

# Kétdimenziós magnetotellurikus modellezés – irányanizotrópiából származó hatások vizsgálata

KISS J.<sup>@</sup>, PRÁCSER E.

Magyar Bányászati és Földtani Szolgálat (MBFSZ),  
1145 Budapest, Columbus u. 17–23.

<sup>@</sup>E-mail: kiss.janos@mbfsz.gov.hu

A magnetotellurikus mérési adatok  $E$  és  $H$  polarizációs inverziójából többnyire különböző eredményeket, eltérő lát-szólagos fajlagosellenállás-szelvényeket kapunk. A két irány közötti eltérés vajon hiba vagy földtani információ? A kérdés költői, hiszen nyilvánvalóan olyan földtani okai vannak a jelenségnek, amellyel eddig érdemben nem foglalkoztunk.

Az eltérést irányanizotrópiának hívjuk (ezt két- és háromdimenziós hatások okozzák), amelyet eddig csak a földtani közeg vezetőképességének irányfüggő megváltozásával hoztunk kapcsolatba. A határátmeneti jelenségek vizsgálata alapján (Kiss et al. 2020) azonban mást is találtunk, nemcsak a vezetőképességtől, hanem a közeg mágneses tulajdonságaitól és/vagy dielektromos permittivitásától is függő irányanizotrópiát. Mivel az elektromágneses, azaz elektromos és mágneses teret mérjük, ez tulajdonképpen nem is meglepő. Ez viszont óvatosságra kell, hogy intsen minket!

Korábban, amikor a mágneses permeabilitás szerepét vizsgáltuk a Curie-hőmérséklet tartományában, szerteágazó magnetotellurikus modellezést folytattunk házi fejlesztésű programokkal. Ezeknek a futtatásoknak az eredményeit elővéve számos, akkor érthetetlen jelenség magyarázatát adták meg a feltárt határátmeneti törvényszerűségek. Jelen tanulmányunkban az adatokat leporolva, a 2009-ben félbehagyott tanulmányt kibővítve mutatjuk be modellezési eredményeinket.

A CEL08 szelvény mentén, a Kab-hegynél egyértelmű kapcsolat tételezhető fel a bazaltsapka és az anizotrópia-maximum megjelenése között (lásd Kiss et al. 2020). Az anizotrópia maximumhelye a magnetotellurikus szelvényen sokkal mélyebben van, és sokkal nagyobb kiterjedésű, mint amit eddigi földtani ismereteink alapján a bazaltok lehetséges mélybeli helyzetéről és méretéről tudunk.

Lehet, hogy ennek a jelenségnek is földtani – pontosabban az elektromágneses tér terjedésében keresendő – okai vannak? A természetben minden a fizika törvényei szerint működik, csak eddig lehet, hogy nem ismertük fel ezeket a törvényszerűségeket? Cikkünkben ennek járunk utána kétdimenziós direkt modellezéssel, majd terepi szondázási görbék vizsgálatával.

## Kiss, J., Prácser, E.: Two-dimensional magnetotelluric modelling – investigation of effects due to directional anisotropy

From the  $E$  and  $H$  polarization inversion of magnetotellurics, we obtain mostly different results, with different specific resistivity sections. Is the difference between the two directions an error or geological information? The question is theoretical, since there are obvious geological reasons for the phenomenon, which we have perhaps not addressed enough so far. We call the divergence directional anisotropy (caused by two- and three-dimensional effects), which we have so far only associated with directional changes in the conductivity of the geological medium. However, based on the study of boundary transition phenomena (Kiss et al. 2020), we have found something else, a directional anisotropy that depends not only on conductivity but also on the magnetic properties and/or dielectric permittivity of the medium. Since we measure the electromagnetic, i.e. electric and magnetic fields, this is actually not surprising. But this should make interpretative geophysicists and geological users cautious!

In our previous studies, when investigating the role of magnetic permeability over the Curie temperature range, we have also performed a wide range of modelling using in-house developed programs. By re-examining the results of these runs, the boundary transition laws that were discovered explained many phenomena that were then incomprehensible. In the present paper, we have presented our results by dusting down the data and extending the paper, which was abandoned in 2009.

Along the CEL08 profile at Kab Hill a clear connection between the basaltic cap and the maximum anisotropy can be assumed (see Kiss et al. 2020). The location of the anisotropy maximum in the section is much deeper and much larger than what we know about the possible position and size of the basalts based on our geological knowledge. Is it possible to assume that this phenomenon also has geological causes — more precisely, that it is due to the propagation

of the electromagnetic field? Could it be that everything in nature happens according to the laws of physics, but that we have not yet recognised these laws? In this article, we investigate this too; using two-dimensional direct modelling and then examining field sounding curves.

*Beérkezett:* 2021. április 4.; *elfogadva:* 2021. június 3.

## Alapok

A magnetotellurikus mérések során az észak–déli ( $x$ ) és a kelet–nyugati ( $y$ ) irányban mért elektromos ( $E_x$ ,  $E_y$ ) és mágneses ( $H_x$ ,  $H_y$ ) térkomponensekből a legegyszerűbb (homogén, vízszintes rétegezetséget feltételező) függvénykapcsolatból kiindulva határozzuk meg a frekvenciától és a közeg paramétereitől függő impedanciát (Nemesi, Hobot 1981, Kiss et al. 2005):

$$Z_{x,y}(\omega) = \frac{E_x(\omega)}{H_y(\omega)} \quad \text{és} \quad Z_{y,x}(\omega) = \frac{E_y(\omega)}{H_x(\omega)}, \quad (1)$$

ahol

$\omega$  – körfrekvencia ( $\omega = 2\pi f$ ,  $f$  – frekvencia)

$E_x(\omega)$ ,  $E_y(\omega)$  – a felszínen mért  $\omega$  frekvenciájú elektromos térváltozás  $x$  és  $y$  irányú horizontális komponense,

$H_x(\omega)$ ,  $H_y(\omega)$  – a felszínen mért  $\omega$  frekvenciájú mágneses térváltozás  $x$  és  $y$  irányú horizontális komponense.

Az impedanciákból a gyakorlati felhasználás céljából jobban elterjedt látszólagos fajlagos ellenállás<sup>1)</sup> kiszámításához a Cagniard-féle képletet (1953) alkalmazzuk:

$$\rho_{x,y}(\omega) = \frac{|Z_{x,y}(\omega)|^2}{\omega\mu_0\mu_r}, \quad \text{ill.} \quad \rho_{y,x}(\omega) = \frac{|Z_{y,x}(\omega)|^2}{\omega\mu_0\mu_r}, \quad (2)$$

ahol

$\mu_0$  – a vákuum mágneses permeabilitása,

$\mu_r$  – a közeg relatív mágneses permeabilitása.

Két közeg határfelületén, ha a határfelületi áramsűrűség és töltéssűrűség nulla értékű, akkor az elektromos és mágneses térkomponensek

– érintő irányú összetevői folytonosak lesznek:

$$E_{t_2} = E_{t_1} \quad \text{és} \quad H_{t_2} = H_{t_1}, \quad (3)$$

– normál irányú összetevői ugrást szenvednek:

$$E_{n_2}/E_{n_1} = \varepsilon_{r_1}/\varepsilon_{r_2} \quad \text{és} \quad H_{n_2}/H_{n_1} = \mu_{r_1}/\mu_{r_2}, \quad (4)$$

ahol

$\varepsilon_{r_1}$ ,  $\varepsilon_{r_2}$  – az első és a második közeg relatív dielektromos permittivitása,

$\mu_{r_1}$ ,  $\mu_{r_2}$  – az első és a második közeg relatív mágneses permeabilitása.

Mivel a vezetési áramsűrűséget a közeg vezetőképessége és a mért elektromos tér együttesen határozza meg ( $J = \sigma E$ ), így a vezetési áramsűrűség függése is érdekes:

– érintő irányú összetevője ugrást szenved:

$$J_{t_2}/J_{t_1} = \sigma_2/\sigma_1, \quad (5)$$

– normál irányú összetevője is ugrást szenved, de másképpen:

$$J_{n_2}/J_{n_1} = \varepsilon_{r_1}\sigma_2/\varepsilon_{r_2}\sigma_1, \quad (6)$$

ahol

$\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  – az első és a második közeg elektromos vezetőképessége.

Két közeg határfelületén tehát a (3) érintő és a (4) normál irányú térkomponensek eltérően fognak viselkedni, ami az (1) impedancia meghatározáskor eltérő értéket eredményez:

$$Z_{x,y} = [E_x(\varepsilon_{r_1}/\varepsilon_{r_2})]/H_y \quad \text{és} \quad Z_{y,x} = E_y/[H_x(\mu_{r_1}/\mu_{r_2})]. \quad (7)$$

Ez természetesen a (2) alapképletek alapján kiszámolt látszólagos fajlagos ellenállásokra is hatással lesz.

A vízszintes, rétegzett vezető modell határfelületének törvényszerűségeivel Szarka (1988) részletesen foglalkozott. Itt most egy általánosabb ismertetést adtunk, amelyben a közeg mágneses és dielektromos paramétereinek megváltozásával és a határfelületeken ezek hatására bekövetkező változásokkal foglalkoztunk (részletesebben lásd Kiss et al. 2020).

## Előzmények

2005 és 2011 között több cikkünk is megjelent a mágneses fázisátalakulás vizsgálata témakörben (Kiss et al. 2005a, 2005b, 2010, 2011). A komplex értelmezések és a terepi magnetotellurikus adatok vizsgálata során úgy tűnt, hogy a mágneses tulajdonságok hatással vannak az elektromágneses mérési eredményekre. Gyakorlati tapasztalataink azt mutatták, hogy a mágneses képződményekhez „jól vezető” hatások kapcsolódnak, viszont a hagyományos magnetotellurikus direkt feladat megoldása során éppen ellenkező, szigetelő hatást, azaz ellenállás-növekedést mutattunk ki!

Kezdetben csak a „legegyszerűbb” homogénfeltér-modell, illetve az egydimenziós (pl. vízszintesen rétegzett) modell klasszikus képletei alapján történt az ellenőrzés. Meg kellett vizsgálni azonban a bonyolultabb, kétdimenziós és háromdimenziós modellek esetét is.

Kétdimenziós modellekre az „MTFWDGP” direktfeladat-megoldó saját fejlesztésű programmal (forráskód: Prácsr Ernő) 2009-ben végeztünk olyan kétdimenziós

számításokat, amelyek a mágneses permeabilitást is figyelembe vették. A futtatások célja a mágneses fázisátalakulás jelenségének kimutatása volt MT mérési adatok alapján, azon belül a mágneses permeabilitás hatásának vizsgálata, különböző elvi 2D modellek felett, a jelenség jobb megértése céljából.

Az eredményeinket akkor nem publikáltuk, mivel a három típusmodell (1. ábra) alapján elvégzett számítások nem jelezték egyértelműen a mágnesezettség hatását. Nem is értettük, hogy az egyik modell esetében „miért igen”, a másokban pedig „miért nem” a válasz a hatások kimutatása során. Mivel csak a Curie-hőmérsékleti mélységben megjelenő Hopkinson-effektusra koncentráltunk, így a többi eredményt, amelyek a felszíni megnövekedett mágnesezettséggel lehettek kapcsolatban, akkor közömbösen vettük tudomásul. A remanens mágnesezettség miatt bevezetett virtuális remanens mágneses szuszceptibilitás (Kiss et al. 2020) magas Königsberger-koefficiens esetén azonban már a felszínen is érezhető változásokat fog okozni, tehát a modellezéseink nem voltak hiábavalóak.

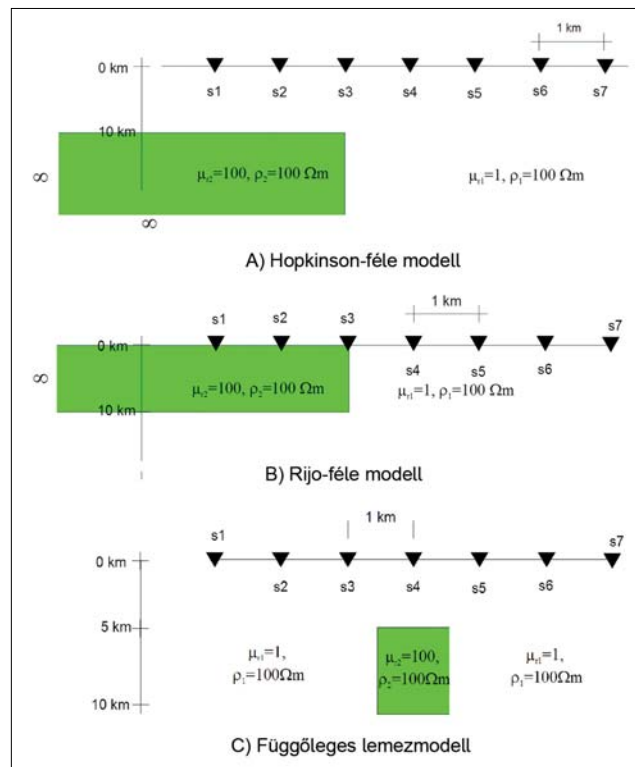
A 2020-ban publikált „AniMax”<sup>2)</sup> eljárással kapcsolatban figyelmünk a határátmeneti jelenségekre, két- és háromdimenziós hatásokra terelődött (Kiss et al. 2020, 2021). Ebben az esetben levezetéseink alapján már nem a közegre jellemző relatív mágneses permeabilitást kellett számításba venni, hanem a határfelület két oldalán lévő anyagok relatív mágneses permeabilitásának az arányát(!), mert részben ez határozza meg az impedancia- és ezen keresztül az ellenállásugrás mértékét. Be kellett vezetni a virtuális mágneses szuszceptibilitást (illetve permeabilitást), amivel a remanens mágnesezettséget is figyelembe tudtuk venni. Ez azért volt szükséges, mert a remanens mágnesezettség értéke egy-két nagyságrenddel nagyobb lehet az indukált mágnesezettségnél (Clark 1997), s így hatása felszíni földtani körülmények között is megjelenhet. A valós mágneses szuszceptibilitásnak – az indukált mágnesezettséget kiváltó paraméternek – jelentős megnövekedése és ebből adódóan a mágneses permeabilitásnak érezhető megnövekedése, elvileg csak a Curie-hőmérséklet mélységtartományában jelentkezhet (a Hopkinson-effektus miatt). Nagy Königsberger-arány esetén azonban már a felszínen is jelentős „remanens mágneses permeabilitás”-növekedés várható.<sup>3)</sup> Az anomális remanens mágnesezettség ( $\mu_r > 1$ ) miatt a magnetotellurikus mérésekben a felszíni mágneses képződmények torzító hatásával – amint azt a határátmeneti jelenségek vizsgálatkor már igazoltuk – számolni kell!

A határfelületek esetén a relatív mágneses permeabilitások arányának fontos szerepe van, így a permeabilitás megváltozása növelheti (kvázihomogén féltér felett), de akár csökkentheti (két közeg kontaktusa mentén) is a mért impedanciát és a látszólagos fajlagos ellenállást.

Az irányanizotrópiát két gyakorlati példán is bemutatuk, a CEL07 és a CEL08 magnetotellurikus szelvények TE és TM módú invertált fajlagosellenállás-szelvényeinek összevetése révén.

## Modellek

Az 1. ábra mutatja az alkalmazott modelleket. A szondázási pontokat fekete háromszögek (egymástól 1 km távolságra) jelzik, a fajlagos ellenállás szempontjából homogén közegben elhelyezett mágneses réteget zöld szín emeli ki.



**1. ábra** Kiindulási modellek kétdimenziós magnetotellurikus direkt feladat megoldásakor, A) Hopkinson-féle modell, B) Rijo-féle modell, C) függőleges lemezmodell

**Figure 1** Initial models for solving a two-dimensional magnetotelluric direct problem A) Hopkinson model, B) Rijo model, C) vertical plate model

A mágneses réteg az első esetben 10 km mélységben kezdődik (Hopkinson-féle modell, Hopkinson 1889), balra és lefelé végtelen kiterjedésű, a második esetben a felszíntől 10 km mélységig tart, és balra végtelen kiterjedésű (Rijo-féle modell, Rijo 2003). Ezután a függőleges lemezmodell következett. Vizsgáltuk a mágneses permeabilitás mellett a vezetőképesség hatását is, mivel a képletek és a modellezési eredmények azt mutatták, hogy analógia van a két paraméter viselkedésében.

A felvett modellgeometriák lehetőséget adtak a mágneses permeabilitás hatásának vizsgálatára függőleges határfelület esetén úgy, hogy az egyik oldalon mágneses közeg van, a másik oldalon pedig nem mágneses. Ezek a vizsgálatok Rijo (2003) mágneses „static shift”-ről szóló publikációjának az ellenőrzését is jelentették.

## A modellező rács mérete

A modellezés egy 97×140 rácspontban készült, ahol a horizontális kiterjedés -94,5 km és 100,5 km között (1. lista),

**1. lista** | Horizontális irányú rácspontok helyzete a kétdimenziós modellezés során  
**List 1** | Horizontal position of grid points in two-dimensional modelling

-94.5000	-33.5000	-25.5000	-21.5000	-19.5000	-17.5000	-15.5000	-14.5000
-13.5000	-12.5000	-11.5000	-10.5000	-9.5000	-8.5000	-7.5000	-6.5000
-5.5000	-5.0000	-4.7500	-4.5000	-4.2500	-4.0000	-3.7500	-3.5000
-3.2500	-3.0000	-2.7500	-2.5000	-2.2500	-2.0000	-1.7500	-1.5000
-1.2500	-1.0000	-0.7500	-0.5000	-0.4000	-0.3000	-0.2000	-0.1000
0.0000	0.1000	0.2000	0.3000	0.4000	0.5000	0.6000	0.7000
0.8000	0.9000	1.0000	1.1000	1.2000	1.3000	1.4000	1.5000
1.6000	1.7000	1.8000	1.9000	2.0000	2.1000	2.2000	2.3000
2.4000	2.5000	2.6000	2.7000	2.8000	2.9000	3.0000	3.1000
3.2000	3.3000	3.4000	3.5000	3.6000	3.7000	3.8000	3.9000
4.0000	4.1000	4.2000	4.3000	4.4000	4.5000	4.6000	4.7000
4.8000	4.9000	5.0000	5.1000	5.2000	5.3000	5.4000	5.5000
5.6000	5.7000	5.8000	5.9000	6.0000	6.1000	6.2000	6.3000
6.4000	6.5000	6.7500	7.0000	7.2500	7.5000	7.7500	8.0000
8.2500	8.5000	8.7500	9.0000	9.2500	9.5000	9.7500	10.0000
10.2500	10.5000	10.7500	11.0000	11.5000	12.5000	13.5000	14.5000
15.5000	16.5000	17.5000	18.5000	19.5000	20.5000	21.5000	23.5000
25.5000	27.5000	31.5000	39.5000	100.5000			

**2. lista** | Vertikális irányú rácspontok helyzete a kétdimenziós modellezés során  
**List 2** | Vertical position of grid points in two-dimensional modelling

-4.2715	-2.8477	-1.8984	-1.2656	-0.8438	-0.5625	-0.3750	-0.2500
0.0000	0.0500	0.1000	0.1500	0.2000	0.2500	0.3000	0.3500
0.4000	0.4500	0.5000	0.6000	0.7000	0.8000	0.9000	1.0000
1.1000	1.2000	1.3000	1.4000	1.5000	1.6000	1.7000	1.8000
1.9000	2.0000	2.2500	2.5000	2.7500	3.0000	3.2500	3.5000
3.7500	4.0000	4.2500	4.5000	4.7500	5.0000	5.2500	5.5000
5.7500	6.0000	6.2500	6.5000	6.7500	7.0000	7.2500	7.5000
7.7500	8.0000	8.2500	8.5000	8.7500	9.0000	9.2500	9.5000
9.7500	10.0000	10.5000	11.0000	11.5000	12.0000	12.5000	13.0000
13.5000	14.0000	14.5000	15.0000	15.5000	16.0000	16.5000	17.0000
17.5000	18.0000	18.5000	19.0000	19.5000	20.0000	21.0000	22.0000
23.0000	24.0000	25.0000	27.0000	29.0000	33.0000	38.0000	43.0000
51.0000	59.0000	65.6737	72.3474	85.6947	99.0421	112.3895	139.0842
165.7789	166.0000						

a vertikális kiterjedés 4 km és -166 km (2. lista) között változott. A modellezés segítségével vizsgáltuk a 0, 1, 2, 3, 4, 5 és 6 km-es távolságokban az 1., 2., 3., 4., 5., 6. és 7. pontokon a hatást, és ehhez 12 diszkrét frekvencián (1. táblázat) számoltuk ki a magnetotellurikus válaszokat.

A frekvenciák durván azt a tartományt fedik le, amelyet a terepi mérések során az intézetünk (ELGI, MFGI, MBFSZ) is alkalmazni szokott.

### Homogén féltér tesztje (2–5. ábra)

A modellező rács jóságát a homogén féltér válaszgörbéi alapján tudjuk megítélni. Ellenőrzés céljából bemutatjuk, az elektromosan homogén ( $\rho = 100 \Omega\text{m}$ ), de nem mágneses ( $\mu_r = 1$ ) féltér felett kialakuló látszólagos fajlagos ellenállás- és fázisgörbéket (2., 3. ábra). Ezután az elektromosan homogén ( $\rho = 100 \Omega\text{m}$ ), de megnövekedett per-

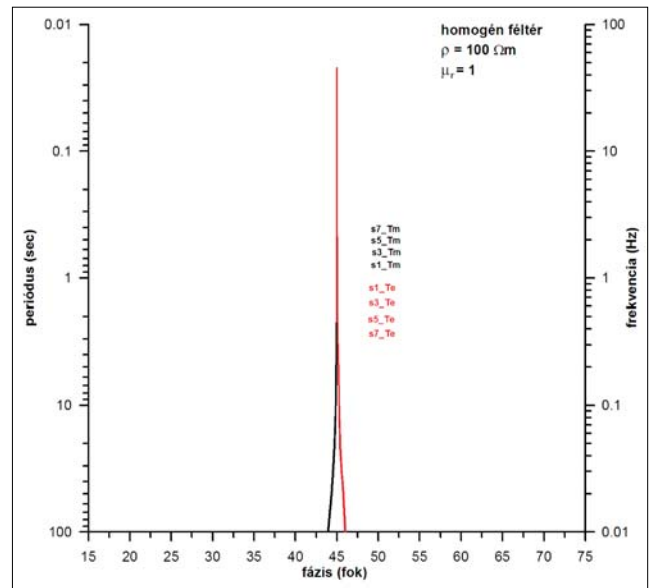
**1. táblázat** | A kétdimenziós modellezés során használt frekvenciák  
**Table 1** | Frequencies used in two-dimensional modelling

No	Frekvencia	Periódus
1	0,010	100,00
2	0,021	47,60
3	0,045	22,20
4	0,100	10,00
5	0,210	4,76
6	0,450	2,22
7	1,000	1,00
8	2,100	0,47
9	4,500	0,22
10	10,000	0,10
11	21,000	0,04
12	45,000	0,02

meabilitású ( $\mu_r = 10$ ) homogén féltér válaszgörbéit is (4., 5. ábra) megmutatjuk. A hét ponton kiszámított szondázási görbék szinte teljesen egymáson futnak, ezért minden másodikat jelenítettük meg.

Az ábrákon az eltérő polarizációjú eredményeket eltérő színnel jelöltük: az  $E$  polarizáció piros, a  $H$  polarizáció válaszgörbéje fekete színű. A periódus (illetve a frekvencia) alapján történt megjelenítéskor a görbe teteje a nagyfrekvenciás, felszínközeli értékeket mutatja, az alja pedig a kisfrekvenciás, nagy mélységből származó válaszokat, a földtani szelvények megjelenítésének megfelelően.

Az első esetben (2., 3. ábra) az látszólagos fajlagosellenállás-görbe visszaadja a homogén féltér az adott modellező rács paraméterek mellett, és a fázisgörbe is csak

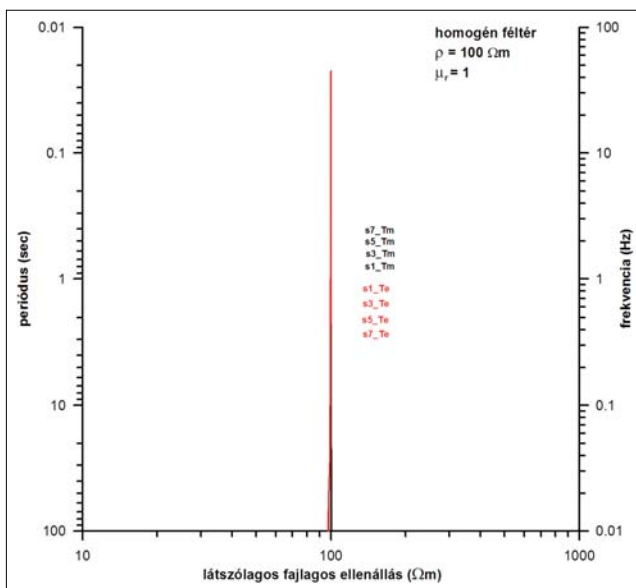


**3. ábra** | Nem mágneses homogén féltér fázisgörbéi  
**Figure 3** | Phase curves of non-magnetic homogeneous half-space

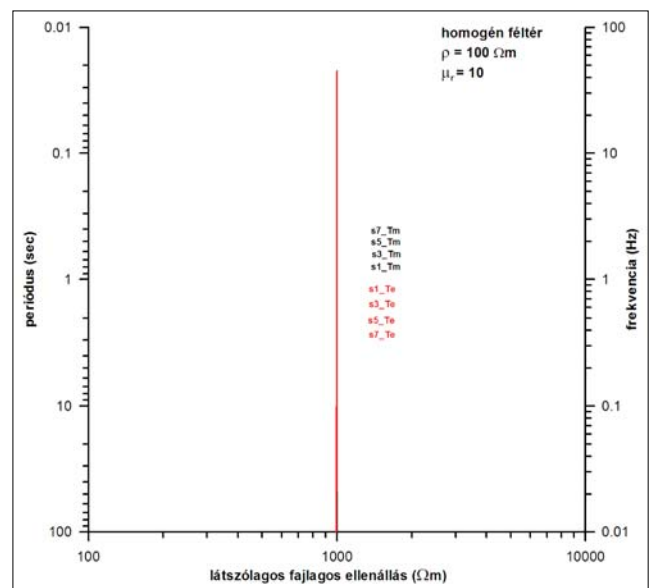
0,1 Hz-től nyílik ki, de ez a hiba 0,01 Hz-nél sem haladja meg a  $\pm 2$  fokot.

A numerikus modellezés csak véges méretű modellel működik, bármilyen nagyméretű rácsot veszünk fel, létezik olyan kis frekvencia, amelynél már romlik a számítás pontossága.

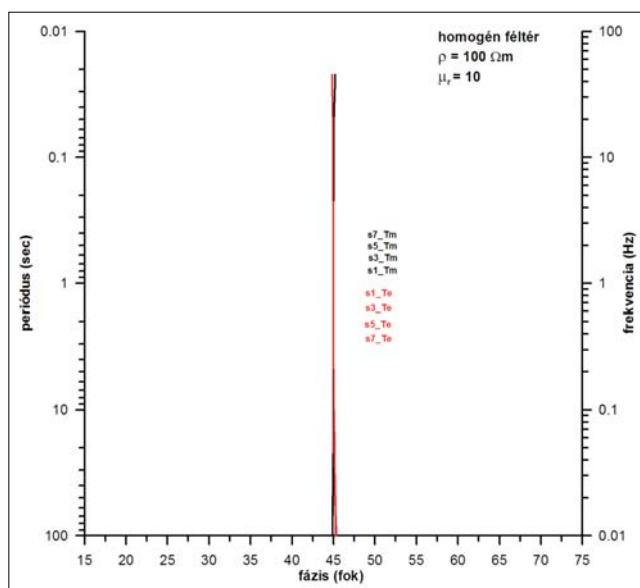
Ha megemeljük a közeg mágneses permeabilitását, akkor ez hatással van a számolt látszólagos fajlagosellenállás-görbére. Jól látszik a megnövekedett mágneses permeabilitás ( $\mu_r = 10$ ) hatása a homogén féltér ( $\rho = 100 \Omega m$ ) felett észlelt görbéken (4., 5. ábra), mivel a féltérgörbe a



**2. ábra** | Nem mágneses homogén féltér látszólagos fajlagosellenállás-görbéi  
**Figure 2** | Apparent resistivity curves of non-magnetic homogeneous half space



**4. ábra** | Mágneses homogén féltér látszólagos fajlagosellenállás-görbéi  
**Figure 4** | Apparent resistivity curves of magnetic homogeneous half-space



5. ábra | Mágneses homogén feltér fázisgörbéi

Figure 5 | Phase curves of non-magnetically homogeneous half-space

( $\rho = 1000 \Omega\text{m}$ ) értéket adja vissza. A mágneses közegben a kis frekvenciák esetében nem látszik a zaj felerősödése. Az alkalmazott modellező rács a homogénfeltér-tesztet kiállta.

Korábbi cikkünk (Kiss et al. 2020) alapján ismert, hogy:

- Homogén feltér esetén az elektromos vezetőképesség növekedése csökkenti az impedanciát (ellenállást), a skinmélységet és a hullámsebességet (vezetőképesség hatása). A mágneses permeabilitás növekedése növeli az impedanciát (ellenállást), viszont csökkenti a skinmélységet és a hullámsebességet (mágneszettségi hatás).

(A mágneszettségi hatás csökkenti a behatolási mélységet és a hullámsebességet, így kisebb térrészt fogunk látni, viszont az felnagyítva jelenik meg a hagyományos képletek alkalmazása esetén. Adódik tehát, hogy figyelembe kell venni a mágneszettséget a képleteinkben! A vezetőképesség és mágneszettség hatását egyszerre csak a direkt feladatnál tudjuk figyelembe venni, mert az inverz feladat esetén az egyik változót fixálni kellene ahhoz, hogy a másikat kiszámíthassuk, ehhez viszont ismernünk kellene azt!)

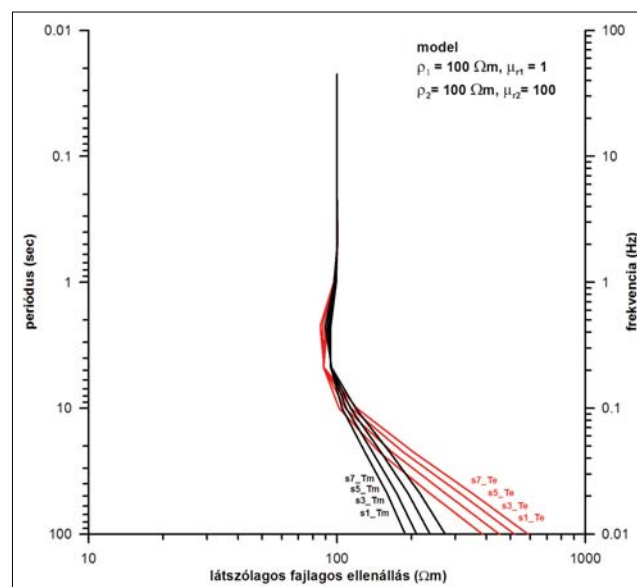
- Két közeg határfelületén az E és H térerők tangenciális összetevői folytonosan mennek át, de a J áramsűrűségvektor már nem, és az E és H normális komponensei is ugrásszerű változást fognak szenvedni, és értelemszerűen irányizotrópia alakul ki.

(Az ugrás mértéke J áramsűrűség tangenciális komponense esetén a vezetőképességek arányától, normál komponense esetén a vezetőképességek egyenes és a dielektromos állandók fordított arányától függ. Az E esetén a dielektromos állandók fordított arányától, illetve H esetén a mágneses permeabilitások fordított arányától fog függeni az ugrás mértéke! – részletesebben lásd Kiss et al. 2020)

## A Hopkinson-féle modell (6., 7. ábra)

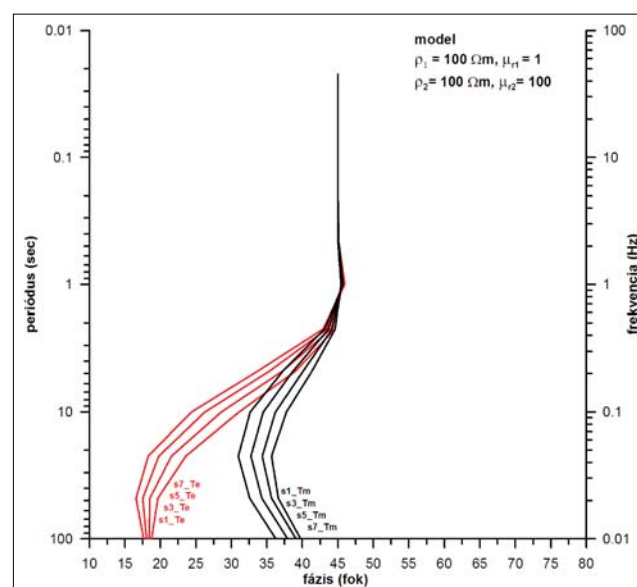
Az első modell esetén 10 km mélységtől van jelen a megnövekedett mágneses permeabilitású közeg (1. ábra, „ $A^2$ ” modell). Ez a klasszikus Hopkinson-effektus modell, amelynél a közeg esetében a megfelelő kontraszt elérése érdekében 100-as nagyságrendű mágneses permeabilitást tételeztünk fel.

Az ábrákon feltüntetjük az egyedi szondázások látszólagos fajlagos ellenállás és fázis menetét (6., 7. ábra). Az egyes pontokon a görbemenet változása azonos tendenciát



6. ábra | Látszólagos fajlagosellenállás-görbék a Hopkinson-féle modell esetén

Figure 6 | Apparent resistivity curves for the Hopkinson model



7. ábra | A fázisgörbék a Hopkinson-féle modell esetén

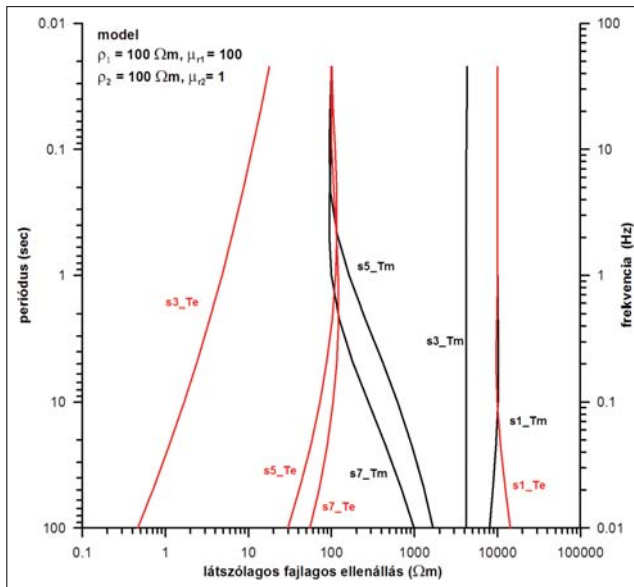
Figure 7 | Phase curves for the Hopkinson model

mutat, így most is csak minden második pont görbáját rajzoltuk ki.

A mágneses második réteg hatására kisebb ellenállás-csökkenés után különböző mértékű ellenállás-növekedést tapasztalunk mindkét polarizáció esetében. A fázisgörbék végeinek visszakanyarodása jelzi, hogy a fázis gyorsabban reagál, mint az ellenállás.

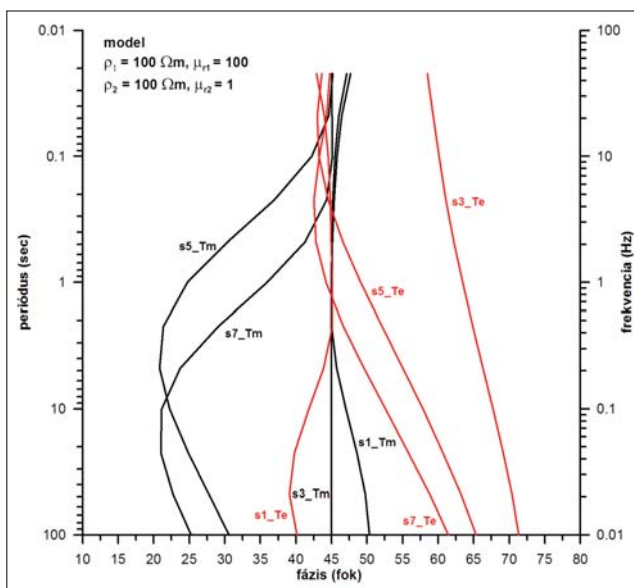
### Rijo-féle mágneses modell (8–11. ábra)

A legdurvább változásokat a felszíni mágneses paramétereknek a megváltozása okozza. Csak nagyon erős ferro-



8. ábra | Látszólagos fajlagosellenállás-görbék a Rijo-féle modell esetén

Figure 8 | Apparent resistivity curves for the Rijo-model



9. ábra | Fázisgörbék a Rijo-féle modell esetén

Figure 9 | Phase curves for the Rijo-model

mágneses anyag (vaskvarcit, szerpentinit, amfibolit) felszíni jelenléte, illetve erős remanens mágnesezettség esetében valószínűsíthető ez a modell a gyakorlatban. A remanens mágnesezettség növekedése a felszíni vulkanikus és metamorf kőzetek megjelenése esetén lehet jelentős, az előzetes vizsgálataink alapján (Kiss et al. 2020) a hatás a kontaktus környezetében várható.

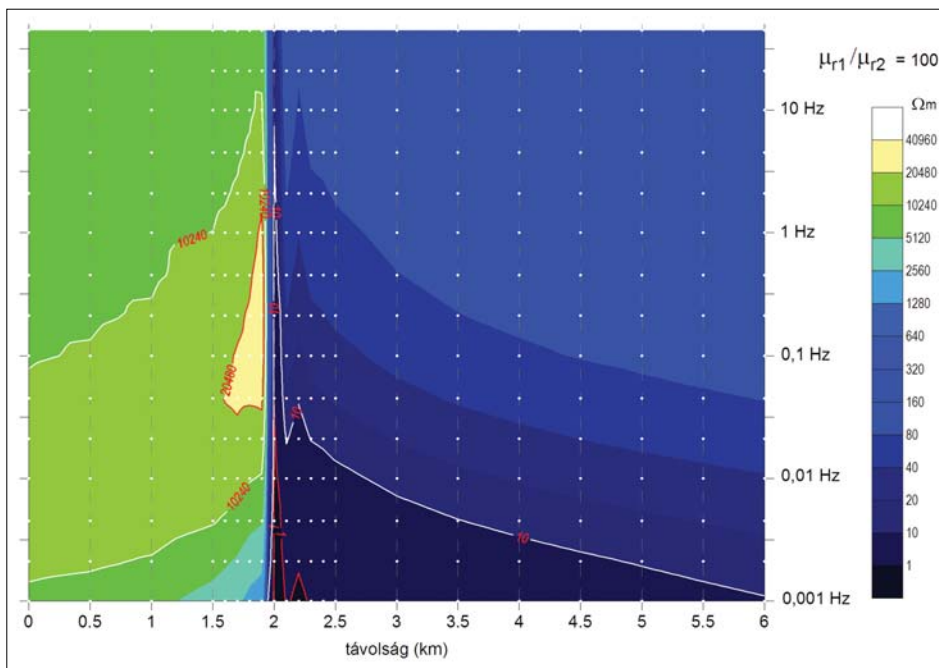
A látszólagos fajlagos ellenállás esetén TM módban folyamatos átmenetet tapasztalunk a különböző mágneses és nem mágneses félterek (100 és 10000 Ωm) között. TE módban már más a helyzet! Jelentős különbség látszik attól függően, hogy a mágneses ható felett, a mágneses – nem mágneses határvonalán, vagy a nem mágneses közeg felett van-e a szondázási pont. A mágneses ható tetején, az 1-es szondázási ponton, a  $(\rho\mu_r) = 10000$  Ωm határozza meg a kezdő ellenállás értéket. A mágneses ható hiánya esetén, a 4-es szondázási ponttól a  $\rho = 100$  Ωm jellemzi a kezdő ellenállást.

*Érdekes jelenség a 3. szondázási pont kiugróan kicsi ellenállásértéke és annak menete! Nagy frekvencián a kezdő ellenállás értéke egy nagyságrenddel kisebb ( $\rho = 10$  Ωm), mint a számításba jöhető legkisebb ellenállásérték! Kis frekvenciák irányában azonban ez az ellenállás folyamatosan tovább csökken 1 Ωm alá, egészen 0,3 Ωm-ig. A harmadik szondázási ponton a fázis is hasonló rendellenességet mutat! A TE és a TM módban számolt látszólagos fajlagos ellenállások között itt van a legnagyobb eltérés, itt jelentkezik a legnagyobb eltérés (anizotrópiamaximum) a kétféle látszólagos fajlagos ellenállás értékei között (TM módban nincs hatása a mágnesezettségnek).*

A mágneses test kontaktusán észlelt jelenség erősen a határfelületre koncentrálódik. Ezt a szondázási pontok közötti távolság csökkentésével lehetett tovább vizsgálni. Az 1 km távolságban mért egyedi szondázások alapján úgy tűnt, nehéz lett volna a jelenséget tovább tanulmányozni, pontosan megjeleníteni, ezért a 100 m-es ponttávolságban kiszámolt adatokból szelvényt készítettünk az eredeti modellt megőrizve.

A TE módú szondázási eredményeket egy távolság-frekvencia síkon jelenítettük meg (kizárva a behatolási mélység különbségéből származó hatásokat). A színezést úgy választottuk ki, hogy a rétegpárparaméterek (kiindulási „elektromos ellenállás”- vagy „elektromos ellenállás × mágneses permeabilitás”-értékek) jól elkülönüljenek.

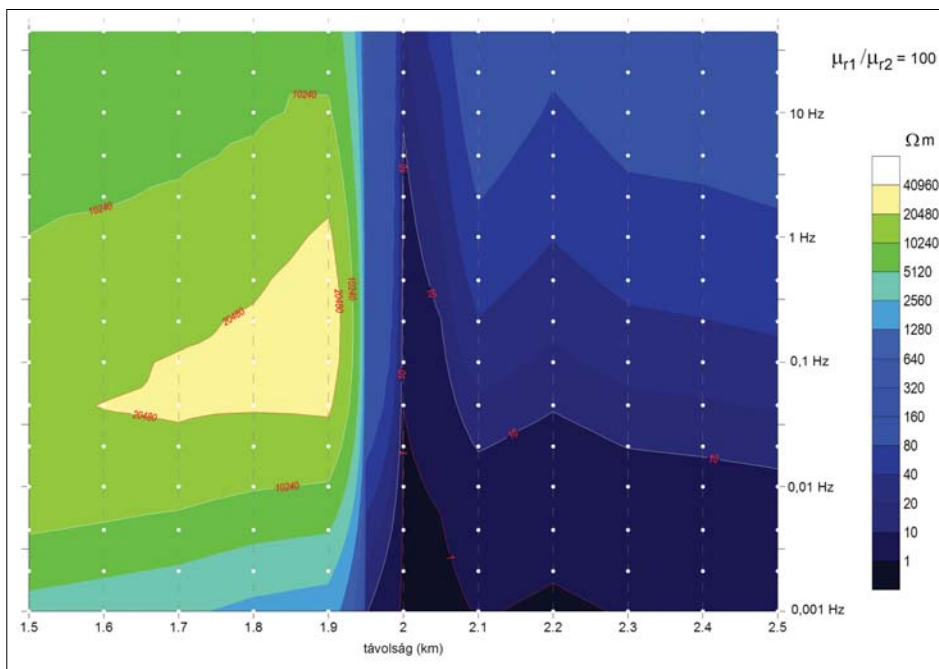
Elsőként a teljes 6 km-es szakaszt mutatjuk be (10. ábra), majd a kontaktus körüli 1 km-es zónát (11. ábra). Az ábrákon jól látszik a látszólagos fajlagos ellenállás megváltozása a kontaktushoz közeledve. Jobbról indulva minél közelebb vagyunk, annál kisebb az érték. Balról éppen ellenkező hatás látszik, mert a kontaktushoz közeledve nő az érték. A határfelület hatására a mágneses (bal oldali) közegben a látszólagos fajlagos ellenállás jóval 20 000 Ωm fölé emelkedik (1,9 km, 0,1–1,0 Hz között), míg a nem mágneses (jobb oldali) közegben ez az érték 3 Ωm-re lecsökken (2 km, 0,1 Hz). *Nagyon erős a kontraszt a szélső értékek alapján, az ábra szerint legalább 6000-szeres egy szűk 100–200 m-es sávban!*



10. ábra | A látszólagos fajlagos ellenállás frekvenciafüggő metszete a 6 km hosszú szelvényen (mért érték – fehér pont)  
 Figure 10 | Frequency-dependent section of the apparent resistivity of 6 km long model profile (measured value – white dot)

(Itt meg kell említeni, hogy szélsőségesen nagy relatív mágneses permeabilitást használtuk a modellezés során azért, hogy a hatás minél kontrasztosabban – ha úgy tesszük –, minél jobban beazonosíthatóan jelenjen meg! A természetben ennél kisebb, de érzékelhető hatások várhatóak.)

Azaz, a relatív permeabilitások arányának megfelelően változik a kontaktus két oldalán a látszólagos fajlagos ellenállás értéke, a mágneses közegbe behatolva körülbelül 100-szorosára nő (esetünkben  $100 \times 100 \approx 10\,000 \Omega\text{m}$ ), illetve a mágneses közegből távozva pedig, 100-ad részére csökken (esetünkben  $100/100 \approx 1 \Omega\text{m}$ ).



11. ábra | A látszólagos fajlagos ellenállás frekvenciafüggő metszete a modellszelvény kontaktusa körüli 1 km-es zónában  
 Figure 11 | Frequency-dependent section of the apparent resistivity of the 1 km wide zone around the contact in model profile



A vezetőképesség értéke tart a nullához a kis frekvenciák irányában. Az is látszik azonban, hogy a kis frekvenciákon nagyon sokáig éreztetni hatását, azaz kis frekvencián sokáig azonosítható a két közeg határfelületének a hatása. A pont-ról pontra követhető jelenség egyfajta lecsengési folyamatra emlékeztet. Ha egy ilyen határfelület megjelenik a szelvény mentén, akkor bizony a magnetotellurikus kiértékelő eléggé tanácstalanná válik, a zajos mérést hibáztatja, pedig a jelenség a természet törvényeinek megfelelően alakult ki. A jelenség – úgy tűnik – a kontaktus közvetlen közelében jelentkezik legerősebben, s attól távolodva gyengül, de szélesedik a hatása (a 10 Ωm-es érték 10 Hz-nél jelenik meg, 0,1 Hz-nél kb. 75 m széles, míg 0,01 Hz-nél 2 km szélességű tartományban azonosítható, a mágneses ható melletti nem mágneses közegben).

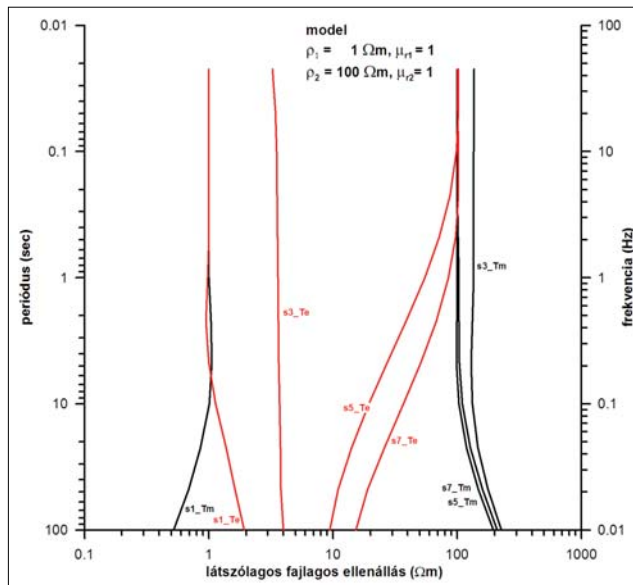
Mivel a két közeg relatív mágneses permeabilitásának arányától függ a változás mértéke, így a kontaktustól távolabb, a mágneses közeg felett csak az egyedi mágneses szuszceptibilitásból származó hatás szinte meg sem jelenik. Ennek oka, hogy a mágneses permeabilitás értéke miatt csak kevésbé nő meg ennek a közegnek a látszólagos fajlagos ellenállása, mivel a mágneses permeabilitás maximális értéke nem 100, hanem csak maximum 2 körüli, ami az ellenállás növekedésben túl nagy változást nem okoz. Csak a relatív mágneses permeabilitások egymáshoz viszonyított aránya lehet egy olyan nagyságú érték, amely viszont már megjelenik a kontaktus közvetlen környezetében a látszólagos fajlagos ellenállás-értékekben.

Ha a két közeg relatív mágneses permeabilitásának arányát 100 helyett csak 2-nek vesszük, akkor a 100 Ωm-es fajlagos ellenállású közeg a kontaktus egyik oldalán 100/2 = 50 Ωm, míg a másik oldalon 100 × 2 = 200 Ωm lesz, azaz 4-szeres kontraszttal jelentkezik a határfelület két oldalán, a kontaktus közelében. Mindeközben, ha kiszámítjuk egy vezetőképeség alapján homogén féltér ellenállását, amelynek  $\mu_r = 1$ -től különböző relatív mágneses permeabilitása van (pl.  $\mu_r = 2$ ), akkor a mért impedancia  $\sqrt{2}$ -szeresére, a számított látszólagos fajlagos ellenállás pedig 2-szeresére nő meg. Ez azért van így, mert a klasszikus Cagniard-féle képletben a relatív mágneses permeabilitás értékét konstansnak ( $\mu_r = 1$ ) kezeljük. A látszólagos fajlagos ellenállás számításakor a mágneses permeabilitás változását nem vesszük figyelembe, mivel az ismeretlen.

**Rijo-féle jól vezető modell (12., 13. ábra)**

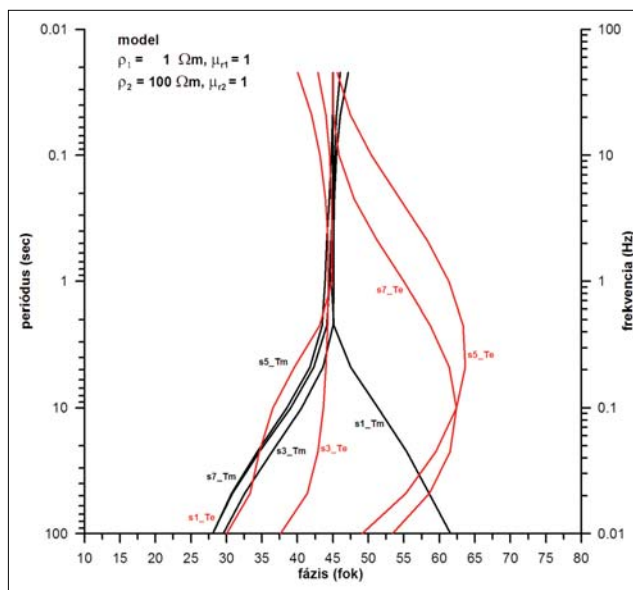
Ennél a modellnél az analógiák vizsgálata miatt kiszámítottuk, hogy egy jól vezető közeg esetén milyen választásgörbéknek kapunk (12., 13. ábra). A legszembetűnőbb jelenség az, hogy a határfelületen, a harmadik szondázási pontban nincsen jelentős eltérés az első vagy második közeg látszólagos fajlagos ellenállásához képest, hanem a két szélsőérték (1–100 Ωm) körüli/közötti görbét kapjuk eredményül.

E polarizációban folyamatos az átmenet a szélsőértékek között. H polarizációban a görbe az első ellenállásról átugrik a második ellenállásra, de a két különböző réteg ellenállásától a harmadik szondázási görbe ellenállásértéke jelen-



12. ábra | Látszólagos fajlagosellenállás-görbék a jól vezető Rijo-féle modell esetén

Figure 12 | Apparent resistivity curves for the conductive Rijo-model

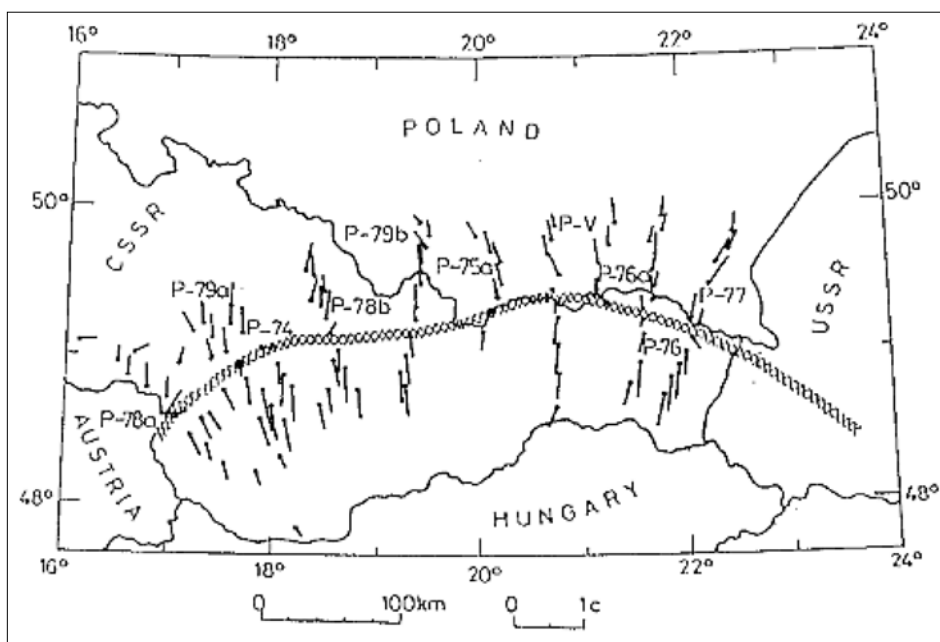


13. ábra | Fázisgörbék a jól vezető Rijo-féle modell esetén

Figure 13 | Phase curves for the conductive Rijo-model

tősen nem tér el (12. ábra). A fázisnál ugyanez a helyzet (13. ábra). A vezetőképesség szempontjából eltérő közegek közötti határfelület nem okoz olyan extrém kicsi látszólagos fajlagosellenállás-értékeket, mint amelyet a mágneses határfelület esetében tapasztaltunk.

Összességében a Rijo-féle mágneses modell esetén van olyan futtatási eredményünk (mérési pontunk), ahol a mágneses ható jelenléte nem látszólagos fajlagosellenállás-növekedést, hanem -csökkenést okozott E polarizációban! Az ellenállás-csökkenés a határfelület közvetlen környezetében a nem mágneses közegben jelentkezik!



14. ábra | Indukciós (Wiese) nyilak a Ny-Kárpátok íve mentén, a nyilak a zónától kifelé mutatnak É-on és D-en egyaránt (Jankowski et al. 1985)  
 Figure 14 | Induction (Wiese) arrows along W-Carpathians, the arrows are directed away from the conductivity

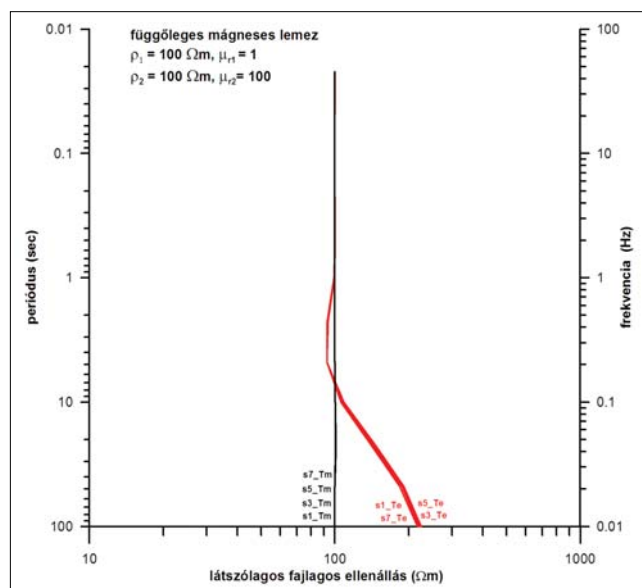
Ez azért fontos, mert a szakirodalomban nagyon sok helyen a mágneses (magmás és metamorf) kőzetek környezetében és nagyszerkezeti vonalak mentén, csökkent ellenállású zónákat mutattak ki (ilyen például a Ny-Kárpátok mentén a geomágneses indukciós vektorok alapján azonosított vezetőképesség-anómália, 14. ábra).

**Függőleges mágneses lemez hatása (15. ábra)**

Vizsgáljuk meg azt az esetet, amikor a mágneses ható a két-dimenziós modellezés irányára merőleges, függőleges mág-

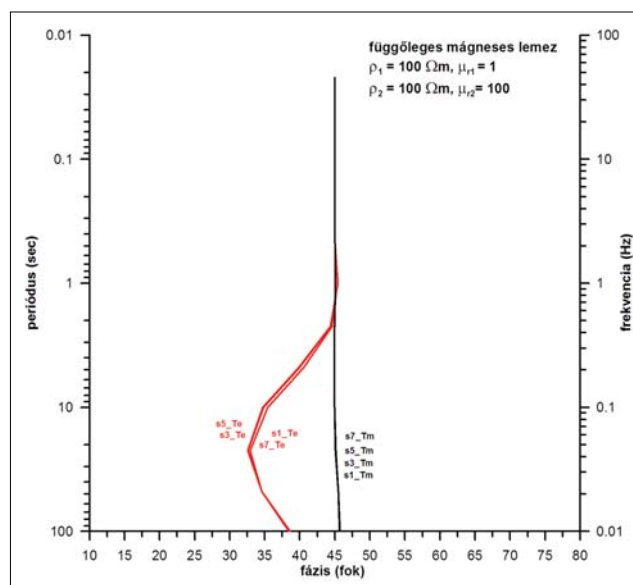
neses lemez! Mivel mágneses testről van szó, így a test hosszanti iránya (szelvényre merőlegesen) lesz a mágnesezési irány, ami a magnetotellurikában a TM mód vagy *H* polarizációs irány, és rá merőlegesen, azaz szelvényirányban pedig, az áramvezetési irány, azaz TE mód vagy *E* polarizációs irány. (Normál esetben és modellezéskor a szelvényre merőleges irány szokott a TE irány lenni, de itt a mágneses lemez miatt a TE és TM polarizációk iránya módosul a modelltől függően. A lemez mágneses tere megváltoztatja, módosítja az elektromágneses tér terjedését!)

Ebben az esetben, mivel a test 5 km-re van a felszíntől, a kontaktusok hatását a ritka állomástávolság miatt nem ér-



15. ábra | Látszólagos fajlagosellenállás-görbék függőleges, mágneses lemez esetén

Figure 15 | Apparent resistivity curves for a vertical magnetic plate



16. ábra | Fázisgörbék függőleges, mágneses lemez esetén

Figure 16 | Phase curves for a vertical magnetic plate

zékelyük. A mágneses lemez a homogén féltérnek megfelelő hatásokat mutatja, azaz megnöveli a közeg fajlagos ellenállását.

Két dolog látszik: az egyik az, hogy az ellenállásgörbe (15. ábra) alapján sokkal kisebb a hatás, mint ami a 6. ábra esetén, mert kisebb a mágneses tömeg, a másik az, hogy  $H$  polarizációban gyakorlatilag nincsen hatás. Azaz, ha a mágneses lemezre merőlegesen futó szelvényen mérünk, akkor a mágneses permeabilitásnak gyakorlatilag nincs hatása a  $H$  polarizációra.

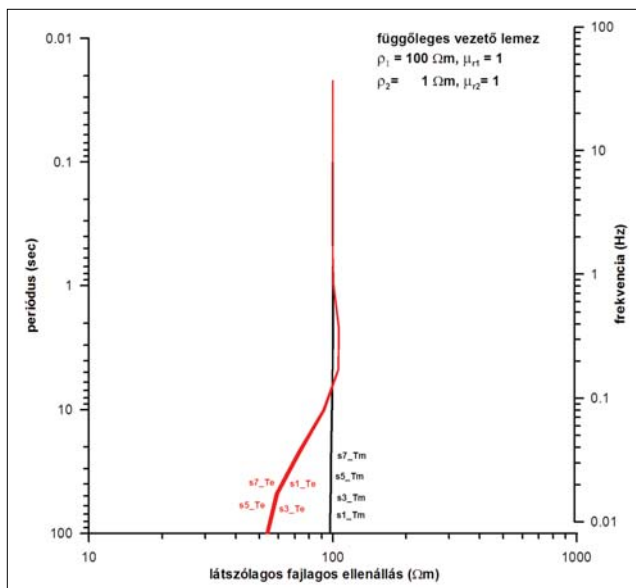
A mágneses lemez szigetelőre jellemző hatást produkál  $E$  polarizációban a látszólagos fajlagosellenállás-görbén. A 10 km mélységben lévő végtelen mágneses lemez hatását a rá merőleges irányban, azaz TE módban már megérzik a mérések, és ugyanazt a jelenséget látjuk, mint homogén féltér esetében, azaz a mágneses test jelenléte (kezdeti belengés után) növeli a látszólagos fajlagos ellenállást. A lemez helyzetéből adódóan mindez elsősorban az alacsony frekvenciákon jelenik meg. A fázisértékeknél (16. ábra) ugyanezeket a dolgokat tapasztaljuk, és ebben az esetben is szembeötlő a fázis gyorsabb reagálása.

Nézzük meg, hogy milyen hatást kapunk, ha nem mágneses, hanem egy vezető függőleges lemez hatását vizsgáljuk!

### Függőleges, jól vezető lemez hatása (17., 18. ábra)

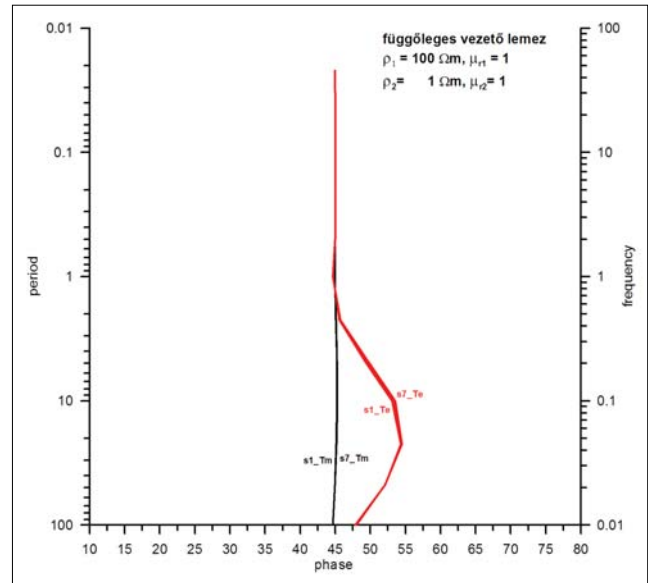
Ennél a modellnél a lemez iránya adja meg az áramvezetés irányát (TE), amely merőleges a szelvény irányára. A szelvényirány lesz a mágneses irány (azaz a TM)!

Ebben az esetben éppen az ellenkezőjét tapasztaljuk. A szelvényre merőleges, jól vezető lemez esetén a  $H$  polarizációban gyakorlatilag nincs hatás, az  $E$  polarizációban



17. ábra | Látszólagos fajlagosellenállás-görbék függőleges, jól vezető lemez esetén

Figure 17 | Apparent resistivity curves for a vertical, conductive plate



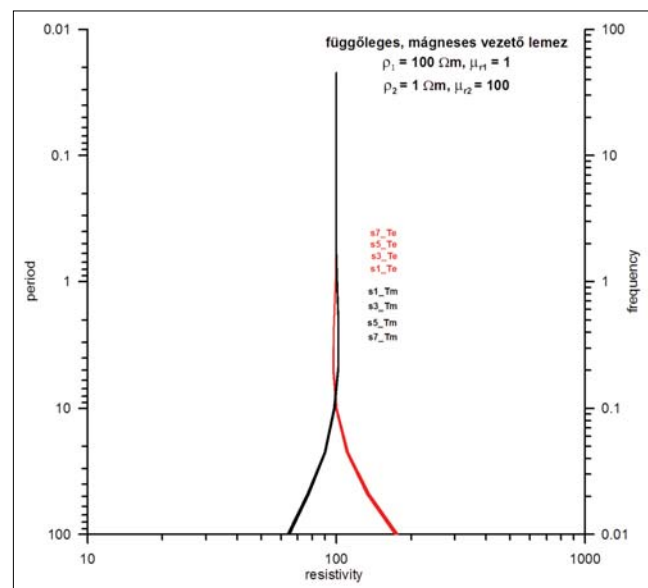
18. ábra | Fázisgörbék függőleges, jól vezető lemez esetén

Figure 18 | Phase curves for a vertical, conductive plate

viszont igen erősen jelentkezik a látszólagos fajlagos ellenállás csökkenése (17. ábra). A fázis esetében is ugyanez tapasztalható (18. ábra).

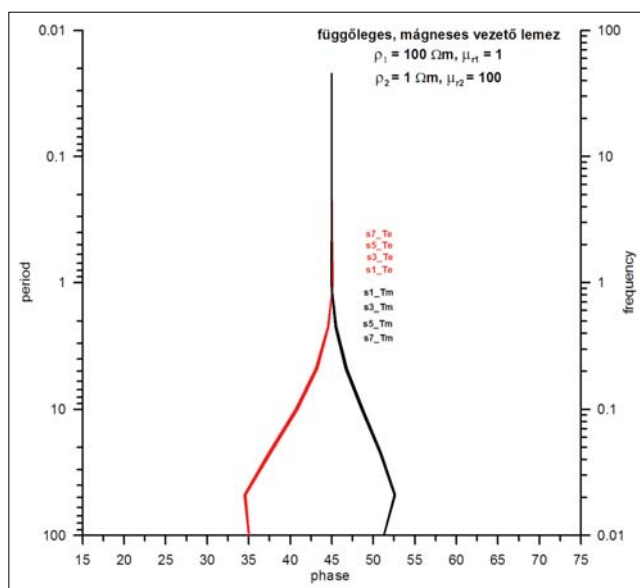
### A függőleges, jól vezető és mágneses lemez hatása

Ha a lemez mágneses és jól vezető is egyszerre, akkor az előző hatások együttesen jelentkeznek (19., 20. ábra). Ebben az esetben a különböző polarizációk esetében teljesen



19. ábra | Látszólagos fajlagosellenállás-görbék a függőleges, mágneses és jól vezető lemez esetén

Figure 19 | Apparent resistivity curves for vertical, magnetic and highly conductive plate



**20. ábra** | Fázisgörbék a függőleges, mágneses és jól vezető lemez esetén  
**Figure 20** | Phase curves for vertical, magnetic and conductive plate

ellentétes látszólagos fajlagosellenállás-változásokat kapunk, azaz jelentősen megnő a különbség az  $E$ - és  $H$ -polarizációs mérési eredmények között. Ez egyértelműen anizotrópiamaximumot okoz! A lemez mágneses tere határozza meg a TE és TM irányokat!

A hagyományos, kétdimenziós magnetotellurikus inverzió esetében ez utóbbi modell kiértékelése csak az elektromos paraméterek figyelembevételével valószínűleg nem fog kielégítő eredményt adni. A nagy mágneses permeabilitású földtani képződmények hatással lehetnek az elektromágneses mérésekre, azaz a mágneses permeabilitás hatását időnként nem szabad figyelmen kívül hagyni! A

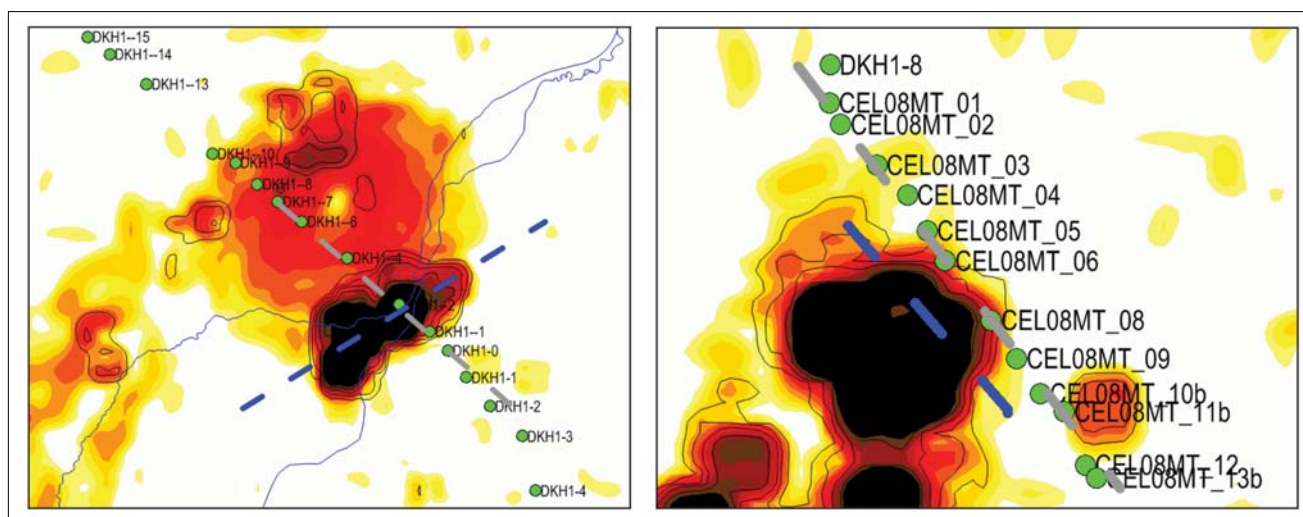
modellezési eredmények alapján a mágneses ércek rendkívül nagy anizotrópiát fognak okozni az MT mérésekben.

## Terepi adatok (Kab-hegy, Kemeneshát, Nyírség)

Az irányanizotrópia vizsgálatáról szóló első cikkünkben (Kiss et al. 2020) a CEL08 szelvény mentén, a Kemenesháton és a Kab-hegy oldalában találtunk anizotrópiamaximumokat. Mindkét esetben az erősen mágneses bazalt/bazanit-képződményhez kapcsolhatjuk a rendellenességet. Érdekes viszont, hogy nem ugyanazon arányképzéssel előállított szelvényen jelenik meg a két hatás. Ennek oka a geometriában keresendő, azaz a mágneses test (és a kontaktus) helyzete játszik szerepet a szelvényhez képest (21. ábra).

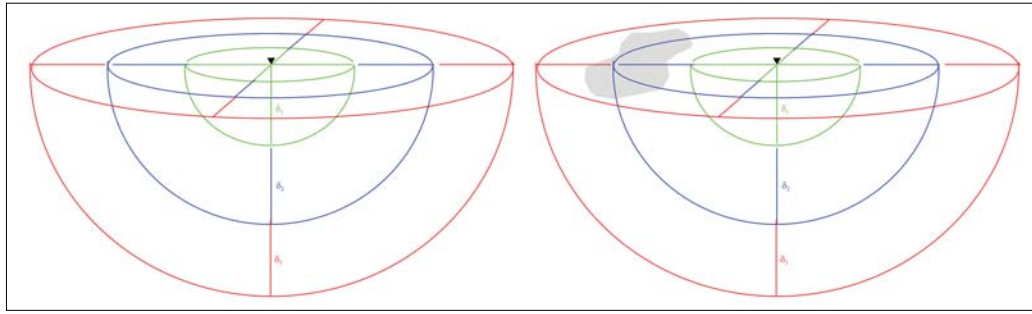
A felszínközeli bazalttest a Kemenesháton az MT szelvényre merőleges helyzetben, illetve közvetlenül a szelvény nyomvonalát alatt van. A Kab-hegynél – mivel a szelvény a hegy mellett a síkon halad (a bazaltokra nem is esik mérési pont) – a szondázási pontok a közettani kontaktussal párhuzamosan haladnak. Itt a szondázási pontok hosszan benne vannak tehát abban a kontaktuszónában, ahol a permeabilitásarányok megváltozása miatt a legnagyobb torzulással kell számolni (lásd 11. ábra kis látszólagos fajlagos ellenállású anomália a kontaktus mentén). Ez az oka annak, hogy olyan nagy és markáns eltérést látunk a különböző irányú TE és TM mérési adatok között.

A földi mágneses mérések az 1500 m-es ritka ponttávolság, illetve a hatók felett tapasztalható nagyobb kiterjedésű mágneses anomáliák miatt a kontaktuszónát pontosan leképezni nem tudták, de annak hatását az MT szelvényen egyértelműen azonosíthatjuk.



**21. ábra** | A kemenesháti bazalt és a „Pásztori vulkán” (bal oldalon) valamint a Kab-hegyi bazalt (jobb oldalon) megjelenése a mágneses változékonysági térképen (kiegészítve az 1 km-es mélységű hatók terének izovonalaival) és az MT szelvény (szondázási pontok) helyzete. Kék szaggatott vonal jelzi a mágneses irányt, ami meghatározza a TE és TM irányokat

**Figure 21** | Manifestation of Kemeneshát basalt and Pásztori volcano (left side) and Kab Hill basalt (right side) on the magnetic variability map by colours and variability lines of the magnetic sources of 1 km depth with the sounding points of MT profile. Blue dashed line is the magnetic direction determining the TE and TM polarisations



22. ábra | Magnetotellurikus szondázási pontban mért információk forráskörnyezete különböző frekvenciákon  
 Figure 22 | Source surroundings of information measured at a magnetotelluric sounding point at different frequencies

A közzétartott kontaktussal párhuzamos szelvényen tapasztalt anizotrópiamaximumok nem a mágneses ható valódi vízszintes és vertikális helyzetét mutatják, hanem azt a sávot, amelyben a határátmeneti zóna hatása érződik. Ezt legkönnyebben a 21. ábra helyszínrajza és a 22. ábra háromdimenziós képe alapján érthetjük meg.

A  $\delta_1$  skinmélység az  $f_1$  frekvenciákhoz tartozó behatolási mélységet, a  $\delta_1 + \delta_2 (= 2 \times \delta_1)$  skinmélység az  $f_2$  frekvenciákhoz tartozó behatolási mélységet, a  $\delta_1 + \delta_2 + \delta_3 (= 3 \times \delta_1)$  az  $f_3$  frekvenciához tartozó skinmélységet mutatja (22. ábra, bal oldal).

A 2. táblázatban láthatjuk, hogy a mérések során használt frekvenciák milyen behatolási mélységet jelentenek. A táblázatban három különböző fajlagosellenállás-értékre számítottuk ki a skinmélységet, de ez a mélység tapasztalataink alapján a mágneses permeabilitás értékétől is függ.

Visszatérve a 22. ábra jobb oldalához, azt látjuk, hogy ha megjelenik a felszínen oldalirányból egy test (szürke poligon), akkor annak hatása van a mérésre, ami meg fog jelenni a mért szondázási görbén.

2. táblázat | A 10, 100 és 1000  $\Omega\text{m}$ -es fajlagos ellenálláshoz tartozó skinmélységek a frekvencia függvényében  
 Table 2 | Skin depths for resistivity of 10, 100 and 1000  $\Omega\text{m}$  as a function of frequency

Frekvencia (Hz)	Skinmélység (m) 10 $\Omega\text{m}$	Skinmélység (m) 100 $\Omega\text{m}$	Skinmélység (m) 1000 $\Omega\text{m}$
100 000	5	16	50
10 000	16	50	159
1 000	50	159	503
100	159	503	1 592
10	503	1 592	5 033
1	1 592	5 033	15 915
0.5	2 251	7 118	22 508
0.1	5 033	15 915	50 329
0.04	7 958	25 165	79 577
0.01	15 915	50 329	159 155
0.001	50 329	159 155	503 292
0.0001	159 155	503 292	1 591 549
0.00001	503 292	1 591 549	5 032 921

A mérések eredményeit mindig az adott szelvény nyomvonalára alá függőlegesen vetítjük be, miközben a kapott az információ a skinmélység (hatótávolság) átmérőjű féltérnek az összehatását mutatja. Nagy frekvenciákon kis térrészről van szó, és minél kisebb a frekvencia, annál nagyobb féltérnek a hatásával kell számolni. Így például a Kab-hegy felszín takaró bazaltsapkája  $\delta_1$ -nél nagyobb, de  $\delta_3$ -nél kisebb távolságból jelenik meg teljes térfogatában, amit mi  $\delta_1$  és  $\delta_3$  közötti mélységként fogunk látni, azaz az EM törvényeknek megfelelően leképezve, de általunk geometriailag hibásan megjelenítve.

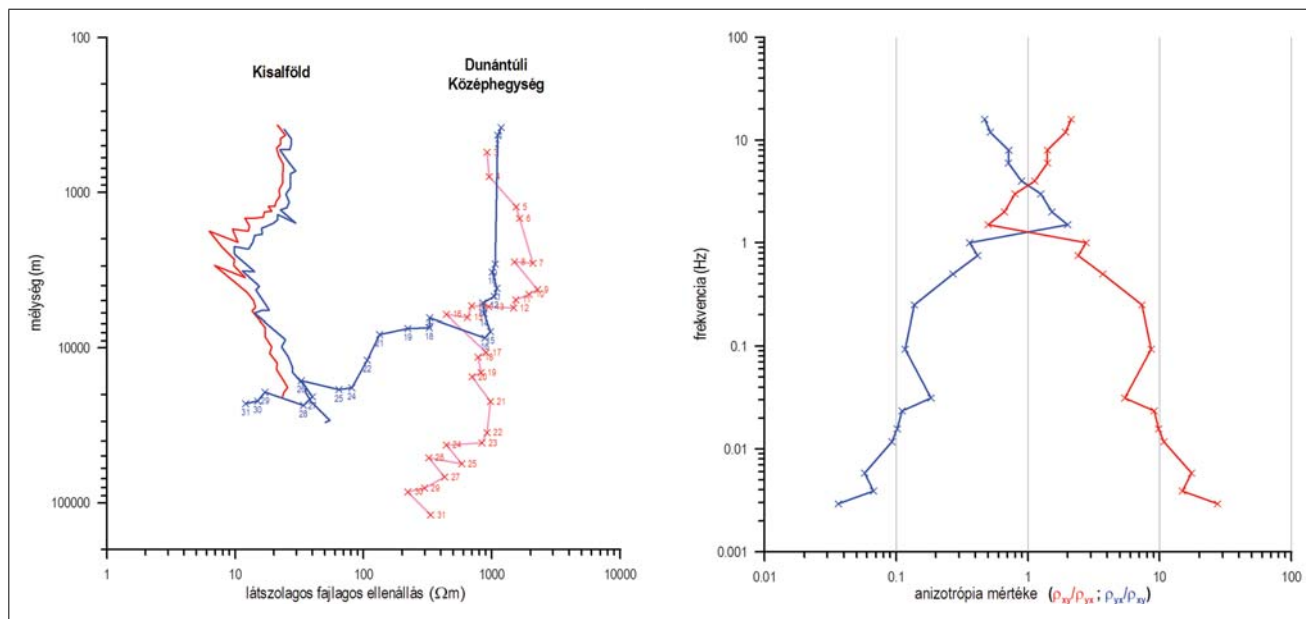
### AniMax a terepi szondázási görbéken

Az anizotrópiából származó eltérésnek az egyedi szondázási görbéken is meg kell jelennie. Ezt néhány szondázási eredmény vizsgálata alapján könnyen be is láthatjuk.

Vizsgáljuk meg először a CEL08 szelvény néhány pontját! A szelvény a Kisalföld vastag üledéke után ráfut a középhegységi medencealjzat-kibúvásokra, ami igen jelentős változást jelent a vezetőképesség (fajlagos ellenállás) kezdő értékeiben és a szondázási görbék menetében (23. ábra, balra).

A 23. ábra bal oldalán egy tipikus kisalföldi szondázási pont görbét mutatjuk (kék, piros vonalak). Az  $E$  és  $H$  polarizációs szondázási görbék párhuzamosak, közöttük nincs jelentős eltérés. A görbe 20  $\Omega\text{m}$  látszólagos fajlagos ellenállásról indul, és egy lokális csökkenő görbeszakasz után folyamatosan emelkedik.

A középhegységi görbe (23. ábra, balra, kék, piros pontozott vonalak) jelentősen eltér a kisalfölditől. A görbe a prekainozoos medencealjzat kibúvásos környezet miatt a nagy frekvencián 1000  $\Omega\text{m}$ -es fajlagos látszólagos ellenállásról indul. Kisebb frekvenciákon a görbe értéke az egyik polarizációban stagnál, vagy másik polarizációban erőteljesen csökken. A középhegységi görbék eltéréseinek az oka az irányanizotrópia, amelyet leginkább a Kab-hegy közelsége okoz, azért mert a szelvény a Kab-heggyel párhuzamosan fut kb. 5–10 km-en keresztül. Ezt a hatást az aránygörbéken lehet nyomon követni (23. ábra, jobbra). Ha a két görbe ugyanolyan lenne, akkor a görbék arányát egy egyenes vonal jelezné az 1-es értéken. A két görbe között azonban 10–30-szoros eltérés alakul ki a kis frekvenciák felé, ami az oldalhatásként megjelenő



23. ábra | Jellegzetes szondázási TE (kék) és TM (piros) görbék a CEL08 szelvény mentén (balra) és egy középhegységi, Kab-hegy melletti szondázás E és H polarizációs aránygörbéi (jobbra)

Figure 23 | Characteristic TE (blue) and TM (red) sounding curves along the CEL08 profile (left) and E and H polarization ratio curves of a Transdanubian Middle Ranges sounding near Kab Hill (right)

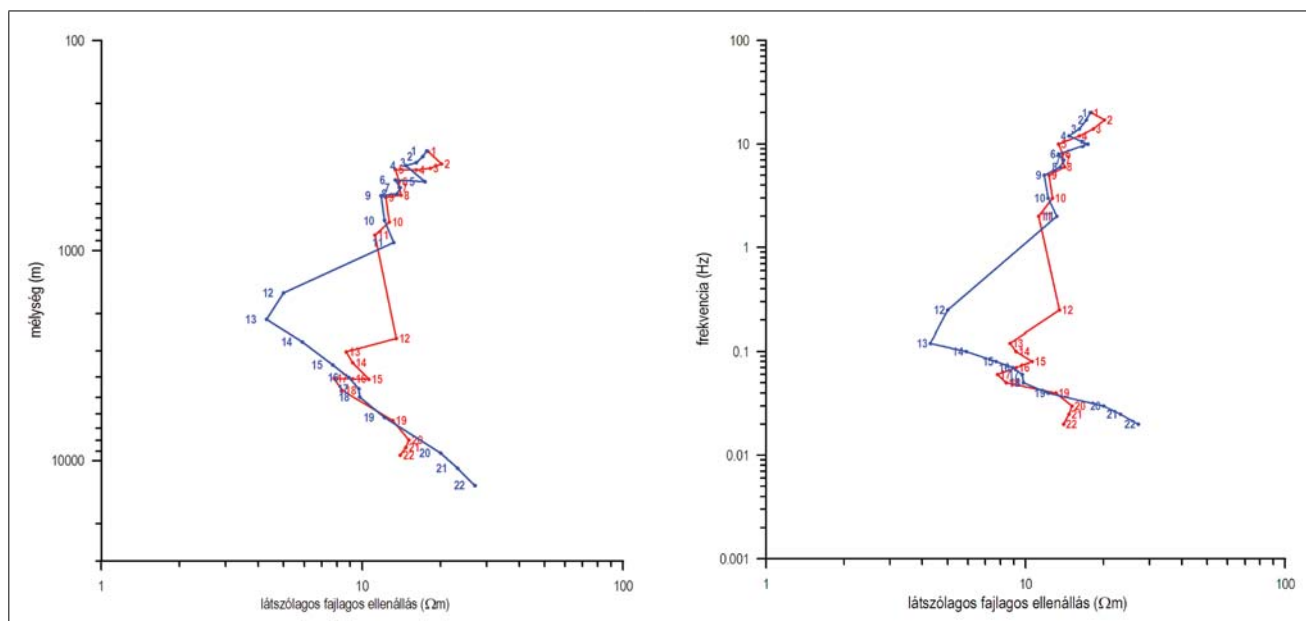
kab-hegyi bazalttal, illetve a bazalt okozta határátmeneti jelenséggel (lásd 8. ábra, s3 pont görbéi) lehet összefüggésben.

A 23. ábra bal oldalán lévő középhegységi szondázási görbén sorszámok látszanak, ennek magyarázatát a következőkben ismertetjük majd, más szondázáshoz kapcsolódóan.

Egy másik példa a Nyírség területéről, a Napkor település melletti, szeizmikus reflexiós szelvény alapján kimutatott (Nemesi et al. 1996) eltemetett vulkánnak a környeze-

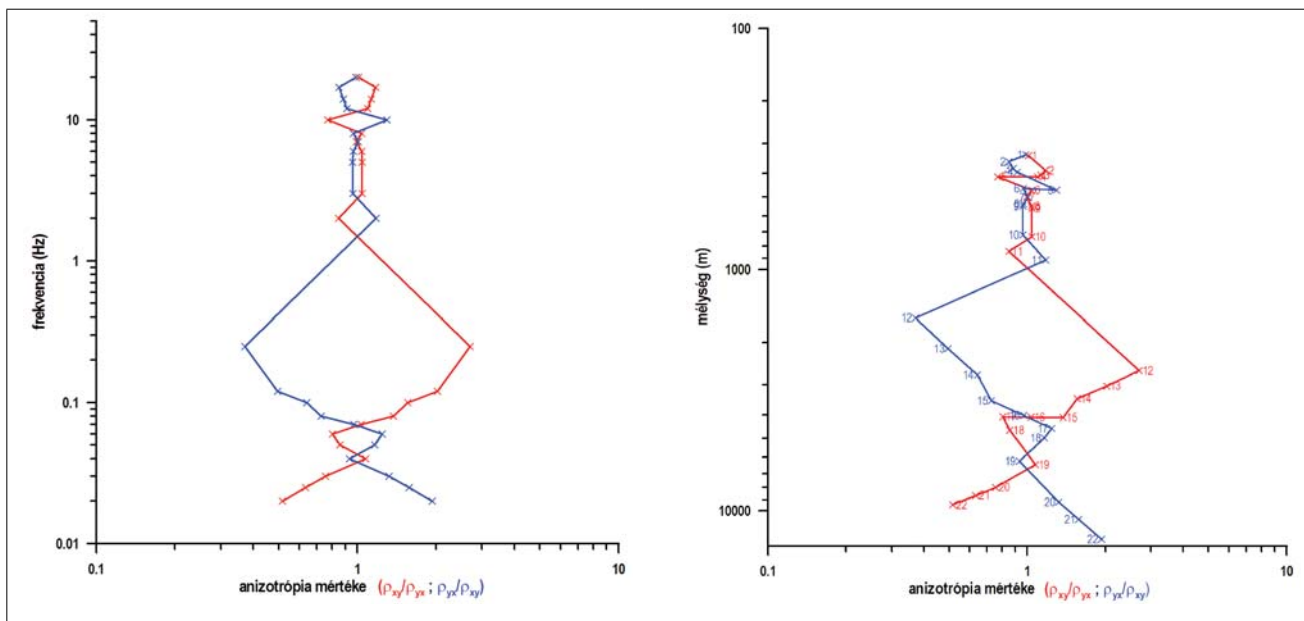
tében végzett A-18/26-os számú magnetotellurikus szondázási pont görbéi (24. ábra). Mivel eltemetett mágneses hatóról van szó, így gyengébb jelenségre számítunk.

Az 24. ábra azt mutatja, hogy az A-18/26-os ponton lemerített MT szondázási görbék szétnyílnak az 1000 m (1,5 Hz) és 3000 m (0,15 Hz) közötti mélységtartományban, ami az anizotrópia megjelenésének jele a mérési adatokban. A görbéket mélység- és frekvenciaskálán is megjelenítettük, aminek oka van, s mielőtt továbbmennénk, ennek kapcsán érdemes néhány dolgot végiggondolni:



24. ábra | Az A-18/26 szondázási pont különböző irányban mért ellenállás–frekvencia, illetve ellenállás–mélység görbéi (log-log skála mentén)

Figure 24 | Resistivity–frequency and resistivity–depth curves of the sounding point A-18/26 measured in different directions (log-log scale)



25. ábra | Az anizotrópia mértéke az A-18/26-os szondázási görbéken frekvencia és Bostick-mélység szerint

Figure 25 | Extent of anisotropy on A-18/26 sounding curves depend on frequency and Bostick depth

1. A szondázási görbék a periódusidő (frekvencia) függvényében mintázzák meg az EM teret, így diszkrét adatok állnak rendelkezésre (24. ábra, jobbra). A görbék összevetése tehát elsősorban egyszerűnek tűnik az azonos periódusidőre kiszámolt látszólagos fajlagosellenállásértékek alapján.
2. A mélység azonban a periódusidő (frekvencia) mellett a közeg elektromos vezetőképességétől, mágneses permeabilitásától is függ (Kiss et al. 2020). Az anizotrópia megjelenése esetén tehát az azonos periódusidők nem jelentenek azonos mélységet (24. ábra, balra)!
3. Az irányanizotrópia miatt az  $E$  és  $H$  polarizációban eltérő szondázási görbéket mérünk, amelyek az irányonként eltérő fizikai tulajdonságokkal és határfelületekkel vannak kapcsolatban.
4. A klasszikus alapképletek alapján az EM hullám behatolási mélysége változik, ha változik a közeg vezetőképessége vagy a mágneses permeabilitása. Ez viszont azt jelenti, hogy ugyanarra a periódusidőre (frekvenciára) – az anizotrópia, azaz a különböző fizikai paraméterek miatt – eltérő behatolási mélységek lesznek jellemzőek.
5. Az azonos periódusidőn (frekvencián) mért értékek ebből adódóan nem azonos mélységekhez tartoznak, viszont az azonos mélységpontokban nincs mért, maximum csak származtatott látszólagos fajlagosellenállásértékünk.

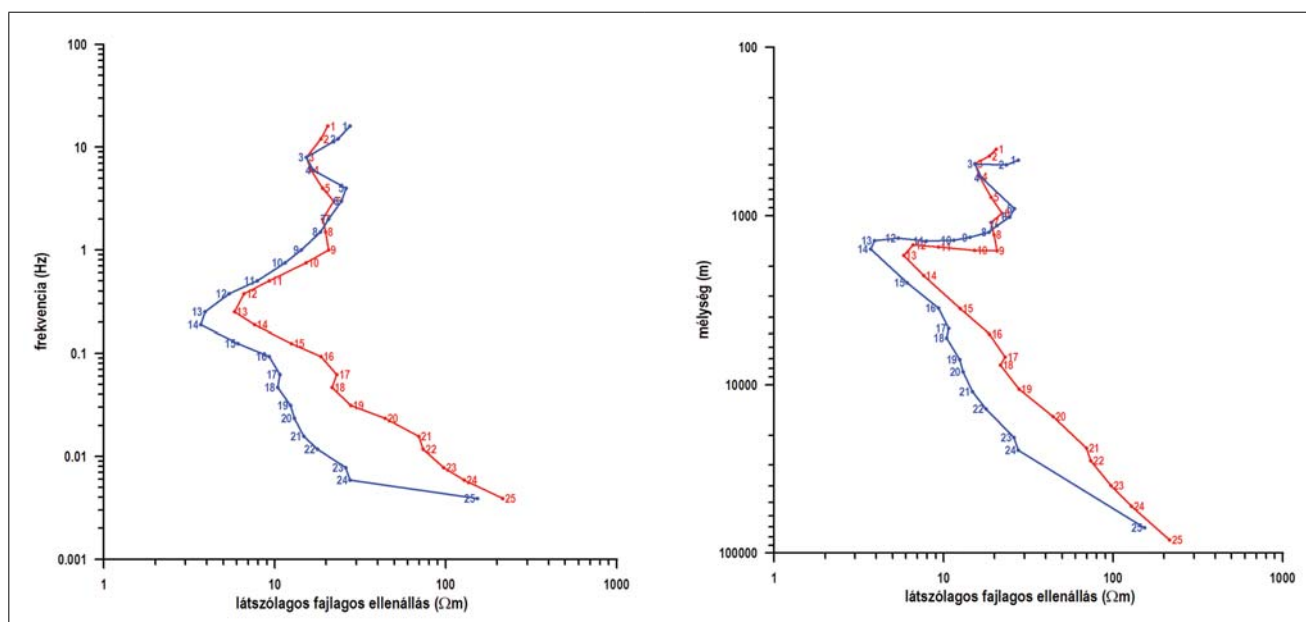
Az anizotrópia pontos beazonosítása korrekt módon – úgy tűnik – csak a frekvencia alapján végezhető el. Az azonos frekvenciájú (periódusidejű) adatok eltérő mélységhez tartoznak, így elsősorban hibának tűnik az összevetésük. De lehet, hogy az ebből adódó eltérés még jobban kiemeli

azokat a mélységtartományokat, ahol az anizotrópia jelenségével számolni kell! Sőt lehet, hogy normál megjelenítésben, a periódusidő (frekvencia) alapján végzett összevetéskor azonosnak tűnő görbék a behatolási mélységek eltérése miatt jelentős anizotrópiát fognak mutatni!

A 24. ábra bal oldala az A-18/26 pont szondázási mélységgörbéjét mutatja. A mért értékeket a frekvencia szerint sorszámoztuk (amint a 23. ábra bal oldalán a középhegységi görbét is), így látszik, hogy hol ugrik meg a behatolási mélység a fizikai paraméterek megváltozása miatt a görbék között. Az A-18/26 pont esetében a 11. és 12. frekvencia között jelentkezik eltérés a behatolási mélységben, ami a 19. frekvenciánál eltűnik. A görbe legmélyebb részénél (20.–22. pontok) az eltérések már inkább zajból származnak, de itt sem zárható ki az anizotrópia hatása. Érdeemes megnézni, hogy a két görbe aránya mit eredményez, azaz mekkora lesz az irányok közötti anizotrópia.

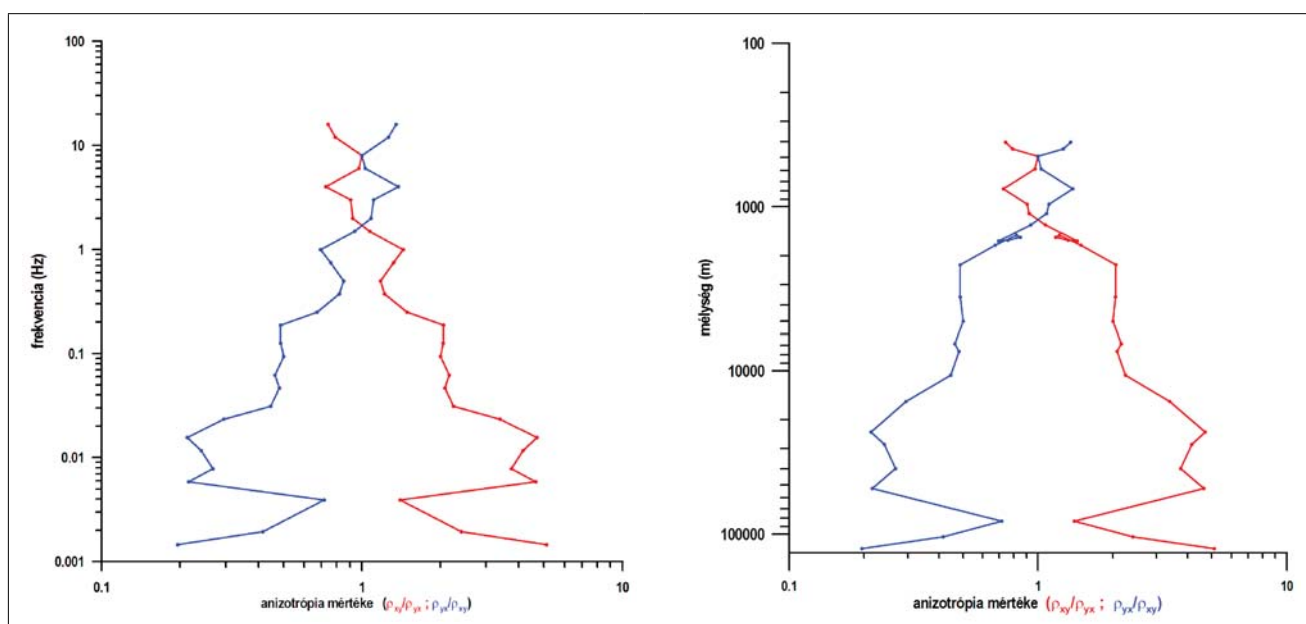
Még nincs tapasztalatunk az anizotrópia nagyságának megítélésében, de úgy tűnik, hogy az 50%-os eltérés (az anizotrópia 0,5–1,5 közé esik) még elfogadható, és nem jelez durva változást a földtani közegben, illetve a változás az elektromos vezetőképesség-változással megmagyarázható. Ezen az értéken felül viszont már 2D vagy 3D hatásokból származó anizotrópiára lehet gyanakodni, ami a határfelület mentén a mágneses permeabilitások arányában bekövetkező jelentős változást is jelezheti.

Egy ilyen hatást azonosíthatunk a 25. ábra piros anizotrópiagörbén, amely majdnem 3-szoros eltérést jelez a kétféle mérési irány között a frekvenciától (25. ábra, balra) és a mélységtől (25. ábra, jobbra) függően. A maximális anizotrópia az 1000–3000 m-es mélységtartományban (a 0,07–2 Hz frekvenciatartományban) jelentkezik. A 24. ábra is szépen mutatja ebben a mélységtartományban (frekvenciatartományban) az eltérést.



26. ábra | Az A-16/10 magnetotellurikus szondázás látszólagos fajlagosellenállás-görbéi

Figure 26 | Apparent resistivity curves of A-16/10 magnetotelluric sounding



27. ábra | Az anizotrópia mértéke az A-16/10-es szondázási görbéken frekvencia és Bostick-mélység szerint

Figure 27 | Extent of anisotropy on A-16/10 sounding curves depend on frequency and Bostick depth

Nézzünk meg egy másik példát is, a Necs-1 mélyfúrás környezetében! Ez a fúrás 1074 m-től 3760 m-ig miocén vulkanitot, majd 4000 m-ig kréta dioritot fúrt. Itt tehát durván 3000 m vastag összlet van magmás képződményekből, amelynek a felső része effuzív, alsó része intruzív.

A 26. ábra mutatja a fúrástól É-ra, 6 km távolságban mért A-16/10 MT szondázási pont látszólagos fajlagosellenállás-görbéit. A log-log skála mentén megjelenített szondázási görbén látszik az anizotrópia hatása miatti

szétnyílás, de a görbealakok alapján ez nem tűnik jelentősnek.

Ha azonban megvizsgáljuk az összetartozó értékeket, akkor a 13. értéktől jelentős eltérés van a különböző irányokban mért szondázási görbék között (ez mélységben is megjelenik, hiszen eltérő sorszámok vannak azonos mélységben). A megjelenített aránygörbéken (27. ábra) mindez már nagyon erősen jelentkezik és kb. ~2000 m-től 2-szeres, mélyebben még ennél is nagyobb anizotrópiát



jelezve. A 27. ábra bal és jobb oldala (azaz a frekvencia-ellenállás és a mélység-ellenállás görbék) között az is látszik, hogy mekkora torzulás adódik a közegparaméterektől függő változó behatolási mélységből.

## Összefoglalás

A magnetotellurikus módszer mért paraméterei ( $E_x$ ,  $E_y$ ,  $H_x$ ,  $H_y$ ,  $H_z$ ) esetén és a klasszikus feldolgozási képletek (homogénfáltér- és egydimenziós vagy rétegzett modell) miatt a dielektromos állandó és a mágneses permeabilitás szerepe eddig elhanyagolhatónak tűnt.

Korábbi cikkünkben (Kiss et al. 2020) bemutattuk, hogy két eltérő fizikai paraméterű közeg esetén a határátmeneti törvényszerűségek miatt a két közeg kontaktusa felett az elektromos vezetőképeség mellett a mágnesespermeabilitás- és a dielektromospermittivitás-értékek megváltozásának mértéke (azok aránya) hatással van a magnetotellurikus mérés eredményeire. Ezt a TE és TM módú inverziós eredmények összevetéséből (anizotrópiamaximumok alapján) ismertük fel a CEL08 szelvény mentén.

Elméleti kutatások és numerikus modellezések alapján homogén féltérmodell esetén, a mágneses tulajdonságok megjelenése alapvetően növeli, de határfelületek mentén akár csökkentheti is a klasszikus módon kiszámolt impedanciát és ebből következően a látszólagos fajlagos ellenállást. Ez viszont azt jelenti, hogy egyes jól vezető zónák földtani értelmezése további lehetőségekkel, a mágneses és nem mágneses közeg kontaktzónájával bővül.

Az erősen mágneses és főleg a remanensen mágnesezett képződmények jelenlétekor ezekkel a hatásokkal a magnetotellurikus szondázásoknál – elsősorban a kontaktzónák környékén – számolni kell! A mágneses tulajdonságok a klasszikus magnetotellurikus feldolgozásokban hatással van a skinmélységre, az elektromágneses hullám terjedésére is, tehát a különböző irányokban végzett mérések behatolási mélysége is eltérő lesz.

A mágneses test jelenléte átfordíthatja a TE és TM polarizációs irányokat az anizotrópiahatás mellett. Egy erősen mágneses test az anomális mágneses terével, sokkal tágabb körben fejti ki hatását, mint a közeg mágneses közetfizikai tulajdonságai, így az elektromágneses tér torzulása nemcsak a test közvetlen környezetében, hanem a test által keltett mágneses erőter elérésekor (azaz tágabb környezetben) is érezhető lesz!

Elméleti megfontolások és numerikus modellezések eredményei után terepi görbéken, a látszólagos fajlagos ellenállások alapján is találtunk ilyen jellegzetességeket, és a CEL08 szelvényen a Kab-hegy mellett vagy a Nyírségben, a Napkor melletti vulkán kontaktzónájában (A-18 szelvény) és a Nagyecséd alatti vastag vulkáni összlet környezetében (A-16 szelvény). A szondázási görbék alapján kimutatható irányanizotrópia ilyen jelenségekre utal.

## Köszönetnyilvánítás

A közetfizikai paraméterek vizsgálatával a doktori képzés során kezdtem el komolyabban foglalkozni, s akkor jött a felismerés is, hogy a dolgok összefüggenek: pl. a szeizmikus hullámterjedési sebesség a sűrűséggel vagy a mágneses tulajdonságok az elektromágneses hullámterjedéssel. Nem haszontalan tehát ezekkel a kérésekkel foglalkozni.

A vizsgálatokban jó társakra találtam PhD-témavezetőm (Szarka László) és szerzőtársam (Prácsér Ernő) személyében, akiknek ezúton köszönöm meg az együttműködést. A velük folytatott konzultációk, beszélgetések gyakorlati példákon és az elméleten keresztül vezettek el miniket a magnetotellurika és a mágnesség kapcsolatához, kezdetben csak a Curie-hőmérséklet mélységében (Hopkinson-effektus), majd az elektromágneses tér elmélet elemzésének és a modellezésnek köszönhetően a remanens mágnesezettség „virtuális mágneses szuszceptibilitása” kapcsán a felszíni hatásokhoz. A téma azonban még most sem zárható le, mert még most is csak statikusan (skalárisan) vesszük figyelembe a fizikai paramétereket, miközben a gyakorlati példák alapján a mágneses és elektromágneses erők „dinamikus” kapcsolatban vannak egymással. Az anomális mágneses (indukált és/vagy remanens) tértől függ az elektromágneses tér torzulása és terjedési sebessége a közegben, amit most még nem tudunk figyelembe venni a magnetotellurikus mérések feldolgozása során.

Köszönet illeti cikkünk lektorait (Verő Lászlót és Turai Endrét), akik nyelvi botlásainkat, hibáinkat kijavították, és értékes megjegyzéseikkel növelték a cikk szakmai színvonalát.

## A tanulmány szerzői

Kiss János, Prácsér Ernő

## Jegyzetek

<sup>1)</sup> 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 az adott heterogén közeget jellemezhetjük. A magnetotellurikus mérések eredményeként látszólagos fajlagos ellenállás szondázási görbéket kapunk, inverzió segítségével történik a látszólagos értékekből a közeg fajlagos ellenállásának meghatározása.

<sup>2)</sup> AniMax – anizotrópiamaximum.

<sup>3)</sup> Az indukált mágnesezettség során a külső földi mágneses tér a konszolidálódott, szilárd anyagban a mágneses domének irányba rendeződését idézi elő. Az anyag szilárdsága miatt itt meglehetősen korlátozott a mágneses domének mozgása, ezért inkább csak polaritásbeli átrendeződésről beszélhetünk.

Remanens mágnesezettség esetén viszont mindez képlékeny anyagban történik, ahol a mágneses domének fizikai mozgása is lehetséges, ezért sokkal nagyobb mértékű „térbeállítás” valószínűsíthető, azaz a domének a polaritásbeli rendezettség mellett effektív mozgással a legkedvezőbb, legkönnyebben felmágnesezhető irányba rendeződnek, ami általában a hossz tengelynek felel meg. Mágneses szempontból tehát egy rendezett,

azonos irányú mágneses doménszerkezet alakul ki. Ennek köszönhetően az indukáltnál sokkal erősebb remanens mágnesesség alakulhat ki.

### Hivatkozások

- Cagniard L. (1953): Basic theory of the magnetotelluric method of geophysical prospecting. *Geophysics*, 18, 605–635.
- Clark D. A. (1997): Magnetic petrophysics and magnetic petrology: aids to geological interpretation of magnetic surveys. *AGSO Journal of Australian Geology & Geophysics*, 17/2, 83–103.
- Hopkinson J. (1889): Magnetic and other physical properties of iron at a high temperature. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, A180, 443–465.
- Jankowski J., Tarlowski Z., Praus O., Pecova J., Petr V. (1985): The result of deep geomagnetic soundings in the West Carpathians. *Geophys. J. R. Astr. Soc.* 80, 561–574.
- Kiss J., Prácser E., Szarka L., Ádám A. (2010): Mágneses fázisátalakulás és a magnetotellurika. *Magyar Geofizika*, 51/2, 73–87.
- Kiss J., Szarka L., Prácser E. (2005a): Second order magnetic phase transition in the Earth. *Geophysical Research Letters*, 32, L24310, DOI: 10.1029/2005GL024199
- Kiss J., Szarka L., Prácser E. (2005b): A Curie-hőmérsékleti fázisátalakulás geofizikai következményei. *Magyar Geofizika*, 46/3, 102–110.
- Kiss J., Zilahi Sebess L., Szarka L. (2011): A mágnesség jelensége és a Hopkinson-effektus. *Magyar Geofizika*, 52/3, 151–169.
- Kiss J., Zilahi-Sebess L., Rádi K. (2020): MT mérési adatok nem hagyományos feldolgozása („AniMax” – anizotrópiamaximumok és analitikus fajlagos ellenállás). *Magyar Geofizika*, 61/3, 101–122.
- Kiss J., Vértesy L., Rádi K. (2021): Új ötletek az erőtér-geofizikai adatfeldolgozásban (esettanulmányok). ILP MNB online konferencia, 2021. február 10. [https://drive.google.com/drive/folders/1FU\\_87oWe3FFQ4bqv4ASStuDTuh1QnP5?usp=sharing](https://drive.google.com/drive/folders/1FU_87oWe3FFQ4bqv4ASStuDTuh1QnP5?usp=sharing)
- Nemesi L., Hobot J. (1981): A Tiszavidék és a Tiszántúl mélyszerkezetének geoelektromos kutatása. *Geofizikai Közlemények*, 27, 7–105.
- Nemesi L., Polcz I., Szeidovitz Gy.né, Stomfai R. (1996): ÉK-Magyarország vulkanikus kőzetei geofizikai mérések alapján. *Magyar Geofizika*, 37/3, 142–153.
- Rijo L. (2003): Magnetic static shift effects on 2-D TE magnetotelluric sounding. In: 8th International Congress of the Brazilian Geophysical Society, Rio de Janeiro 1, 1–6.
- Szarka L. (1988): A magnetotellurikus térösszefüggések fizikai jelentéséről. *Magyar Geofizika*, 29/5–6, 201–224.