

# MagnetoTellurikus Országos Alapszelvények – a Dunántúli MTOA-02 szelvény komplex feldolgozása

KISS J.<sup>®</sup>, SZEZENYI R., LUKÁCS T.

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

<sup>®</sup>E-mail: janos.kiss@sztfh.hu

2023-ban kezdtük el a magnetotellurikus alapszelvényekkel kapcsolatos cikksorozatot (Kiss, Szebenyi 2023). Az első szelvényünk a CEL07 litoszférakutató szelvény nyomvonalában mért magnetotellurikus mérési adatokat mutatta be. Mivel ez a szelvény az osztrák országhatártól a horvát országhatárig futott, így MTOA-01 (MagnetoTellurikus Országos Alapszelvény, No1) névre kereszteltük. A névből adódik, hogy a programot folytatni akarjuk nyugatról kelet felé haladva, összedolgozva a korábban különböző célból mért, de eddig külön életet élő magnetotellurikus szondázásokat és szelvényeket. Jelen tanulmány az MTOA-02 szelvény komplex adatait, ezek feldolgozását, az archív KA-3, Som-101, SB-1 MT szelvények összedolgozását mutatja be.

## Kiss, J., Szebenyi, R., Lukács, T.: Magnetotelluric National Basic Sections – complex data processing of the Transdanubian MTOA-02 section

In 2023, we started a series of articles in Hungarian Geophysics on magnetotelluric baseline sections (Kiss, Szebenyi 2023). Our first section presented magnetotelluric measurements taken in the track of the CEL07 lithosphere survey profile. Since this section ran from the Austrian border to the Croatian border, it was named MTOA-01 (MagnetoTelluric National Baseline Section No1). The name implies that we want to continue the programme from west to east, combining magnetotelluric soundings and sections previously measured for different purposes but living separate lives so far. This paper presents the processing of the complex data from the MTOA-02 section, based on archival KA-3, Som-101, SB-1 MT sections.

*Beérkezett:* 2024. november 24.; *elfogadva:* 2025. február 24.

### Az MTOA-02 alapszelvény

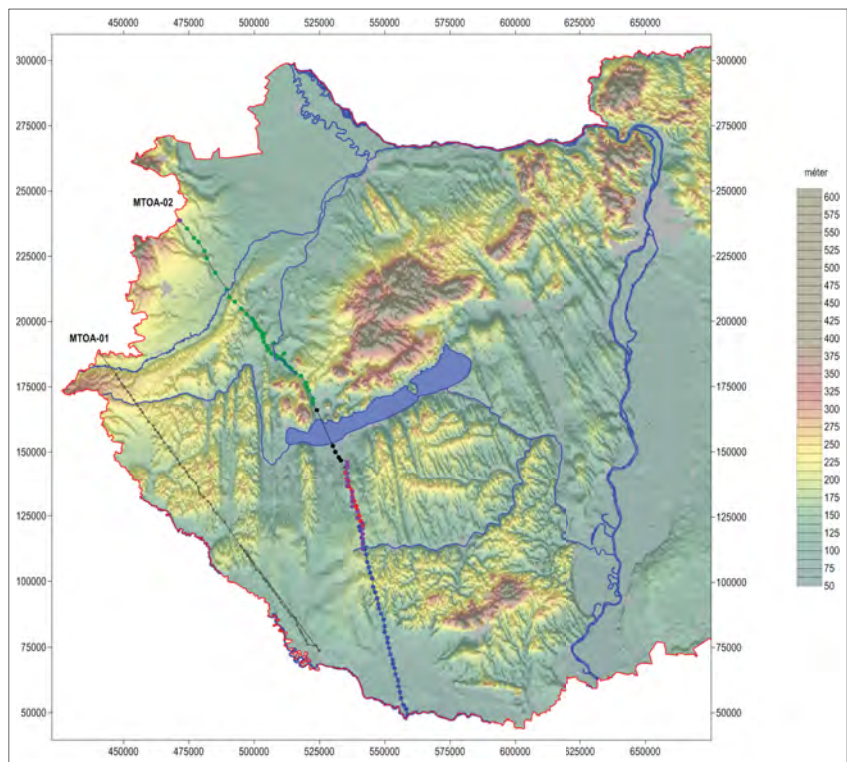
Ez a szelvény a kislépföldi földtani kutatás KA-3 szelvénye (ELGI 1990), a Nagyatád (MOL 1985) hálózatos és Somogyásmon 101-es szelvény (MOL 2021) CH-kutatáshoz kapcsolódó magnetotellurikus – MT, CSAMT<sup>1)</sup> – mérései, valamint a Dél-Dunántúl SB-1 szelvény (ELGI, 1992) magnetotellurikus szondázásaiból és néhány új, 2023. évi mérési adataiból áll össze, azaz 5 mérési kampány MT-adatait jeleníti meg egyszerre.

Van egy ~15 km-es hiányzó rész (Szigliget és Fonyód között) a Balaton miatt (1. ábra). A különböző idejű MT szelvények, az összevonás után (a balatoni kisebb irányváltástól eltekintve) egy majdnem egyenes, folyamatos nyomvonalat eredményeznek az országhatárok között, ezért kapta a szelvény az MTOA-02 nevet (1. ábra). Ez a

tevékenység persze az archív magnetotellurikus adatok összegyűjtését, rendezését és egységes kezelését – esetenként adatformátumok transzformációját – is igényli.

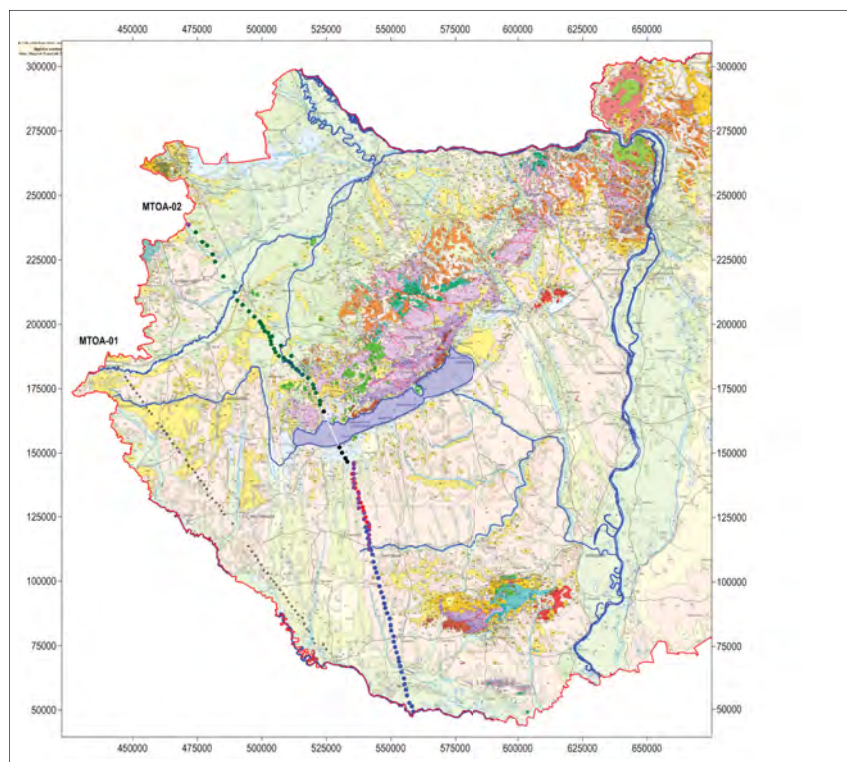
Az egyszerűség kedvéért az enyhén görbülő nyomvonalat kiegyenesítettük és az eredményeket úgy mutatunk be, hogy minden egyes pontot és adatot a kezdőponttól mért távolság alapján jelenítettünk meg úgy, mintha a kezdő- és végpont egy egyenessel lenne összekötve.

2023-ban 4 szondázást végeztünk a Balaton D-i részén a szelvény nyomvonalában, így néhány egyedi tervezett mérési pont híján teljes mérési szelvényünk van. Korábban szakdolgozatban (Szebenyi 2023), publikációban (Szebenyi et al. 2024) és előadásban (Szebenyi, Kiss 2024) megjelent anyag nem tartalmazhatta a 2023. évi mérési pontok adatait és a szelvény mentén végzett erőter-geofizikai feldolgozások eredményeit, amelyeket most beépítettünk.



1. ábra Az MTOA-01 és MTOA-02 szelvények magnetotellurikus szondázási pontjai a domborzati térképen (MT-mérések: KA-3 – ELGI, 1990, Somogyásmon 101 – MOL 2021, Nagyatád – MOL 1985, SB-1 – ELGI, 1992, továbbá kiegészítő mérések SZTFH 2023; a földtani térkép jelmagyarázata: <https://map.hugeo.hu/fdt500/>)

Figure 1 Magnetotelluric sounding points of sections MTOA-01 and MTOA-02 on the topographic map



2. ábra Az MTOA-01 és MTOA-02 szelvények nyomvonalai a felszíni földtani térképen (MT mérések: KA-3 – ELGI, 1990, Somogyásmon 101 – MOL 2021, Nagyatád – MOL 1985, SB-1 – ELGI, 1992, továbbá kiegészítő mérések SZTFH 2023; a földtani térkép jelmagyarázata: <https://map.hugeo.hu/fdt500/>)

Figure 2 Traces of the MTOA sections on the surface geological map

A szelvény kisalföldi és D-dunántúli részei RMTS-2<sup>2)</sup> (kék és zöld szimbólumok), a somogyisalmi pontok ADU-7<sup>3)</sup> (piros szimbólumok), a nagyatádi területi mérések PHOENIX<sup>4)</sup> műszerrel (OKGT, lila szimbólumok) lettek lemérve.

A szelvény nyomvonala azért érdekes, mert az MTOA-01 szelvény csak az ÉÉNY elején (Alpokalja) haladt felszínközeli kristályos kőzetek közelében, máshol fiatal, vastag kainozoos medenceüledékeken történt a mérés. Az MTOA-02 szelvény átmegy a Dunántúli-Középhegységen, azon belül a Balatonfelvidéken, így megjelennek a mezozoos (lila), esetleg permi (barna) képződmények és a felszínen jelen vannak a bazaltvulkanizmus tanúhegyei (2. *ábra*, zöld poligonok). Az egyik végtelen nagy fajlagos ellenállásával, a másik mágnesezettségével fogja módosítani, esetenként torzítani a mérések eredményét.

Az archív szelvényeket külön-külön, belső kutatási jelentésekben vagy szerződéses munkák során már publikáltuk, de a mérések csak így összedolgozva adnak egységes, átfogó képet a Dunántúl geoelektromos paraméterek alapján beazonosítható kéreg felépítéséről, nagyszerkezeti egységekről és az azokat elválasztó tektonikai zónákról.

### MT mérési adatok, mélységmetszetek

A mért szondázási görbék (3.–5. *ábra*) megjelenítése a szondázási pont helyéhez mint fixponthoz viszonyítva történtek. Egységesen megadtunk egy szorzótényezőt, amely megmutatja, hogy egységnyi távolsághoz mekkora fajlagosellenállás-változás (logaritmus értéként) tartozik – azaz mennyire húzzuk szét az ellenállás tengelyt –, majd megadtuk szintén egységesen a szondázás tengelyének fajlagosellenállás-értékét – azaz mennyire (mekkora távolsággal) toljuk el a kirajzolás során, ami természetesen függ a szorzótényező értékétől is. A munka közben az optimális

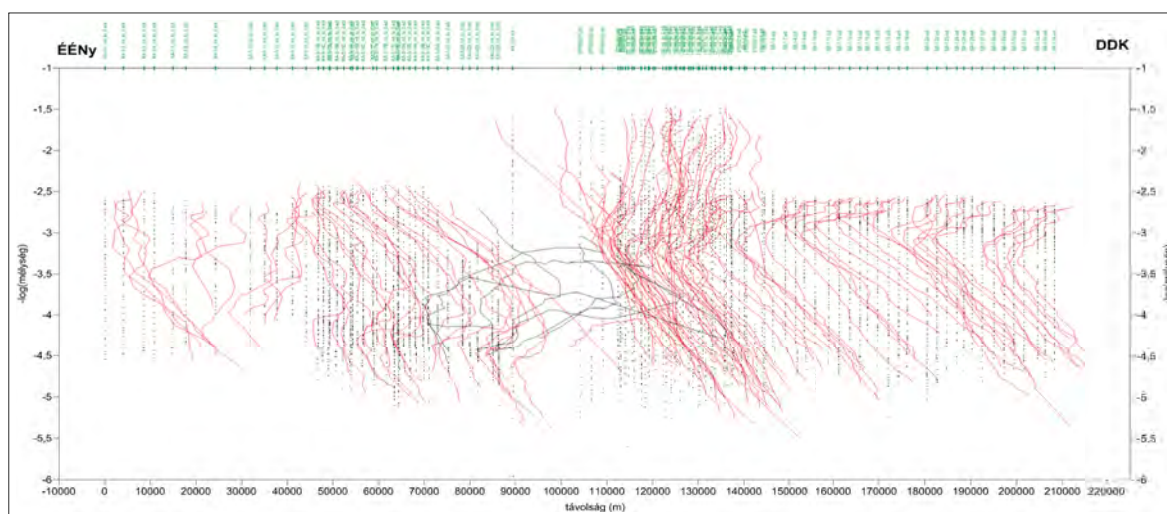
megjelenítéshez folyamatosan ellenőrizni kellett a görbék helyzetét a szondázási pontok függőleges tengelyéhez képest, mivel minden görbét egységes skála és tengelyérték mellett jelenítünk meg!

A 3.–5. *ábra* görbéi alapján látszik, hogy a szelvény végén (DDK-en), a szondázási pontok (felszínen jelölve) és a görbék helyzete összhangban van (a görbék középvonala és a szondázás neve ugyanoda esik). Ezzel szemben a szelvény elején (ÉÉNY-on) az ellenállásértékek nagysága miatt a görbék kicsit elcsúsznak a mérési ponttól (azaz annak tengelyétől a fentebb leírt egységes megjelenítés miatt). A szelvény közepén a szondázási görbék szétnyílnak, megváltozik a mélységi menetük, aminek földtani okai lehetnek.

A mérési görbék összezsúfolódása részben annak köszönhető, hogy felszínközeli megjelennek a medencealjaképződmények, illetve a pannon bazaltok felszíni jelenléte miatt nagyon megnőhet a látszólagos fajlagos ellenállás értéke (pozitív túllövés), majd a mélyebb részekben, szintén a mágneses határfelületek miatt átbillennek az értékek és a görbék (negatív túllövés) – lásd a görbék alja a szelvény 45–90 vkm<sup>5)</sup> szakaszán. A jelenség mindkét irányban, polarizációban (3., 4. *ábra*) megjelenik – a görbék egy része vízszintesen elfekszik (néhány közülük fekete színnel kiemelve).

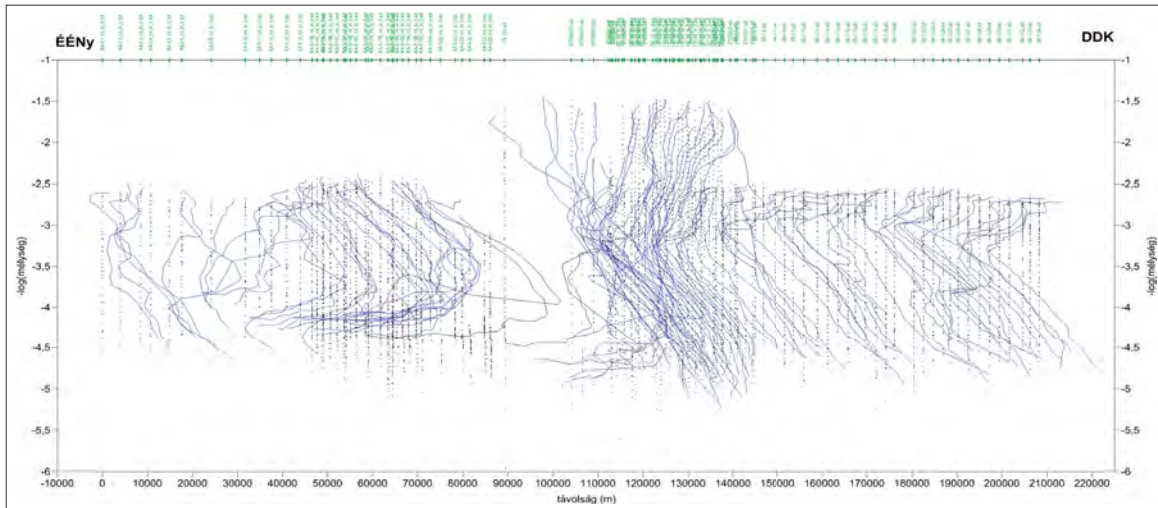
A görbék lefutásának különbsége anizotrópiamaximumok formájában is megjelenik (6. *ábra*). Az anizotrópiamaximum értéke AniMax > 5 esetében nemcsak egy egyszerű 2D vagy 3D hatásról van szó, hanem feltételezhető a mágneses képződmény jelenléte, illetve mágneses határfelülethez kapcsolható EM torzulás. (A szelvényen megjelenő függőleges maximumvonalatok esetében nem zárható ki a bazaltvulkanizmus magmacsatornáinak vagy magmakamrájának hatása.)

A 7. és 8. *ábra* mutatja a tanúhegyek és az MT szondázások helyzetét 75–115 vkm között. A KA-3-20A jelű szondázástól (~Uzsabánya) a bazaltok közvetlen közelében (kontaktzónában) történt a mérés, és a folytatásban – noha

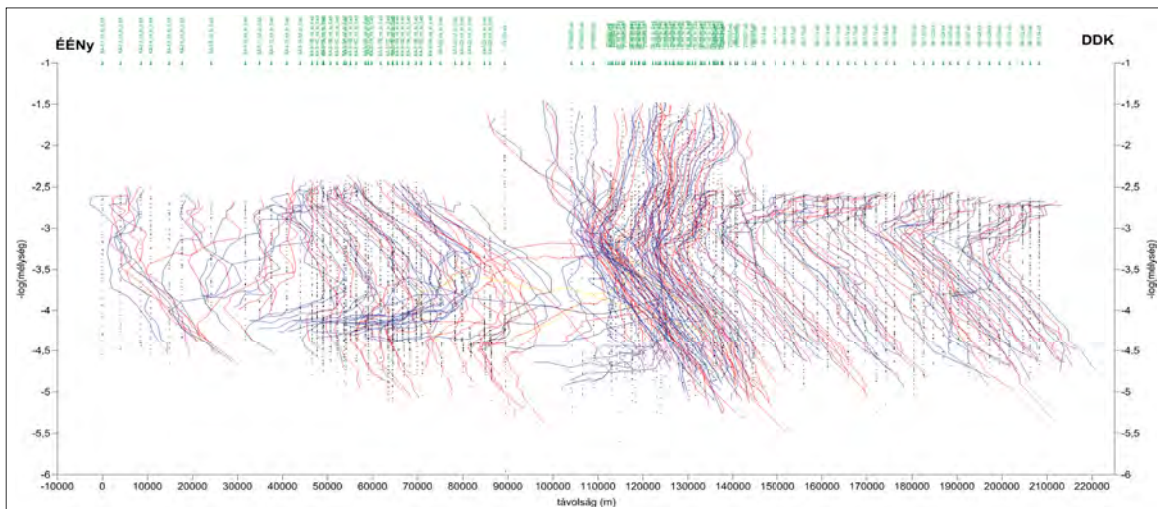


3. *ábra* A magnetotellurikus impedanciából ( $Z_{xy} = E_x/H_y$ ) számított látszólagos fajlagos ellenállás ( $\rho_{xy}$ ) szondázási görbéi az MTOA-02 szelvény nyomvonalaiban (nagyon zajos görbék és pontszerű zajok kiszűrve), logaritmikus mélységskála mentén

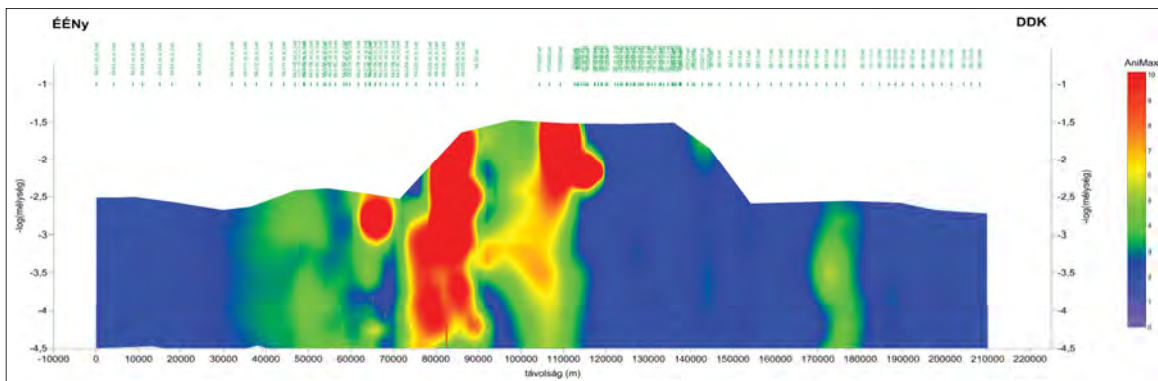
Figure 3 Apparent resistivity ( $\rho_{xy}$ ) sounding curves calculated from magnetotelluric impedance ( $Z_{xy} = E_x/H_y$ ) along the MTOA-02 section trace (very noisy curves and point noises filtered out), along a logarithmic depth scale



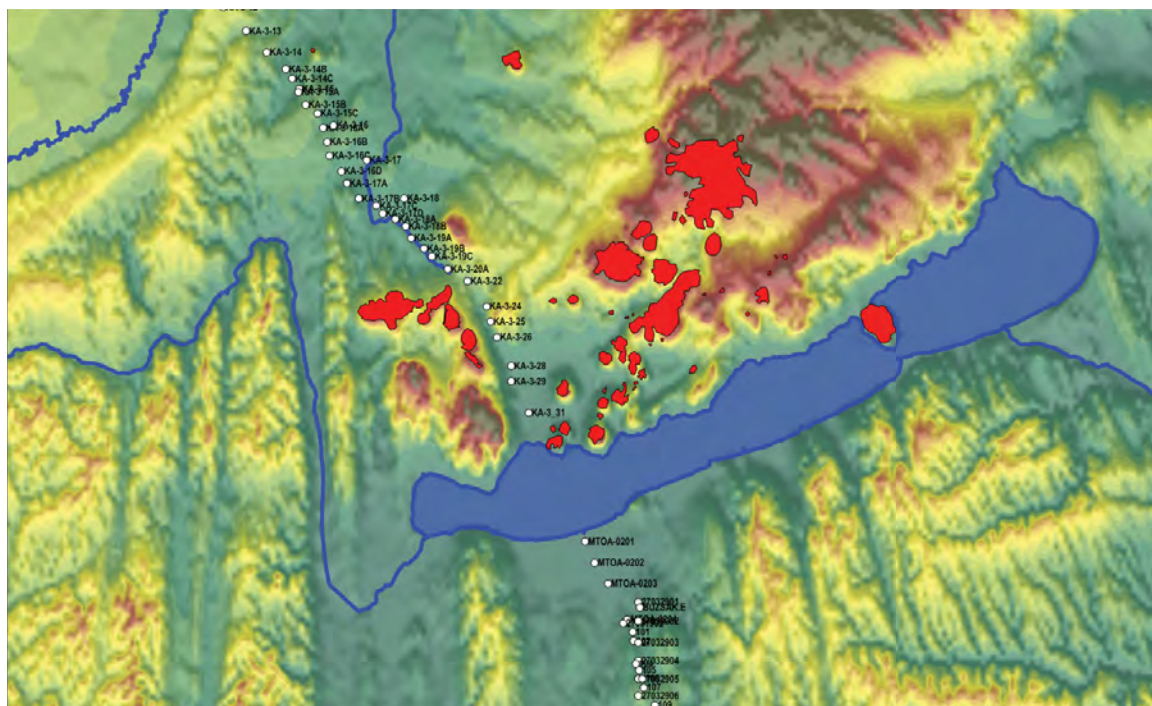
**4. ábra** A magnetotellurikus impedanciából ( $Z_{xy} = E_x/H_y$ ) számított látszólagos fajlagos ellenállás ( $\rho_{yx}$ ) szondázási görbéi az MTOA-02 szelvény nyomvonalában (nagyon zajos görbék és pontszerű zajok kiszűrve), logaritmikus mélységskála mentén  
**Figure 4** Sounding curves of apparent resistivity ( $\rho_{yx}$ ) calculated from magnetotelluric impedance ( $Z_{yx} = E_y/H_x$ ) along the MTOA-02 section trace (very noisy curves and point noises filtered out), along a logarithmic depth scale



**5. ábra** A  $H$ -polarizációs (piros) és  $E$ -polarizációs (kék) látszólagos fajlagos ellenállás szondázási görbéi az MTOA-02 szelvény nyomvonalában (nagyon zajos görbék és pontszerű zajok kiszűrve), logaritmikus mélységskála mentén. [A szelvény közepén, 90 000–140 000 m között, az CSAMT mérések 35–50 m-es mélységből indulnak.]  
**Figure 5**  $H$ -polarisation (red) and  $E$ -polarisation (blue) apparent resistivity sounding curves along the MTOA-02 section trace (very noisy curves and point noises filtered out), along a logarithmic depth scale [In the middle of the section, between 90 000–140 000 m, CSAMT measurements start from a depth of 35–50 m]



**6. ábra** Anizotrópia maximumok (AniMax<sup>®</sup>) a szűretlen görbék alapján az MTOA-02 szelvény nyomvonalában, logaritmikus mélységskála mentén  
**Figure 6** Anisotropy maxima (AniMax) based on unfiltered curves along the trace of the MTOA-02 section, along a logarithmic depth scale



7. ábra | MT szondázási pontok a balatonfelvidéki bazaltos tanúhegyek (piros) poligonjaival a domborzati tréképén  
 Figure 7 | MT sounding points with polygons (red) of the basaltic hills of the Lake Balaton Highlands

a felszínen elvileg Szigligetig nincs bazalt – a nagyobb mélységekben a jelenléte nem zárható ki a fő elterjedési irányok (a tanúhegyek csapásvonala) alapján. A mágneses adatokból láthatjuk majd, hogy a mágneses anomáliák a szelvényen kívül voltak, de a mágneses képződmények

1. táblázat | A zajos (a feldolgozásból kizárandó) szondázások a MTOA-02 szelvényen (16 db)  
 Table 1 | The noisy soundings (to be excluded from processing) on the MTOA-02 section (16)

Pontazonosító	Terület	Év
101	Somogy	2021
102	Somogy	2021
103	Somogy	2021
104	Somogy	2021
107	Somogy	2021
108	Somogy	2021
KA-305	Kisalföld	1990
KA-317B	Kisalföld	1990
KA-320	Kisalföld	1990
KA-322	Kisalföld	1990
KA-324	Kisalföld	1990
KA-325	Kisalföld	1990
KA-326	Kisalföld	1990
KA-328	Kisalföld	1990
KA-329	Kisalföld	1990
SB-101	D-Dunántúl	1992

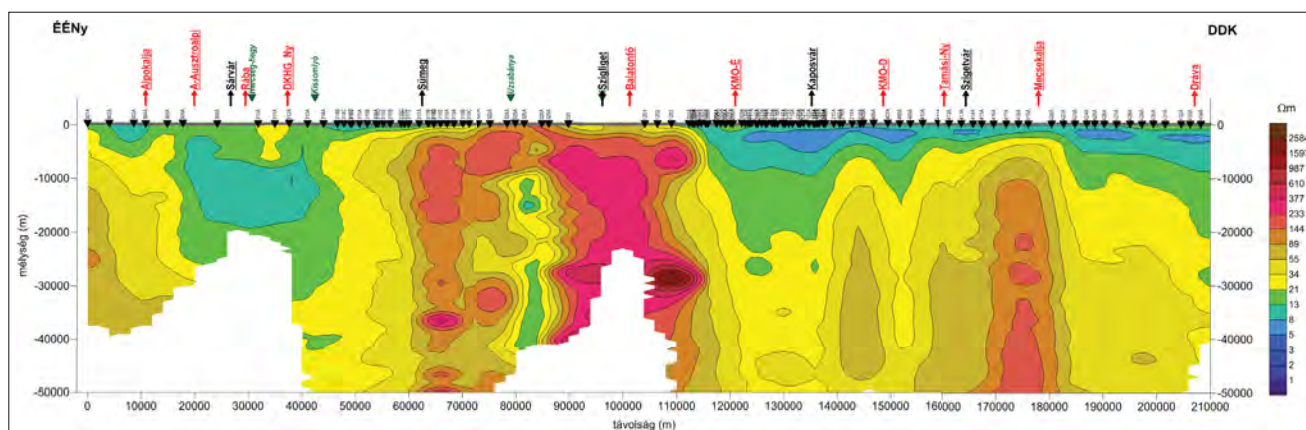
hatását a kisfrekvenciás (nagy behatolású) EM szondázások oldalról, nagyobb távolságból is megérezik!

Az 5. ábra alapján látszik, hogy az MT szondázások egyes helyeken elérik 100 km behatolási mélységet, de 40–110 vkm között a görbék 10 km mélységben elfeksznek – egy DK-i dőlésű, jól vezető hatás miatt –, és nem érnek el nagyobb mélységet (10. ábra). A szakirodalomban ez a hatás „Dunántúli Elektromos Vezetőképesség Anomália” (röviden: DVA) néven ismert (Ádám 1992).

Az elfekvésnek az oka az, hogy a középhegységi zónában, a felszínen mezozoos karbonátos képződmények (mészkö, dolomit) vannak, amelyek fajlagos ellenállása néhányszor 1000  $\Omega$ m, amit helyenként vulkanitok, pannon bazaltok is tarkítanak. Ezeken a helyeken a nagy ellenállás miatt az első mintavételi frekvencián sokkal nagyobb skin-mélység adódik, mint olyan helyeken, ahol a felszínen fiatalabb, üledékes kőzetek (agyag, homok) vannak, néhányszor 10  $\Omega$ m fajlagos ellenállással. A mezozoos medencealjzat fekéjében kisebb fajlagos ellenállású kőzetek (pl. perm homokkő) jönnek, ami csökkenő fajlagos ellenállású görbéket eredményez. Ezt egészítheti ki egy grafitos összetételű kőzet vagy a bázisos magmás kőzetek kontaktzónájában kialakuló extrém, változó előjelű hatások.

A további feldolgozás előtt, a zajos, erősen torzult görbéket ki kellett zárni a mérési anyagból (1. táblázat). Az így előálló, (121 – 16 =) 105 pontból álló magnetotellurikus mérési adatrendszerből a fő irányokban kiszámítottuk a látszólagos fajlagos ellenállás  $\rho_{xy}$  (9. ábra) és  $\rho_{yx}$  (10. ábra) mélységmetszeteket. Az MT szondázások helyeit (fekete háromszögek) és neveit is feltüntettük. A  $H$ - és  $E$ -polarizációs értékekből kiszámítottuk az anizotrópiamaximu-





**10. ábra** | Az MTOA-02 látszólagos fajlagos ellenállás  $\rho_{yx}$  mélységzselvénye (nagyszerkezeti vonalak nevei és település nevei)  
**Figure 10** | MTOA-02 Apparent specific resistivity  $\rho_{yx}$  depth section (names of major structure lines and names of settlements)

mokat is (6. és 15. ábra – logaritmus és lineáris mélység-skála mellett).

A terület ismert földtani felépítése alapján a fő tektonikai irányok:

- a Balatontól É-ra a Rába-vonal (DDNy–ÉÉK,  $\sim 30^\circ$ ) iránya,
- a Balatontól D-re pedig a Közép-magyarországi Zóna (NyDNy–KÉK,  $\sim 60^\circ$ ) iránya.

A magnetotellurikus mérések esetén a  $H$ - és  $E$ -polarizációt tisztán elméleti megfontolások alapján a következőképpen lehet meghatározni (Takács 1979, Zsdanov 1986):

1.  $H$ -polarizáció az az eset, amikor a  $H$ -nak csak egy nullától különböző komponense van:

$$\vec{E}^H = (E_x, 0, E_z); \quad \vec{H}^H = (0, H_y, 0),$$

2.  $E$ -polarizáció az az eset, amikor az  $E$ -nek csak egy nullától különböző komponense van:

$$\vec{E}^E = (0, E_y, 0); \quad \vec{H}^E = (H_x, 0, H_z),$$

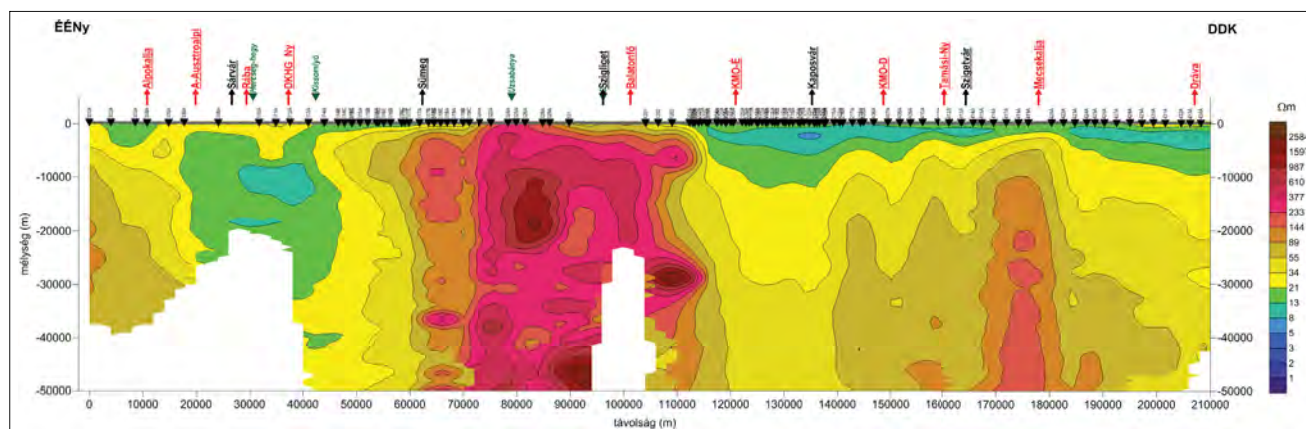
A gyakorlatban ez azt jelenti, hogy a legerősebb vezetési irány az  $E$ -polarizációs irány (TE-mód), a rá merőleges

irány pedig, a  $H$ -polarizációs irány (TM-mód). Egy egyszerű vezetővel lehet legjobban bemutatni a dolgot. A kábelben áram folyik ( $E_y$ ), körülötte körkörös mágneses tér alakul ki, merőlegesen az áram irányára ( $H_x, H_z$ ). Ez a példa tökéletesen szemlélteti az  $E$ -polarizáció lényegét, s nyilván a rá merőleges vízszintes irány lesz a  $H$ -polarizáció.

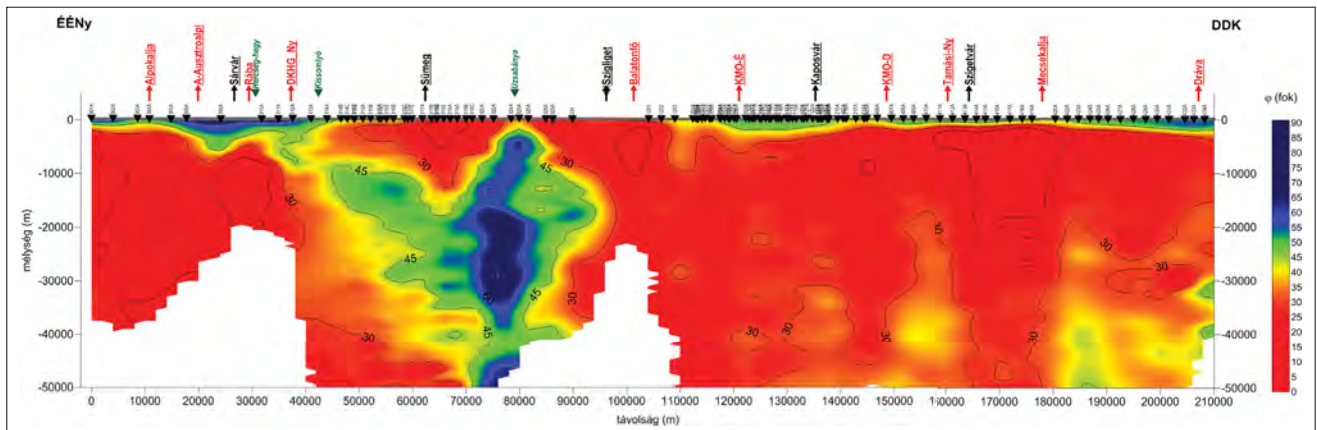
Általában a szerkezeti zóna mentén alakul ki a jól vezető irány (közeg), azaz az ismert tektonikai irány lesz az  $E$ -polarizációs irány és a szerkezetre merőlegesen alakul ki a  $H$ -polarizációs irány. Így sokszor az alapirányokban mért (forgatás nélküli) mérési eredményeken is látszik, hogy melyik milyen polarizációt jelent.

Esetünkben, mivel a forgatás nélküli adatokat dolgoztuk fel, a tektonika közel DNy–ÉK iránya miatt egyik jól vezető anomália sem dominál főirányú látszólagos fajlagos ellenállás mélységmetseteken (9., 10. ábra).

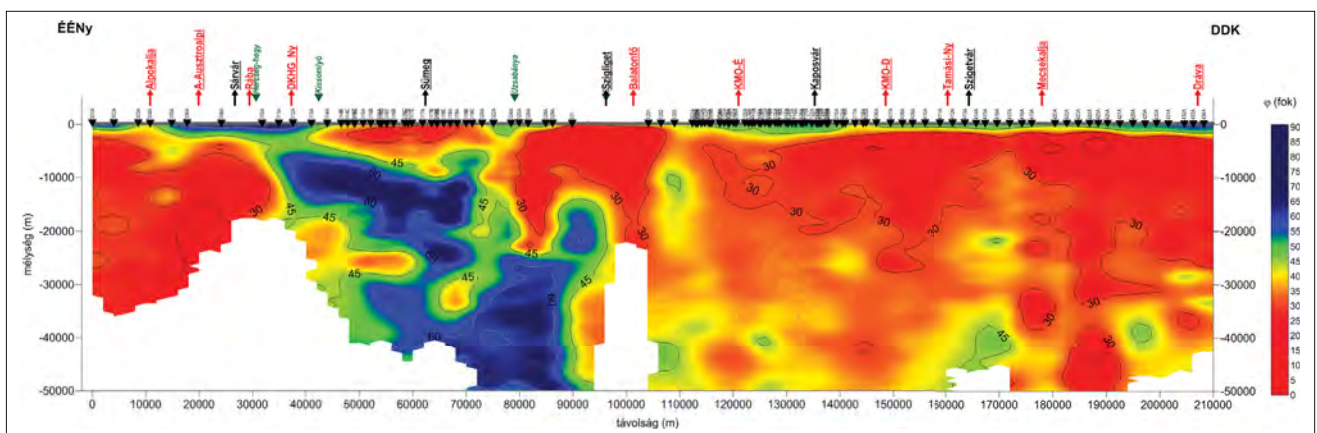
A frobeniusi vagy euklidesi norma alapján meghatározott analitikus látszólagos fajlagos ellenállás (11. ábra) alapján a Rába-vonal mentén jelentkező vezetőképesség-anomália tűnik erősebbnek, tehát a Rába-vonal iránya a valódi  $E$ -polarizációs irány és a rá merőleges irány a  $H$ -polarizációs irány.



**11. ábra** | Az MTOA-02 analitikus látszólagos fajlagos ellenállás  $\rho_{as}$  mélységzselvénye  
**Figure 11** | MTOA-02 analytical apparent resistivity  $\rho_{as}$  depth section



12. ábra | Az MTOA-02 fázis ( $\varphi_{xy}$ ) mélységszelvénye  
 Figure 12 | MTOA-02 phase ( $\varphi_{xy}$ ) depth section



13. ábra | Az MTOA-02 fázis ( $\varphi_{yx}$ ) mélységszelvénye  
 Figure 13 | MTOA-02 phase ( $\varphi_{yx}$ ) depth section

Az impedanciatenzor fázisparamétere<sup>7)</sup> alapján szintén erre a következtetésre jutunk (12., 13. ábra), és a fázis-átlag rajzolja ki legszebben ezt az irányt, a DVA mélységi helyzetét (14. ábra). A fázisparaméter tölcészerű jól vezető alakzatot mutat, tetején dugóval (14. ábra), egy korábbi cikkünkben (Bodoky, Kiss 2020) feltételezett „dabronyi meteoritkráter” körvonalán belüli részen.

Érdekes, hogy amíg a fajlagos ellenállás alapján mindkét nagyszerkezeti zóna megjelenik, addig a fázisparaméter alapján csak a Balatontól É-ra jelentkező vezetőképesség-anomália, a DVA rajzolódik ki, a Közép-Magyarországi Zóna (KMZ) gyakorlatilag láthatatlan. Ennek nyilván geológiai okai vannak.

A főirányokban elvégzett mérésekből kapott látszólagosellenállás-adatok eltérését (10. és 11. ábra), azaz irányfüggőségét az anizotrópiaadatok (15. ábra) jellemzik. Az 1–5 közötti anizotrópiaértékek szerkezeti anizotrópiát jeleznek, az ennél nagyobb érték esetén azonban – a korábbi gyakorlati tapasztalatok alapján – mágneses határfelületet feltételezünk a szelvény nyomvonala mentén.

A magnetotellurikus mérési adatokon túl érdemes vizsgálni a gravitációs és mágneses mérési eredményeket is, a relatív sűrűségi és relatív mágnesezettségi mélységmetszeteket.

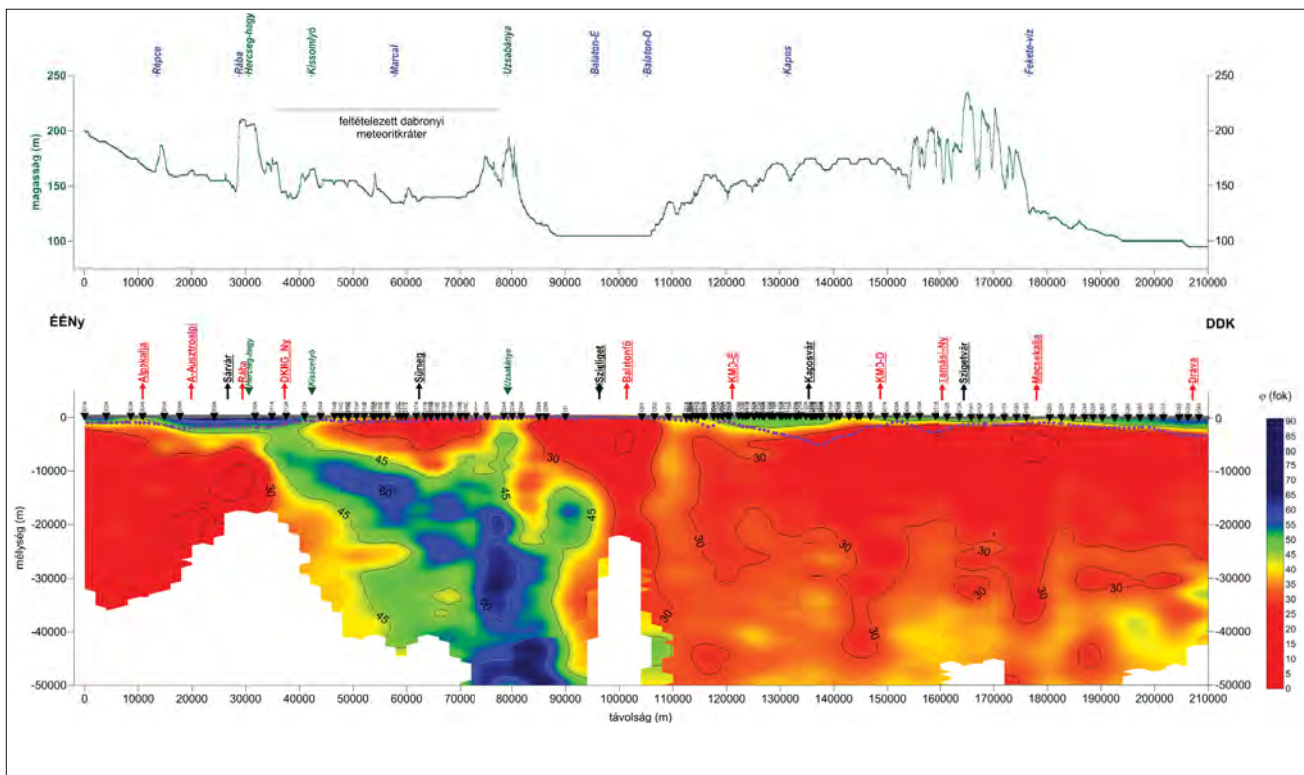
### Relatív sűrűségi és mágnesezettségi mélységmetszetek

A 16. ábra felső része mutatja a szelvény nyomvonala mentén mért gravitációs Bouguer-anomália-adatokat (kék görbe) és a mágneses  $\Delta Z$  mérési adatokból, az indukáló tér értékével transzformált (átszámolt)  $\Delta T$  adatokat (piros görbe).

A Bouguer-anomália alapján a Kisalföld 5–10 mGal, a Dunántúli-Középhegység 15–20 mGal, a KMZ  $-10 \div -20$  mGal, a Dél-Dunántúl pedig a Kisalföldnek megfelelő értékekkel jelentkezik, ami a Dráva-árokknál csökken le  $-15$  mGal-ig.

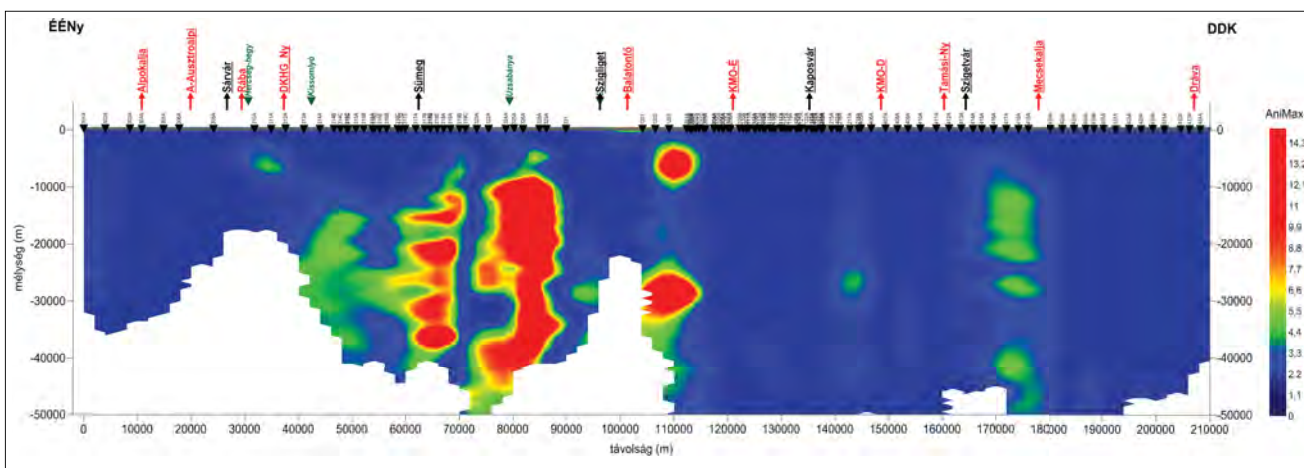
A 16. ábra alján, a spektrális szűrések alapján számított relatív sűrűség-mélységmetszet (Kiss és Vértessy 2020) látszik, rajta az Euler- és Werner-féle automatikus hatókijelölésből kapott ponthalmaz, amik a ható geometriájától függően tengelyvonalat, vagy határfelületet rajzolnak ki. A hatókijelölések és a sűrűség-mélységmetszet pontosan jelzik a földtani felépítésben bekövetkező kisebb-nagyobb változásokat, a fő szerkezeti elemeket.

Érdekes, hogy a sűrűségeloszlás alapján a DVA kisebb, a KMZ nagyobb relatív sűrűségminimummal jelentkezik. A DVA-t az MT elektromágneses mérési paraméterek alap-



14. ábra | Az MTOA-02 domborzata (felül) és az átlagfázis ( $\varphi_{\text{átlag}}$ ) mélységsvénye (alul), rajta a Haas-féle (2010) medencealjzatszint (lila szimbólumokkal) és a feltételezett meteoritkráter helyzetével

Figure 14 | MTOA-02 relief (top) and depth section of the mean phase ( $\varphi_{\text{average}}$ ) (bottom), showing the Haas (2010) basement level (with purple symbols) and the position of the hypothetical meteorite crater



15. ábra | Az MTOA-02 látszólagos fajlagos ellenállás AniMax mélységmetszete (nagyszerkezeti vonalak nevei és település nevei)

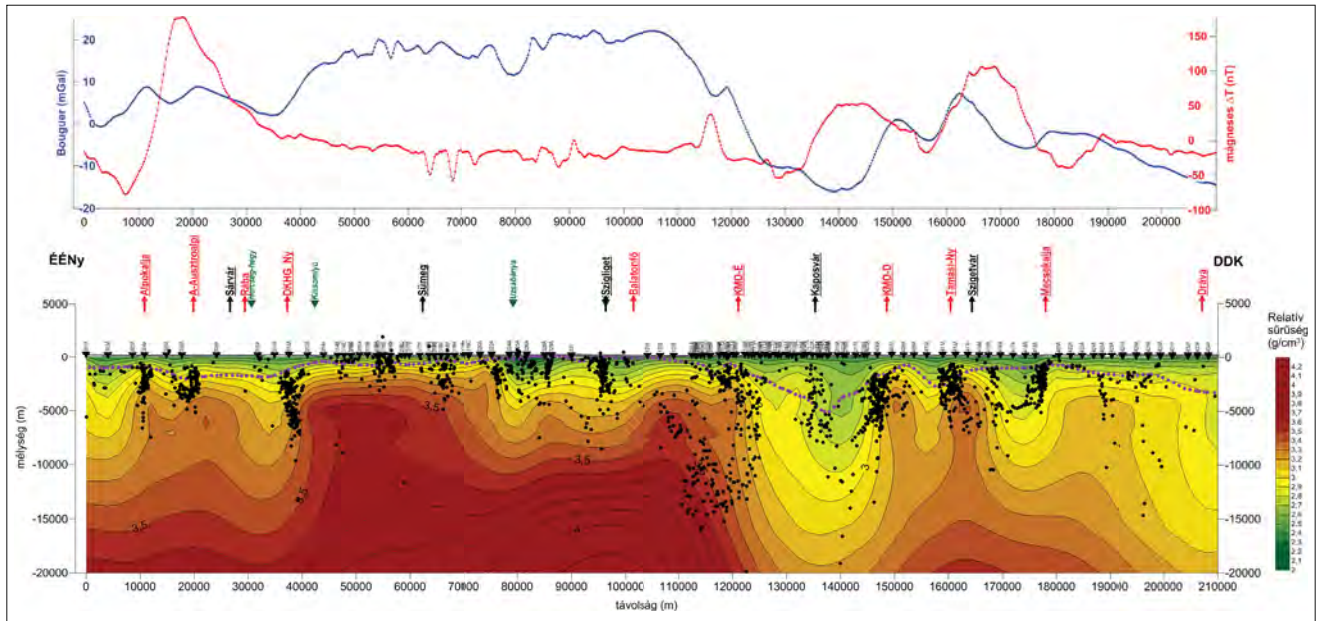
Figure 15 | MTOA-02 Anisotropy maxima depth section (with names of major structure lines and names of settlements)

ján (ionos, fémes, vagy grafitos vezetőképesség)<sup>8)</sup>, a KMZ-t a gravitációsűrűség-paraméterek (kőzetmátrix anyaga, pórustérfogat)<sup>9)</sup> alapján tudjuk jól beazonosítani, ami nyilvánvalóan kőzettani kifejlődéstől függő.

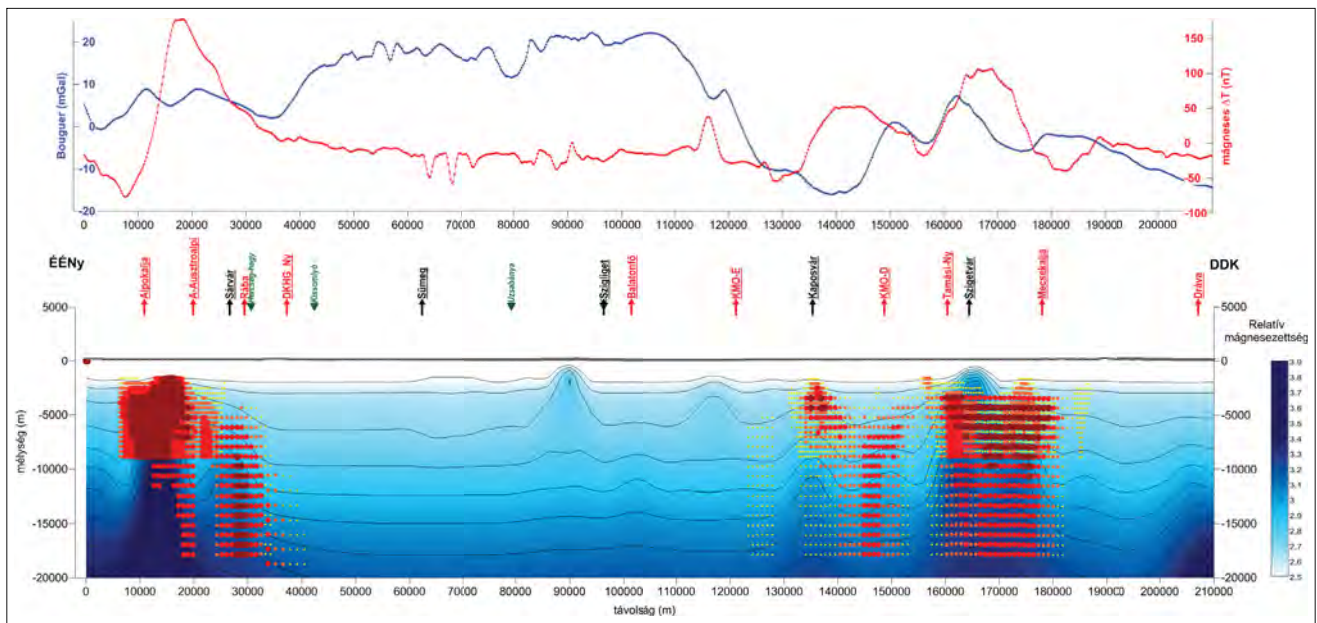
A DVA a felszíntől néhányszor 10 km-es mélységig azonosítható az EM paraméterek alapján (14. ábra), a KMZ viszont csak 10, maximum 20 km-es mélységig (16. ábra), mindkét esetben megfigyelhetőek mágneses hatók a mélyben vagy a peremi részeken (17. ábra), ami a nagyszerke-

zeti vonalak és a magmatizmus (vulkanizmus) kapcsolatára hívja fel a figyelmünket.

A 17. ábra mutatja a mágnesezettségi mélységmetszetet, amelyet a mágneses adatok spektrális szűrése alapján készítettünk el (Kiss, Vértesy 2020). Az ábrán megjelenítettük a Naudy-féle automatikus hatókijelölés eredményeit (sárga-piros-barna ponthalmaz), amelyek a mágneses testek legvalószínűbb helyzetét mutatják, összhangban a mágneses változékonysági mélységmetszettel. Látható,



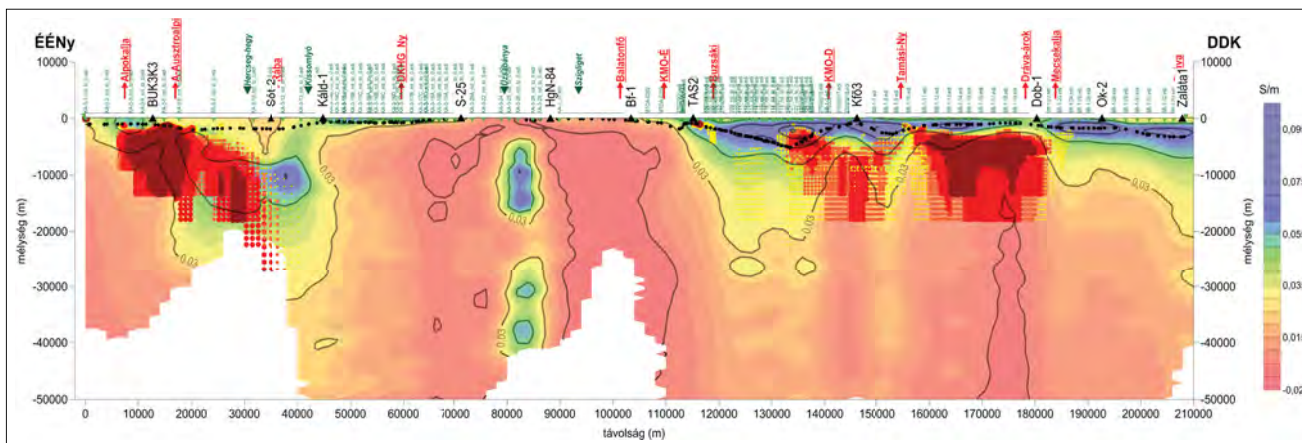
16. ábra | Az MTOA-02 sűrűség-mélységmetszete, gravitációs Werner- és Euler-hatókijelöléssel (kétszeres kimagasztás)  
 Figure 16 | MTOA-02 relative density depth section with Werner and Euler solutions (double exaggeration)



17. ábra | MTOA-02 mágneses mélységmetszet Naudy-féle (sárga-piros-barna) hatókijelöléssel (kétszeres kimagasztás)  
 Figure 17 | MTOA-02 relative magnetization depth section with magnetic Naudy-depth solutions (yellow-red-brown) (double exaggeration)

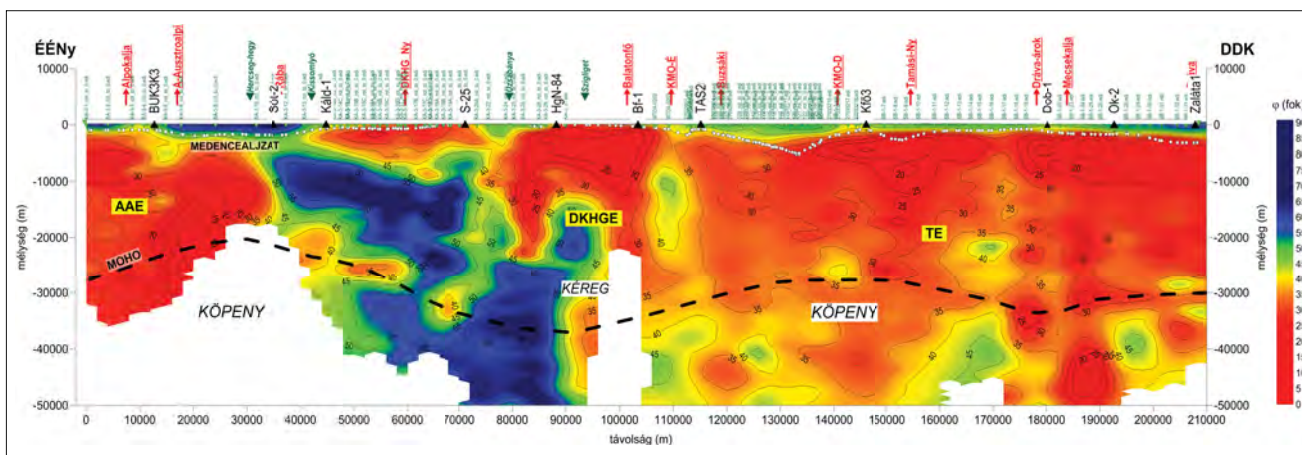
hogy a DVA ÉÉNy-i peremén és a KMZ DDK-i peremén és a KMZ alatt mágneses hatókat lehet azonosítani. A lokális, felszínről ismert testek azért nem látszanak (kivéve 90 vkm-nél, Szigliget előtt megjelenő kisebb anomália), mert a mérési szelvény elkerülte a tanúhegyeket és a mérési mintavételi távolsága 1500 m körüli volt. A feldolgozási eljárások egy „mozgó ablak” (minimum  $5 \times 1500$  m) mentén végzik a szűréseket, így a kisméretű testek nem jelennek meg, hatásuk gyorsan lecseng, de az EM mérésekre – azok nagy behatoló képessége miatt – távolról is hatnak.

A 18. ábra mutatja a látszólagos fajlagos ellenállásból kiszámított<sup>(10)</sup> látszólagos fajlagosvezetőképesség-mélységmetszetet, rajta a mágneses Naudy-féle megoldásokkal. 83 vkm-nél jólvezető anomália látszik a szigetelő környezetben. A közel függőleges zónát É-ről Uzabánya, D-ről Szigliget határolja le. Mindkét helyen a felszíntől ismertek a pannon bazaltok (tanúhegyek), a zóna egy mélybeli magmatsatorna kontaktzónájának hatásaként értelmezhető. Sajnos D-ről, Szigliget felől, hiányzik néhány MT mérési pont, amelyek még jobban be tudnák határolni a



18. ábra | Az MTOA-02 látszólagos fajlagos vezetőképesség ( $\sigma_{yx}$ ) mélységmetszete, Naudy-féle hatókijelöléssel és a Haas-féle medencealjzat-mélységi szinttel

Figure 18 | MTOA-02 apparent conductivity depth section, with magnetic Naudy-depth solutions and Haas's basement depth



19. ábra | Az MTOA-02 impedanciafázis ( $\varphi_{yx}$ ) mélységmetszete a Moho feltételezhető határvonalával (szaggatott fekete vonal) [AAE – Alpokalja Egy-ség, DKHGE – Dunántúli-Középhegységi Egység, TE – Tisza Egység]

Figure 19 | MTOA-02 impedance phase ( $\varphi_{yx}$ ) depth section with assumed Moho boundary (dashed black line) [AAE – Alpokalja Unit, DKHGE – Dunántúl Central Mountain Unit, TE – Tisza Unit]

vélt feláramlási zónát. Ha a vezetőképesség-számítást a  $\rho_{xy}$  és  $\rho_{yx}$  vektorösszegéből számítjuk, akkor a 83 vkm-nél lát-szó (18. ábra) vezetőképesség-anomália eltűnik – a mágnes-es kontaktushatás a művelet miatt nem jelenik meg. Ezt a hatást azonban mindkét fázis (12., 13. ábra) és még az át-lagfázis (19. ábra) is mutatja.

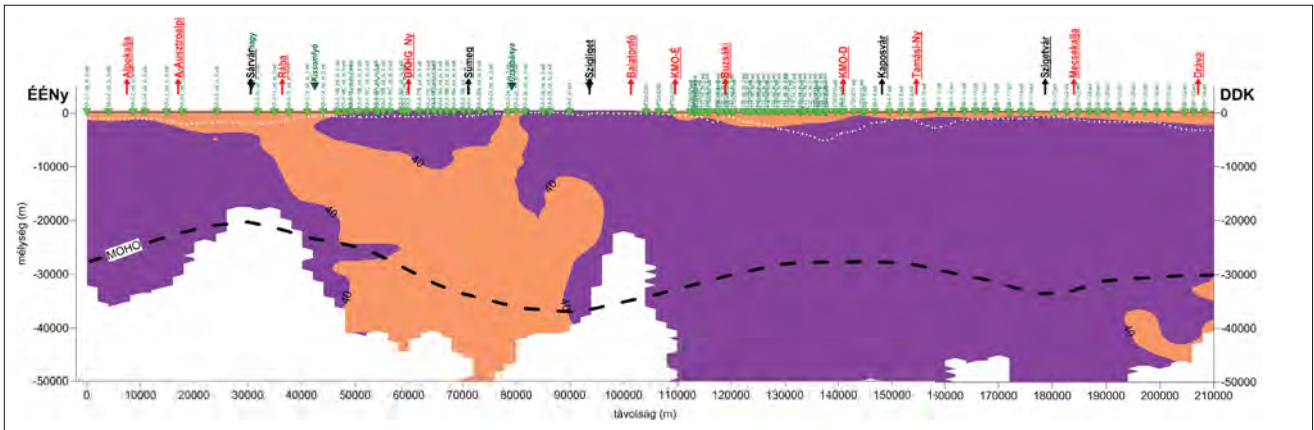
A 18. ábra esetén az alap a színes fajlagosvezetőképes-ség-mélységmetszet, amelyre rákerültek a Naudy-féle hatókijelölések, majd a vezetőképesség izovonalait mindezek fölött is megjelenítjük. Így a Naudy-megoldások által ki-mutatott mágneses hatókon látszanak a vezetőképesség-eeloszlás izovonalai. Látszik, hogy a tömbösen jelentkező mágneses hatók vezetőképesség-minimumot (fajlagos-ellenállás-maximumot) okoznak, de a kontaktuszónákban (a hatók peremén) mindenhol mélyre nyúló vezetőképes-ség-maximumot (fajlagosellenállás-minimumot) találha-tunk.

A magnetotellurikus adatok megfelelő mintavételezés (frekvenciatartomány) és hosszú mérés esetén (statiszti-

kailag értelmezhető nagy hullámhosszúságú jelek) kéreg- és litoszféra-kutatásra alkalmasak a kapott behatolási mély-ségből adódóan. A méréseink alapján azonban sem a Conrad-, sem a Moho-határfelület nem jelentkezik kontrasztosan, ami azt jelenti, hogy az elektromos vezetőké-pesség szempontjából nincs erős kontraszt a határfelületek két oldala között, hanem – talán – folyamatos az átmenet. Egyedül a  $\varphi_{yx}$  paraméter mutat egy gyengén követhető anomáliavonalat a Moho mélységszintjén (19. ábra).

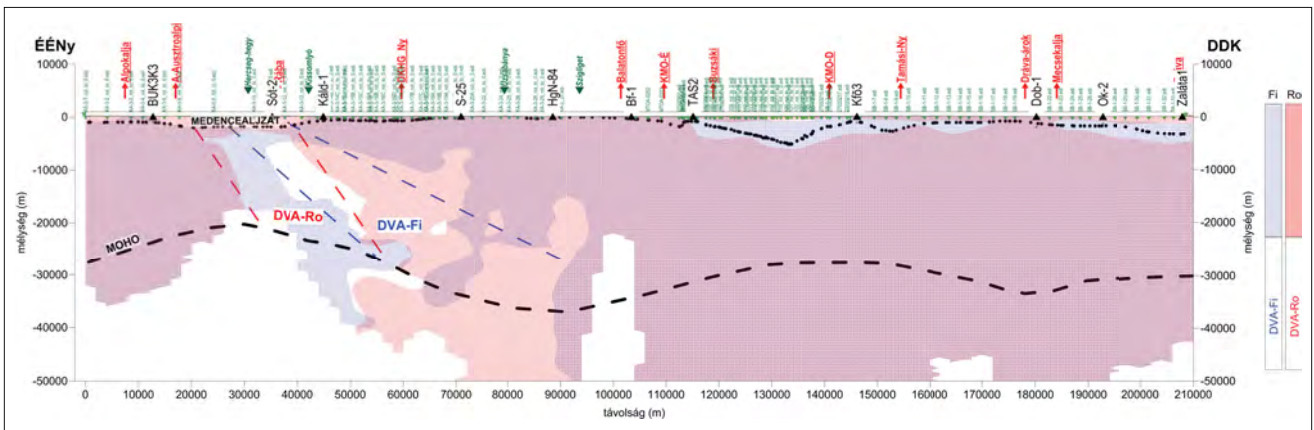
A Moho-szint körüli fázisváltozékonyságot (19. ábra) az adja, hogy vannak feltételezhető mélytörések ( $\varphi_{yx} > 45^\circ$ ) és magmás benyomulások ( $\varphi_{yx} < 30^\circ$ ), amire a fázis robusztusan ugyan, de reagál.

Az impedancia fázisértékét tovább vizsgálva megállapítható, hogy a földtani adatok alapján meghatározott pre-kainozoos medencealjzat szintje és a fázis 40–45° körüli értéke szinte ugyanott jelentkezik. A színezés megválasztásával emelhetjük ki látványosan a medencealjzat és fedőüledék határvonalát a fázisértékek alapján, valamint a



**20. ábra** Az MTOA-02 impedanciafázis ( $\varphi_{xy}$ ) megjelenítése 2 színnel – 40° alatti (lila, azaz a fázis alapján szigetelő medencealjzat) és 40° feletti (narancssárga, azaz a fázis alapján fedőüledék és/vagy fellazult, jól vezető zóna) –, valamint a Moho feltételezhető határvonalával (szaggatott fekete vonal) és a Haas et al. (2010) prekainozoos mélységgel (fehér pontozott vonal)

**Figure 20** MTOA-02 impedance phase ( $\varphi_{xy}$ ) plotted with 2 colours – below 40° (purple, i.e. insulating basin substrate based on phase) and above 40° (orange, i.e. overlying sediment and/or loosened well-conducting zone based on phase) – and with the presumed Moho boundary (dashed black line) and the depth of Pre-Cenozoic basement (Haas et al. 2010, white dotted line)



**21. ábra** Az MTOA-02 látszólagos fajlagos ellenállás ( $\rho_{xy}$ ) és impedanciafázis ( $\varphi_{xy}$ ) blokkos megjelenítése a DVA kijelölésére (a szraffozott részek a szigetelő közegeknek, az üresen hagyott részek a jól vezető zónák – a mérés behatolási mélységéig)

**Figure 21** MTOA-02 apparent resistivity ( $\rho_{xy}$ ) and impedance phase ( $\varphi_{xy}$ ) block display for conductivity anomaly assignment (hatched parts are the insulating medium, blank parts are the well conducting zones – up to the penetration depth of the measurement)

Rába-vonaltól a Középhegység alá bukó jól vezető zóna (DVA) helyzetét (20. ábra).

Az MTOA-02 szelvényen a Dunántúli Vezetőképesség Anomália (Ádám 1992) eltérő helyen jelentkezik a látszólagos fajlagosellenállás- (9. ábra) és az impedanciafázis (20. ábra) paramétere alapján. Ha az anomáliát a közeg vezetőképessége okozza, akkor elvileg ugyanott kellene megjelennie az ellenállás és a fázis paraméter alapján is, de nálunk jelentős elcsúszás van az anomáliák középvonalában, aminek földtani okai lehetnek.

Korábbi tanulmányokban (Kiss, Prácser 2021, Kiss et al. 2023) vizsgáltuk a mágneses paraméterek hatását az MT mérésekre. Ezek azt mutatták, hogy a legkontrasztosabb változás a mágneses, nem mágneses határfelületen jelentkezik.

Homogén féltér esetén a mágneses permeabilitás növeli a látszólagos ellenállást, de határfelület megjelené-

sekor, mielőtt a tellurikus áramok behatolnak a mágneses közegbe, feltorlódnak a határfelületen (a megváltozó mágneses erőter miatt a tellurikus áramok iránya megváltozik), ha úgy tetszik, erőt gyűjtenek, hogy leküzdjék (áttörjék) a mágneses erőter okozta közegeellenállást (árnyékoló hatást). Ez pedig egy virtuális vezetőképesség anomáliát fog okozni, közvetlenül a határfelület mentén, a nem mágneses oldalon (Kiss et al. 2023). Tehát nem a mágneses test középvonalában jelenik meg a jól vezető zóna, hanem a határfelületen, azaz a kontaktus mentén (miközben a mágneses testen belül a fajlagos vezetőképesség állandósága mellett is növekvő látszólagos fajlagos ellenállást fogunk mérni)!

A látszólagos fajlagos ellenállás értékét a mágneses permeabilitás növeli homogén féltér esetén. Nem homogén féltér esetén a mágneses test kontaktusán, a határfelület mentén jól vezető hatás fog jelentkezni. A mágneses

test kontaktusán anizotrópia jelenik meg a  $H$ - és  $E$ -polarizáció között (15. ábra). Ezek lehetnek az elsődleges jelei a mágneses test jelenlétének.

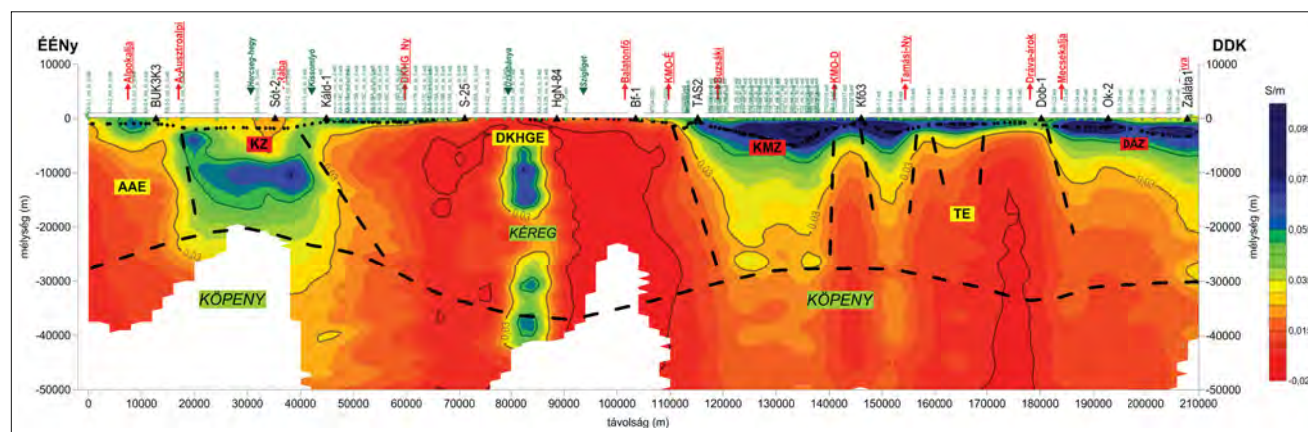
A fázis az impedancia valós és képzetes része közötti fázisszöget mutatja, ami a szakirodalom alapján a közeg vezetőképességétől függ. A magnetotellurikus frekvenciafüggő mintázás fázisa a képződményhatár feletti és alatti (melletti) térrész vezetőképességei közötti viszonyt mutatja meg. Ha jól vezető zónát érez, akkor az értéke  $45^\circ$  feletti értéket mutat. Ha szigetelő közeget érzékel, a fázis  $45^\circ$  alatti értékkel jelentkezik. Mivel a fázis sokkal robusztusabban írja le a közeget, így a kontaktusszerű, hirtelen változásokra érzékletlenebb lesz (integrált hatásokat mutat), viszont a vastagabb, jól vezető zónákat biztosan azonosítja. Az MTOA-szelvényeken is jól azonosítható a prekainozoos medencealjzat szintje a fázis alapján!

A DVA anomáliázóna kétféle megjelenése talán a Balaton-felvidék alatti mágneses anyaggal, pannon bazaltos

magmatsatornákkal, illetve magmakamrákkal lehet összefüggésben (Hercseg-hegy, Kissomlyó, Uzsabánya). A mágneses közeg nem feltétlenül nagy tömegű, így annak hatása a ritka felszíni mágneses mérések alapján talán nem is jelentkezik, de a mágneses erőtér körbeveszi a mágneses testet, és hatása módosíthatja a magnetotellurikus mérési paramétereket. A mágneszettséggel 10–20 km mélységig számolni kell, a Curie-hőmérséklet ( $\sim 358\text{--}770\text{--}1130^\circ\text{C}$ , a Ni, a Fe és a Co esetén) mélysége alatt azonban ez a hatás elvileg megszűnik (Kiss et al. 2011).

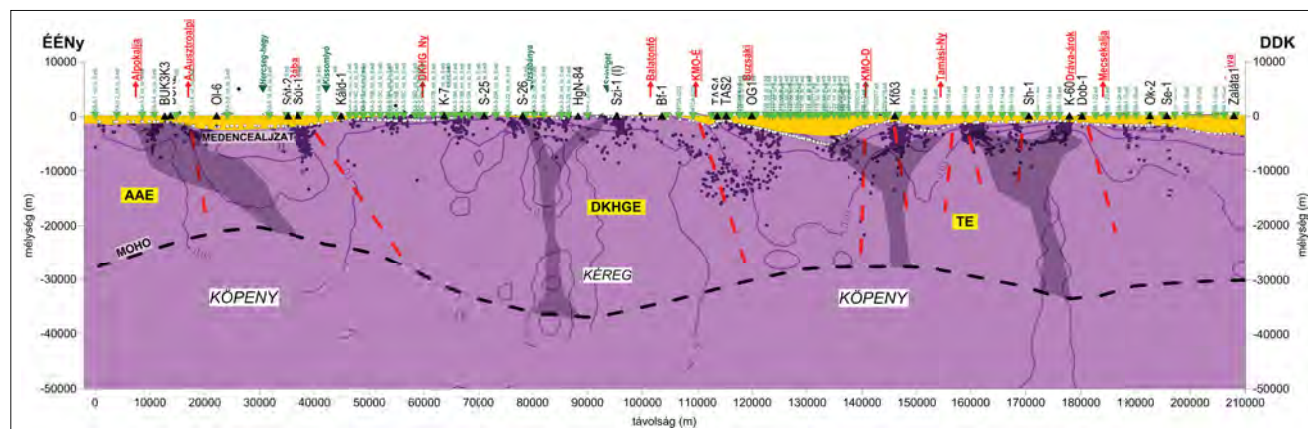
A fázis alapján kirajzolódó mélyzóna területe felett korábban a domborzati, gravitációs, mágneses és tellurikus adatok alapján körgyűrűs szerkezeteket azonosítottunk, aminek lehetséges okaként felmerült a meteoritkráter lehetősége (Bodoky, Kiss 2020). A DVA eredetének pontosítása, igazolása azonban további, területi vizsgálatokat igényel!

A látszólagos fajlagosellenállás-értékek alapján számított fajlagos vezetőképesség mélységmetszete alapján szer-



22. ábra Az MTOA-02 látszólagos fajlagos vezetőképesség ( $\sigma_{app}$ ) mélységmetszete és szerkezet-kijelölés [AAE – Alpokalja Egység, DKHGE – Dunántúli-Középhegységi Egység, TE – Tisza Egység, KZ – Kisalföldi Zóna, KMZ – Közép-Magyarországi Zóna, DAZ – Dráva-árok Zóna]

Figure 22 MTOA-02 Apparent specific conductivity ( $\sigma_{app}$ ) depth section and structure assignment [AAE – Alpokalja Unit, DKHGE – Transdanubian Central Mountain Unit, TE – Tisza Unit, KZ – Little Plain Zone, KMZ – Central Hungarian Zone, DAZ – Danube-Drava Trench Zone]



23. ábra Az MTOA-02 kéregszerkezeti értelmezési vázlata a látszólagos vezetőképesség izovonalakkal, gravitációs hatókijelölésekkel és a lehetséges köpeny-feláramlási helyekkel (vulkanizmussal) [AAE – Alpokalja Egység, DKHGE – Dunántúli-Középhegységi Egység, TE – Tisza Egység]

Figure 23 MTOA-02 crustal structure interpretation sketch with apparent conductivity isolines, gravity solutions and possible mantle upflow locations (volcanism) [AAE – Alpokalja Unit, DKHGE – Transdanubian Central Mountain Unit, TE – Tisza Unit]

kezeti vázlatot készíthetünk a szelvény nyomvonalára mentén, amelyet a földtani ismereteink alapján, a felszínen be is tudunk azonosítani. Mivel látszólagos értékekről van szó, a változások hatása csak a szerkezet mélységi megjelenésétől indul, és nagyobb mélységig érezhető a hatása. Azt is érdemes figyelembe venni, hogy minél nagyobb mélységet vizsgálunk, annál nagyobb térrész integrált hatását kapjuk vissza (22. ábra).

Az MTOA-02 szelvény mentén korábbi publikációinkban (Szebenyi 2023, Szebenyi et al. 2024) már a felszínközeli földtani felépítésre bemutattunk egy lehetséges változatot. Ebben a tanulmányban a kéregszerkezeti elemek (Moho- és Conrad-inhomogenitás, mélytörések, magmacsatornák) vizsgálata volt a cél, amihez a gravitációs, mágneses adatokat is felhasználtuk a magnetotellurikus mérési adatok kiegészítésére. Az így kapott földtani értelmezési vázlatot mutatja a 23. ábra.

Az impedanciafázis paramétere alapján bizonytalanul azonosítani lehetett a Moho-szintet, a látszólagos fajlagos ellenállás (vagy látszólagos fajlagos vezetőképesség) alapján a főbb kéregszerkezeti blokkokat, a mélytöréseket – többek között a Dunántúli Vezetőképesség Anomáliát, a Közép-Magyarországi Zónát és a Dráva-árkot. A mágneses Naudy-féle hatókijelöléssel a tömbös bázisos magmás és metamorf testeket lehetett kimutatni, a magnetotellurikus anizotrópiamaximumok a kisebb magmacsatornák lehetséges helyeit mutatták meg. Ezeket az értelmezési vázlaton összevontan mutatjuk meg. Az impedanciafázis paramétere a prekainozoos medencealjzat felszínének nyomon követéséhez adhat segítséget.

## Konklúzió

Ebben a tanulmányban három régi (80-as, 90-es évekbeli), egy viszonylag új (2021. évi) és néhány napjainkban mért új magnetotellurikus mérés kampány anyagát dolgoztuk össze, mivel a szelvények egy nyomvonal mentén, határtól határig mint egy magnetotellurikus alapszelvény (MTOA-02) fűzhetők fel. A magnetotellurikus mérések nagy behatolási mélysége miatt a mérési adatok kéregszintű vizsgálatokra adnak lehetőséget. Néhány érdekes kérdés és ezekhez kapcsolódó megállapítás is felmerül a feldolgozások eredményeképpen.

A látszólagos fajlagos ellenállás és a fázisparaméter a magnetotellurika fő mérési paraméterei, amelyek minden elektromos és mágneses fizikai paraméter hatását tartalmazza, de ezek nem valós, hanem látszólagos fizikai paraméterek. Ha inverzióval a közeg (kőzet) fajlagos ellenállását határozzuk meg, akkor egy többváltozós fizikai teret egyetlen változóval (a közeg vezetőképességével) közelítjük, miközben a többi változóról (mágneses permeabilitás, polarizálhatóság, dielektromos állandó) nincsenek pontos információink.<sup>11)</sup> Ebből adódóan a látszólagos fajlagos ellenállás és a fázisparaméterek objektív mérési paramétereknek tekinthetők, míg az inverzió eredménye emiatt már nem teljesen az.<sup>12)</sup>

Ez pedig azt jelenti, hogy a gyakorlatban kialakult szokás ellenére (mármint hogy csak a kétdimenziós inverzióból kapott fajlagosellenállás-szelvényt jelenítjük meg), mindkét iránynak megfelelő látszólagos fajlagos ellenállás és fázisparamétert meg kell jeleníteni, dokumentálni és vizsgálni is kell azokat! Ez rögtön megmutatja a közeg jellegét (egy- vagy többdimenziós) és az irányanizotropia mértékét is. Erre korábbi cikkünkben (Kiss, Szebenyi 2023) is mutattunk példákat.

A földtani értelmezéshez az is fontos, hogy vertikális skála ne a frekvencia legyen (az ilyen szelvényt hívják pszeudoszelvénynek – „pseudosection”), hanem a mélység szerint jelenítsük meg az eredményeket, azaz mélységmetszetet készítsünk. Ebben az esetben a relatív sűrűség, relatív mágnesezettség vagy szeizmikus refrakciós, illetve reflexiós mélységszelvény adatait (amennyiben vannak) összevethetjük a magnetotellurikus mérési adatokkal. Mivel a mélyfúrások mélysége és az ipari szeizmikus mérések behatolási mélysége ritkán haladja meg a néhány kilométert, így a kéregszintű elektromágneses vizsgálatoknál a kiegészítő adatok ismeretére (gravitációs, mágneses, szeizmikus) feltétlen szükség van.

## A tanulmány szerzői

Kiss János, Szebenyi Renáta, Lukács Tamás

## Jegyzetek

- <sup>1)</sup> CSAMT – „Controlled Source Audio-frequency MagnetoTellurics”, azaz mesterséges forrású MT.
- <sup>2)</sup> RMTS2 – az ELGI saját készítésű MT műszere.
- <sup>3)</sup> ADU-7 – német „Metronix” műszer.
- <sup>4)</sup> PHOENIX – kanadai „Phoenix Geophysics” műszer.
- <sup>5)</sup> vkm – vonal kilométer (nem mélység, hanem távolság mértékegység).
- <sup>6)</sup> Anizotrópiamaximum, azaz AniMax =  $|\rho_{xy}/\rho_{yx}| + |\rho_{yz}/\rho_{zy}|$ .
- <sup>7)</sup> A fázis az impedancia valós és képzetes része közötti fázisszögöt mutatja, amely a szakirodalom alapján a közeg vezetőképességétől függ. Homogén feltér esetén, azaz ha nem változik a fajlagos ellenállás ( $\rho_a = \text{állandó}$ ), akkor a fázis értéke  $45^\circ$  lesz. Amennyiben változik a fajlagos ellenállás ( $\rho_a \neq \text{állandó}$ ), akkor a fázis ( $\varphi$ ) értéke is változni fog. Ha csökken az elektromos vezetőképesség (vagy nő a fajlagos ellenállás), akkor a fázis értéke kisebb lesz, míg ha nő a vezetőképesség (csökken a fajlagos ellenállás), akkor a fázis értéke nagyobb lesz, amint azt a szakirodalom már a kezdetektől ismerteti (Berdicsevszkij 1968), bár ezt eddig nem használtuk fel.
- <sup>8)</sup> A fajlagos ellenállást elsődlegesen a fém-, grafit- és elektrolit-tartalom – a szabad elektronok és a mobilis ionok mennyisége – határozza meg.
- <sup>9)</sup> A sűrűség alapvetően az anyagi összetételtől, a szilárd kőzetváz szerkezetétől, tömörségétől, a pórustérfogattól és a pórusteret kitöltő anyagtól függ, amely lehet folyadék és gáz is.
- <sup>10)</sup> A fajlagos vezetőképességet (conductivity [S/m]) a fajlagos ellenállás (resistivity [ $\Omega\text{m}$ ]) reciprokt értékeként kaphatjuk meg ( $\sigma = 1/\rho$ ). Mivel egymás reciprokt értékei, így az egyik a jól vezető közegre, a másik a szigetelő közegre lesz érzékenyebb a megjelenítés során ( $S/m = 1/\Omega\text{m}$ ).
- <sup>11)</sup> A klasszikus magnetotellurikus feldolgozásokban a mágneses permeabilitást, az elektromos permittivitást, valamint az elekt-

romos polarizálhatóságot állandónak feltételezik, ami a gyakorlatban sokszor nem teljesül.

<sup>12)</sup> Az ekvivalens megoldások lehetősége, az inverzió jellege (konvergáló vagy divergáló) is bizonytalanságokat eredményez a földtani modell leképzésekor.

## Hivatkozások

- Ádám A. (1992): A dunántúli elektromos vezetőképesség-anómália földtani és módszertani jelentősége, Akadémiai székfoglaló: 1990. szeptember 24. Értekezések, emlékezések. Akadémiai Kiadó, Budapest. ISBN 963-05-6403-3
- Berdicsevszkij M. N. (1968): Geoelektromos kutatás magnetotellurikus szelvényezéssel. Nyedra Kiadó, Moszkva, p. 255.
- Bodoky T., Kiss J. (2020): Újabb vizsgálatok a feltételezett dabronyi becsapódási szerkezettel kapcsolatban. Magyar Geofizika, 61/1, 19–27.
- Kiss J., Szarka L., Prácser E. (2023): Mágneses torzulások a magnetotellurikában. A klasszikus MT feldolgozási eljárások várható torzulásai mágneses közeg megjelenése esetén, 2D direkt modellezés eredményei extrém nagy mágneses permeabilitás esetén. Magyar Geofizika, 64/1, 1–15.
- Kiss J., Szebenyi R. M. (2023): Dunántúli magnetotellurikus MTOA-01 alapszelvény (CEL07 litoszférakutató szeizmikus-tomográfia-szelvény mentén). Magyar Geofizika, 64/2, 78–94.
- Kiss J., Vértesy L. (2020): A potenciáltér-anomáliák paraméterfüggősége és spektrális mélységmetszetek. Magyar Geofizika, 61/1, 8–18.
- Kiss J., Zilahi-Sebess L., Szarka L. (2011): A mágnesség jelensége és a Hopkinson-effektus. Magyar Geofizika, 52/3, 151–169.
- Szebenyi R. (2023): Magnetotellurikus adatok feldolgozása a Dunántúlon, egy mintaszelvény alapján. Diplomamunka, ELTE, Földrajz- és Földtudományi Intézet, Geofizikai és Őrtudományi Tanszék, Budapest
- Szebenyi R., Kiss J. (2024): Regional-scale magnetotelluric data processing and interpretation in Transdanubia, Hungary. Poster, EGU General Assembly 2024
- Szebenyi R. M., Kiss J., Héja H. G. (2024): Using archived magnetotelluric data for geologic interpretation in the Transdanubian Region. Acta Gedaetica et Geophysica, DOI: 10.1007/s40328-024-0440-3
- Takács E. (1979): Geofizika. Geoelektromos kutatómódszerek I. Tankönyvkiadó, Budapest, p. 208.
- Zsdanov M. (1986): Geoelektromos kutatások. Nyedra Kiadó, Moszkva, p. 316.