

A Balaton vízmélységének és tavi üledékvastagságának térképezése vízi szeizmikus szelvények alapján

ZLINSZKY András¹, MOLNÁR Gábor^{2,3}, SZÉKELY Balázs^{2,3}

¹ MTA Balatoni Limnológiai Kutatóintézet,

² Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, Technische Universität Wien, 1040 Wien, Gußhausstr. 27–29, Ausztria

³ ELTE Geofizikai és Űrtudományi Tanszék, 1117 Budapest, Pázmány Péter sétány 1/c

Mapping bathymetry and thickness of lacustrine deposits of Lake Balaton (Hungary), using lake seismic profiles

Abstract

Previous research of the geological evolution of Lake Balaton (Hungary) has been based on sporadic borehole data, evaluation of the topography of the surrounding regions, and water seismic data characterized by low horizontal resolution. The lake bed itself has been surveyed four times at regular intervals since 1895, but the latest complete survey was carried out in 1975 using the echosounding and optical geodetic methods of the time.

In the framework of the cooperative efforts of the Eötvös Loránd University and Geomega Ltd, high resolution lake-seismic surveys were carried out on the Eastern Basin of the lake between 1997 and 2007. These provided precise and valuable data on the Pannonian strata overlain by Holocene sediments. The ultra-high resolution dataset made possible the determination of the water depth and the thickness of lacustrine sediments on a decimetre scale. A new digital elevation model of the lake bed was created for the Eastern embayment of the lake, together with the mapping of the Holocene sediment thickness and the erosion surface underneath. The calculated digital elevation model of the lake bed was compared to a model interpolated from the 1975 survey and thus the sedimentation rate could be calculated for the last 30 years. Although these surveys carry several possible sources of error, the calculated average deposition rate is in the same order of magnitude as the results acquired by previous authors using other methods. The present study also demonstrates that there are considerable differences in the sedimentation pattern and the differences show similarities with the topography of the discordance surface underlying the Holocene lacustrine sediment. The discordance surface separating the Pannonian and other pre-Holocene strata from the overlying Holocene lacustrine sediment shows a row of elevated features along the axis of the lake; these features have low slope angles towards the south and are relatively steep on their northern side. The line of this northern slope breaks in several places. There are no elements on the discordance surface surveyed which are similar to the meridional valleys of the areas to the south of the lake. The 30-year-scale lake bed changes, and the discordance surface of the lacustrine sediments and Pannonian strata also exhibit similarities with the characteristic directions of the surrounding topography. Thus they can partly be correlated with the previously documented neotectonic movements.

Keywords: Balaton, water seismic measurements, sediment thickness, neotectonics

Összefoglalás

A Balaton kialakulásának és geológiájának kutatását az eddigi munkák során szórványos fúrási adatokra, a környék domborzatának vizsgálatára és alacsony felbontású vízi szeizmikus mérésekre alapozták. Magát a medret 1895 óta négy alkalommal mérték fel teljesen, a legutóbbi mederfelmérés 1975-ben történt ultrahangos szonárral és optikai geodéziai módszerekkel.

Az ELTE és a Geomega Kft. együttműködésében 1997 és 2007 között nagyfelbontású szeizmikus méréseket végeztek a Balatonon, amelyek adatokat szolgáltatottak a holocén üledék alatti pannóniai rétegekről. Az ultranagy felbontású szeizmikus adatok alapján a vízmélység és a tavi üledék vastagsága deciméteres pontossággal meghatározható. A szeizmikus adatok alapján a Balaton keleti medencéjére egy új digitális medermodellt állítottunk elő, és feltérképeztük a holocén tavi üledék vastagságát valamint az alatta levő eróziós felszín topográfiáját. A kapott medermodellt összevetettük az 1975-ös mederfelmérés adataiból számított digitális domborzati modellel, és adatokat nyertünk az üledék-felhalmozódás intenzitásáról az utóbbi 30 évben. Bár ez a két adatrendszer különbségei miatt számos hibalehetőséggel terhelt, a számított átlagos üledékképződési ráta nagyságrendileg egybeesik a korábbi szerzők más módon nyert

eredményeivel. Vizsgálataink azt mutatják, hogy a tényleges ráta ettől az átlagértéktől egy határozott térbeli mintázatot követve helyenként lényegesen eltér. A holocén üledék és az ezek fekvését adó elsősorban pannóniai rétegek közötti diszkordanciafelszín vízközépen, a tó hossz tengelye mentén rendeződött magaslatok sorát mutatja, amelyek dél felé enyhén lejtnek egy ívelt völgy felé, az északi oldaluk viszont meglehetősen meredek, és vonala több helyen megtörik. A Siófoki-medencétől délre fekvő területekre jellemző meridionális völgyekhez hasonlóan azonban nem mutat az általunk felmért terület. A meder magasságának 30 év alatt bekövetkezett változásai, illetve a tavi üledék és a pannóniai rétegek közötti diszkordanciafelszín topográfiája rokonságot mutat egymással és a Balaton körüli felszínformák jellemző irányával, és részben megfeleltethető a tó területén korábban leírt neotektonikai mozgásoknak.

Tárgyszavak: Balaton, vízi szeizmika, iszapvastagság, neotektonika

Bevezetés

A Balaton vízmélységi és tavi üledékvastagsági térképezése több célt is szolgált egyszerre. A tóban zajló üledékfelhalmozódás mértéke és területi eloszlása régóta kutatott téma, a feliszapolódás problémája iránt nagy érdeklődés mutatkozik a nagyközönség részéről is. Mivel azonban a Balaton egy tektonikailag meglehetősen aktív és részleteiben nem teljesen ismert geodinamikájú területen fekszik, a tómeder geomorfológiai viszonyainak vizsgálatától szélesebb körű következtetéseket is várhatunk.

A tómeder első teljes térképezését az akkori Földművelésügyi Minisztérium (FM) vízrajzi osztálya végezte (PÉCH & ERDŐS 1898). Ennek a felmérésnek a célja elsősorban a tó térfogatának minél pontosabb megismerése volt a vízszint biztonságos szabályozása érdekében. A felmérést „szondázó rúddal és alattsággal” (vizesen sem nyúló kötéllel) végezték mintegy 2884 pontban, és megkísérelték az iszapvastagságot is felmérni oly módon, hogy a mélység megmérése után a szondázó rúd hegyét az iszapba nyomták. A tó mélységi viszonyairól 1:75 000-es, egy méteres alapszintközű térkép készült, ugyanakkor az iszapvastagságról tudomásunk szerint nem készült térkép, vélhetően a felmérés megbízhatatlan volta miatt. A későbbi mederfelmérések céljai között már szerepelt, hogy a tó feliszapolódásának a mértékét meghatározzák.

A FM Vízrajzi Intézet 1929–30-ban hasonló módszerekkel megismételte a térképezést, ez azonban az előzőnél megbízhatatlanabb a helymeghatározás pontatlansága miatt. 1955-ben a Vituki mérte fel a Balaton medrét, ekkor már ultrahangos mélységmérővel. A mérés eredményeit 1:25 000 léptékű térképen ábrázolták (VIRÁG 1998). A Balaton legutóbbi mederfelmérését 1975-ben, szintén a Vituki végezte, a tó tengelyére merőleges 77 szelvény és kb. 200, a partközélemben felvett csonkaszelvény mentén (SASS 1979). A felmérés eredményeit szintén 1:25 000 léptékben, 0,5 méteres alapszintközű térképlapokon ábrázolták (BALÓ 1975). A tavi iszap vastagságáról sokáig csak néhány, a part közelében felvett fúrás adatai álltak rendelkezésre (LÓCZY 1913), hiszen a tavon és a tó környékén készült üledékkutató fúrások nem feltétlenül érték el az iszap alsó szintjét (BUCZKO et al. 2009). A tó üledékéről az első szeizmikus felmérést CSERNY Tibor vezetésével a MÁFI végezte 1981-től. Az erről készült jelentés egyben áttekinti a tó területén korábban végzett fúrásokat is (CSERNY 1987). Összesen 33 fúrás és 370 km hosszúságú vízi szeizmikus szelvény alapján megszerkesztették a Balaton első iszapvastagság térképét. A kubai–magyar együttműködésben végzett nagyszabású

munkálatok eredményeként elsőnek közöltek adatokat a tavi üledék fekvésének morfológiájáról, és a szeizmikus és fúrási adatok együttes kiértékelése alapján a Balaton keletkezéséről egységes elméletet alkottak (CSERNY & NAGYBODOR 2000). A vízi szeizmikus szelvények digitalizálása és újraértékelése pontosította az ebből levont következtetéseket (CSERNY & PRÓNAY 2004).

Mindezek a felmérések az adott kor technikai színvonalán készültek és a Balaton kutatásának, így jelen munkának is fontos alapadatait jelentik. A szeizmikus térképezés negyedszázada, a mederfelmérés három évtizeddel ezelőtt történt, azóta pedig mind a szeizmikus adatgyűjtés és feldolgozás, mind pedig a geodézia ugrásszerű fejlődésen ment keresztül, a térinformatika elterjedése pedig gyorsabb és pontosabb adatfeldolgozást tesz lehetővé. Nyilvánvaló tehát, hogy a Balaton vízmélységének és iszapvastagságának egy újabb, a teljes tóra kiterjedő felmérése időszerű lenne.

Az ELTE Geofizikai Tanszéke a Geomega Kft.-vel együttműködve nagy- és ultranagy felbontású vízi szeizmikus méréseket végzett a tavon az utóbbi másfél évtizedben. A vizsgálatok különösen intenzív szakaszba kerültek az *Integrált kutató módszer kifejlesztése negyedidőszaki környezeti állapotok geofizikai vizsgálatára* című OTKA-projekt 2003-ban történt megindulásával. A felvételezés célja legfőképpen a Siófoki-medence alatti pannóniai korú rétegek térképezése volt, de a minden eddiginél sűrűbb mérési hálózat és a pontos műholdas helymeghatározás miatt az adatok felhasználhatóak a tómeder és a holocén üledékvastagság térképezésére is. A szeizmikus mérések ilyen célú értelmezésével a Siófoki-medence felmért területeire aktuális és pontos vízmélység és iszapvastagság térképeket szerkesztettünk, amelyek alkalmasak neotektonikai és szedimentológiai következtetések levonására is.

Adatok és módszerek

A szeizmikus adatok feldolgozása

Az alábbiakban bemutatjuk a mederdomborzati modell előállításához szükséges szeizmikus feldolgozási lépéseket, amelyek részben eltérnek a hagyományos vízi szeizmikus feldolgozási folyamattól.

A vízi szeizmikus mérési adatok futásidő-adatok, a műszer a jel kibocsátásától annak visszaverődés után a hidrofona való érkezéséig eltelt időt méri. A futásidő

adatoknak a mélységkonverziója során a jeladó és a hidrofon egymástól mért távolsága (offset) a mérendő kis mélységek esetében nem hanyagolható el. Emiatt a futásidő adatokból ennek az offsetnek a figyelembevételével számítottunk mélységadatokat, a 1450 m/s vízbeni terjedési sebességgel számolva. A mérés során mind a jeladó, mind a hidrofon a víz színe alatt van, ez a mélység hozzáadódik a futásidőből számított mélységadatokhoz. Mivel bemerülési mélység időben állandó, a számított mélységadatokat konstans értékkel történő korrekciójára volt szükség.

A mérés különböző éveken, különböző időszakokban történt, ezért a vízállásértékekkel korrigálni kell a mért mélységadatokat. Ismeretes továbbá, hogy a Balaton esetében a vízállásadatok nem együtt változnak az egyes parti mérési pontokon, ennek oka a Balaton vízének lengése, az ún. seiche (CHOLNOKY 1918). A vízlevegő felületén „megbillenti”, ami legfeljebb néhány m, 3–5 deciméteres amplitúdójú, több órás periódusidejű oszcillációt eredményez (MUSZKALAY 1973).

A hagyományos vízi szeizmikus feldolgozás során, a szelvényeken a víz és a tavi üledék, illetve az üledék és az alatta található rétegek határát jelöltük ki Geographix szoftverben (1. ábra). A réteghatár vonalát a szoftver kijelölés után automatikusan végigrajzolta addig, ameddig az jól követhető volt. A korrekciók után a nyomvonalakból és a szeizmikus eredményekből rekonstruáltuk a mért X és Y koordinátáit a földrajzi pozíciót adta meg EOV-ben, Z koordinátája pedig a reflektáló pont mélysége az aktuális vízfelszínhez képest. Több mérési szelvény együttes alkalmazása esetén a fenti hatások korrekciója során egy szelvényt függőlegesen rögzítettnek tekintettünk. Ennek tengerszint feletti magasságát is rögzítettük az aktuális (vagy közelítő) vízállásadat segítségével. Ennek a rögzített szelvénynek és egy korrigálandó másik szelvény nyomvonalának metszéspontjában meghatároztuk a két szelvényen mért medermélységet, és ezek különbségével mint konstans

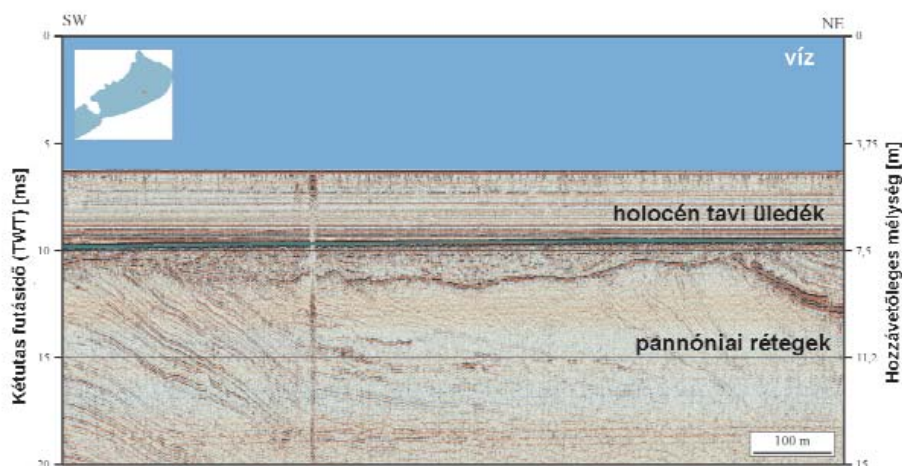
értékkel függőlegesen korrigáltuk a teljes második szelvényt.

Sok szelvény esetén, amelyek többszörösen is keresztelik egymást, ez a módszer ellentmondáshoz vezetett, vagyis előálltak olyan szelvénykeresztelő pontok, amelyekben a korrigált szelvények még különböző medermélységet mutattak.

A medermélység meghatározásához szükséges pontosabb korrekciós eljárás kiinduló adata, a fenti — hagyományos — módon korrigált adatrendszerből előállított X, Y, Z koordinátákból álló pontfelhő volt, amely valamennyi ponthoz tartalmazta az adott pont egyedi szelvényazonosítóját.

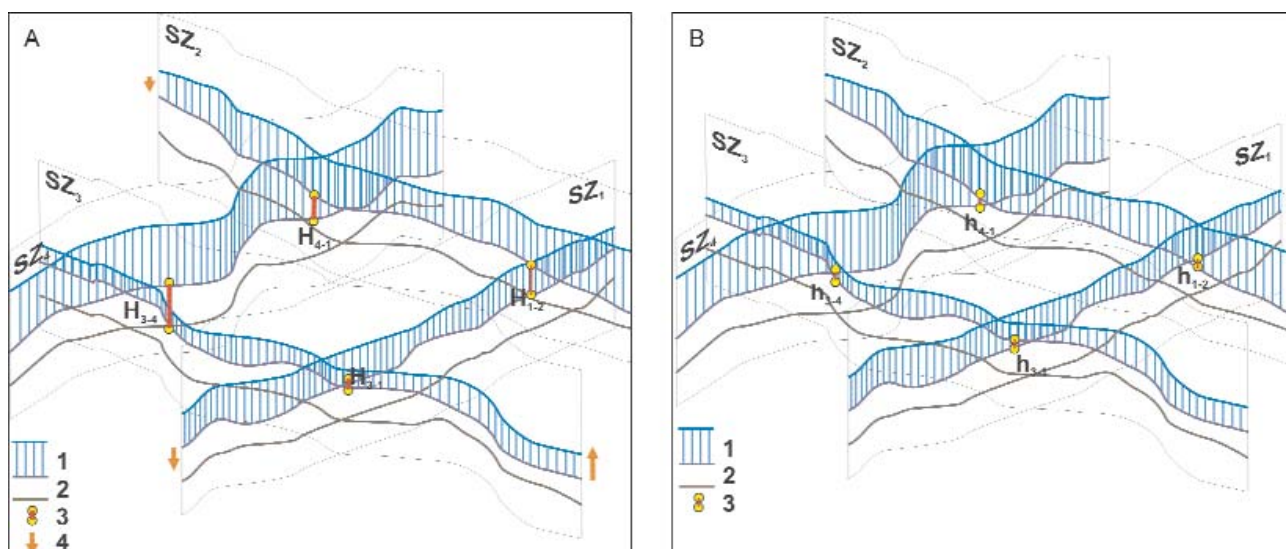
Ebből a pontfelhőből rekonstruáltuk az egyes mérési szelvényeket. Ezeknek a szelvényeknek meghatároztuk valamennyi metszéspontját valamennyi másik szelvényvel, és a metszéspontokban az egyes szelvényekhez tartozó medermélységeket. Ezután a közvetett mérések kiegyenlítését alkalmaztuk, vagyis a metszéspontokban a mélységkülönbségek négyzetösszegét minimalizáltuk. A kiegyenlítés eredménye (a kapott paraméterek) az egyes szelvények függőleges tolasának mértéke (minden szelvényhez egy érték). A korrekció alkalmazása során ezekkel a kapott értékekkel korrigáltuk az egyes szelvényekhez tartozó pontok magasságát.

A rekonstrukció során 541 szelvényszakaszt jelöltünk ki, és ezeknek közel 6200 metszéspontja van. Ezekben a metszéspontokban a feldolgozás előtt az átlagos eltérés 7 cm volt. Ez együttesen jellemzi a kiolvasási pontosságot és a fenti hibaforrások együttes hatását. A kiegyenlítés eredményeként ez az átlagos hiba 3 cm-re csökkent (2. ábra). Természetesen csak azokat a hatásokat sikerült ebben a lépésben kiküszöbölni, amelyek az egyes szelvényszakaszok mérése során állandónak tekinthetők, ilyen például a vízállás. Jelen munka során a síófoki vízmérce szerinti 100 centimétert jelöltük ki standard vízzintnek (105,09 m Adria



1. ábra. Szeizmikus szelvény részlete a Balaton keleti medencéjéből. Az ábrán elkülönül a víz, a vízszintesen települő tavi üledékretegek, és az alattuk elhelyezkedő pleisztocén rétegek, amelyek eróziós diszkordanciával települnek a pannóniai rétegekre

Figure 1. Water seismic section from the Eastern Basin of Lake Balaton, showing water, horizontally-layered Holocene lacustrine sediment and the underlying discordant Pannonian layers



2. ábra. A) $H_{i,j}$: kiegyenlített magasságkülönbség az i - j szelvények között. B) $h_{i,j}$: kiegyenlített magasságkülönbség az i - j szelvények között
 1 – víz, 2 – holocén üledék, 3 – ekvivalens pontok és magasságkülönbségük, 4 – kiegyenlítésből számolt szelvénykorrekció. Az ábra erősen magasságtorzított és a szelvények közötti magasságkülönbségek még ezen belül is túl vannak hangsúlyozva, különösen a korrigált esetben. Figyeljük meg az egyes szelvényekhez tartozó eltérő vízszintet

Figure 2. A) $H_{i,j}$: unequalized elevation difference between sections i - j . B) $h_{i,j}$: equalized elevation difference between sections i - j

The graphic has strong vertical exaggeration and the elevation differences are even more exaggerated, especially in the corrected case. Note different water levels corresponding to different sections. 1 – water, 2 – Holocene sediment, 3 – equivalent points and their elevation differences, 4 – section correction calculated by equalization

fölkött). A nagyszámú szelvénymetszés pont biztosítja a mérések redundanciáját: A mérések megismétlése, valamint újabb szelvények nem növelik jelentősen a reziduálokat, viszont komoly indikátorai a mérések megbízhatóságának és reprodukálhatóságának.

A szeizmikus mérések eddig tárgyalt hibáin kívül a hullámzás a zavart időjárású napokon felvett szelvényekben legalább 20 cm-es hibát okozhat. Ezt úgy korrigáltuk, hogy minden egyes szelvényre egy 50 mérési pont (25 m, két és fél rasztercella) hosszúságú mediánszűrést alkalmaztunk, ami kisímtotta a félautomatikus kiértékelés egyes lépései közötti néhány tíz centiméteres ugrásokat is.

Az eredményül kapott pontfelhő a mérési nyomvonalak mentén nagyon sűrű (fél méteres térbeli felbontású), a vonalak között azonban üres, így az adatsűrűség térben két irányban anizotróp. A mérési adataink vertikális felbontása a szelvény tetején 5 centiméter körüli. A bemeneti mérési adatok a korábbi felvételezések adataihoz képest szelvényen belül (tehát relatív értelemben) minden eddiginél pontosabbak, abszolút értelemben vett hibájukat pedig a fenti korrekciók jóságát határozza meg.

Interpoláció

A felszínmodellek szabálytalan háromszöghálóba történő lineáris interpolációval 10×10 méter felbontással készültek. Ez egyfelől megőrizte a fentiek szerint korrigált mérési adatok pontos értékeit, másfelől nem igényelt túlságosan nagy számítási kapacitást még több millió pontra sem. Mivel a mérési pontjaink a térképezett topográfiai elemek léptékéhez képest igen sűrűn helyezkednek el, a képződött élek és sík felületek látszanak ugyan, de számottevően nem zavarják az értelmezést. A kapott felület

körbevágásánál eltávolítottuk azokat a területeket, ahol egymástól nagyon távoli pontok között történt az interpoláció és áthidalt valamilyen ismert topográfiai elemet a mederben. Mivel a meder a képlékeny iszap és a fenék szintjében is aktív áramlások miatt egyenletes görbületű (MUSZKALAY 1973), erre csak kevés helyen (Fűzfői-öböl, Tihany környéke) volt szükség.

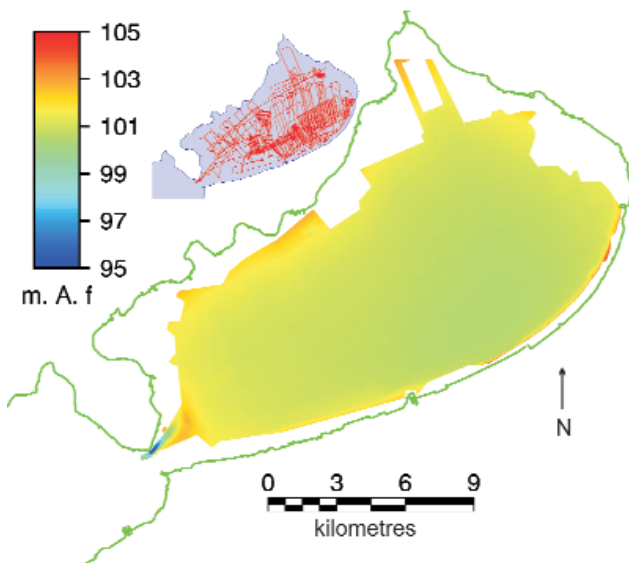
A tavi üledék alját képező eróziós felszín vizsgálatához ugyanezzel a módszerrel állítottunk elő domborzati modellt, de csak valamivel kisebb területet tudtunk feltérképezni, mert az iszapban lévő gázbuborékok miatt nem lehetett a mérés teljes területén kijelölni az iszap alsó felszínét. Az áthalmozódási folyamatok vizsgálatához összehasonlítottuk az így kapott medertérképet az utolsó vízrajzi felmérés (BALÓ 1975, SASS 1979) adataiból készült digitális medermodellel (ZLINSZKY et al. 2008a, b). Az echográfós mélységmérés pontossága 10 cm körüli, (BENEFY & V. NAGY 1969) és itt az aktuális helyi vízszint meghatározása is deciméteres pontatlanságot okozhat. A hullámzás hatása az 1975-ös felmérésnél elhanyagolható, mert az echográfós mérésre használt kutatóhajó lényegesen nagyobb volt, mint a szeizmikus műszereket hordozó úszótest.

Eredmények

Medermodell

A szeizmikus szelvényekből számított vízmélység-adatok feldolgozásával új, a felmért területeken minden eddiginél pontosabb medermodellt állítottunk elő a Balaton keleti medencéjének nyíltvízi területeire. A raszteres adatrendszer nem terjed ki a mérési vonalak által közrefogott

sokszögön kívülre (nem extrapoláltunk), tehát nem fedi le a tó teljes keleti medencéjét. A kapott mederprofil a várakozásainknak megfelelően a medence nagy részén meglehetősen sík, enyhén D–DK felé lejtő, topográfiai elemektől mentes felszín. A meder a Keleti-medencében az északi part közelében viszonylag sekélyebb, enyhén lejt DK felé, és a legmélyebb területek közvetlenül a déli part előtt húzóó marástól északra találhatóak a parttal párhuzamosan, illetve a Tihanyi-kút általunk felmért részén. A meder síknak tekinthető szakasza az északi parton 103 méteres tengerszint fölötti magasság körül kezdődik, és a déli part közelében, de még a marástól víz felé eső részen 101 méteres magasság körül ér véget. A marás és a part közötti sekély sávot az általunk használt mérőhajóval nem lehetett megközelíteni annak merülése miatt, így az nem szerepel a térképeken (3. ábra).



3. ábra. A Siófoki-medence medrének szeizmikus mérési adatok alapján készített digitális domborzati modellje

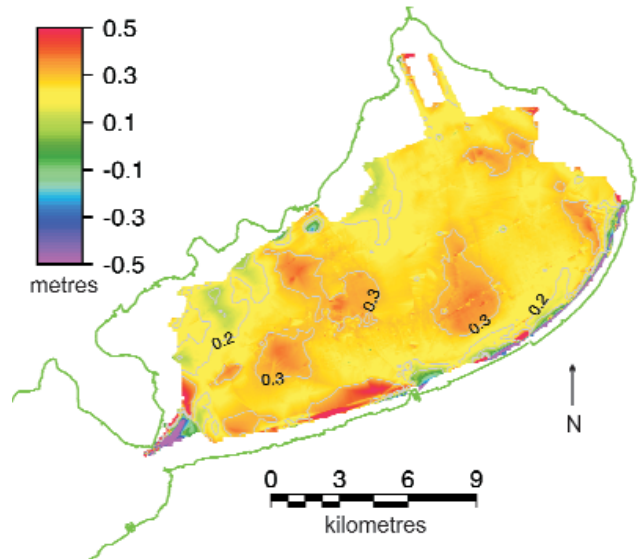
A mérések nem terjedtek ki a medence teljes területére, ahol azonban van adat, ott a meder enyhén lejt dél felé, és topográfiai elemektől csaknem teljesen mentes. A kis térkép a szeizmikus mérési nyomvonalakat mutatja a Keleti-medence területén

Figure 3. Digital Elevation Model of the Siófok Basin based on seismic measurements

The lake bottom has a slight slope towards S, and is practically free of topographic features, but not the whole area of the basin has been surveyed. The inset shows seismic tracks in the Siófok Basin

Mederváltozás az elmúlt 30 évben

A szeizmikus mérések alapján számított medermagassági adatokból pontról-pontra kivontuk az 1975-ben felmért mederprofil magasságait. Tekintve, hogy Z adatként nem vízmélységet, hanem tengerszint feletti magasságot használtunk, az így kapott térkép a meder tengerszint feletti magasságának a felmérési időszakban történt változásait mutatja. Ennek megfelelően ahol a kapott érték pozitív, ott felhalmozódás (vagy emelkedés), ahol negatív, ott elhordás (vagy süllyedés) történt (4. ábra). A legnagyobb nem pontszerű eltérés 40 cm-es emelkedésnek felel meg, az átlagos változás +25 cm, a Keleti-medence területének nagy részére ez az érték jellemző. A Siófok és Balatonaliga között,



4. ábra. A Siófoki-medencére az 1975-ös vizrajzi felmérés adataiból és a szeizmikus mérésekből számított medermodell magasságkülönbségének térképe

Pozitív értékek a vízfenék emelkedését, negatív értékek süllyedést jelölnek, az izovonalak lépésköze 10 cm

Figure 4. Elevation difference map of the Siófok Basin calculated from the 1975 bathymetric survey and the seismic measurements

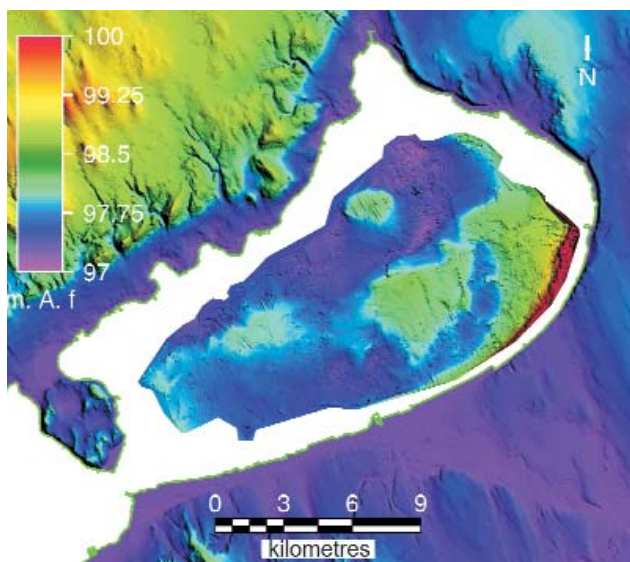
Positive values indicate rise of the lake bottom, negative values correspond to drop. Interval of iso-lines is 10 cm

éppen a Keleti-medence legmélyebb részén kb. 35 cm különbség mutatkozik a két felmérés során tapasztalt vízmélység között. Mivel ezen a területen 1975-ben számos mérési szelvény áthaladt, nem valószínű, hogy az akkori mérés hibája okozza ezt a tendenciát. Műtermék viszont az Alsóörs előtti pontszerű, erősen süllyedő terület, amelyet valószínűleg néhány hibás szeizmikus mérési pont okozott. Az átlagos felhalmozódás 24,5 cm kb. 28 évre, amelyből számolva a meder tengerszint feletti magasságának változási rátája 8,8 mm/év. Ez természetesen a medence területén belül különbségeket mutat, a legnagyobb mederváltozásokat a tó tengelyében, vízközépen, illetve a legmélyebb vízü területeken találtuk.

Az iszapfekü felszínmodellje

A holocén üledéket az alatta lévő pannóniai (és a helyenként előforduló más preholocén) rétegektől elválasztó diszkordanciafelszínhez tartozó pontok közötti interpolációval megkaptuk a tavi üledék alsó határát képező felszín domborzati modelljét (5. ábra). Ez a térkép tehát azt a felszínt ábrázolja, amelyet akkor kapnánk, ha a Balaton keleti medencéjéből a vízen kívül az összes holocén tavi üledéket is eltávolítanánk.

Mivel ez a felület a tó kialakulása óta tovább nem erodálódik (hiszen befedi a víz és a holocén üledék), a topográfiája a tó kialakulását megelőző idő óta csak a tektonikus mozgások következtében változik. A diszkordanciafelszín domborzata tehát tükrözi mind a tó kialakulása előtt, illetve azzal egyidőben zajló eróziót, mind pedig az azóta történt tektonikai folyamatokat, de a fenti



5. ábra. A holocén tavi üledék és a pannónia rétegek közötti diszkordanciafelszín térképe a Balaton keleti medencéjében

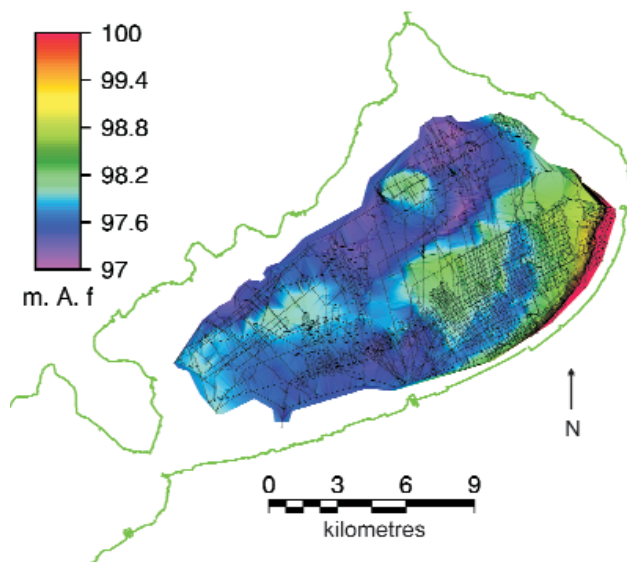
Az ábrán feltüntetett színskála az iszapfekü tengerszint feletti magasságára vonatkozik, a jobb láthatóság érdekében egy szűkebb tartományra igazítva. A maximális szintkülönbség 6 méter

Figure 5. Map of the discordance surface between the Holocene lacustrine sediments and the underlying Pannonian strata in the Eastern Basin of Lake Balaton

The legend corresponds to the elevation above sea level of the discordance surface, set to enhance a range considerably narrower than the relief for better interpretation. The relief of the discordance surface is 6 metres

hatások nem választhatóak szét, így az egyes topográfiai elemek kialakulásának módja nem határozható meg egyértelműen.

A parttól távoli területeken a legmagasabban és legalacsonyabban fekvő felületek között mintegy két méter a reliefkülönbség, ennek nagyságrendje nem zárja ki, hogy a tó kialakulása óta, kizárólag neotektonikai folyamatok eredményeként jött létre a szintkülönbség. A legmeredekebb lejtő és a legmagasabban fekvő preholocén felszín Aliga és Balatonszabadi között található a parttal párhuzamosan. Itt egy kis területen felfutnak a marásra a szelvények, és a tavi üledék felszínéhez nagyon közel vannak a pannóniai rétegek (bár a szeizmikus szelvények tanúsága szerint az általunk felmért területen mindenütt befedi őket az üledék). Azonosítható Balatonalmádi előtt egy kisebb kiemelkedő terület, amelyről nem lehet eldönteni, hogy folytatódik-e észak felé, (ahol már nem történt újabb mérés) vagy szigetszerűen áll ki. Balatonkenese és Balatonfüred között egy elhúzódo mélyedés található, ettől délre, Balatonakaratya–Balatonvilágos környéke és Tihany között pedig egy újabb kiemelkedő terület. A Balatonligától Tihany felé húzódo kiemelkedő területek, bár nem függenek teljesen össze, de egyenes vonal mentén rendeződnek. Egy ÉK–DNy irányú ívelt völgy határolja ezt a területet dél felől, amely egy szigetszerűen kiálló magaslatot vesz körül, amelyet minden irányból völgy határol, az északi oldala pedig egy NyDNy–KÉK irányban hosszan elhúzódo és két helyen megtörő, markáns, csaknem lépcsőszerű topográfiai elem. A kapott mintázatok természetesen nem minden esetben függetlenek a mérési nyomvonalak elhelyezkedésétől (6. ábra). Azokat a topográfiai elemeket lehet nagy biztonsággal azonosítani, amelyeken több szelvény is áthalad, és amelyek teljes egészükben felmért területen találhatóak. Az ívelt völgyek értelmezhetőek paleomeanderként, a magaslatok és az északi oldalukat határoló vonal értelmezhető neotektonikus mozgások eredményeként, a Balaton tágabb környezetére a déli parton jellemző közel meridionális vagy sugaras formák azonban egyáltalán nem jelennek meg az iszapfekü felszínén.



6. ábra. Az 1997–2007 közötti vízi szeizmikus felmérés mérési nyomvonalai a holocén tavi üledék és az alatta fekvő rétegek közötti diszkordanciafelszín ezen mérések alapján készült térképére vetítve

Figure 6. The tracks of the water seismic measurements carried out between 1997–2007 overlain onto the map of the discordance surface between the Holocene lacustrine sediments and the underlying strata based on these measurements

Értelmezés

A meder nagy részére jellemző topográfiai elemektől gyakorlatilag mentes felszín a sekély tóban a teljes vízoszlopot megmozgató hullámzás és vízlengés tartja fenn (VIRÁG 1998, MUSZKALAY 1973). Az üledék lerakódását és elmosódását alapvetően és rövid távon a tó vízének áramlási rendszere befolyásolja, és így főként az áramlások felelősek a 4. ábrán kialakuló mintázatokért. A Balaton áramlási rendszeréről meglehetősen kevés mérési adat, illetve modell van, és azok is elsősorban a Keszthelyi-, (LUETTICH et al. 1990, ISTVANOVICS et al. 2008), illetve a Keszthelyi-, Szigligeti-, Szemesi-medencére és a Tihanyi-szorosra korlátozódnak (MUSZKALAY 1973), így ezekkel való összehasonlításra nem nyílt lehetőség. A teljes tómedencére kiterjedő matematikai áramlási modellt ír le KOLODKO et al. (1980), ennek a térbeli felbontása viszont nem alkalmas felhalmozódási és lerakódási zónák elkülönítésére. A medence legmélyebb területein mutatkozó lerakódás mindenesetre magyarázható lehet azzal, hogy a már egyszer lerakódott üledéket a mélyebb vízi területekről keveri fel legkevésbé a

szél, hiszen az áramlások erőssége a vízfelszíntől a fenék felé haladva csökken (MUSZKALAY 1973).

Jelen adatsor és az 1975-ös felmérés között kimutatott különbségek az 1975-ös felmérés mérési hibáinak nagyságrendjébe esnek, tehát jogosan vethető fel a kérdés, hogy értelmezhető-e egyáltalán a két adatrendszer közötti különbség. A legfontosabb hibaforrások az 1975-ös mérésnél a mélységmérés hibája és a helyi vízszint meghatározásából adódó hiba. A mérés publikált leírása (SASS 1979) nem tér ki arra, hogy ez utóbbit hogyan korrigálták, csak azt említi, hogy a térképek rajzolása során a +75 cm-es vízállásra korrigáltak. Az értelmezés során abból a feltételezésből indultunk ki, hogy a szelvényekben mért 1975-ös felmérés hibája szelvényenként különböző, és a hibák várhatóan véletlenszerű mintázatban és mindkét irányba egyformán szóródnak. Mivel a kapott áthalmozódási mintázat nem véletlenszerű, mivel kis területen található az 1975-ös adatokhoz képest akár csak kismértékű üledékhiány is, de nagy területeken tapasztalható felhalmozódás, és mivel a különbségek nem az 1975-ös szelvények mentén jelennek meg, hanem számos akkori szelvényt átfogó mintázatban, ezért feltételezhető, hogy nem elsősorban a két mérés hibái okozták a kapott mintázatot. Bár ez a hibák nagyságrendje és a két mérés között eltelt viszonylag rövid idő miatt nem állítható teljes bizonyossággal, nem áll módunkban ennél erősebb következtetéseket levonni, hiszen nem készült 1975 óta az egész medencére kiterjedő pontosabb felmérés.

A két mérés között eltelt időszakra számított átlagos felhalmozódási ráta nagyságrendileg megfelel a CSERNY *et al.* (1995) izotóp-geokémiai kutatásai során a holocénre számított felhalmozódási rátának (5–14 mm/év), a felhalmozódott üledék számított térfogata pedig a lefolyási modellekből becsülhető felhalmozódott üledéktérfogatnak (ZLINSZKY *et al.* 2008b). Az általunk számolt feltöltődés valamivel több, mint a BENDEFY & V. NAGY (1969) által az utóbbi 191 évre a Keleti-medencében számolt felhalmozódási ráta (5 mm/év), és jól megfelel a FELFÖLDY és munkatársai (1969) által közölt rátának (7 mm/év), valamint a Vituki által az 1975 előtti mederfelismerések összehasonlításával az egész Balatonra átlagosan számolt felhalmozódásnak (1 cm/év) (SASS 1979).

A meder tengerszint feletti magasságát a fentiekben tárgyalt áramlási viszonyok mellett neotektonikai folyamatok is befolyásolhatják. A vizsgált időtáv erre első látásra rövidnek, a várható változások talán csekélynek vagy zajsztint alattinak tűnhetnek. Úgy véljük azonban, hogy elképzelhető, hogy a neotektonikának és ezen belül is akár az aktív tektonikának szerepe lehet a medermorfológia alakításában.

Ha a tó egész környékének léptékében vizsgáljuk a kérdést, legelső érvként a Balaton keleti medencéjének északkeleti–keleti peremén tapasztalható földrengés aktivitást érdemes megemlítenünk (TÓTH *et al.* 2008). Ugyan a rengések sekély mivolta és szerencsére kis energiája nemigen teszi lehetővé, hogy fészekmechanizmust állapítsanak meg belőlük, ennek megfelelően a tektonikus aktivitás jellege sem pontosan ismert, de viszonylag rendszeres aktivitás miatt a folyamatos mozgás feltételezhető.

A Balaton északi és déli partjának paleomagassági viszonyait vizsgálva már LÓCZY (1913) és CHOLNOKY (1918) is felvetette az abrúziós színlők magasságkülönbsége alapján a differenciális kiemelkedés lehetőségét. Az ismételt magasrendű szintezésekből (JOÓ 1992) levezethető vertikális kéregmozgások alapján kiszámítható szintkülönbségek viszonylagosan jó egyezést mutatnak a differenciális kiemelkedésből számolható szintkülönbséggel (TIMÁR *et al.* 2006). A meder síknak tekinthető szakasza az északi parton 103 méteres tengerszint fölötti magasság körül kezdődik, és a déli part közelében, de még a marástól víz felé eső részen 101 méteres magasság körül ér véget (ZLINSZKY *et al.* 2008a). Ezt a két méteres (a Siófoki-medencében akár három méteres) magasságkülönbséget az északi és a déli part között mért differenciális kiemelkedés sebessége, amely JOÓ (1992) szerint 0,3–0,5 mm/év, hatezer–tízezer év alatt létrehozhatta, amely időtartam rövidebb a tó medencéinek feltételezett koránál (CSERNY & NAGY-BODOR 2000, NAGYNÉ BODOR *et al.* 2000).

A preholocén felszín tükrözi a tó kialakulásakor zajló eróziót és egyben az azóta lezajlott neotektonikai folyamatokat. Ha a kapott domborzati modellt az erózió szempontjából értelmezzük, két olyan ívelt mélyedést is találunk, amelyek értelmezhetőek folyó völgyként a MIKE (1976) által közölt paleomeander elméletnek megfelelően. Ezek a mélyedések nem mutatnak egyértelmű lejtést és egymással sem függenek össze a vizsgált területen belül, de ez nem zárja ki, hogy valamikor folyó völgyek lettek volna. A felszínen nem mutatkoznak olyan, a somogyi part domborzatára jellemző közel meridionális struktúrák, amelyeket pl. FODOR *et al.* (2005) a szélerózióknak tulajdonítanak azon az alapon, hogy a völgyrendszerek szeizmikus felmérése során nem találtak a késő-miocén üledékeket elvető töréseket. A preholocén erózió nyomait azonban egyfelől a tektonika, másfelől éppen a kezdődő intenzív tavi abrúzió tüntethette el.

Az iszapfekü térképén a keleti medencét DNy–ÉK irányban átszelő hát iránya azonos a tágabb környékre, ezen belül is a Somogyi-dombságra leírt antiklinálisok és/vagy fő vetők irányával (CSONTOS *et al.* 2005, FODOR *et al.* 2005), feltételezhetjük tehát, hogy a jelenkorban is zajló tektonikai folyamatokhoz kapcsolható. Szintén figyelemreméltó, hogy az említett magaslatot észak felől határoló mélyedés több részből, a CSERNY és NAGY-BODOR által leírt részmedencékből áll és a hát északi éle cikcakkosan megtört formát mutat, mert ez feltűnően hasonlít a SÍKHEGYI (2002, 2009) által a Balaton északi partjára és számos somogyi folyó völgyére leírt, transzpressziós elmozdulások által kiváltott rotáció létrehozta struktúrákhoz.

A szűk értelemben vett tómedence területén korábban kimutatott jelenségekkel is össze lehet vetni az itt bemutatott eredményeket. A balatoni üledék áthalmozódásának általánosan elfogadottnak tekinthető tendenciája, vagyis a finom szemcsés üledéknek az északi part közelében, a durva szemcsés üledéknek pedig a déli part és a marás között történő lerakódása (ENTZ & SEBESTYÉN 1942) az általunk kapott eredményeken semmilyen formában nem mutatkozott meg, az iszap felhalmozódása az áthalmozódási

térkép (4. ábra) tanúsága szerint ugyanis tóközépen a legintenzívebb, és mind az északi, mind pedig a déli part felé csökken. Feltételezhető tehát, hogy a meder általános topográfiai jellemzőit, vagyis az enyhe lejtést az északi parttól a déli part felé, és a marás alkotta „küszöböt” nem elsősorban az üledék áthalmozódása hozta létre az ENTZ és SEBESTYÉN által leírt módon, hanem a tavat is kialakító eróziós és/vagy neotektonikai folyamatok.

Ahogy már említettük, jelen munka során a szeizmikus mérésen nem terjedtek ki a marás és a part közötti sekély vízü sávra, és a korábbi vízi szeizmikus mérések (CSERNY & CORRADA 1990) során is csak a 2 méternél mélyebb vízü területek kerültek felmérésre (CSERNY et al. 2004), de az akkor mért adatok alapján sikerrel találtak magyarázatot a marás kialakulására is. A déli part marásán az üledékvastagság szinte mindenütt 2 méternél kevesebb (CSERNY & CORRADA 1990), holott a marás előtti legmélyebb sáv és a marás és a part közötti pad között a magasságkülönbség gyakran 3 méternél is több, és a legmélyebb részeken is van a fenékholocén tavi iszap. A marás tehát a preholocén felszín (CSERNY & CORRADA [1990] által leírt, az általunk használt mérőhajóval nem megközelíthető) kiemelkedéséből és az erre a hullámok megtörése következtében egy-két méteres rétegben lerakódott nagyszemcsés tavi üledékből áll.

SACCHI et al. (1999) valamint LOPES CARDOZO et al. (2002) a Balaton keleti medencéjén DNy–ÉK irányban végighúzó, feltehetően oldaleltolódásos vetőt térképeztek, amely jelen mérés szeizmikus szelvényein eltolódásoknál gyakori, bonyolultabb (szétseprűződő, helyenként meg-megszakadó) formában jelentkezik (HORVÁTH 2003), és feltételezhetően a Holocén rétegeket is elveti (LOPES CARDOZO et al. 2002). A kutatás jelen állása alapján e vetőzónára vonatkozóan vertikális elmozdulási komponens nem adható meg, ugyanakkor a medermorfológiát esetlegesen befolyásoló vertikális elmozdulás sem zárható ki. Az azonban feltűnő, hogy az iszapfekü térképén (5. ábra) említett (NyDNy–KÉK) irányú markáns szintváltozás fő tengelye párhuzamos ezzel a vetővel, bár attól északra lényegesen eltolódott. A Balatonligától Tihany felé húzó kiemelkedő területek, bár nem függenek teljesen össze, de szintén egyenes vonal mentén rendeződnek. A háttól északra és délre elhelyezkedő mélyedések pontosan megfelelnek a CSERNY & NAGY-BODOR (2000) által a Dryas II és Dryas III időszakra felvázolt résztavaknak, vagyis vélhetően az egységes tó kialakulása előtti állapotot tükrözik. Ezt támasztja alá az iszapfekü térképen (5. ábra) látható, őket délnyugatról határoló és különösen a déli „elő-medence” esetében viszonylag meredek fal, amely jellegében (de természetesen magasságában nem) hasonló az Enyingi-hátnak a Balaton partjával való metszévonalában kialakuló magasparthoz.

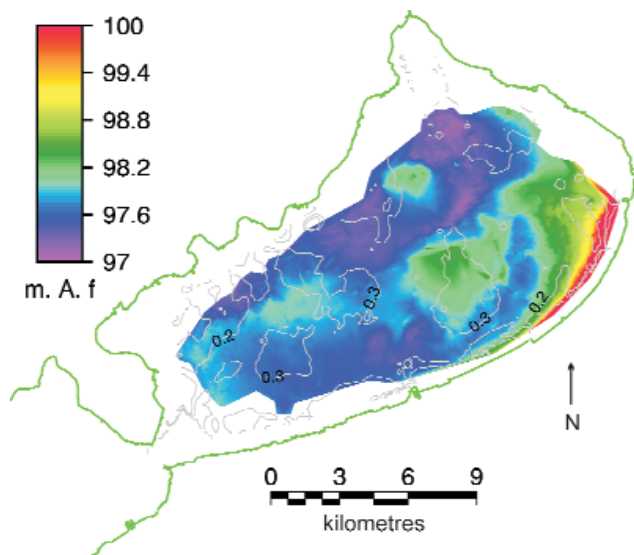
A Balatonszabadi–Balatonvilágos–Balatonkenese háromszögben megjelenő, magasabban fekvő terület kialakulhatott napjainkban is zajló tektonikai folyamatok eredményeképpen is (BENEFY 1964), de valószínűbb, hogy az Enyingi-hát átöröklött, reliefjében szinte elhanyagolható

formájáról van szó, vagy — amennyiben az Enyingi-hát kialakulása recensen is tart — e folyamat hozzájárulhat e mintázat kialakulásához. Ennek a formának a külső, ÉNy felé eső részén nagy üledékfelhalmozódást tapasztaltunk a vizsgált időszakban.

Bár sem a tó vízének áramlásrendszerei, sem pedig a környék preholocén eróziós története nem tökéletesen ismert, mind az áthalmozódás, mind pedig az iszapfekü mintázatairól állíthatjuk, hogy nem magyarázhatóak kizárólag áramlástani, illetve eróziós jelenségekkel. A korábbi vizsgálatok során kimutatott neotektonikus formák azonban számos esetben hasonlóságot mutatnak a mederváltozás és az iszapfekü térképén felfedezhető topográfiai elemekkel. Ráadásul egyes helyeken a két térkép egymáshoz is hasonló, felvethető tehát, hogy az utóbbi évtizedek folyamatai esetleg a hosszú távú (ezeréves) folyamatok térbeli mintázatához hasonlóak. Ez ahhoz a jelenleg nem bizonyítható következtetéshez vezethetne, hogy az eredeti tómeder (az eróziós felszín) jelenlegi tengerszint feletti magasságát nemcsak az egykori kialakító faktorok (pl. szél, folyóvölgyek) határozzák meg, hanem időközben, tektonikusan is alakul.

Ugyanakkor meg kell jegyeznünk, hogy a vizsgált időszakban az áramlási okokból történő lerakódás várhatóan egy nagyságrenddel nagyobb, mint a tektonikai eredetű köthető változás.

A kapott adatrendszer számos kérdést is felvet. A tavi üledék alatti felszín topográfiája nem mutat a meder kialakulásának módjára utaló egyértelmű jeleket. Továbbra is vitatható, hogy milyen mértékben járult hozzá a jelenlegi Balaton kialakulásához differenciális kiemelkedés, szél-erózió, folyami erózió, illetve tavi abrázió. Az eróziós felszín topográfiája alapján nem cáfolható a jelenlegi tó helyén húzó ősfolyamra alapuló elmélet sem. A további vízi szeizmikai mérések adatainak hasonló feldolgozása ki fogja terjeszteni a tavi üledék alatti felszín felderített területét, de ezt korlátozza az üledékben található gáz, illetve a mérőhajó merülése. Mivel a vízi szeizmikával felmérhető mélység a vízmélységgel arányos, a partközeli területek vizsgálata nem is várható. Az eddig felmért terület nem tartalmazza a tómeder azon részeit, ahol az üledék áthalmozódása várhatóan a legintenzívebb, nevezetesen a Zala torkolatának közelében és a Tihanyi-szorostól keletre és nyugatra elhelyezkedő területeket. A parti övben zajló felhalmozódásról sem nyertünk adatokat, pedig a tóba bejutó lebegőanyag egy része minden bizonnyal a nádasokban, illetve a déli parti maráson ülepszik le. A meder-térképeknek a vizsgált területen történő összehasonlítása alapján számítható szedimentációs ráta tehát nem feltétlenül felel meg az egész tóra jellemző átlagos szedimentációs rátának. A feliszapolódási viszonyok és a diszkordanciafelszín topográfiájának részletesebb, pontosabb vizsgálatát a fúrás adatokkal való összehasonlítás tenné lehetővé. Az utóbbi évtizedek szedimentációs mintázata (4. ábra) és a preholocén felszín (5. ábra) térbeli mintázata rokonságot mutat egymással (7. ábra), de további, más módszerekkel végzett kutatásokra van szükség ahhoz, hogy ennek az okát megtaláljuk.



7. ábra. Az 1975 és a mérések időpontja közötti mederváltozás szintvonalai az iszapfekü magassági modelljére vetítve

Az intenzív mederváltozások elhelyezkedése részben rokonságot mutat a preholocén felszín topográfiájával

Figure 7. Contour lines of the elevation changes of the Lake floor between 1975 and the seismic measurements projected on the elevation model of the discordance surface separating lacustrine sediments and preholocene layers

The locations of intensive elevation changes show similarities to the topography of the preholocene surface

Következtetések

A Balaton keleti medencéjének vízi szeizmikus felmérése által szolgáltatott adatokból kiszámítottuk a meder domborzati modelljét és a holocén tavi üledék fekjének felszínmodelljét.

Megállapítást nyert, hogy a holocén tavi üledék fekjének topográfiája rokonságot mutat a tó szűkebb környékének egyes felszínformáival, mint az Enyingi-hát vagy a cikcakkos lefutású meredek völgyek, ugyanakkor a felmért területen nem azonosítottunk olyan meridonális struktúrákat, amelyek szél-erózióra utalnának. Az iszapfekü egyes mélyedései értelmezhetők folyóvölgyként, de mindent egybevetve a felszín nem mutat a tó keletkezési módját egyértelművé tevő elemeket.

A mederváltozások térképe és a tavi üledék fekjének domborzata szintén hasonlóságokat mutat egyes csökkenő vízmélységű területeken, ami arra enged következtetni, hogy a tó területe ma is tektonikai aktivitást mutat, és ez az aktivitás döntő szerepű lehetett a Balaton medencéjének kialakulásában.

Köszönetnyilvánítás

A kutatást az OTKA TS44765 és T47104, valamint a 3B022-04 NKFP (BALÓKO) projektek anyagi támogatása tette lehetővé. A vízi szeizmikus mérési kampányok egy részében közreműködtek az Eötvös Loránd Tudományegyetem és a University of Leeds geofizika szakos hallgatói 2004 és 2007 között. A GeoGraphix szoftver a Landmark University Grant támogatásának köszönhetően került beszerzésre az ELTE Geofizikai Tanszéken. Köszönjük SZAFIÁN Péter és HÁMORI Zoltán tanácsait és aktív segítségét az eredmények feldolgozásában, továbbá KISS Rózsa, TIMÁR Gábor, TÓTH Tamás, és a mérések kivitelezésében résztvevő hajózó személyzet segítségét. Köszönjük továbbá a kézirat bírálóinak, CSERNY Tibornak és SIKHEGYI Ferencnek segítségét és tanácsait.

Irodalom — References

- BALÓ Z. (szerk.) 1975: Balaton Vízrajzi Atlasz. — *Vízrajzi Atlasz Sorozat*. Vízgazdálkodási Tudományos Kutató Intézet, Budapest.
- BENDEFY, L. 1964: Geokinetic and crustal structure conditions of Hungary as recorded by repeated precision levelings. — *Acta Geologica Hungarica* **8/1-4**, 395–411.
- BENDEFY L. & V. NAGY I. 1969: *A Balaton évszázados partvonalváltozásai*. — Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 215 p.
- BUCZKO, K., MAGYARI, E. K., BITUSIK, P. & WACNIK, A. 2009: Review of dated Late Quaternary palaeolimnological records in the Carpathian Region, east-central Europe. — *Hydrobiologia* **631/1**, 3–28.
- CHOLNOKY J. 1918: A Balaton hidrográfiája. — In: LÓCZY L. (szerk.): *A Balaton tudományos tanulmányozásának eredményei*. Franklin Társulat, Budapest, 1–318.
- CSERNY T. 1987: A Balaton aktuálgeológiai kutatásának eredményei. — Magyar Állami Földtani Intézet, Budapest.
- CSERNY T. & CORRADA, R. 1990: A Balaton aljzatának szedimentológiai térképe. — *A MÁFI Évi Jelentése* **1988. évről**, 169–176.
- CSERNY, T. & NAGY-BODOR, E. 2000: Limnogeology of Lake Balaton, Hungary. — In: GIERLOWSKI-KORDESCH, E. & KELTS, K. (eds): *Lake basins through space and time. AAPG Studies in geology*, 605–618.
- CSERNY T. & PRÓNAY Z. 2004: Szeizmoakusztikus mérések a Balatonon: a kezdetektől napjainkig. — *Földtani Kutatás* **41/2**, 3–12.
- CSERNY, T., HERTELENDI, E. & TARIÁN, S. 1995: Results of isotope-geochemical studies in sedimentological and environmental geologic investigations of Lake Balaton. — *Acta Geologica Hungarica* **38/4**, 355–376.
- CSERNY T., PRÓNAY Z. & NEDUCZA B. 2004: A Balatonon végzett korábbi szeizmikus mérések újraértékelése. — *A MÁFI Évi Jelentése* **2004**, 273–283.
- CSONTOS, L., MAGYARI, A., VAN VLIET-LANOE, B. & MUSITZ, B. 2005: Neotectonics of the Somogy hills (Part II): Evidence from seismic sections. — *Tectonophysics* **410/1-4**, 63–80.
- ENTZ G. & SEBESTYÉN O. 1942: *A Balaton élete*. — A Királyi Magyar Természettudományi Társulat Könyvkiadó Vállalata, Budapest, 349 p.

- FELFÖLDY, L., MUSZKALAY, L., RÁKÓCZI, L. & SZESZTAY, K. 1969: Origin and movement of sediment in Lake Balaton. — In: FREY, D. G. (ed): *Symposium on Paleolimnology. Tihany, Hungary*, E. Schweitzerbart'sche Verlagsbuchhandlung, 282–291.
- 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* **410/1–4**, 15–41.
- HORVÁTH A. 2003: Balatoni üledékek vizsgálata vízi szeizmikus szelvényezések alapján. — *Szakkolgozat*, Eötvös Loránd University, Budapest, 80 p.
- ISTVANOVICS, V., HONTI, M., KOVÁCS, A. & OSZTOICS, A. 2008: Distribution of submerged macrophytes along environmental gradients in large, shallow Lake Balaton (Hungary). — *Aquatic Botany* **88/4**, 317–330.
- JOÓ, I. 1992: Recent vertical surface movements in the Carpathian Basin. — *Tectonophysics* **202**, 129–134.
- KOLODKO, J. JACKOWSKI, B. L. & SKIBA, M. 1980: Sekély tavakban a szél hatására kialakuló áramlások számítása: Kezdeti eredmények a Balaton esetén. — *Vízügyi Közlemények* **62/4**, 623–631.
- LOPES CARDOZO, G., BADA, G., LANKREIER, A. & NIEUWLAND, D. 2002: Analogue modelling of a prograding strike-slip fault: Case study of the Balatonfő fault, western Hungary. — *EGU Stephan Mueller Special Publication Series* **3**, 217–226.
- LUETTICH, R. A., HARLEMAN, D. R. F. & SOMLYODY, L. 1990: Dynamic behavior of suspended sediment concentrations in a shallow lake perturbed by episodic wind events. — *Limnology and Oceanography* **35/5**, 1050–1067.
- LÓCZY L. 1913: A Balaton környékének geológiai képződményei és ezeknek vidékek szerinti telepedése. — In: LÓCZY L. (szerk.): *A Balaton tudományos tanulmányozásának eredményei*. I. kötet, 1. rész, 1. szakasz, Budapest, Kilián F. Bizománya, 617 p.
- MIKE K. 1976: A Balaton kialakulása és fejlődése. — In: BALÓ Z. (szerk.): *Balaton*. — *Vízrajzi Atlasz Sorozat*. Vízgazdálkodási Tudományos Kutató Intézet, Budapest, 30–39.
- MUSZKALAY L. 1973: *A Balaton vizének jellemző mozgásai*. — Vízgazdálkodási Tudományos Kutató Intézet, Budapest, 85 p.
- NAGYNÉ BODOR E., SZUROMINÉ KORECZ A. & CSERNY T. 2000: A Siófoki-medence vízborításának fejlődéstörténete, palinológiai és ostracoda vizsgálatok alapján. — *Hidrológiai Közöny* **80/5**, 329–332.
- PÉCH J. & ERDŐS F. 1898: A Balaton Vízrajzi fölvétele. — *Vízrajzi Évkönyv* **8** (1897), 86–94.
- SACCHI, M., HORVÁTH, F. & MAGYARI, 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: DURAND, B., JOLIVET, L., HORVÁTH, F. & SÉRANNE, M. (eds): *Mediterranean Basins: Tertiary Extension within the Alpine Orogen*. — *Geological Society, London, Special Publications* **156**, 357–390.
- 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. — *EGU Stephan Mueller Special Publication Series* **3**, 203–216.
- SÍKHEGYI F. 2009: A Somogyi- és Zalai-dombság neotektonikája — morfostrukturális vizsgálatok. — Nyugat-Magyarországi Egyetem Erdőmérnöki Kar, Sopron, 151 p.
- 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.
- TÓTH L., MÓNUS P., ZSÍROS T., BUS Z., KISZELY M. & CZIFRA T. 2009: Magyarországi földrengések évkönyve 2008. — *GeoRisk – MTA GGKI*, Budapest, 98 p.
- VIRÁG Á. 1998: *A Balaton múltja és jelene*. — Egri nyomda, Eger, 904 p.
- ZLINSZKY A., MOLNÁR G. & HERODEK S. 2008a: A Balaton medrének digitális geomorfológiai vizsgálata. — *Hidrológiai Közöny* **88/6**, 239–241.
- ZLINSZKY, A., SZÉKELY, B. & CLEMENT, A. 2008b: Comparing sediment load and deposit thickness values in the eastern embayment of shallow Lake Balaton, Hungary. — *Geophysical Research Abstracts*, **10**, EGU2008-A-06101.

Kézirat beérkezett: 2010. 03. 30.