

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

KISS J.<sup>1,@</sup>, SZEKENYI R. M.<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup>ELTE, Földrajz- és Földtudományi Intézet, Geofizikai és Űrtudományi Tanszék  
<sup>@</sup>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.

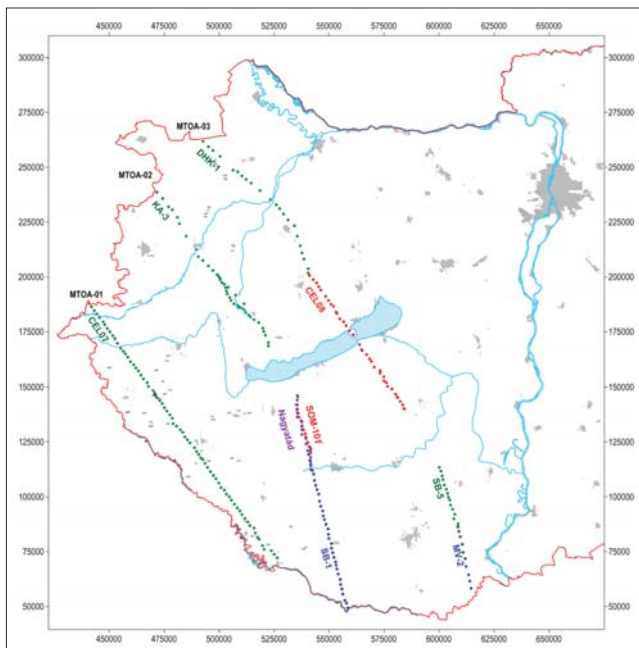
\* MTOA – *MagnetoTellurikus Országos Alapszelvény* (MagnetoTelluric Country-side/National Base Section)  
(MTOA-01 magnetotellurikus alapszelvény = CEL07 litoszférakutató szeizmikus szelvény)

## 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 folytatódhatnak, 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 (Szébényi 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.

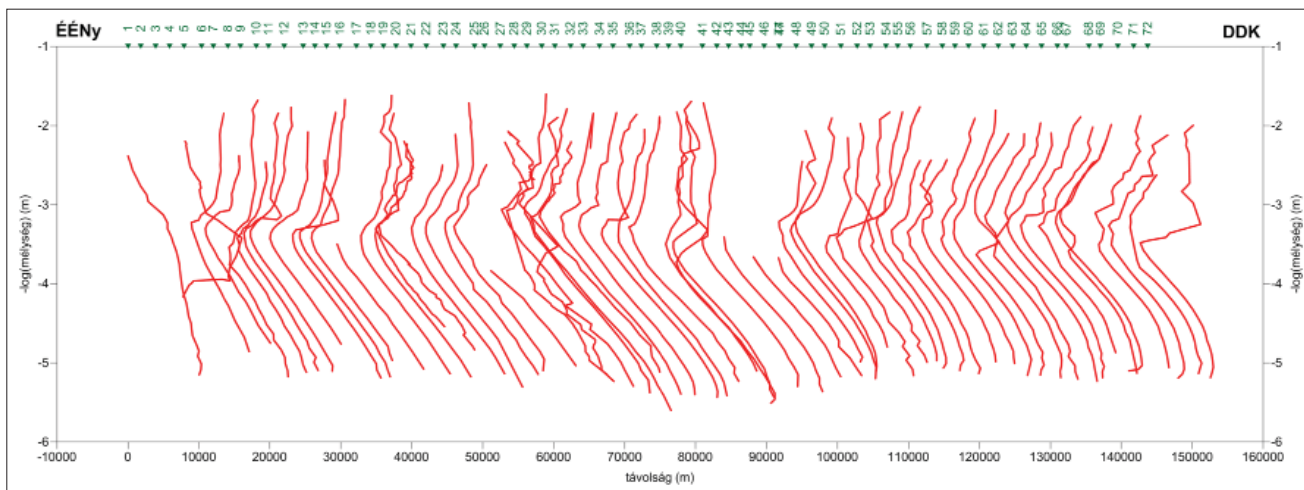
Az új magnetotellurikus feldolgozásokat módszertani kutatás előzte meg, amely a magnetotellurikus mérések E- és H-polarizációs méréseinek eltérését vizsgálta, azaz a fizikai tulajdonságokba megjelenő anizotrópiát. Erre legmegfelelőbbnek az AniMax (a  $\rho_{xy}/\rho_{yx}$  és a  $\rho_{yz}/\rho_{zy}$  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 vkm<sup>1</sup> 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 ( $\rho_{xy}$ ) szondázási görbék az MTOA-01 (CEL07) szelvény nyomvonalában (nagyon zajos görbék és pontszerű zajok kiszűrve) logaritmus mélységskála mentén

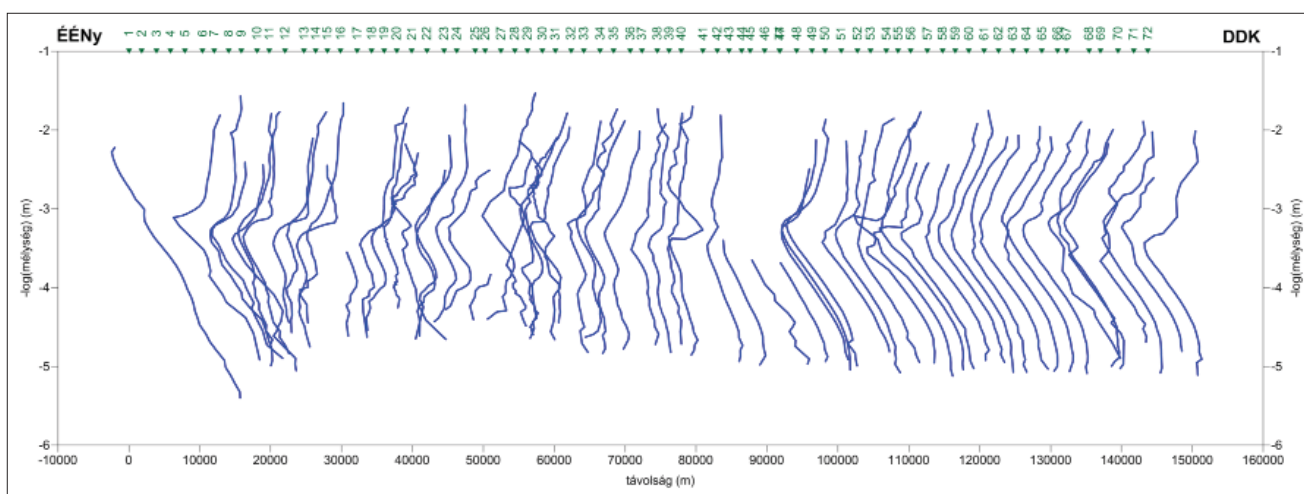
**Figure 2** Apparent resistivity ( $\rho_{xy}$ ) curves calculated from magnetotelluric impedance ( $Z_{xy} = E_x/H_y$ , H-polarization, ZROT = 0) along the trace of the MTOA-01 (CEL07) section (very noisy curves and point noises filtered out) along a logarithmic depth scale

A 2. és 3. ábra magnetotellurikus impedanciából ( $Z$ ) kiszámolt látszólagos fajlagos ellenállás<sup>2)</sup> ( $\rho$ ) 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-mélység<sup>3)</sup> 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-

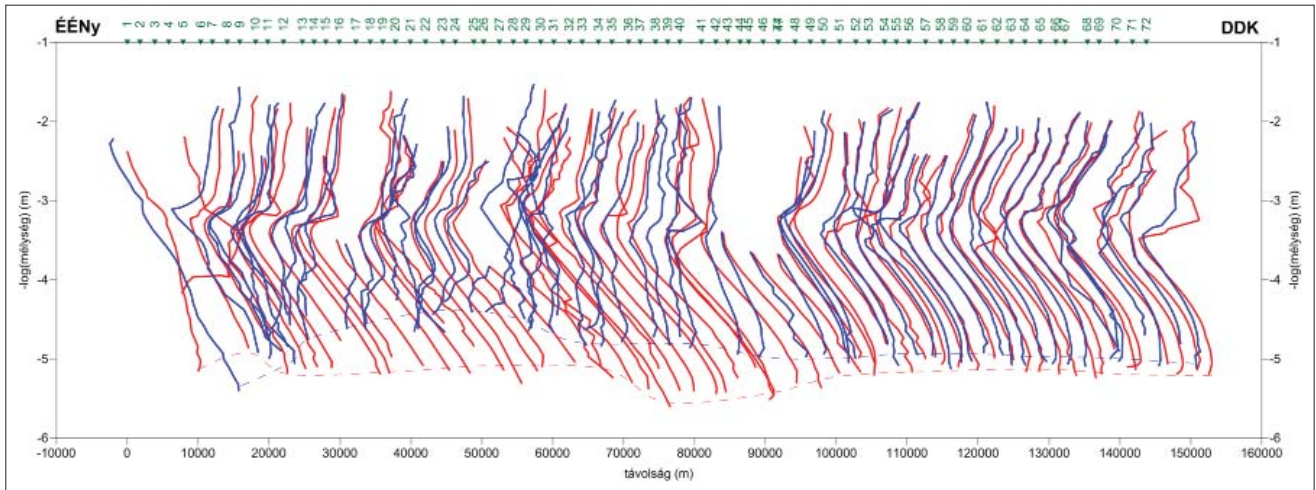
tés során az egyponos zajokat szubjektív úton eltüntettük a görbékről. Vannak nagyon zajos használhatatlan görbék (nincsenek megjelenítve), és vannak zajos, de használható görbék is (korrigált formában jelennek meg).

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-



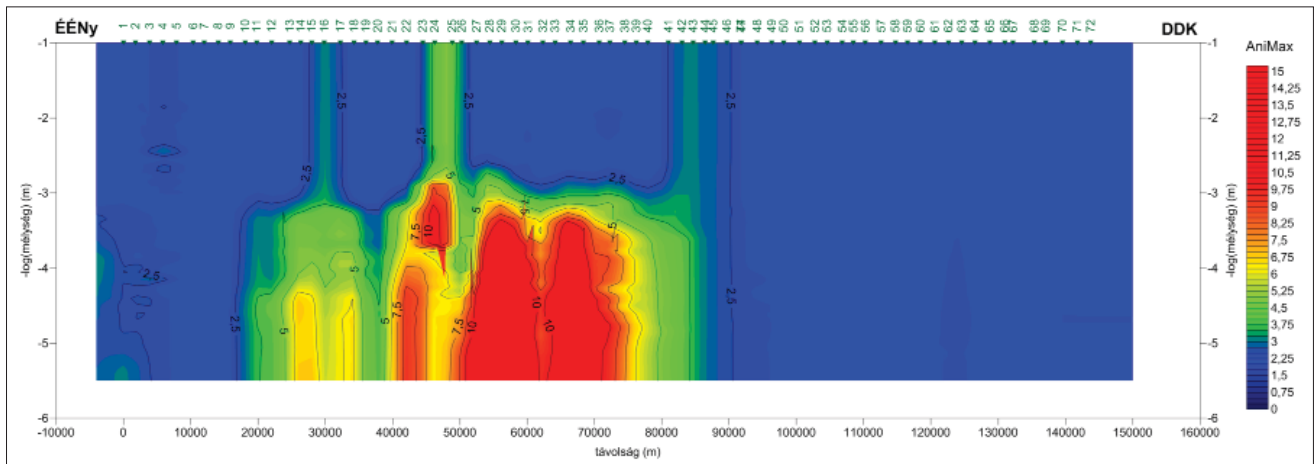
**3. ábra** Magnetotellurikus impedanciából ( $Z_{yx} = E_y/H_x$ , E-polarizáció, ZROT = 0) kiszámolt látszólagos fajlagos ellenállás ( $\rho_{yx}$ ) szondázási görbék az MTOA-01 (CEL07) szelvény nyomvonalában (nagyon zajos görbék és pontszerű zajok kiszűrve) logaritmus mélységskála mentén

**Figure 3** Apparent resistivity ( $\rho_{yx}$ ) 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



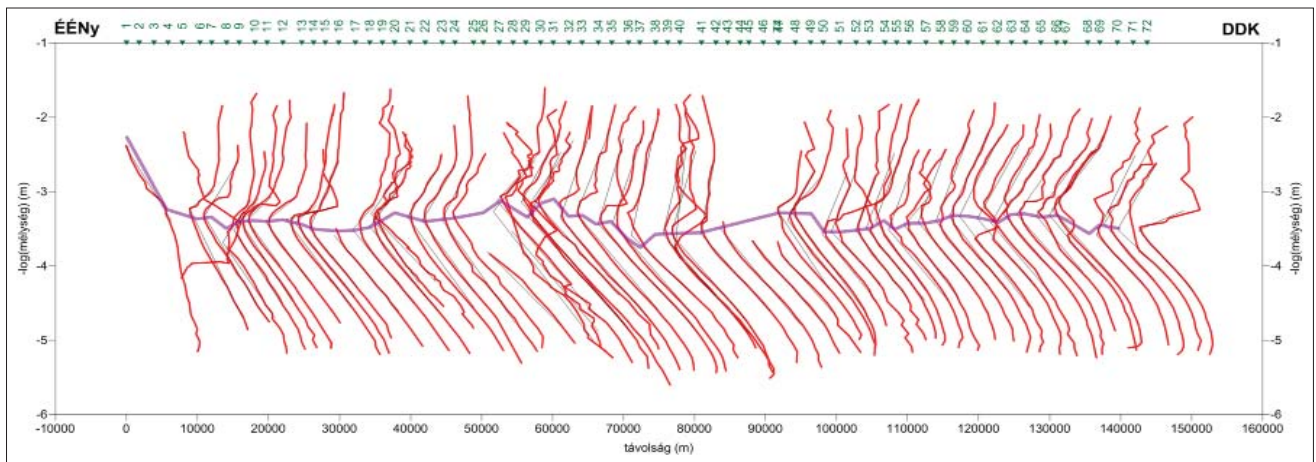
4. ábra H-polarizációs (piros) és E-polarizációs (kék) látszólagos fajlagos ellenállásgörbék (nagyon zajos görbék és pontszerű zajok kiszűrve) logaritmikus mélységskála mentén

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



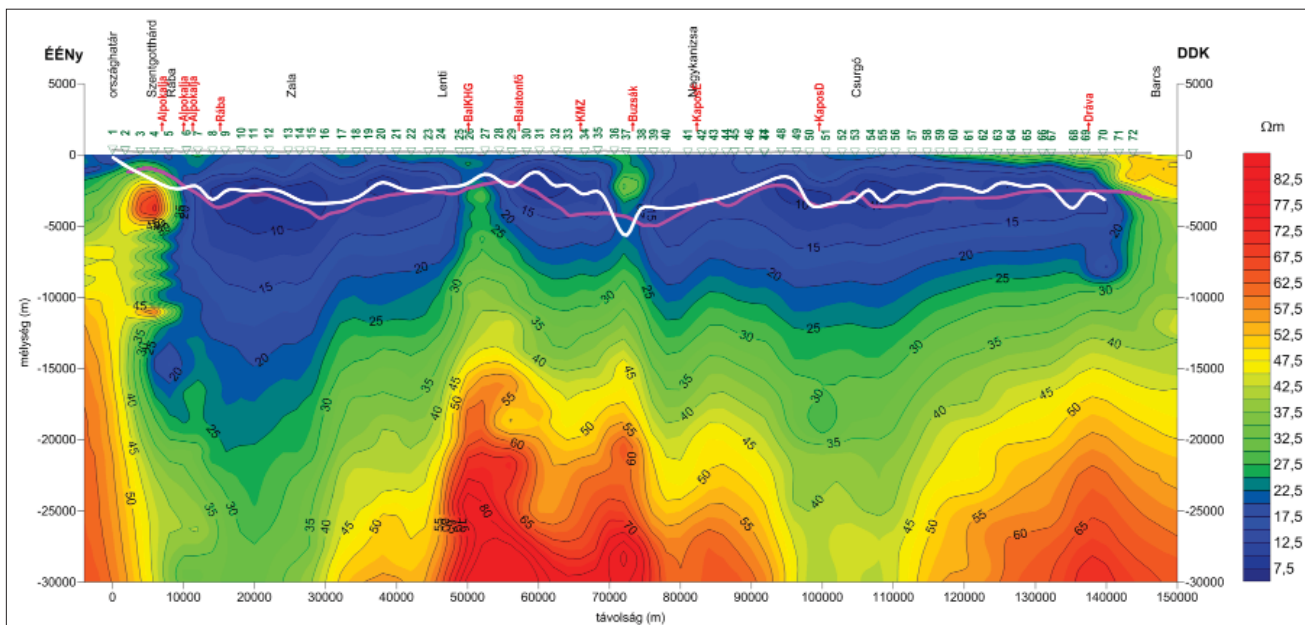
5. ábra Anizotropiamaximumok (AniMax) a szűretlen görbék alapján az MTOA-01 (CEL07) szelvény mentén (logaritmikus mélységskála!)

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 ( $\rho_{xy}$ ) szondázási görbéken az MTOA-01 (CEL07) szelvény nyomvonalában

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

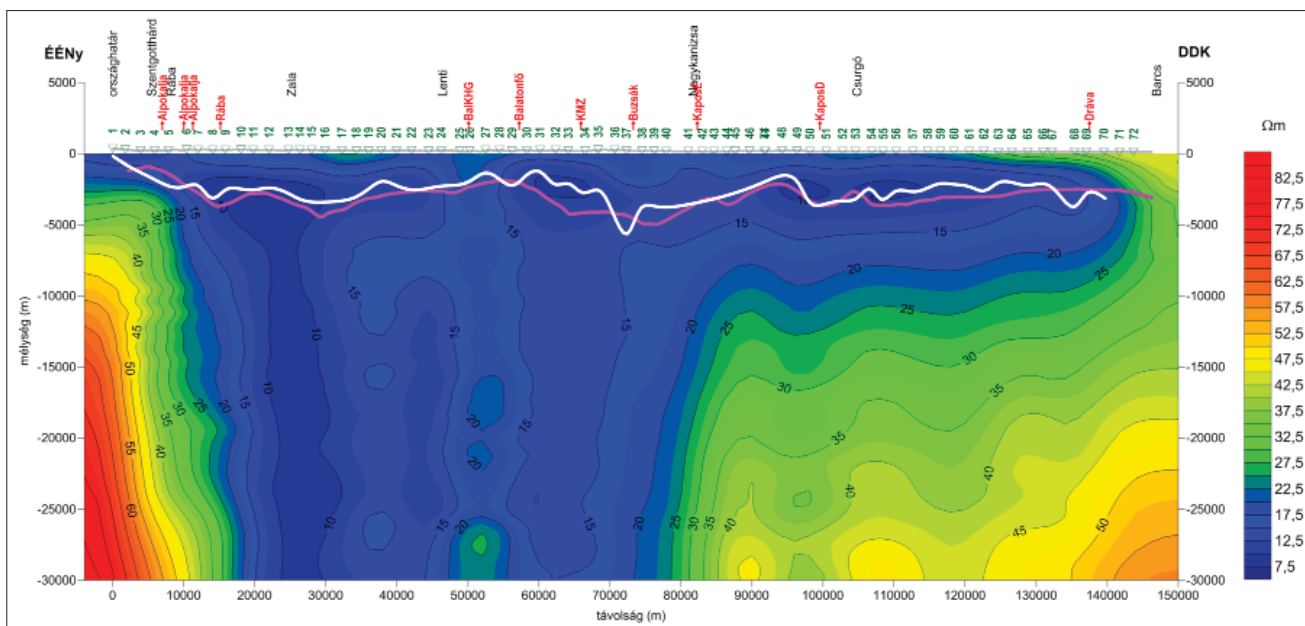


7. ábra | CEL07MT látszólagos fajlagosellenállás- ( $\rho_{xy}$ ) mélységshelvény (TM), rajta a Haas-féle (2010) medencealjzatszint  
 Figure 7 | CEL07MT apparent resistivity ( $\rho_{xy}$ ) depth section (TM) with the basement level (Haas et al. 2010)

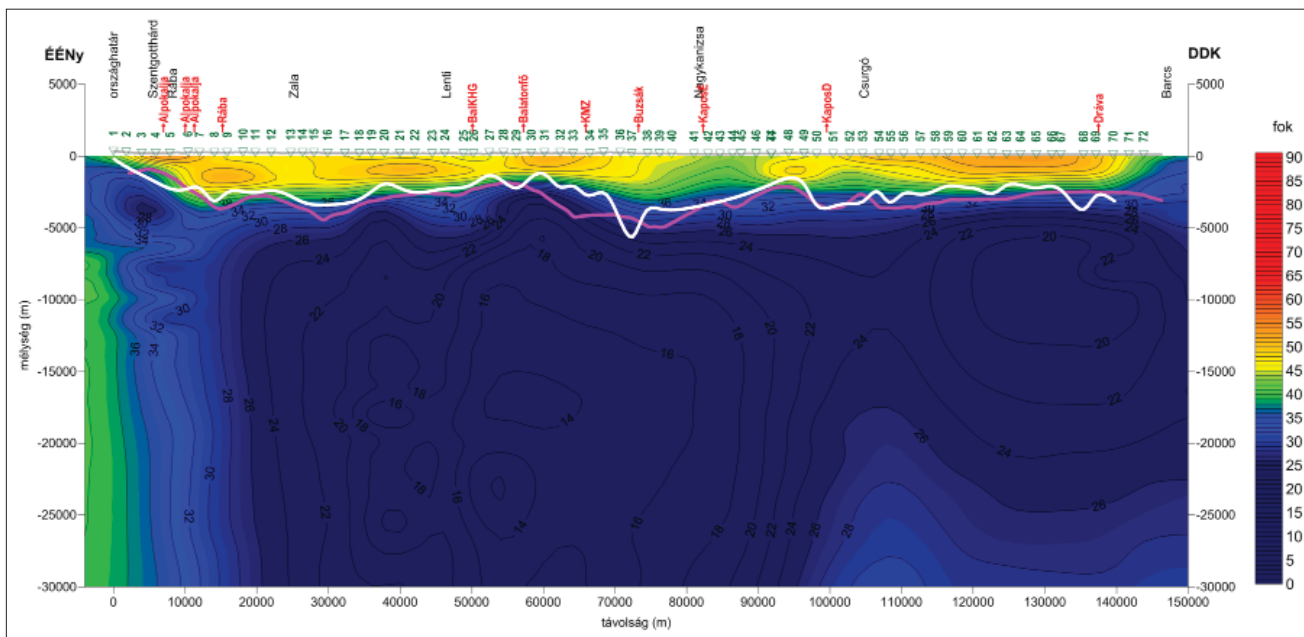
sonló lefutást mutat, és nem jelentkezik másféle hatás (pl. mágnesezettség). D felé érzékelhető csak az ellenállás-görbék meredekségének csökkenése. Ahol a görbék azonos lefutásúak, ott 1D modellről beszélhetünk. Ahol a H és E-polarizációs görbék eltérő menetet mutatnak, ott a 2D vagy 3D modellel van 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, Prácsér 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- ( $\rho_{yx}$ ) mélységshelvény (TE), rajta a Haas-féle (2010) medencealjzatszint  
 Figure 8 | CEL07MT apparent resistivity ( $\rho_{yx}$ ) depth section (TE) with the basement level (Haas et al. 2010)



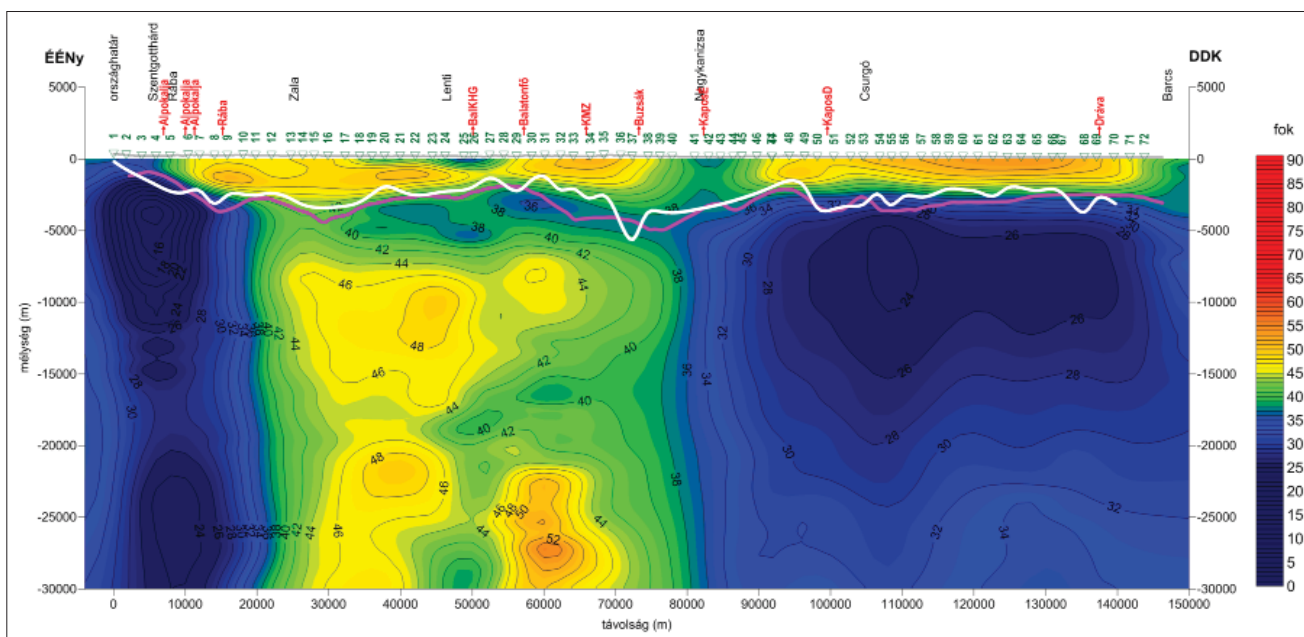
9. ábra | CEL07MT fázis- ( $\varphi_{xy}$ ) mélységszelvény (TM), rajta a Haas-féle (2010) medencealjzatszint  
 Figure 9 | CEL07MT phase ( $\varphi_{xy}$ ) depth section (TM) with the basement level (Haas et al. 2010)

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

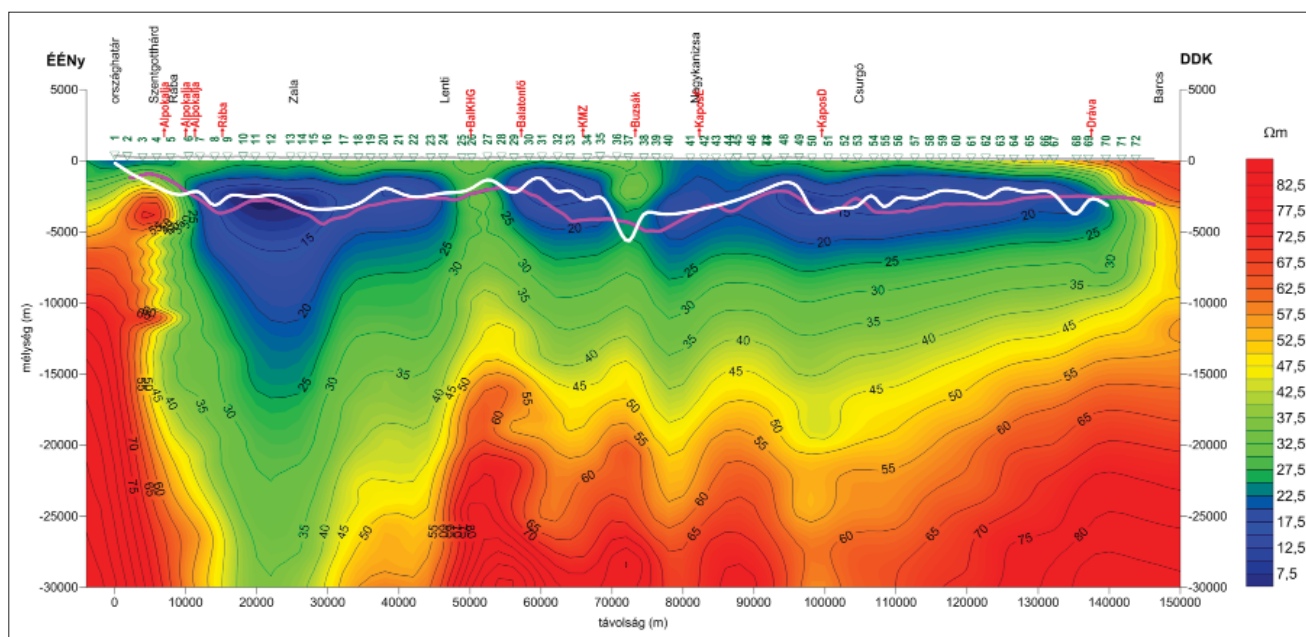
Másik érdekesség a görbéken az, hogy az eltérő polarizációs görbéknek ugyanazon a frekvencián eltérő a behatolási mélysége (4. ábra, szaggatott vonalakkal összekötött szondázási görbévegek), ami arra utal, hogy vagy a vezetőképességben jelentős eltérés van, vagy mágneses képződményeket detektálnak a 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 ( $\rho_{xy}$ ) szondázási görbéinek legkarakterisztikusabb törése (6. ábra)



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



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

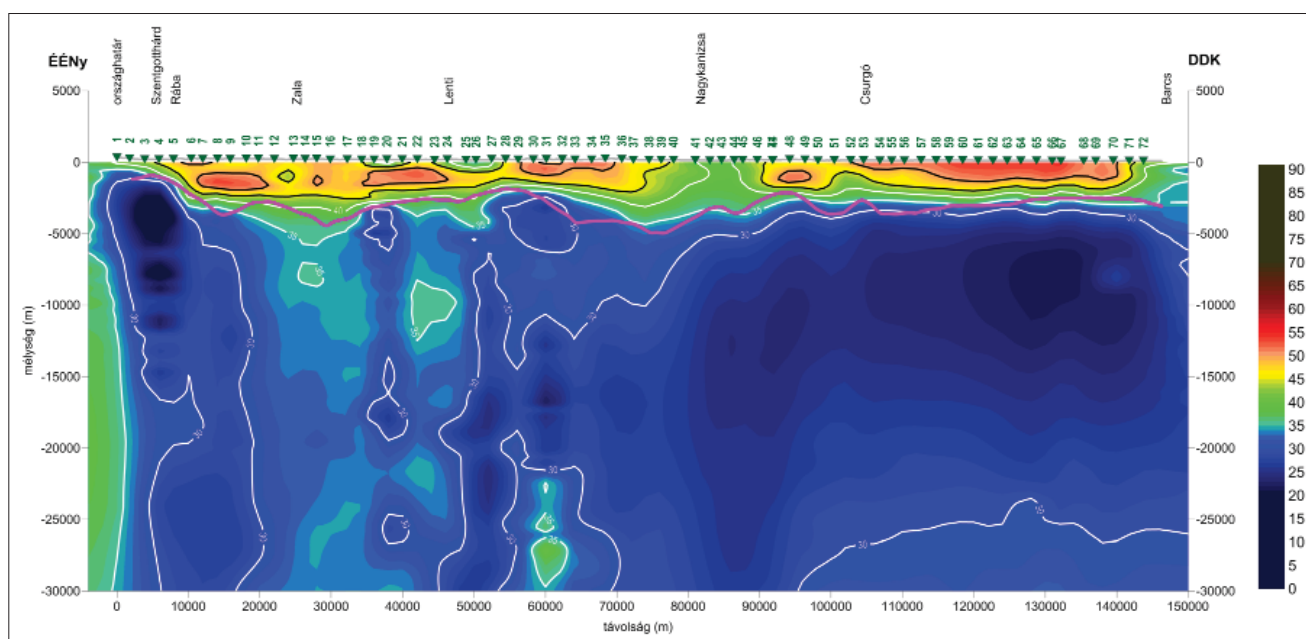
Figure 11 | CEL07MT analytical apparent resistivity section with the basement level (Haas et al. 2010)

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 összevetethetők az eredmények.

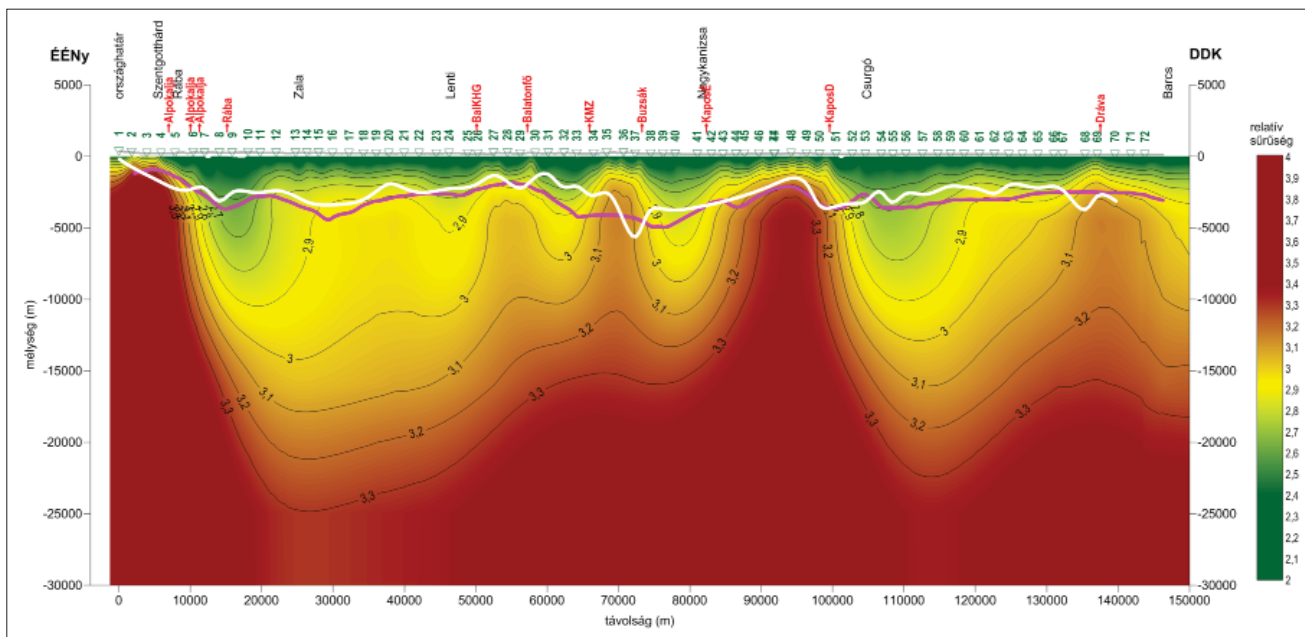
A látszólagos fajlagos ellenállás- (7. és 8. ábra) és fázis-mélységszelvényeket Gauss-szűrővel simítottuk, hogy a zajból származó nagyfrekvenciás változásokat kiszűrjük, így egy robusztus, de jól használható paramétereloszlást kaptunk. A szelvények eleje és vége hasonló lefutást mutat, ugyanakkor a középső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

A fázisparaméter<sup>4)</sup> 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)

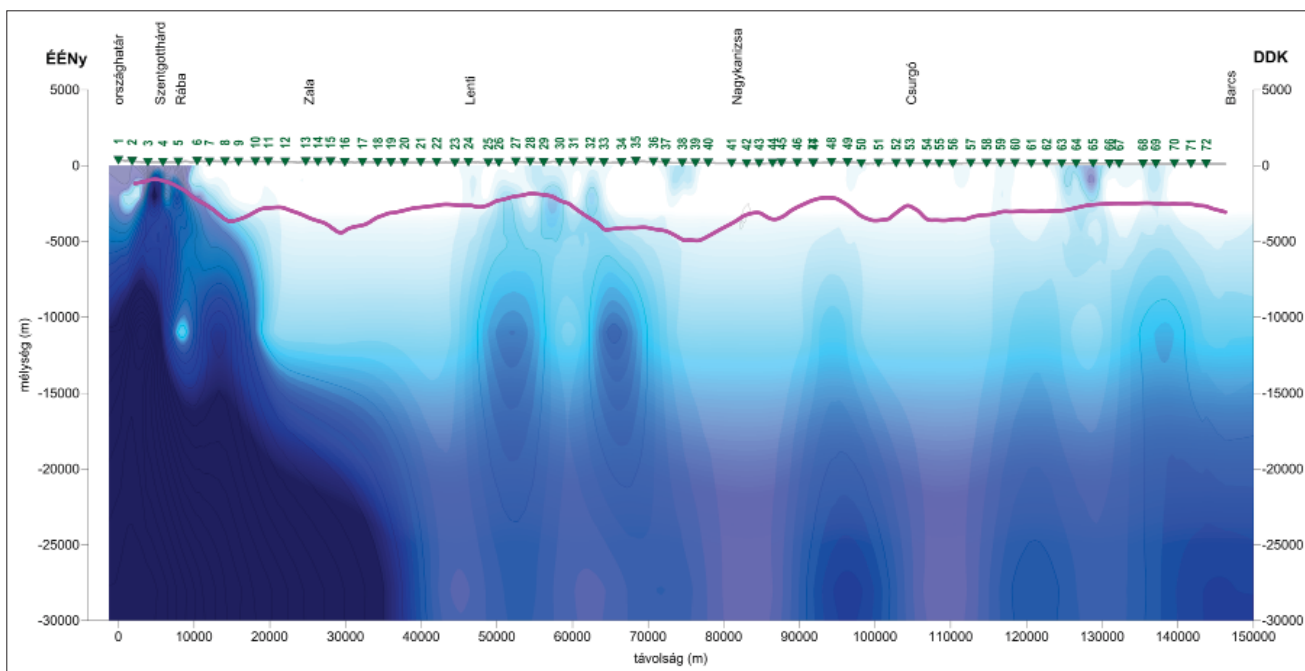
medencealjzat felszínét H-polarizációban (9. ábra), mert ott jön a váltás (35°–40° között, a kék-zöld színváltás helyén), de ez jelzi a szerkezeti zónát is ott, ahol az anizotrópia miatt leginkább várható, azaz E-polarizációban (10. ábra).

Az E- és H-polarizációs látszólagos fajlagosellenállás-metszetek eltérése miatt célszerű volt kiszámolni az analitikus<sup>5</sup> 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  $\rho$  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 mélységre 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, metamorfjtjai jól elkülönülnek. Felismerhetőek a felszínközeli is megje-

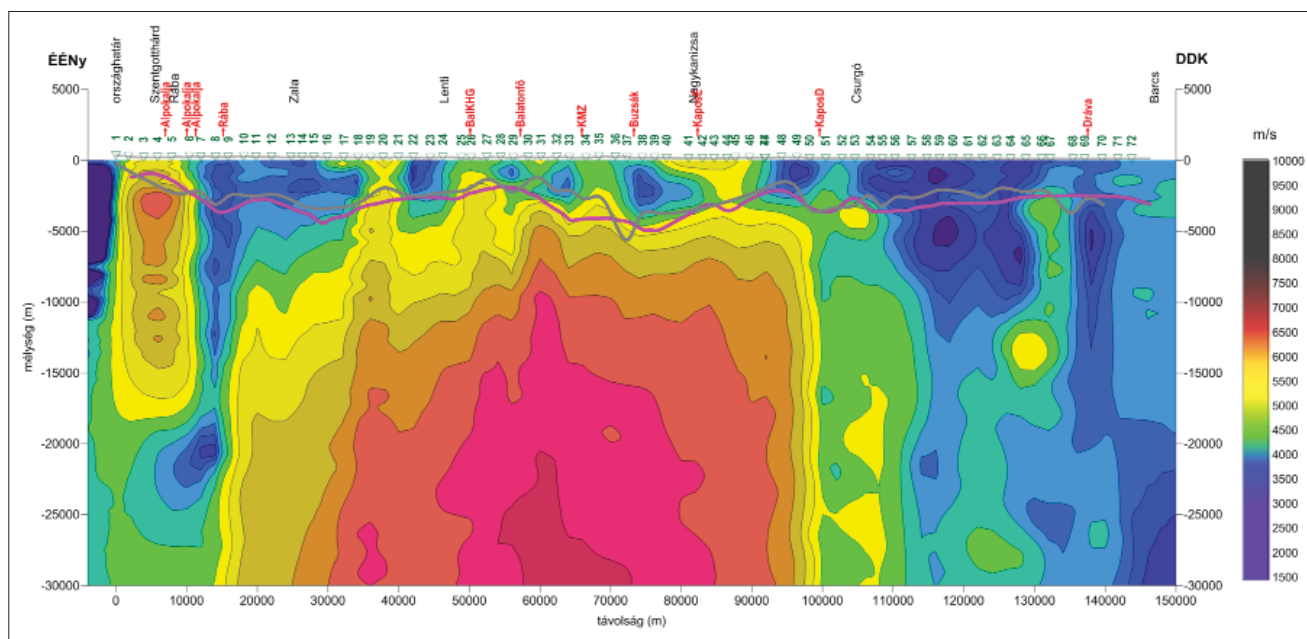
lenő miocén vulkanitok anomáliái (50–60 vkm) és egy mélybeli ható (intrúzió, szubvulkáni képződmény 95 vkm-nél), amely a mélyben megrekedve megemeli a medencealjzat szintjét.

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.

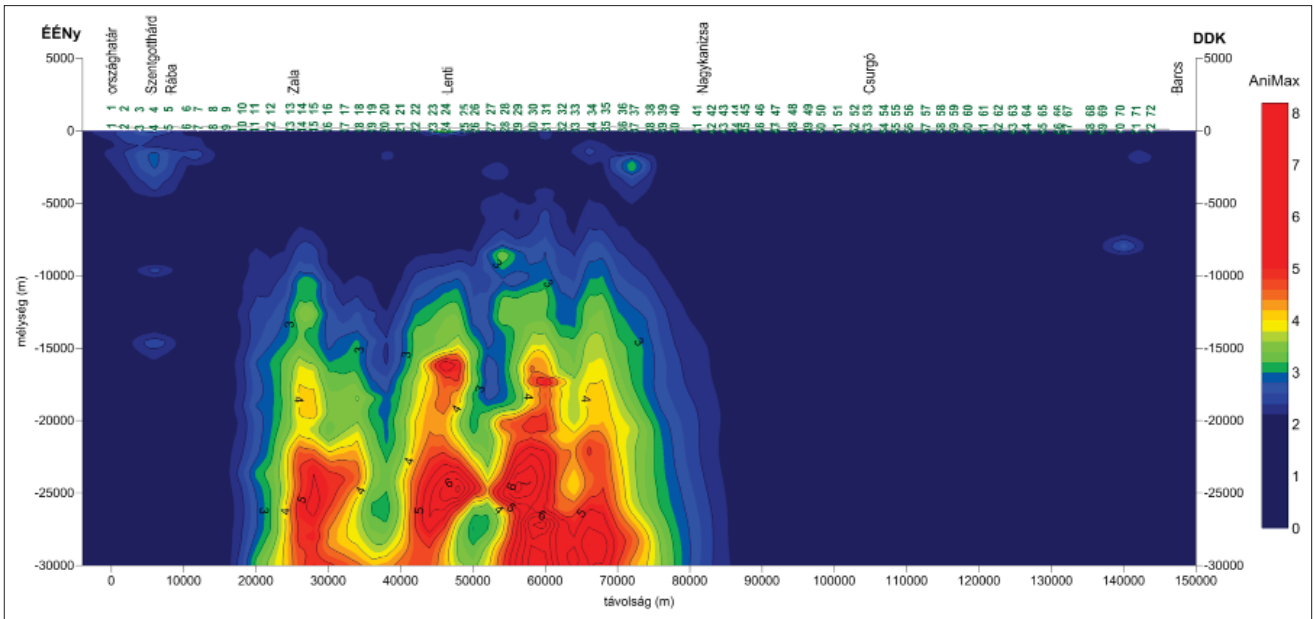
A 16. ábra az anizotrópiamaximumot mutatja, amelyet a különböző polarizációkban meghatározott ellenállás-értékek arányaiból képeztük. A nagy AniMax<sup>6</sup>-értékek esetében már feltételezhető a mágneses képződmények jelenléte, illetve azok határfelületeinek hatása (Kiss et al. 2020, Kiss, Prácsér 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).

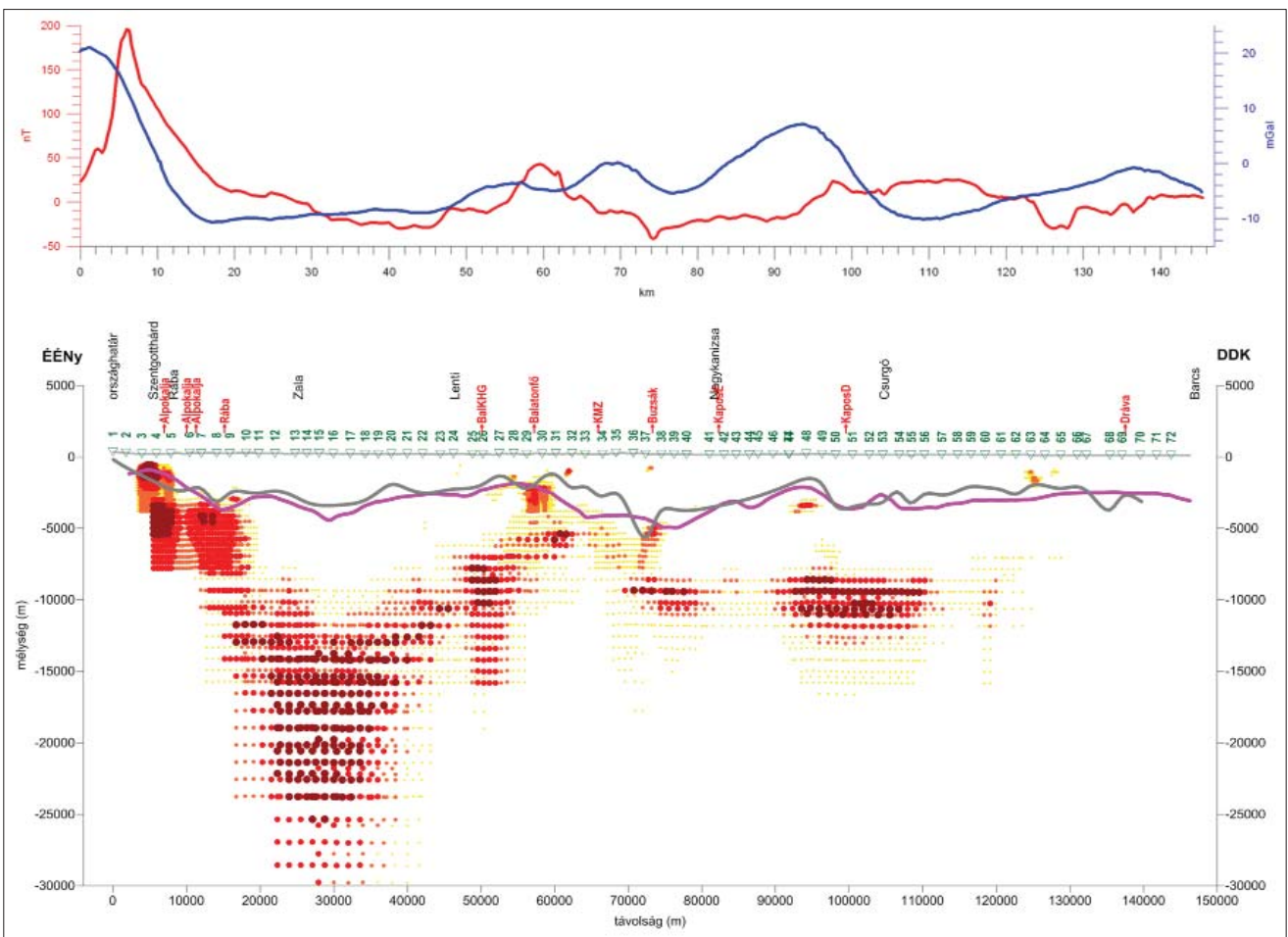
A mágneses közeg detektálásában segíthetnek továbbá a magnetotellurikus mérések mágnesezettségre utaló anizotrópiamaximum-szelvények. A CEL07 szelvény esetében a mágneses Naudy-féle feldolgozási eredmények rásimulnak az anizotrópiamaximukra, jelölve az anizotrópiát okozó közeg határfelületét (18. ábra).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



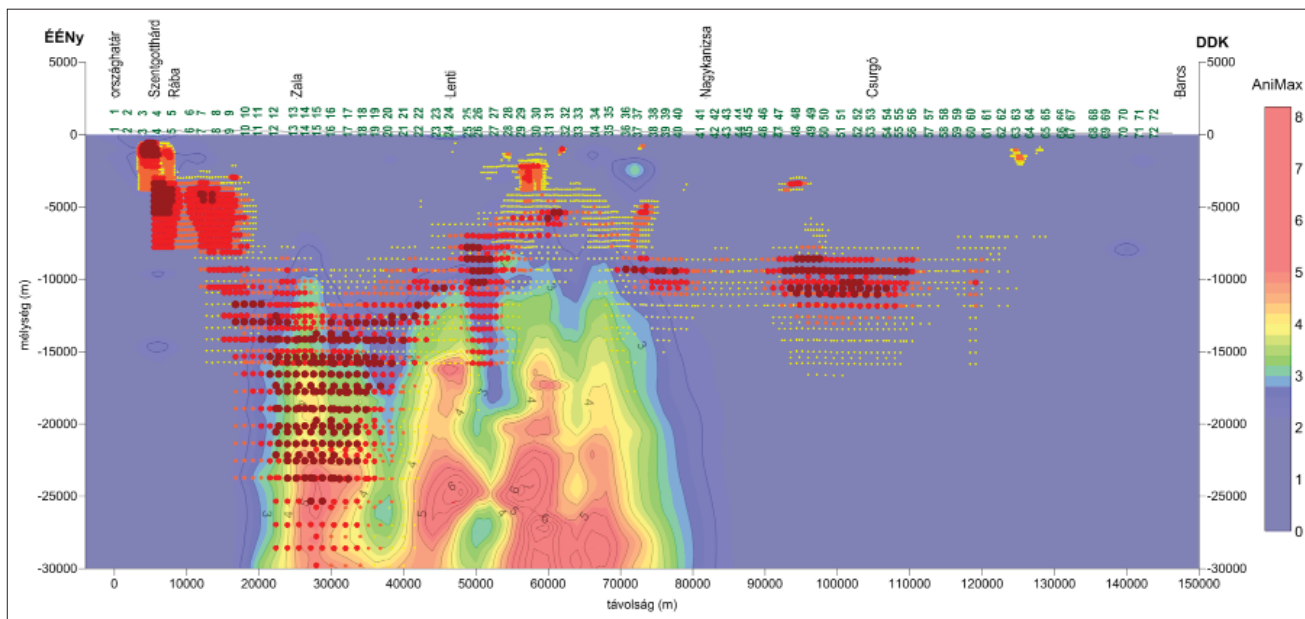
15. ábra | Az MTOA-01 (CEL07) vertikális EM energiaterjedés sebessége, rajta a Haas-féle (Haas et al. 2010) medencealjzatszint  
Figure 15 | MTOA-01 (CEL07) vertical EM energy propagation velocity, showing the basement level (Haas et al. 2010)



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-kenozoos 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)

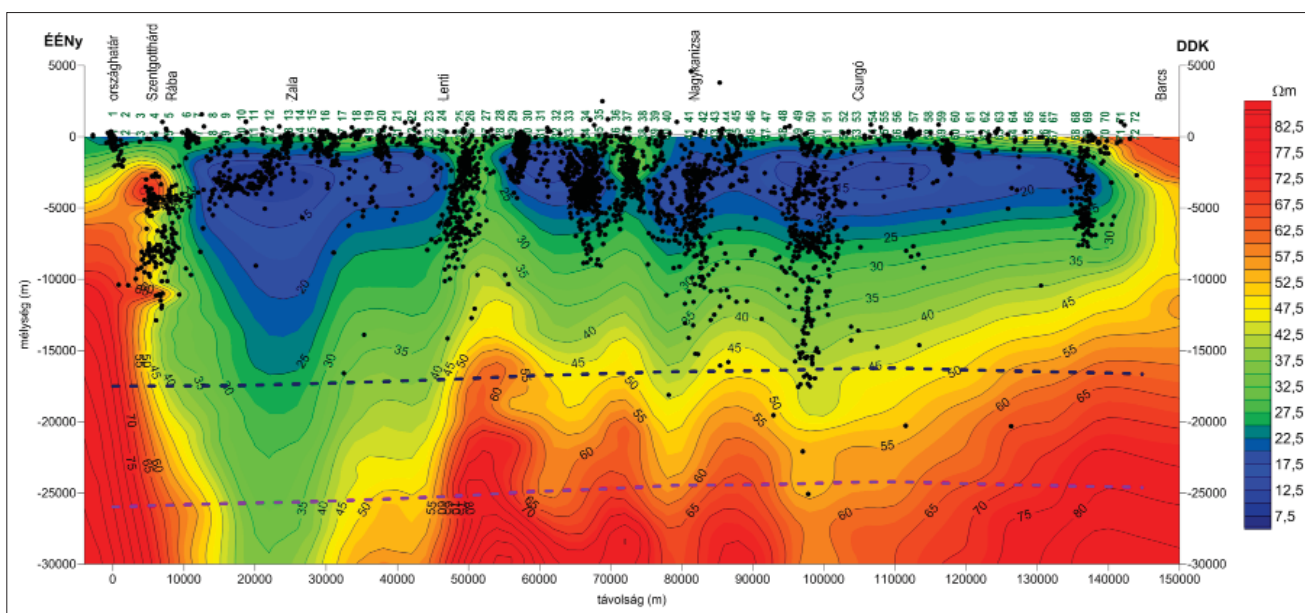
Figure 18 | Combination of the contents of Figs. 16 and 17 along the MTOA-01 (CEL07) section (Naudy's magnetic causative bodies on the AniMax section)

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 gravitációs-ható-kijelölés alapján) a 80 vkm

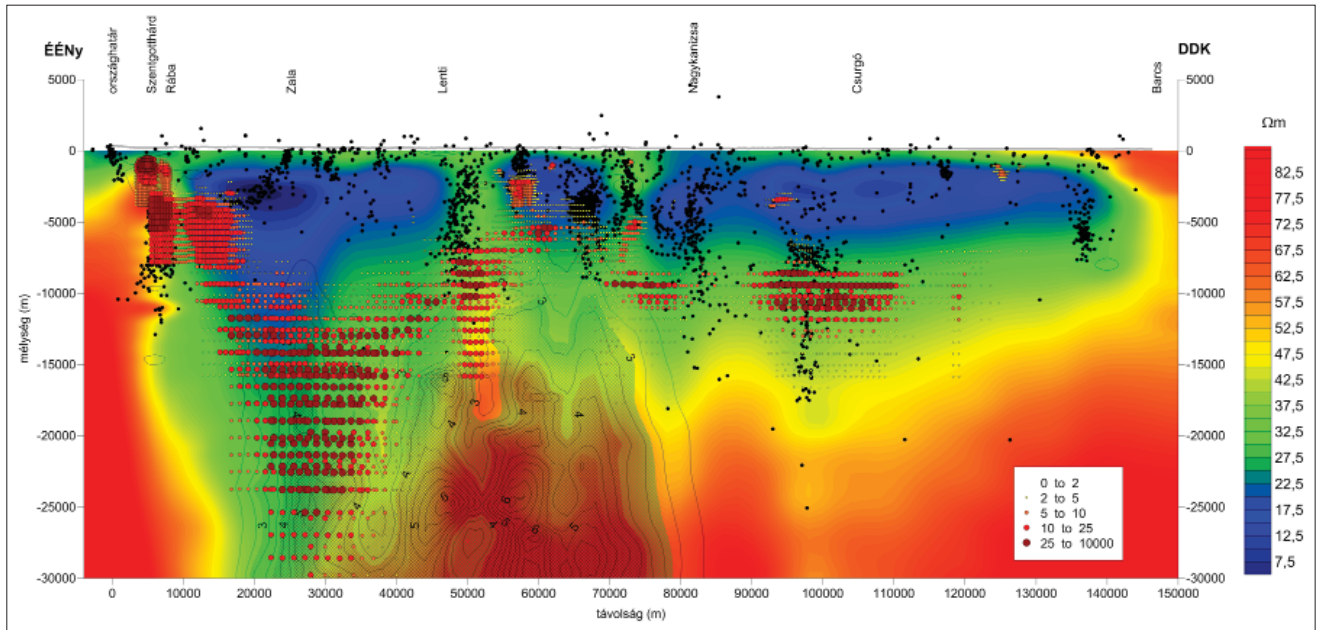
(Nagykánizsa) körüli, a 21. ábra alapján 100 vkm-nél adható meg.

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))

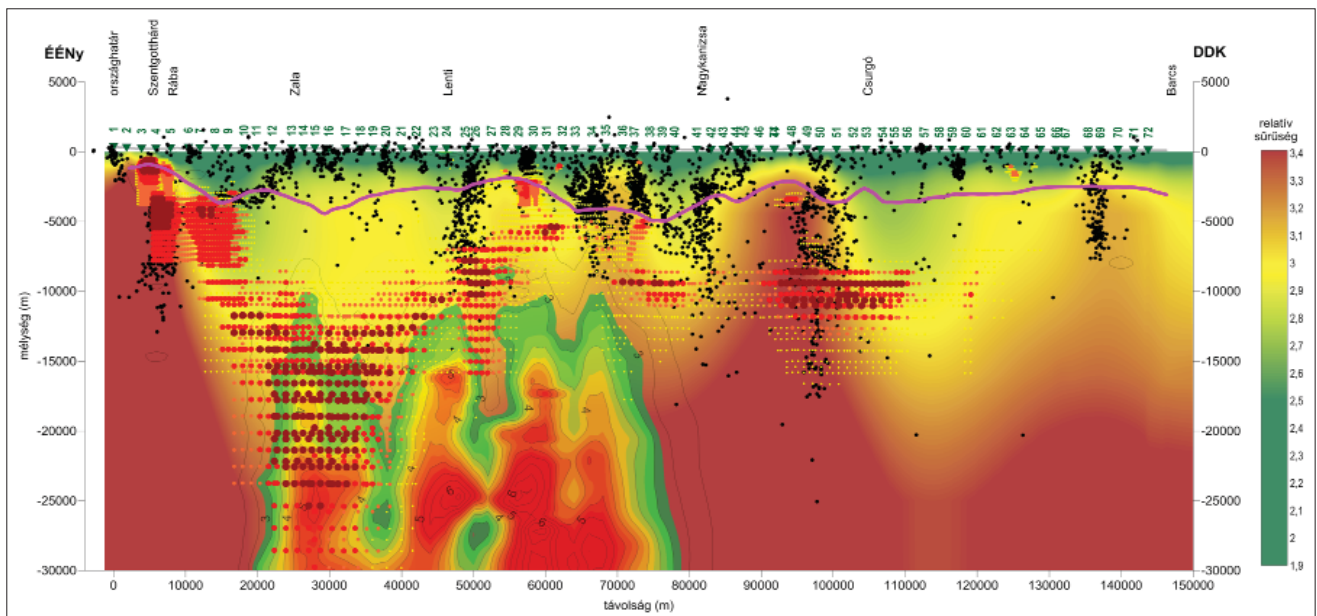
**Figure 20** Combination of the contents of Figs. 11 and 18 along the MTOA-01 (CEL07) section (*base*: analytical apparent resistivity, with AniMax section with hatches, plus magnetic Naudy solutions and results of automatic gravity Werner and Euler deconvolutions)

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-

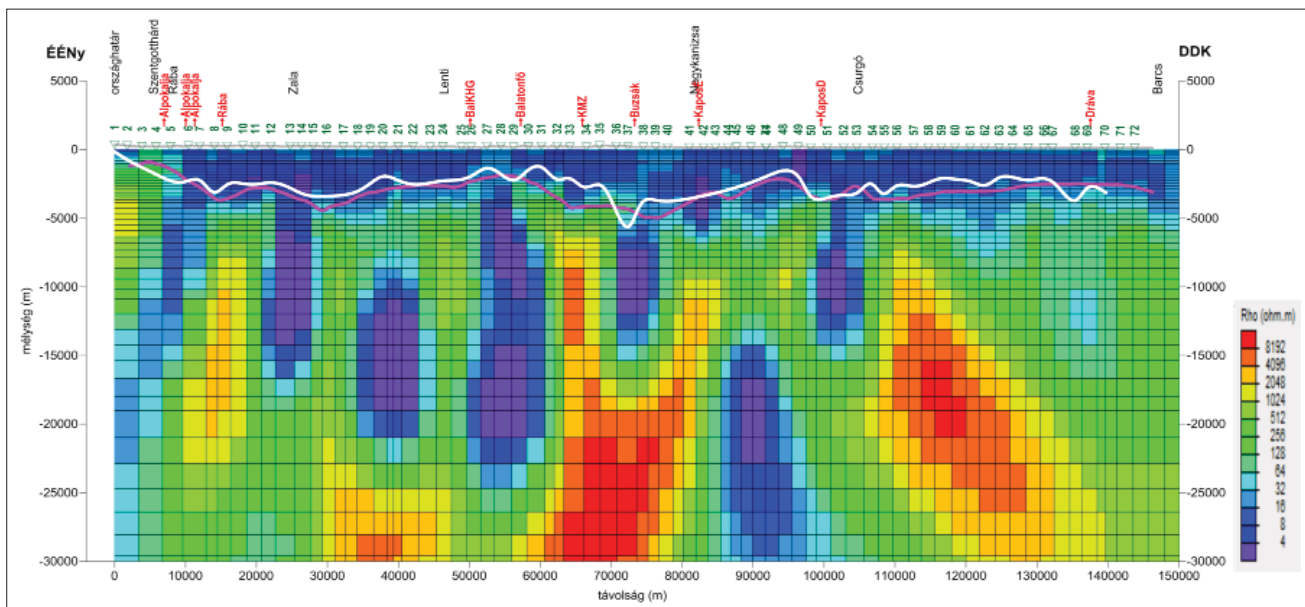
gos ellenállás inverziós modelljéhez (23. ábra) az Alpok és Nagykanizsa közötti térrészben.

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 mélységével (püspöklika 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))



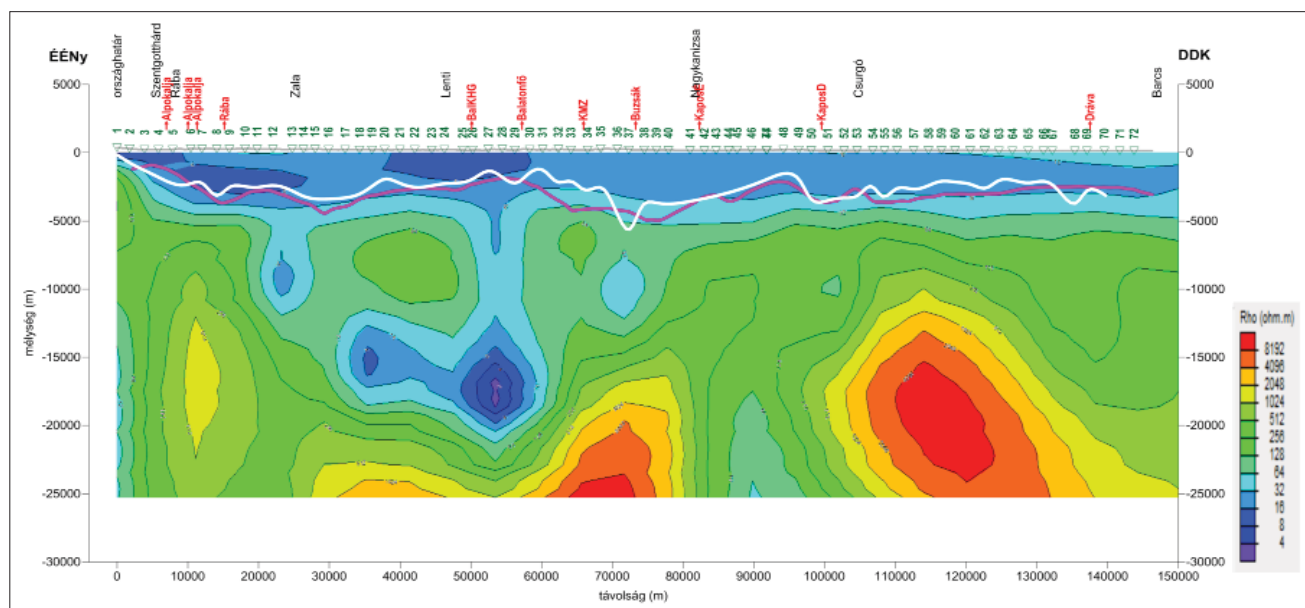
22. ábra A CEL07MT kétdimenziós inverziója (Rodi, Mackie 2001), fajlagos ellenállás inverziós rács, rajta a Haas-féle (Haas et al. 2010) medencealjzatszint

Figure 22 Two-dimensional inversion (Rodi, Mackie 2001) of CEL07MT, specific resistance 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).

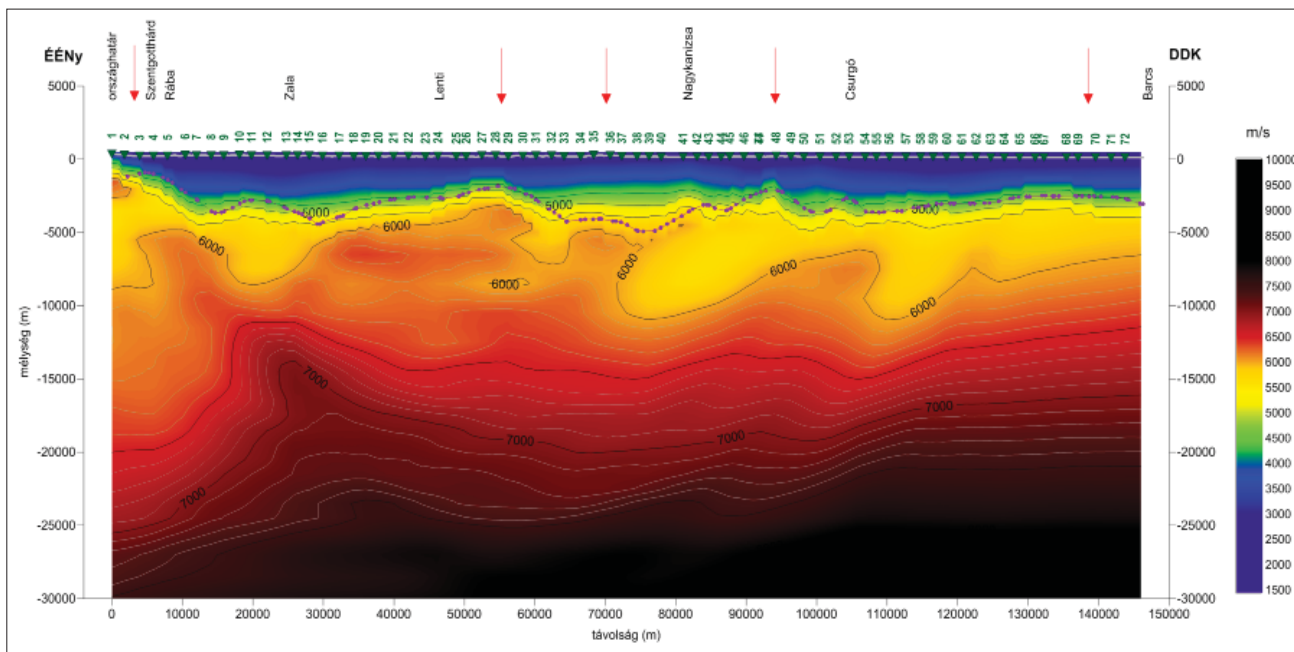
Érdekes továbbá, hogy magnetotellurikus fázis értelmezése alapján egy mély, jól vezető zóna ( $\varphi = 35-40^\circ$ ) is megjelenik az Alpokalja–Rába és a Balatonfő-vonal között (27. ábra). Ez a mélyszerkezeti zóna a magnetotellurikus mérések anizotrópiája alapján is beazonosítható (lásd 26. ábra).

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)



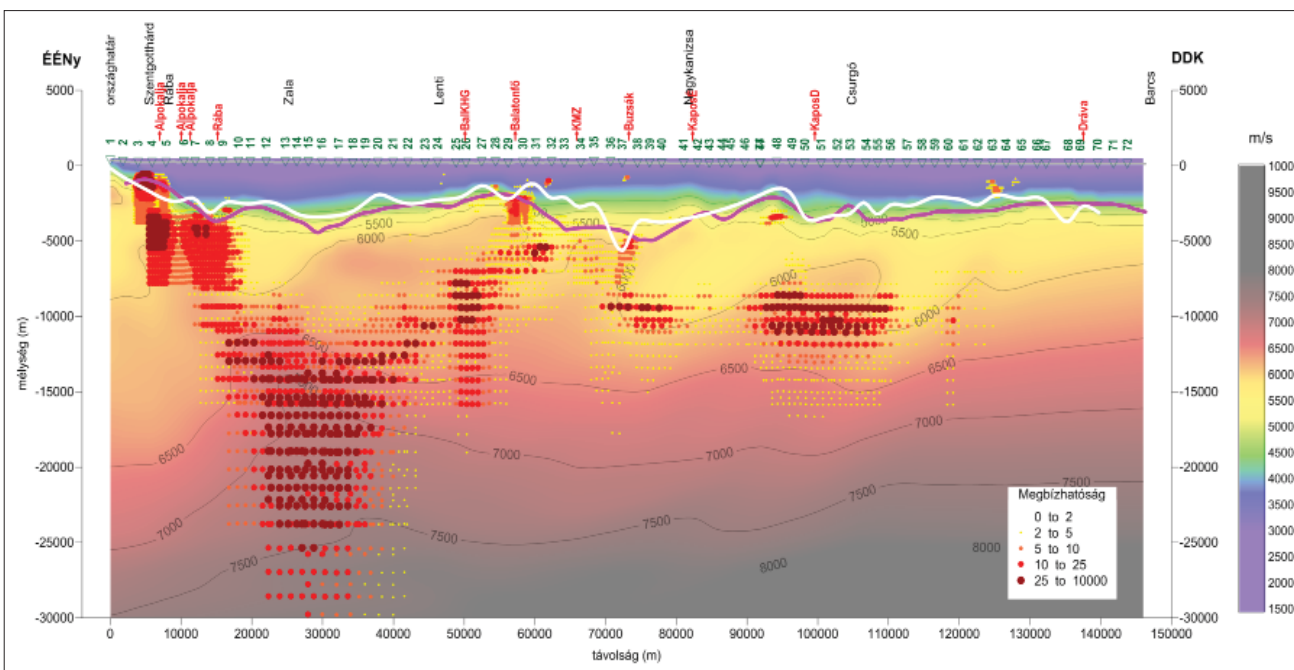
24. ábra | Az MTOA-01 (CEL07) szeizmikus tomográfia sebességszelvénye  
 Figure 24 | MTOA-01 (CEL07) seismic tomography velocity section

léte is okozhatja az alacsony fázisértékeket és az anizotrópiajelenségeket.

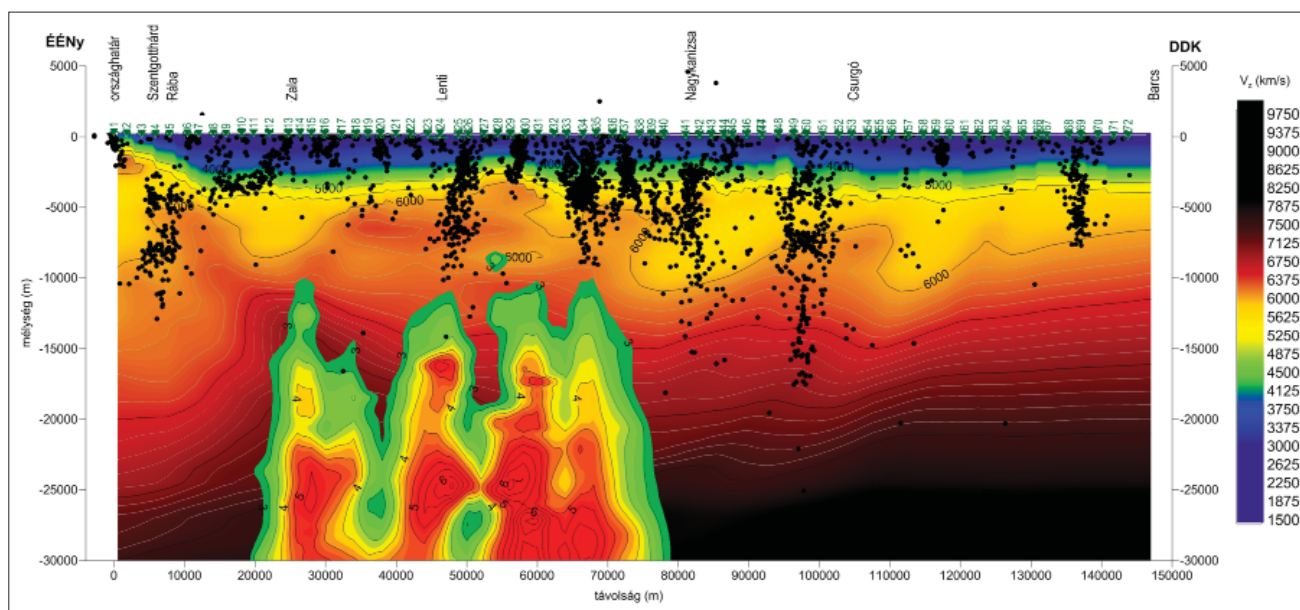
A szeizmikus P-hullámsebesség alapján meghatározhatjuk a Conrad- és Moho-határfelületek legvalószínűbb helyzetét is, azaz elkülöníthetjük a szelvény mentén a felső kérget, alsó kérget és a köpenyt (27. ábra). Mindkét határfelületen látszik a kéreg kivastagodása az Alpok(álja) irányában, az izosztáziának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

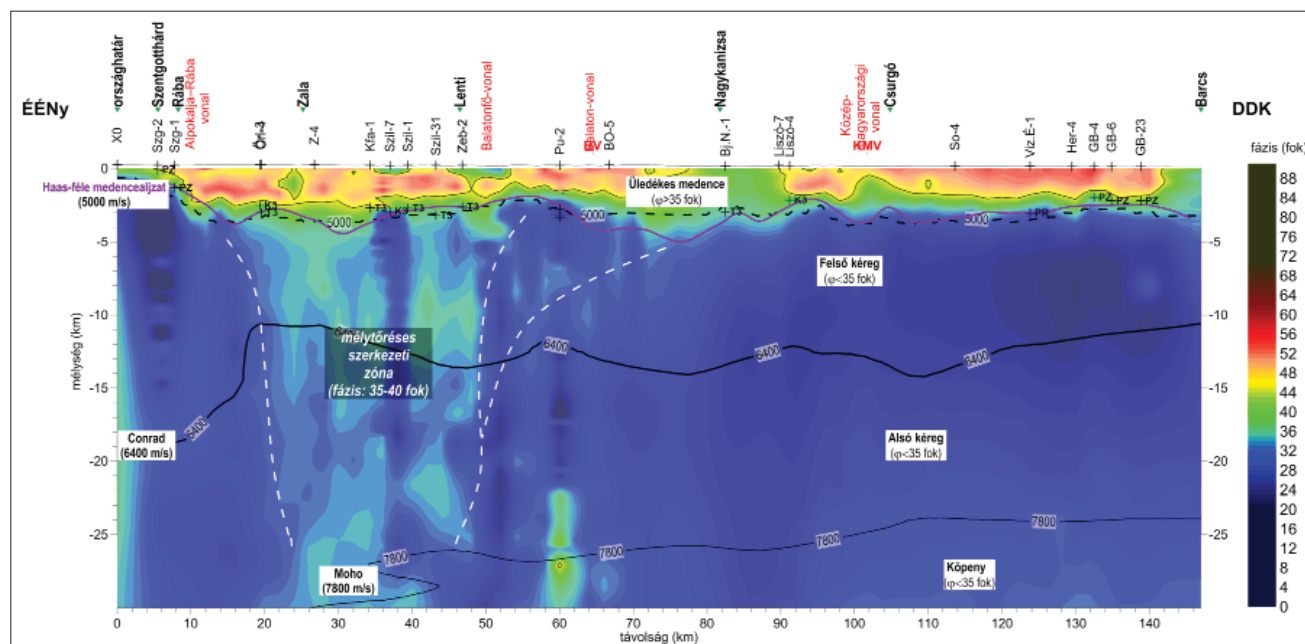


26. ábra Az MTOA-01 (CEL07) szeizmikus tomográfia sebességszelvénye és az MT mérések anizotrópiamaximumai  
 Figure 26 MTOA-01 (CEL07) seismic tomography velocity section and anisotropy maxima of MT measurements

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- ( $\varphi$ ) 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 mágneses képződmények megjelenésére (mágneses – nem mágneses 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)<sup>7)</sup> 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 mágneses Naudy-megoldások jelzik, hol válik bizonytalanná az inverzióból kapott feldolgozási eredmény a nem mágneses 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 mágneses 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

- <sup>1)</sup> vkm = vonalkilométer vízszintes távolság (és vm = vonalméter)
- <sup>2)</sup>  $\rho$  (vagy  $\rho_a$ ) – 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.
- <sup>3)</sup> mélység – Bostick-mélység:  $H_{\text{Bostick}} = [\rho_a / \omega \mu_0]^{1/2}$
- <sup>4)</sup> Fázis ( $\varphi$ ) – 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 vezetőből szigetelőbe 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.
- <sup>5)</sup> Analitikus látszólagos fajlagos ellenállás = az E-polarizációs és a H-polarizációs látszólagos fajlagos ellenállások vektorösszege.
- <sup>6)</sup> AniMax =  $|\rho_{xy} / \rho_{yx}| + |\rho_{yx} / \rho_{xy}|$
- <sup>7)</sup> 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 mélyszerkezetig, 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.