

MAGYAR GEOFIZIKA

HUNGARIAN GEOPHYSICS

A MAGYAR
GEOFIZIKUSOK
EGYESÜLETÉNEK
FOLYÓIRATA



JOURNAL OF THE
ASSOCIATION
OF HUNGARIAN
GEOPHYSICISTS

Tisztelet az éveknek

Dunántúli magnetotellurikus MTOA-01 alapszelvény

A Demjén környéki terület felszín alatti
hőmérsékletviszonyainak becslése

EÖTVÖS 175

Agocs-ösztöndíj, 2023

Szekció tisztelgett Szabó Csaba munkássága
előtt a Goldschmidt Konferencián

Új, mágnesesen árnyékolt úrkutatási laboratóriumot
adtak át Fertőbozon

In Memoriam

Mészáros Ferenc Fülöp



MAGYAR GEOFIZIKA

HUNGARIAN GEOPHYSICS

64. évfolyam (2023) 2. szám



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

TARTALOM • CONTENTS

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

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

TANULMÁNY • PAPER

78 Dunántúli magnetotellurikus MTOA-01 alapszelvény (CEL07 litoszférakutató szeizmikus tomográfia-szelvény mentén) (MTOA-01 base magnetotelluric section of Transdanubia (along the lithosphere exploration seismic tomography section CEL07)) – *Kiss J., Szabó R. M.*

95 A Demjén környéki terület felszín alatti hőmérsékletviszonyainak becslése (Estimation of subsurface temperature conditions in the vicinity of Demjén) – *Vass P.*

HÍREK • NEWS

111 EÖTVÖS 175 – *Szerkesztőség*

113 Agocs-ösztöndíj, 2022 – *Galsa A.*

114 Szekció tisztelt Szabó Csaba munkássága előtt a Goldschmidt Konferencián – *Patkó L., Spráncz T., Berkesi M., Kovács I. J., Gelencsér O., Guzmics T.*

114 Új, mágnesesen árnyékolt űrkutatási laboratóriumot adtak át Fertőbozon – *Szerkesztőség*

IN MEMORIAM

115 Mészáros Ferenc Fülöp – *Bodoky T., Tóth Cs.*

MAGYAR GEOFIZIKA

HUNGARIAN GEOPHYSICS

64. évfolyam (2023) 2. 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 szakcikkeket (tanulmányokat) szaklektorálás után közli. A szaklektorok névsorát az évváró számban tesszük közzé. A lapban megjelenő cikkek adatainak és állításainak helyességért, ill. közölhetőségéért kizárólag a szerzők tartoznak felelősséggel.

Kiadja a Magyar Geofizikusok Egyesülete

A kiadásért felel: 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)

Tisztelet az éveknek

Kedves Szeniorok!

Szeretettel és tisztelettel köszöntöm az idén kerek évfordulót ünneplő tagtársainkat!

Már huszonhat éve él ez a rovatunk a *Magyar Geofizika* oldalain. Remélem, egy kis mosolyt csal majd az arcukra és némi örömet jelent Önöknek idén is ez a megemlékezés. Azt is remélem, hogy ezzel a pár sorral és a fényképekkel a fiataloknak is eszükbe jutnak a régi kedves kollégák, akik segítettek nekik beletanulni a szakmába, átsegítették őket a kezdeti nehézségeken, és támogatták őket a hét-köznapokon is, ha szükség volt rá.

Sajnáljuk, hogy már nem működnek azok az intézmények, ahol nagyobb létszámban dolgozhattunk együtt, és a szakma széles körű megismerésére nyílt lehetőség.

Talán segít azonban a fiatal kollégáknak, ha a régi jelentések, beszámolók anyagait tanulmányozva ezeken az oldalakon megismerhetik, hogy kiknek a lába nyomán járnak, kiknek köszönhetik azt az ismeretanyagot, amelyet ma használhatnak. A szenior kollégák teljesítménye lemérhető a jelentéstárak több ezer kötetén, alapos és precíz munkájuk eredménye jó példát mutat a következő generációknak.

Kívánjuk, hogy az ünnepeltek még sok évig éljenek jó egészségben, kedves, boldog családi-baráti körben!

Tisztelettel,

Hegybíró Zsuzsanna
az MGE nevében

95. születésnapját ünnepli

Gööz Lajos

90. születésnapját ünnepli

Aczél Etelka, Bartha Lajos, Szarka Rudolf, Veró József

85. születésnapját ünnepli

Baranyai Pál, Deres János, Komlóssy György, Szalóki István,
Szeidovitz Győző,

80. születésnapját ünnepli

Déry Béla, Drahos Dezső, Kardeván Péter, Kónya Albert, Kulcsár János,
Matherni Géza, Pályi András, Rezessy Géza, Tátrallyay Mariella

75. születésnapját ünnepli

Ábele Ferenc, Beke Balázs, Dobórka Mihály, Gömböcz Lajos, Guthy Tibor,
György Lajos, Keresztes Nagy Tiborné, Késmárky István, Kovács András
(Szolnok), Kovács Károly (Sopron), Ormos Tamás, Románné Hegybíró
Zsuzsa, Satori Gabriella, Tóthné Gittinger Edit, Viola Balázs

70. születésnapját ünnepli

Zalai Péter



Gööz Lajos dr.



Aczél Etelka dr.



Bartha Lajos



Szarka Rudolf



Verő József dr.



Baranyai Pál dr.



Deres János dr.



Komlóssy György dr.



Szalóki István dr.



Szeidovitz Győző dr.



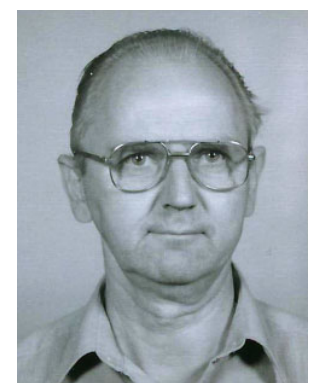
Déry Béla



Drahos Dezső dr.



Kónya Albert



Matherni Géza



Pályi András



Rezessy Géza



Ábele Ferenc



Dobróka Mihály dr.



Gömböcz Lajos



Guthy Tibor dr.



György Lajos



Késmárky István dr.



Ormos Tamás dr.



R.-né Hegybiró Zsuzsanna



Sátori Gabriella dr.



Tóthné Gittinger Edit



Viola Balázs dr.

Dunántúli magnetotellurikus MTOA-01* alapszelvény (CEL07 litoszférakutató szeizmikus tomográfia- szelvény mentén)

KISS J.^{1,@}, SZEKENYI R. M.²

¹Szabályzott Tevékenységek Felügyeleti Hatósága (SZTFH), Földtani Igazgatóság,
H-1051 Budapest, Sas utca 20–22.

²ELTE, Földrajz- és Földtudományi Intézet, Geofizikai és Űrtudományi Tanszék
@E-mail: janos.kiss@sztfh.hu

Egy 2020-ban megjelent tanulmányban vizsgáltuk az invertált MT szelvények (fajlagos ellenállások) adatai alapján a különböző polarizációjú mérések anizotrópiáját. 2021-ben visszanyúlva a korábbi modellezési eredményeinkhez azt elemeztük, hogy milyen torzulást (anizotrópiát) okoz a felszínközeli található mágneses ható, de ekkor már nem az invertált adatokon, hanem a direkt modellezésből kapott és a terepen mért szondázások látszólagos fajlagos ellenállásai alapján. A 2023-ban megjelent tanulmányban, frekvencia- és mélységtartományban is bemutattuk a direkt modellezés eredményét egy, a vezetőképesség alapján homogén, de a mágnesezettség alapján inhomogén modellen. Azt vizsgáltuk, hogy a klasszikus képletekkel kiszámolt paraméterek (látszólagos fajlagos ellenállás, fázis és behatolási mélység) milyen torzulásokat szenvednek.

Ebben a dolgozatban visszanyúlunk CEL07 litoszférakutató szelvény magnetotellurikus szondázásaihoz, amelyeket 2003-ban mértek. A szelvényt – mivel az MT szelvények legnyugatibb, északitól a déli országhatárig futó elektromágneses mérése – az MTOA-01 (MagnetoTellurikus Országos Alapszelvény) névre kereszteltük. A névből adódik, hogy a programot folytatni szeretnék nyugatról kelet felé haladva, összedolgozva a korábban különböző célból mért, de eddig külön életet élő magnetotellurikus szondázásokat és szelvényeket.

Kiss, J., Szekenyi, R. M.: MTOA-01 base magnetotelluric section of Transdanubia (along the lithosphere exploration seismic tomography section CEL07)

In 2020, we analysed the anisotropy of measurements with different polarizations based on inverted MT section data (based on specific resistivity). In 2021, we went back to our previous modelling results and analysed the distortion (anisotropy) caused by the near surface magnetic body, but this time not on the inverted data, but on the basis of apparent resistivity obtained from direct modelling or measured in the field. In our next paper published earlier this year, we presented the results of direct modelling in the frequency and depth domains on a conduction-homogeneous but magnetically inhomogeneous model. We have investigated the distortions of the parameters (apparent resistivity, phase, and penetration depth) calculated by classical formulas.

In this paper, we retrieve to magnetotelluric soundings measured along the CEL07 lithospheric survey section in 2003. The section, being the westernmost electromagnetic measurement of the country-side MT sections running from the northern boundary to the southern boundary, is named MTOA-01 (after Hungarian name: MagnetoTelluric National Base Section). From the name, it is intended to continue the programme, moving from west to east, combining magnetotelluric soundings previously measured for different purposes but living separate lives so far.

Beérkezett: 2023. július 11.; *elfogadva:* 2023. szeptember 13.

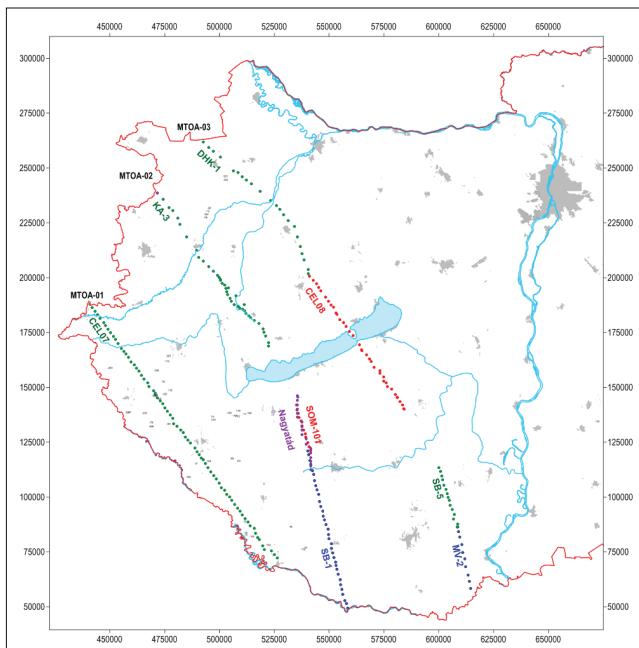
* MTOA – MagnetoTellurikus Országos Alapszelvény (MagnetoTelluric Country-side/National Base Section)
(MTOA-01 magnetotellurikus alapszelvény = CEL07 litoszférakutató szeizmikus szelvény)

Bevezetés

Olyan archív magnetotellurikus mérési adatokat gyűjtötünk le az országos adatbázisból, amelyek felfűzésével az országhatártól országhatárig tartó folyamatos mérési szelvényt kaptunk (1. ábra). Ezek a szelvények magnetotellurikus országos alapszelvényeknek tekinthetők, ilyenek például:

- Az MTOA-01 alapszelvény teljes egészében a CEL07 litoszférakutató szeizmikus szelvényen mért MT mérési adatoknak felel meg (a mérések Ausztriában folytatódnak, de azokkal most nem foglalkozunk).
- Az MTOA-02 alapszelvény a kisalföldi KA-3, a somogyi 101 szelvényeket, a nagyatádi hálózatos MT mérés pontjait és a D-dunántúli Sb-1 szelvényt fogja együttesen jelenteni. Ezen a szelvényen egy hiányzó 20 km hosszú szelvényt szakaszt terepi mérésekkel pótolnunk kell, ami folyamatban van. A szelvény feldolgozásáról egy diplomamunka (Szabó 2023) is készült.
- Az MTOA-03 alapszelvény a kisalföldi DKH-1, a CEL08 vonalán mért mérések és az SB-5 és MV-2 szelvényekből áll össze. Itt is van egy kb. 30 km-es hiányzó rész, amelyet még terepi mérésekkel pótolni kell, hogy teljes és egyenletes fedettséget kapjunk.

A Dunántúlon a CELEBRATION-2000 litoszférakutató program keretében lemért CEL07 és CEL08 szeizmikus tomografikus szelvények mentén rendelkezésre álltak tehát magnetotellurikus szondázások is. Ezek mentén a vonalak mentén korábban gravitációs és mágneses adatfeldolgozások is történtek (Kiss 2005, 2009, Kiss, Prácser 2016).



1. ábra Magnetotellurikus Országos Alapszelvények (Ny-ról K-re sorban: MTOA-01 (CEL07), MTOA-02 és MTOA-03)

Figure 1 Magnetotelluric National Base Sections (in order from W to E: MTOA-01 (CEL07), MTOA-02 and MTOA-03)

A közép-magyarországi tektonikai, nagyszerkezeti zóna és a balatonfelvidéki vulkanizmus (köpeny xenolitokkal), valamint az eltérő földtani kifejlődésű blokkok (ALCAPA, TISZA) teszik érdekessé ezeket az alapszelvényeket. A szeizmikus tomográfia mellett a magnetotellurikus méréseknek a behatolási mélysége lehetővé teszi a kéregmélységű kutatásokat és elemzéseket. Ebbe a kutatásba kapcsolódunk be az elektromágneses mérési adatokkal figyelembe véve a fent említett kutatási szempontokat és a Topo-Europe (Cloething et al. 2007), illetve AlpArray (Hetényi et al. 2018) mérési programokat, amelyek a Kárpát-medencében napjainkban is jelen vannak.

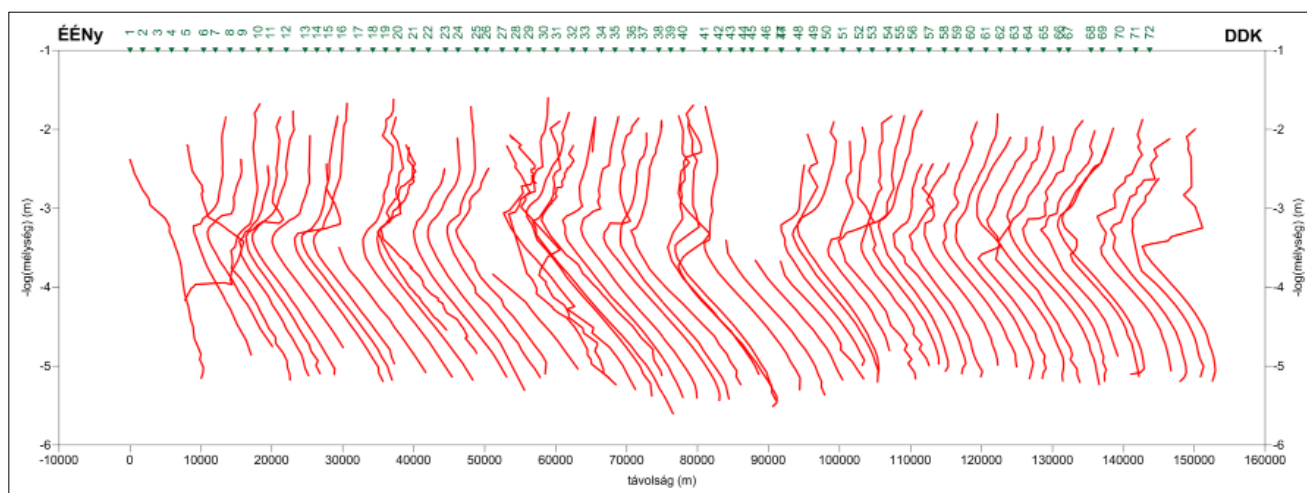
Az új magnetotellurikus feldolgozásokat módszertani kutatás előzte meg, amely a magnetotellurikus mérések E- és H-polarizációs méréseinek eltérését vizsgálta, azaz a fizikai tulajdonságokba megjelenő anizotrópiát. Erre legmegfelelőbbnek az AniMax (a ρ_{xy}/ρ_{yx} és a ρ_{yz}/ρ_{zy} arányok összege) érték tűnt, amely a szerkezeti anizotrópiára és a mágneses testek mellett megjelenő torzulásokra érzékeny (Kiss et al. 2020). A mágneses hatók mellett kialakuló anizotrópiát modellezéssel is igazoltuk (Kiss, Prácser 2021).

A feldolgozások során nem mindegy, hogy a mért látszólagos fajlagos ellenállást vagy pedig az invertált fajlagos ellenállásokat használjuk fel az AniMax kiszámításakor. Tapasztalataink alapján a látszólagos fajlagos ellenállás forrásadatait érdemes használni, bár a behatolási mélységek eltérősége miatt ez csak a szondázási mélységgörbék vagy az interpolált E- és H-polarizációs rácsok alkalmazásával lehetséges, mivel más a frekvencia és a mélység szerint kapott anizotrópia.

MTOA-01 szelvény mentén végzett feldolgozások

2003-ban 72 ponton magnetotellurikus mérés történt a CELEBRATION-07 (röviden: CEL07) vonal mentén, az osztrák–magyar határtól egészen a horvát–magyar határig. A GeoForschungsZentrum (GFZ) Potsdam magnetotellurikus műszerkészletének SPAM és CASTLE típusú műszereivel történtek a mérések a soproni MTA–GGKI kivitelezésében, ELGI együttműködéssel (Szarka et al. 2004, Ádám et al. 2005).

Három tektonikai egység (Pannon-medence, Keleti-Alpok és Dinaridák) érintkezési zónájában egy bonyolult geológiai felépítés tisztázása céljából végezték magnetotellurikus mélyszondázásokat egy 140 vkm¹ hosszú szelvény vonalában (1. ábra). A szondázási pontok távolsága 2 km volt. Az MT mérések a CEL07 litoszférakutató szelvény nyomvonalának magyarországi részét követték. Az MT mérési pontok távolsága megegyezett a szeizmikus geofonok távolságával. A mérési anyagot, annak feldolgozását több tanulmány (Szarka et al. 2004, Ádám et al. 2005, Kiss 2005), előadás (Szarka et al. 2003, Ádám et al. 2004a, 2004b, Szarka et al. 2004) és doktori dolgozat (Kiss 2009, Novák 2010) is bemutatja.



2. ábra Magnetotellurikus impedanciából ($Z_{xy} = E_x/H_y$, H-polarizáció, ZROT = 0) kiszámolt látszólagos fajlagos ellenállás (ρ_{xy}) szondázási görbék az MTOA-01 (CEL07) szelvény nyomvonalában (nagyon zajos görbék és pontszerű zajok kiszűrve) logaritmus mélységskála mentén

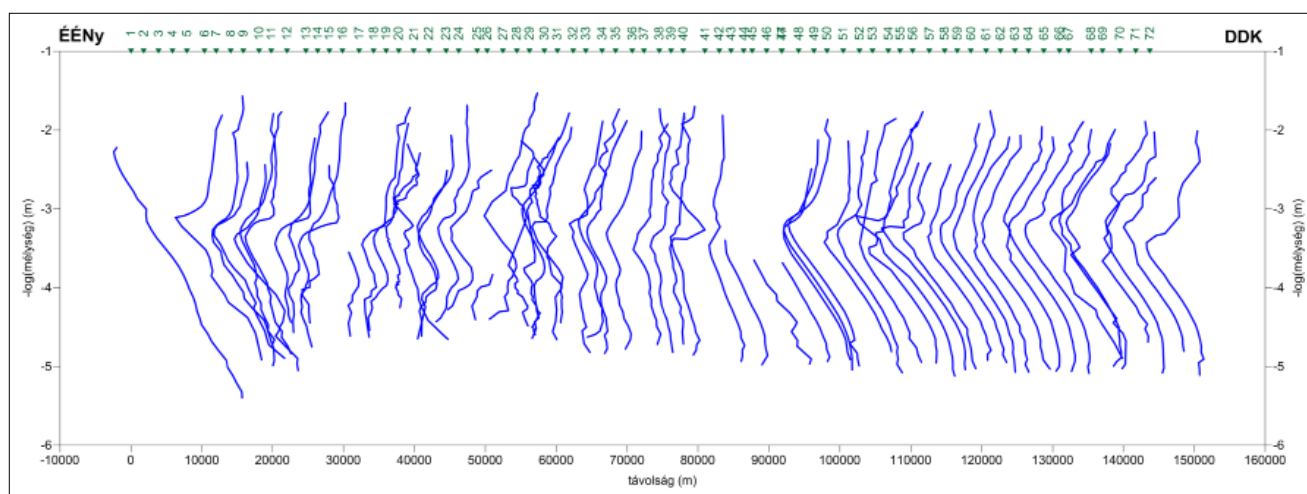
Figure 2 Apparent resistivity (ρ_{xy}) curves calculated from magnetotelluric impedance ($Z_{xy} = E_x/H_y$, H-polarization, ZROT = 0) along the trace of the MTOA-01 (CEL07) section (very noisy curves and point noises filtered out) along a logarithmic depth scale

A 2. és 3. ábra magnetotellurikus impedanciából (Z) kiszámolt látszólagos fajlagos ellenállás²⁾ (ρ) szondázási görbéket mutatja a CEL07 szelvény nyomvonala mentén.

Az ábrákon megjelennek zöld színnel a mérési pontok helyei, azok függőleges tengelye jelzi a mérési adatok helyét. Az ábrák függőleges tengelye a Bostick-mélység³⁾ tengely. Mivel a szondázási görbéket log-log skálán jelenítjük meg, így a mélységtengelyen a mélység logaritmus jelenik meg, negatív előjellel. A szondázási görbék ellenállásértékét a távolság tengelynek megfelelően ábráztuk, de ez is logaritmus érték. A tengelyvonalak ellenállásértékét a feldolgozóprogramban interaktívan állítjuk be egy eltolási értékkel és egy szorzótényezővel. Erre azért van szükség, hogy a görbék jellege (lefutása) minél karakteresebben jelenjen meg a regionális megjelenítés esetén. A megjelení-

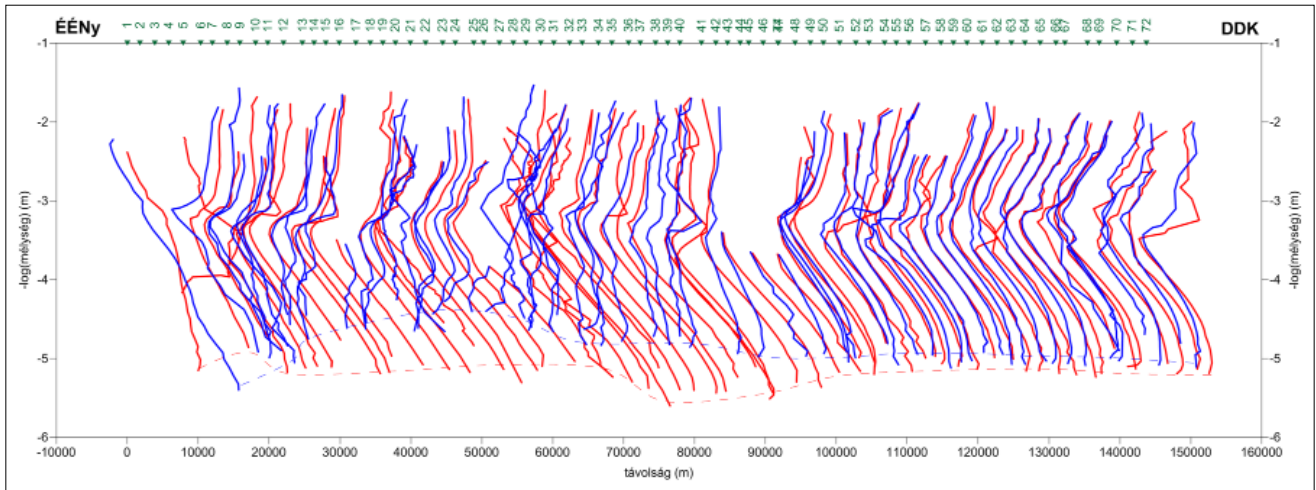
tés során az egyponos zajokat szubjektív úton eltüntettük a görbékről. Vannak nagyon zajos használhatatlan görbék (nincsenek megjelenítve), és vannak zajos, de használható görbék is (korrigált formában jelennek meg).

A 2. ábra a H-polarizációnak (TM mód) megfelelő eredményeket mutatja, a 3. ábra az E-polarizációs (TE mód) eredményeket mutatja. A két ábra görbéi között a legnagyobb különbség 25 és 95 vonalkm között, körülbelül 2 km-es mélységben megjelenő trend- vagy görbemenet változása (4. ábra). Az E-polarizációs görbéken nem kezd el emelkedni a látszólagos fajlagos ellenállás, hanem megtartja folyamatosan csökkenő jellegét, miközben H-polarizációban már egyértelmű emelkedés látszik. H-polarizációban a görbék lefutása a $-3,5 \div -5$ exponenciális mélységértékek között párhuzamos, azaz a vezetőképesség ha-



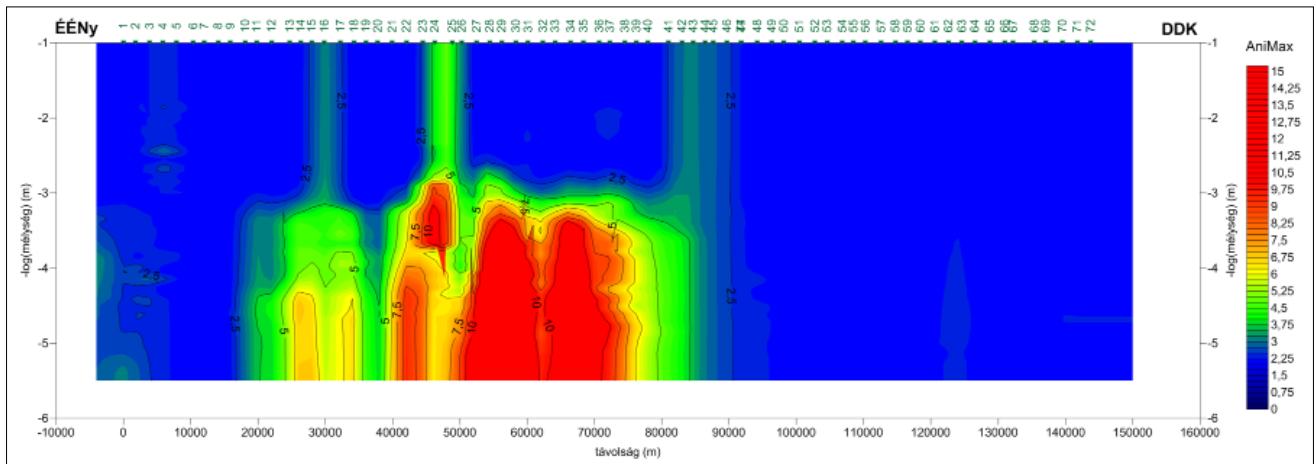
3. ábra Magnetotellurikus impedanciából ($Z_{yx} = E_y/H_x$, E-polarizáció, ZROT = 0) kiszámolt látszólagos fajlagos ellenállás (ρ_{yx}) szondázási görbék az MTOA-01 (CEL07) szelvény nyomvonalában (nagyon zajos görbék és pontszerű zajok kiszűrve) logaritmus mélységskála mentén

Figure 3 Apparent resistivity (ρ_{yx}) curves calculated from magnetotelluric impedance ($Z_{yx} = E_y/H_x$, E-polarization, ZROT = 0) along the trace of the MTOA-01 (CEL07) section (very noisy curves and point noises filtered out) along a logarithmic depth scale



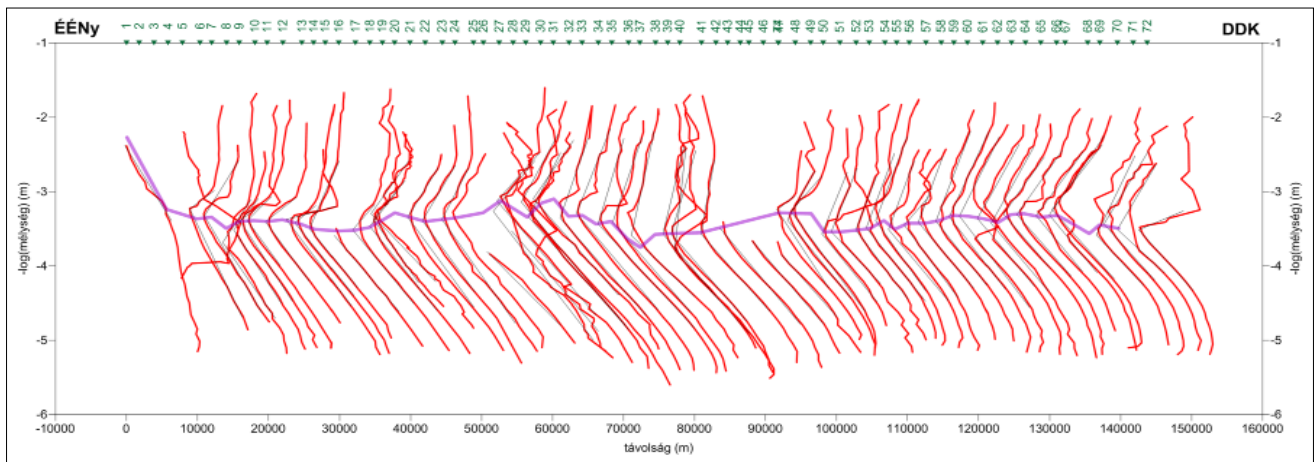
4. ábra H-polarizációs (piros) és E-polarizációs (kék) látszólagos fajlagos ellenállásgörbék (nagyon zajos görbék és pontszerű zajok kiszűrve) logaritmikus mélységskála mentén

Figure 4 H-polarisation (red) and E-polarisation (blue) apparent resistivity curves (very noisy curves and point noises filtered out) along a logarithmic depth scale



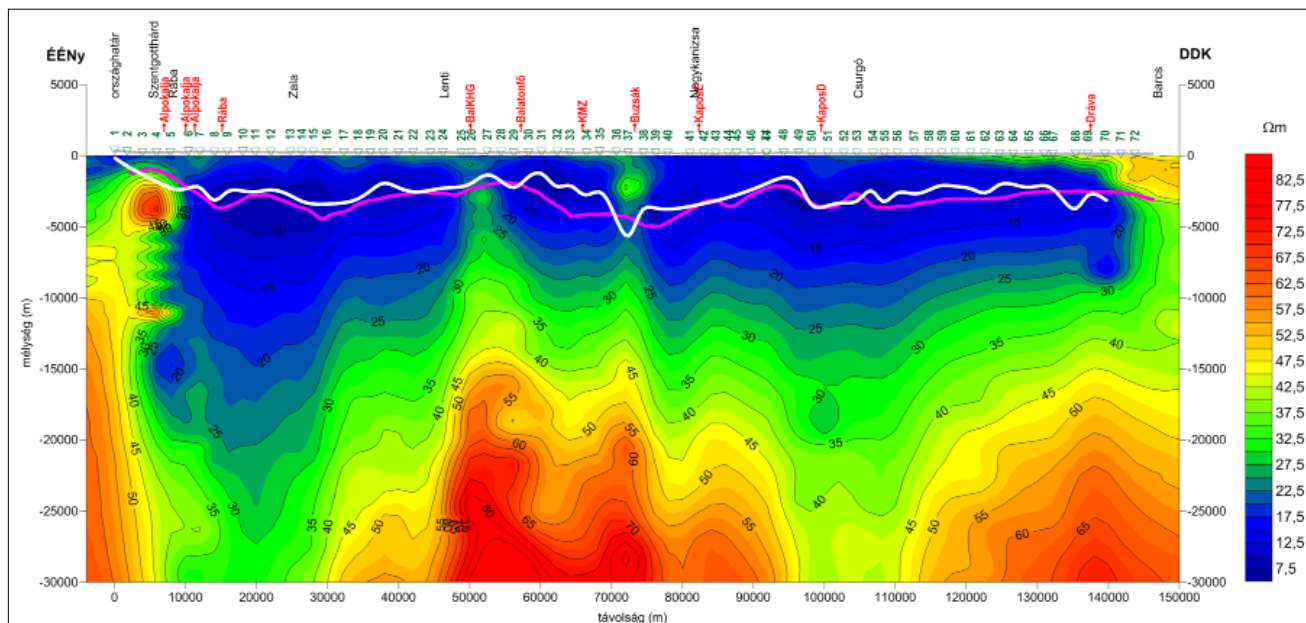
5. ábra Anizotropiamaximumok (AniMax) a szűretlen görbék alapján az MTOA-01 (CEL07) szelvény mentén (logaritmikus mélységskála!)

Figure 5 Anisotropy maxima (AniMax) based on unfiltered curves along the MTOA-01 (CEL07) section (logarithmic depth scale!)



6. ábra Nagy fajlagos ellenállású közege (medencealjzat) utaló törések a H-polarizációs látszólagos fajlagos ellenállás (ρ_{xy}) szondázási görbéken az MTOA-01 (CEL07) szelvény nyomvonalában

Figure 6 Breaks in the H-polarization apparent resistivity (ρ_{xy}) probing curves in the MTOA-01 (CEL07) section trace indicating a high resistivity medium (basement)

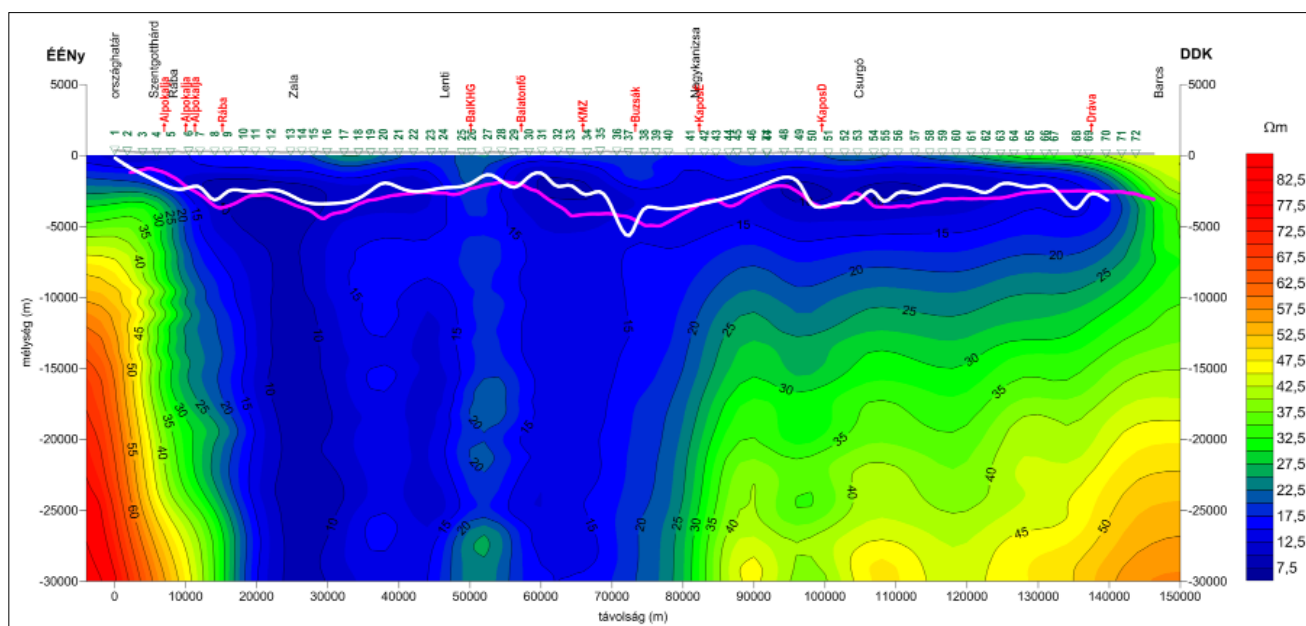


7. ábra | CEL07MT látszólagos fajlagosellenállás- (ρ_{xy}) mélységshelvény (TM), rajta a Haas-féle (2010) medencealjzatszint
 Figure 7 | CEL07MT apparent resistivity (ρ_{xy}) depth section (TM) with the basement level (Haas et al. 2010)

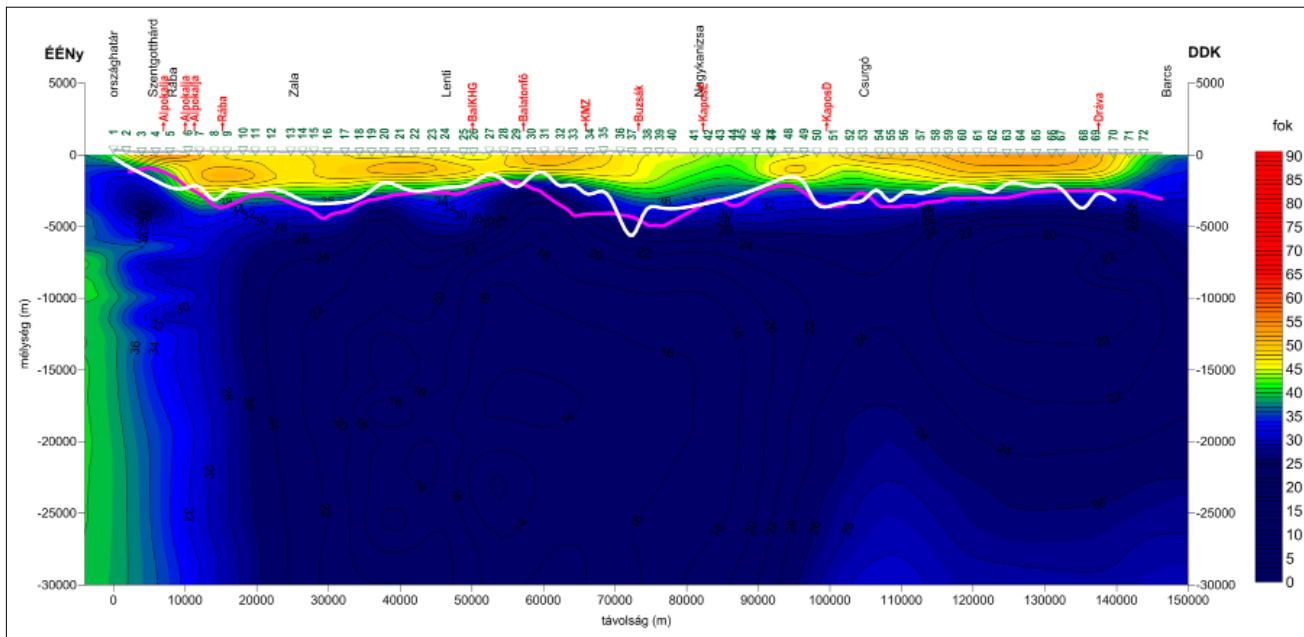
sonló lefutást mutat, és nem jelentkezik másféle hatás (pl. mágnesezettség). D felé érzékelhető csak az ellenállás-görbék meredekségének csökkenése. Ahol a görbék azonos lefutásúak, ott 1D modellről beszélhetünk. Ahol a H és E-polarizációs görbék eltérő menetet mutatnak, ott a 2D vagy 3D modellel van dolgunk.

Az E-polarizációban megjelenő, esetenként folyamatos ellenállás-csökkenés a szerkezeti zónák mentén megjelenő „áramkanalizáció”-nak köszönhető, azaz a szerkezeti zónák irányában jelentősen megnő a vezetőképesség. Az

eltérő irányú mérések között megjelenő eltérést anizotrópiának hívjuk. Megjelenése általában földtani szerkezetekhez (vagy mágneses képződmények pereméhez, ld. Kiss et al. 2020, Kiss, Prácser 2021) kapcsolódik. A legnagyobb eltérések (anizotrópiamaximumok) a CEL07 szelvényen, 45 és 80 vonalkm közötti szakaszon jelentkeznek (5. ábra). Ezt a jelenséget már a korábbi publikációk is bemutatták (Szarka et al. 2004), de akkor csak egy konkrét idő, a $T = 800$ s esetében mért paraméterek alapján. A görbekirajzolásból (4. ábra) és az anizotrópiaszelvény alapján



8. ábra | CEL07MT látszólagos fajlagosellenállás- (ρ_{yx}) mélységshelvény (TE), rajta a Haas-féle (2010) medencealjzatszint
 Figure 8 | CEL07MT apparent resistivity (ρ_{yx}) depth section (TE) with the basement level (Haas et al. (2010)



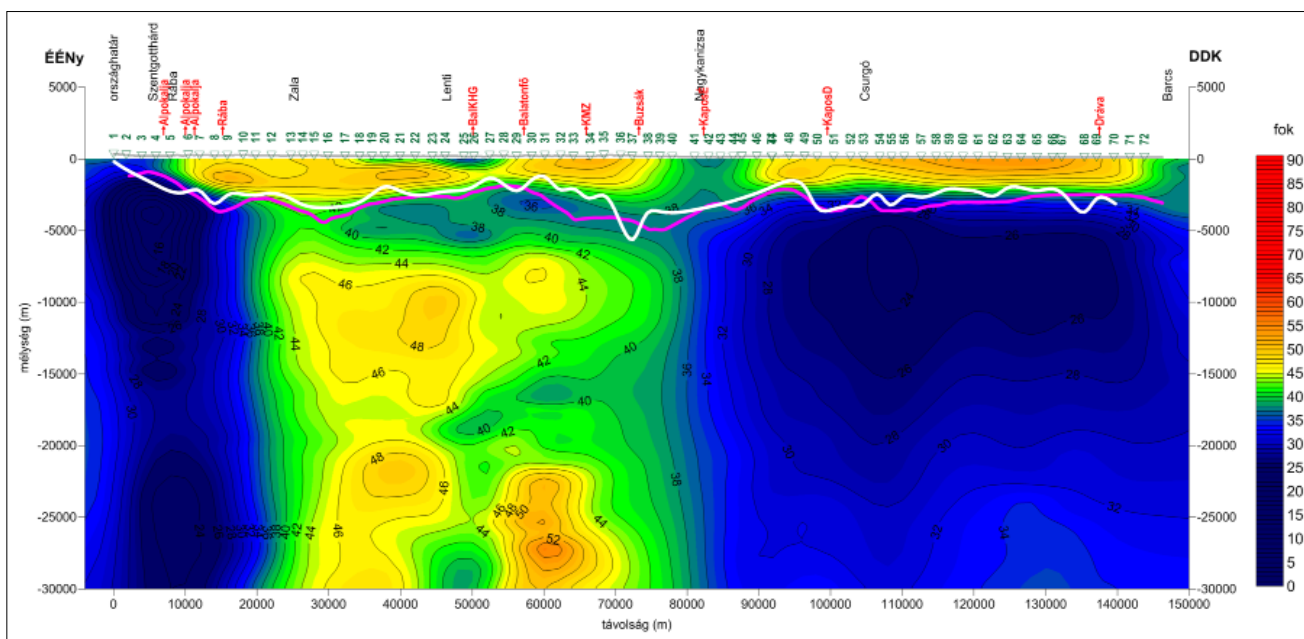
9. ábra | CEL07MT fázis- (φ_{xy}) mélységszelvény (TM), rajta a Haas-féle (2010) medencealjzatszint
 Figure 9 | CEL07MT phase (φ_{xy}) depth section (TM) with the basement level (Haas et al. 2010)

(5. ábra) jól látszik, hogy a jelenség a szelvény 25–80 vkmes szakaszán, 2000 m mélység alatt általánosnak mondható.

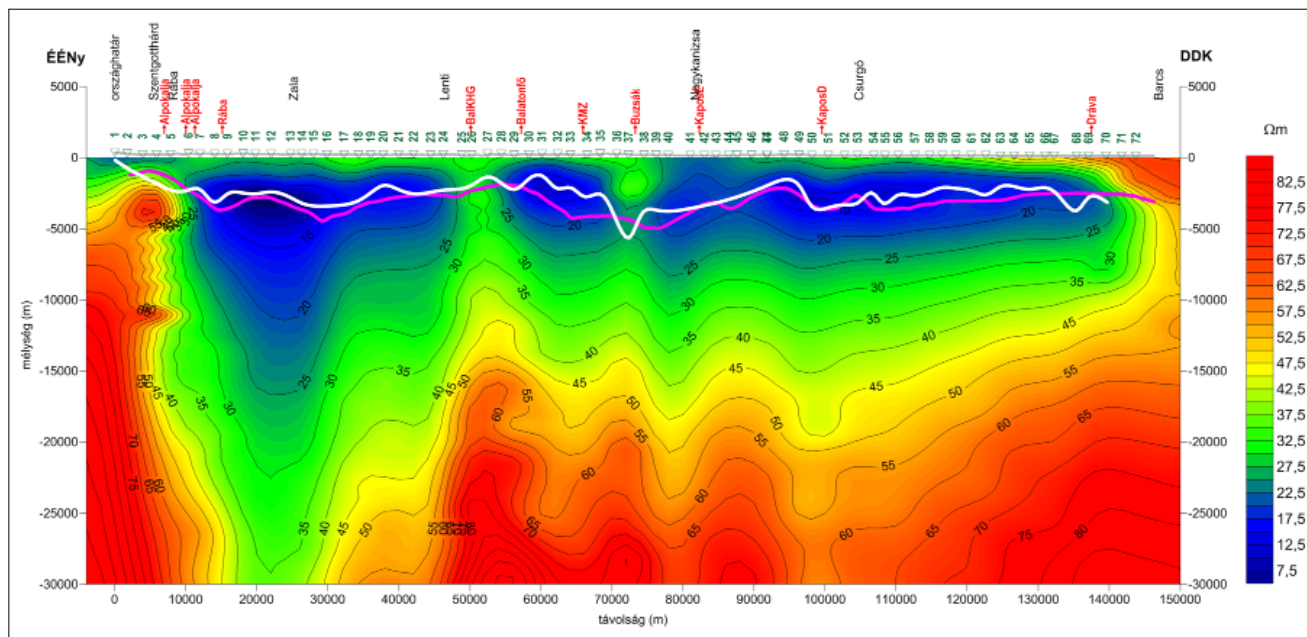
Másik érdekesség a görbéken az, hogy az eltérő polarizációs görbéknek ugyanazon a frekvencián eltérő a behatolási mélysége (4. ábra, szaggatott vonalakkal összekötött szondázási görbévek), ami arra utal, hogy vagy a vezetőképességben jelentős eltérés van, vagy mágneses képződményeket detektálnak a magnetotellurikus mérések.

Mivel a Bostick-mélység alapján a szondázási görbék elérik a 30 km-es mélységet, így az MT szelvény már kéregkutató szempontjából is érdekes, mert a Conrad-határfelület mélységét eléri, és a Moho-határfelület jelenléte is valószínű a szondázási görbék legmélyebb részén.

Magnetotellurikus impedanciából ($Z_{xy} = H_x/E_y$, H-polarizáció) kiszámolt látszólagos fajlagos ellenállás (ρ_{xy}) szondázási görbéinek legkarakterisztikusabb törése (6. ábra)



10. ábra | CEL07MT fázis- (φ_{yx}) mélységszelvény (TE), rajta a Haas-féle (2010) medencealjzatszint
 Figure 10 | CEL07MT phase (φ_{yx}) depth section (TE) with the basement level (Haas et al. 2010)



11. ábra CEL07MT analitikus látszólagos fajlagosellenállás-szelvény, rajta a Haas-féle (2010) medencealjzatszint

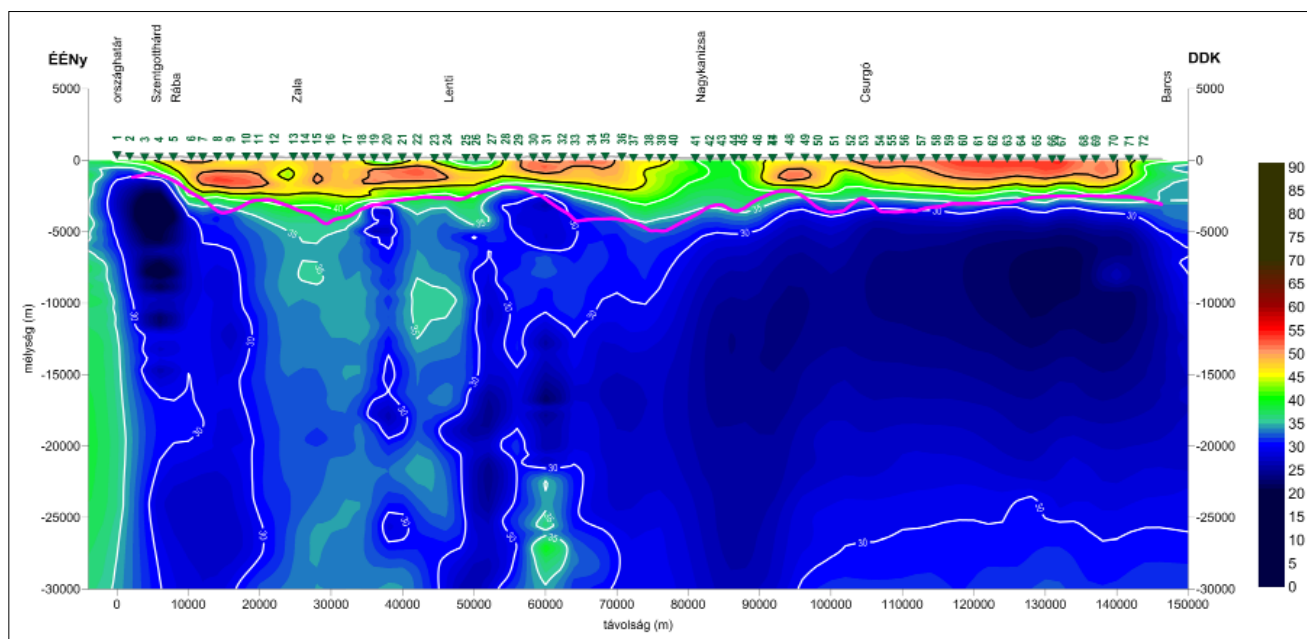
Figure 11 CEL07MT analytical apparent resistivity section with the basement level (Haas et al. 2010)

robusztusan a nagy fajlagos ellenállású medencealjzathoz köthetők. Ezt később a mélységszelvényen (17. ábra) is bemutatjuk majd.

A mért látszólagos fajlagosellenállás-görbék alapján kiszámíthatjuk a látszólagos fajlagos ellenállás- és a fázis-mélységszelvényeket (grideket). Ezeket már lineáris – azaz nem logaritmusos, ahogy eddig tettük – mélység szerint jelenítjük meg kétszeres kimagasítással, így a földtannal jobban összevethetők az eredmények.

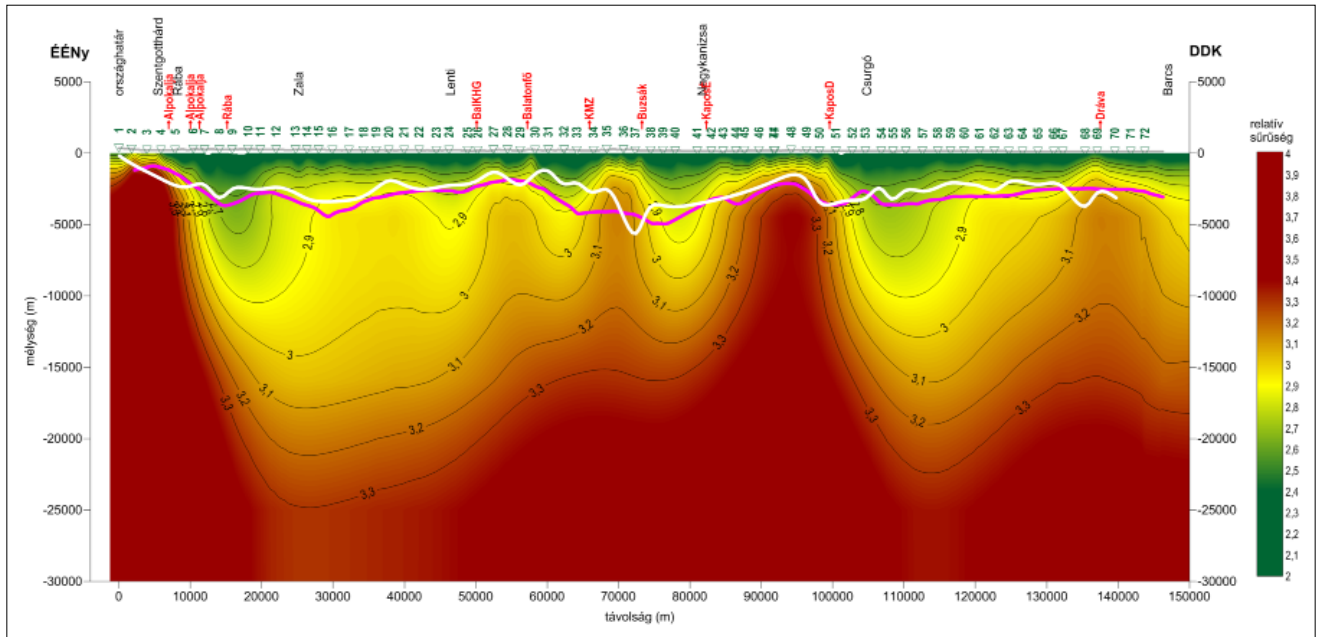
A látszólagos fajlagos ellenállás- (7. és 8. ábra) és fázis-mélységszelvényeket Gauss-szűrővel simítottuk, hogy a zajból származó nagyfrekvenciás változásokat kiszűrjük, így egy robusztus, de jól használható paramétereloszlást kaptunk. A szelvények eleje és vége hasonló lefutást mutat, ugyanakkor a középső részen jelentős eltérés van az anizotrópiának köszönhetően.

A fázisparaméter⁴⁾ mélységszelvényeit a 9. és a 10. ábra mutatja. Az impedancia fázisa viszonylag jól leképezi a



12. ábra CEL07MT átlagfázisszelvény, rajta a Haas-féle (2010) medencealjzatszint

Figure 12 CEL07MT average phase section with the basement level (Haas et al. 2010)



13. ábra | MTOA-01 (CEL07) relatív sűrűségi mélységmetszet, rajta a Haas-féle (2010) medencealjzatszint

Figure 13 | MTOA-01 (CEL07) relative density depth section with the basement level (Haas et al. 2010)

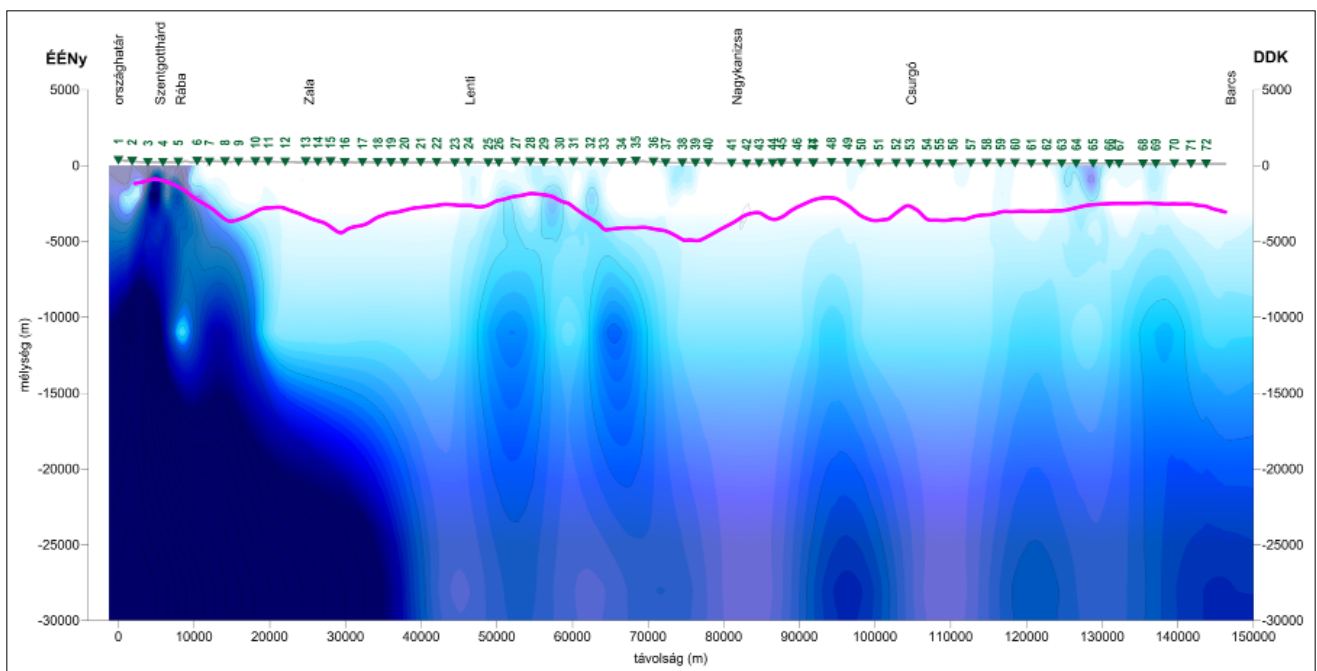
medencealjzat felszínét H-polarizációban (9. ábra), mert ott jön a váltás (35°–40° között, a kék-zöld színváltás helyén), de ez jelzi a szerkezeti zónát is ott, ahol az anizotrópia miatt leginkább várható, azaz E-polarizációban (10. ábra).

Az E- és H-polarizációs látszólagos fajlagosellenállás-metszetek eltérése miatt célszerű volt kiszámolni az analitikus⁵⁾ fajlagosellenállás-szelvényt (11. ábra), amely a két-

féle irányban mért ellenállás eredő értékét jelentheti, azaz egy vektorösszegezést. Magnetotellurikában az effektív értéként a mértani középértéket szokták használni:

$$\rho_{\text{eff}} = [\rho_{xy}/\rho_{yx}]^{1/2},$$

de ez félvezető lehet, mert ha az egyik ρ érték nullához közelít, akkor a másik értéktől függetlenül az effektív érték is lenullázódhat, ami hibás végeredményhez vezet. Sajnos



14. ábra | MTOA-01 (CEL07) relatív mágnesezettségi mélységmetszet, rajta a Haas-féle (Haas et al. 2010) medencealjzatszint

Figure 14 | MTOA-01 (CEL07) relative magnetization depth section showing the basement level (Haas et al. 2010)

méréstechnikai okok miatt a nullához közeli érték előfordulhat a mérésekben.

Az analitikus szelvényen jól elkülönül az Alpokalja (0–10 vkm), majd a Közép-magyarországi (45 és 95 vkm között) zónában 3 közel függőleges látszólagos fajlagosellenállás-maximumzóna, majd a D-dunántúli rész 95 vkm-től. Az első kettő az ALCAPA, az utóbbi a TISIA részeként.

A látszólagos fajlagosellenállás-értékek a felszíntől a medencealjzatig (lásd Haas-féle medencealjzat) csökkenő ellenállásviszonyokat mutatnak, majd a medencealjzattól az érték folyamatos növekedésnek indul (a fázisértékek alapján is ez látszik, 12. ábra). Ez alól csak az anomális részek (szerkezeti zónák – 20–30 vkm közötti mély látszólagos fajlagos ellenállás minimumzóna, vulkanitok – 45–75 km közötti látszólagos fajlagosellenállás-maximumok) jelentenek kivételt, ahol megváltozik a látszólagos fajlagos ellenállás menete.

E pásták földtani azonosításához érdemes elővenni a relatív sűrűségi mélységmetszetet és a relatív mágnesezettségi mélységmetszetet. A három paraméter alapján biztosabb értelmezést lehet adni.

A 13. ábra a relatív sűrűségi mélységmetszetet mutatja. A szelvény elején, az Alpokalján az Ausztró-Alpi Egység metabazitjai és metamorf képződményei okozzák a relatív-sűrűség-maximumot. A maximumot egy minimum (szerkezeti zóna) követi 15–25 vkm között, amely 10–15 km mélyséig azonosítható. Lokális relatív-sűrűség-maximumzónák azonosíthatók 55, 70 és 95 vkm-nél. Ezek közül az első kettő vulkanitokhoz köthető a fúrési adatok alapján, míg a legutolsónál csak erősen gyanítható ugyanez a kapcsolat.

A 14. ábra a relatív mágnesezettségi mélységmetszetet mutatja, ahol az Alpokalja metabazitjai, metamorfittjai jól elkülönülnek. Felismerhetőek a felszínközeli is megje-

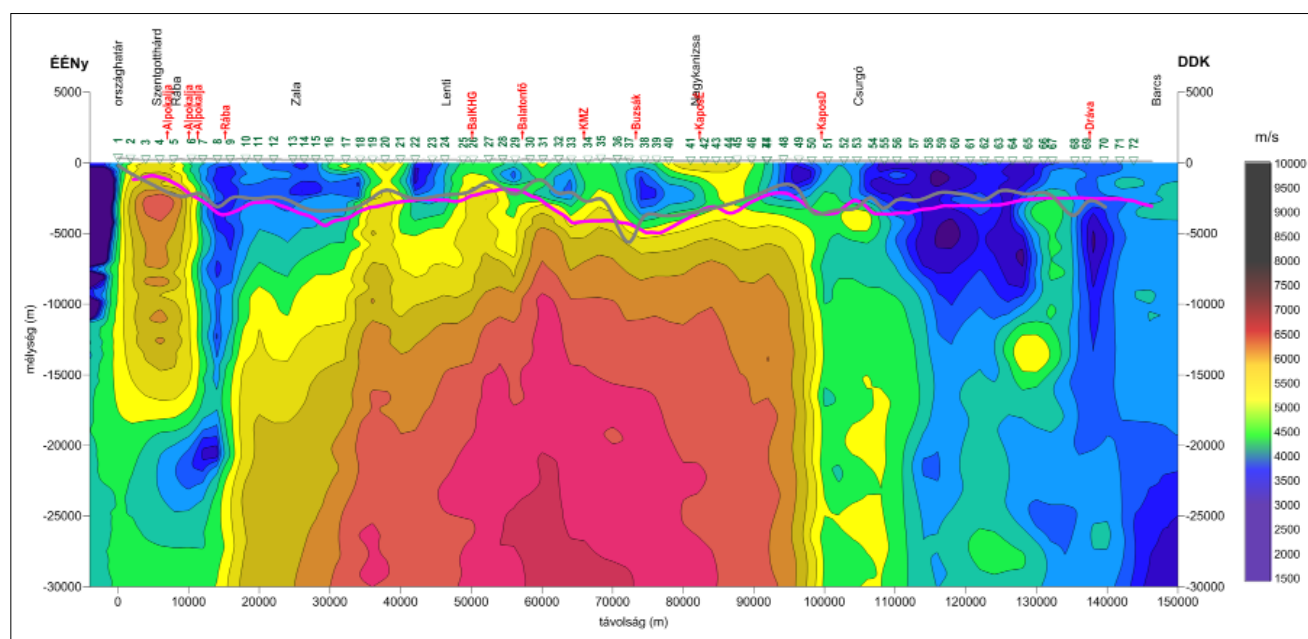
lenő miocén vulkanitok anomáliái (50–60 vkm) és egy mélybeli ható (intrúzió, szubvulkáni képződmény 95 vkm-nél), amely a mélyben megrekedve megemeli a medencealjzat szintjét.

A 15. ábra alapján 30–95 vkm között szakaszon a vertikális EM hullámterjedés (Miecznik, Czerwiński 2001) jelentősen megnő, miközben a látszólagos fajlagos ellenállás alacsony értéken marad a felső kb. 10 km-ben. Ez mágneses hatásra utaló jel.

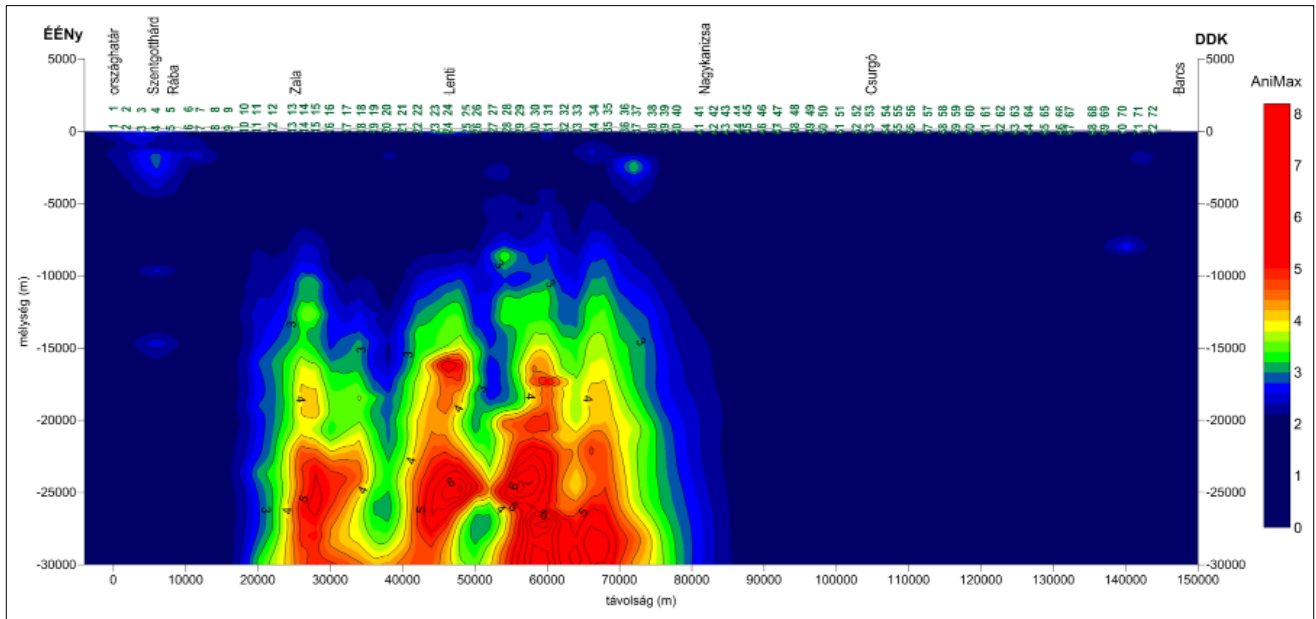
A 16. ábra az anizotrópiamaximumot mutatja, amelyet a különböző polarizációkban meghatározott ellenállás-értékek arányaiból képeztük. A nagy AniMax⁶-értékek esetében már feltételezhető a mágneses képződmények jelenléte, illetve azok határfelületeinek hatása (Kiss et al. 2020, Kiss, Prácsér 2021). A relatív mágnesezettségi mélységmetszet (14. ábra) a ritka mágneses mérések alapján szintén erre utal.

A földtani képződmények mágneses tulajdonságai exponenciálisan változnak (miképpen a fajlagos ellenállás is, szemben a sűrűség lineáris növekedési trendjével), így a mélységtől való (fordítottan arányos) függés azt jelenti, hogy a mágneses erőter a mélységgel arányosan nagyon gyorsan lecseng, s a nagy mélységekről nehéz információt kinyerni, és kellően bizonytalan is. Korábbi években a spektrálisan szűrt mágneses anomáliákon változó ablakméret mellett elvégzett mágneses Naudy-féle feldolgozások tűntek a legjobban használhatóknak (17. ábra).

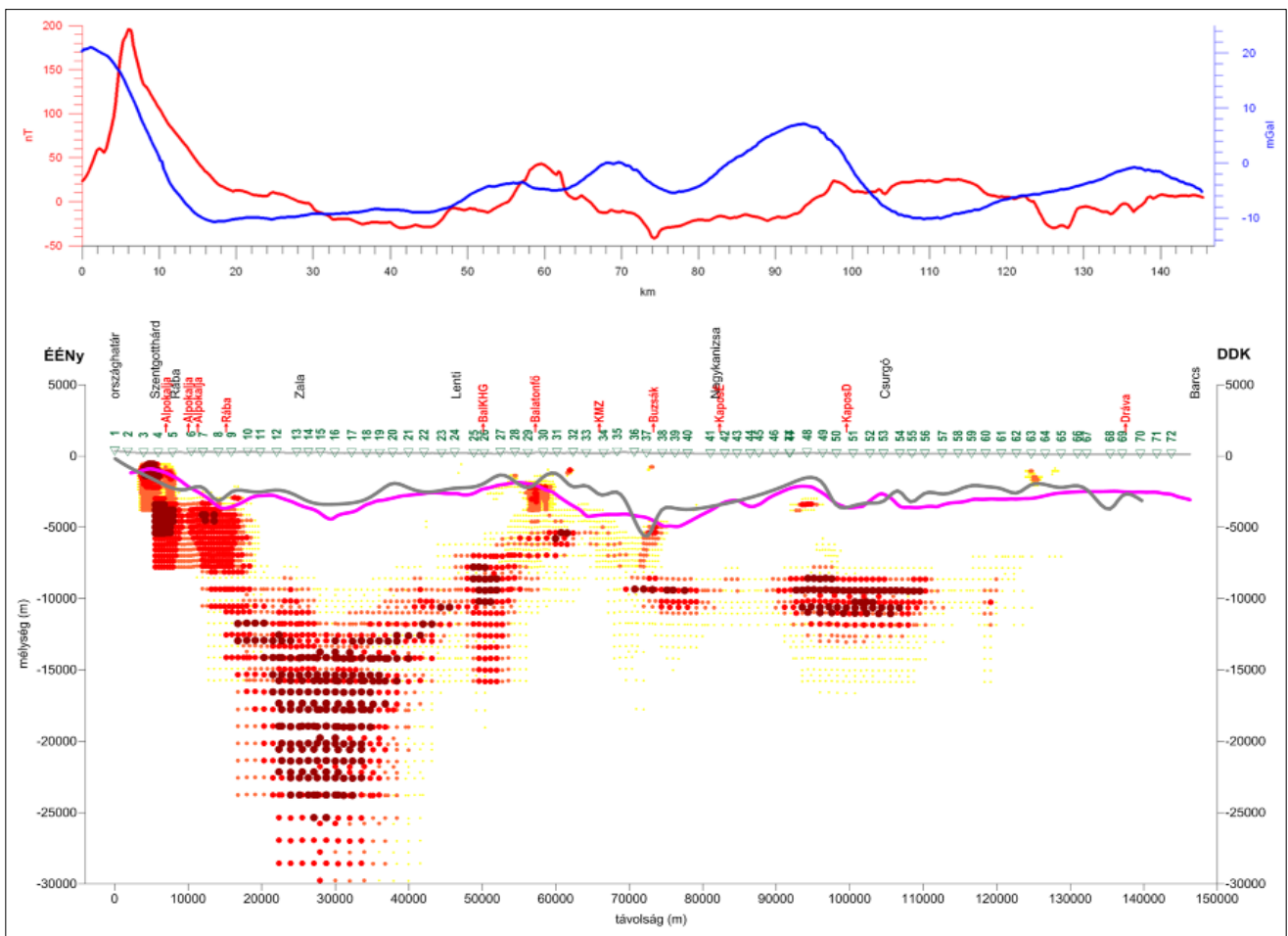
A mágneses közeg detektálásában segíthetnek továbbá a magnetotellurikus mérések mágnesezettségre utaló anizotrópiamaximum-szelvények. A CEL07 szelvény esetében a mágneses Naudy-féle feldolgozási eredmények rásimulnak az anizotrópiamaximukra, jelölve az anizotrópiát okozó közeg határfelületét (18. ábra). Ez alól csak a



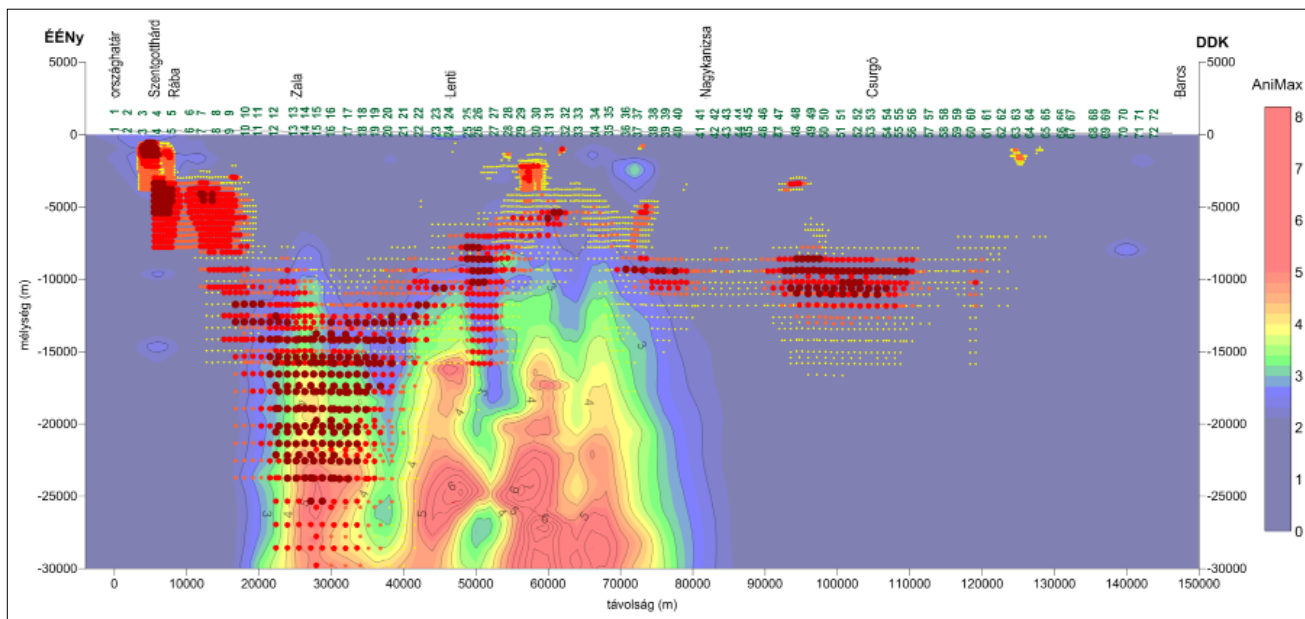
15. ábra | Az MTOA-01 (CEL07) vertikális EM energiaterjedés sebessége, rajta a Haas-féle (Haas et al. 2010) medencealjzatszint
Figure 15 | MTOA-01 (CEL07) vertical EM energy propagation velocity, showing the basement level (Haas et al. 2010)



16. ábra | Az MTOA-01 (CEL07) AniMax-szelvénye (különböző polarizációs ellenállások aránya)
 Figure 16 | MTOA-01 (CEL07) AniMax (ratio sum of resistivity of different polarization) section



17. ábra | Naudy-féle mágneses feldolgozások eredménye a MTOA-01 (CEL07) szelvény mentén, a különböző pre-cenozoos medencealjzatszintekkel (Kilényi-féle püspöklila, Haas-féle lila) és a MT szondázási fajlagos ellenállás görbe törése mentén fekete színű karikával jelölve
 Figure 17 | Results of the Naudy magnetic processing along the MTOA-01 (CEL07) section with different pre-Cenozoic basement levels (Kilényi's purple, Haas' light purple) and along the break in the MT probing resistivity curve (marked with black circles)



18. ábra | A 16. és 17. ábra tartalmának együttes megjelenítése az MTOA-01 (CEL07) szelvény mentén (Naudy-féle hatókijelölés az AniMax-szelvényen)

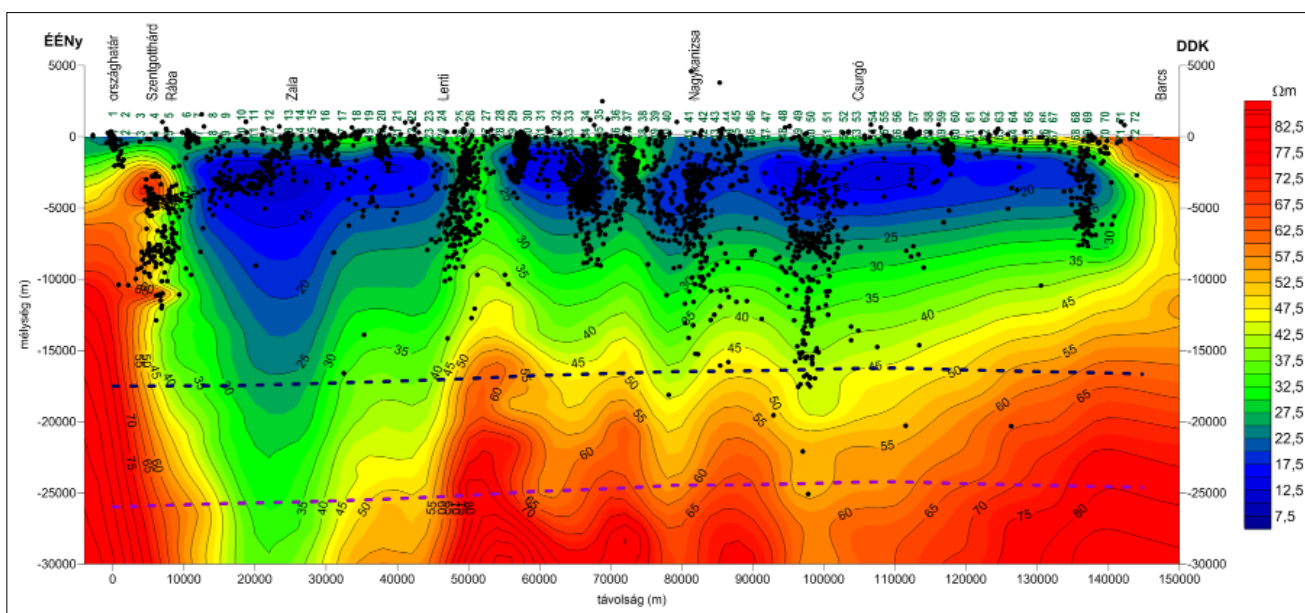
Figure 18 | Combination of the contents of Figs. 16 and 17 along the MTOA-01 (CEL07) section (Naudy's magnetic causative bodies on the AniMax section)

90 000–11 000 vm közötti szakasz tér el, ahol a Naudy 10 000 m mélyen mágneses hatót jelez, de az MT ezt nem érzékeli (feltehetően a kisebb közettérfogat miatt).

A szelvény teljes hosszát három szakaszra oszthatjuk, az első az Ausztro-alpi (0–25 vkm), a köztes a középhegységi + Közép-magyarországi (25–100 vkm) és az utolsó a tiszai (vagy Tisia) egység (100–150 vkm). Ez utóbbi kettő közös határvonala a 20. ábra alapján (a látszólagos fajlagos-ellenállás- és a gravitációsható-kijelölés alapján) a 80 vkm

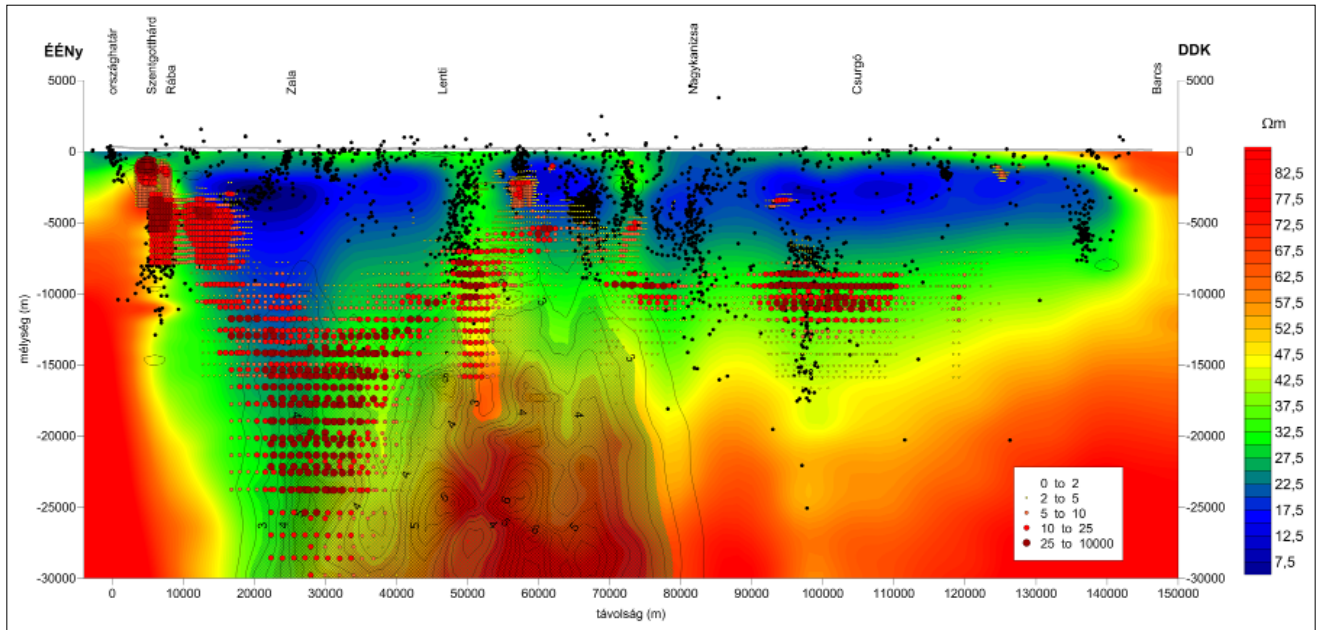
(Nagykánizsa) körüli, a 21. ábra alapján 100 vkm-nél adható meg.

Az MT látszólagos fajlagos ellenállás szelvénye (pl. 7., 8., 11. ábra) gyakorlatilag a „nyers” mérési adatokon alapul, feldolgozástól függetlenül. Az MT adatok inverziója során a látszólagos fajlagos ellenállásokból és fázisparaméterekből származtatott fajlagos ellenállást kapunk, ami kedvező körülmények között (1D vagy néhány speciális 2D esetben) akár valós fajlagos ellenállás is lehet. A kétdimen-



19. ábra | CEL07MT analitikus látszólagos fajlagosellenállás-szelvény, gravitációs hatókijelöléssel, Haas-féle medencealjzattal, szeizmológiai állomások alapján meghatározott Conrad- és Moho-felület

Figure 19 | Analytical apparent resistivity section CEL07MT with gravity edge detections and Haas et al. (2010) basement level, with Conrad and Moho surface (dashed lines) determined by seismology



20. ábra A 11. és 18. ábra tartalmának együttes megjelenítése az MTOA-01 (CEL07) szelvény mentén (*alap*: analitikus látszólagos fajlagos ellenállás, rajta sraffozással az AniMax-szelvény, továbbá mágneses Naudy-féle megoldások (sárga-barna pontok) és az automatikus gravitációs Werner- és Euler-féle dekonvolúciók eredményei (fekete pontok))

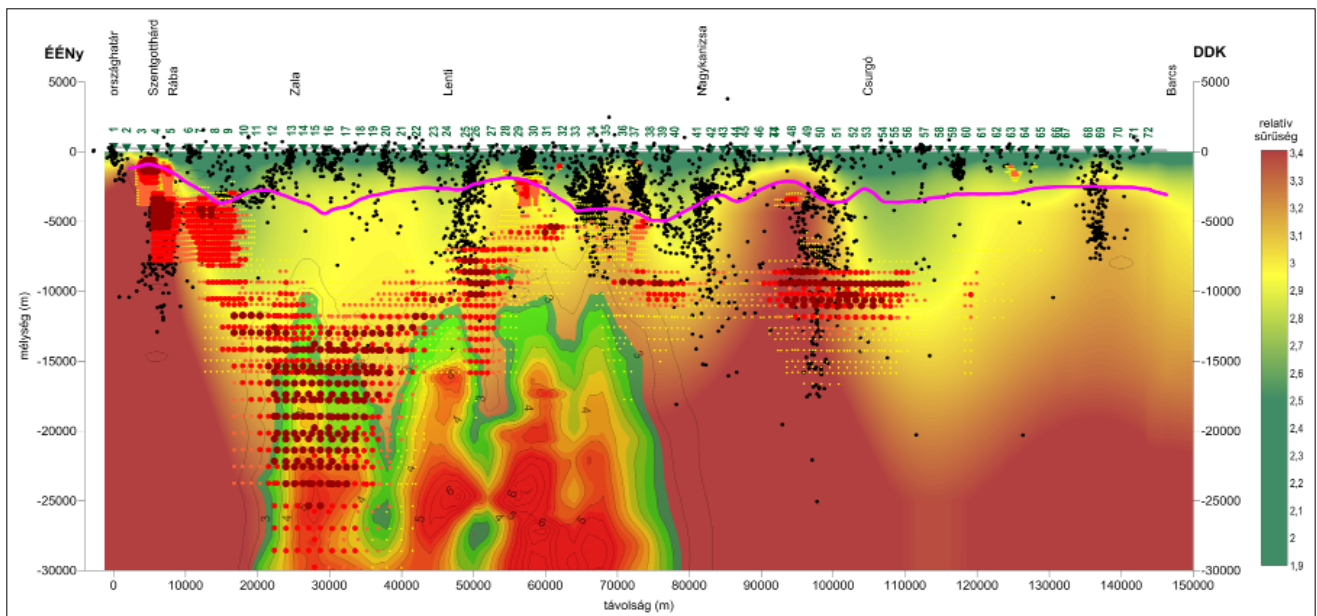
Figure 20 Combination of the contents of Figs. 11 and 18 along the MTOA-01 (CEL07) section (*base*: analytical apparent resistivity, with AniMax section with hatches, plus magnetic Naudy solutions and results of automatic gravity Werner and Euler deconvolutons)

ziós inverziót tehát el kell végezni, mivel azok adnak többé-kevésbé valós közegeellenállás adatokat (22., 23. ábra).

Mivel ez egy litoszférakutató szeizmikus refrakciós szelvény, így a v_p sebességeloszlási mélységmetszet is rendelkezésre áll (24. ábra), amely rajzolatában hasonlít a fajla-

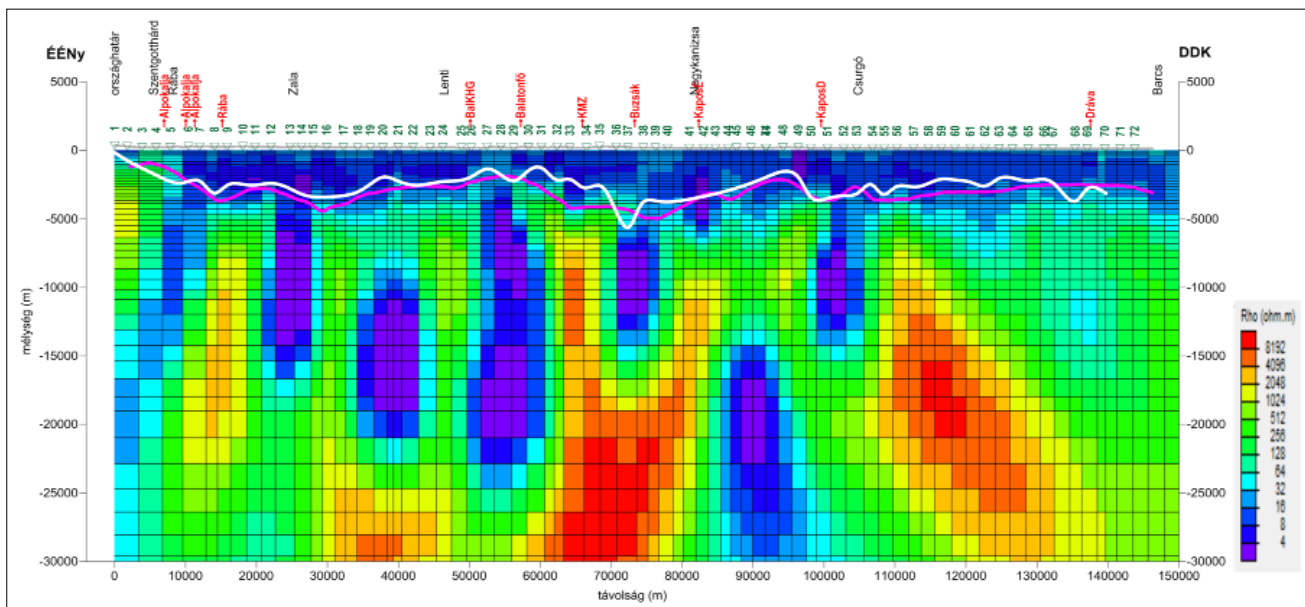
gos ellenállás inverziós modelljéhez (23. ábra) az Alpok és Nagykanizsa közötti térrészben.

A mágneses Naudy-féle hatókijelölés és a magnetotellurikus anizotrópiamaximumok, valamint a sebességeloszlás kapcsolata (25., 26. ábra) is felismerhető.



21. ábra A 13. és 18. ábra tartalmának együttes megjelenítése az MTOA-01 (CEL07) szelvény mentén (*alap*: relatív sűrűségi mélységmetszet, rajta az AniMax-eloszlás és kiegészítve az automatikus gravitációs Werner- és Euler-féle (fekete pontok), a mágneses Naudy-dekonvolúció eredményeivel és a várható prekainozoos medencealjzat mélységgel (püspöklila vonal))

Figure 21 Combination of the contents of Figs. 13 and 18 along the MTOA-01 (CEL07) section (*base*: relative density depth section, with the AniMax distribution and supplemented by the results of the automatic gravity Werner and Euler the magnetic (black dots) Naudy-deconvolution and the expected pre-Cenozoic basement depths (purple line))



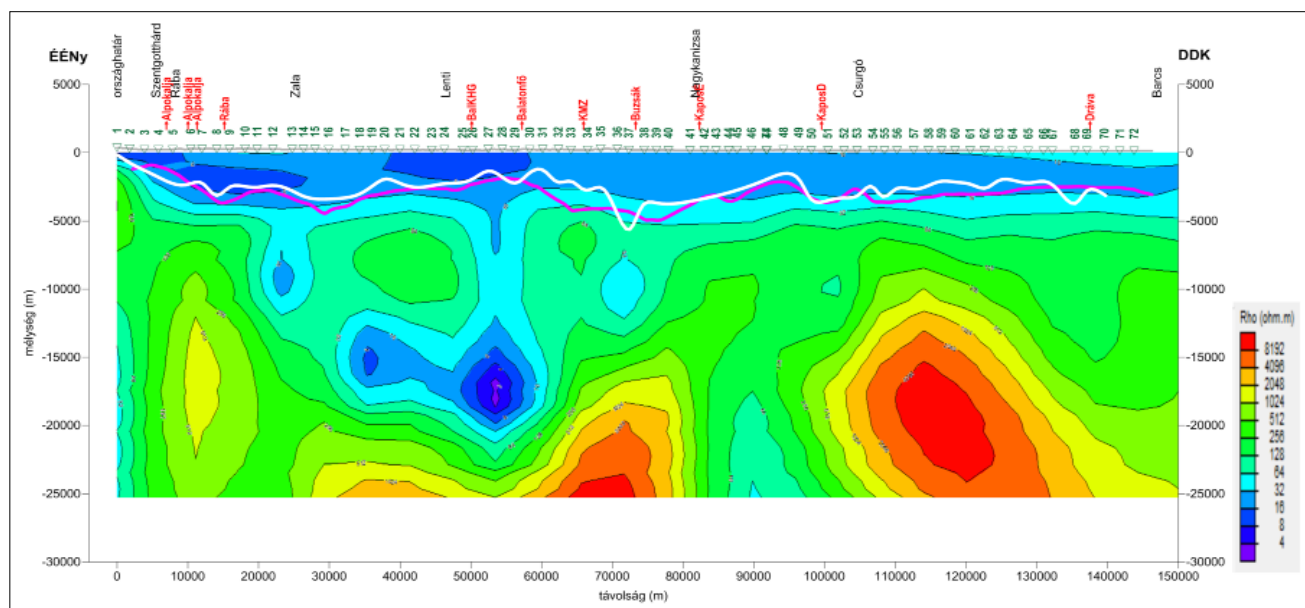
22. ábra A CEL07MT kétdimenziós inverziója (Rodi, Mackie 2001), fajlagos ellenállás inverziós rács, rajta a Haas-féle (Haas et al. 2010) medencealjzatszint

Figure 22 Two-dimensional inversion (Rodi, Mackie 2001) of CEL07MT, specific resistence inversion grid, with the basement level (Haas et al. 2010)

A szelvény mentén található mélyfúrások a prekainozoos medencealjzat szintjéig mélyültek le (27. ábra), így annál mélyebbről nincsenek földtani információk. A 19. ábra mutatja az analitikus látszólagos fajlagosellenállás-szelvény mentén a szeizmológiai feldolgozások alapján várható Conrad- és Moho-szintet. A 27. ábra pedig az MT E- és H-polarizációs fázisból képzett átlagértéket mutatja (színes alap), amely jól leképezi az üledékes medence felszínét ($\varphi > 35^\circ$), ami gyakorlatilag együtt jelenik meg a Haas-féle medencealjzatszinttel (Haas et al. 2010).

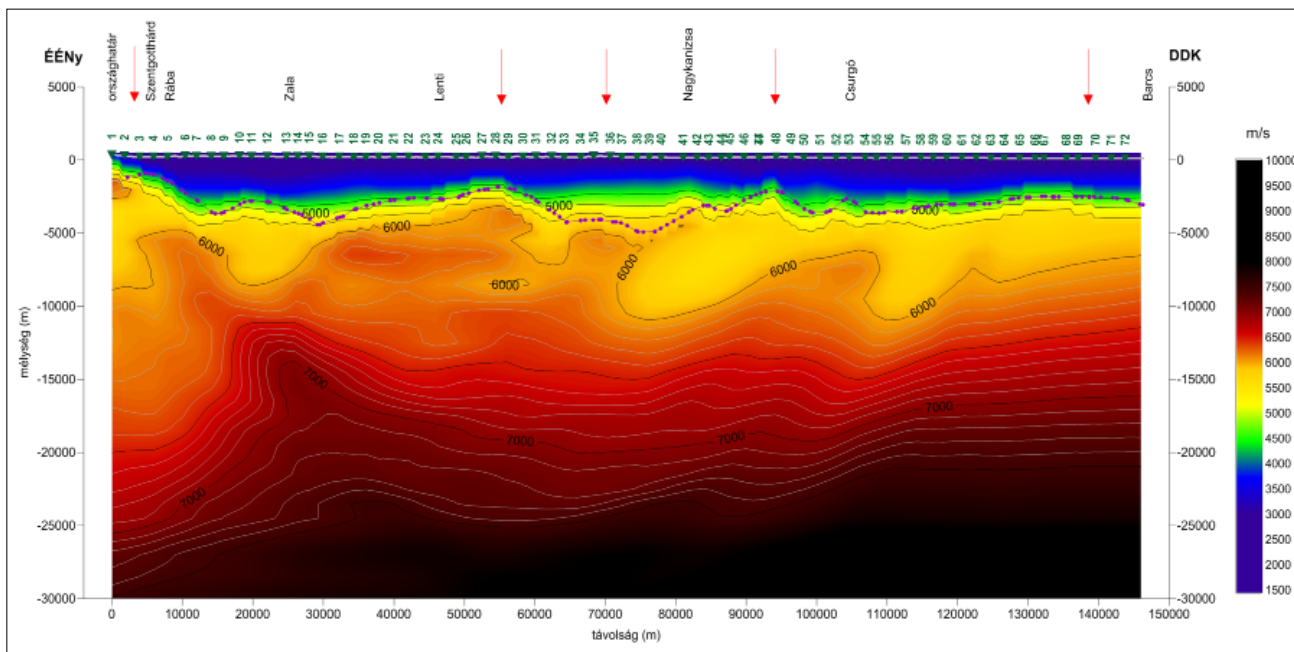
Érdekes továbbá, hogy magnetotellurikus fázis értelmezése alapján egy mély, jól vezető zóna ($\varphi = 35-40^\circ$) is megjelenik az Alpokalja–Rába és a Balatonfő-vonal között (27. ábra). Ez a mélyszerkezeti zóna a magnetotellurikus mérések anizotrópiája alapján is beazonosítható (lásd 26. ábra).

A felszínen (Alpokalja metavulkanitok) és fúrásokból (pl. Pu-2) megismert mágneses képződmények a Naudy-féle hatókijelölés alapján szintén szoros kapcsolatban állnak a mélyszerkezeti zónával, így a mágneses anyag jelen-



23. ábra A CEL07MT kétdimenziós inverziója, fajlagos ellenállás modell (simított rács)

Figure 23 Result of two-dimensional inversion of CEL07MT, specific resistivity model (smoothed grid)



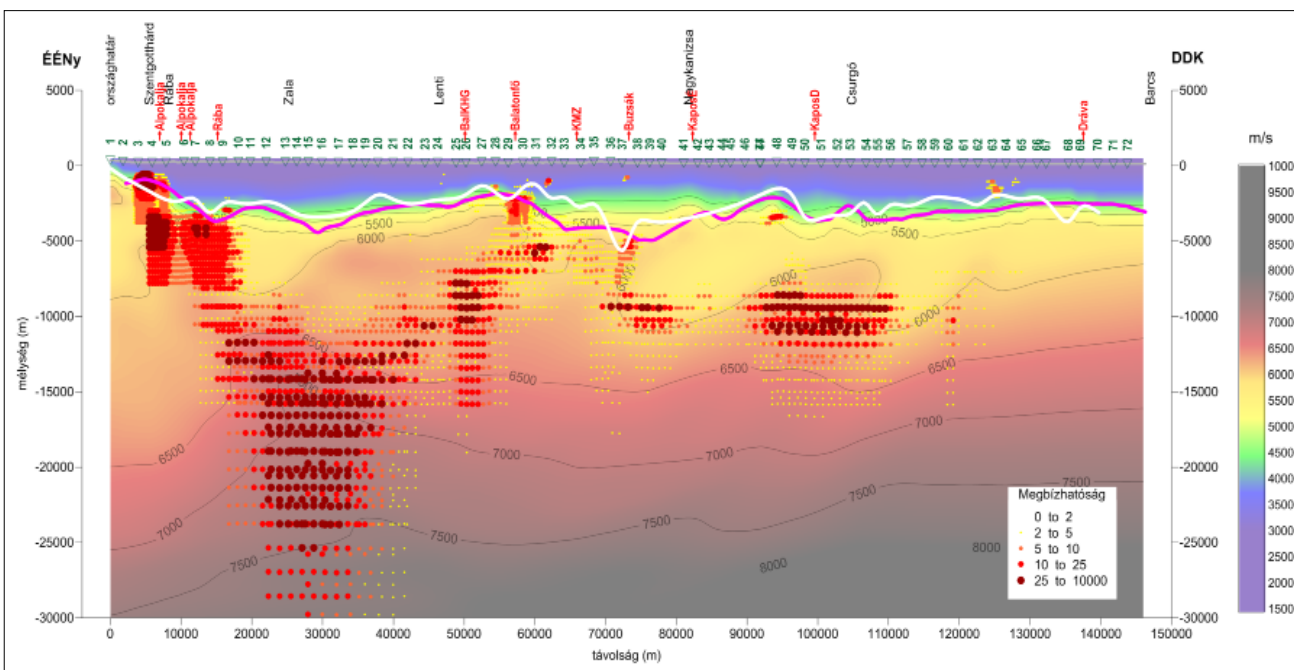
24. ábra | Az MTOA-01 (CEL07) szeizmikus tomográfia sebességszelvénye
 Figure 24 | MTOA-01 (CEL07) seismic tomography velocity section

léte is okozhatja az alacsony fázisértékeket és az anizotrópiajelenségeket.

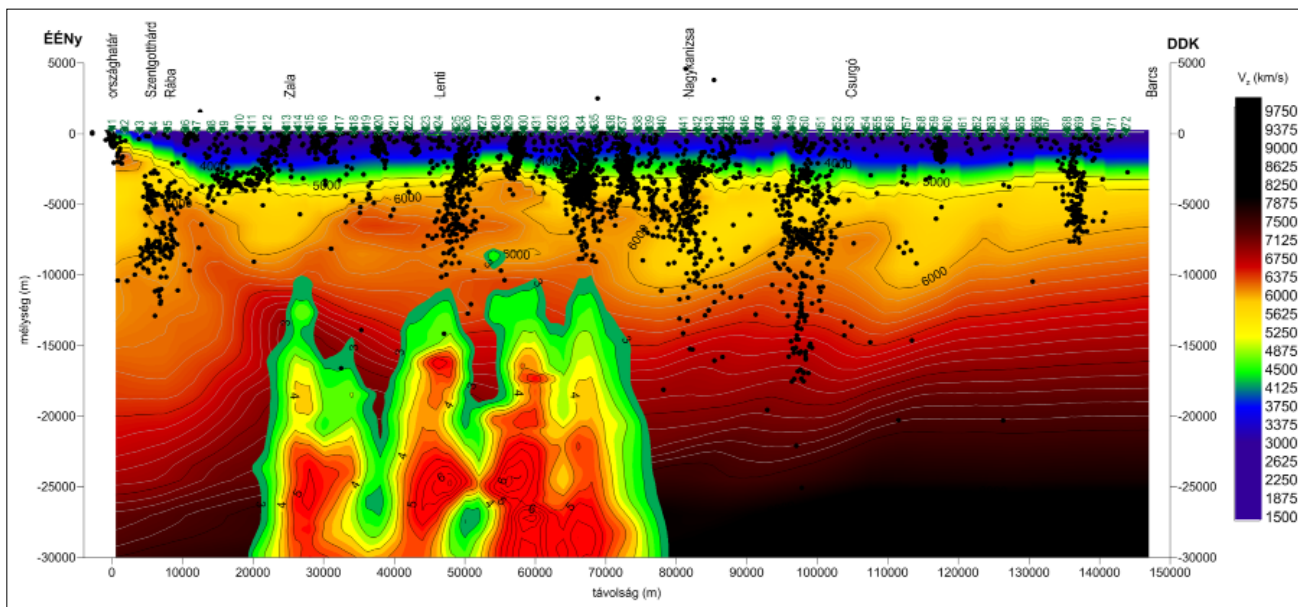
A szeizmikus P-hullámsebesség alapján meghatározhatjuk a Conrad- és Moho-határfelületek legvalószínűbb helyzetét is, azaz elkülöníthetjük a szelvény mentén a felső kérget, alsó kérget és a köpenyt (27. ábra). Mindkét határfelületen látszik a kéreg kivastagodása az Alpok(álja) irányában, az izosztáziának megfelelően.

Összefoglalás

A geofizikai adatfeldolgozásokban kicsit elkényelmesedtünk, így a feldolgozóprogramok által elkészített inverziókkal sokszor megelégszünk, hátradőlünk, és nem vizsgáljuk részletesebben a mérési adatokat, hiszen „az inverzió mindent figyelembe vett és megoldott”. Ez azonban többnyire nem igaz! A meglepetés akkor adódik elő, amikor egy



25. ábra | Az MTOA-01 (CEL07) szeizmikus tomográfia sebességszelvénye a mágneses Naudy-féle hatókijelöléssel (megbízhatóság szerint)
 Figure 25 | MTOA-01 (CEL07) seismic tomography velocity section with result of magnetic Naudy deconvolutions (by confidence level)

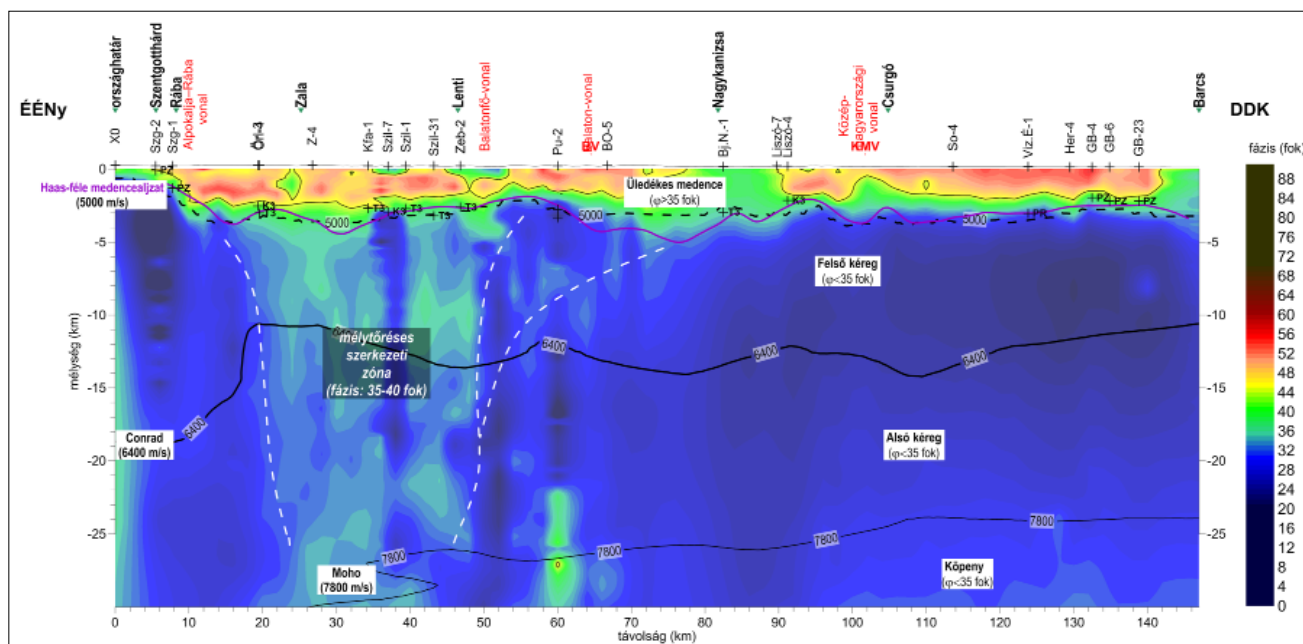


26. ábra Az MTOA-01 (CEL07) szeizmikus tomográfia sebességszelvénye és az MT mérések anizotrópiamaximumai
 Figure 26 MTOA-01 (CEL07) seismic tomography velocity section and anisotropy maxima of MT measurements

másik szakértő ugyanabból a mérési adatsorból, ugyanazal a feldolgozóprogrammal valami más eredményre jut....

Persze ez a probléma nem új keletű, mert már régebben is nagy dilemma volt az 1D, a 2D, az E-polarizációra, H-polarizációra, esetleg a kétdimenziós inverzióra alapozott értelmezés, vagy hogy a fajlagos ellenállás és fázis közül melyiket részesítenünk előnyben, az elvégzett iterációk számáról nem is beszélve!

Minden feldolgozásnak megvan a maga előnye és hátránya. A kiválasztásban segíthetnek az előzetes földtani ismeretek, geofizikai háttér adatok, illetve az inverzió után elvégzett direktfeladat-tesztek. Sok esetben azonban nincsenek előzetes információk, csak a mérési adat van. Ebben az esetben célszerűnek látszik a mérési adatoknak sokoldalú vizsgálata, különböző típusú feldolgozások elvégzésével.



27. ábra Kéregszintű értelmezési vázlat az MTOA-01 (CEL07) fázis- (φ) szelvény mentén (színes alap – MT átlagfázis, lila vonal – Haas-féle medencealjzat, fekete vonal – medencealjzat 5000 m/s, Conrad-határfelület 6400 m/s és Moho-határfelület 7800 m/s P-sebességnél)
 Figure 27 Crustal interpretation sketch along MTOA-01 (CEL07) (coloured background – MT mean phase, purple line – Haas basement level, black line – basement level at 5000 m/s, Conrad boundary surface at 6400 m/s, and Moho boundary surface at 7800 m/s

Ebben a tanulmányban országos léptékű CEL07 szelvényt vizsgáltuk kb. 70 szondázással. Ilyen esetekben úgy gondoltuk, hogy célszerű egyszerre láttatni az összes szondázási görbét (cikk-cakk görbéket). Ez elsőre visszalépésnek tűnhet, hiszen a 60–80-as évek megjelenítési technikájához nyúltunk vissza, viszont rögtön szembe-tűnő, hogy a robusztus változások kimutatására ez jó lehetőség. (Egyenként is vizsgáljuk, ellenőrizzük a szondázási görbéket, de akkor a rendszerszintű változások megjelenése nem olyan egyértelmű, nehezebben ismerhető fel!)

Amióta megjelentek az MT inverziók, azóta a mért látszólagos fajlagosellenállás-szelvényeket nem szokás megjeleníteni, pedig az E- és H-polarizációban megjelenő különbségek vagy a szondázások közötti behatolási mélység különbözősége földtani információkat hordoznak (mert hogy az E-polarizáció maximumcsatolású, H-polarizáció nullcsatolású mérési elrendezésnek fogható fel a magnetotellurikában).

A CEL07 szelvény mentén az eltérés már a szondázási görbékben, de a látszólagos fajlagos ellenállás szelvények eltéréseiben is jelentkezik. Az eltérést anizotrópiának hívjuk, és az anizotrópiamaximumok vagy vezetési irány-anizotrópiát jeleznek (képződményhatárok), vagy esetleges mágnese képződmények megjelenésére (mágnese – nem mágnese kontaktzónával) utalnak az elméleti modellezés (Kiss, Prácser 2021) gyakorlati mérési tapasztalatok alapján.

A fázisparaméter megjelenítésével is ritkán találkozunk a szakirodalomban, noha a VLF mérések módszertani vizsgálata (ELGI-1, ELGI-2)⁷⁾ alapján ismert, hogy síkhullám esetén a fázis 45 foktól való eltérése jelzi a változások tendenciáját (pl. a medenceüledékeket vagy szerkezeti zónák megjelenését ($\varphi > 45^\circ$), illetve végtelen fajlagos ellenállású kristályos aljzatot ($\varphi < 45^\circ$)).

Az adatok komplex kezelése és együttes megjelenítése az értelmezést segíti. A relatív sűrűségi mélységmetszet és a mágnesezettségi mélységmetszet az ország egész területére elkészíthető, így bármelyik szeizmikus vagy geoelektromos vonal mentén felhasználható a közös értelmezéshez. Nyilván a pontszerű információk (mélyfúrások, egyedi geofizikai szondázások) is felhasználhatók, bár ezeknek a szerepe az MT méréseknél a nagy behatolási mélység miatt korlátozott.

Az adatok együttes megjelenése, például az anizotrópia-maximumok (AniMax) és a mágnese Naudy-megoldások jelzik, hol válik bizonytalanná az inverzióból kapott feldolgozási eredmény a nem mágnese közegre kidolgozott magnetotellurikus adatfeldolgozás során. Ezt a CEL07 szelvény mentén elvégzett feldolgozások és megjelenítések is bizonyítják.

A magnetotellurikus mérések során sokszor a külső ipari elektromágneses zajra gyanakodunk, amikor zajos egyedi szondázást találunk, pedig a közös feldolgozások és a módszertani vizsgálatok alapján ezeknek a zajos méréseknek is időnként földtani eredetű oka van, például egy mágnese képződmény kontaktzónája vagy masszív elterjedése. A kutatási terület további geofizikai vizsgálata

szempontjából is hasznos az ipari jellegű zajok lehatárolása – vagy ha lehetséges – azok beazonosítása, dokumentálása (archiválása).

A tanulmány szerzői

Kiss János, Szebenyi Renáta Mónika

Jegyzetek

- ¹⁾ vkm = vonalkilométer vízszintes távolság (és vm = vonalméter)
- ²⁾ ρ (vagy ρ_a) – Látszólagos fajlagos ellenállás (apparent resistivity). A fajlagos ellenállás egy adott homogén földtani közegre jellemző elektromos fizikai paraméter. A látszólagos fajlagos ellenállás az az ellenállás, amellyel az adott ponton, az adott frekvencián, a mérés behatolási mélységéig egy heterogén közeget egyetlen fajlagos ellenállás értékkel jellemezhetünk. A magnetotellurikus mérések eredményeként látszólagos fajlagos ellenállás szondázási görbéket kapunk, inverzió segítségével történik a látszólagos értékekből a közeg fajlagos ellenállásának meghatározása.
- ³⁾ mélység – Bostick-mélység: $H_{\text{Bostick}} = [\rho_a / \omega \mu_0]^{1/2}$
- ⁴⁾ Fázis (φ) – Az impedancia fázisa. Az elektromágneses síkhullám esetében igaz, hogy homogén féltér ($\rho_{a2} = \rho_{a1}$) esetében a fázis értéke $\varphi = 45^\circ$. A kétréteges MT görbék tulajdonságai alapján, ha a $\varphi < 45^\circ$, akkor a $\rho_{a2} > \rho_{a1}$, azaz vezetőlőbe való átmenetet jelez (a közeg szigetelő) a frekvenciafüggő behatolási mélységig. Ha $\varphi > 45^\circ$, akkor $\rho_{a2} < \rho_{a1}$, azaz a szigetelőből jól vezető összetételbe való átmenetre utal (a közeg vezető). Többreteges vagy 2D, 3D modellek esetén a helyzet bonyolultabb.
- ⁵⁾ Analitikus látszólagos fajlagos ellenállás = az E-polarizációs és a H-polarizációs látszólagos fajlagos ellenállások vektorösszege.
- ⁶⁾ AniMax = $|\rho_{xy} / \rho_{yx}| + |\rho_{yx} / \rho_{xy}|$
- ⁷⁾ Gyakorlati földtani kutatásban, napi rendszerességgel alkalmazott módszertani ismertető és mérési utasítás, ami belső használatra készült (sem a szerzők, sem az évszám nincs feltüntetve.)

Hivatkozások

- Ádám A., Kiss J., Madarasi A., Novák A., Prácser E., Szarka L., Varga G., Ritter O., Weckmann U., Schnegg P. (2004a): Magnetotellurika a CELEBRATION-7 szelvény mentén. A Tudomány napja, 2004. November 4., Budapest
- Ádám A., Kiss J., Madarasi A., Novák A., Prácser E., Szarka L., Varga G. (2004b): Magnetotellurikus eredmények a CELEBRATION-007 szelvény mentén. V. Geotudományi Ankét, 2004. november 18. Nagykanizsa
- Ádám A., Novák A., Szarka L. (2005): Tectonic weak zones determined by magnetotellurics along the CEL-7 deep seismic profile, Acta Geod. Geoph. Hung., 40/3–4, 413–430.
- Cloetingh S. Ziegler P. A., Bogaard J. J. F., Andriessen P. A. M., Artemieva I. A., Bada G., van Balen R. T., Ben-Avraham Z., Brun J-P., Bunge H. P. (2007): TOPO-EUROPE: the Geoscience of Coupled Deep Earth – Surface Processes, Global and Planetary Change, 58/1–4, 1–118.
- ELGI-1: Az EM-16 és az EM-16R műszerek kezelési utasítása, Kézirat belső használatra, ELGI

- ELGI-2: Összefoglalás a VLF-EM módszer alapjairól, Kézirat belső használatra, ELGI
- Haas J., Budai T., Csontos L., Fodor L., Konrád Gy. (2010): Magyarország pre-kainozoos földtani térképe, 1:500 000. (Pre-Cenozoic geological map of Hungary, 1:500 000). A Magyar Állami Földtani Intézet kiadványa, Budapest.
- Hetényi Gy., Molinari I., Clinton J., Bokelmann G., Bondár I., Crawford W. C., Dessa J.-X., Doubre C., Friederich W., Fuchs F., Giardini D., Grácz Z., Handy M. R., Herak M., Jia Y., Kissling E., Kopp H., Korn M., Margheriti L., Meier T., Mucciarelli M., Paul A., Pesaresi D., Piromallo C., Plenefisch T., Plomerová J., Ritter J., Rumpker G., Šipka V., Spallarossa D., Thomas C., Tilmann F., Wassermann J., Weber M., Weber Z., Westergom V., Živčić M. (2018): The AlpArray Seismic Network: A large-scale European experiment to image the Alpine Orogen. *Surv. Geophys.*, <https://doi.org/10.1007/s10712-018-9472-4>
- Kiss J. (2005): A CELEBRATION-7 szelvény komplex geofizikai vizsgálata, és a „sebességanomália” fogalma. *Magyar Geofizika*, 46/1, 25–34.
- Kiss J. (2009): Regionális gravitációs anomáliák, izosztikus hatások Magyarországon. *Magyar Geofizika*, 50/4, 153–171.
- Kiss J., Prácz E. (2016): Szelvény mentén végzett adatfeldolgozási eljárások – hatókijelölés, frekvenciaszűrés és mélységfókuszálás – alkalmazása a CEL08 vonalon. *Magyar Geofizika*, 57/2, 69–87.
- Kiss J., Zilahi-Sebess L., Rádi K. (2020): MT mérési adatok nem hagyományos feldolgozása („AniMax” – anizotrópia maximumok és analitikus fajlagos ellenállás). *Magyar Geofizika*, 61/3, 101–122.
- Kiss J., Prácz E. (2021): Kétdimenziós magnetotellurikus modellezés – irányanizotrópiából származó hatások vizsgálata. *Magyar Geofizika*, 62/1, 43–60.
- Miecznik J., Czerwiński T. (2001): Electromagnetic energy velocity in magnetotelluric sounding interpretation (M-24). In: EAGE 63rd Conference & Technical Exhibition, Amsterdam, The Netherlands, 11–15 June 2001.
- Novák A. (2010): Elektromágneses geofizikai leképezés tenzor invariánsokkal: a felszínközeltől a dunántúli mélyszerkezetiig. Doktori (PhD) értekezés, Nyugat-Magyarországi Egyetem Kitaibel Pál Környezettudományi Doktori Iskola Környezettudományi Program, Sopron
- Rodi W., Mackie R. L. (2001): Nonlinear conjugate gradients algorithm for 2-D magnetotelluric inversion. *Geophysics*, 66, 174–187.
- Szarka L., Ádám A., Novák A., Kiss J., Madarasi A., Prácz E., Varga G. (2004): Magnetotelluric images completed with gravity, magnetics and seismics from SW-Hungary. In: IAGA WG 1.2 on Electromagnetic Induction in the Earth, Proceedings of the 17th Workshop, Hyderabad, India, October 18–23, 2004
- Szarka L., Novák A., Ubránkovics Cs., Koppán A., Westergom V., Turi J., Ádám A., Madarasi A., Varga G., Kiss J., Jesh M., Prácz E., Ritter O., Weckman U. (2003): Magnetotelluric Measurements along the CELEBRATION-007 line. In: Pancardi Conference, 2003, Sopron
- Szarka L., Ádám A., Kiss J., Madarasi A., Novák A., Prácz E., Varga G. (2004): Magnetotelluric images from SW-Hungary, completed with gravity-, magnetic and seismic measurements. In: 32nd International Geological Congress, Florence, Italy, 2004.
- Szebenyi R. M. (2023): Magnetotellurikus adatok feldolgozása a Dunántúlon, egy mintaszelvény alapján. Diplomamunka, ELTE, Földrajz- és Földtudományi Intézet, Geofizikai és Űrtudományi Tanszék, p. 49.

A Demjén környéki terület felszín alatti hőmérsékletviszonyainak becslése

VASS P.

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

A geotermikus energia helyi hasznosítása szempontjából nagyon fontos a kisebb területek felszín alatti hőmérsékleti viszonyainak kutatása. A tanulmányban bemutatásra kerülnek a Demjén környéki olajkutatás és -termelés során mélyített fúrásokban mért hőmérsékleti adatok feldolgozási módszerei és a korrigált adatok együttes kiértékelésének folyamata. A feldolgozásban használt Horner-módszer alkalmazhatóságának vizsgálata pozitív eredményt hozott. A helyi hőmérséklet-mélység függvény becsléséhez pedig egy olyan modellt használtam, amely a konduktív és a konvektív hőáramlást egyaránt figyelembe veszi. A modellparaméterek optimális értékeinek meghatározását a reziduumok L1 és L2 normák szerinti minimalizálással hajtottam végre. Az eredmények ellenőrzésénél további fúrások talphőmérsékleti adataira és a szakirodalomra támaszkodtam. A becsült hőmérséklet-mélység függvényekből meghatároztam a geotermikus gradiens függvényeit is. Az összehasonlító vizsgálatok alapján az L1 norma szerinti minimalizálással kapott eredmény minősült jobbnak.

Vass, P.: Estimation of subsurface temperature conditions in the vicinity of Demjén

The research for the subsurface temperature conditions of smaller areas is very important from the point of view of utilizing local sources of geothermal energy. In this study the data processing methods of bottomhole temperature values measured in boreholes drilled for exploration and production of oil in the vicinity of Demjén and the joint evaluation of the corrected temperature data are presented. The feasibility of the Horner method used for temperature data processing was investigated and the result was positive. A model which takes into account both the conductive and the convective heat flows was selected for the estimation of local subsurface temperature as a function of depth. The optimal values of the model parameters were determined by minimizing the L1 and the L2 norms of residuals, respectively. The verification of the results was based on static bottomhole temperature data coming from additional boreholes and the relevant literature. The geothermal gradient functions were also derived from the estimated subsurface temperature functions. Based on the comparative investigations, it can be stated that the temperature function gained by minimizing the L1 norm of residuals is regarded as a better estimation.

Beérkezett: 2023. augusztus 7.; *elfogadva:* 2023. szeptember 20.

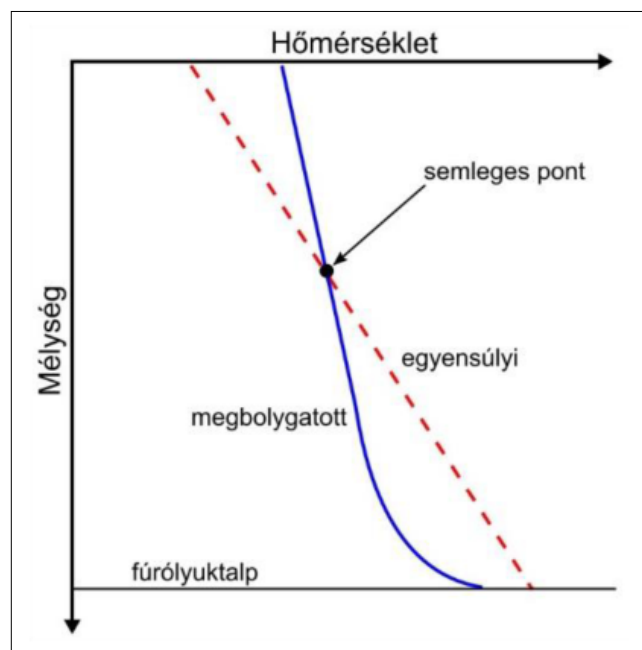
Bevezetés

A felszín alatti kőzetformációk hőmérsékletének, illetve az egyensúlyi hőmérséklet adott területre érvényes mélységfüggésének lehető legpontosabb ismerete több szempontból is nagy jelentőséggel bír. A fúrások és a fluidumtermelő kutak kiépítésének tervezése, valamint a mélyfúrású geofizikai szelvények kiértékelése során alkalmazott számítási módszerek egy része bemeneti paraméter formájában igényli a hőmérsékletet. A geotermikus energia hasznosítására irányuló tervezési munka szempontjából pedig az egyik legfontosabb információt jelenti a helyi hőmérséklet-mélység összefüggés.

A fúrólukokban végzett hőmérsékletméréseket leggyakrabban olyan körülmények között hajtják végre, amelyek csak többé-kevésbé közelítik meg a hőmérsékleti egyensúly állapotát. A nyitott fúrólukban az iszapöblítés hatása, annak leállításra és a fúrószerszám eltávolítása után még nagyon sokáig befolyásolja a mért értékeket. A fúróluktalpon vagy annak közelében mért hőmérséklet (Bottomhole Temperature, BHT) kisebbnek adódik, mint a környezetével hőmérsékleti egyensúlyban álló ugyanazon mélységpont hőmérséklete (Bottomhole Static Temperature, BHST). Ez a különbség akár 10–40 °C-ot is jelenthet (Fertl et al. 1986). A termelési geofizikai mérések során sem mérhető az egyensúlyi (nyugalmi)

hőmérséklet, mivel a kútban áramló fluidum a kút lezárása után szintén nagyon sokáig okoz az egyensúlyhoz képest jelentősen eltérő hőmérséklet-eloszlást. A lokális hőmérsékleti térben keletkező perturbáció mértékének elhanyagolhatóvá válása gyakran nagyon hosszú várakozási időt igényel (néhány nap is lehet mélyebb fúrások esetén), és ez a várakozási idő a legtöbb esetben nem illeszthető be az elsődlegesen nem geotermikus hasznosítás céljából fúrt kutak mérési programjába.

A szénhidrogén-kutató fúrások nyitott lyukban végzett hőmérsékletmérésének rendszeresített formája a fúrási geofizikai szelvényezésekhez kapcsolódik. A szelvényezési programban előírt mérések meghatározott csoportját mindig egy mélységszakasz lefúrása, a lyuk kiöblítése és a fúrószerszám kiépítése után hajtják végre. Ekkor a fúrólyuk még nincs termikus egyensúlyi állapotban, ugyanis az iszapöblítés során cirkuláltatott iszap hűti a fúrólyuk alsó részét, a felszínre visszatérő, felmelegedett iszap pedig fűti a fúrólyuk felső részét. Ennek eredményeképpen az 1. ábrán látható hőmérséklet-eloszlás alakul ki egy homogénnek tekinthető felszín alatti közegben. Az iszapöblítés hatása az öblítési időn kívül függ még az öblítés sebességétől, az iszap típusától és a talpmélységtől is.

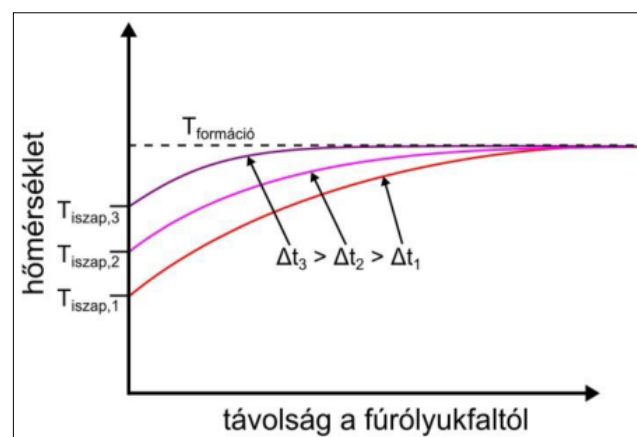


1. ábra Az egyensúlyi, valamint az iszapöblítés hatására megváltozott hőmérséklet-eloszlás egy homogénnek tekinthető felszín alatti közegben (Serra, Serra 2004 alapján)

Figure 1 Temperature profiles for thermal equilibrium (red dashed line) and for disturbed condition produced by drilling mud circulation (blue solid curve) in a homogeneous subsurface medium (based on Serra, Serra 2004)

A fúrási geofizikai szelvényezés során alkalmazott szondavonatok mindegyike képes mérni a művelet során beálló legnagyobb hőmérséklet értékét, amely tulajdonképpen a szondavonaton által elért legnagyobb mélységre vonatkozik, hiszen a hőmérséklet-eloszlás még megboly-

gatott állapotában is mélységgel növekvő hőmérsékleti értékeket eredményez. Mivel a mérendő mélységintervallum legalsó pontja általában a lyuktalp, a mért maximum-hőmérséklet leggyakrabban ennek a pontnak a termikus állapotát jellemzi a szondavonaton lyuktalpra érkezésének időpontjában. Ez az időpont fontos adat, és az iszapöblítés leállításától eltelt idő formájában kell rögzíteni a mért maximum-hőmérsékleti értékkel együtt. Amikor összehasonlítjuk az ugyanazon fúrólúkszakaszban egymás után következő, más-más szondavonatokkal végzett szelvényezési fuvarokból (logging trip) származó idő-hőmérséklet adatpárokat, általában azt tapasztaljuk, hogy a későbbi időpontokban ugyanazon mélységpontra vonatkozó hőmérsékletértékek egyre nagyobbak. Ez a növekedés a hőmérsékleti egyensúly állapota felé törekvő rendszer természetes válasza a zavart okozó hatás megszűnésére. A folyamat nem lineárisan megy végbe az idő függvényében. A változás sebessége kezdetben nagyobb, és fokozatosan csökken az idővel. Az iszapöblítés hőmérsékletet befolyásoló hatása a fúrólyukfaltól számított távolság függvényében szintén csökken, és az öblítés befejezése után eltelt idő növekedésével egyre szűkebb az a környezet, amelyen belül a nyugalmi hőmérséklethez képest el nem hanyagolható az eltérés. A távolság és az



2. ábra A hőmérséklet sugárirányú eloszlása ugyanabban a mélységben, az öblítés befejezése után eltelt különböző időpontokban (Zaki 1994 alapján)

Figure 2 Temporal change in the radial distribution of temperature at a fixed depth level after the mud circulation was stopped (based on Zaki 1994)

idő előzőekben ismertetett hatását mutatja be a 2. ábra. Az ábrán szereplő mennyiségek: Δt_i az öblítés befejezésétől eltelt i -edik idő, $T_{\text{izsap},i}$ a fúróiszap hőmérséklete az öblítés befejezésétől eltelt i -edik időben, $T_{\text{formáció}}$ a kőzetformáció hőmérséklete termikus egyensúlyi állapotban. A hővezetés differenciálegyenletének megoldása alapján arra a következtetésre jutottak, hogy az iszapöblítés hatása a kút belső terének határától számított 10 láb (~3 m) távolságon túl már általában kicsi (Edwardson et al. 1962).

Egyensúlyi lyuktalphőmérséklet meghatározása Horner-módszerrel

Timko és Fertl (Timko, Fertl 1972) dolgozott ki egy módszert, amely tulajdonképpen a folyadéktermelő kutak vizsgálata során alkalmazott, zárás utáni nyomásemelkedés-mérések értelmezésének Horner módszerén alapul (Horner 1951). A vizsgálat lényege a következő: meghatározott termelési idő után a kutat lezárják, majd a termelőréteg mélységébe beépített műszer segítségével mérik és rögzítik a nyomás értékének növekedését az idő függvényében. Elegendően hosszú idő után a nyomás állandósulna, és felvinné a tárolóréteg statikus (egyensúlyi) nyomásának értékét, amely egy fontos rezervoármechanikai paraméter. Természetesen a vizsgálat számára célszerűen biztosított időtartam általában nem elég hosszú az egyensúlyi állapot eléréséhez. Ennek megfelelően a rendelkezésre álló idő–nyomás adatpárok alapján kell becsülni a kívánt paraméter értékét.

Horner módszerének alapját a meghatározott feltételek kikötése mellett érvényes diffúzitásegyenlet képezi. A mért nyomást (P_w) lineáris skálán, a zárástól eltelt idő (Δt) és a zárást megelőző termeltetési idő (t_0) összegének a zárástól eltelt időre vonatkoztatott hányadosát pedig logaritmus skálán értelmezve, a Horner-grafikonon (Horner plot) ábrázolt adatpárok egy bizonyos tartományba (a kút lezárásától számított nem túl közeli és nem túl távoli idők tartományáról van szó) eső pontjaira egy egyenes illeszthető. Az egyenest $\Delta t = \infty$, azaz $(t_0 + \Delta t)/\Delta t = 1$ értékre extrapolálva a logaritmus skálán, a tárolóréteg statikus nyomásának becsült értéke (P_{wst}) leolvasható a nyomás tengely lineáris skáláján.

A már említett szerzőpáros által javasolt módszer esetében a zárás után mért nyomás az öblítés befejezése után mért talphőmérsékletnek (T_{BHT}), a termeltetési idő a fúrás befejezését követő öblítési időnek (t_k), a zárástól eltelt idő pedig az öblítés befejezésétől eltelt időnek (Δt) felel meg. A Horner-grafikon talphőmérsékletekre alkalmazott változatánál az ordinátatengely képviseli lineáris skálával a talphőmérsékletet, és az abszcisszatengely a $(t_k + \Delta t)/\Delta t$ kifejezésnek megfelelően van logaritmus skálázva. A mérési adatokra illesztett egyenes segítségével extrapolált egyensúlyi talphőmérsékletet (T_{BHST}) az ordinátán kimetszett érték adja meg. A módszert korábban már ismertette, és a felszín alatti tér egyensúlyi hőmérséklet eloszlását meghatározó problémával is foglalkozott Boda és Zilahi-Sebess (Boda, Zilahi-Sebess 2013).

A két módszer között jelentős különbség mutatkozik az elemzésbe bevonható adatpárok száma tekintetében. Míg a nyomásmérésnél lényegében az adatbőség esete áll fenn, a mért talphőmérséklet-értékek száma attól függ, hogy hány fuvarban hajtották végre a fúrás geofizikai szelvényezést ugyanabban a fúrólukszakaszban, ugyanazon szelvényezési munkafolyamat (job) keretein belül. Ez a szám az adott mélységtartományra vonatkozó mérési programtól függ, de az öt vagy annál nagyobb érték már figyelemre méltónak tekinthető. Ugyanakkor a pontpárookra illesztett

egyenes megbízhatóságának alsó korlátja a maximum-hőmérséklet három független mérését igényli. Ebből következik, hogy sajnos nem minden fúrólukszakasz esetében alkalmazható a módszer, valamint az idő- és hőmérsékletadatokat pontosságára vonatkozó érzékenységgel is számolni kell.

Jóllehet a módszer formailag kivitelezhető, és az esetek jelentős részében elfogadható eredmények származtathatók az alkalmazásával, az elméleti háttérrel tekintve nincs megalapozva. Ugyanis a zárás után bekövetkező nyomásemelkedés és az öblítés befejezése után meginduló hőmérséklet-emelkedés folyamatai eltérnek egymástól.

Dowdle és Cobb (Dowdle, Cobb 1975) vizsgálták, hogy milyen feltételek mellett használható a Horner-módszer az egyensúlyi talphőmérséklet becslésére. A folyadéktermelő kutak rétegnomására és a lyuktalp hőmérsékletére felírható diffúziós egyenletek formailag azonos szerkezetűek. Hengerszimmetrikus esetben mindkettő a vizsgált mennyiségnek a sugárirányú távolság és az idő szerinti viselkedése közötti összefüggést magában foglaló differenciálegyenlet a tárolóréteg, ill. a lyuktalp szintjére vonatkozóan. Általános alakja a következőképpen írható fel:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = a \left(\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} \right), \quad (1)$$

ahol $u(r,t)$ az r sugárirányú távolság és t idő függvényeként értelmezett nyomás (P) vagy hőmérséklet (T), az a konstans általános elnevezése diffúziós tényező. A nyomás esetében $a = k/(\phi\mu c)$, ahol k a réteg permeabilitása, ϕ a porozitása, μ a folyadék viszkozitása és c a kőzet-folyadék rendszer összenyomhatósága (kompresszibilitása). A hőmérsékletre felírható differenciálegyenlet, a hővezetési egyenlet, diffúziós tényezője (hőmérséklet-vezetési tényező) $a = k_h/(c_f\rho)$, ahol k_h a hővezető képesség, c_f a fajlagos hőkapacitás (fajhő) és ρ a halmazsűrűség.

Az egyenletek érvényességi kereteit természetesen a modellekben rögzített feltételek teljesülése határozza meg. A megoldáshoz szükséges kezdeti feltételek és a kút terén kívüli lecsapolási területre vonatkozó (külső) határfeltételek megfeleltethetők egymásnak. Az eltérés a kút terén belülre vonatkozó határfeltételnél jelentkezik, ugyanis a nyomás esetében az állandó hozammal termeltetett kút belső terének sugaránál a nyomásgradiense konstans, és a lezáráskor nullára csökken az értéke. A talphőmérséklet az állandó sebességgel végzett öblítés során az iszap hőmérsékletének feleltethető meg, amely gyakorlatilag konstansnak tekinthető. Az öblítés befejezésének hatására azonban a hőmérséklet gradiense nem lesz zérus, hanem az értéke függ az időtől (fokozatosan, de nem lineárisan csökken, amíg be nem áll a termikus egyensúlyi állapot). A zárás utáni folyamatok eltérése miatt elméletileg a nyomásra vonatkozó megoldást, amelyen a Horner-féle grafikon alapszik, nem lehetne alkalmazni az egyensúlyi talphőmérséklet becsléséhez.

Ugyanakkor Dowdle és Cobb felhívják a figyelmet arra is, hogy a hőmérsékleti gradiensnek a változása nagyon las-

sú, ezért rövid öblítési idő (t_k) esetén a gradiens értéke állandónak vehető, és a Horner-féle grafikonra alapozott talphőmérséklet becslésének módszere megbízható eredményt biztosít. Lényegében a módszer az öblítési időtartamtól függő mértékben alábecsüli a tényleges egyensúlyi talphőmérsékletet. Ennek mértékére vonatkozóan két példát említenek. Egy tipikusnak mondható, 2,4 órás öblítési időnél 2%-kal kisebb a becsült érték, míg egy nagyon hosszú, 50 órás öblítési időnél már 11%-os eltérésre számíthatunk. Az öblítési időnek tehát fontos szerepe van a módszer esetében.

Az (1) egyenletnek a kútlezárás után bekövetkező nyomásemelkedésre vonatkozó megoldásából származtatott összefüggésében szereplő mennyiségek egy részét az egyensúlyi talphőmérséklet (T_{BHST}) meghatározásához szükséges mennyiségekkel helyettesítve, az alábbi formulához jutunk:

$$T_{\text{BHST}} = T_{\text{BHT}} - C \log\left(\frac{t_k + \Delta t}{\Delta t}\right), \quad (2)$$

ahol T_{BHT} a fúróluktalp hőmérséklete az öblítés befejezése után Δt idővel, t_k az öblítés időtartama és C a hőmérsékletvezetési tényező reciproka. Utóbbi ismeretére a Horner-módszer alkalmazásánál nincs szükség, mert a mérési adatok segítségével a feladat megoldása lineáris regresszióra vezethető vissza.

A módszer végrehajtásának és az öblítési idő hatásának bemutatása érdekében egy demjéni fúrás geofizikai szelvényezési során mért talphőmérséklet-adatokat használtam fel. A ferdeségi adatok korrekcióját elvégezve, a fúrás felszíntől számított függőleges mélysége 926 m-nek adódott. A szelvényezési műveletek megnevezéseit, az öblítés befejezése óta eltelt időket és a mért maximum-hőmérsékleteket az 1. táblázat tartalmazza. Ennél a fúrásnál az a ritka eset áll fenn, hogy „nagyinak” mondható független hőmérsékleti adatszám (7) vonható be a feldolgozásba. A mért értékek pontosságát nem ismerjük ugyan, de min-

denképpen fel kell tételezni valamilyen mértékű véletlen hibát. Az öblítés befejezésétől eltelt idő növekedése növekvő talphőmérséklet-értékekkel párosul, és ez megfelel a termikus egyensúly felé törekvéssel szemben elvárható változásnak. A trendet az utolsó adat megtöri, ugyanis a két utolsó mérés között eltelt három és fél óra alatt nem mutatkozik hőmérséklet-változás. Ez akár arra is utalhat, hogy a lyuktalp már beállt a termikus egyensúly állapotába, vagy ahhoz közeli állapotban van, de a hibás mérés vagy hibás adatrögzítés eseteivel is számolnunk kell.

Az öblítés időtartamára vonatkozó közvetlen adatot nem találtam a kútkönyvben. Míg az öblítés befejezése és a szondavonat talpra érkezése között eltelt idő, valamint a szelvényezés során mért maximum-hőmérséklet számára a nyomtatott fúrási geofizikai szelvény fejlécén külön mezők vannak biztosítva a fontosabb adatok számára fenntartott táblázatban, viszont furcsa módon az öblítési időtartam rögzítésére nincs adatmező. Ennek eredményeképpen a gyakran egyébként is hiányosan kitöltött fejlécen esélyünk sincs megtalálni ezt a nagyon fontos adatot. Csak a kútkönyv egyéb dokumentumainak alapos áttekintésével remélhetünk olyan információkra bukkanni, amelyek révén következtethetünk az öblítés időtartamára. Mindezekre azért tartom fontosnak felhívni a figyelmet, mert a hiányos vagy hanyag, esetleg hibás, rosszul megtervezett dokumentáció nagyon fontos adatok és információ elvesztéséhez vezet. Ez pedig megnehezíti, bizonytalanná vagy akár lehetetlenné is teszi bizonyos feldolgozási, kiértékelési és kutatási munkák elvégzését.

A példaként választott esetben a földtani napi jelentések alapján ismert, hogy melyik napon fúrták le a lyuk utolsó 15 m-es szakaszát. Az öblítés és a fúrászszer szám kiépítése ezután következett. A fúrási geofizikai szelvényezési műveletek még ugyanezen a napon megkezdődtek. Az utolsó szelvényezéshez kapcsolódó talpra érkezés, amint az 1. táblázatban látható, több mint 22 órával az öblítés befejezése után történt, de még szintén azon a napon. Ennek

1. táblázat Egy demjéni fúrás alsó szakaszán végrehajtott fúrási geofizikai szelvényezések megnevezései, az öblítés befejezése és a szondavonat talpra érkezése között eltelt idők, valamint a mért maximum-hőmérsékletek összefoglalása

Table 1 Tool combinations of successive well logging trips in the first, elapsed times between the end of mud circulation and BHT measurements in the second, and the measured BHT values in the third column for a borehole drilled at Demjén

Szelvényezési művelet neve	Az öblítés befejezése óta eltelt idő	A mért maximum-hőmérséklet
Optimális laterolog, természetes potenciálszelvényezés (OL – SP)	5 h 20 min = 320 min	53 °C
Pszedo-laterolog hosszú, természetes potenciálszelvényezés (PLH – SP)	7 h = 420 min	55 °C
Mikrolaterolog, természetes potenciálszelvényezés (MLL – SP9)	9 h 10 min = 550 min	56,5 °C
Mikrolog, lyukátmérő-szelvényezés (ML – DL)	12 h 30 min = 750 min	59 °C
Sűrűség, lyukátmérő-szelvényezés (DEL – DL)	15 h = 900 min	61,5 °C
Akusztikus intervallumfutási időszelvényezés (ATL)	18 h 50 min = 1130 min	64 °C
Mészköre hitelesített neutron porozitás, természetes-gammasugárzás-szelvényezés (FINLM – TG)	22 h 20 min = 1340 min	64 °C

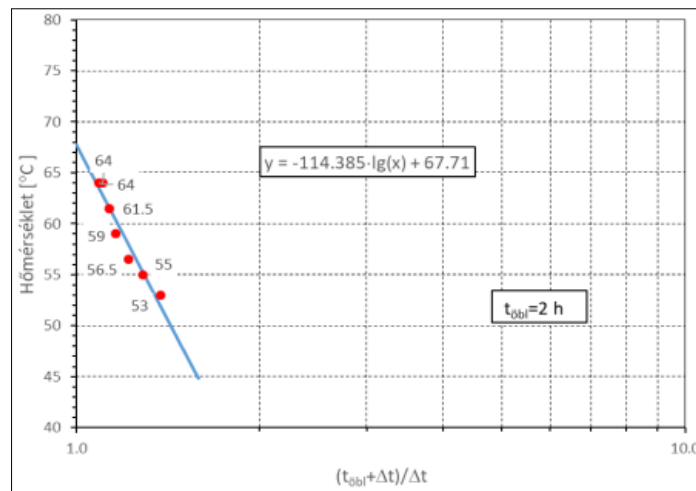
2. táblázat | Az öblítés óta eltelt idők (Δt_i), a mért maximum-hőmérsékletek ($T_{max,i}$) és a Horner-grafikon abszcisszatengelyéhez tartozó kifejezés számított értékei kétórás öblítési idő ($t_{öbl}$) feltételezésével

Table 2 | Times elapsed from the end of mud circulation (Δt_i), the measured BHT values ($T_{max,i}$) and the corresponding abscissa values of the Horner plot assuming two hour mud circulation time ($t_{öbl}$)

Δt_i [min]	$T_{max,i}$ [°C]	$(t_{öbl} + \Delta t_i)/\Delta t_i$
320	53	1,3750
420	55	1,2857
550	56,5	1,2182
750	59	1,1600
900	61,5	1,1333
1130	64	1,1062
1340	64	1,0896

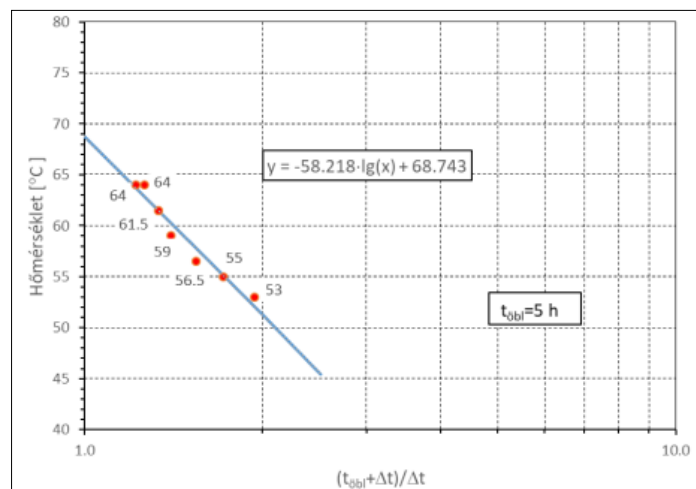
alapján arra következtethetünk, hogy az öblítés nem tartott sokáig. Ha elfogadjuk a tevékenységekkel kapcsolatban rögzített adatokat, akkor legfeljebb kétórás öblítéssel kell számolnunk. Ez az időtartam elfogadhatónak tekinthető, hiszen az indokolatlanul elnyújtott öblítési folyamat gazdaságossági szempontból egyáltalán nem kívánatos.

Az öblítési időtartam hatásának vizsgálata érdekében négy különböző érték választása mellett alkalmaztam a Horner-módszert. Az öblítési idők növekvő sorrendben 2, 5, 10 és 15 óra. A kétórás öblítési időhöz tartozó adatokat a 2. táblázat foglalja össze. A (2) egyenletben alkalmazott jelölések közül T_{BHT} helyett T_{max} , t_k helyett pedig $t_{öbl}$ jelenik meg a fejlécben. Az adatok alapján készült Horner-grafikont a 3. ábra mutatja be, melyen a piros körök jelzik a táblázat megfelelő értékpárjai által meghatározott pontok helyzetét. A legkisebb négyzetek elvének alkalmazásával illesztett lineáris összefüggést a kék egyenes szemlélteti. Az egyenes paramétereit tartalmazó egyenlet a



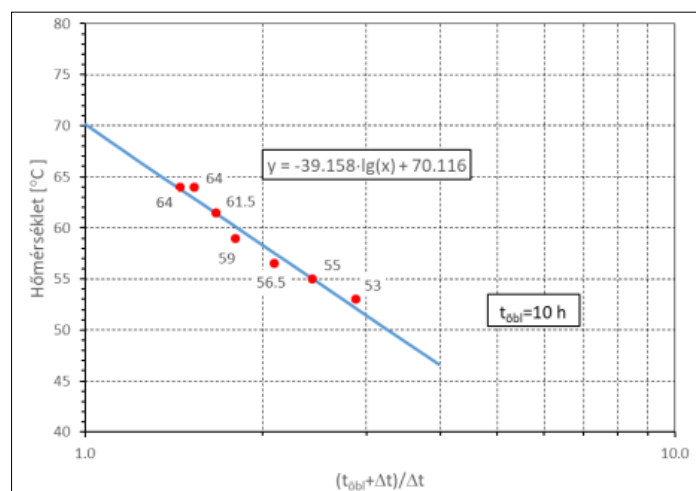
3. ábra | A kétórás öblítési idő alkalmazásával készített Horner-grafikon. A logaritmus skála 1-es értékére extrapolált egysúlyi lyuktalpi hőmérséklet, $T_{BHST} = 67,7$ °C

Figure 3 | Horner plot for two hour mud circulation time. The static bottomhole temperature extrapolated by the fitted line is $T_{BHST} = 67.7$ °C



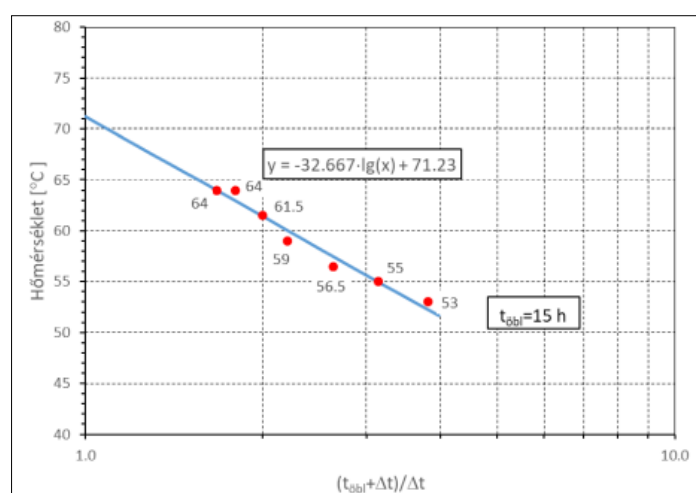
4. ábra | Az ötórás öblítési idő alkalmazásával készített Horner-grafikon. A logaritmus skála 1-es értékére extrapolált egysúlyi lyuktalpi hőmérséklet, $T_{BHST} = 68,7$ °C

Figure 4 | Horner plot for five hour mud circulation time. The static bottomhole temperature extrapolated by the fitted line is $T_{BHST} = 68.7$ °C



5. ábra | A tízórás öblítési idő alkalmazásával készített Horner-grafikon. A logaritmusos skála 1-es értékére extrapolált egyensúlyi lyuktal-phőmérséklet, $T_{\text{BHST}} = 70,1 \text{ °C}$

Figure 5 | Horner plot for ten hour mud circulation time. The static bottomhole temperature extrapolated by the fitted line is $T_{\text{BHST}} = 70.1 \text{ °C}$



6. ábra | A tizenöt órás öblítési idő alkalmazásával készített Horner-grafikon. A logaritmusos skála 1-es értékére extrapolált egyensúlyi lyuktal-phőmérséklet, $T_{\text{BHST}} = 71,2 \text{ °C}$

Figure 6 | Horner plot for fifteen hour mud circulation time. The static bottomhole temperature extrapolated by the fitted line is $T_{\text{BHST}} = 71.2 \text{ °C}$

grafikon egyik szövegdobozában látható. A két konstans közül a második a lényeges, amely az egyenes ordinátametszetét adja meg. Ez tulajdonképpen az öblítés után eltelt végtelen hosszú időre extrapolált fúróllyuktal-phőmérséklet, azaz az egyensúlyi lyuktal-phőmérséklet becslés értéke ($T_{\text{BHST}} = 67,7 \text{ °C}$). Az 5, 10 és 15 órás öblítési idővel készített Horner-grafikonokat és a becslés egyensúlyi talphőmérsékleteket sorrendben a 4–6. ábrák mutatják be.

A különböző öblítési idők esetében kapott egyensúlyi lyuktal-phőmérsékleteket a 3. táblázat foglalja össze. Az értékek mindegyike nagyobb, mint a legutoljára végzett fúrás geofizikai szelvényezés során mért maximum-hőmérséklet ($\Delta t_7 = 22 \text{ h } 20 \text{ min}$, $T_{\text{max},7} = 64 \text{ °C}$). Ez arra utal, hogy az öblítés befejezése után nagyjából egy nap elteltével a fúróllyuktal-phő még nem érte el a hőmérsékleti egyensúly állapotát. A hosszabb öblítési idő feltételezése mellett nagyobb egyensúlyi lyuktal-phőmérsékletet kapunk. Ez érthető, hiszen a hosszabb öblítési idő nagyobb

mértékű hőmérséklet-különbséget eredményez az öblítés leállításakor érvényes talphőmérséklet és az egyensúlyi talphőmérséklet között. Ha összehasonlítjuk az értékeket, akkor azt tapasztaljuk, hogy az öblítési idők viszonylag széles tartományában (13 óra) a becslés egyensúlyi talphőmérséklet nem mutat nagy változást ($3,5 \text{ °C}$). Ugyanakkor a korábban ismertetett tapasztalatokat figyelembe véve, nem szabad elfelejtkezni arról, hogy a becslés értékek megbízhatósága a tényleges öblítési idő növekedésével romlik. Ebben az esetben a dokumentált adatok alapján rövid öblítési időre következtethetünk, s emiatt a táblázat első két sorának adataira érdemes koncentrálni. A két talphőmérséklet-érték között mindössze 1 °C különbség van. A becslés értékek becslés szórásai, amelyek a lineáris regresszióval meghatározott paraméter bizonytalanságát jellemzik, tizedre kerekítve megegyeznek, és a nagyságot tekintve kis értéket képviselnek.

Az R^2 (determinációs együttható) számításával jellemezhető az illeszkedés jósága. Látható, hogy nincsenek jelen-

3. táblázat A különböző öblítési idők alkalmazásával kapott egyensúlyi lyuktalphőmérsékletek, a becsült hibákkal és a lineáris regresszióval kapott modell „jószágát” jellemző statisztikai mennyiségek értékeivel
Table 3 Estimated static bottomhole temperatures with the estimated error (column 2) in the function of the mud circulation time (column 1). R squared vales (column 3) and relative corrected standard deviations of the residuals (column 4) characterizing the goodness of fit

Öblítési idő [h]	Becsült egyensúlyi lyuktalp-hőmérséklet [°C]	R ²	Relatív korrigált reziduális szórás
2	67,7 ± 1,1	0,94	0,020
5	68,7 ± 1,1	0,95	0,018
10	70,1 ± 1,1	0,96	0,016
15	71,2 ± 1,1	0,96	0,015

tős különbségek közöttük. Az 1-hez közeli R²-értékek arra utalnak, hogy a független változó teljes varianciájának a regresszióval magyarázott hányada nagy (>94%), és ez jó illeszkedést jelent a modellhez (Köves, Párniczky 1975). A relatív korrigált reziduális szórás, amely a függőváltozó mért értékeinek átlagára normált korrigált reziduális szórás, tulajdonképpen a függőváltozó nagyságrendjétől függetlenül torzítatlan becslése a lineáris összefüggésből számított becslés szórásának. Minél kisebb az értéke, annál pontosabban lehet megbecsülni a függőváltozó értékeit a lineáris modellel a független változó értékeiből (Köves, Párniczky 1975). A 3. táblázat negyedik oszlopát vizsgálva egymáshoz közeli kis értékeket láthatunk. Statisztikai értelemben kijelenthető, hogy a lineáris modell választása mind a négy esetben indokolt.

A Magyarország mélyfúrású kútjainak katasztere XXXIII. kötetében található K-11-es kataszteri számú demjéni hévízkutat 2008-ban fúrták le. A kút légvonalban számított távolsága a példában szereplő fúrástól 3166,5 m. Mélysége 950 m, ami nagyon közel van a fúrás 926 m-es függőleges mélységéhez. Ennek a kútnak a kataszterben rögzített lyuktalpi hőmérséklete 68,3 °C. Az érték nagyon jól illeszkedik a rövidebb öblítési idővel számított egyensúlyi talphőmérsékletek értékeihez, és ez megerősíti a Horner-módszer alkalmazhatóságába vetett bizalmat a demjéni terület esetében. További megerősítést jelentenek a hazai geotermikus viszonyok jellemzése érdekében különböző mélységekre készített hőmérsékleteloszlás-térképek (Lenkey et al. 2021). Az Egerhez közeli Demjénben az átlagoshoz képest nagyobb hőmérséklet jelentkezik a felszín alatti 500 és 1000 m-es szinteken. Az 500 m-es mélységben 40–50 °C-os, az 1000 m-es mélységre becsült térkép szerint pedig 60–70 °C-os tartományba eső hőmérsékletértékekre lehet számítani ezen a területen. Az országos átlagok az említett mélységekben 40 °C és 60 °C (Lenkey et al. 2021).

Egyensúlyi lyuktalphőmérséklet meghatározása a hőmérséklet stabilizálódását leíró paraméteres görbe illesztésén alapuló módszerrel

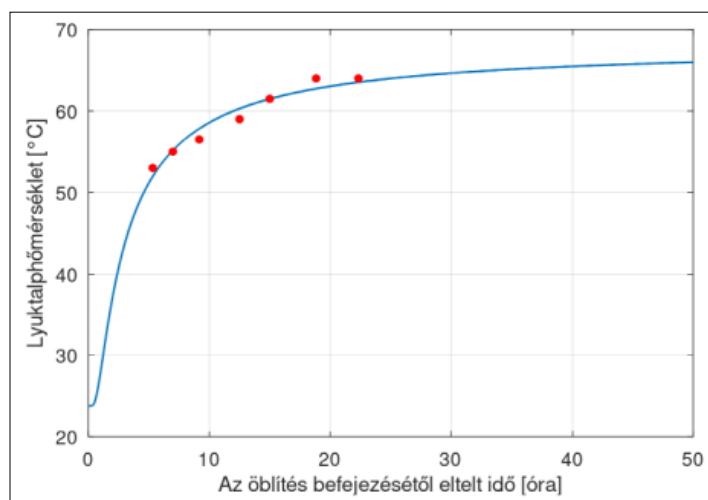
Az egyensúlyi lyuktalphőmérséklet meghatározásának egy másik megközelítési módját Middleton javasolta (Middleton 1979). Az általa alkalmazott modellben, amely lyuktalp-

hőmérséklet egyensúly felé törekvésének folyamatát igyekszik leírni, azt feltételezi, hogy az öblítés leállításakor ($t = 0$) a fúróluk alsó néhány méterében egységesen fennálló hőmérséklet az iszap (T_m) hőmérsékletének felel meg. Ugyanebben az intervallumban a fúrólukat körülvevő közetformáció a hőmérsékleti egyensúly állapotában van (T_f). Tehát a folyamat kezdetén a sugárirányú hőmérséklet-eloszlásban ugrásszerű változást feltételez a fúrólukfalnál. Az öblítés leállítása után a fúrólukba hő áramlik be minden irányból azonos hőáramsűrűséggel. A hőátadásban csak a konduktív folyamat van figyelembe véve, és a fúrólukon belüli közeg hőmérséklet-vezetési tényezője (a) megegyezik a külső közegével.

A hővezetés differenciálegyenletének a modellben felállított feltételek figyelembevételével mellett kapott megoldásával olyan összefüggést származtatott, amellyel ki lehet fejezni a fúróluk alsó szakaszában az iszap hőmérsékletének változását az idő függvényében. Ezáltal az ismeretlen paraméterek (T_f , T_m , a) különböző kombinációjára előállíthatók a lyuktalphőmérséklet stabilizálódásának görbéi. A görbék aszimptotái, a $t = \infty$ -hez tartozó T_f egyensúlyi hőmérsékletnek felelnek meg. A gyakorlati alkalmazáshoz legalább három különböző időpontban mért talphőmérsékleti adatra van szükség, hasonlóan a Horner-módszerhez. Az öblítési idő ismeretére azonban nincsen szükség. A feladat megoldását az ismeretlen paraméterek értékeinek olyan megválasztása jelenti, amelyekkel előállított hőmérséklet-stabilizálódási görbe a legjobban illeszkedik az öblítés leállításától számított idők és a mért lyuktalphőmérsékletek által meghatározott pontok rendszerére.

A Middleton által kidolgozott modellben a fúróluk keresztmetszete négyzet alakú volt, és a hőmérséklet stabilizálódására kapott megoldás nem felelt meg az előzetesen megszabott feltételeknek. Erre Leblanc, Pascoe és Jones mutatott rá (Leblanc et al. 1981). A javításon kívül megoldották a problémát körkeresztmetszetű fúróluk esetére is, amely jobban illeszkedik a valóságos körülményekhez. A lyuktalp hőmérsékletének időbeli változását leíró egyenlet ebben a modellben:

$$T_{\text{BHT}}(t) = T_f + \Delta T \left[\exp\left\{-r^2/(4at)\right\} - 1 \right], \quad (3)$$



7. ábra | A nemlineáris hőmérséklet-emelkedési modellnek a mérési adatokra legjobban illeszkedő típusgörbéje a hőmérséklet-vezetési tényező értékének $0,27 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ -re történő választása esetén

Figure 7 | Best fitting non-linear temperature build-up curve for the measured data with the assumption of thermal diffusivity value of $0.27 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$

ahol t az öblítés leállításától eltelt idő, $\Delta T = (T_f - T_m)$ az egyensúlyi hőmérséklet, valamint az öblítés befejezésekor fennálló lyuktalpi hőmérséklet különbsége, r a fúróluk sugara és a a közeg hőmérséklet-vezetési tényezője. A görbeillesztés problémája egyszerűsíthető, ha a kőzetformáció hőmérséklet-vezetési tényezőjére vonatkozó megfontolások, ill. apriori ismeretek alapján, rögzítjük ennek a paraméternek az értékét, vagy több, de véges számú értéket vonunk be a feldolgozásba. Ilyen módon a regressziós feladat lineárisává válik. Az egyenes meredekségét befolyásoló ismeretlen paraméter Δt , az ordinátametszet értéke pedig a becsült egyensúlyi hőmérséklet (T_f) (Leblanc et al. 1982).

A hőmérséklet-vezetési tényező értékének megválasztásánál érdemes figyelembe venni az alábbi megfontolást. A vízre vonatkozó érték $0,144 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, és ez nagyjából a tizede a törmelékes üledékes kőzetekre vonatkozó átlagos értéknek. A fúrólukban vízbázisú iszapot, a közvetlen környezetében pedig törmelékes üledékes kőzetet feltételezve, az érték valahol a kettő közötti tartományban van. Félíg vízből, félíg kőzetből álló keverékre $0,27 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ értéket származtattak (Leblanc et al. 1981). A helyi adottságoktól (iszap, kőzet) függően érdemes lehet azonban megvizsgálni más értékeket is a $0,2-0,8 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ tartományban (Leblanc et al. 1982).

A görbeillesztéses módszer vizsgálatának érdekében a már korábban említett fúrás talphőmérséklet- és időadatait használtam fel (1. táblázat). Az alsó szakaszra érvényes lyukátmérő $7 \frac{5}{8}$ " volt. A hőmérséklet-vezetési tényező értékét $0,27 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ -ra állítottam be. A legkisebb négyzetek elve alapján végrehajtott lineáris regresszió eredményeként becsült egyensúlyi hőmérséklet tizedesre kerekítve $T_f = 68,1 \text{ °C}$ -nak adódott. Ez nagyon közel áll az előzőekben bemutatott Horner-módszerrel származtatott és az adatbázisból vett értékekhez. A pontok és az illesztett görbe viszonyát a 7. ábra mutatja be.

A görbeillesztést elvégeztem a hőmérséklet-vezetési tényező két másik értéke mellett is, és a kapott eredményeket a 4. táblázatban foglaltam össze. Mindhárom esetben közeli értékek adódtak az egyensúlyi talphőmérsékletre, és a becslés tizedesre kerekített becsült szórásai is meggyeznek. A ΔT -nél viszont nagyobb eltérések jelentkeztek, és a becsült értékek bizonytalansága is nagyobb. Ebből arra lehet következtetni, hogy az öblítés leállításának pillanatakor fennálló iszaphőmérséklet becslése sokkal érzékenyebb a hőmérséklet-vezetési tényező értékének megváltozására. Az R^2 -értékek jó illeszkedést jeleznek a hőmérséklet-vezetési tényező rögzítése révén lineárisává alakított modellhez. A relatív korrigált reziduális szórások értékei

4. táblázat | A görbeillesztéses módszerrel becsült paraméter értékek a becsült szórásaikkal és a regresszióval kapott modell „jóóságát” jellemző statisztikai mennyiségek értékeivel

Table 4 | Estimated parameters (columns 2 and 3) in the function of thermal diffusivity (column 1) gained by temperature build-up curve fitting method. R squared values (column 4) and relative corrected standard deviation of the residuals (column 5) characterizing the goodness of fit

a [$10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$]	$T_f = T_{\text{BHST}}$ [°C]	ΔT [°C]	R^2	Relatív korrigált reziduális szórás [°C]
0,20	$68,6 \pm 1,1$	$36,1 \pm 3,7$	0,95	0,018
0,27	$68,1 \pm 1,1$	$44,2 \pm 4,8$	0,94	0,019
0,30	$67,9 \pm 1,1$	$47,9 \pm 5,3$	0,94	0,019

pedig kedvezően kis értékűek. A hőmérséklet-vezetési tényező értékének csökkentése kicsit javított mind az R^2 , mind a relatív korrigált reziduális szórás értékein. A tényező kisebb értékeinek a vizsgálata már nem lenne indokolt, hiszen a tiszta vízre érvényes értékhez kerülnénk közelebb, és ennek a feltételezése már a valóságtól nagyon távol állna.

A felszín alatti hőmérséklet mélységfüggésének becslése a demjéni területre konvektív hőáramlás figyelembevételével

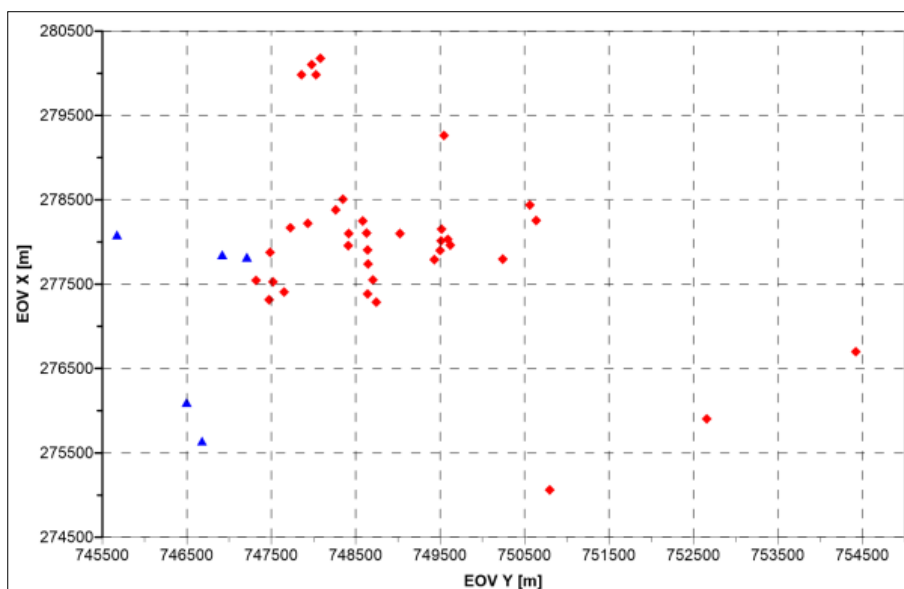
A mintaadatrendszer feldolgozásával becsült és más forrásokból származó információk által is megerősített eredmény alapján a továbblépés kézenfekvő iránya a demjéni területen mélyült további fúrások talphőmérsékleti adatainak feldolgozása irányába mutatott. Elegendően nagyszámú, megbízható forrásból származó, a mélység tekintetében széles mélységtartományban, lehetőség szerint egyenletesen eloszló egyensúlyi talphőmérsékleti adatok segítségével lehetővé válik a területet jellemző átlagos hőmérsékleti mélységprofil származtatása. Természetesen a felsorolt optimális feltételek együttes teljesülése a gyakorlatban csak ritkán fordul elő, ez azonban nem jelenthet akadályt a már rendelkezésre álló adatok együttes elemzését célzó vizsgálataink végrehajtásával szemben.

A demjéni területen korábban szénhidrogén-kutatási céllal mélyített fúrások kútkönyvi dokumentumai, a „Földi energiaforrások hasznosításához kapcsolódó hatékonyság növelő mérnöki eljárások fejlesztése” című, GINOP-2.3.2-15-2016-00010 jelű projekt támogatása révén vált lehetővé. Az elemzésbe bevont 90 fúrás anyagának alapos áttekintése

során feldolgozásra alkalmas talphőmérséklet-mérési adataikat csak 36 fúrás esetében találtam. A fúrások nagyobb részében sajnos vagy hiányos volt az adatrögzítés, vagy egyáltalán nem volt adat. Az öblítési idő hosszára vonatkozóan pedig egyetlen egy fúrásnál sem találtam adatot. Tehát jelentős mennyiségű adatvesztésről beszélhetünk a technológiai fegyelem és a tevékenységek ellenőrzésének hiányosságai miatt. A fúrások területi eloszlását a 8. ábra mutatja be. A 9×6 km-es terület kelet-északkeleti irányban fekszik Demjén határában. A fúrások egyenletes területi eloszlása sajnos nem teljesül. A délkeleti negyed három kutatófúrása a legmélyebb, felszíntől számított függőleges mélységük közelíti a 2000 m-t.

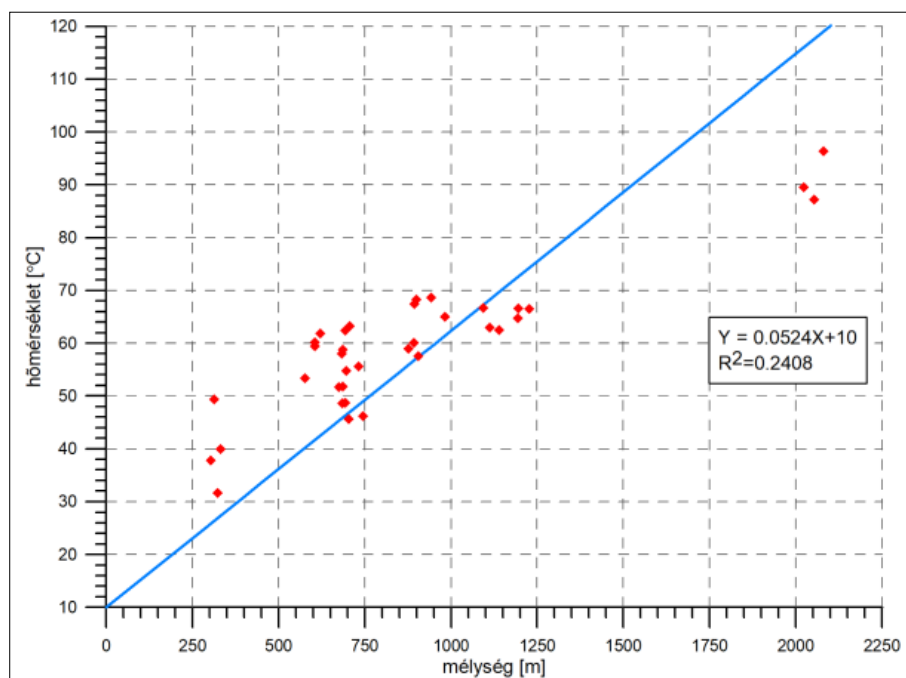
A fúráspontok tengerszint feletti magassága a 131,4 és 242,2 m közötti tartományba esett. A területre vonatkozó lokális referenciaszintet ($z_0 = 0$ m) a két szélsőérték átlagaként határoztam meg ($h_{ref} = 186,6$ m). A fúrások felszíntől számított függőleges talpmélységét erre a szintre vonatkozóan számítottam át. A lokális referenciaszinthez hazánk évi középhőmérsékletét rendeltem hozzá ($T_0 = 10$ °C). A fúrások egyensúlyi talphőmérsékleteinek a becslését a Horner-módszerrel végeztem el. Az öblítési időre vonatkozó információhiány miatt egy normál körülmények között indokolhatónak tekinthető értéket, 5 órát alkalmaztam a számítások során.

Az előállított mélység-hőmérséklet adatait elsősorban egyenest illesztettem a lokális referenciaszintre vonatkozó kezdő hőmérséklet határfeltételének rögzítése mellett. Az eredményt a 9. ábra mutatja be, melyen egyértelműen látszik, hogy az egyenes nem alkalmas a felszín alatti hőmérséklet változásának leírására ebben az esetben. A legkisebb négyzetek módszerével végrehajtott lineáris regresszió eredményét negatív értelemben minősíti az ábrán



8. ábra | Az elemzésbe bevont fúrások területi eloszlása a Demjén kelet-északkeleti határában fekvő területen. *Piros rombusz*: a talphőmérsékleti adatok feldolgozásába bevont szénhidrogénkutató fúrás helye. *Kék háromszög*: 2006 és 2017 közötti időszakban mélyített hévízkutató-fúrás helye

Figure 8 | Areal distribution of borehole sites involved into the analysis in the vicinity of Demjén. *Red rhombus symbols*: the sites of HC boreholes whose BHST data used for data processing. *Blue triangles*: thermal borehole sites drilled later and used for the verification of results



9. ábra | A Horner-módszerrel számított egyensúlyi hőmérsékletek mélység szerinti eloszlása és az adatrendszerre illesztett egyenes gráfja
Figure 9 | BHST values versus depth determined by Horner method and the linear function fitted to the data

megjelenő R^2 kis értéke is. A lineáris hőmérséklet függvény sekély tartományban kisebb hőmérsékletet becsül annál, ami az egyébként erősen szóródó adatok alapján elvárható lenne. A legmélyebb fúrásokból származtatott adatokhoz képest viszont túlzottan magas értéket becsül ($T = 114,8$ °C, $z = 2000$ m-ben). Mindezekből arra lehet következtetni, hogy a területet egyetlen átlagos geotermikusgradiens-értékkel nem lehet jellemezni. Ez egyben azt is jelenti, hogy a hőáramlásnak nemcsak a konduktív, hanem a konvektív formája is jelen van. Ha az utóbbi hatását el lehetne hanyagolni, akkor az adatoknak a lineáris modellhez sokkal jobban illeszkedő elrendeződést kellene mutatniuk. Számolni kell tehát a függőleges irányú fluidumáramlással is, amelyhez természetes módon hőáramlás társul. A hőmérsékleti adatok mélység szerinti megoszlásával kapcsolatban meg kell jegyezni, hogy a 250 m-nél sekélyebb, a 300–500 m-es és az 1250–2000 m-es tartományokban adathiány áll fenn. A kevés adat és egyenetlen eloszlás sajnos a hőmérséklet mélységfüggésének vizsgálatát nehezíti, és a becsült eredmények bizonytalanságát növeli.

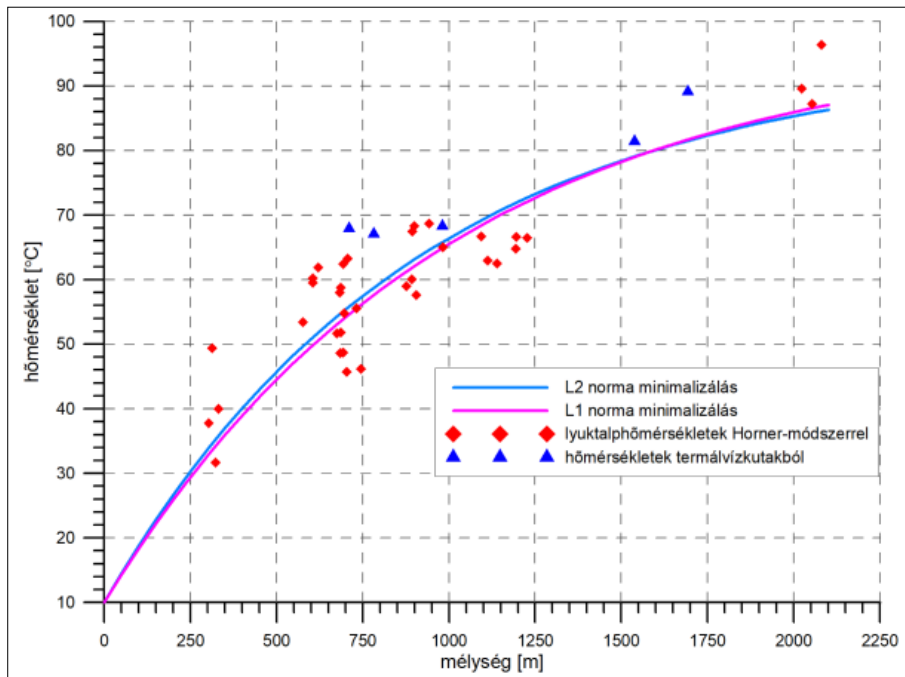
A felszín alatti függőleges irányú vízmozgás hatását is figyelembe vevő, elméleti hőmérséklet–mélység függvény meghatározásának problémájával Bredehoeft és Papadopoulos foglalkozott (Bredehoeft, Papadopoulos 1965). Az együttesen fennálló konduktív hővezetés és fluidumáramlás általános leírására szolgáló parciálisdifferenciálegyenletből kiindulva, az alábbi feltételek kikötésével oldották meg a feladatot. A felszín alatti közeg homogén, izotróp és féligáteresztő a kizárólag függőleges irányú fluidumáramlásra nézve. Ezzel tulajdonképpen csak egyirányú áramlás van figyelembe véve (egydimenziós áramlás esete). Az alulról felfelé áramló fluidum hőtöbbletet

eredményez a felsőbb tartományban, és ez nagyobb hőmérsékletet hoz létre a kizárólag konduktív hővezetés által befolyásolt állapothoz képest. A felszín közeléből lefelé áramló fluidum fordított hatást fejt ki. A modell állandósult hő- és fluidumáramlást feltételez. A megoldáshoz felhasznált határfeltételek két különböző mélységben fennálló hőmérséklet rögzítését igénylik az áramlás által befolyásolt intervallumon belül. A matematikai részleteket mellőzve, az említett szerzők által közölt megoldás a következő formában írható fel:

$$T(z) = T_0 + (T_M - T_0) \left[\frac{\exp\{Kz/M\} - 1}{\exp\{K\} - 1} \right]. \quad (4)$$

Az egyenlet a z mélységre érvényes T hőmérsékletet adja meg abban az esetben, ha ismerjük a vizsgált mélységintervallum z_0 tetőszintjében fennálló T_0 hőmérsékletet, az alsó z_M szint T_M hőmérsékletét és az áramló fluidum, valamint a porózus közeg jellemzőitől függő K konstans értékét. Az M -mel jelölt mennyiség a két mélysztint közötti különbséget ($z_M - z_0$) jelenti. Látható, hogy a modellezéshez használható összefüggés nemlineáris, és nem vezethető vissza lineáris esetre logaritmusképzéssel sem.

Esetünkben kétféleképpen vonható be a vizsgált terület jellemző hőmérséklet–mélység függvényének becslésebe. Mindkét esetben ugyanazok a bementi mélységre és egyensúlyi talphőmérsékletre vonatkozó adatsorok ($T_i = T(z_i)$, $i = 1, 2, \dots, N$), valamint megadjuk a z_0 , T_0 értékeket is. A $z_0 = 0$ m és $T_0 = 10$ °C értékek rögzítésével tulajdonképpen a lokális referenciaszinthez hozzárendeljük az évi középhőmérsékletet. Ezután kezelhetjük úgy a feladatot, hogy keressük az általunk megválasztott z_M mélységszint



10. ábra | A kétparaméteres optimalizálás során, a reziduumok L1 és L2 norma szerinti minimalizálásával kapott regressziós görbék

Figure 10 | Regression curves obtained by the minimization of L1 and L2 norms of the residuals when two unknown parameters were specified in the model

T_M hőmérsékletének és a K konstansnak az optimális értékeit, amelyekkel a modell a bemeneti adatokhoz legjobban illeszkedő görbét, azaz hőmérséklet–mélység függvényt adja. A másik esetben a z_M alsó mélységszinthez megadjuk az általunk feltételezett T_M hőmérsékletet is, és csak a K konstans értékére vonatkozóan kell az optimumkeresést elvégezni. Szerencsére az ismeretlen paramétereknek a feladat számára relevánsnak tekinthető tartományai könnyen behatárolhatók az apriori ismeretek alapján. A korábban már említett hőmérséklettérképek alapján a 2000 m-ben várható hőmérsékletnek a tartománya ezen a területen 90–100 °C, amely már nem jelent pozitív anomáliát, mivel az országos átlagot 100 °C-ra becsülik (Lenkey et al. 2021). A K konstans értéke negatív, ha alulról

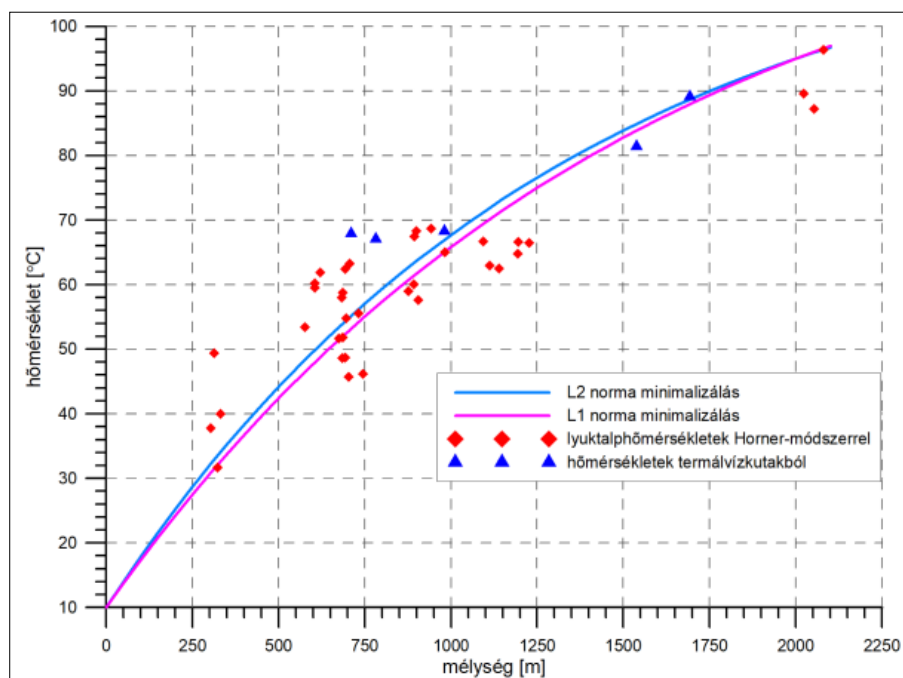
felfelé áramló fluidumról van szó, és ez az eset áll fenn a demjéni területre vonatkozóan. A $K = 0$ érték a fluidumáramlás nélküli konduktív hővezetést írja le. Minél kisebb értéket vesz fel K , annál nagyobb mértékű a fluidummal együtt áramló hő hatása a hőmérséklet–mélység függvényre. A különböző K értékekhez tartozó típusgörbék tanulmányozása alapján érthetővé válik, hogy például a $K = -20$ érték már nagyon jelentős eltérést okoz a görbe alakjában a $K = 0$ eset egyeneséhez képest (Bredehoeft, Papadopoulos 1965).

A kétparaméteres optimalizálás során alkalmazott keresési tartományok és a tartományokon belül alkalmazott felbontások a következők voltak: $80\text{ °C} \leq T_M \leq 120\text{ °C}$, $\Delta T_M = 0,1\text{ °C}$, $-3 \leq K \leq -1$, $\Delta K = 0,1$. A legkisebb négyze-

5. táblázat | A kétparaméteres optimalizálás során a reziduumok L1 és L2 norma szerinti minimalizálásával kapott optimális paraméterértékek és az illesztett görbék alapján különböző mélységszintekre becsült egyensúlyi hőmérsékletértékek

Table 5 | The optimal values of unknown parameters (rows 2 and 3) obtained by the minimization of L1 and L2 norms of the residuals (columns 2 and 3) when two unknown parameters were specified in the model, and estimated static temperatures of different depth levels calculated from the equations of fitted curves (rows 4 to 7)

	L1 norma szerinti illesztés	L2 norma szerinti illesztés
Optimális K	-2,1	-2,3
Optimális $T_m(z_m = 2100\text{ m})$ [°C]	87,1	86,3
$T(z = 500\text{ m})$ [°C]	44,6	45,8
$T(z = 1000\text{ m})$ [°C]	65,5	66,4
$T(z = 1500\text{ m})$ [°C]	78,3	78,4
$T(z = 2000\text{ m})$ [°C]	86,0	85,3



11. ábra | Az egyparaméteres optimalizálás során a reziduumok L1 és L2 norma szerinti minimalizálásával kapott regressziós görbék

Figure 11 | Regression curves obtained by the minimization of L1 and L2 norms of the residuals when a single unknown parameter was specified in the model

tek elve (a reziduumok L2 norma szerinti minimalizálása) szerint és az abszolút eltérések összegének minimalizálásával (a reziduumok L1 norma szerinti minimalizálása) kapott eredményeket a 10. ábra mutatja be.

A K és a T_m paraméterek optimális értékeit az 5. táblázat tartalmazza. A vizsgálati tartomány alsó szintjét $z_m = 2100$ m-ben rögzítettem, mivel a legmélyebb fúrás 2080,6 m-rel szerepel az adatrendszerben. A kapott nemlineáris modellekkel 500 m-enként növekvő mélységszintekre számított egyensúlyi hőmérsékletek is tanulmányozhatók a táblázat alsóbb soraiban. A két különböző görbeillesztési módszerrel kapott eredmények nagyon közel állnak egymáshoz. Ez mind a grafikonon megjelenített görbékre, mind a táblázatban szereplő adatokra igaz.

A számításokba bevont adatokat a piros rombusz szimbólum jelöli az ábrán. A kék háromszögek azoknak a fúrásoknak a talphőmérsékleti adatait mutatják, amelyeket a 2006 és 2017 közötti időszakban mélyítettek hévízkutatói céllal Demjén környékén. Az adatokat a Magyarország mélyfúrású kútjainak katasztere XXXII., XXXIII., XXXVII., XXXIX. és XL. kötetéből gyűjtöttem ki azzal a céllal, hogy a számítással kapott eredményeket ezekkel a független forrásból származó adatokkal is össze lehessen vetni. Az ábrán jól látható, hogy az adatok többsége az 250–1250 m-es tartományban helyezkedik el. A görbék az erősen szóródó pontthalmaz középső tartományán haladnak át. A szóródás okai között szerepelhet a mérési hiba, a Horner-módszer alkalmazásából származó hiba és a konvektív hőáram egyenetlen eloszlása a területen. Az utóbbi ok miatt egyes helyeken az „átlagoshoz” képest lényegesen nagyobb, ill. kisebb hőmérsékletek is előfordulhatnak.

Ha összehasonlítjuk a kapott modellek 500, 1000 és 2000 m-es szintekre becsült értékeit a korábban már említett hőmérsékleteloszlás-térképekből kiolvasható tartományokkal (Lenkey et al. 2021), akkor elmondható, hogy az 500 és 1000 m-es szintek esetében nincs ellentmondás. Nem ez a helyzet a 2000 m-es mélységre becsült hőmérsékletekkel. A térkép szerint a területre jellemző tartomány 90–100 °C-nak felel meg, amely nem számít nagy értéknek a hazai viszonyokat tekintve. Valószínű, hogy ebben a mélységben a felszín alatti víz felfelé áramlása már nincs jelen. Ha Magyarország pre-kainozoos földtani térképét tekintjük (MBFSZ térképi portál, 2017), abból megállapítható, hogy a vizsgált terület északnyugati sarka kiemelt helyzetben van, és itt a mezozoos mészkőaljzat teteje 500 m körüli mélységszinttel jellemezhető. Ezen a részen harmadrendű kainozoos tektonikai elem létezése is valószínűsíthető, amely magyarázhatja felszín alatti vízzel felfelé szállított hő inhomogén eloszlását. Déli és délkeleti irányban az aljzat mélyül, a terület nyugati részén tömörülő fúrásponthoz már 1000 m-hez közelít az aljzattérség. A terület délkeleti sarkában pedig az 1500 m-t is eléri. A karbonátos aljzatban pozitív hőmérsékleti anomália valószínűleg már nincs. A számított modellekkel 2000 m-es szintre becsült hőmérsékletértékek viszont túl alacsonyak, hiszen még a 90 °C-ot sem éri el. Ennek az az oka, hogy a lokális referenciaszinttől számított 2000 m-es mélységet elérő három fúrásból kettő esetében 90 °C alatti egyensúlyi talphőmérsékletet kaptam (87,2 és 89,6 °C), és ez gyanút ébreszt a reprezentativitásukukról. Hiába van jelen a harmadik fúrás magasabb talphőmérséklettel (96,4 °C) az adatrendszerben, a regressziós modell illesztését a két adat

6. táblázat | Az egyparaméteres optimalizálás során a reziduumok L1 és L2 norma szerinti minimalizálásával kapott optimális paraméter értékek és az illesztett görbék alapján különböző mélységszintekre becsült egyensúlyi hőmérsékletértékek

Table 6 | The optimal values of the unknown parameter (row 2) obtained by the minimization of L1 and L2 norms of the residuals (columns 2 and 3) when a single unknown parameter was specified in the model, and estimated static temperatures of different depth levels calculated from the equations of fitted curves (rows 3 to 6)

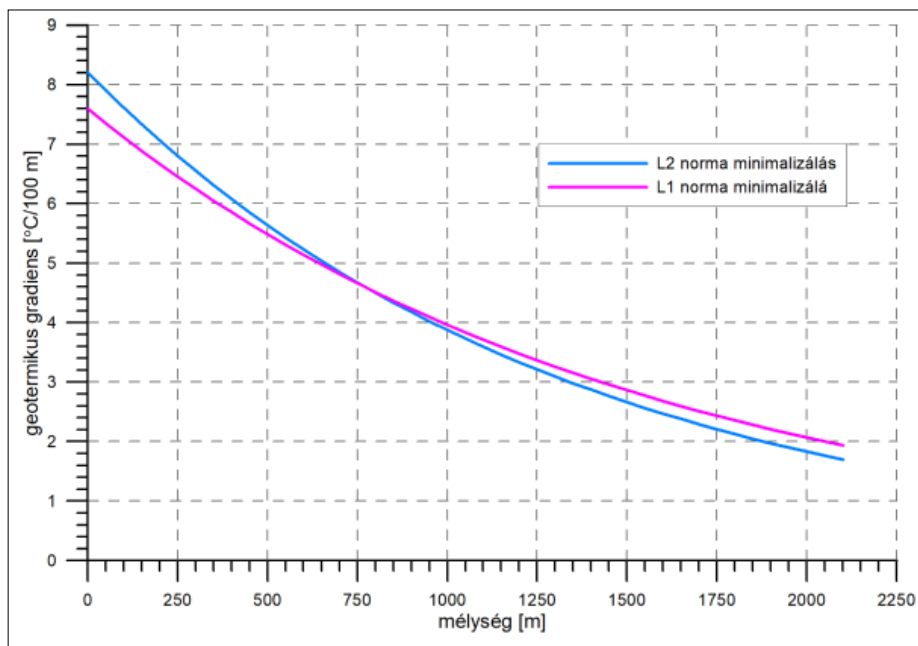
	L2 norma szerinti illesztés	L1 norma szerinti illesztés
Optimális K	-1,5	-1,3
$T(z = 500 \text{ m}) [^{\circ}\text{C}]$	44,2	42,4
$T(z = 1000 \text{ m}) [^{\circ}\text{C}]$	67,7	65,8
$T(z = 1500 \text{ m}) [^{\circ}\text{C}]$	83,9	82,8
$T(z = 2100 \text{ m}) [^{\circ}\text{C}]$	96,8	97,0

erősebben befolyásolja. Ez a nemkívánatos hatás abban is megmutatkozik, hogy az ellenőrzés érdekében bevont hévízkutak adatait megjelenítő kék háromszögekhez sem illeszkednek jól a görbék. Kijelenthető tehát, hogy a kevés számú adat miatt, főleg a nagyobb mélységek esetében a modellek alulbecsülik a területre valószínűsíthető hőmérséklet-eloszlást.

Javítást olyan módon érhetünk el, ha rögzítjük a $z_m = 2000$ m-es mélységre feltételezett T_m értéket, és csak a K paraméterre vonatkozóan hajtjuk végre az optimalizálást. A 2000 m-es mélységre becsült hőmérsékleteloszlás-térképpel összhangban álló $T_m = 95$ °C értéket alkalmaztam a vizsgált tartomány alsó határához közeli hőmérsékleteként. A reziduumok L1 és L2 normái minimalizálása szerint végzett modellillesztések eredményeit a 11. ábra jeleníti meg, amelyen azonnal észlelhető a javulás a nagyobb mélységekre becsült hőmérsékleti görbeszakaszok esetén.

A kétparaméteres optimalizálásnál tapasztaltakhoz képest kicsit nagyobb ugyan az eltérés az L1 és L2 normás illesztések eredményei között, de nem mondható jelentősnek a különbség. A 6. táblázatba foglalt adatok tanulmányozása során sem találunk jelentős eltérést az optimális K értékek és a különböző mélységszintekre becsült hőmérsékletek között. A legnagyobb eltérés 1000 m körüli mélységben jelentkezik, ahol a 2 °C-ot közelíti. Jobban illeszkednek a görbék a hévízkutak talphőmérsékleti adataihoz is, és ez megerősítést jelent az eredmények elfogadhatóságát illetően.

Mindkét görbének vannak előnyös és hátrányos tulajdonságai. Az L1 norma szerinti illesztéssel kapott görbe kissé közelebb áll az 1000 m-nél mélyebb fúrásokból származó hőmérsékletekhez. A másik görbe viszont az ennél sekélyebb mélységtartományban mutat jobb illeszkedést a hőmérsékleti adathalmazra.



12. ábra | Az egyparaméteres optimalizálással kapott hőmérsékletfüggvényekből származtatott geotermikusgradiens-függvények

Figure 12 | The curves of geothermal gradient functions derived from the temperature functions estimated by the single-parameter optimization

7. táblázat Az egyparaméteres optimalizálással kapott hőmérsékletfüggvényekből származtatott geotermikusgradiens-függvények értékei néhány mélységszinten

Table 7 The optimal values of the unknown parameter (row 2) obtained by the minimization of L1 and L2 norms of the residuals (columns 2 and 3) when a single unknown parameter was specified in the model, and estimated static temperatures of different depth levels calculated from the equations of fit. The values of geothermal gradient functions derived from the temperature functions estimated by the single-parameter optimization (rows 2 and 3) for different depth levels (row 1) fitted curves (rows 3 to 6)

Mélység [m]	0	250	500	750	1000	1250	1500	1750	2000
Geotermikus gradiens (L1 norma) [°C/100 m]	7,59	6,46	5,49	4,66	3,96	3,37	2,86	2,44	2,07
Geotermikus gradiens (L2 norma) [°C/100 m]	8,21	6,80	5,64	4,68	3,88	3,21	2,66	2,21	1,83

8. táblázat Sekélyebb és mélyebb mélységtartományokra becsült átlagos geotermikusgradiens-értékek

Table 8 Average geothermal gradient values estimated for shallower and deeper intervals (column 1). Country-wide average values (column 2), values calculated from the equation of curve fitted by the minimization of L1 norm of the residuals for the single-parameter optimization (column 3), values calculated from the equation of curve fitted by the minimization of L2 norm of the residuals for the single-parameter optimization (column 4)

	Geotermikus gradiens országos átlaga [°C/100 m]	Geotermikus gradiens hőmérsékletfüggvény alapján (L1 norma) [°C/100 m]	Geotermikus gradiens hőmérsékletfüggvény alapján (L2 norma) [°C/100 m]
500–1000 m	4	4,68	4,70
1000–2000 m	4	2,92	2,73

Ha a két eltérő célfüggvény alkalmazásával kapott hőmérsékletfüggvények közötti választást fontolgatjuk, akkor érdemes megvizsgálni a függvények mélység szerinti deriválásával számítható geotermikusgradiens-függvényeket. A (4) egyenlettel megadott matematikai modell esetében a deriválás művelete könnyen elvégezhető. A K konstans eltérő értéke miatt különböző gradiensfüggvények menete a 12. ábrán látható. Mindkét gradiens esetében elmondható, hogy nemlineáris csökkenés mutatkozik a mélységgel. A csökkenés természetes jelenség, hiszen nagyobb mélységben a kőzetek egyre tömörebbek és a hővezető képességük nő. A csökkenés mértékében viszont különbség jelentkezik. A becsült geotermikusgradiens-görbék a $z = 773.98 \text{ m} \cong 774 \text{ m}$ -ben keresztezik egymást, ahol az értékük $dT/dz|_{z=774 \text{ m}} = 4,59 \text{ °C/100 m}$. A két gradiensfüggvény néhány mélységszintre számított értékei szerepelnek a 7. táblázatban.

A nagyak tekinthető értékek a metszéspont mélysége feletti szakaszban jelentkeznek. A terület aljzatviszonyait figyelembe véve, ez tekinthető annak a törmelékeny üledékekkel kitöltött „átlagos” tartománynak, amelyben a felfelé áramló vízzel szállított hő pozitív hőmérsékleti anomáliát okoz. A metszéspont alatti tartományban már jelentkezik, és egyre nagyobb szerepet tölt be az aljzat hatása. A tömör mészkőben a konduktív hővezetés dominál, de a felszín alatti mélykarszt járatrendszerében a Bükk hegység nyitott mészkő felszínein keresztül a mélybe jutó csapadékvíz áramlik valószínűleg oldalirányban is. A leszálló és szétáramló víz hűtő hatása jelentkezik a nagyobb mélységekben, és ez valószínűleg mérsékli a felfelé irányuló konduktív hőáram hőmérséklet-növelő hatását. A területre becsült hőáramsűrűség egyébként az országos átlagot (90 mW/m^2)

alulról közelíti ($\sim 80 \text{ mW/m}^2$) az országos hőáramsűrűség-térkép alapján (Lenkey et al. 2021). Ezzel összhangban áll az, hogy a 2000 m-es mélységre becsült hőmérsékleteloszlás-térképen az országos átlagot (100 °C) szintén alulról közelíti a terület a $90\text{--}100 \text{ °C}$ -os tartománnyal.

A hőmérsékleteloszlás-térképek mélységszintjei közötti tartományokra becsült átlagos geotermikus gradiens értékei hasonlíthatók össze a 8. táblázatban. Az első oszlop országos átlagértékei a mélységszintek hőmérsékleti átlagai (40 °C , 60 °C és 100 °C) alapján adódnak (Lenkey et al. 2021). A második és harmadik oszlop értékeit az egyparaméteres optimalizálással kapott hőmérsékletfüggvények egyenleteivel lehet számítani.

Látható, hogy míg a sekélyebb tartományban az országos átlagot meghaladó gradiensértékeket lehet becsülni mindkét kiegyenlítési módszerrel, a mélyebb tartományra már az átlagtól kisebb értékeket kapunk. Ennek oka a sekélyebb tartomány hőtöbblete és a mélyebb tartomány hőhiánya az átlagos viszonyokhoz képest.

Visszatérve a két gradiensfüggvény-görbe minősítésére, a reziduumok L1 norma szerinti minimalizálásával kapott hőmérsékletfüggvényből származó eredmény előnyösebb tulajdonságokkal rendelkezik. Mérsékeltabb a gradiens változása a mélységgel, és a tanulmányozott intervallum határain is elfogadhatóbb értékeket vesz fel. Nem indul olyan nagy értékről ($< 8 \text{ °C/100}$), és nem csökken le annyira a 2000 m-es szintnél ($> 2 \text{ °C/100}$), mint a másik módszer alkalmazásával kapott eredmény. A becsült hőmérsékletfüggvényeket bemutató 11. ábrán megfigyelhető, hogy abban a középső tartományban, ahol a két görbe között az eltérés nagyobb, a reziduumok L1 norma szerinti minimalizálásával kapott eredmény görbéjének alakjára az adatok

szóródásának középső sávjától kieső pontok nincsenek olyan nagy hatással, mint a másik görbe esetében. Az L1 norma kiugró adatokkal szemben megnyilvánuló nagyobb rezisztenciájának köszönhetően a hőmérsékletfüggvény átlagos görbülete kisebb, és ennek megfelelően a gradiensfüggvény görbéje is enyhébb lecsengést mutat kisebb maximummal és nagyobb minimummal.

Összefoglalás

A fúróluktalp egyensúlyi talphőmérsékletének becsléséhez a lyuktalpon különböző időpontokban mért hőmérsékleti adatokra van szükség. Nagyon fontos lenne, hogy ne csak a mért hőmérséklet és az öblítés befejezésétől számított idő, hanem az öblítési idő hossza is szerepeljen a fúrási napló adatai között.

Az egyensúlyi talphőmérséklet meghatározásához gyakran alkalmazott Horner-módszer használatának egyik feltétele az öblítési idő ismerete. Az egyik demjéni fúrás esetében vizsgáltam, hogy a módszer mennyire érzékeny az öblítési idő hosszának változására. A széles tartományban változtatott öblítési idő nem eredményezett jelentős eltérést a becsült hőmérsékletértékekben. Ugyanakkor érdemes tisztában lenni a szakirodalomban tárgyalt korlátokkal is. A Horner-módszerrel kapott eredmény ellenőrzése érdekében egy másik módszert is alkalmaztam, melynek lényege abban áll, hogy a hőmérséklet stabilizálódását leíró matematikai modellt kell illeszteni a mért adatok rendszerére. Az öblítési idő hosszának ismeretére itt nincs szükség, de a fúróluktalp környezetét jellemző hőmérséklet-vezetési tényező értéket alkalmasan kell megválasztani az egyenletben. Fizikailag indokolt értéket alkalmazva, a Horner-módszerrel kapott eredményhez nagyon közeli értéket kaptam. További ellenőrzést jelentett egy a területen fúrt, hasonló mélységű hévízkút egyensúlyi talphőmérséklet-adata, amely mindkét becsült adathoz közel állt.

Ezt követően a 36 demjéni fúrás adatrendszerét dolgoztam fel. A különböző talpmélységű fúrások becsült egyensúlyi talphőmérsékleteit felhasználva a területre jellemző hőmérséklet–mélység függvényt meghatároztam. A legegyszerűbb lineáris modell alkalmatlannak bizonyult erre a célra. Ebből arra lehet következtetni, hogy a terület felszín alatti hőmérsékleti viszonyait nemcsak a konduktív, hanem konvektív hőáramlás is befolyásolja. Így olyan matematikai modellt alkalmaztam, amelyben a függőlegesen áramló fluidummal szállított hő hatása is figyelembe van véve. A modell két paraméterére vonatkozó optimalizálást a reziduumok L1 és L2 norma szerinti minimalizálásával egyaránt elvégeztem. A kapott hőmérséklet–mélység függvények konkávok, és ezt a görbék alakját jellemző tulajdonságot az alulról felfelé áramló fluidummal szállított hő hatása okozza. Az eredmények a vizsgált mélységtartomány alsó részében, 1500–2000 m között, a korábbi kutatások eredményeit közlő szakirodalomban ismertetett eredményekkel nincsenek összhangban. A túlságosan alacsony becsült hőmérsékleti értékek oka a mélyebb tartományba

eső kevés adat, és az elvárhatóhoz képest alacsony egyensúlyi talphőmérséklet-értékek.

A probléma megoldása érdekében a modell egyik paraméterét, amely a vizsgált tartomány alsó határa egyensúlyi hőmérsékletének felel meg, a szakirodalmi adatokkal összhangban lévő érték hozzárendelésével rögzítettem. Az optimalizálást ilyen módon egyparaméteresre redukálva végeztem el, a reziduumok L1 és L2 norma szerinti minimalizálásával egyaránt. A kapott eredmények sokkal jobb illeszkedést eredményeztek az ellenőrzésbe bevont, hévízkutakból származó egyensúlyi talphőmérsékletekhez. Az L1 normás illesztéssel kapott függvény előnyösebb volt abban nyilvánul meg, hogy a kiugró értékűnek minősülő adatok nem befolyásolják annyira a görbe alakját, mint a másik illesztési módszer esetében.

Megvizsgáltam a területre a becsült hőmérséklet–mélység függvények deriválásával számítható geotermikusgradiens-függvényeket. A két gradiensgörbe 774 m-ben metszi egymást, ahol az érték $4,59\text{ °C}/100\text{ m}$. E szint felett az országos átlagtól nagyobbak, lefelé viszont az átlagos alá csökkennek az értékek. Nagyjából ez lehet az a területre átlagos értelemben jellemző mélység, amely felett a konvektív hőáram pozitív hatása érvényesül. A szint alatt a mészkőaljzat hatása jelentkezik, amely a felszínről származó karsztvíznek köszönhetően az átlagos hőmérsékletviszonyokhoz képest valamelyest kisebb hőmérsékleteket és jelentősen kisebb hőmérsékletigradiens-értékeket okoz.

Az L1 norma szerinti minimalizálás rezisztenciájának előnye a geotermikusgradiens-görbe vonatkozásában is megjelenik. Megállapítottam, hogy a konvektív hőáramot is figyelembe vevő modell egyparaméteres optimalizálásával nyert hőmérséklet–mélység függvényei közül az L1 norma szerinti minimalizálással kapott változat javasolható a demjéni terület felszín alatti hőmérséklet eloszlásának közelítésére.

Köszönetnyilvánítás

A kutatómunka a Miskolci Egyetemen működő Alkalmazott Földtudományi Kutatóintézet GINOP-2.3.2-15-2016-00010 jelű „Földi energiaforrások hasznosításához kapcsolódó hatékonyságnövelő mérnöki eljárások fejlesztése” projektjének részeként – a Széchenyi 2020 Terv keretében – az Európai Unió támogatásával, az Európai Strukturális és Beruházási Alap társfinanszírozásával valósult meg.

A tanulmány szerzője

Vass Péter

Hivatkozások

- Boda E., Zilahi-Sebess L. (2013): A zavarmentes hőmérsékleti tér meghatározásának problémája. *Magyar Geofizika*, 54/1, 19–30.
- Bredhoeft J. D., Papadopoulos I. S. (1965): Rates of vertical groundwater movement estimated from the Earth's thermal profile. *Water Resource Research*, 1/2, 325–328. <https://doi.org/10.1029/wr001i002p00325>

- Dowdle W. L., Cobb W. M. (1975). Static formation temperature from well logs – An empirical method. *Journal of Petroleum Technology*, 27/11, 1326–1330. Paper Number: SPE-5036-PA, <https://doi.org/10.2118/5036-PA>
- Edwardson M. J., Girner H. M., Parkison H. R., Williams C. D., Matthews C. S. (1962): Calculation of formation temperature disturbances caused by mud circulation. *J. Pet. Technol.* 14/04, 416–426. Paper Number: SPE-124-PA, <https://doi.org/10.2118/124-PA>
- Fertl W. H., Chilingarian G. V., Yen, T. F. (1986): Determination of true static formation temperature from well logs. *Energy Sources*, 8/2–3, 277–288. DOI: 10.1080/00908318608946056
- Horner D. R. (1951): Pressure buildup in wells. In: *Proceedings Third World Petroleum Congress, The Hague, Section II, Preprint 7.*
- Köves P., Párniczky G. (1975): *Általános statisztika, 2. jav. kiadás, Közgazdasági és Jogi Könyvkiadó, Budapest*, p. 583, p. 637.
- Leblanc Y., Pascoe L. J., Jones F. W. (1981): The temperature stabilization of a borehole. *Geophysics*, 46/9, 1301–1303. <https://doi.org/10.1190/1.1441268>
- Leblanc Y., Lam H. L., Pascoe L. J., Jones F. W. (1982): A comparison of two methods of estimating static formation temperature from well logs. *Geophysical Prospecting*, 30/3, 348–357. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2478.1982.tb01311.x>
- Lenkey L., Mihályka J., Paróczy P. (2021): Review of geothermal conditions of Hungary. *Földtani Közlöny*, 151/1, 65–78., Budapest, 2021, DOI: 10.23928/foldt.kozl.2021.151.1.65
- MBFSZ térképi portál (2017): Magyarország pre-kainozoos földtani térképe 1:500 000, <https://map.mbfisz.gov.hu/preterc500/>
- Middleton M. F. (1979): A model for bottom-hole temperature stabilization. *Geophysics*, 44/8, 1458–1462. <https://doi.org/10.1190/1.1441018>
- Serra O., Serra L. (2004): *Well Logging Data Acquisition and Application. Editions Serralog, 25 rue des Chaumières, 14370 Méry Corbon, France*, p. 558.
- Timko D. J., Fertl W. H. (1972): *How Downhole Temperatures, Pressures Affect Drilling. World Oil.*
- Zaki B. (1994): *Theory, Measurement, and Interpretation of Well Logs. Society of Petroleum Engineers, Inc., USA*, p. 76.

EÖTVÖS 175

„Eötvös 175”: 2023. szeptember

Eötvös Loránd születésének (1848. július 27.) 175. évfordulójához kötődő ünnepi események sora már tavasszal elkezdődött. Sokoldalú életművének tiszteletére a születésnap környékén zömmel nyári jellegű rendezvények voltak: „Eötvös 175” kiállítás Berlinben, turistaprogram Dobogókőn, kerékpártúrák a Dolomitokba. A július 27-i budapesti Eötvös-emléktúra utolsó állomásán, a krisztinavárosi Havas Boldogasszony Plébániatemplomban (Eötvös Loránd megkeresztelésének helyszínén) emléktáblát helyeztünk el.

Az első szeptemberi rendezvény a budapesti Eötvös József Collegium tanévnyitóján tartott „Eötvös 175” emlékülés volt, 4-én. Szeptember 9–10-én a Téry Ödön Baráti Társaság Egyesület 110 km-es teljesítménytúrárt szervezett Eötvös emlékére. Szeptember 18–20-án pedig a Wigner Fizikai Kutatóközpont – „Wigner 121” nemzetközi konferenciájukhoz kötődően – gravitációs szekciót tart.

Az Eötvös 175 tudományos csúcspontja szeptember 20-án, szerdán érkezik el, amikor 10 és 13 óra között egy – Eötvösök által szervezett nemzetközi konferencia (Internationale Erdmessung, 1906. szeptember 20–28.) nyitónapjának évfordulóján – tudományos emlékülésre kerül sor a Magyar Tudományos Akadémia Nagytermében. Az MKH Wigner Fizikai Kutatóközpont, a BME, a Miskolci Egyetem, a Szabályozott Tevékenységek Felügyeleti Hatósága, az MKH Földfizikai és Űrtudományi Kutatóintézet és az ELTE kutatói számolnak be mindarról, amit Eötvös Loránd nyomdokain haladva elérték.

Az előadóülést Freund Tamás, az MTA elnöke nyitja meg. A teljes program követhető lesz az MTA youtube csatornáján. Az elnök külön köszönti az aradi Csiky Gergely Főgimnázium diákjait, abból az alkalomból, hogy ebben az iskolában áll az 1906-os konferencia terepi, aradi-ménési tanulmányútjának emléktáblája. Mint ismeretes, a korabeli résztvevők el voltak ragadtatva az Eötvös-inga bámulatos képességétől. Az aradi emléktáblát az Eötvös Loránd Fizikai Társulat délelőtt megkoszorúzza, majd délután diákoknak, este felnőtteknek tartanak ismeretterjesztő előadásokat. Ugyanezen nap (szeptember 20-án) a BEAC Budapesten 17 óra 5 perckor indítja el XLIV. „5vös 5 km” futóversenyét és jótékonyági sétáját.

Az Eötvös 175 keretében tartandó ünnepélyes koszorúzásra szeptember 28-án 13:30-kor kerül sor a Gesztenyés kerti Eötvös Loránd-szobornál, az Eötvös Loránd Geofizikai Alapítvány és a Budapest XII. Hegyvidék Önkormányzat szervezésében. Ezt követően pedig (15 és 17 óra között) a XII. kerületi Hegyvidéki Kulturális Szalonban (Törpe u. 2.) Eötvös 175 kulturális ünnepség lesz.

Szeptember végén van a jelentkezési határideje annak a középiskolai vetélkedőnek (III. Baksa Csaba Kárpát-méencei Földrajz és Földtudományi verseny, <https://www.focik.hu/>), amelynek egyik feladata kifejezetten Eötvös Lorándhoz kötődik.

Hírek szerint a Fővárosi Szabó Ervin Könyvtár által tervezett „Budapest 150 sztereofénykép-kiállításon többek között Eötvös Loránd néhány sztereofényképét is bemutatják.

Az őszi félév során több iskolában szerveznek Eötvös 175 rendezvényt. Október 4-én például Eötvös 175 és Süss 175 napot a kolozsvári Apáczai Csere János Elméleti Líceumban. A hasonló iskolai programokhoz a következő segítségeket ajánljuk:

- *dokumentumokat* a honlapunkról, mindenekelőtt a mind- eddig összegyűjtött videofelvételeket és filmeket. (A Via Eötvös alkotója, Buda János külön is ajánlja filmjét az érdeklődők figyelmébe);
- *posztereket* a) Eötvös 175 posztert, ami négy nyelven is letölthető honlapunkról (eotvos175.hu, Eötvös 175 arcu- lat); b) a pestszentlőrinci Tomory Lajos Múzeum és az Eötvös Loránd Geofizikai Alapítvány kérésre Eötvös Loránd életművét bemutató kinyomtatott posztereket bocsát rendelkezésre;
- *kiállításokat*, mindenekelőtt az ELTE Egyetemi Könyvtár és Levéltárban található Eötvös-kiállítást (<https://eotvoskiallitas.elte.hu/>). Nagy élményt nyújt az Eötvös Loránd Emlékgyűjtemény virtuális megtekintése (http://files.elearning.sztaki.hu/Escape3D/Eotvos_kiallitas/index_2D_hu.html). Ajánljuk még többek között az Országos Pedagógiai Könyvtár és Múzeum XIX. századi fizikai taneszköz-kiállítását is;
- *előadókat*: Érdemes tudni, hogy az MTA ún. Alumni programjában résztvevő iskolák és előadók számára (akiktől elvárás, hogy MTA köztestületi tagok legyenek, és jelentkezzenek be az MTA Alumniba) költségtérítést biztosít. (MTA Alumni jelentkezés: <https://mta.hu/alumni/koltsegteritesi-lehetoseg-a-kozepiskolai-mta-alumni-programban-reszt-vevo-iskolaknak-111984> és <https://mta.hu/alumni/koztestuleti-tagok-jelentkezeset-varjuk-a-kozepiskolai-mta-alumni-programba-111975>).

További információ: info175@eotvos100.hu

Eötvös 100 és Eötvös 175 egyesített honlap: eotvos100.hu, eotvos175.hu

„Eötvös 175” üdvözlőlap: https://media.eotvos100.hu/eotvos175/arcukat/Greeting_card.pdf

2023. szeptember 13.

Szarka László Csaba, Sólyom Jenő, Pályi András

Az Eötvös 175 alkalmából a soproni Földfizikai és Űrtudományi Kutatóintézet Berlinben, egy tudományos világkonferencián (IUGG General Assembly) „Eötvös 175” kiállítást szervezett. Az erről szóló beszámoló egyelőre itt olvasható: <https://epss.hu/a-berlinben-megrendezett->

28th-general-assembly-of-iugg-n-bemutatott-eotvos175-kiallitas/

Számos képet találhatnak itt: https://drive.google.com/drive/folders/1mesIezBH6JhRblzd-Gr4ny7u1hX_6kw1

Szarka László

A Magyar Turista Egyesület megemlékezése báró Eötvös Lorándról a Menedékházban, Dobogókőn, 2023 július 29-én

A megemlékezés programja a következő volt:

Délelőtti emléktúrák indultak Dobogókőre, majd a menedékházban *Kis Domonkos Dániel* méltatta Eötvösnek a hazai túrizmus fellendítésében játszott szerepét és *Schön-*

viszky László beszélt Eötvöséről, mint geofizikusról. Az előadások után bemutatták báró Eötvös Loránd jégcsákányát, amelyet a Dolomitok sziklás csúcsainak meghódításakor használt.

Szerkesztőség

Aradon is megemlékeznek báró Eötvös Loránd születésének 175. évfordulójáról

A Csiky Gergely Főgimnázium a budapesti központi ünnepekkel egy időben, 2023. szeptember 20-án tartja megemlékezését. Megkoszorúzzák Eötvös Loránd emléktábláját a diákok és pedagógusok, majd a koszorúzást előadások követik Eötvös Loránd életéről és munkásságáról, illetve a gravitációs hullámokról.

Az előadások szorosan kapcsolódnak az MTA székházában tartott központi ünnepséghez, mégpedig úgy,

hogy az aradi koszorúzás filmfelvételét megtekintik a budapesti rendezvényen, *Freund Tamás*, az MTA elnöke beszédének filmfelvételét pedig az aradi rendezvények elején vetítik le.

Az aradi program: https://www.csikygergelyarad.ro/wp-content/uploads/temp/E%C3%B6tv%C3%B6s_175_Csiky_program.pdf

Szerkesztőség

Agocs-ösztöndíj, 2023

A díjat alapító dr. William B. Agocs professzor szándéka szerint az Eötvös Loránd Tudományegyetem geofizika szakán megvédett, kiemelkedő színvonalú MSc-, illetve PhD-dolgozatot lehet jutalmazni. Az Agocs-díj kuratóriuma, amely a korábbi díjazottakból áll, titkos szavazással két MSc-dolgozatot talált jutalmazásra érdemesnek 2022-ben.

A díjazott MSc-dolgozatok:

Borsos Lilla Emőke: Sekély vulkánitok lehatárolása 2D szeizmikus és fúrési adatok segítségével a Bodrogló területén. Témavezető: *Szabó Tivadar*, SZTFH.

Szebenyi Renáta Mónika: Magnetotellurikus adatok feldolgozása a Dunántúlon, egy mintaszelvény alapján. Témavezető: *dr. Kiss János PhD*, SZTFH.

A díjakat *dr. Borhy László* akadémikus, az ELTE rektora nyújtotta át a díjazottoknak ünnepélyes körülmények között a rektori tanácssteremben, 2023. szeptember 14-én.

Galsa Attila



Az Agocs-ösztöndíj átadása. (balról: *Kis Károly* az Agocs-Kuratórium elnöke, *Szebenyi Renáta Mónika* díjazott, *Borhy László* akadémikus, az ELTE rektora, *Borsos Lilla Emőke* díjazott, *Timár Gábor*, a Geofizikai és Űrtudományi Tanszék tanszékvezetője és *Sziklai Péter*, az ELTE rektorhelyettese)



Borsos Lilla Emőke és *Szebenyi Renáta Mónika* díjazottak az Eötvös Loránd-szobor előtt

Szekció tisztelgett Szabó Csaba munkássága előtt a Goldschmidt Konferencián

2023. július 9–14-én, immár 33. alkalommal került sor a *European Association of Geochemistry* és a *Geochemical Society* által szervezett *Goldschmidt* nemzetközi konferenciára. A geokémia szakterületének legrangosabb, több ezer résztvevős találkozására idén a franciaországi Lyonban került sor. Hazánkat több egyetem és kutatóintézet hallgatói, illetve munkatársai nagy számban képviselték, többen közülük kiemelt előadó, meghívott előadó vagy szekcióvezetői szerepet töltek be.

A konferencián e szerzők számára legmeghatározóbb pillanat egy olyan tudományos szekció lebonyolítása volt, amely az évtizedek óta az ELTE-n oktató és kutató – jelenleg a Földfizikai és Űrtudományi Kutatóintézet munkatársa – *Szabó Csaba* tudományos munkássága előtt tisztelgett. A 17 előadást és 15 poszterprezentációt felvonultató szekció az alábbi nevet viselte: „Geochemical and geodynamical processes of the lithosphere based on fluid, silicate, carbonate, and sulfide melt inclusions of the upper mantle and crust (Session in honor of Dr. Csaba Szabó)”. E különleges szekció kiemelt előadójaként *Robert Bodnar* (Virginia Tech, USA) – a fluidum- és olvadékszárványok elismert szakértője, egyben Szabó Csaba

egykori amerikai mentora – fő tudományos eredményei, sikerei és együttműködései alapján méltatta Szabó Csaba példaértékű szakmai és pedagógiai kiválóságát, melyet az általa nagy számban kinevelt, hazánkban és külföldön dolgozó kutató több generációja is fémjelez. Meghívott előadók voltak továbbá *Bali Enikő* (University of Iceland, Izland), *Costanza Bonadiman* (Università degli Studi di Ferrara, Olaszország) és *Gregory M. Yaxley* (Australian National University, Ausztrália) is.

Szabó Csaba oktatási tevékenysége évtizedek óta ablakot nyit a geofizikus hallgatóknak a geológia világára. A kutatások terén Szabó Csaba szintén sokat tett a geofizika és geológia összefogásáért a földtani folyamatok jobb megértése érdekében. A Magyarhoni Földtani Társulattal közösen szervezett Ifjú Szakemberek Ankétjának Szabó Csaba is aktív szervezője volt, hozzájárulva az esemény jelenlegi arculatának kialakításához, továbbá ma is lelkes támogatója.

Ez a szekció megrendezése nagy elismerést jelentett Szabó Csabának és az ő révén a hazai földtudományoknak.

Patkó Levente, Spránitz Tamás, Berkesi Márta, Kovács István János, Gelencsér Orsolya, Guzmics Tibor

Új, mágnesesen árnyékolt űrkutatási laboratóriumot adtak át Fertőbozon

Szarka László kollégánk hívta fel figyelmünket a következő hírre, amely a Sopron Médiaiban jelent meg:

„Hazánkban eddig megvalósíthatatlan geofizikai, űrkutatási, közzetani, biológiai és orvostudományi kutatások és alkalmazások elvégzésére nyílik lehetőség annak az új, mágnesesen árnyékolt laboratóriumnak a megnyitásával, amelyet Fertőbozon adtak át pénteken. A több mint 400 millió forintos kormányzati támogatásból megvalósuló projekt eredményeként egy világszínvonalú kutatási infrastruktúra nyílt meg a magyar kutatók számára.

A laboratóriumot a Magyar Kutatási Hálózat két kutatóhelyének, a Földfizikai és Űrtudományi Kutatóintézetnek

és a Wigner Fizikai Kutatóközpontnak a konzorciuma hozta létre azzal az elsődleges céllal, hogy ott geofizikai méréseket végezhesse, szimulálják az űrbéli mágneses körülményeket, űreszközök mágneses tisztaságát vizsgálhassák, illetve űrkutatási műszereket fejlesszenek. A fenti elsődleges célok túl a laboratórium nyitott minden olyan tudományos és technológiai fejlesztés számára, amely alacsony terű, mágnesesen tiszta környezetet igényel.”

Bővebben, képanyaggal is kiegészítve a következő link alatt található a hír a világhálón: „Világszínvonalú űrkutatási infrastruktúra létesült Fertőbozon” – SopronMédia (sopronmedia.hu)

Mészáros Ferenc Fülöp

1941 – 2023

Mészáros Ferenc 1941-ben Kárpátalján, Bustyaházán született egy tanár családban. 1959-ben a mátyásföldi Corvin Mátyás Gimnáziumban érettségizett, majd érettségi után az Eötvös Loránd Tudományegyetem Természettudományi Karán (ELTE TTK) fizikusnak jelentkezett. Jó középiskolai eredményeinek és a felvételi vizsgán elért magas pontszámának köszönhetően még ugyanabban az évben fel is vették geofizikus szakra.

Öt évvel később, 1964-ben ezen a szakon heten kaptunk diplomát. Heten alkottunk 1959-től 1964-ig egy tankört, a fizikusok sokkal nagyobb létszámú tankörei között. Ennek a kis tankörnek volt vezetője Mészáros Feri, kedves, mindnyájuk által szeretett, örökké vidám, mindig mosolygó barátunk és évfolyamtársunk. Tanulmányi eredményei jók voltak, és nem emlékszem egyetlen esetre sem, amikor valakivel komolyabb konfliktusba került volna. Végzésünk után aztán nagy tudású évfolyamtársunk, Meskó Attila kivételével, aki a Tanszéken maradt, mi többiek mind a Magyar Állami Eötvös Loránd Geofizikai Intézetben (ELGI) kaptunk munkát, itt azonban különböző osztályokra kerülve elváltak útjaink. Feri közülünk egyedül a Mélyfúrás-geofizikai Főosztály dolgozója lett, ahol aztán a következő negyven évben egészen 2005-ben bekövetkezett nyugdíja-

zásáig meg is maradt. Itt töltött idejéről nagyon keveset tudok, pedig az Intézet úgy működött, mint egy nagy család, és ezen belül a Mészárosok még egy külön kis családot is alkottak, mert Ferin kívül még három testvére, valamint egy sógora és egy sogornője is az ELGI-ben dolgozott.

Ferivel ismét egymásra tulajdonképpen már csak nyugdíjazásunk után találunk, amikor Albu Pista kollégánk elkezdte éves rendszerességgel az évfolyamtalálkozókat szervezni. Az utolsó években ezeken a találkozókön, illetve a járvány években az ezeket helyettesítő telefonátalkatások során tudtam meg, hogy Feri súlyos betegséggel küzd és csak most, hogy itthagyt bennünket döbbsentem rá, hogy mennyire kevésbé ismertem az életét.

Kedves Feri, nagyon sajnálom, hogy annyira lekötött a saját életem, hogy nem találtam több időt, több alkalmat arra, hogy kollégáimra, barátaimra kicsit jobban odafigyeljek. Most szomorúan búcsúzom tőled a többiek, Albu Pista, Czifra Feri, Simon Bandó és Verő Laci nevében is. Tudom, hogy te hívó katolikus keresztény voltál, hiszem, hogy most hazataláltál. Békesség kísérjen utadon!

Bodoky Tamás



Mészáros Ferenc Fülöp
1941 – 2022



Szomorúan veszem tudomásul, hogy eltávozott az a geofizikus barátom, akit a legrégebben ismertem az Eötvös Loránd Geofizikai Intézetben. Igen, Mészáros Feri 2023. július 31-én eltávozott. Ma szept. 1-jén volt a temetése.

Ferit 1968 őszén ismertem meg az ELTE IV. éves hallgatójaként, amikor Sebestyén Karcsi bácsi (akkor az ELGI Mélyfúrási és Elektromos Főosztály vezetőjeként) Őt bízta meg a mélyfúrási téma gyakorlati óráinak vezetésével – mindnyájan jelest kaptunk.

Később, 1970-től dolgozva az ELGI-ben Ferivel szinte naponta találkoztunk. A munkában tanácsaival sok témában segített és mindig segítőkészen reagált, ha hozzá fordultunk. Itt most lehetetlen a több évtizedes ELGI-s

együttlét eseményeit felidézni. Feri kedves, szerény, visszafogott, segítő, igazságszerető személyisége közismert volt.

Persze nemcsak munkaidőben az ELGI-ben, hanem azon kívül, családiról is összebarátkoztunk. Sokszor sok helyen (pl. Solti Gábornál, a Csülökben, nálunk Zebe-gényben, vagy az Ő kis kismarosi telkén stb.), különböző eseményeknél voltunk együtt. Ezekről rengeteg fotó gyűlt össze, melyekből az utóbbi – már nyugdíjasként töltött – 15 évből egyet mellékelek.

Feri kedves emlékét megőrizzük!

Tóth Csaba



25 éve, 1998. szeptember 22-én nyílt meg a báró Eötvös Loránd Emlékiállítás



Kutalikné Kardos Zsuzsanna, Budapest XIV. kerület polgármestere és dr. Bodoky Tamás, a Geofizikai Intézet igazgatója megnyitják az emlékiállítást

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

