

MAGYAR GEOFIZIKA

HUNGARIAN GEOPHYSICS

A MAGYAR
GEOFIZIKUSOK
EGYESÜLETÉNEK
FOLYÓIRATA



JOURNAL OF THE
ASSOCIATION
OF HUNGARIAN
GEOPHYSICISTS

A Magyar Geofizikusok Egyesületének 2024. évi Közgyűlése
Ifjú Szakemberek Ankétja - 2024
Köszönet Egyesületünk támogatásáért
Szenior klubdélután

Nagy felbontóképességű szerkezetkutató 3D szeizmikus mérések
a Bodai Agyagkő Formáció (BAF) kutatására a Nyugat-Mecsekben
Eredmények és tapasztalatok a VLF módszer területén

Beszámoló a Balkán Geofizikai Társulat 12. Kongresszusáról
Korvin Gábor: „Statistical Rock Physics”

In memoriam
Ujfalusy Antal Gábor



MAGYAR GEOFIZIKA

HUNGARIAN GEOPHYSICS

65. évfolyam (2024) 1. szám



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

TARTALOM • CONTENTS

MGE HÍREK • NEWS OF ASSOCIATION OF HUNGARIAN GEOPHYSICISTS (AHG)

- 3 A Magyar Geofizikusok Egyesületének 2024. évi Közgyűlése (General Assembly of AHG) – *Hegedűsné Petró E.*
6 Ifjú Szakemberek Ankétja – Eger, 2024. április 5–6. (Meeting of Young Professionals – 2024) – *Hegedűsné Petró E.*
7 Köszönet Egyesületünk támogatásáért (Thanks for supporting the Association) – *MGE Elnöksége*
8 MGE szenior klubdélután (Senior club-meeting in AHG) – *Bodoky T.*

TANULMÁNY • PAPER

- 10 Nagy felbontóképességű szerkezetkutató 3D szeizmikus mérések a Bodai Agyagkő Formáció (BAF) kutatására a Nyugat-Mecsekben (High-resolution structural 3D seismic survey for exploration of Boda Claystone Formation (BCF) in the Western-Mecsek Mts.) – *Gombár L., Molnár P., Halász A.*
27 Eredmények és tapasztalatok a VLF módszer területén (Results and experiences in the field of the VLF method) – *Vincze L., Németh N., Pethő G.*

HÍREK • NEWS

- 46 Beszámoló a Balkán Geofizikai Társulat 12. Kongresszusáról
49 Megjelent Korvin Gábor „Statistical Rock Physics” c. könyve

IN MEMORIAM

- 50 Újfalussy Antal Gábor – *Szerkesztőség*

MAGYAR GEOFIZIKA

HUNGARIAN GEOPHYSICS

65. évfolyam (2024) 1. szám

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

Főszerkesztő • Editor-in-Chief

DR. BODOKY TAMÁS

E-mail: mageofedit@gmail.com

Szerkesztőbizottság • Editorial Board

DR. GALSA ATTILA, DR. KISS JÁNOS, DR. LÓRINCZ KATALIN,

DR. PETHŐ GÁBOR, DR. SZABÓ NORBERT PÉTER

Technikai szerkesztő • Technical Editor

HOCK GÁBOR

E-mail: mageoftechn@gmail.com



Lapunk e számának megjelenését a
Magyar Tudományos Akadémia
támogatja

A szerkesztőség a szakcikket (tanulmányokat) szaklektorálás után közli. A szaklektorok névsorát az évfolyam záró számában 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: Dr. Timár Gábor

Szerkesztőség: 1145 Budapest, Columbus u. 17-23.

Telefon/Fax: (1) 201-9815

Titkársági e-mail: postmaster@mageof.t-online.hu

Honlap: www.mageofegy.hu

Megjelenik évente négyszer

INDEX: 26 507

HU ISSN 2677-1497 (online)

A Magyar Geofizikusok Egyesületének 2024. évi Közgyűlése

A Magyar Geofizikusok Egyesülete (MGE) 2024. évi Közgyűlését április 26-án tartotta meg a Szabályozott Tevékenységek Felügyeleti Hatóságának konferenciatermében, az Eötvös Loránd Geofizikai Intézet egykori Columbus utcai épületében. A közgyűlésen a jelenléti ív szerint 61 tagtársunk jelent meg.



Timár Gábor, az MGE elnöke megnyitja a Közgyűlést

A Közgyűlés a Himnusz közös eléneklésével kezdődött, majd a napirend elfogadása után Timár Gábor, az MGE elnöke a közgyűlési jegyzőkönyv vezetésére és hitelesítőire tett javaslatot. A jelen lévők egyhangúan elfogadták jegyzőkönyv vezetőként Hegedűsné Petró Erzsébetet, hitelesítőként pedig Pályi Andrászt és Hegedűs Endrét.

Ezután Timár Gábor elsőként társegyesületeink és jogi tagjaink képviselőit (Jogi tagjaink az Acoustic Kft., a Biocentrum Kft., az ELGOSCAR Környezettechnológiai Zrt., a Geo-Log Kft., a Geomega Kft., a Mecsekérc Zrt., az

MS Solution Energy Kft. és az O&GD Central Kft.), majd a Közgyűlésen megjelent tagtársakat köszöntötte.

A köszöntések után a Közgyűlés egy perces néma felállással emlékeztet meg az elmúlt év során elhunyt tagtársairól:

*Dr. Baráth Istvánról, Czuczor Ernőnéről,
Lakatos Sándorról, Lantos Miklósról és
Dr. Tóth Józsefről.*

A megemlékezést követően az elnök felkérte Bereczki László általános titkárt, hogy számoljon be az MGE a 2023. évről.

Bereczki László elmondta, hogy a 2023. évi taglétszám 447 fő volt, amely az előző évihez képest 10 fővel kevesebb néhány kilépő és a sajnálatos halálesetek következményeként. Az egyesület támogatásai is nagyon lecsökkentek, de ennek ellenére az MGE pénzügyi helyzete stabil. Pénzügyi tartalékainkat lekötöttük, államkötvénybe fektettük 2023-



Bereczki László általános titkár beszámolója (az elnökségi asztalnál Kovács Attila Csaba és Breitner Dániel alelnökök, illetve Timár Gábor elnök ülnek)



Az MGE 2024. évi Közgyűlése

ban is, ezért a 2022-es évhez képest nagyobb nyereséggel zártuk az évet.

Szigorúan az Alapszabályunkban leírtak szerint végeztük tevékenységünket. Elnökségi üléseinket az Alapszabályban leírtak szerint tartottuk meg. Így 2023-ban is megfeleltünk a közhasznúság megtartásához szükséges feltételeknek.

Nagybörzsönyben megtartottuk hagyományos évi ifjúsági rendezvényünket az Ifjú Szakemberek Ankétját (ISZA). Elindítottunk egy újabb rendezvénysorozatot, a szakmai előadói napokat. A klímaváltozással kapcsolatos előadói délutánt és egy geotermikus előadói napot szerveztünk. A klíma előadói délutánt az Országos Magyar Bányászati és Kohászati Egyesülettel (OMBKE) közösen rendeztük meg. A geotermiával foglalkozó előadói napot a Szabályozott Tevékenységek Felügyeleti Hatóságával (SZTFH) közösen szerveztük, itt a résztvevők száma több mint 150 fő volt.

Hagyományos éves rendezvényeink keretében Eötvös Loránd sírját is megkoszorúztuk 2023. áprilisában.

Területi csoportjaink megfelelően működtek, volt olyan csoport amely újjá szerveződött.

A *Magyar Geofizika* című szaklapunkat 2023-tól már csak online jelentethettük meg a megemelkedett nyomdai költségek miatt.

Ápoltuk külföldi kapcsolatainkat (EAGE, SEG). Egy szakosztályunk működik jelenleg, ez az EAGE szakosztály.

A titkári beszámolót, amely tartalmazta a csoportok által összeállított beszámolókat, minden tagtársunk megkapta a közgyűlési meghívóval együtt, ezért a titkár itt nem beszélt részletesen a csoportok működéséről. Az év elején közkívánatra megalakult a Budapesti Területi Csoport, melynek vezetője *Zelei Gábor* lett, titkára *Zahuczki Péter*.

A következő évet illetően a titkár elmondta, hogy 2024. évi szakmai rendezvényeinket a Szabályozott Tevékenységek Felügyeleti Hatóságának közreműködésével fogjuk megtartani, a Budapesti Területi Csoport szervezésében. Erre az évre három szakmai előadói délutánt tervezünk, reméljük, hogy mindhárom meg tudjuk valósítani, de kettőt biztosan.

Ezt követően a titkár rátért a 2024. évi pénzügyi terv ismertetésére. Az Egyesületünket gyakorlatilag a befektetések hozamából, a tagdíjakból, valamint pályázatokból kívánjuk fenntartani.

2023-ban az 1%-os felajánlásokból több mint 400 ezer forint gyűlt össze, ezt az ISZA megrendezésére fordítottuk.

A jelen lévőknek kivetített táblázatban látható, hogy a tervhez képest mi valósult meg, valamint hogy kevesebb bevétel valósult meg, mint a tervezett.

Egyedül a geotermia rendezvényre volt egy nagyobb kiadásunk, de idén az ilyen jellegű kiadásokat is megpróbáljuk csökkenteni, az SZTFH felajánlásának jóvoltából.

Mint az a kivetített táblázatban látható, több mint 4 millió forint eredményt tudott felmutatni az Egyesület a befektetéseknek köszönhetően.

Köszönjük a tagság felelősségvállalását is, mely többek között az 1%-os felajánlások, valamint a tagdíjak időben történő befizetése terén mutatkozik meg.

Mindent összevetve a beszámoló alapján megállapítható volt, hogy sikeres szakmai és pénzügyi évet zártunk 2023-ban.

A titkári beszámoló után a Magyar Geofizikusokért Alapítvány (MGA) kuratóriumi elnökének, *Gombár László*-nak az alapítványi beszámolója következett. *Gombár László*



Gombár László, az MGA kuratóriumának elnöke beszámol az Alapítvány helyzetéről

elő elmondta, hogy bevételük szinte nem volt 2023-ban, kivéve azt az 1,2 millió forintot, amely a befektetett tartalék kamataként jelent meg a számlájukon. Kérelmet nem kaptak a fiatalok támogatásával kapcsolatban, egy nyugdíjas tagtársunkat támogatták karácsony előtt és az ISZA megrendezését 2023. márciusában. Ezen túl csak a szerény kiadással járó szenior klubdélutánt finanszírozták. 2024-ben még terveznek kiadásokat, de azzal elfogy az Alapítvány tartalék pénze.

Gombár László felhívást tett közzé a Tudománytörténeti bizottság nevében: a 60 év feletti szenior tagtársakat kéri, hogy írják le szakmai pályafutásukat, melyeket összegyűjtve a honlapra szeretnék feltenni a Magyar Geofizikusok Egyesületének Arcképcsarnoka „fül” alatt. Szeretnék, ha a szakmai önéletrajzukat megíró és elküldő tagtársakról az utókor számára egy emlék maradna a következő korosztály számára.

Az elnök megkérdezte a jelenlévőket, hogy van-e hozzászólás, kérdés az elhangzottakkal kapcsolatban. Mivel kérdés, hozzászólás nem érkezett, felkérte *Kaszás Lászlót*, a Felügyelőbizottság (FB) elnökét, hogy tartsa meg beszámolóját.

Kaszás László beszámolójában elmondta, hogy *Bereczki László* titkár beszámolójából is látható volt, hogy az egyesület konzervatív, inkább hosszú távra tervezett működést megelőzve folytatta éves gazdálkodását. A 2023-as évre vonatkoztatva eredményes évet zárt. Bár a 2024-es terv ismertetése ezután következik, elmondja, hogy a 2024-es pénzügyi tervben is hasonló számokkal terveztek, vagyis az FB támogatja az idei pénzügyi tervet is.

A Felügyelőbizottság megvizsgálta a közhasznúság fenntarthatóságát is. A gazdaságossági mutatók közül három mutatónak felelt meg az Egyesület, a támogatottsági mutatók közül kettőt tudott teljesíteni. A közhasznúsági



Kaszás László, a Felügyelőbizottság elnöke beszámolóját tartja

státusz megtartását semmi sem veszélyeztette. Az FB 2023. évi beszámolót elfogadásra javasolja.

Az alapítvány beszámolójával kapcsolatban csupán véleményezéssel bír az FB (a beszámolót ebben az esetben a kuratóriumnak kellett elfogadnia), a számadatok alapján egyetértenek azzal, hogy az MGA még kb. egy évig tudja folytatni tevékenységét.

A 2024. évi tervvel kapcsolatban elmondja, hogy az azt mutatja, hogy hasonlóan a 2023-as évhez konzervatív gazdálkodást fog folytatni az egyesület, ezért a 2024. évi tervet is elfogadásra javasolják.

A FB-hez nem érkezett olyan bejelentés, észrevétel mely szerint a Magyar Geofizikusok Egyesülete nem az Alapszabály szerint működött volna 2023-ban, így ezzel a feladatukkal kapcsolatban nem volt teendőjük.

Az Elnök jelezte, hogy szavazás következik, ahol valamennyi elhangzott beszámolót egyenként kell majd elfogadnia a Közgyűlésnek.

A Közgyűlés az elhangzott beszámolókat az itt következő szavazás során egyenként egyhangúlag elfogadta. Az elnök megköszönte a szavazáson való részvételt majd sikeres évként lezártnak nyilvánította a 2023-as évet. Ezután felkérte *Berezcki László* általános titkárt, hogy ismertesse az Egyesület 2024. évi pénzügyi tervét.

Berezcki László kivetített egy táblázatot, ahol tételesen látható a 2024-re prognosztizált pénzügyi terv. Minden tételt az előző évi tények alapján, azok figyelembevételével terveztek meg. Kicsit kevesebb lesz a kiadás, mert már nem jelenik meg nyomtatásban a *Magyar Geofizika* című szaklapunk. Elmondja, hogy szeretnénk folytatni a törzstőke befektetését, mert az növeli a bevételeket. A tagdíjknál is egy nagyobb bevétel várható a tavalyihoz képest, mert idén január 1-től emelkedtek a tagdíjak.

Hegybíró Zsuzsa felszólalt, szerinte az Alapítványt meg lehetne menteni azzal, hogy az Egyesület a pozitívumának 10%-át átutalja az Alapítványnak. A titkár válaszában elmondta, hogy az Egyesület támogatottsága szinte teljesen megszűnt, egyelőre a kamatokból érünk el jelentősebb bevételt, de azt nem tudjuk, hogy ez a befektetési lehetőség mennyi ideig fog még tartani. Két éve megszűnt az Alapítvány közhasznúsága, ezért gondoltuk, hogy mivel az Alapítvány támogatottsága is megszűnt, azt lassan fel kell számolni.

Az elnök megkérdezi, hogy elfogadja-e a Közgyűlés az elhangzott 2024. évre szóló pénzügyi tervet.

A Közgyűlés egy tartózkodás mellett, ellenszavazat nélkül egyhangúlag hozott igen szavazattal elfogadta az MGE 2024. évi pénzügyi tervét.

A szavazás után az Elnök 20 perc szünetet rendel el.

A szünet után a titkár bejelentette, hogy hagyományainkhoz híven most az ISZA közönségdíjas előadása következik, de sajnos a nyertes előadó külföldi tartózkodása miatt nem tud részt venni a közgyűlésen. Ezért helyette *Rábóczy Bence*, a gyakorlati kategória II. helyezette mondja el az ISZA-n elhangzott előadását. Az előadás címe: „Exploring the inner structure of the Esztramos Mountain using muographic measurements”.

Az előadást követően a díjak, kitüntetések átadása következett.

- Renner János- emlékérmét kapott *Pusztainé Holczer Magdolna* az Egyesület leköszönő könyvelője. A titkár méltatta Pusztainé Holczer Magdolna tevékenységét.
- Emléklap kitüntetést kapott *Kopcsa Józsefné*, a Miskolci Egyetem Geofizikai Tanszékének nyugdíjas ügyintézője. A titkár felolvasta Kopcsa Józsefné méltatását, valamint a kitüntetett levelét, melyet a Közgyűlés résztvevőihez intézett, mert személyesen nem tudott eljönni a rendezvényre.

Ezután kerültek átadásra az „Év cikkei” díjak:

- Meskó Attila-díjat *Porkoláb Kristóf* kapott a következő cikkért: *Porkoláb K., Broerse T., Kenyeres A., Békési E., Tóth S., Magyar B., Wesztergom V., 2023. Active tectonics of the Circum-Pannonian region in the light of updated GNSS network data. Acta Geodaetica et Geophysica, 58, 149–173.*
- Csókás János-díjat *Váradi Kitti* kapott a következő cikkért: *Váradi K., Berezcki L., Szijártó M., Markos G., Fodor L., 2022. Miocén extenziós szerkezetek vizsgálata a magyar-szlovák Kisalföldön. Magyar Geofizika, 63/4, 208–224.*

Végül a 2024. évi ISZA díjainak kiosztása következett, ezután az *Timár Gábor* elnök bezárta a Közgyűlést és megkérte a jelenlévőket, hogy énekeljék el közösen a Bányász Himnuszot.

Hegedűsné Petró Erzsébet



A Közgyűlés a Bányász Himnusszal zárult

Ifjú Szakemberek Ankétja

Eger, 2024. április 5–6.

A Magyar Geofizikusok Egyesülete 2024. április 5–6-án Egerben, a Szent István Hotelben rendezte meg az 54. Ifjú Szakemberek Ankétját. Az Ankéton 28 szóbeli és 14 poszterelőadás hangzott el, illetve került bemutatásra. Az Ankéton 58 fő vett részt.

Hagyományosan három kategóriában mérték össze tudásukat az előadók: elméleti, gyakorlati és poszter-kategóriában.

A hat főből álló zsűrinek (Sóron András, Timár Gábor, Leskó Máté, Tóth Tamás, Botka Dániel, Virág Attila) ismét nehéz dolga volt az elhangzó kitűnő előadások összehasonlításával, de végül a különdíjakat felajánló szponzorokkal együtt sikerült eldönteniük a sorrendet. A fiatal előadók komoly felkészültségről tettek tanúbizonyságot. Az egyesületi díjak mellett 14, míg a cégek, intézmények által felajánlott különdíj is kiosztásra került.

Idén több, a Miskolci Egyetemen, az ELTE-n, illetve a Debreceni Egyetemen tanuló külföldi doktorandusz is nyert értékes díjat az ISZA-n.

A díjak átadására 2024. április 26-án az egyesület éves közgyűlésén került sor.

Az ISZA díjazottjainak a névsora:

Elméleti kategória: 1. díj – Polyák Ábel, SZTE, 2. díj

– Gereczi G. Botond, ELTE, 3. díj – Molnár Bence, ELTE

Gyakorlati kategória: 1. díj – Ali Shebl, Debreceni

Egyetem, 2. díj – Rábózkai Bence, ELTE, 3. díj – Mohamed M. Abdelkader, Debreceni Egyetem

Poszterkategória: 1. díj – Bodor Bálint, SZTE, 2. díj – Winkler Zsuzsanna, MOL Nyrt., 3. díj – Szűcs József, ELTE

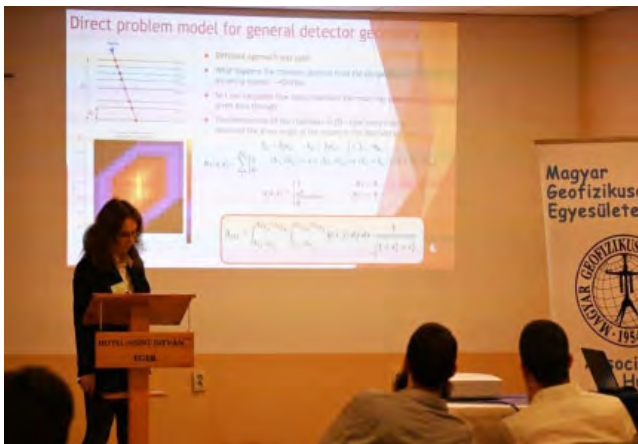
Küöldíjak:

GEOMEGA Kft.	Ali Shebl, Debreceni Egyetem
MS Energy Solutions Kft.	Pap József, Miskolci Egyetem
Geo-Log Kft.	Mekker Julianna, SZTFH
Mingeo Kft.	Kosztá Benedek, ELTE
O&GD Central Kft.	Polyák Ábel, SZTE
Elgoscar Környezet-technológiai Kft.	Saeed Bidar Kahnamuei, ELTE
Mecsekérc Zrt.	Balassa Csilla, Miskolci Egyetem
MOL Nyrt.	Mohamed El Balawy, Miskolci Egyetem
Földfizikai és Csillagászati Kutatóintézet	Hadeer Hassan, Miskolci Egyetem
Biocentrum Kft.	Szűcs Levente, ELTE
ELGA Szilárd József-díj	Kárpi Marcell, Miskolci Egyetem
ELGA Böckh János-díj	Horváth Laura, ELTE
MFT IB (kalapács)	Magyar János, ELTE
Közönségdíj	Ali Shebl, Debreceni Egyetem

Hegedűsné Petró Erzsébet



Az ISZA – 2024 résztvevői Egerben



Előadás az ISZA-n



Előadás az ISZA-n



A poszterbemutatók helyszíne

Köszönet Egyesületünk támogatásáért

Örömmel számolunk be arról, hogy két tagtársunk magánszemélyként ajánlott fel támogatást Egyesületünknek:

Bucsi Szabó László 2023-ban 50 000,- Ft,
Dr. Pleszkáts Tibor 2024-ben 100 000,- Ft

támogatást nyújtott a Magyar Geofizikusok Egyesületének.
Köszönjük szépen!

Magyar Geofizikusok Egyesületének Elnöksége

MGE szenior klubdélután OMBKE székház, 2024. május 28.

A korábbi hagyományokat folytatva idén is megrendezte a Magyar Geofizikusok Egyesülete a szenior klubdélutánt, az idős egyesületi tagok összejövetelét. A kedves találkozó házigazdái *Magyar Balázs* és *Petró Erzsébet*, a klubdélután helyszíne *Zelei Gábornak* köszönhetően az Országos Magyar Bányászati és Kohászati Egyesület Hízlaló téri székháza volt.

Magyar Balázs üdvözölte néhány szóban a megjelenteket, akiket a kellemes társaságon túl bőségesen megterített büféasztal is várt.

Öröm volt találkozni a rég nem látott barátokkal, kollégákkal, elbeszélgetni a régi időkről, bár sajnós, idén valamivel kevesebben voltunk, mint az előző években.

A jól sikerült találkozó megrendezését a szenior egyesületi tagok nevében köszönjük szépen *Petró Erzsébetnek*, *Magyar Balázsnak* és *Zelei Gábornak*.

Bodoky Tamás



Élénk beszélgetésbe merülve...



A vidám hölgykoszorú



Fontos szakmai kérdések megvitatása folyt



Ezt az alkalmat meg kellett örökíteni

Nagy felbontóképességű szerkezetkutató 3D szeizmikus mérések a Bodai Agyagkő Formáció (BAF) kutatására a Nyugat-Mecsekben

GOMBÁR L.¹, MOLNÁR P.², HALÁSZ A.²

¹Miskolci Egyetem, GEOSEIS Consulting, 3515 Miskolc-Egyetemváros

²Radioaktív Hulladékokat Kezelő Kft., 2040 Budaörs, Puskás Tivadar u. 11.

E-mail: laszlo.gombar@geoseis.hu, molnar.peter@rhk.hu, halasz.amade@rhk.hu

A Ny-Mecsekben bő két évtizede tartó geológiai kutatás célja a Magyarországon keletkező hosszú élettartamú és nagy aktivitású radioaktív hulladék, valamint a kiegészítő fűtőelemek hosszú távú, biztonságos elhelyezésére alkalmas mély-ségi geológiai tároló helyének kijelölése. Az eddigi kutatófúrások és a néhány korábbi 2D szeizmikus szelvény alapján kialakítható szerkezeti kép nem ad megfelelő támpontot az 500 és 1000 m mélységintervallumban tervezett tárlóter helyének meghatározásához. A Radioaktív Hulladékokat Kezelő Kft. ezért egy nagy felbontó képességű, sűrű mérési hálózattal jellemezhető 3D szeizmikus mérés kivitelezését határozta el. A korszerű műszaki elvárásoknak megfelelő terepi szeizmikus adatgyűjtés 2022. július–november folyamán történt meg. A mérés kivitelezése során számos kihívással kellett szembenézni, úgymint a változatos topográfia, az erdővel borítottság, a felszínen és felszínközélen található nagy szeizmikus terjedési sebességgel bíró alaphegységi képződmények, az erősen változó vastagságú fedőüledékek, valamint a lakott területek. A cikk bemutatja a terepi mérések tervezését, kivitelezését és az adatfeldolgozás folyamatát.

Kulcsszavak: 3D, szeizmikus kutatás, geofon, vibrátor, Bodai Agyagkő Formáció

Gombár, L., Molnár, P., Halász, A.: High-resolution structural 3D seismic survey for exploration of Boda Claystone Formation (BCF) in the Western-Mecsek Mts.

The target of the geological investigation, which has been carried out in West-Mecsek mountains for decades is to find a safe, deep geological repository location for the long-lifetime, high radioactive wastes, as well as for exhausted nuclear heating elements. The geological structural image - derived from the exploration wells drilled so far and from some earlier 2D seismic sections - has not provided a reliable base for determination of the right location for the waste repository planned within the 500m to 1000 m depth interval. The Radioactive Waste Management company therefore has decided to carry out a high-resolution 3D seismic survey to image the potential area with a dense network of source and receiver lines. The seismic data acquisition campaign meeting all the up-to-date technical requirements was carried out from July to November in 2022. During data acquisition several field challenges had to be faced as like the varying topography, the partial forest coverage of the survey area, the high seismic velocity basement formations located on the surface or near-surface, the varying thicknesses of weathered zone sediments and the inhabited areas.

The article presents the designing of the survey, as well as the data procedures of acquisition and final data processing.

Keywords: 3D, seismic survey, geofon, seismic vibrator, Boda Claystone Formation

Beérkezett: 2024. április 2.; *elfogadva:* 2024. június 1.

Bevezetés

A 49 km² területet lefedő 3D szeizmikus mérés alapvető célja a Cserdi-Bükkösd-Boda térségében (1. ábra) található Bodai Agyagkő Formáció (BAF) összetételének megismerése, a terület földtani adottságainak, azaz a földtani, geofizikai, tektonikai, rétegtani viszonyainak térbeli jellemzése volt (Molnár et al. 2022, Hámos 2019). A kutatási terület földtani-szerkezeti jellegét az összetett szerkezetű Kővágószőlősi-antiklinális és az azt észak és dél felől lehatároló, NyDny–KÉK-i csapású jelentős szerkezeti zónák – a Hetvehely–Magyarszék-vonal és a Mecsekalja diszlokációs zóna – határozzák meg.

A Kővágószőlősi-antiklinális ÉK, K, illetve DK-i irányban fiatalodó, íves-páztás geometriájú, 4000–5000 m vastagságú, perm-triász korú törmelékes és karbonátos kifejlődésű rétegek építik fel. A mérési terület Ny-i peremén, Bükkösd és Cserdi térségében a perm-triász képződményekre kora miocén törmelékes üledékek (konglomerátum, homokkő, agyag) települnek max. 200–250 m vastagságban. A mérési terület D-i harmadát pedig dél felé fokozatosan 300–500 m-ig kivastagodó, késő miocén üledékek (kavics, homok, agyag és agyagmárga) borítják. A mérési terület É-i, dombvidéki részén a perm-triász képződményekre közvetlenül negyedidőszaki üledékek (főként lösz) települnek, legfeljebb 20–30 m vastagságban.

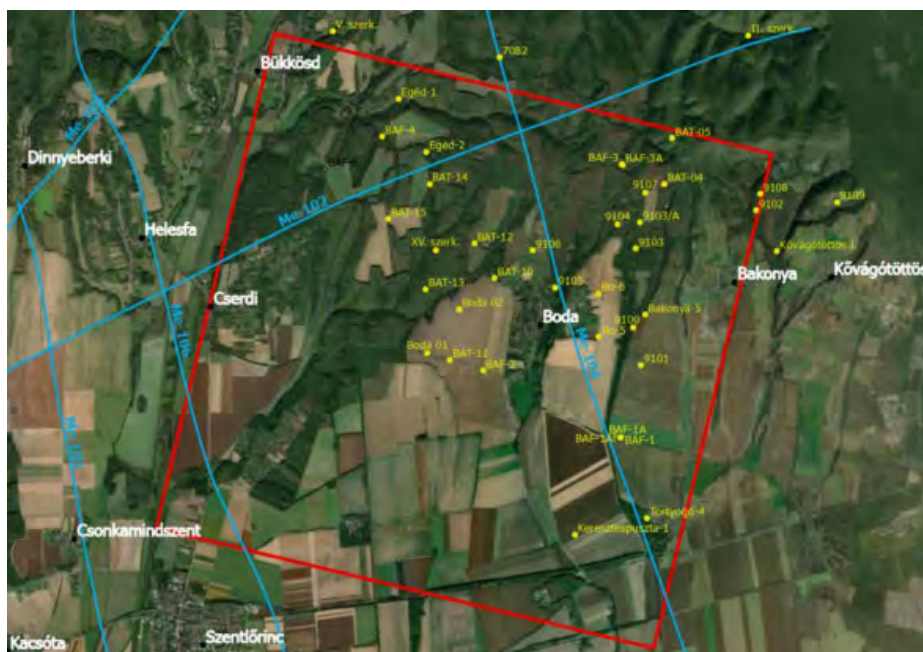
A 3D szeizmikus mérések elvégzésére a Radioaktív Hulladékokat Kezelő Kft. (RHK) nemzetközi közbeszerzési tendert írt ki, amelyet a Magyarországon már több éves mérési tapasztalattal és kiváló referenciákkal rendelkező, lengyelországi székhelyű Geofizyka Torun S.A. (GT) nyert el.

Kutatástörténet

A nyugat-mecseki 3D szeizmikus mérések területének és tágabb környezetének megkutatottsága országos szinten igen jónak mondható. Az elmúlt évtizedekben a BAF kutatása és az uránbányászati tevékenységek során számos nyersanyag- és szerkezetkutató, valamint térképező fúrás mélyült, ezekhez karotázsmérések kapcsolódtak, felszíni földtani térképezés, kutatóárkok vizsgálata, felszíni geofizikai mérések zajlottak, amelyek értékelését számos kutatási jelentés és szakkikk ismerteti.

Az elmúlt évtizedekben a kutatási területen, illetve annak tágabb környezetében számos szeizmikus mérés zajlott. 1976–77-ben készültek a Gö-jelölésű szeizmikus reflexiós szelvények. 2004–2005-ben az RHK megbízására regionális szeizmikus reflexiós szelvényeket (Me–101, –102, –103, –103/a és –104) mértek összesen 82 500 fm hosszban, valamint megvalósult az Me–104 szelvény mélytomográfias felvétele. A szeizmikus nyomvonalak mentén magnetotellurikus szelvényezést is végeztek, emellett újraértékeltek a Gö-jelű, archív szeizmikus szelvényeket. 2017-ben 2 db újabb reflexiós szeizmikus szelvény (Me–105 és Me–106) mérésre került sor, összesen 30 382 m hosszban. E mérések feldolgozása 2018 elején készült el (Cserkész-Nagy et al. 2018).

2018 októberében kísérleti jelleggel került sor a Cserdi–01 jelű S_H-hullám szeizmikus reflexiós szelvény lemérésére. A mérések földtani-szerkezeti értelmezése a korábbi fúrasi és geofizikai kutatási eredményekkel jó korrelációt mutatott, sőt, ezen eredmények jelentős pontosítását is lehetővé tették. A mért szelvényen egyértelműen kijelölhető és követhető volt a fiatal (főként negyedidőszaki) fedőüledékek és az alaphegységi képződmények határa, a



1. ábra | A 3D mérési terület körvonala a korábbi 2D szeizmikus szelvények nyomvonalával és a kutatófúrások helyével
Figure 1 | Schematic of Geonic Area of the 3D seismic survey with the previous 2D seismic profiles and exploration boreholes

hagyományos P-hullám reflexiós szeizmikus szelvényvel nem vizsgálható szakaszokon is (Filipszki et al. 2018).

A jelen kutatási területre vonatkozó általános rétegtani ismereteket az 1:25 000 méretarányú földtani térkép magyarázója (Konrád et al. 2016), a szerkezeti képet és a neotektonikai folyamatokat pedig Sebe et al. (2017) foglalja össze. Mindezek ellenére viszonylag hiányosak az ismeretek az alaphegységet fedő fiatalabb képződmények rétegtrendjét, valamint a területen ismert szerkezeti elemek fiatal tektonikai aktivitását illetően.

Az RHK által 2017-ben összeállított földtani kutatási zárójelentés (Tungli et al. 2017) készítése óta a Nyugat-Mecsek általános földtani-rétegtani ismeretében nem történt alapvető változás. Azonban érdemes megemlíteni, hogy a BAF-kutatás új litosztratigráfiai ismereteket hozott, amelyek főleg a korábbi eredmények újraértékelését jelentik.

Földtani háttér

A Nyugat-Mecsek földtani-szerkezeti alapvonásait az összetett szerkezetű Kővágószőlősi-antiklinális, és az azt észak és dél felől lehatároló, NyDNy–KÉK-i csapású jelentős szerkezeti zónák (Hetvehely–Magyarszék-vonal és a Mecsekalja diszlokációs zóna) határozzák meg. A Kővágószőlősi-antiklinális alatt az északi, gyűrt előtér nélküli, a Mecsekalja-feltolódástól (Mecsekalja diszlokációs zóna É-i határvonala) a Sás-völgyig terjedő boltozatot értjük. Az antiklinálist NyDNy–KÉK-i csapású, enyhe keleties dőlésű tengellyel ÉK, K, DK-i irányokba fiatalodó, íves-páztás elrendeződésű, 4000–5000 m vastagságú alaphegységi, perm-triász korú, törmelékes és karbonátos kifejlődésű rétegtömb építi fel (Fülöp 1994).

Az alaphegységre miocén, pannóniai és negyedidőszaki üledékek települnek, amelyek a Kővágószőlősi-antiklinális déli és nyugati előterében tanulmányozhatók. A kutatási területen az aljzatot 0–500 m között változó vastagságú miocén képződmények borítják – D, Ny és (kisebb részben) ÉNy felé vastagodó kifejlődésben –, továbbá negyedidőszaki üledékek fedik le leggyakrabban 0–20 m vastagságban. A kiemelt alaphegységi hátakon, ahonnan nem pusztultak le a fedőüledékek, a negyedidőszaki képződmények legnagyobb vastagsága eléri a 30–40 m-t. A késő pannóniai időszak első felétől jellemző kompresszió a hegységperemi üledékek deformációját okozta. A szerkezeti mozgások következtében a pliocén–kvarter üledékek elterjedése, fáciése és vastagsága erősen változó (Konrád et al. 2016).

A vizsgálatra kijelölt terület földtani-szerkezeti alapvonásait három fő szerkezeti zóna határozza meg, amelyek mentén történő többfázisú tektonikai mozgások eredményeként jött létre, emelkedett ki a Nyugat-Mecseken belül a Kővágószőlősi-antiklinális NyDNy–KÉK-i csapású, enyhe K-i tengelydőlésű, íves-páztás, K felé fiatalodó földtani elrendezésű szerkezeti blokkja.

A kutatási terület közelítőleg 90%-ban a Kővágószőlősi-antiklinális szerkezeti blokkján helyezkedik el. Délkeleti

részen a Mecsekalja-feltolódás (Mecsekalja-öv É-i határvonala) kb. 1,5 km-es szakasza esik a területre, Ny–K csapásban. A Kővágószőlősi-antiklinálist átszelő Boda-Büdös-kúti zóna NyDNy–KÉK csapásban metszi ketté, nyugaton kissé bizonytalan helyzetben, kelet felé több ágra szakadva, a két szerkezeti blokk között max. 1,5 km-es oldalelmozdulási komponenseket eredményezve. A terület északnyugati részén a Hetvehely–Magyarszék-öv kb. 3,5 km hosszán szeli át a területet DNy–ÉK csapásirányban. Itt a Gorica-pikkelyre tolódik rá az antiklinális, melynek rétegsora megegyezik a nyugat-mecsekivel. A fő szerkezeti övek, vonalak iránya, csapása meghatározó a szerkezeti blokkok teljes területén. Az antiklinális területén jellemzőek az ezekkel a fő irányokkal párhuzamos szerkezeti pászták és az ezekre merőleges törések, törésirányok.

3D szeizmikus mérések tervezése

A nyugat-mecseki 3D szeizmikus mérés tervezésénél alapvető cél volt, hogy az 500–1000 m-es célmélység tartományban megbízható szeizmikus leképezést biztosítson a meglévő reflexiós felületek, illetve törés- és vetőrendszerek tekintetében.

A mérési terület felszínközeli geológiai felépítésének és a topográfia ismeretében a következő kihívásokkal kellett számolni:

- A terület É-i részén a nagy hullámterjedési sebességű, perm korú agyagkő- és homokkőrétegek közvetlen a felszínen vagy annak közelében vannak, így a szeizmikus forrás rugalmas energiájának csak kisebb része tud behatolni a kívánt mélységekbe. Az adott forrásból behatoló energia, illetve a jelek amplitúdója függ az adott közeg bementi akusztikus impedanciájától, és így a gerjesztett részecske sebesség amplitúdója ($V(t)$) függ az adott felszíni összlet rugalmas hullámokra vonatkozó terjedési sebességétől (C) és a közeg sűrűségétől (ρ).

$V(t) = P(t)/Z_0$ – ahol $P(t)$ a forrás által a közegre gyakorolt nyomásamplitúdó jele, $Z_0 = C_0\rho_0$, pedig a felszíni közeg bementi impedanciája.

Tehát például egy 4000 m/s sebességű, 2,2 kg/dm³ sűrűségű agyagkő esetében az ugyanolyan csúcserőjű vibrálás által keltett nyomásjel ($P(t) = F_{gf}(t)/A_{bp}$) csak fele-harmad akkora részecske sebesség amplitúdót eredményez, mint egy 1800 m/s hullámterjedési sebességű, 1,8 kg/dm³ sűrűségű agyagos-homokos felszín esetében (F_{gf} a földelő, A_{bp} a vibrátor bázislapfelülete).

A forrásoldali problémákhoz tartozik még, hogy a fent leírt gerjesztési körülmények mellett a források energiájának igen jelentős része a különböző típusú koherens zavarhullámok keltésére fordítódik, és csak kisebb arányban a hasznos P-hullámok gerjesztésére.

- Egy másik nagy kérdés volt, hogy milyen felületek fognak reflektálni, hiszen a korábban mélyített fúrásokban mért VSP-szelvények alapján a nagy sebességű perm-triász és idősebb korú formációk között nincsenek jelentős különbségek az akusztikus sebességekben, így

nem várhatók jelentős reflexióskoefficiens-értékek a rétegsorokban.

Tehát az erős, forrás keltette koherens zavarhullámok jelenlétében kellett a kis reflexiós koefficienssekkel jellemezhető mélységbeli határfelületekről származó, gyenge hasznos jeleket detektálni.

- Még ha ez sikerül is, ott a következő kihívás a reflexiós jelek megfelelő feldolgozása, a közös mélységpontokhoz (binnekhez) tartozó csatornák korrekciók (statikus korrekciók, NMO-korrekció) utáni hatékony összegzése, és az optimális stacking-, illetve migrált adattömb előállítása a rendkívül tagolt domborzati viszonyok és a laza fedőréteg gyorsan változó paramétereinek mellett. A 7×7 km²-es területen DNY–ÉK irányú dőlésvonal mentén a domborzat tengerszint feletti magassága 110 m-ről 430 m-re nő, meredek falú völgyekkel, löszkanyonokkal tagolva.

A mérési geometriát és a forrásparamétereket a fenti kihívások optimális kezelésére, az alapvető célkitűzések elérésére és természetesen a rendelkezésre álló anyagi források figyelembevételével kellett megtervezni. A viszonylag sekély kutatási célmélység miatt a forrás- és geofonvonalak távolságát úgy kellett megválasztani, hogy a 3D mérésekre definiált minimumoffset (a forrás- és geofonvonalak által meghatározott elemi négyzet átlója) kisebb legyen 500 m-nél, mivel a tapasztalati megfigyelések szerint a mini-

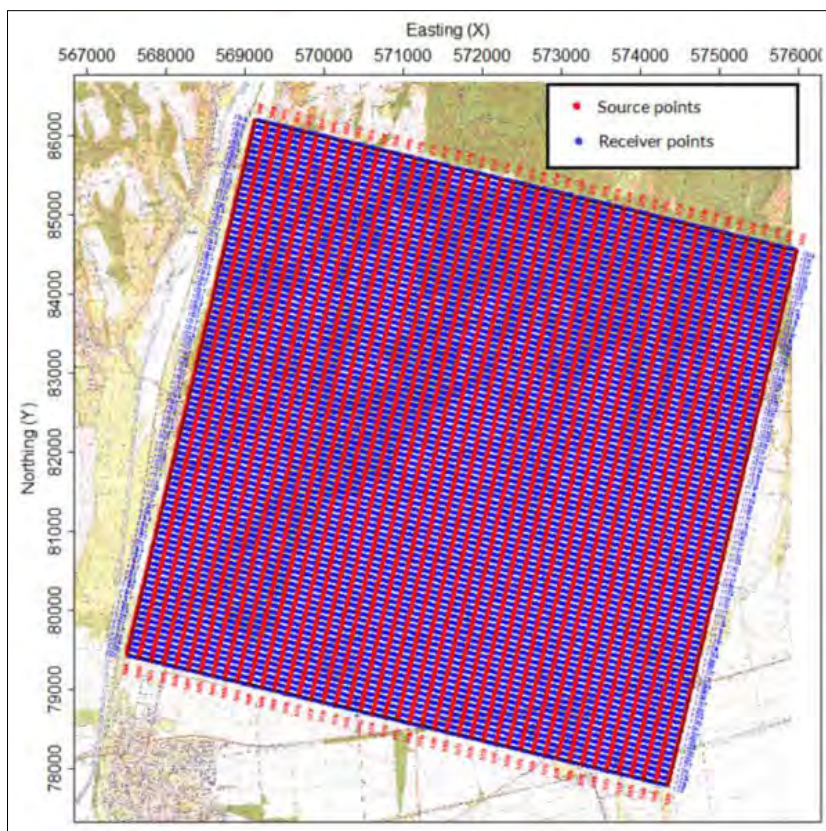
mumoffsetnél nagyobb mélységeknél várható csak értékelhető minőségű 3D leképezés a szeizmikus adatrendszer feldolgozása után. Természetesen minél sűrűbb geofon-, illetve forrásvonallal tudjuk lefedni a felszíni mérési területet, annál nagyobb fedésszámot érünk el, amivel az egyes szeizmikus feldolgozási lépéseket hatékonyabbá téve megbízhatóbb leképezést tudunk elérni.

Egy másik kritikus mérési paraméter a térbeli mintavételezés (a forrás- és geofonpontok távolsága a forrás- és geofonvonalak mentén), illetve az általa meghatározott felszín alatti binméret, ami alapvető a szeizmikus adatrendszer által biztosított horizontális és vertikális felbontóképesség szempontjából.

A Fresnel-zónák vs. horizontális felbontóképesség elméletéből kiindulva általában jóval ritkább térbeli mintavételezés is megfelelne adott sebesség- és dőlésviszonyok mellett a szeizmikus leképezés felbontóképességét illetően. Azonban a mérési terület domborzatának tagoltsága, a felszínközeli laza rétegek gyakori sebesség- és vastagságváltozásai a lehető legsűrűbb térbeli mintavételezést követelték meg. Az erdővel borított, tagolt domborzat miatt a preferált, vibrátoros jeladás mellett mindenképpen szükség volt robbantásos jelgerjesztés alkalmazására is.

E megfontolások alapján – a 3D leképezés szimulációjára szolgáló tervezőszoftverek segítségével ellenőrzötten – az alábbi mérési geometriát választottuk:

- geofonpontok távolsága: 20 m,



2. ábra | A tervezett elvi mérési elrendezés

Figure 2 | The planned survey geometry

- forráspontok távolsága: 20 m,
- geofonvonalak távolsága: 80 m,
- forrásvonalak távolsága: 160 m.

Természetesen ideális lett volna, ha a forrásvonalak távolságát is kisebbre, 80–120 m-re lehetett volna választani, ezt azonban egyrészt a rendelkezésre álló anyagi források nem engedték meg, másrészt a terület déli felén folytatott intenzív mezőgazdasági művelésben (alapvetően szója- és kukoricatáblákban) okozott károk a gazdálkodók felháborodását, ellenállását növelték volna, valamint a kártalanítási összeg nagyságát duplázták volna meg. (E döntés helyességét később igazolta, hogy a mérések idején, 2022 szeptemberében a sokéves átlag kétszeresét meghaladó eső hullott, ami jelentősen növelte a taposási zöldkárt.)

Ugyancsak a ritkább forrásvonal-hálózat kialakítása mellett szólt a mérési terület É-i felét fedő erdőben található művelési nyiladékok rendszere, amelyek kihasználása a robbantásos forráspontok számának minimalizálása és ezáltal a költségek csökkentése szempontjából kulcsfontosságú volt. A művelt erdőben egymástól 150–200 m távolságban húzódtak a nyiladékok, amelyek kitisztításával a vibrátorok számára járható utak keletkeztek.

Alapvetően a nyiladékok és a területen meglévő dűlőutak uralkodóan ÉÉK–DDNy-i iránya – amely az uralkodó felszíni dőlésirányt követi – miatt történt a forrásvonalak ÉÉK–DDNy-i irányának kiválasztása. Az érzékelő vonalak iránya ebből adódóan NyÉNy–KDK-i lett (2. ábra).

Az érzékelő vonalak (in-line) és forrásvonalak (x-line) irányának ilyenfajta megválasztásával az erdővel fedett részekre (a mérési terület kb. 30–35%-ára) a robbantásos pontok számát sikerült a teljes területet lefedő 15 660 forráspont 16%-ában minimalizálni.

Az érzékelő vonalak mentén regisztrálandó aktív csatornaszám kiválasztása a maximális célmélység (1000 m) kb. másfélszeresével egyenlő maximális in-line offset alapján történt ($80 \times 20 \text{ m} = 1600 \text{ m}$). Így 160–160 csatornával történt a regisztrálás az érzékelő vonalak mentén. Az aktív regisztrálási vonalak számának megválasztásánál arra törekedtünk, hogy megfelelő maximális offsetet biztosítsunk a forrásvonalak irányában is, és az ideálisnak tartott 0,8–0,85 aspect ratio (az aktív felvevő rendszer forrásvonal-irányú és érzékelővonal-irányú méreteinek hányadosa) közelében legyen a felvevő rendszer ilyen paramétere.

A szeizmikus mérés közbeszerzési pályázatában műszaki követelményként szerepelt a kábeles, real-time minőségellenőrzést lehetővé tevő mérőrendszer alkalmazása, a fentebb említett, várhatóan alacsony jel/zaj viszony miatt. Hasonló okból a jelenleg többnyire elfogadott, költség-takarékos, egy geofon per mérőcsatorna elrendezés helyett 6 geofonos, 10 m hosszúságú in-line geofon csoportot követeltünk meg a jel/zaj viszony javítása érdekében.

A felvételezési zaj – a szél, eső, erdei fakitermelés, vasúti és közúti közlekedés által keltett időszakos zajok – real-time monitorozása elengedhetetlen volt az aktuális jel/zaj viszony optimalizálása érdekében. A kábeles rendszer elősegítette, hogy a nagyon zajos időszakokra a felvételezés

szüneteljen, vagy a mérés időlegesen egy kevésbé zajos területen folytatódjon. Így lehetőség volt a nagyon zajos vibrátoros felvételek későbbi megismétlésére, továbbá a robbantásos forráspontokon az optimális fojtási technológia kialakítására és adaptálására az eltérő felszínközeli rétegrendű, erdős területeken.

A forrásoldalt tekintve, nagyon szerencsésnek bizonyult a 25 tonnás HEMI50 vibrátorok (6. ábra) választása, mert ezek viszonylag kis mérete lehetővé tette a keskeny erdei nyiladékok kihasználását, amivel mintegy felére sikerült csökkenteni az előzetesen betervezett robbantásos gerjesztési pontok számát a természeti értékek károsítása nélkül.

1. táblázat
Table 1

A tervezett mérési geometria paraméterei
Planned recording geometry parameters

Mérési geometria	
A méréssel lefedett felszíni terület	7×7 km ²
Geofonvonalak iránya	NYÉNY–KDK
Geofonvonalak távolsága	80 m
Geofonköz	20 m
Geofon per csatorna	6
Geofoncsoport hossza	10 m
Elvi geofonpontok száma	31 500
Forrásvonalak iránya	ÉÉK–DDNY
Forrásvonalak távolsága	160 m
Forráspontköz	20 m
Elvi forráspontok száma	15 660
Regisztrált aktív geofonvonalak száma	32
Vonalanként regisztrált csatornák száma	160
Regisztrált csatornaszám	5 120
Elvi maximális fedésszám	160
Forráspont per salvo	4
Forráspont per km ²	312,5
Min. offset	179 m
Max. offset	2 041 m
Aspect ratio	0,78

A 3D szeizmikus mérések előkészítése és kivitelezése

A mérési területet számos település (Bükkösd, Boda, Bakonya, Bicsérd, Szentlőrinc és Cserdi) kül- és belterületét érintette (1. ábra). A lakott területek mellett komoly akadályt jelentett még a mérés kivitelezése szempontjából a 6. sz. főút, valamint a Szentlőrinc–Bükkösd közötti forgalmas út a mérési terület Ny-i szélén.

Az érintett hatóságokkal, önkormányzatokkal, a kezelők helyi megbízottjaival az RHK által megbízott alvállalkozó, a Geosupport Kft. vette fel és tartotta a kapcsolatot a mérés előtt és annak folyamán. Az illetékes földhivataloknál ki- gyűjtött helyrajzi számok alapján a mérés által érintett föld-

tulajdonosokat, ill. a bérlőket levélben értesítették a szeizmikus mérésekről. Az engedélyeztetés része volt a folyamatosan élő telefonszám és zöldszám fenntartása, ahol a gazdák megtehették bejelentéseiket, és információt kaphattak a mérési program őket érintő aktuális előrehaladásáról.

A terepi tevékenység kezdetét közvetlenül megelőzte még egy intenzív kommunikációs kampány az RHK részéről a helyi hírlapban, tévében, az önkormányzatok hirdetőtábláján közzétett tájékoztató révén, megismertetve a lakossággal a mérések célját, helyét és tervezett időzítését. Az RHK képviselői lakossági fórumokat tartottak, valamint egy lakossági bemutatót szerveztek Bodán, a terepi mérések megkezdése előtt az üzemelő vibrátorokkal és a mérőrendszer elemeinek bemutatásával. Itt az RHK vezetői és a szeizmikus csoport irányítói megnyugtató válaszokat adtak a lakosság részéről felmerülő kérdésekre. Az önkormányzati vezetők részéről szintén mindenütt pozitív támogatás volt tapasztalható.

A kutatás az ÉK-i részen egy kisebb, Natura 2000 státusszal rendelkező területet érintett, ahol a méréssel kapcsolatos tevékenység csak szeptember 1. után kezdődhetett el.

A mérési terület északi, erdős részein több vadásztársaság is rendelkezik vadászati területtel, akik részéről igényként felmerült, hogy szeptember vége előtt ne zavarja a szeizmikus mérés a vadászatot. Ezért a méréseket a terület DK-i sarkából indítottuk. Természetesen az erdei források kitűzését és a robbantólyukak fúrását a mérések tervezett szeptember eleji kezdése előtt már két hónappal el kellett kezdeni, a délebbi erdőterületektől észak felé haladva.

A terepi adottságok és a számos lakott település érintése miatt a szeizmikus méréseket alapvetően vibrátoros forrással terveztük kivitelezni. Azonban már az előzetes tervezési fázisban nyilvánvaló volt, hogy a mérési terület

bizonyos részein a vibrátoros forrás nem alkalmazható, a sűrű erdőkkel fedett, tagolt domborzatú területeken, ahová a vibrátorok nem tudnak behajtani, robbantásos mérésre lesz szükség.

A GT által hónapokkal korábban végrehajtott tesztfúrások alapján várható volt, hogy a vékony talajréteg alatt a Bodai Agyagkő hol mállottabb, hol pedig igen kemény rétegeiben kell a robbantó lyukakat lefúrni, emiatt csak a sűrített levegős, down-hole kalapácsos fúrési technológia lehet a megoldás az erdős területek nagyobbik részén. Kivételt képezett a Cserdi-Bükkösd környéki löszös dombvonulat, ahol sok helyen 10 m-t is meghaladó vastagságú löszben kellett a fúróknak dolgozniuk.

A költségek minimalizálása és a mérési idő optimalizálása miatt már előzetesen döntés született a fúrandó robbantólyukak mélységéről, amit 5 m-ben határoztunk meg. Ahol a kőzet keménysége miatt ez nem volt lehetséges, ott 3x3 méteres furatokból álló lyukcsoport létesült (Baldrian et al. 2013).

A terepi vibrátoros forrás tesztek a teljes mérőeszköz-állományra kiterjedő technikai audit után kezdődtek el a terület DK-i sarkában, 2022. szeptember 3-án.

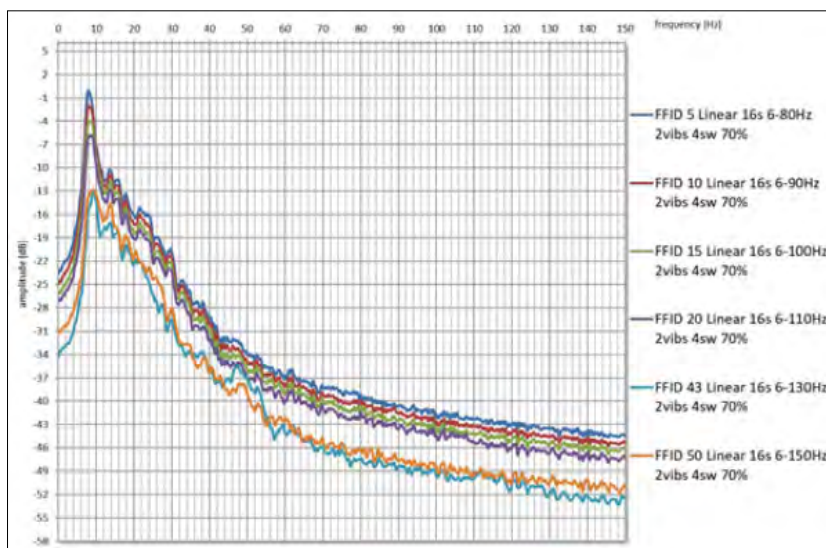
A vibrátoros forrás alkalmazásánál a vibrátorok száma, a vibrátor kimenő teljesítménye, az egy forrásponton történő vibrálások száma, a sweepepek hossza és frekvenciatartománya változtatható. Ezeket a paramétereket az adott helyen elvégzett tesztek során kell az adott szeizmo-geológiai viszonyoknak megfelelően kiválasztani, optimalizálva a jel/zaj viszony (adatminőségi) elvárásokat a ráfordítandó költségekkel szemben (Deák, Gombár 2015).

A vibrátoros felvételek jel/zaj viszonya az alábbiak szerint függ a forrásparaméterektől:

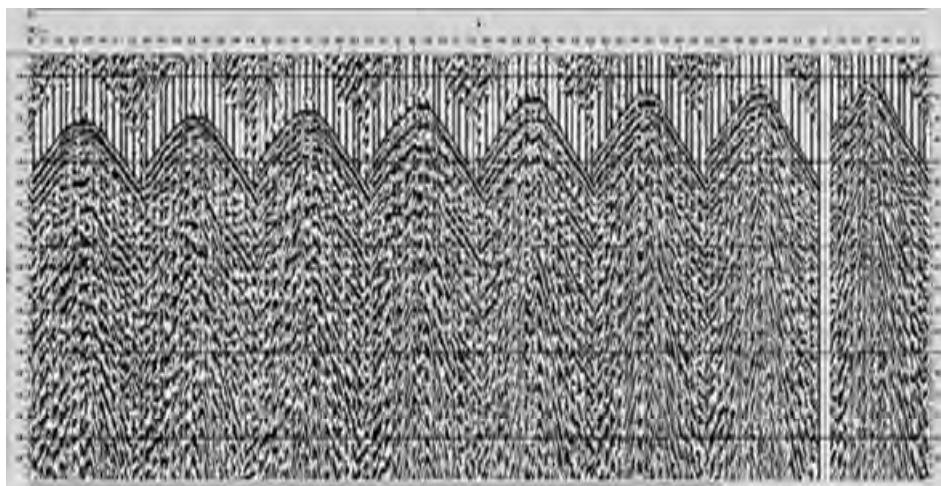
$$S/N \approx Pf \cdot Dr \cdot Nv \cdot [Ns \cdot SL]^{1/2},$$

ahol

Pf – egy vibrátor csúcseréje,



3. ábra | A különböző sweeppfrekvenciákkal készített tesztfelvételek amplitúdóspektrumai
 Figure 3 | Amplitude spectra of test records prepared with different sweep frequencies



4. ábra | A kiválasztott 6–120 Hz, 2×2×16 sec sweeppel készített felvétel részlete
Figure 4 | A sequence of the field record with the selected 6–120 Hz, 2×2×16 sec sweep

Dr – a meghajtási szint (20–80%),
 Nv – a vibrátorok száma,
 Ns – az egy forrásponton összegzett sweepek száma,
 SL – a sweephossz.

A forrásparaméterek tesztelése során két HEMI 50 vibrátorral, 80%-os kimenő erővel készítettünk tesztfelvételeket 6 Hz-es sweep kezdő frekvenciától a 110–130 Hz-es felső határfrekvenciáig, 12, 16 és 20 szekundum hosszúságú sweepek alkalmazva. Az egy helyben történő vibrálások száma 2, 3 és 4 volt.

2. táblázat | A kiválasztott felvételezési és forrásparaméterek
Table 2 | The selected recording and source parameters

Felvevő műszer	
Típus (kábeles rendszer)	SERCEL 428
Felvételhossz	4 sec
Mintavétel	2 msec
Zajelnyomás (vibroszeiz esetén)	diversitystack
Antialias szűrő és fázisa	208 Hz, Lin. phase
Korreláció	Afterstack
Vibrátoros forrás	
Vibrátorok típusa	HEMI 50, Univib
Vibrátorok száma	2×2 + 1 tartalék
HEMI vibrátorok csúcserője	50000 lbs/vib.
Univib vibrátor csúcserője	24000lbs/vib.
Sweep hossza	16 sec
Driveszint	70%
Sweep száma per VP	2×2; 2×3
Lakott területeken per VP	1×4
Sweepfrekvencia	6–120 Hz
Vibrátorcsoport hossza	10 m egy vonalban

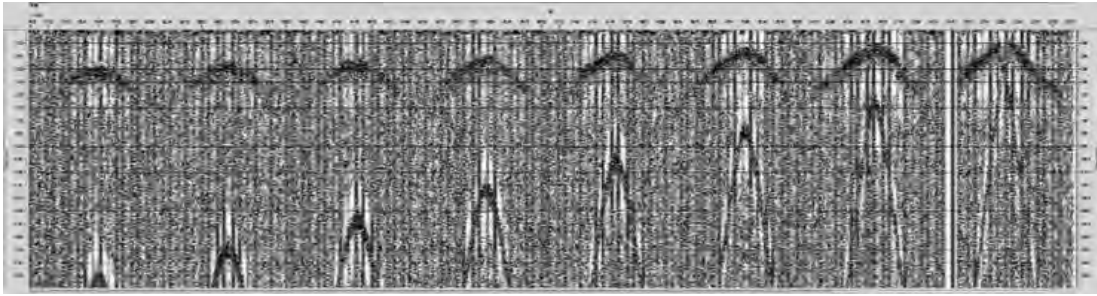
A tesztfelvételek két ponton készültek. Az egyik helyszín a mérési terület DK-sarkában, a 6. sz. főút mellett, a Mecsekalja diszlokációs zónától délre a levetett szárnyon helyezkedett el, ahol a fiatal fedőüledékek vastagsága elérte a 200–300 m vastagságot. Itt a kísérleti felvételeken megfigyelhetők voltak a klasszikus, sekély reflexiók hiperbola görbéi. A másik helyszín Boda község mellett volt, ahol a BAF mélysége mindössze néhány méter volt a felszíntől. Ezekon a tesztfelvételeken semmiféle reflexiós jel nem volt megfigyelhető.

A tesztfelvételek ProMax munkaállomáson történt feldolgozása és vizsgálata alapján kiválasztott forrásparamétereket és a felvételi paramétereket a 2. táblázat tartalmazza. A 3. ábra mutatja a tesztfelvételek amplitúdóspektrumainak összehasonlítását, a 4. ábrán pedig egy tesztfelvétel forráspontközeli geofonvonalainak részlete látható.

A sweep felső határfrekvenciájának megválasztásánál a különböző felső frekvenciával készített felvételeket keskeny sáváteresztő frekvenciatartománybeli szűrésnek vetettük alá, kiderítendő, hogy milyen magas frekvenciás sávban kapunk még koherensnek tekinthető energiát a sekélyebb reflexiós szintekről. Az 5. ábra mutatja a 110–120 Hz-es áteresztett frekvenciasávban a kiválasztott paraméterekkel készített felvételt. Látható, hogy – elsősorban a forrásközeli geofonvonalak csatornái – még határozott nagyfrekvenciás jeltartalommal bírnak. Ezért a sweep felső határfrekvenciáját 120 Hz-re választottuk, így nyerve egy 4 egész 1/4 oktávós (6–120 Hz) sáv szélességű, megfelelően nagy felbontást biztosító vibrátorjelet.

Mivel a robbantási mélység előre elhatározottan 5 m volt, így a robbantásos tesztmérésnél csak az optimális töltetsúlyok kiválasztása volt a feladat. Az 5 méteres töltetmélységekkel 0,45 kg, 0,9 kg, 1,35 kg és 1,8 kg-os robbanótöltetekkel készültek kísérleti felvételek szülő lyukakból. Ezenfelül ellenőrzésképpen egy 10 m mély lyukból is készült felvétel 1,8 kg-os töltettel az adott teszt helyszínén.

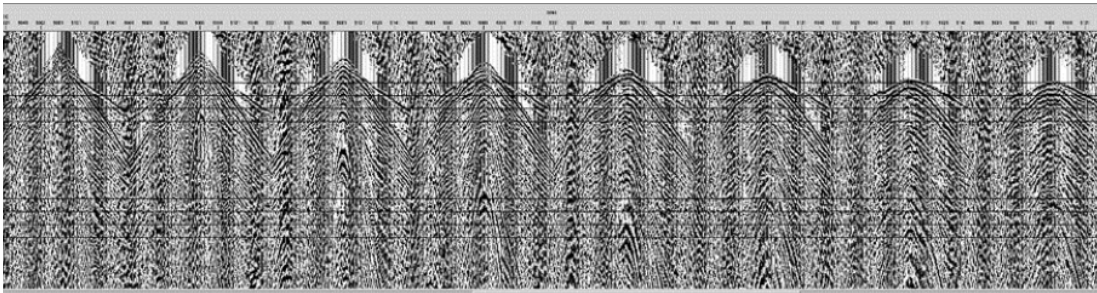
A felvételek összehasonlítása során (8. ábra) az 1×5 m lyukból, 1,8 kg töltettel készült felvételt minősítettük a leg-



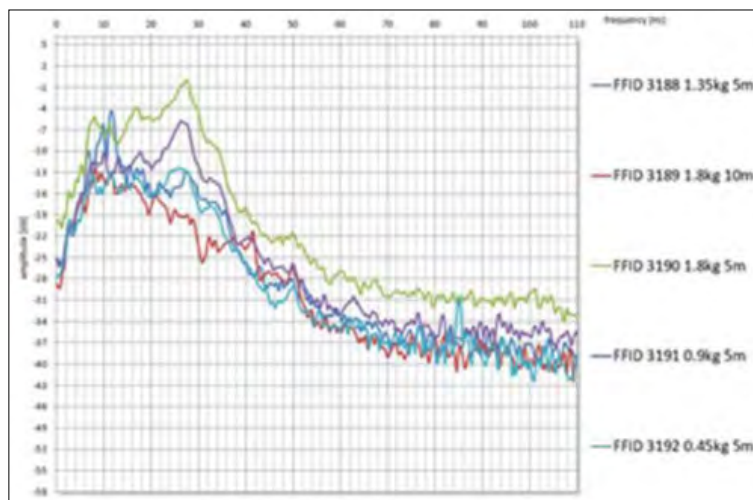
5. ábra | A kiválasztott sweeppel készített felvétel magas frekvenciás tartalma 110–120 Hz tartományban
Figure 5 | A sequence of the record with selected sweep in the high frequency band of 110–120 Hz



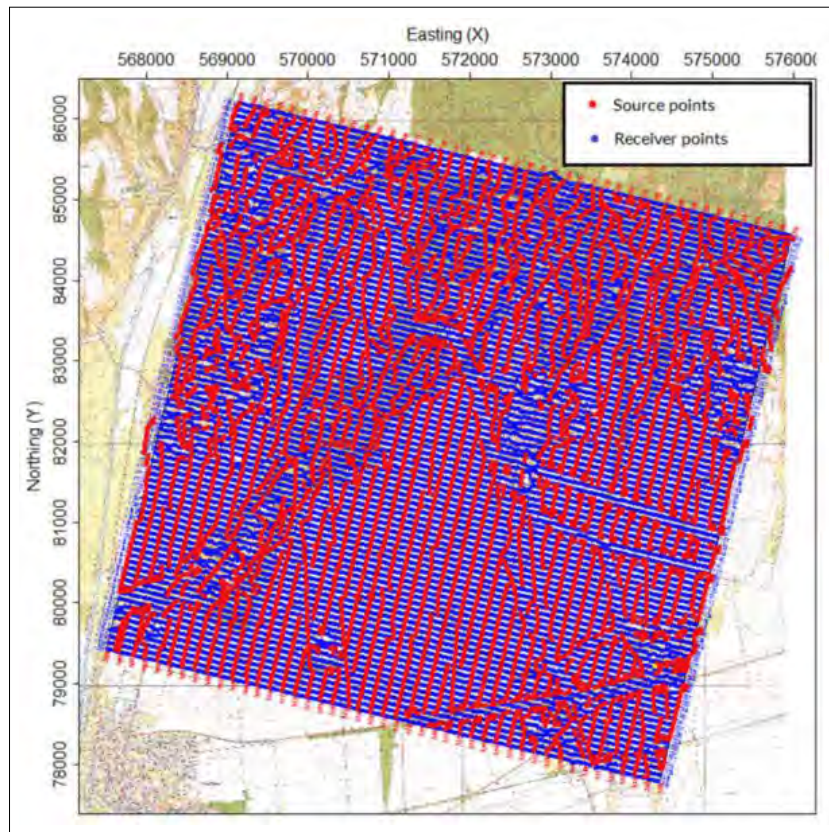
6. ábra | 25 tonnás HEMI 50 típusú vibrátorok működés közben
Figure 6 | HEMI 50 type vibrators on the site – with weight of 25 tons



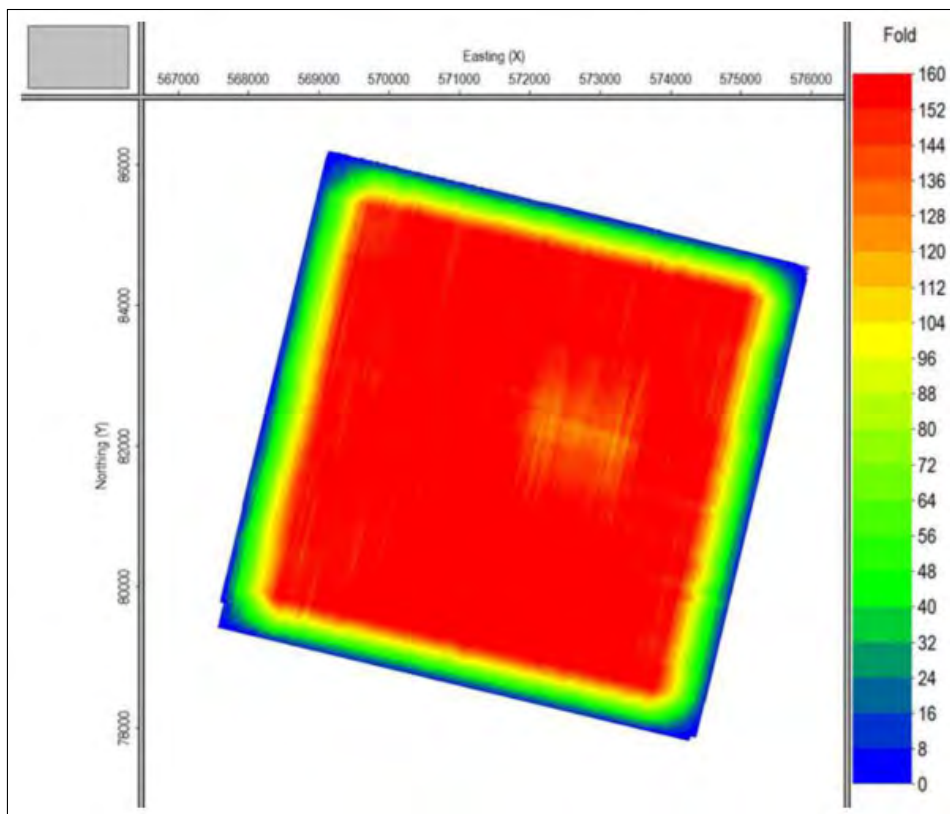
7. ábra | Robbantásos terepi felvétel, 5 m töltetmélység, 1,8 kg töltet
Figure 7 | Explosive field record with source effort – 5 m depth, 1.8 kg explosive



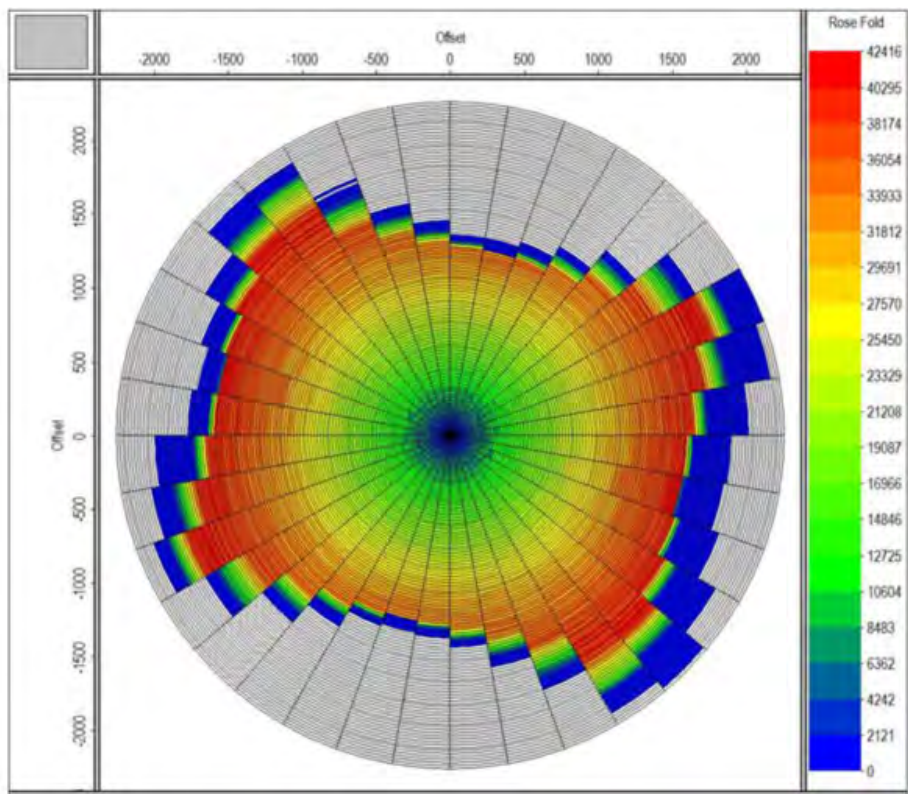
8. ábra | Robbantásos teszt felvételek amplitúdóspektrumainak összehasonlítása
Figure 8 | Amplitude spectra of explosive test records



9. ábra | A ténylegesen megvalósult forráspont- és geofonpont-eloszlás
Figure 9 | Project postplot map with the executed source and receiver points



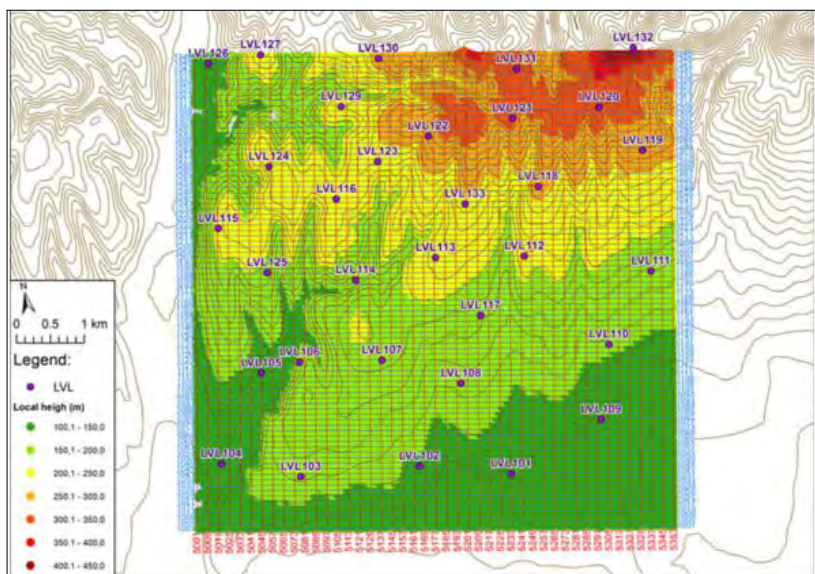
10. ábra | A megvalósult fedésszámeloszlás a teljes offsettartományra a mérési területen
Figure 10 | Resulting fold distribution for all offsets on the surveyed area



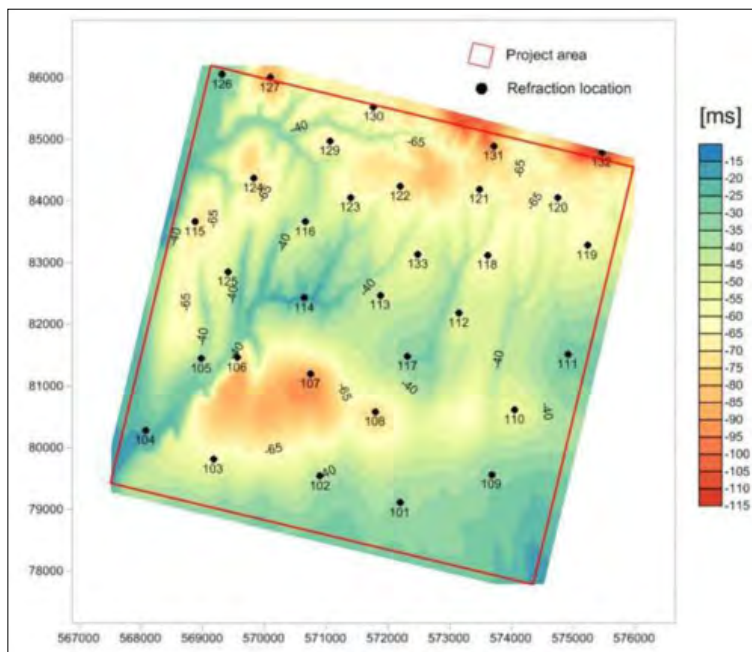
11. ábra | A megvalósult fedésszám-offset-azimut eloszlást bemutató rózsadiagram
 Figure 11 | Resulting rose diagram representing the fold offsets and azimuths statistics

jobbnek, így ez a töltetsúly lett a kiválasztott paraméter a robbantásos mérésnél (7. ábra). A 10 m mély lyukból lőtt felvétel esetében csak a háttérzaj alacsonyabb szintje volt az egyedül megfigyelhető különbség a sekélyebb robbantási mélységgel készült felvétellel szemben. Koherens reflexiók jelek ott éppen úgy nem látszottak, mint az 5 m-es töltet esetében, viszont a felszíni P és SV zavarhullámok különböző módusai uralták a felvételeket.

A csak robbantással gerjeszhető forráspontok esetében a kísérletek alapján jelentős szerepet játszott az alkalmazott fojtás minősége. A béléscsővel ellátott lyukak mellé megfelelő mennyiségű, zsákokba töltött kőzetörlemény került, amellyel a robbanóanyag betöltése után a felszínig feltöltötték a lyukat. Ahol a topográfia és megközelíthetőség azt lehetővé tette, ott a betöltött tömedékelt lyukat



12. ábra | A mérési terület tengerszint feletti magassága a megvalósult sekélyrefrakciós mérések helyével
 Figure 12 | Elevation map of the survey area with shallow refraction locations



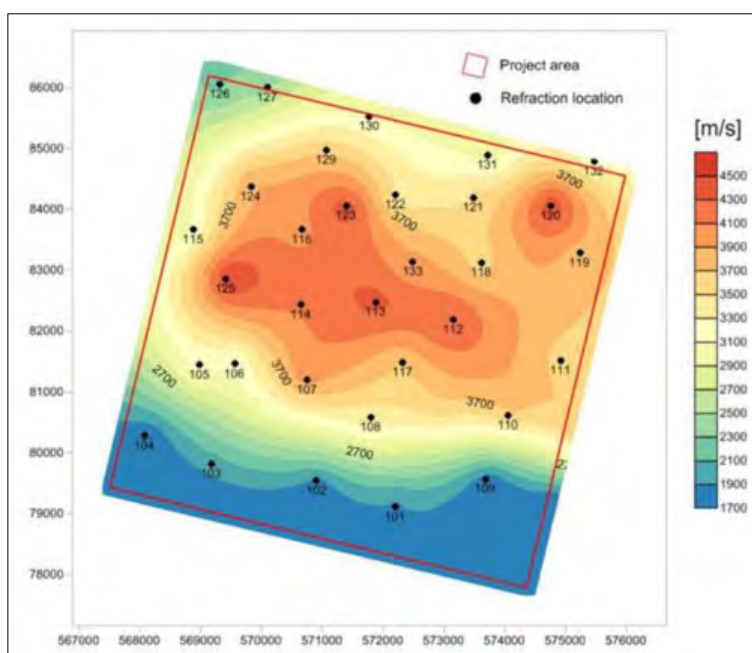
13. ábra A +100 m tengerszint feletti magasságú dátumra számított statikus korrekciós értékek eloszlása
 Figure 13 Distribution of field static correction values calculated to +100 m elevation datum

közvetlenül az elrobbantás előtt még vízzel is feltöltötték a jobb energiaátadás érdekében.

A 9. ábra mutatja a megvalósult forrás- és geofonpont-eloszlást, a 10. ábrán pedig az látható, hogy a mérési terület fedésszámeloszlása nagyon kedvezően alakult. Boda község közvetlen környezetét kivéve jól teljesül a tervezett 160-szoros fedésszám elérése. Boda községben a nagyon szűk utcák és az alattuk futó közművek nem tették lehetővé a biztonságos, kockázatmentes vibrálást még a 14 tonnás,

speciálisan lakott területeken belüli mérésre alkalmas kis vibrátorokkal (Univib) sem.

A többi érintett településen az Univib vibrátorral, megnövelt sweepszámmal és a rezgési sebesség mérés kontrollja mellett sikerült megfelelő számú forráspon-tot megvibrálni, megtartva a tervezett fedésszámot. A 11. ábra mutatja be az úgynevezett rózsadiagram segítségével a megvalósult fedésszám-offset-azimut eloszlást.



14. ábra A felszíni laza rétegek alatt elhelyezkedő nagy sebességű öszslet sebességeloszlása
 Figure 14 Velocity distribution of the high velocity formations located under weathered layers

A 3D adatgyűjtés mellett külön figyelmet fordítottunk a – megbízható statikus korrekció meghatározásához elengedhetetlen – felszínközeli szeizmogeológiai modell megalkotását szolgáló sekélyrefrakciós mérések elvégzésére. A 12. ábra mutatja a mérési terület topográfiai modelljét és a sekélyrefrakciós mérési pontokat.

A terepi statikus korrekciók meghatározása a sekélyrefrakciós mérési pontok rétegvastagság- és rétegsebességadatai alapján, a felszíni magasságok figyelembevételével, interpolálással történt az egyes geofon- és forráspontokra, a +100 méteres tengerszint feletti vonatkozási szintre (13. ábra).

A statikus korrekciós értékek területi eloszlása, de még inkább a laza rétegek alatt elhelyezkedő rétegek hullámterjedési sebességének eloszlása megmutatja a terület DK-i sarkában húzódó Mecsekalja nagyszerkezeti vonal csapásirányát (14. ábra).

A terepi adatgyűjtést folyamatos, különböző szinteken megvalósuló minőségellenőrzés kísérte. A minőségellenőrzés része volt a regisztrált terepi felvételek mérési geometriájának, jel/zaj viszonyának napi ellenőrzése egy PC-alapú munkaállomásra telepített ProMax feldolgozórendszer segítségével. Itt a felvételek ellenőrzése mellett egy, a beérkező adatokat folyamatosan beépítő 3D terepi előfeldolgozás is készült. Az adatgyűjtés befejezése után pedig egy minőségellenőrző brute-stack és egy post-stack 3D migrációs adatrendszert is előállítottak.

3D szeizmikus adatfeldolgozás

A számítógépes adatfeldolgozást szintén a Geofizyka Torun végezte, a cég toruni feldolgozó centrumában, alapvetően a ProMax/SeisSpace alapú feldolgozócsomaggal és egyéb kiegészítők, pl. a Hampson–Russel statikus korrekciós modulok alkalmazásával.

A feldolgozóknak az alábbi speciális kihívásokat kellett kezelniük:

- Erős koherens zavarhullámok jelenléte mind a vibrátoros, mind a sekély lyukakból lőtt robbantásos felvételek esetében: hanghullámok, ground-roll, direkt S-hullám-beérkezések (gyenge jel/zaj viszony);
- Rendkívül változatos topográfia (110–430 m közötti tszf. magasságok), a felszínközeli laza rétegek gyakori vastagság- és sebességváltozásai – bonyolult statikus korrekció;
- A terület déli részének kivételével már a felszíntől nagy sebességű perm-triász kemény kőzetek jelenléte (nagy bementi hullámimpedancia a felszínen – gyenge bemenő energia);
- Részben ismeretlen, bonyolult tektonika a mélyebb zónákban; idős, nagy sebességű kőzetösszletek, amelyek között kicsi az akusztikusimpedancia-különbség – gyenge reflexiók.

Az adatfeldolgozás az alábbi munkafázisokra volt felosztható:

1. fázis:
 - Adatok betöltése (demultiplexálás – SEGD-ből SEGY formátumra);
 - Mérési geometria helyességének ellenőrzése;
 - Csatornák editálása.
2. fázis:
 - Monofrekvenciás zajok kiszűrése;
 - Minimumfázisú jelkonverzió a vibrátoros felvételekre;
 - A szeizmikus adatrendszer standardizálása – vibrátoros forrással és robbantásos forrással készült felvételek illesztése (minimumfázisú jel – SEG standard polaritás);
 - Koherens és véletlen zajok csillapítása;
 - Dekonvolúció.
3. fázis:
 - A 3D szeizmikus felvételek refrakciós első beérkezéseinek kijelölése;
 - Elsődleges statikus korrekció számítása Hampson–Russel-féle GLI szoftverrel;
 - A számított adatrendszer kalibrálása a terepi sekélyrefrakciós mérések eredményeihez;
 - Statikus korrekció meghatározása;
 - Maradék koherens és véletlen zajok csillapítása;
 - A beérkezési idő szerinti amplitúdócsökkenés kompenzálása;
 - Felszínkonzisztens amplitúdóskálázás;
 - Reziduális statikus korrekció és sebességanalízis (3 iterációs lépésben);
 - Trim statikus korrekció.
4. fázis:
 - Szerkezetorientált modellalapú statikus korrekció (SOMTS);
 - Többszörös reflexiók csillapítása (Radon-transzformáció alapján);
 - Összegzés előtti jel/zaj javítása;
 - Felszínkonzisztens amplitúdóskálázás;
 - Szeizmikus csatornainterpoláció;
 - DMO és 4. sebességanalízis;
 - Mute and CDP-összegzés.
5. fázis:
 - Végző összegzés koherenciajavító utóműveletekkel;
 - CDP-összegzés utáni (PostStack) időmigráció;
 - PostStack szerkezetorientált simítás, jel/zaj javítás (Structure Oriented Smoothing – SOS).
(2. Számú végeredmény: PostStack időmigrált adattömb)
6. fázis:
 - Sebességmodell véglegesítése;
 - Izotróp Kirchoff PreStack migráció és sebességanalízis 2 iterációval;
 - Maradék Move-out-korrekció (RMO);
 - Végző összegzés előtti időmigráció (PreStack time migration);
 - Automatikus erősítés szabályozás, skálázás;

– PostStack feldolgozás – SOS.

(2. Számú végeredmény: PreStack időmigrált adattömb)

Már a terepi minőségellenőrző feldolgozás során látszott, hogy a mérési anyag alacsony jel/zaj viszonya miatt nem célszerű ragaszkodni a valódi amplitúdó megőrzéséhez, hanem jobb minőségű összegszelvényeket lehet előállítani az automatikus erősítés szabályozás (AGC) alkalmazásával. Így a kezdetektől a valódi amplitúdójú feldolgozással párhuzamosan készült egy AGC-s verzió is minden lépésnél.

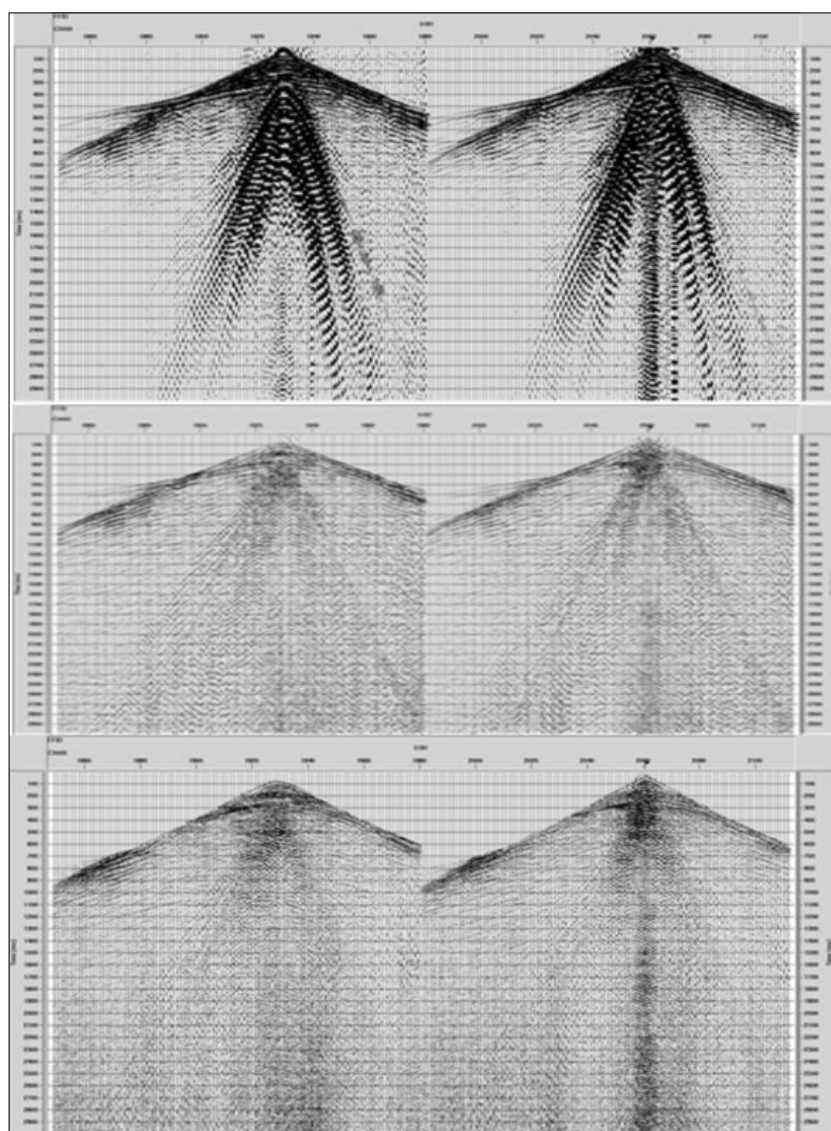
Mivel a felvételek túlnyomó többségén a forrás keltette zajok és egyéb inkoherens háttérzajok domináltak, szükség volt egy erőteljes zajelnyomásra a bonyolultabb többsatornás feldolgozási lépéseket megelőzendően. Nagyon hatékonynak bizonyult a rendkívül erős ground-roll elnyomására alkalmazott adaptív térbeli szűrés (15. ábra). A tesztelt F-K szűrés a felvételek gyenge jel/zaj viszonya mi-

att nem adott elfogadható eredményt. Természetesen szükséges volt egy felszínkonzisztens jelszint kiegyenlítésre is a területet jellemző, rendkívül eltérő forrás- és vevőkondíciók miatt.

A robbantós és vibrátoros forrás eltérő fázisú és spektrumú jeleket produkált, így a zajszűrések után közös fázisra kellett transzformálni a jeleket.

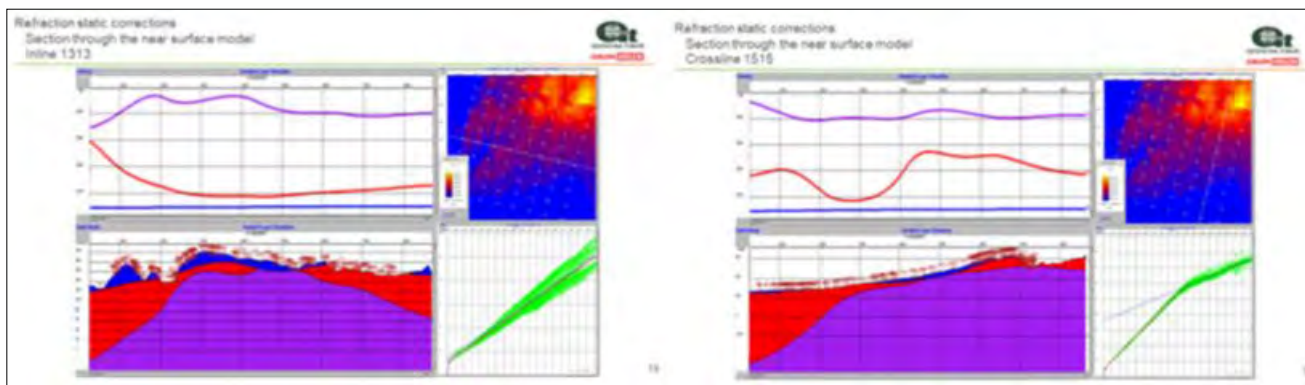
A vibrátoros forrású, elméletileg zéró fázisú jeleket minimumfázisúvá transzformálva illesztettük a robbantással keltett minimumfázisú jelalakhoz. A jelek tehát innentől kezdve végig minimumfázisúak és a SEG sztenderdnek megfelelő polaritásúak lettek. Azaz a pozitív reflexiós koefficiens negatív polaritású jelet eredményez a szeizmikus felvételen és a feldolgozott szeizmikus szelvényeken.

A számos tesztelt dekonvolúciós eljárás közül a spiking dekonvolúció adta a legjobb eredményt, így azt alkalmazták 120 ms operátor hosszal és 0,1% fehérzaj-hozzáadással.



15. ábra | Két geofonvonal regisztrátuma ground-roll szűrés előtt és után, valamint felszín konzisztens dekonvolúció után

Figure 15 | Recorded data of two geophone lines without/with ground-roll elimination, and after surface consistent deconvolution



16. ábra | Az első beérkezésekből meghatározott felszínközeli sebesség-vastagság modellek egy-egy in-line (balra) és cross-line (jobbra) szelvény mentén

Figure 16 | Near surface velocity and thickness models determined by first-break statics along an inline (left) and a crossline (right) section

Az előzőekben ismertetett okok miatt a megfelelő statikus korrekció meghatározása volt az egyik legkritikusabb feldolgozási művelet. A terepi sekélyrefrakciós mérésekből meghatározott statikus adatrendszert a +100 m-es tszf. magasságú dátumszintre vonatkoztattuk. Azonban ebben az esetben a terület É-i részén, ahol 300–430 m feletti a domborzat tengerszint feletti magassága, a sekélyreflexiós szintek levágásra kerülnének a nulla idő fölé történő statikus tolások által. Az ilyen adatvesztést elkerülendő, az egész adatrendszeren egy –500 ms-os konstans tolást alkalmaztunk az összegzések előtt. A sekélyrefrakciós statikus korrekció topográfiához történő finomítása a terepi felvételek első beérkezéseinek kijelölése után a Hampson-Russel GLI (Generalized Linear Inversion) felszínközeli sebesség–vastagság modell meghatározásával történt (16. ábra).

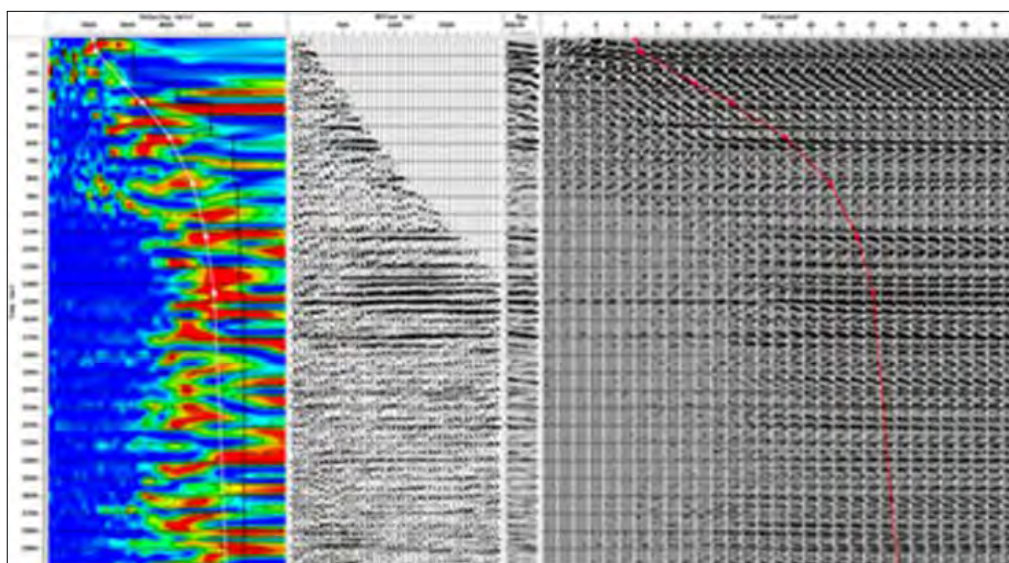
A statikus korrekció meghatározását célzó különböző módszerekkel történő finomításainak jel/zaj viszonyt növelő hatását és a szeizmikus leképezés javításának fokozatait a 18., 19. és 20. ábra mutatja be. Nagyon látványosan

követhető nyomon az egyre pontosabb statikus korrekció leképezést javító hatása a 21. ábra időmetszetein is.

A sebességanalízist egy 500×500 m-es hálózat mentén végeztük 11×11 binés „super gather”-ek formálásával. Az északi, alapkőzet-kibúvások területén már a felszíntől kezdve 3000–4000 m/s összegzési sebességek adódtak. Nagyobb beérkezési időknél a semblance már alig volt érzékeny az összegzési sebesség változtatására (17. ábra).

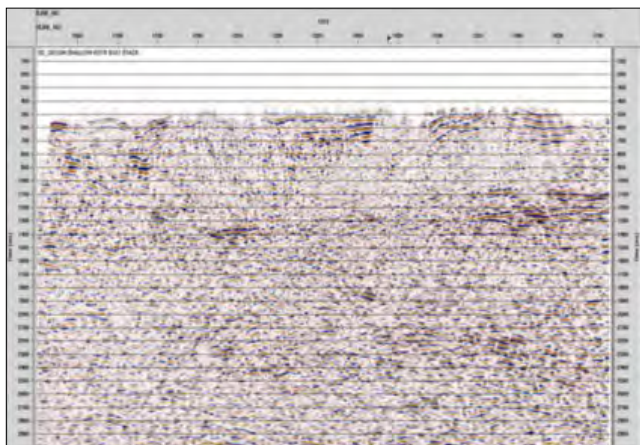
Természetesen minden újabb sebességtérrel készített összegzést egy-egy automatikus reziduális statikus korrekciós javítási művelet követett. Négy ilyen iterációs ciklus lefuttatása után érdemi javulás már nem volt elérhető a jel/zaj viszonyban.

A véglegesnek tekintett sebességtérrel végrehajtott CDP-összegzés után előállt a 3D összegzett adattömb, amely a PostStack migráció bemenetét képezte. A Post-Stack migráció a Kirchoff-féle migrációs algoritmus szerint készült. Az alábbiakban közölt összegzelszvények és migrált időszelvények hosszúsága 7 km, és az adatokat 3 sec TWT-ig jelenítettük meg.



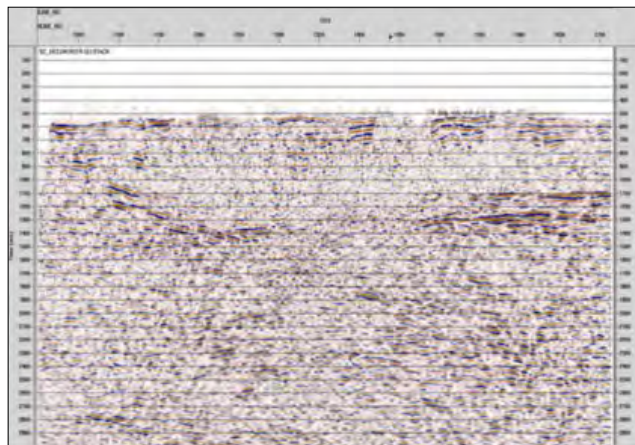
17. ábra | Sebességanalízis – semblance a sebességfüggvénnyel, NMO-korrigált CDP gather, összegcsatorna, CVS panel

Figure 17 | Velocity analyses: semblance with velocity function, NMO corrected CDP gather, stacked channel, CVS panel



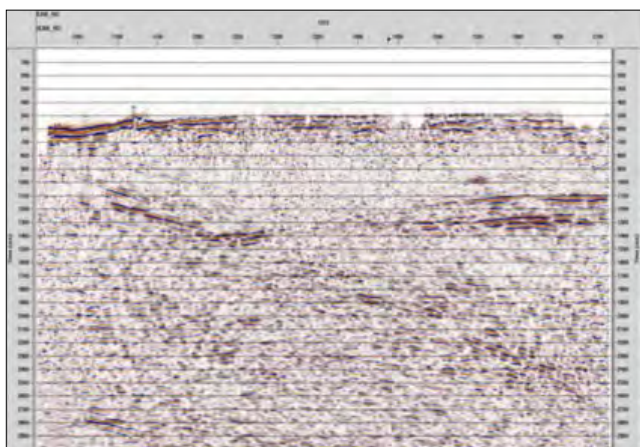
18. ábra | 1330 in-line összecszelvény a sekélyrefrakciós statikus korrekció alkalmazása után

Figure 18 | Stack section of inline 1330 with shallow refraction static correction



19. ábra | 1330 in-line összecszelvény az első beérkezéses statikus korrekció alkalmazása után

Figure 19 | Stack section of inline 1330 with first break static correction

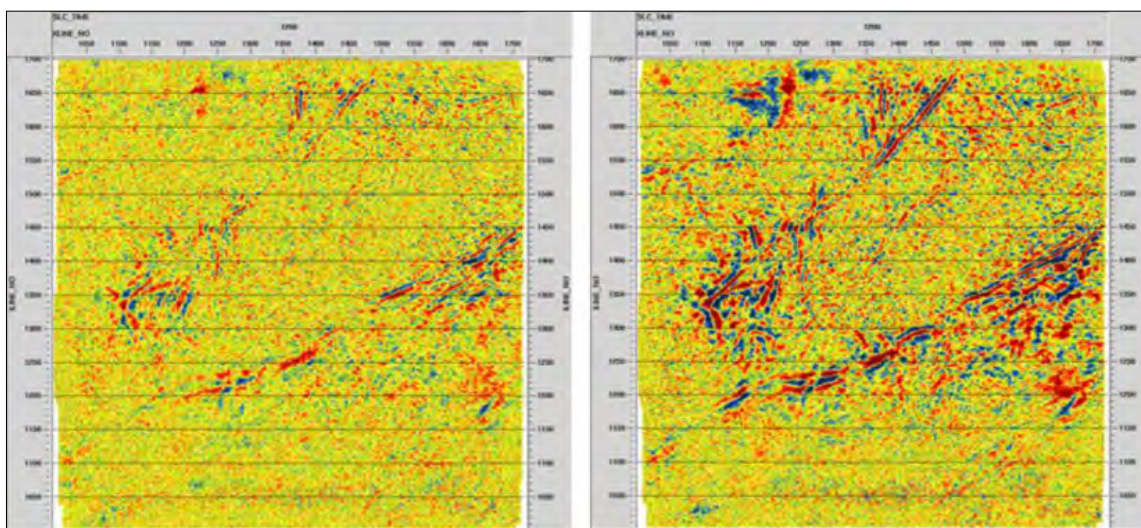


20. ábra | 1330 in-line összecszelvény a reziduális statikus korrekciók alkalmazása után

Figure 20 | Stack section of inline 1330 after residual static corrections

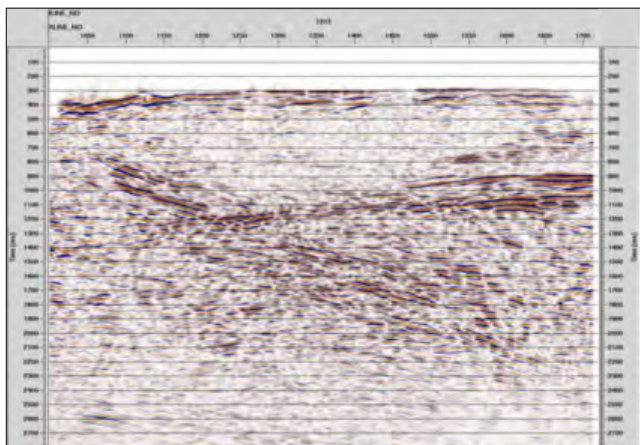
A véglegesnek tekintett sebességtérrel végrehajtott CDP-összegzés után előállott a 3D összegzett adattömb, ami a PostStack migráció bemenetét képezte. A PostStack migráció a Kirchoff-féle migrációs algoritmus szerint készült.

A terület bonyolult földtani, szerkezeti felépítése miatt cél volt a PreStack migrált adattömb előállítás is. Ennek a műveletnek a kimenetét alapvetően befolyásolja a bementi CDP-gyűjtésekben lévő adatcsatornák szabályos, egyenletes eloszlása offset és azimuth szerint, ezért célszerű megszüntetni a kimaradó vagy eltolt forráspontok által kialakult egyenetlenségeket. Ezért szükség volt az 5D interpolációra, ami az in-line, cross-line irányban, az offset- és azimuth térben, valamint a frekvenciatartományban történő interpolációt jelentette. Az így regularizált adatrendszeren a PreStack migráció már sokkal stabilabb eredményt tud adni, nem jelennek meg a migrációs „mosolyok” az in-line és cross-line szelvényeken. A PreStack migrációhoz alkalmazandó optimális sebességtér meghatározása

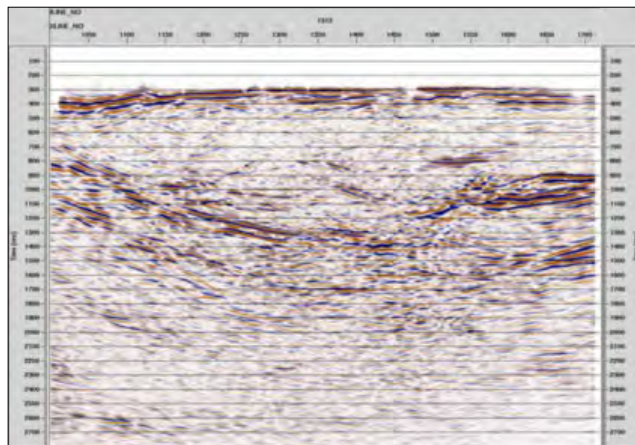


21. ábra | $T = 1200$ ms időmetszetek az összegzett adattömbből reziduális statikus korrekció alkalmazása előtt és után

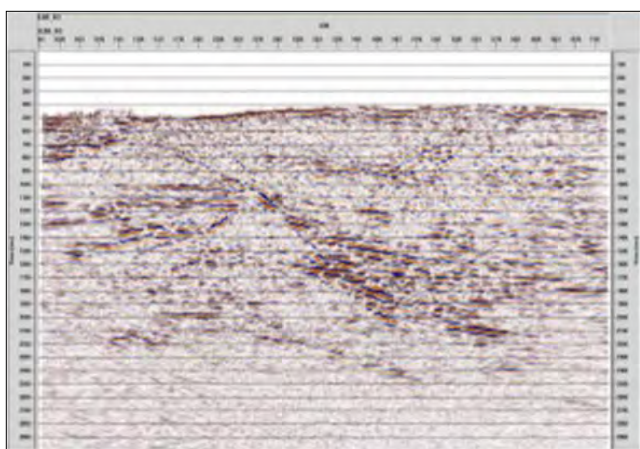
Figure 21 | $T = 1200$ ms time slices from the stacked datacube before and after residual static improvement



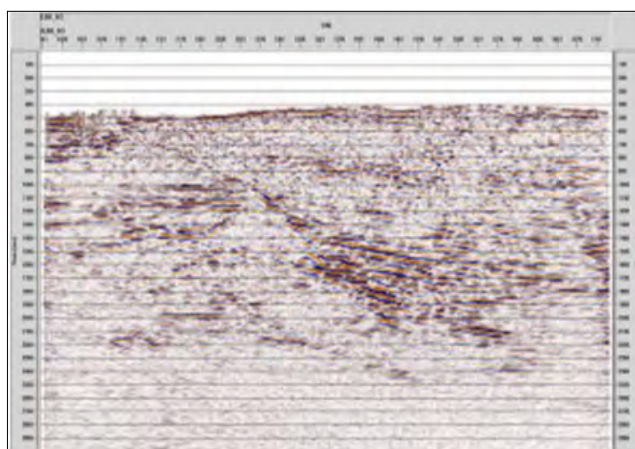
22. ábra | 1330 in-line összegszelvény összegzés utáni migráció előtt
 Figure 22 | Stack section of inline 1330 before PostStack migration



23. ábra | 1330 in-line összegszelvény PostStack migráció után
 Figure 23 | Stack section of inline 1330 after PostStack migration



24. ábra | 1596 in-line migrált időszelvény PostStack migráció után
 Figure 24 | Migrated time section of inline 1596 after PostStack migration



25. ábra | 1596 in-line migrált időszelvény PreStack migráció után
 Figure 25 | Migrated time section of inline 1596 after PreStack migration

sztintén számos iteráció után született meg. Kiindulási adatrendszerként a PostStack összegzéshez meghatározott sebességtér szolgált.

A PostStack és PreStack migrációval előállított adatömböket összehasonlítva (az in-line és cross-line irányú szelvények egybevetésével, lásd 22–25. ábrák), csak minimális eltérés figyelhető meg. Az időmetszeteken már több helyen látható a leképezés bizonyos mértékű javulása a PreStack adatrendszeren.

Konklúzió

A Nyugat-Mecsekben végzett nagy felbontóképességű 3D szeizmikus mérés célja a korábbi 2D szeizmikus mérések és mélyfúrások alapján valószínűsített földtani felépítés pontosítása, valamint a tervezett mélységi geológiai tároló elhelyezése szempontjából kritikus tektonikai szerkezetek helyének és mélységbeli elterjedésének meghatározása volt.

A szeizmikus mérési program a körültekintő előkészítés után, a tervezett időkereteken belül sikeresen megvalósult.

A folyamatos terepi minőség-ellenőrzés biztosította, hogy az igen változékony terepi körülmények (topográfia, zajforrások) és adottságok ellenére az optimális adatminőséget sikerüljön regisztrálni az épített környezet és infrastruktúra bármilyen károsodása nélkül.

A Gefizyka Torun által igen gondos, minden részletre kiterjedő adatfeldolgozás előállította a PostStack és PreStack migrált szeizmikus adattömböket, amelyeket a terület geológiáját kiválóan ismerő szakemberekkel együtt értelmezve újabb, sokkal részletesebb szerkezeti és geológiai modell áll elő a Nyugat-Mecsek felépítéséről.

Köszönetnyilvánítás

Ezúton fejezzük ki köszönetünket a kézirat lektorainak, Lőrincz Katalinnak és Takács Ernőnek a dolgozat tartalmi és formai színvonalát erősítő észrevételeikért és hasznos megjegyzéseikért.

A tanulmány szerzői

Gombár László, Molnár Péter, Halász Amadé

Hivatkozások

- Babinszki E., Piros O., Budai T., Gyalog L., Halász A., Király E., M. Tóth T. (2023): Magyarország litosztratigráfiai egységeinek leírása I. (E. Babinszki, O. Piros, T. Budai, L. Gyalog, A. Halász, E. Király, T. M. Tóth, eds.). Budapest: Szabályozott Tevékenységek Felügyeleti Hatósága.
- Baldrian T., Gombár L., Schachinger M. (2013): Nagy kiterjedésű robbantásos 3D szeizmikus mérés Magyarországon. *Magyar Geofizika*, 54/1, 31–42.
- Cserkész-Nagy Á., Deák F., Hámos G. (2018): Földtani kutatás a Nyugat-Mecsekben. Szeizmikus értelmezés a Me-105, Me-106 vonalak mentén. Kézirat, RHK Kft., Paks. RHK-N-003/18.
- Deák F., Gombár L. (2015): Szerkezetkutató 3D szeizmikus mérések a Paksi Atomerőmű környezetében. *Magyar Geofizika*, 56/3, 139–151.
- Filipszki P. (2018): Terepi jelentés. Cserdi-01_S/2018 szeizmikus szelvény. Kézirat, RHK Kft., Paks, RHK-N-009/18.
- Filipszki P., Kádi Z., Koroknai B., Tóth T. (2018): Értékelő jelentés az SH-hullám szeizmikus mérési módszer alkalmazhatóságáról a Cserdi-01_S/2018 szelvény példáján. Kézirat, RHK Kft., Paks, RHK-N-010/18.
- Fülöp J. (1994): Magyarország geológiája. Paleozoikum II. – Akadémiai Kiadó, Budapest, p. 447.
- Hámos G. (2019): Nagyfelbontású 3D szeizmikus reflexiós mérés a Nyugat-Mecsekben földtani kutatási program engedélyeztetési dokumentációja. Földtani kutatási terv, Mecsekérc Zrt, Adattár.
- Konrád Gy., Sebe K., Budai T. (2016): Magyarázó a Bodai Agyagkő Formáció perspektivikus elterjedési területének 1:25000 méretarányú földtani térképéhez. Kézirat, RHK Kft., Paks, RHK-N-014/16.
- Molnár P., Molnár L., Ország J., Szegő I., Tungli Gy. (2022): A Bodai Agyagkő Formáció telep-helykutatása I. fázis földtani kutatási terve. Radioaktív Hulladékokat Kezelő Kft. SMI-007/22, 196 p.
- Sebe K., Said D., Wágenhoffer A., Hámos G., Kovács L., Somodi G., Bögér Á., Konrád Gy., Horváth J., Szujó G. (2017): Neotektonikai folyamatok alakulása a BAF tágabb földtani környezetében a késő miocén óta. Kézirat, RHK Kft., Paks, RHK-N-015/16.
- Tungli Gy. (szerk), Molnár P., Ország J., Szegő I., Török P. (2017): A Bodai Agyagkő Formáció földtani kutatása. Zárójelentés, I. felszíni kutatási fázis 2. szakasz. Kézirat, RHK Kft., Paks, RHK-N-008/17.

Eredmények és tapasztalatok a VLF módszer területén

VINCZE L.^{1,2}, NÉMETH N.³, PETHŐ G.²

¹Geoelektro Kft., 2094 Nagykovácsi

²Miskolci Egyetem, Geofizikai Intézeti Tanszék, 3515 Miskolc-Egyetemváros

³Miskolci Egyetem, Földtan-teleptani Intézeti Tanszék, 3515 Miskolc-Egyetemváros

E-mail: laszlo.vincze56@gmail.com, norbert.nemeth1@uni-miskolc.hu, pethogaborgeo@gmail.com

Egy rövid áttekintés után a sekély behatolású mélységgel jellemezhető, nagyon alacsony frekvenciás VLF módszer elméleti alapjait, a mérések során használt adókat, a nálunk használt műszereket, majd a mért paramétereket ismertetjük. Az esettanulmányok során először a kétréteges féltérrel történő kiértékeléssel nyert eredményekkel és tapasztalatokkal foglalkozunk. Egy 2D-vel közelíthető szerkezetre H-polarizációt feltételezve véges különbséges modellezést és trial and error interaktív inverziós kiértékelést alkalmaztunk. Az E-polarizációs esetre a vertikális mágneses térkomponens értelmezésére mutatunk be példákat. Az ismertetett esettanulmányok bizonyítják a könnyen kivitelezhető VLF módszer sokoldalú alkalmazhatóságát. Tekintettel a vizsgált módszer kis felbontóképességére, gyakran célzerű a VLF-mérést további geofizikai módszerekkel kiegészíteni. A megváltozott frekvenciájú katonai adók működése miatt az analóg műszernél új vevőblokkokat fejlesztettünk ki. Az évek során szerzett mérési tapasztalataink további műszerfejlesztéseket indokolnak.

Kulcsszavak: VLF műszerek, E- és H-polarizáció, esettanulmányok

Vincze, L., Németh, N., Pethő, G.: Results and experiences in the field of the VLF method

After a short overview, the theoretical basis of the near-surface VLF method, the transmitters used in the course of measurements, the VLF instruments applied in our country and the measured parameters are described. In the case studies, first the results and experience obtained with the two-layer half-space evaluation have been presented. Assuming H polarization for an elongated geological structure, finite difference modelling and trial and error inversion method are applied. Examples for the interpretation of the vertical magnetic field component are presented for E polarization. The presented case studies demonstrate the application versatility of the VLF method. Considering the low resolution of the method, it is often advisable to complement the VLF measurement with additional geophysical surveys. Due to changes in the operation frequency of military transmitters new receiver blocks were developed for the analogue instrument. The experience gained over the years encouraged us to do further instrument developments.

Keywords: VLF equipment, E and H polarization, case studies

Beérkezett: 2024. március 2.; *elfogadva:* 2024. május 14.

Bevezetés

A 15–30 kHz tartományban működő katonai rádióadókra alapozott VLF-EM módszert először jól vezető érc-tömszökök és telérek kimutatására alkalmazták nagy sikerrel, a mágneses komponensek szelvény menti mérésével. A VLF-EM módszer első alkalmazásait Paterson és Ronka (1970) publikációja foglalja össze. A földi mérésekkel szinte egy időben terjedt el a módszer légi változata is. Később a VLF-R változatnál az elektromos komponens mérésének

lehetővé tételével egyszerűen meghatározhatóvá vált a látzólagos fajlagos ellenállás és az elektromos és mágneses komponensek közti fáziseltérés, melyek a földtani térképezésben jelentős szerepet játszanak.

Magyarországon a távoli, hosszúhullámú műsorszóró adók EM terét felhasználó rádiófrekvenciás módszerek bevezetése Takács Ernő professzor nevéhez fűződik (Takács 1971). Számos mérési eredménnyel és azok értelmezésével bizonyította, hogy a sekély kutatási mélységű mérnök-geofizikai, földtani térképezési feladatoknál a kis költségű

módszer alkalmazása célravezető. A radiokip módszer alkalmazásához szükséges műszer saját fejlesztésű volt. A méréseinél használt adók elsősorban a 155 kHz-es brassói és a 629 kHz-es temesvári adók voltak. A Bükk-fennsík nagymezői részén e két frekvencián elvégzett profilmérése a radiomagnetotellurika (RMT) hazai előzményének tekinthető. Magyarországon a MÁELGI rendelkezett elsőként – 1974-től – Geonics EM16 és EM16R műszerrel (Bodoky, Polcz 2016). A műszert és működését angliai tanulmányútját követően Kakas Kristóf mutatta be. A kísérleti mérések után Tóth Csaba alkalmazta először az eljárást felszíni földtani térképezési céllal a Tapolcai-medencében. Az áttörést az alkalmazásban 1974. októberi iharkúti mérések hozták. A módszer és az EM16R műszer alkalmas volt a kis mélységű ellenállás-térképezésre és a felszínközeli bauxittek indirekt detektálására. Ezen a területen az előkutatási fázis megkerülhetetlen módszerévé vált a VLF látzólagos fajlagos ellenállás mérése. Az ELGI-ben kiértékelő nomogramokat készítettek kétréteges modellekre, továbbá az értelmezést elősegítő mélységtérképeket szerkesztettek. Farkas (1987) egy mérési pontban három különböző irányból sugárzó, de közeli frekvenciájú VLF adót felhasználva a VLF invariánsellenállás-módszert vezette be a magnetotellurikus kutatásban használatos impedancia-tenzor mintájára. A mérési eredményekből szerkesztett polárdiagramot és az invariánsellenállás-térképet sikeresen alkalmazták elsősorban bauxitkutatás területén.

A geofizikai műszerek közül a VLF műszer az, amelyből kereskedelmi forgalomban világszerte a legtöbbet értékesítették. Ennek megfelelően alkalmazási gyakorisága is kiemelkedő.

Az RMT módszernél a VLF sáv szűk frekvenciatartományát szélesítették ki annak érdekében, hogy a felszínközeli térrészről jobb felbontást érjenek el. A 30 kHz feletti tartományt kiterjesztették 1000 kHz-ig, ahol különböző időjeladók és műsorszóró rádióadók sugároznak. Az RMT módszerét széles körben alkalmazzák, a hidrogeológiai feladatok megoldására elsők között Stiefelhagen és Müller (1979), a kommunális lerakók jellemzésére Zacher és szerzőtársai (1996) publikáltak eredményeket. Közép- és hosszuhullámú műsorszóró adók EM terét VLF adóval kiegészítve Takács Ernő alkalmazta skalár RMT-mérésre Kömlődön a Duna árvízvédelmi gátjának vizsgálatára (Csókás és szerzőtársai 1993).

A VLF módszer elméleti alapjai

Az elektromágneses módszerek elmélete a Maxwell-egyenletekhez kapcsolódik, melyekből a telegráfegyenlet vezethető le. Ez az egyenlet idő $e^{+i\omega t}$ szerinti változást feltételezve homogén izotrop közegre a következő alakú az \vec{E} elektromos térerősségvektor függvényében (teljesen hasonló az egyenlet a mágneses térvektor esetén is):

$$\Delta \vec{E} + (\mu \varepsilon \omega^2 - i\omega \mu \sigma) \vec{E} = \Delta \vec{E} + k^2 \vec{E} = \vec{0}, \quad (1)$$

ahol μ az abszolút mágneses permeabilitást, ε az abszolút dielektromos állandót, ω a körfrekvenciát, k a hullámszámot jelöli. Az (1) egyenlet megoldása, ha E_x komponenszt tételezünk fel a lefelé (z) terjedő hullám esetében:

$$E_x(z, t) = E_{x0} e^{-ikz} e^{i\omega t} = E_{x0} e^{-i\alpha z} e^{-\beta z} e^{i\omega t}, \quad (2)$$

itt E_{x0} a felszíni elektromos térkomponens, $k = \alpha - i\beta$ alakú. Így a

$$k^2 = \alpha^2 - 2i\alpha\beta - \beta^2 = \mu \varepsilon \omega^2 - i\omega \mu \sigma \quad (3)$$

egyenletből a valós és képzetes részek egyenlőségéből az α és β értékek meghatározhatóak. A gyökvonásoknál csak a pozitív értékeket figyelembe véve írható, hogy

$$\alpha = \omega \left\{ \frac{\mu \varepsilon}{2} \left[\left(1 + \frac{\sigma^2}{\varepsilon^2 \omega^2} \right)^{1/2} + 1 \right] \right\}^{1/2} \quad (4)$$

és

$$\beta = \omega \left\{ \frac{\mu \varepsilon}{2} \left[\left(1 + \frac{\sigma^2}{\varepsilon^2 \omega^2} \right)^{1/2} - 1 \right] \right\}^{1/2}.$$

A szkinmélység az a mélység, melyben a felszíni térérték az e -ad részére csökken. A (2) egyenlet jobb oldalán az amplitúdó mélységgel való csökkenését $E_{x0} e^{-\beta z}$ írja le, így a szkinmélység (z_s) számításához az alábbi egyenletet kell megoldani:

$$E_{x0} e^{-\beta z_s} = E_{x0} e^{-1}, \quad \text{ebből} \quad (5)$$

$$z_s = \frac{1}{\beta} = \frac{1}{\omega} \left\{ \frac{\mu \varepsilon}{2} \left[\left(1 + \frac{\sigma^2}{\varepsilon^2 \omega^2} \right)^{1/2} - 1 \right] \right\}^{1/2}.$$

Tehát a β csillapítási tényező és a szkinmélység egymással fordítottan arányos.

A λ hullámhossz az azonos fázisú pontok közötti távolság. A (2) egyenlet jobb oldalán a fázisviselkedést a második tényező írja le, így λ az $e^{-2\pi i} = e^{-\alpha \lambda}$ feltételből határozható meg, amiből

$$\lambda = \frac{2\pi}{\alpha} = \frac{2\pi}{\omega} \left\{ \frac{\mu \varepsilon}{2} \left[\left(1 + \frac{\sigma^2}{\varepsilon^2 \omega^2} \right)^{1/2} + 1 \right] \right\}^{1/2}. \quad (6)$$

A lefelé terjedő síkhullám terjedési sebessége $v = \lambda/T = \lambda f$, így

$$v = \left\{ \frac{\mu \varepsilon}{2} \left[\left(1 + \frac{\sigma^2}{\varepsilon^2 \omega^2} \right)^{1/2} + 1 \right] \right\}^{-1/2}.$$

A fenti általános összefüggések a VLF módszernél az eltolási áramok elhanyagolhatóságával egyszerűsödnek:

$$\alpha = \beta = \left[\frac{\omega \mu \sigma}{2} \right]^{1/2} \quad \text{miatt} \quad (8)$$

$$\left[\frac{1}{\omega \mu \sigma} \right]^{1/2} \quad \lambda = 2\pi \left[\frac{2}{\omega \mu \sigma} \right]^{1/2},$$

és ebben az esetben az EM hullám homogén vezetőképesű féltérbeli terjedési sebessége:

$$v = \frac{\lambda}{T} = 2\pi \left[\frac{f}{\pi\mu\sigma} \right]^{1/2}. \quad (9)$$

A VLF módszernél használatos adók, műszerek, mért paraméterek

VLF-adók

A nagyon alacsony rádiófrekvenciás módszereknél a távoli katonai adók által emittált vivőhullámokat használjuk fel földtani-geofizikai információszerezésre. A VLF-adók antennái vízszintes vezetőképes lemezen lévő rövid vertikális elektromos monopólusoknak tekinthetők. Az adók teljesítményét és frekvenciáját úgy választják meg, hogy a tengeralattjárókkal kommunikálni lehessen. Az emittált elektromágneses hullámok egyrészt direkt úton, a föld–levegő határon felületi hullámként, másrészt a Föld–ionoszféra hullámvezetőben a felszín és alsó ionoszféra között részleges reflexióval terjednek. Az ionoszférikus hullámterjedési mód elemzése nagyon fontos eszköz az ionoszféra legalsó rétegének a vizsgálatához. Az alsó ionoszféra (D réteg első-sorban) töltéssűrűsége és magassága változik, aminek oka főleg a Nap aktivitása miatti gyorsabb és a napszak szerinti

lassúbb változások. Emiatt a mérés helyén a beérkező VLF hullám polarizációja, fázisa és teljesítménye is időben változhat. A stabilabb jelszint és az állandó hullámpolarizáció miatt indokolt a közvetlen úton terjedő VLF EM tér földtani-geofizikai célú felhasználása. A VLF-adók közül az egyik legelső a már nagy teljesítményű (1800 kW), 15–25 kHz között működő, Kalbeben épített Goliath, mely 1943-tól a II. világháború végéig üzemelt. A technika fejlődése és a hidegháborús évek hozzájárultak, hogy egyre több katonai adót építsenek. Ezek közül ma már csak nagyon kevés működik. A mi mérési gyakorlatunkban is észlelhető volt a változás, amit az 1. táblázat is tükröz.

VLF műszerek

Számos VLF geofizikai műszer létezik, melyek leírását Vincze (2023) adja meg. Ebben a fejezetben a Magyarországon is használatos kanadai analóg Geonics EM 16/16R és a francia digitális T-VLF műszereket mutatjuk be. A VLF-EM módszer első alkalmazása és az első, kereskedelmi forgalomba kerülő műszer megépítése Vaino Ronka nevéhez fűződik. Az első EM16 műszert 1965-ben adta el a Geonics. A műszerrel kapcsolatos legfontosabb gyakorlati tudnivalók a Geonics Ltd. (1979) kiadványában találhatók meg.

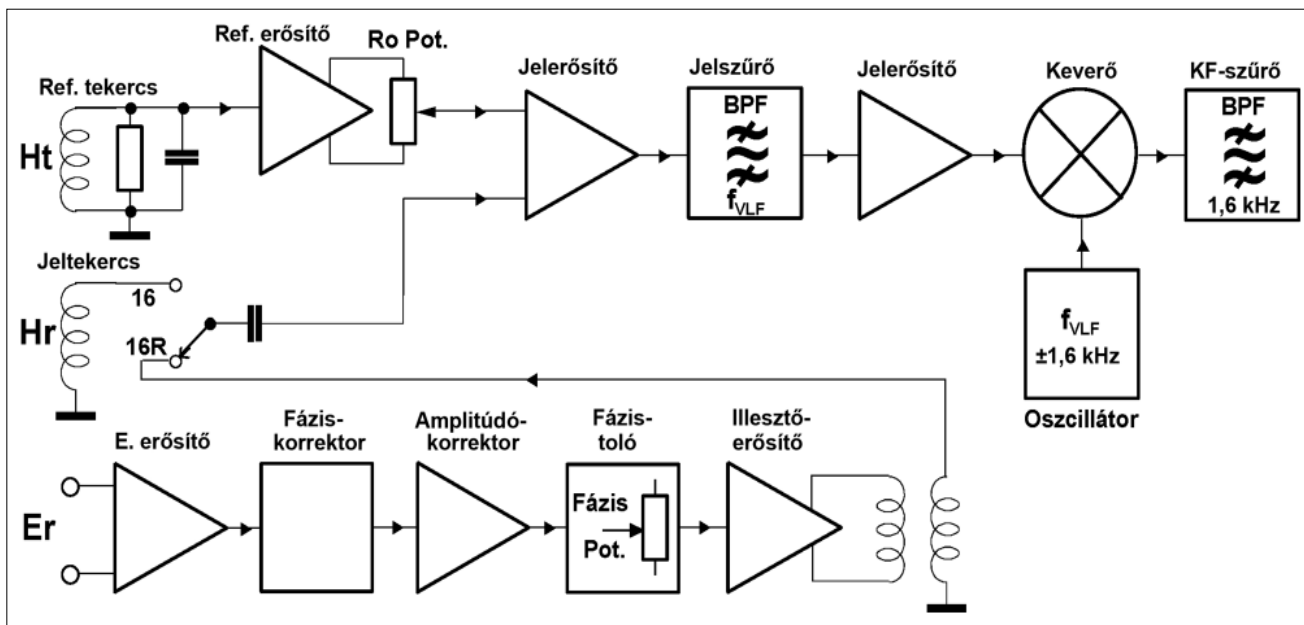
Az alaplámpa két, egymásra merőleges tekercse (T alakú fogantyú, 1. kép, balra) érzékeli a mágneses teret. Az

1. táblázat | Az 1970-es évektől a 90-es évekig működő fontosabb és a jelenleg működő európai fontosabb VLF-adók
Table 1 | Important VLF transmitters working between from the 70s till the 90s and European transmitters available today

Korábbi adók		Új adók	
Adó jele	Frekvencia (kHz)	Adó jele	Frekvencia (kHz)
GBR – nem működik	16,0	RDL – időszakosan	18,10
JXZ – ritkán működik	16,4	GBZ – időszakosan	19,60
UMS – nem működik	17,1	ICV – gyakori szünet	20,27
NAA – nem működik	17,8	FTA – gyakran működik	20,90
NPM – működik	23,4	GQD – gyakran működik	22,10
		HWU – gyakran működik	22,60
		DHO – gyakran működik	23,40



1. kép | A Geonics EM16 alaplámpa (balra) fajlagosellenállás-mérő EM16R opcióval (jobbra)
Picture 1 | Geonics EM16 instrument (left) with resistivity unit EM16R (right)



1. ábra | A Geonics EM16/16R műszerének blokkvázlata
 Figure 1 | Schematic of Geonics EM16/16R instrument

adó frekvenciáját cserélhető hangoló blokkok határozzák meg. A műszerbe egyszerre két hangoló blokk helyezhető el, melyek közül az alkalmazni kívántat egy kétállású kapcsolóval választhatjuk ki. A műszer működése egy ún. „heterodyn” elvű rádióvevő működéséhez hasonlítható. A kiválasztott frekvenciára vonatkozó szelektivitást első körben a tekercsek hangoló kondenzátorai, majd második lépésben a jelszűrő (*signal filter*), harmadik lépésben a keverés után az ún. középfrekvenciás szűrő (*filter amplifier*)

biztosítja. A műszer blokkvázlatát az 1. ábra szemlélteti. A látszólagos fajlagos ellenállás mérésénél az alpműszert ki kell egészíteni a fajlagos ellenállást mérő egységgel (1. kép, jobbra). A zajszűrőt tartalmazó és nagy bemeneti ellenállással jellemezhető elektrodák használata nagymértékben hozzájárult a mérések jó reprodukálhatóságához.

Az Iris Instruments T-VLF műszere (lásd 2. kép) mágneses és fajlagos ellenállás üzemmódban működik. Ez a műszer már digitális méréstechnikai elemeket is használ. A blokkvázlata a 2. ábrán látható. Mágneses antennájuk szélessávú, erősítő fokozataik műveleti erősítők. Programozható, kapcsolt kapacitású hibrid szűrőket alkalmaznak. A jeleket A/D-konverterek alakítják digitális adattá és mikrovezérlői DSP funkcióval segítik a további jelfeldolgozást. A mérés eredményeket a T egységen digitális kijelző jeleníti meg, és azok belső memóriájukban eltárolhatók, majd később további adatfeldolgozásra letölthetők. A fajlagos ellenállás-mérés tetszőleges elektrodaközzel végezhető.

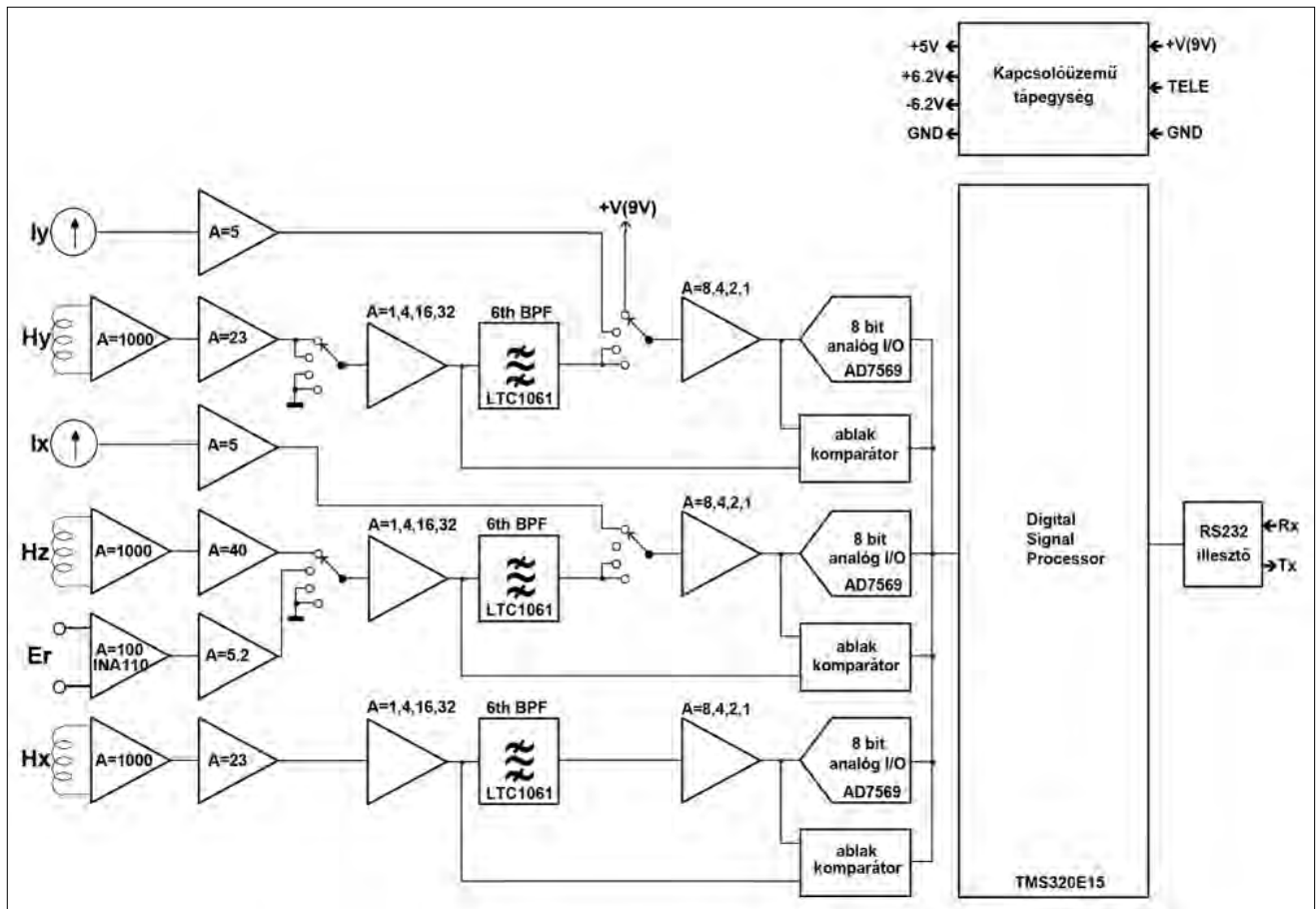
A Geonics EM 16-tal szembeni előny, hogy a VLF mágneses mérés során nem kell az adóirányra merőleges szelvény mentén haladni, az alpműszerben lévő három tekercs tetszőleges irányú profil menti mérést lehetővé tesz. Ugyanakkor a bemeneti ellenállása kisebb, mint a Geonics műszeré, továbbá a zajérzékenysége is nagyobb, mint az analógé.

Mért paraméterek

A mért fizikai paraméterek vonatkozásában és az elméleti görbék számítása során a magnetotellurika (MT) módszerre a kiindulás, ugyanis mind az MT, mind a VLF esetén az EM tér távoli forrása miatt az elektromágneses tér síkhullámú. A különbség a két módszer által vizsgált frekvenciatár-



2. kép | Iris T-VLF műszer (jobbra) a T egységgel (balra)
 Picture 2 | Iris T-VLF instrument (right) with T unit (left)



2. ábra | Az Iris T-VLF műszer blokkvázlata
 Figure 2 | Schematic of Iris T-VLF instrument

tományban és a forráspolarizációban jelentkeznek. A VLF módszernél a mérési pontban jellemző állandó frekvencián sugárzó adó iránya határozza meg a hullám polarizációját, ami állandó. Az MT módszernél mind a frekvencia, mind a forrástér polarizációja változik. A Cagniard (1953) által kifejlesztett MT módszer matematikai-fizikai összefüggései felhasználhatóak, így a látszólagos fajlagos ellenállás (ρ_a) és annak fázisa (ϕ) a felszíni impedanciából (Z_s) határozható meg. Az MT alapösszefüggést aktualizálva a VLF módszerre az adóiránnyal megegyező elektromos (E_r) és az arra merőleges azimutális mágneses (H_ϕ) térkomponens ismeretében:

$$\rho_a = \frac{1}{\mu\omega} |Z_s|^2 = \frac{1}{\mu\omega} \left| \frac{E_r}{H_\phi} \right|^2, \quad \phi = \tan^{-1} \frac{\text{Im}(Z_s)}{\text{Re}(Z_s)}. \quad (10)$$

Megjegyezzük, hogy felszín alatti összlet látszólagos fajlagos ellenállása a hullám dőlésével (W_s) is jellemezhető (Takács 1981):

$$\rho_a = \frac{1}{\varepsilon\omega} |W_s|^2 = \frac{1}{\varepsilon\omega} \left| \frac{E_r}{E_z} \right|^2, \quad (11)$$

ahol E_z a vertikális elektromos térkomponens. A (10) és (11) képletekben szereplő EM térkomponensek működő adók esetén mindig mérhetőek, ellentétben a vertikális

mágneses térkomponenssel (H_z), amely a behatolási mélység az 1D-s esettől eltérő földtani felépítés, pl. érclelerek esetén alakul ki. Az indukciós módszereknél az elliptikusan polarizált mágneses tér létrejöttének feltételeivel és egyenleteivel Takács (1981), a VLF esetében McNeill és Labson (1991) részletesen foglalkozik. A gyakorlat számára – amennyiben az indukált szekunder tér elhanyagolható a primer térhez képest – az ellipticitásra (e) és a polarizációs ellipszis nagytengelyének vízszintessel bezárt szögére (θ) a következő közelítő összefüggések adhatók meg:

$$\tan 2\theta \approx 2 \text{Im}(H_z) \quad \text{és} \quad e \approx \text{Re}(H_z). \quad (12)$$

Ha egyetlen adóval, egy adott irányból érkező VLF hullámmal mérünk, akkor skalár mérésről beszélünk. Ha több irányból érkező VLF hullámokkal mérünk egy pontban, akkor a kissé különböző frekvenciákon kívül az 1D-től eltérő szerkezet miatt is különbözni fog a mért érték. Ekkor tenzormérésről beszélünk.

Pedersen (1998) tenzor-VLF-méréseinél (legalább két vagy több adó mérésével) a tipper vektor használatát javasolja. 1D-től különböző szerkezet esetén egy adott frekvencián a mágneses tér vertikális komponense lineáris kapcsolatban van a horizontális komponensekkel:

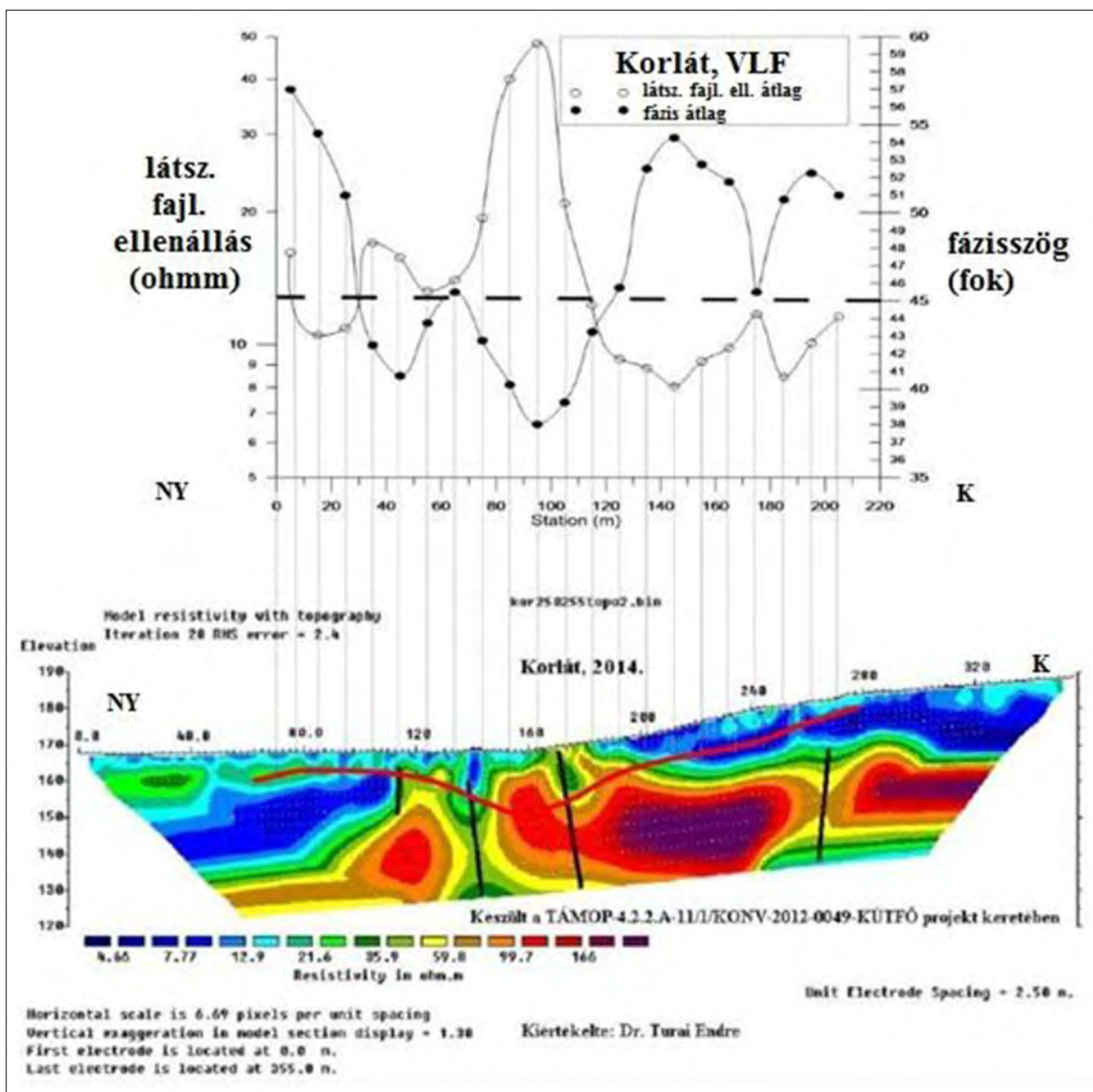
$$H_z = AH_x + BH_y, \quad (13)$$

ahol A és B a tipper vektor komponensei. A tipper vektor a gyakorlatban jól használható, ugyanis az elektromosan jó vezető zóna felé mutat.

Esettanulmányok, kétréteges féltérrel történő közelítés

Vízszintesen rétegzett homogén féltér felett nem alakul ki a H_z komponens, emiatt a rétegzett féltérről csak a látszólagos fajlagos ellenállás mérésével kaphatunk információt. Figyelembe véve a relatíve sekély kutatási mélységet a VLF-R módszernél, elsősorban a kétréteges modellnek

van jelentősége. A két mérési adatból (látszólagos fajlagos ellenállás és annak fázisszöge) meghatározhatók a geoparaméterek, ha a három adatból az egyiket ismertnek tetelezzük fel. Ezzel részletesen foglalkozik Vincze (2023). A mi gyakorlatunkban részben a Geonics (1975) által kétréteges esetre megadott nomogramokat, másrészt Grissmann és Reitmayer (1978) által közölt 1D-s inverziós formalizmust alkalmaztuk a kiértékelés során. 1D-s esetre az impedanciafázis 45° -tól való eltérése értékes információt hordoz a fajlagos ellenállások viszonyáról. Ha a mért fázisszög 45° , akkor a behatolási mélységig homogénnek tekinthető a féltér. Bebizonyítható, hogy ha $\varphi < 45^\circ$, akkor $\rho_2 > \rho_1$ (azaz a szkinmélységig növekvő fajlagos ellenállás),



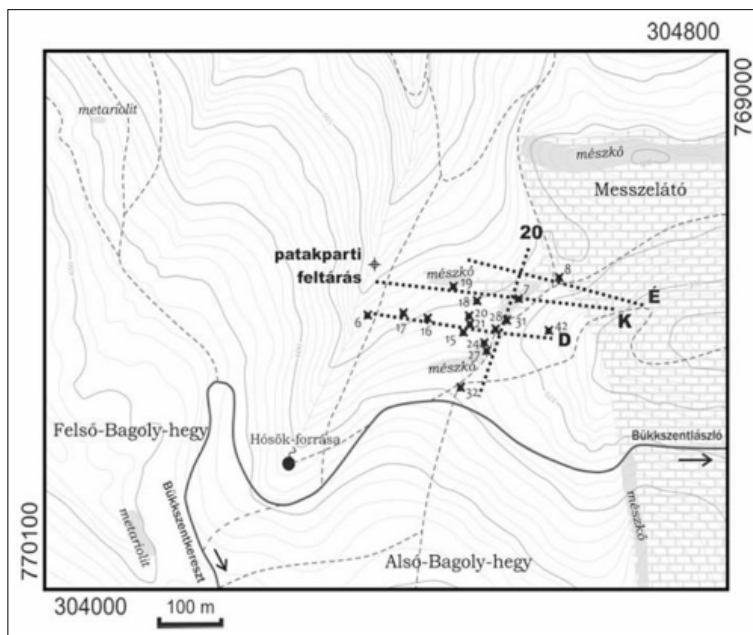
3. ábra | Francia VLF-adókkal mért látszólagos fajlagos ellenállás és fázisszövevény (fent), multielektódás látszólagos fajlagosellenállás-mérés kiértékelése (lent)
 Figure 3 | Apparent resistivity and phase measurement with French VLF transmitters (top), interpretation of multielectrode resistivity measurement (bottom)

míg $\varphi > 45^\circ$ esetén viszont $\rho_2 < \rho_1$ (azaz a szkinmélység csökkenő fajlagos ellenállás) esete áll fenn. Nem homogén felső réteg esetén nem végeztünk inverziós kiértékelést, hanem csak a látszólagos fajlagos ellenállás és fázis szelvény menti viselkedését vizsgáltuk. Először az ezen alapuló minőségi kiértékelésre látunk példákat – gyakran más geofizikai módszerek eredményeit is felhasználva –, majd inverziós kiértékelést mutatunk be.

A korláti VLF-mérések és értelmezésük

A Korlát község vízellátását biztosító langyos vizű termelőkút közelében (É-i szélesség: $48^\circ 22' 25''$; K-i hosszúság: $21^\circ 14' 24''$) végzett geoelektromos (multielektrodás látszólagos fajlagos ellenállás, indukált polarizációs), továbbá VLF-mérésekkel a Hernád-vonalhoz tartozó törérendszert sikerült kimutatni, amely a termelőkút hozamát biztosítja. A két mérési vonal közel K–NY-i irányú volt, a VLF-mérésekhez – mivel a korábbi adók csak ritkán vagy egyáltalán nem működtek – az FTA (Sainte Assise, 20,9 kHz) és a HWU (Rosnay, 22,6 kHz) adók terét használtuk fel. A mérés során T-VLF digitális és Geonics EM16R analóg műszereket használtunk. Ezen adók vizsgálatához az analóg műszer esetén új vevőblokkok fejlesztésére volt szükség, melynek részleteit Vincze tanulmánya (2015) tartalmazza. Mivel a két közeli adófrekvencia és közel megegyező adóirány miatt a négy mérés (mindkét műszerrel mind a két frekvencián mértünk) jó egyezést mutatott, a mért látszólagos fajlagos ellenállás és azok fázisértékeinek átlagolása indokolt volt. A VLF-mérés eredményét és a multielektrodás mérés kiértékelését a 3. ábra mutatja. A mérési terület környezetében a miocén andezitre a Her-

nád völgyére jellemző agyagos üledék néhány méter vastagságban települt. Az agyagos üledék fajlagos ellenállása 5–10 ohmm volt, az andezit 40–180 ohmm. Az itt bemutatott szelvényen a mért látszólagos fajlagos ellenállásból a két hasonló frekvenciára számított szkinmélység 9 és 25 m között változott, amit a 3. ábra alsó részén feltüntetett vastag piros folytonos vonal mutat. Figyelembe véve a multielektrodás látszólagos fajlagosellenállás-mérés kiértékelését megállapítható, hogy csak a szelvény középső, 110–180 m (multielektrodás mérés) közötti szakaszon hatol be a VLF tér az andezitig. Ez a VLF szelvényen a 35–115 m-nek felel meg. Itt 45° -nál kisebb fázis szögek jelentkeznek, ezen kívüli szakaszokon 45° -nál nagyobbak a fázis értékek, és kisebb fajlagosellenállás-értékek jelentkeznek, ami megfelel az 1D-s kétréteges elméletnek. A multielektrodás szelvény 140 m-nél jelentkező látszólagos fajlagos ellenállás csökkenését is mutatja a VLF szelvény 60 m-nél. A termelőkút vízhozamát eredményező vetők helyét az alsó ábrán a fekete, közel függőleges vonalak mutatják (Turai és szerzőtársai 2015). A VLF módszer felbontóképessége természetesen nem közelítheti meg a multielektrodás méréssel nyerhető, azonban a szkinmélységig egy átlagos fajlagos ellenállás megadható és a kétréteges közelítést feltételezve a fajlagos ellenállás mélységben növekvő vagy csökkenő viselkedése nyomon követhető. Az ezzel párhuzamos, 70 m-re D-re lévő szelvény alatt az andezit nagyobb mélységben található, a két szelvényen mért fázisértékek összehasonlításából a vetőzóna csapása ÉK–DNY-i irányú. A korláti esettanulmány kapcsán ki kell emelni, hogy a VLF értelmezést szükséges volt multielektrodás adatgyűjtéssel és interpretációval kiegészíteni.



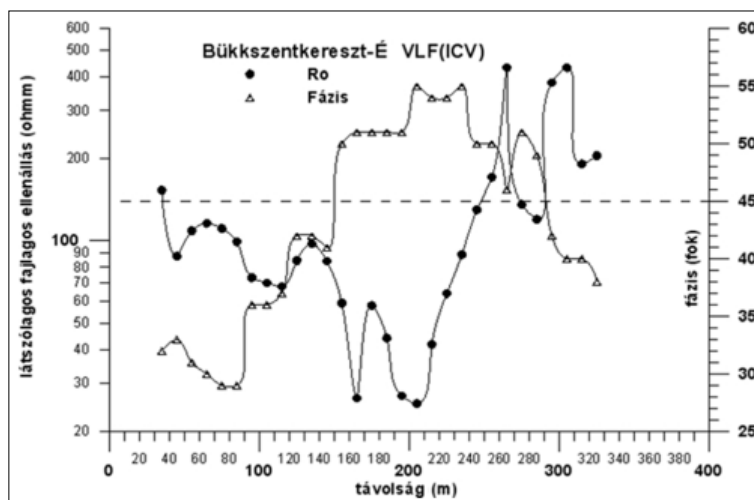
4. ábra Földtani képződményeket, VLF-mérési vonalakat (pontozott vonal) és a kiértékelés során felhasznált korábbi sekélyfúrások (x-szel és számmal jelölve) helyét szemléltető térkép
 Figure 4 Map showing formations, VLF measuring profiles (dot line) and shallow boreholes (denoted by x with number) drilled earlier and used for interpretation

A Bükkszentkereszt kutatás

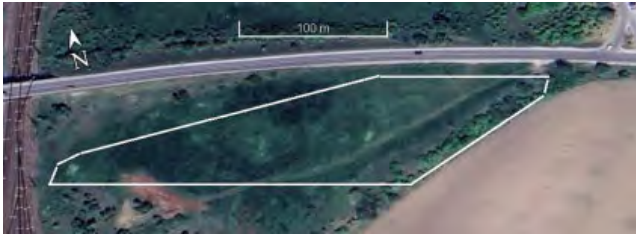
A Bükkszentkereszt és Bükkszentlászló közötti kutatási terület egy szerkezeti határzóna közelében helyezkedik el, ahol részint tömeges Bükkfennsíki Mészko, részint tűzköves Felsőtárkányi Mészko érintkezik tektonikusan a Bagolyhegyi Metariolittal (Németh és szerzőtársai 2023). Ehhez a formációhoz kapcsolódik a mangánoxidos, és foszfatos, berillium- és urándúsulást tartalmazó kőzetanyag (Szabó, Vincze 2013), mely a mállott szericitpalában szeszélyes és változó vastagságú, kiemelkedő lencséké széttagolt réteget alkot, és amelyre a kutatás irányult (Zajzon és szerzőtársai 2014). Korábban, a területen az U-tartalmú érces kőzettestek lehatárolása a fúrásokban elvégzett természetesgamma-mérések révén csak részben történt meg. Az általunk elvégzett felszíni radiometriai mérésekkel (Németh és szerzőtársai 2015) elsősorban a lejtőtörmelék, illetve a szálaban álló kőzetek felett az ép kőzet *in situ* radiometriai jellemzőit tudtuk megállapítani. Csak a patakparti feltárásnál (4. ábra) sikerült magas U-tartalmú apatitos kőzetet kimutatni. Ennek mért urántartalma átlagértékben mintegy harmincszorosa a metariolithoz képest, a legnagyobb mért érték meghaladta a 240 ppm-et. Felszíni térképezés útján nem lehet egyértelmű kőzettesthatárokat meghatározni a területen, amit a változó vastagságú kőzetmálladék jelenléte indokol. A fúrások mindegyikében (elsősorban a teljes iszapvesztés miatt) nem történt fajlagosellenállás-mérés. Viszont ahol végeztek, ott megállapítást nyert, hogy a területen előforduló kőzetekre jellemző fajlagosellenállás-intervallumok átfedik egymást. Például a kovás, főként kvarcból és földpátokból álló metavulkanit fajlagos ellenállása nagyobb is lehet, mint a mészkoé, de fordított helyzet is fennállhat nagyobb lemezszilikát-tartalom esetén. A relatíve sűrűn elhelyezkedő sekélyfúrások (4. ábrán x-szel és számmal jelöltek) között rétegtani korrelációt gyakorlatilag nem lehetett végezni a nagyfrekvenciás térbeli változások miatt.

A VLF-szelvények helyzetét a 4. ábra pontozott vonalai mutatják, az É-i szelvényhez közel mágneses, a D-i szelvény mentén pedig multielektrodás fajlagos ellenállás és GP-mérés is volt (Pethő és szerzőtársai 2014). A Bükkszentkereszt-É profil mentén mért VLF látszólagos fajlagos ellenállás és fázisértékek viselkedése eltér a többi szelvényétől, kivéve a középső, K jelű szelvény K-i részétől. Az Északi szelvény K-i oldalán (5. ábra, jobb oldali rész) megjelenő, szálaban álló, nagyobb fajlagos ellenállású mészkovet Ny-i irányban egy jelentősen alacsonyabb látszólagos fajlagos ellenállású rész követi. A középső szakaszon 150 m és 230 m között egy minimumzóna jelentkezik. Ettől balra, Ny-on, egy emelkedő látszólagos fajlagos ellenállású, átlagértékben 100 ohmm-es rész rajzolódik ki. Utóbbiról a fázissal együtt valószínűsíthető, hogy törmelékkel fedett metariolit. Az is feltételezhető, hogy a metariolit Ny-i irányban nagyobb fajlagos ellenállásúvá válik, és/vagy a felszínhez közelebb kerül. A szelvénytől É-ra található Bszk-8 sekélyfúrásban kb. 30 m vastagságú mészko alatt található a bontott metariolit, ami nagyobb kiterjedés esetén indokolná, hogy a fázisérték a szelvény középső szakaszán 45°-nál nagyobb. A területen általában a 45°-nál kisebb fázisértékeket mértünk, azaz általában a szkinmélységig a kőzetmálladék alatti nagyobb fajlagos ellenállású kőzet a legjellemzőbb felépítés. Összevetve az É-i szelvény VLF eredményeit a K jelűvel megállapítható volt a két szelvény korrelációja a K-i részen (Pethő és szerzőtársai 2014). A földtani ismereteink és eddigi VLF-mérési tapasztalataink alapján is valószínűsíthető, hogy a két szelvényen egy vető hatása jelentkezik, melynek csapása közel ÉNy-DK-i. Az É-i irányban kiszélesedő vetőzóna felszínén mérhető hatása az 5. ábrán 200 m és 260 m között jelentkezik (Pethő és szerzőtársai 2014), ami a mágneses mérések értelmezésével összhangban volt.

A hatékonyabb vetőkutatás érdekében a bemutatott szelvény mentén ajánlható a multielektrodás látszólagos fajlagos ellenállás és a VLF H_z -mérése. Ez utóbbi méréséhez szükséges E polarizációt eredményező működő adó a



5. ábra | VLF látszólagos fajlagos ellenállás és fázisszelvény vetőkutatási céllal a Bükkszentkereszt-É profil mentén
Figure 5 | VLF apparent resistivity and phase response along profile Bükkszentkereszt-É for fault exploration

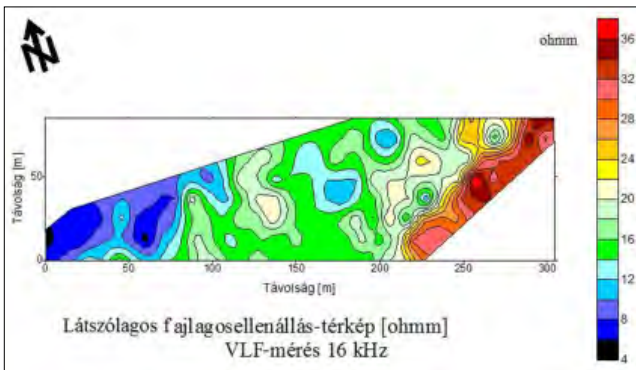


6. ábra VLF-mérések területe (fehér sokszög)
Figure 6 Site of VLF measurements (white polygon)

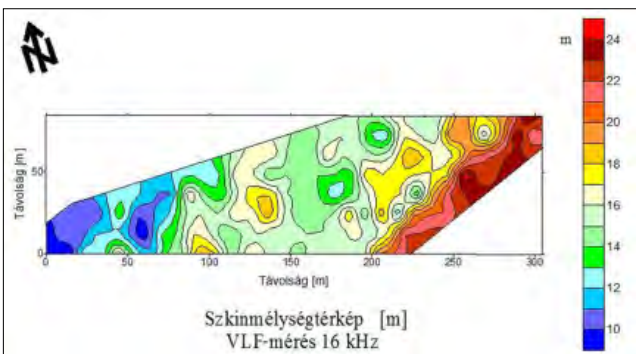
mérésünk idején nem volt, a méréshez használt olasz adó (ICV) közelítőleg H-polarizációt eredményezett. A bükk-szentkereszti berilliumdúsulás kutatásával kapcsolatban pedig megállapítható, hogy a geokémiai és ásvány-kőzettani vizsgálatok mellett további geológiai-geofizikai kutatások (pl. földradar is) szükségesek az érces kőzettestek lehatárolására.

Fedett kommunális hulladéklerakó feletti VLF-mérés

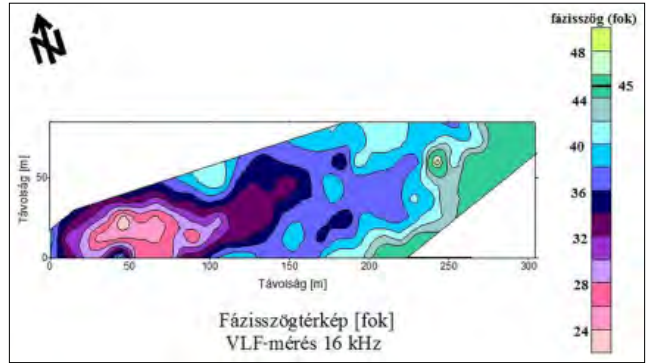
A következőkben a VLF módszer használhatóságát vizsgáljuk meg egy földtakarásos depónia esetében. A kommunális hulladéklerakó a Miskolc–Budapest vasútvonaltól K-re, a 35. számú főúttól D-re található (É-i szélesség: 47° 59' 12"; K-i hosszúság: 20° 50' 31"). A kommunális hulladéklerakó felett több éven át elsősorban hallgatói geofizikai mé-



7. ábra Fedett kommunális lerakó felett mért látszólagos fajlagos ellenállás-térkép
Figure 7 Distribution of apparent resistivity measured over the covered landfill



8. ábra Szkinmélységtérkép a fedett kommunális lerakó esetében
Figure 8 Skin-depth map for the covered landfill



9. ábra A fedett kommunális lerakó felett mért látszólagos fajlagos ellenállás-fázistérkép
Figure 9 Distribution of apparent resistivity phase measured over the covered landfill

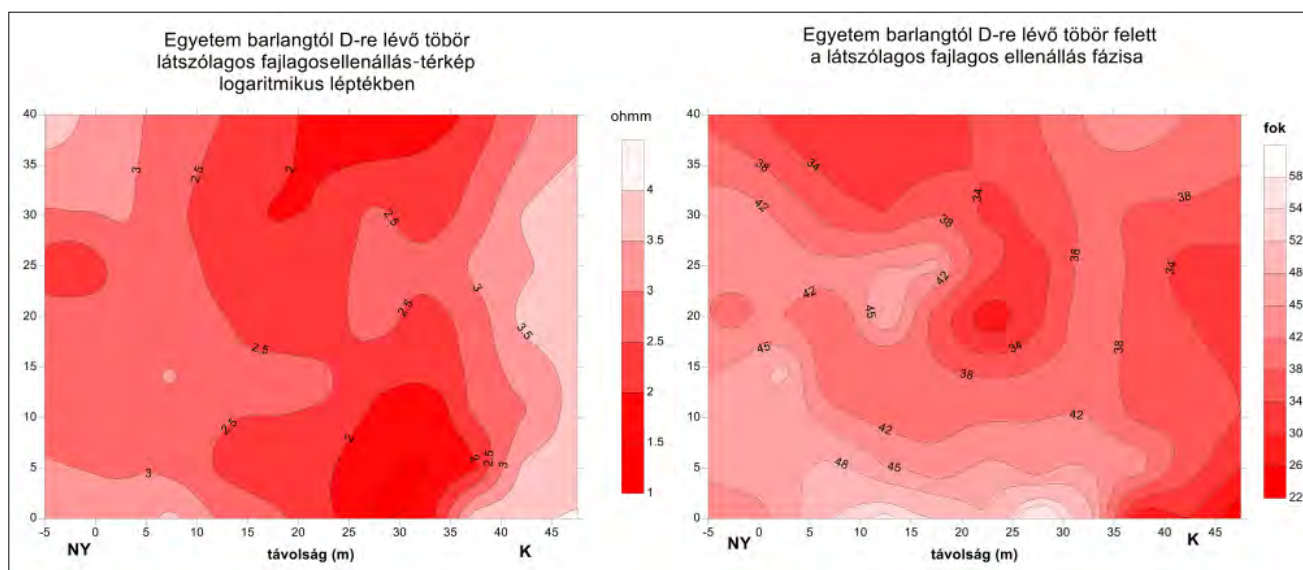
rési gyakorlatok voltak. A helyszín és a VLF-mérési terület határvonala fehér poligonon jelölve a 6. ábrán látható.

Az ÉNY-i (adóirányú) szelvények 15 m-re helyezkedtek el egymástól, a 16 KHz-es GBZ-adó terét vizsgáltuk. A látszólagos fajlagosellenállás-térképet a 7. ábra, az ebből számítható szkinmélységtérképet a 8. ábra, az adó irányú elektromos tér- és az arra merőleges mágneses térkomponens közötti fázisszögérték területi eloszlását a 9. ábra mutatja.

A látszólagos fajlagosellenállás- és fázistérkép alapján (7. és 9. ábra) megállapítható, hogy a hulladéklerakó NY-i része a legszennyezettebb, és a vizsgált terület nagyobb, középső részén is helyeztek el hulladékot. A K-, DK-i rész, amely 30 ohmm-nél nagyobb látszólagos fajlagos ellenállással és 45°-os fázisszöggel jellemezhető pedig nem szennyezett. Ez utóbbi területrész alatt a VLF-mérés alapján ismeretlen vastagságú homokos kavicsréteg valószínűsíthető. A szkinmélység a területen ezen a frekvencián 10 m és 24 m közötti. A 16 kHz-es VLF-mérés alapján a felszín alatt a szennyeztelen részen 25 m mélyséig agyagréteg nem mutatható ki. Az itt elvégzett további mágneses és multielektrodás fajlagosellenállás- és indukált polarizációs mérések szintén alkalmasnak bizonyultak a földtakarással fedett depónia laterális lehatárolására. A legjobb felbontóképességgel a multielektrodás mérések rendelkeztek, melyek segítségével következtetni lehetett a mesterséges szigetelő réteg hiányára, a természetes szigetelő (agyag-) réteg szkinmélység alatti meglétére, és a szennyezettség mélységbeli tovaterjedésére is (Turai és szerzőtársai 2017). Tekintettel arra, hogy a hulladéklerakó védőgáttal és aljzatszigeteléssel sem rendelkezik, ezért a kommunális lerakóból a csapadék hatására lefelé és kifelé is a szennyeződés további terjedése várható.

Az István-lápai töbr vizsgálat VLF fajlagosellenállás-méréssel

Az István-lápadban (Bükk hegység) a karsztpერი töbrök egyikét vizsgáltuk meg, mely a Szentistván-hegyi Meta-vulkanit Formációtól D-re helyezkedik el a Bükkfennsíki Mészki kibúvásán, és az Egyetem-barlanghoz képest a leg-

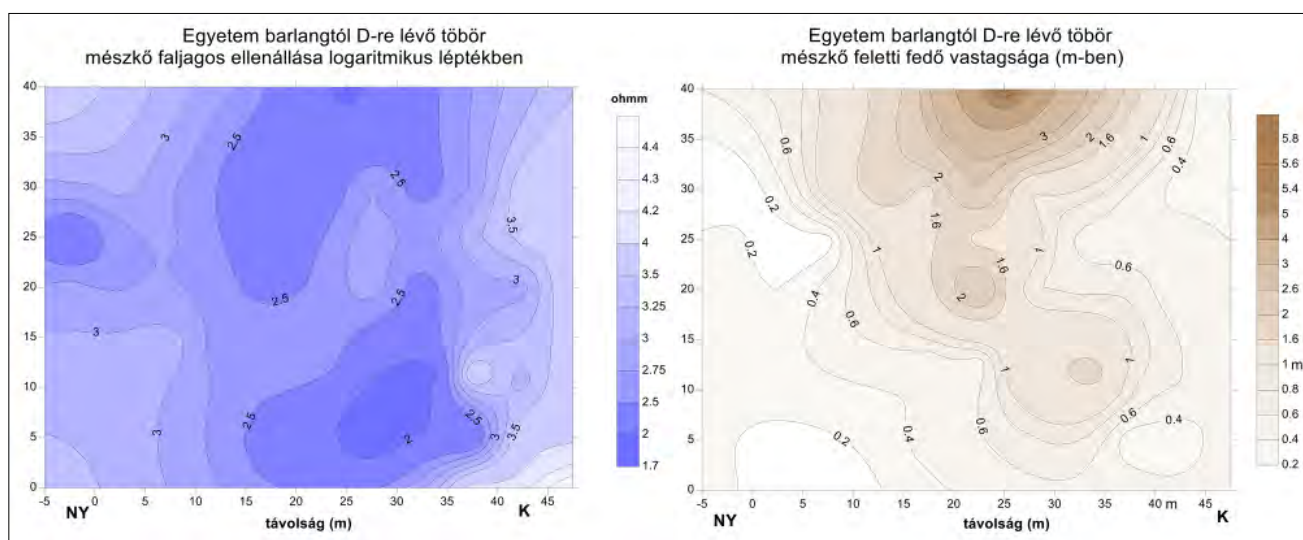


10. ábra | Egy bükki töbörben mért VLF látszólagos fajlagosellenállás- és fázistérkép
 Figure 10 | VLF apparent resistivity and phase map measured in a sinkhole of Bükk Mountains

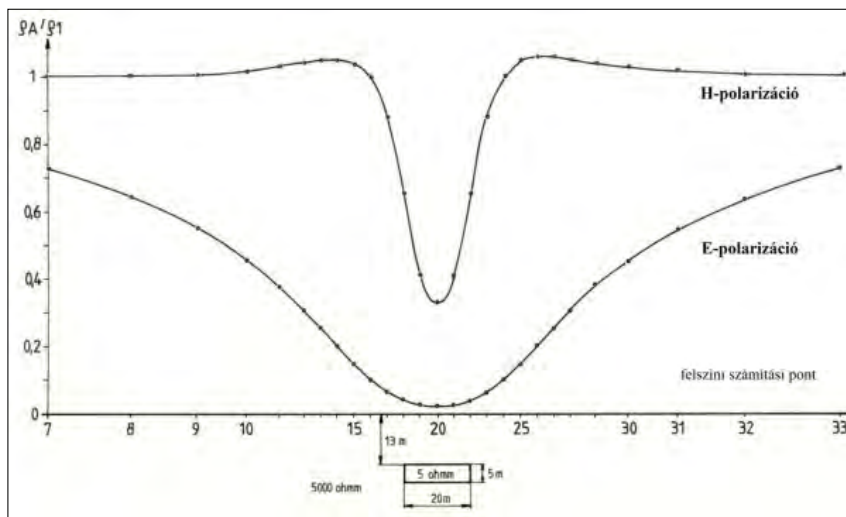
közelebbi D-i töbör (É-i szélesség: 48° 06' 01"; K-i hosszúság: 20° 36' 20"). A méréshez alkalmazott DHO-adó frekvenciája 23,4 kHz volt. A VLF-mérések kiértékelése során pontonként 1D-s kétréteges felépítést tételeztünk fel. Az agyagos fedőképződmény fajlagos ellenállását állandónak, 30 ohmm-nek véve a Grissemann és Reitmayer-féle inverziós eljárást (1978) alkalmaztuk. A mért látszólagos fajlagosellenállás- és fázistérképet a 10. ábrán, a kiértékelés során kapott fedő vastagság- és a mészkő fajlagosellenállás-térkép a 11. ábrán látható.

A térképek alapján állítható, hogy az alapkőzet fajlagos ellenállása széles intervallumban (100–5000 ohmm) változik, és a középső, közel É–D-i irányú sávban kisebb a mészkő fajlagos ellenállása. A jövezető-kitöltés mennyisége közel ebben a sávban – a karsztos repedések felett – a legnagyobb (Sűrű és szerzőtársai 2014). Nem zárható ki a D-i

szakaszon egy vízzáró képződmény mélyebb szintbeli előfordulása sem a fázisadatok alapján, azonban valószínű, hogy ez inkább a felszínközeli mészkő anizotrópiájával indokolható. A töbör alját fedő talajosodott málladék vastagsága csak a vizsgált terület É-i részén, középen haladja meg a 3 m-t, a D-i részen 0,5 m alá csökken. Ebben a töbörben spektrális természetesgamma-mérést is végeztünk, a természetesgamma-dózisteljesítményt döntően a töbörkitöltő agyag vastagsága határozza meg. Az itt található agyagban a legfontosabb radioaktív izotóp a ⁴⁰K, mely a töbör felett É-ra kibúvó metaandezitből származik. Az Istvánlápai töbör és közvetlen környezete (és általában a fedett karsztos képződmények) részletesebb geofizikai vizsgálatához további, elsősorban mágneses, multielektrodás fajlagosellenállás-, szeizmikus refrakciós és georadarmérések javasolhatók. Karsztban kialakuló barlangok hosszúhullá-



11. ábra | Egy bükki töbörben a mészkő fajlagos ellenállásának és a fedővastagságnak a térképe
 Figure 11 | Resistivity distribution of limestone and the thickness distribution of the overburden in a sinkhole of Bükk Mountains



12. ábra E- és H-polarizációs normált látszólagos fajlagos ellenállás hosszan elnyúlt vezető inhomogenitás felett 16 kHz-en
 Figure 12 Normalized apparent resistivity responses for the two polarizations over an elongated conductive inhomogeneity at 16 kHz

mű és VLF-adók alkalmazásával történő kimutathatóságára hazánkban korábban Majoros (1969), Pethő és Újszászi (1975), Ficsór és szerzőtársai (1989) végeztek vizsgálatokat.

Karsztos területek vízbázisvédelme szempontjából kiemelt jelentősége van a karsztos területek fedőképződményei paraméterei (fedő képződmény vastagsága, szennyezőanyag megkötő képessége, vertikális és horizontális szivárgási tényezője) és az alatta lévő mészkő hidrogeológiai paraméterei meghatározásának. Sásdi (2017) ismerteti a Bükk hegység jó, közepesen vízvezető, vegyes tulajdonságú és vízrekesztő formációit, továbbá a korábbi kutatások eredményeit is, figyelembe véve a Bükk hegység fontos hidrogeológiai összefüggéseit. Karsztos területek vízbázisvédelme érdekében megkerülhetetlen a megfelelő geoterületek koordinált terepi és laboratóriumi együttműködése.

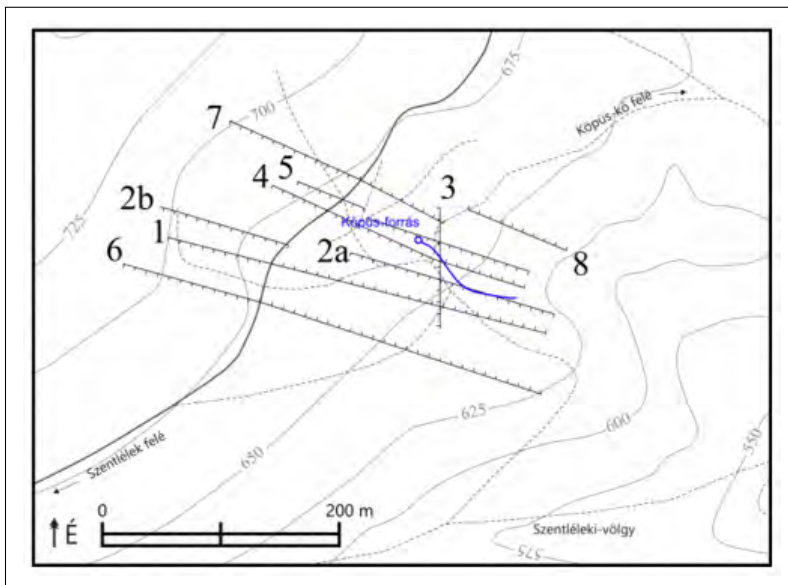
Esettanulmányok, felszínközeli 2D-s szerkezetek kutatása VLF módszerrel

A VLF módszernél a 2D-vel közelíthető szerkezetek kutatása során a legfontosabb kérdés a szerkezet csapásvonala és az adóirány által közbezárt szög viszonya. Abban az esetben, ha a két irány egybeesik, akkor E-polarizációról van szó (lévén az E_r komponens csapásirányú). Ilyenkor E_r mellett az azimutális mágneses tér (H_ϕ) és a vertikális mágneses térkomponens (H_z) mérhető. Elektromosan jó vezető képződmény esetén az áramcsatornázás jelensége a domináns a képződményben folyó, mágneses tér által indukált áram miatt. Ennek eredménye a H_z mágneses térkomponens kialakulása, amely tisztán földtani eredetű (Takács, 1971). A másik kitüntetett esetenél az adóirány a szerkezeti csapásvonalra merőleges, így H-polarizációról van szó, ugyanis az azimutális mágneses tér komponens egybeesik a szerkezeti csapásvonallal (Pethő, 2012). Ekkor az adóirányú elektromos térkomponens dőlésirányú. A harmadik

komponens a vertikális elektromos tér komponens, mely a VLF mérésekben ritkábban használatos, mint az előbbi kettő. H-polarizációnál a galvanikus hatás (vertikális határfelületek mentén frekvenciától független elektromos töltés felhalmozódás) teszi lehetővé a szerkezet kimutathatóságát. A két polarizációt leíró egyenlet homogén izotrop esetben a csapásirányú komponensekre nézve ugyanaz a Helmholtz-féle parciális differenciálegyenlet (lásd A. Melléklet). Taylor sorfejtést és a megfelelő belső határfeltételeket alkalmazva kapjuk meg a véges differencia egyenleteket. Pl. egy vertikális határfelület mentén lévő rácspontokra az E-polarizációnál az adóirányú elektromos térkomponens és a vertikális mágneses térkomponens folytonosságát, míg H-polarizációnál az azimutális mágneses tér komponens és a vertikális elektromos tér komponens folytonosságát kell érvényesíteni (Takács, 1981). A Maxwell-egyenletekből következik, hogy H-polarizációnál a modellezés során a levegőre nem kell rácst fektetni. Az ismeretlenek a rácspontbeli csapásirányú komponensek, melyekből a Maxwell-egyenletek véges differenciás megfelelői alapján közelíthető a másik két komponens, továbbá a felszíni látszólagos fajlagos ellenállás is. A 12. ábra a két polarizációra vonatkozó, véges különbségek módszerével egy vízszintesen hosszan elnyúlt hasáb alakú szerkezet felett számított normált (a normálás a felszín közeli réteg fajlagos ellenállására történt) látszólagos fajlagos ellenállást mutatja. Erre a szerkezetre a H-polarizáció adja a jobb kimutathatóságot (Ficsór és szerzőtársai 1989).

Köpüs-forrás, VLF látszólagos fajlagosellenállás-mérés és kiértékelése

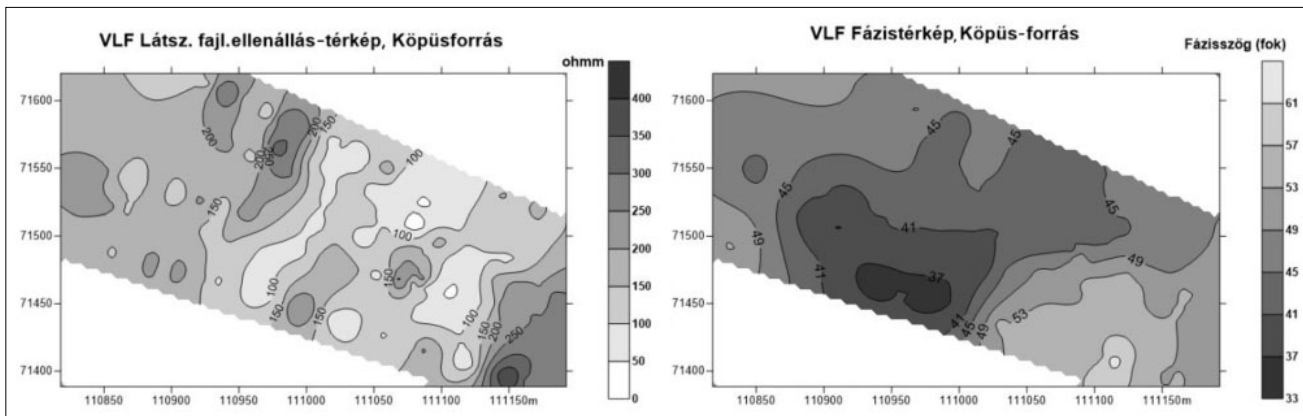
A Köpüs-forrás egy kis hozamú, a Bükk-hegységben lévő Köpüs-tető D-i oldalán – nem a völgyben – fakadó forrás, amely rövid felszíni lefolyás után elnyelődik a meredekebbé váló hegyoldalon. Mind a víz kilépése fölött, mind pedig az elnyelődése körül bitumenes Nagyvisnyói Mészkő



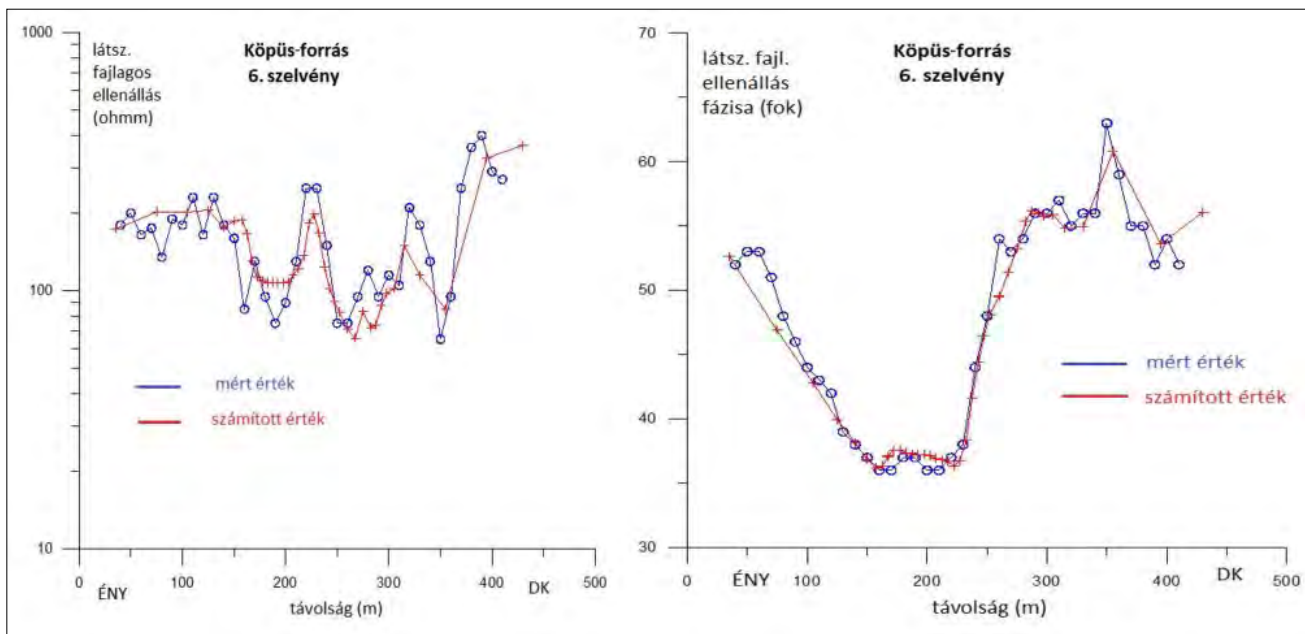
13. ábra | Topográfiai szintvonalas térkép a VLF-mérési szelvényekkel a Köpüs-forrásnál
Figure 13 | Contour map of topography with VLF profiles in the vicinity of Köpüs Spring

található a felszínen (Less és szerzőtársai 2005). Az impermeábilis agyagkő felszínközeli meglétét valószínűsítette a hegyoldalon kialakuló enyhe lejtésű terasz, másrészt a teraszon átfolyó, utána elnyelődő forrásvíz. A morfológiai és hidrológiai érvek mellett geobotanikai észrevételek is szóltak (Németh, Pethő 2009). A Bükk-hegységben ez volt az első alkalom, hogy gombákat használtak geobotanikai indikátorként, és a megfigyelések egyértelmű összefüggést mutattak bizonyos gombák élőhelyeinek és a talajképző kőzetek térbeli eloszlása között. Végül az agyagkő kibúvását talajfúrásokból nyert furadékszemszék ásványos összetétele is igazolta. A VLF-méréssel az volt a célunk, hogy a vízzáró agyagos kőzettestet (mely a mészkő fekéjét képezi, a Szentléleki Formáció Garadnavölgyi Evaporit Tagozat része) lehatároljuk, és a forrás kialakulásának, majd a forrás vízének elnyelődésére VLF módszeren alapuló szerkezeti magyarázatot adjunk (Németh, Pethő 2009).

A mérési területen (É-i szélesség: 48° 07' 14"; K-i hosszúság: 20° 32' 21") a szelvények közel ÉNY-DK-ek, az angol GBR adó irányával egyeznek meg, és a lejtőiránnyal jó egyezést mutatnak, lásd 13. ábra. A mészkő kibúvásain mért rétegzés alapján a képződményhatárok csapásiránya ezekre közel merőleges. A fenti megfigyelések alapján a H-polarizáció feltételezése indokolt. A mérési eredményeket a 14. ábrán láthatjuk. Ezek alapján is állítható, hogy a lokálisan 2D-s szerkezeti közelítés indokolt. A mérési eredmények kiértékelése – az inverziós feladat megoldása – a *trial and error* módszerrel történt. A véges különbséges előremodellezésnél mindig fellép a diszkretizációs hiba, amely nemcsak az elsődleges térkomponenseknél, hanem az azokból származtatott mennyiségeknél is jelentkezik, és a szelvény két szélén ez nagyobb, mint a szelvény belső részén alkalmazott finomabb rácsközök esetén. Ez a hiba az inverzió során is megmarad. A 15. ábrán látható 6-os szelvény menti fázishoz képest a látszólagos fajlagos ellen-



14. ábra | A Köpüs-forrás környezetében mért adatok 16 kHz, GBR-adó
Figure 14 | Apparent resistivity (left) and phase contour map (right) at 16 kHz, GBR transmitter



15. ábra A látszólagos fajlagos ellenállás (bal oldalon) és annak fázisának (jobb oldalon) mért és számított értékeinek eltérése a 6. szelvény mentén H-polarizáció, 16 kHz

Figure 15 Differences between measured and computed values of the apparent resistivities (left) and their phases (right) along the profile 6 for H polarization at 16 kHz

állás rosszabb egyezésének elsősorban az a magyarázata, hogy a közvetlenül felszínközeli fajlagosellenállás-változásokra a fázis kevésbé érzékeny. A modell 39×49-es ráccsal lett lefedve, a start modellt két és három réteges 1D modellekből építettük fel. Az interaktív inverzió során a cellák vezetőképességét változtattuk, azonban legfeljebb öt konduktivitásértéket alkalmaztunk (így pl. a karsztosodás mértéke és az anizotrópia hatása sem lett figyelembe véve), ami a mért és a számított adatok közötti eltérések további magyarázata.

A mérési eredményekkel legjobb egyezést eredményező modellhez tartozó számított értékeket a mértekkel együtt a 15. ábra mutatja. A számított értékekhez tartozó, 6-os szelvény alatti földtani metszetet a 16. ábrán látjuk. A kiértékelést nehezítette a felszíni málladék változó (60–120

ohmm közötti) fajlagos ellenállása, amely közvetlenül esős időt követően kisebb, mint száraz időszakban. A gátat képező impermeabilis fekü agyagkő felszínre emelkedése okozza a forrás megjelenését. Az agyagkő térbeli elhelyezkedése hozzájárult a plató kialakulásához. Mivel DK-i irányban az agyagkő után ismét repedezett mészkő búvik a felszínre, ezért a forrás vize mintegy 100 m felszíni folyás után elnyelődik.

A vizsgált terület É-i részén lévő, egymás folytatásának tekinthető 7. és 8. szelvény mentén mért adatokat összevontuk (13. és 14. ábra), melynek kiértékelése a korábbihoz hasonlóan történt. Az egyesített két szelvény szakasz alatti geológiai metszetet a 17. ábra mutatja.

A 16. és 17. ábrák alapján megállapítható, hogy a forrás lényegében egy szinklinális magjában elhelyezkedő mészkő



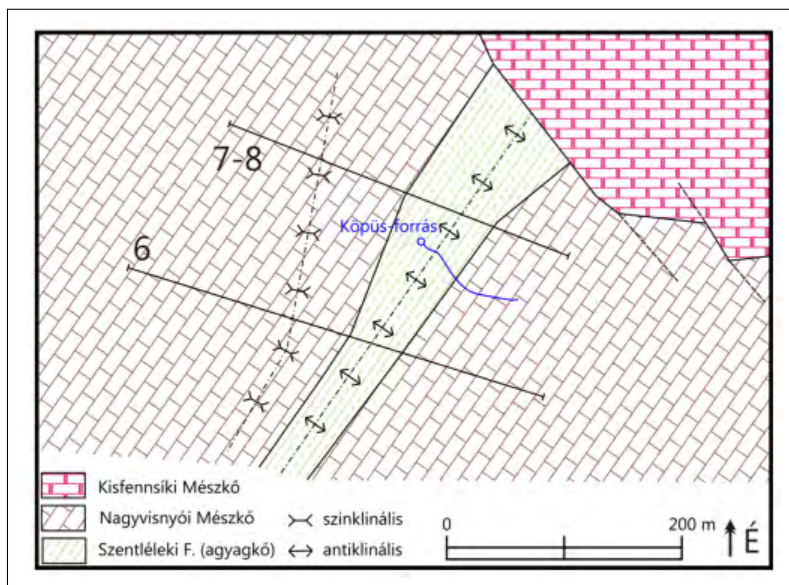
16. ábra A 6-os szelvény alatti földtani metszet a Köpüs-forrás környékén, GBR-adó

Figure 16 Geological section under the profile 6 in the vicinity of Köpüs Spring, GBR transmitter



17. ábra A 7-8-as szelvény alatti földtani metszet a Köpüs-forrás környékén, GBR-adó

Figure 17 Geological section under the profile 7-8 in the vicinity of Köpüs Spring, GBR transmitter



18. ábra | A vizsgált terület földtani térképe

Figure 18 | Interpreted geological map of the area

kőből, közvetlenül az agyagkőkibúvás teraszára támaszkodó lejtőtörmelékből fakad. A vízáadó mészke fekvésének mélysége D-i irányba nő, és a szinklinális ebben az irányban elkeskenyedik. A mészke szinklinális tengelye és az agyagkő antiklinális nyerge D-i irányban megközelíti egymást. A vizsgált terület egészére feltételezve a 2D-s jelleget a 18. ábra szerinti földtani térkép adható meg.

Az esettanulmány részletes ismertetésével nemcsak a VLF módszer földtani térképezésben, hanem karszterületek vízbázisvédelemben betöltött szerepét is szándékozunk bemutatni.

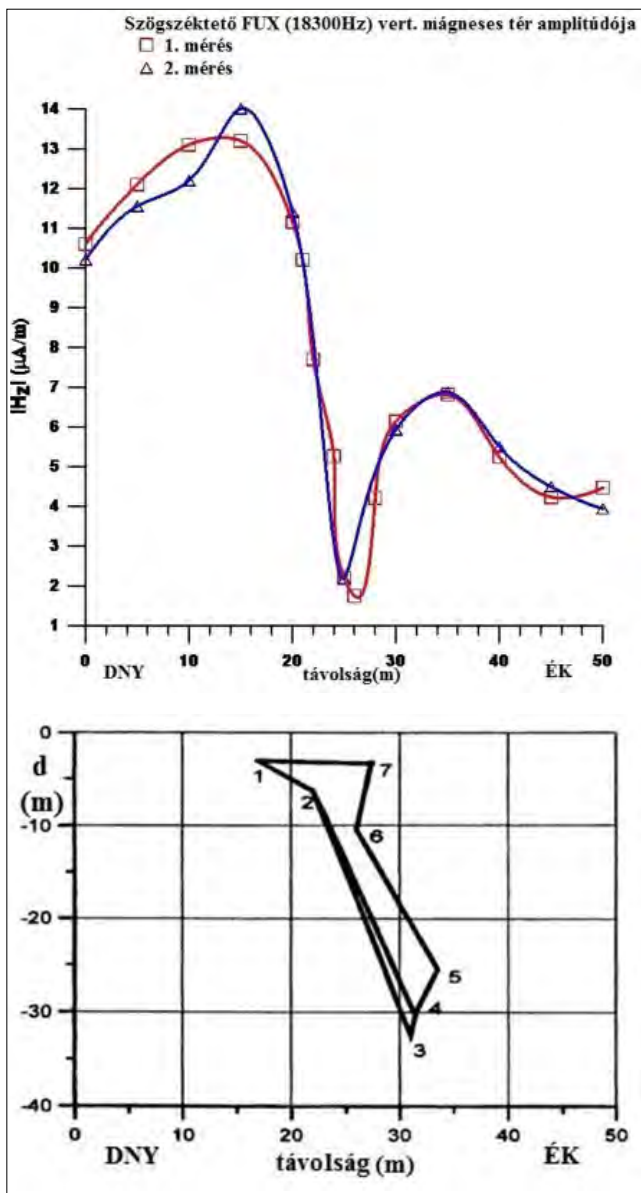
A szögszék-tetői VLF-kutatás

A Szögszék-tetőn (Bükk-hegység DK-i része) és környezetében jól karsztosodó Bükkfennsíki Mészke található a felszínen több négyzetkilométer összefüggő kiterjedésben (Less és szerzőtársai, 2005). Karsztforrások nincsenek, a terület a miskolctapolcai Hejő-források vízgyűjtőjéhez tartozik. A kőzettestet ÉNy–DK-i csapású, meredek vetőzónák tagolják, amelyek mentén breccsásodás, valamint változó vastagságú egyéb, nem karsztosodó kőzetek beékelődése észlelhető. A karszterületek hidrogeológiai megismerése szempontjából kiemelt jelentősége van az impermeábilis képződmények lehatárolásának. Ezek a változó méretű és mélységű közbetelepülések vagy vető menti közbeékelődések gátakat képezhetnek a karsztvíz áramlása előtt, amely így egyes átbukási helyekre koncentrálódva léphet át a következő tömeges mészke anyagú kőzettestbe.

A Szögszék-tetői vizsgálataink esetében egy kibúvó, a palásság ÉNy–DK-i csapása mentén lencseszerűen elnyúlt Szinvai Metabazalt test (Németh és szerzőtársai 2023) ékelődik a mészkebe. Ezen a helyen (É-i szélesség: $48^{\circ} 02' 15''$; K-i hosszúság: $20^{\circ} 39' 24''$) a vízzáró kőzetanyag oldalirányú és mélységbeli lehatárolása volt a cél.

Az egymáshoz képest 20 m-re lévő, párhuzamos, DNY–ÉK-i szelvényeken a GBZ- (19600 Hz) és FUX- (18300 Hz) adók terét mértük a digitális T-VLF műszerrel. A két szelvényen mért mágneses és látszólagos fajlagosellenállás-adatokból megállapítható volt, hogy a vizsgált szerkezet csapása ÉNy–DK-i irányú, továbbá a metabazalt kőzettest meredek dőlésű határokkal érintkezik a mészkevel. A felette mérhető látszólagos fajlagos ellenállás 150–200 ohm között változik, a két oldalán megjelenő mészkeé pedig 250–1200 ohm között. A földtani szerkezet tehát egy lokálisan 2D-s, a két adó helyzetét figyelembe véve jó közelítéssel E-polarizációs eset. Ilyenkor a csapásirányú elektromos tér dőlés menti változása hozza létre a vertikális mágneses teret. A kibúvón a metabazalt mészkenél kisebb állékonysága miatt terasz alakult ki, amely közel vízszintes, topográfiai hatástól mentes mérési területnek tekinthető. A francia adónál (FUX) tapasztaltunk jobb jel/zaj viszonyt. Az egyik szelvény mentén mért vertikális mágneses térkomponens reprodukálhatósága a 19. ábra felső részén látható. Annak ellenére, hogy jelen esetben a mészke fajlagos ellenállása a metavulkanithoz képest átlagosan csupán 3–6-szoros, az adó teljesítménye miatt a mért vertikális mágneses tér amplitúdója megközelítette a $15 \mu\text{A/m-t}$.

A mért H_z komponens amplitúdója szelvény menti átlaga alapján a Biot–Savar-törvényen alapuló közelítő inverzió lett megvalósítva, melynek részleteit Takács et al. (2005) ismerteti. Ennek értelmében a mért szekunder mágneses tér a 2D-s inhomogenitáson belüli csapás irányú indukált áramok hatására kialakuló mágneses terek szuperpozíciójából származik. A felszíni vertikális mágneses térkomponensben egyetlen áramvonal hatását Banks (1979) alapján egy kettős integrállal lehet számítani, mely a Stokes-tétel értelmében az inhomogenitás egyenes vonalszakaszokkal határolt keresztmetszete menti vonalintegrállal alakítható át. Ezen alapszik az interaktív inverzióhoz tartozó direkt



19. ábra A mészkőbe ágyazott metabazalt test felett mért vertikális mágnesestér-komponens amplitúdója (fent) és a kiértékeléssel kapott metabazalt test metszete az ÉK–DNY irányú vertikális síkban (lent)

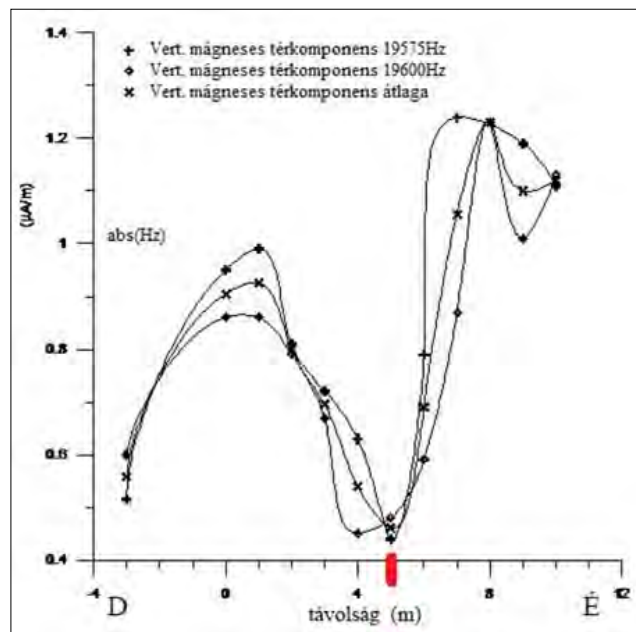
Figure 19 Amplitude of the vertical magnetic field over a metabasalt body hosted by limestone (top) and NE-SW cross-section of the metavolcanic body (bottom)

modellezés. Ily módon az inverziós feladat leegyszerűsítve a 2D-s inhomogenitást jellemző sokszög kontúrjának a meghatározását jelenti. A beékelte metabazalt test csúcspontjaival jellemzett kontúrja a 19. ábra alsó részén látható. Az inverzió során az 1-2-4-5-6-7-1 poligonnak a 2-3-4-2 háromszöggel való kiegészítésére volt szükség, melynek az elektromos vezetőképessége kismértékben ugyan, de nagyobb, mint a tőle ÉK-re lévő nagyobb területrésze. A felszíni törmelékanyag megfigyelésével alátámasztott értelmezésünk szerint ez egy vetőzónában kialakult, kevert anyagú breccsa jelenlétének tulajdonítható a mészkő és a metabazalt elnyírt érintkezése mentén.

Fémes nagyobb átmérőjű csővezeték kimutatása

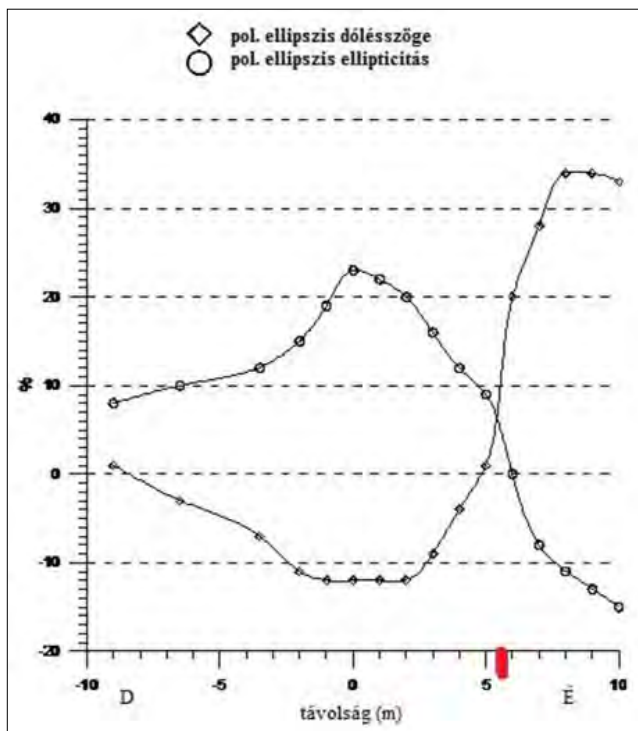
Kistokajban egy K–NY-i irányú, föld alatt mintegy 3 m mélyen húzódó, fémes gázvezeték felett (É-i szélesség: 48° 03' 06"; K-i hosszúság: 20° 50' 03"), É–D-i irányú szelvény mentén vizsgáltuk a vertikális mágneses tér viselkedését. A felhasznált adó a GBZ 19600 Hz-es elektromágneses tere volt, a mérési eredmény a 20. ábrán látható. A T-VLF műszerrel mérhető volt az ugyanezen adótól származó 19575 Hz-en mérhető EM tér is. A mért H_z térkomponens amplitúdója – amely itt egy nagyságrenddel volt kisebb, mint a Szögszékettőn tapasztalt – elsősorban a VLF-adó teljesítményétől, a hosszan elnyúlt hengeres ható tengelye és az adó irány kölcsönös helyzetétől (köztük lévő szög koszinuszától), továbbá az érintkező közegek elektromos vezetőképességbeli kontrasztjától függ. Az inhomogenitás fölött a H_z komponensnek elméletileg nullátmenete van – itt a vertikális komponens abszolút értéke van ábrázolva – a szelvény mentén. Az eset jó közelítéssel E-polarizációs, ugyanis a gázvezeték nyomvonala és az adó iránya a mérési helyen 25°-on belül megegyezik. A szelvény mentén elméletileg szimmetrikus görbét kellene kapnunk. Ez a gyakorlatban többnyire nem teljesül, hasonló (aszimmetrikus) mérési eredményt tapasztalt Takács (1971) a H_z összetevő anomáliájának fémes csővezeték feletti vizsgálatokor 155 kHz-en.

A GBZ VLF-mérést követően a német DHO-adó 23,4 kHz-es EM terét felhasználva végeztünk ugyanitt további vizsgálatot. Ebben az esetben is (az adóirány és a vezeték nyomvonala közötti szög kisebb, mint 30°) még elfogadható az E-polarizációs feltételezés. Ennél a vizsgálatnál a polarizációs ellipszis ellipticitását és dőlésszögét mértük,



20. ábra Fémes csővezeték felett mért vertikális mágnesestér-komponens abszolút értéke, GBZ-adó

Figure 20 Absolute value of the vertical magnetic field component over a metallic pipeline, GBZ transmitter



21. ábra A DHO 23,4 kHz-es adó felhasználásával mért polarizációs ellipszis dőlésszöge és ellipticitása egy K–NY-i fémes csővezeték felett, Kistokaj

Figure 21 Tilt angle and ellipticity of the magnetic polarization ellipse over a metallic pipeline in Kistokaj due to DHO 23,4 kHz transmitter

mely paraméterek a H_z/H_ϕ arányból vezethetők le, lásd B. Melléklet.

Elvben a dőlésszögnek és az ellipticitásnak a fémes cső felett, 0% értékeknél kell egymást átmetszeni (mivel a H_z komponens ebben a pontban zérus). A 20. ábrához hasonlóan a 21. ábránál sem szimmetrikus az anomália, az É-i oldalon az angol adóhoz hasonlóan nagyobb értékeket kaptunk. A cső felszíni vetülete a 21. ábra szerint 5,6 m-nél van, ugyanakkor a dőlésszög mérési eredmény alapján (ami általában megbízhatóbb, mint az ellipticitás) a 20. ábrához hasonlóan 5 m-nél.

Felszín alatti, szkinmélységnél kisebb mélységben elhelyezkedő fémes távvezeték VLF mágneses módszerrel történő kimutatására a legjobb esély adóirányú vezeték esetén áll fenn, ugyanis ekkor a legnagyobb a jó vezetőkben az indukált rádiófrekvenciás áramsűrűség. Ha az azimutális (azaz a primer) mágneses tér nem merőleges a jóvezetőképződmény csapásvonalára, akkor a dőlésirányú szelvényeken a kimutathatóság romlik a vezetőkben folyó indukált áram csökkenése miatt.

Összegzés

A tanulmányunkban áttekintést adtunk a rádiófrekvenciás (radiokip és VLF) felszíni geofizikai módszerek legfontosabb kezdeti, külföldi vonatkozásairól, továbbá a módszerek hazai bevezetéséről. Matematikai-fizikai bevezetőt kö-

vetően a leggyakrabban használatos – Magyarországon mérhető – VLF-adókat ismertettük. A geofizikai mérésekhez is használt adók pozíciója és frekvenciája időben változott, az utóbbi szelektív vevőblokkok fejlesztését igényelte. A sikeres fejlesztés nagymértékben hozzájárult ahhoz, hogy a VLF módszert a korábbi évekhez hasonlóan ma is eredményesen alkalmazzuk. A mérés relatíve könnyű kivitelezhetősége, továbbá a felszínközeli tértartományok jelentős fajlagosellenállás-változásai miatt az esettanulmányok a kutatások széles spektrumát fedték le. A tanulmányban az E- és H-polarizációs esetekre is mutattunk be példát. A VLF-mérési eredmények kiértékelése szinte mindig alulhatározott feladat. Ezen más geofizikai módszerek alkalmazásával, továbbá geológiai ismeretek és megfigyelések felhasználásával sikerült javítani.

A tanulmány szerzői

Vincze László, Németh Norbert, Pethő Gábor

Hivatkozások

- Banks R. J. (1979): The use of equivalent current systems in the interpretation of Geomagnetic Deep Sounding data. *Geophysical J. R. Astr. Soc.*, 56., 139–157.
- Bodoky T., Polcz I. (2016): A Magyar Állami Eötvös Loránd Geofizikai Intézet története II. rész, 1965–2012.
- Cagniard L. (1953): Basic theory of the magneto-telluric method of geophysical prospecting. *Geophysics*, 18/3, 603–635.
- Csókás J., Dobróka M., Gyulai Á., Hursán L., Ferenczy L., Ormos T., Pethő G., Steiner F., Szűcs P., Takács E., Turai E. (1993): Környezetvédelmi geofizikai célú geofizikai módszerek fejlesztése a Miskolci Egyetem Geofizikai Tanszékén. In: 1553-93 TEMPUS JEP Geofizika a környezetvédelem szolgálatában c. továbbképző szeminárium, I. kötet
- Farkas I. (1978): VLF invariáns ellenállás módszer. A Magyar Állami Eötvös Loránd Geofizikai Intézet 1978. évi jelentése, pp. 79–80.
- Ficsór L., Pethő G., Majoros Zs. (1989): VLF method for surveying caves. In: *Proceedings of the 10. International Congress of Speleology*, Budapest, pp. 127–129.
- Geonics Limited (1975): EM16-R (RADIOHM). Two-Layer Interpretation Curves. TN-1, pp. 8–14.
- Geonics Limited (1979): Operating Manual for EM16 VLF-EM.
- Grissemann C., Reitmayer G. (1978): VLF magnetotellurics in ore exploration and structural geology. In: 48th SEG Meeting in San Francisco.
- Less Gy., Kovács S., Pelikán P., Pentelényi L., Sásdi L. (2005): A Bükk hegység földtana. Magyarázó a Bükk hegység földtani térképéhez (1:50000). Magyar Állami Földtani Intézet, Budapest, p. 284.
- Majoros Zs. (1969): Barlangkutatás radiokip módszerrel. *Karszt és Barlang*, 2, 65–68.
- McNeill J. D., Labson V. F. (1991): Geological mapping using VLF radio fields. In: Nabighian M. N.: *Electromagnetic Methods in Applied Geophysics*, Vol. 2, Application, Chp. 7., pp. 521–640.
- Németh N., Pethő G. (2009): Geological mapping by geobotanical and geophysical means: a case study from the Bükk Mountains (NE Hungary). *Central European Journal of Geosciences*, 1(1) 84–94.

- Németh N., Pethő G., Zajzon N. (2015): In situ gamma ray survey for geological mapping of K-metasomatized metavolcanics at Bükkszentkereszt, Bükk Mts, Hungary. *Open Geosciences*, 7, 318–331. DOI: 10.1515/geo-2015-0033
- Németh N., Kristály F., Gál P., Móricz F., Lukács R. (2023): Metavolcanic formations in the Parautochthonous Triassic successions of the Bükk Mts, NE Hungary. *International Journal of Earth Sciences*, 112/1, 297–320. DOI: 10.1007/s00531-022-02246-6
- Paterson N. R., Ronka, V. (1970): Five years of surveying with the very low frequency-electromagnetics method. *Geoexploration*, 9, 7–26.
- Pedersen L. B. (1998): Tensor VLF measurements: Our first experiences. *Exploration Geophysics*, 29, 52–57.
- Pethő G., Ujszászi J. (1975): Barlangkutatás radiokip módszerrel. *Magyar Geofizika*, 16(5), 181–185.
- Pethő G. (2012): Geological applications of the VLF method. *Geoscience and Engineering* 1(2), 129–136.
- Pethő G., Turai E., Szabó N. P., Németh N., Baracza M. K., Bulla D., Kormos K. (2014): Geophysical Exploration of a Complex Metavolcanic Environment. In: EAGE Near Surface Geoscience 2014, Paper: Tu PA1 21, p. 5.
- Sásdi L. (2017): A Bükkben végzett víznyomjelzéses vizsgálatok ismertetése és értékelése. p. 100. https://termeszettvedelem.hu/wp-content/uploads/2022/02/sasdi_laszlo_2017.pdf
- Stiefelhagen W., Müller I. (1979): Radio frequency electromagnetics (RFEM): VLF-EM extended to hydrogeological problems. In: 59th Meeting of EAGE, Geneva
- Sűrű P., Németh N., Pethő G. (2014): Töbrök vízföldtani és geofizikai vizsgálata. In: XVI. Bányászati, Kohászati és Földtani Konferencia. Kolozsvár, EMT, pp. 233–237.
- Szabó L., Vincze J. (2013): A bükkszentkereszti riolit (kvarcporfir)-tufa Mn-ércesedéssel társult U-Be-tartalmú foszfátásványosodása. *Földtani Közlöny*, 143/1, 3–28.
- Takács E. (1971): Tapasztalatok a radiokip módszer alkalmazásában. *Magyar Geofizika*, 12(4) 148–160.
- Takács E. (1981): Geofizika (Geoelektromos kutatómódszerek) II. rész. Tankönyvkiadó, Budapest, p. 271.
- Takács E., Pethő G., Szabó I. (2005): Comparative investigations about the applicability of current density pseudosections in the interpretation of 2D VLF vertical magnetic anomalies. *Acta Geodaetica et Geophysica Hungarica*, 40(2), 127–146.
- Turai E., Gyulai Á., Szűcs P., Baracza M. K., Fejes Z., Pethő G., Szabó N. P. (2015): A felszíni geofizikai mérések eredményei a zempléni melegvíz kutatásban. In: MGE 34. Vándorgyűlés, Budapest, 2015. 09. 24–26.
- Turai E., Szilvási M., Nádas E., Abordán A. (2017): Rekultivált hulladéklerakó belső szerkezetének vizsgálata geoelektromos módszerekkel. In: Műszaki Tudomány az Észak-Kelet Magyarországi Régióban, konferenciakiadvány, pp. 586–593.
- Vincze L. (2015): GEONICS Ltd., EM16/16R VLF műszerhangoló blokkok készítése. Belső jelentés. Geoelektro Kft., Nagykovácsi, megrendelő: ME Geofizikai Intézeti Tanszék.
- Vincze L. (2023): A VLF és RMT műszerek fejlődése és lehetőségei a jelenben. Új eredmények a műszaki föld- és környezet-tudományban. Miskolci Egyetem, Műszaki Földtudományi Kar, Doktoranduszok Fóruma, pp. 329–345.
- Zacher G., Tezkan B., Neubauer F. M., Hördt A., Müller I. (1996): Radiometrics: A powerful tool for waste-site exploration. *European Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, 1(2), 139–159.
- Zajzon N., Németh N., Szakáll S., Gál P., Kristály F., Fehér B., Móricz F. (2014): Ritkaföldfémek a bükkszentkereszti Mn-U-Be geokémiai anomáliában. In: Ritkaföldfémek magyarországi földtani képződményekben (ed. Szakáll S.). CriticEl Monográfia sorozat 5, Milagrossa Kft., Miskolc, pp. 91–108. (ISBN: 978-615-80073-0-6)

A. MELLÉKLET

VLF E- és H-polarizációs egyenletek

Az adóiránnyal (r) párhuzamos csapásirányú 2D-s szerkezeti feltételezés mellett a következő további feltételezésekkel élünk:

- a vizsgált tértartományban a beérkező EM tér megegyezik,
- egyetlen diszkrét f frekvenciájú, $e^{-i\omega t}$ harmonikus időfüggésű EM teret vizsgálunk,
- a vezetési áram lényegesen nagyobb, mint az eltolási áram,
- a közeg izotrop.

A kiindulás az I. vektoriális Maxwell-egyenlet (Ampere-törvény), mely szerint mind a vezetési áram, mind az eltolási áram mágneses teret hoz létre:

$$\operatorname{rot} \vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}. \quad (\text{A1})$$

Ezt az egyenletet hengerkoordináta-rendszerben komponensekre bontva írható, hogy

$$\frac{1}{r} \frac{\partial H_z}{\partial \phi} - \frac{\partial H_\phi}{\partial z} = j_r + \frac{\partial D_r}{\partial t}, \quad (\text{A2})$$

$$\frac{\partial H_r}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial r} = j_\phi + \frac{\partial D_\phi}{\partial t}, \quad (\text{A3})$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r H_\phi) - \frac{1}{r} \frac{\partial H_r}{\partial \phi} = j_z + \frac{\partial D_z}{\partial t}. \quad (\text{A4})$$

A II. vektoriális Maxwell-egyenlet (Faraday-törvény) szerint az időben változó mágneses tér elektromos örvényt teret létesít:

$$\operatorname{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}. \quad (\text{A5})$$

Komponensekre bontás után, henger koordináta-rendszerben:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial E_z}{\partial \phi} - \frac{\partial E_\phi}{\partial z} = -\frac{\partial B_r}{\partial t}, \quad (\text{A6})$$

$$\frac{\partial E_r}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial r} = -\frac{\partial B_\phi}{\partial t}, \quad (\text{A7})$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(rE_\phi) - \frac{1}{r} \frac{\partial E_r}{\partial \phi} = -\frac{\partial B_z}{\partial t}. \quad (\text{A8})$$

A továbbiakban az eltolási áram elhanyagolhatóságát és a skaláris Maxwell-egyenleteket („anyagegyenleteket”) vesszük figyelembe, és a deriválásokat elvégezve kapjuk (A2)–(A4) helyett:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial H_z}{\partial \phi} - \frac{\partial H_\phi}{\partial z} = \sigma E_r, \quad (\text{A9})$$

$$\frac{\partial H_r}{\partial z} = \sigma E_\phi, \quad (\text{A10})$$

$$-\frac{1}{r} \frac{\partial H_r}{\partial \phi} = \sigma E_z. \quad (\text{A11})$$

Hasonlóan, (A6)–(A8) három egyenletéből:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial E_z}{\partial \phi} - \frac{\partial E_\phi}{\partial z} = -i\omega\mu H_r, \quad (\text{A12})$$

$$\frac{\partial E_r}{\partial z} = -i\omega\mu H_\phi, \quad (\text{A13})$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial E_r}{\partial \phi} = i\omega\mu H_z. \quad (\text{A14})$$

A fenti hat egyenletet érdemes úgy csoportosítani, hogy az egyik esetben csak H_r , E_ϕ , E_z komponensek szerepeljenek, azaz az (A10)–(A12) egyenletek, míg a másik esetben E_r , H_ϕ , H_z komponensek, azaz ebbe a csoportba az (A9), (A13), (A14) egyenletek tartoznak. Az (A10) és (A11) egyenletekben szereplő elektromos térkomponenseket (A12)-be helyettesítve megkapjuk a H-polarizációs parciális differenciálegyenletet:

$$\frac{\partial^2 H_r}{(r\partial\phi)^2} + \frac{\partial^2 H_r}{\partial z^2} = i\omega\mu\sigma H_r. \quad (\text{A15})$$

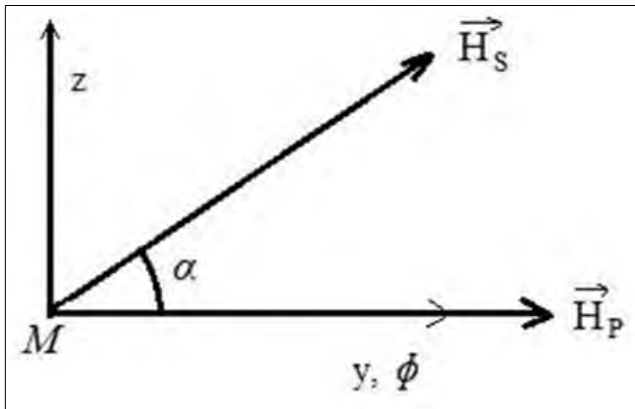
Hasonlóan a mágneses térkomponensek értékeit az (A13) és (A14) egyenletekből (A9)-be helyettesítve az eredmény az E-polarizációs parciális differenciálegyenlet:

$$\frac{\partial^2 E_r}{(r\partial\phi)^2} + \frac{\partial^2 E_r}{\partial z^2} = i\omega\mu\sigma E_r. \quad (\text{A16})$$

B. MELLÉKLET

A VLF mágneses tér polarizációs ellipszise

Egy adóiránnyal megegyező irányú fémes vezetőt és dőlésirányú profilmérést tételezünk fel. Az eredő mágneses tér a primer azimutális mágneses térkomponenst (H_{ϕ_p}) tartalmazó vertikális (yz) síkban akkor válik elliptikusan polarizálttá, ha kialakul a szekunder mágneses tér is, és köztük nemcsak irány-, hanem fáziseltérés (ϕ) is van. Ha a szkinmélységnél kisebb mélységben az adó irányában (x vagy r) hosszan elnyúlt, elektromosan jó vezető képződmény van,



B1. ábra | Primer és szekunder mágneses tér vektora az M felszíni vizsgálati pontban az yz síkban

Figure B1 | Primary and secondary magnetic field vector at the surface observation point M in the yz plane

akkor az indukció miatt a primer mágneses tér fázisához képest ϕ fáziskéséssel a szekunder mágneses tér létrejön. Tételezzük fel, hogy a vizsgálati felszíni (M) pontban a szekunder tér a vízszintessel α szöget zár be (B1. ábra).

A primer és szekunder tér frekvenciája megegyezik a VLF vivőhullám frekvenciájával (f_{vlf} , $\omega = 2\pi f_{vlf}$). Feltételezve, hogy a primer térnek csak vízszintes komponense van:

$$H_{\phi_p}(t) = H_{\phi_p_0} \cos \omega t, \quad H_{z_p} = 0. \quad (\text{B1})$$

A szekunder tér felbontása vízszintes és vertikális összetevőkre:

$$H_{\phi_s}(t) = H_s \cos(\omega t - \phi) \cos \alpha, \quad (\text{B2})$$

$$H_{z_s}(t) = H_s \cos(\omega t - \phi) \sin \alpha, \quad (\text{B3})$$

Az eredő azimutális és vertikális mágneses térösszetevők *in phase* ($\cos \omega t$) és kvadratúra ($\sin \omega t$) komponensek összegeként adható meg:

$$y(t) = H_\phi(t) = (H_{\phi_p_0} + H_s \cos \phi \cos \alpha) \cos \omega t + H_s \cos \alpha \sin \phi \sin \omega t, \quad (\text{B4})$$

$$z(t) = H_z(t) = H_s \sin \alpha \cos \phi \cos \omega t + H_s \sin \alpha \sin \phi \sin \omega t. \quad (\text{B5})$$

Az azimutális komponensben is megjelenő szekunder tér miatt az eredő vízszintes és a vertikális mágneses térkomponens közötti fázisviszony megváltozik, a (B4) és (B5) egyenletek helyett írható:

$$\begin{aligned} y(t) &= Y_0 \cos(\omega t - \phi') \\ &= Y_0 \cos \phi' \cos \omega t + Y_0 \sin \phi' \sin \omega t, \end{aligned} \quad (\text{B6})$$

$$z(t) = Z_0 \cos(\omega t - \phi). \quad (\text{B7})$$

A (B6) és (B4) egyenletek jobb oldalainak összevetéséből kapjuk:

$$Y_0 \sin \phi' = H_S \cos \alpha \sin \phi, \quad (\text{B8})$$

$$Y_0 \cos \phi' = H_{\phi_{p_0}} + H_S \cos \alpha \cos \phi. \quad (\text{B9})$$

Az utóbbi két egyenletből osztással majd a két egyenlet négyzetre emelését követő összegzésével:

$$\phi' = \tan^{-1} \frac{H_S \cos \alpha \sin \phi}{H_{\phi_{p_0}} + H_S \cos \alpha \cos \phi}, \quad (\text{B10})$$

$$Y_0 = \sqrt{H_{\phi_{p_0}}^2 + 2H_{\phi_{p_0}} \cos \alpha \cos \phi + H_S^2 \cos^2 \alpha}. \quad (\text{B11})$$

(B5) és (B7) alapján:

$$Z_0 = H_S \sin \alpha. \quad (\text{B12})$$

A (B6) és (B7) egyenletekben a fázisszögeket módosítjuk úgy, hogy mind a két argumentumhoz ϕ' -t hozzáadunk (ezzel a fázisviszonyok nem változnak meg), és vesszük be a $\delta = \phi' - \phi$ jelölést! Ekkor írható:

$$y(t) = Y_0 \cos(\omega t), \quad (\text{B13})$$

$$z(t) = Z_0 \cos(\omega t + \delta). \quad (\text{B14})$$

(B14)-ben δ értéke:

$$\delta = \left(\tan^{-1} \frac{H_S \cos \alpha \sin \phi}{H_{\phi_{p_0}} + H_S \cos \alpha \cos \phi} \right) - \phi. \quad (\text{B15})$$

A t paraméter eliminálása a (B13), (B14) egyenletekből:

$$\begin{aligned} z/Z_0 &= \cos(\omega t + \delta) = \cos \omega t \cos \delta - \sin \omega t \sin \delta \\ &= (y/Y_0) \cos \delta - \sqrt{1 - y^2/Y_0^2} \sin \delta. \end{aligned} \quad (\text{B16})$$

Az átrendezést és négyzetre emelést követően:

$$\left[(z/Z_0) - (y/Y_0) \cos \delta \right]^2 = (1 - y^2/Y_0^2) \sin^2 \delta. \quad (\text{B17})$$

Ebből a polarizációs ellipszis szokásos alakú egyenlete az yz síkban:

$$\frac{y^2}{Y_0^2} + \frac{z^2}{Z_0^2} - 2 \frac{yz}{Y_0 Z_0} \cos \delta = \sin^2 \delta. \quad (\text{B18})$$

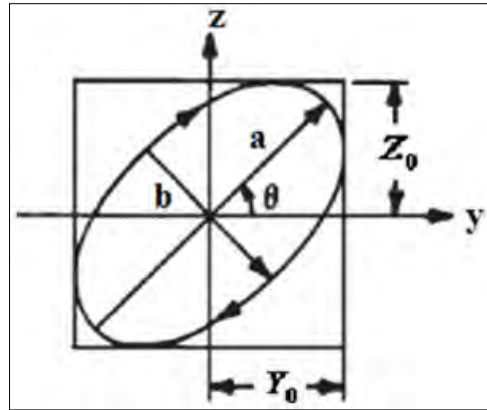
Az ellipszis (B2. ábra) paramétereit (B11), (B12), és (B15) adják meg. A gyakorlatban az ellipticitásra (e) és a kistengelynek a függőlegessel bezárt szögének (θ) – amely megegyezik a nagytengelynek a vízszintessel bezárt szögével – tangensére vonatkozó formulák megadásakor azzal a feltételezéssel élnek, hogy a szekunder tér lényegesen kisebb, mint a primer tér. A dőlésszög így a szekunder vertikális mágneses térösszetevő *in phase* komponensével,

$$\theta \approx \tan^{-1}(H_S \sin \alpha \cos \phi / H_{\phi_{p_0}}), \quad (\text{B19})$$

míg a kistengely–nagytengely hányados a szekunder vertikális mágneses térösszetevő kvadratúrakomponensével közelíthető:

$$e = \frac{b}{a} \approx H_S \sin \alpha \sin \phi / H_{\phi_{p_0}}. \quad (\text{B20})$$

A (B5), (B19), (B20) egyenletek mutatják meg a szekunder vertikális mágneses térkomponens és a polarizációs ellipszis két paramétere közti kapcsolatot.



B2. ábra | Mágneses tér polarizációs ellipszise az yz síkban lévő felszíni megfigyelési pontban egy adóirányú, (x) hosszan elnyúlt, elektromosan jó vezető objektum felett

Figure B2 | Magnetic polarization ellipse at the surface observation point in the yz plane over a conductive target elongated in the transmitter bearing

Beszámoló a Balkán Geofizikai Társulat 12. Kongresszusáról

A Balkán Geofizikai Társulat, amelynek a Magyar Geofizikusok Egyesülete is tagja, 12. Kongresszusát idén május 27-től 31-ig tartotta Szerbiában a Kopaonik Hegység sí- és természetjáró paradicsomában a „Kraljevi cardaci” hotelben.

A kongresszus, amelyen a szokásos előadásokon túl, számos meghívott előadás is elhangzott, sikerrel zárult *Snezana Komatina* professzor asszony és szerbiai kollégái



Hotel Kraljevi Čardaci, Kopaonik Mt., Serbia

Május 27. Érkezés, regisztráció és egy közös vacsora

Május 28. A Kongresszus Megnyitója majd ezt követően három meghívott előadó:

Aldo Vesnaver: Amplitude and travelttime inversion for mono-channel Boomer surveys

Aleksandra Kolarski: Solar-Terrestrial Interactions: Solar Flares as Earth's lower ionospheric Perturbors

Florina Chitea Tuluca: The role of geophysics and cross-sector technologies for methane abatement strategies in the Waste Sector

Délután:

Workshop: Learning how to use the EPOS Data Portal: harnessing cross-disciplinary research
Presenters: *Harald Nedrebø, Jan Michalek and George A. Donoso*

George A. Donoso (Luleå University of Technology, Sweden): Introduction to EPOS, the European Plate Observing System

gái gondos szervező munkáját dicsérve. A kongresszus szervezését számos, geofizikában érdekelt vállalat és nemzetközi egyesület támogatta.

Az alábbiakban rövid áttekintést adunk a szakmai programról, melynek egyes előadásai az EAGE „Earth Doc” adatbázisában minden bizonnyal felelhetők lesznek.

Poszterbemutatók:

Ndreko Dhurata: Evaluation of the macroseismic field of moderate M4.8 of Klosi earthquake in Albania

Lule Arjol: Moderate to strong earthquakes of albania during this century and their seismogenic zones

Rumiana Bojilova: Ionospheric co-seismic effects after MW 5.9 earthquake in Greece on 29 March 2024

Dimcho Solakov: Seismological analysis of the swarm type seismicity in the Kresna seismogenic zone (Bulgaria)

Ormeni Rrapo: Seismotectonic activity of the curraj i epem-ragami transversal fault zone, Albania

Sunjay Sunjay: Carbon capture geological storage

Omoregbe Omoare: Hydrogeophysical investigation of Asaba area, Delta State, Nigeria

Technical Exhibition

Walking tour Čardaci 1

Ice-breaker reception

Május 29. *Előadások:*

Ndreko Dhurata: Some aspects of seismic activity during 2023 in Albania and surrounding area

Lule Arjol: Seismicity of Shkoder-Peje deep fault zone during this century

Ormeni Rrapo: Statistical analysis of the current seismicity in the Kurbnesh-kukesprizren zone, Albania

Marko Vanić: Lithology prediction using wave-equation based AVO seismic inversion in complex geological setting of the Pannonian Basin

Vita Kalashnikova: Method for spatial first break picking using neural network, QC, editing and smoothing

Andrei Voronin: Application of CRS technique to poor quality of seismic signal data

Laurențiu Asimopolos: Study about block size distribution curves and commercial boundaries of the marble quarries

Moataz Mohamed Gomaa Abdelrahman: Hybrid Singular Value Decomposition (SVD)-based interval inversion algorithm for robust petrophysical parameters prediction

Vita Kalashnikova: Lithology and fluid prediction using AI algorithms around the Shrek area in the Norwegian Sea

Christian Tzankov: Integrated geophysical study of the ancient city of Cabyle, Southern Bulgaria

Peter Tildy: Geophysical Investigation of Organic Contaminant Plume using ERT and IP – a case study from Hungary

Milena Marjanović (meghívott előadó): Insights into dike nucleation and eruption dynamics from high-resolution seismic imaging of magmatic system at the East Pacific Rise

Nádasi Endre Kázmér: Modeling the detectability of cavities under rebar structures in case of GPR measurements

Marjan Delipetrev: Potential for construction of a geothermal power plant in the Republic of North Macedonia

Natalia-Silvia Asimopolos: Analysis of the geomagnetic storm from March 23–24, 2024, which had a strong impact on the Earth

Magdalena Marković: Ophiolites in Serbia: An untapped energy source/storage rock

Maria Angela Capello, OSI (meghívott előadó): The strategic opportunity of sustainability in the energy sector

Koya Suto (meghívott előadó): Contribution of geophysics to disaster assessment and community development – An example from a GWB project

Boyko Ranguelov: Seismology of extra-terrestrial bodies in the Solar system

Filip Arnaut: River proximity data as a predictor for ophiolite classification: A machine learning approach with OSM data

Sherif M. Elkholy: Investigating the impact of reservoir temperature variation on the geological CO₂ storage capacity

Este: Gála vacsora

Május 30. *Előadások*:

Magdalena Marković (meghívott előadó): Postgraduate education in Earth sciences: where are we heading?

Florina Chitea Tuluca: Role of geophysics for security challenges in the world

Igbinedion Pedro Imafidon: Geophysical investigation of part of Ahmadu Bello University Farm, Nigeria

M. Salih Bayraktutan: Seismological analysis of the location of the ash landfill in KEC for the installation of solar panels

Dejan Bajić: Geothermal energy in Serbia and its potential

Dorđe Maroš: Response and criteria for CO₂ storage

Branislava Radišić: Non-renewable and renewable energy sources

Mbata Dennis-Godfrey Praise: Ownership of oil and gas in Nigeria

Marko Vanić (meghívott előadó): The adventure begins: Discovering joyful and simple ways to mastering skills for the future you want to create

Panel Discussion: *Carbon Capture Utilization Storage (CCUS)*

How to scaleup CCUS? From technology, to safety, considering economics, expanding policies, including social justice & equity

Moderator: *Mileva Radonjić*

Pierre Cerasi: Modelling of fracture healing due to creep of caprock shale in CO₂ geological sequestration

Sherilyn Williams-Stroud: Integrating induced seismicity with fault interpretation at the Decatur, IL CCS Projects

Camelia Knapp: Seismic inversion for carbon storage in onshore/offshore environments

Christine Ehlig Economides: Integrating hydrogen generation with CO storage

Yunxing Aron Lu: Advancing CCS with AI: Addressing regulatory complexities and enhancing public acceptance through Large Language Models (LLMs)

Ben Anderson: Integrated core analysis techniques for CCUS

Május 31. Poszterbemutatók:

Maya Tomova: Electrical resistivity tomography for mine planning and identifying potential hazards of underground operations

Marjan Delipetrev: High seismic activity of Republic of North Macedonia in the period 2015–2020

Atanas Kisyov: Application of the ERT method for mapping landslide bodies in tectonically disrupted rock masses

Kritikakis George: 3D electrical tomography for monitoring sea water intrusion at Samaria gorge National Park

Rumiana Boijlova: Ionospheric effects during annular solar eclipse on 14 October 2023

Kritikakis George: Application of MASW and SRT methods for nearshore antiquities imaging

Florina Chitea Tuluca: Geohazards in urban areas. Study case: Slanic town (Prahova county, Romania)

A Kongresszus bezárása



A Kongresszus résztvevői (elől középen a férfiak között *Snezana Komatina* professzor asszony)

Kedves Kollégák!

Örömmel tudatom, hogy pár hete megjelent a Springer Nature Kiadónál a „Statistical Rock Physics” c. monográfiám. (Ld. mellékelt kép, a kötetről az interneten részletes tájékoztatás található: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-031-46700-4>)

A könyv pdf példányát szívesen elküldöm minden geofizikus vagy geológus kollégának, aki e-mailben megkeres, és ezt kéri.

Hejce, 2024. május 28.

Baráti üdvözlettel,

Korvin Gábor
gaborbhai@gmail.com

volt ELGI-s, az MTA doktora, a King Fahd University of Petroleum and Minerals (Dhahran, Saudi Arabia) nyug. professzora



Ujfalusy Antal Gábor, a Magyar Geofizikusok Egyesületének alapító tagja 1931 – 2024

Ujfalusy Antal Gábor, 1931-ben született a Bács-Kiskun megyei tanyavilágban, Gátéren, édesanyja tanárnő, édesapja kántortanító volt. 13 éves korában, 1944. október 22-én kiskunfélegyházi házukat ágyúlövedék találta el, a becsapódás következtében szülei és kishúga is azonnal meghaltak. Csúpan ő és vak nagyapja, Forgó Gábor, aki a Félegyházi Gimnázium korábbi igazgatója volt, élték túl a támadást.

Ujfalusy Antal elemi iskolai tanulmányait Kiskunfélegyházán kezdte, majd ugyancsak Kiskunfélegyházán, a Constantinumban és a mai Móra Ferenc Gimnázium elődjében folytatta. A gimnázium utolsó két évét Karcagon végezte. Érettségi után, 1949-ben kezdte meg tanulmányait a Budapesti Műszaki Egyetem Sopronba kihelyezett Földmérő Mérnök Karán, innen két év múltán váltott át a Geofizikus Mérnök Karra, ahol 1953-ban geofizikus mérnöki oklevelet kapott.

Végzése után a Magyar–Szovjet Olaj Vállalathoz került, majd egész életében itt és ennek jogutódjainál dolgozott, így végül a MOL Rt.-től vonult nyugdíjba.

1956 nyarától két és fél éven át részt vett családjával a Kínai–Magyar Geofizikai Expedícióban, mely egész életét meghatározta. Az expedíció, működésének három éve alatt, két nagy területet vizsgált át: először a Sárga-folyó által körülölelt, 1700 méteres magasságban húzódó, Belső-Mongóliában fekvő Ordoszi-fennsík sivatagjában zajlottak a kutatások, majd később magyar javaslatra az expedíció színhelyét áthelyezték a több eredménnyel kecsegtető Mandzsúriába, changchuni székhellyel. Végül itt letek rá Kína mai napig legnagyobb kőolaj- és földgázlelőhelyére. Az elért nagy horderejű szakmai eredményért végül az expedíció tagjaival együtt Csou En-laj miniszterelnök személyes kitüntetését vehette át.

Az 56-os forradalom izgalma átjárta a Kínában dolgozó expedíciót is. 1956 szilveszterén Ujfalusy Antal azt javasolta, hogy a lanchoui helyi kormányzó által a nemzetközi szakembereknek tartott fogadáson a pohárköszöntő alkalomával a magyarok ne igyanak a szovjetek egészségére. Hazatérésük után büntetőeljárás indult, és vádirat készült

ellenük. A több kihallgatást követően végül 1960-ban a Legfelsőbb Bíróság megszüntette az eljárást Kádár János utasítására és a magas kínai kitüntetés hatására.



Ujfalusy Antal Gábor
1931 – 2024

Kínai kutatási eredményeit a helyi Tudományos Akadémia *Acta Geofizika* folyóiratában közölte, ezt tíz hazai szakmai publikáció követte. Előadó és gyakorlatvezető volt a Miskolci Nehézipari Egyetemen és a budapesti ELTE Geológiai karán, valamint előadást tartott a salzburgi EAEG kongresszuson (1968) is. Az 1980-as években másfél hónapot dolgozott Washingtonban és Denverben, az USA geológiai szolgálatánál (USGS), ahol részt vett a Világbank, az USGS és a hazai olajipar megállapodásának tető alá hozásában.

1992-es nyugdíjazásáig, majd később nyugdíjasként is a MOL Rt. geofizikai szeizmikus kiértékelési osztályán dolgozott, részt vett a hajdúszoboszlói, a pusztaföldvári, a makói és az algyői olaj- és gáztároló szerkezetek feltérképezésében is.

Ujfalusy Antalt egyesületi tevékenységéért a Magyar Geofizikusok Egyesülete 1993-ban tiszteleti tagjává választotta és 1997-ben „Renner János Emlékérem”-mel jutalmazta.

Ujfalusy Antal fantasztikus személyiség volt, aki mindenivel rekord idő alatt megtalálta a közös hangot. Igazi társasági ember! Derűs, életvidám személyisége mindenkit elvarázsolt. Frissen megismert emberek olyan ragaszkodással kötődtek hozzá, amiből bensőséges barátságok alakultak ki.

Soha nem panaszkodott. Mindenben kizárólag a jót látta meg, és példa számunkra az az elégedettség, amellyel a legapróbb dolgokhoz is viszonyult. Isten szeretete vezette egész életében, és ez segítette át az embert próbáló nehézségeken is. Vállalta a hitét a legnehezebb időszakokban is.

Híres volt derűs humoráról, amellyel mindenki arcára mosolyt csalt.

Kedves Tóni, nyugodjál békében, nem felejtünk el!

*Családjának megemlékezése alapján
összeállította a Szerkesztőség*

Búcsúzunk 1970–2024



Az Eötvös Loránd Geofizikai Intézet 1970-ben épült székháza több mint fél évszázadig szolgálta a magyar föld kutatását és a magyar tudományos kutatásokat. Többen is részt vettünk építésében, saját munkával is.
Most búcsúzunk tőle.



MAGYAR GEOFIZIKUSOK EGYESÜLETE

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

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