

# A Curie-hőmérsékleti fázisátalakulás geofizikai következményei<sup>1</sup>

KISS JÁNOS<sup>2,3</sup>, SZARKA LÁSZLÓ<sup>3,4</sup>, PRÁCSER ERNŐ<sup>2</sup>

*A Curie-hőmérsékletnek megfelelő mélységtartományban — Magyarországon ez 4–16 km-re tehető — több érdekes geofizikai anomália jelentkezik. Elsőként említhetnénk a földmágneses adatok spektrális vizsgálata alapján ebben a mélységtartományban kimutatott rétegszerű mágneses hatókat. Ugyanítt több magnetotellurikus szelvényen is jól vezető kéreganomália jelentkezik, és minden alapunk megvan annak feltételezésére, hogy az eddig ismert és fizikailag reális mechanizmusokhoz egy eddig figyelembe nem vett jelenség, a mágneses fázisátalakulás is hozzájárulhat.*

*Cikkünkben a Curie-hőmérsékleten jelentkező fázisátalakulást ismertetjük, illetve az ennek kísérőjeként megjelenő, rendkívüli módon megnőtt mágneses szuszceptibilitást (Hopkinson-effektust), mint a mélybeli mágneses és jól vezető kéreganomáliák egy lehetséges magyarázatát.*

*A másodrendű mágneses fázisátalakulás jelensége — mint lehetséges magyarázat a mágneses és magnetotellurikus anomáliák eredetére — Kiss Jánosban vetődött fel a NYME Kitaibel Pál Környezettudományi Doktori Iskolában végzett PhD tanulmányai során.*

**J. KISS, L. SZARKA, E. PRÁCSER: Phase transition at the Curie temperature and its geophysical consequences**

*There are some interesting geophysical anomalies in the depth of the Curie temperature — that is 4–16 km in Hungary. First of them we would mention the deep magnetic bodies identified in this depth by spectral depth estimation of geomagnetic data. On the other hand, there are a lot of magnetotelluric crustal conductivity anomalies in the same range. On base of these arguments we suppose, that the anomalies are related partly to the magnetic phase transition, beyond the well-known physically realistic phenomena.*

*In this paper we try to review the magnetic phase transition just at the Curie temperature causing enhanced magnetic susceptibility (Hopkinson effect). This may be a good explanation of deep magnetic and crustal conductivity anomalies.*

## 1. Bevezetés

Az általunk vizsgált jelenség megértéséhez a cikk elején ismertetjük a legfontosabb fizikai jellemzőket és azok összefüggését. Az elemzések során megnézzük, hogy Magyarországon milyen valószínűséggel és milyen mélységben jelentkezhet ez a hatás, majd gyakorlati példákon vizsgáljuk azokat az anomáliákat és azokat a földtani felépítésből adódó helyzeteket, ahol mindennek reális esélye van [KISS, SZARKA, PRÁCSER 2005].

### 1.1. Fázisátalakulások [GESZTI 2004]

A termodinamikának a fizikusok számára talán leggyakrabban alkalmazási területét a fázisátalakulások és a fázis-egyensúlyok leírása jelenti, ami a fizikai anyag-tudománynak és az ezt hasznosító mérnöki tudományoknak is alapvetően fontos háttere.

A fázis a halmazállapot fogalmának általánosítása, amely megkülönbözteti egymástól a bár azonos halmazállapotú, de különböző szimmetriájú anyagokat, pl. egy szilárd anyag különböző kristálmódosulatait, egy mágneses kristály paramágneses és ferromágneses állapotát, vagy

a folyékony hélium normális és szuperfolyékony állapotát. A fázis az anyagnak halmazállapot és szimmetria tekintetében egységes állapota, amely a külső paraméterek (hőmérséklet, nyomás, a környezet egyes komponenseinek kémiai potenciálja) meghatározott tartományában lehet stabil. A stabilitási tartomány határát átlépve az anyag — külső feltételektől függően — felbomlik más stabil fázisokra, vagy egyetlen stabil fázisba megy át. A stabilitási tartományok meghatározása és a tartományok határain fellépő fázisátalakulások körvonalazása a termodinamikai elemzés feladata.

### 1.2. Mágneses fázisátalakulás [GESZTI 2004; KITTEL 1981]

A ferromágneses anyagok spontán (külső mágneses mező nélkül is jelen levő) mágnesezettsége a hőmérséklet növelésével csökken, majd egy adott hőmérsékleten, a  $T_c$  Curie-ponton eltűnik, e fölött az anyag paramágneses. A Curie-pontnál megváltozik az anyag szimmetriája, a paramágneses tértükrözéssel szemben szimmetrikus, a ferromágnesnél viszont kitüntetett irányt jelent a mágnesezés vektora. Emiatt a  $T_c$ -nél fázisátalakulás zajlik le. Ez sok tekintetben könnyebben és pontosabban vizsgálható, mint a folyadék-gőz átalakulás, ezért a fizikai alap kutatás szempontjából döntő szerepe volt a ferromágnes-paramágnes átalakulás részletekbe menő megértésének. Magasabb hőmérsékletre  $T_c$  alá hűtve az anyag újra ferromágneses lesz: a szimmetria szerint lehetséges különböző mágnesezési irányok közül véletlenszerűen választ magának egyet, amelyhez azután ragaszkodik. Ennek a véletlen választás-

<sup>1</sup> Beérkezett: 2005. augusztus 9-én

<sup>2</sup> Magyar Állami Eötvös Loránd Geofizikai Intézet, H-1145 Budapest, Kolumbusz u. 17–23.

<sup>3</sup> Nyugat-Magyarországi Egyetem, Kitaibel Pál Környezettudományi Doktori Iskola, Sopron

<sup>4</sup> MTA Geodéziai és Geofizikai Kutatóintézet, H-9400 Sopron, Csatka u. 6.

nak neve spontán szimmetriasértés. A hőmérséklet változtatásával a ferromágnesség eltűnése, ill. újbóli megjelenése legtöbbször folytonosan történik: kicsivel  $T_c$  alatt a mágnesezés kicsi, emiatt a rendszer még „nem tudja, milyen irányt választott”: a mágnesezés nagy ingadozásokat mutat, akárcsak a folyadék-gőz rendszer kritikus pontjában. Emiatt a folytonos fázisátalakulások pontját általában is kritikus pontnak nevezzük. *A mágneses kritikus pontban fellépő ingadozások nem fényszórásban, hanem spin-polarizált neutronok szóródásában figyelhetjük meg. Az ingadozások velejárója a kritikus pontban óriásira megnövekedő mágneses szuszceptibilitás* (a kompresszibilitással analog mennyiség) és az ugyancsak megnövekvő fajhő is.

A jelenséget matematikailag — bár születtek azóta pontosabb formulák is — a Curie–Weiss-törvénnyel közelíthetjük ( $T < T_c$  esetben):

$$\kappa = C / (T - T_c)$$

ahol

$\kappa$  — mágneses szuszceptibilitás,

$C$  — Curie-állandó,

$T$  — hőmérséklet,

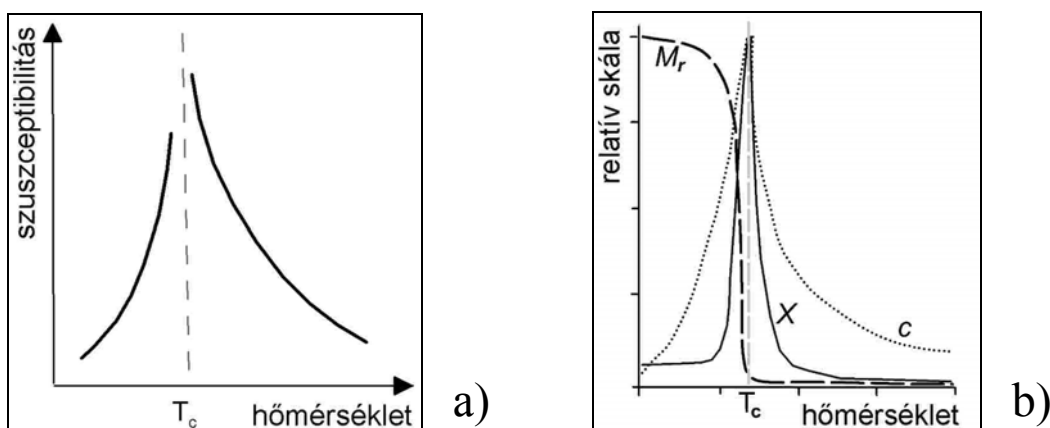
$T_c$  — Curie-hőmérséklet.

Ferromágneses esetben a Curie-hőmérséklet alatt komplex viselkedést tapasztalunk, amit a remanens mágnesezettség és a mágneses szuszceptibilitás változása határoz meg. Elérve a Curie-hőmérsékletet a spontán, vagy remanens mágnesezettség az eredeti értékről nullára csökken le. A

mágneses szuszceptibilitás a Curie-hőmérséklet környezetében, egy szűk tartományban, elvileg végtelen nagyságú lehet (*1. ábra*) — ezt 1885-ben John HOPKINSON fedezte fel és publikálta elsőként [HOPKINSON 1889] — ami rendkívül érdekes, és magyarázatot adhat néhány általunk jól ismert, de rendkívülinek tűnő geofizikai jelenségre.

Földmágneses kutatás szempontjából ez azt jelenti, hogy a mágneses kritikus pont környezetében (a litoszférában, ahol a hőmérséklet eléri a Curie-hőmérsékletet) jelentkező megnövekedett mágneses szuszceptibilitás hatására kialakuló földmágneses anomália a rendkívül nagy mélység — és az ebből adódó nagy hullámhossz — ellenére detektálhatóvá válik a felszíni mérésekből, ha megfelelően hosszú szelvény mentén vizsgáljuk.

Az elektromágneses indukció esetében a közeg áramvezetését a kisfrekvenciás elektromágneses térben az elektromos vezetőképesség ( $\sigma$ ) és a mágneses permeabilitás ( $\mu$ ) együttesen ( $\sqrt{\mu\sigma}$ ) határozza meg, ez azt jelenti, hogy ha a mágneses permeabilitás értéke  $n$ -szeresére nő, az egyenértékű a vezetőképesség  $n$ -szeres megnövekedésével [MATVEJEV 1990]. Ebből az következik, hogy ha a mágneses szuszceptibilitás értéke egy-két nagyságrenddel nagyobb a normális értéknél, akkor ez szigetelő környezetben fiktív vezetőképesség-anomáliákat eredményezhet. A valóság azonban ennél bonyolultabb, amit az 5.2. fejezetben bővebben is kifejtünk.



1. ábra. a) A mágneses szuszceptibilitás függése a hőmérséklettől a Curie-hőmérséklet közvetlen környezetében [KAGANOV, CURKERNYIK 1982]; b) vázlat a mágnesezettség ( $M_r$ ), a mágneses szuszceptibilitás és a fajhő ( $C$ ) viselkedéséről a Curie-hőmérséklet környezetében [GOULD, TOBOCHNYIK 2005 alapján]

Fig. 1. a) Temperature depending of magnetic susceptibility near the Curie temperature [after KAGANOV, CURKERNYIK 1982]; b) schematic behaviour of magnetization ( $M_r$ ), magnetic susceptibility and specific heat ( $C$ ) near the Curie temperature [after GOULD, TOBOCHNYIK 2005]

## 2. Mágneses és elektromágneses alapparaméterek

Cikkünkben sokszor hivatkozunk a különféle mágneses paraméterekre, illetve kapcsolatba hozzuk őket a látszólagos fajlagos ellenállás számítással az elektromágneses mérések során. Célszerűnek tűnik, hogy bemutassuk ezeket az alapparamétereket és kapcsolatrendszerüket.

### 2.1. Mágneses alapparaméterek [BUDÓ 1979 alapján]

#### Mágnesezettség ( $M$ ):

Az anyag egy kis térfogatú része a benne uralkodó mágneses térerősség hatására bizonyos mágneses momen-

tumot vesz fel, amelynek térfogategységre vonatkoztatott értéke az  $\mathbf{M}$  mágnesezettség, amit mágneses polarizációnak is szoktak nevezni. A mágnesezettség megmutatja, hogy az anyag a külső mágneses tér hatására mekkora mágnességre tesz szert.

#### Mágneses szuszceptibilitás ( $\kappa$ ):

Egy anyagi állandó (a mágnesezhetőség mértéke), az anyag belsejében uralkodó mágneses térerősség és a mágnesezettség közötti mérőszám. Használatos még a fajlagos szuszceptibilitás is ( $X = \kappa / \zeta$ ), ahol az anyag sűrűségét ( $\zeta$ ) is figyelembe vesszük.

### Mágneses permeabilitás ( $\mu$ ):

A mágneses indukció és a térerősség között fennálló kapcsolatot mutatja. A szuszceptibilitás és a permeabilitás közötti összefüggés:

$$\mu_r = 1 + \kappa \quad \text{és} \quad \mu = \mu_r \cdot \mu_0, \text{ ahol}$$

$\mu_r$  — relatív mágneses permeabilitás,

$\mu_0$  — a vákuum mágneses permeabilitása.

### Curie-hőmérséklet ( $T_c$ ):

A ferromágneses anyagok esetében  $\mu_r$  és  $\kappa$  nem tekinthetők anyagi állandóknak, mivel függenek a mágneses térerősségtől, a mágneses anyag előéletétől, és egy szűk tartományban a hőmérséklettől is. Ez a tartomány közvetlenül a Curie-hőmérséklet alatt jelentkezik.

A Curie-hőmérséklet (Néel-hőmérséklet) felett a ferromágneses anyagok elvesztik a mágnesezettségüket, valamint mágnesezhetőségüket, és paramágnesessé válnak. Közvetlen a Curie-hőmérséklet alatt a Hopkinson-effektus következtében a ferromágneses anyagok szuszceptibilitása több nagyságrenddel megnőhet. Ferromágneses anyagok a vas, a nikkel, a kobalt tartalmú anyagok és ezek különböző ötvözei. Az 1. táblázat mutatja a főbb mágneses ásványok szuszceptibilitását és Curie-hőmérsékletét.

Ferromágneses ásványok	Szuszeptibilitás (CGS)	Curie-hőmérséklet (°C)
Magnetit ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ )	0,3–2,0	578
Titanomagnetit ( $\text{Fe}_{3-n}\text{Ti}_n\text{O}_4$ )	$10^{-6}$ – $10^{-1}$	(–150)–578
Hematit ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )	$(2-10) \cdot 10^{-4}$	675 (Néel)
Maghemit ( $\gamma\text{Fe}_2\text{O}_3$ )	0,3–2,0	675 (Néel)
Pirrhotin ( $\text{Fe}_n\text{S}_{n+1}$ )	$(1-10) \cdot 10^{-2}$	300–325

1. táblázat. Ferromágneses ásványok mágneses tulajdonságai [CSÓKÁS 1977; LOGACSOV, ZAHAROV 1979]

Table 1. Magnetic properties of ferromagnetic minerals [CSÓKÁS 1977; LOGACSOV, ZAHAROV 1979]

A közetek mágneses szuszceptibilitása a mágneses ásványok szemcseméretétől, formájától és a befoglaló közet kémiai összetételétől, a hőmérséklettől, valamint a nyomástól függ. A legnagyobb szuszceptibilitású ásványok (1. táblázat) — a mágneses anomáliák többsége feltételezhetően ezekről származik — Curie-hőmérséklete (a titanomagnetit és pirrhotin kivételével) 500–700 °C közé tehető.

### Curie-mélység ( $H_c$ ):

Az erősen mágneses anyagok — közöttük azok a közetek, amelyekben ezek az ásványok jelen vannak a földkéregben — csak addig a mélységig kutathatók, amíg a litoszférában a közetek hőmérséklete el nem éri a Curie-hőmérsékletet, mert ott a ferromágneses anyagok átalakulnak és paramágnesessé válnak. A földtani kutatásban fontos annak ismerete, hogy milyen mélységig tudunk a földmágneses anomáliák értelmezése során hatókat kijelölni. Ez a mélység a Curie-hőmérsékletnek megfelelő mélység, azaz a Curie-mélység, vagy az ún. Curie-izoterma.

A földmágneses mérések esetén a mágneses kritikus pontban jelentkező nagy (akár nagyságrendekkel is nagyobb) mágneses szuszceptibilitás hatása 500–700 °C-nak megfelelő hőmérsékletnél, a Curie-mélységben jelentkezik, és minél nagyobb a szuszceptibilitás, annál nagyobb amplitúdójú anomáliát okoz, illetve annál kisebb mágneses tömeg szükséges egy felszínen is észlelhető mágneses anomália kialakulásához.

## 2.2. Elektromágneses alapparaméterek:

### Hullámszám ( $k$ ):

A közeg — amelyen keresztül az elektromágneses hullámok terjednek — alapvető geoelektromos karakterisztikáját a hullámszám ( $k$ ) adja meg, ami egy komplex szám:

$$k = \sqrt{-i\omega\sigma\mu - \omega^2\epsilon\mu} \quad (3)$$

A képletben megtalálhatók a földtani közeg jellemző fizikai paraméterei, mint elektromos vezetőképesség ( $\sigma$ ), mágneses permeabilitás ( $\mu$ ), dielektromos permittivitás ( $\epsilon$ ), és az elektromágneses tér jellemző paramétere a körfrekvencia ( $\omega=2\pi f$ ) vagy frekvencia ( $f$ ). A földtani közegek elektromágneses indukciós vizsgálatánál  $\omega\mu\sigma \gg \omega^2\epsilon\mu$ , azaz  $\sigma \gg \omega\epsilon$ , tehát

$$k = \sqrt{-i\omega\sigma\mu} \quad (4)$$

### Szkin-mélység ( $d_s$ ):

A szkin-mélység megadja, hogy homogén feltérben milyen mélységben csökken le a tér amplitúdója a felszíni érték 1/e-ad részére. A magnetotellurikus méréseknél ez egyszerűen kifejezhető:

$$d_s = \sqrt{2/(\omega\sigma\mu)} \quad (5)$$

### Impedancia ( $Z$ ):

Az elektromágneses mérések során a mért elektromos és mágneses térkomponensek alapján a váltóáramú ellenállást vagy impedanciát határozzuk meg. A magnetotellurikus méréseknél legegyszerűbb esetben ez a következő:

$$Z_{xy}(\omega) = E_x(\omega)/H_y(\omega), \quad (6)$$

ahol

$E_x(\omega)$  — a felszínen mért  $\omega$  frekvenciájú elektromos tér-változás  $x$  irányú horizontális komponense,

$H_y(\omega)$  — a felszínen mért  $\omega$  frekvenciájú mágneses tér-változás  $y$  irányú horizontális komponense.

A földtani közeg paramétereivel is szoros összefüggésben van az impedancia. Homogén feltér felszínén

$$Z_{xy} = \omega\mu/k \quad (7)$$

### Látzólagos elektromos fajlagos ellenállás ( $\rho_L$ ):

A magnetotellurikus mérések kiértékelése során a látzólagos fajlagos ellenállás értékét ( $\rho_L$ ) határozzuk meg. A  $\rho_L$  értéke azt mutatja meg, hogy adott frekvencián és földtani felépítés mellett mekkora ellenállással lehet jellemezni a heterogén földtani közeget. Az ún. Cagniard-féle  $\rho_L$  értékét a magnetotellurikus méréseknél a következőképpen határozzuk meg (ahol  $\mu_L = \mu_r \mu_0$ , és általános esetben  $\mu_r = 1$ , tehát  $\mu_L = \mu_0$ ):

$$\rho_L = \frac{|Z_{xy}^2|}{\omega\mu_0} \quad (8)$$

A (8) képletből is láthatjuk, hogy valójában sem a látzólagos fajlagos ellenállás nem határozható meg pontosan a mágneses permeabilitás ismerete nélkül, sem pedig a permeabilitás a fajlagos ellenállás ismerete nélkül. Ez természetesen csak akkor játszik szerepet, ha a relatív mágneses permeabilitás nem egyenlő 1-gyel — pl. mágneses anyag jelenléte esetében a mágneses fázisátalakulás kritikus pontján. Szerepe csak anomálishan mágneses zóna esetén van, egyébként  $\mu_L = \mu_0$ .

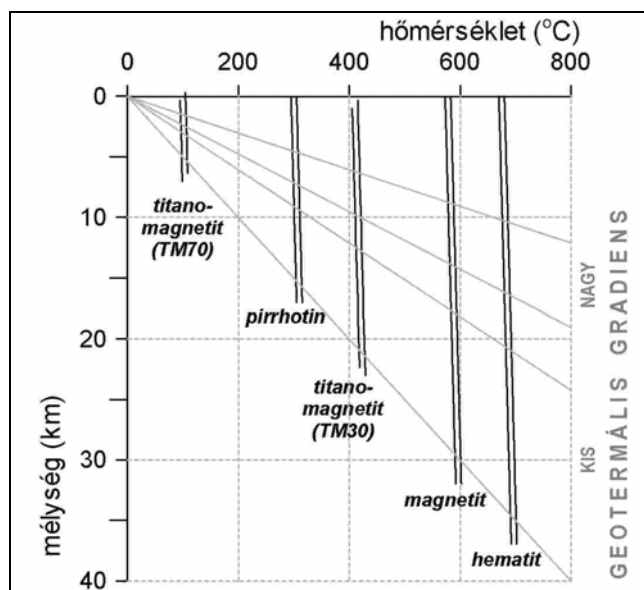
### 3. A geotermikus gradiens és a Curie-mélység Magyarországon

Hazánk geotermikus adottságai sajátosak, mivel a Magyarországot magába foglaló Pannon-medencében a földkéreg vékonyabb a 30–35 km-es világátlagnál, mindössze 24–26 km vastag, valamint a medence jó hőszigetelő üledékekkel (agyag, homok) van kitöltve. A Föld belsejéből kifelé irányuló hőáram átlagos értéke  $90\text{--}100\text{ mW/m}^2$ , ami csaknem kétszerese a kontinentális átlagnak — az európai kontinens területén az átlagérték  $60\text{ mW/m}^2$ .

Az egységnyi mélységnövekedéshez tartozó hőmérséklet-emelkedést jelentő geotermikus gradiens átlagértéke a Földön általában  $0,020\text{--}0,033\text{ }^\circ\text{C/m}$ , nálunk pedig általában  $0,042\text{--}0,066\text{ }^\circ\text{C/m}$  (2. ábra). A felszínen kb.  $10\text{ }^\circ\text{C}$  a közép-hőmérséklet, az említett geotermikus gradiens feltételezésével 1 km mélységben  $60\text{ }^\circ\text{C}$ , 2 km mélységben  $110\text{ }^\circ\text{C}$  a kőzetek hőmérséklete. A geotermikus gradiens a Dél-Dunántúlon és az Alföldön nagyobb, mint az országos átlag, a Kisalföldön és a hegyvidéki területeken pedig kisebb.

A geotermikus gradiens néhány kilométerre érvényes adataiból csak bizonytalanul lehet meghatározni nagyobb mélységek hőmérsékletét. Ezek az értékek legfeljebb a földkéregre érvényesek és a földkéregben is helyről helyre változnak; a legnagyobb különbségek az óceáni hátságok, ösmasszívumok és fiatal geosinklinálisok között vannak.

A 2. ábra mutatja, hogy a mágneses ásványok Curie-hőmérséklete a geotermikus gradiens alapján milyen mélységben jelentkezik. A Curie-pont nyomásfüggőségét jelzi az ásványok mélységgel növekvő Curie-hőmérséklete.



2. ábra. A Curie-hőmérséklet és Curie-mélység kapcsolata a geotermikus gradiens alapján különböző mágneses ásványok (1. táblázat) esetében (a földi, valamint a magyarországi minimális és maximális geotermikus gradiensek esetén)

Fig. 2. Connection between the Curie temperature and Curie depth — based on the geothermal gradient — for the main magnetic minerals (at the minimum and maximum geothermal gradient of the Earth and Hungary)

Az 2. ábra alapján a Földre átlagosan elmondható, hogy a Curie-hőmérséklet a pirrhotin esetében már 9 km környé-

kén jelentkezhet, és a hematit esetében ugyanez az érték 35 km-es mélység is lehet. A magnetit Curie-hőmérséklete 17–30 km között található.

A magyarországi geotermikus adatok alapján ezek a mélységek sokkal kisebbek (a legkisebb Curie-mélység 4 km, a legnagyobb 16 km), a magnetit elméletileg feltételezett Curie-mélysége 9–14 km.

A Curie-hőmérséklet értékéhez — elvileg minden földrajzi koordináta esetében — egy meghatározott mélység rendelhető hozzá. Nem ismerjük azonban pontosan a mágneses ásványt, amely a hatást létrehozza, és a geotermikus gradiensről is csak közelítő információink vannak, így nem tudunk ennél pontosabb meghatározást adni. A lineáris mélységfüggés csak durva közelítés, a gyakorlat alapján [RYBACH 2005] ez az összefüggés sokkal bonyolultabb és az adott földtani felépítéstől függően változhat. Ezt tovább bonyolítja a Curie-hőmérséklet és a geotermikus gradiens közötti összefüggést.

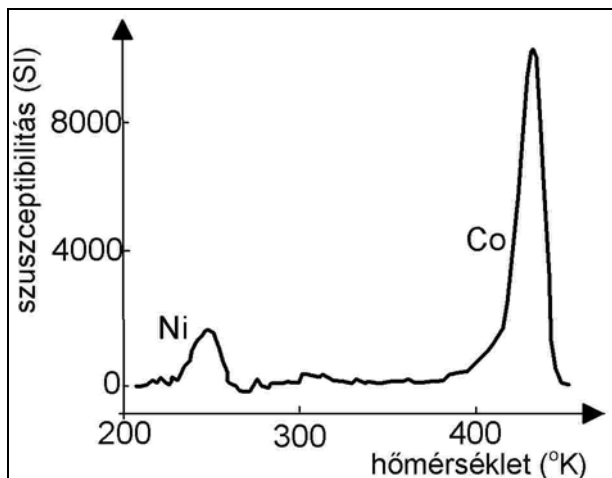
A gyakorlati tapasztalatok azt mutatják, hogy az ásványok eltérő Curie-hőmérséklete ellenére a kőzetekre „vonatkozatható” Curie-hőmérséklet — összetételtől függetlenül —  $600\text{ }^\circ\text{C}$  alatt van [LOGACSOV, ZAHAROV 1979], ami gyakorlatilag a magnetit Curie-hőmérsékletét jelenti. Ez viszont egyszerűsítheti a Curie-mélység meghatározását.

### 4. Laboratóriumi kísérletek ferromágneses anyagokon

Az elméleti megfontolások alapján végtelennek feltételezett szuszceptibilitás-növekedést laboratóriumi vizsgálatok segítségével ellenőrizték [RÜDT, BABERSCHKE 2004; LENZ et al. 2004]. A vizsgálatok kimutatták, hogy közvetlenül a kritikus Curie-hőmérséklet alatt, pl. egy rézlemezen elhelyezett ferromágneses nikkel bevonat mágneses szuszceptibilitása rendkívüli mértékben megnövekedik (3. ábra, Ni-csúcs). A Curie-hőmérséklet és a fázisátalakulást jelentő kritikus pont a nikkel bevonat vastagságától és a külső mágneses tér irányától is függ. Az anyagtartalomnak is jelentős befolyása van, amit egy rézlemez két oldalára felvitt, nikkel és kobalt bevonatú mintán kísérletekkel bizonyítottak. A mágneses szuszceptibilitás maximuma mindkét elem Curie-hőmérsékleténél megjelenik (3. ábra, Ni-, Co-csúcsok), eltérő nagysággal. A kísérletek alapján a szuszceptibilitás maximumok  $5\text{--}15\text{ }^\circ\text{C}$ -os szélességű zónában jelentkeznek és a szuszceptibilitás értéke néhány 100-tól néhány 1000 SI értékig emelkedik. Ez kb. 3–4 nagyságrenddel nagyobb, mint az ásványok és kőzetek ismert szuszceptibilitása. Figyelembe véve, hogy a kőzetekben a ferromágneses anyag különféle ásványok és ötvözetek formájában van jelen, a Curie-mélység és a kritikus pont hőmérsékleti tartománya sokkal szélesebb is lehet, mint ahogy azt feltételeznénk.

Az első laboratóriumi méréseket, amelyeket a Hopkinson-csúcs kimutatása céljából végeztek kőzetalkotó ásványokon — magnetit és hematit — DUNLOP publikálta [DUNLOP 1974]. Napjainkban — a mai technikai eszközökkel megvalósítható laboratóriumi körülmények között — egyre több adat keletkezik a kőzetalkotók ásványok Hopkinson-csúcsainak jellegzetességeiről. A pirrhotint például [KONTNY et al. 2000], a magnetitet [KONTNY, DE WALL 2000], a titanomagnetitet [KONTNY, VAHLE, DE

WALL 2003] vizsgálta. Érdekesek — és korántsem befejezettek — a fejlemények a katakláizotokkal kapcsolatban [JUST 2004]. Valószínűleg sok mérési eredmény (és mérési körülmény) egyszerűen nem került publikálásra, pedig érdekes lenne ismerni azokat is.



3. ábra. Nikkel-réz-kobalt lemezek mágneses szuszceptibilitásának változása különböző hőmérsékleten, a két ferromágneses anyag a saját Curie-hőmérsékletén jelentkezik [RÜDT, BABERSCHKE 2004]

Fig. 3. Changes of magnetic susceptibility of a Nickel-copper-cobalt ultra thin magnetic layer at different temperature, the ferromagnetic materials give maximum at own Curie temperature [after RÜDT, BABERSCHKE 2004]

## 5. Geofizikai jelenségek

### 5.1. Nagy szerkezetekhez kapcsolódó mágneses anomáliák vonulata — mélység és eredet

Magyarország mágneses térképén a fő szerkezeti irányoknak megfelelően hosszban elnyújtott, 20–50 km szélességű, ún. kisfrekvenciás — mélybeli hatótól származó — változó amplitúdójú anomáliák rajzolódnak ki. A mágneses anomáliák egy részének eredetét a földtani és mélyfúrás adatok alapján [ZELENKA et al. 2004] azonosították, ezek a mélyfúrással elért, 1–3 km mélységtartományban megjelenő vulkanitok. A vulkanitok elterjedése és a mágneses anomáliák közötti kapcsolat egyértelműen látszik, de a mélységkülönbség miatt a földtani adatokból ismert vulkanitok csak az ún. nagyfrekvenciás tartományra adnak magyarázatot. Felvetődik azonban annak lehetősége, hogy az 1–3 km-ben jelenlévő vulkanitok nagyszerkezeti mozgások hatására kialakult hasadékokból erednek, amely vulkáni gyökérszónák mentén a bázisos vulkáni anyag kisebb-nagyobb vastagságban még most is jelen van. Lehet azonban másféle magyarázatot is találni, pl. az anomáliákat a metamorfózisnak köszönhetően szerkezeti vonalak mentén — nagy, 5–15 km mélységben — kialakult közettani változások mágneses anyagai is okozhatják (kb. 450 °C-on a vaskarbonátok magnetitké alakulnak át).

A nagy mélységű mágneses hatókra utaló szakirodalom már több is jelent meg, a hazaiak közül meg kell említeni KIS Károly és társai cikkét [KIS, AGOCS, MEYERHOFF 1999], amely a következőket állapítja meg: „Az országos mágneses  $\Delta Z$  adatok alapján, négy regionális 1 km-es

ponttávolságú szelvény mentén elvégzett spektrális vizsgálat a mágneses hatók legnagyobb mélységét 6–16 km-ben (néhány helyen 25 km-ben) határozták meg, feltételezve, hogy ez már a Curie-izoterma mélysége.”

Ha a mágneses hatóként jelentkező kőzetek átlagos szuszceptibilitásával számolunk, akkor nagyon nagy mágneses tömeget, azaz nagy vastagságú összefüggő hatókat kell feltételezni, ami nem valószínű. Adódik a másik lehetséges megoldás, hogy nem a mágneses tömeg nagy, hanem a mágneses szuszceptibilitás értéke, aminek feltételezésére a mágneses fázisátalakulások során történő változások reális állapot teremtenek.

A külföldi publikációban mostanában jelent meg egy cikk a törökországi Curie-mélységekről [ATES, BILIM, BUYUKSARAC 2005], ahol török szerzők a légi mágneses anomáliák és a Curie-hőmérséklet mélységének kapcsolatát vizsgálva megállapították: „A feldolgozási eredmények jó korrelációt mutattak a mágneses adatokból és a hőáram mérésekből meghatározott Curie-mélységek között.”

Feltételezésünk szerint nem azért tudjuk a Curie-mélységet a mágneses anomáliák alapján meghatározni, mert ott megszűnik a ferromágneses anyagok mágnesezettsége, hanem azért, mert a fázisátalakulás során a ferromágneses anyag szuszceptibilitása nagyon nagy értéket vesz fel közvetlenül a Curie-hőmérséklet alatt, s ez az, ami erős anomáliát okoz. A regionális mágneses anomáliák és a Hopkinson-effektus közötti kapcsolat ötlete már 1973-ban megjelent az IAGA Kiotóban megrendezett konferenciáján, majd később publikációban is [DUNLOP 1974].

Felvetéseink ellenőrzésére elvégeztük a magyarországi mágneses anomáliák spektrális elemzését. A földmágneses adatok térképi adatrendszerén (4. ábra) elvégzett spektrális mélység-meghatározások [SPECTOR, GRANT 1970] alapján a legnagyobb hatómélység kb. 15 km-nek adódik (5. ábra).

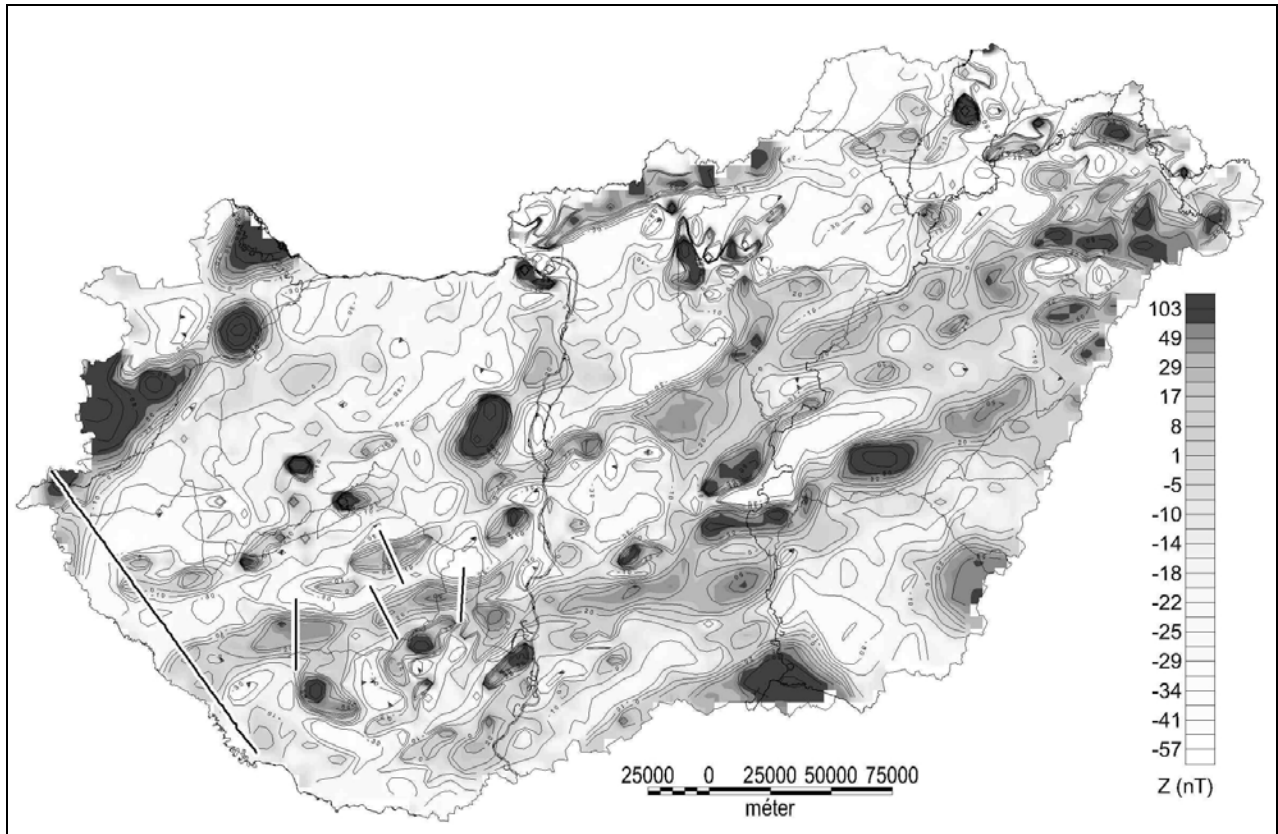
A 4. ábra mágneses térképén, az 5 km-es rácsba interpolálás miatt eltűntek a nagyfrekvenciás és nagy amplitúdójú felszínközeli hatók (pl. Börzsöny, Mátra és Tokaji-hegység), csak a nagyobb mélységű és kisebb amplitúdójú (pl. a Curie-mélységből származó) hatások maradtak meg. Jól kirajzolódik Magyarország nagyszerkezeti képe a mágneses anomáliák alapján.

Négy kisebb dél-dunántúli szelvény mágneses alapadatai alapján (ezeket a 4. ábra jelzi vonalakkal) elvégzett ellenőrző mélységmeghatározások is helytől függően 6–8 km-es legnagyobb kimutatható mélységet adtak (6. ábra), amelyek jól egyeznek a korábban [KIS, AGOCS, MEYERHOFF 1999] által elvégzett vizsgálatok eredményeivel, tehát nem zárható ki, hogy az anomáliák eredete Curie-mélységű (ekvivalens megoldások persze lehetségesek).

A legnagyobb hatómélység, azaz a Curie-mélység magyarországi viszonylatban tehát 6–16 km-es tartományban jelentkezik a spektrális vizsgálatok alapján, a földtani és geotermikus adottságoktól függően.

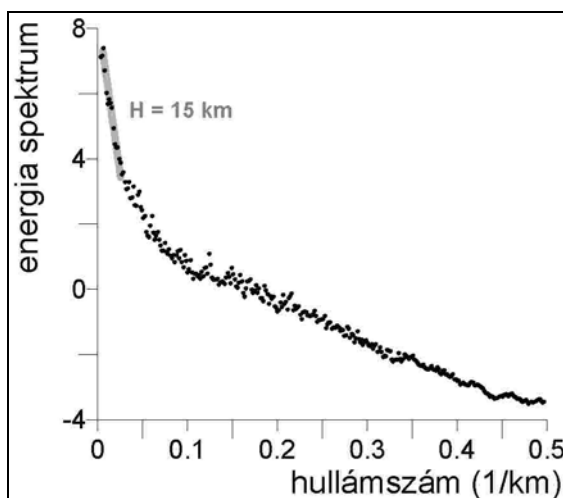
### 5.2. Jól vezető kéreganomáliák — mélység és eredet

Világszerte nagyon sok helyen találkozunk a középső kéregben (15–20 km) hirtelen vezetőképes-növekedéssel, amit általában nagyon vékony, rendkívül jól vezető zónák okoznak. Az alsó kéregben is számtalan rejtélyes eredetű jól vezetőt mutattak ki az MT mérések, miközben elismert tény, hogy a kontinentális (alsó)kéreg



4. ábra. Magyarország  $\Delta Z$  anomáliatérképe (5 km-es rács), a szelvény menti spektrális vizsgálatok helyének feltüntetésével

Fig. 4. Magnetic  $\Delta Z$  anomaly map of Hungary (grid size 5 km) with profiles of spectral depth estimations



5. ábra. Spektrális mélység-meghatározás az országos mágneses  $\Delta Z$  térkép alapján

Fig. 5. Spectral depth estimation based on magnetic  $\Delta Z$  map of Hungary

ellenállása a korról arányosan nő. A Föld különböző részein észlelt fajlagos ellenállás adatok alapján az alsó kéreg várhatóan néhány ezer  $\Omega\text{m}$  körülnek tekinthető, míg az alsó kéreg tetejére és a középső kéregre sokkal inkább a néhány száz  $\Omega\text{m}$ -es érték a jellemző. Ennek alapján feltételezhetjük, hogy normális esetben az alsó kéreg ellenállása a 100–1000  $\Omega\text{m}$  körüli, és ami ettől kisebb vagy nagyobb értékkel jelentkezik, az anomálisnak tekinthető.

Az eddigi vélemények [JONES 2000] szerint az anomáliákat okozhatja:

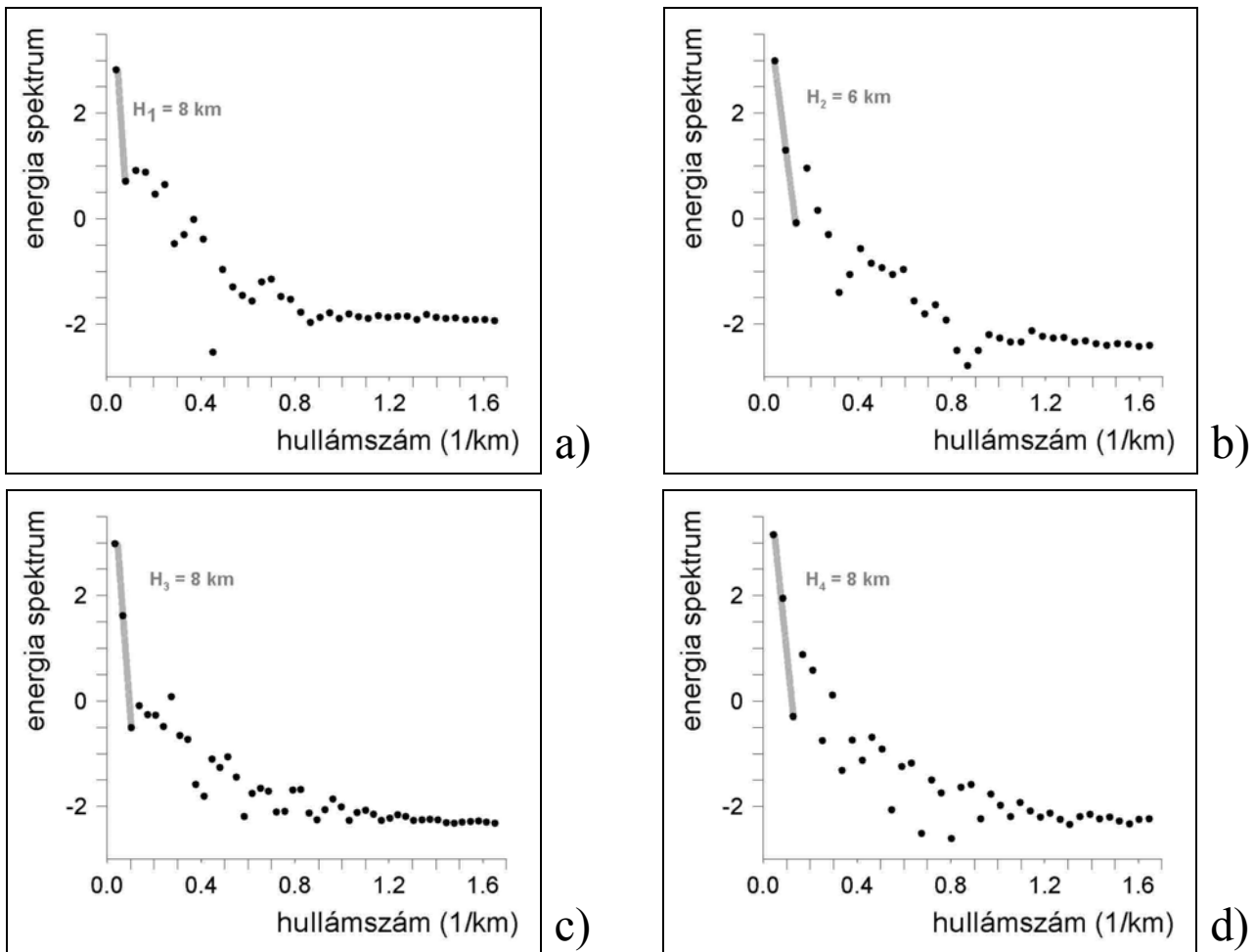
- sós fluidum;
- grafitos filmszerű bevonat;
- jól vezető ásvány;
- részleges kőzetolvadás.

A megfigyelések alapján a régi kristályos pajzsokon sincs minden tekintetben kielégítő magyarázat a 2–3 nagyságrenddel nagyobb vezetőképesség-anomáliák eredetére [JONES 1992; 2000].

Vezetőképesség-anomáliákat találunk például a Kárpátok íve mentén 10–20 km mélységben [ÁDÁM et al. 1990; BUCHA 1980], vagy a Himalája alatt is az MT mérések alapján [UNSWORTH et al. 2004], hogy csak a legérdekesebbeket említsük, ezeknek nincsen még általánosan elfogadható földtani magyarázatuk.

A elektromágneses mérések esetében a mágneses szuszceptibilitás hatásának figyelembevétele — a ferromágneses anyagok megnövekedett szuszceptibilitása a Curie-hőmérséklet elérése előtt — teljesen természetes magyarázatot adhat a kéregbeli jól vezető zónák kialakulására.

A magnetotellurikus anomáliát a komplex  $k$  hullámszám csak részben, a közegbeni csillapodásra vonatkozóan írja le. A kritikus állapotban lévő mágneses test vízszintes felületeire vonatkozó tangenciális mágneses térerősség határfeltételi egyenlet nem  $k$ , hanem  $k/\mu$ , azaz  $\sigma\mu$  helyett  $\sigma/\mu$  konstans voltát követeli meg. Következésképpen egészen bonyolult anomáliaképek jönnek létre. Egydimenziós közegben például a Curie-mélységben egy vékony mágne-



6. ábra. Spektrális mélység-meghatározások négy rövid szelvény spektruma alapján

Fig. 6. Spectral depth estimations along four short profiles

ses réteg a hagyományos magnetotellurikus értelmezés számára igen nagy fajlagos ellenállású és vastag rétegek látszik. Többdimenziós ható függőleges határfelületeire ugyanakkor E-polarizációban a B indukciós vektor felületre merőleges komponensének folytonossága is felírandó, míg H-polarizációban kizárólag a H tangenciális komponensének folytonossága. Ilyen módon — a határfelületi egyenletekben a  $\mu$  nem egyforma előfordulása miatt — a Curie-mélységben lévő kritikus állapotú mágneses ható H-polarizációban ellenállás-növekedést, míg E-polarizációban ellenállás-csökkenést, azaz vezetőképesség-növekedést okoz. Az egy- és többdimenziós magnetotellurikus anomáliákkal egy külön tanulmányban érdemes foglalkozni.

A CEL-7 litoszféra-kutató komplex szelvény mentén elvégzett magnetotellurikus mérések [SZARKA et al. 2004] több helyen is 8 km alatti mélységben jól vezető anomáliákat mutattak ki (7. ábra).

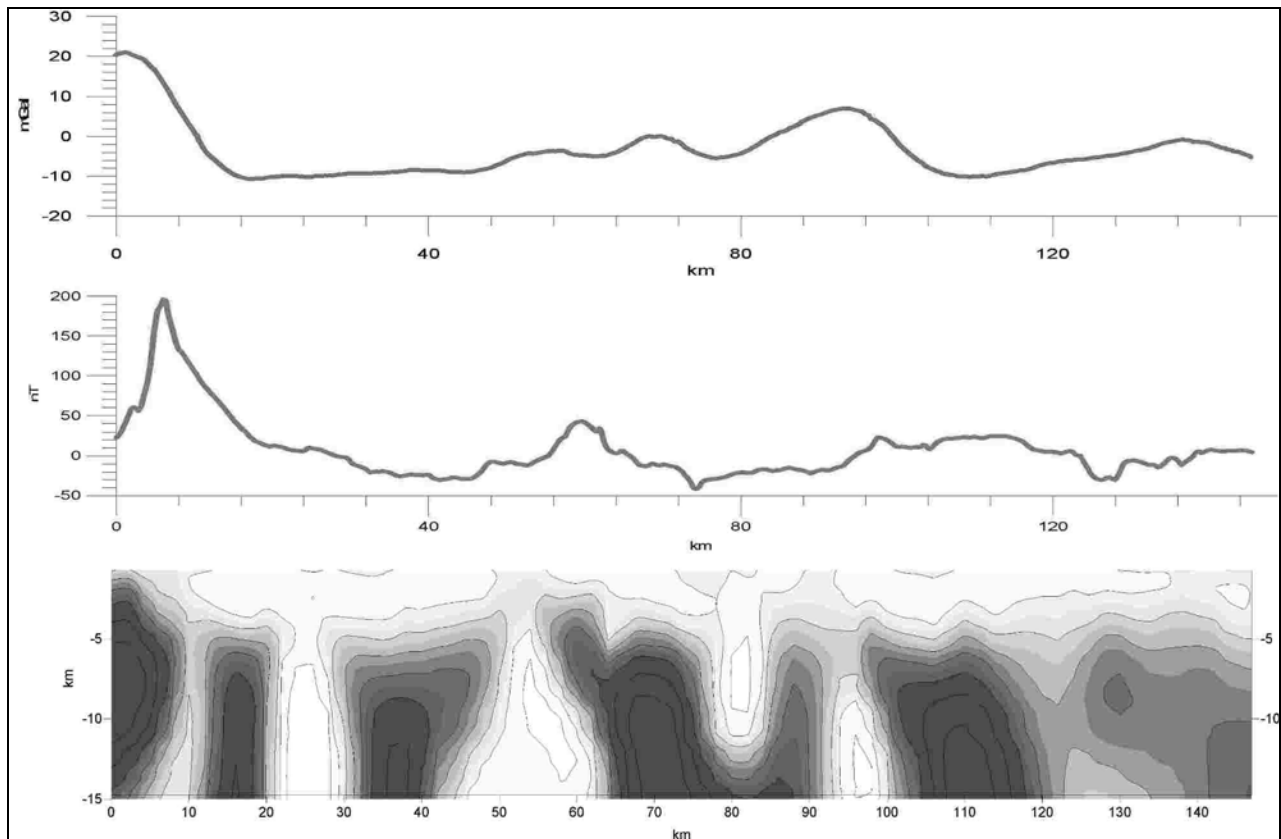
A szelvény 60. km-e környékén jelentkező jól vezető kéreganomália például a mágneses anomáliával azonos helyen jelentkezik. A mágneses anomália spektrális vizsgálata alapján a szelvény legmélyebb mágneses hatója 8 km mélységű (8. ábra).

Mágneses 2D modellezéssel teszteltük az eredményeket. A modellezés azt mutatja, hogy egy 10 km mélységben található 500·500 m keresztmetszetű, a szelvényre merőleges, 10 km hosszúságú ható az ultrabázisos kőzetek

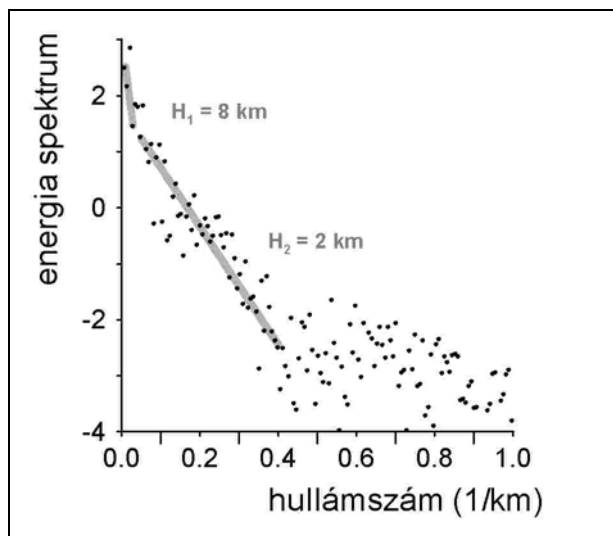
szuszeptibilitásánál kb. egy-két nagyságrenddel nagyobb szuszeptibilitással már leírja az anomáliát. A 9. ábra a Curie-mélységben elhelyezkedő kis térfogatú, de nagy mélységű mágneses hatónak — vízszintesen elnyúlt négyzetes hasábnak — a modellezett anomáliáját mutatja a CEL-7 szelvény mentén.

## 6. Összefoglalás

Ha a jól vezető kéreg-anomáliákat és mély mágneses hatásokat összevetjük, akkor az tapasztaljuk, hogy mindkét jellegzetesség ugyanabban a mélységtartományban jelenik meg, és mindkét jelenség rendkívülinek tekinthető. Az elektromágneses MT mérések esetében azért, mert bár vannak fizikailag jól megalapozott feltételezések, ennek ellenére nem tudjuk pontosan a jól vezető anomáliák eredetét. A másik esetben egy vonal menti mérés eredményeként egy olyan mágneses ható hatását detektáljuk, ami spektrális mélységbecslés alapján nagymélységű, ebből következően viszont az ismert mágneses szuszeptibilitásoknál jóval nagyobb szuszeptibilitású. E jelenségek egyik lehetséges új magyarázata lehet a Curie-hőmérséklet közelében megjelenő fázisátalakulás és az ehhez kapcsolódó megnövekedett mágneses szuszeptibilitás (Hopkinson-effektus).

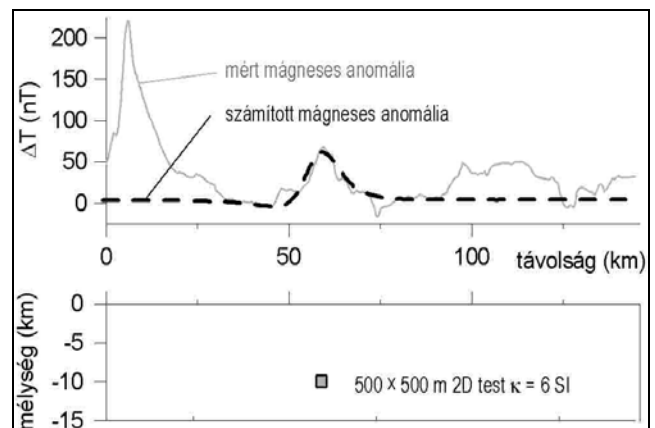


7. ábra. Gravitációs (felül), mágneses (középen) anomáliák és magnetotellurikus invertált ellenállásszelvény (alul) a CEL-7 mentén  
 Fig. 7. Gravity (top), magnetic (middle) anomalies and magnetotelluric resistivity pseudosection along the CEL-7 profile



8. ábra. CEL-7 szelvény mágneses spektrum analízise és a jellemző mélységek

Fig. 8. Spectral depth estimation and the typical depths along CEL-7 profile



9. ábra. Mágneses 2D modellezés a CEL-7 mentén. (A mérési adatok görbéjére a szelvény 60. km-énél jól illeszkedik egy 10 km mélységű, 500×500 m-es keresztmetszetű négyzetes hasáb modellezett mágneses anomáliája)

Fig. 9. Magnetic 2D modelling along the CEL-7 profile. (The measured magnetic anomaly curve at 60 km has a good coincidence with the calculated anomaly of a square shape, 500×500 m body in 10 km depth)

Ha a Curie-mélységben vulkáni vagy metamorf eredetű mágneses anyag található, akkor az ott jelentkező fázisátalakulás miatt a mágneses szuszceptibilitás egy (vagy több — nem tudjuk pontosan) nagyságrenddel megnövekedhet. Ez a megnövekedett szuszceptibilitás lehet az oka a korábban kizárólag jól vezetőknél tulajdonított kéreg-

anomáliáknak, de ez okozhatja a jellegzetes sávos anomáliákat az országos mágneses anomáliatérképen, amelyek spektrális mélysége szintén Curie-mélység körüli.

A Curie-hőmérséklet körüli, fázisátalakulással jellemezhető sáv mélybeli kiterjedése nem túl nagy, néhány száz 100 m (5–15 °C körüli), mégis a fázisátalakulás okozta



hatás a mágneses anyagok eltérő Curie-hőmérséklete miatt jelentős lehet, és bizonyos geofizikai paraméterek drasztikus megváltozását okozhatják.

## 7. Köszönetnyilvánítás

A cikk megírásához, az elemzések elvégzéséhez felhasznált adatok az MGSZ és az ELGI országos mágneses és magnetotellurikus adatbázisaiból származnak. Kutatási eredményeink több pályázati munkához, tudományos kutatáshoz kapcsolódnak, például:

— OTKA T 037694 — „Új irányzatok a magnetotellurikában”;

— OTKA TS 408048 — „Földi elektromágnesség”;

— Erőtér-geofizikai módszertani kutatások (ELGI).

Köszönet KÁDÁR Györgynek (MTA Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Kutatóintézet, Budapest), ÁDÁM Antalnak (MTA Geodéziai és Geofizikai Kutatóintézet, Sopron) és MÁRTONNÉ SZALAY Emőkének (Eötvös Loránd Geofizikai Intézet, Budapest) a szakmai kérdésekben és a szakirodalom felkutatásában nyújtott segítségért, valamint minden kollégának, aki adatokkal, tanácsokkal közvetve vagy közvetlenül a segítségünkre volt a vizsgálatokban.

## HIVATKOZÁSOK

- ÁDÁM A., STEINER T., KAIKKONEN P., MENVIELLE M., TARITS P. 1990: Torzítják-e a magnetotellurikus teret a Kárpáti elektromos inhomogenitások a Pannon-medencében? *Geophysical Transactions* **35**, 4, 287–299
- ATES A., BILIM F., BUYUKSARAC A. 2005: Curie Point Depth Investigation of Central Anatolia, Turkey. *Pure and Applied Geophysics* **162**, 357–371
- BUCHA V. 1980: Geomagnetism of the external flysch Czechoslovakian Carpathians and the possible causes of anomalous geophysical manifestations. *Studia geoph. et geod.* **24**, 227–251
- BUDÓ Á. 1979: Kísérleti fizika. Tankönyvkiadó, Budapest
- CSÓKÁS J. 1977: Geofizika I. Gravitációs és mágneses módszerek. Tankönyvkiadó, Budapest
- DUNLOP D. J. 1974: Thermal Enhancement of Magnetic Susceptibility. *J. Geophys.* **40**, 439–451
- GESZTI T. 2004: Termodinamika, fázisátalakulások. <http://galahad.elte.hu/~geszti/okt/termo7.pdf>
- GOULD H., TOBOCHNIK J. 2005: Introduction to Computer Simulation Methods: Applications to Physical Systems, Ferromagnetic phase transition. <http://www.ibiblio.org/e-notes/Perc/trans.htm>
- HOPKINSON J. 1889: Magnetic and other physical properties of iron at a high temperature. *Philos. Trans. R. Soc.* 443–465
- JONES A. G. 1992: Electrical conductivity of the continental lower crust, *In* D. M. FAMTAIN, R. J. ARCULUS, R. W. KAY (Eds): *Continental lower crust*. Elsevier, 81–143
- JONES A. G. 2000: MTNet — Discussion Forum: Continental Lower Crustal Conductivity. <http://www.cg.nrcan.gc.ca/mtnet/fora/clc/clc.html>
- JUST J. 2004: Modification of magnetic properties in granite during hydrothermal alteration (EPS-1 borehole, Upper Rhine Graben). Disszertáció. Ruprecht-Karls Egyetem, Heidelberg
- KAGANOV M. I., CURKERNYIK V. M. 1982: *Priroda magnyetizma*, Nauka, Moszkva
- KIS K. I., AGOCS W. B., MEYERHOFF A. A. 1999: Magnetic sources from vertical magnetic anomalies. *Geophysical Transactions* **42**, 3–4, 133–158
- KISS J., SZARKA L., PRÁCSER E. 2005: Second-order magnetic phase transition in the Earth. *Geophysical Research Letters* (submitted)
- KITTEL C. 1981: Bevezetés a szilárdtest-fizikába. Műszaki Könyvkiadó, Budapest
- KONTNY A., DE WALL H. 2000: The use of low and high  $k(T)$ -curves for the characterization of magneto-mineralogical changes during metamorphism. *Phys. Chem. Earth* **25**, 421–429
- KONTNY A., DE WALL H., SHARP T. G., PÓSFAL M. 2000: Mineralogy and magnetic behaviour of pyrrhotite from a 260 °C section at the KTB drilling site, Germany. *American Mineralogist* **85**, 1416–1427
- KONTNY A., VAHLE C., DE WALL H. 2003: Characteristic magnetic behaviour of subareal and submarine lava units from the Hawaiian Scientific Drilling Project (HSDP-2). *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* **4**, 10, 1029/2002GC0003304
- LENZ K., LINDER J., KOSUBEK E., BABERSCHKE K. 2004: SFB290 TP A2 UP I: Ferromagnetic Resonance (FMR). <http://www.physik.fu-berlin.de/~ag-baberschke/sfb290/TPA2up1.html>
- LOGACSOV A. A., ZAHAROV V. H. 1979: *Magnyitorazvedka*. Moszkva, Nyedra
- MATVEJEV B. K. 1990: *Elektrorazvedka*. Nyedra, Moszkva
- RÜDT C., BABERSCHKE K. 2004: SFB290 TP A2 UP II: ac-susceptibility in UHV. <http://www.physik.fu-berlin.de/~ag-baberschke/sfb290/TPA2up2.html>
- RYBACH L. 2005: Sekély és mély geotermikus energiaforrások — státusz és kilátások (EGS program — <http://www.eere.energy.gov/geothermal/pdfs/egs.pdf>, EGS program in Soultz, Franciaország — <http://www.soultz.net>. Az ELTE Geofizikai Tanszéke és a Magyar Geofizikusok Egyesülete Egyed László Szemináriumi előadása, Budapest, 2005. április 5.
- SPECTOR A., GRANT F. S. 1970: Statistical models for interpreting aeromagnetic data. *Geophysics* **35**, 293–302
- SZARKA L., ÁDÁM A., KISS J., MADARASI A., NOVÁK A., PRÁCSER E., VARGA G. 2004: Magnetotelluric images from SW-Hungary, completed with gravity, magnetic and seismic measurements. 17th EM Induction Workshop, Hyderabad, India
- UNSWORTH M., WENBO W., JONES A. G., LI S., BEDROSIAN P., BOOKER J., SHENG J., MING D., HANDONG T. 2004: Crustal and upper mantle structure of northern Tibet imaged with magnetotelluric data. *Journal of Geophysical Research* **109**
- ZELENKA T., BALÁZS E., BALOGH K., KISS J., KOZÁK M., NEMESI L., PÉCSKAY Z., PÜSPÖKI Z., RAVASZ CS., SZÉKY-FUX V., ÚJFALUSSY A. 2004: Buried Neogene volcanic structures in Hungary. *Acta Geologica Hungarica* **47**, 2–3, 177–219