokat az előadóktól. Már amennyiben nem voltunk elég bátrak ahhoz, hogy a nagyközönség előtt tegyük ugyanezt... Ha nem is értettem mindent, azt mindenféleképpen érdekes volt látni, melyek azok a területek, amelyeken jelenleg a legintenzívebb kutatás-fejlesztés folyik, s melyek azok a legfontosabb problémák, amelyek ma még megoldatlanok az alkalmazott geofizikán belül. Arról nem is beszélve, hogy a szakdolgozatvédesemre és saját poszterbemutatómra készülve milyen hasznos volt, hogy láthatam, hogyan csinálják mindezt a már tapasztalt előadók.

A hét legélvezetesebb óráit a diákprogramok tartogatták, melyek az előadásokkal párhuzamosan zajlottak. Így a GeoQuiz geológus és geofizikus vetélkedő, amelyen háromfős csapatok mérhették össze tudásukat. Az induló 27 csapatból 8 jutott be a döntő fordulóba, köztük harmadik helyen az a csapat is, melyet egy angol csoporttársnőmmel és egy argentin csoporttársammal együtt alkottunk. A verseny láthatóan nem csak a diákok számára volt érdekes, a döntőre ugyanis hatalmas közönség gyűlt össze. Többen odajöttek hozzánk, hogy sok sikert kívánjanak. Végül egy izgalmas,



Hegybíró Zsuzsanna búcsúzik tiszttségéből



Törös Endre dr. a konferenciáról üdvözlí a *Magyar Geofizika* olvasóit

fej-fej melletti verseny után az első helyen végeztünk, és mindhárman egy-egy fényképezőgéppel lettünk gazdagabbak. A második és harmadik helyezettekkel sem bántak szűkmarkúan a rendezők, ők e-book-olvasót vihettek haza.

A legnépszerűbb program vitathatatlanul a – Dániában szinte kötelező – Lego-építő verseny volt: Lego-darabokból kellett olajfúrótornyot építeni. A látványosnál látványosabb platformok, hűen tükrözték a tervezők nemzetiségét. A brit létesítményről nem maradhatott le a foci pálya a munkások egészséges kikapcsolódását biztosítandó, és a torony melletti szeizmikus mérőhajót maga a Loch Nessből az Északi-tengerbe szabadult Nessi támadása fenyegette. Az orosz torony tetején vörös csillag díszelgett, és pillanatok alatt megépült a Barátság vezeték az ukrán platform irányába. Ez utóbbit kellemes kelet-európai káosz jellemezte, míg a kanadaiak mérnöki precizitású remekművet hoztak létre.

A Lego-építésnél komolyabb szakmai diákprogramok közé tartoztak a diák-poszterbemutatók, a vezetett séták a kiállításon és az ún. *Recruitment Café*. Itt körforgásos rendszerben minden részt vevő egyetemi hallgatónak öt perce volt arra, hogy meggyőzze az adott cég képviselőjét: érdemes továbbvinni az állásjelentkezését. Vagy tíz cég vett részt ezen a rendezvényen, kisvállalatoktól kezdve akkora óriásokig, mint a Shell vagy a Schlumberger. Hogy a vállalatok tényleg komolyan veszik az eseményt, bizonyíték: nem egy csoporttársam kapott állásajánlatot a konferencia után.

A tanulók számára rendezett program csúcspontja a *Student Evening* volt egy kellemes, tengerre néző szórakozóhelyen, közel a Koppenhága védjegyeként szolgáló Kis Hableány szoborhoz. Bár a szobor maga rendkívüli csalódást okozott: szembesültem vele, hogy a Hableálynak lábai vannak, azért az este emlék marad.

A különböző programok mellett a kiállítás egész héten várta a résztvevőket, és rendkívül jó kapcsolatépítési lehetőségeket biztosított. A több mint száz standnál lehetőség nyílt olyan kisebb cégeket is megismerni, amelyekről nem feltétlenül hallunk, mert a szaklapok nincsenek tele a hirdetésekkel. A különböző reklámajándékok között néha nagyon hasznosakat is találni. Idén minden bizonnyal a Saudi Aramco standja volt a kedvenc, ahol 8 gigabájtos pendrive-okat osztogattak az arra járóknak. Legalábbis az uraknak, a hölgyeknek zsebtükörrel kellett beérniük... A GES standnál „zsákmányolt” Unicum pedig már tényleg csak „a hab volt a tortán”...

A konferencia rengeteg élménnyel szolgált, s bár egy nagyon kimerítő tanév után fáradtan érkeztem, megerősített abban, hogy geofizikusnak lenni a legjobb dolog a világon, és óriási lelkesedéssel tértem vissza Aberdeenbe, hogy a nyarat szakdolgozatírással töltssem.

Köszönet *Horváth Ferenc* volt tanszékvezetőnek és az ELTE összes tanárának, akik támogattak abban, hogy külföldön folytassam a tanulmányaimat. Nélkülük ebben sohasem lett volna részem ebben a szakmai és emberi élményben.

Kiss Fanny

Kőzetfizikai modell az akusztikus hiszterézis leírására

DOBRÓKA MIHÁLY^{1,2,*}, SOMOGYINÉ MOLNÁR JUDIT¹

¹Miskolci Egyetem, Geofizikai Intézeti Tanszék, 3515 Miskolc-Egyetemváros

²MTA–ME Műszaki Földtudományi Kutatócsoport, 3515 Miskolc-Egyetemváros

*E-mail: dobroka@uni-miskolc.hu

Közismert, hogy a kőzetekben terjedő akusztikus hullám sebessége nemlineáris kapcsolatban áll a nyomással, és a kőzetek kvázisztatikus rugalmas tulajdonságai hiszterézist mutatnak. A hiszterézis jelenségének jellemzése azért fontos, hogy a fluidumok kitermelési folyamata során a tárolók mechanikai tulajdonságait jobban megértsük. A cikkben új kőzetfizikai modellt mutatunk be, mely leírja az akusztikus hiszterézist. A modell megadja az akusztikus hullám terjedési sebessége és a kőzetnyomás közti kapcsolatot mind fel- és leterhelési szakasz esetén. A modell (a nemzetközi irodalomban is elfogadott) alapelve, hogy a kőzetekben a felterhelés során bezáródott mikrorepedések újra kinyílnak a leterhelés során. A modellt szénhidrogén-kutató fúrásokból származó kőzetmintákon mért longitudinális hullámsebesség-adatrendszeren alkalmaztuk. A mérések során az impulzusátviteli módszert használtuk. A mérések különböző nyomáson történtek, és a modellparamétereket linearizált inverziós módszerrel határoztuk meg. Az inverziós eljárás keretében számított adatok jól illeszkednek a mért adatokhoz, ami azt bizonyítja, hogy az akusztikus hiszterézist leíró új kőzetfizikai modell a gyakorlatban jól alkalmazható.

Dobróka, M., Somogyi Molnár, J.: Petrophysical model for describing acoustic hysteresis

It is well known that the change of acoustic wave velocity propagating in rocks is nonlinear with respect to pressure and the quasistatic elastic properties of rocks are hysteretic. Characterization of hysteretic behaviour is important for a mechanical understanding of characteristics of reservoirs during depletion. In this paper a petrophysical model is presented which describes the acoustic hysteresis. The model provides the connection between the propagation velocity of acoustic wave and rock pressure both in case of pressurization and depressurization cycles. The model is based on the idea (accepted in the literature) that the microcracks in rocks close during pressurization and reopen during depressurization. The model was applied to acoustic P wave velocity data sets measured on core samples originated from oil-drilling wells. During the measurements the pulse transmission technique was used. Measurements were carried out at various incremental pressures and the model parameters were determined by linearized inversion methods. The calculated data in the inversion procedure matched accurately with measured data proving that the new rock physical model describing acoustic hysteresis applies well in practice.

Beérkezett: 2012. május 10.; *elfogadva:* 2012. augusztus 3.

Bevezetés

A Föld belső szerkezetéről, fizikai állapotáról főként szeizmikus adatok révén nyerünk információt. A szeizmikus/akusztikus hullámterjedés jellemzői a kőzetek fontos mechanikai tulajdonságairól hordoznak információt, ezért a kőzetparaméterek laboratóriumi és in situ vizsgálatában az akusztikus hullám sebességének meghatározása gyakori feladat. A szeizmikus adatok értelmezésénél jelentős szerepet játszik egy adott fizikai környezetben (nyomásállapot) lévő kőzetmintán

laboratóriumban mért szeizmikus/akusztikus tulajdonságok extrapolálása, ezért az akusztikus hullámsebesség nyomásfüggésének laboratóriumban történő tanulmányozása fontos információval szolgál a szeizmikus mérési adatok értelmezéséhez. A kutatók a kőzetekben terjedő akusztikus hullám sebességét különböző módon, illetve pórusnyomás alkalmazása mellett több évtizede tanulmányozzák. Közismert, hogy a hullámsebesség növekvő nyomás mellett nő, amit számos kutató a kőzetekben lévő mikrorepedések nyomás alatti bezáródásával magyaráz (Somogyiné Molnár, Dobróka 2011).

A kőzetekben terjedő akusztikus hullám sebessége a nyomás nemlineáris függvénye, és a kőzetek kvázisztatikus rugalmas tulajdonságai ún. akusztikus hiszterézist mutatnak (a kőzetet a mechanikai felterhelés, ill. a leterhelés során eltérő hullámterjedési sebesség jellemzi). A hiszterézis jelenségének megismerése lényeges pl. a rezervoármechanika (a szénhidrogén-kitermelés során a tárolók mechanikai tulajdonságainak megértése) és az építőmérnöki mérések (az út alapjának vibrációs tömörítésének folyamata, valamint hidak ívszerkezetének süllyedésének vizsgálata) gyakorlatában (Rudenko, Robsman 2004). Az akusztikus hiszterézis laboratóriumban történő vizsgálata gyakori feladat (Jones, Wang 1981, Ji et al. 2002). A hiszterézis jelensége a mikrorepedések irreverzibilis záródásával (Birch 1960), a pórus-térfogat irreverzibilis csökkenésével (Jones, Wang 1981), valamint a kőzetben lévő kötőanyagok nemlineáris viselkedésével (Hill 1963, Hashin, Shtrikman 1963) magyarázható. A mikrorepedések irreverzibilis záródásának elképzelése szerint a felterhelés során bezáródott mikrorepedések a kőzetben nem nyílnak ki újra maradéktalanul a leterhelési szakaszban. Egy másik elgondolás (Jones, Wang 1981) alapján a magas nyomásértékek mellett a felterhelés során záródott pórusok a leterhelési ciklusban kis nyomásértékeknél már nem veszik fel az eredeti alakjukat és méretüket. Ez a folyamat inkább agyagos kőzetekben játszódik le, melyekben nem jellemzőek a jól körülhatárolható mikrorepedések (Scholz, Kranz 1974). A kőzetekben terjedő rugalmas hullámok sebessége a kőzetalkotó ásványok és kötőanyagok (kőzetváz) típusától, mennyiségétől és struktúrájától, a kőzet porozitásának mértékétől, a póruskitöltő anyagok fajtájától, mennyiségétől valamint a mikrorepedezettségtől is függ. Mikrorepedések és szemcsék környezetében képlékeny ásványok (például klorit, szericit vagy szerpetin) ágyazódhatnak be, ami megváltoztatja a kőzet rugalmas tulajdonságait. A kőzetben lévő szemcsék ugyanis tökéletesen rugalmas testként viselkednek, míg a szemcsék közti kötőanyagok gyakran nemlineárisan rugalmas tulajdonságot mutatnak. Ennek eredményeképpen a kőzet nemlineáris rugalmas viselkedést, hiszterézist mutat.

A kőzetekben terjedő akusztikus hullámsebesség nemlineáris kapcsolatban van a kőzetre ható nyomással (Yu et al. 1993, Best 1997). A nyomás–sebesség kapcsolat exponenciális függvénnyel jellemezhető legjobban (Wang et al. 2005, Singh et al. 2006). Számos empirikus modell létezik a longitudinális sebesség nyomásfüggésének jellemzésére, azonban ezek rendszerint egy alkalmasan választott formula paramétereinek matematikai regressziós eljárás alapján meghatározását adják, fizikai magyarázattal nem szolgálnak a nyomás–sebesség kapcsolatára (Wepfer, Christensen 1991, Ji et al. 2007). Laboratóriumi mérési adatok megfelelő értelmezéséhez olyan kvantitatív modell megalkotására van szükség, amely fizikai magyarázatot is ad a jelenségre. A jelen dolgozatban olyan kőzetfizikai modellt mutatunk be, mely megadja az akusztikus hullám terjedési sebessége és a kőzetnyomás közti kapcsolatot mind fel- és leterhelési szakasz esetén, azaz sikeresen írja le és egyben magyarázatot ad az akusztikus hiszterézisre is.

A nyomásfüggő sebesség modellje a felterhelési szakasz leírására

A hullámsebesség növekvő nyomás melletti növekedésének közismert jelenségét számos kőzetfizikai tanulmány vizsgálja. A nyomásfüggés jelenségének egyik legelfogadottabb kvalitatív magyarázata a növekvő nyomás hatására a kőzetben lévő mikrorepedések záródása (Walsh, Brace 1964). Erre a képre alapozva Somogyi Molnár és Dobróka (2011) kőzetfizikai modellt dolgozott ki az akusztikus hullámterjedési sebesség nyomásfüggésének kvantitatív leírására a felterhelési szakaszon. Ezt a modellt általánosítva a leterhelési szakaszra a hiszterézis jelensége egzaktul leírhatóvá válik.

Vezessük be a (nyitott) mikrorepedések térfogategységre vonatkozó számát (N)! A felterhelési szakaszra kidolgozott kőzetfizikai modell alapfeltevése, hogy a kőzetben $d\sigma$ nyomásnövekedés hatására a nyitott mikrorepedések számában bekövetkezett dN változás (a bezárt mikrorepedések száma) egyenesen arányos a $d\sigma$ nyomásnövekménnyel és a még nyitott mikrorepedések számával. A két alapfeltevést egyesíthetjük egy differenciálegyenletben

$$dN = \lambda N d\sigma, \quad (1)$$

melynek megoldása $N = N_0 \exp(-\lambda \sigma)$, ahol λ egy, az anyagra jellemző új kőzetfizikai paraméter, N_0 a feszültségmentes állapotban ($\sigma = 0$) nyitott repedések száma. A negatív előjel azt fejezi ki, hogy növekvő feszültségnél a repedések bezáródásával a nyitott mikrorepedések száma csökken.

A $d\sigma$ nyomásváltozás hatására a terjedési sebességben bekövetkező dv változás és a bezáruló mikrorepedések dN száma között egyenes arányosságot feltételezünk

$$dv = -\alpha dN, \quad (2)$$

ahol α arányossági tényező (anyagi minőségtől függő konstans), a negatív előjel pedig azt fejezi ki, hogy a sebesség csökkenő repedésszám esetén növekszik. Együttesen megoldva az (1) és (2) egyenleteket a longitudinális hullámsebesség nyomásfüggését leíró modellt kapjuk a felterhelési szakaszra (Somogyiné Molnár, Dobróka 2011)

$$v = v_0 + \Delta v_0 \{1 - \exp(-\lambda \sigma)\}, \quad (3)$$

ahol v_0 a kőzetben terjedő rugalmas hullám sebessége terheletlen állapotban ($\sigma = 0$) és Δv_0 egy új kőzetfizikai állandó (Dobróka, Somogyi Molnár 2012a). A modell keretében a terjedési sebesség a terhelésmentes állapottól (v_0) a nagy kőzetnyomással jellemzett állapotig ($v_{\max} = v_0 + \Delta v_0$) változhat, ahol az összes mikrorepedés zárva van. Tehát a Δv_0 állandót tekinthetjük a kőzetben terheletlen állapotban lévő mikrorepedések által okozott sebességesésnek (Ji et al. 2007). A λ anyagjellemző paraméter fizikai jelentése kétféleképpen is megadható. A $\Delta v = v_{\max} - v$ jelölés (a mikrorepedések jelenléte által okozott sebességesés σ nyomásnál) bevezetésével a (3) egyenlet így is felírható:

$$\Delta v = \Delta v_0 \exp(-\lambda \sigma). \quad (4)$$

Láthatjuk, hogy a σ^* karakterisztikus nyomásnál (ahol $\lambda \sigma^* = 1$) a Δv mennyiség a „kezdeti” Δv_0 értékéről az 1/e-ed részére csökken. A λ petrofizikai jellemző tehát a karakterisztikus nyomás reciproka (Dobróka, Somogyi Molnár 2012b). A λ paraméternek másik jelentést is adhatunk. A tapasztalat azt mutatja, hogy a különböző kőzetek eltérő mértékben „reagálnak” a kőzetnyomás változására, azaz különböző a sebesség nyomásérzékenysége. Az ún. érzékenységi függvényeket gyakran alkalmazzák a szeizmikus (Dobróka 1987, 1988), geoelektromos (Gyulai 1989), elektromágneses (Szalai, Szarka 2008) gyakorlatban, valamint a mélyfúrás geofizika (Dobróka, Szabó 2011) területén. Ennek mintájára vezessük be az $\Delta v = v_{\max} - v$ sebességés (logaritmikus) nyomásérzékenységet az

$$S(\sigma) = -\frac{1}{\Delta v} \frac{d\Delta v}{d\sigma} = -\frac{d \ln(\Delta v)}{d\sigma}.$$

Látható, hogy a (4) egyenlet alapján

$$\lambda = -\frac{d \ln(\Delta v)}{d\sigma} = S,$$

azaz a λ kőzetfizikai anyagjellemző a $\Delta v = v_{\max} - v$ sebességés logaritmikus nyomásérzékenysége, amely nem függ a nyomástól.

A bemutatott modell longitudinális akusztikus hullámokra egytengelyű terhelés esetén az elasztikus tartományban érvényes. Nagy feszültségek tartományában a kőzetben új mikrorepedések is keletkezhetnek, amit a mérések során azazl igyekeztünk elkerülni, hogy a kőzetmintákat csupán a törőszilárdság 20–30%-áig terheljük annak érdekében, hogy a reverzibilis tartományban maradjunk. A tartomány átlépésekor az ún. kritikus nyomást (Anselmetti, Eberli 1997) meghaladva, a minta roncsolódása miatt a terhelés hatására új repedések nyílnak, és a mérhető szeizmikus sebesség (a nyomás növekedésével) csökken. Ez a jelenség kívül esik vizsgálatainkon, leírására más modell megalkotása szükséges.

A nyomásfüggő sebesség modell a leterhelési szakasz leírására

A leterhelési szakasz jellemzéséhez bevezetjük a zárt mikrorepedések számát (n), amely előáll a kőzetben nyomásmentes állapotban lévő nyitott mikrorepedések N_0 számának és adott nyomásérték melletti nyitott mikrorepedések N számának a különbsége: $n = N_0 - N$. Ha egy felterhelt állapotban lévő kőzetmintán egy maximális σ_m nyomásértékről csökkentjük a nyomást, a zárt mikrorepedések újra elkezdnek kinyílni, így csökkenő hullámsebesség mérhető. A kőzetfizikai modell alapfeltételezéseként kijelentjük, hogy a zárt mikrorepedések számában bekövetkező változás (dn) egyenesen arányos a zárt mikrorepedések számával (n) és az alkalmazott $d\sigma$ nyomáscsökkenéssel

$$dn = \lambda' n d\sigma, \quad (5)$$

ahol λ' egy, a már bevezetett λ paramétertől különböző, az anyagra jellemző új kőzetfizikai paraméter. A fenti differenciálegyenletet megoldva

$$n = n_m \exp\{-\lambda'(\sigma_m - \sigma)\}, \quad (6)$$

ahol n_m a zárt mikrorepedések száma az alkalmazott maximális nyomás (σ_m) esetében. A (2) egyenletet a leterhelési szakaszra változatlan formában érvényesnek tekintjük, hiszen a sebességváltozás szempontjából csak a mikrorepedések számának változása lényeges, függetlenül attól, hogy milyen okból történt a változás. Az (5) és (6) egyenletek együttes megoldása a $dN = -dn$ formula felhasználása mellett

$$v = v_m - \alpha n_m [1 - \exp\{-\lambda'(\sigma_m - \sigma)\}] \quad (7)$$

adódik, ahol v_m az alkalmazott maximális nyomás mellett mérhető sebesség. Az $\alpha n_m = \Delta v_m$ jelölést alkalmazva megkapjuk a leterhelési szakaszra érvényes, a longitudinális hullámsebesség nyomásfüggését leíró modellegyenletet

$$v = v_m - \Delta v_m [1 - \exp\{-\lambda'(\sigma_m - \sigma)\}]. \quad (8)$$

A (7) egyenlet maximális nyomásértéknél (σ_m) a mérhető terjedési sebességet (v_m) adja, míg $\sigma = 0$ esetén a $v(0) = v_1$ jelölést alkalmazva

$$v_1 = v_m - \alpha n_m [1 - \exp(-\lambda' \sigma_m)]$$

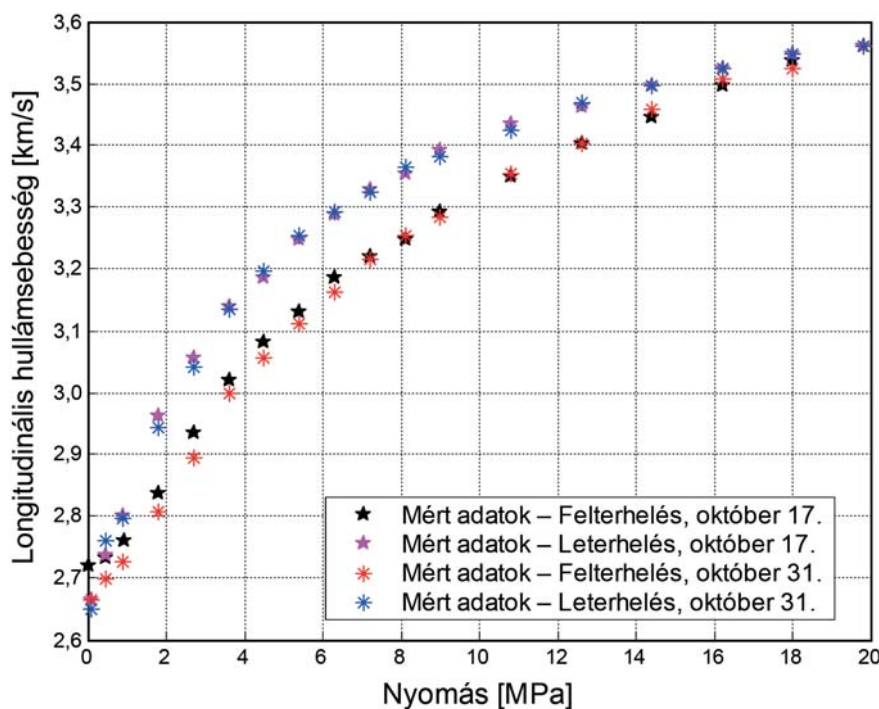
adódik. Bevezetve a $\Delta v_1 = -\alpha n_m \exp(-\lambda' \sigma_m)$ formulát, a (8) egyenlet a leterhelési szakaszt leíró modellegyenletet adja vissza

$$v = v_1 + \Delta v_1 [1 - \exp(-\lambda' \sigma)]. \quad (9)$$

Az akusztikus hiszterézis bemutatása laboratóriumban mért hullámsebesség-adatok alapján

Azért, hogy a kőzetfizikai modellek gyakorlatban való alkalmazhatóságát igazoljuk, a modelleket laboratóriumban mért akusztikus sebességadatokon teszteltük. Az akusztikus hullám terjedési sebességét az impulzusátviteli módszerrel mértük (Toksöz et al. 1979). A kőzetmintákat egytengelyű terhelés alatt vizsgáltuk a ME Bányászati és Geotechnikai Tanszékének elektromechanikus anyagvizsgáló berendezésével. A terhelés változtatása mind felterhelés, mind leterhelés alatt kis lépésekben (1 kN) történt, és minden nyomáson megmértük a terjedési időt. A kőzetminták törési szilárdságai ismertek voltak a mérések során, melyeket nem közelítettük meg, nehogy újabb repedéseket okozzunk a kőzetmintákban. A mérések során az eltérő törési szilárdság következtében mintánként eltérő volt a maximális terhelés értéke. A mérések során számos különböző kőzetminta (melyből kettőt mutatunk be a cikkben) nyomásfüggő longitudinális sebességét határoztuk meg.

A mérési berendezés és a kísérletek megbízhatóságát jellemző fontos kérdés a mérések reprodukálhatósága. Ezért az



1. ábra | Ismételt mérések eredménye az A jelű kőzetminta esetében a hiszterézis reprodukálhatóságának vizsgálatának céljából
Figure 1 | Results of repeated measurements of sample A for studying reproducibility of hysteresis

A jelű minta esetében megismételtük a mérést. Az eredményt az 1. ábra mutatja, melyen látható, hogy a második mérés igen jó közelítéssel egyező eredményt adott, tehát a jelenség jól reprodukálható.

Az ábra alapján egyben azt is megállapíthatjuk, hogy a fel- és leterhelési görbék között szignifikáns eltérés mutatkozik. Birch (1960) nyomán az akusztikus hiszterézis magyarázataként azt az egyszerű képet fogadjuk el, hogy a felterhelési szakaszban bezárult mikrorepedések a terhelés csökkentésével (a leterhelési szakaszban) nem nyílnak meg maradéktalanul, egy bizonyos irreverzibilitás mindig jelen van. Ennek következtében a leterhelési szakaszban kevesebb a nyitott mikrorepedés, mint azonos nyomásnál a felterhelési szakaszban, azaz a terjedési sebesség nagyobb. A kőzetfizikai modellekben ezt az irreverzibilitást a két különböző λ paraméter fejezi ki.

A hiszterézisről az előzőekben mondottak alapján azt váránk, hogy a leterhelési szakasz végén (zérus nyomásnál) is vannak zárva maradt mikrorepedések, azaz a sebesség nagyobb, mint a felterhelési szakasz kezdetén. Ezzel szemben azt láthatjuk, hogy a leterhelési görbe a kis feszültségek tartományában metszi a felterhelési görbét, az alá esik (az egyes mintáknál eltérő mértékben). Annak ellenére, hogy a mérés kezdetén már közelítőleg ismert volt a minta törőszilárdsága (melynek megközelítőleg 20–30%-áig terheljük a próbatesteket, hogy a rugalmas tartományban maradjunk) a mérések tanúsága szerint kis mértékben ugyan, de túllépünk a linearitás tartományán, és ezzel új mikrorepedéseket hoztunk létre a kőzetmintában. A mérési nyomástartomány csökkentésével elkerülhető lett volna a hiszterézis jelensé-

gének tanulmányozását „zavaró” új mikrorepedések létrehozása, de ekkor a sebesség–nyomás kapcsolatának vizsgálata is csupán egy szűkebb terhelési tartományban történhetett volna, ami csökkentette volna a gyakorlat számára releváns következtetések levonásának esélyét.

A kőzetmodellek alkalmazása mért adatrendszeren

A fentiekben bevezetett kőzetfizikai modellek megteremtik annak a lehetőségét, hogy a kőzet ($v_0, \Delta v, \lambda, v_0', \Delta v', \lambda'$) paramétereinek ismeretében a (3) és (8) egyenlet segítségével tetszőleges nyomásnál meg tudjuk határozni a terjedési sebességértékeket külön le- és felterhelési szakasz esetén. A geofizikai inverzió terminológiájával fogalmazva ezek az egyenletek a direkt feladat megoldását jelentik. A kőzetfizikai modellekben szereplő modellparamétereket laboratóriumi mérési adatok alapján linearizált inverziós eljárásokkal (Menke 1984) határoztuk meg. Mivel az adatrendszerek kismértékű zajt tartalmaztak, és az inverz probléma jelentősen túlhatározott, a paraméterek meghatározására a legki-

1. táblázat. | A vizsgált kőzetminták leírása

Minta	Leírás
B	Finom, középszemcsés homokkő
C	Finomszemcsés homokkő

2. táblázat. Akusztikus terjedési sebességadatok inverziós feldolgozása alapján kapott modellegyenletek

Minta	Felterhelési szakasz	Leterhelési szakasz
B	$v = 2,69 + 0,96 \{1 - \exp(-0,1094 \sigma)\}$	$v = 2,69 + 0,89 \{1 - \exp(-0,1889 \sigma)\}$
C	$v = 2,60 + 0,86 \{1 - \exp(-0,1334 \sigma)\}$	$v = 2,56 + 0,81 \{1 - \exp(-0,2988 \sigma)\}$

sebb négyzetek módszerét alkalmaztuk. A cikkben két kiválasztott közetminta adatainak inverziós feldolgozását mutatjuk be. A minták jellemzőit az 1. táblázat tartalmazza.

A mintákon mért akusztikus terjedési sebesség adatrendszerek inverziós feldolgozásával határoztunk meg a modellparamétereket. A paraméterek ismeretében a (3) és (9) formulák segítségével felírhatóak a mintákra vonatkozó modellegyenletek külön a fel- és leterhelési szakaszokra (2. táblázat).

Az egyenletekkel tetszőleges nyomáson számíthatunk terjedési sebességértékeket. A számított és mért értékeket a 2-3. ábrán láthatjuk. Az ábrákon a folytonos vonalak a számított sebesség–nyomás függvényeket mutatják fel- és leterhelési szakasz esetén, míg a mérési adatokat a szimbólumok szemléltetik.

Az ábrák alapján megállapíthatjuk, hogy a számított adatok jól illeszkednek a mért adatokhoz, ami bizonyítja, hogy a kőzetfizikai modellek a gyakorlatban jól használhatóak. A modellegyenletek egyaránt jól jellemzik a fel- és leterhelési szakaszt. A görbéken jól látható az akusztikus hiszterézis jelensége. A kőzetfizikai modelleket számos közetminta esetében tesztelve hasonlóan jó egyezést kaptunk.

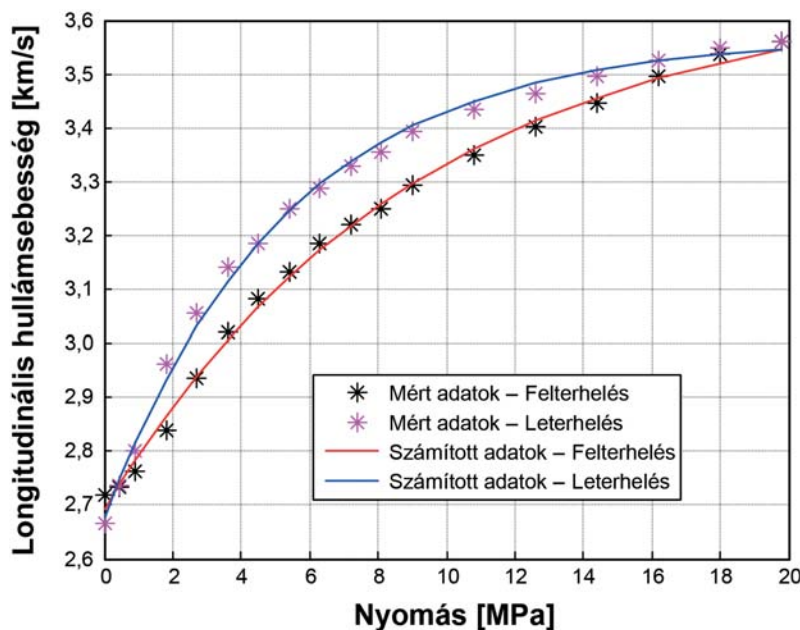
Az eljárás pontosságának jellemzése érdekében adattérbeli illeszkedési hibát (Somogyi Molnár, Dobróka 2011) számoltunk:

$$D = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \left(\frac{d_k^{(m)} - d_k^{(sz)}}{d_k^{(sz)}} \right)^2} \cdot 100 [\%],$$

ahol $d_k^{(m)}, d_k^{(sz)}$ a k -adik nyomásérték mellett mért, ill. számított terjedési sebesség. Az inverziós eljárás a B jelű mintára 0,48%, míg a C jelű minta esetében 0,66% illeszkedési hibát adott. Ezek az eredmények alátámasztják az inverziós paraméterbecslés pontosságát és megerősítik a kifejlesztett kőzetfizikai modellek alkalmazhatóságát.

Összefoglalás

A cikkben olyan kőzetfizikai modellt mutattunk be, mely megadja a kőzetnyomás és az akusztikus hullám terjedési sebességének kapcsolatát mind a fel- és leterhelési szakasz esetén, azaz sikeresen írja le és egyben magyarázatot is ad az akusztikus hiszterézisre is. A felterhelési szakaszban a terjedési sebesség a nyomás növekedésével nő. A növekedés üteme kis nyomásértékeknél nagy, azonban nagy nyomásértékek esetén a növekedés üteme csökken, mivel egyre kevesebb a nyitott mikrorepedés. A felterhelési szakaszban bezárt mikrorepedések a terhelés csökkentésével, a leterhelési szakaszban nem nyílnak meg maradéktalanul, egy bizonyos irreverzibilitás mindig jelen van. E fizikai elvből kiindulva

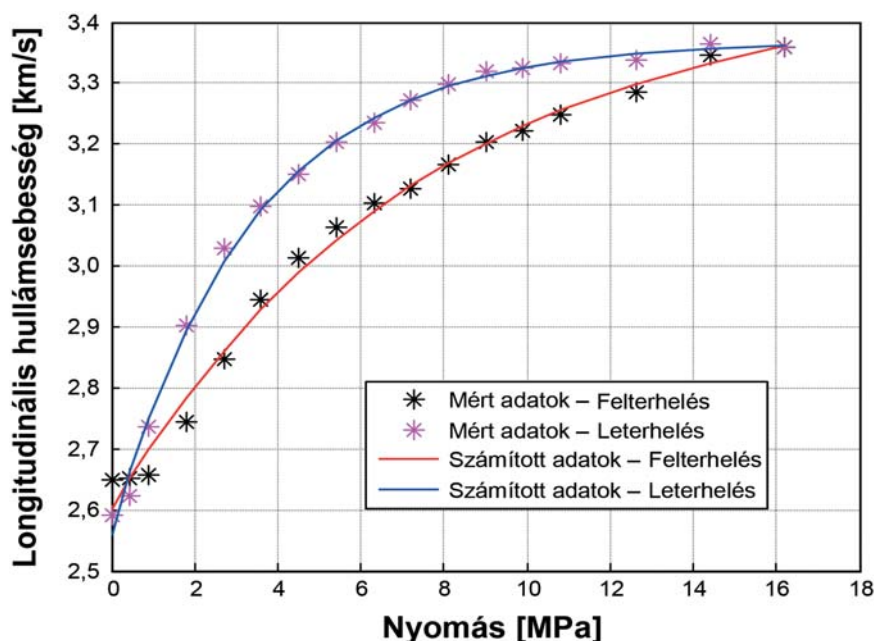


2. ábra

A B jelű közetmintán mért és az inverzióval számított sebesség–nyomás függvény a fel- és leterhelési szakaszra

Figure 2

The measured and inversion calculated velocity–pressure function on rock sample B in case of pressurization and depressurization cycle



3. ábra | A C jelű kőzetmintán mért és az inverzióval számított sebesség–nyomás függvény a fel- és leterhelési szakaszra

Figure 3 | The measured and inversion calculated velocity–pressure function on rock sample C in case of pressurization and depressurization cycle

állítottuk fel a jelenséget leíró differenciálegyenleteket, melyek megoldásával könnyen értelmezhető formulákat vezetünk le. Az akusztikus hiszterézist a bevezetett modell-egyenletekben a két különböző λ paraméter fejezi ki.

A kőzetfizikai modelleket számos kőzetmintán végzett mérések adatain alkalmaztuk. Bemutattuk, hogy a mérések kiválóan reprodukálhatóak. A modellegyenletekben szereplő modellparamétereket lineáris inverziós eljárással határoztuk meg. A paraméterek ismeretében a kőzetfizikai modell alapján számított adatokat a mérési adatokkal összevetve jó egyezést találtunk, ami azt bizonyítja, hogy a kőzetfizikai modellegyenletek jól jellemzik a fel- és leterhelési

szakaszt, illetve jól működnek a gyakorlatban. Az alkalmazott lineáris inverziós módszer megbízhatóságát az is alátámasztja, hogy a megoldandó inverz probléma jelentősen túlhatározott, valamint a minták esetében számított illeszkedési hibák 1% alattiak voltak.

Köszönetnyilvánítás

A kutató munka a TÁMOP-4.2.1.B-10/2/KONV-2010-0001 jelű projekt részeként – az Új Magyarország Fejlesztési Terv keretében – az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósul meg.

Hivatkozások

- Anselmetti F. S., Eberli G. P., 1997: Sonic velocity in carbonate sediments and rock. In: I. Palaz and K.J. Marfurt (eds.), Carbonate Seismology. SEG, 53–74
- Best A.I., 1997: The effect of pressure on ultrasonic velocity and attenuation in near-surface sedimentary rocks. Geophys. Prosp. 45, 345–364
- Birch F., 1960: The velocity of compression waves in rocks to 10 kilobars, Part 1. J. Geophys. Res. 65, 1083–1102
- Dobróka M., 1987: Love seam-waves in a horizontally inhomogeneous three-layered medium. Geoph. Prosp. 35, 512–516.
- Dobróka M., 1988: On the absorption-dispersion characteristics of channel waves propagating in coal seams of varying thickness. Geoph. Prosp. 36 318–331
- Dobróka M., Szabó N., 2011: Interval inversion of well-logging data for objective determination of textural parameters. Acta Geophys. 59(5), 907–934
- Dobróka M., Somogyiné Molnár J., 2012a: New petrophysical model describing the pressure dependence of seismic velocity. Acta Geophys. 60, 371–383
- Dobróka M., Somogyiné Molnár J., 2012b: The pressure dependence of acoustic velocity and quality factor – new petrophysical models. Acta Geod. Geophys. Hung. 47, 149–160
- Gyulai Á., 1989: Parameter sensitivity of underground DC measurements. Geophysical Transactions 35(3), 209–225
- Hashin Z., Shtrikman S., 1963: A variation approach to the theory of the elastic behaviour of multiphase materials. J. Mech. Phys. Solids 11, 127–140
- Hill R., 1963: Elastic properties of reinforced solids: Some theoretical principles. J. Mech. Phys. Solids 11, 357–372
- Ji S. C., Wang Q., Xia B., 2002: Handbook of Seismic Properties of Minerals, Rocks, Ores. Polytechnic International Press, Montreal, Canada
- Ji S., Wang Q., Marcotte D., Salisbury M. H., Xu Z., 2007: P wave velocities, anisotropy and hysteresis in ultrahigh-pressure metamorphic rocks as a function of confining pressure. J. Geophys. Res. 112, B09204.
- Jones L. A., Wang H. F., 1981: Ultrasonic velocities in Cretaceous shales from the Williston basin. Geophysics 46, 288–297

- Menke W., 1984: Geophysical data analysis – Discrete inverse theory. Academic Press Inc., Ltd., London
- Rudenko O. V., Robsman V. A., 2004: Nonlinear process in media acoustic hysteresis and problems of dynamic interaction between piles and earth foundation. *Acoust. Phys.* 50(6), 725–731
- Scholz C. H., Kranz R., 1974: Notes on dilatancy recovery. *J. Geophys. Res.* 79, 2132–2135
- Singh R., Rai C., Sondergeld C., 2006: Pressure dependence of elastic wave velocities in sandstones. SEG/New Orleans 2006 Annual Meeting.
- Somogyiné Molnár J., Dobróka M., 2011: A szeizmikus/akusztikus sebesség és a jósági tényező kőzetnyomástól való függését leíró kőzetfizikai modellek. *Magyar Geofizika* 52(3), 128–134
- Szalai S., Szarka L., 2008: Parameter sensitivity maps of surface geoelectric arrays, I. Linear arrays. *Acta Geod. Geoph. Hung.* 43, 419–437
- Toksöz M. N., Johnston D. H., Timur A., 1979: Attenuation of seismic waves in dry and saturated rocks, I. Laboratory measurements. *Geophysics* 44(4), 681–690
- Walsh J. B., Brace W. F., 1964: A fracture criterion for brittle anisotropic rock. *J. Geophys. Res.* 69, 3449–3456
- Wang Q., Ji S. C., Salisbury M. H., Pan M. B., Xia B., Xu Z. Q., 2005: Pressure dependence and anisotropy of P-wave velocities in ultrahigh-pressure metamorphic rocks from the Dabie-Sulu orogenic belt (China): Implications for seismic properties of subducted slabs and origin of mantle reflections. *Tectonophys.* 398, 67–99
- Wepfer W. W., Christensen N. I., 1991: A seismic velocity-confining pressure relation, with applications. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.* 28, 451–456
- Yu G., Vozoff K., Durney D. W., 1993: The influence of confining pressure and water saturation on dynamic elastic properties of some Permian coals. *Geophysics* 58(1), 30–38

Édesvíztároló rétegek agyagtartalmának meghatározása fúrólúkszelvevények faktoranalízise alapján

SZABÓ NORBERT PÉTER^{1,*}, KORMOS KATALIN^{1,2}

¹Miskolci Egyetem, Geofizikai Intézeti Tanszék, 3515 Miskolc-Egyetemváros

²MTA-ME Műszaki Földtudományi Kutatócsoport, 3515 Miskolc-Egyetemváros

*E-mail: norbert.szabo.phd@gmail.com

Az agyagtartalom meghatározása kiemelt jelentőséggel bír a mélyfúrési geofizikai adatok kiértékelése szempontjából. A hagyományosan ebből a célból alkalmazott természetes γ -indexszel kifejezett lineáris modell gyakran csak durva közelítést ad, mely különösen igaz a sekély fúrások esetében. Az irodalomban számos nemlineáris modellt vezettek be, mellyel a valóságnak jobban megfelelő eredményeket kapunk. Jelen tanulmányban egy új nemlineáris, statisztikai elven alapuló modellt javasolunk az agyag százalékos részarányának meghatározására. A mélyfúrési geofizikai adatrendszer faktor analízisének eredménye az ún. faktorszelvevény, mely erős korrelációs kapcsolatot mutat az agyagos homok(kő)-formációk agyagtartalmával. Egy korábbi kutatás mélyfúrásokban olyan exponenciális kapcsolatot tárt fel egy faktoranalízissel nyert új változó (első faktor) és az agyagtartalom között, mely jó közelítéssel a mérési területtől független. A modellt sekély mélységű fúrások adatain is hasonló eredménnyel alkalmazhatjuk, melyet ezúttal két kelet-magyarországi példán mutatunk be. A kapott eredmények alapján egy közös (mindkét területre kiterjedő) regressziós modellt javasolunk. A statisztikai eljárással becsült agyagtartalom-értékek szoros egyezést mutatnak a gyakran alkalmazott Larionov-formula alapján számított értékekkel, ami megerősíti a nemlineáris közelítés érvényességét. Mindazonáltal, míg a Larionov-formula csak egyfajta szelvevényt használ fel bemenő mennyiségként, az új statisztikai módszer egyidejűleg dolgozza fel mindazt a szelvevényt, mely valamilyen mértékben érzékeny az agyag jelenlétére, és ezzel megbízható közetfizikai információt szolgáltat a mélyfúrési geofizikai adatok értelmezése számára.

Szabó, N. P., Kormos, K.: Shale content of freshwater formations estimated by factor analysis of borehole logs

The calculation of shale volume is of great importance in the interpretation of well logs. The conventionally used linear model connecting natural γ -ray index to shale content often gives a rough estimate especially in shallow boreholes. Different non-linear formulae have been introduced to get more realistic results. In the paper, a new non-linear statistical model is suggested to estimate the percentage of shale in the rock. The result of factor analysis of well-logging data is the factor log that highly correlates with the shale content of shaly-sand(stone) formations. An earlier study of deep wells revealed an exponential relationship between a new variable (i.e. the first factor) extracted by factor analysis and shale volume, which proved to be nearly independent of the measurement area. The model applied to shallow borehole data indicates a similar result which is shown here by two East-Hungarian examples. As a result, a local regression model is suggested which seems to be applicable to both measurement areas. It is shown that the shale volume log estimated by the statistical procedure is in sufficiently close agreement with that derived from the well-known Larionov's formula which confirms the validity of the non-linear approximation. However, whereas the formula of Larionov uses only one well log as an input to extract the shale volume, the new statistical method processes all those types of logs simultaneously, which to some extent are sensitive to the presence of shale content, thus providing highly reliable petrophysical information to the interpretation of well logs.

Beérkezett: 2012. július 20.; *elfogadva:* 2012. augusztus 22.

Bevezetés

Az agyag finomszemcsés üledék, mely agyagásványok és iszap közel egyenlő arányú keverékéből áll. Három különböző formában jelenhet meg a természetben: a pórusteret

kitöltő diszperz agyagrészecskék formájában vagy szerkezeti agyagként, amely beépül a kőzetmátrixba, továbbá vékony lemezszerű vízzáró réteget képezhet a porózus-permeábilis rétegek között. Az üledékes kőzetek fizikai tulajdonságai általában az agyag mennyiségével együtt változnak.

A tapasztalatok azt mutatják, hogy a szeizmikus sebesség közel lineárisan változik az agyagtartalommal (Han et al. 1986, Klimentos 1991). Az effektív porozitás a növekvő diszperz agyagtartalom miatt csökken, így annak pontosabb számítása megköveteli a karotázs szelvényadatok agyaghatásra történő korrekcióját (Thomas, Stieber 1975). A víztelítettség meghatározása céljából megfigyelt fajlagos ellenállás értéke az agyagban minimális, mivel az agyagásványok szemcseméretükénél fogva igen nagy felületi vezetőképességgel rendelkeznek. Emiatt általában olyan víztelítettség-modelleket alkalmazunk, melyek azt feltételezik, hogy a szabad víz és a diszperz agyagszemcsék elektrolitok elegyként vezetnek az elektromos áramot (De Witte 1955). Mivel a közszemcsék méretváltozása nagy hatással van a rétegek átteresztőképességére, ezért a permeabilitást erősen befolyásolja az agyag mennyisége. Terepi és laboratóriumi mérések tapasztalati kapcsolatot feltételeznek a permeabilitás és az agyagtartalom között (Revil, Cathles 1999, Slater, Lesmes 2002).

A felszín közeli szerkezetek közetfizikai paramétereinek meghatározása céljából alkalmazott fúrás geofizikai módszerek átfogó összefoglalóját Tselentis (1985) adta meg. Az agyagtartalmat mint az egyik kulcsparamétert determinisztikus, inverz vagy statisztikai modellezéssel számíthatjuk. A leggyakrabban használt megközelítés a determinisztikus eljárás, mely a karotázs szelvények egyedi elemzésén alapul. Ekkor az agyag jelenlétére legérzékenyebb méréseket, a természetes potenciált vagy természetes γ -intenzitást, egymástól független egyenletekbe helyesítve az agyagtartalmat külön eljárásban határozzuk meg (Asquith, Krygowski 2004). Ennél a módszernél általában megbízhatóbb eredményt ad, ha egyszerre több szelvényt is figyelembe veszünk, pl. a porozitásslavények kombinációját (Poupon, Gaymard 1970). A hazai gyakorlatban a tároló értékelési területén jelentős eredményeket értek el Szilágyi (1974), Baráth et al. (1976), Ferenczy és Kiss (1993). Felszín közeli rétegsorok agyagtartalmának mélyfúrás geofizikai adatokból történő meghatározására számos determinisztikus megoldáson alapuló esettanulmányt közöl az irodalom (Paillet 1995, Fisher et al. 1998, Cripps, McCann 2000, Kvapil, Mares 2003, Doveton, Merriam 2004, Hsieh et al. 2007, Adeoti et al. 2009).

A közetfizikai jellemzők becslésére alkalmas inverziós módszerek a szelvények együttes felhasználásán alapulnak, melynek keretében a geofizikai adatokat egyetlen kiértékelési eljárásba integráljuk. A módszer alkalmazásának alapfeltétele, hogy ismerjük a matematikai kapcsolatot a mérési adatok és a közetfizikai modell között. A vonatkozó egyenleteket az előremodellezési fázisban az elméleti adatok számításához használjuk. Az inverz feladatot egy alkalmasan választott optimalizációs algoritmus segítségével oldjuk meg, melynek révén a mélységpontban számított adatokat a mért adatokhoz illesztjük. Az eljárás végén az optimumhoz rendelt modellt tekintjük az inverz feladat megoldásának. Mivel az egyes mélységpontokban mért eltérő nagyságrendű (ill. zajjal terhelt) és mértékegységű adatok száma alig haladja meg a közetfizikai ismeretlenek számát, túlhatáro-

zott inverz feladatról beszélünk, melyet a súlyozott legkisebb négyzetek módszerével oldhatunk meg (Menke 1984). A mélyfúrás geofizikai inverz feladat alapelvét és annak technikai megvalósítását Mayer és Sibbit (1980), Alberty és Hashmy (1984), Ball et al. (1987) részletezik, valamint egy újszerű inverziós módszert a Miskolci Egyetem Geofizikai Intézeti Tanszékének munkatársai, Dobróka és Szabó (2010) közöltek. A karotázs inverziós módszerek néhány sekély alkalmazása megtalálható Paillet és Crowder (1996), Beltrami et al. (1997), Moret et al. (2004), Drahos (2005), valamint Jang és Kim (2008) munkáiban.

A fúrólavaszelvények feldolgozásának harmadik lehetősége a különböző statisztikai módszerek alkalmazása, melynek segítségével tapasztalati összefüggéseket kereshetünk az adatok és a nem mérhető közetfizikai mennyiségek között. Jelen tanulmányban egy többváltozós statisztikai módszert alkalmazunk a fúrólavak-geofizikai adatok és az agyagtartalom közötti kapcsolat leírására. A faktoranalízist hagyományosan nagyméretű problémák változó számának csökkentésére és a közvetlenül nem mérhető háttérváltozók feltárására használják (Lawley, Maxwell 1962). A módszer mélyfúrás geofizikában történő alkalmazásának elvi lehetőségét Hemphins (1978) említette először, melyet Rao és Pal (1980), Herron (1986), Buoro és Silva (1994), Grana et al. (2011), Szabó et al. (2012) és Szabó (2012) alkalmazásai bizonyították. A mélyfúrás geofizikai szelvényekből faktoranalízissel egy új szelvényt (faktorszelvényt) képezhetünk, mely erős korrelációt mutat a víz-, ill. szénhidrogén-tároló agyagos homok(kő)-formációk agyagtartalmával. Ezt a kapcsolatot Szabó (2011), Szabó és Dobróka (2011) több mélyfúrásban is bemutatta. A faktoranalízissel származtatott új változó (faktor) és az agyagtartalom között olyan nemlineáris összefüggés létezik, mely különböző mérési területeken jó közelítéssel azonos formában érvényes. A fenti módszert sekély fúrások adatain is hasonló eredménnyel alkalmazhatjuk. Jelen tanulmányban két terepi példát ismertetünk, ahol a mélyfúrásokhoz hasonlóan ugyancsak erős korrelációs kapcsolat fedezhető fel a faktor és az agyagtartalom között. Reményeink szerint a regressziós formula nagyobb területre is kiterjeszhető, ami azt valószínűsíti, hogy a módszer egy független eljárásnak tekinthető.

Determinisztikus módszerek

Az agyagtartalom (V_{sh}) mint az agyag által kitöltött térfogat és a kőzet teljes térfogatának az aránya, a leggyakrabban a természetes γ -szelvény felhasználásával határozható meg. Mivel a nem radioaktív kőzeteket (pl. homokkő, karbonátok) a szelvény minimuma (GR_{min}), a radioaktív agyagokat annak maximuma (GR_{max}) jelzi, ezért a természetes γ -index

$$i_{\gamma} = \frac{GR - GR_{min}}{GR_{max} - GR_{min}} \quad (1)$$

felhasználásával az agyagtartalom lineárisan közelíthető: $V_{sh} \cong i_{\gamma}$ (Poupon, Gaymard 1970), ahol GR az adott mélységben mért természetes γ -intenzitást jelöli. Az (1) egyenlet

csak az agyag részarányának durva becslésére alkalmas, mivel a GR_{\min} és GR_{\max} megválasztása nagymértékben függ a mérési terület földtani felépítésétől és a szelvényértelmező szubjektív döntésétől. Másrészt, a módszer azt feltételezi, hogy a kőzetben nincsenek jelen az agyagokon kívül más radioaktív ásványok, ami ugyancsak félrevezetheti az összetett kőzettani felépítésű formációk értelmezését.

A terepi tapasztalatok azt mutatják, hogy az (1) egyenlet az agyagtartalmat általában túlbecsüli, ami különösen igaz fiatal üledékek esetén. Realisabb becslés végezhető, ha nemlineáris összefüggést feltételezünk a természetes γ -index és az agyagtartalom között. Larionov (1969) harmadkorú vagy fiatalabb üledékekre javasolt formulája:

$$V_{sh} = 0,083(2^{3,7I_\gamma} - 1), \quad (2)$$

és a terciernél idősebb korú kőzetekre vonatkozó egyenlete:

$$V_{sh} = 0,33(2^{2,7I_\gamma} - 1). \quad (3)$$

Ugyancsak nemlineáris modelleket vezetett be Stieber (1970), Clavier et al. (1971), Bhuyan és Passey (1994), melyek mind óvatosabb becslést adnak az (1) egyenlethez képest. Az 1. ábra egy terepi példát mutat különböző módszerekkel számított agyagtartalom-értékek összehasonlítása céljából. A szelvényadatok egy dél-magyarországi szénhidrogén-kutató fúrás egy 50 m-es szakaszáról származnak. Az (1)–(3) egyenleteket és az inverz modellezést egymástól függetlenül alkalmazva megállapítható, hogy a lineáris közelítés a kívánatosnál nagyobb agyagtartalmat ad eredményül (1a. ábra). A különböző módszerek alkalmazásának eredményeként a számított agyagtartalom szelvények jelentős eltérést mutatnak (1b. ábra), ami nagymértékben befolyásolja más kőzetfizikai paraméterek számítását a fúróluk-szelvények értelmezése során.

Inverziós eljárások

Az inverz modellezés során valamennyi szelvényt egyidejűleg dolgozzuk fel. Vízkutató fúrásokban általában a természetes γ - (GR), természetes potenciál- (SP), valamint a sekély és mély behatolású fajlagosellenállás- (RS és RD) szelvények állnak rendelkezésre. Ezeket alkalmanként kiegészítik porozitáskövető szelvényekkel: sűrűség- (DEN), akusztikus terjedési idő- (AT) vagy neutronporozitás- ($NPHI$) adatokkal. A lyukátmérő- (CAL) és hőmérséklet- (TE) szelvényekre nincsenek szonda válaszegyenletek, így azokat közvetlenül nem alkalmazzuk az inverz feladat megoldásakor. Az inverziós eljárások alkalmazásához ismernünk kell a matematikai kapcsolatot a mért mennyiségek és a kőzetfizikai modell paraméterei között. Az alábbi egyszerűsített elméleti szonda válaszegyenletek édesvízzel telített formációkra alkalmazhatók (Alberty, Hashmy 1984):

$$GR = V_{sh} GR_{sh} + V_{sd} GR_{sd}, \quad (4)$$

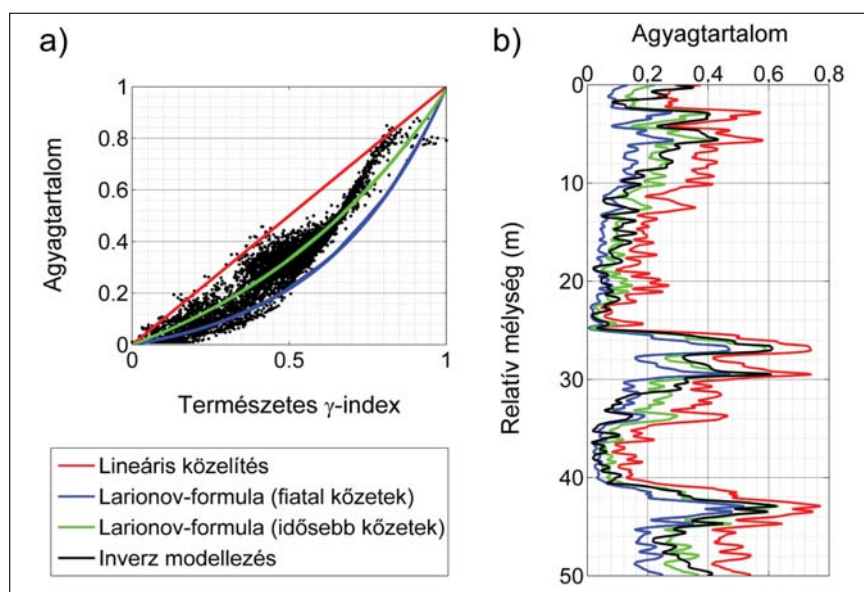
$$SP = V_{sh}(SP_{sh} - SP_{sd}) + SP_{sd}, \quad (5)$$

$$\frac{1}{\sqrt{RS}} = \left[\frac{V_{sh}^{(1-0,5V_{sh})}}{\sqrt{R_{sh}}} + \frac{(\sqrt{\Phi})^m}{\sqrt{aR_{mf}}} \right] (\sqrt{S_{x0}})^n, \quad (6)$$

$$\frac{1}{\sqrt{RD}} = \left[\frac{V_{sh}^{(1-0,5V_{sh})}}{\sqrt{R_{sh}}} + \frac{(\sqrt{\Phi})^m}{\sqrt{aR_w}} \right] (\sqrt{S_w})^n, \quad (7)$$

$$NPHI = \Phi + V_{sh} NPHI_{sh} + V_{sd} NPHI_{sd}, \quad (8)$$

$$DEN = \Phi + V_{sh} DEN_{sh} + V_{sd} DEN_{sd}, \quad (9)$$



1. ábra Agyagtartalom becslés egy dél-magyarországi fúrásban, (a) agyagtartalom – természetes γ -index kapcsolata különböző modellek alapján, (b) a modellek alapján becsült agyagtartalom-szelvények

Figure 1 Shale volume estimation example from a South-Hungarian well, (a) shale volume-natural γ -ray index cross-plot using different models, (b) shale volume logs estimated by the relevant models

$$AT = \Phi AT_w + V_{sh} AT_{sh} + V_{sd} AT_{sd}, \quad (10)$$

$$\Phi + V_{sh} + V_{sd} = 1, \quad (11)$$

ahol Φ az effektív porozitás, S_{x0} és S_w a kisépért és az érintetlen zóna víztelítettsége, V_{sd} a homok térfogata. A (4)–(11) egyenletekben az sh , sd , w indexek az agyag, homok és pórusvíz fizikai tulajdonságait jelölik. Az m , n , a konstansok a kőzetek texturális tulajdonságait fejezik ki, melyeket irodalmi adatokból vagy inverziós eljárással adhatunk meg (Dobróka, Szabó 2011). A (6)–(7) nemlineáris fajlagos-ellenállás-egyenletek (ún. indonéziai formulák) empirikusak, melyek alkalmazhatóságát nagyszámú laboratóriumi mérés igazolt (Poupon, Leveaux 1971). A (11) formula az egységnyi térfogatú kőzet anyagmérleg-egyenlete, melyet az inverziós paraméterek korlátozására használunk. Látható, hogy a fenti válasz egyenletek mindegyikében szerepel az agyagtartalom, mely azt fejezi ki, hogy a méréseket befolyásolja az agyag mennyisége. Az ilyen fajta, több egyenletben is megjelenő változó kedvezően határozható meg az inverziós eljárással.

A hagyományos inverziós módszerek az adott mélységpontban mért, különböző típusú szelvényadatokat együttesen dolgozzák fel a kőzetfizikai paraméterek meghatározása céljából. Képezzük a mélységpontban mért adatok vektorát

$$\mathbf{d}^{(\text{mért})} = [GR, SP, RS, RD, DEN, NPFI, AT]^T, \quad (12)$$

ahol T a transzponálást írja elő. A (12) vektor adatait együttesen invertáljuk a kőzetfizikai modell meghatározása céljából. A modell paramétereit – mint inverziós ismeretleneket – ugyancsak egy oszlopvektorba foglaljuk:

$$\mathbf{m} = [\Phi, S_{x0}, S_w, V_{sh}, V_{sd}]^T. \quad (13)$$

Mivel V_{sd} a (11) egyenletből kifejezhető, az adatok száma (ebben az esetben 7) nagyobb az ismeretlenek számánál (itt 4), tehát az inverz feladat túlhatározott. A (12) egyenletben szereplő adatok elvi értékeit a (4)–(10) egyenletek felhasználásával a direkt feladat keretében számítjuk. A mérési és az elméleti adatok eltérését iteratív eljárásban csökkentjük. Ehhez az alábbi, súlyozott euklideszi normán alapuló célfüggvényt minimalizáljuk (Mayer, Sibbit 1980)

$$E = \sum_{k=1}^K \left(\frac{d_k^{(\text{mért})} - d_k^{(\text{számított})}}{\sigma_k} \right)^2 = \min., \quad (14)$$

$$\mathbf{D} = \begin{pmatrix} GR'_1 & SP'_1 & RS'_1 & RD'_1 & DEN'_1 & NPFI'_1 & AT'_1 \\ GR'_2 & SP'_2 & RS'_2 & RD'_2 & DEN'_2 & NPFI'_2 & AT'_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ GR'_n & SP'_n & RS'_n & RD'_n & DEN'_n & NPFI'_n & AT'_n \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ GR'_N & SP'_N & RS'_N & RD'_N & DEN'_N & NPFI'_N & AT'_N \end{pmatrix}. \quad (17)$$

A fenti szelvények kombinációjából sekély alkalmazás-soknál hiányozhat egy-két mérésfajta, ugyanakkor egyes intervallumokon adathiány is előfordulhat. Ha legalább egy

ahol a $d_k^{(\text{mért})}$ és $d_k^{(\text{számított})}$ jelöli a k -adik mért és számított adatot (K az alkalmazott szondák száma). Mivel az adatok bizonytalansága eltérő, ezért adattérbeli súlyozás szükséges. Az adatok szórása függ az alkalmazott szondatípustól és a mérési környezet jellemzőitől, amelyek irodalmi közlések alapján megadhatók. A (14) optimalizálási feladat megoldása

$$\mathbf{m} = (\mathbf{J}^T \mathbf{W} \mathbf{J})^{-1} \mathbf{J}^T \mathbf{W} \mathbf{d}^{(\text{mért})}, \quad (15)$$

ahol \mathbf{J} a Jakobi- (érzékenységi) mátrix, $W_{kk} = \sigma_k^{-2}$ ($k = 1, 2, \dots, K$) olyan diagonális súlymátrix, mely az adatok a priori ismert varianciáit tartalmazza. Mivel az adat- és modelltérbeli kovarianciamátrixok egymással kapcsolatban állnak, a kőzetfizikai paraméterek becslési hibája számítható (Menke 1984). Ezzel az inverziós eredmények pontossága és megbízhatósága kvantitatív módon jellemezhető, ami igen vonzóvá teszi az inverziós módszerek alkalmazását a mélyfúrási geofizikában. Az 1. ábrán egy inverziós kiértékelés eredménye látható. Ennek keretében a litológiára (GR és SP), porozításra (DEN , AT , $NPFI$) és víztelítettségre (RS és RD) érzékeny szelvényeket együttesen invertáltuk (többek között) az agyagtartalom meghatározása céljából. A kapott eredmények rávilágítanak arra, hogy az egyetlen szelvényt felhasználó determinisztikus módszerek nem általános érvényűek, és az agyagtartalmat célszerű különböző módszerek alapján meghatározni.

Új statisztikai eljárás

Az agyagtartalom statisztikai módszerrel történő meghatározása céljából először a mért változókat standardizáljuk, amivel azokat zérus középértékre és egységnyi szórásra transzformáljuk. A k -adik standardizált szelvény n -edik adata

$$d_{kn}^{(\text{mért})'} = \frac{(d_{kn}^{(\text{mért})} - \bar{d}_k^{(\text{mért})})}{\sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{n=1}^N (d_{kn}^{(\text{mért})} - \bar{d}_k^{(\text{mért})})^2}}, \quad (16)$$

ahol $\bar{d}_k^{(\text{mért})}$ a k -adik szelvény adatainak számtani átlaga ($k = 1, 2, \dots, K$ a szelvények száma, $n = 1, 2, \dots, N$ a mélységpontok száma). A (16) egyenlet szerint skálázott adatokat mátrixba foglaljuk:

változót (faktort) szeretnénk képezni az adatrendszerből, akkor minimálisan négy mérési szelvényt kell alkalmaznunk. Emellett a GR , SP , RS vagy RD szelvények mindig

szükségesek, mert ezek reagálnak legérzékenyebben a közzettani változásokra. Az inverziós gyakorlatlól eltérően a faktoranalízisben felhasználhatjuk a lyukátmérő-szelvényt is, mivel a *CAL* mérések a kavernák és az iszaplepleny dektálásával hasznos közzettani információt szolgáltatnak a statisztikus eljárás számára.

Bontsuk fel a (17) egyenletben szereplő $N \times K$ méretű adatmátrixot a következőképpen:

$$\mathbf{D} = \mathbf{F}\mathbf{L}^T + \mathbf{E}, \quad (18)$$

ahol az \mathbf{F} a faktorok $N \times M$ méretű mátrixa, \mathbf{L} a faktorsúlyok $K \times M$ méretű mátrixa, és \mathbf{E} az $N \times K$ méretű hibakompo-

$$\begin{pmatrix} GR'_1 & SP'_1 & RD'_1 & DEN'_1 \\ GR'_2 & SP'_2 & RD'_2 & DEN'_2 \\ GR'_3 & SP'_3 & RD'_3 & DEN'_3 \\ GR'_4 & SP'_4 & RD'_4 & DEN'_4 \\ GR'_5 & SP'_5 & RD'_5 & DEN'_5 \\ GR'_6 & SP'_6 & RD'_6 & DEN'_6 \\ GR'_7 & SP'_7 & RD'_7 & DEN'_7 \\ GR'_8 & SP'_8 & RD'_8 & DEN'_8 \\ GR'_9 & SP'_9 & RD'_9 & DEN'_9 \\ GR'_{10} & SP'_{10} & RD'_{10} & DEN'_{10} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} F_1^{(1)} & F_1^{(2)} \\ F_2^{(1)} & F_2^{(2)} \\ F_3^{(1)} & F_3^{(2)} \\ F_4^{(1)} & F_4^{(2)} \\ F_5^{(1)} & F_5^{(2)} \\ F_6^{(1)} & F_6^{(2)} \\ F_7^{(1)} & F_7^{(2)} \\ F_8^{(1)} & F_8^{(2)} \\ F_9^{(1)} & F_9^{(2)} \\ F_{10}^{(1)} & F_{10}^{(2)} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} L_{11} & L_{12} & L_{13} & L_{14} \\ L_{21} & L_{22} & L_{23} & L_{24} \end{pmatrix}, \quad (19)$$

ahol $F^{(1)}$ és $F^{(2)}$ az első és második faktor (szelvény). Tételezzük fel, hogy a faktorok lineárisan függetlenek ($\mathbf{F}^T\mathbf{F}/N = \mathbf{I}$, ahol \mathbf{I} az egységmátrix), valamint az $\mathbf{F}\mathbf{L}^T$ és \mathbf{E} mátrixok korrelálatlanok. Ekkor a standardizált mérési változók korrelációs mátrixa

$$\mathbf{R} = N^{-1}\mathbf{D}^T\mathbf{D} = \mathbf{L}\mathbf{L}^T + \mathbf{\Psi}, \quad (20)$$

ahol $\mathbf{\Psi} = \mathbf{E}^T\mathbf{E}/N$ a mért változók szórásnégyzeteinek a közös faktorokkal nem értelmezhető részét képviseli. A faktorsúlyok Jöreskog (2007) közelítő algoritmusával nem iteratív módon számíthatók. Képezzük az alábbi mátrixot

$$\mathbf{S}^* = (\text{diag } \mathbf{S}^{-1})^{1/2} \mathbf{S} (\text{diag } \mathbf{S}^{-1})^{1/2}, \quad (21)$$

ahol \mathbf{S} a standardizált mérési változók minta kovarianciamátrixa. Számítsuk ki az \mathbf{S}^* mátrix λ sajátértékeit és \mathbf{w} sajátvektorait, mellyel a faktorsúlyok mátrixa

$$\mathbf{L} = (\text{diag } \mathbf{S}^{-1})^{-1/2} \mathbf{\Omega}_M (\mathbf{\Gamma}_M - \theta \mathbf{I})^{1/2} \mathbf{U}, \quad (22)$$

ahol $\mathbf{\Gamma}_M$ az első M számú (nagyság szerinti sorrendbe rendezett) sajátérték diagonális mátrixa, $\mathbf{\Omega}_M$ az első M számú sajátvektor mátrixa (a sajátvektorokat az oszlopok tartalmazzák), \mathbf{U} egy $M \times M$ méretű tetszőleges ortogonális mátrix. A θ paraméter meghatározza a faktorok legkisebb számát, amikor

$$\theta = (K - M)^{-1}(\lambda_{M+1} + \lambda_{M+2} + \dots + \lambda_K) < 1. \quad (23)$$

A faktorok meghatározása a maximum-likelihood módszerrel történik az alábbi célfüggvény alkalmazásával

$$P = -(\mathbf{D} - \mathbf{F}\mathbf{L}^T)^T \mathbf{\Psi}^{-1} (\mathbf{D} - \mathbf{F}\mathbf{L}^T) = \max. \quad (24)$$

nens-mátrix. A faktorok számát M -el jelöljük, mely az eredeti változók számánál kevesebb. A \mathbf{F} mátrixot a faktorok különböző mélységpontokban becsült értékei, míg az \mathbf{L} mátrixot a mért változóknak a faktorokra eső súlyai alkotják. Gyakorlatilag a faktorokat a mérések lineáris kombinációjával állítjuk elő, ahol a súlyok az adatok és a faktorok korrelációs viszonyait fejezik ki. Számunkra az \mathbf{F} mátrix első oszlopa bír gyakorlati jelentőséggel, melyet az első faktornak (faktorszelvénynek) nevezünk. Példának okáért, végezzünk 10 különböző mélységben 4-féle mérést (*GR*, *SP*, *RD*, *DEN*), majd a mért mennyiségeket redukáljuk két új változóvá. Az egyszerűség kedvéért legyen $\mathbf{E} = \mathbf{0}$, ekkor a (18) egyenlet a következő:

A (24) egyenletre lineáris megoldást Bartlett (1937) közzölt, amellyel előállíthatjuk a faktorokat:

$$\mathbf{F} = (\mathbf{L}^T \mathbf{\Psi}^{-1} \mathbf{L})^{-1} \mathbf{L}^T \mathbf{\Psi}^{-1} \mathbf{D}. \quad (25)$$

Abban az esetben, amikor a nyers faktorok közzettizikai jellemzőkkel nem azonosíthatók, akkor lehetőségünk van forgatási módszereket alkalmazni, amivel szemléletesebb jelentésű faktorokká alakíthatjuk át azokat. Az ortogonális rotációs módszerek korrelálatlan faktorokat eredményeznek. Jelen tanulmányban a Kaiser (1958) által javasolt *varimax* algoritmust alkalmaztuk.

Szabó (2011) az alábbi kapcsolatot találta az első faktor és az agyagtartalom között:

$$V_{sh} = \alpha e^{\beta F_1'}, \quad (26)$$

ahol α és β helyi regressziós együtthatók. A fenti formula több hazai és tengerentúli mélyfúrásban is érvényesnek bizonyult a regressziós együtthatók közelítőleg azonos értékei mellett. A (26) egyenletben az első faktort alkalmas módon skálázzuk:

$$F_1' = F'_{1,\min} + \frac{F'_{1,\max} - F'_{1,\min}}{F_{1,\max} - F_{1,\min}} (F_1 - F_{1,\min}), \quad (27)$$

ahol F_1 az első faktor becsült értéke a mélységpontban, $F_{1,\min}$ és $F_{1,\max}$ az első faktorszelvény szélsőértékei, $F'_{1,\min}$ és $F'_{1,\max}$ az első faktor előírt új alsó és felső határa. A léptékváltásra a különböző fúrásokban kapott eredmények összehasonlítása miatt van szükség. Jelen tanulmányban bemutatjuk, hogy a (26) egyenlet sekély vízkezelő fúrások esetén is alkalmazható. A (26) egyenlet alapján számított agyag-

tartalom-értékeket független forrásból származó eredményekkel is ellenőrizhetjük. Az agyagtartalom-szelvények illeszkedésének jellemzésére az átlagos négyzetes hiba négyzetgyökét használjuk:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (V_{sh,n}^{(I)} - V_{sh,n}^{(II)})^2}, \quad (28)$$

ahol az (I) és (II) indexek az első és a második becslési módszert jelölik. Az első faktor és az agyagtartalom közötti nemlineáris kapcsolat erősségének jellemzésére a rangkorrelációs együtthatót alkalmazzuk (Spearman 1904)

$$R = 1 - \frac{6 \sum_{n=1}^N \delta_n^2}{N(N^2 - 1)}, \quad (29)$$

ahol δ_n az aktuális két változó n -edik adatai rangjának a különbsége.

A faktoranalízis terepi alkalmazása

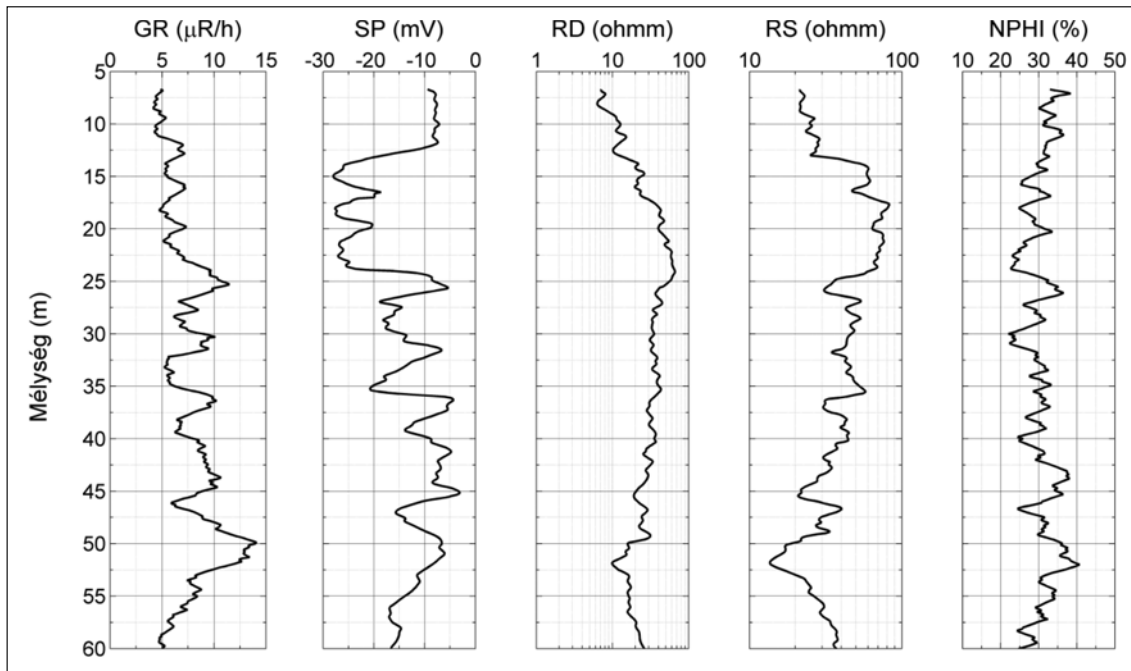
A vizsgált fúrások az Alföld észak-keleti részén helyezkednek el (2. ábra). A Pannon-medence negyedidőszaki üledékei változatos mocsári, folyóvízi és delta üledékekből állnak. A vastag porózus-permeábilis kavics- és homokrétegek kiváló minőségű édesvizet tárolnak, melyeket közbetelepült agyagrétegek választanak el. A két területen a sekély mélységű fúrásos kutatás célja a felszíni geofizikai mérések kiegészítéseként az általános földtani jellemzés és a vízáradó rétegek felmérése a vízminőség védelme érdekében.



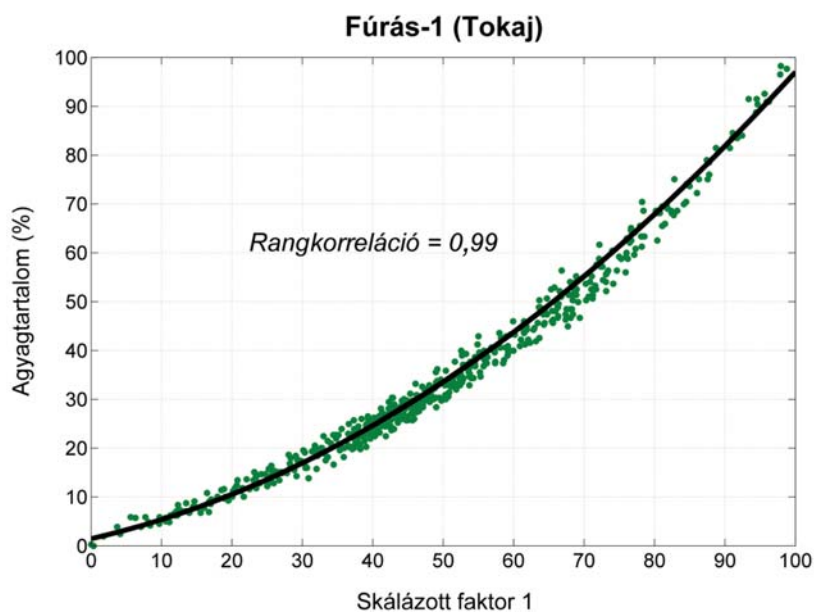
2. ábra | A vizsgált fúrások helyszínrajza
Figure 2 | Location map of the investigated wells

Teszt terület 1

Az első fúrás (Fúrás-1) a Tokaji Vízművek területén helyezkedik el, a Tisza és a Bodrog folyók találkozásánál (2. ábra). A fúrás miocén vulkanikus kőzeteken fekvő fiatal üledékeket keresztezett, melyek főleg pleisztocén folyóvízi homokból és kavicsból, valamint holocén homokból, iszapból és agyagból állnak. A területen a felszíni egyenáramú geoelektromos szondázások és a karotázsmérések üledékképződési ciklusok jelenlétére utalnak, melyek pro-delta kör-



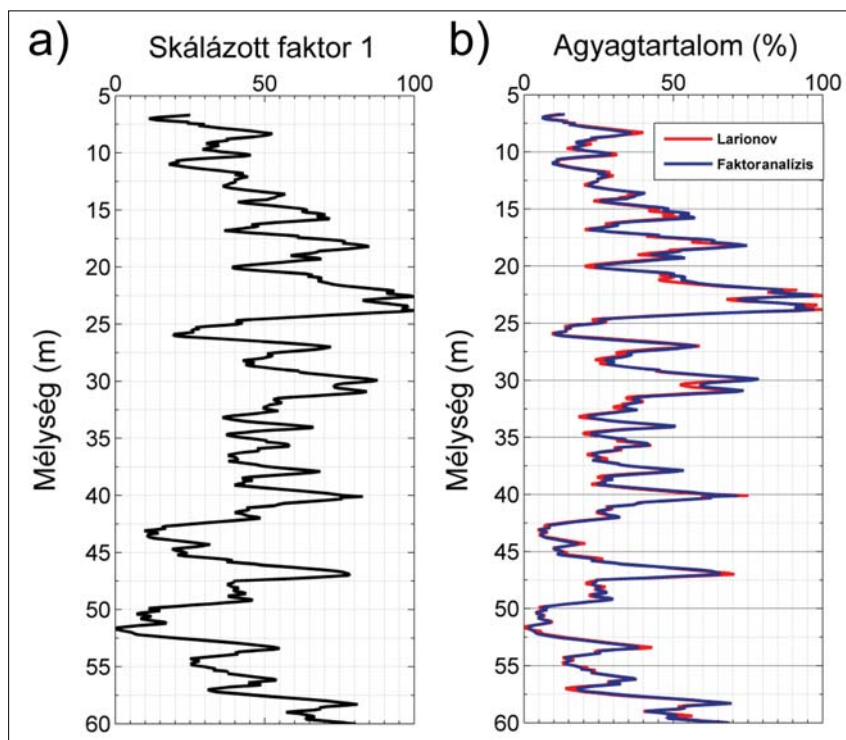
3. ábra | Fúrás-1 karotázsszelvényei mint a faktoranalízis bemeneti adatrendszer
Figure 3 | Borehole logs measured from Well-1 as input for factor analysis



4. ábra | Az első faktor és az agyagtartalom kapcsolata Fúrás-1-ben
Figure 4 | The exponential relationship between the first factor and shale volume in Well-1

nyezetből indulnak 60–100 m körüli mélységben, majd feljebb deltafront jellegű (ciklikusan növekvő és csökkenő fajlagos ellenállású 4–5 m-es szakaszokkal) környezetbe váltanak 20 m körül (Bucsi Szabó 2001). A folyókhöz közel

elsősorban a durvaszemcsésű összetétel uralkodik, távolabb a Vízmű kútjaiban inkább a közép- és finomszemcsés összetétel a jellemző. Vizsgálatunk Fúrás-1 felső 60 m-es szakaszára terjedt ki. A 3. ábra a mért szelvényeket mutatja:

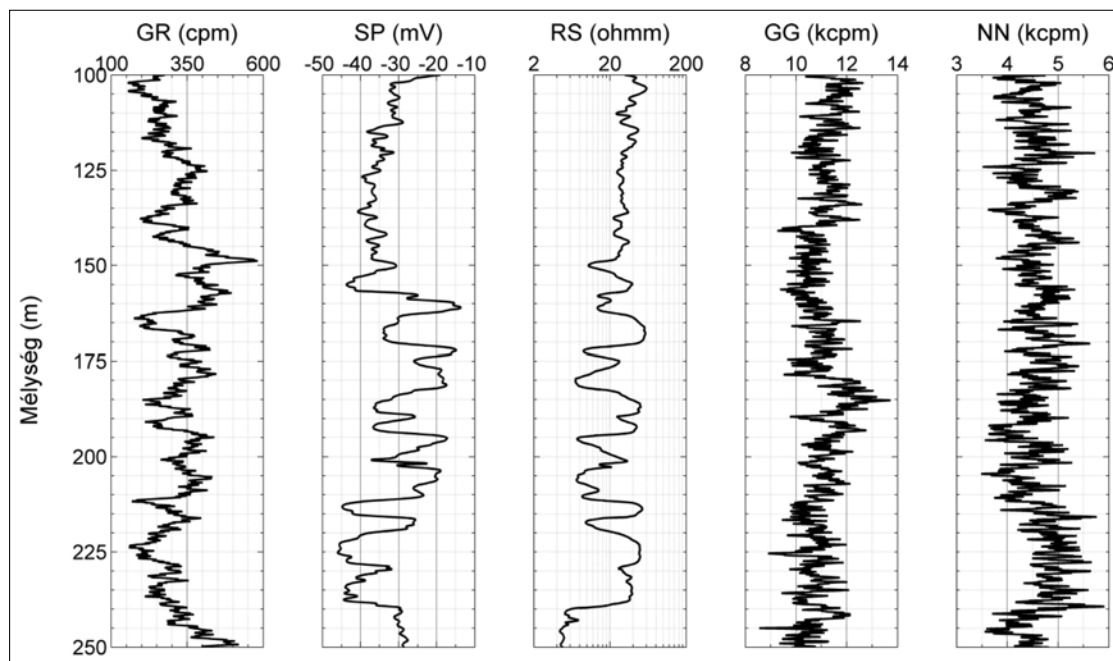


5. ábra | Faktoranalízissel előállított szelvények Fúrás-1-ben, (a) az első faktorszelvény, (b) a faktoranalízissel és a Larionov-formulával becsült agyagtartalom-szelvények
Figure 5 | Borehole logs estimated by factor analysis in Well-1, (a) the log of the first factor, (b) shale volume logs estimated by factor analysis and the Larionov's formula, respectively

természetes γ -sugárzás (GR), természetes potenciál (SP), sekély-behatolású fajlagos ellenállás (RS), mélybehatolású fajlagos ellenállás (RD) és neutronporozitás ($NPHI$). A mérések Pearson-féle korrelációs együtthatóinak átlaga 0,09, ami gyenge lineáris kapcsolatot mutat a szelvények között. A maximum-likelihood módszer alkalmazása megköveteli a mért változók Gauss-eloszláshoz közeli eloszlását. Az adatok átlagos csúcsossága és ferdesége $-0,2$ és $0,3$, ami gyakorlatilag kielégíti a normalitás feltételét. A faktoranalízis alkalmazásával egyetlen faktort állítottunk elő, amely megőrizte a mért változók információjának nagy részét: az első faktor az adatok varianciájának 99%-át magyarázta (ezt főkomponens-analízissel állapítottuk meg). A faktort a (27) egyenlet alapján az $F'_{1,\min} = 0$ és $F'_{1,\max} = 100$ értékek előírásával skáláztuk, ahol az új intervallum megfelel az agyagtartalom százalékban kifejezett értéktartományának. A becsült faktorsúlyok: $-0,37$ (GR), $-0,61$ (SP), $0,58$ (RD), $0,70$ (RS), $-0,94$ ($NPHI$), ami azt mutatja, hogy az első faktor minden szelvényvel korrelál. Látható, hogy a litológiai szelvények (GR és SP) mellett a porozításra és a víztelítettségre érzékeny mérések ($NPHI$ és RS) hatása is igen nagy. Az első faktor és az agyagtartalom kapcsolatát a 4. ábrán láthatjuk. A (26) egyenlet együtthatóinak becsült értékeit az 1. táblázat tartalmazza. A nemlineáris kapcsolat erősségét mérő rang-korrelációs koefficiens (0,99) erős (majdnem teljes) korrelációs kapcsolatot mutat a két mennyiség között. Az első faktor mélység-szelvényét az 5a. ábra mutatja. A faktoranalízissel becsült agyagtartalom szelvényét a (2) egyenletből (függetlenül) számított agyagtartalom szelvényével az 5b. ábrán hasonlíthatjuk össze. A két görbe közötti eltérés $RMSE = 3,3$. Azonban ha az agyagtartalmat az (1) egyenlet szerint számítjuk, akkor $RMSE = 15,5$ -re nő.

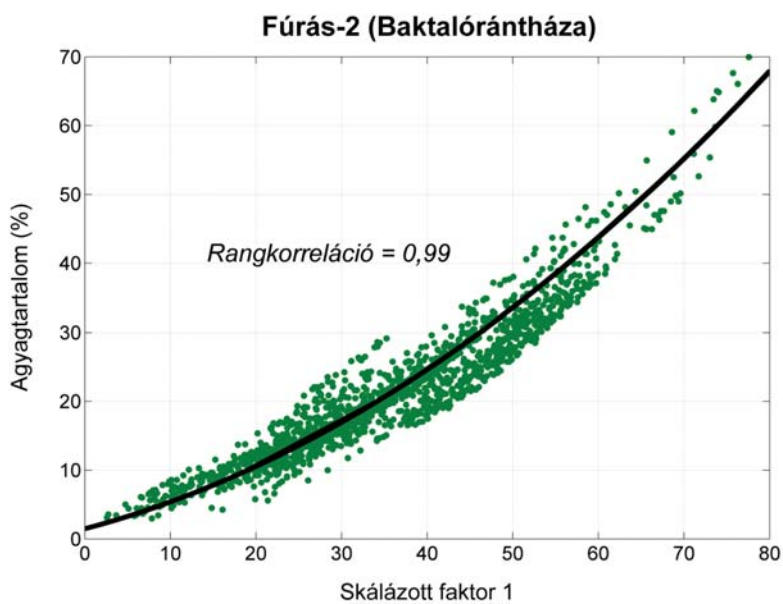
Teszt terület 2

A második fúrás (Fúrás-2) Baktalórántháza közelében mélyült kb. 51 km-re kelet-délkeletre Tokajtól (2. ábra). Az 1197 m talpmélységű termásvízkutató fúrás felső szakaszán felső pleisztocén vízáadó rétegek helyezkednek el, melyekben a szemcseméret különböző. A közel horizontális helyzetű porózus sorozatokat agyagrétegek határolják. 100–160 m között homokos összlet található, alatta agyag, majd ez alatt 5–15 m vastagságú durvaszemcsés rétegek következnek. A feké kb. 240 m mélységben található (Bucsi Szabó 2002). A felhasznált adatrendszer a Fúrás-1-hez képest egy mélyebb mélységtartományt képvisel (100–250 m). A 6. ábrán szereplő szelvények: természetes γ -intenzitás (GR), természetes potenciál (SP), sekélybehatolású fajlagos ellenállás (RS), γ - γ sűrűség (GG) és neutron-neutron (NN). A korreláció a mért adatok között átlagosan 0,08. A csúcsosság- és ferdeségértékek rendre 0,8, ill. 0,3, melyek a Gauss-eloszlástól kissé hegyesebb eloszlásra utalnak. Ebben az esetben is egyetlen faktort határoztunk meg, mely a mért változók varianciáját 99%-ban magyarázta. A becsült faktorsúlyok: $0,92$ (GR), $-0,13$ (SP), $-0,81$ (RS), $0,40$ (GG), $0,06$ (NN). E mérési kombinációban a GR és RS szelvények korreláltak legjobban a faktoral, az SP és a porozításkövető szelvények hatása azonban relatíve gyenge volt. A faktorértékeket hasonlóan skáláztuk, mint a Fúrás-1 esetén. A (26) függvénykapcsolat ebben az esetben is fennáll (7. ábra). A tapasztalati függvény együtthatói az 1. táblázatban találhatóak. A rangkorrelációs együttható értéke 0,99, mely a nagyméretű minta ($K \times N = 23415$) és a szoros nemlineáris kapcsolat eredménye. A 8. ábrán a becsült faktorszelvény és az agyagtartalom-szelvények láthatók. A determinisztikus és a sta-



6. ábra | Fúrás-2 fúróluk-szelvényei mint a faktoranalízis bemeneti adatrendszere

Figure 6 | Borehole logs measured from Well-2 as input for factor analysis

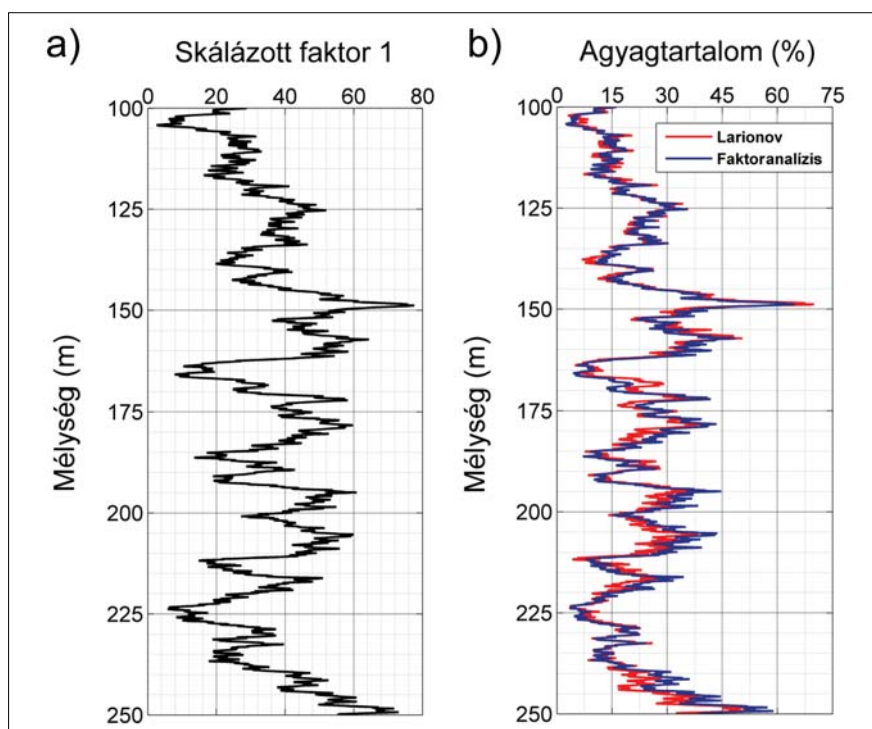


7. ábra | Az első faktor és az agyagtartalom kapcsolata Fúrás-2-ben

Figure 7 | The exponential relationship between the first factor and shale volume in Well-2

1. táblázat. Az agyagtartalom-faktor regressziós modell együtthatói, valamint a becslés alsó és felső korlátja 95%-os szignifikancia szint mellett

	α_{\min}	α	α_{\max}	β_{\min}	B	β_{\max}
Fúrás-1	8,911	9,134	9,358	0,0243	0,0246	0,0249
Fúrás-2	7,586	7,661	7,735	0,0267	0,0268	0,0270
Átlag		8,397			0,0257	



8. ábra | Faktoranalízissel előállított szelvények Fúrás-2-ben, (a) az első faktorszelvény, (b) a faktoranalízissel és a Larionov-formulával becsült agyagtartalom-szelvények

Figure 8 | Borehole logs estimated by factor analysis in Well-2, (a) the log of the first factor, (b) shale volume logs estimated by factor analysis and the Larionov's formula, respectively

tisztikus megoldás eltérése $RMSE = 2,8$, mely jóval alacsonyabb, mint a faktoranalízissel és a lineáris módszerrel kapott eredmények különbsége ($RMSE = 14,6$).

Az 1. táblázatban megadott átlagértékekkel a $V_{sh} = 8,4e^{0,026F_T}$ helyi formulát javasoljuk az agyagtartalom meghatározására. Tapasztalatunk szerint, a természetes γ -szelvényből az (1) formulával kapott agyagtartalom-értékek kb. 20%-kal magasabbak a $0,2 < V_{sh} < 0,8$ intervallumon a faktoranalízissel kapott értékeknél, ami összhangban van a Larionov-formulával kapott eredményekkel is. A fentieket figyelembe véve megállapítható, hogy a lineáris formulával kapott agyagtartalom-értékek korrekciója nélkülözhetetlen a vízzel telített rétegek pontosabb és megbízhatóbb tárolási tulajdonságainak számításánál.

Összefoglalás

A tanulmány bemutatja, hogy a mélyfúrású geofizikai szelvényekből képzett első faktorszelvény erősen korrelál a törmelekes üledékes kőzetek, tárolók agyagtartalmával. A kapott eredményeket a független determinisztikus és inverziós módszerekkel végzett kiértékelés is alátámasztja. Az eddigi hazai és külföldi fúrású adatokon végzett kísérletek azt mutatják, hogy a (26) regressziós formula a mérési területtől függetlenül jó közelítéssel alkalmazható. Érdemes azonban szétválasztani két mélységtartományt, ahogyan azt Larionov is tette. A sekély mélységű, többnyire konszolidálatlan (víztároló-) üledékekben az első faktorra leginkább a porozitáskövető szelvények, míg nagyobb mélységben a tömörebb (szénhidrogén-tároló) formációkban leginkább a litológiai szelvények hatnak. E két zónában a (26) egyenlet alakja megegyezik, azonban a regressziós együtthatók különbözőek.

A statisztikai módszer egyik előnye annak gyorsasága. Míg a determinisztikus vagy inverziós eljárások pontról-pontra haladnak, addig a faktoranalízis együttesen dolgozza fel a szelvényezési intervallum valamennyi adatát. Ebbe természetesen az is belefér, hogy bizonyos intervallumokon adathiány is előfordulhat. A faktoranalízis algoritmus könnyen kiterjeszhető többfúrású alkalmazásokra is. Ha azonos területen található fúrásokban gyűjtött valamennyi adatot egyetlen statisztikai eljárásban dolgozzuk fel, akkor lehetővé válik az agyagtartalom nagyobb területre kiterjedő (2D vagy 3D) meghatározása. További gyakorlati jelentőséggel bír a faktoranalízisből származó agyagtartalom a priori ismeretként történő felhasználása a mélyfúrású geofizikai inverz feladat megoldásában. A független forrásból származó közetfizikai információ növeli az inverz feladat túlhatározottságát, ezáltal csökkenti az inverz feladatban részt vevő közetfizikai paraméterek (porozitás, víztelítettség, mátrix részarány) becslési hibájának mértékét és az esetleges többértelműséget, ami a vízkészletek pontosabb és megbízhatóbb számítását teszi lehetővé.

Köszönetnyilvánítás

A kutatómunka a TÁMOP-4.2.1.B-10/2/KONV-2010-0001 jelű projekt részeként – az Új Magyarország Fejlesztési Terv keretében

– az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósul meg. Az első szerző (SzNP) köszönetet mond az MTA Bolyai János Kutatási Ösztöndíj támogatásáért. A második szerző (KK) köszönetet mond az MTA-ME Műszaki Földtudományi Kutatócsoport támogatásáért. A szerzők köszönetet mondanak a HÁROMKŐ Földtani- és Geofizikai Kutató Betéti Társaság munkatársainak és vezetőjének, Bucsi Szabó Lászlónak a terepi adatok és a mérési területekre vonatkozó speciális ismeretek átadásáért, valamint Prof. Dr. Dobróka Mihálynak, a Miskolci Egyetem Geofizikai Tanszéke Kutatócsoportja vezetőjének a kutatás elősegítéséért és hasznos tanácsaiért.

Hivatkozások

- Adeoti L., Ayolabi E. A., James P. L., 2009: An integrated approach to volume of shale analysis: Niger Delta example, Orire Field. *World Applied Sciences Journal* 7, 448–452
- Alberty M. W., Hashmy K. H., 1984: Application of ULTRA to log analysis. SPWLA 25th Annual Logging Symposium, New Orleans, 1984-Z
- Asquith G., Krygowski D., 2004: Basic well log analysis, 2nd edition. AAPG
- Ball S. M., Chace D. M., Fertl W. H., 1987: The Well Data System (WDS): An advanced formation evaluation concept in a micro-computer environment. SPE Eastern Regional Meeting, Pittsburgh, 17034-MS
- Baráth I., Barlay Z., Markó L., Kisházi A., 1976: A világszínvonal helyzetének elemzése az ipari geofizikai információ automatizált feldolgozása és értelmezése terén. NIMDOK
- Bartlett M. S., 1937: The statistical conception of mental factors. *British Journal of Psychology* 28, 97–104
- Beltrami H., Cheng L., Mareschal J. C., 1997: Simultaneous inversion of borehole temperature data for determination of ground surface temperature history. *Geophysical Journal International* 129, 311–318
- Bhuyan K., Passey Q. R., 1994: Clay estimation from GR and neutron-density porosity logs. SPWLA 35th Annual Logging Symposium, Tulsa, 1994-DDD
- Buoro A. B., Silva J. B. C., 1994: Ambiguity analysis of well-log data. *Geophysics* 59, 336–344
- Bucsi Szabó L., 2001: Tokaj Vízmű veszélyeztetett ivóvízbázis diagnosztikai vizsgálata. Zárójelentés. HÁROMKŐ BT., Miskolc
- Bucsi Szabó L., 2002: Baktalórántházai Vízmű vízbázisa. Geofizikai vizsgálatok. Jelentés. HÁROMKŐ BT., Miskolc
- Clavier C., Hoyle W., Meunier D., 1971: Quantitative interpretation of thermal neutron decay time logs: Part I. Fundamentals and techniques. *Journal of Petroleum Technology* 23, 743–755
- Cripps A. C., McCann D. M., 2000: The use of the natural gamma log in engineering geological investigations. *Engineering Geology* 55, 313–324
- De Witte L., 1955: A study of electric log interpretation methods in shaly formations. *Petroleum Transactions AIME* 204, 103–110
- Dobróka M., Szabó N., 2010: Sorfejtéses inverzió II. Mélyfúrású geofizikai adatok feldolgozása intervalluminverziós eljárással. *Magyar Geofizika* 51, 25–42
- Dobróka M., Szabó N. P., 2011: Interval inversion of well-logging data for objective determination of textural parameters. *Acta Geophysica* 59, 907–934
- Doveton J. H., Merriam D. F., 2004: Borehole petrophysical chemostratigraphy of Pennsylvanian black shales in the Kansas subsurface. *Chemical Geology* 206, 249–258
- Drahos D., 2005: Inversion of engineering geophysical penetration sounding logs measured along a profile. *Acta Geodaetica et Geophysica* 40, 193–202

- Ferenczy L., Kiss B., 1993: Szénhidrogén-tárolók mélyfúrásai geofizikai értelmezése I. Kézirat, Nemzeti Tankönyvkiadó
- Fisher A. T., Barnhill M., Revenaugh J., 1998: The relationship between hydrogeologic properties and sedimentary facies: An example from Pennsylvanian bedrock aquifers, Southwestern Indiana. *Ground Water* 36, 901–912
- Grana D., Dvorkin J., Cibin P., 2011: Factor analysis prediction of effective stress from measurable rock attributes and calibration data. *First Break* 29, 63–72
- Jang H., Kim H. J. 2008: Permittivity inversion of borehole radar data measured in the vadose zone. *SEG Annual Meeting, Las Vegas*, 2008-1303
- Han D. H., Nur A., Morgan D., 1986: Effects of porosity and clay content on wave velocities in sandstones. *Geophysics* 51, 2093–2107
- Hempkins W. B., 1978: Multivariate statistical analysis in formation evaluation. *SPE California Regional Meeting, San Francisco*, 7144-MS
- Herron M. M., 1986: Mineralogy from geochemical well logging. *Clays and Clay Minerals* 34, 204–213
- Hsieh B. Z., Chilingar G. V., Lu M. T., Lin Z. S., 2007: Estimation of groundwater aquifer formation-strength parameters from geophysical well logs: The southwestern coastal area of Yun-Lin, Taiwan. *Energy Sources Part A* 29, 1–19
- Jöreskog K. G., 2007: Factor analysis and its extensions. *Factor analysis at 100, Historical developments and future directions*. Lawrence Erlbaum Associates
- Kaiser H. F., 1958: The varimax criterion for analytical rotation in factor analysis. *Psychometrika* 23, 187–200
- Klimentos T., 1991: The effects of porosity-permeability-clay content on the velocity of compressional waves. *Geophysics* 56, 1930–1939
- Kvapil J., Mares S., 2003: Cone penetration logging for the direct detection of LNAPLs contamination. *Near Surface Geophysics* 1, 157–160
- Larionov V. V., 1969: Radiometry of boreholes. *Nedra*
- Lawley D. N., Maxwell A. E., 1962: Factor analysis as a statistical method. *The Statistician* 12, 209–229
- Mayer C., Sibbit A., 1980: GLOBAL, a new approach to computer-processed log interpretation. *SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Dallas*, 9341-MS
- Menke W., 1984: *Geophysical data analysis: Discrete inverse theory*. Academic Press
- Moret G. J. M., Clementz W. P., Knollz M. D., Barrashz W., 2004: VSP traveltimes inversion: Near-surface issues. *Geophysics* 69, 345–351
- Paillet F. L., 1995: Integrating surface geophysics, well logs and hydraulic test data in the characterization of heterogeneous aquifers. *Journal of Environmental and Engineering Geophysics* 0, 1–13
- Paillet F. L., Crowder R. E., 1996: A generalized approach for the interpretation of geophysical well logs in ground-water studies – Theory and application. *Ground water* 34, 883–898
- Poupon A., Gaymard R., 1970: The evaluation of clay content from logs. *SPWLA 11th Annual Logging Symposium, Los Angeles*, 1970-G
- Poupon A., Leveaux J., 1971: Evaluation of water saturation in shaly formations. *The Log Analyst* 12, 3–8
- Rao B. N., Pal P. C., 1980: Factor analysis for interpreting petrophysical data on Roro Ultramafics, Singhbhum district, India. *Geophysical Prospecting* 28, 112–118
- Revil A., Cathles III L. M., 1999: Permeability of shaly sands. *Water Resources Research* 35, 651–662
- Slater L., Lesmes D. P., 2002: Electrical-hydraulic relationships observed for unconsolidated sediments. *Water Resources Research* 38, 1–13
- Spearman C., 1904: The proof and measurement of association between two things. *The American Journal of Psychology* 15, 72–101
- Stieber S. J., 1970: Pulsed neutron capture log evaluation – Louisiana Gulf Coast. *SPE Fall Meeting AIME, Houston*, 2961-MS
- Szabó N. P., 2011: Shale volume estimation based on the factor analysis of well-logging data. *Acta Geophysica* 59, 935–953
- Szabó N. P., Dobróka M., 2011: Geostatistical approach for shale volume estimation in water-bearing formations. *Near surface 2011, Leicester*, P15
- Szabó N. P., 2012: Dry density derived by factor analysis of engineering geophysical sounding measurements. *Acta Geodaetica et Geophysica Hungarica* 47, 161–171
- Szabó N. P., Dobróka M., Drahos D., 2012: Factor analysis of engineering geophysical sounding data for water-saturation estimation in shallow formations. *Geophysics* 77, WA35–WA44
- Szilágyi E., 1974: *Fejezetek a mélyfúrásai geofizika gyakorlatából I. Kézirat, Nehézipari Műszaki Egyetem*
- Thomas E. C., Stieber S. J., 1975: The distribution of shale in sandstones and its effect upon porosity. *SPWLA 16th Annual Logging Symposium, New Orleans*, 1975-T
- Tselentis G. A., 1985: The processing of geophysical well logs by microcomputers as applied to the solution of hydrogeological problems. *Journal of Hydrology* 80, 215–236

Modern hulladéklerakók aljzatszigetelési hibáinak kimutatása 3D modellezéssel

BARACZA MÁTYÁS KRISZTIÁN

Miskolci Egyetem, Geofizikai Intézeti Tanszék, 3515 Miskolc-Egyetemváros
E-mail: baracza@uni-miskolc.hu

A világ számos fejlett országában, az Európai Unióban, így Magyarországon is komoly környezetvédelmi előírások vonatkoznak arra, hogyan és milyen feltételekkel helyezhetők el veszélyes és kommunális hulladékok lerakókban, tárolókban. Az egyre szigorodó környezetvédelmi előírásoknak megfelelően új hulladéklerakók építésre már csak akkor adnak létesítési engedélyt, ha a beszállítani kívánt hulladékok típusához a kritériumoknak megfelelően kialakított aljzatszigetelési rendszert építenek ki. E kombinált aljzatszigetelési rendszerek megakadályozzák a hulladékokból az altalaj felé áramló csurgalékvizek kiszivárgását a környezetbe. Az aljzatszigetelési rendszer kiépítése során és a hulladékok elhelyezése közben hibák keletkezhetnek a szigetelésben. A biztonságos üzemeltetés egyik feltétele annak az ellenőrzése, hogy építés közben nem sérült-e meg az aljzatszigetelés. Ennek egyik módszere lehet a geoelektromos geofizikai vizsgálat, melynek nagy előnye a fúrásos és egyéb in-situ vizsgálati módszerekkel szemben, hogy a már lerakott hulladékok és a kiépített aljzatszigetelési rendszer megbontása nem következik be. A 3D FD (3Dimenziós véges differencia) előremodellező program felhasználásával vizsgáltam az előforduló aljzatszigetelési hibák kimutathatóságát. A dolgozat bemutatja a hulladéklerakó építésének (üzemeltetésének) néhány olyan problémáját, amely az olyannyira fontos aljzatszigetelés sérülését eredményezheti. Továbbá bemutatja annak fizikai alapját, amely lehetővé teszi a sérülések geoelektromos módszerrel történő kimutatását. Ehhez geofizikai modellszámítások eredményét mutatja be egyszerű modellen.

Baracza, M. K.: 3D model studies for detecting the barrier system punctures of modern waste site

Containment of communal and hazardous waste materials in Hungary and worldwide in modern landfills is frequently achieved by lining the structure with a low permeability geomembrane commonly made of plastics like high density polyethylene. Strict construction quality control is applied during the construction of the geomembrane to ensure that the number of penetrating holes and other imperfections in it are reduced to an acceptable extent. Conventional non destructive testing methods are used to detect punctures, under the construction, however in operating waste sites these methods are not applicable to the entire geomembrane surface. Some geoelectrical method, closely related to the direct current electrical resistivity one, can be used to test the lined containment. The geoelectrical techniques exploit the insulating properties of modern geosynthetical membranes and are able to locate the holes of the geomembrane under the protective soil or waste covering it. That method does not damage the liner. That enables the method to locate leaks in active landfills after the waste has been deposited on the floor area. The available 3D FD forward modelling program permits investigation of deposits of optional horizontal range in a three-dimensional, inhomogeneous geometry and with an arbitrary resistivity distribution.

Beérkezett: 2012. május 20.; *elfogadva:* 2012. június 19.

Bevezetés

A hulladéklerakóknál előírás, hogy a lerakó alatt kialakított természetes anyagok keverékéből beépített jó vízzáró képességű szigetelő rétegek mellett, bizonyos esetekben szintetikus anyagból készült szigetelő réteget vagy rétegeket is ki kell alakítani a hulladéktestből kioldódó anyagok visszatartására. A hulladéklerakók kialakításakor kiépített és megfelelően tömörített természetes anyagok keverékéből álló szigetelő réteg anyaga általában különböző típusú agyagok

és geopolimerek keveréke. A különböző arányban kevert és beépített agyagok fizikai és talajmechanikai szempontból támasztott követelményeit több kormányrendelet szabályozza.

Az aljzatszigetelés legfontosabb eleme a geomembrán, más néven fólia szigetelőréteg, szintén a csurgalékvíz elszivárgását hivatott megakadályozni. A számos geomembrán típus közül a HDPE (nagy sűrűségű polietilén) és az EPDM (gumifólia) szigetelőket alkalmazzák leggyakrabban. A kivitelezési költségek általában HDPE fóliánál kedvezőbbek,

ezért ennek alkalmazása elterjedtebb. Megkívánt minimális vastagsága hulladéklerakóknál 2 mm. Élettartama megfelelő kivitelezés és üzemeltetés szerint eléri a 100 évet. Gyártói mérések szerint, optimális körülmények között a fajlagos ellenállása meghaladja a 10^{11} Ω m-t. E nagy elektromos ellenállású fólián átfolyó áram nagyon kicsi, de nem nulla a nagy felület következtében. Ez magyarázhatja azt a jelenséget, hogy teljesen ép szigetelőfólián keresztül is folyik áram, amely néhány század milliamper is lehet.

A HDPE fóliát általában 4–5 m széles tekercsekből építik fel a hulladéklerakók előkészített felületű és minőségű aljzatára. Illesztésük ragasztással vagy hőprezéssel készül. A kiépítés során a fóliahegesztés jóságának vizsgálatára több módszert is használnak, elterjedt módszer a fóliahegesztés során kialakított sűrített levegővel tesztelhető csatorna, légnyomásmegtartó képességének vizsgálata. Emellett vákuumtechnikán alapuló tesztek is léteznek a „varratok” minősítésére. Ezeket a vizsgálatokat általában az illesztési felületek mentén végzik, nem a homogén fóliaszakaszok vizsgálatára (Szabó I. 2001). Ezek az eljárások nem alkalmasak a hegesztésen kívüli fóliasérülések kimutatására, pedig a szigetelőfólia kiépítése közben számos fizikai sérülés alakulhat ki. A leggyakoribb okok: a fólia-előállítás végző berendezés kapaszkodó karmai által okozott sérülések, a fóliahegesztés kialakításakor létrejött olvadási hibák, gyenge minőségű munkavégzés, munkagépek járőfelületei által okozott sérülések stb.

A lefektetett szigetelőfóliák felső oldalán számos olyan üzemeltetést segítő elem kap helyet, amely nem inert hulladékok esetén a felgyülemelő csurgalékvíz mennyiségének csökkentésére és a biológiai bomlási folyamatok során keletkező gázok elvezetésére, felhasználására szolgálnak. Ezek beépítése ugyancsak veszélyt jelenthet a fóliaszakadások kialakulására.

A fent leírt vonalas gyűjtőlevesítményeknek, gázkutaknak, gyűjtőzompoknak többszörösen kell ki- és behaladniuk a hulladéktestbe, megtörve a szigetelőfólia folytonosságát. A lefektetett szigetelőfólia és a felszínen futó vonalas kialakítású drének és csövek védelmére általában geotextilréteget terítenek le, majd annak felületére általában jó vízvezető képességű, néhány tíz centiméter vastagságú mosott kavics vagy kavicsos homok szivárgóréteket építenek ki. A szivárgóréteg feladata a későbbi üzemeltetés során a csurgalékvizek és bomlástermékek drénekhez történő vezetése és az egyenletes terhelés biztosítása a szigetelő felé.

A csőcsatlakozások és aknák szigetelőfóliával történő összedolgozása különös figyelmet igénylő munka, mert ezeken a helyeken sokszor alakulhatnak ki fóliahegesztési hibák (Szabó A. 2008).

A hulladéklerakókat nemcsak aljzatszigetelés kialakítására szokták szigetelőfóliákkal borítani, hanem azok lezárásakor, fedőréteg kialakítására is használják, a csapadékok beszivárgásának minimalizálására. A fedőfólia-réteg kialakításakor is fontos követelmény, hogy a fólia teljes mértékben vízzáró legyen. Ez azért fontos, mert a csapadék hulladéktestbe áramlása plusz terhelést jelent az aljzatszigetelő rendszerre. Meg kell említeni, hogy ezek a beszivárgó vizek ki-

sebb kockázatot jelentenek a hulladéklerakó üzemeltetése szempontjából, mert a hulladéktestben zajló bomlási folyamatokhoz szükség lehet külső vízmennyiségre.

Ahhoz, hogy geoelektromos módszerekkel kimutatható legyen egy aljzatszigetelési rendszer szivárgásmentessége, elektromos szempontból többféle módszer alkalmazható.

Mindegyik lényege, hogy egy áramforrásból elektródán keresztül áramot kell juttatni az elszigetelt lerakóterbe, továbbá az áramkör zárásához szükség van egy hulladéklerakón kívül elhelyezett másik elektródára (mint nyelőre). Az áramkör a „szigetelő”-rétegen (fólián) keresztül záródik. A szigetelőfólia elektromosan (szakadás hiányában) teljesen vagy csaknem teljesen elszigeteli egymástól a hulladék felőli és az altalaj felőli oldalt.

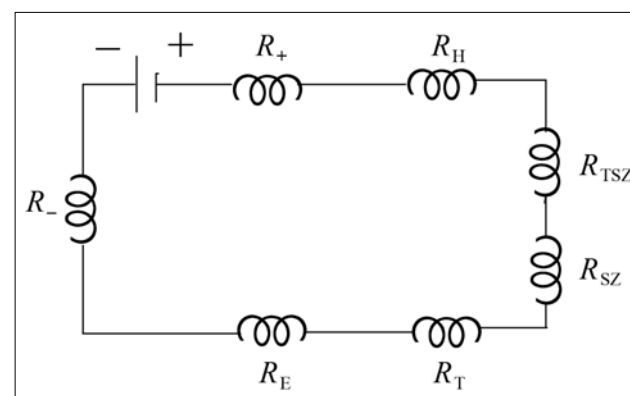
Amennyiben az aljzatszigetelés sérült, a szakadáson keresztül jelentős áram „szökik” meg a hulladékteréből. Ennek hatására a potenciáeloszlás jelentősen megváltozik a sérülésmentes állapothoz képest, ami alapja a sérülések kimutatásának.

Ha az átvezető sérülés száraz és nincs kitöltve nedves közzel, akkor a szakadás elektromos szempontból kimutathatatlan. Szakadás esetén a hulladékokkal feltöltött lerakó aljzatszigetelési sérülésen keresztül elektromosan jól vezető zóna köti össze a lerakó belső terét a külső környezettel.

Mérési eljárások

A szakadásmérésnél kialakuló áramkör következő fő részeit az 1. ábra mutatja be, az Ohm-törvényt felhasználva:

- R_+ ; R_- = átmeneti ellenállás (az árambevezető és -nyelő elektróda felületén),
- R_H = hulladék ellenállása (hulladéktest átlagos fajlagos ellenállásértéke),
- R_{TSZ} = szivárgó réteg ellenállása (kavics vagy kavicsos homok szivárgó réteg),
- R_{SZ} = szigetelőfólia ellenállása (HDPE vagy EPDM aljzatszigetelő fólia),



1. ábra Szakadáskereső geoelektromos mérés áramköri elemei

Figure 1 Electrical analogue of resistance circuit for geoelectrical leak location method

R_T = altalaj ellenállása (befogadó geológiai közeg),
 R_E = elektródák ellenállása (az árambevezető és -nyelő elektróda anyagának az ellenállása).

A kialakuló áramerősség az áramkörben:

$$I = \frac{U}{R_+ + R_H + R_{TSZ} + R_{SZ} + R_T + R_E + R_-}$$

Azért, hogy az átmeneti ellenállások befolyását elkerüljük, a geoelektromos gyakorlatban általánosan alkalmazott külön mérőelektródával (elektródákkal) mérjük a potenciált vagy potenciálkülönbséget.

Amennyiben nincs szakadás a fólia felszínén, az áramsűrűség eloszlása egyenletes az egész lerakótér felszínén. A kialakuló áramerősséget és potenciáeloszlást befolyásolja a fóliára fektetett rétegek mérete, alakja, vastagsága, inhomogenitása és az árambevezető elektróda elhelyezkedése. Az áramszőkés jelenségét a 2. ábra mutatja.

A féltér felszíni potenciáeloszlását mindig befolyásolja a behordott fedőrétegek inhomogenitása, a lerakó térben futó csövek, az altalaj változékonysága, a hulladéklerakó geometriai viszonyai, sarkak, élek, padkák helyzete. A későbbiekben vizsgálni szeretném e paraméterek hatásainak elkülönítését a szakadástól. A méréshez használt áramforrások lehetnek egyen- vagy váltakozó feszültségű berendezések. A váltakozó feszültséget alkalmazó mérőrendszerek előnye az elektródákon kijuttatható magasabb feszültség, de hátránya a feltöltődési effektussal kapcsolatos káros zavarpotenciálok ráakódása a mért jelre. Az alkalmazott frekvencia csökkentésével jelentősen mérsékelhető a feltöltődési és kisülési effektus.

A terepen gyakorlatban használt egyenáramú források általában akkumulátorok. Néhány sorba kötött akkumulátorral azonban nem biztos, hogy elegendő nagyságú áramot tudunk a hulladéktestbe bevezetni.

Mérések alkalmával fontos a forráselektrodák elhelyezésének megválasztása, illetve kiképezése, mert különösen

inhomogén hulladéktest esetén a hulladékon átfolyó áram erőssége gyorsan csökken az elektródától távolodva, és az áram mindig a hozzá legközelebbi szakadási helyen át igyekszik a legrövidebb úton keresztül zárni az áramkört.

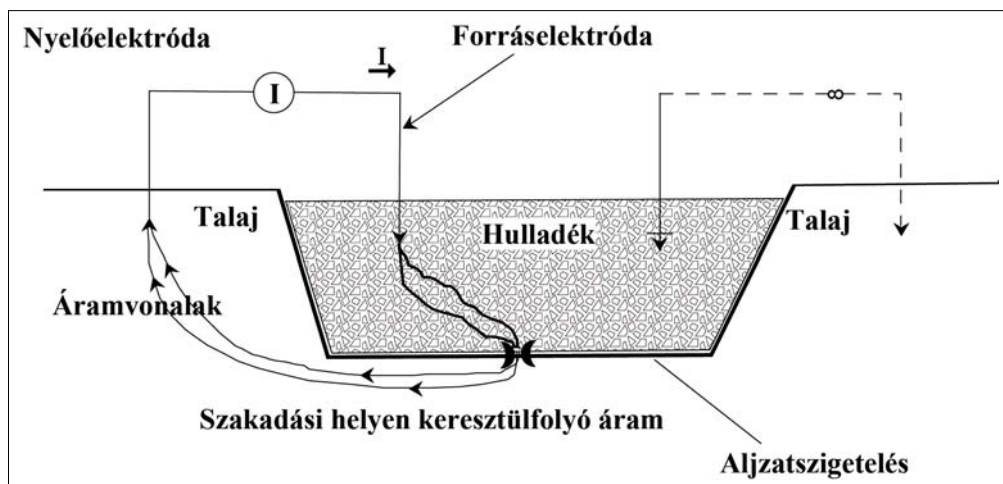
A lerakótéren kívül elhelyezkedő nyelő áramelektrodát a kételektrodás rendszer kívánalmainak megfelelően, a kvázi végtelen távoli pontban kell elhelyezni (Frangos W. 1997).

Fontos szempont, hogy a hulladéklerakó aljzatszigetelésének felszínre kibúvó vállrészét, az övszivárgó környezetében teljesen le kell takarítani annak érdekében, hogy az áramszőkési effektus ne a felszíni hanyag letakarítás miatt megmaradt „áramhídon” keresztül valósuljon meg. Mérés alkalmával el kell távolítani minden olyan, áramvezetés szempontjából kritikus tereptárgyat, amely kivezetheti az áramot a körbeszigetelt lerakótérből. Szintén nagy odafigyelést jelentő kritérium, hogy a meglehetősen inhomogén szerkezetű és fajlagos ellenállású szilárd hulladékok felszínén megfelelő erősségű áramot lehessen a hulladéktestbe juttatni.

Az eddigi gyakorlatban a hulladéklerakók üzemeltetéséhez, biztonsági vizsgálataikhoz kapcsolódóan kétféle geoelektromos gyakorlat alakult ki:

- előre beépített szenzorrendszerre épülő méréstechnika,
- mobil, állandó érzékelők nélküli, hulladékfelszínről végezhető mérések.

A gyakorlatban általában az előre beépített szenzorrendszert alkalmazzák. Az előre beépített szenzorrendszer esetében a szigetelő fólia alá és felé közvetlenül hálószerűen elhelyezett elektródákat építenek be, és folyamatos monitoringméréseket végeznek (Kovács A., KBFI-Triász Kft. 2007, BHF Environmental s.r.o. Slovakia 2012). Ezek alapján állapítják meg a szivárgás helyét (szakadás helyét). A mérések legfőbb előnye, hogy időjárástól „függetlenül” a szenzorrendszerrel folyamatosan végezhető geoelektromos mérések. Hátránya, hogy kiépítése rendkívül költséges, valamint a szenzorrendszer meghibásodása esetén az utólagos



2. ábra | Áramszőkés jelensége a hulladéklerakó-testből
 Figure 2 | Configuration of electric leak location technique for landfills

javítás bonyolult, költséges, szinte javíthatatlan (Hix K. 1998).

Az előre beépített szenzorrendszer mérőelektrodái többféle elektrodaelrendezésben is működnek. Létezik olyan mérési módszer, amelynél a talaj nedvességtartalmát mérő szenzorokat építenek a szigetelő alá (Metolabor AG. 2004).

A mérések megvalósítása automatizálható. A mérési adatok összegyűjtése egy programvezérelt automata adatgyűjtő segítségével, tetszőleges elektrodaconfigurációban hajthatók végre.

A méréseket minden esetben megelőzi a bázisállapot felvétele. Ehhez viszonyított értékek alapján állapítható meg biztonságosan, hogy a hulladéklerakó aljzatszigetelésén keresztül történik-e szivárgás, és ha igen, akkor hol. A mérések kiértékelésénél figyelemmel kell lenni többek közt az altalaj vezetőképességbeli egyenetlenségeinek feltérképezésére valamint, a talajvízviszonyok változásaira stb. Ezekhez bázismérésre van szükség. Az altalaj bázis fajlagos ellenállástérképének elkészítését általában Wenner-elrendezéssel célzerű elvégezni.

Geoelektromos mérőrendszerrel nem rendelkező hulladéklerakók esetében a lerakó körül telepített figyelőkutakban mérik a talajvízben oldott ionok és vegyületek változásait. Amennyiben valamely figyelőkútban változás tapasztalható a kútvíz minőségében, valószínűsíthető, hogy az aljzatszigetelő fóliában valahol szakadás alakult ki, és a szakadási helyen vagy helyeken keresztül csurgalékvíz szivárog az altalajba, elszennyezve ezzel a talajvizet.

Magyarországon is léteznek olyan hulladéklerakók, amelyek kialakításánál már előírás volt a szigetelőfólia beépítése, de különböző okok miatt geoelektromos szenzorrendszer beépítésére nem került sor, vagy az üzemeltetés során végérvényesen megrongálódtak az érzékelők. Ilyen esetekben jelenthet megoldást a mobil szakadáskeresési eljárások alkalmazása.

Mobil szakadáskeresési eljárás

A hulladékfelszínről történő mobil szakadáskeresési eljárást a nehéz kivitelezési és kiértékelési sajátosságok miatt eddig

csak szűk körben, próbaszerűen alkalmazták. A mobil szakadáskeresési geoelektromos mérések általában a hulladéktest felszínén végezhetőek el. Egy ilyen mobil szakadáskeresési eljárás kifejlesztésére irányuló kísérlet eredményét mutatjuk be ebben a dolgozatban.

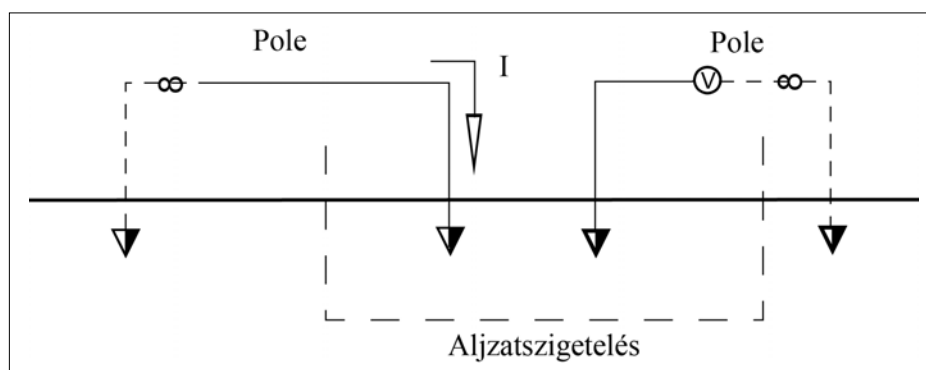
A javasolt mérési módszer mobil szakadáskeresési eljárás esetén, a Pole–Pole és Pole–Dipole mérések. Mindkét mérés esetében az áramszökési effektus és helyének detektálása a cél, a felszínen elhelyezett mérőelektrodák segítségével.

Pole–Pole elektrodaelrendezés esetén az áram bevezetése az elszigetelt hulladéktestbe egy áramelektroda segítségével történik. Az áramelektroda-pár másik tagja (nyelő), a lerakóterén kívül a kvázi végtelenben helyezkedik el, amelyen keresztül a bevezetett áram, energiaforrásba való visszavezetése történik. Pole–Pole elrendezésnél a mérő elektrodapár egyik tagja az elszigetelt hulladéktest felszínén mozog, párja a kvázi végtelenben található a hulladéklerakon kívül. A Pole–Pole elektrodaelrendezés sematikus vázlatát a 3. ábra mutatja.

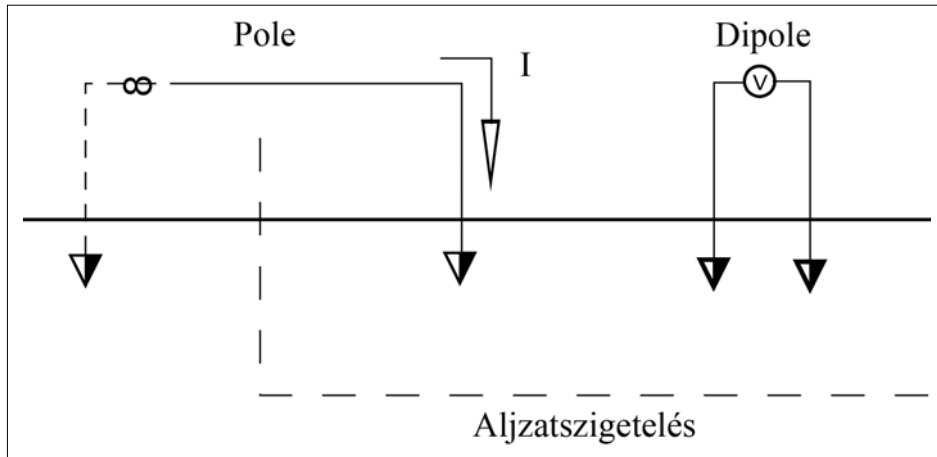
A tápelektrodán bevezetett áram a hulladéklerakó testben szétáramolva a nagy fajlagos ellenállású aljzatszigetelésen áthaladva (igen nagy felület) zárja az áramkört. A hatására kialakuló potenciáltér-eloszlás, a hulladék belső szigetelésével körbe vett részén a mérő- vagy más néven referenciaelektroda segítségével mérhető meg. A méréseket szelvényvonalak mentén érdemes végezni. A potenciálértékeket a szelvényvonal mentén a hulladékba szúrt referenciaelektrod és a külső párja közt kialakuló potenciálkülönbségek adják. A mérés felbontóképessége növelhető a mérési pontok minél sűrűbb elhelyezésével. Pole–Pole mérések eredményeképpen olyan potenciáeloszlás-térkép hozható létre a vizsgált terület felett, amely kiugró potenciálanómália megjelenítésével hívja fel a figyelmet a szakadás helyére. Sajnos több egymáshoz közel található szakadási hely esetén a potenciálérték maximuma nem mutatja pontosan, hol is találhatóak a kritikus helyek.

Pole–Dipole elektrodaconfiguráció esetében a 4. ábra mutatja az elektrodák helyzetét.

A mérés kivitelezése egy áram- és egy mérődipólus segítségével történik. Az áram bevezetése a hulladéklerakó nagy



3. ábra Pole–Pole elektrodaelrendezés
Figure 3 Schematic representation of Pole–Pole electrode arrangement



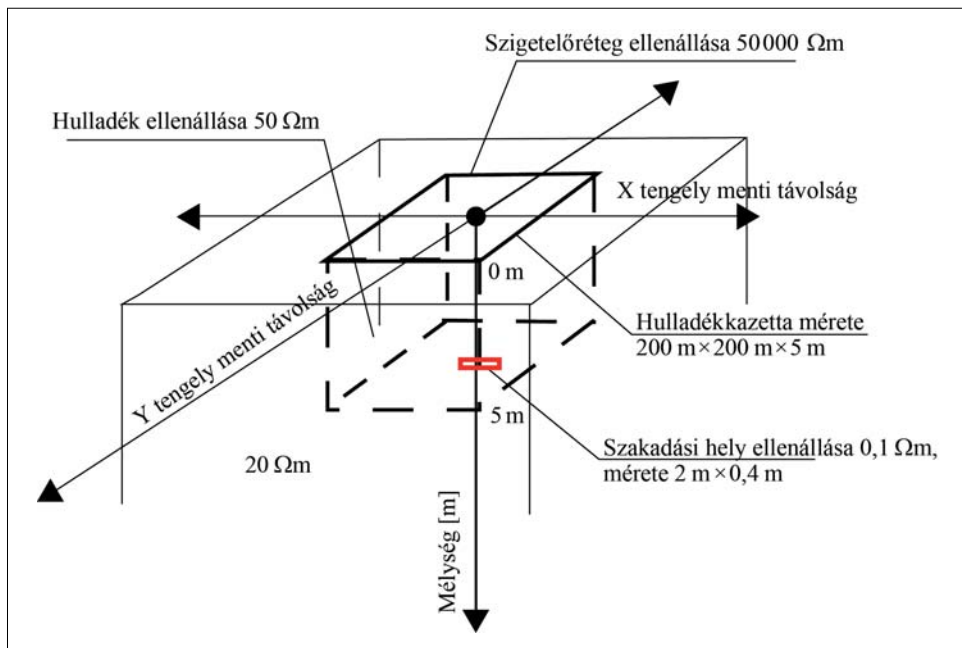
4. ábra Pole–Dipole elektródaelrendezés
Figure 4 Schematic representation of Pole–Dipole electrode arrangement

fajlagos ellenállású fóliával körbe határolt terén belül történik egy áramelektroda segítségével, melynek párja, a nyelőelektroda a lerakóterén kívül, kvázi végtelen távolságban található. További vizsgálat tárgya lesz a távoli elektród mélybeli elhelyezése. A mérő- vagy potenciáelektrodák távolságát változtatják annak függvényében, hogy mennyire szükséges növelni a mérés felbontóképességét, illetve milyen mélységben van a szigetelőfólia. A mérődipólusok távolságát egy adott térképezési mérés során állandó értéken célszerű tartani. A mérések kivitelezése szelvényvonalak mentén történik.

A szelvényvonalak közti távolságok sűrítethetők, ha pontosabb felbontást szeretnénk látni. A Pole–Dipole mérések eredményeként megszerkeszthető egy potenciál különbség eloszlás térkép, melynek értékeit a szelvényvonalak mentén felfűzhető pontok eredményei adják.

Szakadásmentes esetben a terület felett mért potenciál- adatok eloszlása normál lefutású, értékeikben kiugró mennyiségek nem találhatók.

Amennyiben szakadás található a vizsgált hulladéklerakó aljzatszigetelésében, ott a szakadás közvetlen környezetében, egy pozitív–negatív értékkel megjelenő potenciálcúcs-



5. ábra Előremodellezéskor felhasznált hulladéklerakó modell
Figure 5 Waste model for 3D FD modelling

pár figyelhető meg, melynek inflexiós pontjában, a két csúcspont közti függvényszakasz középpontjában található a szakadási hely.

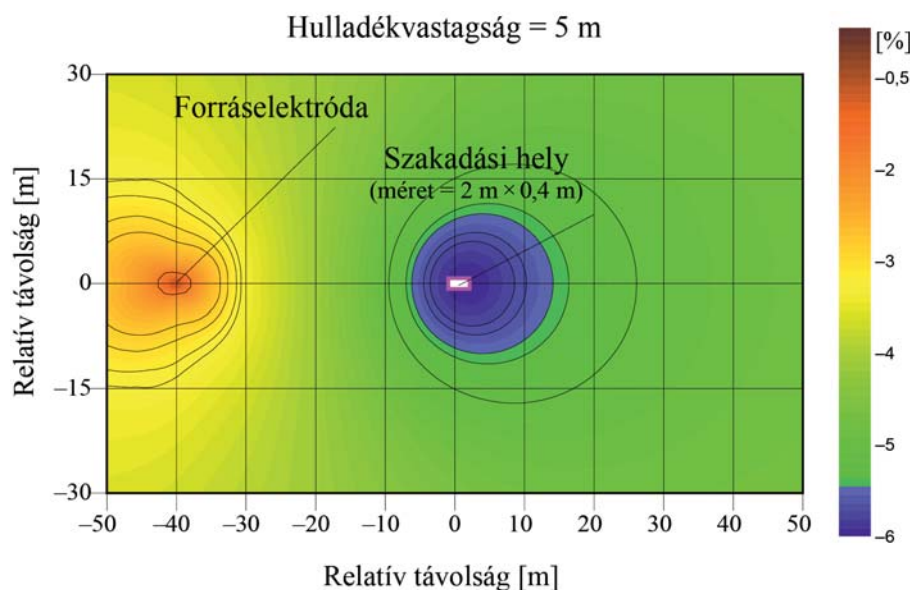
Amennyiben több szakadási hely is található egymáshoz közel a fólia felületén, akkor a potenciáeloszláson alapuló kiértékelés csak többször ismételt helymeghatározásra irányuló méréssel ad megbízható eredményeket.

A mérések eredményes kivitelezéséhez fontos a talajnedvesség jelenléte. Ha a hulladéktest felszíne vagy maga a lerakott hulladék kevés nedvességet tartalmaz, akkor erősen

romlik az elektromos áramvezető képességük, így gyengül a mért jel erőssége, kimutathatatlaná válhat a szakadás helye a fólián.

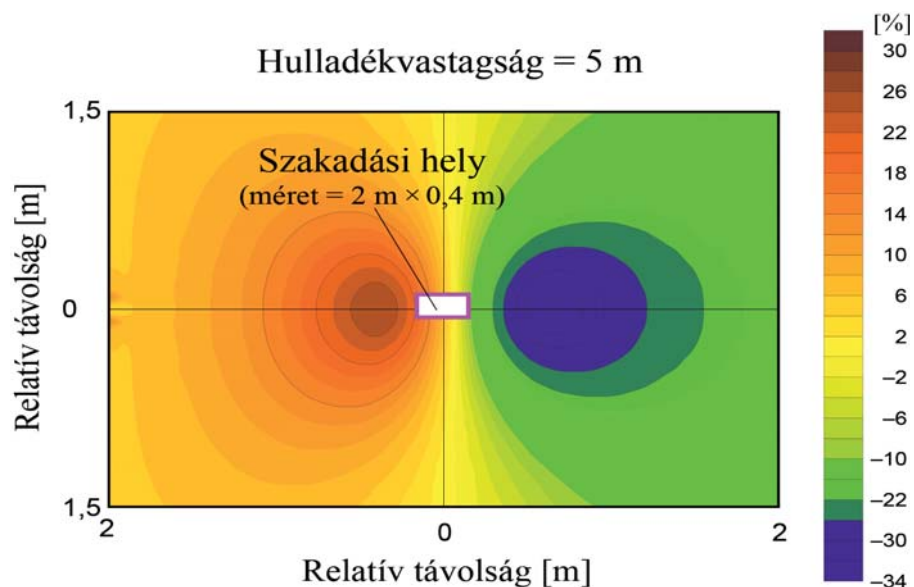
3D modellezés

A Geofizikai Intézet Tanszéken rendelkezésre álló 3D FD (*3-Dimensional Finite Difference*) véges differencia előre-modellező program tetszőleges keresztmetszetű, három-



6. ábra | Normált potenciáeloszlás-térkép Pole-Pole elektródaelrendezés esetén

Figure 6 | Normalized potential distribution map of Pole-Pole arrangement



7. ábra | Pole-Dipole elektródaelrendezés anomáliaképe

Figure 7 | Potential distribution map of Pole-Dipole arrangement

dimenziós, inhomogén, normális értelemben bármilyen fajlagos ellenállású és geometriájú hulladéksajátságokkal kombinálható lerakók vizsgálatát teszi lehetővé. A tetszőleges szó alatt a hulladéklerakókba behordott anyagok gyakorlatában tapasztalható átlagos fizikai tulajdonságok értenődők. A véges differencia előremodellező alapprogramot Klaus Spitzer német kutató fejlesztette ki a Freibergi Bányászati Akadémia Geofizikai Intézetében (Spitzer K. 1995).

Az X , Y horizontális irányok rácseleminék maximális száma mindkét irányban 73 db, a Z vertikális irányú rácseleminéké 39 db. A program segítségével a potenciálértékek a tér minden tetszőleges pontjában kiolvashatóak. A program a futtatása végeredményeként a beadott modelleknek megfelelő virtuális térben tetszőleges konfigurációjú elektrodaelrendezés potenciálképét generálja le.

A kapott eredmények kiértékeléséhez Gyulai Ákos véges differenciás program segítségével végzett modellszámítási eredményeit használtam fel (Gyulai Á. 1997).

Az előremodellezések alkalmazásával különböző geometriájú hulladéklerakó modelleket vizsgáltam, melyeket terepi példák alapján alkottam meg. A különböző geometriai sajátosságú hulladéktestek mellett modelleztem eltérő terepi példák-ból vett fajlagos ellenállásértékekkel feltöltött objektumokat is. A lefuttatott modellszámítások szerint a program képes kezelni nagy inhomogenitású hulladékmodelleket is, különböző elektroda elrendezések esetén. Eddigi modellkísérleteim alkalmazásával nagy behatoló- és kimutatóképes-

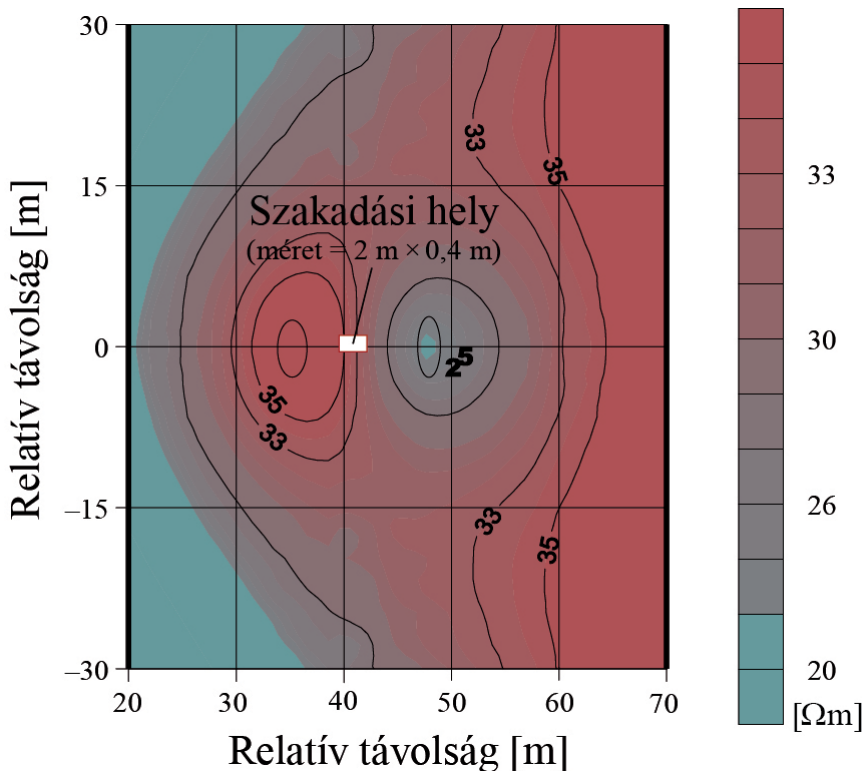
ségük miatt a Pole–Pole, Pole–Dipole elektrodaelrendezéseket vizsgáltam.

Az elvégzett modellkísérletek közül bemutatni kívánt eredményekben 5 m vastagságú hulladékkal kalkuláltam, amely megfelel egy feltöltés alatt álló kommunális szilárdhulladék-lerakónak. A behordott hulladék fajlagos ellenállását 50 Ω m-nek, a környező terület átlagos fajlagos ellenállását 20 Ω m-nek vettem, az objektum közepén elhelyezett szakadást 0,1 Ω m fajlagos ellenállású cellákkal töltöttem fel. A szakadás mérete a modellben 2 m \times 0,4 m, melynek modelljét az 5. ábra mutatja.

A hulladékkazetta méretét 200 m \times 200 m területűnek választottam. A szigetelőfólia fajlagos ellenállását 50 000 Ω m-re állítottam be. Ez lényegesen kisebb, mint amit a gyártók a fóliára garantálnak. Néhány számítást végeztem arra nézve, ha a fólia ennél nagyobb fajlagos ellenállású. Ezek a számítások azt mutatják, hogy a fólia fajlagos ellenállásának növelésével igen jelentősen növekszik a szakadás okozta indikáció. A leírt alapmodell paraméterei megfelelnek egy jelenlegi hulladéklerakóban átlagosan mérhető értékeknek.

A Pole–Pole elektrodaelrendezéssel generált normált potenciáloszlás térképet az 6. ábra mutatja. A normálási művelet során a szakadást tartalmazó modell értékeit normáltam a szakadásmentes esetre vonatkozóan.

A kinagyított normált potenciáloszlás-térképen látható, hogy a szakadási hely a koordináta-rendszer 0,0 pontjában elhelyezve -6% -os anomáliával jelenik meg. Az $X = -40$,



8. ábra Pole–Dipole elektrodaelrendezés látszólagos fajlagosellenállás-térképe
 Figure 8 Plot of the apparent resistivity values in Pole–Dipole array

$Y = 0$ koordinátájú helyen megjelenik a forráselektroda is lokális pozitív anomáliával. A jobb kimutathatóság érdekében a fenti modellszámításból meghatároztam a mérő-dipólussal mérhető potenciálkülönbségeket.

A modellszámítást elvégezve Pole–Dipole elektrodaelrendezésre is, adódik a 7. ábrán bemutatott bipoláris anomáliakép, ahol a pozitív és a negatív anomáliapár maximuma közötti távolság közepén jelentkezik a szakadás helye. A kinagyított potenciáleloszlás-térképen a pozitív–negatív anomáliapár értékei -34 és $+30\%$ -os csúcsokkal jelennek meg.

A 8. ábra a látszólagos fajlagosellenállás-eloszlás térképét mutatja be Pole–Dipole elrendezés esetén. A látszólagos fajlagos ellenállás számított értékeit a potenciáleloszlásból határoztam meg.

Az $X = 40$, $Y = 0$, $Z = 0$ helyzetű szakadási középpont közvetlen környezetében jól megfigyelhető a látszólagos fajlagos ellenállás izovonalainak bipoláris anomáliaképe. A jelölt szakadási hely két oldalán szimmetrikusan elhelyezkedő két anomália maximumértékei közti képzeletbeli vonal felezőpontja jelöli ki szakadás helyét.

A felhasznált 3D véges differencia elven működő előre-modellező program segítségével eredményesen tervezhető meg a gyakorlatban már kipróbált elektrodaelrendezések által létrejövő térbeli potenciáleloszlás. A munka folytatásaként nagy behatolóképeségű és többféle elektrodaelrendezés esetén tervezem a potenciál- és fajlagosellenállás-terek előremodellezését elkészíteni egy és több szakadási hellyel rendelkező modellek esetében (Szalai S. et al. 2010). A kapott előremodellezési eredményeket terepi alkalmazásokon szeretném kipróbálni. Tervezem továbbá a hulladéklerakók aljzatszigetelési vizsgálatának kiértékelési gyakorlatába át-

ültetni a 1,5D inverziós eljárást (Gyulai Á., Ormos T. 1999a).

Összegzés

Az elvégzett modellvizsgálattal a céloom annak igazolása volt, hogy az általam javasolt új módszer képes detektálni a hulladéklerakó aljzatszigetelési hibáit.

A bemutatott modellvizsgálati példával, mint a hulladéklerakó felszínén végzett mérésekkel is, detektálható az aljzatszigetelés szakadása. Természetesen további modellezésekkel kívánom bizonyítani, hogy a módszer alkalmas különböző hulladéklerakó-teszt esetén is a szakadási helyek kimutatására. Mindehhez további szintetikus modellvizsgálatok elvégzését tervezem, valamint feltétlen összehasonlításokat azokkal a mérésekkel, amelyeket a hulladéklerakó szigetelése alá beépített elektrodarendszer alkalmazásával végeznek.

További vizsgálatok szükségesek az inhomogén hulladéktest által okozott problémák vizsgálatára – és általában is –, az inhomogenitás figyelembevételére valamilyen inverziós meghatározással.

Az előremodellezés segítséget nyújthat a terepi mérések optimális kialakításában, ezzel pénzt és energiát spórolva a kivitelezőnek. A kipróbálásra került és jövőben bevonni kívánt kiértékelési eljárások hozzájárulnak, illetve hozzájárulhatnak a szigetelőfólia szakadási helyeinek eredményesebb felkutatásához.

Köszönetnyilvánítás

Köszönet illeti az OTKA T042686. számú projektjének támogatását.

Hivatkozások

- Szabó I., 2001: Hulladékelhelyezés. Tankönyv, Miskolci Egyetemi Kiadó, Miskolci Egyetem
- Szabó A., 2008: Hulladéklerakók lezárásának aktuális kérdései, PhD-értekezés, Miskolc, Mikoviny Sámuel Földtudományi Doktori Iskola
- Frangos W., 1997: Electrical detection of leaks in lined disposal ponds. *Geophysics* 62, 1737–1744
- Kovács A., KBFI-Triász Kft. 2007: Műanyag földműszigetelések ellenőrzése. Mélyépítő Tükörkép Magazin 2007/3.
- BHF Environmental s.r.o., Slovakia, 2012: Geoelectrical Detection and Location of Leaks through Plastic Geomembranes. Tevékenységismertető brosúra
- Hix K., 1998: Leak Detection for Landfill Liners Overview of Tools for Vadose Zone Monitoring, Technology Status Report prepared for the U.S. E.P.A. Technology Innovation Office under a National Network of Environmental Management Studies Fellowship
- Metolabor AG., 2004: Dichtungskontrollsystem TAUPE für Mülldeponien I–II., Forschungszentrum Karlsruhe in der Helmholtz-Gemeinschaft 2004/10.
- Spitzer K., 1995: A 3-D finite difference algorithm for DC resistivity modelling using conjugate gradient methods. *Geophysical Journal International* 123, 902–914
- Gyulai Á., 1997: Geoelektromos 3-D FD modellezési vizsgálatok. T 019088 sz. OTKA pályázat II. Részjelentés, 1–48
- Szalai S., Varga M., Novák A., Szarka L. 2010: A „Nem konvencionális geoelektromos elrendezések” című K 49604 sz. OTKA projekt eredményeiből. *Magyar Geofizika* 51(4), 209–226
- Gyulai Á., Ormos T., 1999a: A new procedure for the interpretation of VES data: 1.5-D simultaneous inversion method. *Journal of Applied Geophysics* 41, 1–17
- Scales J. A., Gersztenkorn A., Treitel S., 1988: Fast Lp solution of large, sparse, linear systems: Application to seismic travel time tomography. *Journal of Comp. Phys.* 75, 314–333
- Steiner F., 1997: Optimum methods in statistics. Akadémiai Kiadó, Budapest
- Vass P., 2010: A Fourier-transzformáció mint inverz feladat. PhD-értekezés. Miskolci Egyetem

A forrás térbeli jellemzőinek a hatása a magnetotellurikus adatokra

PRÁCSER ERNŐ

MTA CSFK Geodéziai és Geofizikai Intézet, Sopron Csatkai E. u. 6–8.
E-mail: pracser.erno@csfk.mta.hu

A magnetotellurikus (MT) módszer esetében azt feltételezzük, hogy a földben az ionoszférából érkező elektromágneses síkhullámok hatására áramok indukálódnak és ezek hatását érzékeljük az elektromágneses térkomponensekben. Kis mélységű kutatásoknál, amikor a magnetotellurikus mérések nagyobb frekvenciákra vonatkozó részei hordozzák az információt, ez a síkhullámú közelítés feltétlenül teljesül. Nagyobb mélységek esetén az alacsony frekvenciákhoz tartozó adatok a meghatározóak, ezért ekkor a feltételezett forrás kiterjedésének és távolságának a hatása esetleg már nem elhanyagolható. Itt most két modellre végzünk számításokat. Az első modellnél azt feltételezzük hogy az elektromágneses teret az ionoszférában egy végtelen vonalforrás gerjeszti. A második esetben pedig a forrás egy adott, a felszínnel párhuzamos síkbeli speciális árameloszlás. Nyilvánvaló, hogy a valóságban a források nem ilyen egyszerűek, de azok a következtetések, amelyeket a forrás vízszintes és függőleges távolságának a hatására, illetve magasságára vonatkozólag levonunk, bonyolultabb esetekben is hasonlóan érvényesek lehetnek.

Prácser, E.: The effect of the spatial characteristics of the source on the magnetotelluric data

At the magnetotelluric method an electromagnetic plane wave, arriving from the ionosphere, is supposed to induce electric current in the Earth, and the effect of these currents are observed in the electromagnetic field components. At explorations for small depths, when the information is contained in the higher frequency domain of the magnetotelluric measurement, this plane wave assumption is certainly valid. In the case of greater depths, data belonging to lower frequencies are significant, so the effect of the extent and distance of the supposed source can not be negligible. In this paper calculations will be performed for two types of models. At the first model a line current in the ionosphere is assumed to stimulate the electromagnetic field. In the second case the source is a special current distribution in a plane, parallel to the surface. It is clear, that in reality the sources are not so simple, but the drawn conclusions, regarding the effect of the horizontal and vertical distance of the source, may be valid for more complicated cases.

Beérkezett: 2012. május 4.; *elfogadva:* 2012. szeptember 12.

1. Bevezetés

A magnetotellurikus mérések első alkalmazásai idején az volt az általános vélekedés, hogy a módszer csak síkhullám esetén ad pontos eredményt azaz feltételezték, hogy a szondázás környezetében a gerjesztő elektromágneses tér x és y irányban csak kis mértékben változik. A mért elektromágneses értékekből a Tyihonov–Cagniard-impedancia, illetve az abból számított látszólagos fajlagos ellenállás és fázis alkalmazásával következtettek a föld rétegeinek a fajlagos ellenállására. Később Dmitriev és Berdichevsky (1979) igazolta, hogy a Tyihonov–Cagniard-impedancia akkor is alkalmazható, ha a mágneses térerősség vízszintes irányban a mérés környezetében nem elhanyagolható mértékben, de lineárisan változik. Hangsúlyozták, hogy a mágneses tér változása nagyobb mértékű is lehet, a lényeg a linearitáson van. A környezet mérete a kutatási mélység nagyságának

kb. háromszorosa. Berdichevsky és Zhdanov (1984) azt állítja, hogy ez a feltétel az esetek túlnyomó részében teljesül, kivéve azt az esetet, amikor az elektromágneses térnek lokális maximuma van (sarkvidék). Feltételezhető, hogy a gerjesztő elektromágneses tér 300–500 km távolságban lineárisan változik, ezért a Tyihonov–Cagniard-képlet 100–150 km mélységig alkalmazható. Ez az állítás is indokolja hogy foglalkozunk a vonalforrás esetével, és attól nagyobb távolságra vizsgáljuk az elektromágneses térkomponensekből számított impedanciát. Ez a vizsgálat esetünkben az elektromágneses teret meghatározó képletek és a modellszámítások elemzésére vonatkozik. Most kétféle forrásra elemezzük a Tyihonov–Cagniard-impedancia alkalmazhatóságát. Végtelen vonalforrásra és egy síkban eloszló, x tengely irányú áramok által keltett elektromágneses térre, ahol az egyes áram elemek fázisa az y tengely mentén periodikusan (szinuszosan) változik. Ilyen síkbeli áramok által

keltett elektromágneses tér alapján számítható MT impedancia tulajdonságait elemzi Price (1962) és Price nyomán Ádám (1966). A síkhullámú gerjesztésen alapuló magnetotellurikus mérési adatoknak a forrás hatása által okozott torzítását korábban az impedancia korrekciójával próbálták kiegyenlíteni. A korrigált impedancia alapján számított lát-szólagos fajlagos ellenállás- és fázisgörbéket elemezték és hasonlították össze a tipikus modellekre előzetesen kiszámított és közölt görbeseregekkel. Ebben a cikkben egy másik megoldás figyelembe vételét javasoljuk. Abban az esetben amikor a forrás torzító hatását egy ismeretlen mennyiség okozza, akkor azt az inverzió során egy ugyanolyan ismeretlen paraméternek tekintjük, mint a rétegeparamétereket, és azzal számítjuk az előremodellezést. Az inverziós algoritmus pedig erre a mennyiségre is ad egy becslést.

A pontforrásra és a vonalforrásra érvényes elektromágneses számítások rétegezett féltérre számtalan cikkben és szakkönyvben szerepelnek. Ugyanez mondható el a síkhullámú esetre, azaz a magnetotellurikus számításokra is. Az is elfogadott tény, hogy ha a forrástól távolodunk, akkor az elektromágneses tér közelít a síkhullámú esetre érvényeshez. Ennek az állításnak a matematikai levezetése viszont nem magától értetődő. Ezért ebben a cikkben a rétegezett féltér esetére megmutatjuk a kapcsolatot a már ismert vonalforrásra vonatkozó és a síkhullámú esetre érvényes képletek között. A vonalforrásra vonatkozó képlet levezetésének fő lépéseit is közöljük, az egyes lépések részletes indoklásától eltekintünk, hiszen ez a hivatkozott szakirodalomban szerepel.

2. A végtelen kiterjedésű vonalforrás elektromágneses tere

A véges és végtelen vonalforrás elektromágneses terét a szakirodalomban a leggyakrabban az elektromos dipól terének integrálásával számítják. A végtelen vonalforrás esetén ennél egyszerűbb módon is eljuthatunk az elektromágneses tér meghatározásához, ha a Maxwell-egyenleteket közvetlenül erre a forrásra írjuk fel. Mivel ez a fajta megoldás a geofizikai szakirodalomban nem túl gyakori, a Maxwell-egyenletek frekvenciatartománybeli változatából kiindulva levezetjük az MT impedancia képletét:

$$\text{rot } \mathbf{H} = \sigma \mathbf{E} + i\omega\epsilon \mathbf{E} + \mathbf{s}, \quad (1)$$

$$\text{rot } \mathbf{E} = -i\omega\mu \mathbf{H}. \quad (2)$$

Az \mathbf{s} forrásvektornak csak x irányú komponense van, a z tengely lefelé irányul:

$$s_x = I \delta(y) \delta(z - h),$$

I a vezetőben folyó áram erőssége, δ jelöli a Dirac- δ függvényt, ω a körfrekvencia, μ a mágneses permeabilitás, ϵ a dielektromos állandó, σ a közeg vezetőképessége, $h < 0$ a forrás magassága. Az elektromágneses teret az elektromos vektorpotenciál alapján számoljuk. A vektorpotenciálnak esetünkben csak az x irányú komponense különbözik 0-tól.

Az elektromos dipólnál a vektorpotenciálnak z irányú komponense is van (Scriba, 1974), de szimmetriaokok miatt ez most kiesik. A vektorpotenciál így

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} A_x \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

alakú. Ismert, hogy az elektromos vektorpotenciálból hogyan számíthatók az elektromos és mágneses térerősségvektorok (Kaufmann, Keller 1985). Vegyük figyelembe, hogy az A_x nem függ x -től, ezért $\text{div } \mathbf{A} = 0$. Emiatt a végtelen vonalforrás esetén az elektromágneses tér vektorpotenciálból való számítása leegyszerűsödik,

$$\mathbf{E} = -i\omega\mu \mathbf{A}, \quad (3a)$$

$$\mathbf{H} = \text{rot } \mathbf{A}. \quad (3b)$$

A Helmholtz-egyenlet levezetése is ismert, de mivel végtelen vonalforrásra ez egyszerűbb az általános esetenél, közöljük levezetésének lényeges lépéseit. Az (1) egyenletbe helyettesítsük be \mathbf{E} és \mathbf{H} (3) képletekkel meghatározott értékét! Ekkor az \mathbf{A} vektorpotenciálra kapunk egy differenciálegyenletet:

$$\text{rot rot } \mathbf{A} = -i\omega\mu(\sigma + i\omega\epsilon)\mathbf{A} + \mathbf{s}.$$

Újra figyelembe véve, hogy $\text{div } \mathbf{A} = 0$, megkapjuk az \mathbf{A} -t meghatározó Helmholtz-differenciálegyenletet, amely tartalmazza a forrást is. Az ϵ dielektromos állandót a továbbiakban 0-nak vesszük, mivel a vizsgálataink elsősorban kis frekvenciák esetére vonatkoznak, amikor ez az elhanyagolás megtehető.

$$\Delta \mathbf{A} - \gamma^2 \mathbf{A} = -\mathbf{s},$$

ahol $\gamma = \sqrt{i\omega\mu\sigma}$ a hullámszám. A vektorpotenciál x komponensére vonatkozó Helmholtz-egyenlet tehát

$$\frac{\partial^2}{\partial y^2} A_x(y, z) + \frac{\partial^2}{\partial z^2} A_x(y, z) - \gamma^2 A_x(y, z) = -I\delta(y)\delta(z - h). \quad (4)$$

Vegyük a (4) egyenlet y változó szerinti Fourier-transzformáltját! $A_x(y, z)$ Fourier-transzformáltját jelöljük $f(z, \nu)$ -vel! A transzformált differenciálegyenletben az y szerinti kétszeres deriválás egy $-\nu^2$ szerinti szorzatként jelenik meg, a Dirac- $\delta(y)$ függvény Fourier-transzformáltja az azonosan 1 függvény, ezért

$$f(z, \nu)(\nu^2 + \gamma^2) - \frac{\partial^2}{\partial z^2} f(z, \nu) = I\delta(z - h). \quad (5)$$

Ennek az egyenletnek a megoldásai homogén közegben a z változó pozitív és negatív kitevőjű exponenciális függvényeinek az összegei. Az általános alak

$$f(z, \nu) = c_1 \exp(-\nu_0 z) + c_2 \exp(\nu_0 z), \quad (6)$$

ahol $\nu_0^2 = \nu^2 + \gamma^2$. A megoldásnak ki kell elégítenie azt a feltételt, hogy

$$\lim_{|z| \rightarrow \infty} f(z, \nu) = 0,$$

továbbá $z = h$ -nál a z szerinti deriváltjának ugrásszerűen meg kell változnia az (5) egyenlet jobb oldalán fellépő Dirac- δ miatt. A feltételeknek megfelelő függvény homogén közegben tehát

$$f(z, \nu) = \frac{I}{2\nu_0} \exp(-\nu_0 |z - h|).$$

Vákuumban, amely egy speciális homogén közeg, $\sigma = 0$ miatt $\gamma_0^2 = i\omega\mu\sigma = 0$, ezért ekkor $\nu_0 = \nu$. Az $f(z, \nu)$ függvény homogén közegbeli képletét és az általános megoldást (6) figyelembe véve az $f(z, \nu)$ függvény kiszámítható rétegezett féltér esetére. Ez számos, a témakörrel foglalkozó munkában megtalálható (Keller, Frischknecht 1966, Scriba 1974, Kaufmann, Keller 1983, Kaufmann, Keller 1985, Weaver 1994). A megoldások azon alapulnak, hogy az f függvény megoldása minden rétegben általánosan a (6) képlettel adható meg. Továbbá figyelembe kell venni, hogy az f függvény és annak a z szerinti deriváltja a réteghatárokon folytonos. Rétegezett modellre az f függvény rekuzióval számítható, ennek többféle változata létezik. Most levezetés nélkül csak egyet mutatunk be, amely az $R_j(\nu)$ reflexiók együtthatóin alapul.

$$R_j(\nu) = \frac{\frac{\nu_j - \nu_{j+1}}{\nu_j + \nu_{j+1}} + R_{j+1}(\nu) \exp(-2\nu_{j+1} d_{j+1})}{1 + \frac{\nu_j - \nu_{j+1}}{\nu_j + \nu_{j+1}} R_{j+1}(\nu) \exp(-2\nu_{j+1} d_{j+1})}, \quad (7)$$

$$R_n(\nu) = 0,$$

ahol n a rétegek száma, d_j a j -edik réteg vastagsága, σ_j a j -edik réteg vezetőképessége, $\nu_j^2 = \nu^2 + i\omega\mu\sigma_j = \nu^2 + \gamma_j^2$. Az $f(z, \nu)$ függvény értéke a felszín és a forrás között $R_0(\nu)$ függvényében

$$f(z, \nu) = \frac{\exp(\nu h)}{2\nu} (\exp(-\nu h) + R_0(\nu) \exp(\nu h)),$$

$$h \leq z \leq 0.$$

$A_x(y, z)$ -t az $f(z, \nu)$ inverz Fourier-transzformáltjával számítjuk. Vegyük figyelembe, hogy $f(z, \nu)$ ν -nek páros függvénye, ezért $A_x(y, z)$ egy koszinusz-transzformálttal is számítható. A vektorpotenciál x irányú komponense rétegezett közegben

$$A_x(y, z) = \frac{I}{2\pi_0} \int_0^\infty \frac{\exp(\nu h)}{\nu} (\exp(-\nu z) + R_0(\nu) \exp(\nu z)) \cos(\nu y) d\nu. \quad (8)$$

A (8) képletben az integráljelen belül azt a függvényt, amellyel a koszinusz függvény meg van szorozva, magfüggvénynek ($f(z, \nu)$) is hívjuk. Az impedancia számításához szükséges elektromágneses térkomponenseket a vektorpotenciálból a (3) képletekkel számítjuk. Az elektromos térerősség x irányú komponensét $A_x(y, z)$ -nek $-i\omega\mu$ -vel való szorzásával kapjuk:

$$E_x(\omega, y, z) = -\frac{i\omega\mu I}{2\pi} \int_0^\infty \frac{\exp(\nu h)}{\nu} (\exp(-\nu z) + R_0(\nu) \exp(\nu z)) \cos(\nu y) d\nu.$$

A mágneses térerősség y irányú komponense

$$H_y(\omega, y, z) = \frac{\partial}{\partial z} A_x(y, z) = \frac{I}{2\pi_0} \int_0^\infty \exp(\nu h) (-\exp(-\nu z) + R_0(\nu) \exp(\nu z)) \cos(\nu y) d\nu.$$

Ezek a képletek szerepelnek Pirjola és Boteler (2001) cikkében is. Az $E_x(\omega, y, z)$ -t és a $H_y(\omega, y, z)$ -t meghatározó képletek levezethetők az x irányú elektromos dipólra vonatkozó képletek integrálásával is. Figyelembe véve, hogy az elektromos dipól elektromágneses térkomponenseit meghatározó képletek a magfüggvény és a $J_0(\nu r)$ vagy a $J_1(\nu r)$, ($r = [x^2 + y^2]^{1/2}$) Bessel-függvény szorzatának integráljaként állnak elő, ehhez a

$$\frac{2\cos(\nu(y - y_0))}{y - y_0} = \int_0^\infty J_0(\nu \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}) dx_0 \quad (9)$$

integrált kell alkalmazni. A (9) képlet Watson (1966) 13.47 (5) képletének egy speciális esete. Összességében ez egy bonyolultabb eljárás lenne, mivel az elektromos dipól esetén a vektorpotenciálnak z irányú komponense is van. A vektorpotenciál z komponenséhez tartozó tagok az x szerinti integrálás során kiesnek. Az impedancia értéke a felszínen ($z = 0$), végtelen vonalforrás hatása esetén

$$Z_{xy}(\omega, h) = \frac{E_x(\omega)}{H_y(\omega)} = i\omega\mu \frac{\int_0^\infty \frac{\exp(\nu h)}{\nu} [1 + R_0(\nu)] \cos(\nu y) d\nu}{\int_0^\infty \exp(\nu h) [1 - R_0(\nu)] \cos(\nu y) d\nu}. \quad (10)$$

Az impedanciából a magnetotellurikában jól ismert képletekkel látszólagos fajlagosellenállás- és fázisértékek számíthatók,

$$\rho_a(\omega) = \frac{|Z_{xy}(\omega)|^2}{\omega\mu}, \quad \phi(\omega) = \text{atan} \left(\frac{\Im Z_{xy}(\omega)}{\Re Z_{xy}(\omega)} \right).$$

A (10) képletben a ν a nevezőben is szerepel, ami a későbbiekben kényelmetlen lehet, mivel szükség lesz a magfüggvény $\nu = 0$ -nál felvett értékére. Ezért ezt a nevezőben levő ν -t érdemes kiküszöbölni egy átalakítással, amely a (7) rekuziók képletén alapul. A két függvény, amelyeknek a koszinusz-transzformáltja a (10) képletben szerepel, az exponenciális tényezők nélkül

$$\frac{1}{\nu} (1 + R_0(\nu)) = \frac{2(1 + R_1(\nu) \exp(-2\nu_1 d_1))}{\nu_1 (1 - R_1(\nu) \exp(-2\nu_1 d_1))}, \quad (11)$$

$$(1 - R_0(\nu)) = \frac{2(1 - R_1(\nu) \exp(-2\nu_1 d_1))}{(1 - R_1(\nu) \exp(-2\nu_1 d_1))} \quad (12)$$

alakban is írható. Magfüggvényként a (11), (12) képletek jobb oldalát akkor érdemes alkalmazni, ha szükség van a

$\nu \rightarrow 0$ határátmenetre, egyébként a bal oldali, tömörebb alak a célszerűbb. Elemezzük most az impedancia (10) képletét, hogyan alakul az értéke nagy magasságokra (h), vagy nagy távolságokra (ν). Tekintsük először a nagy magasság esetét! Ha figyelembe vesszük a Dirac- δ egy lehetséges előállítását mint ν függvényét,

$$\delta(\nu) = \lim_{h \rightarrow -\infty} \frac{|h|}{2} \exp(|\nu|h),$$

akkor a (10) képlet lényegesen leegyszerűsödik, ha a számlálót és a nevezőt is megszorozzuk h abszolút értékével, és azután tartunk $|h|$ értékével a végtelenbe. A Dirac- δ egy fontos tulajdonsága, hogy egy folytonos, integrálható f függvényre

$$\int_0^{\infty} \delta(\nu) f(\nu) d\nu = \frac{1}{2} f(0).$$

Ezt felhasználva meghatározható (10) számlálója és nevezője. A $\nu = 0$ behelyettesítés a (11) és (12) képletek alkalmazásával végezhető el. Így megkapjuk a vonalforrásra érvényes impedancia képletét a $h \rightarrow -\infty$ határátmenet esetére:

$$\lim_{h \rightarrow -\infty} Z_{xy}(\omega, h) = i\omega\mu \frac{(1 + R_1(0)\exp(-2\gamma_1 d_1))}{\gamma_1(1 - R_1(0)\exp(-2\gamma_1 d_1))}. \quad (13)$$

Homogén féltér esetén $R_1(0) = 0$ teljesül. Ekkor az MT impedancia homogén féltérre jól ismert képletét kapjuk, $\nu =$

$$\begin{aligned} A_j(\nu) &= (\nu_j + \nu_{j+1}) + (\nu_j - \nu_{j+1})R_{j+1}(\nu)\exp(-2\nu_{j+1}d_{j+1}) \\ &\quad + \left((\nu_j - \nu_{j+1}) + (\nu_j + \nu_{j+1})R_{j+1}(\nu)\exp(-2\nu_{j+1}d_{j+1}) \right) \exp(-2\nu_j d_j) \\ &= \nu_j \left(1 + R_{j+1}(\nu)\exp(-2\nu_{j+1}d_{j+1}) \right) + \nu_{j+1} \left(1 - R_{j+1}(\nu)\exp(-2\nu_{j+1}d_{j+1}) \right) \\ &\quad + \nu_j \exp(-2\nu_j d_j) \left(1 + R_{j+1}(\nu)\exp(-2\nu_{j+1}d_{j+1}) \right) - \nu_{j+1} \exp(-2\nu_j d_j) \left(1 - R_{j+1}(\nu)\exp(-2\nu_{j+1}d_{j+1}) \right) \\ &= \nu_j \left(1 + \exp(-2\nu_j d_j) \right) \left(1 + R_{j+1}(\nu)\exp(-2\nu_{j+1}d_{j+1}) \right) + \nu_{j+1} \left(1 - \exp(-2\nu_j d_j) \right) \left(1 - R_{j+1}(\nu)\exp(-2\nu_{j+1}d_{j+1}) \right), \end{aligned}$$

(14) nevezője:

$$\begin{aligned} B_j(\nu) &= (\nu_j + \nu_{j+1}) + (\nu_j - \nu_{j+1})R_{j+1}(\nu)\exp(-2\nu_{j+1}d_{j+1}) \\ &\quad - \left((\nu_j - \nu_{j+1}) + (\nu_j + \nu_{j+1})R_{j+1}(\nu)\exp(-2\nu_{j+1}d_{j+1}) \right) \exp(-2\nu_j d_j) \\ &= \nu_j \left(1 + R_{j+1}(\nu)\exp(-2\nu_{j+1}d_{j+1}) \right) + \nu_{j+1} \left(1 - R_{j+1}(\nu)\exp(-2\nu_{j+1}d_{j+1}) \right) \\ &\quad - \nu_j \exp(-2\nu_j d_j) \left(1 + R_{j+1}(\nu)\exp(-2\nu_{j+1}d_{j+1}) \right) + \nu_{j+1} \exp(-2\nu_j d_j) \left(1 - R_{j+1}(\nu)\exp(-2\nu_{j+1}d_{j+1}) \right) \\ &= \nu_j \left(1 - \exp(-2\nu_j d_j) \right) \left(1 + R_{j+1}(\nu)\exp(-2\nu_{j+1}d_{j+1}) \right) + \nu_{j+1} \left(1 + \exp(-2\nu_j d_j) \right) \left(1 - R_{j+1}(\nu)\exp(-2\nu_{j+1}d_{j+1}) \right). \end{aligned}$$

Képezzük $A_j(\nu)$ és $B_j(\nu)$ hányadosát!

$$\begin{aligned} T_j(\nu) &= \frac{A_j(\nu)}{B_j(\nu)} = \frac{\nu_j \coth(\nu_j d_j) T_{j+1}(\nu) + \nu_{j+1}}{\nu_j T_{j+1}(\nu) + \nu_{j+1} \coth(\nu_j d_j)} \\ &= \frac{\coth(\nu_j d_j) (\nu_j / \nu_{j+1}) T_{j+1}(\nu) + 1}{(\nu_j / \nu_{j+1}) T_{j+1}(\nu) + \coth(\nu_j d_j)}. \end{aligned} \quad (15)$$

0, azaz $\nu_1 = \gamma_1$ esetén. A (7) rekurziós képlet alkalmazása akkor célszerű, ha az egyes térkomponenseket külön-külön is ki kívánjuk számítani. Ez, amint megmutattuk, a magnetellurikus impedancia számítására is alkalmas, de erre a feladatra a szakirodalomban egy másik rekurziós képlet terjedt el. Vezessük le ezt a fajta rekurziós képletet (7) felhasználásával! A levezetést tetszőleges ν értékre végezzük el, mivel a későbbiekben erre a térfrekvencia-tartománybeli (ν) impedanciára is szükségünk lesz. A (13) képlet alapján vezessünk be egy új függvényt!

$$T_j(\nu) = \frac{1 + R_j(\nu)\exp(-2\nu_j d_j)}{1 - R_j(\nu)\exp(-2\nu_j d_j)}.$$

Határozzuk meg a $T_j(\nu)$ -re is a rétegek sorszáma szerinti rekurziós képletet! Azért, hogy a levezetés során elkerüljük a bonyolult emeletes törtek használatát, jelöljük $A_j(\nu)$ -vel a $T_j(\nu)$ tört számlálóját és $B_j(\nu)$ -vel a nevezőjét,

$$T_j(\nu) = \frac{1 + R_j(\nu)\exp(-2\nu_j d_j)}{1 - R_j(\nu)\exp(-2\nu_j d_j)} = \frac{A_j(\nu)}{B_j(\nu)}. \quad (14)$$

(14)-ben először $R_j(\nu)$ helyébe írjuk be a (7) rekurziós képletet, majd a törtet bővítjük (7) nevezőjével, majd $(\nu_j + \nu_{j+1})$ -gyel. Külön számítjuk (14) számlálóját és nevezőjét. Kezdjük a számlálóval:

Ennek a rekurziós formulának létezik egy tömörebb alakja:

$$\begin{aligned} T_j(\nu) &= \coth \left(\nu_j d_j + \operatorname{arcoth} \left(\frac{\nu_j}{\nu_{j+1}} T_{j+1}(\nu) \right) \right), \\ T_n(\nu) &= 1. \end{aligned} \quad (16)$$

Meg kell azonban jegyezni, hogy számítástechnikai szempontból előnyösebb a (15) képlet. Ha $\nu \rightarrow 0$, akkor megkapjuk a magnetotellurikára szokásos rekurziót:

$$T_j = \coth \left(\gamma_j d_j + \operatorname{arccoth} \frac{\gamma_j}{\gamma_{j+1}} T_{j+1} \right), \quad T_n = 1.$$

Az impedancia a felszínen a

$$Z_1 = i\omega\mu T_1 / \gamma_1$$

képlettel számítható. A szakirodalom leggyakrabban ezt a képletet használja (Berdichevsky, Zhdanov 1994). Ha a cél csak az MT esetre vonatkozó impedancia képletének a rekurziós levezetése, ez lényegesen egyszerűbb annál a módszernél, mint amelyet mi követtünk (13).

Térjünk most át arra az esetre, amikor a mérési pont y koordinátája tart a végtelenbe, azaz számítsuk ki a (10) képlet határértékét,

$$\begin{aligned} & \lim_{|y| \rightarrow \infty} Z_{xy}(\omega, y) \\ &= \lim_{|y| \rightarrow \infty} i\omega\mu \frac{\int_0^\infty e^{\nu h} \frac{2(1 + R_1(\nu)e^{-2\nu d_1})}{\nu_1(1 - R_1(\nu)e^{-2\nu d_1})} \cos(\nu y) d\nu}{\int_0^\infty e^{\nu h} \frac{2(1 - R_1(\nu)e^{-2\nu d_1})}{(1 - R_1(\nu)e^{-2\nu d_1})} \cos(\nu y) d\nu}. \end{aligned} \quad (17)$$

Ennél a határérték-számításnál, azért kell gondosan eljárni, mivel mind a számláló, mind a nevező a Riemann–Lebesgue-lemma miatt 0-hoz tart (Davies, 1983), hányadosuk ezért értelmezhetetlen. Ez a 0-hoz tartás fizikailag is természetes, hiszen a forrástól eltávolodva az elektromágneses komponensek 0-hoz tartanak. Az ilyen tört típusú határértékek számítására a matematikában a L’Hospital-szabály terjedt el, amely röviden azt jelenti, hogy bizonyos feltételek teljesülése esetén a határérték úgy is számítható, hogy a számlálót és a nevezőt deriváljuk, és akkor már nem 0/0 típusú határértéket kapunk. Mi most ennek a szabálynak a fordított változatát alkalmazzuk, azaz a számláló és nevező deriváltja helyett annak primitív függvényét vesszük. Ezt ritkán alkalmazzák, mivel a deriválás általában egyszerűsíti a függvényeket, például csökkenti a hatványkifejezések fokszámát, a primitív függvény viszont gyakran bonyolultabb. A (17) képlet a $\cos(\nu y)$ függvény y szerinti primitív függvényét véve így alakul

$$\begin{aligned} & \lim_{|y| \rightarrow \infty} Z_{xy}(\omega, y) \\ &= \lim_{|y| \rightarrow \infty} i\omega\mu \frac{\int_0^\infty e^{\nu h} \frac{2(1 + R_1(\nu)e^{-2\nu d_1})}{\nu_1(1 - R_1(\nu)e^{-2\nu d_1})} \frac{\sin(\nu y)}{\nu} d\nu}{\int_0^\infty e^{\nu h} \frac{2(1 - R_1(\nu)e^{-2\nu d_1})}{(1 - R_1(\nu)e^{-2\nu d_1})} \frac{\sin(\nu y)}{\nu} d\nu}. \end{aligned} \quad (18)$$

A számlálóra és a nevezőre is alkalmazzuk a Dirichlet-integrál-tulajdonságot, amely egy integrálható $f(\nu)$ függvényre a

$$\lim_{y \rightarrow \infty} \int_0^\infty f(\nu) \frac{\sin(\nu y)}{\nu} d\nu = \frac{\pi}{2} f(0)$$

határérték teljesülését jelenti. A (18) képletben a számláló és a nevező az $|y| \rightarrow \infty$ határátmenet esetén, a Dirichlet-integrálok tulajdonsága miatt (Davies 1983), megegyezik magfüggvény $\nu = 0$ helyen felvett értékével. Az egyszerűsítések után újra megkapjuk a (13) képletet, ugyanúgy, mint amikor a vonalforrás nagy magasságára ($h \rightarrow -\infty$) számoltuk az impedancia határértékét.

2.1. Numerikus vizsgálatok

Az 1. ábrán egy, az 1. táblázat szerinti modellen 100 km magasságban levő vonalforrás esetére vizsgáljuk a látszólagos fajlagos ellenállás és fázis változását az oldalirányú távolság függvényében. Az impedancia számítása a (10) képleten alapul. Látható, hogy a legtávolabbi vonalforrásra vonatkozó számolt adatok közelítik meg a legjobban a síkhullámú (MT) esetet. A Fourier-, illetve a koszinusz-transzformált számítására gyakran alkalmazzák a gyors Fourier-transzformációt (FFT). Ez a geofizikai számításoknál kevésbé célszerű, mivel itt általában logaritmikus lépésközzel mérnek és számolnak. A (10)-ben szereplő integrálok számítására elterjedt egy szűrőelméleten alapuló algoritmus, a számításainkat ezzel a módszerrel végeztük. A kiszámítandó integrálban integrandusként egy viszonylag lassan változó függvénynek egy oszcilláló függvénnyel való szorzata szerepel. Ez az alapja a szűrőelméleten alapuló integrálásnak (Anderson 1979). A hivatkozott cikkben Bessel-függvényekre kidolgozott eljárás szerepel, de hasonló szűréses integrálás létezik a koszinusz és szinusz függvényeket tartalmazó integrálok számítására, mivel a lényeg a függvények oszcilláló tulajdonságán van. A koszinusz és szinusz függvények egyébként speciális, $\frac{1}{2}$ -edrendű Bessel-függvényekkel is kifejezhetőek.

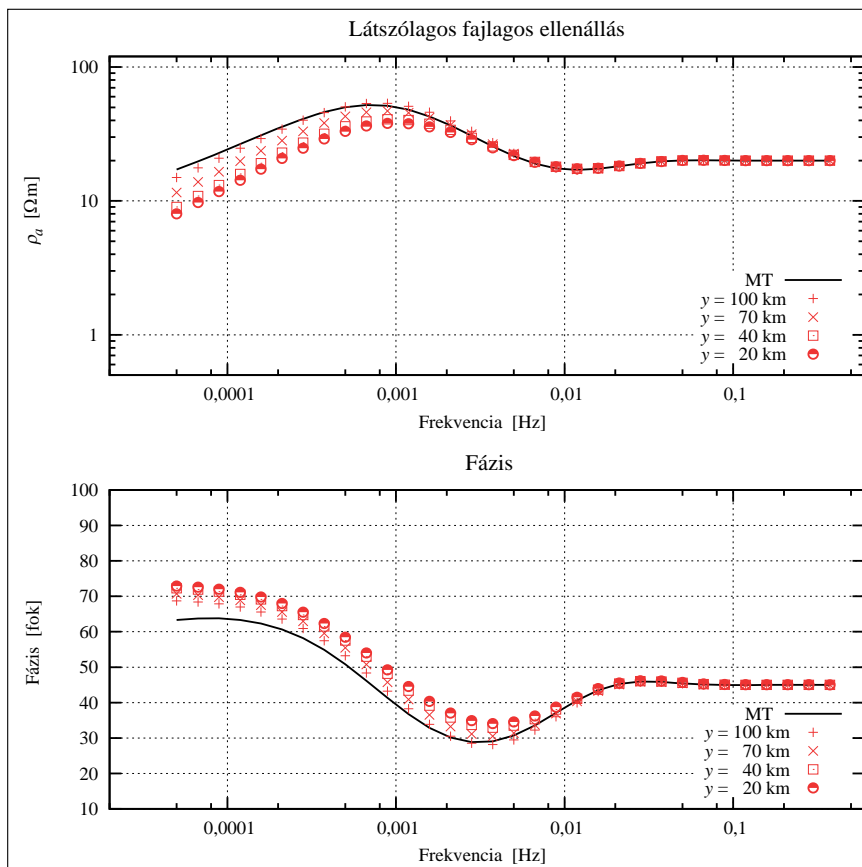
Az 1. táblázat rétegparamétereivel – vonalforrást feltételezve – szintetikus adatokat számítottunk $y = 70$ km-es oldal-távolságra és inverzióval MT görbékét illesztettünk hozzá. A szintetikus adatokhoz Gauss-eloszlású zajt adtunk úgy, hogy a relatív hiba nagy valószínűséggel ne haladja meg az 5%-ot.

1. táblázat | Modellparaméterek a forráshatás tanulmányozásához, ρ egy adott réteg fajlagos ellenállása, d a vastagsága

Réteg	ρ [m]	d [m]
1.	20,0	25000,0
2.	300,0	100000,0
3.	5,0	∞

2. táblázat | Szintetikus adatok (1. táblázat) inverziójával kapott modellparaméterek

Réteg	ρ [m]	d [m]
1.	20,0	23482,8
2.	169,4	90154,6
3.	2,6	∞



1. ábra | Vonalforrásra számított látszólagos fajlagosellenállás- és fázisértékek különböző forrás-vevő távolságokra, $h = -100$ km, modellparaméterek az 1. táblázatban
Figure 1 | Apparent resistivity and phase values calculated for line source at different source-receiver separations, $h = -100$ km, the layer parameters are in Table 1

A görbék illeszkedése a 2. ábrán látható. Az inverziós algoritlussal kapott modellparaméterek a 2. táblázatban láthatók. Az eltérés mértéke az 1. táblázat paramétereire képest – szintetikus adatokról lévén szó – nem elhanyagolható.

2.2. Síkbeli árameloszlás hatásának a számítása vonalforrások összegzésével

Most megmutatjuk, hogy a vonalforrás képletéből hogyan számíthatjuk egy adott vízszintes síkban elszórt áramok elektromágneses terét, illetve az impedanciát. Tekintsünk a síkban x irányú végtelen vonalforrásokat úgy, hogy a fázisuk az y koordinátának a periodikus függvénye! Eddig a vonalforrás y koordinátája 0 volt, most azt feltételezzük, hogy a vonalforrásnak az y koordinátája y_0 . Ekkor az egy vonalforráshoz tartozó vektorpotenciált meghatározó Helmholtz-egyenlet:

$$\frac{\partial^2}{\partial y^2} A_x(y, z) + \frac{\partial^2}{\partial z^2} A_x(y, z) - k^2 A_x(y, z) = -I \delta(y - y_0) \exp(i v_p y_0) \delta(z - h). \quad (19)$$

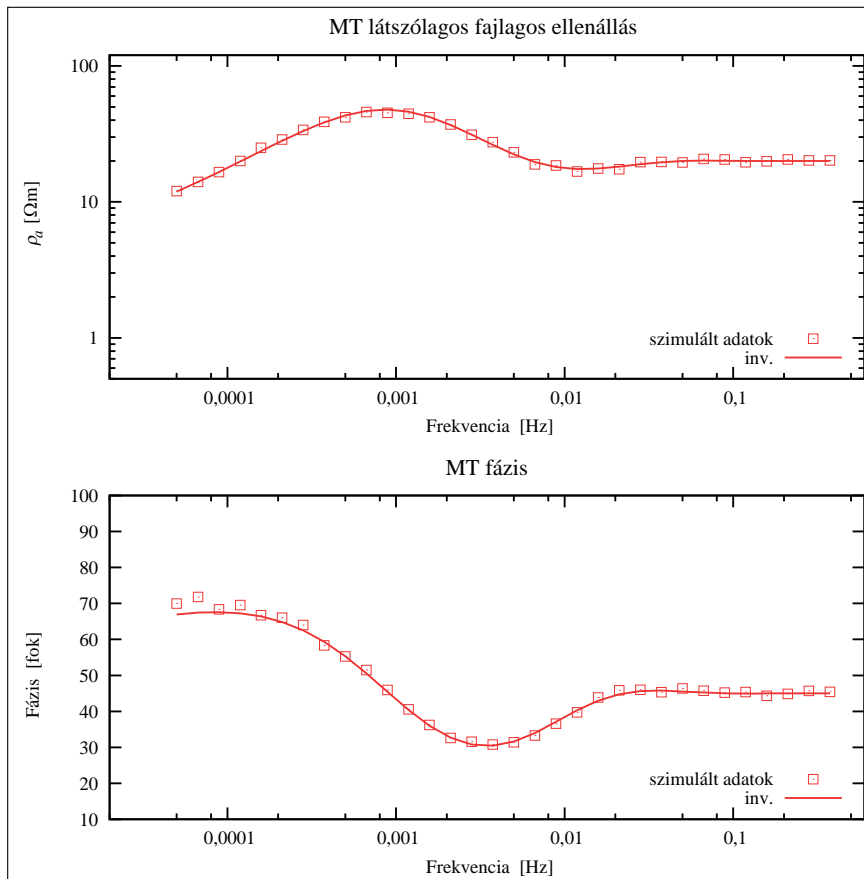
A megoldás ezzel a forrással ugyanúgy elvégezhető, csak az eredményül kapott térkomponenseket meg kell szorozni $\exp(i v_p y_0)$ -lal, valamint y helyébe $y - y_0$ írاندó. A teljes sík-

beli árameloszlás hatásához ezeknek a vonalforrásoknak a hatását kell integrálni a forrás y_0 koordinátája szerint. A v_p -t kétféleképpen is lehet értelmezni. Egyrészt a $v_p y_0$ az y_0 koordinátájú vonalforrás a fáziskülönbségét adja az $y = 0$ koordinátájú vonalforráshoz képest, másrészt megadja a síkbeli árameloszlás y koordináta szerinti periodicitását. Az elektromos térerősség x komponensének a képlete a felszínen:

$$E_x(\omega, y, z) = -\frac{i\omega\mu I}{2\pi} \int_0^\infty \frac{\exp(vh)}{v} (1 + R_0(v)) \times \int_{-\infty}^\infty \cos(v(y - y_0)) \exp(i v_p y_0) dy_0 dv.$$

A $H_y(\omega, y, z)$ komponensre vonatkozó képletet külön már nem is írjuk fel, hanem $E_x(\omega)$ -val együtt közvetlenül az impedanciát meghatározó képletbe helyettesítjük be. A végtelen síkban elszórt áramforrás esetére érvényes impedanciát meghatározó képlet:

$$Z_{xy}(\omega) = E_x(\omega) / H_y(\omega) = \frac{\int_0^\infty \frac{e^{vh}}{v} (1 + R_0(v)) \int_{-\infty}^\infty \cos(v(y - y_0)) e^{i v_p y_0} dy_0 dv}{\int_0^\infty e^{vh} (1 - R_0(v)) \int_{-\infty}^\infty \cos(v(y - y_0)) e^{i v_p y_0} dy_0 dv}. \quad (20)$$



2. ábra Inverzióval kapott MT görbék (2. táblázat) illeszkedése az 1. táblázat paraméterein alapján számolt szintetikus adatokhoz (vonalforrás, $h = -100$ km, $y = 70$ km)
Figure 2 The fit of MT inversion curves (Table 2) to the synthetic data, calculated from the parameters of Table 1

A képlet számlálójában és nevezőjében is a belső integrál egy $y_0 = -y_0$ helyettesítéssel a $\cos(\nu(y + y_0))$ függvény Fourier-transzformáltjává alakítható, amely ismert:

$$\pi [\delta(\nu - \nu_p) + \delta(\nu + \nu_p)] \exp(i\nu_p y).$$

Ha ezt beírjuk a (20) képletbe, akkor felhasználva a Dirac- δ tulajdonságát, a ν szerinti integrálásra sincs szükség, hiszen a magfüggvénynek csak a $\nu = \nu_p$ helyen felvett értéke marad. Azt is érdemes figyelembe venni, hogy a mérési hely y koordinátája, amely az egyes komponensek esetében $\exp(i\nu_p y)$ alakban még része volt a képleteknek, az impedancia képletéből egyszerűsítéssel kiesik. Ugyanígy a tört egyszerűsítésével esik ki a képletből a forrás h magassága is. Az impedancia végül

$$\begin{aligned} Z_{xy}(\omega) &= \frac{E_x(\omega)}{H_y(\omega)} \\ &= i\omega\mu \frac{1 + R_0(\nu_p)}{\nu_p (1 - R_0(\nu_p))}. \end{aligned} \tag{21}$$

A következő részben ennek a képletnek adjuk meg egy tömörebb levezetését, és elemezzük a ν_p térfrekvencia torzító hatását az impedanciára.

3. Az impedancia számítása arra az esetre, ha az indukáló tér fázisa az y szerint periodikusan változik

Ellentétben a vonalforrásra vonatkozó számítással, most a forrás helyének a koordinátái nem szerepelnek a kiindulási képletekben. Az előző rész levezetése a síkban eloszló áramforrásokra vonatkozólag – amelyet most egy tömörebb levezetéssel helyettesítünk – már bizonyította, hogy az impedanciára kapott képlet független a forrás magasságától. Most csupán azt tételezzük fel, hogy az indukáló mágneses térnek csak y irányú komponense van, és az x koordináta irányában a tér változatlan. Képlettel kifejezve az indukáló mágneses tér a felszínen

$$H_y(y_0 + y, \omega) = H_y(y_0, \omega) \exp(i\nu_p y). \tag{22}$$

A forrásra vonatkozó egyéb feltételezésre nincs szükség, hiszen az elektromágneses térkomponensek számítása most nem célunk, csak az impedanciát, azaz E_x és H_y arányát kívánjuk meghatározni. Ezért $H_y(y_0, \omega)$ értéke bármi lehet. A térkomponensek mint a mágneses vektorpotenciál függvényei:

$$\mathbf{E} = -i\omega\mu \operatorname{rot} \mathbf{A}, \quad (23a)$$

$$\mathbf{H} = -\gamma^2 \mathbf{A} + \operatorname{grad} \operatorname{div} \mathbf{A}, \quad (23b)$$

ahol ω a körfrekvencia, $\gamma^2 = i\omega\mu\sigma$ a hullámszám, μ a mágneses permeabilitás, σ a közeg vezetőképessége. μ értéke számításaink során megegyezik annak vákuumbeli értékével. Az \mathbf{A} vektorpotenciálnak esetünkben csak függőleges komponense van. Az elektromágneses térkomponensek értékei mint a vektorpotenciál függvényei a Maxwell-egyenletekből vezethetők le, számos publikáció foglalkozik ezzel a módszerrel (Kaufmann, Keller 1985, Weaver 1994), ennek a lépéseit ezért most nem részletezzük. Csak azt jegyezzük meg, hogy most a mágneses vektorpotenciált alkalmazzuk, ellentétben a vonalforrás esetével, amikor az elektromos vektorpotenciál alapján számoltunk. Az hogy a kétféle vektorpotenciál közül melyiket választjuk, általában a forrás jellegétől függ, de jelen esetben a gerjesztő tér egyszerű leírhatósága miatt bármelyik vektorpotenciált alkalmazhatjuk. Lényegében Price (1962) is az itt bemutatott módszerrel számítja az elektromágneses térkomponenseket, valamint az impedanciát, csak nem mondja ki, hogy az általa használt $Z(z)P(x, y, v_p)$ függvény egy mágneses vektorpotenciálnak a függőleges irányú komponense, és a vízszintes irányú komponensek 0-val egyenlők.

Az impedancia számításához szükséges elektromágneses térkomponensek (23) alapján

$$E_x(y, z) = -i\omega\mu \frac{\partial}{\partial y} A_z(y, z), \quad (24)$$

$$H_y(y, z) = \frac{\partial^2}{\partial y \partial z} A_z(y, z). \quad (25)$$

A vektorpotenciál z irányú komponense a Helmholtz-egyenlet megoldásával számítható

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2}{\partial y^2} A_z(y, z, v_p) + \frac{\partial^2}{\partial z^2} A_z(y, z, v_p) \\ = \gamma^2 A_z(y, z, v_p). \end{aligned}$$

Alkalmazzuk a változók szétválasztásának módszerét, és vegyük figyelembe a $H_y(y, z)$ y szerinti periodikus tulajdonságát! Ugyanez a tulajdonság érvényes $A_z(y, z, v_p)$ -re is, amelyet ezért kereshetünk az

$$A_z(y, z, v_p) = f(z, v_p) C \exp(i v_p y)$$

alakban, ahol C az elektromágneses tér erősségét meghatározó állandó, az impedancia számításakor kiesik. $A_z(y, z, v_p)$ -nek ezt az alakját beírva a Helmholtz-egyenletbe, majd egyszerűsítve $f(z, v_p)$ -re kapunk egy differenciálegyenletet:

$$\frac{\partial^2}{\partial z^2} f(z, v_p) = (\gamma^2 + v_p^2) f(z, v_p).$$

Ez a függvény rétegezett féltér esetére ugyanúgy határozható meg rekurzióval, mint a pont- és a vonalforrás képletének a magfüggvénye. Ellentétben a pont- és a vonalforrásokkal, nincs szükség az $A_z(y, z, v_p)$ függvény v_p szerinti integrálására, mivel most csak egyetlen v_p értékhez tartozó $A_z(y, z, v_p)$ függvény adja a Helmholtz-egyenlet megoldását. Ez annak a következménye, hogy most az elektromágneses

tér y szerinti változását eleve rögzítettük ($\exp(i v_p y)$). A $Z(\omega, v_p)$ impedancia számítása a (24) és (25) képletek alapján könnyen elvégezhető akár mint $f(z, v_p)$, akár mint $R_0(v_p)$ függvénye,

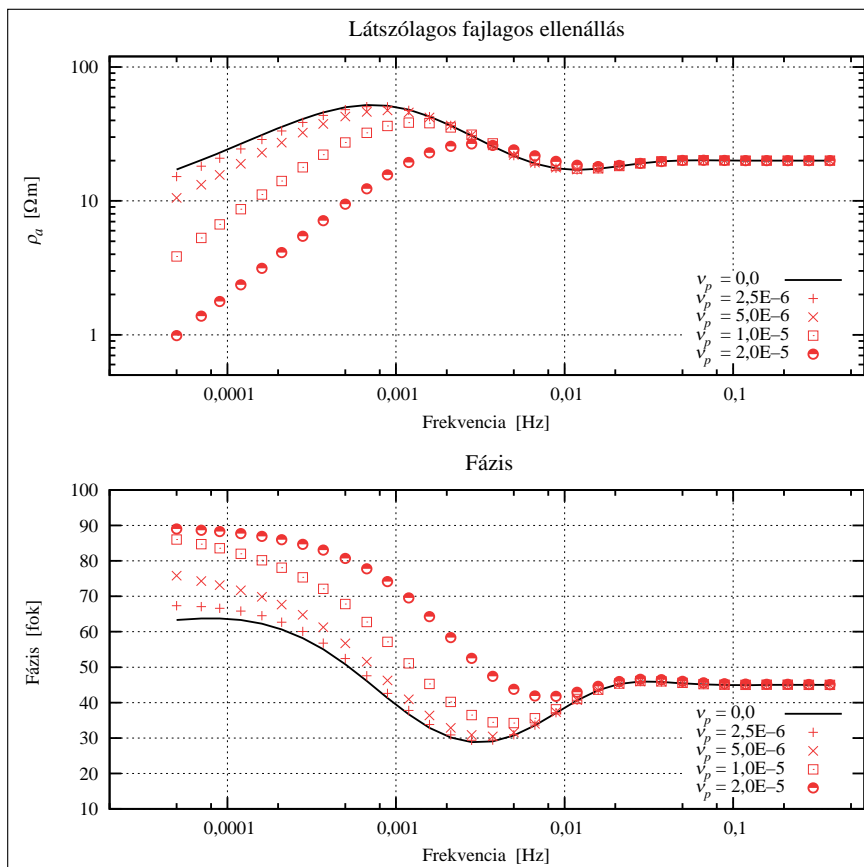
$$Z(\omega, v_p) = \frac{i\omega\mu f(0, v_p)}{\frac{\partial}{\partial z} f(0, v_p)} = \frac{i\omega\mu(1 + R_0(v_p))}{v_p(1 - R_0(v_p))}.$$

Ugyanazt a képletet kaptuk, mint az előző részben szereplő (21), csak lényegesen egyszerűbben, nem volt szükség kétszeres integrálásra, majd annak leegyszerűsítésére. Egyúttal azt is megállapíthatjuk, hogy a Maxwell-egyenletek kétféle kiindulásból való megoldása ugyanazt az impedanciát adja eredményül. Az előző részben egy vízszintes síkban levő árameloszlásra számoltunk, és az egyenletek felírásakor a Dirac- δ -kkal figyelembe vettük a forrás pontos leírását, most viszont csak abból a feltételezésből indultunk ki, hogy a felszínen a gerjesztő mágneses térnek periodikus tulajdonsága van (22).

Az előző rész levezetésének abban az esetben lehet létjogosultsága, ha az a sík, amelyben az árameloszlást feltételezzük, y irányban véges. Ekkor a (20) képletben a belső integrálokat a végtelen határok helyett véges határokkal kell számítani. Nyilvánvaló, hogy a végtelen síkban levő árameloszlásnál mint forrásnál is igaz az, hogy $v_p \rightarrow 0$ esetén megkapjuk az MT impedanciát. Hasonló feltételekkel számolva Price (1962) is egy, a (21)-gyel ekvivalens képletet vezet le, de nem az általános n réteges modellre, hanem csak egy speciális kétréteges esetre. Az akkori időkben még nem volt meg a számítástechnikai feltétele annak, hogy bonyolultabb algoritmusokkal számoljanak és alkalmazzák a már akkor is ismert általános n réteges esetre vonatkozó megoldást. Ádám (1970) már az általános, n réteges esetre érvényes (16) képlettel végzett számításokat elemzi Srivastava (1965) alapján, figyelembe véve a v_p térfrekvencia változásának a hatását az MT látszólagos fajlagos ellenállásra és fázisra.

3.1. A v_p hatása a látszólagos fajlagos ellenállásra és a fázisra

A 3. ábrán megfigyelhető, hogy a v_p térfrekvencia változása milyen változásokat okoz a (21) képlettel számolt látszólagos fajlagosellenállás- és fázisértékekben az eredeti magnetotellurikus ($v_p = 0$) értékekhez képest. A modellparamétereket az 1. táblázat tartalmazza. Az elektromágneses tér nagyobb frekvenciáira valamennyi görbe a magnetotellurikus görbével esik egybe, a legnagyobb a különbség a kis frekvenciák és a nagy v_p térfrekvenciák esetén. Az MT görbék grafikus megjelenítéséből az látszik, hogy nagy térfrekvenciák esetén a síkban eloszló áramok elektromágneses terének a síkhullámtól való eltérése nagyobb torzítást okoz, mint amilyent a vonalforrás térbeli jellemzőinek a hatása a forrás közelében (1. ábra). Nem elégedhetünk meg azonban csupán azzal, hogy megállapítjuk, hogy a v_p térfrekvencia milyen módon torzítja a magnetotellurikus görbét, hanem meg kell vizsgálni azt is, hogy milyen réteg-



3. ábra Látszólagos fajlagosellenállás- és fázisgörbék különböző v_p értékekkel, az 1. táblázat modelljére

Figure 3 Apparent resistivity and phase curves with different v_p values, for the model in Table 1

paramétereket kapunk a görbékéből. Az MT mérés célja ugyanis a földben levő rétegek fajlagos ellenállásának és a vastagságának a meghatározása. Első kísérletként elvégeztünk egy inverziót az 1. táblázat paramétereivel számított szintetikus adatokon, $v_p = 10^{-5}$ -nel. Az adatokhoz Gauss-eloszlású zajt adtunk úgy, hogy a relatív hiba nagy valószínűséggel ne haladja meg az 5%-ot. Ennél az első kísérletnél a szintetikus adatokhoz magnetotellurikus görbét próbáltunk illeszteni.

Az illeszkedés eredménye a 4. ábrán látható („1. inv.” görbe). A kapott modellparaméterek a 3. táblázatban szerepelnek. Az első réteg paramétereit, amint az elvárható volt, elfogadható pontossággal kaptuk meg, a második réteg paraméterei viszont nagymértékben eltérnek a szintetikus adatok számításához használt modelltől. A 4. ábra „1. inv.” fázisgörbéje kis frekvenciák esetén nem illeszkedik tökéletesen a szimulált mérési adatokhoz. Ez arra enged következtetni,

hogy nem is létezik megfelelő MT ($v_p = 0$) görbe, azaz a $v_p = 10^{-5}$ -nel számított görbéhez csak egy másik, $v_p \neq 0$ -val számított görbe illeszkedhet.

3.2. A v_p -t ismeretlenként kezelt inverzió

Egy olyan inverziós algoritmus adná vissza az elvárt modellparamétereket, amely az előremodellezés során figyelembe venné a v_p értékét. v_p értéke azonban ismeretlen, ezért egy olyan inverziós algoritmussal érdemes kísérletezni, amelyik a v_p -t is ismeretlennek tekinti, azaz a jó illeszkedés érdekében a modellparaméterek mellett a v_p értékét is folyamatosan változtatja.

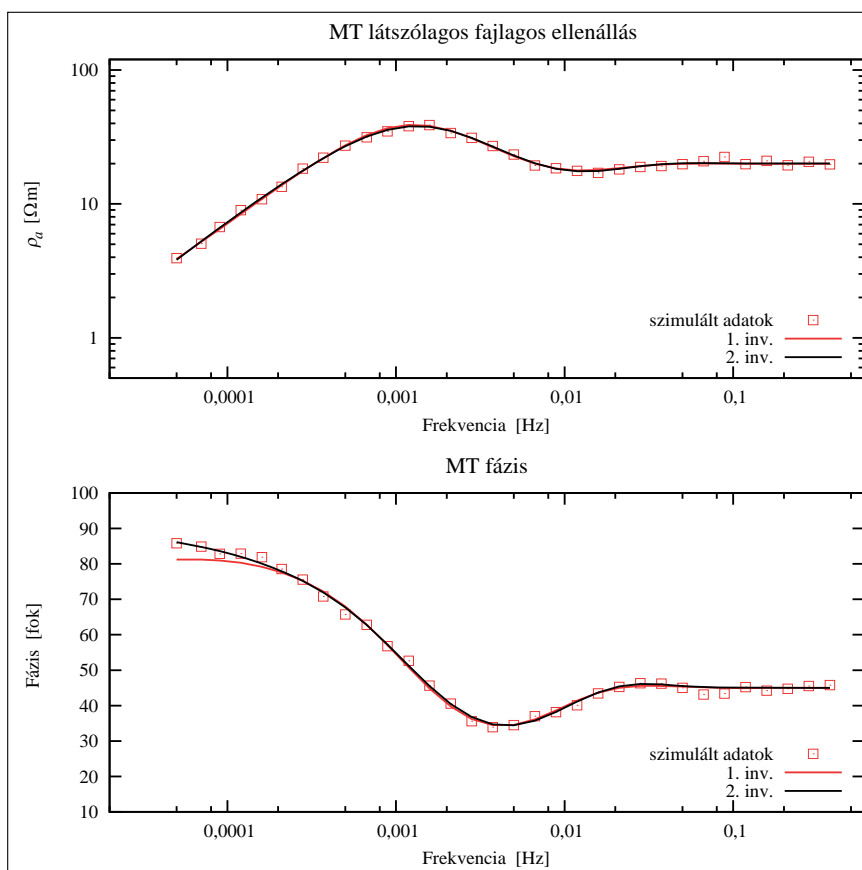
Az alkalmazott inverzió a linearizált inverzió, ennek az alapjaival most nem foglalkozunk, mivel az egy évtizedek óta rutinszerűen alkalmazott eljárás a geofizikában. Csupán az inverziónak a Jacobi-mátrix szinguláris értékek szerinti felbontásán (SVD) alapuló alapképletét írjuk fel (Jackson 1972), mivel ennek a sajátértékei alapján minősítjük a most végzett inverziókat. Az adatok és a paraméterek megváltozása közötti összefüggést a

$$\Delta \mathbf{p} = \mathcal{V} \mathbf{A}^{-1} \mathcal{U}^T \Delta \mathbf{m}$$

képlet adja meg, ahol \mathbf{p} a modellparaméterek, \mathbf{m} az adatok vektora, az \mathcal{U} és \mathcal{V} mátrixok az SVD adat-, illetve paramé-

3. táblázat MT görbeillesztés eredménye az 1. táblázat alapján számolt szintetikus adatokhoz

Réteg	ρ [m]	d [m]
1.	19,9	24250,5
2.	106,7	63926,8
3.	0,1	∞



4. ábra Inverzióval kapott MT görbék (3., 4. táblázat) illeszkedése a szintetikus adatokhoz (1. táblázat)

Figure 4 The fit of MT inversion curves (Tables 3, 4) to the synthetic data (Table 1)

ter-térbeli sajátvektorait tartalmazza, Λ a sajátértékeket tartalmazó átlós mátrix. Ennek a típusú inverzióknak egy kissé részletesebb kifejtése egy más jellegű geofizikai inverziós feladat kapcsán szerepel a szerző egy korábbi munkájában (Prácsér 2010). A 4. ábra „1. inv.”-vel jelölt inverziójához tartozó sajátértékek csökkenő sorrendbe rendezve,

$$\lambda_1 = 5,35225, \quad \lambda_2 = 4,40277, \quad \lambda_3 = 1,63771, \\ \lambda_4 = 0,13763, \quad \lambda_5 = 0,09209.$$

Az inverzió minőségét jól jellemzi a legnagyobb és a legkisebb sajátértékek aránya. Egy adott sajátérték összefüggésbe hozható bizonyos modellparaméterekkel. Esetünkben a viszonylag kicsi λ_4 és λ_5 értékek azt jelzik, hogy a modellünk esetén a második és a harmadik rétegek fajlagos ellenállásai csak bizonytalanul határozhatók meg. Például, ha a második réteg fajlagos ellenállását növeljük, akkor a harmadik réteg fajlagos ellenállásának csökkentésével elérhető, hogy az MT görbék alig változzanak.

4. táblázat MT görbeillesztés eredménye az 1. táblázat alapján számolt szintetikus adatokhoz, ismeretlennek tekintett v_p -vel

Réteg	ρ [m]	d [m]
1.	20,0	25064,8
2.	289,3	96088,4
3.	5,75	∞

A 4. táblázat tartalmazza annak az inverzióknak az eredménymodelljét, amely a v_p térfrekvenciát ismeretlennek tekintette. Ez azt jelenti, hogy a v_p térfrekvencia és a rétegparaméterek együttesen mint komponensek adják a \mathbf{p} paramétervektort. A görbék illeszkedése szintén a 4. ábrán („2. inv.”) látható. Tekintettel arra, hogy zajjal terhelt szintetikus adatokról van szó, a kapott modellparaméterek és a szintetikus adatok számítására alkalmazott modellparaméterek eltérése elfogadható. Az inverzióhoz tartozó 6 sajátérték:

$$\lambda_1 = 5,53154, \quad \lambda_2 = 4,97432, \quad \lambda_3 = 2,00083, \\ \lambda_4 = 0,63929, \quad \lambda_5 = 0,07669, \quad \lambda_6 = 0,04094.$$

A legkisebb sajátértékek ennél az inverzióknál is a 2. és 3. rétegek ellenállásaival vannak kapcsolatban. Ez egyúttal azt is jelenti, hogy a v_p térfrekvencia a nagyobb abszolút értékű sajátértékekkel hozható összefüggésbe, ezért jól meghatározható. Az ábrán látható MT görbéket eredményül adó inverzió futtatásakor is tapasztalható volt, hogy az algoritmus nagy biztonsággal határozza meg a v_p térfrekvenciát ($v_p = 1,005 \cdot 10^{-5}$). A relatív hiba a pontos értékhez képest kevesebb, mint fél százalék. Még abban az esetben is, amikor a v_p kezdeti becslése durván eltért az elvárttól, az inverziós algoritmus már az első néhány iteráció után pontosan adta vissza a helyes értéket, miközben a 2. és a 3. réteg ellenállása lényegesen lassabban tartott a helyes értékhez. Ezért akkor sem kockáztatunk sokat, ha valódi MT mérésekre alkal-

mazzuk ezt az eljárást, mivel akkor a ν_p -re egy 0-hoz közeli ($\nu_p = 6,4 \cdot 10^{-8}$) értéket kapunk, és a modellparaméterekre is megkapjuk az elvárt értékeket, azaz a módosított inverzió speciális esetként tartalmazza a síkhullámú esetre végzett mérések inverzióját.

4. Összefoglalás

Matematikailag levezettük, hogy a végtelen vonalforrás esetére érvényes impedancia a forrástól távolodva határértékben a síkhullámú MT impedanciához tart. Kétféle forrástípusra megmutattuk, hogy azok paraméterei hogyan torzítják az MT látszólagos fajlagos ellenállást és a fázist.

Hivatkozások

- Anderson W. L., 1979: Numerical integration of related Hankel transforms of orders 0 and 1 by adaptive digital filtering. *Geophysics* 44/7, 1287–1305
- Ádám A., 1966: A magnetotellurikus (MT) módszer Price-féle kritikájáról. (A pulzációs tér kiterjedésének meghatározása.) *Geofizikai Közlemények* XVI, 1–2
- Ádám A., 1970: A földi elektromágneses tér szerepe a Föld belső szerkezetének kutatásában. *MTA X. Osztályának közleményei* 4, 385–417
- Berdichevsky M. N., Zhdanov M. S., 1984: *Advanced theory of deep geomagnetic sounding*. Elsevier, Amsterdam – Oxford – New York – Tokyo, p. 408
- Davies B., 1983: *Integráltranszformációk és alkalmazásaik*. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 292. o.
- Dmitriev V. I., Berdichevsky M. N., 1979: The fundamental model of magnetotelluric sounding. *IEEE Proc.* 67, 1034–1044
- Jackson D. D., 1972: Interpretation of inaccurate, insufficient and inconsistent data. *Geophys. J. R. Astr. Soc.* 28, 97–109
- Keller G. V., Frischknecht F. C., 1966: *Electrical methods in geophysical prospecting*. Pergamon Press, Oxford – New York – Toronto – Sydney – Braunschweig

Szintetikus adatokon való inverzióval azt is megmutattuk, hogy a forrás geometriai paraméterei hogyan befolyásolják a magnetotellurikus inverzióval kapott rétegparamétereket. A síkban eloszló vonalforrásokra egy új inverziós eljárást mutattunk be, amely a térfrekvenciát is ismeretlen paraméterként kezeli és a rétegparaméterekkel együtt határozza meg. Az így meghatározott rétegparaméterek megbízhatóságát elsősorban az adatokat terhelő zajok korlátozzák, a 0-tól különböző térfrekvenciának nincs számottevő negatív hatása. A bemutatott inverzió alkalmazásával a rétegparaméterek mellett kapunk egy ν_p térfrekvencia-értéket is, amely az elektromágneses teret gerjesztő síkbeli árameloszlásnak egy fontos jellemzője.

- Kaufmann A. A., Keller G. V., 1983: *Frequency and transient soundings*. Elsevier, Amsterdam – Oxford – New York, p. 684
- Kaufmann A. A., Keller G. V., 1985: *Inductive mining prospecting part I: Theory*. Elsevier, Amsterdam – Oxford – New York – Tokyo, p. 620
- Pirjola R., Boteler D., 2002: Calculation methods of the electric and magnetic fields at the Earth's surface produced by a line current. *Radio Science* 37, 3
- Prácser E., 2010: A mágneses permeabilitás meghatározása inverzióval. *Magyar Geofizika* 51/4, 175–184
- Price A. T., 1962: The theory of magnetotelluric methods when the source field is considered. *Journal of Geophysical Research* 67, 5
- Scriba H., 1974: A numerical method to calculate the electromagnetic field of a horizontal current dipole. *Pageoph.* 112, 801–809
- Srivastava S. P., 1965: Method of interpretation of magnetotelluric data when source field is considered. *Journal of Geophys. Res.* 70/4, 945–954
- Watson G. N., 1966: *A treatise on the theory of Bessel functions*. Cambridge at the University Press, p. 804
- Weaver J. T., 1994: *Mathematical methods for geo-electromagnetic induction*. John Wiley & Sons, Inc., New York – Chichester – Toronto – Brisbane – Singapore, p. 316

A Bodai Agyagkő Formáció ciklusos felépítése lyukgeofizikai szelvények alapján

HALÁSZ AMADÉ

PTE TTK Környezetföldrajzi és Tájvédelmi Tanszék, Pécs
E-mail: tade@gamma.ttk.pte.hu

Jelen tanulmány a karotázsgörbék alkalmazhatóságáról szól a Bodai Agyagkő ciklusvizsgálatában. A Bodai Agyagkővet harántolt 3 fúrás (Ib-4, BAT-4, BAT-5) ciklicitásvizsgálatát végeztem el a karotázsszelvények felhasználásával. A lyukgeofizikai vizsgálatok kiegészítik a korábbi eredményeket (Halász 2009, Halász, Halmi 2012) és a rétegsor további tagolását teszik lehetővé. A ciklicitást jellemzően az agyagtartalom változásában sikerült kimutatni. A természetes gamma- és fajlagosellenállás-értékek alapján meghatároztam eddig nem ismert olyan ciklusokat, amelyek jellemző vastagsága 7 m és 12 m. Ezek elsősorban a homogén agyagkőnek leírt rétegekben jelennek meg, tehát a természetes gamma-értékek alkalmasak a formáció ciklussztratigráfiai elemzésére. Megállapítottam, hogy a számított albittartalom a többi módszerrel elért eredményekkel korrelál, azonban többletinformációt nem nyújt azokhoz képest.

Halász, A.: Cycle stratigraphic analysis of the Boda Claystone Formation by using high-resolution well log data

The present cycle stratigraphic study is based on high-resolution well log data. Geophysical well logs proved the existence of characteristic cyclic units detected by other methods (Halász, Halmi 2012) and also the thickness of the comprising cycles (Halász 2009). I reported cyclicity in the clay content of the formation. Based on natural gamma and resistivity values, I defined previously unknown cycles with thicknesses of 7 m and 12 m. I could apply this to units considered as homogeneous, thus the natural gamma values can be used in the cycle stratigraphic analysis of the formation. I stated that it is not worth carrying out cycle analyses based on calculated albite contents during future studies, because it gives no extra information compared to other methods.

Beérkezett: 2012. június 29.; *elfogadva:* 2012. augusztus 31.

1. Bevezetés

A nagy aktivitású radioaktív hulladékok egyik potenciális befogadó kőzetének, a Bodai Agyagkő Formációnak (BAF) és földtani környezetének, a Nyugat-Mecseknek a kutatása több évtizedre nyúlik vissza. A megfelelő tárolóhely kiválasztása szempontjából fontos tényező a képződmény horizontális és vertikális tagolódása és homogenitása. A Bodai Agyagkő Formáció esetében a ciklicitásvizsgálat ebben a témakörben nyújt hasznosítható ismereteket. A korábban egyhangúnak leírt rétegsor (Jámbor 1964) öt makroszkóposan (és a fő kőzetalkotó komponensek alapján) elkülöníthető kőzetből épül fel (Máthé 1999), e kőzettani tulajdonságok szerint tagolható. A lyukgeofizikai módszerek használatával a makroszkóposan nem észlelhető kőzettani változások is megismerhetővé válnak, és további tagolást tesznek lehetővé, ezáltal pontosabb képet adva a térbeli változékonyságról. Vizsgálatom célja tehát a képződmény részletesebb tagolása a geofizikai paraméterek segítségével.

2. Vizsgálati módszerek

A ciklussztratigráfiai elemzéshez az Ib-4, a BAT-4 és a BAT-5 lyukgeofizikai szelvényeit vizsgáltam. A feldolgozás során a természetes gamma-, fajlagosellenállás- (10 és 40 cm-es felbontásban), neutronporozitás-, valamint a számított albittartalom-görbéket használtam fel. A neutronporozitás- és a fajlagosellenállás-értékeket mindhárom, az albitot a BAT-4, BAT-5 számú fúrásban, a természetes gamma-értéket pedig csak az Ib-4 számú fúrásban tudtam értelmezni a rendelkezésre álló adatok alapján. A mért és számított értékek spektrumanalízissel történő feldolgozása során a jellemző ciklusok vastagságát igyekeztem meghatározni.

A természetes gamma-szelvények jól tükrözik a kőzet agyagtartalmának változását, esetenként mennyiségi értékelést is lehetővé téve. Mivel az agyagkő gamma-sugárzása viszonylag nagy, a mérés alkalmas a szemcseméret meghatározására. Szarka et al. (2003) vizsgálatai szerint a természetes gamma (TG) $\mu\text{R/h}$ -ban mért értéke és az illit száza-

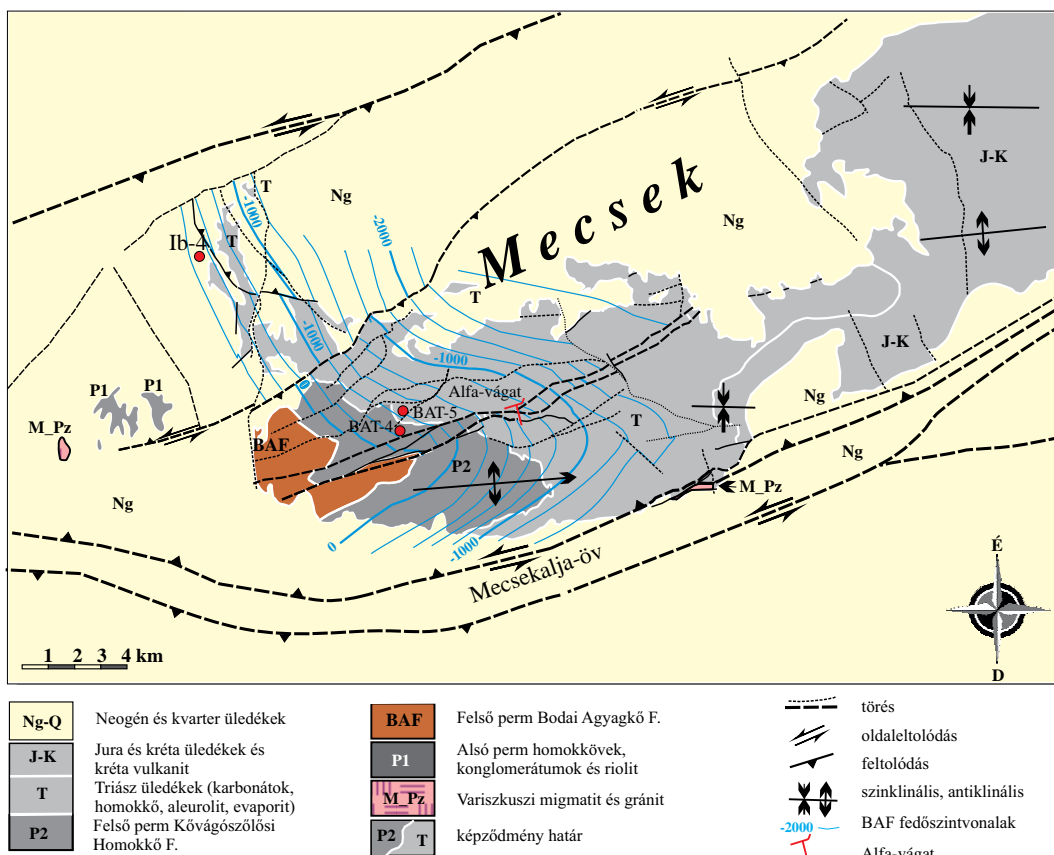
lékos aránya között a korrelációs együttható igen nagy. Eből azt a következtetést vonták le, hogy a természetes gamma mérésből pl. az illittartalom meghatározhatónak tűnik. Varga et al. (2006) megállapítása szerint az agyagkövekben az illit + muszkovit mennyisége általában nagyobb, mint az albitolitokban, az aleurolitokban és a homokkövekben, ami alátámasztja Szarka et al. (2003) eredményeit. Az összgamma-karotázsmérések alapján kimutatható ciklicitást befolyásolhatják a nyugat-mecseki perm képződményekben ismert uránanomáliák (Barabás 1956). A mérési eredményekre hatással lehet a circondulás is (Hurley, Faribau 1957). A formáció jellemzése szempontjából fontos agyagtartalom mérését viszont az agyagásványokhoz köthető K is befolyásolja, emiatt a spektrális gamma-mérések pontosabb eredményt mutatnának.

A formáció albittartalma igen jelentős, amely részben „fészkek” formájában, részben kötőanyag formájában van jelen, 13–59% között változó mennyiségben (Máthé 1999). Kötőanyag formájában makroszkóposan nem azonosítható, kimutatására azonban a lyukgeofizikai módszerek alkalmazhatók. A BAT-4 és BAT-5 geofizikai mérési adataiból számított albittartalom alapján próbáltam ciklusokat kimutatni. Az elsődleges vizsgálat során kiderült, hogy az albitartalom kiválóan korrelál a mátrixsűrűséggel (0,993), a

rendelkezésre álló dokumentációból azonban nem derült ki, hogy az albittartalom mérése milyen módszerrel történt. Az albittartalom mennyisége a BAT-4 és BAT-5 fúrásban valóban számított érték. Az albittartalom-számítás a neutronporozitás- és sűrűségmérések keresztábrájának (*cross-plot*) felhasználásával készült (Zilahi-Sebess 2008). A használt közetmodell két mátrixkomponensből (albit és illit-hematit) és a porozitásból áll. A porozitásmentes pontok az albit- és illit-hematit (illit + hematit állandó arányú keverék) pontot összekötő egyenes szakaszra esnek (Maros et al. 2008).

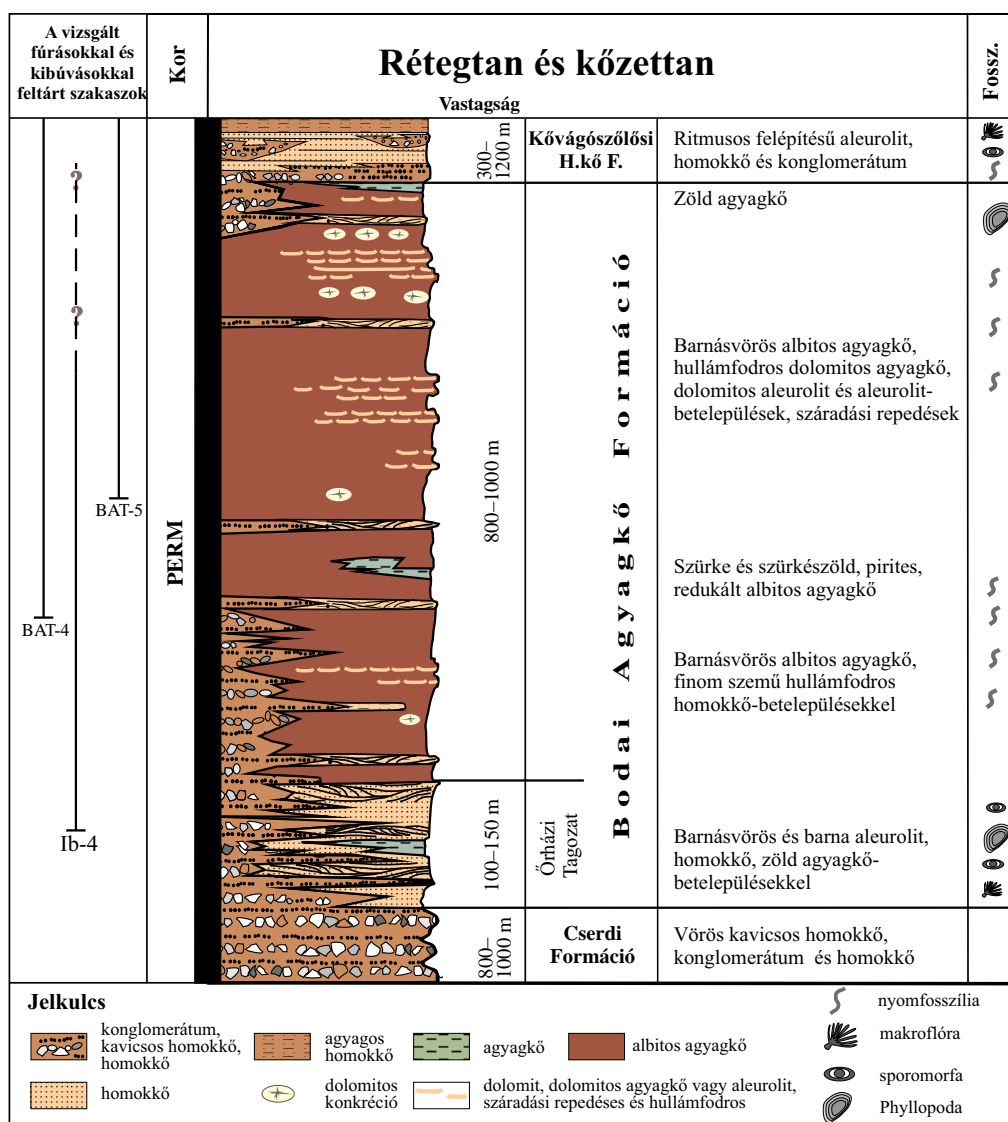
3. Földtani háttér

A Bodai Agyagkő Formáció a Tiszai-főegységben a Nyugati-Mecsek prekainozoos aljzatának (*1. ábra*) jellemző képződménye (Jámbor 1964, Haas et al. 2010), amely először Barabás (1956) kandidátusi értekezésében különül el mint önálló földtani egység. A formáció részletes kutatástörténetét és általános leírását számos zárójelentés (pl. Konrád 1998, Majoros 1999, Máthé 1999, Konrád, Hámos 2006 stb.), valamint számos tanulmány ismerteti (Jámbor 1964, Fülöp 1994, Barabás, Barabásné Stuhl 1998, Konrád et al.



1. ábra A Nyugati-Mecsek és környékének földtani térképe a Bodai Agyagkő felszíni elterjedésével és a vizsgált fúrásokkal (készült Weber 1977, Chikán, Konrád 1982, Chikán et al. 1984, Konrád 1996, Csontos et al. 2002 és Konrád, Sebe 2010 alapján)

Figure 1 Geological map with depth contours of the top of the BCF and with the examined boreholes



2. ábra | A Bodai Agyagkő elvi rétegoszlopa a fedő és fekvő képződmények feltüntetésével (Konrád 1999)

Figure 2 | Idealised lithological column of the BCF

2010a). A Bodai Agyagkő létrejötté egy olyan sós tóhoz köthető (Demény et al. 1996), mely a kristályos aljzat hosszú ideje tartó denudációjának következtében enyhén lejtő morfológiájú környezetben foglalt helyet (Konrád et al. 2010b).

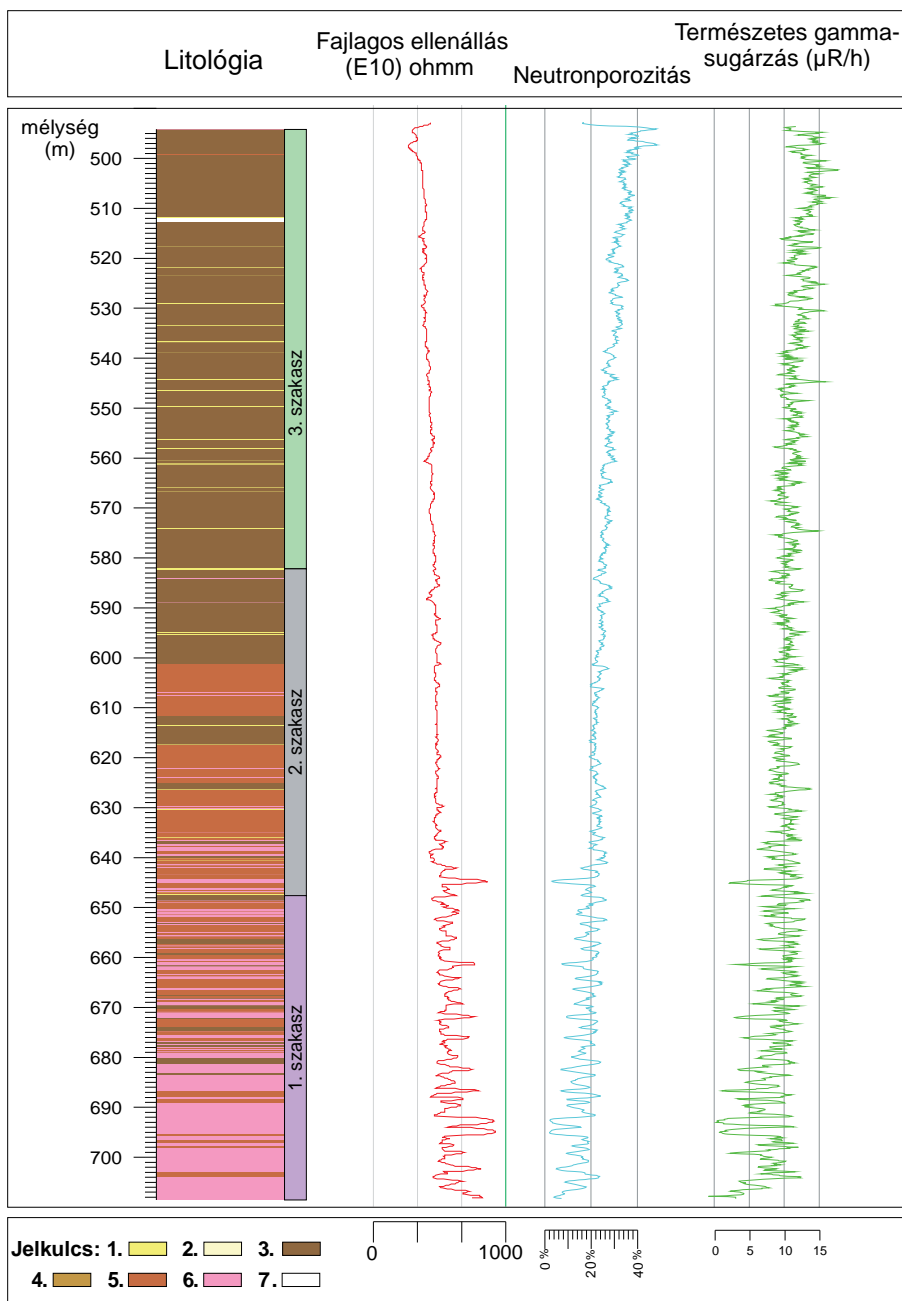
A térképezési adatok alapján (Konrád 1999) a formációt három fő litosztratigráfiai alegységre lehet elkülöníteni (2. ábra):

Alsó: Őrházi Tagozat, korábban „átmeneti rétegek”. Barna, vörösbarna, csillámos homokkő, amelyben aleurolit- és agyagkő-betelepülések találhatóak. Vastagsága 100–150 m.

Középső: vörösbarna, albitos, kőzetlisztes agyagkő, melyben kalcit, dolomit, vagy albit kötőanyagú aleurolit és finom szemű homokkőrétegek, valamint dolomit, dolomitos agyagkőrétegek települnek. Fokozatos rétegváltozással fejlődik ki az Őrházi Tagozatból. Vastagsága 350–450 m.

Felső: albitos agyagos aleurolit, kőzetlisztes agyagkő, száradási repedések dolomitbetelepülésekkel és dolomit-kongréciókkal. Vastagsága 400–450 m.

A Bodai Agyagkő Formáció kutatási programja során elvégzett részletes ásványtani, kőzettani és geokémiai vizsgálatok segítségével agyagkő, aleurolit, homokkő, albitolit és dolomit fő kőzettípusokat, valamint azok között számos átmeneti típust különítettek el (Barabás, Barabásné Stuhl 1998, Konrád 1998, Máthé 1999, Árkai et al. 2000, Varga et al. 2006, Konrád et al. 2010a). Az elkülönített fő litofáciesek közötti különbségek nem mindig élesek, sőt gyakoribbak az átmeneti típusok. Az agyagkő és az aleurolit kevert típusainak elkülönítése a terepi dokumentálás gyakorlatában nem könnyű feladat. E típusok uralják döntően a formáció rétegsorát, a dolomitos és a homokkőes rétegek ezekben közbe-településként figyelhetők meg. Kivétel ez alól az Őrházi Tagozat, amelyben a homokkő a domináns kőzettípus, és a



3. ábra | Az Ib-4 számú fúrás vizsgált karotázsgörbéi (Halász, Halmi 2012). Jelkulcs: 1. dolomit, 2. agyagos dolomit, 3. agyagkő, 4. kőzetlisztes agyagkő, 5. agyagos aleurit, 6. (kőzetlisztes) homokkő, 7. maghiány

Figure 3 | Borehole logs of Ib-4 well. Legend: 1. dolomite, 2. clayey dolomite, 3. claystone, 4. silty claystone, 5. clayey siltstone, 6. (silty) sandstone, 7. missing core

finomabb szemű frakciók képviselik a betelepülések jelentős hányadát.

4. Eredmények

4.1. Az Ib-4 számú fúrás ciklicitáselemzése lyukgeofizikai módszerekkel

Az Ib-4 számú fúrás esetében az említett természetes gammat és neutronporozitást, valamint a fajlagosellenállás-

görbéket vizsgáltam (3. ábra). A neutronporozitás-érték és a kőzet albitartalmának korrelációja alapján elvégeztem ezek ciklusainak feldolgozását is a spektrumanalízis módszerével.

Azt feltételeztem, hogy a formációra jellemző, általában néhány cm vastag betelepülések (dolomitos rétegek és kötegek) hatása nem fog megjelenni a geofizikai görbéken, mivel a nagyobb szondahossz (10 cm) és az ahhoz kapcsolódó kisebb vertikális felbontóképesség az ennél vékonyabb rétegek kimutatását nem teszi lehetővé. Ez alól kivétel a – néhány centiméteres felbontású – mikroszondás ellenállás-

mérés, illetve a lyukfalleképező módszerek (akusztikus lyukfal-televízer). A hagyományos módszereknél a vékony rétegzettség csak összegzett hatásként jelentkezhet, azonban következtetni lehet rá, hiszen a 10 és 40 cm szondahosszú konvencionális elektromos szondák indikációja is látványosan különbözhet, ha a két szondahossz közé esik a rétegek vastagsága. A dolomitos rétegek kimutatására ez a módszer tehát csak közvetve alkalmazható, ahol pedig egy hosszabb köteges rétegcsoport jelenik meg, ott a természetes gamma-görbékben is jelentkeznek változások.

4.1.1. A természetes gamma-szelvények ciklicitás szempontú értékelése

A természetes gamma- és a fajlagosellenállás-görbék együttes elemzése alapján a szemcseméret-változás felfelé finomodó trendet mutat, azonban – főleg az „átmeneti rétegek” – változó ideig tartó, kisebb-nagyobb intenzitású üledék-beáramlás nyomai lehetnek, amelyek elvéve a felsőbb réteggösszletekben (ott kisebb intenzitással) is követhetők.

A természetes gamma-szelvény elsősorban azokon a szakaszokon használható tagolásra, ahol a homogén szerkezetűnek leírt aleurolit, illetve kőzetlisztes agyagkő nagy vastagságban fejlődött ki. Ezeken a szakaszokon a természetes gamma-szelvény látványosan ciklusos rajzolatot mutat. Tehát az agyagtartalomra érzékeny természetes gamma grafikonján jelentkeznek a finom változások. A 3. ábra jól mutatja, hogy felfelé a ciklusok egyre vékonyabbak, ami a lerakódási idő rövidülését, vagy a beszállított üledék mennyiségének csökkenését jelentheti. Az ábrán látszik, hogy nem teljesen egyforma ciklusokról van szó, ami részben a mérés módszeréből, részben a ciklusok földtani felépítése közötti eltérésekből adódik.

A módszerből adódó különbséget az okozhatja, hogy egy adott mélységpontban a természetes gamma értékének kb. 70%-át a lyukfaltól számított kb. 15 cm távolságon belüli környezet határozza meg. A gamma-értéknek a kálium megközelítőleg az egyharmadát teszi csak ki, vagyis elég jelentős részben a nagy fajlagos felületen redukív környezetben adszorbeálódott urán-, illetve az agyagfrakcióhoz kötődő tóriumtartalmú ásványok szerepe is jelentős az agyagok természetes gamma-aktivitásában (Hurley, Faribau 1957). Ez összességében azt eredményezi, hogy a természetes gamma értéke a szállított üledékek esetén valamilyen módon a fajlagos felülettel arányos, mivel a lerakódás/ülepedés közbeni jelentős permeabilitás mellett végbemenő folyamat eredmé-

nyét látjuk, vagyis ezzel válik olyan tökéletes agyagindikátorrá a természetes gamma, hogy makroszkóposan az ilyen finomságú változások már nem is láthatók.

A vizsgálat során azt is tapasztaltam, hogy a zöld (reduktív?) rétegeknél, rétegfoszlányoknál a környező rétegekhez képest nagyobb a természetes gamma értéke, jellemzően 20 ($\mu\text{R/h}$) körüli. Egyes esetekben azonban a nagy természetes gamma-értékhez nem kapcsolódott makroszkóposan megfigyelhető zöldes réteg. Az Ib-4 számú fúrás ásványkőzet-tani vizsgálatai során mindössze egy mintában (G-4234) találtak a kérdéses jelenséggel (Kovács 2005). A minta alapszíne vörösesbarna, melyet zöldeskék foltok tarkítanak. Ezek színhatára éles, azonban az anyag minőségében nem mutatkozik változás a vékonycsiszolat alapján.

A formáció kronosztratigráfiai tagolásának problematikája miatt a ciklusok időtartamát (*time series*) nem, de a mélységet (*depth series*), vagyis a ciklusok vastagságát lehetett vizsgálni (Halász 2009). A természetes gamma-mérés agyagtartalommal szembeni érzékenysége makroszkóposan nem felismerhető ciklicitást mutathat. A rendelkezésre álló adatbázisból a PAST nevű program algoritmusát használva (Press et al. 1992) Lomb-periodogramokat állítottam elő. A periodogram „Frequency” tengely egysége az $1/x$ egység), ahol az x a kapott érték méterben (pl. a 0,1 frekvencia a 10 m-es vastagságnak felel meg). A véletlenszerű hibákat kiszűrtem, majd a 0,01 és 0,05 szignifikanciaszintnek megfelelő csúcsokat értékeltem.

A módszer felbontásából adódóan néhány tíz centiméteres ciklus (homokkő/aleurolit, agyagkő/dolomit) nem várható az elemzés alapján, és az agyagtartalom ilyen finom léptékű változása sem. A szemcseméret alapján meghatározott ciklusvastagságok (az egy méter feletti tartományban) a természetes gamma-értékek szerint is jól követhetők a fúrás teljes szelvényében. A vizsgálat eredményeit az 1. táblázatban foglaltam össze. Jól látszik, hogy a rétegsor egészére jellemző ciklusvastagságok (Halász 2012) egyenként is megjelennek az egyes réteggösszletekben. Erre jó példa a 12,5 m-es ciklusvastagság az Őrházi Tagozatban, a 7,6 m-es a középső réteggösszletben, valamint a 2,5–2,6 m-es ciklusvastagság az Őrházi Tagozatban és a felső réteggösszletben egyaránt. A homokkőves rétegek kivételével jelentkezett egy 3 m-es, valamint egy kb. 1,5 m vastagságú ciklus is. Ezeket a ciklusokat a terepi dokumentálás során nem, csak a természetes gamma-szelvényen sikerült elkülöníteni, ezért úgy gondolom, hogy azok az agyagtartalom makroszkóposan nem követhető változásait tükrözik.

1. táblázat. Jellemző ciklusvastagságok az Ib-4 sz. fúrás természetes gamma-értékei alapján

	Jellemző ciklusvastagságok méterben					
Közettan	13,8	7,2	2,4	0,97	0,64	0,59
Teljes fúrás	12,5	7,0	2,6	3,44	–	–
Őrházi Tagozat	12,6	–	2,6	–	–	2,0
Középső sz.	–	7,6	2,5	3,4	–	1,6
Felső sz.	–	5,8	–	3,2	–	1,42

4.1.2. A fajlagosellenállás-szelvények ciklicitás szempontú értékelése

A fajlagosellenállás-szelvények közül a részletesebb, 10 cm-es felbontásút elemeztem. A mérés során kapott értéket – az egyes kőzetek fajlagos ellenállásán túl – számos egyéb tényező is befolyásolja (porozitás, pórusokban található fluidum). Általánosságban elmondható, hogy a homok(kő) (fluidumtartalomtól nagyon függő) és a dolomit ellenállása nagy, míg az agyag(kő) ellenállása kisebb. A karotázsgörbe és a rétegoszlop összevetése alapján ez az összefüggés jól látszik (3. ábra). A dolomitos betelepülések csak abban az esetben jelentkeznek a karotázsszelvényen, ha kötegekben csoportosulnak, és jelentősen eltérő kőzetanyagú azok fedője és fekéje. A görbén jól látszik a litológia alapján megválasztott első és második, valamint második és harmadik rétegösszlet határa. A második rétegösszletben egyre kevesebb a magas érték (100–600 ohmm), majd a harmadik rétegösszletben a görbe lefutása egyenletesebbé válik a vékony dolomitos betelepülések és az agyagos/kőzetlisztes köztípusok váltakozása miatt. Az elméletileg nagyobb értéket mutató dolomitok vastagsága nem éri el az elméleti mérési küszöböt, emiatt azok megjelenése is ritkább.

Az ellenállásértékek alapján meghatározott jellemző ciklusvastagságokat a 2. táblázatban foglaltam össze. Az első sorban szintén a litológia alapján kapott vastagságértékeket tüntettem fel.

A fúrómag alapján meghatározott köztípusok ciklusai a 2 m-es vastagság felett jó egyezést mutatnak a fajlagosellenállás-szelvényen elkülönített ciklusokkal. A 11 m-nél vastagabb ciklusok csak a dolomitbetelepüléses felső rétegösszletre jellemzők, míg a 7–8 m-es vastagság szinte a teljes fúrásra. E két vastagabb ciklus jelenléte megfeleltethető a dolomitköteges rétegek agyagkő/dolomit ciklusának. A 2,5 m-es ciklicitást a homokkő gradált rétegzése idézi elő.

Az Őrházi Tagozatban sikerült azonosítani egy, a földtani dokumentálás során nem észlelhető 16 m-es ciklicitást is, amely a homokos (agyagos) aleuolitrétegek és a több méter vastag homokkőrétegek váltakozásából adódik a fúrás legalsó rétegösszletében (3. ábra). Az ellenállásértékek spektrumanalízise alapján jól tagolható a rétegsor és a jellemző ciklicitás is követhető.

4.1.3. Az albittartalom alapján kijelölhető ciklicitás

A neutronaktivációs módszer feldolgozását azért alkalmaztam, mert ígéretes kísérletek folynak az albittartalom e módszerrel történő meghatározására (Lovas et al. 2005). Az Ib-4 fúrás esetében az albittartalom kimutathatósága azonban nem tökéletes, mivel a módszer valójában a Na-tartalmat jelzi. Az Ib-4 jelű fúrás rétegsorából ismert nátriumtartalmú analcím is, tehát ebben a fúrásban e kettő összegzett arányát mutatja. A neutronszelvényekből (a BAT-4 és BAT-5 számú fúrás esetében is) csak bonyolult számításokkal sikerült előállítani az albittartalomra utaló görbét, de a kettő jó korrelációja miatt nem tekinthetem el annak vizsgálatától. A módszer előnye, hogy a kőzet kémiai összetevőiről szolgáltat információt, míg hátránya, hogy a mérés során kapott eredmények kiértékelési metodikája nem teljesen megoldott (Lovas et al. 2005). A feldolgozás során figyeltem fel arra, hogy a neutronporozitás- és a természetes gamma-értékek jól korrelálnak egymással (0,83), ez utóbbira jellemző kiugró értékek a porozitásgörbén azonban „simítottabban” jelennek meg. A korábban meghatározott rétegösszlethatárok (amelyek egy-egy nagyobb ciklus határainak tekinthetők) a neutronszelvényen is jól követhetők, igaz, nem olyan markánsan, mint az ellenállásgörbén.

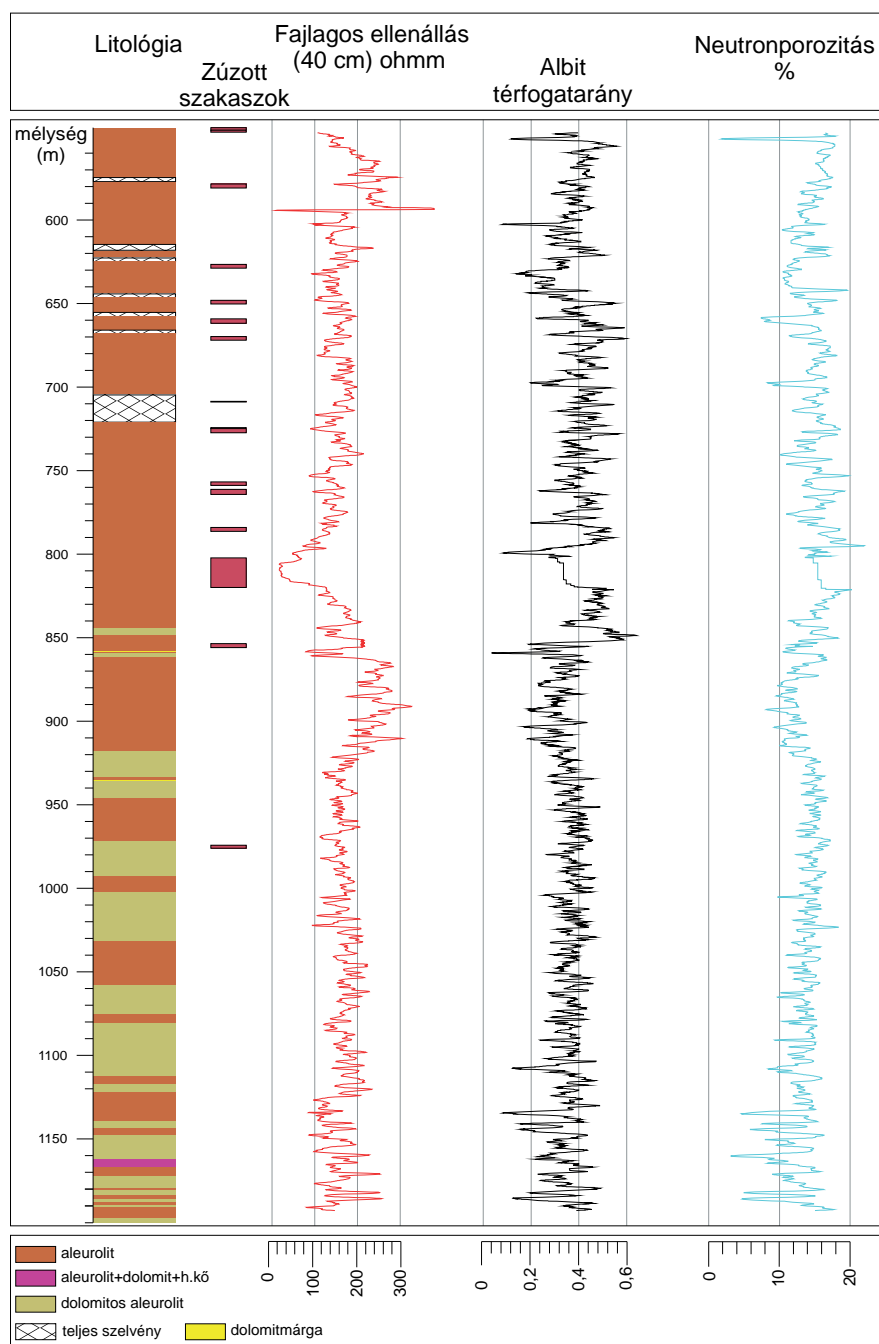
A Lomb-periodogram segítségével számolt jellemző vastagságok (3. táblázat) érdekes eredményt hoztak. A természetes gamma-görbével való jó korreláció alapján, ah-

2. táblázat. Jellemző ciklusvastagságok az Ib-4 sz. fúrás fajlagosellenállás-értékei alapján

	Jellemző ciklusvastagságok méterben					
Kőzetan	13,8	7,2	2,4	0,97	0,64	0,59
Teljes fúrás	12,2	8,4	2,0	1,6	–	16,5
Őrházi Tagozat	–	8,3	2,5	–	–	16,4
Középső sz.	–	7,6	2,5	–	–	–
Felső sz.	11,2	5,5	–	–	–	–

3. táblázat. Jellemző ciklusvastagságok az Ib-4 sz. fúrás neutronporozitási értékei alapján

	Jellemző ciklusvastagságok méterben					
Kőzetan	13,8	7,2	2,4	0,97	0,64	0,59
Teljes fúrás	12,8	–	2,6	3,2	1,33	27,0
Őrházi Tagozat	14,3	5,5	–	3,2	–	16,4
Középső sz.	–	7,6	2,5	3,1	1,5	–
Felső sz.	12,4	–	–	–	–	16,2



4. ábra A BAT-4 sz. fúrás vizsgált karotázsgörbéi
Figure 4 Borehole logs of BAT-4 well

hoz hasonló ciklusvastagságot vártam (12,2, 7,5, 3,2 és 2,6 m), azonban a felső rétegösszletben a 12,4 m a legvékonyabb várható ciklus a számítás alapján. A neutronaktívációs módszerekkel kapott eredmény elméletileg utal a kőzet albittartalmára, azonban a kisléptékű ciklusos változások ezzel a módszerrel nem mutathatók ki. Számolni kell azzal a ténnyel, hogy a neutronszelvényeken az albitos és dolomitos betelepülések egyaránt nagy értékeket mutatnak, amelyeket a spektrumanalízis során nem lehet szétválasztani.

4.2. A BAT-4 és a BAT-5 sz. fúrás ciklicitáselemzése lyukgeofizikai módszerekkel

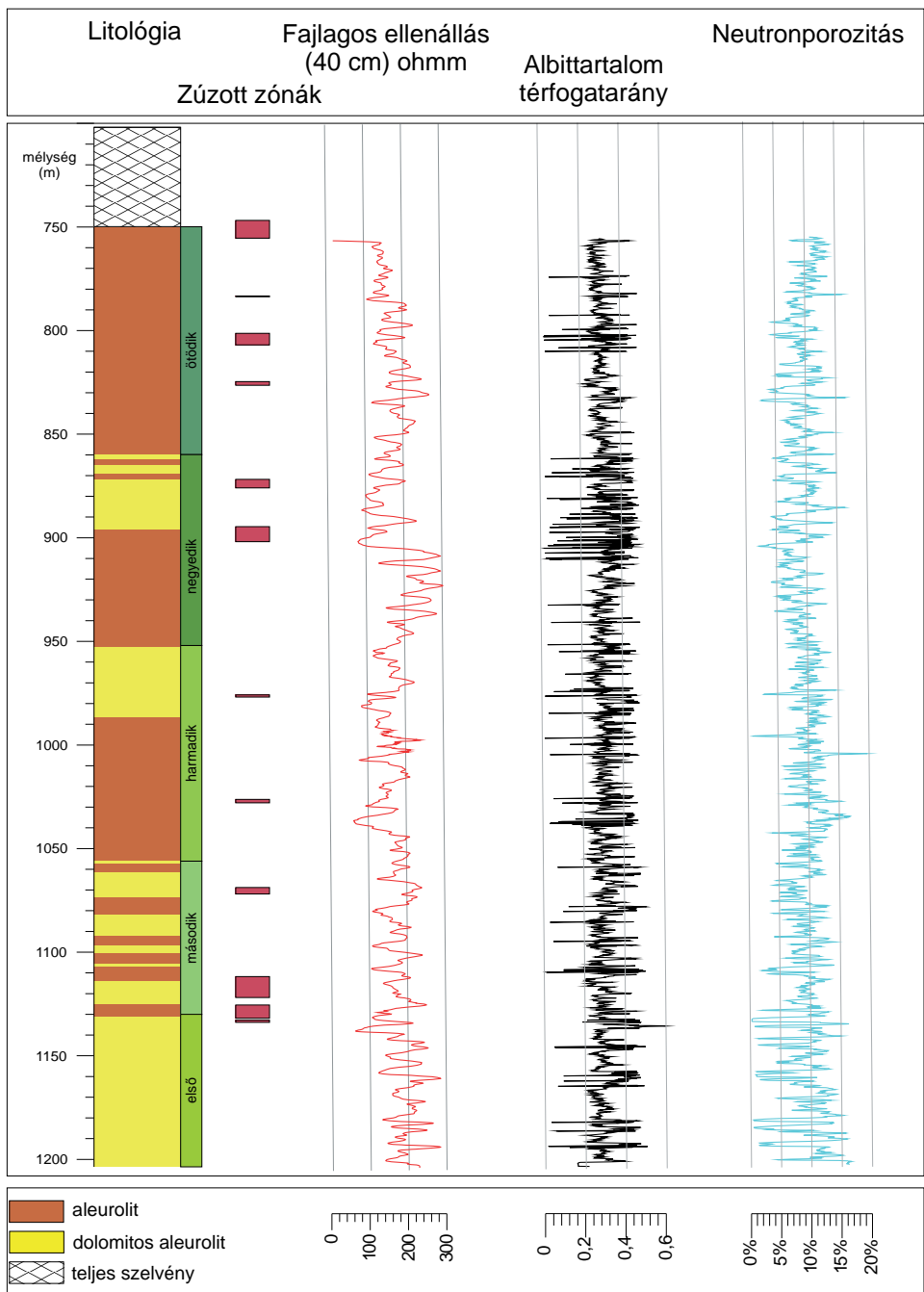
A BAT-4 sz. fúrás rendelkezésre álló karotázsgörbéiből a fajlagos ellenállást, a számított albittartalmat (a továbbiakban ezt értem albittartalom alatt) és a neutronporozitást vizsgáltam. Az albittartalom geofizikai módszerekkel történő meghatározására már történtek korábban kísérletek, részben a neutronaktívációs módszer, részben a mátrixsűrűség felhasználásával (4. ábra). Ebben a fúrásban az albit és

4. táblázat. Jellemző ciklusvastagságok a BAT-4 sz. fúrás geofizikai értékei alapján

Jellemző ciklusvastagságok méterben				
E40	27,0	16,5	7,8	3,9
Albit	20,3	–	8,7	5,4
N. porozitás	–	14,2	8,4	–

a mátrixsűrűség korrelációja 0,993 volt, míg az albittartalom és a neutronporozitás korrelációja csupán 0,658.

A rétegsorra jellemző ciklicitás az aleurolit/dolomit és a homokkő/aleurolit/dolomit ciklusok váltakozásából adódik,



5. ábra | A BAT-5 sz. fúrás vizsgált karotázsgörbéi
 Figure 5 | Borehole logs of BAT-5 well

5. táblázat. Jellemző ciklusvastagságok a BAT-5 sz. fúrás geofizikai értékei alapján

Jellemző ciklusvastagságok méterben					
E40	47,2	25,2	15,15	6,1	
Albit	29,7	11,7	8,5	5,1	2,1
N. porozitás	27,7		8,7	6,5	

ám azok vastagságát csak közelítőleg lehetett megadni, mivel a földtani leírás nem tartalmaz erre vonatkozó pontosabb adatokat. Az előző fúráshoz hasonlóan itt is a spektrumanalízist használtam a ciklusvastagságok megállapításához, amelyeket a 4. táblázatban foglaltam össze.

A fajlagos ellenállást tekintve a 8 és 16 m körüli értékek jó egyezést mutatnak az Ib-4 fúrásban megismert vastagságokkal, azonban a 27 m hosszúságú ciklusokat eddig nem sikerült igazolni, ahogy az albittartalom alapján jelentkező 20 m-eseket sem. A neutronporozitás értékek alapján megjelenő 14 és 8 m-es ciklusok szintén megtalálhatók az Ib-4 számú fúrásnál, azonban az ott gyakori 1,5–3,2 m közöttiek itt egyáltalán nem mutathatók ki.

A BAT-5 fúrásban (5. ábra) is kiszámoltam az albittartalom és a neutronporozitás, valamint mátrixsűrűség korrelációs kapcsolatát. Az utóbbival újra nagy, 0,995, míg a neutronporozitással csupán –0,338 korrelációs értéket kaptam. Ezek szerint ebben a fúrásban a számított albittartalom és a neutronporozitás között gyenge a korreláció.

Az ellenállásszelvények alapján az eddig is ismert ciklusvastagságok jelentek meg, kiegészülve egy 47,2 m-es ciklussal (5. táblázat). Ez utóbbi megfeleltethető az aleurolit és dolomitos aleurolit váltakozásának. A számított albittartalom szerint a BAT-4 fúrás eredményeihez hasonló értékeket kaptam, ami jó korrelációs lehetőségre utal. Egyedül itt mutatkozott az Ib-4 rétegsorára nagyon jellemző, 2 m körüli ciklus, amely a homok/aleurolit és agyagkő/dolomit típusok vastagságának felel meg. A neutronporozitásból számított vastagságok mindegyike ismert a korábbi fúrásokból, azonban az Ib-4 számú fúrásban megismert vékonyabb ciklusok itt hiányoznak.

5. Összefoglalás, következtetések

A mélyfúrás geofizikai szelvényekből kiolvasható ciklicitás elemzésével a BAF kutatása során korábban nem foglalkoztak. A munka során a ciklicitás szempontjából fontos tulajdonságokról információt adó adatsorokat vizsgáltam: a természetes gamma, a fajlagos ellenállás, a neutronporozitás és a számított albittartalom értékének változásait. Elsődleges célom volt a makroszkóposan nem vagy nem pontosan meghatározható agyag- és albittartalom-változás ciklicitásának meghatározása.

Az Ib-4 jelű fúrás fajlagos ellenállás és a neutronporozitás görbéi alapján jól elkülöníthetők a korábban meghatározott rétegösszlethetők (Halász 2010). A neutronaktivációs módszerek közül a neutronporozitási értékek alapján ko-

rábban történtek próbálkozások az albittartalom meghatározására. Emiatt tettem kísérletet az albittartalomtól függő ciklicitás meghatározására, amely fenntartásokkal kezelendő. A BAT-4 és BAT-5 sz. fúrásnál rendelkezésre állt az albittartalom-görbe, amelyen sikerült ciklusokat kimutatni, ám azok litológiai ellenőrzésére jelen munka nem terjedt ki.

Az Ib-4 jelű fúrásban a litológia szerint meghatározott ciklusvastagságok jól követhetők a természetes gamma-adatok alapján is, amelyek az agyagtartalom-változás 3 és 1,5 m vastag ciklusait jelölik. Így a természetes gamma-értékek vizsgálata eredménnyel használható a ciklusok kimutatásában. A felső rétegösszletből eddig nem ismert 8–10 m körüli ciklusok jelenléte igazolható a spektrumanalízis segítségével. Az ellenállás- és neutronporozitás-görbék alátámasztják a litológia alapján meghatározott ciklusok létezését a két méteres tartomány felett, sőt, ki is egészül egy 3,2 és egy 16 m-es ciklussal. A 16 m körüli érték az Őrházi Tagozatban követhető jobban, míg a 3,2 m részben az átmeneti, részben a középső rétegösszletre jellemző, ahol homok-köréteggként vagy betelepülésként van jelen.

A két BAT jelű fúrás karotázsszelvénye alapján az 5, 8 és 16 m körüli ciklusvastagság volt domináns, ami jó egyezést mutat az Ib-4 számú fúrásban megismert ciklusokkal. Lényegi különbség az Ib-4 számú fúráshoz képest, hogy a 20 m és az a feletti vastagság is jelentkezett, míg az 5 m alatti értékek csak egy esetben (BAT-5 albittartalom görbe). A görbék alapján is hasonló értékek olvashatók le, ám az albittartalom lefutásában néhol sűrűn jelentkező, 0,5–1 m-ként megfigyelhető kiugró értékek a Lomb-periodogramon nem mutatkoznak.

A különböző lyukgeofizikai szelvények alapján meghatározott ciklusvastagságok jól korrelálhatók egymással és a fúrásban dokumentált ciklusokkal, valamint a makroszkóposan nem látható tulajdonságok alapján is sikerült a képződést tovább tagolni.

Köszönetnyilvánítás

Köszönettel tartozom a Mecsekérc Környezetvédelmi Zrt.-nek, hogy rendelkezésemre bocsátotta az archív és a jelenleg folyó kutatások jelentéseit. Köszönöm a Radioaktív Hulladékokat Kezelő Közhasznú Nonprofit Kft. (korábban Radioaktív Hulladékokat Kezelő Kht.) vezetőinek, hogy engedélyt adtak a kutatási jelentésekbe való betekintésre és azok felhasználására. A kutatás egy része az RHK Kft. támogatásával készült.

Szeretnék köszönetet mondani a kutatás során nyújtott érdemi segítségért Konrád Gyulának és Halmai Ákosnak, valamint a lektorálást Zilahi-Sebess Lászlónak és dr. Szabó Norbert Péternek.

Hivatkozások

- Árkai P., Balogh K., Máthé Z., Demény A., Fórizs I., Nagy G., 2000: Composition, diagenetic and post-diagenetic alterations of a possible radioactive waste repository site: the Boda Albitic Claystone Formation, southern Hungary. *Acta Geologica Hungarica* 43/4, 351–378
- Barabás A., Barabásné Stuhl Á., 1998: A Mecsek és környéke perm képződményeinek rétegtana. In: Bérczi I. & Jámor Á. (szerk.): Magyarország geológiai képződményeinek rétegtana, MOL Nyrt.-MÁFI kiadvány, Budapest, 187–210
- Barabás A., 1956: A mecseki perm időszaki képződmények. Kandidátusi értekezés. Magyar Állami Földtani Intézet Könyvtár, 93 o.
- Chikán G., Konrád Gy., 1982: A nyugat-mecseki földtani térképezés újabb eredményei. – A Magyar Állami Földtani Intézet Évi Jelentése 1980-ról, 169–186
- Chikán G., Chikán G.-né, Kókai A., 1984: A Nyugati-Mecsek földtani térképe. 1:25 000. – Magyar Állami Földtani Intézet, Budapest
- Csontos L., Benkócs L., Bergerat, F., Mansy, J-L., Wórum G., 2002: Tertiary deformation history from seismic section study and fault analysis in a former European Tethyan margin (the Mecsek–Villány area, SW Hungary). *Tectonophysics* 357/1–4, 81–102
- Demény A., Fórizs I., Máthé Z., 1996: A Preliminary Stable Isotope Study on a Potential Radioactive Waste Repository Site in the Mecsek Mountains, Southern Hungary. *Rapid Communications in Mass Spectrometry* 10, 1415–1417
- Fülöp J., 1994: Magyarország geológiája. Paleozoikum II. 445 o.
- Haas J., Budai T., Csontos L., Fodor L., Konrád Gy., 2010: Magyarország pre-kainozoos földtani térképe, 1 : 500 000 [Pre-Cenozoic geological map of Hungary, 1 : 500 000]. – Magyar Állami Földtani Intézet, Budapest
- Halász A. 2009: A Cycles and rhythms within the Boda Claystone in the borehole Ib-4. *Central European Geology* 52/3–4, 325–342
- Halász A., 2011: A Bodai Aleurolit Formáció ciklussztratigráfiai vizsgálata. PhD disszertáció, Pécsi Tudományegyetem, 134 o.
- Halász A., Halmai Á., 2012: Homogén kőzetek színelapú elemzésének módszere az Ibafa Ib-4 fúrásban harántolt Bodai Agyagkő Formáció példáján. *Földtani Közlöny* 142/2, 125–136
- Hurley P. M., Faribau H. W., 1957: Abundance and Distribution of Uranium and Thorium in Zircon, Sphene, Apatite, Epidote and Monazite in Granite Rocks. *Trans. Amer. Geophys. Union*, 38 p.
- Jámor Á., 1964: A Mecsek hegység alsópermi képződményei. Jelentés. Mecsekérc Zrt. Adattár, Kővágószőlős, 113 o.
- Konrád Gy., Hámos G., 2006: A magyarországi nagy aktivitású radioaktív hulladéktároló telephely kijelölésének földtani szempontjai és az eddigi kutatások. *Acta Geographica, Geologica et Meteorologica* 1, 33–39
- Konrád Gy., 1996: Jelentés a Bodai Aleurolit Formáció 1995–96. évi földtani térképezéséről. – Kutatási jelentés (J-2743), kézirat, Mecsekérc Zrt. adattár, Kővágószőlős, 44 o.
- Konrád Gy., 1998: Jelentés a Bodai Aleurolit Formáció 1995–98. évi kutatásáról. Kézirat, Mecsekérc Zrt. Adattár, Kővágószőlős, 102 o.
- Konrád Gy., 1999: The Boda Claystone Formation. – “The Geology of today for tomorrow”. A satellite conference of the World Conference of Science, Excursion Guide Book, Budapest, pp. 65–75
- Konrád Gy., Sebe K., 2010: Fialat tektonikai jelenségek új észlelései a Nyugati-Mecsekben és környezetében. *Földtani Közlöny* 140/2, 135–162
- Konrád Gy., Sebe K., Halász A., Babinszki E., 2010a: Sedimentology of a Permian Playa Lake: Boda Claystone Formation, Hungary. *Geologos, Poland*. 16/1, 27–41
- Konrád Gy., Sebe K., Halász A., Halmai Á., 2010b: A Délkelet-Dunántúl földtani fejlődéstörténete – recens analógiák. *Földrajzi Közlemények* 134/3, 251–265 (<http://foldrajz.ttk.pte.hu/foldtan/dk-dunantul/>)
- Kovács B., 2005: Az Ib-4 számú fúrás alaphegységi képződményeinek ásvány-kőzettani vizsgálatai. Vékonycsiszolatos vizsgálatok. BAF projekt jelentés, Mecsekérc Zrt. Adattár, Kővágószőlős. 65 o.
- Lovas A., Szarka R., Kollár L., Henézi F. R., 2005: Az albit lyukgeofizikai módszerekkel történő kimutatási lehetőségek vizsgálata. Kézirat, Mecsekérc Zrt. Adattár, Kővágószőlős. 180 o.
- Majoros Gy. (szerk.), 1999: Nagyléptékű földtani vizsgálatok, regionális tektonikai és szedimentológiai modell kidolgozása. Kézirat, Mecsekérc Zrt. Adattár, Kővágószőlős 100 o.
- Maros Gy., Andrásy L., Zilahi-Sebess L., Máthé Z., 2008: Determination of the well-logging model of the Boda Aleurolite Formation (BAF) based on core analyses with the laser-induced plasma spectrometer ImaGeo-LIPS. *First break* 26, 129–139
- Máthé Z. (szerk.), 1999: Ásvány-kőzettani, kőzetgeokémiai és izotóptraszport vizsgálatok Mecsekérc Zrt. Adattár, Kővágószőlős, 153 o.
- Press, W. H., Teukolsky, S. A., Vetterling, W. T., Flannery, B. P., 1992: *Numerical Recipes in C*. Cambridge University Press. 1018 p.
- Szarka R., Kollár L., Majoros Gy., Lovas A., 2003: A BAF-ra mélyült archív fúrások geológiai és mélyfúrás-geofizikai adatainak egységes feldolgozása. Mecsekérc Zrt. Adattár, Kővágószőlős.
- Varga A., Raucsik B., Szakmány Gy., Máté Z., 2006: A Bodai Aleurolit Formáció törmelékes kőzettípusainak ásványtani, kőzettani és geokémiai jellemzői. *Földtani Közlöny* 136/2, 201–231
- Wéber B., 1977: Nagyszerkezeti szelvényvázlat a Ny-Mecsekből. *Földtani Közlöny* 107/1, 27–37
- Zilahi-Sebess L., 2008: Petrofizikai módszerfejlesztés. Budapest, ELGI adattár, 39 o.

Hidrogeológiai célú geofizikai térképezés egy tihanyi maar-tó környezetében

TÓTH ÁDÁM^{1,*}, HAVRIL TÍMEA², MÁDLNÉ SZÓNYI JUDIT², MÜLLER IMRE²

¹ELTE Geofizikai és Űrtudományi Tanszék, H-1117 Budapest, Pázmány Péter sétány 1/C

²ELTE Általános és Alkalmazott Földtani Tanszék, H-1117 Budapest, Pázmány Péter sétány 1/C

*E-mail: adam.geophysics@gmail.com

A Tihanyi-félsziget tavai a térségben 7,96 millió éve (Sacchi, Horváth 2002) lezajlott freatomagmás vulkanizmus során kialakult maar-szerkezetekben foglalnak helyet. Felszín alatti vizekkel való kapcsolataikat korábban nem vizsgálták. E kapcsolatok megértését célzó kutatás keretén belül a hidrogeológiai vizsgálatok mellett rádió-magnetotellurikus (RMT) méréseket végeztünk a felszín közeli képződmények fajlagos elektromos ellenállásának és geometriájának meghatározására. A kapott fajlagosellenállás-értékeket figyelembe véve a kráterperemet alkotó bazaltos képződmények, a diatrémaszerkezetet kitöltő pirokklasztitok és a maar-tavi üledékek elkülöníthetővé váltak. A kapott ellenállásértékeket hidraulikus vezetőképesség-értékké konvertáltuk. Az eredmények hozzájárultak a terület hidrosztratigráfiai viszonyainak tisztázásához, továbbá a félsziget tavai és felszín alatti vizei közötti kapcsolat megértéséhez, valamint akár egyéb maar-területeken is használhatók analógiaként.

Tóth, Á., Havril, T., Mádl-Szónyi, J., Müller, I.: Geophysical measurements to understand the hydrogeology of the maar-lake setting of the Tihany Peninsula, Hungary

The lakes of the Tihany Peninsula are located in maar structures which were formed by the phreatomagmatic volcanism of the region dating 7.96 Ma B.P. (Sacchi, Horváth 2002). Interaction between groundwater and the lakes has not previously been examined. In order to understand the complex hydrogeology of the Tihany Peninsula, geophysical radio-magnetotelluric (RMT) measurements were carried out to determine the electrical resistivity and geometry of shallow formations, and were coupled with hydrogeological observations. Maar lake sediments, maar structure filling pyroclastic deposits and tephra ring formations were able to be distinguished according to the resulting resistivity values. Electrical resistivity values were converted to hydraulic conductivity for each formation. The results of the study improved to clarify the hydrostratigraphic conditions of the area and hydrologic knowledge of the peninsula, and could also be applied to other maar regions.

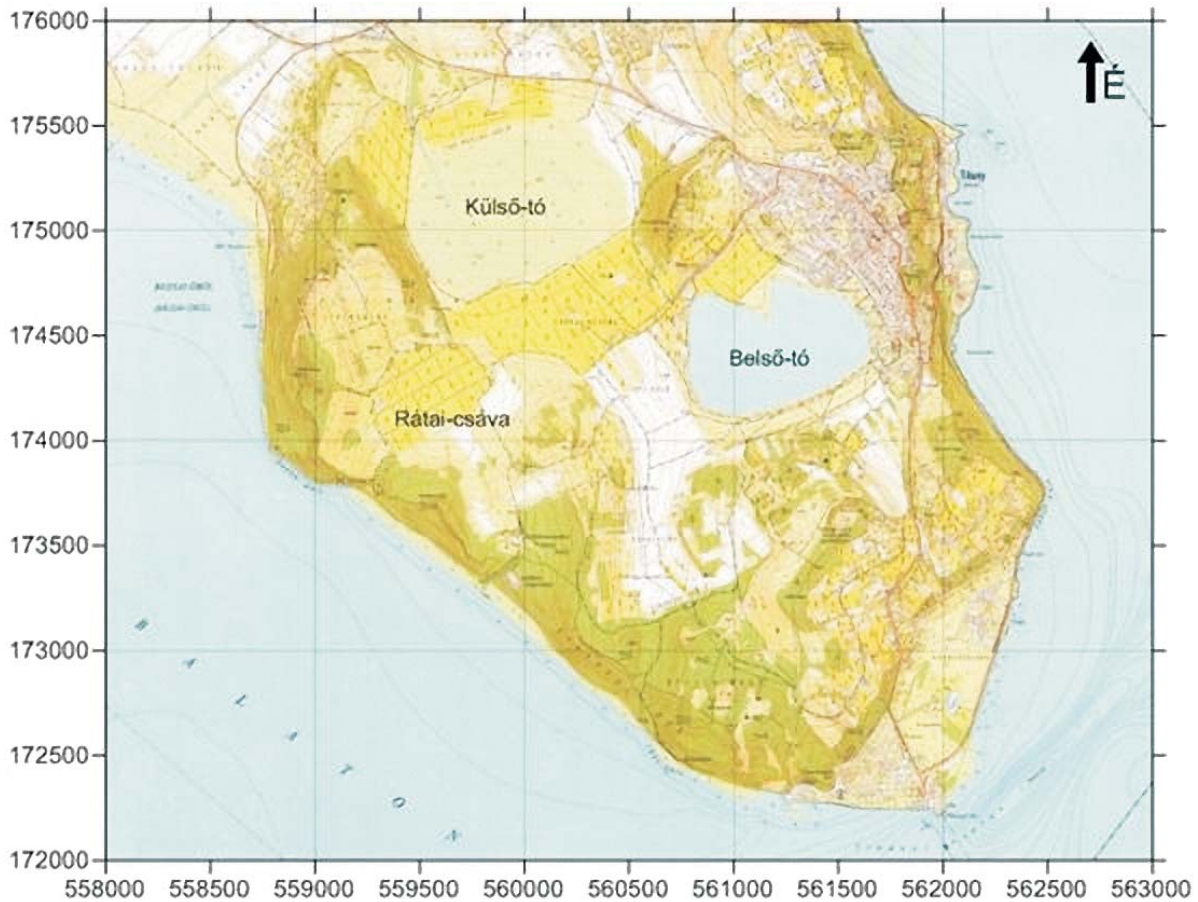
Beérkezett: 2012. május 9.; *elfogadva:* 2012. augusztus 11.

1. Bevezetés, földtani környezet

Az ELTE Hidrogeológia és Geotermia Munkacsoportjában 2010-ben indult el a Tihanyi-félsziget komplex hidrogeológiájának vizsgálatára irányuló kutatás, melynek célja a félsziget tavainak – a Külső-tó, a Belső-tó, valamint az időszakosan vízzel borított Rátai-csáva – felszín alatti vizekkel való kapcsolatának megértése (1. ábra). A félsziget hidrogeológiáját, a tavak és a felszín alatti vizek kölcsönhatását korábbi szerzők nem vizsgálták. Ennek meghatározásához a hidrogeológiai vizsgálatok mellett felszíni geofizikai méréseket végeztünk. Rádió-magnetotellurikus (RMT) műszer segítségével térképeztük a felszín közeli elektromosan vezető képződmények helyzetét és fajlagos elektromos ellenállását. Vizsgálataink során elsősorban az időszakosan vízzel borított depresszióban található Rátai-csáva felszín közeli földtani felépítésének jobb megértésére összpontosítottunk.

Ezzel hozzá kívántunk járulni a Rátai-csáva időszakos jellegének, illetve a félsziget maar-tavaival való kapcsolatának megértéséhez. A félszigeten végzett számos korábbi geofizikai vizsgálat után jelen kutatásunk újszerűségét a maar-területen végzett hidrogeológiai célú rádió-magnetotellurikus térképezés adja.

A Tihanyi-félsziget földtani szempontból a Balaton-felvidék délkeleti előteréhez tartozik, a Bakony–Balaton-felvidék Vulkáni Terület része. A félszigeten 7,96 millió évvel ezelőtt lezajlott vulkáni tevékenység (Sacchi, Horváth 2002) a régió alkálilbazalt vulkanizmusának első megnyilvánulása volt. A freatomagmás kitörések során a felfelé áramló forró magma vízzel, illetve vízzel telt üledékkel keveredve heves vulkáni robbanásokat eredményezett. Az így létrejött felszínbe vájt, sekély felépítményt maarnak, a hidrovulkáni fragmentáció és kürtőfalbeomlás által a maar alatt keletkező mély, paleozóos képződményekig érő, tölcser alakú



1. ábra | A Tihanyi-félsziget domborzata és vizei (EOV 43-412 [1983]: Tihany térképlap [1:10000], MÉM Földügyi és Térképészeti Hivatal)

Figure 1 | The topography and hydrography of the Tihany Peninsula (EOV 43-412 [1983]: Map sheet, Tihany [1:10000]. DAF Department of Land Administration and Geoinformation)

szerkezetet pedig diatrémának nevezzük (Lorenz 2003). A folyamat hatására a félszigeten három fő maar-szerkezet alakult ki: egy keleti, egy nyugati, és egy középső (Németh, Martin 1999a) (2. ábra). Martin és Németh (2004) besorolása alapján a tihanyi felépítmény a fedett maar-komplexumok közé tartozik, azaz a freatomagmás kitörések során a maarok és a tufagyűrűk körül torlóár, valamint a piroklasztuszorások üledékei halmozódtak fel. Varrók már 1957-es beszámolójában is megjegyezte, hogy a félsziget tavai az előbb említett maarok maradványaiban helyezkednek el.

A Külső-, és Belső-tóval ellentétben a Rátai-csáva – amely valószínűleg a középső maar parazitakürtője lehetett (Láng, Fodor 1970) – nem rendelkezik állandó vízborítással, így ezt a területet választottuk az RMT mérések helyszínül. Itt a teljes meder térképezhető felszíni geofizikai módszerekkel, ami megkönnyíti a maar-szerkezetből adódó struktúra vizsgálatát.

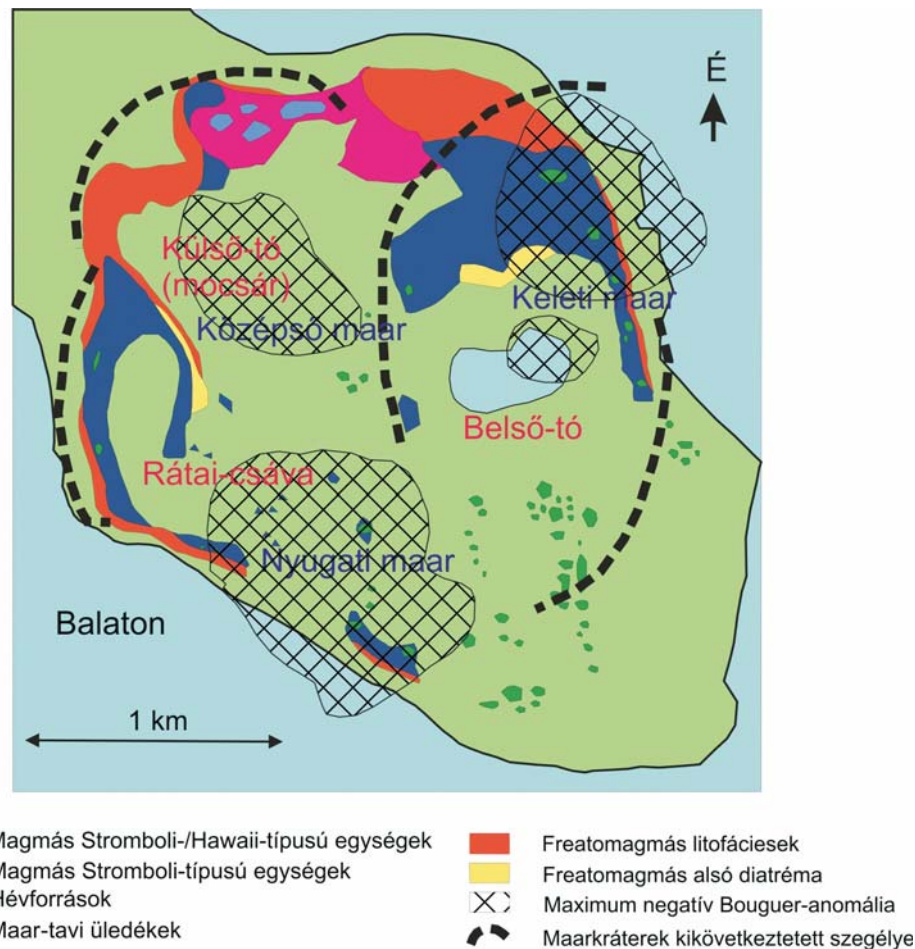
2. Kutatási előzmények

A Tihanyi-félsziget a korábbi hidrogeológiai kutatások szégyenessége ellenére sokrétűen vizsgált terület. A kutatások

elsősorban a lezajlott vulkanizmus hatásait (Németh, Martin 1999a, Németh et al. 1999, 2001, Martin, Németh 2004, Balogh, Németh 2005), a félsziget sajátos növény- és állatvilágát (Hably 1992a, Halaváts 1911, Krolopp 1961), valamint a térség neotektonikáját (Bada et al. 2010, Horváth et al. 2010) – ez a Balaton kialakulásának megértéséhez is nagy segítséget jelenthet – helyezték előtérbe. Ugyanakkor a térség természeti védettsége is igényli a sokrétű háttérkutatást.

2.1. A Tihanyban végzett archív geofizikai mérések

A félszigeten működő Tihanyi Földmágneses Observatóriumnak (MFGI) köszönhetően 1954. óta folyamatosak a geofizikai mérések és megfigyelések. Az 1950-ben kezdődött abszolút földmágneses és a későbbi graviméteres mérések eredményeit Benderné et al. (1966) foglalták össze. A Külső-tó területén számottevő mágneses anomáliát figyeltek meg, míg ugyanezen a területen a Bouguer-anomáliatérképen egy kisebb minimum jelentkezett. Ezen eltérésekből arra következtettek, hogy a tó alatt egy besüllyedt vulkáni kürtő helyezkedik el. Az anomália nagysága arra utal,



2. ábra A vulkanikus tevékenység nyomai a Tihanyi-félszigeten (Tóth Á. 2011, Németh et al. 2001 nyomán)
Figure 2 The manifestations of the volcanic activity on the Tihanyi Peninsula (Tóth Á. 2011, after Németh et al. 2001)

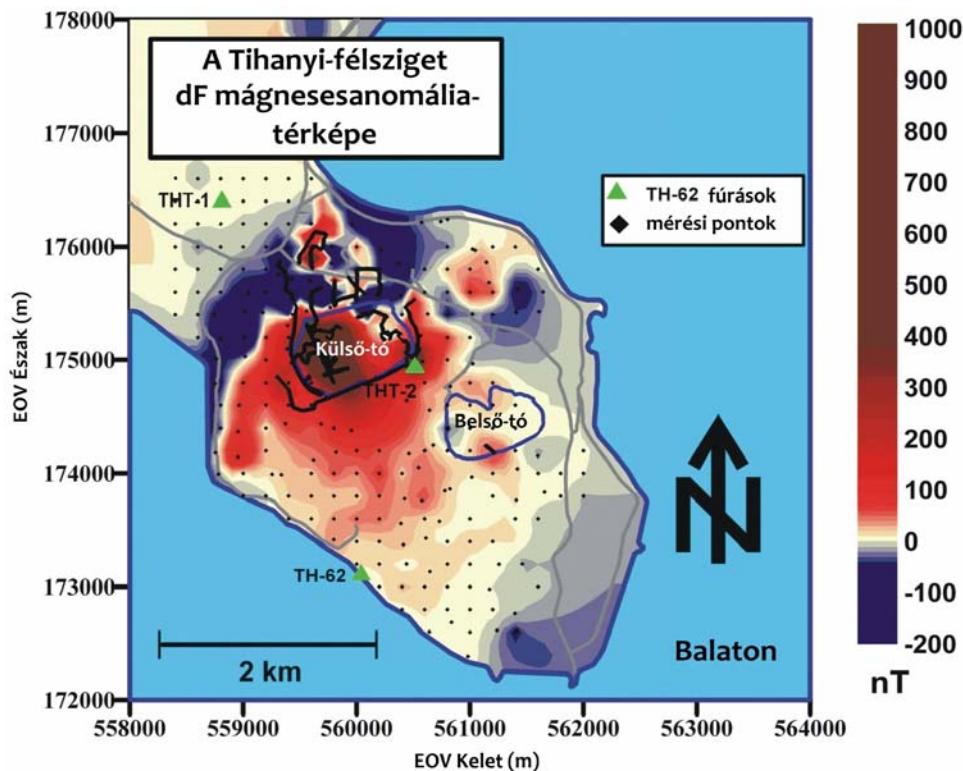
hogy a kürtőt nem bazalttufa, hanem bazalt tölti ki. A Belső-tó területének Bouguer-anomáliatérképén minimum mutatkozott, azonban a térség mágneses szempontból csaknem anomáliamentesnek tekinthető, vagyis a tó medencéje nem egy besüllyedt kráter, hanem a Balatonhoz hasonlóan törésvonal mentén keletkezett.

Lipovics et al. (2004) kutatásai során földmágneses vizsgálatokat végeztek nagy pontosságú Overhauser-magnetométerrel, majd az anomáliákat mutató területeken a kőzetek mágneses szuszceptibilitását mérték. Vizsgálataik célja a kitérés centrumok lokalizálása, illetve a vulkáni testek feltérképezése volt. A Külső-tó nyugati oldalán egy 1000 nT nagyságú, körülbelül 2 km² területet lefedő pozitív anomáliát mutattak ki, ettől északra pedig egy kisebb negatív is megfigyelhető. Ez utóbbi anomália bazaltos anyagot reprezentál, normál mágnesezettségű testre utal. A bazaltos anyag értelmezése szerint a vulkáni kürtőt, vagy a maar gyökérszónáját képviseli. Másik két kisebb, fordított mágnesezettségű centrumot is kimutattak a félsziget északi részén. Ezek csupán néhány száz méter átmérőjűek, az általuk okozott anomália 300 nT. Eredetük egyelőre nem tisztázott. A déli területeken nem tapasztaltak eltérést a mágneses térben, ami azzal magyarázható, hogy nincs a mélyben vulkáni

kőzet (3. ábra). Az ELGI által készített gravitációs mérések adatait felhasználva megállapították, hogy a gravitációs tér északnyugatról délkelet felé haladva regionálisan csökkenő értékeket mutat. A Külső-tó területén egy lokális minimum található 1–2 mgal eltéréssel. A minimumok északkelet–délnyugat irányú trendje egybeesik a térségben húzódó szerkezeti vonalakkal (4. ábra).

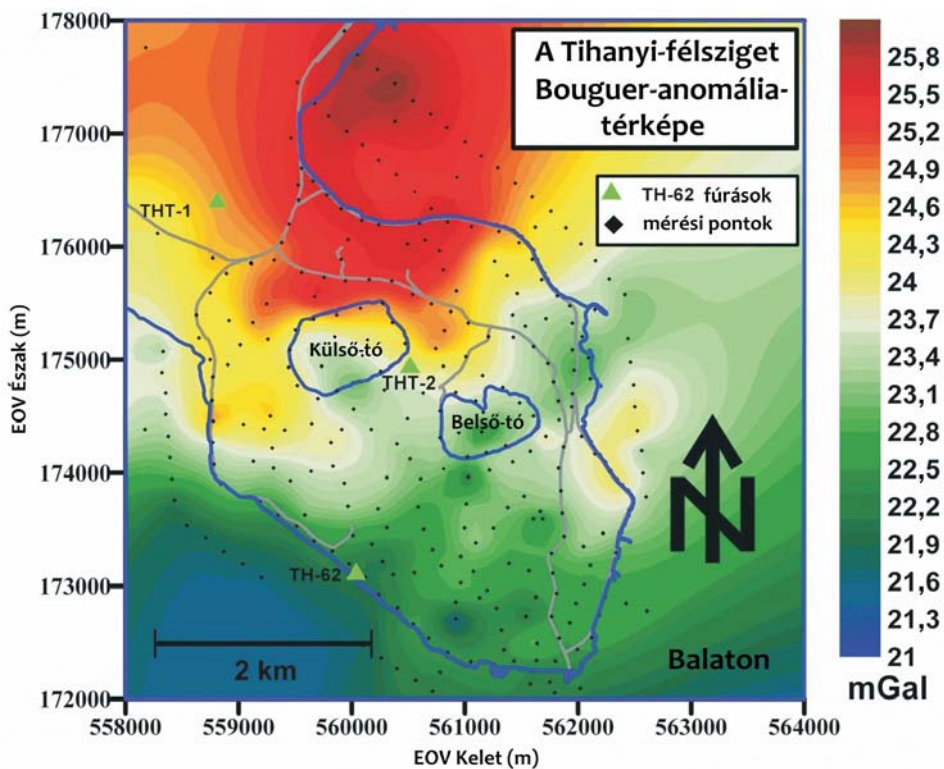
2.2. Összehasonlító tesztvizsgálatok különböző módszerekkel

A szakirodalomban a maar-szerkezeteket elektromos, szeizmikus, mágneses és gravitációs módszerekkel vizsgálták (Cassidy et al. 2007, Gebhardt et al. 2011, Skácelová et al. 2010). Emellett a felszín alatti vizek kutatásának legfontosabb eszközei az elektromos és elektromágneses módszerek, de gyakran alkalmazzák azokat a sekély szerkezetek térképezésére is (Nobes 1996). Mivel a vizsgált területen már történtek mágneses és gravitációs mérések, így kutatásunk során a többi mérési módszert helyeztük előtérbe. Számos tanulmány megmutatta a refrakciós szeizmika (Butler 2005, Rubin, Hubbard 2005), a vertikális elektromos szon-



3. ábra | A Tihanyi-félsziget mágneses totáltér-anomáliatérképe (Lipovics et al. 2004 nyomán)

Figure 3 | Total field magnetic anomaly map of the Tihany Peninsula (after Lipovics et al. 2004)



4. ábra | A Tihanyi-félsziget Bouguer-anomáliatérképe (Lipovics et al. 2004 nyomán)

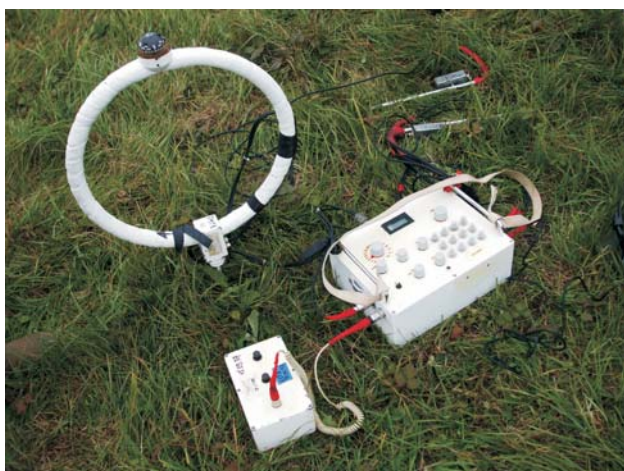
Figure 4 | Bouguer anomaly map of the Tihany Peninsula (after Lipovics et al. 2004)

dázás (Asfahani, Radwan 2007, Okoro et al. 2010), valamint a rádió-magnetotellurika (Pedersen et al. 2005, Tezkan et al. 2005) hidrogeológiai célú alkalmazhatóságát. Ennek megfelelően a felszín alatti inhomogenitások hidrogeológiai célú térképezése érdekében a Tihanyi-félszigeten, a Belső-tó nyugati partján, ugyanazon szelvény mentén e három geofizikai módszert (RMT, VESZ, refrakciós szeizmika) teszteltük.

A refrakciós szeizmika által meghatározott sebességek nem bizonyultak jellemzőnek a modellezett képződményekre. Ennek oka lehet, hogy e módszer a kis dőlésű, a fedőhöz képest nagyobb sebességű felületek leképezésében eredményes. A geoelektromos módszerekkel (VESZ és RMT) végzett tesztvizsgálatok eredményei jó egyezést mutattak. A VESZ mérés során egy mérőszorozattal a terítésen belül csupán egy pontra kapunk információt, feltételezve a modellezett rétegek közötti homogenitását. Az RMT módszerrel idő- és költséghatékonyan szerezhetünk a mérési pont környezetére jellemző információt, közel azonos behatolási mélység mellett. Figyelembe véve a fenti tapasztalatokat az inhomogén közeg gyors térképezésére a rádió-magnetotellurikus módszer bizonyult a legalkalmasabbnak és legmegbízhatóbbnak. Mivel a behatolási mélység viszonylag sekély (litológiától és mérési frekvenciától függően ~10–30 m), ezért a mért ellenállás adatok könnyen korrelálhatók sekélyfúrásokból, illetve szivattyúpróbákban kapott hidraulikus vezetőképesség-értékekkel (Linde, Pedersen 2004). A vizsgált terület domborzati jellege folytán tipikusan 3D-s, azonban az RMT mérés sűrű állomásközei és kisebb elektromos terítési távolságai lehetővé teszik a lokálisan 1D-s közelítést, ami szintén az RMT módszer alkalmazását indokolta.

3. Rádió-magnetotellurikus vizsgálatok

Magyarországon a rádió-magnetotellurikus módszer fejlesztése radiokip eljárás néven Takács Ernő nevéhez köthető



5. ábra | RMT műszer (fotó: Tóth Á.)

Figure 5 | RMT device (photo: Tóth Á.)

(Takács 1971). Az általunk használt skalár RMT műszer (5. ábra) megtervezése és kivitelezése az 1980-as években kezdődött meg a svájci Centre d'Hydrogéologie et de Géothermie Neuchâtel (CHYN) központban, és mára a hidrogeológusok egyik gyakran használt geofizikai eszköze lett. Segítségével meghatározható az elektromosan vezető közegek rétegsorban elfoglalt helyzete, illetve mérhető a rétegek, közetek fajlagos ellenállása. A mérés három különböző frekvencián történik. A rádióhullámok eltérő behatolási mélységeinek köszönhetően három különböző mélységtartományból kapunk információt (Turberg 1994).

3.1. Módszer

Az RMT az elektromágneses indukciós módszerek közé tartozik. A felszínen haladó elektromágneses hullám hatására örvényáramok indukálódnak a felszín közeli összetettekben, létrejön egy másodlagos elektromágneses tér. A vevő az elsődleges (primer) és a gerjesztett (szekunder) tér eredőjét méri (Takács 1971). Mivel a primer mező ismert, a fáziskülönbséget (φ [°]) mérjük, így a szekunder tér is meghatározható. A kettő segítségével pedig információkat kapunk a felszín alatti közeg tulajdonságairól.

Az RMT lényegében a VLF-R (*very low frequency – resistivity*) alacsonyfrekvenciás ellenállásmérő műszer továbbfejlesztett verziója. Működési alapelvek megegyeznek, azonban míg a VLF-R a 10–30 kHz-es frekvenciatartomány jeleit használja, addig az RMT egészen 240 kHz-ig alkalmazható. Az alacsonyfrekvenciájú jeleket távoli katonai, navigációs és óraállító rádióadók szolgáltatják (Oskooi, Pedersen 2005). A direkt és a felszínen reflektált hullámok a fáziskülönbség miatt kioltják egymást, a litoszféra behatoló hamar elvesztik energiájukat, gyorsan lecsengenek, nem tudnak eljutni az észlelőig. Így a mérés során csak az ionoszféráról visszavert jelek hasznosíthatók, mivel ezek nagy távolságban is foghatók, és terjedésük során síkhullámként írhatók le (Zacher et al. 1996). A mérés során a rádiótartományban megfelelő frekvenciákon (10–240 kHz) egyszerre érzékeljük és mérjük az elektromos tér egyik komponensét és az erre merőleges mágneses komponensét ($E_x - H_y$ vagy $E_y - H_x$) (Tezkan 2009). A behatolási mélység (vagy effektív mélység) a jel frekvenciájától függ: az alacsonyabb frekvenciájú jelek mélyebbre hatolnak be. Az eljárás effektív mélysége az alábbi formulából adható meg:

$$\delta = 503,3 \cdot \sqrt{\rho_a / f},$$

ahol δ [m] a behatolási mélység, ρ_a [Ω m] a látszólagos fajlagos elektromos ellenállás, f [Hz] a jel frekvenciája (Turberg 1994). A módszer alkalmazása során a mágneses térkomponens az adó irányára merőleges állású, vízszintes tengelyű tekerccsel, az elektromos mező térkomponensét pedig az adó irányában földbe szúrt két, egymástól 5 méter távolságban lévő, elektróda közti potenciálkülönbséggel határozzuk meg. A műszer a térkomponensek alapján számolja ki a látszólagos fajlagos elektromos ellenállást és a két tér közötti fáziseltolást (Stiefelhagen, Müller 1997).

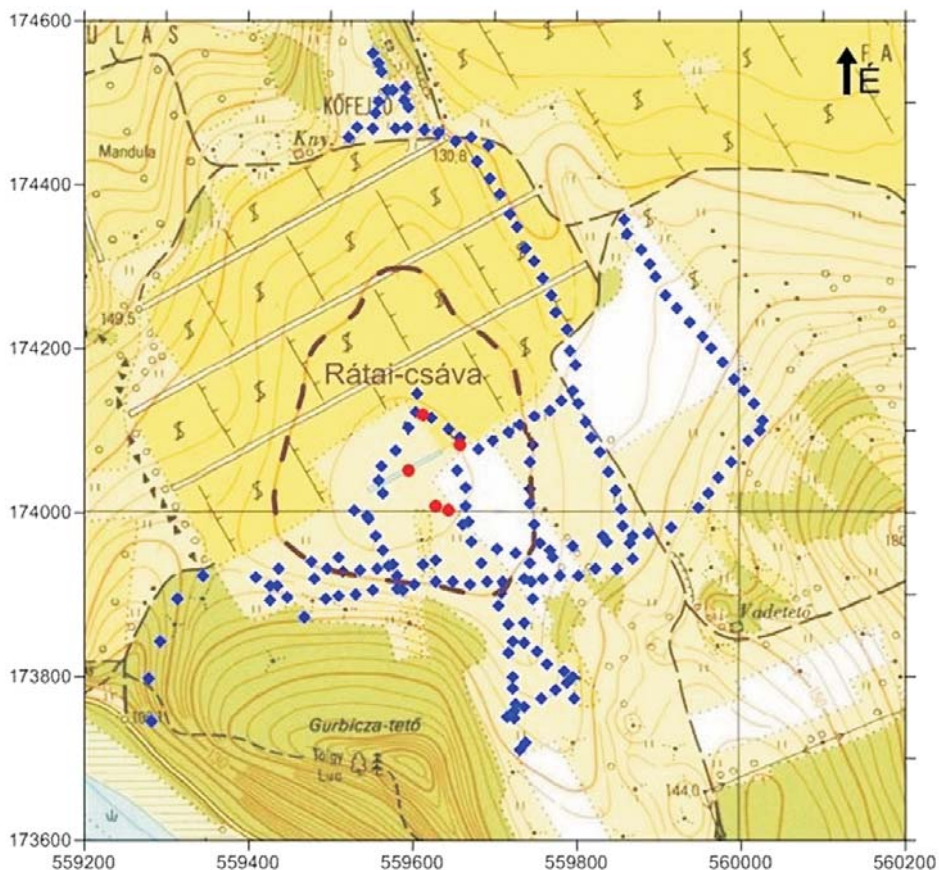
Az elektromágneses tér érzékelése akusztikus módon történik: az indukciós tekercset ($\varnothing = 0,4 \text{ m}$) egy erősítőn át fülhallgatóra kötve detektáljuk a jeleket. A mérések során a jelminimumot keressük, szerencsés esetben a jelek akár teljesen ki is oltódhatnak, ekkor olvassuk le a látszólagos fajlagosellenállás- és fáziskülönbség-értékeket.

A módszer előnye, hogy a mérés során a helyszínen gyors kvalitatív értelmezést adhatunk. Ha a mért fázis 45° , akkor az adott pontban egyetlen réteg található a behatolási mélységig (homogén, izotróp féltér). Egydimenziós, kétréteges esetben a látszólagos fajlagos ellenállás növekedéséhez fáziscsökkenés társul. Tehát az említett feltételek mellett a fázis azt mutatja meg, hogy a behatolási mélység alatt a fajlagos ellenállás növekszik (a fázis értéke kisebb 45° -nál), csökken (a fázis értéke nagyobb 45° -nál) vagy változatlan (a fázis értéke 45°).

A látszólagos fajlagosellenállás-értékekből a FITVLF2 nevű program segítségével inverziós eljárással meg tudjuk adni a képződmények fajlagos ellenállását, valamint a rétegek vastagságát. A szoftvert Thierrin (1988, nem publikált) fejlesztette ki a Fischer et al. (1981) által bemutatott egydimenziós inverziós sémát alapul véve. A felszínről lefelé

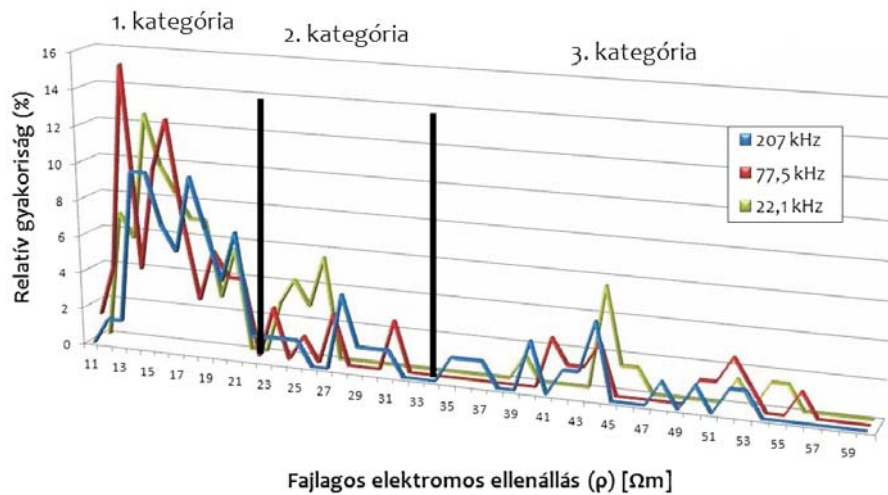
haladva az impedancia és a behatolási mélység definícióját felhasználva lépésről lépésre adja meg a rétegek fajlagos ellenállását és vastagságát (a felszíni fajlagos ellenállást ismertnek tekintve). A módszer alapelve, hogy adott T idő alatt a felszíni impedancia, $Z(T)$ csak attól a szerkezettől függ, amely a felett a H mélység felett van, ameddig az elektromágneses hullám lehatolt. Beépített kritérium akadályozza meg, hogy túl sok réteget iktasson be az inverzió során. Zaj hozzáadásával a fő szerkezetek továbbra is jól megjelennek az eredményekben. Nagyon kicsi (10%) hibával old fel olyan 2–3 réteges szerkezeteket, ahol az ellenálláskontraszt megfelelő, 3–4-szeres (például $100 \Omega\text{m}$ -es homok egy $20 \Omega\text{m}$ -es agyagon).

Miután a program segítségével meghatároztuk a fajlagos ellenállásokat, az eredményeket a rendelkezésre álló apriori kőzetinformációkkal kell összevetnünk. Ez a megfeleltetés nem mindig egyértelmű, előfordul, hogy a mért értékek egyik kategóriába se vagy többbe is besorolhatók. Ilyen esetben egymáshoz viszonyítva, a kőzetekről, illetve a rétegsorról rendelkezésre álló földtani ismeret alapján próbáljuk megfeleltetni a fajlagos ellenállásokat az egyes képződményeknek.



6. ábra Az RMT mérési pontok helye a Rátai-csávában (kék pontok). A piros pontok a területen létesített sekély fúrások helyeit jelzik. A barna szaggatott vonal a Rátai-csáva kontúrját jelöli (EOV 43-412 [1983]: Tihany térképlap [1:10000]. MÉM Földügyi és Térképészeti Hivatal)

Figure 6 The RMT measurement points in setting of Rátai-csáva (blue dots). Red dots indicate the shallow boreholes. Contour of Rátai-csáva is marked with brown dashed line. (EOV 43-412 [1983] Map sheet, Tihany [1:10000]. DAF Department of Land Administration and Geoinformation)

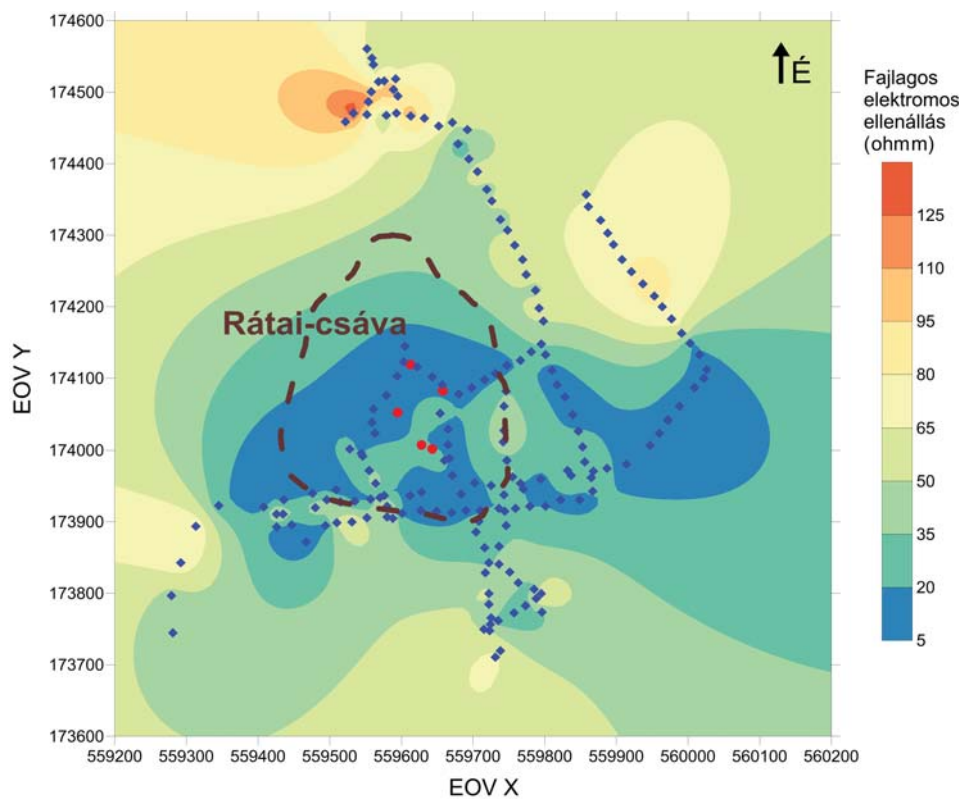


7. ábra | A fajlagos elektromos ellenállások eloszlása a használt frekvenciákon és az így kijelölt kategóriák
Figure 7 | The distribution of the specific electrical resistivity values by the used frequencies with the marked categories

3.2. RMT térképezés

Az időszakosan vízzel borított Rátai-csáva sekélyföldtani felépítésének megismerése érdekében a mérési pontokat (181 db) ~20 méteres közzel vettük fel úgy, hogy a tómeder és a peremterületek felépítéséről is információt szerezzünk (6. ábra). A méréseinkhez felhasznált adók iránya N 120–

130°. Mivel az adók egy irányba esnek, így elkerülhetők az irányfüggésből adódó (*static shift* által okozott) hibák. A három kiválasztott adó: egy magas frekvenciájú, 207 kHz-es – ez a németországi Aholmingban található rádióadó; egy közepes, 77,5 kHz-es – a Frankfurt am Main-tól 25 km-re található Mainflingen órajeladója, nemzetközi jelzése



8. ábra | Fajlagosellenállás-eloszlástérkép a Rátai-csáva környezetében a felszíni képződményekre. Kék pontok az RMT méréseket, piros pontok a sekély fúrásokat jelzik. A barna szaggatott vonal a Rátai-csáva kontúrját jelöli
Figure 8 | Specific electrical resistivity distribution map of the surroundings of Rátai-csáva for surficial formations. Blue dots indicate the RMT measurements, red dots show the shallow boreholes. Brown dashed line is the contour of Rátai-csáva

DCF77; valamint Skelton (Nagy-Britannia) alacsonyfrekvenciájú 22,1 kHz-es rádióadója.

Az RMT műszer rádióhullámok segítségével méri a kőzet fajlagos elektromos ellenállását 15–240 kHz frekvenciatartományban. Egyben méri a fáziseltolódást (0–90°) is a vízszintes tengelyű vevőtekerces és a két földbe helyezett elektróda, tehát a mágneses és elektromos komponensek között. Az alkalmazott szűrőablak szélessége 180 Hz. A használt frekvenciák választhatók, programozhatók, valamint adattároló is csatlakoztatható analóg kimenettel (0–200 mV). A műszer megbízhatósága jó, zaj csak a magasfeszültségek (30–50 m-es) környezetében van. Tapasztalatlan operátor is csak 5% hibát követ el, ha ismételten mér. A mérés egy gyakorlott személy számára mérési pontonként csak 15–20 másodpercet vesz igénybe.

Az adatok kiértékelése során az egyes kategóriák meghatározásához Turberg (1994) munkáját vettük alapul. Módszere szerint a látszólagos fajlagos ellenállás – fázis pontok által alkotott halmazok kijelölik a különböző ellenállású kategóriákat. Vizsgálati területe (Jura, Svájc) azonban a Tihanyi-félszigettel ellentétben kevésbé változatos földtani felépítésű, így ez a módszer számunkra nem eredményezett egyértelmű csoportképzést. Ezért ábrázoltuk az inverzióval kapott értékeket relatív gyakoriságukkal 10–60 Ωm tartományban. Ennek alapján már lehatárolhatjuk a 20 Ωm-nél kisebb fajlagos ellenállású képződményeket. 35 Ωm-nél egy éles határ jelentkezik, így a második tartományt a 20–35 Ωm közé eső fajlagosellenállás-értékkel rendelkező képződmények alkotják. A 35 Ωm fölötti fajlagos ellenállások elkülönülnek az előzőektől, ezért ezek alkotják a harmadik csoportot (7. ábra).

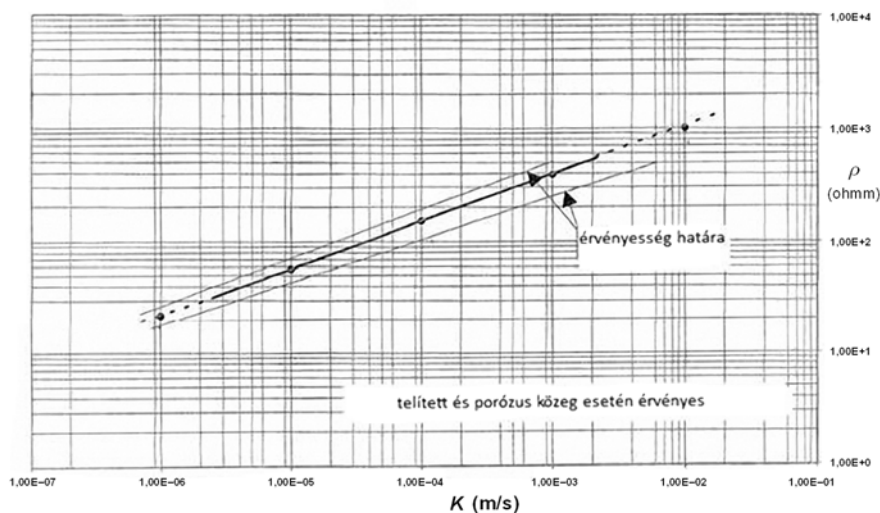
Az egyes kategóriák térbeli elhelyezkedését a 8. ábra szemlélteti, melyet a FITVLF2 által a felszíni képződményekre modellezett fajlagosellenállás-értékekből, a Surfer 10.0 szoftver segítségével, krigeléses interpolációs eljárás-

sal készítettünk el. A Rátai-csáva középső részén, az időszakosan vízzel borított tómederben, alacsony, 10–20 Ωm fajlagos ellenállású képződmények borítják a felszínt. A tómedertől távolodva fokozatosan jelennek meg a közepes, 20–35 Ωm közötti fajlagosellenállás-értékek, végül körülbelül 200–300 m-rel a depresszió legmélyebb pontjától, felszínre bukannak a 35 Ωm-nél nagyobb fajlagos ellenállású kőzetek. Az összletek geometriája – belül a kisebb, kívül a nagyobb fajlagos elektromos ellenállás-értékekkel – egy maar-struktúrát rajzol ki.

4. Értelmezés és diszkusszió

Az RMT mérések segítségével a Rátai-csáva környezetében különböző fajlagos elektromos ellenállású felszín közeli képződményeket tudunk elkülöníteni. Az adatok eloszlása alapján a kráterperemi bazaltos képződmények, a maartavi üledékek és a diatrémaszerkezetet kitöltő piroklasztitok fajlagosellenállás-értéküket tekintve elkülönülnek egymástól.

A szakirodalomban számos fajlagos elektromos ellenállás – szivárgási tényező összefüggés található, melyek közül Zilahi-Sebess et al. (2007) bemutatja, hogy a fajlagos elektromos ellenállás a szivárgási tényező kétértékű függvénye, valamint taglalja a függvény logaritmikusan lineáris természetének fizikai magyarázatát is. A Müller et al. (2008) munkája nyomán készült kalibrációt felhasználva, egy log-log rendszerben lineáris összefüggés alapján a mérések során kapott fajlagosellenállás-értékekhez (ρ [Ωm]) hidraulikus vezetőképesség-értéket (K [m/s]) rendeltünk (9. ábra). Az általunk használt konvertálás empirikus összefüggésen alapul, amelyet 100 szivattyúpróba illesztettek, ahol a fúrásokat a mért adatokra telepítették. Ez a tapasztalati összefüggés 20 Ωm alatt nem érvényes, mivel agyagos összleteken



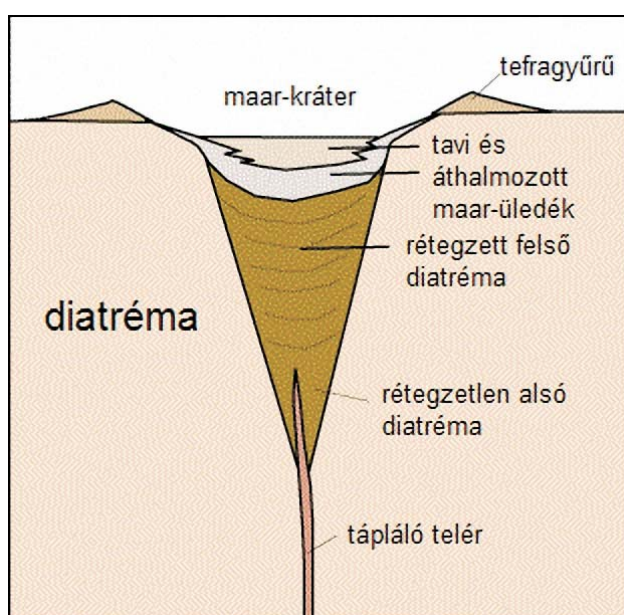
9. ábra | Az RMT mérésekből meghatározott fajlagos elektromos ellenállások és a hidraulikus vezetőképesség közötti közelítő összefüggés (Müller et al. 2008 nyomán)

Figure 9 | The approaching relation between the resulting specific electrical resistivity values from RMT measurements and the hydraulic conductivity (after Müller et al. 2008)

nem végeztek szivattyúpróbát. A nagyon kis értékeknél szaggatott vonal jelzi a feltételezett görbemenetet (9. ábra).

Az alacsony, 10–20 Ωm fajlagosellenállás-értékekkel rendelkező képződményeket a maar-tavi üledékeknek feleltethetjük meg. Ezek átlagos vastagsága a vizsgált régióban 7–8 m, K -tényezőjük 10^{-7} m/s nagyságrendű. Az átmeneti, 20 és 35 Ωm közötti értékek a vulkanizmus során keletkezett, diatrémaszerkezetet kitöltő piroklasztitokat és vulkáni törmelékeket reprezentálják. A hozzájuk rendelt szivárgási tényező 10^{-6} m/s nagyságrendű. A magasabb térszíneken megjelenő, több mint 35 Ωm fajlagos ellenállású összletek a kráterperemi bazaltos képződményeket képviselik, hidraulikus vezetőképességük $5 \cdot 10^{-6}$ m/s (10. ábra, 1. táblázat).

Az eredmények ellenőrzése céljából a geofizikai mérésekből levezetett hidraulikus vezetőképesség-értékeket összevetettük a Rátai-csávában kézi fúróval mélyített öt sekélyfúrás (2–5 m mélységű) mintáinak laboratóriumi szemcseeloszlás vizsgálata során meghatározott értékekkel. Erre a maar-tavi üledékek esetében volt lehetőség, mivel kézi fúrásokat csak a meder legmélyebb pontjában tudtunk létesíteni (6. ábra). A mintákra a kapott szivárgási tényező (K) értékek 10^{-8} – 10^{-6} m/s nagyságrend közé esnek, amelyek



10. ábra Maar-diatréma vulkán vázlatos felépítése (Lorenz 2003 nyomán módosítva)

Figure 10 Model of a maar-diatreme volcano (modified after Lorenz 2003)

összhangban vannak az RMT mérési eredményekből meghatározott K -tényezővel (Havril, Tóth Á. 2011).

Az ELTE Hidrogeológia és Geotermia Munkacsoportjának a Tihanyi-félsziget komplex hidrogeológiáját célzó kutatásának egyik fontos részét jelentette a területen végzett RMT térképezés, amely hozzájárult a félsziget hidrosztratiográfiai viszonyainak jobb megértéséhez. Emellett a tavak felszín alatti vízzel alkotott kapcsolatának meghatározására érdekében a sekélyfúrásokból kiképzett ideiglenes potenciometerekben mért vízszintadatokból hidraulikai számításokat, vízszintváltozásokra vonatkozó elemzéseket és vízkémiai értékelést is készítettünk. Ezek a Rátai-csáva beáramlási terület jellegére utalnak (Havril, Tóth Á. 2011). Hipotézisünket, miszerint a félsziget tavai hidraulikai összeköttetésben állnak egymással, kétdimenziós numerikus áramkép-szimulációval is teszteltük. A numerikus modellezés K -tényezőértékeit az RMT mérésekkel nyert fajlagos elektromos ellenállásokból kaptuk (Havril, Tóth Á. 2011, Havril 2012). Az RMT mérések tehát fontos szerepet játszottak a félsziget tavainak felszín alatti vízzel alkotott kölcsönhatásának megértésében.

5. Összefoglalás

A Tihanyi-félszigeten található maar-tavak felszín alatti vízzel való kapcsolatának megértését célzó kutatásunk során rádió-magnetotellurikus (RMT) méréssel térképeztük a Rátai-csáva felszín közeli képződményeinek fajlagos ellenállását és geometriáját. A Müller et al. (2008) munkája nyomán készült kalibrációt felhasználva a mért fajlagosellenállás-értékeket egy logaritmikusan lineáris összefüggés segítségével hidraulikus vezetőképesség-értékekké konvertáltuk.

A mérésekkel kapott ellenállásértékeket figyelembe véve a kráterperemet alkotó bazaltos képződmények ($\rho > 35 \Omega\text{m}$; $K \approx 5 \cdot 10^{-6}$ m/s), a diatrémaszerkezetet kitöltő piroklasztitok ($\rho = 20\text{--}35 \Omega\text{m}$; $K \approx 10^{-6}$ m/s) és a maar-tavi üledékek ($\rho = 10\text{--}20 \Omega\text{m}$; $K \approx 10^{-7}$ m/s) elkülöníthetővé váltak. Ez utóbbi, alacsony ellenállásértékekkel jellemzett 7–8 m vastagságú képződmények hidraulikus vezetőképessége laboratóriumi szemcseeloszlás-vizsgálatokkal 10^{-8} – 10^{-6} m/s-nak adódott (Havril, Tóth Á. 2011), ami összhangban van az RMT mérési eredményekből levezetett szivárgási tényezővel.

Az eredmények kiindulási alapot jelenthetnek a félsziget állandó tavainak (Belső-tó, Külső-tó) felmérésénél, és akár

1. táblázat. Az egyes maar-képződmények mért ellenállásértékei és a hozzájuk rendelt hidraulikus vezetőképesség-értékek

Képződmény	Fajlagos elektromos ellenállás (Ωm)	Hidraulikus vezetőképesség (m/s)
Maar-tavi üledékek	10–20	10^{-7}
Maar-szerkezetet kitöltő képződmények	20–35	10^{-6}
Kráterperemi bazaltos képződmények	>35	$5 \cdot 10^{-6}$

egyéb maar-területeken is használhatók analógiaként. Az eredmények hozzájárulnak a tavak és a felszín alatti vizek közötti kapcsolatok megértéséhez és a természetvédelem alatt álló terület vizes ökoszisztémáinak fenntartható kezeléséhez.

Köszönetnyilvánítás

Szeretnénk köszönetet mondani az ELTE Földrajz- és Földtudományi Intézet munkatársainak: Dr. Horváth Ferencnek, Dombrádi Endrének, Lipovics Tamásnak (Geofizikai és Űrtudományi Tanszék), Dr. Harangi Szabolcsnak, (Kőzettani és Geokémiai Tanszék), Dr. Eröss Anitának, Dr. Simon Szilviának, Pulay Eszternek, Varga Andrásnak és Zsemle Ferencnek (Általános és Alkalmazott Földtani Tanszék). Köszönettel tartozunk továbbá az ELTE másodéves geológus MSc hallgatóinak, hogy terepi munkájukkal hozzájárultak kutatásainkhoz. Köszönjük Madarasi András és Dr. Pethő Gábor lektorok észrevételeit, javaslatait.

Hivatkozások

Asfahani J., Radwan Y., 2007: Tectonic Evolution and Hydrogeological Characteristics of the Khanaser Valley, Northern Syria, Derived from the Interpretation of Vertical Electrical Soundings. *Pure and Applied Geophysics* 164/11, 2291–2311

Bada G., Szafián P., Vincze O., Tóth T., Fodor L., Spiess, V., Horváth F., 2010: Neotektonikai viszonyok a Balaton keleti medencéjében és tágabb környezetében nagyfelbontású szeizmikus mérések alapján. *Földtani Közöny* 140/4, 367–390

Balogh K., Németh K., 2005: Evidences of the Neogene small-volume intracontinental volcanism in Western Hungary: K/Ar geochronology of the Tihany Maar Volcanic Complex. *Geologica Carpathica* 56/1, 91–99

Benderné K. O., Böjtösné V. K., Reményi Gy., 1966: A tihanyi obszervatórium környékén végzett földtani, földmágneses és gravitációs vizsgálatok. *Magyar Állami Eötvös Loránd Geofizikai Intézet, Geofizikai Közlemények* 15/1–4, 83–93

Butler D. K. (szerk.), 2005: *Near-Surface Geophysics, Investigations in Geophysics Series 13*, Society of Exploration Geophysicists, Tulsa, OK. 732 p.

Cassidy J., France S. J., Locke C. A., 2007: Gravity and magnetic investigation of maar volcanoes, Auckland volcanic field, New Zealand. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 159, 153–163

EOV 43-412 1983: Tihany térkép [1:10000]. MÉM Földügyi és Térképészeti Hivatal

Fischer G., Schnegg P. A., Peguiron M., Lequang B. V., 1981: An analytic one-dimensional magnetotelluric inversion scheme. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society* 67, 257–278

Gebhardt C.A., De Batist M., Niessen F., Anselmetti F. S., Ariztegui D., Kopsch C., Ohlendorf C., Zolitschka B., 2011: Deciphering lake and maar geometries from seismic refraction and reflection surveys in Laguna Potrok Aike (southern Patagonia, Argentina). *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 201, 357–363

Hably L., 1992a: The flora of Tihany–Fehérsziget (faciostratotype of the Intra-Carpathian Pontian), West Hungary. *Geophytology* 22, 199–205

Halaváts Gy., 1911: A Balatonmelléki pontusi korú rétegek faunája. *Balaton. Tudományos Tanulmányozásának Eredményei* 4/2, 1–74

Havril T., 2012: Felszínalatti vizek és tavak kölcsönhatásának időbeli és térbeli elemzése helyszíni mérések és numerikus szimu-

láció segítségével a Tihanyi-félszigeten. MSc szakdolgozat. ELTE TTK, Általános és Alkalmazott Földtani Tanszék, 83 o.

Havril T., Tóth Á., 2011: Tihanyi maar-tavak – kapcsolatban a felszín alatt? TDK-dolgozat. ELTE-TTK, Általános és Alkalmazott Földtani Tanszék, 84 o.

Horváth F., Sacchi M., Dombrádi E., 2010: A Pannon-medence üledékeinek szeizmikus sztratigráfiai és tektonikai vizsgálata a Dél-Dunántúli és a Balaton területén. *Földtani Közöny* 140/4, 391–418

Krolopp E., 1961: A tihanyi felső-pleisztocén Mollusca-fauna. *Földtani Intézet Évi Jelentése 1957–58-ról*, 505–509 o.

Láng G., Fodor T., 1970: A Tihanyi félsziget földtani felépítése – in Bilik I. (szerk.): *Tihany – Magyarázó a Balaton és környéke 1:10000 építésföldtani térképsorozatához*. Magyar Állami Földtani Intézet, 15–36 o.

Linde N., Pedersen L. B., 2004: Characterization of a fractured granite using radiomagnetotelluric data. *Geophysics* 69, 1155–1165

Lipovics T., Csontos A., Lenkey L., 2004: Preliminary results of geophysical studies over the Tihany Volcano at the Tihany Peninsula, Hungary. *Second International Maar Conference, Lajosmizse*, poster

Lorenz V., 2003: Maar-diatreme volcanoes, their formation, and their setting in hardrock or soft-rock environments. *GeoLines* 15, 72–83

Martin U., Németh K., 2004: Mio/Pliocene phreatomagmatic volcanism in the Western Pannonian Basin. *Geologica Hungarica, Series Geologica* 26, 193

Müller I., Mádl-Szőnyi J., Eröss A., 2008: Local scale EM geophysical survey to estimate hydrogeological parameters related to environmental problems. *Georgikon for Agriculture* 16/1, 39–49

Nobes D. C., 1996: Troubles waters. *Environmental application of electric and electromagnetic methods. Surveys in Geophysics* 17, 393–454

Németh K., Martin U., 1999a: Large hydrovolcanic field in the Pannonian Basin: general characteristics of the Bakony – Balaton Highland Volcanic Field, Hungary. *Acta Vulcanologica* 11/2, 271–282

Németh K., Martin U., Harangi Sz., 1999: Miocene maar/diatreme volcanism at the Tihany Peninsula (Pannonian Basin): The Tihany Volcano. *Acta Geologica Hungarica* 42/4, 349–377

Németh K., Martin U., Harangi Sz., 2001: Miocene phreatomagmatic volcanism at Tihany (Pannonian Basin, Hungary). *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 111/1–4, 111–135

Okoro E. I., Egboka B. C. E., Onwumesi A. G., 2010: Evaluation of the aquifer characteristic of Nanka Sands using hydrogeological method in combination with Vertical Electrical Sounding (VES). *Journal of Applied Sciences and Environmental Management* 14/2, 5–9

Oskooi B., Pedersen L. B., 2005: Comparison between VLF and RMT methods. A combined tool for mapping conductivity changes in the sedimentary cover. *Journal of Applied Geophysics* 57, 227–241

Pedersen L. B., Bastani M., Dynesius L., 2005: Groundwater exploration using combined controlled source and radiomagnetotelluric techniques. *Geophysics* 70, 608–615

Rubin Y., Hubbard S. (szerk.), 2005: *Hydrogeophysics*. Springer, Berlin. 523 p.

Sacchi M., Horváth F., 2002: Towards a new time scale for the Upper Miocene continental series of the Pannonian basin (Central Paratethys). *Stephan Müller Special Publication Series 3 (Neotectonics and surface processes: the Pannonian Basin and Alpine/Carpathian System)*, pp. 79–94

- Skácelová Z., Rappich V., Valenta J., Hartvich F., Šrámek J., Radoň M., Gaždová R., Nováková L., Kolínský P., Pécskay Z., 2010: Geophysical research on structure of partly eroded maar volcanoes: Miocene Hnojnice and Oligocene Rychnov volcanoes (northern Czech Republic). *Journal of Geosciences* 55/4, 333–345
- Stiefelhagen W., Müller I., 1997: Radio Frequency Electromagnetics (RF-EM) – extended VLF applied to hydrogeology. 59th EAGE Conference & Technical Exhibition, Geneva, Switzerland. Extended abstract, F-46.
- Takács E., 1971: Tapasztalatok a radiokip módszer alkalmazásában. *Magyar Geofizika* 12/4, 148–160
- Tezkan B., 2009: Radiomagnetotellurics – in Kirsch, R. (szerk.): *Groundwater geophysics – A tool for hydrogeology*. Second edition. Springer, Berlin. pp. 295–317
- Tezkan B., Georgescu P., Fanzi U., 2005: A radiomagnetotelluric survey on an oil-contaminated area near the Brazi Refinery, Romania. *Geophysical Prospecting* 53, 311–323
- Tóth Á., 2011: RMT-mérések a tihanyi-félszigeti Rátai-csávéban. BSc Szakdolgozat. ELTE TTK, Geofizikai és Űrtudományi Tanszék, 65 o.
- Turberg P., 1994: Apport de la cartographie radiomagnetotellurique à l'hydrogéologie des milieux fracturés. These de Doctorat, Université de Neuchâtel, Neuchâtel. 132 p.
- Varrók K., 1957: Jelentés az 1957. évben a Tihanyi-félszigeten végzett munkáról. Kézirat, Magyar Állami Földtani Intézet, Adattár, 3–12 o.
- Zacher G., Tezkan B., Neubauer F. M., Hördt A., Müller I., 1996: Radiomagnetotellurics: A powerful tool for waste-site exploration – *European Journal of Environmental and Engineering Geophysics* 1, 135–159
- Zilahi-Sebess L., Fancsik T., Török I., Kovács A. Cs., 2007: Szivárgási tényező becslés lehetőségei geofizikai mérések alapján. *Magyar Geofizika* 48/3, 99–111

In memoriam Pekár Dezső

SZABÓ ZOLTÁN

Magyar Földtani és Geofizikai Intézet, 1143 Budapest, Stefánia út 14.
E-mail: szabo.zoltan@mfgi.hu

Beérkezett: 2012. június 18.; *elfogadva:* 2012. június 18.



Pekár Dezső (1873–1953)

Családi, társadalmi, szakmai események

Családi háttér

A Pekár család a Felvidékről származott. Történetünk hősi apja, id. Pekár Károly (1832–1903) a felvidéki Rozsnyón született, középiskolai tanulmányait Iglón és Eperjesen folytatta, majd a bécsi Politechnikai Intézetben szerzett

mérnöki oklevelet. Kezdetben, rövid ideig, Rozsnyó majd Kassa városának szolgálatában áll. 1857-ben a Tisza-vidéki Vasút ezt követően az Erdélyi Vasút mérnöke lesz. A vasútársaságok államosítása után a Magyar Államvasutak szolgálatába lép. 1865-ben költözik Aradra. 1889-ben vasúti főfelügyelő, és aradi üzletvezetőként „létszámapasztás” címén, ami ellen nincs fellebbezés” nyugállományba helyezik. Nyugdíjazását méltánytalannak tartja: „...engem ezen csapás (midőn 32 éves önfeláldozó szolgálatom után, úgy bánnak el velem mint az utolsó, leghaszontalanabb cseléddel, vagy mint valamely gonosztevővel) annyira megviselt, mint akár Imre öcsémet feleségének elvesztése” – írja legidősebb fiának.

Tevékeny természete nehezen viseli a semmittevést: helyi lapokat szerkeszt, melynek révén hamarosan az Aradi Nyomdatársaság igazgatója lesz. Más elfoglaltságai mellett Arad városának főlesküdött főmérnöke. Fennmaradt idejében filozófiai, esztétikai tanulmányokkal foglalkozik, verseket ír, német elbeszéléseket fordít, verses reklámokat szerkeszt.

Aránylag későn, 1867-ben nősül, felesége Horváth Anna, Széchenyi híres mérnökének, a víz- és árvízvédelmi munkáiról ismert Beszédes Józsefnek unokája és Horváth Mihály történész, kultúrpolitikus, az 1849-es Szemere-kormány vallás- és közoktatásügyi miniszterének unokahúga. A házaspárnak három fiúgyermek születik, és a gyermekek még kicsik, amikor 1881-ben elvesztik édesanyjukat, ettől kezdve egyedül apjukra hárul a fiúk nevelésének feladata. Valószínűleg ez a szomorú esemény is szerepet játszik abban, hogy apa és fiai között a szokásosnál szorosabbá válik a kapcsolat: a gondos apa egész életében figyelemmel kíséri fiai pályafutását, és mindig készen áll arra, hogy kiterjedt kapcsolatai révén egyengesse fiai pályafutását.

A legidősebb fiú, ifj. Pekár Károly (1869–1911) elemi iskoláit és a gimnáziumot Aradon végezte. Csecsemőkorában tbc-vel fertőzött tehén tejével táplálták, minek következtében ő is megfertőződött. A betegség egész további életére rányomta bélyegét. Gimnáziumi éve alatt a tehetséges, de gyenge alkutú fiú a családi orvos rábeszélésére aktívan kezdett sportolni, rendszeresen úszott, vívott és kirándult. Érettségi után a budapesti Tudományegyetemen magyar és francia nyelv- és irodalom szakos hallgatóként az újságírói pá-

lyával kacérkodott, de végül a tanári pálya mellett döntött. Egészségi problémái miatt egy évet halaszt, majd végül 1891-ben záró vizsgát tesz, és még ugyanebben az évben esztétikából mint fő-, magyar irodalomból és francia filológiából mint melléktárgyból doktorál.

A következő tanévben állami ösztöndíjjal Párizsban és Dijonban tökéletesíti francia nyelvtudását. Párizsi útja eseményzámba megy a családban. „Adjunk hálát a gondviselésnek, hogy ami még nemrég csupán «pium desiderium» volt, máris beteljesedett; hogy míg nagyatyád Rozsnyón végezte az algimnáziumot, atyád Bécsben a műegyetemet, Te – szerény anyagi körülményeink dacára – már Parisban tetőzheted be tanulmányaidat” – írja a gondos apa fiának. A hazuról ajánló levelekkel ellátott fiú igyekszik kihasználni a lehetőségeket: szorgalmasan látogatja az egyetemi előadásokat, verseket ír, meglátogatja a Párizsban tartózkodó Szabolcska Mihályt és Munkácsyt, ösztöndíja azonban csak igen szerény megélhetést biztosít számára, és az állandó pénzhiány nyomasztja.

Hazatérve önkéntesi évét szolgálja az aradi 33. sz. gyalogezrednél. A katonai fegyelmet nehezen viseli. Tartalékos hadnagyként szerel le. Az ambiciózus apa egyetemi pályán szerette volna látni elsőszülött fiát, de ő 1893-ban helyettes tanárként a Lőcsei állami főreáliskolába szerződik. A következő évben tanári szakvizsgát tesz és folyamodik rendes tanári kinevezéséért, de a minisztérium ragaszkodik a kinevezéshez előírt hároméves tanári gyakorlathoz. Pályázatát évente megismétli, sikertelenül. Helyettes tanári jövedelméből csak igen nyomorúságos életkörülményekre futja. Jövedelmének kiegészítése céljából tornatanítói képesítést szerez. Aktívan bekapcsolódik a Lőcsei Vívó és Torna Egyesület munkájába, ahol vívóleckéket ad. Egészségi állapota újfent romlik. „Most már harmadéve nyomorgok a napszámnyi díjazással, olykor periodikusan koplalok s adósságokat csinállok az államszolgálatban” – írja családjának.

Elkeseredésének tetőpontján, amidőn osztályfőnöki, ifjúságikönyvtár-kezelői, tornatanári helyettesítő munka, azonkívül még heti öt óra szakszerű helyettesítés következtében ismét megbetegszik, segélyért folyamodik: „Napszámnyi díjazásomból még az orvosságot sem fizethetem, nemhogy diétát tartsak, mikor kellően sem élhetek. Elkeseredésemben, szinte megtántorodik jellemem, mert messze vagyunk még attól az igazán socialis társadalmi felfogástól, melyben egyedül csak a munka uralkodik s visz előre. Hiszen havi 66 forintokért úgy elhalmozni munkával valakit, hogy betegig dolgozza magát s betegségében meg periodikusan koplalni kénytelen, ez a mi socialis jelenünknek nemcsak munkaszarolása, hanem modern rabszolgasága” - írja a miniszterhez címzett folyamodványban. Rossz közérzetét csak fokozza a katonasággal kapcsolatos afférja, amire érdemes kicsit részletesebben kitérni, mert nagyon jellemző a korra: „A kassai hadtestparancsnokság révén Pekár mint tartalékos tiszt úgy, mint minden más ily rangú tiszt, nyomdai fölszólítást vett, hogy az emelendő Albrecht-szoborra adományozzon.” Rossz anyagi helyzetére hivatkozva megtagadta az adományt. Az esetről apja egy jó barátja révén, így értesült: „Károly fiad azt, hogy az Albrecht emlékére mitsem adhat,

azzal indokolta, hogy jelen állásában sokszor éheznie is kell; amely nyilatkozat nem csupán nagy megdöbbenést keltett az ezrednél hanem lehetséges, hogy fiadnak tisztis rangjába is fog kerülni; mert ha valamely tartalékos tiszt nem bír annyit megkeresni, amennyi a tisztet megillető tisztességes megélhetéshez szükséges, akkor a tisztis rangot nem viselheti.” Hogy a dolgot valahogy elsimítsák, a barát beajánlja az apát az új ezredparancsnokhoz. A találkozó létrejött, melyről az apa az alábbiakban értesíti fiát: „Csupán annyit mondtam el, hogy értésemre esett, hogy fiam az Albrecht emlékre felesleg hiányában nem adományozhatott, s hogy én, ki mint volt üzletvezető, ismételve kísértem Ő Fenségét a vasúton és ültem vendéglátó asztalánál, íme most fiam nevében akarok az emlékre 5 forintot felajánlani. ... Az ezredes úr, aki nagyon megtisztelőleg és szívesen fogadott részletesen elmondotta: hogy abban, ha fia semmivel sem járulhatott ez időszerint az emlék felállításához, senkisémmel utközött volna meg; de az, hogy ő mint tartalékos tiszt, – amint azt egészen felesleges indokolásképpen megírta, – éhezni kénytelen, nem volt abban hagyható; azért ebből azután egész levelezés keletkezett, és most, midőn már meggyőződünk arról, hogy fiának 800 ft. fizetése van, tehát éppen nem kell éheznie, mivel ma 600 forintból is tisztességesen meg lehet élni, egyelőre ezen helytelen kifejezéséért megrovással illetük.”

A pénzt el nem fogadta, hanem javasolta, hogy „tisztis reputatiód helyreállítása végett küldjed be Kassára. A további beszélgetés folyamán, mely mindegyre szívélyesebbé lett, sikerült azután az ezredesnek ígéretét vennem, hogy az egyelőre való megdorgálása végleges elintézését képezze és így az ügy teljesen befejeztessék. Tett ígéretemhez képest tehát a mai postával küldök 5 forintot és arra kérek, hogy ne hazudtolj engemet és ezen összeget mindenestre küldd el azonnal Kassára, és pedig minden néven nevezendő magyarázgatás nélkül.”

1896. június 10-én végre teljesül régi vágya, kinevezik rendes tanárrá. Jól érzi magát Lőcsén, növendékei szeretik és tisztelik, nagy kirándulásokat szervez a környékbeli erdőkbe, hegyekbe. Tanártársaival azonban szakmai nézeteltérésbe keveredik, ezért megfogadja apja tanácsát és budapesti állásért folyamodik. Kérése csak 1904-ben teljesül azzal a kikötéssel, hogy latin nyelv és irodalomból is tanári oklevelet szerez. Először a VII. ker. (külső) állami főgimnáziumba kerül, majd 1906-ban áthelyezik a VI. ker. főreáliskolába, a későbbi Kemény Zsigmond Gimnáziumba. 1907 januárjában csípőcsont-tuberkulózissal kórházba kerül, ahonnan megszökik. Öngyilkossági szándékai vannak, ezért kórházba szállítják, ahol zárt osztályra kerül. Sorsáért hozzátartozóit okolja. Közel háromévnyi elzártság után, bírói segédlettel kikerül a zárt osztályról és szanatóriumba utalják, ahonnan 1911 májusában szabadul. Ekkor családjára tudta nélkül az adriai tengerpartra utazik, hogy fizikailag megerősödjön. Hiába kapta meg a sokáig áhított magántanári képesítéséről szóló miniszteri jóváhagyást, betegsége már olyan stádiumba jutott, hogy néhány hónap múlva gümőkórban elhalálozik. Fiumében van eltemetve.

Tragikusan rövid életében szinte hihetetlen méretű irodalmi munkásságot fejtett ki. Elsősorban esztétikával és filozófiával, valamint magyar és francia irodalommal foglalkozott. Művei közül kiemelkedik a *Positiv Aestetika*. A 672 oldalas műben az esztétikai érzéseket élettani alapokon próbálja értelmezni. Könyvének megjelenését a Tudományos Akadémia támogatta, és Marczibányi-jutalommal tüntette ki. A vallás és közoktatási miniszter beszerzésre ajánlotta valamennyi középiskolának és tanfelügyelőségnek. Másik jelentős műve, *A filozófia története* 1902-ben jelent meg. A 468 oldalas könyvet Semsey Andornak, a századforduló tudománypártoló mecénásának ajánlja. 1906-ban jelent meg *A magyar nemzeti szépről* című 474 oldalas, 210 képet tartalmazó könyve, melyben a magyar nemzeti vonásokat taglalja művészetünkben, zenében, költészetünkben és irodalmunkban. További három könyvén kívül rengeteg cikke jelent meg különböző tudományos és szépirodalmi folyóiratokban. Mindezek mellett még fordítással is foglalkozott, sőt Pekry Károly írói néven verseket is írt, melyek *Századok útján*. *Álmok* című verseskötetében jelentek meg.

A középső fiú, Pekár Mihály (1871–1942) orvos, fiziológus. Orvosi tanulmányait a budapesti egyetemen végezte. Diplomájának megszerzése után az Élettani Tanszéken tanársegéd, rövid minisztériumi kitérés után visszatér az egyetemre. 1918-tól az Élettan professzora a pozsonyi Erzsébet egyetemen. Trianon után az egyetem ideiglenesen Pestre kerül, majd 1923-ban végleges helyére, Pécsre. Pekár nagy érdemeket szerzett az egyetem pécsi elhelyezése kapcsán, megakadályozta az orvosi kar felszámolását, és szorgalmazta az egyetem könyvtárának létrehozását. Érdemeinek elismeréseként a könyvtár ma az ő nevét viseli. Fő kutatási területe az artériás és vénás vér vegyi összetételének, és az inzulin hatásának vizsgálata.

Pekár Dezső életének első szakasza (a terepmunka kezdetéig)

Ennyi kitérő után térjünk vissza történetünk hőiséhez! Pekár Dezső a család harmadik fiúgyermeké Aradon született 1873. november 17-én. Elemi iskolai és a gimnáziumi tanulmányait, fivéreihez hasonlóan, szülővárosában végezte. Szervezőképessége már gimnáziumi éveit alatt megmutatkozott, erre utal, hogy 8. osztályos tanulóként az aradi kir. főgimnázium és állami főreáliskola „Petőfi önképzőkörének” elnökévé választották. 1891 júniusában jeles eredménnyel érettségizett.

Egyetemi tanulmányait a budapesti Tudományegyetemen folytatta, ahol a kémia, a fizika, a matematika és az ásványtan körébe tartozó előadásokat hallgatott. Különös súlyt helyezett a fenti tárgyak

gyakorlati elsajátítására, már az 1892/93. tanévben, még hallgatóként, Lengyel Béla egyetemi tanár laboratóriumá-



Röntgen-felvétel egy békáról

ban dolgozott. A következő két tanévben gyakornok, illetve ösztöndíjas vegyész növendék dr. Than Károly egyetemi tanár mellett, ahol kezdetben fiziko-kémiai vizsgálatokkal foglalkozott, majd Winkler Lajos előadásain segédkezett a kísérletek bemutatásánál, és vele együtt közreműködött Than professzor *A kísérleti chemia elemei* c. könyvének sajtó alá rendezésében.

Pekár Dezső 1895. november 1-től tanársegéd Eötvös Loránd mellett. 1895 végén jelentek meg az első híradások Wilhelm C. Röntgen würzburgi professzor rejtélyes (kezdetben X, a későbbiekben róla elnevezett) sugarak segítségével készített felvételeiről. Eötvös buzdítására Klupathy Jenő és a fiatal Pekár Dezső kezdett foglalkozni a témával. Klupathy Jenő néhány évvel korábban hosszabb időt töltött Würzburgban Kohlrausch, majd Berlinben Helmholtz laboratóriumában. Kiváló és invenciózus kísérletező hírében állott, valószínűleg ez motiválta professzorát, hogy rábízta ezen sokat ígérő új téma tanulmányozását. 1894–95-ben Eötvös minisztersége alatt, az egyetem vezetőségének megbízásából ő helyettesítette Eötvöst. 1903-ban az akkor ala-



Eötvös Loránd jobbjának sztereo-röntgen-felvétele

kult gyakorlati fizikai tanszék vezetőjének nevezik ki, utóda ebben a pozícióban 1922-től Rybár István lesz.

Klupathy és Pekár a Semsey Andor által adományozott rádiumforrás segítségével kezdték el kísérleteiket. Kezdetben kazettába zárt fotolemezre különböző fémtárgyakat (kulcs, olló, pénzérmék) helyeztek, és ezeket „világították” át a rádium sugaraival, majd különböző anyagok (fa, szén, üveg stb.) sugár áteresztő képességét vizsgálták. A későbbiekben békát, gyíkot sőt Eötvös kezét világították át. Az előhívott fotolemezen jól látszódtak az állatok belső csontjai. Hőgyes Endre orvosprofesszor egy hibás csontfelépítésű hulla kezét bocsátotta rendelkezésükre, melynek röntgenképén jól felismerhetők voltak a csontelváltozások. Ezek voltak az első röntgenfelvételek Magyarországon. Klupathy 1896. január 16-án mutatta be kísérleti eredményeiket a Matematikai és Fizikai Társulat előadójánál, megelőzve a felfedező Röntgent, aki csak egy héttel később számolt be felfedezéséről és kísérleteiről Würzburgban. Pekár Dezső, aki nagyon kedvelte a sztereografikus fényképezést, békáról, kézről, kézfogásról készített sztereografikus röntgenfelvételeket oly módon, hogy két felvétel között a röntgenforrást 20–25 cm-rel odébb helyezte. A két felvételt aztán egymás mellé másolta. A maguk nemében ezek voltak az első sztereografikus röntgenfotók az egész világon. Pekár továbbra is szívesen foglalkozott a témával, 1902 és 1906 között „A Röntgen-sugarakról és azok orvosi alkalmazásáról” címen rendszeres előadássorozatot tartott orvostanhallgatók részére.

Pekár 1901 október haváig tanársegédként egyrészt vezette a tanárjelöltek fizikai laboratóriumi gyakorlatát, másrészt professzora tudományos vizsgálataiban segédkezett. 1901 májusában Summa cum laude fokozattal doktorált kémia, fizika, ásványtan tárgyából. 1901 novemberében elnyerte a Tudományos Akadémia Semsey Andor-féle ösztöndíját.

Eötvös már gravitációs vizsgálatainak kezdetén, az 1880-as évek végén, foglalkozni kezdett a tehetetlen és súlyos tömeg arányosságának kérdésével. A probléma fontosságát már Newton felismerte, aki vizsgálatait azonos hosszúságú,

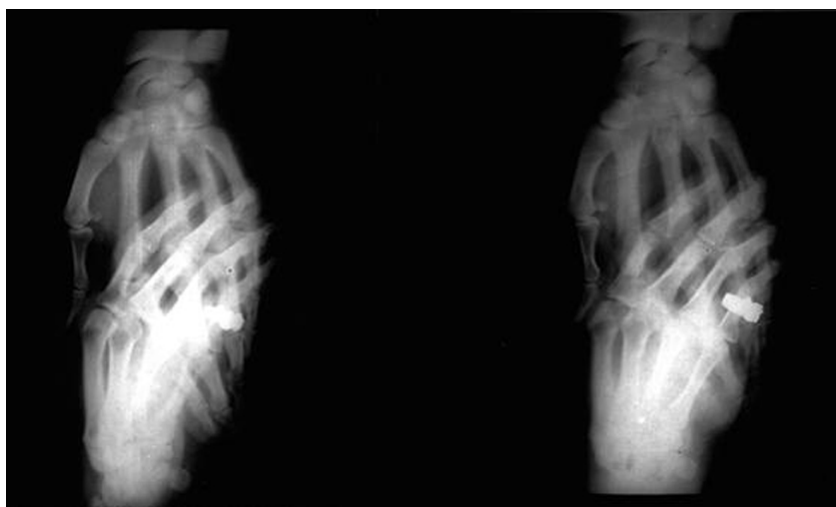
de különböző anyagból készült súllyal megterhelt ingák lengésidejének mérésére alapozta. Kísérletei azt mutatták, hogy a tehetetlen és súlyos tömeg közötti eltérés – ha van egyáltalán – kisebb kell legyen, mint 1/1000. Newton után Bessel is végzett hasonló kísérleteket, melyek alapján arra a következtetésre jutott, hogy az esetleges eltérés nem lehet nagyobb, mint 1/60 000. Eötvös bámulatatosan érzékeny torziós ingáját használta a kísérletekhez. A mérések szempontjából mellékes, hogy a torziós inga Coulomb-féle változatát vagy az Eötvös-féle megoldást használjuk. Eötvös kísérlete a következőképpen zajlott: az ingarúd minkét végén meghagyva a platina súlyt, az inga rúdját K–Ny irányba állítva, majd 180°-kal átforgatva meghatározta az inga nyugalmi helyzetét. Ezután az egyik súly helyére valamilyen más anyagból készült tömeget helyezett, és megismételte a mérést. A megvizsgálandó kérdésre a két mérési sorozat különbsége adja meg a feleletet. Eötvös az 1880-as években végzett méréseivel bebizonyította, hogy a tehetetlen és súlyos tömeg eltérése kisebb kell legyen, mint 1/20 000 000.

Az 1900-as évek elején újra előtérbe kerültek a gravitáció mibenlétére vonatkozó vizsgálatok. Ez indította a göttingeni egyetem filozófiai fakultását arra, hogy 1906-ban kitűzze az alábbi pályázatot: „Eötvös igen érzékeny módszerrel közölt az anyag gravitációjának és tehetetlenségének összehasonlítására. Tekintettel erre, és utalva az elektrodinamika újabb haladására, és a radioaktív anyagok felfedezésére, vizsgáltsék meg részletesen a Newton-féle törvény a gravitáció és tehetetlenség arányosságáról.” A kiírás természetesen felkeltette Eötvös érdeklődését is, mivel lehetőséget látott arra nézve, hogy időközben tökéletesített ingájával túlszárnyalja korábbi eredményeit. Vizsgálataiba bevonta, a már kellő műszeres gyakorlattal rendelkező közvetlen munkatársait, Pekár Dezsőt és Fekete Jenőt is. A méréseket részben az egyszerű nehézségi variométerrel (ismertebb nevén Balatoni inga), de főleg a kettős nagy ingával végezték. A korszerűbb műszereknek köszönhetően sikerült Eötvös 20 évvel korábbi eredményét egy nagyságrenddel megjavítani. Méréseikről szóló „Beitrag zur Gesetzmäßigkeit der Proportionalität von Trägheit und Gravität”

című pályamunkájukkal 1909-ben elnyerték a Göttingeni Egyetem Benecke-féle pályadíját. Pekár az alábbiakban számol be munkájukról:

„Egész sorát végeztük a kísérleteknek, amelyek pontosság dolgában az előzőket túlszárnyalták, és mégis egyetlen esetben sem állapíthattunk meg észrevehető eltérést a tehetetlenség és gravitáció arányosságának törvényétől.

E vizsgálataink befejezése után, a legújabb időkben állította fel Einstein általános relativitási elméletét. E nagy horderejű elméletnek a tehetetlenség és gravitáció arányosságának törvénye egyik sarokpontja s így annak szigorú kísérleti igazolása még fontosabbá vált.”



Kézfogás sztereo-röntgen-felvétele

Vitorlázás az Adrián

Az ifjú Pekár szerette a szereplést, a társaságot, a napfényt, a vizeket, a kalandos utazásokat és a fényképezést. Idős koráig rendszeres látogatója volt a Császár uszodának, hétvégeken pedig barátaival nagy evezős túrákat tettek a Dunán. Életének későbbi szakaszában bőven volt része hazai és külföldi kalandos utazásokban. A fotózás pedig szinte hivatali kötelessége volt: ugyanis Pekár volt az, aki professzorának, Eötvös Lorándnak utazásai során készített fotóit kidolgozta, nagyította és kiállításokra előkészítette. Valószínűleg a fényképezés kapcsán ismerkedett meg Györök Leóval, a kalandos életű tengerésszel, tanárral és festőművésszel, aki 1899 nyarán meghívta adriai vitorlás kirándulására. Pekár így emlékszik a meghívásra: „Györök meghívott, hogy 1899 nyarán Tangl barátommal együtt vitorlás kirándulást tegyünk az Adrián. ... Györök azért hívott meg bennünket, hogy részére felvételeket készítsék, amit ő, mint jó nevű festő, felhasználhat.” De ki is volt Györök Leó?



Györök Leó, a Kurul tulajdonosa és kapitánya

Györök Leó (1847–1899) a kiemelkedő rajz tehetséggel megáldott fiú Fiumében végezte a Tengerészeti Akadémiát. A kemény és sokszor durva tengerészélet azonban nem nyerte el tetszését, ezért már 1866-ban felhagy a hajózással és az angliai Cardiffban telepszik le, ahol nyelvtanítással és festéssel tartja fenn magát. Egy év angliai tartózkodás után Párizsba megy, ahol a képzőművészeti főiskolán festészetet tanul, és ezzel párhuzamosan mérnöki tanulmányokat folytat. Az 1870. évi francia forradalom és Párizs ostroma véget vetett Györök tanulmányainak, aki a forradalmárok pártjára állt. A harcok során kitünteti magát, hamarosan kapitány, majd Párizs egyik külvárosának tüzérparancsnoka lesz. Az események sodrában hamarosan a harcok során rommá lőtt Issy vár helyreállítási munkáit irányítja, majd a forradalom utolsó napjaiban őrnagyként a Montmarte parancsnoka. A Kommün leverése után fogságba esik, kivégzőosztag elé kerül, de sebesülten túléli, bujkál, de ismét elfogják a kivég-

zést újfent megússza, de életfogytig tartó gyarmati kényszer munkára ítélik. Kilencszáz társával egyetemben a bresti hadi kikötőben egy hajón tartják fogságban, ahonnan kalandos körülmények között sikerül megszöknie. Hazatérve Magyarországra kezdetben egy belga érdekeltségű vasútépítő társaságnál dolgozik, majd barátai unszolására beiratkozik a budapesti Tudományegyetem magyar–francia szakára. 1877-től Fiumében találjuk, ahol főgimnáziumi nyelvtanárként keresi kenyerét. Szabad idejében egyre többet foglalkozik a festéssel. Kedvenc témája a tenger. Képeit derűs pasztellszínek jellemzik. Jól érzi magát Fiumében, 1880-ban mégis felmondja állását és Budapestre költözik. 1883-ban szerepel először egy kiállításon a Múcsarnokban. Festményeinek sikere van, a bírálók és a közönség szívesen fogadta pontos rajzú, derűs színvilágú képeit. 1884-ben a IV. ker. községi főreáliskola francia–magyar szakos tanára és az is marad haláláig. Egyre intenzívebben foglalkozik a festéssel. A nyári szünidőket az adriai tengerparton tölti, fest és vitorlázik. 1890-ben saját tervezésű vitorlás építésébe kezd. E vállalkozásáról egyik ismerőse az alábbiakban számol be: „Eleinte vállalkozó szellemű barátunk még ácsokat is csak nagy nehezen tudott kapni, mert – mint mondták – olyan munkához nem fognak, amely csak felsüléssel végződik. A vitorlás Portoróban, ezen a nagy múltú hajóépítő telepen készült. A tengerparti népség eleinte sokat mulatott a szárazföldi nyelvmesteren, aki belekontárkodott a hajóácsok mesterségébe. A csúfolódás azonban lassanként nagy tiszteletté változott át. A magyar tanár olyan hajót épített, amelynek ezen a vidéken még nem látták párját. Volt is ajánlkozó bőven, aki matrónak akart elszegődni rája, de Györök csak azt a két hajóácsot fogadta fel, akik az építésben segédkeztek.”



A Kurul legénysége: balról Pekár Dezső és Tangl Károly

A 13 m hosszú, kétárbocos vitorlást Kurul névre kereszteli (szerinte ugyanis ez volt a Turul madár eredeti neve). Rá jellemző módon a hajóra az akkori szokással ellentétben nem az osztrák–magyar lobogó, hanem a magyar trikolor

került. Ettől kezdve minden nyáron barátaival vitorlázgat. Az 1899-es nyárról Pekár így számol be: „Már leutazáskor Fiume környékén és a közeli szigeteken több szép részletet örökítettünk meg. A Kurul a Lussin-piccolo és Lussin-grande közötti Val d’Arche öbölben horgonyzott, a Györök tulajdonában levő partrészlet kis mólójánál. Ő volt a kapitány, ezenkívül két matróz és egy hajóinasból állt a személyzet, aki egyik tanár kollegájának érettségizett fia volt. Kívülük csupán még mi ketten voltunk a vitorlásra. A hajó rendbe hozása és felszerelése után mindenekelőtt az Adrián keresztül Ravennába vitorlázunk át.”



Kikötői jelenet egy dalmát szigeten: mázsáló

Viharos körülmények között két nap alatt értek Ravenna tengeri kikötőjébe. Meglátogatták Ravenna nevezetességeit: a híres mozaikos középkori templomokat, Dante síremlékét, Theoderik palotájának romjait és síremlékét stb. Visszafelé menet a dalmát szigetek között bolyongtak. Ekkor még senki sem gondolta, hogy vendéglátójuk néhány hónap múlva, két agyvérzést követően föbe lövi magát.

A kiránduláson készített felvételeket Pekár Dezső a következő év tavaszán vetített képes előadás keretében mutatta be a Kis Akadémián. Ejtsünk néhány szót a Kis Akadémiáról!

A Kis Akadémia

Pekár pályakezdő éveiben kezdtek az egyetem Bölcsészettudományi Karához tartozó tanársegédek vacsoráival egybekötött baráti összejöveteleket rendezni. A társaság vezérégyénisége, Than Károly professzor tanársegéde, a bohém természetű Winkler Lajos volt. Pekár Dezső Winkler révén, került kapcsolatba a társasággal. Hamarosan szoros baráti kapcsolat alakult ki közöttük. Közben Eötvös is felfigyelt a jó gyakorlati érzékkel megáldott Pekárra, és hamarosan bevonta az oldatok molekuláris felületi energiájára vonatkozó vizsgálataiba. A kényes méréseket többnyire éjjel végezték, és a műszerleolvasások közötti időben gyakran beugrottak

Winkler Lajossal a Múzeum, vagy az igen jó nevű, Rákóczi úti Balaton kávéházba. Ez utóbbiban hamarosan nagyobb asztaltársaság alakult ki, a bölcsészekhez csatlakoztak az orvoskar tanársegédei is, közöttük Pekár bátyja, Mihály is, aki az Élettani Intézetben volt tanársegéd. A spontán összejövetelek során gyakran tudományos kérdések is felmerültek. E tudományos viták során alakult ki a vélemény, hogy az összejöveteleket rendszeressé kellene tenni, egy-egy vitaindító előadás köré szervezve. Ennek érdekében az alábbi felhívással fordultak a szóba jöhető kollégákhoz:

Tisztelt Collega Urak!

Azon kéressel bátorkodunk a t. Collega Urakhoz fordulni, hogy a régebben divatos kedélyes assistensi vacsorákat ez új évben felelevenítsük; kérjük tehát, szíveskedjenek f. hó 7-én, kedden este 8 órakor a Dankovszky-féle vendéglőben (Vámház-körút 12.) lehetőleg teljes számban megjelenni. Budapest, 1896. jan. 5-én.

*Winkler Lajos
Tangl Károly*

*Buchböck Gusztáv
Pekár Dezső*

A meghirdetett vacsorára sor került, a későbbiekben azonban találkozóikat a Deák tér 2. szám alatti, Putzer György vezette vendéglőben tartották. A fehérasztal mellett nagy és heves tudományos vitákra került sor, melyek során felmerült a gondolat, hogy az előadásokat kísérletek bemutatásával színesíteni lehetne. Ez viszont már tantermet igényelt. Elsősorban Pekár Mihálynak köszönhető, hogy főnöke, Klug Nándor professzor a fiatalság rendelkezésére bocsátotta élettani tantermét. A társaság kezdetben Egyetemi Asztaltársaságként jegyezte magát. Az első előadást 1899. december 2-án Pekár Mihály tartotta, aki 17 évig volt a társaság legfőbb szellemi irányítója. Ő szervezte az előadókat, és maga is számos előadást tartott. Ha az előre meghívott előadó váratlan akadályoztatás miatt nem tudta előadását megtartani, bármikor hajlandó volt rögtönzött előadással előállni. A tudomány mellett természetesen a kellemes szórakozásra is gondoltak: „Előadás után testületileg a Putzer vendéglőbe mentünk vacsorára, azután levonultunk a pincehelyiségbe, amint mondtuk „a bumsztiba”, ahol zene játszott, és női kiszolgálás élénkítette a hangulatot” – írja Pekár Dezső visszaemlékezéseiben. Kezdetben az Élettani Intézet asszisztensei, főleg Pekár Mihály tartották az előadásokat, hamarosan azonban más tudományágak képviselői is megjelentek, többek között ifj. Pekár Károly. 1900-ban Tangl Károly egyetemi magántanár és Pekár Dezső vetített képes előadást tartott adriai vitorlás bolyongásukról. Ugyanezen évben a Kis Akadémia tagjai meglátogatták az Aquincumi Múzeumot, a látogatáson Pekár több fényképet készített. Az első évben 25 előadást tartottak, az első 15-öt az Élettani Intézet tantermében, majd a terem más irányú foglaltsága miatt a Fizikai Intézet kis tantermében. „Általában szabadon adtunk elő, és nem felolvasásokat tartottunk, ami nagymértékben hozzájárult előadói készségünk fejlesztéséhez. Előadásainkat lehetőleg bemutatásokkal, kísérle-

tekkel, és vetített képekkel tettük érdekesebbé és érthetőbbé. Amikor a Fizikai Intézet kistantermébe mentünk át, én magam megfelelő epizskópikus vetítőberendezést konstruáltam, és az Intézet költségén elkészítettem, hogy ily módon könyvekben levő ábrákat kényelmesen vetíthessünk. Professzorom, báró Eötvös Loránd ugyanis kezdetől fogva nagy megértéssel és szeretettel viseltetett a Kis Akadémia iránt, és mindenben támogatta működésünket”.



A Kis Akadémia kirándulása az aquincumi múzeumba (1900)

A későbbiekben maga Eötvös Loránd is tartott előadásokat „A nehézségi erőre vonatkozó vizsgálataim” címmel. A Kis Akadémia elnevezés továbbra is csak belső használatra szolgált, a K. A. monogram csak 1908-tól szerepelt a meghívókon. A Kis Akadémia fennállása alatt több mint 1000 előadást tartottak és 42 könyvet adtak ki.

A terepi ingamérések szervezője és vezetője

A geofizikai vizsgálatok eleinte laboratóriumban folytak, rövid terepi próbákkal. 1902-ben azonban Pekár munkakörében további életpályáját alapjaiban meghatározó változás állott be: Eötvös – jó pszichológiai érzékkel – rábízta a terepi torziósinga-mérések irányítását. Tudós és menedzser egymásra talált! Ettől kezdve Pekár fokozatosan levette a szervezési feladatokat tudós patrónusa válláról, akit egyre inkább nyomasztottak az adminisztratív terhek, hátráltatva tudományos munkásságát. Ez vezérelte akkor is, amikor 1905-ben lemondott akadémiai elnökségéről: „Múlnak az évek, s bár munkaerőmet lankadni még nem érzem, mégis minden lenyugvó nap arra int, hogy a Mindenhatótól nekem kiszabott munkaidő előbb-utóbb végére jár. Addig, amíg erőm tart, addig, amíg erőm van munkára, első, mert csak általam teljesíthető feladatomban kell tartanom azt, hogy kiegészítsem és feldolgozzam azt a tudományos anyagot, melyet évtizedek alatt nagy fáradtsággal és részben éppen Akadémiánknak támogatásával összehordtam. Ameddig élek, ennek kell hogy éljek. Mielőtt késő volna, erre kell



Pekár Dezső mágneses mérés közben

összegyűjtenem erőmet, megválva azon állásaimtól, melyek annak további szétforgácsolását okoznák.”

A kiemelkedő gyakorlati érzékkel, szervezőkészséggel és kapcsolatépítő tulajdonsággal rendelkező Pekár valósággal lubickolt új feladatkörében. A terepi mérések megszervezése és kivitelezése az akkor még igencsak kezdetlegesnek számító ingákkal (a műszereket csak szétszedett állapotban lehetett szállítani egyik állomásról a másikra) nem volt egyszerű feladat. A hihetetlen érzékenységgel rendelkező műszerekkel, nagyfokú hőérzékenységük miatt, csak speciálisan kiképzett műszerháznál (sátorban) és csak éjszaka lehetett méréseket végezni. A két-három kilométeres állomástávolság és a műszerek vizuális leolvasása állandó észlelői jelenlétet kívánt, amit csak naponkénti költözéssel lehetett megoldani. A terepi munkákat a mezőgazdasági károk elkerülése, a helyszínelés megkönnyítése, és a könnyebb közlekedés érdekében csak aratás után kezdték, és mindaddig folytatták, míg az időjárás az adott körülmények között azt lehetővé tette.



Előkelő vendégek a terepen (előtérben Pekár Dezső)



A kettős nagyinga szállítása vállon

Eötvös szerteágazó más irányú elfoglaltsága miatt személyesen csak ritkán tudott részt venni a terepi mérésekben, de megkövetelte a szinte naprakész információt a terepi nehézségekről és a mérési eredményekről, ami az akkori távközlési viszonyok között nem is volt olyan egyszerű dolog. A telefonhálózat még igencsak gyermekcipőben járt, az egyetlen kommunikációs csatornát a posta jelentette. Esetünkben ez szerencsés körülménynek számít, mivel egybehangzóan a jól ismert közmondással, miszerint a szó elszáll az írás megmarad, sok levél fennmaradt ebből az időszakból. Pekár leveleiből értesülhetünk a terepi nehézségekről, a műszerekkel kapcsolatos problémákról, de ugyanakkor képet kaphatunk Eötvös és munkatársainak kapcsolatáról is. Mindezek illusztrálására álljon itt néhány érdekesebb levélrészlet! 1902 októberében Ó-Futtakról pl. a következő, mosolyt fakasztó, nem mindennapi problémáról számol be: „A gravitációs eszközzel is volt egy kis bajunk. A legnagyobb elővigyázat dacára a házikó tetején tanyázó pókseregéből egy bele szentelenkedett az eszközbe, s ott terjedelmes hálót szőtt magának. Az eszközt kitisztítottuk, s minden rendben van, a mint azt a későbbi észlelések mutatják.” Az inga esetében egy pók nagyobb problémát tud okozni, mint a bi-



Hatókrös szekérrel mentik a műszereket az ár elől (Felvinc)

zonyos elefánt a porcelánboltban. A mérési körülményekről a következőképpen számol be: „Az időjárás ha nem is kedvező, de legalább nem túlságosan rossz. Eddigi két állomásunkon még napot is kaptunk a deklinációhoz. Az utak azonban annyira átáztak, hogy a vörös kocsit négy lóval éppen csak el bírjuk húzatni.

Jelenleg állandóan kint tanyázunk, csakúgy, mint Palánka vidékén. A rossz utak miatti lassú közlekedés ugyanis sok idővesztéssel jár.

Harkányi bárót örömmel várjuk, ha nem jön semmi közbe, akkor holnapután azaz f. hó 18-án délre a Futtak feletti minimum és Ó-Kér között a közbülső állomáson leszünk. Jó volna, ha meleg pokróczot magával hozna, mert nekünk nincs felesleges.”

Következő levelében kedvezőbb hírekkel szolgál: „Az idő jobbra fordult. Már három nap óta ha nem is egészen derült, de jó idő van. Az utak azonban rosszak. A vörös kocsit 4 lóval húzatjuk. Az uradalom a lovakat a legnagyobb készséggel bocsátja rendelkezésünkre.

Az uradalmi alkalmazottak nagyon figyelmesek irányunkban. Ma is a kis-alpári ispán felkeresett bennünket, s akarva nem akarva kénytelenek vagyunk ma náluk vacsorálni.

Leveleket méltóztassék egyelőre Kis-Kérre poste restante címezni. Ha tovább megyünk, utánunk küldetjük. Harkányi báró urat várjuk, de eleddig hiába.”

Eötvös postafordultával válaszol:

Kedves Doctor Úr!

Köszönöm, hogy Ókérre érkezésükről értesített, én ezek szerint pénteken estére megyek Verbászra, a Rumpf szállodába. Harkányi is velem jön. A szombat és vasárnap éjjeli megfigyeléseket elvállaljuk, hogy önök is ágyba kerüljenek. Ha pénteken este nem találunk senkit Verbászon, akkor szombaton várjuk be a fogadóban. Verbászon variációs megfigyeléseket kell végeznünk a Szt. Tamási úton.

Van még egyéb tennivaló is, alig merem mondani. De a dolog úgy áll, ha csak nagyon nem csalódom, önök Kiskéren jelentékenyebb gravitációs variációt találtak, s ez meg lesz Verbászon is. Ha ez így van, akkor az is valószínű, hogy Feketehegyen ez a nagyobb variatio megszűnik. Így Feketehegy elsőrendű fontosságú hely lesz, s a teljesség még ennek megfigyelését is igényelné. Régen töröm már ebben a fejemet, nem mertem azonban azzal a kéréssel kirukkolni, hogy még ezt is vegyük fel a programba. Majd Verbászon megbeszéljük Isten áldja, a vizontlátásra

Eötvös Loránd

Budapest, 1902. Oct. 22.

A már-már rutinszerű terepi nehézségek mellett, az alábbi levél más jellegű problémáról számol be:

Kegyelmes Uram!

Szíves leveleit köszönettel vettem. Az 1000 koronát megkaptam, köszönöm. Az utóbbi levelet csak 13ikán kaptam meg, s így a hármast eddig még 6 állásban észleltük. Ma elkezdjük a 3 állásban való észlelést. A III eszköz ismét rossz, talán valami kis szál van benne; majd rendbe hozzuk.

Mellékelve küldöm a további adatokat. Az adott programtól el kellett térnünk, a Mozsor felé eső részt egyelőre elhagytuk. Mozsorban ugyanis két kolera gyanús eset fordult elő, ezért a falura zárlatot hoztak. Valószínű, hogy ezek sem kolera esetek voltak. Veszély reánk nézve egyáltalán nincs, a zárlat azonban megakadályozza a falun való átjárkálást, és élelmiszerek kihozását. Ezért egyelőre Titel felé vesszük útunkat. Ezirányban kb. a titeli állomásnak nekihaladva, egészen a Tiszáig mennénk. Ha a zárlatot feloldják, pótoljuk a mozsári részletet.

Itt-ott előfordult a vidéken egy-egy állítólagos kolera eset. Veszély azonban egyáltalán nincs. Megtörténhet azonban, hogy pl. Titelen is előfordul egy, s akkor zárlatot hoznak. Ez esetben azt gondolnám, hogy legjobb volna, ha Zombor felé vennők útunkat. Ez esetre kérném szíves útbaigazítását, hogy mily úton és mily közökkel haladjunk. Valószínű ugyan, hogy erre egyelőre nem lesz szükség. Azt hogy haza menjünk nem találnám indokoltnak, mert veszély tényleg nincs. Embereink is tekintettel a jó időre maradni szeretnének.

A zágrábi eszköz adatait a napokban elküldöm Gavazzinak és címemet is megírom. Címem: Titel post. rest.

*Mindháromunk tiszteletteljes üdvözlését jelentve
maradok kész szolgája
Titel 1910 okt. 13. Pekár Dezső*

A következő két levél jól tükrözi azt a kölcsönös tiszteletet és megbecsülést, mely jellemezte Eötvös Loránd, a Kegyelmes Úr, és munkatársai kapcsolatát:

Kedves Doktor úr!

Sietve válaszolok kedves levelére, hogy még Fülöpszálláson eljusson Önökhöz.

Kimondhatatlanul örvendek vállalkozási tervüknek, a bámulatos energiának, mellyel lehetővé válik azon kívánságom megvalósulása, melyet kimondani nem mertem volna.

Bárcsak az Atyaisten, vagy a meteorológusok olyan időjárást adnának, aminő szükséges tervük kiviteléhez.

Minden képzelhető jót kívánok

Budapest, 1911. dec. 10. Eötvös Loránd

Kedves Doktor úr!

Bámulatos, hogy az idej nehéz körülmények között mily sokat tudtak végezni. Van anyag elég a további kombinációhoz. Ha sikerül még a Szovátai vonal mágnességét s különösen deklinációját nagyjában megismernünk nyugodtan várhatjuk a jövő tavaszt. Sármásig ilyen deklinációs megfigyelésekkel most már ne fáradjanak. Teljesen elég volna ha egyikük (Kohlrausch 3–4 km-es közökben) megfigyelné a Maros–Ludas–Sármási útvonalat, a mi úgy hiszem egy napi kocsikázással elintézhető (de ez sem okvetlenül szükséges!)

Ütött tehát a pakolás és indulás órája. Nagy és érdekes munka végzésének tudatával jöhetnek haza.

Leginkább siessen Fekete, mert bár eddig nincs baj, de nem lehetetlen a mozgósítás rémének megvalósulása s mégis csak jobb ha a netaláni behívó kedves tüzerünket itthon találja.

*Szíves értesítését várom, a viszont látásig
híve*

Bpest 1912. nov. 19. Eötvös Loránd



Elérkezett a hazaindulás ideje



Irány Cimabanche, annak meghatározására, mennyire torzítja a Monte Cristallo a potenciálfelület görbületét

1910-ben a lassan rutinná váló terepi mérések mellett Pekár Dezső és Fekete Jenő, a tiroli Dolomitokban, Cimabanche mellett, a Monte Cristallo (3221 m) és a Croda Rossa (2963 m) közötti 1500 m magasan fekvő szűk völgyben végzett torziósinga-méréseket. Azt vizsgálták, hogy a markáns topográfiai viszonyok, milyen mértékben torzítják a nehézségi erő potenciálfelületét. Arra a meglepő eredményre jutottak, hogy a völgy középvonalában a potenciálfelület görbületi sugara 12267 km, azaz közel kétszerese, míg a völgy peremén 205 685 km, azaz több mint harminckétszerese az átlagos földszugár 6370 km-es értékének.



Észlelés a hegyek tövében

1915-ben, a torziósinga-mérések mellett Pekár Dezső részt vett Oltay Károly potsdami relativity-méréseiben. 1898 és 1904 között ugyanis a potsdami Porosz Geodéziai Intézetben levő alapponton határozta meg, először kellő pontossággal két német kutató, Kühnen és Furtwängler a nehézségi erő abszolút értékét. Miután az abszolút mérés igen hosszadalmas és fáradságos munkát igényelt, viszont a nehézségi erő két pont közötti különbségének meghatározása relatív ingával aránylag könnyen meghatározható, a nemzetközi tudományos közvélemény a potsdami értéket fogadta el kiindulási értéknek, és saját gravitációs alappontjának értékét minden ország Potsdamhoz viszonyítva határozta meg. Így történt ez hazánkban is, a budapesti Műegyetem Geodéziai Intézetében létesített magyarországi gravitációs főalappontot – Eötvös kezdeményezésére – Oltay Károly mérte össze Potsdammal 1908-ban. Ennek a mérésnek megismétlésére került sor 1915-ben.

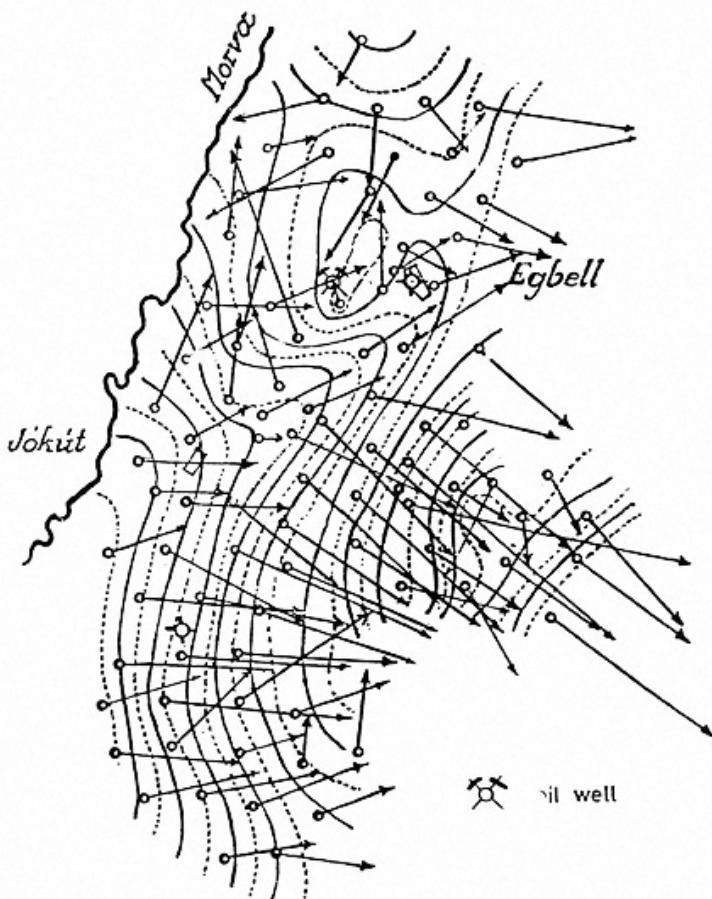
A terepi munkálatok szüneteiben Pekár Dezső Eötvös tudományos értekezéseinek és jelentéseinek sajtó alá rendezésében segédkezett. Torziósinga-méréseiről rendszeresen tartott előadásokat a Matematikai és Fizikai Társulatban, a Királyi Természettudományi Társulatban és más egyesületekben Budapesten, Aradon, Vácott és Kecskeméten. Az előadások mellett számos népszerűsítő cikket is írt különböző folyóiratokban. A fennmaradt kéziratok tanúsága szerint minden, a torziósinga-mérésekkel kapcsolatos kérelmet, beadványt Eötvös nevében ő fogalmazott.

1906–07-ben a Természettudományi Társulat másodtitkáraként több népszerű tudományos munkát rendezett sajtó alá. Több nagy horderejű bírósági perben, amelyekben a kérdés eldöntéséhez laboratóriumi fizikai és kémiai vizsgálatok váltak szükségessé, szakértőként működött közre.

1915. november 30-án a pénzügyminiszter a Magyar Állami Bányászati Monopóliumok és Bányászati Kutatások Központi Igazgatósága keretében magyar királyi állami főgeofizikussá nevezte ki.

1915-ben már jelentkeztek a háborús nehézségek: Fekete Jenőt behívták katonának, és a felmentési kérelemre még nincs válasz. A terepi segédszemélyzet nagy részét behívták katonának. A lovak takarmányozásának megoldása sem egyszerű, az árak is emelkednek, a segédszemélyzetnek többet kell fizetni, a tudományos dolgozók napidíjával is kezdeni kéne valamit stb. Ilyen körülmények között a szokásos Eötvös-inga-mérésekre nem került sor. Kapóra jött azonban a pénzügyminiszter Eötvöshöz írt levele, miszerint: „A háborús állapot a Nagy Alföld keleti részeiben való mérést jelenleg megakadályozza. Ezért arra való tekintettel, hogy a tömegelosztások és a tektonika közötti összefüggés megállapítása a kutatás szempontjából is elsőrangú fontosságú, teljes tisztelettel arra kérem Nagyméltóságodat, hogy ez év folyamán a Morvamezőn és esetleg Horvátországban Ivanic Kloster és Bregi körül méltóztassék gravitációs méréseket végeztetni.” Így Pekár Dezsőnek és Steiner Lajosnak alkalmuk nyílt arra, hogy a morvamezei torziósinga-mérések előkészítéseként relativity-méréseket végezzenek Egbell környékén.

Pekár Dezső és Steiner Lajos, a Böckh Hugó kezdeményezte egbelli torziósinga-mérések előkészítése gyanánt



Egbell: a kőolajkutató geofizika megszületése (1916)

öt állomáson relatív inga-méréseket végzett Morvamező környékén. A méréseket az érdekelt fél, a Pénzügyminisztérium, hathatós anyagi és erkölcsi támogatása tette lehetővé.

Magukra az Eötvös-inga-mérésekre 1916 nyarán került sor. Pekár feljegyzéseiből tudjuk, hogy Egbell környékén 92 állomáson mértek. A mérések sikeresnek bizonyultak, a gradiensekből számított izogamma-térképen jól felismerhetően kirajzolódott a fűrészi adatokból már ismert, kőolajat és földgázt tartalmazó antiklinális kontúrja. Az eredményeket Pekár így foglalta össze: „Egbell környékén, ahol olajok után kutattak, méréseinkkel teljesen olyan alakulatot állapítottunk meg, mint amelyet a geológusok is meghatároztak”. A mérések kezdeményezője, Böckh Hugó az alábbiakban foglalta össze véleményét: „... ha nem is volna meg a geológiai felvétel, az izogammák mégis biztos támpontot nyújtanának arra nézve, hogy hol telepítsünk kutató fűrészt.” Ez a mérés alapozta meg az Eötvös-inga későbbi világhírét.

Az 1907-től folyósított állami támogatásnak köszönhetően örvendetesen fejlődő torziósinga-mérésekre komoly csapást mért az 1918-as esztendő. Az Újvidék és Tittel környéki mérések befejeztével az expedíció tagjai az évek óta kialakult szokásnak megfelelően a műszer- és lakókocsikat vasúti tehervagonokba rakták, hogy felszállítsák Budapestre. Közbejött azonban az októberi őszirozsás forradalom, melynek során a csöcselék – ahogy Pekár írja – megroha-

mozta és kifosztotta a ceglédi vasútállomáson vesztelő vasúti szerelvényt, amelynek három vagonja az expedíció felszerelését szállította. Pekár a maga részéről mindent megtett az elrabolt terepi felszerelés pótlása ügyében. Törekvései azonban, főleg a háborút követő zűrzavaros helyzet miatt, nem jártak sikerrel.

Pekár függetlenségi harca

Eötvös 1919-ben bekövetkezett halálával lezárult a magyar geofizikai kutatások hőskora. Halála alapvetően megváltoztatta az 1907 óta önállóan gazdálkodó terepi kutatások helyzetét. Pekár Dezső, a kutatások vezetője, felismerte a helyzet komolyságát, miszerint Eötvös vitathatatlan tudományos tekintélyének hiányában bizonytalanná vált a terepi geofizikai kutatások helyzete az egyetem keretei között. A terepi méréseket kezdetektől vezető Pekár Dezső jobbnak látta, ha kezdeményezi a kutatások leválását a Tudományegyetemről, illetve a Kultuszminisztériumról. Törekvéseit támogatta Böckh Hugó, a Pénzügyminisztérium Bányakutatói osztályának vezetője, aki már közel egy évtizede próbálta növelni a nyersanyag-kutatói célok fokozottabb érvényesülését a geofizikai kutatásokban. Eötvös ellenállt ezeknek a törekvéseknek, mivel őt elsősorban a kutatások tudományos oldala érdekelt, míg Pekár sokkal pragmatikusabb nézetet képviselt. A Böckh Hugóval kötött szövetséget siker koronázta, az

„Eötvös Loránd féle csavarási-inga mérések” átkerültek a Pénzügyminisztérium hatáskörébe. Ez a szervezeti átalakulás egyben azt is jelentette, hogy a további méréseket elsősorban a nyersanyag-, ezen belül is a szénhidrogén-kutatás igényei vezérelték.

Az átirat szavai szerint: „Folyó év augusztus 23-án 26.973 sz. alatt kelt nagybecsű átiratára van szerencsém tisztelettel értesíteni Nagyméltóságodat, hogy a nagyemlékű báró Eötvös Loránd által felfedezett és megindított geofizikai kutatásoknak tárcám vagyongazdálkodásához tartozó és különállóan leltározott tárgyait és műszereit a pénzügyi tárca hatáskörébe átengedem.” Ugyanez az átirat azonban a tudományos kutatások folytatása érdekében a következőket is tartalmazza: „Teljes tudatában e világhírű felfedezés tudományos és gyakorlati jelentőségének, biztosítékot kérek azonban az iránt, hogy a geofizikai állomás a jövőben nem csupán csak gyakorlati célokat fog szolgálni, hanem a geofizikai tudományos kutatást továbbra is folytatni fogja és alkalmat ad a magyar tudós világnak is az e téren való kutató, kísérletező munkára.”

A szövetségesek jó üzletet kötöttek, Pekárnak sikerült elérnie a függetlenséget, Böckh Hugó pedig megszerezte az Eötvös Loránd-féle geofizikai kutatások feletti felügyeleti jogot. Pekár ezzel kapcsolatban – kutatásszervezetére utalva – megjegyzi, hogy: „A hivatalos körök beolvasztó törekvéseivel szemben sikerült elérnem, hogy igazgatásom alatt,

mint különálló intézmény működjék”. Ezt követően kinevezik miniszteri tanácsossá.

1926-ban már a székházépítés körvonalai is kezdtek kialakulni. Az intézet ugyanis ebben az időben mint vendég a budapesti tudományegyetem Kísérleti Fizikai Intézetének épületében volt elhelyezve. A rendelkezésre álló helyiségek a legszükségesebb munkálatok elvégzésére is alig voltak elegendők. Az intézet felszerelésének egy részét, a nehézségi erő abszolút értékeinek meghatározására szolgáló relatív ingákat és tartozékaikat ideiglenes jelleggel a Műegyetemen, Oltay Károly Geodéziai Intézetében tárolták. A mérőexpedíciók kocsiparkja pedig a Hungária körüti Pálffy lak-tanyában volt beraktározva.

Az 1926. január 3–8. között tartott Természet-, Orvos-, Műszaki és Mezőgazdaság-tudományi Országos Kongresszus nagy megértéssel tárgyalta az Eötvös intézet ügyét. A kongresszus főtitkára, Gorka Sándor egyetemi tanár többek között az alábbiakat mondta: „Legyen egy külön intézete a gravitációs vizsgálatoknak, annak a tudományágnak, amely magyar lángelméből fakadt, s amely Eötvös nevével lett nagyra és járta be az egész világot, mindenütt dicsőséget szerezve a magyarságnak.” Maga a kultuszminiszter, Klebelsberg Kuno gróf is a legnagyobb szeretettel karolta fel az építendő új Eötvös-intézet ügyét, szerinte: „Ez intézettel kapcsolatban oldhatnók meg az Eötvös mauzóleum kérdését is olyszerűen, amint azt Pasteurrel a franciák tették, aki a párizsi Pasteur-intézet egy kápolnaszerűleg kiképzett termében nyugszik.”

A leendő intézet tervezésének előkészítéseként Wälder Gyula műegyetemi építésztanár és Pekár Dezső hivatalos kiküldetésben Németországba utazott, hogy tanulmányozzák rokon jellegű intézetek elhelyezését és működését. Többek között meglátogatták a Schweydar-féle ingákat gyártó Askania műveket is. Mint tudjuk azonban, a nagy felbuzdulásból a későbbiekben semmi sem valósult meg.

A székházüggyel párhuzamosan azonban, derült égből vilámcsapásként egy új szereplő lépett a színre, báró Nopcsa Ferenc, a Magyar Királyi Földtani Intézet igazgatója személyében. A madridi Geológiai Kongresszusról hazatérve az alábbiakban számol be tapasztalatairól hivatali feletteseinek:

„...jelentem Nagyméltóságodnak, hogy az Eötvös-ingával folyó súlymérések geológiai szempontból napról-napra fontosabbá válnak... Az Eötvös-inga által ... elért eredmények csak akkor érnek valamit, ha geológus adja meg az interpretációt, mert az inga csak súlykülönbségeket jelez és a geológus feladata marad megmagyarázni, hogy minden speciális esetben milyen kőzetek idézhetik elő az említett súlykülönbségeket. Ennek folytán az Eötvös-inga által adott számok holt anyag halmazatot képeznek, mindaddig, míg a geológus interpretációja által életet nem visz beléje. Az Eötvös-inga eme precizitása és adatai interpretációja adja meg eme készülék közgazdasági jelentőségét, de éppen ez ami az Eötvös-inga legnagyobb diadala egyszersmind jóformán az Eötvös-inga tudományos átka volt. A fejlődés t. i. azt hozta magával, hogy az Eötvös-inga használatát eddig jóformán petróleum- és bányatársaságok monopolizálták. Mindennek

dacára a madridi geológiai kongresszus alkalmával a világ összes geológusai az inga teoretikus jelentőségét ismét a bányászokkal ellentétben, előtérbe hozták. A kongresszuson egy külön nemzetközi súlymérő bizottságot alakítottak, melynek határozatai az egész világra kötelezők, a Magyarországon végzendő súlymérésekkel pedig nem a Pénzügyministerium kiküldötteit, hanem a m. kir. Földtani Intézet igazgatóját bízták meg, mert ezzel dokumentálni akarták, hogy a súlymérések monopoliumát ki kell ragadni a pénz kereső vállalatok kezéből és tudományos bázison is kell folytatni.

A Eötvös-ingáról szóló jelentésemet azzal fejezhetem be, hogy a Magyarországon végzendő súlymérések dolgában egy nemzetközileg elintézett fait accompli előtt állunk, ez pedig abban áll, hogy nemzetközi határozat alapján az ilyen munkák elvégzésére a m. kir. Földtani Intézet bízott meg.

Bud önagyméltóságával, valamint a Pénzügyministerium bányászati osztályával (Böhm ministeri tanácsos úrral) folytatott beszélgetés során is az a vélemény alakult ki, hogy az erők koncentrációja érdekében szükséges, hogy az összes geológiával foglalkozó kutatások, melyekhez, mint a fenti exposé bizonyítja, a geofizikai kutatások is tartoznak, egy helyben follyanak össze, ez a hely pedig nem lehet más, mint a m. kir. Földtani Intézet.”^{a)}

Miután levelét megírta, találkozót kér Pekártól, aki beszámol a geofizikai székházépítés fejleményeiről. Ezen értesüléseiről az alábbiak szerint tájékoztatja feletteseit báró Nopcsa: „... a geofizikai intézet felállítása a Kultuszministerium hatáskörében jóformán elintézett dolog, azt javasolom, állapítsa meg a kormány (ha szükséges törvény alakjában) hogy eme két intézet működésének tudományos tekintetben szoros összefüggésben kell állnia és hogy ezért a geofizikai intézet munkaterve évről-évre a m. kir. Földtani Intézet igazgatójával olyforma megállapodás alapján történjen, hogy a m. kir. Földtani Intézet igazgatója a geofizikai intézet igazgatójának kijelöli, hogy melyik terület átkutatását tartja teoretikus geológiai és bányakutatási szempontból szükségesnek.”

Tehát a dolgok akkori állása szerint a Földművelésügyi Minisztérium és a Földtani Intézet kénytelen letenni beolvasztási szándékáról, ezért Nopcsa már csak a két intézmény szoros (ha szükséges, törvénnyel biztosított) együttműködését javasolja. A beolvasztási kísérlet megghiúsult, Pekár most már minden energiáját a szakmai kérdésekre fordíthatja.

Harc a szakma elismertetéséért

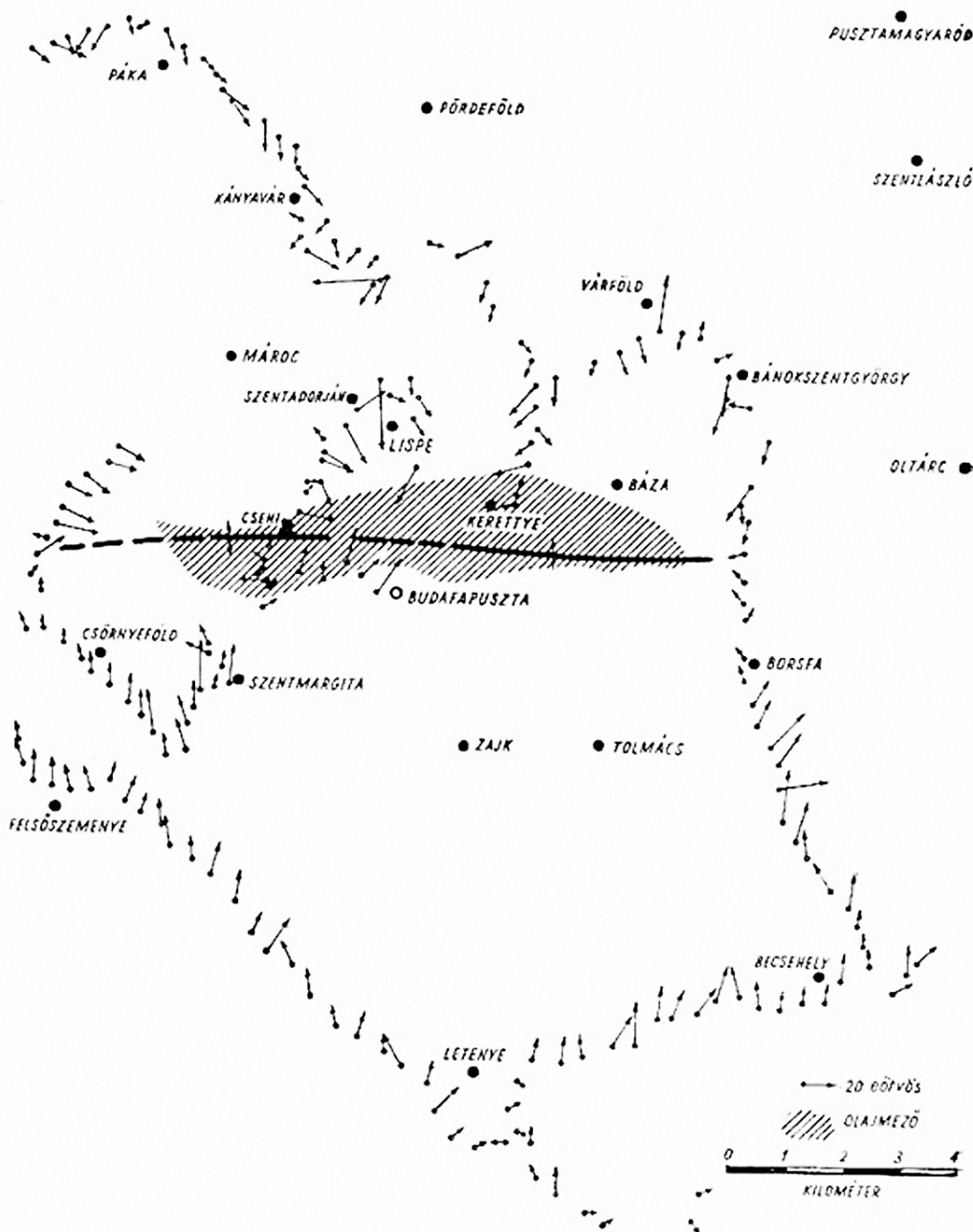
Külföldi vállalatok magyarországi érdekeltségei

A trianoni békeszerződés szinte valamennyi jelentős ásványkincstől megfosztotta Magyarországot, és jó néhány évbe tellett, amíg a földtudomány alkalmazkodni kezdett a jelentősen korlátozott lehetőségekhez. A kőolaj- és földgáz-kutatással foglalkozó geológusok többsége hosszabb-rövi-

debb időre külföldi olajvállalatokhoz szegődött. A magyar kormány az igen költségesnek ígérkező szénhidrogén-kutatások folytatására idegen tőkét keresett. A tárgyalások már 1919-ben megkezdődtek a világ egyik legnagyobb olajvállalatának, az Anglo-Persian Oil Company (APOC) vezetőivel. A tárgyalások eredményeként 1921-ben megalakult a Hungarian Oil Syndicate, Ltd. (HOS). Az új vállalat megalakulása új lehetőségeket teremtett a hazai szakemberek számára. Böckh Hugó és Pekár Dezső egyaránt kivált az állami szolgálatból. Böckh Hugó az Anglo-Persian Oil Co. tanácsadója lett, és ebben a minőségében közreműködött a társaság magyar leányvállalatának, a HOS-nak a tevékenységében is. Pekár Dezső fizetés nélküli szabadság címén tá-

vozott az állami szolgálatból, és elvállalta a HOS geofizikai kutatásainak irányítását, miközben „társadalmi munkában” tovább igazgatta az Eötvös-intézetet, miközben 1922-ben az Akadémia levelező tagjává választották. A dolog pikantériája, hogy a vállalat geofizikai méréseit az Eötvös-intézet munkatársai végezték.

A társaság első fúrását a Pávai Vajna Ferenc dőlésmérései alapján kimutatott budafapusztai antiklinálison Böckh Hugó és a vállalat nagy nemzetközi tapasztalattal rendelkező angol geológusa tűzte ki. Az 1737 m mélységű fúrás azonban jelentéktelen olajszerű gázyomon kívül semmi érdelem-
 geset nem talált. Érdekességként megemlítjük, hogy a fúrást eredetileg északabbra tűzték ki, de az angol fúrómester nem



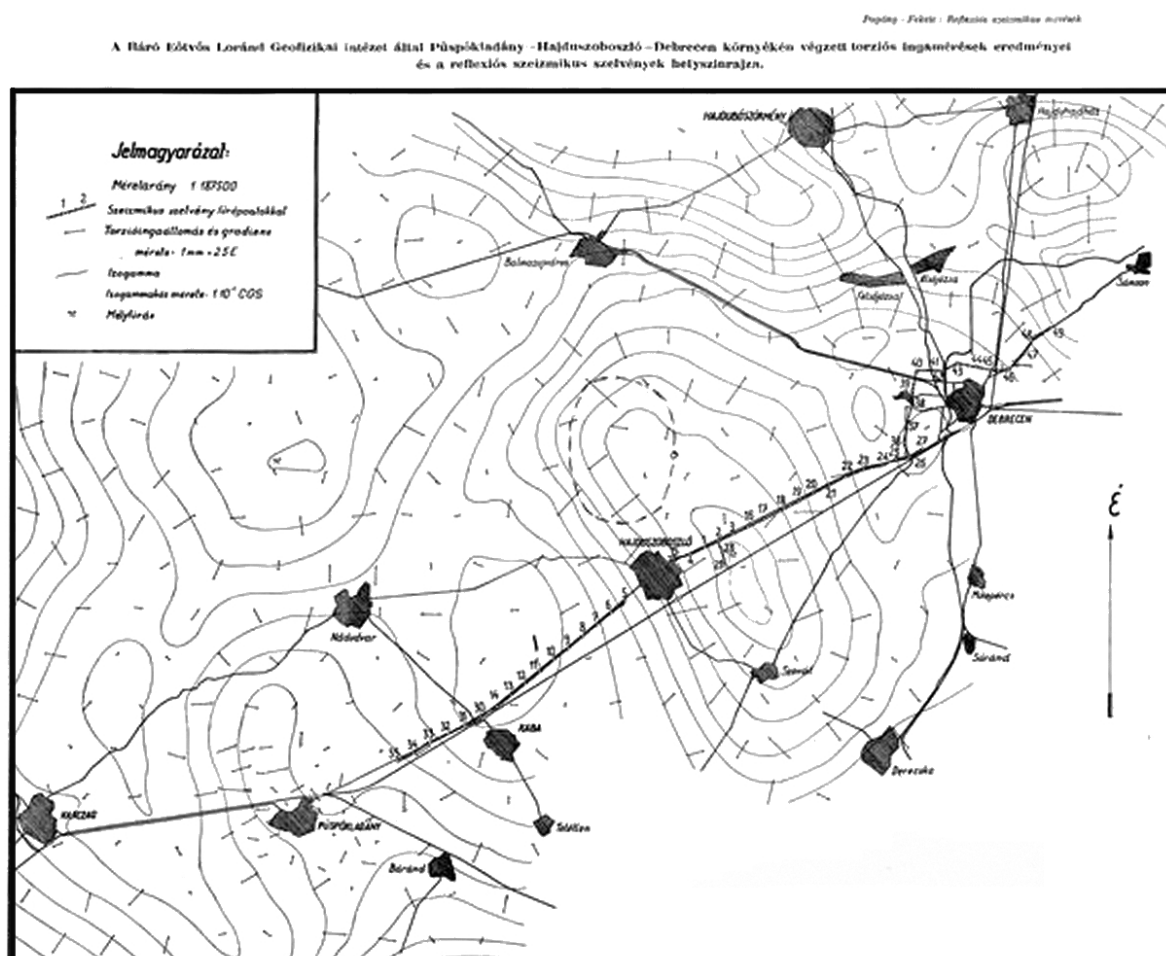
A magyar kőolajipar születése: Budafapuszta, 1937

volt hajlandó a fűrberendezést a dombra felvinni. A társaság további tevékenysége, bár koncessziós szerződését az első három év után további három évre meghosszabbították, szénhidrogén szempontból változatlanul sikertelennek bizonyult.

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

szempontjából ugyan meddőnek bizonyult, de jelentős mennyiségű szén-dioxid-gázt tárt fel.

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



Hajdúszoboszló: termásvíz már van, a földgázra még 40 évet várni kell

Kincstári kutatások

Érdekes módon akkor, amikor külföldön már egyre gyakrabban geofizikai mérések alapján tűzték ki a fúrásokat, nálunk, a torziós-inga hazájában, a kincstári kutatások során a fúrópontokat többnyire felszíni geológiai térképezés alapján telepítették. Ebben nyilvánvalóan szerepet játszott az is, hogy Böckh Hugó kiválásával a kincstári kutatások irányítása Pávai Vajna Ferenc kezébe került, aki aknában (amelyeket Pekár szarkasztikusan, egyszerűen „sürgödröknek” titulált) és sekély kézi fúrásokban meghatározott bizonytalan dőlésmérésekben „az új magyar módszerben” jobban hitt, mint a geofizikában. Mindenesetre elmondható, hogy az általa kitűzött fúrások termálvizet igen, de jelentős szénhidrogén-előfordulást nem tártak fel.

Így történt ez Hajdúszoboszló esetében is. A Hajdúságban végzett torziósinga-mérésekre, még Eötvös életében került sor. Az igen ritka, mindössze 3 km állomástávolságú felmérés alapján, a Hortobágy területén egy gravitációs minimum, Hajdúszoboszlótól K–ÉK-re egy maximum rajzolódott ki. Böckh Hugó és id. Lóczy úgy gondolta, hogy a minimum esetleg sötömszöt, a maximum pedig boltozatot jelez, ezért mindkettő megfúrását javasolták. Az 1918 folyamán, a gravitációs minimumra telepített hortobágyi fúrás azonban nem igazolta a geológusok előzetes elképzelését. Pekárnak lett igaza, aki szerint a minimum okát az alaphegység mélyebb helyzetében kell keresni.

A gravitációs maximumra Böckh Hugó és Papp Simon által 1918-ban Nagyhegyes határában kitűzött pont helyett viszont Pávai követelésére a fúrást Hajdúszoboszló keleti szélén mélyítették. A fúrás szénhidrogénmezőt nem, de gyengén gázos termálvizet tárt fel, megalapozva Hajdúszoboszló fürdőváros jellegét.

1924 júliusának végén bizalmas értekezletet tartottak a Hajdúszoboszló térségébe tervezett további próbafúrás ügyében. Az értekezleten részt vettek: Papanek Ernő miniszteri tanácsos, a Bányakutatói osztály vezetője, Böckh Hugó professzor mint geológus szakértő, Pávai Vajna Ferenc főbányatanácsos és Pekár Dezső. Az értekezlet célja volt megállapítani, hogy a geológiai és geofizikai kutatások egymástól eltérő eredményeit egybevetve hol telepítsék a legközelebbi próbafúrást. Pekár Dezső előadja, hogy torziósinga-mérésekkel a Vértölgyön egy jól körülhatárolt, markáns gravitációs maximumot mutattak ki. A maximumot széles, nyugodt sáv veszi körül, ami a hatószámítások pontosságát és megbízhatóságát fokozza. Egy ilyen határozott gravitációs maximum, mint amilyen a vértölgyi, minden körülmények között csak földalatti kiemelkedést jelenthet. Ilyen szabályos hatást kisebb sűrűségű sötöttek körülakásával kihozni lehetetlen.

Pávai bemutatta a Vértölgyön és Hajdúszoboszló környékén végzett dőlésméréseinek eredményeit. 5–10 m-es mélységű fúráshármasok alapján állapította meg a rétegek dőlését, a dőlési adatok alapján szerkesztett térképén Hajdúszoboszló ÉK-i részén egy felszín közeli dóm kontúrjai körvonalazódtak. Véleménye szerint a földtanilag kimutatott dóm konform a geofizikaival, de a dóm tengelyének elferdülése miatt a felszíni rétegekben mintegy 3,9 km-rel nyugatabbra jelentkeznek.

Pekár ezzel szemben arra hivatkozik, hogy felszín közeli adatok alapján nem lehet mélyebb szerkezetekre következtetni. Szerinte a térképek pusztá megtekintése szembeötlően mutatja, hogy a két dóm alakja egymástól teljesen eltérő, így konformitásról szó sem lehet. Továbbá a két dóm egymástól való távolsága túlságosan nagy ahhoz, hogy egyazon szerkezethez tartozzanak. Vértölgyön a geofizikai kép teljesen tiszta és határozott, a dóm teteje a gravitációs mérésekkel teljesen és biztosan definiálva van. A fúrást a dóm tetején kell lemélyíteni.

Böckh professzor egyetértett Pekár véleményével, aki makacsul ragaszkodott a geofizikai úton meghatározott dóm megfúrásához, ezzel szemben Pávai továbbra is az általa meghatározott dóm fúrása mellett kardoskodott. Hangsúlyozta, milyen nagy előnyt jelent, hogy az általa javasolt fúrás közvetlenül Hajdúszoboszló szélén fekszik, és így a feltételezett földgáz a város világítására könnyen felhasználható, míg a vértölgyi fúrásból hosszú és költséges csövezetékre volna szükség. Ekkor az értekezleten váratlan fordulat következett be: annak ellenére, hogy a résztvevők meggyeztek abban, hogy a mélyfúrást a geofizikailag meghatározott helyen kell lemélyíteni, Papanek miniszteri tanácsos kijelentette, hogy ilyen nagyon költséges munkára nincsen elegendő pénz. A rendelkezésre álló pénzből csupán egy pár



Szecsődy Miklós, Fekete Jenő és Pávai Vajna Ferenc vitája (Erdélyi Fazekas János karikatúrája). A tények makacs dolgok, a vitapartnerek nemkülönben; főhet a döntéshozók feje!

száz méteres fúrásra telik, ezért a Pávai által kimutatott felszín közeli dóm megfúrását javasolja. Ha a fúrás eredményesnek bizonyul, akkor lehetővé válik további pénzek biztosítása a vérvölgyi maximum megfúrására. Egyben felkéri Pekár Dezsőt, hogy csatlakozzon javaslatához.

Pekár eleget tett a kérésnek, utólagos feljegyzésében azonban a következőképpen háborog: „Ismételten hangsúlyoztam azonban, hogy a döntést tárgyi és szak szempontból helytelennek tartom. Nagyon elszomorít az a tudat, hogy amikor a geológusok is érdemesnek tartják a Vérvölgy vidékén fúrásokat eszközölni, nem a geofizikailag megállapított, igen markáns dómot fúrjuk meg, hanem egy oly pontot, amelyet egy aránytalanul kevésbé pontos és biztos módszerrel határoztak meg, s amely az előzőekben részletezettek szerint csak közvetlenül a felszíni rétegekre vonatkozik. Önkéntelenül a «nemo propheta in patria» mondás jut eszembe. Mások örömmel fúrnának meg egy előnyösnek látszó területen egy hasonló markáns gravitációs alakulatot. Az angolok gondolkodás nélkül fúrták volna meg Rápoltot, ha ott egy centrális gravitációs konfigurációt találtunk volna. Indiában egy sokkal kevésbé kifejezett alakulatot érdemesnek találtak megfúrni. ...Most pedig itt, Eötvös torziós ingájának hazájában vonakodunk az ez úton nyert biztos gravitációs útmutatást követni, és felesleges munkálatokra és fúrásokra fordítjuk az időt és költséget. ... Hogy a geológiai és geofizikai eredményt pontosabban egybevetessem, Pávai főbányatanácsostól lemásolás végett elkértem a geológiai térképet, s egyúttal felvilágosítást kértem az irányban, hogy a térképbe a dóm lejtőin berajzolt vonalak mekkora magasságkülönbségeket jeleznek. Erre Pávai legnagyobb meglepetésemre kb. a következőket felelte: «E vonalak semmiféle határozott magasságkülönbséget nem adnak meg, hiszen azok csupán a dőlés irányának hozzávetőlegesen megfelelőleg hasból (sic!) vannak rajzolva. Az eredmények összehasonlításánál e vonalakat nem szabad figyelembe vennem, tekintsem úgy, hogy azok egyáltalán nincsenek is ott az átadott térképen, s hogy csupán a dóm teteje és hozzávetőlegesen a gerincvonalra van oda berajzolva.» E kijelentés nagymértékben megerősíti az értekezleten mondott kritikámat, hiszen e geológiai módszer tehát még oly fokban sem pontos, mint azt én eddig és az értekezleten is gondoltam. Hogy ennek tudatában, hogy lehet egyáltalán konformitásról még csak beszélni is, azt igazán nem értem! ... Azt a mélyfúrást tehát, amelyből valószínűleg nagyobb mennyiségű földgázt és esetleg olajat várhatunk, a vérvölgyi dóm tetején kell lemélyítenünk.”

Ilyen előzmények után a csupán pár száz méteresre tervezett fúrást a Hajdúszoboszló melletti, Pávai-féle dómra telepítették. A biztató jelek alapján a fúrást a tervezettnél nagyobb mélységig, 1950 m-ig mélyítették. A fúrás aránylag kevés földgázt, viszont jelentős gazdasági értéket képviselő termálvizet tárt fel.

Majdnem napra pontosan négy évvel később felvetődött egy második hajdúszoboszlói fúrás telepítésének kérdése. Pekár Dezső „Észrevételek a hajdúszoboszlói második fúrásra vonatkozólag” c. beadványával fordul az illetékesekhez. Bevezetőben felemlíti az 1924-es vitát, és újból felhív-

ja a figyelmet a fúráskitűzésnél elkövetett következtetlenségekre. Rámutat a Pávai által alkalmazott földtani módszerek pontatlanságára és megbízhatatlanságára: (Pávai) „véleménye szerint a geofizikai pontot nem lehet közvetlenül megfúrni, mert a dómok dőlnek, a felszíni geológiaiakat meg lehet, mert ez esetben, a dómok nem dőlnek.” – írja némi szarkazmussal.

Ismételten leszögezi: „Szükségesnek tartottam az itt elmondottakat újból írásban is lefektetni, nehogy feledésbe menjen a már 1924 júliusában hangoztatott azon véleményem, hogy a kérdéses vidéken a mélyfúrást minden esetre a Vérvölgyön kell végeznünk, és minden egyéb méretezés és fúrás csak felesleges pénzkiadást jelent. Annyival is inkább kötelességemnek tartom ezt megtenni, nehogy valamilyen szememre vethessék, hogy a torziós inga biztos adatainak birtokában nem figyelmeztettem elég nyomatékosan az illetékes köröket a levonható következtetésekre, és ez alapon a mélyfúrás pont kellő elhelyezésére.

Nem az én hibám, ha éppen a torziós inga hazájában nem méltányolják kellően annak eredményeit akkor, amikor újabban az egész világon kizárólag a torziós inga és más segéd szerepet játszó geofizikai eljárások útján tűzik ki a fúrópontokat a sík területeken, a geológiai módszereket pedig csak domb és hegyvidéken használják. Így a texasi nagy olajtársaságok jórészt már leépítették geológiai karukat, s helyette a geofizikus kart szervezték meg. Eltekintve a közvetlen felületi jelektől, teljesen beszüntették a fúrópontoknak sekély geológiai kutató fúrások és 25 m-es aknák alapján való kitűzését. A texasi óriási síkságon az Eötvös-ingával újabban fényes gyakorlati eredményeket értek el, és pár év alatt többet, mint a geológiai módszerekkel évtizedeken keresztül. Nálunk már több mint egy negyed század óta folynak a rendszeres torziós inga mérések, és oly nagy területeket mértünk fel teljes részletességgel, hogy ennek párját sehol a világon nem találjuk. Sajnos azonban, hogy az Eötvös mérések alapján tk. még egyetlen egy fúrás sem történt Hazánkban. A hortobágyi fúrás a geofizikai minimumban ugyanis, nem a geofizikusok, hanem a geológusok ajánlatára történt, mert ott a gravitációs kép nem egy sótesttel kapcsolatos dóm, hanem egy mélyedés mellett szólt, amit a fúrás tényleg igazolt is. Ha már csodálatos módon magunktól nem bízunk Eötvös eszközében, tanuljunk a praktikus amerikaiaktól, és indítsunk meg végre egy fúrást Hazánkban a geofizikai mérések alapján kijelölt ponton!”

A sors iróniája, hogy a már felfedezett földgázmező bővítése során, 1961-ben a nagyhegyesi határban, az 1918-ban kitűzött fúrás pont közelében, mélyített Hsz-36 számú kútból elemi erővel tört fel és gyulladt ki a földgáz. A fúróberendezés elpusztult, a keletkezett kráter helyén ma természetvédelem alatt álló „feneketlen” tó található.

A műszer és módszer külföldi elterjedése

A külföld már igen korán felismerte Eötvös új módszerének jelentőségét. Kezdetben főleg a tudós világ, elsősorban a geodéták érdeklődtek a torziós inga iránt. F. R. Helmert, a pots-

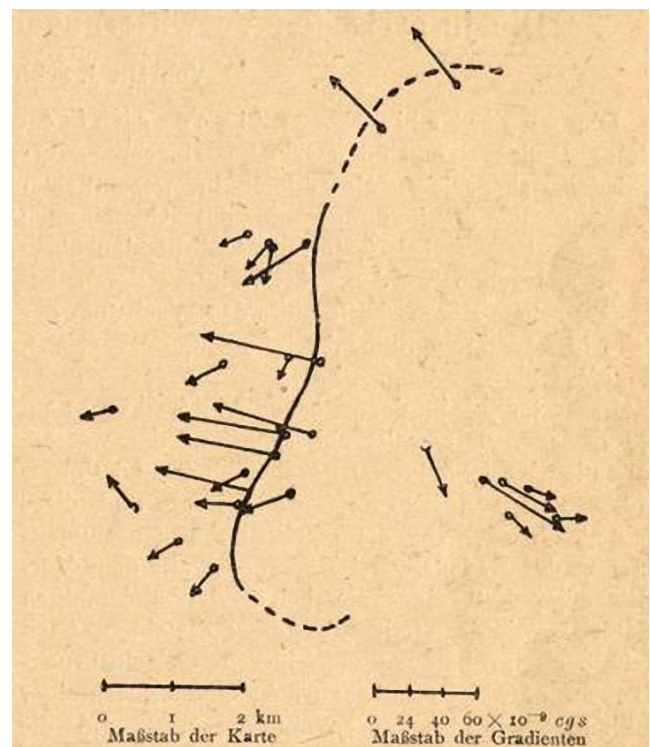
dami Geodéziai Intézet nemzetközileg elismert igazgatója egyenesen a libella mellett a geodézia legegyszerűbb és egyben egyik legfontosabb műszerének tartotta. Még Eötvös életében jöttek Budapestre külföldi, elsősorban egyetemi szakemberek, hogy megismerkedjenek az új kutatóeszközzel. Többek között O. Hecker egyetemi tanár a potsdami Geodéziai Intézetből, akinek az Indiai óceánon, mozgó hajón végzett gravitációs mérései alapján hívták fel Eötvös figyelmét hogy a földfelszínhez képest mozgó járművön végzett gravitációs mérés esetén egy, a jármű mozgásirányától és sebességétől függő korrekció alkalmazására van szükség (Eötvös-effektus). Hecker a későbbiekben intézeti mechanikusuk segítségével, Eötvös útmutatása alapján elkészítette az inga automatizált változatát. Használható torziós szálat azonban nem sikerült készíteniük, ezért Eötvöshöz fordult segítségért, aki nagylelkűen kisegítette őket: saját torziós drótjaiból küldött nekik néhány darabot, és ellátta őket a megbízható minőségű drótok készítésére vonatkozó utasításokkal. Műszerével Hecker kezdetben intézetük laboratóriumában kísérletezett, majd műszerével és egy Eötvöstől kölcsön kapott magyar ingával Königsberger freiburgi professzor társaságában terepi méréseket végzett Hamburgtól D-re (Lüneburger Heide). Königsberger szintén az Eötvös-intézetben ismerkedett meg a forradalmian új kutatómódszerrel, és ő is nagy tisztelőjévé vált Eötvösnek, olyannyira, hogy ő volt, akinek javaslatára Eötvösről nevezték el a torziósinga-méréseknél használt 10^{-9} cgs egységet. A németek olyan jó tanítványnak bizonyultak, hogy hamarosan önálló műszertípussal (Bamberg, ill. Askania) jelentek meg a világpiacon, komoly konkurenciát teremtve az Original Eötvös-ingáknak.

Franciaországban a párizsi Brillouin végzett különleges méréseket a Simplon-alagútban, egy az Eötvös-műszer mintájára készült, kissé módosított ingával. Méréseiről terjedelmes cikk jelent meg a francia akadémia kiadványában.

Ausztriából R. Schumann, bécsi műegyetemi tanár szintén hosszabb ideig tanulmányozta a laboratóriumi és terepi méréseket. Hazatérése után egy Eötvöstől kölcsönzött ingával végzett méréseket a bécsi medencében. Az olaszok közül A. Venturi professzor, a palermói egyetem tanára foglalkozott az Eötvös-inga elméletével, a gyakorlatban pedig E. Soler padovai professzor, aki a Nagykőrös körüli terepi mérések résztvevőjeként sajátította el a tudnivalókat, végzett laboratóriumi és terepi méréseket Padova környékén egy Magyarországról beszerzett ingával. Shinjo kyotói egyetemi tanár Tokió környékén dolgozott ugyancsak magyar ingával. Horvátországból D. Gorjanovich-Kramberger, a horvát geológiai szolgálat megteremtője A. Gavazzi tanárt küldte Magyarországra, aki azután Horvátországban és Szlavóniában végzett méréseket szintén magyar ingával. A lengyeleket J. Smolenski krakkói egyetemi tanár képviselte, aki szintén hosszabb időt töltött Budapesten. Őt Archtowski tanár, majd dr. Jancewski varsói geológus követte, akik tanulmányozták a módszert és rendeltek két ingát. A látogatók többsége néhány hetet, sőt hónapot töltött Magyarországon. Pekárnak oroszlánrésze volt a vendégek oktatásában, rá hárult a terepi mérések bemutatása, a méré-

sekkel kapcsolatos tudnivalók és a feldolgozás menetének ismertetése.

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



Schweydar az egbelli mérés példáján felbuzdulva, ismert sötömzs fölött mér az É-német síkságon, Nienhagen-Hänigsen körzetében (1917)

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

Berlinből az Exploration Bodenuntersuchungs und Verwertungs GmbH igazgatója, H. Gornick kereste fel az inté-

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

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

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

Az amerikai kontinensen Everette Lee DeGolyer és Donald C. Barton, a második világháború előtti időszak legnevesebb kőolajipari szakembereinek nevéhez fűződik az Eötvös-inga-mérések meghonosítása. DeGolyer, aki egy személyben volt az Amerada Petroleum Co. elnökhelyettese és a Mexican Eagle Oil Co. tanácsadója, megállapodást hozott létre a két olajvállalat között két Eötvös-inga megvásárlására. Az egyezmény értelmében Barton, az Amerada vállalat Harvardon doktorált geológusa utazott Magyarországra a torziós-inga elméletének és gyakorlatának elsajátítása és a két inga átvétele céljából. Budapestre érkezése után nem sokkal, 1922. május 29-én kelt levelében az alábbiakról számol be:

„Ma megismerkedtem az Eötvös Intézet terepi csoportjának egy teljes napi programjával.

Reggel 5 óra: az utolsó műszerleolvasás,

Reggeli,

műszerek és sátrak kocsikra pakolása,

különböző felszerelési tárgyak és a lakósátor összecsomagolása.

6 óra: a csomagolás befejezése, a kocsik útra készen,

három észlelő és egy figuráns a szintezőműszer, a szintező-léc, a földmágneses tér horizontális intenzitása és a deklináció meghatározására szolgáló műszerek és a mérésekhez használt könnyű sátor társaságában elindul egy homokfutón.

7 óra: a homokfutó és a személyzet megérkezik az előző nap kitűzött új állomásra

A-észlelő leszintezi, a figuráns közreműködésével, az állomás 100 m sugarú környezetét

B-észlelő kiszámolja az előző éjszakai észlelések eredményeit

C-észlelő végzi a mágneses méréseket.

9 óra: berendezés stb. szállító kocsik megérkeznek

egy koci az 1. számú műszerrel

egy koci az 2. számú műszerrel

egy koci az 1. és 2. műszerhez tartozó sátrakkal és egyéb felszereléssel

egy koci a lakósátorral és felszereléssel

két segéd munkás mintegy 50 m távolságra a mérési ponttól felállítja a lakósátrat

a kocsisok A és B felügyelete mellett, egymástól 10 m távolságra, felállítják a két műszersátrat

A és B meghatározza a műszerek 3 m sugarú környezetének dőlését

A és B felügyelete mellett a segéd munkások felállítják – majd letörlik, beszintezik és dezarretálják – a műszereket, becsukják a sátor ajtaját és magukra hagyják azokat.

Kb. 10.30: *B segít C-nek a mágneses észleléseknél,*

A folytatja a gravitációs számításokat.

11–12 óra: pihenő, ebéd – az egyik észlelő ellenőrzi az ingákat, hogy jól működnek-e.

14 óra: B-észlelő, három segéd munkás társaságában egy homokfutón elindul, hogy kitűzze és előkészítse a következő állomást – a segéd munkások tenispálya simaságúra elplanirozzák a műszerállások 3 m sugarú környezetét úgy, hogy dőlésük kisebb legyen mint 1° . Ez azért fontos, mert a 3 m sugarú kör 1 fokos dőlése 7 egységnyi korrekciót okoz, míg a mérendő mennyiségek nagyságrendje esetleg nem haladja meg a ± 5 egységet.

A-észlelő kiszámolja mindkét állomás 100 m sugarú környezetének topografikus korrekcióját

C-észlelő folytatja a mágneses számításokat egészen 17, vagy 18 óráig.

18–19 óra: vacsora mindenki számára.

19–20 óra: a soros észlelő ellenőrzi a műszerek szintezését, beállítását az első azimutban és azok működőképességét.

20 óra: Minden észlelésre kész!

21 óra: óránkénti műszerleolvasások. (Ez az a legendás Pekár-féle munkarend, amelyre a Pekár-tanítványok évtizedek múltán is hivatkoztak, amikor valami lazaságot észleltek a terepmunkában, imígyen morgolódva: „Pekár idejében nem így volt!”)

A csoport összetétele:

10 ló

5 kocsis, akik a munkákban is segédkeznek

4 segéd munkás a sátrak és a műszerek felállításához (melyek egyenként néhány száz fontot nyomnak)

3 észlelő – (egyikük munkaidejének több mint felét a mágneses észlelések töltik ki).

Felszereltség:

1) földmágneses felszerelés: tranzit teodolit, egy a földmágneses tér horizontális intenzitása és a deklináció meghatározására szolgáló műszer, egy az inklináció meghatározására szolgáló műszer;

Könnyű vászonsátor.

2) Eötvös-féle torziós ingák – ajánlatos minden állomáson két egymás közelében elhelyezett inga használata, hogy ezáltal elkerüljük a lokális zavarok okozta hibákat.

Sátornak nevezett szétszedhető házikó az ingák részére. Akár egy, akár két ingát használnak, tekintélyes csoportra van szükség. Az abszolút minimum 3 fő: kettő az ingák cipelésére, és egy az irányításukhoz. A sátor felállításához minimum három ember szükséges. Egy inga esetén 3 fő éppen csak elégséges, inkább négyre van szükség. Elképzelhető, de nem valószínű, hogy négy ember el tud boldogulni két ingával. Minden ingához külön szállítóeszköz szükséges.

Az egész művelet sokkal bonyolultabbnak tűnik, mint amit elképzeltünk.”

A mérések kiértékelésével kapcsolatos helyzetről Barton egy következő levelében számol be:

„Ahogy én most látom, az észlelés a legegyszerűbb része az Eötvös-féle gravitációs méréseknek. Ami sok időt és munkát igényel, az az állomások előkészítése és az eredmények kiszámolása.

Ma délután megszámláltam, hogy hányféle műveletet kell elvégezni egy állomás észlelésének kiszámolásánál:

232 összeadás és kivonás,

99 szorzás, vagy összeadás,

320 bejegyzés az észlelési lapon.

Ezeket a műveleteket az észlelést követő reggel kell végrehajtani, hogy képet alkossunk a gravitációs szerkezet alakulásáról, és hogy a következő állomásokat a célnak legjobban megfelelő telepítsük.

A végleges feldolgozás során még további számításokra van szükség és minden számolást két személynek egymástól függetlenül kell végeznie.”

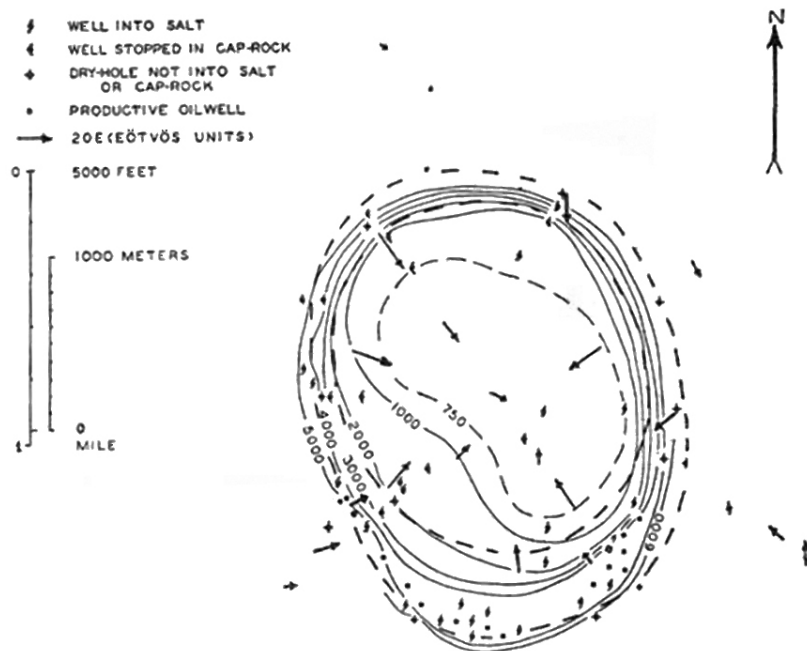
Miután Barton megismerkedett az inga elméletével, gyakorlatot szerzett a terepi mérésekben és az észlelési adatok feldolgozásában, hazatért és várt az ingák megérkezésére. Az első két inga meg is érkezett 1922 novemberében. Már ez év decemberében sort kerítettek az egebli mérésekhez hasonló kísérleti mérésre, de ebben az esetben nem egy anti-klinalishoz kapcsolódó olajmezőn, hanem a Gulf Coast egyik legjelentősebb kőolaj-előfordulásán, a spindletoni só-tómsz (Spindletop, Texas) területén. A méréseket az Amerada Petroleum Corporation keretében Donald C. Barton vezetésével Andrew Gilmour végezte a fúrásokkal már feltárt, de részleteiben nem teljesen tisztázott spindletopi sódóm területén. Az amerikai kontinensen ez volt az első geofizikai felmérés. A következő évben a Roxanna Petroleum Co. egy, az immár konkurenciaképpen megjelenő Askania gyármányú ingával, megismételte a méréseket.

Gilmour színesen számol be a torziós ingával való megismerkedéséről. Fizikus végzettségű lévén, kimondottan az Eötvös-inga-mérésekre szerződötték. Miután hamarabb munkába lépett, mintsem az első ingák megérkeztek, főnöke, Donald Barton megbízta, hogy fordítsa le Eötvösnek németül is megjelent dolgozatát. Gilmour nyelvtudása a tanult latinon és görögön kívül francia volt, németül nem tudott. De ezt senki sem kérdezte tőle. Egy szótár és egy nyelvtankönyv segítségével látott neki a reménytelennek tűnő munkának. Mikor elkészült és nagy büszkén benyújtotta az angol fordítást, kiderült, hogy Barton már előzőleg lefordította a cikket, neki csak azért adta a feladatot, hogy az ingák megérkezéséig legyen valami tennivalója.

A kőolajkutató geofizika első sikerére sem kellett sokáig várni. 1924 februárjában az Amerada társaság leányvállalata, a Rycade Oil Corporation, Barton és Gilmour közreműködésével végzett torziósinga-mérések alapján kitűzött fúrása feltárta az amerikai kontinens első, kizárólag geofizikai adatok alapján megtalált kőolajmezejét (Nash dóm, Brazoria County, Texas).

Az első találatot hamarosan követték a többiek. Ugyanakkor az egyes vállalatok igyekeztek titokban tartani kutatási módszerüket és eredményességüket. Jellemző erre dr. Steiner esete, aki 1923 decemberében Pekárhoz írt levelében arra panaszkodik, hogy:

„...nagyon nehéz feladatnak tartom az itteni társaságokat meggyőzni arról, hogy nekik a műszerre szükségük van. Ezen



Az első, Eötvös-inga segítségével felfedezett kőolajtelep: Nash dome, Brazoria County, Texas (1924. február)

feladat azonban csak addig lesz nehéz, míg az inga segítségével valahol olajat találtak.

Itt a második nehézségre akadunk. Az Amerada Társaság, mely az ingát használja, és amelynek geológusa Mr Donald C. Barton a készüléket az Ön intézetében tanulmányozta, a Corsica-i petróleumtelepen nagy területeket bír, amelyek kivétel nélkül értéktelenek, míg köröskörül a többi társaságok a világ legnagyobb telepét fejlesztették ki egy pár hónap alatt. Ez ugyebár nem a legjobb ajánlás. ...Én megpróbáltam Mr Bartontól, kit személyesen jól ismerek, egy pár felvilágosítást szerezni és, hogy a helyzetet a lehetőségig tisztává tegyem, válaszát másolatban itt közlöm: Kedves Dr Steiner, november 17-én kelt levelét megkaptam. Boldogan válaszolnék kérdéseire, ha megtehetném. A vállalatom véleménye szerint azonban nem válna előnyünkre ha felhívnánk más USA-beli vállalatok figyelmét az Eötvös-ingára. Ezért szigorúan megtiltották, hogy munkánkkal vagy kapott eredményeinkkel kapcsolatban bármilyen információt adjak.”

Ebből a levélből is kiténik, hogy a Nash dómhoz kapcsolódó sikert Barton nem közölhette Steinerrel, akivel pedig jó ismeretségben volt. A nagy titkolódzás ellenére Jakosky szerint az Egyesült Államokban, és 1938 elejéig – csak a Gulf Coaston – 79 olajmezőt fedeztek fel Eötvös-ingamérés alapján.

Az Eötvös utáni műszerfejlesztés

Eötvös idejében nem volt sorozatgyártás, mert minden elkészült inga valamiben különbözött az előzőtől. A sorozatgyártás csak 1922-ben kezdődött a kettős nagy eszköz alu-

míniumból készült változatával. A műszerfejlesztés azonban ekkor sem fejeződött be, a tanítványok közül Pekár Dezső és Rybár István, felismerve a torziós-inga gyártásban rejlő anyagi lehetőségeket, egymás riválisaként, de különböző módon képzelte a fejlesztést. Pekár a műszer méreteinek csökkentése mellett az egyszerű megoldások híve volt, ragaszkodott a szerinte jól bevált vizuális leolvashoz és a kézzel történő azimutbeállításához. Rybár ezzel szemben a fotografikus észlelést és az automatizált forgatást favorizálta. A Pekár-féle megoldás kétségtelen előnye, hogy az észlelő addig folytathatta az észleléseket, amíg megfelelő eredményre jutott, ellentétben a fotografikus észlelésű ingákkal, melyeknél csak a fotólemez előhívása után derült ki a mérés jósága. Hátránya viszont, hogy állandó észlelői jelenlétet igényelt. A Rybár-féle megoldás szük-

ségtelenné tette az észlelő állandó jelenlétét, így egy észlelő két ingával párhuzamosan tudott dolgozni. Kétségtelen azonban, hogy a kényes óraszerkezet a terepi körülmények között könnyen meghibásodott és ezért folyamatos műszaki készenlétet igényelt.

Az ingáknál a legnagyobb problémát a hőmérsékleti zavarok okozták. A külső hőmérséklet-változás kétféle módon befolyásolja az ingaméréseket. Az egyik a torziós szál hőmérséklet-változás okozta elcsavarodása. Ezen úgy segítettek, hogy meghatározták a torziós szálak hőmérsékleti állandóit, a nagy hőmérsékleti járást mutató szálakat kicserélték, a megmaradt szálak hőmérséklet okozta elcsavarodását pedig az észlelések feldolgozásánál járásként (drift) vették figyelembe. Nagyobb nehézséget okozott a műszer egyenetlen felmelegedésből származó hőmérsékleti gradiense, mely a műszer belsejében zavaró légáramlatot keltett. Ehhez járult a műszer burkolatainak megmunkálási és illesztési pontatlanságaiból fakadó hatás. A hőmérséklet-változás következtében fellépő légáramlatok teljesen tönkretelthették az észleléseket. A probléma megoldása megkívánta a műszerek egyedi és aprólékos vizsgálatát. Éppen a műszerek nagyfokú hőérzékenysége volt az oka, hogy kezdetben kellő pontosságú méréseket csak éjszaka, és jó hőszigetelő anyagból készült műszerházban tudtak végezni. Mint sok egyéb területen, a hőmérsékletjárás okával kapcsolatban is különbözött a két rivális nézete. Pekár szerint „a járást az eszköz belsejében a különböző magasságokban, tehát vertikális irányokban fellépő hőmérséklet-különbségek okozzák.” Rybár szerint viszont a lengő és az inga burkolata között fellépő vízszintes irányú hőmérséklet-gradiens okozza a zavarokat. Az okokról ellentétes nézeteket vallottak ugyan, de annak kiküszöbölésében mindketten hasonló megoldásra jutottak. A hőmérséklet-változás okozta járást az inga füg-

gőleges csövének torkolatában elhelyezett, speciálisan kiképzett terelőlemezek segítségével oldották meg.

A Pekár-féle ingák hivatalos típusjelzése *Small Original Eötvös G-2*. A típusnak három változata volt, melyek csak a torziós szál hosszában különböztek egymástól. Az 1926-ban gyártásra kerülő ingában a szál hossza 50 cm, az 1928-as típusé 40 cm, míg az 1930-as ingáé 30 cm volt. Pekár jogosan volt büszke a hagyományos Eötvös-ingák hírnevére, melyet a Brit Birodalomban kizárólagos terjesztési joggal rendelkező W. F. Adam Pekárnak címzett privát és bizalmas megjelölésű levelének részlete is bizonyít: „Érdekelné fogja Önt, amit ma dr. McLintocktól hallottam. Ő gyakorlatilag kiselejtezte az Oertling-ingát^{d)}, amit együtt tesztelt az Anglo-Persian Co. Tulajdonában levő nagy Suss-ingával. Ez a műszer eredetileg Perzsiában volt, de július óta itt Észak-Angliában dolgozik. Ebben a munkában Captain Shaw és Lancaster Jones is részt vett, és arra a meggyőződésre jutottak, hogy a nagy Suss-inga messze a legjobb műszer, amit a doktor valaha is kipróbált.”

De legfőbb riválisa nem az Oertling-inga volt, hanem a berlini Askania gyár ingája. Amikor pl. Steiner az Eötvös-Pekár-ingákba való drót árát kifogásolta, válaszában a következőket írja: „A drótokkal kapcsolatosan egyúttal a következőkről van szerencsém értesíteni. A kis eszközbe való drótok elkészítése nehezebb, illetve több munkát ad, mint a nagyoké. Tanúságképpen felemlíthetem, hogy pl. az Askaniawerke egyáltalában nem tud megfelelő vékony drótokat előállítani. Ezért szerkesztették a Z-eszközt, amelyben ugyancsak vastagabb drótot használnak s amelynek éppen ezért érzékenysége a nagy eszközökhöz viszonyítva 50%-kal kisebb. Megbízható értesülesem szerint az eszköz különben sem valami kiváló és határozottan rosszabb a mi kis eszközünkénél. Múltkor különben kint jártam Berlinben, megtekintettem az Askaniawerkét és őszintén mondhatom, hogy gravitációs eszközeiktől nem voltam elragadtatva. ... Meglepetéssel olvastam b. levelében «hogy egy automatikus regisztráló műszer nem kerül többbe, mint egy vizuális».



Ingák bemutatása: balról Eötvös-Pekár inga, kettős nagyinga, Askania Z-inga

Egy Süss féle eszköz ab Budapest vasúti csomagolás nélkül mindenestől formulákkal együtt 2400–2500 dollár. Egy Bamberg^{e)} eszköz ab Berlin 4000 dollár, melyhez még a nagy német kiviteli vám jön hozzá!!”

Érdekességként megemlítendő, hogy Steiner a magyar ingákat 5000 dollárért árusította, igaz, hogy ebben bennfoglaltatott a 45% amerikai import vám.

Magyar geofizikusok külföldi tevékenysége

Pekár Dezső a kezdetektől fogva fontosnak tartotta, hogy csak kellően kiképzett emberek használják a torziós ingát. Célját kétféleképpen érthette el, egyrészt külföldi szakemberek magyarországi kiképzésével, másrészt magyar szakértők külföldi kiküldetésével. Ez utóbbi megoldás a mérésekben résztvevőknek a nem elhanyagolható anyagi előnyök mellett jelentős tapasztalatszerzési lehetőséget is kínált.

1923–34: Az Eötvös-inga-méréseknek az amerikai földrészen történő elterjedéséhez nagymértékben hozzájárult Eötvös tanítványa és tanársegéde, Fekete Jenő, aki 1923–26 között a Royal Dutch Shell olajtársaság alkalmazottjaként Mexikóban és Venezuelában végzett torziósinga-méréseket. 1927–34 között a Torsion Balance Exploration Co. alkalmazásában az USA Texas és Luisiana államában geofizikus tanácsadóként működött. Külföldi tartózkodása alatt több mint 80 kutatási projektben vett részt. Hazatérve Pekár Dezső nyugalomba vonulása után az ELGI igazgatójaként kamatoztatta külföldi tapasztalatait. Neki köszönhető az újabb geofizikai eljárások (szeizmikus, elektromos és mélyfúrású geofizikai módszerek) meghonosítása Magyarországon.

1923–28, India: Köszönhetően az Eötvös-inga egyre nagyobb nemzetközi hírnevének, 1923 nyarán az angol kormány egyik legnagyobb olajvállalata a Burmah Oil Company, Ltd. (BOC) londoni igazgatója kéréssel fordult a Bárány Eötvös Loránd Geofizikai Intézetéhez, hogy az akkor még Indiához tartozó Khairpur szövetségi államban (napjainkban a terület Pakisztánhoz tartozik) végezzen kőolajkutatást célzó torziósinga-méréseket. A terepi méréseket a téli száraz időszakra ütemezték, mert a nyári monszun ide-



Ingasátor felállítása: Khairpur, India (1923–24)

jén a terepi közlekedés nehézségei és a moszkító nagy száma miatt a terepi munka komoly akadályokba ütközött volna.¹⁾

Az olajvállalat meg volt elégedve az első évben kapott eredményekkel, ezért 1924 novemberében Mr. Dewhurst, a vállalat igazgatója közli Pekár Dezsővel, hogy geológusaikkal egyeztetve kutatófúrást mélyítenek az Eötvös-ingamérésekkel kimutatott maximum tetőzónájának közelében. Egyben felkéri Pekárt egy újabb expedícióra, ezúttal az előző területtől jóval keletebbre, Upper Assam területén, Digboi közelében végzendő torziósinga-mérésekre. A területet sűrű őserdő borítja, a terepviszonyok az előbbinél sokkal kedvezőtlenebbek. A nehéz, mocsaras terepre való hivatkozással felveti az ötletet, hogy az előző expedíció során alkalmazott ingák helyett Rybár-ingát kéne alkalmazni. „Úgy gondoltuk, hogy előnyös lehet a Rybár professzor által felfalált kisebb típusú inga használata, mely mindössze 60–70 font súlyú, ezért könnyen hordozható. Úgy hallottuk, hogy más előnyei mellett az érzékenysége és megbízhatósága is nagyobb, mint a régi ingáké.” Ez érdekes új információ, mert azt jelenti, hogy már 1924-ben megjelent a Rybár-féle inga a piacon. Ez az inga még minden valószínűség szerint vizuális leolvasású volt, mivel a fellelt dokumentumok szerint 1929-ben éppen e körül alakult ki polémia Pekár Dezső és Rybár István között.²⁾



Pekár bemutatja az inga felállítást: Khairpur, India (1923–24)

Pekár válaszában közli, hogy az ő általa kifejlesztett inga természetesen jobb, mint a Rybár-féle, és amennyiben neki Rybár-ingával kell mérnie akkor nem vállalja a felelősséget a mérési adatok megbízhatóságáért. Egyben arra kéri Mr Dewhurst-öt, hogy ez a dolog maradjon kettejük között, mert ő Rybár professzorral baráti viszonyban van, és nagyon kellemetlen lenne számára, ha úgy tünne, hogy ő a Rybár-inga ellen cselekszik.

Hamarosan érkezik a válasz, melyben T. Dewhurst megköszöni Pekár véleményét, mert, mint írja: „a közelmúltban kiderült, hogy az Anglo-Persian Oil Company, Ltd. által vásárolt Rybár-ingával Perzsiában sok probléma merült fel, melyeket főleg a szélsőséges hőmérsékleti viszonyoknak tulajdonítanak. Lehet, hogy a Rybár-inga laboratóriumi kö-



Felszerelés szállítása, átkelés a Dibru folyón: Upper Assam, India (1925–26)

rülmények között kiválóan működik. Ennek ellenére úgy gondolja, hogy a piacon kapható ingák közül még mindig a régi típusú Eötvös-inga a legmegbízhatóbb terepi műszer.”

A két expedíció során 1750 km² kiterjedésű területen 357 torziósinga-állomást telepítettek. A gravitációs észlelések mellett, bár nem volt kötelességük, földmágneses méréseket is végeztek. 15 állomáson a földmágneses tér három komponensének lemérésével kiszámították a tér abszolút értékét. További 242 állomáson pedig csak a horizontális intenzitásértékét határozták meg. Az expedícióban Pekár Dezső mellett Renner János vett részt. Expedíciós tevékenységüket Pekár az alábbiak szerint értékeli: „A távol Kelet nehézségei és veszélyei közepette teljesítettük hazafias kötelességünket. Sikeresen igazoltuk az angolok előtt a magyar génusz alkotásának, Eötvös ingájának használhatóságát a petróleumkutatásban”. A későbbiekben (1927–28) Szecsődy Miklós folytatta az indiai méréseket.

Hazatérésük után Pekár Dezső különböző fórumokon ismertette indiai munkájukat és utazásaikat. Az élvezetes stílusban előadott vetített képes élménybeszámolóknak köszönhetően hamarosan India-szakértő hírnévre tett szert.

Az első külföldi expedíciót hamarosan követik a többiek: 1923–26, Mexikó: a Royal Dutch Shell társaság alkalma-



Megérkeztek az elefántok az új észlelési pontra (baloldalt Pekár Dezső)

zottjaként Fekete Jenő vezette és értelmezte a kőolaj-kutatási célzatú sőtömszkutató torziósinga-méréseket.

1927–28, Franciaország: A francia közmunkaügyi minisztérium meghívására kőolaj-kutatási célú Eötvös-ingaméréseket végeztek a Puy de Dome megyében a Limagne síkságon. Itt készítették az első profundális és lokális anomália-térképet, amelyet manapság regionális, ill. maradékanomáliának nevezünk. A munkában részt vettek: Pekár Dezső, Renner János, Jakab Imre és Oszlaczky Szilárd.

1927–34, USA: Kőolaj-kutatási célú Eötvös-ingamérések Texas, Oklahoma, Kansas és Louisiana államban, valamint Venezuela Zulia államában. Geofizikus tanácsadó: Fekete Jenő a Torsion Balance Exploration Company (Houston) alkalmazásában. 1928 és 31 között csatlakozott hozzá Vajk Raul, aki Rybár István professzor mellett sajátította el az Eötvös-inga ismeretét, a későbbiekben pedig a MAORT vezető geofizikai tanácsadója lett, majd a cég államosítása után végleg az USA-ba távozott.

1929–30, Venezuela: Puerto-Cabello környékén kőolaj-kutató Eötvös-inga-mérések a James C. Templeton angol geológus által alapított IGPC (International Geophysical Prospecting Company, London) keretében. Templeton 1923-ban Budapesten ismerkedett meg a torziósinga-mérésekkel, és ettől kezdve szoros együttműködésben állt az Eötvös-intézettel. Résztvevők: Oszlaczky Szilárd és Jakab Imre. 1930-ban még két magyar, Virágh Bálint és Hollós Dénes dolgozott Venezuelában a North Venezulean Petroleum Company, Ltd. alkalmazásában.

1932–35, Németország: Az IGPC megbízásából Jakab Imre Eötvös-inga-méréseket végzett Hannover környékén. 1933-ban a geoelektromos méréseket tanulmányozta Svédországban. Majd ezt követően geoelektromos műszerfejlesztéssel foglalkozott. Műszereivel 1933 novemberétől már egy másik társaság megbízására Chilében ércutatást végez. 1935-ben Valdivia környékén rablógylkosság áldozata lett. Valdiviában temették el.^{b)}

* * *

Pekár Dezsőt 1934. június 30-ával nyugdíjazták, de ugyanakkor felkérték, hogy az év végéig, Fekete Jenő hazatértéig, továbbra is lássa el az igazgatói teendőket. Nyugdíjasként még további két és fél évet dolgozott az Intézetben, ezt követően pedig, ha megkérdezték, tapasztalataival és tanácsaival élete végéig segítette az Intézet munkáját. Tevékeny életének utolsó néhány évét megnehezítette egy sajnálatos baleset. Az eset a Császár uszodában történt. „Negyven év után itt ért utol a kellemetlenség, hogy megcsúszva a zöld moszatos vizes cementen, lábamat törtem. Valósággal szatírája a sorsnak! Több évtizedes expedícióim alatt ugyanis a legkülönbözőbb baleseteket minden baj nélkül megsúztam, többször kocsival felfordultam, elefántról leestem, a jég közé beszakadtam, csónakkal felfordultam, kocsiától besüppedtem az ingoványba, ahonnan a lovakat egyenként szíjjal és hosszú lánccal megkötve, négyes fogattal kellett kihúzatni, autókarambolban is volt részem stb. És rendes napozó fürdőzésem közben ért utol a baj.” – számol be

1933-ban történt balesetéről. Gyógyulása lassú és nem tökéletes, ettől kezdve nehezebbre esik a mozgás, ami kész tragédia egy olyan dinamikus embernek, akinek lételeme volt az örökös tevékenység.

1953. július 4-én bekövetkezett halálával elvesztettük Pekár Dezsőt, az ELGI első igazgatóját, aki nélkül az Eötvös-féle gravitációs kutatások önállósága nem maradhatott volna fenn több mint 100 esztendeig. Neki köszönhető az eötvösi hagyomány (problémafelvetés, elméleti kidolgozás, műszerszerkesztés és -alkalmazás, valamint a mérési adatok értelmezése) megőrzése és továbbörökítése. A II. világháborút követő hidegháborús helyzet mellett az eötvösi hagyomány továbbélése tette lehetővé, hogy az Eötvös nevével viselő ELGI az 1970-es évekre a világ egyetlen olyan geofizikai intézményévé fejlődött, ahol a fenti tevékenységek egy szervezeti keretben, egymás gondolatait és tevékenységét kölcsönösen megtermékenyítve működtek. A szorosan vett szakmai munka mellett szerteágazó társadalmi tevékenységet folytatott, különböző egyesületek vezetőségi tagja. Előadásiban és publikációiban mindent elkövetett a torziósinga-kutatások hazai és világméretű megismertetésében és elterjesztésében. Igazi menedzseri alkat volt, aki képes volt körömszakadtáig harcolni saját, munkatársai és intézetének vélt vagy valós érdekeiért.

Munkatársaitól nagyfokú precizitást és a lefektetett szabályok szigorú betartását követelte. „A szisztéma a fontos!” – szokta volt mondogatni.

* * *

A sors ironiája, hogy mire ez a cikk megjelenik, mindez már a múlté. Pekár Dezső életének legfontosabb alkotása, az Eötvös Loránd Geofizikai Intézet megszűnésre ítéltetett. Hiába *sic transit gloria mundi*, avagy kissé szabadon fordítva: semmi sem tart örökké, de mindkettő emléke fennmarad.

Jegyzetek

- ^{a)} Részletesebben lásd Szabó Z. 2004: Szemelvények
- ^{b)} European Gas and Electric Co.
- ^{c)} Magyar–Amerikai Olajipari Rt.
- ^{d)} Az Oertling-ingát egy angol cég gyártotta.
- ^{e)} Az 1871-ben Carl Bamberg által alapított finommechanikai műhely 1921-ben egyesült a Centralwerkstatt Dessau céggel. Az egyesült cég neve: Askania Werke, Friedenau Berlin
- ^{f)} Részletesebben lásd Szabó Z. 2008: Szemelvények V.
- ^{g)} Részletesebben lásd Szabó Z. 2008: Szemelvények IV.
- ^{h)} Részletesebben lásd Szabó Z. 2006: Szemelvények II.

Hivatkozások

- Bartha I, Förster R., 1941: A Kis Akadémia negyvenkét esztendeje az ezredik előadásig. A Kis Akadémia könyvtára XLII. 647p.
- Böckh H., 1917: Brachyantiklinálisok és dómok kimutatása torziós mérleggel végzett nehézségi mérések adatai alapján. Bányászati és Kohászati lapok L/9, 265–273
- Böhm F., 1939: Ásványolaj- és földgázbányászat Magyarországon 1935-ig. Bányászati és Kohászati Lapok LXXII/9, 153–189

- De Golyer E., 1938: Historical notes on the development of the technic of prospecting for petroleum. The science of petroleum I. Oxford University Press, pp. 268–275
- Eckhardt E. A., 1940: A brief history of the gravity method of prospecting for oil. *Geophysics* V, 231–242
- Egyed L., 1955: Geofizikai alapismeretek. Tankönyvkiadó, Budapest, 535 o.
- Fröhlich I., 1930: Bárány Eötvös Loránd emlékkönyv. Budapest, 319 o.
- Füzes M. M., 1965: Adatok Györök György és Györök Leó életéhez. A Veszprém Megyei Múzeumok Közleményei 3, 125–144
- Hecker O., 1910: Die Eötvössche Drehwage des Kgl. Geodätischen Institutes in Potsdam. *Zeitschrift für Instrumentkunde* XXX/1, 6–14
- Jakosky I. I., 1940: *Exploration Geophysics*. Trija Publishing Co., Los Angeles, 1195 p.
- Morvay Győző, 1916: Életrajz. In: Pekár Károly: Magyar kultúra, May János könyvnyomdája, Budapest, pp. I–CXXIII
- Nagy M., Enyedi J., 1990: Eötvös Loránd eddig ismeretlen levelei. *Fizikai Szemle* 40/1, 17–24
- Papp S., 1939: A Magyar Amerikai Olajipari Részvénytársaság földolaj- és földgázkutatásai a Dunántúlon. *Bányászati és Kohászati Lapok* LXXII/9, 203–241
- Pekár D., 1915: Kísérleti tanulmányok az Eötvös-féle csavarási mérleg zavarairól. *Mathematikai és Természettudományi Értesítő* XXXIII, 407–455
- Pekár D., 1934: Az Eötvös-ingák megbízhatósága. *Matematikai és Természettudományi Értesítő* L, 301–330
- Pekár D., 1941: Bárány Eötvös Loránd. A torziós inga 50 éves jubileumára. Kis Akadémia, Budapest, 340 o.
- Proubasta D., 1984: Remembrance of geophysical things past. *The Leading Edge of Exploration* 3/10, 32–38
- Szilárd J., 1984: Eötvös Loránd csavarási ingájának bevezetése a földtani kutatásba. *Földtani Kutatás* XXVII/3, 63–69
- Robertson H., 2000: A historic correspondence regarding the introduction of the torsion balance to the United States. *The Leading Edge* 19/6, 652–654
- Rybár I., 1932: Az Eötvös-féle torziós inga zavarairól. *Mathematikai és Természettudományi Értesítő* XLVIII, 147–184
- Schweydar W., 1918: Die Bedeutung der Drehwage von Eötvös für die geologische Vorschung nebst Mitteilung der Ergebnisse einer Messungen. *Zeitschrift für praktische Geologie* 26, 157–162
- Seigel H. O., 2004: A 60 year retrospective on mining geophysics. *The Leading Edge* 23/12, 1247–51
- Szabó Z., 2006: Szemelvények a magyar geofizika történetéből II. *Magyar Geofizika* 47, 36–42
- Szabó Z., 2008: Szemelvények a magyar geofizika történetéből IV. *Magyar Geofizika* 49/1, 45–51
- Szabó Z., 2008: Szemelvények a magyar geofizika történetéből V. *Magyar Geofizika* 49/4, 152–157
- Szilárd J., 1974: A gyakorlati célú Eötvös-inga mérések mérési módszerének kifejlesztése – emlékezés dr. Pekár Dezsőre, az Eötvös Loránd Geofizikai Intézet első igazgatójára. *Magyar Geofizika* 15/3–4, 135–140
- Szinnyei József, 2000: *Magyar írók élete és munkái*. Arcanum Digitális Könyvtár, Budapest

Agocs-díj 2012

A díjat alapító Dr. William B. Agocs professzor szándéka szerint az Eötvös Loránd Tudományegyetem geofizika szakán megvédett, kiemelkedő színvonalú MSc, illetve PhD

dolgozatot lehet jutalmazni. Az Agocs-díj kuratóriuma két MSc dolgozatot talált jutalmazásra érdemesnek 2012-ben. A díjazott dolgozatok:

Szabó Brigitta: Magyarországi szénhidrogén-kutató fúrásokban végzett mágneses magrezonancia- (NRM) mérések feldolgozása és értelmezése
Témavezető: *Dr. Balázs László*

Oláh Péter: Magnetotellurikus és szeizmikus mérések integrált értelmezése geotermikus kutatási szempontból
Témavezetők: *Dr. Lenkey László, Zahuczki Péter*

A díjakat ünnepélyes keretek között a kuratórium elnöke, *Dr. Mezey Barna* professzor, az Eötvös Loránd Tudományegyetem rektora nyújtotta át a jutalmazottaknak 2012.

szeptember 14-én. Az ünnepi alkalmon jelen voltak a kuratórium tagjai és a jutalmazottak által meghívott vendégek.

Kis Károly



Mezey Barna professzor, az ELTE rektora átnyújtja az Agocs-díjat Szabó Brigittának



Mezey Barna professzor, az ELTE rektora átnyújtja az Agocs-díjat Oláh Péternek

A Nemzeti Radioaktív Hulladék-tároló (NRHT) első két kamrája kialakításának földtudományi, bányászati és technológiai eredményei

A fenti című előadói napra 2012. június 13-án, szerdán került sor Pécsen, gyönyörű környezetben, az MTA Pécsi Akadémiai Bizottság székházában.

A rendezvény szervezője az

MTA Pécsi Akadémiai Bizottság X. sz. Föld- és Környezet-tudományok Szakbizottsága Földtani és Bányászati Munkabizottsága.

Társrendezői:

– MECSEKÉRC Környezetvédelmi Zrt.

- Magyarhoni Földtani Társulat Dél-dunántúli Területi Szervezete (MFT)
 - Radioaktív Hulladékokat Kezelő Közhasznú Nonprofit Korlátolt Felelősségű Társaság (RHK Kft.)
 - Országos Magyar Bányászati és Kohászati Egyesület Mecseki Csoportja (OMBKE)
 - Magyar Geofizikusok Egyesülete Mecseki Csoportja (MGE)
 - MTA PAB VI. sz. Műszaki Tudományok Szakbizottsága Környezetmérnöki Munkabizottsága
- voltak.



A rendezvény a paksi atomerőművi kis és közepes aktivitású radioaktív hulladékok elhelyezésére irányuló kutatási, mérési, dokumentációs és építési tevékenységet mutatta be az első két kamra bányászati kialakításához kapcsolódóan.

Az egész napos rendezvényen a témához kapcsolódóan 20 előadást és egy újonnan megjelent, a témához kapcsolódó könyv ismertetését hallgathatta meg a több mint 110 résztvevő, a szünetekben pedig 8 posztert mutattak be szerzőik.

A radioaktív hulladékok elhelyezésére irányuló bányászati kutatási, tervezési, kivitelezési, üzemeltetési tevé-

kenységek nem a „szokványos” ipari és bányászati beruházások hatósági, eljárási, szabályozási rendje szerint folynak. Egyedi, a szokásosnál sokkal szigorúbb, összetettebb feltételrendszernek, elvárásoknak kell megfelelni, és a közfigyelem is nagy a témakörben.

Az itt elvégzett és jelenleg is folyamatban lévő munkák a tudományterületek széles körének – elsősorban földtani, hidrogeológiai, geotechnikai, geomechanikai, geofizikai, bányászati, betontechnológiai stb. témakörökben – alkalmazását igényelte a hozzájuk kapcsolódó sokszínű laboratóriumi vizsgálati háttérrel (pl. ásvány-kőzettani, kémiai, hidrogeokémiai, különböző izotópfizikai, radiometriai, me-



chanikai, közt fizikai stb.). Párhuzamosan folytak egymás mellett a fejlett, sokszor különleges technikákat, technológiákat, egyedi fejlesztéseket igénylő bányászati tervezési, kutatási, vizsgálati, mérési, dokumentációs, kivitelezési és építési technológiai szerelési munkák. Ezek különleges, bányászati körülmények között alkalmazható adatrögzítési technikákat, műszer- és eszközvédelmet tettek szükségessé.

A képződött nagy adatmennyiség, a sokféle adatrendszer, a modellezések, a biztonsági értékelés és ezek integrált feldolgozási, értékelési igénye, összefüggéseinek bemutatása, a statisztikai feldolgozások, ezek 2D/3D/4D-s megjelenítése korszerű informatikai háttér, megfelelő adatbázis-kezelés (hardver és szoftver oldalon egyaránt) alkalmazását igényelte a munkákban részt vevő intézményektől, vállalkozásoktól.

Az előadói nap jól érzékeltette azt az összetett, magas szintű tudományos, műszaki felkészültséget és bonyolult szabályozási háttérrel igénylő bányászati tevékenységet, va-

lamint az ehhez szükséges sokoldalú, állandó egyeztetésekkel járó koordinációs tevékenységet, amely elvezetett az első két tárolókamra kialakításához, megépítéséhez.

A résztvevők aktivitása az előadásblokkok végén tartott hozzászólások időszakában jelentős volt, és a párbeszédnek csak a levezető elnök szigorúsága, határozottsága vetett véget az előadókra való tekintettel.

A Pécsi Akadémiai Bizottság Székházában 2012. június 13-án tartott, „A Nemzeti Radioaktív hulladék-tároló első két kamrája kialakításának földtudományi, bányászati és technológiai eredményei” című előadói nap kiadványa elektronikus formában felkerült a Magyarhoni Földtani Társulat honlapjára (www.foldtan.hu) a Dokumentumtár map-pába, ahonnan az letölthető. Ezenkívül az OMBKE honlapján is elérhető a kiadvány.

Hámos Gábor

PAB Földtani és Bányászati Munkabizottság elnöke

Kubina István

1934–2012

Megdöbbenve hallottuk a hírt, gyors lefolyású betegségben hirtelen elhunyt Kubina István villamosmérnök. Ismét egy olyan ember távozott közülünk, akinek élete, munkássága a kezdetektől összeforrt a magyar olajipari kutatással, a geofizikai műszerfejlesztéssel.

Kubina István 1934. márc. 25.-én született Kispesten. Általános iskolába Kecskeméten járt a Piaristákhoz. Középiskolát a Kandó Kálmán Ipari Technikumban végezte és szerzett gépészeti és elektrotechnikai oklevelet 1952-ben. A Budapesti Műszaki Egyetem Villamosmérnöki karán 1965-ben oklevelet szerzett híradástechnikai szakon.

1955-ben kerül kapcsolatba az olajiparral, a Kőolajkutató Vállalatnál (KÖKU-FEV) kezd dolgozni, kútszelvényezési és karbantartási területen.

1957–65 között az OKGT fejlesztési osztályára kerül, ahol feladatai közé tartozik a Laterolog 7/9, természetes és neutron-gamma szelvényező eszközök kifejlesztése hosszú kábelhez.

1966-ban az OGIL megalakulása után csoportvezetőként dolgozott kútszelvényezési műszerek fejlesztésén az elektronika széles körű felhasználásával, így a laterolog szonda továbbfejlesztésén, a hasadékkereső, négyelektrodás mikro-laterologon.

1970-ben kinevezik osztályvezetőnek a Kútszelvényezési Műszerfejlesztési Osztályra, ahol elkezdődnek a nagy hőfokú, nagy nyomású (180–200 °C, 120 MPa) szondák fejlesztése és kis sorozatú gyártása, így többek közt a háromelemes szonikus, laterolog és kábelfej, valamint a szondatok csatlakozó rendszer kifejlesztése. Elkezdődik – az elavult csöves elektronikák kiváltására – egy korszerű, nagy hőfokú, vastag rétegű, hibrid áramköri technológia fejlesztése és bevezetése. Nagy gondot fordít a komputeres modellezés és tervezés alkalmazásának bevezetésére. Az ujai Kútszelvényezési Fejlesztő Intézettel együttműködésben, speciális hibrid áramköri elemek fejlesztését végzi termelésgeofizikai eszközökhöz.

1977–78 A miskolci Nehézipari Egyetemen, előadó a kútszelvényezési módszerek tárgyban.

1958–74 között a Gamma Művek Geofizikai Műszerek Gyárában műszaki gazdasági tanácsadóként működik melékállásban.

Az SZKFI mint az OKGT kutatóintézete megalakulásakor főkonstruktor a kútszelvényező műszerfejlesztés és kis sorozatú gyártás területén. Fő munkaterülete a komputerizált szelvényező mérések és berendezések elméleti előkészítése

a Magyarországon meglévő technológiai eszközök felhasználásával. Duál-indukciós / laterolog, mikrolog, mikro-laterolog, fúrólukkompenzált szonikus kombinációk kifejlesztése hibrid technológiára alapozva.

1988-ban kinevezik műszaki főtanácsosnak, célja egy korszerű komputerizált szelvényező berendezés fejlesztésének felügyelete, mely az alábbiakat foglalta magában:

- Korszerű szelvényező gépkocsi kifejlesztése automatizált hidraulikus hajtású csörlővel.

- Számos lyukműszer és azok komputerizált felszíni egységének kifejlesztése, ún. kompenzált-neutron, sűrűség, spektrál-gamma, digitális adatgyűjtő/-továbbító lyukműszer, amely egyidejű mérésekre alkalmas a korszerű kombinációkkal.

- Egyeres digitális adatátvitel és annak hibrid áramköri technológiájának kifejlesztése.

Munkája során, amikor csak tehetett, kollégáival tartott a kísérleti mérésekre az ország bármely területére, részt vett az eredmények kiértékelésében, a tanulságok levonásában.

1994-ben a lezajlott politikai-gazdasági változások következtében az SZKFI közvetlenül a MOL irányítás alá kerül, aminek eredményeként többek közt a hazai geofizikai műszerfejlesztés és -gyártás megszüntetésre kerül. A változások hatására úgy dönt, visszavonul a geofizikától.

Nyugdíjba vonulása után sem szűnik meg dolgozni, szabadúszó tanácsadóként dolgozik néhány elektronikával foglalkozó kft.-nél, s ha van szabad ideje, dolgozik az íróasztalánál.

Számos egyesületnek aktív tagja, úgymint MGE, SPWLA, OMBKE, MATE. Pályafutása során számos országba eljut szimpóziumokra, tárgyalásokra, tanfolyamokra.

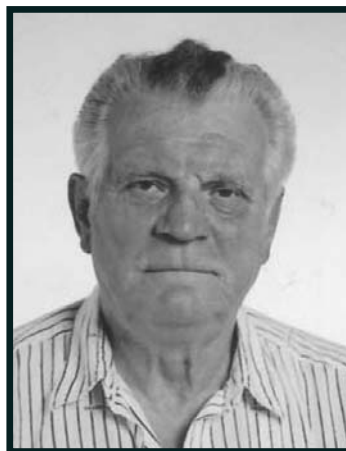
Családszerető ember volt, munkája mellett nem kis figyelmet fordított szeretett családjára, feleségére, aki mindig mellette állt, tűrte az esetleges hosszú távolléteket, szerette és büszke volt gyermekeire, unokáira, dédunokáira.

Kollégái kedvelték, jó főnök, kolléga és munkatárs volt, mindenkit szeretett, aki fel tudta vele venni a munkatempót, sokakat ösztönzött továbbtanulásra, tudása fejlesztésére. Sajnos közel húsz éve visszavonult, így régóta nélkülöztük társaságát.

Pista nyugodj békében, emléked örökké megőriztük!

Pista nyugodj békében, emléked örökké megőriztük!

Déry Béla
önéletrajzi adatok alapján



Kubina István
1934–2012

Bodri Gyula

1951 – 2012

Hosszan tartó, súlyos betegség után 2012. május 12-én meghalt Bodri Gyula, az Eötvös Loránd Geofizikai Intézet volt csoportvezetője, a dunántúli bauxitkutatás legendás alakja.

1951. augusztus 19-én született. Gyermekkorát Pusztamaróton és Piliscséven töltötte, az erdő és a természet szeretetét otthonról örökölte. Erdész felmenőinek példáját követve ő is erdész szeretett volna lenni, de gyerekkori kézsérülése ezt megakadályozta. Esztergomban kitűnő eredménnyel érettségizett, majd 1975-ben kapott geofizikus-mérnöki diplomát a Miskolci Egyetemen. 9 éves korában kezdett barlangászni, Miskolcon az Egyetemi Barlangász Egyesület, majd a Marcel Loubens Barlangkutató Egyesület tagja lett, ezt a szenvedélyét felnőtt korában a Bakonyban is folytatta.

1974 őszétől kezdve dolgozott az ELGI 52. számú terepi csoportjánál (amelynek 1978-ban sikeres és megbecsült vezetője lett). Terepi szakértelme, munkabírása és igen jó vezetői készsége hamar az



Bodri Gyula
1951 – 2012

akkor kibontakozó geofizikai bauxitkutatás kulcsszereplőjévé tette. Az ELGI bauxitkutató terepi csoportjának volt avatott és szeretett vezetője (mongóliai expedíciós munkája után) 1991-ig. A geológusok által nagyra becsült értelmező munkája mellett több módszertani fejlesztésben is részt vett, többek között ő végezte az első radartérképezést hazánkban az Ihar-kút-3 külszíni fejtésben.

A rendszerváltozást követően, a terepi geofizikai csoportok kényszerű felszámolása (1991) után munkáját a Terratest Kft.-ben folytatta, itt is a terepi geoelektromos méréseket irányította. 2010-ben kezdődő betegségével 2012. május 12-ig küzdött. Temetése szűk családi körben történt, de június 5-én összegyűltek barátai és kollégái a veszprémi temetőben, hogy búcsút vegyenek tőle, majd az egyetemen megemlékezzenek munkásságáról, emberi jószágáról.

Emlékét megőrizzük.

Kakas Kristóf

Búcsúbeszéd – utólag

Bodri Gyula búcsúztatóján, 2012. június 5-én nem volt könnyű megszólalni. Bár néhány kolléga megpróbálkozott a lehetetlennel, de megrendülésük végig érezhető volt. Azt, hogy mennyire szerettük, és tiszteltük a mi Bodri Gyulánkat, a veszprémi csoport vezetőjét, az is bizonyítja, hogy a sírjánál közel százan álltunk. Mély döbbenetünket a gyönyörű orgánumon elénekelt Bányászhimnusz csak fokozta.

Az eső, a hatalmas szél, és persze a rengeteg munka sem tarthatott vissza bennünket, hogy jelen legyünk. Itt kellett lennünk, mindannyiunknak, akár betegen (infarktus után is), nehezen járva, de újra együtt, az Ő emlékére. Ki tudja, lesz-e még módunk így együtt lenni... Lassan-lassan mindannyian elfogyunk, és nem lesz, aki emlékezzen ránk, erre a kis csapatra, amely szinte családként működött.

Szerénysége ellenére veszprémi csoportunk fő motiválója Bodri Gyula volt. Szinte mindent csinált, nemcsak profi volt a szakmájában, de ha kellett, segédmunkás volt, észlelőként mért, autót szerelt, programozott (az általunk használt összes feldolgozóprogramot ő írta), vannak, akik azt állítják, hogy gyakran söprűvel a kezében is látták – takarította az irodát.

Nem sokat beszélt, csak dolgozott, hihetetlen szorgalommal, mindig és mindent. Ha valami probléma volt, megoldotta, nem szidott, nem vádolt, nem kiabált, csak dolgozott, akár más helyett is. Több évtizedes együtt dolgozás ellenére soha nem láttuk dühösnek vagy mérgesnek. Sokan csak utólag jöttünk rá, hogy milyen kiváltságos helyzetben voltunk neki köszönhetően itt Veszprémben, a „nyugalom szigetén”.

Az egyetemen a búcsúztató már lényegesen kisebb létszámmal folytatódott. A kivétíton élete szinte minden pillanata feltűnt. Újra láhattuk szokásos testtartásában, cigarettával a kezében, mintha csak köztünk lett volna a borzas fejével és szakállával, ugyanúgy ahogy régen, csöndesen és mégis olyan kifejezően. Képzletünkben a látvány tovább fokozódott, kolbással a kezében, ahogy vezeti az autót. Most értettük meg, hogy miért gyulait evett mindig – hát ezzel lehetett a legkönnyebben dolgozni –, meg az a sok-sok kávé, amit megivott, csak úgy feketén, gyorsan felhőrpintve, mert mindig sietett...

Tódulnak az emlékek, hihetetlen, hogy egy ilyen ember, akivel oly keveset beszélünk, ennyi emléket tud ránk hagyni. Minden szavának jelentősége volt, még a humora is annyira frappáns, odaillő, lényegre törő, velős, mindig tudta,

mikor mit kell mondania. Mindent a helyén tudott kezelni, hihetetlen türelemmel, megértéssel, segítséggel... Mindenhol jelen volt, nemcsak a munkában, de bulikon is, szinte észre se vettük, de ha nem lett volna ott, azonnal hiányzott volna, mint ahogy most is hiányzik...

Már évek óta nem láttuk egymást, ő a betegségével küzdött, és most mégis hiányzik, kimondhatatlan űr maradt utána. Mindannyian el voltunk foglalva a saját dolgainkkal, a megélhetéssel, belesimultunk ebbe a rohanó világba, mint-ha megfeledeztünk volna a hajdani „béke szigetéről”. Csak most torpantunk meg, hogy talán nem így kellett volna...

Vajon tudtunk-e volna neki adni elég erőt? Hagyta volna-e? Vagy inkább maga akarta ezt a küzdelmet is megvív-

ni? Kérdések tömkelege most már bennünk marad... Talán lelkiismeretünket, akarjuk nyugtatgatni...

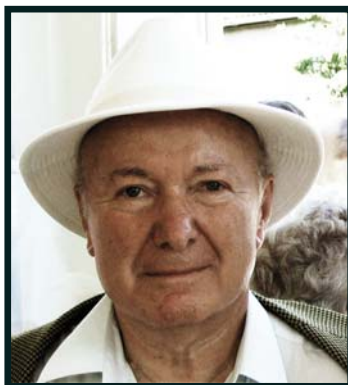
Már hiába akarunk segíteni Neki, már hiába akarunk találkozni Vele. Már csak emlékezhetünk, arra az emberre, akit mindenki szeretett. Milyen kevés ilyen ember van a Földön, akit mindenki szeret! Igazán jó ember volt, s most itt maradt az űr, a hiánya. Nem dolgozik tovább... nem hallgat, és nem mosolyog sokatmondóan...

Végleg megpihent ott Veszprémben, a fenyőfák alatt, és már csak a gondolatainkban élhet tovább, amíg mi is vagyunk.

Károly Terézia

Gergő György 1933–2012

Gergő György aranyokleveles bányamérnök 79 éves korában Pécsen hosszán tartó betegségben elhunyt. Temetése szeptember 11-én, 15 órakor volt a pécsi Köztemető dísztermében.



Gergő György
1933–2012

A gyász hírt a gyászoló család tette közzé az Új Dunántúli Naplóban.

Kedves kollégánk, nyugodjon békében!

Dr. Biró József
bányamérnök, Pécs

Dr. Fabiáncsics László 1934–2012

Dr. Fabiáncsics László, az OFVFK volt főgeofizikusa 2012. május 8-án életének 78. évében elhunyt. Temetése 2012. június 20-án volt Budapesten az Új Köztemetőben.

Nyugodjék békében!

Szerkesztőség

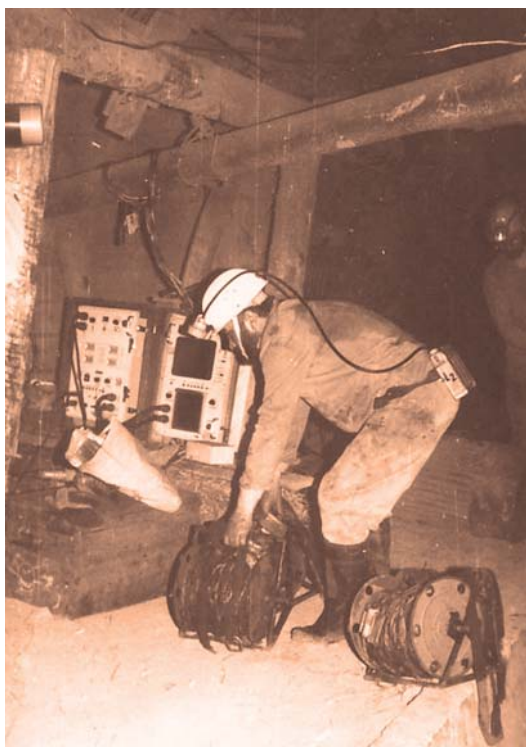
Rendezvénynaptár

2012. szeptember		
2012. szept. 27–28.	Az Egyesület 33. vándorgyűlése (http:// www.uni-miskolc.hu/~earthc)	Miskolc, Egyetemváros
2012. október		
2012. okt. 17.	Új Utak 2012 – előadóiülés: Hazai vizeink helyzete	MFGI/MBFH konferenciaterem, Budapest
2012. november		
2012. nov. 9–10.	VI. Országos Középiskolai Földtudományi Diákkonferencia (http://www.foldtan.hu)	Miskolc, Egyetemváros
2012. nov. 21.	Új Utak 2012 – előadóiülés: A termőtalaj	MFGI/MBFH konferenciaterem, Budapest
2013. március		
2013. márc. 4–7.	DGG – 73. Jahrestagung der Deutschen Geophysikalischen Gesellschaft (http://www.dgg-2013.de)	Lipcse, Németország
2013. április		
2013. ápr. 7–12.	EGU General Assembly – AZ EGU évi közgyűlése (http://www.egu2013.eu)	Bécs, Ausztria
2013. június		
2013. jún. 10–13.	75th EAGE Conference & Exhibition incorporating SPE EUROPEC 2013 Az EAGE éves kongresszusa és műszerkiállítása (http://www.eage.org)	London, Nagy-Britannia
2013. szeptember		
2013. szept. 8–12.	Near Surface Geoscience 2013 (http://www.eage.org)	Bochum, Németország
2013. október		
2013. okt. 7–10.	BGS2013 – a Balkán Geofizikai Egyesület 7. kongresszusa (http://www.eage.org ; mailto: eage@eage.org)	Tirana, Albánia

További részletek, referenciák a honlapról (<http://www.mageof.hu>) érhetők el.

Kakas Kristóf

Geofizika hazai bányáinkban (amikor még voltak)



MAGYAR GEOFIZIKUSOK EGYESÜLETE

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

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

