

Mágneses mérések a Balatonon: Észlelt anomáliák és az eredmények értelmezése

VISNOVITZ F.^{1,*}, HEGYI B.¹, BALÁZS A.², RAVELOSON A.¹, ROZMAN G.³, LENKEY L.¹,
LENKEY-BÖGÉR Á.⁴, KIRÁLY Á.⁵, PETHE M.⁶, KUDÓ I.⁷, KOVÁCS P.⁸, CSONTOS A.⁹,
HEILIG B.⁹, VADÁSZ G.¹⁰, HORVÁTH F.^{1,11,†}

¹Eötvös Loránd Tudományegyetem, Geofizikai és Űrtudományi Tanszék,
1117 Budapest, Pázmány Péter sétány 1/C

²Laboratory of Experimental Tectonics, Università degli Studi Roma Tre, Roma, Olaszország

³MÁV Központi Felépítményvizsgáló Kft., 1097 Budapest, Péceli u. 2.

⁴MOL Nyrt., 1117 Budapest, Október huszonharmadika út 18.

⁵Center for Earth Evolution and Dynamics, University of Oslo, Oslo, Norvégia

⁶Budavári Ingatlanfejlesztő és Üzemeltető Nonprofit Kft., 1013 Budapest, Ybl Miklós tér 6.

⁷Robert Bosch Kft., 1103 Budapest, Gyömrői út 104.

⁸Magyar Bányászati és Földtani Szolgálat, Földfizikai Főosztály, 1145 Budapest, Tallér u. 1/B

⁹Magyar Bányászati és Földtani Szolgálat, Tihanyi Geofizikai Observatórium,
8237 Tihany, Kossuth Lajos utca 91.

¹⁰MTA–ELTE Statisztikus és Biológiai Fizika Kutatócsoport, Budapest

¹¹Geomega Kft., 1093 Budapest, Zsil utca 1.

*E-mail: visnovitz.ferenc@gmail.com

Az Eötvös Loránd Geofizikai Intézet 2006-ban publikálta Magyarország revideált mágneses ΔZ (vertikális komponens-) anomália-térképét, amely áttekinthető képet ad hazánk mágneses hatóiról. Bár vulkanológiai és geodinamikai szempontból is egyaránt érdekes, a Balaton területének mágneses anomáliáit ez a térkép nem mutatja, mivel mérés-technikai okok miatt korábban nem volt mérés a vízben. Balaton-kutatási programja keretében az ELTE Geofizikai és Űrtudományi Tanszéke 2010–2016 között részletes és átfogó mágneses totáltér- (T) méréseket végzett a tó teljes területén. Az új mérések egységes feldolgozásával és transzformációjával sikeresen kiegészítettük az országos térképet és több, korábban ismeretlen mágneses anomáliát azonosítottunk a tómedence területén.

A térség földtani és tektonikai adottságai alapján arra jutottunk, hogy a tó nyugati felében a Bakony–Balatonfelvidék Vulkáni Terület (BBFVT) legdélebbi tagjait, míg a tó középső és keleti medencéjében, a Balaton alatt húzódó szerkezeti zónával összefüggésben álló vonalszerű anomáliákat lehetett kimutatni.

Visnovitz, F., Hegyi, B., Balázs, A., Raveloson, A., Rozman, G., Lenkey, L., Lenkey-Bögér, Á., Király, Á., Pethe, M., Kudó, I., Kovács, P., Csontos, A., Heilig, B., Vadász, G., Horváth, F.†: Magnetic surveys of Lake Balaton: Observed anomalies and interpretations

The magnetic vertical component (ΔZ) anomaly map of Hungary was published by the Eötvös Loránd Geophysical Institute (ELGI) in 2006 to give a comprehensive overview on the locations of magnetized bodies in the country. This map, however, does not provide any information on anomalies in the area of Lake Balaton, the largest shallow lake in Central Europe. The reason is that earlier balance based magnetic surveys were not able to provide accurate data on the wavy surface of water. To fill the gap and map unknown anomalies in the lake area an integrated survey on the total magnetic field was carried out by the Department of Geophysics and Space Sciences of Eötvös Loránd University in the period of 2010–2016. The new map complements the national survey and implies small-scale magnetized bodies.

The lake is located in the vicinity of the Bakony–Balaton Highland Volcanic Field (BBHVF). The magnetic anomalies in the western part of the lake are interpreted as subsurface magmatic rocks that are the southernmost members of this volcanic province. Anomalies in the central and eastern parts are aligned along the tectonic structures that were previously mapped by offshore seismic surveys. We suggest that these mostly linear features are the faint expression of tectonic structures in the magnetic field data.

Beérkezett: 2018. november 9.; *elfogadva:* 2018. december 17.

Bevezetés

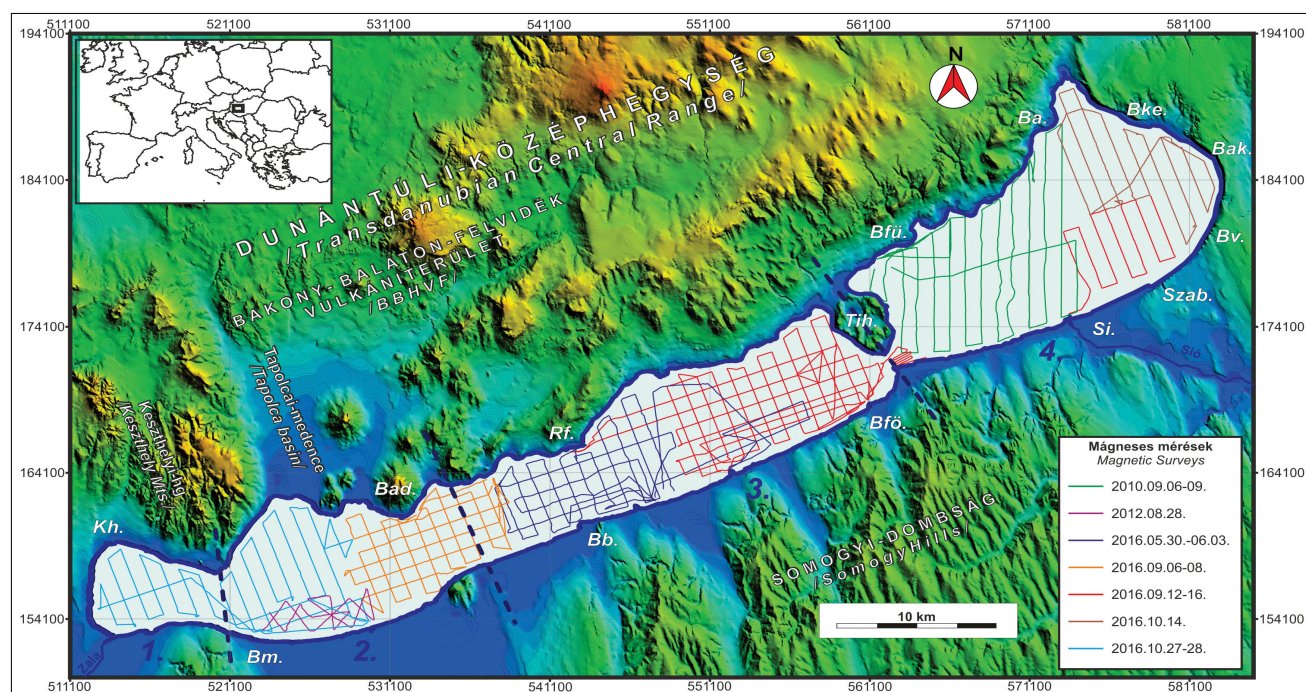
Egy terület geológiai felépítéséről és geodinamikai folyamatairól értékes információt szolgáltat az adott régió mágneses anomália-térképe. A különböző hullámhosszú és amplitúdójú hatók elhelyezkedéséből, alakjából a felszín közeli, vagy épp a mélyben rejlő vulkáni/szubvulkáni testek, magmás-, metamorf blokkok jelenlétére, valamint a terület szerkezeti tagoltságára tudunk következtetni (ld. Bevan 2006, Kiss et al. 2017, Pánisová et al. 2018). A modern hordozható magnetométerek segítségével ma már folyamatosan, $\pm 0,1$ nT pontossággal tudjuk térben és időben mintavételezni a mágneses tér nagyságát, valamint a tér irányfüggő változásait (gradiensét). Emellett a fejlett valós idejű korrekciót alkalmazó RTK GPS használatával a mérési pontok földrajzi koordinátáit és magasságát akár cm pontossággal is meg tudjuk adni. A geológiai célú mágneses mérések korlátait tehát már nem a mérés technika, hanem az antropogén eredetű zajok/zavarok (települések, vezetékek, fémtárgyak) és a terepviszonyok adják.

A Pannon-medence nyugati részén terül el a Balaton, amely mintegy 600 km²-es vízfelületével és 77 km-es hosszával Közép-Európa legnagyobb tava (1. ábra). A tó vízfelületén sokáig nem végeztek mágneses méréseket, mivel a klasszikus terepi variométerek megfelelő tájolását és szintezését a hullámzó tavon nem lehetett elvégezni. A befagyott tavon az Eötvös Loránd Geofizikai Intézet (ELGI) végzett ugyan a tihanyi partok közelében méré-

seket (Bender et al. 1966), de a teljes tó mágneses anomália-térképét ilyen módon nem lehetett biztonságosan elkészíteni. Megbízható légi és vízi mérésekre a 20. század második felétől nyílt mód, miután a protonprecessziós és optikailag pumpált magnetométerek elterjedtek a geofizikai gyakorlatban (Hrovic, Newitt 2011, Turner et al. 2015).

A Balaton első átfogó mágneses térképezését 1966 és 1967 nyarán végezte el az ELTE Geofizikus Diákköre Salát Péter és Horváth Ferenc vezetésével (Hegymegi et al. 1968). Akkoriban erre azért nyílt lehetőség, mert Szermerédy Pál úttörő módon épített egy saját fejlesztésű protonprecessziós magnetométert, amely folyamatos terepi mérésre tökéletesen alkalmasnak bizonyult. A mérések kivitelezésére a VITUKI Balaton nevű kutatóhajója szolgált (Hegymegi et al. 1968). 2010–2016 között az ELTE Geofizikai és Űrtudományi Tanszéke modern műszerekkel újabb vízi mágneses felmérést valósított meg a földtani eredetű anomáliák vizsgálatára. A mérések célja a tó alatt feltételezett magmás intrúziók és a prekainozoos aljzat szerkezeti felépítésének felderítése volt.

Jelen dolgozatban a Balaton területén végzett vízi mágneses mérések történetét és az azok alapján szerkesztett anomália-térképeket mutatjuk be. Külön kitérünk az anomália-térképek sajátosságaira, és a térképeken látható anomáliák bemutatására, majd az új adatokat az országos adatszerkeztetbe illetve kitekintést adunk az anomáliák valószínű eredetére is.



1. ábra A Balaton és környezetének áttekintő domborzati térképe a 2010–2016-os mágneses mérések nyomvonalával

Kh = Keszthely, Bm = Balatonmáriafürdő, Bad = Badacsony, Rf = Révfülpö, Bb = Balatonboglár, Tih = Tihany, Bfö = Balatonföldvár, Bfű = Balatonfűred, Si = Siófok, Ba = Balatonalmádi, Bke = Balatonkenese, Bak = Balatonakarattya, Bv = Balatonvilágos, Szab = Szabadistó, 1 = Keszthelyi-öböl (Keszthely bay), 2 = Szigligeti-medence (Szigliget basin), 3 = Szemesi-medence (Szemes basin), 4 = Siófoki-medence (Siófok basin)

Figure 1

Lake Balaton and its surroundings with the trace of the 2010–2016 offshore magnetic surveys

A kutatási terület földtani jellemzése

A Balaton két különböző morfológiai egység, a Dunántúli-középhegység és a Somogyi-dombság közötti, ÉK–DNy-i hosszanti mélyedésben helyezkedik el (1. ábra). Orientációja jól illeszkedik a Pannon-medence nagyszerkezeti elemeihez (Bada et al. 2010), melyek a Közép- és Dél-Dunántúlon mind az aljzatban, mind az aljzatot fedő miocén–kvarter üledékekben jól követhetők és közel ÉK–DNy-i lefutásúak (Dank et al. 1990, Fodor et al. 2005, Horváth et al. 2005). A tavat korábban épp ezért peremi törések által irányított árkos beszakadásnak tartották (Lóczy 1913, Cholnoky 1936). Az új kutatások fényében azonban nyilvánvalóvá vált, hogy a térség neotektonikáját nem a tó tengelyével párhuzamos normálvetők, hanem egy olyan ÉÉK–DDNy-i transzpressziós feszültségtér határozza meg, mely a tó tengelyével közel párhuzamos nyírózónát hozott létre a Balaton alatt (Bada et al. 2010). Az utóbbi oldaleltolódások a tó tengelyében futó Balatonfő-vonal (Dudko 1986) neotektonikus reaktivációjaként foghatók fel, melynek szerkezeti képét tavi vízi szeizmikus mérések alapján tudtuk részletesen vizsgálni (Sacchi et al. 1999, Bada et al. 2010, Visnovitz et al. 2015).

A tó környezetének geológiai felépítése rendkívül változatos (Budai et al. 1999). A Dunántúli-középhegységben felszínre bukkanó medencealjzatot paleozoós fillit és agyagpala, illetve perm homokkövek mellett mezozoós (triász, jura, kréta) karbonátok és agyagmárgák alkotják, melyek felett D felé növekvő vastagságban miocén képződmények és vékony kvarter rétegsor települ. A tótól É-ra található a Kárpát-Pannon térség legjelentősebb monogenetikus vulkáni területe, a Bakony–Balatonfelvidék Vulkáni Terület (BBFVT), ahol 3500 km²-en mintegy 50–200 kitörési központot találunk (Jugovics 1969, Martin et al. 2003). A kapcsolódó robbanásos kitörésekkel járó (freatomagmás) vulkanizmus a mio-pliocén során, kb. 8–2,5 millió év között zajlott, és a Pannon-medence poszt-extendziós folyamataihoz köthető (Martin, Németh 2004). A vulkanizmus nyomait a területen maar medencék (pl. Tihany, Pula), tufagyűrűk és Stromboli-típusú salakkúpok (pl. Kopácsi-hegy) őrzik (Budai et al. 1999). A legtöbb vulkáni képződményt lávafolyások és piroklasztitok együttesen építik fel, de a vulkáni működéshez felszín alatti, szubvulkáni testek és az utóvulkáni folyamatokhoz köthető gejzíritek is kapcsolódnak. Sacchi et al. (1999), illetve Horváth et al. (2010) tavi szeizmikus szelvényeket tanulmányozva ilyen vulkáni testeket („bazalt intrúziókat” és „gejzírít kúpokat”) véltek felfedezni a Balaton medre alatt is.

A negyedidőszak során az erózió nagymértékben átformálta a térség geomorfológiai képét. Ennek köszönhetően a miopliocén vulkanizmus nyomait a felszínen ma bazaltsapkás tanúhegyek, valamint az üledékekkel kitöltött kráterek (Budai et al. 1999, Martin et al. 2003) formájában találjuk meg. Ilyen tanúhegyek a tó északi partján a Badacsony, a Szigliget és a Hegyestű, a tó tengelyében Tihany, illetve a déli parton a fonyódi várhegy és a boglári hegy is.

A vulkáni központok aljzatát a paleozoós képződmények és mezozoós karbonátos rétegek alkotják (Budai, Vörös 1992, Haas, Budai 1999).

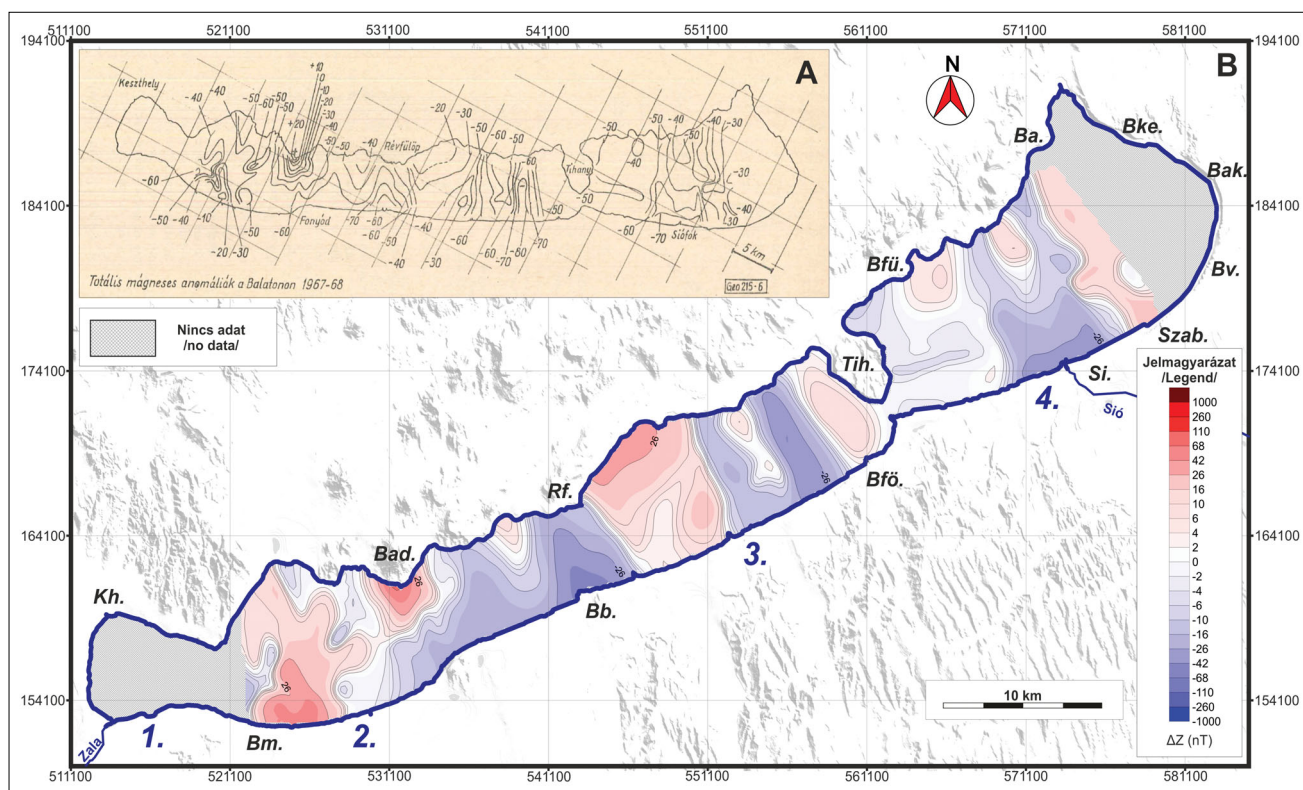
Mágneses mérések a tavon

Az 1966–67-es mérések

A Balaton első mágneses felmérését 1966–67 nyarán végezte el az ELTE Geofizikus Diákköre. A mérések során egy akkor még újdonságnak számító, folyamatos mintavételezésű protonprecessziós magnetométert használtak, melyet Szemerédy Pál irányításával az ELTE Geofizikai Tanszékén fejlesztettek. A műszer a mágneses indukció (totáltér) nagyságának meghatározására volt alkalmas. A tó felmérését egy átlagosan 10 km/h sebességgel haladó nagy testű vashajó (VITUKI, Balaton) végezte, mely mögött a szondát egy 60 m-re kiengedett tutajon helyezték el, 1,5 m magasságban a vízszint felett. A mérés a tó tengelyére merőleges, ÉNy–DK-i irányú szelvények mentén történt, 500 m szelvényközzel és 0,5–1 perces (kb. 80–160 m-enként történő) adatrögzítéssel. A mágneses adatok időfüggő változásait (báziskorrektúra) a Tihanyi Geofizikai Observatórium cserhegyi mérőállomásán elhelyezett második protonszonda segítségével korrigálták kvázivalós idejű korrekciót alkalmazva. A bázisállomás által mért térértékeket egy rövidhullámú rádióadóval sugározták a mérőműszerhez, amely a mért értékeket a rádión kapott adatok felhasználásával korrigálta. A hajó pozícióját parti geodétacsoportok határozták meg háromszögeléssel, melynek pontossága 5–20 m volt. Az adatokon később normáltér-korrektúrákat végeztek, a kis terület miatt első fokú közelítéssel, amelyhez a szükséges együtthatókat az ELGI Mágneses Osztálytól kapták. Már a feldolgozás során nyilvánvalóvá vált, hogy a mérőhajó nagy vastagsága ellenére is zavarta a méréseket. A hajó hatása irányfüggőnek bizonyult, és a párhuzamos szelvények közötti közepes eltéréssel lett korrigálva. A mérési eredményeket ezt követően egy izovonalas térképen ábrázolták, mely vonatkoztatási szintjének az akkori tihanyi közepes bázisértéket (46 881 nT) választották. A mérések eredménye egy regionális áttekintőtérkép lett (2A ábra), mely az akkori országos mágneses térképekhez képest részletgazdagabb, valamint a korai légi mérésekkel összeegyeztethetőbb képet mutatott (Hegymegi et al. 1968). Az eredményeket érdemi földtani értelmezéshez sosem használták fel, mivel az elkészült térképet a zavaró hatások miatt, a korrekciók ellenére is csak tájékoztató jellegűnek ítélték (Horváth et al. 2010).

Új mágneses mérések a tavon

Az újbóli térképezésre az igényt az 1980-as évektől induló nagy felbontású vízi szeizmikus mérések (Cserny, Corrada 1989, Tóth et al. 2010, Balázs et al. 2013, Visnovitz et al. 2013a,b) teremtették meg azáltal, hogy a szelvényeken



2. ábra | Az 1967–68-as balatoni totális mágnesestérképek eredményei. A: Totáltér-anómia-térkép (Hegymegi et al. 1968), B: A totáltér-térkép (A) szintvonalai alapján számított ΔZ anomáliák az átlagértékkel való korrekció után

Kh = Keszthely, Bm = Balatonmárfürdő, Bad = Badacsony, Rf = Révfülöp, Bb = Balatonboglár, Tih = Tihany, Bfö = Balatonföldvár, Bfű = Balatonfüred, Si = Siófok, Ba = Balatonalmádi, Bke = Balatonkenese, Bak = Balatonakarattya, Bv = Balatonvilágos, Szab = Szabadi-sóstó, 1 = Keszthelyi-öböl (Keszthely bay), 2 = Szigligeti-medence (Szigliget basin), 3 = Szemesi-medence (Szemes basin), 4 = Siófoki-medence (Siófok basin)

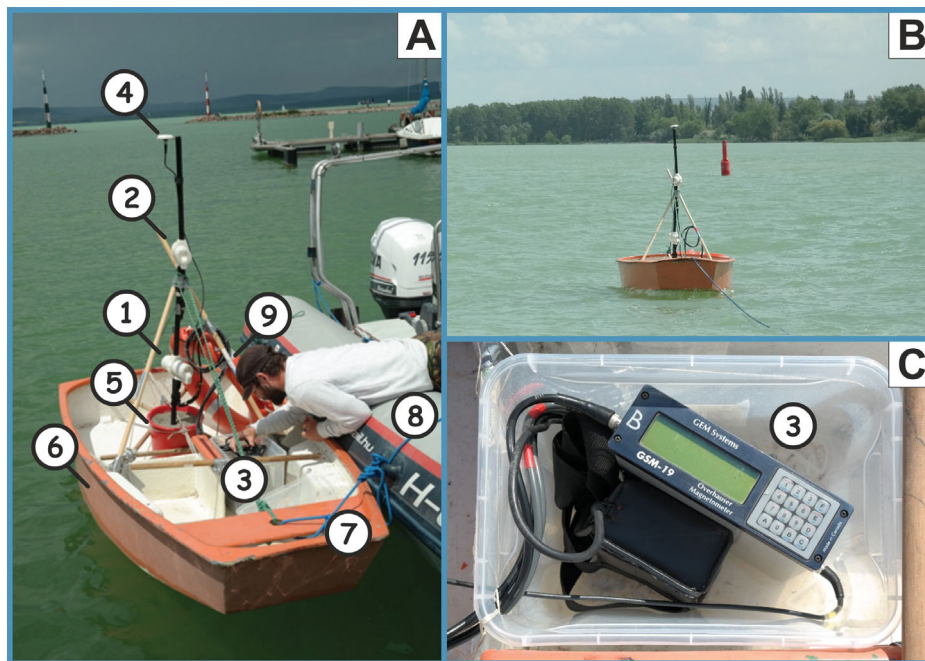
Figure 2 | Results of the 1967–68 offshore total field magnetic survey. A: Contour map of anomalies of the total magnetic field (Hegymegi et al. 1968), B: ΔZ anomaly map based on total field map (A) after average removal

feltételezett vulkáni intrúziók (Sacchi et al. 1999, Horváth et al. 2010, Tóth et al. 2010) és a tó alatt futó törérendszerek (Bada et al. 2010) aljzati gyökerének igazolásához független földtani-geofizikai információra volt szükség. A tó ismételt felmérésére és az anomália térkép felülvizsgálatára végül 2010 és 2016 között került sor.

A 2010–2016 közötti vízi mágneses mérések több kampányban zajlottak. Az első teszt jellegű szelvényezést 2010-ben végeztük a tó keleti oldalán Tihany és Balatonalmádi között, majd a 2012-es nyári terepgyakorlat keretében újabb mérések zajlottak Balatonfenyves és Balatonmárfürdő környékén, a tó nyugati végén. A sikeres teszt-mérések után a tó átfogó felmérése mellett döntöttünk, amely 2016-ban valósult meg. A 2016-os méréseket a korábbi mérések tanulságai alapján úgy terveztük meg, hogy a szelvényezés végén egy, az egész Balaton területére érvényes, egységes és a geológiai hatók kimutatására alkalmas adatrendszer álljon rendelkezésre (1. ábra).

A tavi mérések egy Overhauser típusú magnetométer (GEM System, GSM-19) segítségével történtek, melynek pontossága $\pm 0,2$ nT. A mérőrendszer 2 db szondából, a hozzájuk csatlakozó elektronikai egységből és egy hosszú rúd végén elhelyezett GPS antennából állt (3. ábra, 1–4).

A műszer a mágneses totáltér értékét, a totáltér vertikális gradiensét, az időt, valamint a szélesség- és hosszúságkoordinátákat rögzítette. A mérőeszközt a mérések során egy műanyag vitorlástestbe (mérőhajó, 3. ábra, 6) helyeztük el, melyet minden vastartalmú tárgytól igyekeztünk megtisztítani. A mérőhajót az előre kijelölt útvonalon egy motoros kishajó húzta, melyben a mérést végző személyzet tartózkodott. A vontatási távolságot helyszínen elvégzett tesztmérések alapján 20–25 m-ben határoztuk meg. Ebben a távolságban a motorcsónak zavaró hatása már nem volt kimutatható. A navigációhoz kézi GPS-be előzetesen betöltött nyomvonalakat használtunk. A mérések a tó hossz tengelyére merőleges (ÉNy–DK) és a hossz tengellyel párhuzamos (ÉÉK–DDNy) szelvények mentén történtek, a tó középső részén, durván $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ -es rácshálóban, a keleti, és nyugati medencékben 1 km szelvényközzel (1. ábra). Azokon a helyeken, ahol az előzetes kiértékelés anomáliákat mutatott, a szelvényhálót besűrítettük. A mérések során a mintavételi idő 1, illetve 2 másodperc volt. A hajó sebessége az időjárás függvényében $5\text{--}15 \text{ km/h}$ között alakult. A szelvény menti mérési pontok átlagos távolsága az előbbieknél megfelelően $2\text{--}10 \text{ m}$.



3. ábra A 2010–2016-os vízi mágneses mérések során használt mérőhajó és a mérési összeállítás. A: A mérőhajó a fedélzetén felállított magnetométerrel; 1 = alsó szonda, 2 = felső szonda, 3 = magnetométer, 4 = GPS, 5 = állványt rögzítő súly (homok műanyag vödörben), 6 = műanyag hajótest, 7 = vontatókötél, 8 = motorcsónak, 9 = iránystabilizáló fék (mentőgyűrű), B: A mérőhajó vontatás közben, C: A mérőműszer és a hozzá tartozó akkumulátor vízhatlan műanyag dobozban

Figure 3 Measurement vessel with the magnetometer during the offshore magnetic surveys of 2010–2016. A: The magnetometer mounted on the plastic boat; 1 = lower probe, 2 = upper probe, 3 = magnetometer, 4 = GPS, 5 = balancing weight (sand in a plastic bucket), 6 = plastic sail hull, 7 = towing rope, 8 = motorboat, 9 = heading stabilizer break (lifebuoy), B: The measuring vessel in acquisition, C: measurement device with the battery in a plastic waterproof box

Az adatok feldolgozása

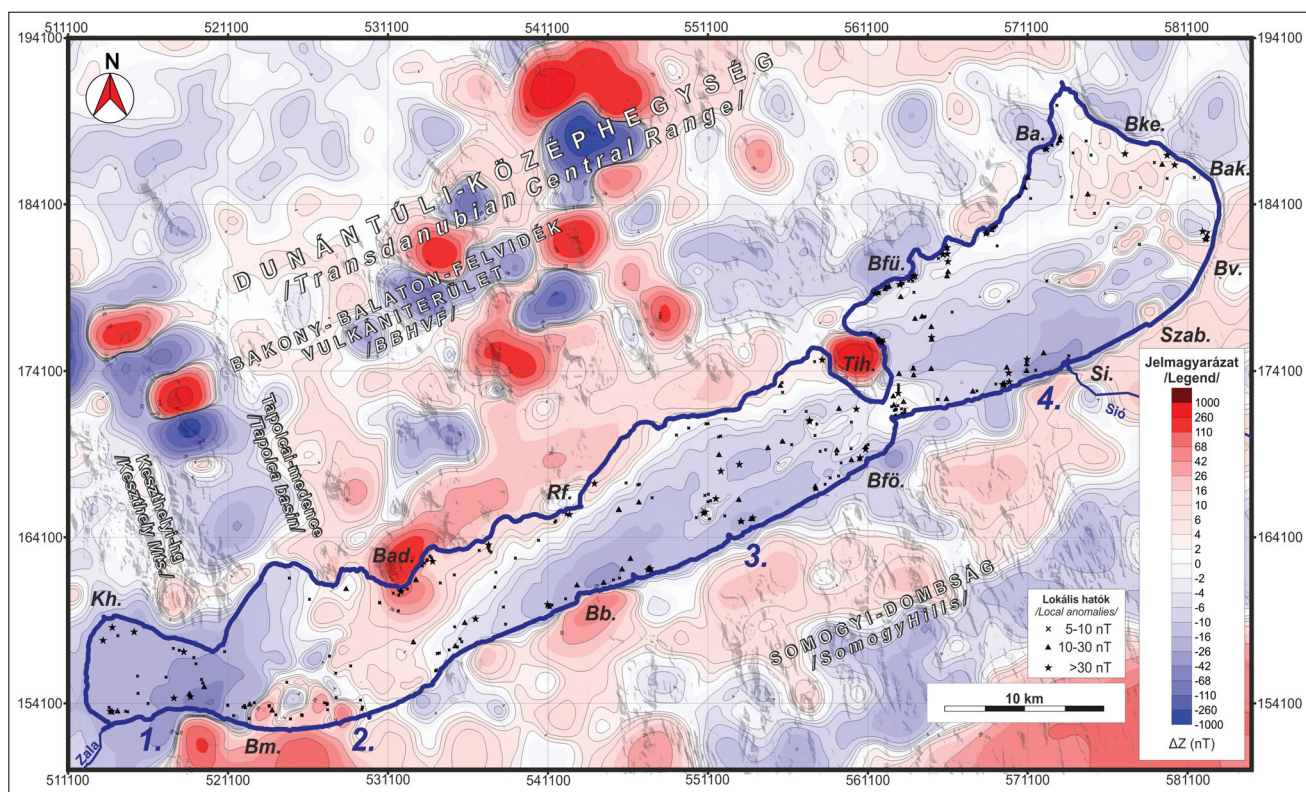
Az adatfeldolgozás során beazonosítottuk és töröltük az adatrendszerből azokat a szakaszokat, melyek időtartama alatt műszerellenőrzés zajlott, vagy a mérőhajó valamelyik kikötőben tartózkodott. Ezt követően eltávolítottuk az adatsorból a rövid hullámhosszú (tipikusan ~5–20 adatpontot érintő) és kiugró amplitúdóval jelentkező változásokat, melyek felszín közeli fémtárgyak hatásai lehetnek. Az így azonosított pontszerű hatók egy része a mérés során is észlelt tereptárgyaknak (stégek, karók, bóják), illetve hajóknak volt megfeleltethető, de számos anomália eredete egyelőre még ismeretlen (4. ábra).

A leválogatott adatrendszeren báziskorrekciót hajtottunk végre a Tihanyi Geofizikai Observatóriumban mért téradatok felhasználásával. 2012-ben a tó nyugati végében tesztméréseket végeztünk egy független bázisműszer segítségével, hogy vizsgáljuk a tihanyi bázisadatok felhasználhatóságát a tó teljes területére nézve. A mérések alapján arra jutottunk, hogy az obszervatórium és a független műszer adatai között mindössze néhány nT különbség jelentkezik, ezért a tihanyi adatok az egész Balaton területén felhasználhatók a geológiai célú mérések báziskorrekciójához.

Az egységes térkép elkészítéséhez, a tó nagy területi kiterjedése miatt szükség volt az adatok normáltér-korrekciójára is. Az ehhez szükséges korrekciós paraméterek a magyarországi szekuláris földmágneses mérőhálózat

(Hungarian Repeat Station network, HRSN) adatai alapján közel két évente kerülnek meghatározásra (Kovács et al. 2012). A feldolgozás során a 2010-es és a 2012-es méréseket a 2013.0 évre, a 2016-os méréseket a 2014.5 évre meghatározott normáltér-paraméterek alapján korrigáltuk (Melléklet, 1. táblázat). A korrigált adatsorból ezt követően kivontuk a tihanyi bázishoz tartozó reziduálanomália-értékét (21,85 nT). Az országos adatokkal való összevethetőség érdekében, a bázis- és normáltérkorrigált adatokat vertikális komponensű anomália- (ΔZ) értékekké transzformáltuk át a Geosoft Oasis Montaj mágneses feldolgozómoduljával. Ehhez azzal a közelítéssel éltünk, hogy a tér különböző pontjaiban a mágneses totáltéranomália- (ΔT) értékét alapvetően az indukált mágnesezettség határozza meg, és az indukáló tér inklinációja (I) körülbelül 63,5°, míg deklinációja közel 3°-nak vehető.

A transzformált ΔZ anomália-térkép a korrekciókból adódóan a tihanyi alapszintre lett meghatározva. Ahhoz, hogy az adatokat az országos adatrendszerrel illeszteni tudjuk, meg kellett határozni a két térkép alapszintkülönbségét is. Utóbbit az ELGI ΔZ anomália-térképének parti mérései és a közeli vízi mérések különbségeként becsültük meg, amiből 35 nT eltérés adódott. Ez az érték jó közelítéssel megegyezett a tó területén mérhető átlagos ΔZ értékkel (~30 nT), így elfogadtuk, és ezzel az értékkel korrigáltuk a teljes adatrendszert (alapszint-korrekció). Az így kapott értékeket variogramillesztést



4. ábra A Balaton és környezetének ΔZ anomália-térképe a 2010–2016 közötti vízi mágneses mérések és az országos anomália-térkép (Kiss, Gulyás 2006) alapján. A fekete markerek a feldolgozás során szűrt lokális hatókat, a kék számok a tó részmedencéit jelölik. Részletes magyarázat az 1. ábránál

Figure 4 ΔZ anomalies of Lake Balaton and its surroundings based on the offshore surveys of 2010–2016 and the anomaly map of Hungary (Kiss, Gulyás 2006). Black markers indicate local anomalies that were filtered out during data processing. Blue numbers show the sub-basins of the lake. For details see Fig. 1.

követően krigeléssel 250×250 m-es rácshálóban interpoláltuk, majd összefésültük az országos felmérés azonos rácstávolság mellett mintavételezett adataival. Az így kapott adatrendszerből szerkesztettük meg a Balaton és környezetének új ΔZ anomália-térképét (4. ábra).

Eredmények

Az 1967–68-as mérések újrafeldolgozásának eredményei

Az 1967–68-as mérések eredményéről publikált térkép (2A ábra) valószínűleg alapszinthibás, mivel a térképen szereplő értékek gyakorlatilag mindenhol negatív totál-tér-anomáliát mutatnak. A feldolgozás során a térkép láthatóan nem lett az országos térképpel egy alapszintre hozva, és az átlagos regionális tér értékével sem korrigálták. A térkép regionális átlagértékkel ($\Delta Z_{\text{atl}} \approx -45,71$ nT) korrigált és $I = 63,5^\circ$ és $D = 3^\circ$ mellett ΔZ értékre transzformált változatát a 2B ábra mutatja, amely már szépen kiemeli a térségre jellemző változásokat. A térkép egyik igen markáns jellegzetessége a tó tengelyére merőleges, egymást váltó pozitív–negatív anomaliasávok, melyek az egykori mérések kivitelezésének és az irányított minta-

vételezésnek az eredményei. Ilyen típusú sávosságot a mágnesezhető anyagoktól nem megfelelően mentesített mérőeszköz esetén tapasztalunk (Bevan 2006), ami alapján nyilvánvaló, hogy az 1967–68-as mérések feldolgozásánál a hajó zavaró hatását nem sikerült érdemben korrigálni. Az eredményekben megjelenő, a mintavételezés irányától függő hatás a korrigált térképen elérheti a 20–40 nT értéket is, amely megfelel a térképen látható anomáliák nagyságrendjének. A térkép érdekessége ugyanakkor, hogy még az előbbi zajszint mellett is felismerhetők kisebb-nagyobb, a sávosságot megtörő anomáliák, melyek felülvizsgálata és validálása a 2010–2016 közötti térképezés feladata volt. Markáns pozitív anomáliák jelentkeznek például Balatonmáriafürdő (Bm) és Badacsony (Bad) előtt, illetve Balatonfüredtől (Bfü) és Révfülöptől (Rf) keletre. Hasonló mértékű negatív anomáliák Balatonboglár (Bb) és Siófok (Si) előtt látszanak, illetve Balatonföldvártól (Bfö) nyugatra egy negatív anomaliasáv jelenik meg, amely keresztülfut a tavon. Szintén érdekes a Tihanyi-félsziget (Tih) keleti oldalán, a szelvények irányára közel merőleges negatív sáv, valamint a Szemesi-medence középső részénél körvonalazódó, enyhe pozitív anomáliacsúcs is, melyeket a térkép nagy bizonytalansága miatt geológiai interpretációhoz egyértelműen felhasználni nem lehetett.

A Balaton új ΔZ anomália-térképe

Az új adatok alapján készített regionális áttekintőtérkép (4. ábra) első ránézésre is alaposan átformálta a Balaton területének mágneses képét. Ez a térkép már lényegében mentes¹ a vontatóhajó mágneses hatásától, és a sűrűbb mintavételezésnek köszönhetően jól kiemeli a mágneses tér hosszú hullámhosszú változásait, valamint a lokális anomáliákat is. A regionális kép követi a tó déli oldaláról ismert KÉK–NyDNY-i irányítottságú mágneses sávokat; a tó déli felében alapvetően kisebb negatív értékeket tapasztalunk, míg a Tihanyi-félszigettől Ny-ra a medencealjzat emelkedését követve az anomáliaértékek É felé fokozatosan nőnek, belesimulva a Balatonfelvidék enyhén pozitív anomaliasávjába. A tó keleti végében változatos, sávós-foltos mintázat jelentkezik, melynek a parti adatokkal való illeszkedése nem egyértelmű. A tó nyugati végében (Keszthelyi-öböl, 4. ábra, 1) ugyanakkor a mért adatok jól követik a Keszthely és Balatonszentgyörgy környékén tapasztalt negatív ΔZ értékeket.

A regionális trendek jó illeszkedése mellett a térképen számos lokális mágneses hatót sikerült azonosítanunk. Ezek egy része ovális, dipól jellegű pozitív–negatív anomáliapároként jelentkezik, míg másik részük a tó hossz tengelyével párhuzamos, sávós-vonalas képet mutat.

A tó nyugati részén (4. ábra, 2) elsősorban dipól jellegű, ovális anomáliák körvonalazódnak, melyek közül a legnagyobb kiterjedésű és amplitúdójú anomáliát a badacsonyi kikötő (Bad) előtt találjuk. A vízi anomália kissé elcsúszva, de a Badacsony hegy parton mért pozitív anomáliájával olvad össze és 2–2,5 km-es félértékszélességet (FWHM), illetve 80–85 nT közötti amplitúdót mutat. Ettől Ny-ra, a szigligeti hegy D-i előterében (kb. 2 km-re a parttól) egy másik, nagyobb kiterjedésű anomália (FWHM \approx 1,5–2 km) látszik. Ennek amplitúdója sokkal kisebb, kb. 10 nT. A térképezés további három látványos anomáliapárt mutatott ki a medence D-i részén, Balatonmáriafürdő (Bm) előtt, nagyjából ott, ahol az 1967–68-as térkép (2B ábra) egy szabálytalan alakú pozitív anomáliát jelölt. A fenti anomáliák félértékszélessége 0,8–1,4 km között van, amplitúdójuk pedig 30–70 nT.

A tó középső medencéjében (4. ábra, 3) jelentősebb kiterjedésű pozitív anomáliát nem találtunk. A meghatározó anomália egy mágneses minimum, amely az 1967–68-as térképpel összhangban Balatonboglár (Bb) előtt helyezkedik el. Amplitúdója durván –30 nT. A negatív csúcs elsőre ellentmondásosnak tűnhet, mivel közvetlenül mel-

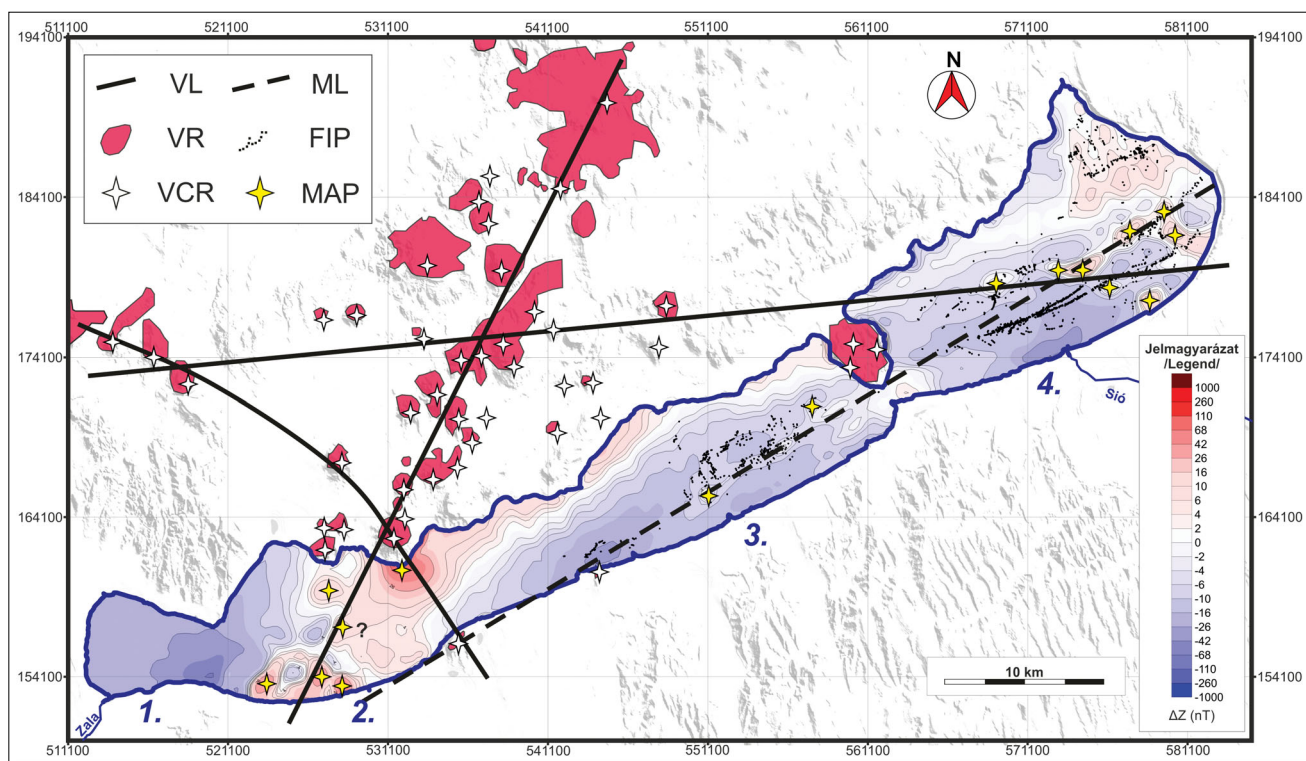
lette a parton pozitív anomáliát találunk. Teljesen hasonló a helyzet Siófoknál (Si), innen kb. 30 km-re KÉK-re, ahol szintén egy nagyobb negatív anomália körvonalazódik. A parti és vízi adatrendszer látszólagos ellentmondását ezen a helyeken az oldja fel, ha az egymás melletti pozitív és negatív csúcsokat egy olyan dipól jellegű anomáliapárként értelmezzük, melynek földmágneses hatója a tó-part közelében helyezkednek el. Ekkor egy normál polaritású anomália alakja pont olyan, hogy az északi negatív része a tóra, a déli pozitív csúcs pedig a szárazföldre esik. A nem tökéletes illeszkedést és a dipól torzulását a parti sávban már feltehetőleg az alacsony térbeli mintavételezés okozza.

A Szemesi-medencében két helyen találtunk lokális pozitív anomáliacsúcsokat. Az egyik a tó középvonalához közel, Tihanytól (Tih) 4–5 km-re nyugatra, míg a másik Boglár (Bb) és Földvár (Bfö) között kb. félúton, a balatonszemesi hajókikötőtől durván 2 km-re ÉÉNy-ra található. Utóbbi helyén az 1967–68-as térkép is egy pozitív anomáliát sejtet. A fenti anomáliamaximumok térben erősen lokalizáltak, kiterjedésük azonban jóval meghaladja az adatrendszerből eltávolított pontszerű hatókét (FWHM \approx 300–600 m). A két lokális csúcsot a Tihanyi-félsziget irányában egy alig észlelhető, gyenge (5–10 nT amplitúdójú) lineáris ható köti össze, amely csak az új, nagy felbontású és sűrített szelvényezésnek köszönhetően vált láthatóvá. Ennek a hatónak a hossz tengelyre merőleges metszetében a látszólagos félértékszélesség nagyjából 0,8–1,2 km.

A Siófoki-medence összetett anomáliaképét éppen az előbbi lineáris ható tükrében érthetjük meg jobban. A Szemesi-medence anomaliasávjába a Tihanyi-félszigettől K-re az 1967–68-as térképen is látható enyhe negatív anomaliasávban (2B ábra) folytatódik, majd a tó keleti részén, ennek a vonalnak a folytatásában és azzal párhuzamos pásztákban több, látszólag lokálisan elkülönülő, jellemzően 10–30 nT amplitúdójú és nagyjából 800–1500 m félérték-szélességű anomáliát lehet felismerni. Az anomáliákból összeálló mintázat, a tó hossz tengelyével közel párhuzamosan, KÉK–NyDNY irányítottságú pozitív–negatív sávokat rajzol ki, amelyek kisebb léptékben ugyan, de a regionális mintázathoz nagyon hasonló képet mutatnak.

A 4. ábrán a geológiai eredetű földmágneses anomáliák mellett az adatrendszerből eltávolított, pontszerű mágneses anomáliák helyét is feltüntettük (fekete szimbólumok). A térkép alapján látszik, hogy a vonalszerű mérések ellenére is rendkívül sok, az iszapban megrekedt fém-tárggyal találkoztunk a mérések során, melyek mágneses hatása akár több, mint 100 nT is lehetett. Az ezekből származó indukált anomália rátevéődik a nagyobb hullámhosszú földmágneses jelre, ami megnehezítette a földmágneses anomáliák maximális amplitúdójának pontos meghatározását. A mágneses térképen még a viszonylag ritka mérőháló ellenére is látszik, hogy a pontszerű hatók első sorban a partok közelében és a nagyobb kikötők környékén jellemzőek, de találunk jelentősen mágnesezhető tárgyakat a tó középső részein is.

¹ A feldolgozás után végzett horizontálisgradiens-vizsgálatok alapján a mérés irányítottságából adódó hibákat a 2010–2016-os felmérésnél is ki lehetett mutatni. A hiba mértéke a 2010–2016-os méréseknél már jóval alacsonyabb, max. 1–2 nT. Ez a hatás elsősorban a tó keleti szélén okoz érzékelhető torzulást az izovonalakban. Az ismeretlen és nemlineáris hibát a műanyag hajóból el nem távolítható kisebb csavarok, esetleg a mérőműszer és az akkumulátor fémtartalma okozhatta. Ezek eltávolítására nem volt módunk.



5. ábra A balatoni mágneses anomáliák és a BBFVT vulkáni képződményeinek lehetséges kapcsolata. VL: vulkáni centrumokat összekötő tengelyvonalak (Martin et al. 2003 alapján), ML: mágneses hatótengely a 2010–2016-os vízi mérések alapján, VR: vulkáni képződmények felszíni előfordulása (Németh 2012 alapján), FIP: felszín közeli vetőindikációk a balatoni ultranagy felbontású szeizmikán (Visnovitz et al. 2015, Jakab et al. 2017 alapján), VCR: Mio/Pliocén vulkáni centrum maradványok (Martin et al. 2003 alapján), MAP: mágneses anomália maximumok

Figure 5 Link between offshore magnetic anomalies and volcanic features of the BBFVT. VL: volcanic lineaments based on Martin et al. 2003, ML: magnetic lineaments based on the offshore surveys between 2010 and 2016, VR: distribution of volcanic rocks on the surface (after Németh 2012), FIP: indications of shallow faults in offshore ultrahigh resolution seismic images (after Visnovitz et al. 2015 and Jakab et al. 2017), VCR: remnants of Mio/Pliocene volcanic centers (after Martin et al. 2003), MAP: magnetic anomaly peaks

Diszkusszió

Az 1966–67-es és 2010–16-os mérések eredményeinek összehasonlítása

Az 1968-ban készült mágnesesanomália-térképet később nem használták fel további földtani kutatásoknál, a mérőhajó vastömegének zavaró hatása miatt. A kezdeti térképet az új adatok fényében vizsgálva azonban láthatjuk, hogy az a főbb anomáliák előrejelzésében jóval sikeresebbnek mutatkozott a vártnál. Bár a mérési adatok hiányában a térképet nem volt módunk az országos adatrendszerrel is illeszthető ΔZ anomáliákra átszámítani, a tihanyi reziduálértékkel és a regionális átlaggal történő korrekció után, ha nem is valós amplitúdókkal, de a fontosabb anomáliák megmutatkoztak (2B ábra). A Badacsony előterében talált anomália mindkét térképen egybeesik, valamint az 1967–68-as térképen a Szigligeti-medence D-i részén látható hatók is jelen vannak. Bár az 1967–68-as térkép felbontása nem elég jó a lokális csúcsok szétválasztására, ennek ellenére az anomália szabálytalan alakja már tulajdonképpen előre jelezte, hogy nem egyetlen ható rejtőzik a területen. Az 1967–68-as térkép az ÉNy–DK sávosság ellenére is előre jelzett nagyobb anomáliaminimumokat Balatonboglár és Siófok előtt. Ezek

az anomáliák az új térképezés alapján valósnak bizonyultak, és a parti pozitív anomáliák negatív párjaként értelmezhetők. Megerősítést nyert továbbá a Szemesi- és Siófoki-medencében is néhány lokális maximum, melyek méretét és amplitúdóját ugyan nem, de helyzetét már a korábbi térkép is igen pontosan megmutatta. Mindezekből azt a következtetést vonhatjuk le, hogy az 1960-as évekbeli mérések és az azokból készült mágnesesanomália-térkép a lehetőségekhez képest meglepően jó eredményt produkált.

A Szigligeti-medence anomáliáinak értelmezése

A Szigligeti-medencében észlelt anomáliák eredetének magyarázatára a legkézenfekvőbb megoldás a vulkanológia felhasználásával adódik. Az általunk kimutatott anomáliapárok és anomáliacsúcsok szépen illeszkednek a Bakony–Balaton-felvidék vulkáni képződményeinek sorába (Balázs et al. 2011, Király et al. 2011, 4. ábra). A BBFVT egyébként jelentős mágneses hatással is bíró vulkáni képződményeit a földmágneses és vulkanológiai kutatásokban általában két kitörési centrum/hatótengely mentén szokás felfűzni (5. ábra). Ezek közül az egyik a K–Ny-i, Tihanyt, a Fekete-hegyet, a Halápot és a Keszthelyi-hegység É-i oldalánál található vulkanitokat köti

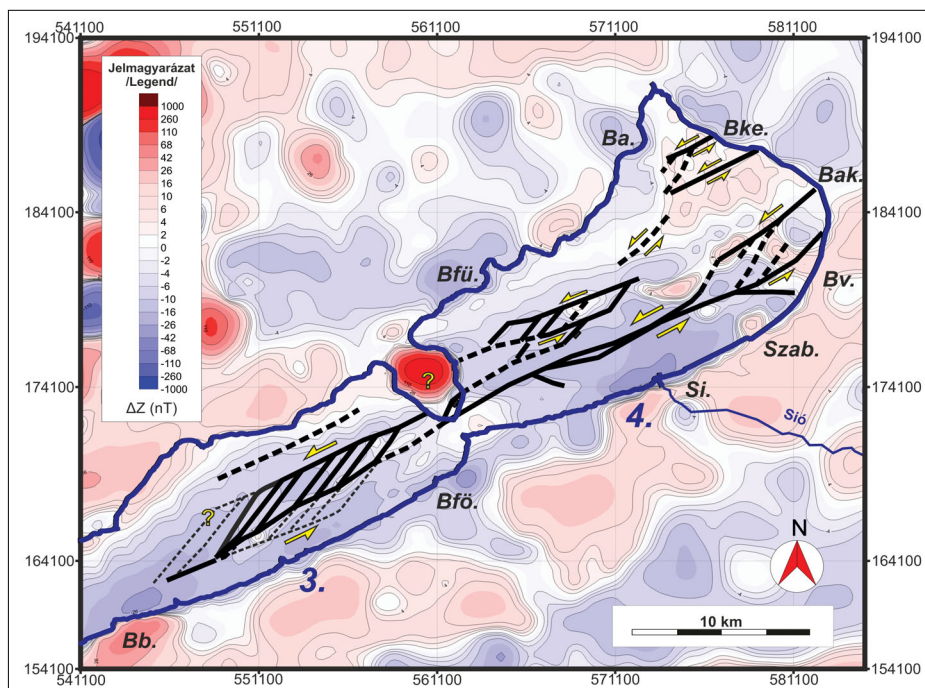
össze, míg a másik durván ÉK–DNy-i csapású, és durván a Kab-hegy, Feketehegy/Bondoró, Badacsony vonalat követi (Posgay 1966, Martin et al. 2003, Martin, Németh 2004, Kiss et al. 2017). A Szigligeti-medencében újonnan kimutatott mágneses anomáliák az utóbbi sorba illeszthetők, és átmenetet képeznek a tó É-i partjánál található tanúhegyek (Badacsony, Szigliget) és a D-i part közelében eltemetett középső miocén lávadóm, a Balatonmáriafürdői trachittest (Klébesz et al. 2009) között. Földrajzi elhelyezkedésük alapján tehát a kapcsolódó hatók eltemetett szubvulkáni testek, illetve eddig még nem ismert vulkáni centrumok (ventek) lehetnek, melyek a BBFVT legdélebbi tagjait képviselhetik az ÉK–DNyi csapású vulkáni sorozatba illeszkedve (5. ábra).

A „tó alatti” vulkanizmus koráról jelenleg meglehetősen kevés információ áll rendelkezésünkre. Az eltemetett vulkánok vagy mélyben megrekedt magmás testek korát a közeli Badacsony, Hármashegy, Fonyód vulkanitjainak kora (3,5 Ma, Martin & Németh 2004) és a tó D-i oldalán eltemetett trachit vulkánhoz tartozó 13 Ma kor (Klébesz et al. 2009) közötti tartományba várjuk. Ebből az időszakból a fiatalabb korokat támasztják alá azok az ultranagy felbontású vízi szeizmikus szelvények, melyeket az ELTE geofizikusai 2011 tavaszán mértek a tavon (Balázs et al. 2013). A szelvényeken az egyik Balatonmáriafürdő előterében található anomália felett a kb. 8 millió éves pannóniai üledékek felboltozódása látható erős, akusztikusan árnyékoló reflexiók kíséretében, ami arra utal, hogy a mélyben valamiféle intrúzió van jelen. A rétegek gyűrődése poszt-dátálja a pannóniai üledékek lerakódását, melynek alapján a kérdéses vulkanizmusnak 8 millió évnél fiatalabbnak kell lennie.

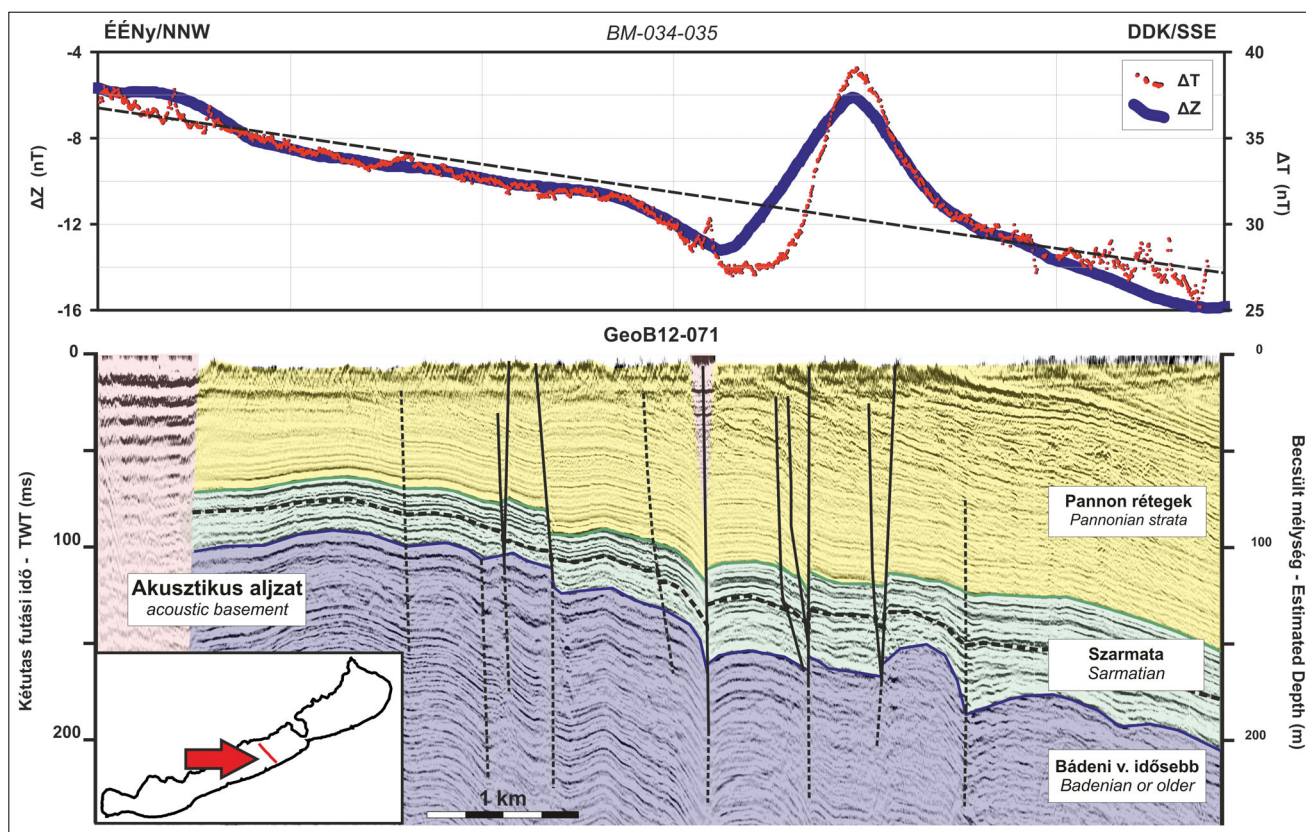
A keleti és középső medencében kimutatott lineáris anomáliák lehetséges eredete

Az 5. ábrán látható, hogy a tó K-i felében talált mágneses maximumok is felfűzhetők a vulkáni centrumokat összekötő tengelyekre. Az utóbbi anomáliák a K–Ny-i tengely folytatásában sorakoznak, de határozottan kisebb ΔZ értékekkel, mint a Ny-i oldalon. A vízi szeizmikus adatokon, a pannóniai rétegek és a pannóniai bázisát adó képződményekben itt is találunk több helyen gyűrődéseket, felboltozódásokat, melyeket Sacchi et al. (1999), majd később Horváth et al. (2010) és Tóth et al. (2010) is vulkáni intrúziókként azonosítottak. A vulkáni testek jelenlétét fúrési adat (Tó-28) is támogatja (Cserny et al. 2004), ugyanakkor a mágneses anomáliák és a szeizmikán látható aljzatmagaslatok helyét összevetve arra jutunk, hogy a térképezett anomáliák nem a magaslatokhoz köthetők, vagyis nem a magaslatok magjában feltételezett „bazaltos intrúziók” keltik azokat.

A tó keleti felében azonosított anomáliák egy másik, a tó tengelyével közel párhuzamos pászta (5. ábra, szaggatott vonal) mentén is felfűzhetők, amely alternatív magyarázatot kínál a hatók eredetére vonatkozóan. Ez az ÉK–DNy-i csapású vonal egybeesik a tó alatt húzódó nyírás zóna lefutásával (6. ábra), melyet korábban a vízi szeizmikus szelvények alapján megismertünk (Visnovitz et al. 2015, Jakab et al. 2017). A meglehetősen jó korreláció a szeizmika segítségével térképezhető vetők és a mágneses anomáliák, valamint a regionális trend és az aljzat D–DK-i irányú mélyülése között (7. ábra) azt az elképzelést támogatja, miszerint a mágneses tér változásait az aljzat települési mélysége és az aljzati tektonika határozhatja meg.



6. ábra | A Balaton alatti szerkezetek (Visnovitz et al. 2015) és a mágnesesanomália-térkép összevetése
Figure 6 | Comparison of the structural model of Visnovitz et al. (2015) with the magnetic anomaly map



7. ábra A Szemesi-medencét keresztelő vízi szeizmikus szelvényen látható vetők (Visnovitz et al. 2015) és a medence déli harmadánál húzódnó lineáris anomália korrelációja. A piros pontok az alapszint korrekció nélküli ΔT értékeket, a kék vonal a ΔZ anomáliát, a szaggatott fekete vonal pedig a regionális trendet jelöli. Az utóbbi az aljzat dőlésével mutat korrelációt

Figure 7 Correlation between the elongate magnetic anomaly and fault system imaged by high-resolution seismic data (Visnovitz et al. 2015) in the central sub-basin of Lake Balaton. Red points show ΔT anomalies before baselevel correction, blue line indicates ΔZ values, while the black dashed line shows the regional trend in magnetic data that has a good correlation with the S-SW dipping acoustic basement

A pontos hatógeometria, a mágneses tulajdonságot hordozó kőzettestek összetétele, valamint fizikai paraméterek, melyek a 4. ábrán látható mágneses anomáliákat létrehozzák, egyelőre még nem ismertek. Ennek felderítésére a kőzetanyag mintázását követő hatómodellezésre lenne szükség.

Összefoglalás, konklúziók

A dolgozatban az elmúlt 50 év balatoni vízi mágneses kutatásait és azok eredményeit foglaltuk össze, külön ki térvén a tó, és egyben Magyarország első vízi mágneses térképezésére (1967–1968), és az ELTE Geofizikai és Űrtudományi Tanszékének 2010–2016 között végzett, új vízi mágneses térképezésének eredményeire is. Az archív térkép és az új mérési adatok feldolgozása után lehetőségünk nyílt a különböző mérési eredmények összehasonlítására, valamint az országos adatok és az új vízi mérések összefésülésével elkészíthettük a Balaton és környékének részletes vertikálisanomália-térképét. A térkép alapján a vízi mérések eredményei jól illeszkednek a szárazföldi adatokhoz, és sikeresen térképeztük néhány partról ismert anomália (pl. Badacsony, Tihany, Boglár) folytatását a tómeder területén. A térképezés

kimutatta, hogy a tó alatt az előbbieken túlmenően jelentős kiterjedésű mágneses hatók nem fordulnak elő, ugyanakkor a részletes térképezésnek hála, számos kis-méretű, relatíve kis amplitúdójú anomáliát tudtunk észlelni. Az anomáliák egy része már az 1967–68-as térképen is körvonalazódik, de azok pontos kimutatása és igazolása csak az új, nagyobb pontosságú és sűrűbb szelvényezés révén vált egyértelművé. A térség földtani adottságait és a tavon végzett vízi szeizmikus szelvények értelmezését figyelembe véve a tó alatti anomáliákat az alábbi módon tudjuk értelmezni:

- A tó területén látható regionális trendeket alapvetően az aljzat kőzettani felépítése és enyhe D–DK irányú dőlése határozza meg, melyre 5–80 nT amplitúdójú dipól jellegű, illetve hosszan elnyúló lineáris anomáliák tevődnek rá.
- A tó nyugati felében azonosított ovális anomáliák, melyek félértékisélessége 0,8–2,5 km közötti, feltehetőleg szubvulkáni testekhez kapcsolódnak, melyek helyzetüket tekintve a BBFVT már ismert vulkáni vonulataiba jól illeszkednek. A kapcsolódó gyűrődéses deformáció a tó alatt látható pannóniai rétegeket posztdatalja, tehát a feltételezett szubvulkáni testek kora 8 Ma-nél fiatalabb, ami összhangban van a BBFVT ismert vulkáni képződésük radiometrikus korával.

- A tó középső és keleti részén észlelt ovális és lineáris anomáliák a Balaton tengelyében húzódó szerkezeti vonallal jól korrelálhatók, ami alapján arra következtethetünk, hogy ezek az anomáliák a tó alatt lejátszódó tektonikus folyamatokkal állnak kapcsolatban.

Köszönetnyilvánítás

A kutatás anyagi és szakmai háttérét az NKFI 109255K pályázat, az EGT/156/M4-0002 „Hidromorfológiai mérőgyakorlat kidolgozása építőmérnök és geofizikus hallgatók számára” c. projekt, valamint a Pázmány–Eötvös Természettudományi Információs Alapítvány támogatása biztosította. A mágneses mérésekben az Eötvös Loránd Tudományegyetem számos hallgatója vett részt. Köszönet illeti Szabó Lajos és Károlyi János hajóskapitányokat (Yachtsail Kft.) a közel 1000 km összhosszúságú vízi szelvényezés során nyújtott segítségért, valamint Sziráki Mártát (Balatonlellel Yacht Klub), Homonnay Zsombort (Ábrahámhegy, Jégmadár kikötő) és a balatoni vízi rendőrséget, hogy a felmérés során a mérőhajóink számára kikötési lehetőséget biztosítottak. Végezetül köszönjük Kiss Jánosnak a cikk lektorálása során nyújtott tanácsait és a totáltéranomália-térképek vertikális komponensű anomália-térképekké transzformálásában nyújtott segítségét.

A tanulmány szerzői

Visnovitz Ferenc, Hegyi Betti, Balázs Attila, Raveloson Andrea, Rozman Gábor, Lenkey László, Lenkey-Bögér Ágnes, Király Ágnes, Pethe Mihály, Kudó István, Kovács Péter, Csontos András, Heilig Balázs, Vadász Gergely, Horváth Ferenc[†]

Hivatkozások

Bada G., Szafián P., Vincze O., Tóth T., Fodor L., Spiess V., Horváth F. (2010): Neotektonikai viszonyok a Balaton keleti medencéjében és tágabb környezetében nagyfelbontású szeizmikus mérések alapján. *Földtani Közlöny* 140/4, 367–390.

Balázs A., Visnovitz F., Spiess V., Fekete N., Tóth Zs., Hámori Z., Kudó I., Horváth F. (2013): Új szeizmikus mérések a Balatonon: beszámoló a 2011–2012. évi szelvényezésekről. *Magyar Geofizika* 54/2, 67–76.

Balázs A., Király Á., Bögér Á. (2011): Basalt volcanoes under the Lake Balaton. 6th Congress of the Balkan Geophysical Society, Budapest.

Bevan B. (2006): Understand magnetic maps. *Geosight*, 74 p. <https://doi.org/10.13140/rg.2.2.26829.64487>

Bender O., Varrók K., Reményi Gy. (1966): A tihanyi obszervatórium környékén végzett földtani, földmágneses és gravitációs vizsgálatok. *Geofizikai Közlemények*, 15/1–4, 83–94.

Budai T., Vörös A. (1992): Middle-triassic history of the Balaton-highland: extensional tectonics and basin evolution. *Acta Geologica Hungarica*, 35/3, 237–250.

Budai T., Császár G., Csillag G., Dudko A., Koloszar L., Majoros Gy. (1999): A Balaton-felvidék földtana. *Magyarázó a Balaton-felvidék földtani térképéhez (1:50000)*, Budapest. Magyar Állami Földtani Intézet (MÁFI), 257 p.

Cholnoky J. (1936): Magyarország földrajza. A Föld és élete, VI. kötet. Franklin és Társa Kiadó, Budapest, 530 p.

Cserny T., Corrada R. (1989): Complex geological investigation of Lake Balaton (Hungary) and its results. *Acta Geologica Hungarica*, 32/1–2, 117–130.

Cserny T., Prónay Zs., Neduczka B. (2004): A Balatonon végzett korábbi szeizmikus mérések újraértékelése. *Magyar Állami Földtani Intézet Évi jelentése 2004*, 273–283.

Dank V., Fülöp J., Ádám O., Barabás A., Bardócz B., Bérczi I., Brezsnaynszky K., Császár G., Haas J., Hámor G., Horváth F., Jámor Á., Kassai M., Nagy E., Pogácsás Gy., Ráner G., Rumler J., Síkhegyi F., Szederkényi T., Völgyi L., Zelenka T. (1990): Magyarország szerkezetföldtani térképe. M = 1:500 000. Magyar Állami Földtani Intézet, Budapest.

Dudko A. (1986): A Velence–Balatonfő terület variszkuszi szerkezetalakulása. *Magyar Állami Földtani Intézet Évi Jelentése 1984-ről*, pp. 23–63.

Fodor L., Bada G., Csillag G., Horváth E., Ruzsiczai-Rüdiger Zs., Horváth F., Cloetingh S., Palotás K., Síkhegyi F., Timár G. (2005): An outline of neotectonic structures and morphotectonics of the western and central Pannonian basin. *Tectonophysics*, 410, 15–41.

Haas J., Budai T. (1999): Triassic sequencestratigraphy of the Transdanubian range (Hungary). *Geologica Carpathica*, 50/6, 459–475.

Hegymegi L., Körmendi A., Szulyovszky I. (1968): Protonprecessziós mágneses mérések a Balatonon. *Magyar Geofizika*, 9/6, 231–236.

Horváth F., Bada G., Windhoffer G., Csontos L., Dövényi P., Fodor L., Grenczy Gy., Síkhegyi F., Szafián P., Székely B., Timár G., Tóth L., Tóth T. (2005): Atlas of the present-day geodynamics of the Pannonian basin: Euroconform maps with explanatory text – OTKA T034928, final report. Eötvös Loránd University, Department of Geophysics and Space Science, Budapest, 38 p.

Horváth F., Sacchi M. Dombrádi E. (2010): A Pannon-medence üledékeinek szeizmikus sztratiográfiai és tektonikai vizsgálata a Dél-Dunántúl és a Balaton területén. *Földtani Közlöny*, 140/4, 391–418.

Hrvoic I., Newitt L. R. (2011): Instruments and Methodologies for Measurement of the Earth's Magnetic Field. In: Manda M., Korte M. (eds), *Geomagnetic Observations and Models*. IAGA Special Sopron, Book Series 5, Springer, pp. 105–126.

Jakab B., Visnovitz F., Fodor L., Horváth F. (2017): Mapping of neotectonic structures at the eastern shores of Lake Balaton using ultra-high resolution seismic profiles recorded in 2014 and 2016. *Acta Mineralogica Petrographica, Field guide series* 32, 16.

Jugovics L. (1969): A Balaton-felvidék és a Tapolcai-medence bazaltvidékének földtani jellegei. *A Magyar Állami Földtani Intézet Évi Jelentése 1968*, pp. 223–243.

Király Á., Balázs A., Bögér Á. (2011): Basalt volcanoes under the Lake Balaton. *Ifjú Szakemberek Ankétja, Absztraktfüzet*, Győr.

Kiss J., Gulyás Á. (2006): Magyarország mágneses ΔZ -anomália térképe, 1:500 000. Magyar Állami Eötvös Loránd Geofizikai Intézet, Budapest.

Kiss J., Vértesy L., Gulyás Á. (2017): Földmágneses esettanulmányok a Balaton-felvidékről, a Duna–Tisza közéről és a Tokaji-hegység területéről. *Magyar Geofizika*, 57/4, 126–151.

Klébesz R., Harangi Sz., Ntaflós T. (2009): A balatonmáriai ultrakáli trachandezit petrogenézise. *Földtani Közlöny*, 139/9, 237–250.

- Kovács P., Csontos A., Heilig B., Koppán A. (2012): Hungarian repeat station survey, 2010. *Annals of Geophysics*, 55/6, 1113–1119. DOI: 10.4401/ag-5450.
- Lóczy L. (1913): A Balaton környékének geológiai képződményei és ezeknek vidékek szerinti telepedése. A Balaton tudományos tanulmányozásának eredményei, I. kötet, 1. rész, Budapest 617 p.
- Martin U., Auer A., Németh K., Breitzkreuz C. (2003): Mio/pliocene phreatomagmatic volcanism in a fluvio-lacustrine basin in Western Hungary. *Geolines, Journal of the Geological Institute, Academy of Sciences of the Czech Republic* 15, 75–81.
- Martin U., Németh K. (2004): Mio/pliocene phreatomagmatic volcanism in the Western Pannonian Basin. *Geologica Hungarica*, 26, 84–90.
- Németh K. (2012): An Overview of the Monogenetic Volcanic Fields of the Western Pannonian Basin: Their Field Characteristics and Outlook for Future Research from a Global Perspective, Updates in Volcanology Francesco Stoppa. *IntechOpen*, DOI: 10.5772/23219.
- Pánisová J., Balázs A., Zalai Zs., Bielik M., Horváth F., Harangi Sz., Schmidt S., Götze H. J. (2018): Intraplate volcanism in the Danube Basin of NW Hungary: 3D geophysical modelling of the Late Miocene Pásztori volcano – *International Journal of Earth Sciences (Geol Rundsch)* 107/5, 1713–1730. <https://doi.org/10.1007/s00531-017-1567-5>
- Posgay K. (1966): A magyarországi földmágneses hatók áttekintő térképe, M = 1:500 000. Magyar Állami Eötvös Loránd Geofizikai Intézet kiadványa, Budapest.
- Sacchi M., Horváth F., Magyarai O. (1999): Role of unconformity-bounded units in the stratigraphy of the continental record: a case study from the Late Miocene of the western Pannonian basin, Hungary. In: Durban, B., Jolivet, L., Horváth, F., Séranne, M. (eds): *The Mediterranean Basins: Tertiary Extension within the Alpine Orogen*. Geological Society, London, Special Publications 156, 357–390.
- Tóth Zs, Tóth T, Szafián P, Horváth A, Hámori Z, Dombrádi E, Fekete N, Spiess V., Horváth F. (2010): Szeizmikus kutatások a Balatonon. *Földtani Közlöny*, 140/4, 355–366.
- Turner G. M., Rasson J., Reeves C. (2015): Observation and Measurement Techniques. In: Schubert G. (ed). *Treatise of Geophysics, Volume 5.: Geomagnetism*, pp. 91–135. Elsevier, ISBN 978-0-444-53803-1.
- Visnovitz F., Balázs A., Horváth F. (2013a): High-resolution seismic surveys in the Lake Balaton to image the stratigraphic architecture of Late Miocene basin fill beneath the lake. *Geophysical Research Abstracts*, 15, EGU2013-969.
- Visnovitz F., Tóth T., Hámori Z., Kudó I., Balázs A., Sacchi M., Surányi G., Horváth F. (2013b): Balatoni egycsatornás, nagy felbontású szeizmikus szelvények újrafeldolgozása. *Magyar Geofizika*, 54/2, 77–88.
- Visnovitz F., Horváth F., Fekete N., Spiess V. (2015): Strike-slip tectonics in the Pannonian basin based on seismic surveys at Lake Balaton. *International Journal of Earth Sciences (Geol. Rundsch.)*, 104/8, 2273–2285. DOI: 10.1007/S00531-015-1179.x.

Melléklet

1. táblázat A normáltér-korrekciónhoz alkalmazott paraméterek négy tizedes jegyre kerekítve. A paraméterek meghatározását lásd Kovács et al. 2012. p_i : elsőrendű polinomiális modellegyűthetők a normáltér leírására, q_i : az elsőrendű közelítéshez tartozó szekuláris változást leíró modellegyűthetők. Φ, λ : földrajzi szélesség és hosszúság szögperc egységekben, $\Phi_0 = 45^\circ 30'$, $\lambda_0 = 16^\circ 00'$, t : aktuális időpont tizedes évre kerekítve, t_{epoch} : az epoch időpontja. A táblázatban szereplő paraméterek alapján számított deklináció- és inklinációértéket szögpercben, a térkomponensek nT egységekben értendők. Megjegyezzük, hogy a feldolgozás időpontjában a 2014.5 epoch utáni szekuláris változás polinom együtthatói még nem álltak rendelkezésre. Ezért, a korrekciókhoz a korábbi időszakra vonatkozó együtthatókat alkalmaztuk

Table 1 Parameters for normal field correction rounded to four decimals. For further details of parameter determination see Kovács et al. 2012. p_i : model coefficients calculated in first-order polynomial approximation, q_i : model coefficients for secular variation calculated in first-order polynomial approximation. Φ, λ : geographic latitude and longitude in minute units, $\Phi_0 = 45^\circ 30'$, $\lambda_0 = 16^\circ 00'$, t : actual date in years rounded to one decimal, t_{epoch} : date of the epoch. Using the given parameters in *Table 1* the calculated values for declination and inclination are given in arc minutes while magnetic field components are calculated in nT units. Note that at the time of processing, the polynomial coefficients for the secular change occurred after the 2014.5 epoch were not yet available. Therefore, corrections were applied using coefficients from the previous period.

Epoch 2013.0	p_0	p_1	p_2	q_0	q_1	q_2
Deklináció / Declination (D)	195.5451	0.1198	0.2194	7.0579	0.0035	-0.0043
Horizontális int. / Horizontal int. (H)	22341.9544	-9.0889	-0.2939	14.7360	-0.0370	-0.0073
Vertikális int. / Vertical int. (Z)	42191.4073	9.5599	1.4157	29.6128	0.0028	0.0215
Inklináció / Inclination (I)	3727.0801	0.8791	0.0625	0.0875	0.0012	0.0012
Totál tér / Total Field (F)	47723.3560	4.5583	1.1512	32.8381	-0.0053	0.0138
Epoch 2014.5	p_0	p_1	p_2	q_0	q_1	q_2
Deklináció / Declination (D)	206.1319	0.1251	0.2129	7.0579	0.0035	-0.0043
Horizontális int. / Horizontal int. (H)	22364.0583	-9.1443	-0.3048	14.7360	-0.0370	-0.0073
Vertikális int. / Vertical int. (Z)	42235.8265	9.5640	1.4480	29.6128	0.0028	0.0215
Inklináció / Inclination (I)	3727.2113	0.8810	0.0643	0.0875	0.0012	0.0012
Totál tér / Total Field (F)	47772.6131	4.5504	1.1719	32.8381	-0.0053	0.0138

Az epochra számított mágneses intenzitás / Magnetic intensity in a given point for the epoch:

$$B^{\text{epoch}}(\Phi, \lambda, p) = p_0 + p_1(\Phi - \Phi_0) + p_2(\lambda - \lambda_0)$$

A szekuláris változás mértéke / Secular variation:

$$B^{\text{sec}} = (\Phi, \lambda, p) = [q_0 + q_1(\Phi - \Phi_0) + q_2(\lambda - \lambda_0)] (t - t_{\text{epoch}})$$

Normáltér-korrekción értéke / Value for normal field correction:

$$B^{\text{norm}} = B^{\text{epoch}} + B^{\text{sec}}$$