

A Balaton legnagyobb kiterjedésének rekonstrukciója a függőleges kéregmozgások figyelembevételével

TIMÁR Gábor¹, CSILLAG Gábor², SZÉKELY Balázs^{1,3}, MOLNÁR Gábor^{1,3}, GALAMBOS Csilla², CZANIK Csenge¹

¹ELTE Geofizikai és Űrtudományi Tanszék

²Magyar Állami Földtani Intézet

³Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, Technische Universität Wien, Ausztria

Reconstructing the maximum extent of Lake Balaton (Transdanubia, Hungary) with respect to vertical crustal movements

Abstract

The quality and resolution of digital elevations models (DEMs) are rapidly improving and the analyses they provide are suitable tools for reconstructions. This study considers a reconstruction of the former inundation levels which characterize the maximum extent of lakes using DEMs and it focuses on Lake Balaton. However, the static filling algorithms which model the inundation in a DEM by a pre-set level often do not produce reliable results. To achieve more reliable models it is suggested that it is necessary to take into account the results of repeated and precise levellings as well. According to these results, the northern shore and foreland of Lake Balaton is being uplifted, in contrast to the southern one. The rate of this relative movement is a few tenths of a millimetre per year. Assuming the rate of uplift has been constant over the past few millennia, in the Early and Middle Holocene the level of the northern embayments (especially the one far to the north at Tapolca) were lower by 2–3 metres compared to the southern ones (especially the one far to the south at Nagyberek). Using this method (DEMs with repeated levellings) more reliable results can be obtained; this approach results in an outline of the lake which fits well to the lacustrine sediments mapped by LÓCZY. Furthermore, there is still no overflow on the southern edge of the watershed. The small differences between this outline and the extent of mapped lacustrine sediments, however, may reflect the small temporal variations of the vertical movements over the recent millennia.

Keywords: Lake Balaton, water level change, digital elevation model, precise levelling, vertical surface movement, Holocene

Összefoglalás

A Balaton egykori, a tó legnagyobb kiterjedésére jellemző vízszint meghatározására kézenfekvő lehetőségként adódik az utóbbi időben egyre jobb pontossággal és felbontóképességgel jellemzett digitális domborzati modellek alkalmazása. A tómedence statikus kitöltése a domborzati modelleken beállított vízszintű elárasztással önmagában azonban nem hoz pontos eredményt. Az elárasztási modellek alkalmazásakor az utólagos függőleges kéregmozgásokat is figyelembe kell venni, a rekonstruált partvonalak ekkor mutatnak jó egyezéseket a geológiai térképeken jelzett tavi üledékek határával. Az ismételt szintezések eredményeként a tó északi partja és előtere a délihez képest emelkedik. E relatív elmozdulás mértéke évente néhány tizedmilliméter. E mozgás állandóságát feltételezve az elmúlt néhány ezer évben, a holocén elején, közepén az északi (elsősorban a messze kinyúló tapolcai) öblözetek szintje a déliekhez (elsősorban a messze kinyúló nagyberekihez) képest a mainál 2–3 méterrel mélyebben lehetett. Ezzel a megfontolással a statikus modellhez képest egyértelműen jobb eredményekhez jutunk; olyan tókörvonalat állíthatunk elő, amely a LÓCZY által is térképezett tavi üledékekhez jól illeszkedik, ugyanakkor a déli peremen sem „csordul túl” a vízgyűjtő határán. Az így megállapított maximális tókiterjedés és a tavi üledékek borított terület határának kismértékű eltérései emellett utalnak a mai, geodéziai úton meghatározott felszínemelkedési ráta időbeli változásaira is az elmúlt évezredek folyamán.

Tárgyszavak: Balaton, szintváltozások, domborzati modell, szintezés, vertikális felszínmozgás, holocén

Bevezetés

A Balaton a földtani közelmúltban a mainál nagyobb kiterjedésű volt, és a legnagyobb kiterjedés megismerése végig meghatározta a tó kutatásának történetét (pl. PÉCH & ERDŐS 1898; LÓCZY 1913; BENDEFY 1958; RÓNAY 1969;

CSERNY 1993; CSERNY & NAGY-BODOR 2000; SÜMEGI et al. 2004, 2008a; BRADÁK 2007; legújabban pedig ZLINSZKY & MOLNÁR 2009). Geológiai értelemben a legegységesebben talán LÓCZY remekbe szabott geológiai térképe (LÓCZY 1920) adja meg e kutatás földtani alapjait. Ezen a térképen (részben LÁSZLÓ [1913] nyomán), a „Tavi alluvium,

mocsárföld” megjelölés adja meg a Balatont körülvevő azon területeket, amelyekn a tó legnagyobb kiterjedése idején üledékképződés folyt. A térkép vízszintes pontosságát a legújabb, GPS-alapú vizsgálatok is igazolták (GALAMBOS et al. 2009). A Balaton tavi üledékeinek elterjedése nem azonosítható teljes mértékben a Balaton egykori partvonalával. A Balaton építésföldtani térképezése során nagyszámú kézi fúrás rétegsorának vizsgálata alapján megállapítható volt, hogy tavi üledékek 107–108 m tsz. felett nem fordulnak elő egy Siófok melletti kis előfordulás kivételével, ahol 110 m-en vékony tőzegréteg települ (BOROS et al. 1980, 1982). A geomorfológiai térképen magas színű jelöléssel 110 m-nél húzta meg a tavi üledékképződés felső határát CSILLAG (1985), e szint fölött azonban a terepen és a topográfiai térképeken is elkülöníthető sávban ábrázolta a Balaton legmagasabb vízállásához köthető abrázíós színűt. Ennek felső határát a 2,5 m-es szintvonal-beosztású 1:10 000-es topográfiai térképek felbontásához alkalmazkodva a 112,5 méteres szintvonalon húzta meg. Jelen vizsgálatunkba bevontuk a MÁFI 1:100 000 méretarányú geológiai térképművének megfelelő szelvényét (BUDAI & SCHAREK 2000) is.

Napjaink részletes szintvonalrajzzal ellátott topográfiai térképei, de különösen a digitális domborzati modellek (KOÓS 1996, MH-TÁTI 1992, TIMÁR 2003, WINKLER 2003, FARR et al. 2007) új eszközt adtak a kutatásokhoz. Fölmerül a lehetőség, hogy a domborzati modellen a tó medencéje körül a mainál magasabb vízszintig történő kitöltéssel (BATES & DE ROO 2000) rekonstruáljuk a korábbi maximális tókiterjedés határvonalát (pl. CSONGRÁDINÉ & SÍKHEGYI 2005). Szintvonalak alapján történt a korábbi tómedence lehatárolása a térség építésföldtani térképein és adatbázisain is (BOROS & CSERNY 1983, CSERNY et al. 1997). A statikus, kizárólag a mai felszínmagasságon alapuló lehatárolás kismértékben ellenmondott az öblözetek részletes vizsgálatának (NAGY-BODOR & CSERNY 1998). A LÓCZY-féle tavi üledékek elterjedése és a mai felszínmagasságból rekonstruált tómedence legjobban a Tapolcai-medencében tér el. Míg a térkép szerint a Szent György-hegy sziget a tavi üledékkel borított térszínben, így feltehetően a Balatonnak is szigete volt, amennyiben a domborzati modellen olyan előtést generálunk, amely a hegyet valóban szigetté teszi, az elárasztás a déli partvonal mentén, elsősorban a Nagyberék öblözetében a tavi üledékszónán jelentősen túlnyúlik, sőt a déli vízválasztó peremen túlcorduláshoz vezet.

Az utóbbi másfél évtized geodinamikai és geodéziai kutatásai ugyanakkor megoldást kínálnak e problémára. A recens vertikális kéregmozgások hatását az eddigi szerzők elhanyagolták. Jelen munkában kísérletet teszünk e hatás figyelembevételére és a következményeinek felmérésére. Eredményeink azt mutatják, hogy a vertikális kéregmozgásoknak akár mintegy tízezer éves skálán is lehet érdemi befolyása a Balaton kiterjedésére, és az ebből eredő hatás a fenti megfigyelésekre kézenfekvő magyarázatot adhat.

Elméleti megfontolások

A Kárpát-medence kialakulásának általános geodinamikai modellje (HORVÁTH 1993; a térséget illetően SÍKHEGYI 2002, SACCHI & HORVÁTH 2002, FODOR et al. 2005) szerint a posztrift fázisban (HORVÁTH 1995) az elvékonyodott litoszfé-ralemez ismételt tektonikai inverzió során kompresszió alá került, helyenként felboltozódott, másutt pedig kisebb-nagyobb medencék jöttek létre (HORVÁTH & CLOETINGH 1996). Ilyenek az Alföld, a Kisalföld és a Dráva-mente, míg a Dunántúli-középhegység, így a Bakony és a tóhoz kapcsolódó Balaton-felvidék is a felboltozódási zónák közé tartozik.

A folyamat mai is tart, sőt a legutóbbi idők *kozmogén izotópos* mérési eredményei és az azokon alapuló geomorfológiai értelmezések szerint a Dunántúli-középhegység egyes területeinek kiemelkedési üteme lényegesen gyorsabb a korábban feltételezetténél (RUSZKICZAY-RÜDIGER et al. 2005a, b; KARÁTON et al. 2006, 2007). Miközben már LÓCZY (1913) is felismerte, hogy a Balaton környékén az azonos korú üledékek magassági helyzete eltérő, ezt a megfigyelést nem terjesztette ki a legfiatalabb rétegekre, valószínűleg azért, mert az ehhez szükséges szélső pontosságú geodéziai, szintezési adatok csak évtizedekkel később születhettek meg (BENDEFY 1958). A fent említett geomorfológiai szintézisen alapulóan ugyanakkor SZÉKELY & MOLNÁR (2008) legújabbban a Bakony délnyugati végén és a Balaton körül található fiatal bazaltvulkánok bazalt-feküszintjének eltérő magasságát is a terület eltérő függőleges szintváltozásának üteméből vezetik le. A mintegy hárommillió éves bazaltvulkáni felszíneken mutatkozó több száz méter magasságkülönbség pedig tizedmilliméter/év nagyságrendű vertikális sebességkülönbségeket jelent.

A felsőgeodéziában járatos szakemberek számára ez a mozgási sebesség nem jelent semmi meglepőt. A hazánkban az 1950-es években elvégzett felsőrendű szintezési munkák (az ún. BENDEFY-felmérés) és annak az 1980-as években történő felújítása (az ún. JOÓ-féle felmérés) magassági adatainak különbségéből érdekes kép rajzolódik ki hazánk függőleges felszínmozgására (JOÓ 1992, 1996, 1998). Eszerint a Bakony és a Vértes kiemelkedésének üteme jelenti a hazai maximumot (+1–1,5 mm/év), míg a legnagyobb süllyedést az alföldi nagyvárosok környékén, a rétegvíz- és kisebb mértékben a szénhidrogének kitermelése miatt felgyorsuló lazaüledék-kompakció miatt észleljük (Debrecen: –7 mm/év). Mivel a „nulla emelkedés” kérdése értelmezési problémákat okoz (részletesen lásd GUBLER et al. 1992), a továbbiakban csak az egyes területeknek másokhoz képest értelmezett, relatív függőleges elmozdulását, illetve a számított ráták szignifikáns különbségeit vesszük figyelembe. Ennek megfelelően a Balaton környékén a fent említett néhány tizedmilliméter/év nagyságrend a jellemző.

A fentiekből következően a tó maximális vízszintjéhez tartozó tókiterjedés helyreállításakor nem lehet csak a mai felszínmagasságokat használni, és azokat változatlan formában a múltba vetíteni. Évi néhány tizedmilliméter pár ezer év alatt 1-3 méter magasságkülönbséget okoz, amely különösen akkor jelentős, ha vízszintes (és itt ez szó szerint értendő!) felszínnek kutatását végezzük (TIMÁR et al. 2006). Ebben a

munkában arra teszünk kísérletet, hogy a jelenlegi felszínmagasságokat a jelenlegi felszínmozgási ütem (1. ábra) időbeli állandóságát feltételezve rekonstruáljuk a LÓCZY-féle tavi üledékek elterjedéséhez tartozó vízszintértéket.

Adatok és módszerek

A vizsgálatba vonható domborzati modellek közül az SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*; WERNER 2001, FARR et al. 2007), a HM Térképészeti Hivatal által forgalmazott DDM-10 (MH-TÁTI 1992) és a Földmérési és Távérzékelési Intézet DDM-5 (WINKLER 2003, TIMÁR 2003) alkalmazását fontoltuk meg. Ezek közül az ingyenes hozzáférésű SRTM használatát a kisebb térbeli felbontása és magassági megbízhatósága miatt elvetettük.

A DDM-10 domborzati modell az 1:50 000 méretarányú katonai térképek 5 méteres alapszintvonalai és néhány felező ill. kisegítő szintvonal digitalizálásán alapul. Vízszintes felbontása 10 méter, a jelen munkában ehelyett 5 méteres felbontást használtunk. A közel sík területeken a felező szintvonalak alapján a vertikális pontosság 2 méter körüli.

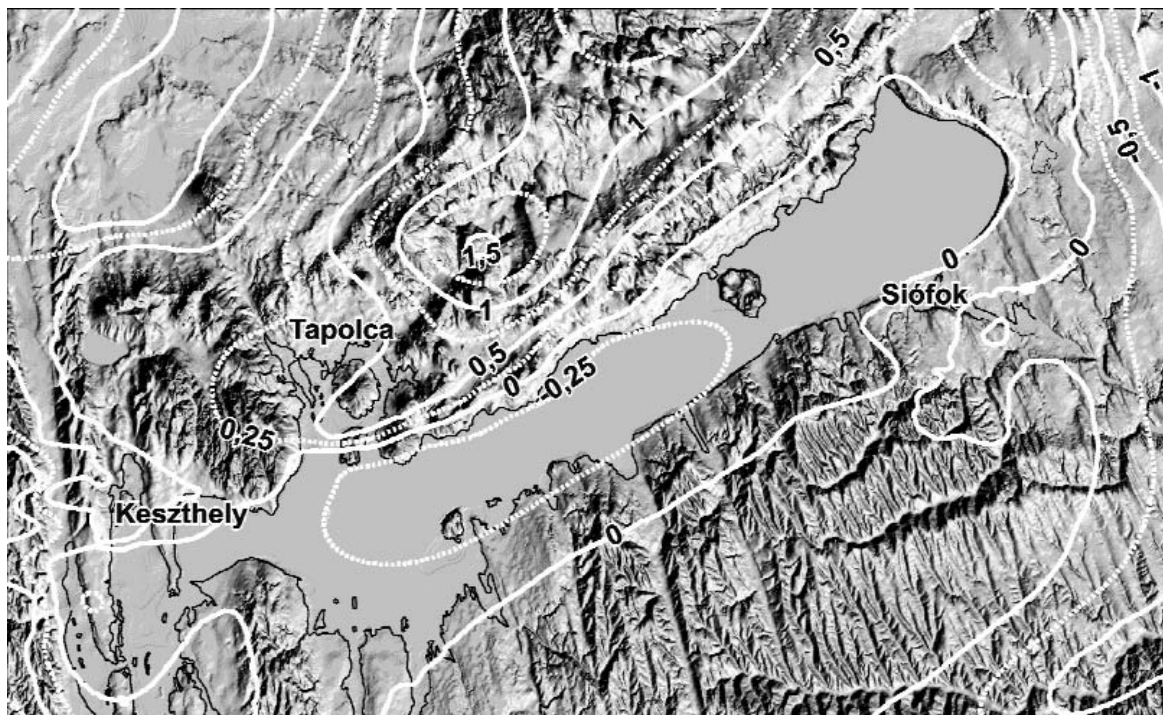
A DDM-5 adatbázis térképeinek (FÖMI 1:10 000 méretarányú topográfiai térképmű) alapszintköze a területet érintő szelvények nagy részén 5 méter, 2,5 méterenkénti felező, és 1,25 méter közötti kisegítő szintvonalakkal. Csak helyenként találkozunk egy méteres alap-

szintközzel. Vertikális pontossága 1 méter körüli. E modellt célzottan, a Tapolcai-öblözlet területén vontuk be a vizsgálatba.

A függőleges felszínmozgás vizsgálatához a JOÓ (1992, 1996, 1998) által közölt, a teljes Magyarországra megadott szintváltozási térkép szintvonalainak digitalizált változatát használtuk (1. ábra). A szintvonaladatokról készített rácshálót a domborzati modellhez hasonló, 50 méteres rácshálóban készítettük el. Az adatrendszer digitalizálásából eredő hibákat nehéz becsülni, a szerzők megítélése szerint a 0,25 mm/év és ezt meghaladó függőleges mozgássebességkülönbségek már szignifikánsak.

A vizsgálatot LÓCZY (1920) a Balaton környékét ábrázoló geológiai térképének bázisán végeztük el, melynek georeferálását TIMÁR et al. (2003) és GALAMBOS (2009) módszerével készítettük. A térképen körberajzoltuk a „Tavi alluvium, mocsárföld” felirattal jelölt területet a tómedencével összefüggő részeit úgy, hogy a turzások területét is a tóhoz rendeltük. A vizsgálatba bevontuk a MÁFI legújabb, 1:100 000 méretarányú geológiai térképművének a tapolcai öblözletet bemutató szelvényét (BUDAI & SCHAREK 2000) is; ezen a „tavi üledék” ($_{1b}Q_h$ földtani index), illetve részben a „mocsári üledék” ($_{6}Q_h$ földtani index) jelzik a Balaton korábbi elöntési területeit.

A vizsgálat szempontjából lényeges kérdés még, hogy a mikor volt maximális a Balaton vízfelülete. A rendelkezésre álló adatok, elsősorban BENEFY & NAGY (1969), ill. CSERNY (1993, 1997), továbbá SÜMEGI et al. (2008a, b) alap-



1. ábra. A Balaton térségének függőleges felszínmozgási rátája Joó (1992) szerint, mm/év egységben

Vékony fekete vonal jelöli a Balatonhoz kapcsolódó tavi és mocsári üledékek kiterjedését Lóczy (1920) szerint. Amennyiben ezt tekintjük a tó maximális kiterjedésének, észre kell vevnünk, hogy e területet érintő függőleges mozgások helyről helyre változnak, az eltérés a tó többi részétől különösen Tapolca térségében jelentős

Figure 1. The vertical movement of the surface after Joó (1992) in the Balaton area

The lacustrine and marsh sediments connected to the Lake Balaton (after Lóczy 1920) are outlined by black line. We interpret these regions as the maximum extents of the lake. It can be seen that this area is affected by different vertical movement from place to place. This difference, with respect to the main area of the former lake, is most considerable in the region of Tapolca

ján a maximális kiterjedés korát a jelenhez képest 9–11 ezer évvel ezelőtre tehetjük. A vizsgálatot a 0–15 000 év időszakra, ezer éves lépésközzel, vagyis minden ezredfordulóra végeztük el.

Az alkalmazott módszer a fenti adatok felhasználásával a következő. A Balaton térségének domborzati modelljét pixelenként módosítottuk a JOÓ-féle magasságváltozási ütem és a feltételezett maximális kiterjedési kor szorzatával:

$$H_{kor}(x,y) = H_{DTM}(x,y) - t_{max} \times v(x,y) \quad (1)$$

ahol $H_{kor}(x,y)$ a korrigált magasság az (x,y) koordinátájú pontban, $H_{DTM}(x,y)$ a domborzati modell szerinti magasság, t_{max} a maximális tókiterjedés becsült kora, $v(x,y)$ pedig a pixelre vonatkozó éves függőleges (emelkedés esetén pozitív) felszínmozgás sebessége. Az így korrigált magasságokra végeztük el az elöntési vizsgálatokat, a balti tengerszint feletti magasságokra vonatkoztatva.

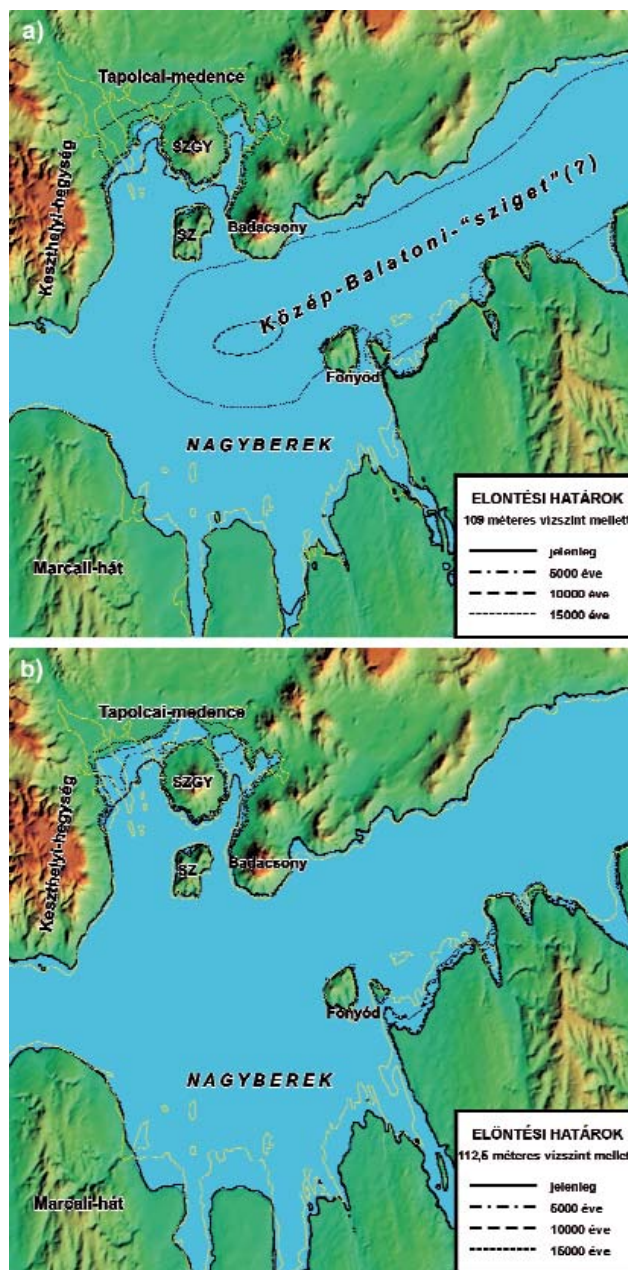
Az alkalmazott vizsgálati módszer a fentiek szerint geometriai: az eleve hibákkal terhelt domborzati modell és a függőleges felszínmozgás adatainak figyelembevételével kísérjük meg a legjobb illeszkedést elérni az elöntés és a LÓCZY-féle térképen a tóval kapcsolatba hozható üledékek kiterjedése között. A modellnek két paramétere van, amelynek a megbecslésére kísérletet teszünk: a maximális elöntés vízszintje és kora.

Eredmények

A fenti módszer által megadott eredményeket két térképen adjuk közre. A térképeken megjelöltük a LÓCZY (1920) által megrajzolt tavi és mocsári üledékek kiterjedését. Feltüntetettük az elöntés mértékét a LÓCZY (1913) által megadott 109 méteres (2. ábra, a), és a CSILLAG (1985) által használt 112,5 méteres (2. ábra, b) szinten, a kéregmozgások figyelembevételével 0, 5000, 10 000 és 15 000 évre visszakorrigált felszínmagasság-értékekkel.

Az eltérések a tó kerületének nagy részén nem jelentősek, azonban érdemi különbségeket tapasztalhatunk a Tapolcai-medencében, a Nagyberekben és Fonyód térségében, továbbá a Zala völgyének a Kis-Balaton feletti részén (2. ábra, a és b). Érdekes, hogy a JOÓ-féle adatbázis (JOÓ 1992) által a Balaton középvonalában megadott minimum-érték (a környezethez képest értelmezett gyors süllyedés) visszakorrigálása miatt az alacsonyabb elöntési szinten 10 és 15 ezer éves korrekció esetén sziget jelenik meg a tóban (ez a 2. ábra a részén feltüntetett „Közép-balatoni-sziget”). A szerzők ezen süllyedésiránta-minimum megbízhatóságát, mivel az kevés helyen érint partot, így a magassági alaphálózatnak csak kevés pontjához köthető, vitatják, e sziget(ek) létét nem látják bizonyítottnak.

A 3. ábrán bemutatjuk a nagy felbontású DDM-5 domborzati modell segítségével becsült elárasztás kiterjedését, összevetve a terület ma használt földtani térképével (BUDAI & SCHAREK 2000). Észrevehetjük, hogy a Szent György-hegy északnyugati és keleti peremét a domborzati modellből



2. ábra. A Balaton lehetséges kiterjedése (a) 109 méter (b) 112,5 méter tengerszint feletti vízszint mellett különböző időpontokban

A Balatonhoz kapcsolódó tavi és mocsári üledékek kiterjedését a sárga vonallal körülvett terület jelzi. Figyeljük meg, hogy a déli part mentén a korabeli lehetséges partvonalak futása a 109 méteres vízszintre utal, emellett a legjobb illeszkedést a 10 ezer évvel ezelőtti korhoz tartozó vonal adja (SZGY=Szent György-hegy; SZ=Szigliget; a „Közép-balatoni-sziget” magyarázatát lásd a szövegben)

Figure 2. The outline of the possible extents of the Lake Balaton with the water level of (a) 109 meters (b) 112.5 meters above sea level, at different ages

Yellow line represents the limit of the lacustrine and marsh sediments connected to the Lake Balaton. Note that the southern palaeo-coastlines allows the water level only at 109 metres and the most fitting coast-age occurs at 10,000 years before present (SZGY= Szent György Hill SZ=Szigliget; "Közép-balatoni-sziget"="Mid-Balaton island"; an artefact resulted by the geometric approach of the study)

a felszínmozgás sebességével korrigált elöntés meglepően jó egyezést mutat a tavi üledékek, illetve a legkeletebbi melléköblözet mentén a mocsári üledékek térképezett kiterjedésével.



3. ábra. A tapolcai öblözet elöntési modellje a nagyfelbontású DDM-5 domborzati modell és a felszínmozgás alkalmazásával, a MÁFI 1:100 000 méretarányú térképszelvényére (BUDAI & SCHAREK 2000) vetítve

Sötétkék régió: elöntés a mai domborzat szerint (felszínmozgási korrekció nélkül), 109 méteres tengerszint feletti magasságú vízszint esetén. Halványkék régió: 109 méteres tengerszint feletti magasságú elöntés a felszínmozgások 10 ezer éves extrapolációjával

Figure 3. Inundation model of the Tapolca embayment using the high resolution DDM-5 elevation model and the vertical crustal movements, projected to the 1:100,000 scale geological map of BUDAI & SCHAREK (2000)

Dark blue hue shows the inundation according to the static fill to the level at 109 metres a. s. l. Light blue hue indicates the inundation according to the water level at 109 metres a. s. l. corrected by the vertical crustal movement extrapolation with the range of 10,000 years

Diszkusszió

A legfontosabb észrevétel az eredményképekkel kapcsolatban az, hogy a jelenkori felszínmozgások korrekciójával előállított elöntési kép lényegesen pontosabban adja vissza a LÓCZY-féle tavi és mocsári üledékek elterjedését, mint a korábban alkalmazott egyszerű, csak a mai felszínmagasságokon alapuló elöntési modellek. A megjelenő szigetek (Tihany, Fonyód, Szigliget, részben a Szent György-hegy) egy része a történelmi időkben is sziget volt, ahogy ezt az elmúlt évszázadok térképei és leírásai mutatják (IRMÉDI-MOLNÁR 1958, 1964; HRENKÓ 1979; PLIHÁL 2003; CSONGRÁDI & SÍKHEGYI 2005; MÉSZÁROS 2005; BREZSNYÁNSZKY & SÍKHEGYI 2007; SZÉKELY et al. 2009). A korrekciós hatás természetesen elsősorban a tó középvonalától messze kiugró területeken, így a Szent György-hegy térségében és a Nagyberek déli öbleiben jelentkezik. Érdekes illeszkedési helyszín még a Fonyódi-hegytől délkeletre húzódó korábbi partvonal. Meg kell jegyeznünk, hogy Tihany, Szigliget és Fonyód szigetjelleget az egyszerű elöntési modellek is megvalósítják, a Szent György-hegyét azonban még részlegesen sem.

A 2. ábra a és b része alapján megállapíthatjuk, hogy a Tapolcai-medencében a tavi és mocsári üledékek paleovízborítottságát a magasabb elárasztási szint és a korai (15 ezer évvel ezelőtti) időpont adja vissza legjobban. A

nagyberek és a Fonyód-környéki partvonalak futása mindazonáltal e lehetőséget kizárja. A déli part e kritikus szakaszain csak a 109 méteres elárasztás, illetve a 10 ezer éves, vagy ennél valamivel idősebb kor választása esetén kapunk elfogadható egyezést. Ez az eredmény a tapolcai paleo-partvonal lefutását is elfogadhatóan biztosítja, figyelembe véve a térséget érintő, és alább részletesebben is említett szárazföldi szedimentációs folyamatokat.

Az elért illeszkedés mindazonáltal nem teljesen pontos. Ennek többféle oka lehet:

- Az alkalmazott domborzati modell vertikális pontosságát az illeszkedés jóságát eleve korlátozza.

- Az alkalmazott felszínmozgási adatsor pontossága korlátozott.

- Az alkalmazott módszer nem veszi figyelembe a maximális vízszinttel jellemzett időszakot követő szárazföldi üledékfelhalmozódást és eróziót.

- A függőleges felszínmozgások a valóságban nem lineáris (nem állandó) jellegűek, mértékük helyről helyre és időben is változik.

- A kérdéses képződmények nem feltétlenül egykorúak.

A fenti faktorok közül a legutóbbi okozhatja a legnagyobb — adott esetben szisztematikus hibát is hordozó — eltérést. A lokális hatások között érdemes megfontolni, hogy a szárazföldi üledékfelhalmozódás a Tapolcai-medence területén jól nyomon követhető (BUDAI et al. 1999a, b). A felső-pleisztocén–holocén képződmények részben valamilyen kiemelkednek, terasz helyzetben települnek a völgyekben, mint folyóvízi–proluviális kavics, homok, részben belesimulnak a tavi üledékek térszínébe. Ez utóbbi jellemző példája a tó második legfontosabb tápláló vízfolyása, az Eger-víz hordalékkúpja, ami szinte összeolvad az egykori Balaton peremi, mocsári képződményekkel. Az 1:50 000-es földtani térkép összevonva folyóvízi–mocsári képződményt jelöl a völgy előtti területen (BUDAI et al. 1999a). Az Eger-víz korabeli torkolatánál fellépő üledékfelhalmozódás alapvetően befolyásolja, hogy a Szent György-hegy szigetként vagy félszigetként rekonstruálható a bemutatott eljárással. A felső-pleisztocén–holocén proluviális összletek a Tapolcai-medence peremén 115–120 méteren fekvő felszínre települtek a medence Ny-i részén Lesencetomaj és Törekpuszta között, valamint a Tapolcai-medence északi peremén, Tapolcától Ny-ra (BUDAI et al. 1999a). Részletes vizsgálatok hiányában ezek pontos kora nem ismert, de nem zárható ki, hogy a legidősebb tavi szintekhez kapcsolódó heteropikus fáciesek. Az északi peremen kialakult hordalékkúp dél felé egy fiatalabb, a térkép szerint holocén hordalékkúppal érintkezik, amit a mocsári–tavi környezetű, holocén balatoni üledékek határolnak már dél felől.

Rekonstrukciónkkal szemben leggyakrabban megfogalmazott kritika az ismételt szintezésekből származtatható vertikális mozgási ráták viszonylag nagy bizonytalansága. Ezt részben elismerve ugyanakkor érdemes megjegyezni, hogy a Balaton térsége neotektonikai szempontból kifejezetten aktív, és az eltérések részben éppen az emiatt fellépő, a geodéziai adatok által szolgáltatott trendhez képest is

helyről helyre változó vertikális mozgásokra utalnak. Nagyobb bázisvonal mentén, nevezetesen a két part közötti távon származtatható rátabeli eltérés véleményünk szerint mindenképpen szignifikáns. Pillanatnyilag jobb becslést nem lehet erre adni, a felszínmozgási adatok pontossága akkor lesz majd növelhető, ha megvalósul az ország újabb, legalább elsőrendű magassági felmérése. Ebben az esetben a mérési pontokon nemcsak kettő, de három időpontban mért, azonos alapszintre vonatkoztatott magassági adattal fogunk rendelkezni. Az eredményeket, különösen a maximális elöntés korát mindenképp érdemes egybevetni KÁZMÉR et al. (2005) dendrokronológiai, illetve SÜMEGI et al. (2008b) fűrasmintákból vett szemcseméret-, pollen- és mollusca-elemzési eredményeivel a Balatontól keletre elterülő fiatal süllyedék, a Sárrét területéről.

A legújabb, előntéseket előrejelző hidrológiai modellek (DI BALDASSARRE et al. 2009) bizonytalanságokat is tartalmazó bemenő adatok esetén az előntésnek nem a lehatárolását, hanem annak pixelenkénti valószínűségét adják meg. Esetünkben e módszer alkalmazása a jövőben mindenképpen javasolt, hiszen — amint azt korábban leírtuk — mind a domborzati modellek, de különösen a vertikális felszínmozgásokra vonatkozó adatok megbízhatósága erősen korlátozott.

Összességében meg kell állapítanunk, hogy a vázolt módszer és az abból származó eredmények valójában egy helyről-helyre és időben is változó függvénynek, a vertikális felszínmozgásnak a mai — részben bizonytalan — adatok alapján történő lineáris extrapolációja alapján tett becslésével készültek. Ez nyilván pontatlanságot fog eredményezni — de ez még mindig kisebb mértékű annál, mintha a vertikális felszínmozgást teljesen figyelmen kívül hagynánk.

Következtetések

A domborzati adatoknak a jelenlegi függőleges felszínmozgás adataival korrigált változatán elvégzett előntési

modellek eredményeként az alábbi következtetésekre jutottunk:

— Feltéve, hogy az említett üledékek lényegében egykorúak, a Balaton a maximális vízszintjét (amely a LÓCZY-féle térképen tavi és mocsári üledékekkel jelölt, a tóval határos területeket öntötte el) mintegy 10 ezer évvel ezelőtt érte el; ez megfelel SÜMEGI et al. (2008) adatainak.

— Ebben az időszakban a Balaton vízszintje a mai felett mintegy 4–5 méterrel, valamivel a Balti-tenger feletti 109 méteres szint felett volt; ez megfelel LÓCZY (1913) következtetésének.

— A Dunántúli-középhegység peremén, a Tapolcai-medencében a mai kiemelkedési sebesség (0,25–0,5 mm/év) jó átlagértéknek tekinthető az utóbbi 10 ezer évre vonatkozóan. Az alkalmazott geometriai modell szerint mindkét adat alsó becslés; a maximális elöntés kora a 10 ezer évet, az előntési magasság pedig a 109 métert kismértékben meghaladhatja.

Mivel mind az alkalmazott domborzati modellek, mind pedig a felszínmozgási adatok pontatlansággal, ill. bizonytalansággal terheltek, vizsgálatainkat a DI BALDASSARRE et al. (2009) által bevezetett valószínűségi előntéstérképek előállításával tervezzük folytatni.

Köszönetnyilvánítás

A projekt az Európai Unió támogatásával és az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósul meg, a támogatási szerződés száma TÁMOP 4.2.1./B-09/KMR-2010-0003. A cikkben bemutatott eredmények részben a T47104 számú OTKA pályázat keretében jöttek létre. SZÉKELY Balázs a projekt elején Békésy György poszt-doktori ösztöndíjasként vett részt a kutatásokban. A szerzők ezúton fejezik ki hálájukat néhai JOÓ István professzor iránt, aki elérhetővé tette a függőleges felszínmozgások adatbázisát.

Irodalom — References

- BATES, P. D. & DE ROO, A. P. J. 2000: A simple raster-based model for flood inundation simulation. — *Journal of Hydrology* **236/1–2**, 54–77.
- BENDEFY L. 1958: *Szintezési munkálatok Magyarországon*. — Akadémiai Kiadó, Budapest, 736 p.
- BENDEFY L. & NAGY I. 1969: *A Balaton évszázados partvonalváltozásai*. — Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 154 p.
- BOROS J., CSERNY T. & CSILLAG G. 1980: Magyarázó a Balaton környékének építésföldtani térképsorozathoz. M=1:20 000. — Kézirat, Magyar Állami Földtani, Bányászati és Geofizikai Adattár, Budapest.
- BOROS J., CSERNY T., CSILLAG G. & KURIMAY Á. 1982: Magyarázó a Balaton környékének építésföldtani térképsorozathoz. M=1:50 000. — Kézirat, Magyar Állami Földtani, Bányászati és Geofizikai Adattár, Budapest.
- BOROS J. & CSERNY T. 1983: A Balaton-környék negyedidőszaki képződményeinek építésföldtani jellemzése. — *Építőanyag* **35/4**, 146–152.
- BRADÁK, B. 2007: Őskörnyezet-rekonstrukció Vörs, Máriasszonsziget régészeti lelőhely környezetében — Szedimentológiai és paleotalajtani megközelítés. — *Archeometriai Műhely* 2007/1, 67–76.
- BREZSNYÁNSZKY, K. & SÍKHEGYI, F. 2007: Das Ungarische Geologische Institut, eine herausragende Werkstatt der thematischen Kartographie. — *Nova Acta Leopoldina NF* **94**, 49–69.
- BUDAI T., CSILLAG G., DUDKO A. & KOLOSZÁR L. 1999a: A Balaton-felvidék földtani térképe, M=1:50 000. — MÁFI kiadvány, Budapest.

- BUDAI T. & CSILLAG G. (szerk.) 1999b: A Balaton-felvidék földtana. Magyarázó a Balaton-felvidék 1:50 000-es földtani térképéhez. — MÁFI alkalmi kiadvány, **197**, 257 p.
- BUDAI T. & SCHAREK P. 2000: Magyarország Földtani Térképsorozata. M=1:100 000. — Keszthely. — Magyar Állami Földtani Intézet, Budapest.
- CSERNY, T. 1993: Lake Balaton, Hungary. — In: GIERLOWSKI-KORDESCH, E. H. & KELTS, K. R. (eds): A Global Geological Record of Lake Basins, Cambridge University Press, 397–401.
- CSERNY, T. 1997: Environmental geological research in the Lake Balaton region. — *Zeitschrift für Geomorphologie N.F.* Suppl.-Vol. **110**, 137–144.
- CSERNY, T. & NAGY-BODOR, E. 2000: Limnogeology of Lake Balaton, Hungary. — In: GIERLOWSKI-KORDESCH, E. H. & KELTS, K. R. (eds): Lake basins through space and time. *AAPG Studies in Geology* **46**, 605–618.
- CSERNY T., HÍDVÉGI M. & TULLNER T. 1997: A Balaton partvidékének környezetföldtana. — CD-lemez, Országos Földtani Szakkönyvtár, L.sz.: K36/1–6.
- CSILLAG, G. 1985: 2. Geomorphological map. — In: BOROS, J., CSERNY, T., CSILLAG, G. & KURIMAY, Á. (eds): Engineering geological map series of the environs of Lake Balaton, scale 1:50 000, MÁFI, Budapest.
- CSONGRÁDI J.-NÉ. & SÍKHEGYI F. 2005: Fonyód és környéke térképeken. — Magyar Állami Földtani Intézet, Budapest, 28 p.
- DI BALDASSARRE, G., SCHUMANN, G. & BATES, P. D. 2009: A technique for the calibration of hydraulic models using uncertain satellite observations of flood extent. — *Journal of Hydrology* **367**, 276–282.
- FARR, T. G., ROSEN, P. A., CARO, E., CRIPPEN, R., DUREN, R., HENSLEY, S., KOBRICK, M., PALLER, M., RODRIGUEZ, E., ROTH, L., SEAL, D., SHAFFER, S., SHIMADA, J., UMLAND, J., WERNER, M., OSKIN, M., BURBANK, D. & ALSDORF, D. 2007: The Shuttle Radar Topography Mission. — *Reviews of Geophysics* **45**, RG2004, doi:10.1029/2005RG000183.
- FODOR, L., BADA, G., CSILLAG, G., HORVÁTH, E., RUSZKICZAY-RÜDIGER, ZS., PALOTÁS, K., SÍKHEGYI, F., TIMÁR, G., CLOETINGH, S. & HORVÁTH, F. 2005: An outline of neotectonic structures and morphotectonics of the western and central Pannonian basin. — *Tectonophysics* **410**, 15–41.
- FRANYÓ F. 1992: Magyarország negyedidőszaki üledékeinek vastagságtérképe. M=1:500 000. — MÁFI kiadvány, Budapest.
- GALAMBOS, Cs. 2009: Development of color signs and projections of the Hungarian archive geological maps. — *Acta Geodaetica et Geophysica Hungarica* **44/1**, 131–140.
- GALAMBOS Cs., TIMÁR G. & SZÉKELY B. 2009: GPS-navigáció történeti és modern földtani térképeken. — *Földtani Közlöny* **139/1**, 93–100.
- GUBLER, E., ARCA, S., KAKKURI, J. & ZIPPELT, K. 1992: Recent vertical movement data (Germany and Switzerland). — In: BLUNDELL, D., FREEMAN, R. & MUELLER, ST. (eds): *A continent revealed: The European Geotraverse Database*. Cambridge University Press, Cambridge, 275 p.
- HALMAI, R. 1982: Orography and hydrography on Lazarus maps. — In: STEGENA, L. (ed.): *Lazarus Secretarius — The first Hungarian mapmaker and his work*. Akadémiai Kiadó, Budapest, 84–86.
- HORVÁTH, F. 1995: Phases of compression during the evolution of the Pannonian basin and their bearing on hydrocarbon exploration. — *Marine and Petroleum Geology* **12/8**, 837–844.
- HORVÁTH, F. & CLOETINGH, S. 1996: Stress-induced late stage subsidence anomalies in the Pannonian basin. — *Tectonophysics* **266**, 287–300.
- HRENKÓ P. 1979: Válogatás a Balatonkörnyék régi térképi ábrázolásából. — *Veszprém Megyei Múzeumok Közleményei* **14**, 245–260.
- IRMÉDI-MOLNÁR L. 1958: Lázár deák és térképe. — *Geodézia és Kartográfia* **10/3**, 177–179.
- IRMÉDI-MOLNÁR, L. 1964: The earliest known map of Hungary from 1528. — *Imago Mundi, A Review of Early Cartography* **18**, 53–59.
- JOÓ, I. 1992: Recent vertical surface movements in the Carpathian Basin. — *Tectonophysics* **202**, 129–134.
- JOÓ I. 1996: A földfelszín magassági irányú mozgásai Magyarországon. — *Geodézia és Kartográfia* **48/4**, 6–12.
- JOÓ I. 1998: Magyarország függőleges irányú mozgásai. — *Geodézia és Kartográfia* **50/9**, 3–9.
- KARÁTSON, D., NÉMETH, K., SZÉKELY, B., RUSZKICZAY-RÜDIGER, ZS. & PÉCSKAY, Z. 2006: Incision of a river curvature due to exhumed Miocene volcanic landforms: Danube Bend, Hungary. — *International Journal of Earth Sciences* **95/5**, 929–944.
- KARÁTSON D., RUSZKICZAY-RÜDIGER ZS. & SZÉKELY B. 2007: Miért kanyar alakú? A Dunakanyar kialakulása az évmilliók vulkáni formák és az évszázadzredes folyóvízi erózió tükrében. — *Földrajzi Közlemények* **55/4**, 289–302.
- KÁZMÉR, M., MIKES, T., BENKÓ, ZS., KOVÁCS, I., POCSAI, T., PROHÁSZKA, A., KROLOPP, E., FEKETE, N., TIMÁR, G. & SZÉKELY, B. 2005: Small-scale Quaternary flexural basins in the Carpathian-Pannonian system: the Transdanubian Sárret Basin as an example. — *Geophysical Research Abstracts* **7**, 09450.
- KOÓS Á. 1996: *Digitális terepmodellek a vezeték nélküli összeköttetések tervezésében — PKI 1972–1994*. — Távközlési Könyvkiadó, Budapest, 105 p.
- LÁSZLÓ G. 1913: A balatonmelléki tőzeg-lápok és berkek. — In: LÓCZY L. (szerk.): *A Balaton tudományos tanulmányozásának eredményei*. I. kötet, I. rész, I. szakasz. — Magyar Földrajzi Társaság Balaton-Bizottsága, Budapest, 567–577.
- LÓCZY L. 1913: A Balaton környékének geológiai képződményei és ezeknek vidékek szerinti telepedése. — In: LÓCZY L. (szerk.): *A Balaton tudományos tanulmányozásának eredményei*. I. kötet, I. rész, I. szakasz — Magyar Földrajzi Társaság Balaton-Bizottsága, Budapest, 617 p.
- LÓCZY L. 1920: A Balaton-tó környékének részletes geológiai térképe. M=1:75 000. — Magyar Földrajzi Társaság Balaton-Bizottsága, Budapest, 4 szelvény.
- MÉSZÁROS O. 2005: Szigliget várának története a középkorban. — *FONS* **12/3**, 299–377.
- MH-TÁTI (Magyar Honvédség Tóth Ágoston Térképészeti Intézete) 1992: DDM-10 — A Magyar Köztársaság 10 méter vízszintes felbontású digitális domborzati modellje.

- NAGY-BODOR E. & CSERNY T. 1998: A balatoni öblök vízborítottságának fejlődéstörténete a palynológiai vizsgálatok eredményei alapján. — *Hidrológiai Közlemény* **78/5–6**, 360–363.
- PÉCH J. & ERDŐS F. 1898: A Balaton Vízrajzi fölvétele. — *Vízrajzi Évkönyv* **8**, 86–94.
- PLIHÁL K. 2003: *A Tabula Hungariae és változatai*. — Cartofil, Budapest, 31 p.
- RÓNAI, A. 1969: The geology of Lake Balaton and surroundings. — *Mitt. Internat. Verein Limnol. [Stuttgart]* **17**, 275–281.
- RUSZKICZAY-RÜDIGER, ZS., FODOR, L., BADA, G., LEÉL-ŐSSY, SZ., HORVÁTH, E. & DUNAI T. 2005a: Quantification of Quaternary vertical movements in the central Pannonian Basin: a review of chronological data along the Danube river, Hungary. — *Tectonophysics* **410**, 157–172.
- RUSZKICZAY-RÜDIGER, ZS., DUNAI, T., BADA, G., FODOR, L. & HORVÁTH, E. 2005b: Middle to Late Pleistocene uplift rate of the Hungarian Mountain Range at the Danube Bend (Pannonian Basin) using in situ produced ^3He . — *Tectonophysics* **410**, 173–187.
- SACCHI, M. & HORVÁTH, F. 2002: Towards a new time scale for the Upper Miocene continental series of the Pannonian basin (Central Paratethys). — *Stephan Mueller Spec. Publ. Ser.* **3**, 79–94.
- SACCHI, M., TONELLI, R., CSERNY, T., DÖVÉNYI, P., HORVÁTH, F., MAGYARI, O., MCGEE, TH. & MIRABILE, L. 1998: Seismic stratigraphy of the Late Miocene sequence beneath Lake Balaton, Pannonian basin, Hungary. — *Acta Geologica Hungarica* **41**, 63–88.
- SASS J. 1979: A Balaton vízrajzi felmérése. — *Vízügyi Közlemények* **4**, 560–581.
- SÍKHEGYI, F. 2002: Active structural evolution of the western and central parts of the Pannonian basin: a geomorphological approach. — *Stephan Mueller Special Publication Series* **3**, 203–216.
- SÜMEGI P., BODOR E., JUHÁSZ I., HUNYADFALVI Z., HERBICH K., MOLNÁR S. & TIMÁR G. 2004: A Balaton déli partján feltárt régészeti lelőhelyek környezettörténeti feldolgozása. *MŰMOÓ III.*, “Halottkultusz és temetkezés”. — *Őskoros Kutatók III. Összejövetelének konferenciakötete*, 399–420.
- SÜMEGI, P., GULYÁS, S. & JAKAB, G. 2008a: Holocene paleoclimatic and paleohydrological changes in Lake Balaton as inferred from a complex quantitative environmental historical study of a lacustrine sequence of the Szigliget embayment. — *Documenta Praehistorica* **35**, 33–43.
- SÜMEGI, P., GULYÁS, S. & PERSAITS, G. 2008b: Holocene paleoclimatic and paleohydrological changes in the Sárrét basin, NW Hungary. — *Documenta Praehistorica* **35**, 25–31.
- SZÉKELY, B. & MOLNÁR, G. 2008: Do the post-Miocene volcanic features really mark a single paleoaltitude in the Transdanubian Range (Pannonian basin)? — *Geophysical Research Abstracts* **10**, 11566.
- SZÉKELY B., MOLNÁR G. & TIMÁR G. 2009: Lázár deák és a folyódinamika — térképezési hibák vagy valós mederváltozás? — In: KÁZMÉR M. (szerk.): *Környezettörténet — Az utóbbi 500 év környezeti eseményei történeti és természettudományi források tükrében*. Hantken Kiadó, Budapest, 75–98.
- TIMÁR G. 2003: Az Alföld nagyfelbontású digitális domborzati modellje. — *Geodézia és Kartográfia* **55/4**, 19–23.
- TIMÁR G., MOLNÁR G. & MÁRTA G. 2003: A budapesti sztereografikus, ill. a régi magyarországi hengervetületek és geodéziai dátumaik paraméterezése a térinformatikai gyakorlat számára. — *Geodézia és Kartográfia* **55/3**, 16–21.
- TIMÁR, G., SZÉKELY, B. & MOLNÁR, G. 2006: Estimation of the maximum Holocene water level of the Lake Balaton (Hungary) based on geomorphic maps and geodetic uplift rate indicators. — *Geophysical Research Abstracts* **8**, 04495.
- WERNER, M. 2001: Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), Mission overview. — *Journal of Communication (Frequenz)* **55**, 75–79.
- WINKLER P. 2003: Magyarország digitális ortofotó programja (MADOP) és nagyfelbontású digitális domborzati modell (DDM) az ország teljes területére. — *Geodézia és Kartográfia* **55/12**, 3–10.
- ZLINSZKY, A. & MOLNÁR, G. 2009: Georeferencing the first bathymetric maps of Lake Balaton, Hungary. — *Acta Geodaetica et Geophysica Hungarica* **44/1**, 79–94.

Kézirat beérkezett: 2010. 03. 30.