

## **A BALATON VÍZKÉSZLET-VÁLTOZÁSÁNAK VIZSGÁLATA DIGITÁLIS TEREPMODELLEK ALKALMAZÁSÁVAL**

SZEMES ÉVA – TELBISZ TAMÁS – VARGA GYÖRGY – NOVÁKY BÉLA

CALCULATION OF CHANGES IN BALATON LAKE WATER  
VOLUME AND SURFACE AREA USING DIGITAL TERRAIN MODELS

### **Abstract**

In order to calculate volume and superficial area changes of Balaton lake, digital terrain models (DTMs) of Balaton lakebed were created by several interpolation methods from digitized contour data. DTMs were compared in terms of visual interpretation, cross-validation and statistical parameters. As a result, it is stated that there are significant differences between interpolation methods. The largest difference between mean elevation values of Balaton lakebed DTMs is as high as 32 cm. The smallest actual Balaton volume (calculated from the 1000 m resolution Local Polynomial DTM) is 13.68% less than the largest actual Balaton volume (calculated from the 1000 m resolution Radial Basis DTM) that highlights the importance of the applied interpolation method. We concluded that the 100 m resolution Kriging DTM is the most suitable for the calculations. Based on the compound DTM including the Balaton and its surroundings, superficial areas and volumes of Balaton lake were calculated for palaeo or historical water levels. Thereafter, changes in the volume of Balaton were determined for the 1863 to 2012 period. Finally, using climate data predictions of EULAKES 2012 project, we estimated future changes (up to 2100) in the area and volume of Balaton lake. It is concluded that water regression will be the most significant in the SW end of the lake and in the Keszthely Bay.

**Keywords:** interpolation, Digital Terrain Model (DTM), lake volume, Balaton

### **Bevezetés**

A Balaton vízkészlete változásának ismerete és folyamatos nyomon követése azért fontos, mert – egyéb hatótényezők mellett – ez határozza meg a tó ökológiai folyamatait, az állat- és növényvilágban történő változásokat, a partvonal alakulását, továbbá hatással van a környező területek természeti és társadalmi folyamataira is. A Balatonnak nemzetgazdasági szempontból is fontos szerepe van, ugyanis az ország turizmusában kiemelkedő szerepet játszik. Sok magyar és külföldi turista közkedvelt üdülőhelye, így a turizmus a Balatonra természeti erőforrásként is alapoz. Az utóbbi évek aszályos időszakai rávilágítottak arra a tényre, hogy a turizmus alakulását is jelentősen befolyásolja a vízkészlet változása, annak vizsgálata tehát természeti és társadalmi szempontok miatt is fontos.

A közvetlenül érzékelhető vízszint- és területváltozások, valamint a tóban tárolt vízmennyiség kapcsolatát digitális terepmódel (DTM) alapján történő térfogatszámítással tudjuk legegyszerűbben meghatározni. Munkánk célja tehát kettős, egyrészt a DTM alapján történő tóterefogat-számítással kapcsolatos módszertani kérdéseket vizsgálja, másrészt a Balaton múlt- és jövőbeli térfogatváltozásait elemzi.

### **A Balaton vízszint-változásai geológiai és történelmi léptékben**

A Balaton geológiai és limnológiai szempontból fiatalnak tekinthető. Korábbi kutatások (pl. MAROSI S. – SZILÁRD J. 1981) szerint a tó medencéje több részletben, a pleisztocén végére alakult ki, tektonikus bezökkenés következtében. Egyes szerzők (LÓCZY L. 1913;

CHOLNOKY J. 1918, 1936) már a 20. század elején a szelerozió szerepét hangsúlyozták a tómedence létrejöttében, és újabb vizsgálatok (CSILLAG G. et al. 2010) alátámasztani látszanak a szél meghatározó szerepét a Balaton részmedencéinek kialakulásában. Ugyanakkor a tektonikus szerkezetek hatása sem zárható ki teljesen (BADA G. et al. 2010; ZLINSZKY A. et al. 2010). A tó szabályosnak mondható jelenkori teknőjét a lerakódások egyenlőtlenül töltik ki, így keresztmetszete É–D-i irányban aszimmetrikus, de nem egészen úgy, ahogy a közvélemény ismeri, ugyanis közvetlenül az É-i part mentén, egy rövid szakaszon meredeken süllyed a fenék, majd D felé haladva egyre lankásabban, de tovább lejt, végül a legnagyobb fenékmélységből eleinte hirtelen, utána pedig lankásabb lejtővel emelkedik ki a D-i part (ENTZ G. – SEBESTYÉN O. 1942); így a tó mélyebb részei a D-i parthoz közelebb húzódnak.

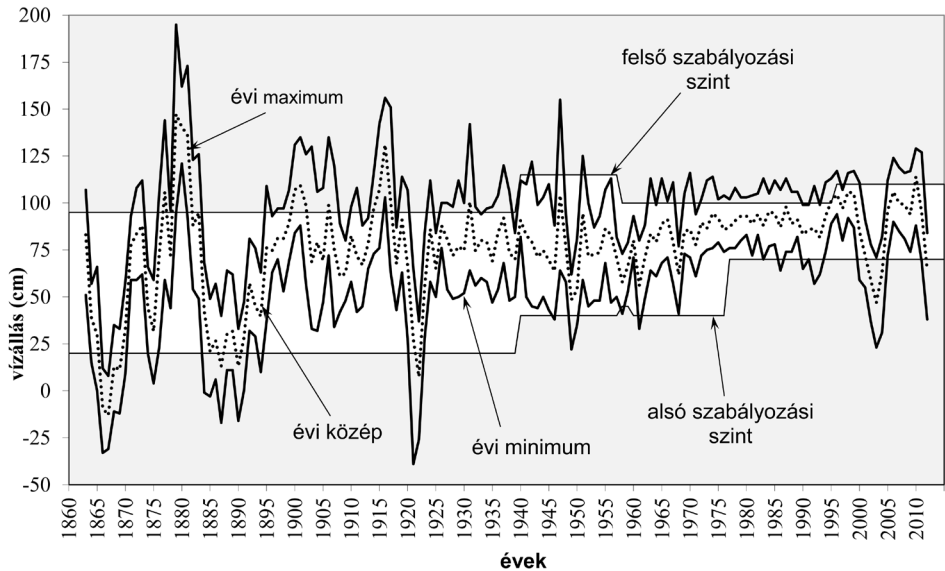
A különböző időszakokban a tó vízszintje folyamatosan változott. Sokszor a mainál jóval magasabb vízállása volt, de előfordult olyan is, amikor kiszáradt a meder. A függőleges felszínmozgások adataival korrigált elöntési modellek eredményéből arra lehet következtetni, hogy a Balaton vízszintje tízezer évvel ezelőtt érte el a maximumát, 109–110 m között (TIMÁR G. et al. 2010; a magassági adatok mindig az Adriai-tenger szintje felett értendők).

A Balaton mai napig folyamatosan meglévő, egységesen összefüggő vízfelülete 6000–8000 éve alakulhatott ki. Az első 6000 évben csak a természeti viszonyok határozták meg a vízszint alakulását (KRAVINSZKAJA G. et al. 2012). A római kor előtt a Balaton vízállása 104 és 107 m között változott (VIRÁG Á. 1997). BENDEFY L. – V. NAGY I. (1969) szerint régészeti leletekből feltételezhető, hogy a 3. század közepéig a Balaton vízállása 106 m körüli volt. Szerintük Siófoktól K-re a tó természetes lefolyásra alkalmas helyét egy a történelem előtti időkben épített földmű vágta ketté, más vélemények (VIRÁG Á. 1997) szerint azonban ez egy természetes homoktúrzás volt. Egyes kutatások azt igazolják, hogy a 3. század végén Galerius római császár átvágta a földgátat és megépíttette a foki zsilipet, így 2 m-rel csökkentette a tó vízszintjét, aminek következtében a tavat D-ről szegélyező mocsarak kiszáradtak. BENDEFY L. – V. NAGY I. (1969) szerint a népvándorlás korában ismételen növekedett a vízszint, ennek megfelelően 900 körül 107 m magasságban lehetett a tó vízszintje. Régészeti kutatások azonban azt igazolták, hogy a 12–13. századig a Balaton vízszintje nem lehetett 105–106 m-nél magasabb; erre az Árpád-kori lelőhelyek előfordulásából lehet következtetni, azok ugyanis a Kis-Balaton térségében 107 m körül találhatók (VIRÁG Á. 1997). A későbbi vízszintváltozásokat írásos bizonyítékok is jelzik, annak megfelelően, hogy Tihany félszigetként vagy szigetként említik az oklevelek; Tihany szigetként történő említése ugyanis egyértelműen a vízszint emelkedésére utal. 1232–1235 körül az apátság a tatárok közeledtének hírére feltételezhetően elzárta a tó természetes lefolyását biztosító fokot és 112 m magasságig duzzasztotta a tavat (BENDEFY L. – V. NAGY I. 1969); BARANYI S. (1980) és VIRÁG Á. (1997) szerint azonban ezek az adatok valószínűleg túloznak. Mindenesetre 1389-ben már a vízszint csökkenésére történő utalások lehettek fel az oklevelekben.

A 17. századig az éghajlati viszonyok hatására emelkedett a vízszint, és elérte a természetes hidrológiai egyensúlyt jelentő 107–107,5 m-es magasságot. A 18. századtól erőteljes emberi beavatkozások kezdődtek, amelyek a partokat és a vízgyűjtők területét is érintették. A vízgyűjtőn történő erdőirtások következtében megváltoztak a lefolyásviszonyok. Az időjárási viszonyok változása miatt szélsőségesebb lett a csapadékeloszlás és fokozódott az erózió. Ezek következtében növekedett a tó vízszintingadozása, szélsőségesebbé vált a vízjárás (VIRÁG Á. 1997, VARGA GY. 2004).

1863. október 25-én átadták a Sió-zsilipet és csatornát (BARANYI S. 1980). A vízállásról ekkortól léteznek mért adatsorok (évi minimum, átlag, maximum; a vízmérce 0 pontja: 104,09 m A. f.), aminek alapján a tó vízkészletváltozásának éves alakulását meg lehet határozni. A zsilip megépítését követően a természetes hatások mellett már jelentőssé vált

a mesterséges szabályozás is. 1891-ben nagyobb kapacitású (50 m<sup>3</sup>/s) zsilipet építettek, a későbbiekben pedig a jobb vízvezetés érdekében a Sió medrét is tovább bővítették (IHRIG D. 1973). 1977-ben a zsilip átteresztőképességét 80 m<sup>3</sup>/s-ra növelték (VIRÁG Á. 2005). A vízszintet egy meghatározott alsó és felső szabályozási szint között kívánták tartani; ezt a szabályozási sávot azonban hidrológiai és műszaki okok, valamint a tó hasznosításával kapcsolatos változó igények miatt időről időre változtatták. Így pl. 1863-ban 20 és 95 cm között volt meghatározva a szabályozási szint. Napjainkban már 70 és 110 cm között próbálják tartani a vízszintet és igyekeznek biztosítani, hogy az üdülési főszezonban is megfelelő mennyiségű víz legyen a tómederben (VITUKI, OVF 2012). Azonban, ahogy az 1. ábra is mutatja, az aszályos időszakok hatását még napjainkban is csak kevésbé tudjuk befolyásolni. Ennek köszönhetően sokszor alakul ki tartósan alacsony vízszint, ami természeti és gazdasági szempontokból is káros.



1. ábra A Balaton vízállása 1863 és 2012 között (VITUKI, OVF 2012 adatok alapján)  
Figure 1 Water level of Balaton from 1863 to 2012 (after VITUKI, OVF 2012)

A vízszintek alakulását, különösen történelmi léptékben, a tó feliszapolódása is befolyásolhatta. A feliszapolódás következtében a Balatonra is jellemző a tó fenékszintjének lassú emelkedése, aminek mértéke irodalmi adatok (BARANYI S. 1980, JÓZSA J. et al. 2012) szerint a 20. században elérte a 0,3–0,5 mm/év ütemet. A fenékszint változásának mértékéről és üteméről azonban jelenlegi ismereteink korlátozottak; ez egy évszázad során 3-5 cm lehetett, ami a tó átlagos vízmélységének 1-2% körüli, vagy azt meghaladó értékét is kiteheti. A feliszapolódás miatt emelkedő fenékszint nyilvánvaló hatással van a tóban adott vízszint mellett tárolt vízmennyiségre: a feliszapolódással együtt csökken az adott vízszint mellett tárolt víztérfogat.

A múltbéli vízkészletváltozások mellett kiemelten fontos a jövőbeli folyamatok vizsgálata is, ugyanis az éghajlatváltozás hatása a Balaton vízkészletének alakulásában jelentős változásokat okozhat. A hőmérséklet emelkedése és a csapadék csökkenése, illetve évszakos eloszlásának változása jelentős vízkészletcsökkenést eredményezhet. Hazánkban a múltbéli tapasztalatok azt mutatják, hogy a csapadék és a hőmérséklet viszonylag kismértékű

változásai a vizekben felerősödnek. Időbeli analógiák alátámasztják, hogy pl. hosszabb időszakok átlagos évi csapadékai közötti 15–20%-os eltérés az évi középhőmérséklet 1-2°C-os eltéréssel párosulva az átlagos évi lefolyásban akár 60%-os különbséghez is vezethet (NOVÁKY B. 2011).

A Balaton lehetséges jövőbeni vízkészletváltozásának és ebből következő vízszint-változásának bemutatásához az EULAKES 2012 által előrejelzett éghajlati adatokat használtuk fel (*1. táblázat; EULAKES 2012*). Az előrejelzés egy közepesen optimista –2-2,5°C-os globális átlaghőmérséklet-növekedést feltételező – forgatókönyv esetén bekövetkező regionális léptékű változásokat mutatja be 2100-ig. Természetesen ilyen hosszú távon csak becslésről beszélhetünk, hiszen egyrészt a globális változásokra vonatkozóan is többféle modelleredmény ismert, másrészt az ebből levezethető helyi változásoknak is van bizonytalansága (EULAKES 2012). Az éghajlati és hidrológiai modellek csak korlátozottan képesek leírni a valós folyamatokat. A modellezés bizonytalanságai a tér- és időbeli lépték csökkenésével növekednek, valamint akkor a legnagyobbak, ha a szélsőségek előrejelzésére irányulnak (NOVÁKY B. 2011). Az előrejelzett éghajlati adatokból történt meg a jövőbeni vízháztartási tényezők adatainak becslése (KRAVINSZKAJA et al. 2012). Ez a munka nem az egyes évekre ad konkrét előrejelzést, hanem 30 éves időszakokra vonatkozó átlagértékeket szolgáltat; azok alapján alkothatunk képet arról, hogy az egyes időszakokban feltételezhetően hogyan alakul majd a tó vízszintje.

Az előrejelzések hosszú távon, sokévi átlagban a Balaton vízkészletének és ebből következően vízszintjének csökkenését vetítik előre. Az éghajlat és a vízkészlet változásának előrejelzéséhez használt referencia-időszak (1971-2001) közepes vízállása 104,84 m volt, így a jövőbeli változásokat ehhez a vízszinthez viszonyították. Az *1. táblázatban* szereplő vízszintek már korábban is előfordultak, sőt még ezeknél alacsonyabb évi közepes vízszint is volt, azonban nem szabad megfeledkezni arról, hogy ezek az alacsony értékek csak 1-1 évben jelentkeztek, az előrejelzés viszont egy-egy 30 éves periódus közepes vízállásának átlagára vonatkozik. Az előrejelzett időszakokban ugyanúgy lehetnek majd magasabb, de jóval alacsonyabb vízállások is. A közepes vízállásnál akár 50 cm-rel alacsonyabb vízállás is elképzelhető száraz időszakokban.

*1. táblázat – Table 1*

A Balaton vízszintváltozásának előrejelzése  
Prediction of Balaton water-level

<b>Időszak</b>	<b>A tó becsült vízszintváltozása (cm) a referencia-időszak (1971–2001) átlagához (104,84 m A. f.) viszonyítva</b>
2051–2080 átlag	–5,3
2061–2090 átlag	–41,0
2071–2100 átlag	–58,1
2071–2100 extrém alacsony vízállás esetén	–108,1

Forrás/Source: Kravinszkaja et al 2012

### **A Balaton digitális terepmodelljének létrehozása**

Kutatásunk alapjául a Balaton vízrajzi atlasza (1975) szolgált, melyben megtalálható a Balaton mélységi szintvonalakkal ellátott 1:100 000-es méretarányú térképe. A térkép a Vízgazdálkodási Tudományos Kutató Intézetben előállított vízrajzi térképek és földmél-

rési topográfiai térképek alapján készült. Az ábrázolás pontosságának átlaghibája 1 mm (VITUKI 1975). Ezt először beszkeneltük, majd EOVS-rendszerbe illesztettük. A DTM elkészítéséhez a bedigitalizált szintvonalakat és magassági pontokat használtuk. A térképen a Balaton vízszintje 104,84 m, ami a síófoki vízmérce állása szerinti 75 cm-es vízállásnak felel meg. A Balaton környéki területeket a DDM-10 adatbázisból (MH TÁTI 1992) vettük, korrigálva az ebben szereplő kisebb hibákat (gödröket).

A magassági pontokból és szintvonalakból interpoláció segítségével kaphatjuk meg a raszteres adatszerkezetű (grid típusú) DTM-t. Erre számos eljárás létezik, melyeket itt nem célunk bemutatni, ezekről a jobb szoftverek súgói tájékoztatást adnak (illetve l. pl. TELBISZ T. et al. 2013). A célunk az alkalmazott interpolációkkal nyert eredmények vizuális és statisztikai összehasonlítása volt. A Balaton medrének modellezéséhez az alábbi interpolációkat próbáltuk ki: legközelebbi szomszéd (NearN), természetes szomszéd (NatN), távolsággal fordítottan arányos súlyozás (IDW; négyzetes kitevővel), szabálytalan háromszögháló (TIN) alapú lineáris interpoláció (TL), lokális polinomok módszere (LP; elsőrendű függvényvel), sugár alapú függvények módszere (RB; multikvadrikus alapfüggvényvel), görbületminimalizáló spline interpoláció (MC), kriging (KR; lineáris modell alkalmazásával). Összesen tehát nyolcféle interpolációs módszert és négy különböző felbontást (10 m, 50 m, 100 m, 1000 m) alkalmaztunk, így harminckét darab DTM-t kaptunk.

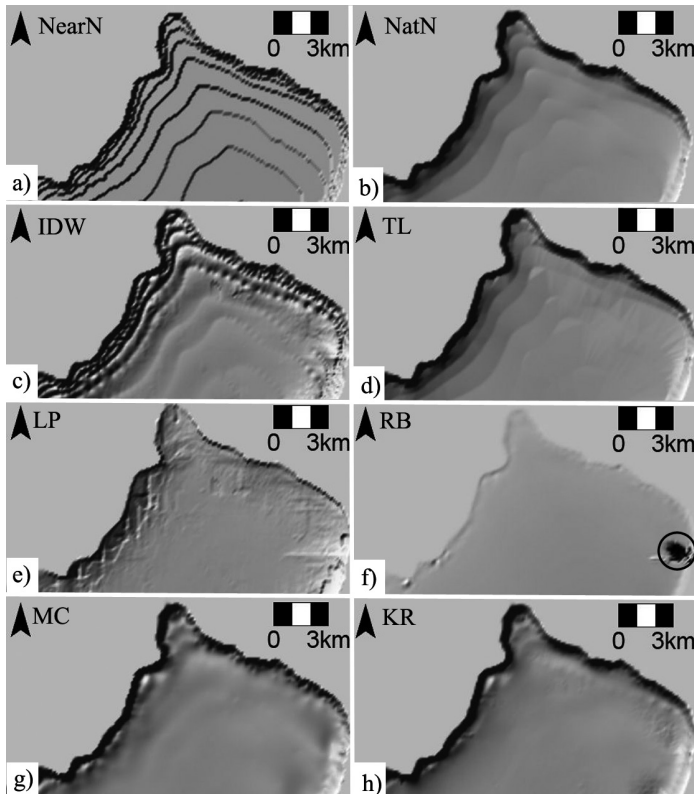
A különböző interpolációs módszerek igen eltérő eredményeket eredményeznek mind a terep általános jellegét tekintve, mind pedig a térfogatszámítások során. Több szempont (vizuális interpretáció, keresztvalidáció, főbb statisztikai jellemzők) alapján értékelve az eredményeket kiválasztottuk a térfogatszámításhoz a legalkalmasabbat. Ezt felhasználva végeztük el a számításokat, ami alapján meghatároztuk a korábbi vízszintek ismeretében a múltbeli, a jövőre vonatkozó vízmérleg-előrejelzések ismeretében pedig a későbbi lehetséges térfogat- és területváltozásokat.

## **Digitális terepmodellek összehasonlítása és a legmegfelelőbb típus kiválasztása**

### *Összehasonlítás vizuális interpretáció alapján*

A vizuális interpretáció azt jelenti, hogy különféle ábrázolások (pl. árnyékolt kép, szintvonalas kép, tömbszelvény) segítségével keressük a DTM hibáit. Ezek alapján viszonylag könnyen és gyorsan azonosíthatók a kiugró értékek, továbbá az interpolált felszín egyes jellemzői, mint például a formák „élessége”, a felszín „simasága”. Ezért az interpolációk jellemzésében a mennyiségi összehasonlítások mellett, sőt azok előtt a vizuális értékelés különösen fontos és hatékony. Az azonos interpolációkkal előállított különböző felbontású DTM-ek vizsgálata alapján megállapítottuk, hogy az 1000 m-es felbontású DTM-ek elmosódott, homályos képet nyújtanak. A legrészletesebb, legjobb képet természetesen a 10 m-es felbontás esetén kaptuk, de a 10, 50 és 100 m-es felbontások között már nem volt lényeges a különbség. A különböző interpolációk eredménye azonban azonos felbontás esetén is igen eltérő képeket eredményezett (2. ábra).

A NearN használata esetén lépcsős felszín jön létre, és az eltérő magasságú területek éles határvonalakkal különülnek el egymástól (2a. ábra). A NatN módszer esetén enyhén szögletes felszín alakul ki, és a szintvonalak kirajzolódnak a DTM-en (2b. ábra). Az IDW módszer esetén a szintvonalak mentén sok apró bemélyedés figyelhető meg a környező területhez képest, melyek a bevitt adatpontok körül jönnek létre; a szakirodalom ezt nevezi „bull’s-eye” („bikaszem”) hatásnak (2c. ábra). A TL interpoláció síklapokból álló képet eredményez (2d. ábra); egyes részeken erőteljesen kirajzolódnak az eljárás során generált



2. ábra A 100 m-es felbontású DTM-ekből készült árnyékolt képek összehasonlítása a Balaton ÉK-i részének kivágatán.

a) NearN b) NatN c) IDW d) TL e) LP f) RB g) MC h) KR

Figure 2 Comparison of 100 m resolution DTM-generated shaded relief images of the NE part of Balaton.

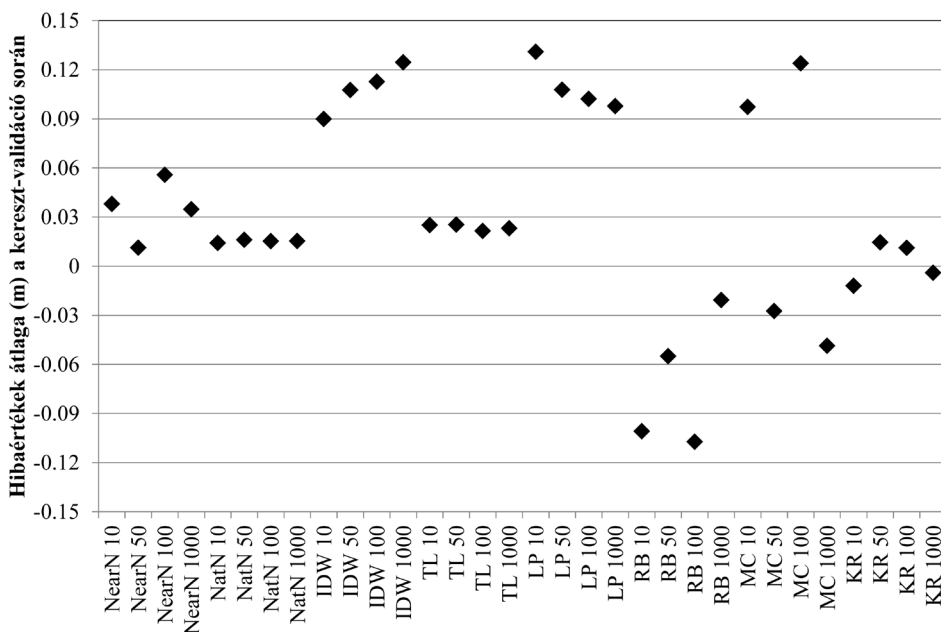
a) NearN b) NatN c) IDW d) TL e) LP f) RB g) MC h) KR

TIN-háromszögek. Az LP módszer során erősen „szabdalt” felszín jön létre (2e. ábra). A RB módszer általánosságban sima képet ad, ám egyes helyeken a valóságtól teljesen eltérő értékeket szolgáltat; ez a kikötők és a Tihanyi-kút környékén jellemző leginkább. Az árnyékolt képen látható sötét foltok kiugróan magas, illetve mély értékeket jelölnek. A 2f. ábrán látható fekete kör területén belül (Balatonvilágos mellett) például 10 m-es tengerszint feletti magassággal (!) rendelkező pontok is létrejöttek. A MC esetében sima felszín jön létre, ami viszonylag jó képet eredményez (2g. ábra). A KR interpolációtól szép, sima felszínt eredményez, itt nincsenek éles határokkal elkülönülő területek (2h. ábra); 10 és 50 m-es felbontások esetén azonban azokon a területeken, ahol kevés mért adat állt rendelkezésre, csíkozás figyelhető meg. A 100 m-es felbontás esetén ez már kevésbé zavaró, így ez a DTM a valósághoz közelítő, jó képet ad. Összességében tehát elmondható, hogy vizuális szempontból a legjobb képet a KR és a MC interpolációk eredményei adják.

### Összehasonlítás keresztvalidáció alapján

A DTM helyességét statisztikai értelemben a keresztvalidáció segítségével lehet ellenőrizni. A módszer lényege, hogy az interpoláció során mindig kimarad egy adatpont, és a szoftver a kimaradt pont helyére interpolált értéket összehasonlítja az eredeti mért érték-

kel. Ezt a módszert érdemes elvégezni több adatponttal is. Így a folyamat során az először kihagyott pont visszakerül, és utána úgy fut le a következő interpoláció, hogy egy másik pont marad ki a számításból. A keresztvalidáció során megkaptuk, hogy a sorban kihagyott összesen 1000 pont esetén mennyi a hiba, azaz mennyi a valós (mért, illetve itt szintvonal alapján megadott) és az interpolált érték különbsége. Ha a hibák átlagértéke 0, akkor az alá- és fölébecslések kiegyenlítik egymást. A legjobb eredményeket a NatN, a KR és a TL interpolációk esetében kaptuk (3. ábra).



3. ábra A keresztvalidáció eredménye: a hibaértékek átlaga az interpoláció típusa és felbontása függvényében  
 Figure 3 Results of cross-validation: mean of errors vs interpolation type and resolution

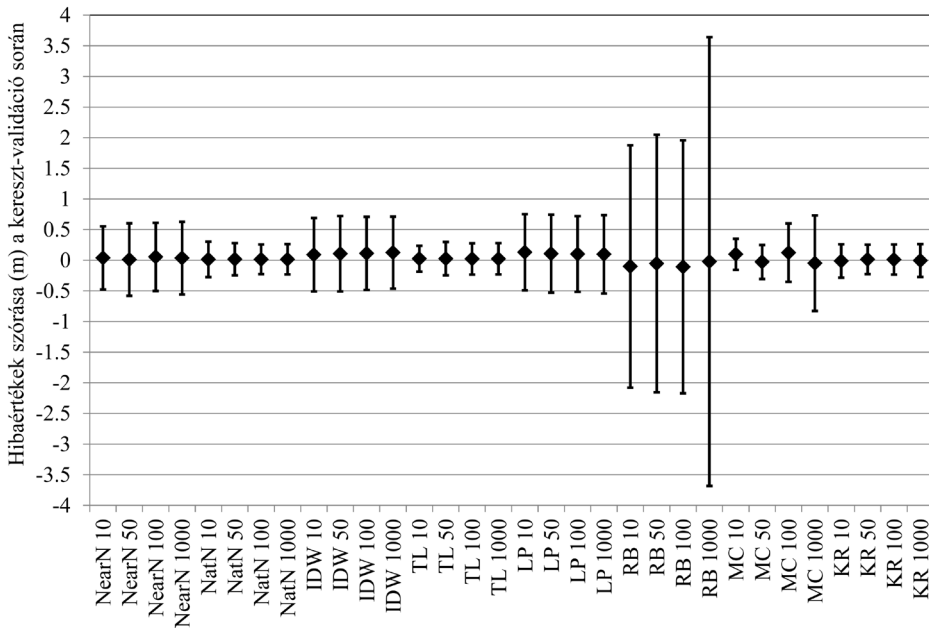
A szórásértékek vizsgálatával már az is megállapítható, hogy hány m a jellemző eltérés a mért és interpolált értékek között. Itt szintén a NatN, a KR és a TL interpolációk esetében kaptuk a legjobb eredményeket (4. ábra).

Összességében elmondható, hogy 100 m-es felbontás esetén a KR jellemezhető a legjobb értékekkel (hibaátalaga: 0,011 m, szórása: 0,246 m). Így a vizsgált módszerek közül statisztikailag is ez a legmegbízhatóbb.

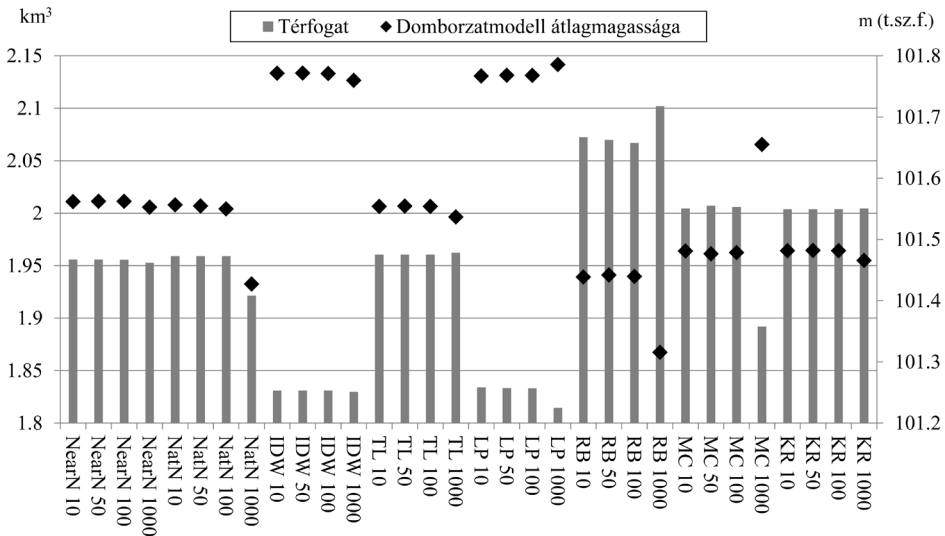
### Összehasonlítás a térfogatszámítás eredményei alapján

A 104,84 m-es vízszinthez tartozó tótérfogat-számítást elvégezve a különböző DTM-ek alapján igen különböző eredményeket kaptunk (5. ábra). Azt azonban megállapítottuk, hogy a különböző térfogat-számítási szabályok (trapezoidális formula, Simpson-formulák) között nincs jelentős eltérés (még a maximális eltérés is csupán 1,65% volt az átlaghoz viszonyítva).

Azonos interpolációs módszereket vizsgálva különböző felbontások esetén – egy-két kivétellel – viszonylag hasonló eredmények jöttek ki. Nagyobb eltérést a NatN1000, RB1000, LP1000 és a MC1000 esetén tapasztaltunk. Ezek ugyanis jelentősen eltérnek a saját inter-



4. ábra A keresztvalidáció eredménye: a hibaértékek szórása az interpoláció típusa és felbontása függvényében  
 Figure 4 Results of cross-validation: standard deviation of errors vs interpolation type and resolution



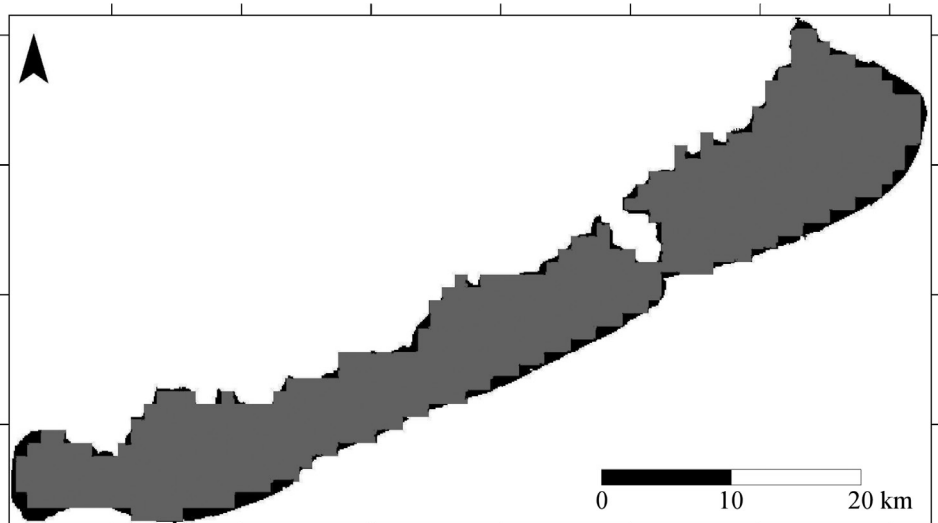
5. ábra A Balaton térfogata a különböző interpolációk eredménye alapján (104,84 m szintmagasságú vízállás esetén) és a DTM-ek átlagmagassága. Jelmagyarázat: 1 – térfogat, 2 – DTM átlagmagassága.  
 Figure 5 Volume of Balaton calculated from differently interpolated DTMs (using 104.84 m a.s.l. waterlevel) and theme an elevation of DTMs. Legend. 1 – volume, 2 – average elevation of DTMs.

polációs típusuknak megfelelő, de más felbontású DTM-eken végzett térfogatszámítás eredményeitől. A MC1000 térfogata 0,114 km<sup>3</sup>-rel tér el a csoportjából hozzá legközelebb eső értéktől (MC100). A többi interpoláció esetén nem tapasztaltunk jelentős eltérést.



Az interpolációs módszereket vizsgálva a Balaton térfogata a LP és az ID módszerrel készített DTM-ek esetén a legkevesebb, azok közül is a legkisebb térfogatot LP1000 esetén kaptuk (1,814 km<sup>3</sup>). A legnagyobb térfogatértékeket a RB módszerrel interpolált DTM-ek szolgáltatták (maximum: RB1000 esetén 2,102 km<sup>3</sup>). Látható, hogy a legkisebb és legnagyobb térfogatértékek különbsége 0,288 km<sup>3</sup>, azaz a legkisebb térfogat értéke 86,32%-a a legnagyobb értéknek.

Az eltérő interpolációs módszerek eredményezte térfogatkülönbségeket elsősorban a tómedret ábrázoló DTM átlagmagassága magyarázza. Minél alacsonyabb az átlagmagasság, annál nagyobb a vízmélység, tehát a térfogat is nagyobb lesz. Ez a szabály azonban – meglepő módon – nem mindig érvényesül. Látható, hogy a NatN esetén az 1000 m-es felbontású modell átlagmagassága alacsonyabb, mint a 100 m-esé, mégis csökken a térfogat. Ennek a felbontásbeli különbség az oka, mert a cellaméret azt is meghatározza, hogy mekkora területen történik a térfogatszámítás. 1000 m-es felbontás esetén ugyanis a tóperem egyes részei jól láthatóan „kimaradnak” a számításból (6. ábra).

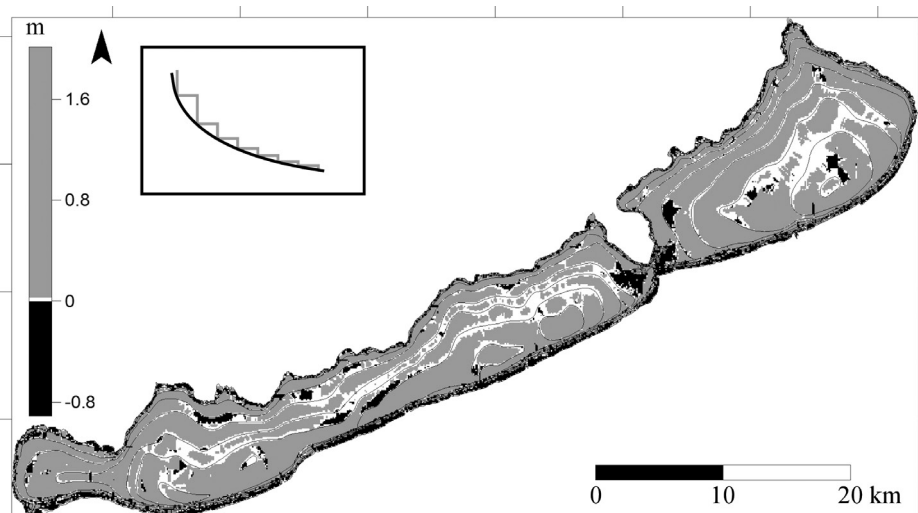


6 ábra A NatN1000 és NatN100 DTM-ek területének összehasonlítása. A szürke a NatN 1000 m-es, a fekete a 100 m-es felbontás területét jelzi.

Figure 6 Comparison of the area of NatN1000 and NatN100 DTM-s. Grey is NatN1000, black is NatN100.

Egy további különbség, ami térfogatbeli eltérésekhez vezet, maga a mederforma. Mind a TL, mind a KR hasonlóan jó keresztvalidációs eredményt szolgáltat, ám az egyik sima, a másik egy szögletes felszín hoz létre. A 7. ábrán látható a TL100 és a KR100 interpoláció különbségtérképe és egy reprezentatív keresztzelvény. A szürke színnel jelölt területeken a TL100 modell magasabb, míg a fekete területeken a KR100. Látható, hogy a szintvonalak környékén szinte megegyezik a két modell magasságértéke, egyébként túlnyomórészt a TL100 magasabb, ám a széleken a KR100 magasabb, mert ez az interpoláció lehetővé teszi, hogy a legmagasabb adott szintvonalnál is magasabb értékek keletkezzenek az DTM generálása során.

A különféle összehasonlítások eredményeként látható, hogy a KR interpoláció eredménye a legmegfelelőbb a további vizsgálatokhoz, ugyanis ez eredményezi a legjobb képet, a keresztvalidáció során a legjobb eredményt adta, és a valósághoz jól közelítő mederforma alapján pontosabb térfogatszámítást lehet rajta végezni. A további számításokhoz jól



7. ábra A TL100 és KR100 DTM-ek magasságkülönbsége, valamint egy reprezentatív keresztzelvény (szürke: TL100, fekete: KR100)  
 Figure 7 Elevation difference of TL100 and KR100 DTMs and a representative cross-section (grey: TL100, black: KR100)

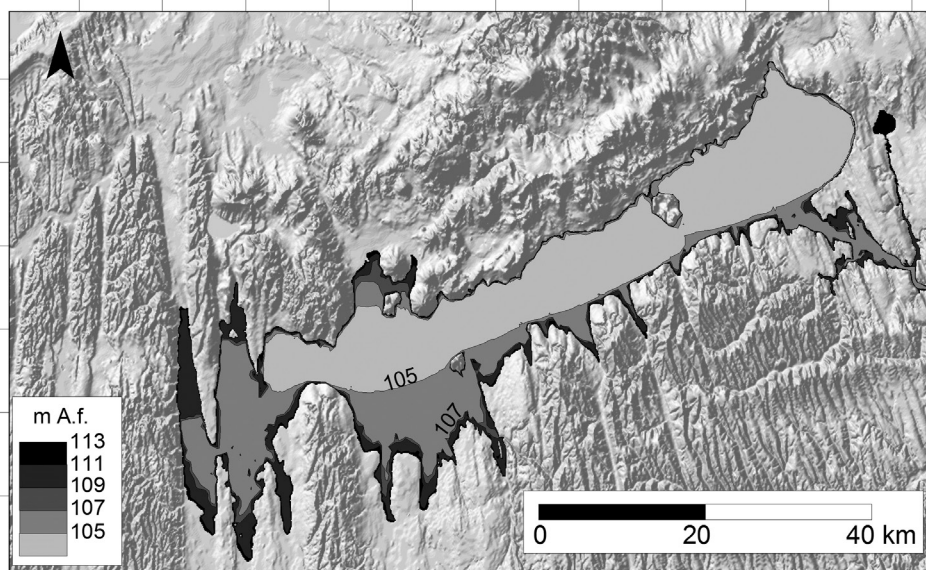
használható a 100 m-es felbontású DTM, mivel ez memória- és időtakarékos felbontás, ugyanakkor mind vizuálisan, mind a számítások eredménye alapján alig tér el a 10 m-es felbontású DTM-től.

## A Balaton vízkészlet-változásának bemutatása a mai domborzat alapján

### Múltbéli változások

A Balaton korábbi vízszintváltozásainak ismeretében, a DTM segítségével egyszerűen megállapítható, hogy mekkora lehetett a Balaton adott időszakhoz tartozó kiterjedése és vízmennyisége (8. ábra).

Ha a Balaton vízszintje a napjainkban jellemző 104,84 méter magasságban van, akkor a vízfelület nagysága a DTM szerint 583,66 km<sup>2</sup>, térfogata pedig 2,00 km<sup>3</sup>. Ennél általában valamivel nagyobb terület-érték szerepel a különféle adattárakban (pl. KDKVI 2007 szerint a vízfelület nagysága 589 km<sup>2</sup>), de mi a DTM szerinti értékből indulunk ki, a változások mértékét ez a különbség érdemben úgysem befolyásolja. A további m-enkénti előntések eredményeként megkaptuk, hogy körülbelül mennyi lenne a szakirodalomban említett vízszintek esetén – a mai domborzati adottságok mellett – a Balaton területe és térfogata (2. táblázat). A 14. századtól a 17. századig az éghajlati viszonyok hatására körülbelül 107 m volt a jellemző vízszint; ebben az esetben az összefüggő vízfelület területe több mint 1,5-szeres, a térfogata pedig több mint 2-szeres lehetett a mai értékekhez képest. A TIMÁR G. et al (2010) által kimutatott tízezer évvel ezelőtti 109–110 m-es maximális vízszintek 3-3,5-szer nagyobb térfogatot és 72-80%-kal nagyobb felületet jelentenek napjainkhoz viszonyítva. Jóllehet ebben az időtávlatban a szerkezeti mozgások miatt már nem teljesen helytálló a mai domborzat alapján számított érték. Ahogy korábban már említettük a BENDEFY L. – V. NAGY I. (1969) által megállapított legmagasabb vízállás 112 m volt. A mai



8. ábra A Balaton és környezete DTM-jén ábrázolt elöntési szintek  
 Figure 8 Flood levels represented by the compound DTM

2. táblázat – Table 2

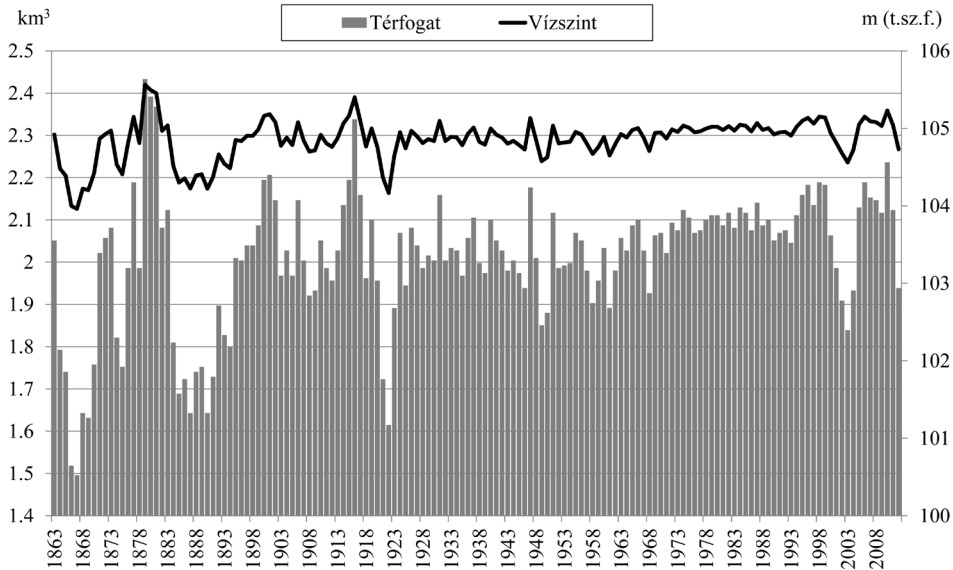
A Balaton területének és térfogatának növekedése adott elöntési szintek esetén  
 Area and volume of Balaton at increasing flood levels

Elöntési szint (m)	Térfogat (km <sup>3</sup> )	Térfogat (%)	Terület (km <sup>2</sup> )	Terület (%)
104,84	2,00	100,00	583,66	100,00
105,00	2,09	104,51	605,94	103,82
106,00	3,17	158,34	917,00	157,11
107,00	4,10	204,73	942,75	161,52
108,00	5,07	252,97	973,37	166,77
109,00	6,07	302,93	1 005,47	172,27
110,00	7,13	355,81	1 056,12	180,95
111,00	8,34	416,39	1 153,23	197,59
112,00	9,51	474,67	1 179,17	202,03
113,00	10,70	534,13	1 201,83	205,91

domborzat alapján 112 m-es vízállás esetén a terület 202%-ra, a térfogat pedig 475%-ra nőne. Ekkor a Balaton területe 1179 km<sup>2</sup>, térfogata 9,51 km<sup>3</sup> lenne, de mint fent említettük, ezt az értéket a mai kutatók (BARANYI S. 1980; VIRÁG Á. 2005) már nem tartják valószínűnek.

1863-tól, a siófoki zsilip megépítésétől a tó évi közepes vízállás adatai is rendelkezésünkre állnak (VITUKI, OVF 2012), így ezek felhasználásával megállapítottuk, hogy 2012-ig hogyan változott évről évre a Balaton átlagos víztérfogata (9. ábra). A legkevesebb

víz 1867-ben 103,96 m vízszint esetén volt a Balatonban, ekkor a tó térfogata 1,50 km<sup>3</sup> volt, és természetesen a térfogat a legmagasabb vízállás (105,56 m) során, 1879-ben volt a legnagyobb (2,43 km<sup>3</sup>). Látható, hogy 1,6 m vízszintkülönbség majdnem 1 km<sup>3</sup> térfogatkülönbséget eredményezett. Ez a változás ugyan nem egymást követő években, de viszonylag rövid idő alatt következett be. Az egy év alatt kialakuló legnagyobb különbség 1878 és 1879 között volt, amikor 0,45 km<sup>3</sup>-rel lett több víz a Balatonban. A legnagyobb egy év alatt bekövetkező térfogatcsökkenés (-0,31 km<sup>3</sup>) 1883 és 1884 között volt.



9. ábra A Balaton térfogatának és vízszintjének alakulása 1863 és 2012 között.

Jelmagyarázat: 1 – térfogat, 2 – vízszint.

Figure 9 Volume and water level of Balaton from 1863 to 2012. Legend: 1 – volume, 2 – water level.

1977-től a 80 m<sup>3</sup>/s-os átteresztőképességű zsilippel (VIRÁG Á. 2005) már megfelelően lehetett viszonylag szűk tartományban tartani a vízszintet. Ám míg a csapadékos időszakokban már nem jöttek létre szélsőségesen magas maximális vízszintek, addig a hosszan tartó szárazabb időszakokban nem akadályozható meg a Balaton vízmennyiségének jelentős csökkenése. A 2000-es évek elején és 2012-ben az átlagos térfogatértékekhez képest az aszályos időszakok következményeként jelentős csökkenés volt tapasztalható. Az ilyen időszakok rávilágítottak arra a tényre, hogy a vízkészlet csökkenését a szabályozással kevésbé lehet befolyásolni, mint a vízkészlet növekedését. Ezért érdemes minél hamarabb a feltételezhető éghajlatváltozással bekövetkező aszályos időszakok várható hatásaival foglalkozni. A vízpótlás lehetséges forrásairól és módjairól ezért feltétlenül szükséges folytatni a már megkezdett gondolkodást (pl. MAYER I. 2005; NOVÁKY B. 2005).

#### *A Balaton várható jövőbeni vízkészlet-változása*

A KRAVINSZKAJA et al. (2012) által előrejelzett 30 éves átlagvízállásokból kiindulva meghatároztuk a vízkészlet várható változását (3. táblázat). Az így kapott adatsor értékelésénél természetesen figyelembe kell venni, hogy az előrejelzés bizonytalansága ilyen időléptékben viszonylag nagy. 2051-2080 között a terület a kiinduláshoz képest 99,87%-ra,

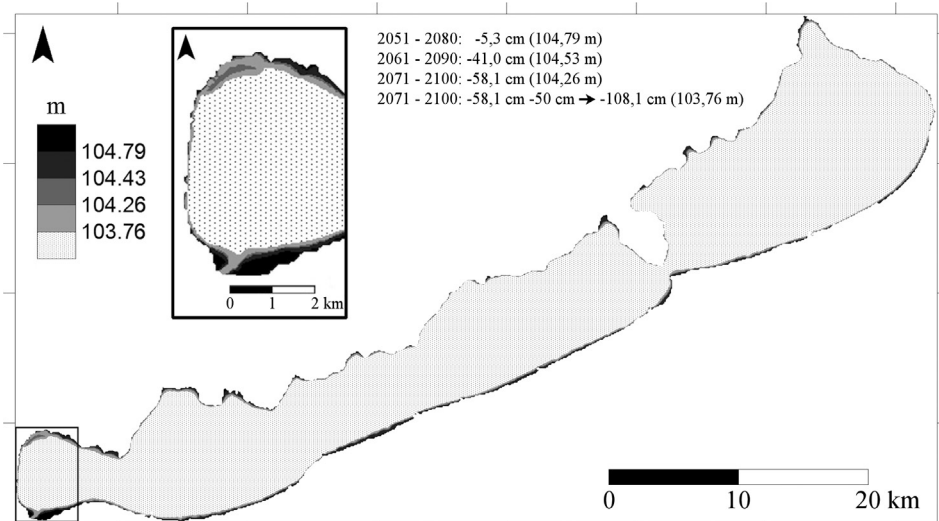
a térfogat 98,43%-ra csökkenhet. A 2071-2100-as időszak átlagában a víz területe várhatóan mindössze további 2,46 százalékponttal (97,41%-ra) fog csökkenni, a tó területe így feltételezhetően 568,52 km<sup>2</sup> lesz. A térfogatcsökkenés viszont ennél jóval nagyobb mértékű lehet, mindössze 83,11%-a lehet majd a mainak, ami abszolút értelemben 1,67 km<sup>3</sup>-t jelent. A 2071-2100 közötti időszak átlagában szélsőségesen alacsony vízállás, azaz az átlagértékhez képest 50 cm-rel kisebb érték esetén a terület 95,05%-ra, a térfogat pedig 69,06%-ra is csökkenhet.

3. táblázat – Table 3

A Balaton térfogatának és felszínének becsült változása 30 éves átlagokban előre jelezve  
Estimated volume and area of Balaton calculated for 30-year means

Vizgált időszak és a közepes vízszint átlaga (m)		Térfogat (km <sup>3</sup> )	Térfogat (%)	Terület (km <sup>2</sup> )	Terület (%)
1971–2001	104,840 (mért)	2,00	100,00	583,66	100,00
2051–2080	104,787	1,97	98,43	582,89	99,87
2061–2090	104,430	1,76	88,01	573,59	98,27
2071–2100	104,259	1,67	83,11	568,52	97,41
2071–2100	103,759	1,38	69,06	554,77	95,05

A Balaton vízfelületének csökkenése következtében a part menti területek szárazzá válnak. A legjelentősebb vízvisszahúzódas a Balaton DNy-i végében, illetve a Keszthelyi-öböl környékén várható (10. ábra). A fent említett szélsőségesen alacsony vízállás esetén a Keszthelyi-öböl területén akár 781 m-t is kell gyalogolni a mai partvonaltól, hogy elérjük a vízfelületet. Az északi parton kevésbé lesz erőteljes a vízvisszahúzódas, itt főként a Balaton benyúló kis öbleiben várható jelentősebb változás.



10. ábra A Balaton várható területváltozása a jövőben  
Figure 10 Estimated area changes of Balaton in the future

A tó medrének térfogatát és így vízszintjét befolyásolja a feltöltődés mértéke is. Ennek becsült mértéke 45 mm/100 év (BARANYI S. 1980), ami a tó medrének térfogatát 100 év alatt hozzávetőlegesen 0,026 km<sup>3</sup>-rel csökkenti.

### Következtetések

A kapott DTM-ek vizualizációja, a keresztvalidáció, valamint a térfogatszámítás alapján megállapítottuk, hogy a Balaton térfogatának kiszámítására és a vízkészletváltozás bemutatására legalkalmasabb a KR interpolációval kapott DTM. A keresztvalidáció alapján, 100 m-es felbontás esetében a KR adta a legjobb eredményeket (átlagos hiba: 0,011 m, hiba szórása: 0,245 m). A kapott DTM segítségével megfelelően lehet szemléltetni a meder domborzatát, valamint jó közelítéssel lehet kiszámítani a Balaton vízkészletét és bemutatni a vízkészletváltozás alakulását. A számítások eredményei alapján a Balaton térfogata 75 cm-es vízállás (104,84 m) esetén 2,00 km<sup>3</sup>, a területe pedig 583,66 km<sup>2</sup>. A mérések kezdetétől, 1863-tól 2012-ig tartó adatsor alapján kiszámítottuk, hogy a Balaton térfogata 1,50 km<sup>3</sup> és 2,43 km<sup>3</sup> között ingadozott. Az elmúlt évtizedekben a Balaton vízszintjének maximumát egyre könnyebben lehetett szabályozni, azonban a vízkészlet csökkenését még mindig elsősorban az időjárási események befolyásolták. Ennek bizonyítéka, hogy a 2000-es évek elején és 2012-ben a tó térfogata jelentősen csökkent.

A Balaton DTM-jét a Balaton környezetét ábrázoló DTM-lel kiegészítve meghatározható, hogy bizonyos elöntési szintek esetén mely területek kerülnének víz alá, és mekkora lenne a tó területének és térfogatának növekedése. Ezzel modellezhető a korábbi időszakokra feltételezett, mainál jóval magasabb vízállások is. Az utóbbi évszázadokban előforduló legmagasabb (107 m körüli) elöntési szint esetén a tó térfogata a jelenlegi érték kétszerese, területe pedig több mint másfélszerese lehetett a mai értéknek. A szakirodalomban szereplő, de ma már kevésbé elfogadott, maximális 112 m-es vízszint esetén a tó térfogata 4,74-szor, területe pedig 2,02-szor nagyobb lenne a mainál.

Az éghajlati előrejelzéseknek megfelelően 2100-ig megbecsülhető, hogy 30 éves időszakban előre léptetve hány cm lesz az átlagos vízszintváltozás. Az előrejelzések szerint a 21. század második felétől tartós vízkészletcsökkenés várható. Ennek eredményeként 2071 és 2100 között a Balaton átlagos térfogata 1,66 km<sup>3</sup>-re csökkenhet. 1863 és 2012 között ennél jóval kisebb térfogatok is előfordultak, azonban nem szabad elfelejteni, hogy a jövőbeni előrejelzések 30 év átlagára vonatkoznak. Ez azt jelenti, hogy szélsőséges években a térfogat 1,38 km<sup>3</sup>-re is lecsökkenhet, ami már jóval kisebb, mint a korábbi időszakok legkisebb értéke. Így a mainál akár 30,9%-kal kisebb térfogatok is kialakulhatnak majd egyes években. A 2071 és 2100 közötti időszakban átlagosan 16,89%-kal kevesebb víz lehet majd a Balatonban, mint napjainkban. A tó területe viszont még szélsőséges esetben is csak 4,95%-kal lesz kisebb. Ennek az az oka, hogy a tó legnagyobb területén 3-4 m közötti vízmélység van, így a partvonal közelében csak keskeny sávban található alacsony vízszint. Ezért a vízkészlet csökkenése miatt csak viszonylag kis területek kerülnek szárazra, a többi részen a kisebb vízmélység kialakulása lesz meghatározó. A 10. ábra alapján látható, hogy a kiszáradás az élővilág és a turizmus szempontjából legfontosabb part menti területeket érinti. A kiszáradó sáv sok helyen elérheti a 200-300 m-t, sőt a Keszthelyi-öbölben és a Balaton DNy-i részén, egyes területeken a jelenlegi partvontaltól számított 700-800 m-es sávban is teljesen visszahúzódhat a víz (103,759 m-es vízszint esetén). A nádasok hosszú ideig tartó szárazra kerülésével rengeteg vízi állat és madárfaj élőhelye szűnik meg. A vízszint csökkenése miatt a vízkészlet kicserélődése lelassul, majd a tó lefolyástalanná válik. Felgyorsul az eutrofizáció folyamata, és megindul a vízminőség erőteljes romlása.

Ez az élővilágra és a turizmusra is igen káros hatással lehet. Ezért a fenti előrejelzések tükrében komolyan mérlegelni kell az esetleges vízpótlás lehetőségeit és ezek összetett természeti, társadalmi hatásait.

### Köszönetnyilvánítás

A kutatást az MTA Bolyai János Kutatási Ösztöndíj támogatta. Köszönjük a lektor segítő javaslatait.

---

SZEMES ÉVA

ELTE TTK Természetföldrajzi Tanszék, Budapest  
szemes.evi@gmail.com

TELBISZ TAMÁS

ELTE TTK Természetföldrajzi Tanszék, Budapest  
telbisztom@caesar.elte.hu

VARGA GYÖRGY

Országos Vízügyi Főigazgatóság, Budapest  
varga.gyorgy@ovf.hu

NOVÁKY BÉLA

Szent István Egyetem, Gödöllő  
novaky.bela@gmail.com

### IRODALOM

- BARANYI S. (szerk.) 1980: A Balaton kutatása és szabályozása. – VITUKI Közlemények, VIZDOK Nyomda, Budapest. 382 p.
- 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. pp. 367–390.
- BENDEFY L. – V. NAGY. I. 1969: A Balaton évszázados partvonalváltozásai. – Műszaki Könyvkiadó, Budapest. 215 p.
- CHOLNOKY J. 1918: A Balaton hidrográfiája. – In: LÓCZY L. (szerk.): A Balaton tudományos tanulmányozásának eredményei. I/II. Magyar Földrajzi Társaság Balaton-Bizottsága, Budapest. 318 p.
- CHOLNOKY J. 1936: Balaton. – A Magyar Földrajzi Társaság Könyvtára, Franklin Társulat, Budapest. 192 p.
- CSILLAG G. – FODOR L. – SEBE K. – MÜLLER P. – RUSZKICZAY-RÜDIGER ZS. – THAMÓNÉ B. E. – BADA G. 2010: A szélerózió szerepe a Dunántúl negyedidőszaki felszínfejlődésében. – Földtani Közlöny 140. 4. pp. 463–482.
- ENTZ G. – SEBESTYÉN O. 1942.: A Balaton élete – Királyi Magyar Természettudományi Társulat, Budapest. 366 p.
- EULAKES 2012: Project EULAKES Ref. Nr. 2CE243P34.3.2. 2nd report, Regional Climate Change Scenario, Scenario Selection and Preliminary Results. - Austrian Institute of Technology, 25 p.
- IHRIG D. (szerk.) 1973: A Magyar vízszabályozás története – Országos Vízügyi Hivatal, Budapest. 398 p.
- JÓZSA J. – RÁKÓCZI L. – KRÁMER T. 2012: Balaton Lake in Hungary. – In: BENGTTSSON, L. – HERSCHY R.W. – FAIRBRIDGE R.W. (eds): Encyclopedia of lakes and reservoirs. Springer, pp. 91-95.
- KDKVI (Közép-dunántúli Környezetvédelmi és Vízügyi Igazgatóság) 2007: Jelentős vízgazdálkodási kérdések. – Székesfehérvár. 13 p.
- KRAVINSZKAJA G. – PAPPNÉ U. J. – VARGA GY. 2012: A természeti és emberi tényezők hatásának értékelése a Balaton vízháztartásának hosszúidejű alakulásában. – Magyar Hidrológiai Társaság 28. Vándorgyűlés, Sopron, 2012. július 7-8.
- LÓCZY L. 1913: A Balaton környékének geológiai képződményei és ezeknek vidékek szerinti telepedése. – In: LÓCZY L. (szerk.): A Balaton tudományos tanulmányozásának eredményei. I/I. 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.
- MAROSI S. – SZILÁRD J. 1981: A Balaton kialakulása. – Földrajzi Közlemények 105. 1. pp. 1–30.
- MAYER I. 2005: A balatoni vízpótlás műszaki lehetőségei. – Vízügyi Közlemények, Balaton különszám pp. 249–282.
- MH-TÁTI (Magyar Honvédség Tóth Ágoston Térképészeti Intézete) 1992: DDM-10, a Magyar Köztársaság 10 méter vízszintes felbontású digitális domborzati modellje. – MH-TÁTI, Budapest.
- NOVÁKY B. 2005: A Balaton vízpótlása és az éghajlat. – Vízügyi Közlemények, Balaton különszám pp. 105–123.
- NOVÁKY B. 2011: Az éghajlatváltozás hatása. – In: SOMLYÓDY L. 2011: Magyarország vízgazdálkodása: helyzetkép és stratégiai feladatok. Magyar Tudományos Akadémia, Budapest. pp. 85–101.
- TELBISZ T. – SZÉKELY B. – TIMÁR G. 2013: Digitális terepmodellek. – ELTE TTK Földrajz- és Földtudományi Intézet Természetföldrajzi Tanszék, Budapest. 80 p.
- TIMÁR G. – CSILLAG G. – SZÉKELY B. – MOLNÁR G. – GALAMBOS CS. – CZANIK CS. 2010: A Balaton legnagyobb kiterjedésének rekonstrukciója a függőleges kéregmozgások figyelembevételével. – Földtani Közöny 140. 4. pp. 455–462.
- VARGA GY. 2004: A Balaton vízháztartásának a közelmúlt években tapasztalt szélsőségei. – Földrajzi Közlemények 128. 1–4. pp. 1–10.
- VIRÁG Á. 1998: A Balaton múltja és jelene. – Egri Nyomda Kft, Eger. 904 p.
- VIRÁG Á. 2005: A Sió és a Balaton közös története (1055-2005). – Közlekedési Dokumentációs Kft., Budapest. 549 p.
- VITUKI–OVF (Országos Vízügyi Főigazgatóság) 2012: Hidrológiai adatsorok. – VITUKI, Budapest.
- VITUKI 1975: Balaton - Vízrajzi Atlasz sorozat. – VITUKI, Budapest.
- ZLINSZKY A. – MOLNÁR G. – SZÉKELY B. 2010: A Balaton vízmélységének és tavi üledékvastagságának térképezése vízi szeizmikus szelvények alapján. – Földtani Közöny 140. 4. pp. 429–438.