

# A Tihanyi-kút morfológiája ultranagy felbontású balatoni szeizmikus mérések alapján

KISS A.<sup>1,2,@</sup>, VISNOVITZ F.<sup>1</sup>, TIMÁR G.<sup>1</sup>, HÁMORI Z.<sup>3</sup>, HORVÁTH F.<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>ELTE Geofizikai és Űrtudományi Tanszék, 1117 Budapest, Pázmány Péter sétány 1/C

<sup>2</sup>MOL Nyrt., 1117 Budapest, Október huszonharmadika utca 18.

<sup>3</sup>Geomega Kft., 1093 Budapest, Zsil utca 1.

@E-mail: annakiss@caesar.elte.hu

2014 tavaszán nagy felbontású vízi szeizmikus méréseket végeztünk a Tihanyi-szoros térségében a korábbi kiterjedt mérési hálózat kiegészítéseként. A mérések vonalszerű szelvények mentén folytak, és a vonalak sűrű elhelyezkedése lehetővé tette, hogy megszerkesszük a szoros új szintvonalas mélységtérképét. A felmérés megmutatta, hogy a Tihanyi-kút legmélyebb pontja ma a félsziget déli csücske előtt, a révkikötőtől keleti irányban, mintegy 200–300 méterre helyezkedik el. Mélysége a mérés kori vízszinthez (104,7 mBf) képest közel 11 méter. A kút árka ma közel lineáris, csapása DNY–ÉK-i irányú. A szeizmikus szelvények értelmezése, valamint a kapott medertérkép korábbi térképekkel történt összevetése alapján a mederfenék morfológiájának időbeli változása volt kimutatható. A változások oka feltehetően a szorosban a tótlengés (seiche) hatására kialakuló erős vízáramlás miatti erózió és üledékáthalmazás.

## Kiss, A., Visnovitz, F., Timár, G., Hámori, Z., Horváth, F.: Morphology of the Tihany Strait based on ultrahigh resolution seismic data on Lake Balaton

In the spring of 2014 we carried out an ultrahigh resolution seismic survey in the Tihany Strait to complete our dense network of previous seismic surveys at Lake Balaton. The measurements were performed along NW–SE-oriented straight lines and allowing us to construct a detailed bathymetric map for the Strait. The new map shows a fairly straight local trench with a SW–NE-orientated strike. Its deepest point (the so-called “Tihany Well”) is 11 m below the actual lake level (104.7 mBf). Seismic interpretations and comparison of our results with previous bathymetric maps suggest some change in the Strait’s morphology in the last 100 years. These changes are most likely caused by the intense currents of this area that erode and redistribute underwater sediments.

*Béérkezett:* 2017. december 11.; *elfogadva:* 2018. augusztus 7.

## Bevezetés

A vizek mélységének mérése – a batimetria – szinte egyidős a vízépítési és vízmérnöki tudományokkal. A kezdeti, nehezzel ellátott, előzetesen lemért kötelek módszerét a modern időkben a hanghullámok vízbéli terjedésén alapuló, a folyó-, illetve tófenékről érkező visszhangok időkézését mérő szonáros mélységmérés váltotta fel.

A mérési technológia e változása a Balaton mélységének kutatása, majd rendszeres térképezése esetében is nyomon követhető. A tó első mélységtérképét az 1700-as évek második felében, a Királyi Helytartótanács utasítására, a tó tervezett lecsapolásának előkészítésére mérte fel Krieger

Sámuel mérnök (Bendefy 1973). Krieger térképén a tó középső és keleti medencéjében nagyobb vízmélységű területek ismerhetők fel, melyeket a 20 láb azaz 3,33 bécsi öl (Zlinszky, Molnár 2009), vagyis kb. 6,3 méter mélységben meghúzott izobát keríti körül – ne feledjük, hogy a tó átlagos vízszintje akkor a mainál valamivel magasabban állt. A két medence mélyebb részei a térkép szerint a Tihanyi-szorosban kapcsolódnak egymáshoz. Az elkeskenyedő mélyebb sáv a Tihanyi-szoros a félszigetközélebbi oldalán metszi, és a térkép felirata „Profunditus maxima Ped 27” (Krieger 1776) egyértelművé teszi, hogy a szoros e pontját, a ma Tihanyi-kútként ismert mélyedést már akkor is a Balaton legmélyebb pontjának tartották. E pont mélysége-

ként 27 lábat adtak meg (kb. 8,5 méter). Az előbbi mind abszolút értékében, mind a kapcsolódó mélyebb zónákhoz viszonyított relatív értékében a mai adathoz képest még alacsonyabb vízmélységet jelzett.

A következő rendszeres mélységmérés a tó szabályos vízrajzi mérőhálózatának kialakításához kapcsolódott az 1894. és 1895. években (Zlinszky, Molnár 2009). A mérés eredményeképp kialakuló térkép (Péché, Erdős 1898) négyzetkilométerenként átlagosan 5 mérési pont alapján készült, és a következő pár évtized balatoni mélységtérképeinek közös alapjaként szolgált. A felmérést 1929–30-ban a Földművelésügyi Minisztérium Vízrajzi Intézete megismételte (Zlinszky et al. 2010). Péché és Erdős (1898) térképe szerint a középső és a keleti medence mélyebb zónái nem állnak közvetlen kapcsolatban a Tihanyi-kúttal, attól mindkét irányban valamivel kevésbé mély zónák válsztják el.

A Balaton korszerű, szonáros mélységmérését elsőként 1955-ben, a VITUKI végezte el (Virág 1997). A legutolsó hidrológiai mederfelmérés 1975-ben történt, szintén a VITUKI kivitelezésében (Sass 1979).

Mindezek a felmérések megegyeznek abban, hogy a tó legmélyebb pontja a Tihanyi-szorosban elhelyezkedő ún. Tihanyi-kút, amely egy, a szoros irányára nagyjából merőlegesen, DNY-ÉK-i irányban elnyúló, hosszú keskeny, árokszerű mélyedés. Hidromorfológiai kialakulását a tó áramlási viszonyai (Józsa et al. 2012) okozzák.

A tó első vízi szeizmikus (szeizmoakusztikus) felmérésére 1986–87-ben került sor egy magyar–kubai együttműködés keretében, mely egyben már a tavi üledékek vastagságviszonyainak vizsgálatára is irányult (Cserny, Corrada 1989). Ezt követően 1993 óta több nagy és ultranagy felbontású vízi szeizmikus mérést végeztek a Geomega Kft. és az ELTE együttműködésében a Balatonon (Tóth et al. 2010, Balázs et al. 2013, Visnovitz et al. 2013), melyek mára egy nagy egységes adatrendszerre álltak össze. Ezen adatok alapján a mederfenék és az iszapvastagság egyaránt vizsgálható, az adatok pontossága és mintavételi sűrűsége egyedinek számít.

2014 márciusában a Geomega Kft. és az ELTE Geofizikai és Űrtudományi Tanszéke – a már 2 évtizede folytatott balatoni szeizmikus méréssorozat részeként – kihasználva a kora tavaszi ritkább hajó- és kompforgalom adta mérési lehetőséget részletesen felmérte a Tihanyi-szoros térségét. A felmérés elsősorban a tómeder alatti üledékek és a kút alatt feltételezhető vetős szerkezet (Visnovitz et al. 2015) felderítését célozta, ugyanakkor az új szelvényezés a korábbiaknál részletesebb felbontású és nagy térbeli sűrűségű adatot szolgáltatott a szoros mélységviszonyairól is. A szeizmikus adatok alapján a tó alatti üledékeket és az üledékképződési folyamatokat vizsgáltuk, valamint megszerkesztettük a szoros új mélységtérképét. Az új térképet összevetettük korábbi (az 1892–96 közötti és 1975-ös állapotokra vonatkozó) mélységviszonyokat ábrázoló térképekkel (Lóczy 1902, Sass 1979, Zlinszky et al. 2008, Zlinszky, Molnár 2009), melyek segítségével mélységtérképünk pontosságát és a meder lehetséges időbeli változásait kívántuk felderíteni.

## Az alkalmazott kutatási módszer

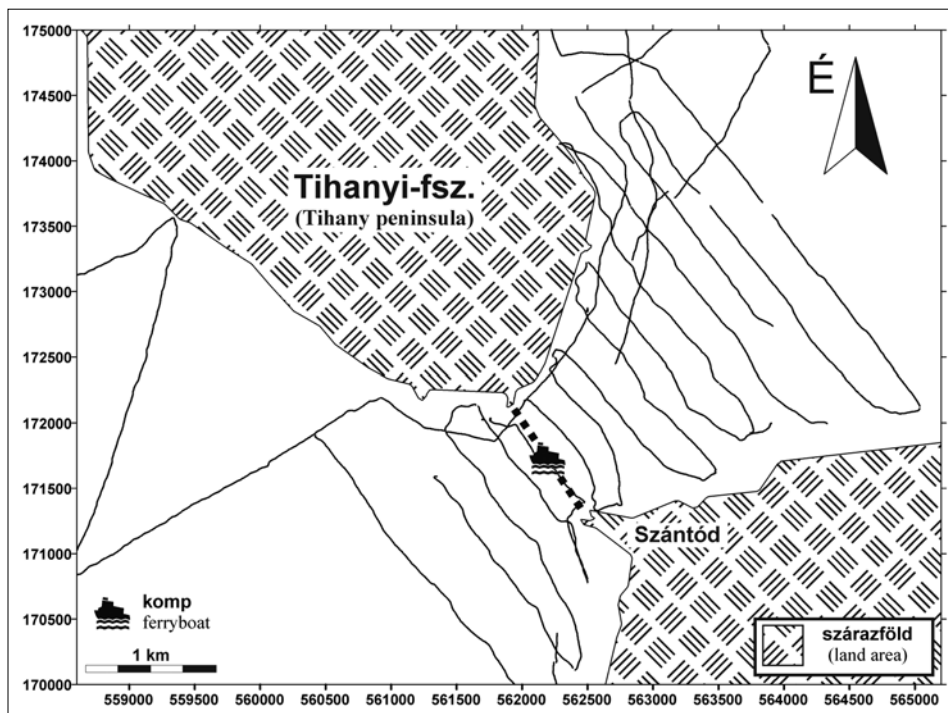
Vízi szeizmikus mérések során a víztest alatt elhelyezkedő laza és konszolidáltabb üledékek pórussait többé-kevésbé víz tölti ki, ami kiváló csatolást biztosít a hullámkeltés, illetve a hullámészlelés során. Ennek köszönhetően a víz alatti rétegek geometriája, elhelyezkedése, egymásra települési viszonyai nagy pontossággal és felbontásban kutathatók. A klasszikus szonárokkal ellentétben a vízi szeizmikus módszer tehát nemcsak a víztest mélységet (a *víznek* mint önálló rétegnek a vastagságát) képes meghatározni, de a folyómeder vagy tómedence feneké alatt elhelyezkedő geológiai rétegsor egy részét is feltárja (Tóth et al. 1997), és lehetőséget teremt a fiatal (negyedkori) üledékek szerkezetének vizsgálatára (Tóth 2004) is.

A felszíni vizek adta kedvező fizikai adottságokat kihasználva a Balatonon 1986 óta folynak tavi szeizmikus kutatások (Cserny, Corrada 1989, Sacchi et al. 1998, Bada et al. 2010, Tóth et al. 2010, Balázs et al. 2013, Visnovitz et al. 2013, 2015b). E mérések egy része a közvetlenül a mederfenék alatti, kb. 20 méteres térrész ultranagy felbontású (deciméteres) leképezésére, míg másik részük a geológiai rétegsor valamivel kisebb felbontású (néhány méteres), de néhány száz méter mélységig történő rekonstrukciójára irányul. A méréseket helyenként az iszapban megjelenő, nagyrészt biogén forrásból származó gáz nehezíti (Visnovitz et al. 2015a). A méréseket egy mérőhajó által vontatott jelforrás, és „vízi geofon-”, hidrofonsorozat segítségével végezzük, aminek eredményeként a hajó haladási irányának megfelelő szelvényeket kapunk. A sekély mélységű, ultranagy felbontású kutatásokhoz az évek során az IKB-Seistec™ katamarán mérőműszert használtuk, mely fix merüléssel és jól definiált mérési geometriával rendelkezik (Simpkin, Davis 1993). Ennek köszönhetően a szeizmikus szelvényeket kiértékelve a vízmélység az (1) összefüggés alapján közelítőleg:

$$h = z - b - v(TWT/2), \quad (1)$$

ahol  $z$  a referenciaszint (balti tengerszint) viszonyított aktuális vízszint,  $b$  a jelforrás merülési mélysége ( $\sim 0,45$  m),  $TWT$  a szeizmikus szelvényről leolvasható hullám beérkezési/kétutas futási idő,  $v$  pedig a leképező hullámok terjedési sebessége a vízben ( $1450 \pm 50$  m/s). A  $z$  vízállás a síófoki vízmérce „0” szintjének Balti feletti magassága (103,41 mBf) és az aktuális vízállás összegeként kapjuk meg. Az utóbbi a 2014-es felmérés idején 129 cm volt.

A korábbi szeizmikus mérési kampányok alapján a Tihanyi-szorosról még viszonylag kevés adat állt rendelkezésre. Ennek elsődleges oka, hogy a méréseknek alkalmazkodniuk kellett a balatoni hajó-, és így a kompforgalomhoz is. 2014 tavaszán azonban, még a sűrű kompforgalom beindulása előtt lehetőségünk nyílt egy motorcsónakkal elvégezhető gyors mérésre, amelynek során a Tihanyi-szoros és a félsziget környékét az 1. ábrán bemutatott sűrű hálóban sikerült felmérni. A szoros területén a szeizmikus szelvények a tó tengelyére merőlegesen, közel ÉNY–DK irányban lettek felvéve, a szelvények közötti távolság átlagosan



**1. ábra** | A Tihanyi-szorosban 2014 tavaszán végzett vízi szeizmikus szelvények helyszínrajza. A szántódi komp nyomvonalát pontozott vonal jelöli  
**Figure 1** | Location map of seismic profiles measured in the Tihanyi Strait in 2014. Dotted line indicates the route of the ferryboat between Szántód and Tihany peninsula

200–300 m volt. A szelvények összekapcsolására a kút területén egy DNY–ÉK szelvény szolgált.

Az IKB-Seistec<sup>TM</sup> műszerrel a vízi mérések során másodpercenként kb. 4–6 lövés történik (Tóth et al. 2010). A 2014-ben a mintavételi frekvencia 6 lövés/s volt, a hajó sebessége pedig 1,6 m/s körül adódott, vagyis a felvett szelvények mentén nagyjából 0,25–0,4 m-enként kaptunk vízmélységi adatokat. A mérések a sűrű mintavételből adódóan meglehetősen jó felbontással mutatják a Tihanyi-szoros mélységviszonyait, beleértve a Balaton legmélyebb részének, a Tihanyi-kútnak a morfológiáját is. A szeizmikus méréseknek köszönhetően helyenként lehetőségünk nyílt a kút alatt található üledékek vizsgálatára is, mely alapján a kútban zajló üledékképződési folyamatokra lehetett következtetni.

## A mederfelmérés eredményei

### Szeizmikus megfigyelések a Tihanyi-szoros területén

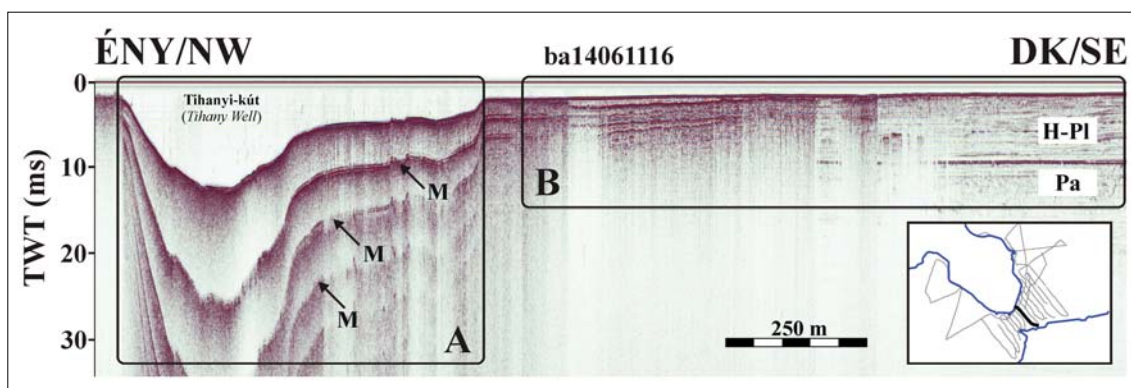
A 2. ábrán a Tihanyi-szoros szeizmikus képe látható egy ÉNY–DK-i lefutású keresztzelvényen. A szelvény ÉNY-i végén találjuk a Tihanyi-kutat (2/A ábra), míg a DK-i oldalon a déli part felőli sekély vizű zóna (2/B ábra), a „Szántód előtti turzasháromszög” (Cholnoky 1936) jelenik meg. A szelvényen a mederfenék helyét az első erős szeizmikus reflexió jelöli ki, amely alatt általában már csak a vízfelszín és az „akusztikusan kemény” mederfenék között ide-oda ve-

rődő hullámok képezte ún. többszörösök, valamint mérés-technikai zajok láthatók.

A Tihanyi-kút területén is a mederfenék-reflexió többszöröződése jellemző (2/A ábra). Ennek okai az „akusztikusan kemény” mederfenék mellett az üledékekben jelenlévő gázbuborékok. A gáz jelenléte jelentősen lecsökkenti a szaturált réteg hullámterjedési sebességét és sűrűségét is, emiatt a mederfenék közvetlen közelébe eső réteg felszíne szinte teljesen visszaveri a szeizmikus hullámokat megátalva az iszap és a mélyebben fekvő rétegek szeizmikus leképezését (Visnovitz et al. 2015a). A kúttól délre a tómeder fokozatosan sekélyebbé válik, és a szoros déli részén a gáz mennyisége az iszapban nagymértékben lecsökken (2/B ábra). Ezen a területen láthatóvá válnak a holocén – felső pleisztocén tavi üledékek (H-PI), és az azok alatti, enyhén D–DK felé dőlő idősebb kőzetrétegek (pannoniai emelet (Pa), Horváth et al. 2010) is. A tavi üledékek bázisa egy markáns diszkordanciafelületként jelentkezik.

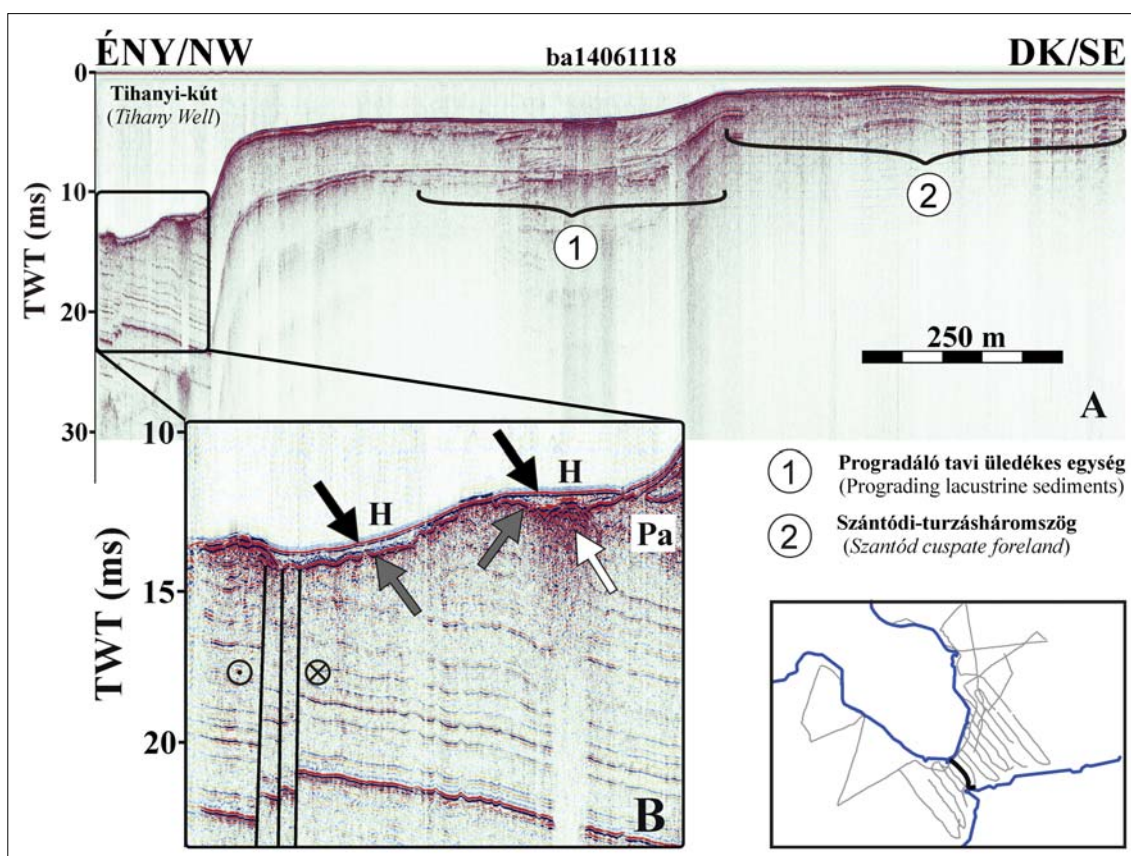
A 2. ábrán a kút keresztmetszete közel U alakú, jellegét tekintve erősen hasonlít a meanderező folyók medrének profiljához. Az árok pereme az É-i oldalon meredekebb, a D-i oldalon pedig lankásabb, és fokozatosan, esetenként lépcsőzetesen megy át a Szántód előtti magasabb térszínbe. A kút peremeinek látszólag nagy dőlésszöge azonban csak a szeizmikus szelvények erőteljes túlmagasításából adódik. A mederfenékhez tartozó legnagyobb lejtőszögek a valóságban mindössze 5–10°-osak.

A Tihanyi-szorosban a tó más részeihez képest szűkebb keresztmetszeten áramlik a Balaton vize, így a hidrodina-



2. ábra Szeizmikus szelvény a Tihanyi-szoroson keresztül (vertikális torzítás 1:20). A = a Tihanyi-kút, B = a Szántód előtti sekély vizű zóna (turzás): É-i részén az iszapgázok árnyékolják a tavi üledékek leképezését, míg a D-i felében a holocén – felső pleisztocén (H-Pl), és az idősebb pannóniai (Pa) üledékek képét is láthatjuk. M = mederfenék-többszörös

Figure 2 Seismic profile across the Tihany Strait (VE = 1:20). A = Tihany Well, B = shallow water zone in front of Szántód village: to the North mapping of lacustrine sediments was not possible due to gas saturation of the mud while to the South Holocene to Upper Pleistocene (H-Pl) and older Pannonian strata (Pa) are well imaged in seismic profiles, M = multiples



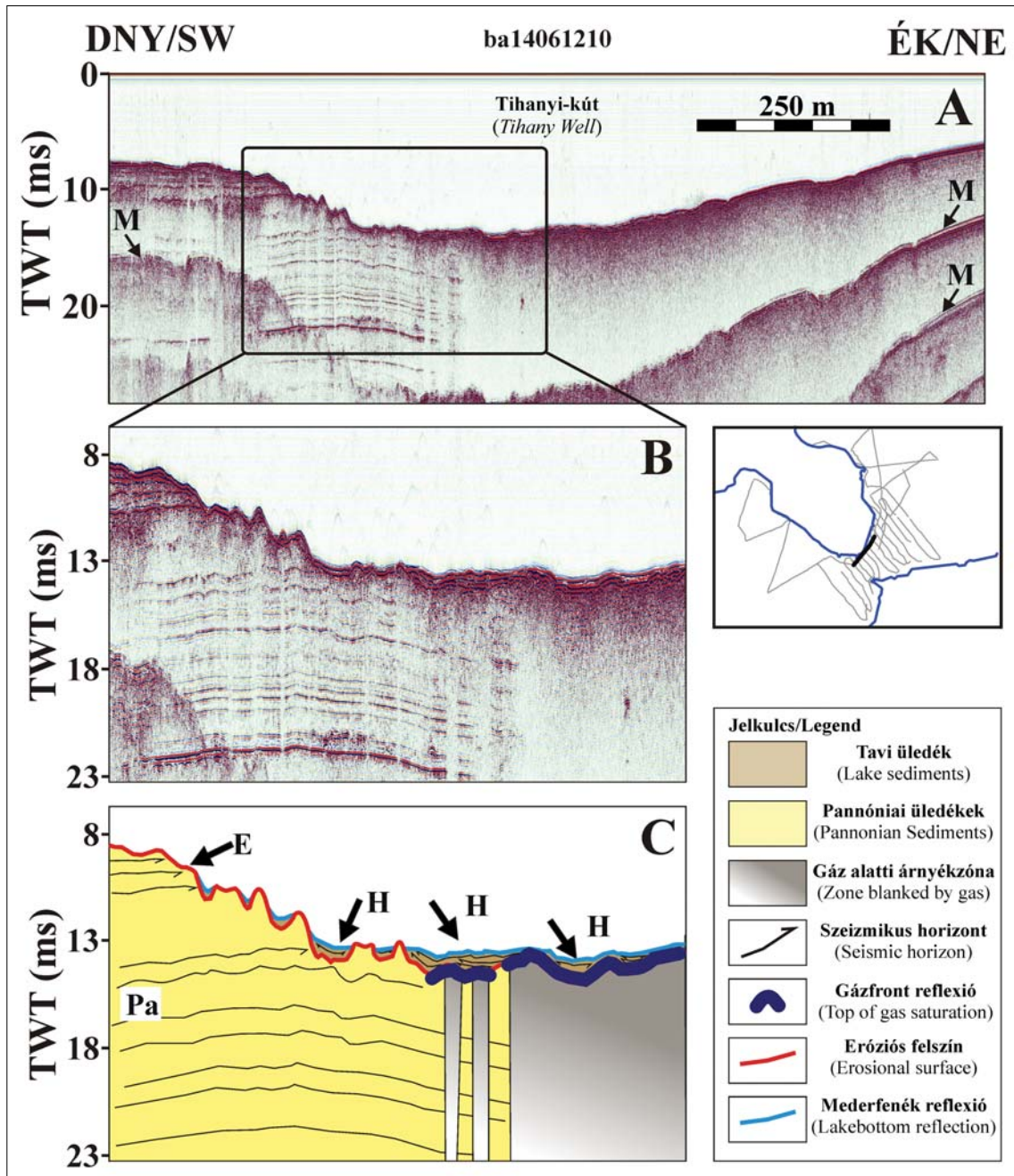
3. ábra Szeizmikus szelvény a rév útvonalának közelében (A, vertikális torzítás 1:20), amelyen a kis gáztartalom következtében az árok tengelyében (B) láthatóvá válnak az erodált pannóniai rétegek (Pa). A szürke nyilak pannóniai rétegek felszínét, a fekete nyilak a kútban lerakódott recens tavi üledékeket (H) jelölik. A fehér nyíl gázfelhalmozódás helyét mutatja. A pannóniai összletben vetők ismerhetők fel 1–2 m-es vertikális elvetéssel, amelyek a balatoni eltolódási zóna (Visnovitz et al. 2015b) részét képezik. Az ① és ② jelek a szelvény jobb oldalán különböző tavi üledékes környezeteket mutatnak

Figure 3 Seismic profile close to the ferryboat route (A, VE = 1:20) showing the eroded Pannonian strata (Pa) in the area of the Tihany Well (B) that are visible due to low gas saturation of the sediments. Gray arrows mark the eroded top of the Pannonian strata, with local accumulations of recent mud (H). White arrow indicates the location of shallow gas saturation. Note the faults with 1 to 2 meters vertical offset in Pannonian sediments, which are manifestation of the regional strike-slip system (Visnovitz et al. 2015b). Different lacustrine deposition environments are indicated by ① and ② on the right side of the profile

mika törvényeiből adódóan a szorosban nagyobb áramlási sebességek alakulnak ki (Cholnoky 1936, Krámer, Józsa 2013). A legjelentősebb vízmozgás a Balaton hosszanti vízlevegéséből (*seiche*) származik, amelynek periódusideje 6–24 óra, átlagos amplitúdója 5–25 cm. Ennek eredményeként a Tihanyi-szorosban maximálisan 2 m/s sebességű áramlás is létrejöhet. Ez az áramlási sebesség a tófené-

ken akár 40 méter/hónap iszapmozgást is okozhat (Karász, 1981).

A 3/A ábrán megfigyelhető, hogy a Balaton aljzata a 2. ábrán látható szelvényhez hasonló lefutású, vagyis a kút mélyedése után DK felé megjelenik egy padka, majd a déli part felé közeledve a meder egyre sekélyebbé válik. A szelvény igazi érdekessége az, hogy ezen a helyen a tó alatti



4. ábra A Tihanyi-kút hossz tengelyével közel párhuzamos szeizmikus szelvény (A, vertikális torzítás 1:20), amely a kút csapásának irányában mutatja az erodált pannóniai rétegeket (Pa). A szelvény DNY-i végén (B, C) a pannóniai rétegek eróziós felszíne alkotja az árok fenekét (E), amelyre több helyen vékonyan holocén iszap (H) települ. A szelvény ÉK-i oldalán az „akusztikusan kemény” mederfenék többszöröződése (M) látszik

Figure 4 Longitudinal profile sub-parallel with the long axis of the Tihany Well (A, VE = 1:20) showing the eroded Pannonian strata (Pa). At the SW end the profile (B, C) the lake bottom is represented by eroded Pannonian sediments (E) that are covered by a thin layer of Holocene mud (H) at some places. The NE flank of the trench multiples (M) of the strongly reflective lake bottom can be seen

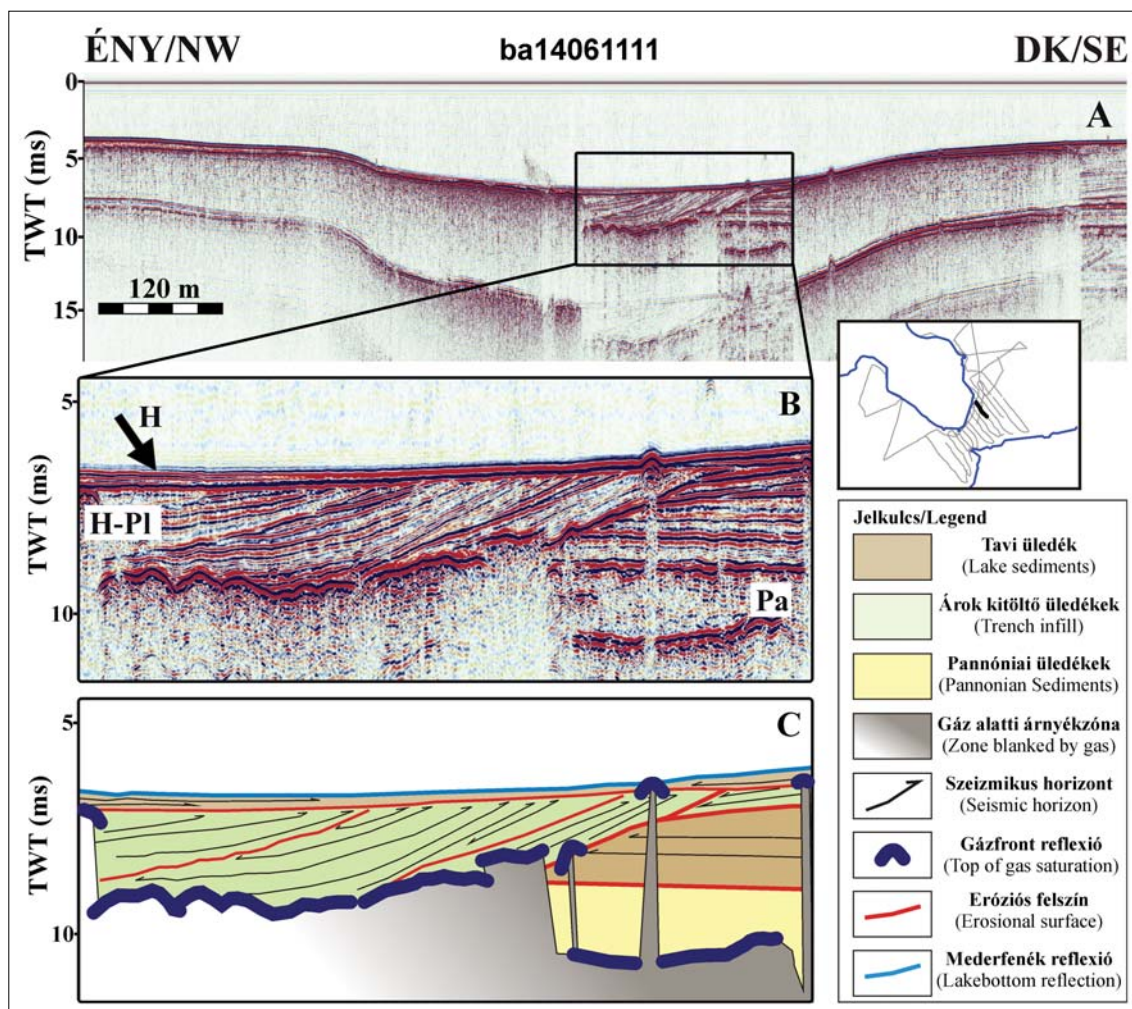
üledékek gáztartalma annyira kicsi, hogy a mederfenék alatti rétegek is szépen leképezhetők voltak. Itt a Balatonra jellemző 3–5 m vastag, közel vízszintesen települő tavi mészszip (Cserny 2002) hiányzik.

A mederfenék alatti rétegeket vizsgálva egy néhány vetőből álló keskeny vetőzónát sikerült kimutatni, nagyjából 180–200 cm-es vertikális elmozdulásokkal (3/B ábra). Ezek a vetők jól illeszkednek a Balaton alatt kimutatott balos nyírozónához (Bada et al. 2010, Visnovitz et al. 2015b), ezúton a törésrendszer kút alatti szakaszát mutatják. A vetők a kút középső részén jelentkeznek és láthatóan annak alakjára nincsenek hatással. Maga a kút tehát nem szerkezeti árok, hanem egy víz alatti erózióval létrejött mélyedés.

A kút DNY-i részén a mederfenéket közvetlenül a pannóniai üledékek alkotják, amely ma is zajló eróziós folyamatokra utal (4. ábra). A pannóniai rétegek erodált felszínének gödreiben holocén üledékek lerakódása (H) jelentkezik kb. 20–100 cm-es, változó vastagságban. Hasonló jelenséget mutat a 3/B ábra is, ahol szürke nyíllal jelöltük a

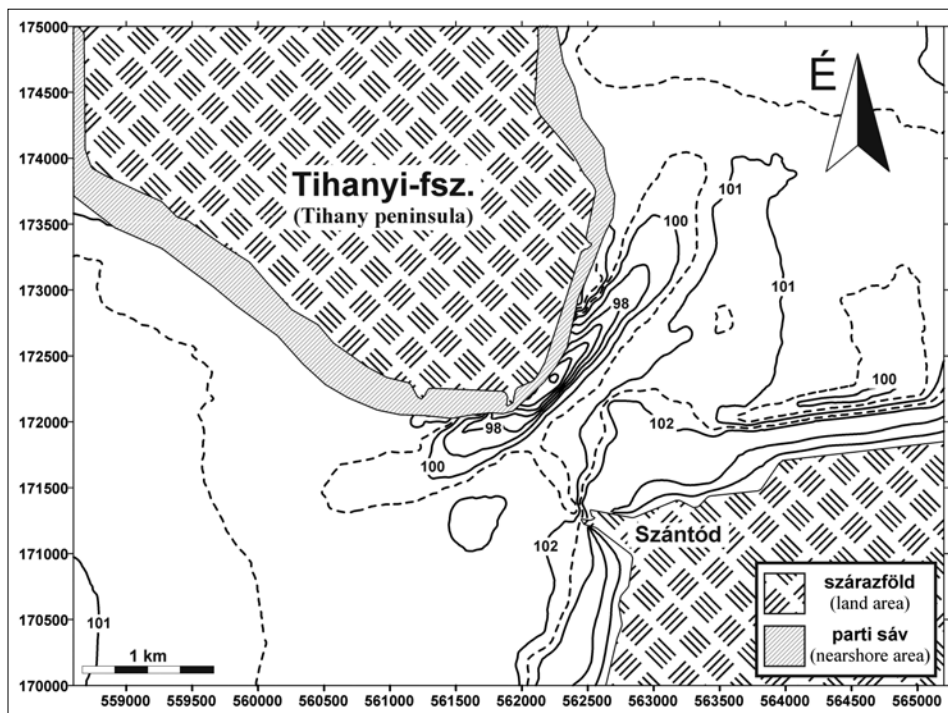
pannóniai rétegek erodált felszínét, amelynek mélyedéseiben ugyancsak recens iszap települ. Az iszapban és/vagy a pannóniai rétegek tetején gázfelhalmozódás figyelhető meg (3/B ábra, fehér nyíl), mely olyan felhőszerű „akusztikus gátat” okoz, amely megakadályozza a mélyebb rétegek leképezését. Ugyanez a jelenség figyelhető meg a 4. ábrán a kút ÉK-i lejtőjénél is, ahol közvetlenül a mederfenék alatt jelentkező gázsaturáció miatt a tó alatti rétegek nem leképezhetők.

Az 5. ábrán a kút K-i folytatásában egy egykori árok gödrének feltöltött medre látható. A szeizmikus szelvényen D felől a közel vízszintes iszapreflexiók eróziósan lefejeződtek, majd az így kialakult gödröt, É–ÉNY felé dőlő, fiatalabb üledékek töltik fel. Ennek tetején vékonyan megjelennek a recens tavi üledékek is, melyek É, illetve D felől fokozatosan feltöltik fel a megmaradt mélyedést (5/B,C ábra). A ferde rétegeket alulról gázfront határolja, amely kb. 2 m vastagságú, ferdén rétegzett üledék alatt helyezkedik el.



5. ábra | A tavi rétegsoron belüli észlelhető ferde reflexiók, melyek a Tihanyi-kút folytatásában egy már korábban létrejött árok feltöltődését mutatják

Figure 5 | Oblique reflections in lake sediments that indicates filling up of the former incision of the continuation of the present Tihany Well



**6. ábra** A Tihanyi-szoros Balti-tengerszintre meghatározott szintvonalas térképe a 2014-es felmérés alapján. A Tihanyi-félsziget körül egy szűk parti sáv kitarására került, mivel a szeizmikus értelmezés ezeken a területeken nem megbízható  
**Figure 6** Contour map of the Tihany Strait (mBf) based on the seismic survey of 2014. Nearshore area is blanked around the Tihany Peninsula as the interpretation of the lake bottom was difficult due to incomplete seismic data

### A Tihanyi-kút mederfenék térképe

A szeizmikus szelvények alapján kijelöltük a mederfenékhez tartozó reflexiót, és az (1) összefüggés alapján a szeizmikus két utas futási idők felhasználásával meghatároztuk a mederfenék Balti-tengerszint feletti magasságát (6. ábra).

A 6. ábrán látható, hogy a Tihanyi-kút árka DNY-ÉK-i lefutású és a szoros Tihanyhoz közelebbi oldalán terül el. Alakja jó közelítéssel egyenes. Legmélyebb pontja a félsziget déli csücskénél, a révkikötőtől kb. 200–300 méterrel K-i irányban található. Mélysége, a 2014-es tavasi vízszinthez (129 cm, kvvm.hu 2015) képest  $10,6 \pm 0,36$  m. A kúttól délre egy nyelv alakú enyhe magaslat figyelhető meg (101 mBf szintvonal), mely feltehetőleg az áramlások okozta üledékáthalmazódás eredménye. Geometriája alapján ez a forma egy olyan turzásra emlékeztet, mely É-ÉK felé épül előre. Hasonlót a szoros NY-i oldalán nem látunk.

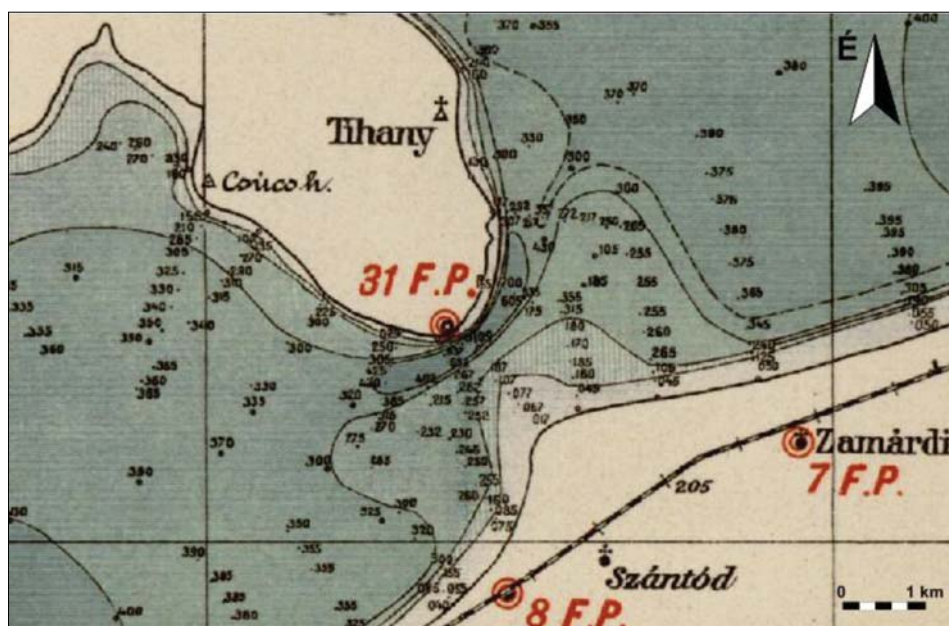
### Az eredmények összetétele korábbi batimetriai térképekkel

Az új felmérés eredményeinek korábbi térképekkel való összevetetősége érdekében megszerkesztettük két korábbi felmérés balti szintre átszámított szintvonalas térképét. A felhasznált adatrendszerek a VITUKI 1975-ös szonáros felmérésének eredményei (Sass 1979) alapján Zlinszky et al. (2008) által elkészített medermodell, valamint a Magyar

Királyi Földművelésügyi Minisztérium Vízirajzi Osztálya által 1892 és 1896 közötti botos felméréseken alapuló 1:75 000-es méretarányú térkép (Lóczy 1902) voltak.

A Lóczy-térkép alapját az 1895-ös batimetriai felmérés adja, melynek a szoros területére vonatkozó részlete a 7. ábrán látható. A felmérés során a vízmélységet a partvonalra merőleges vonalak mentén, átlagosan 200 m távolságonként, botos mélységmérővel határozták meg (nagyjából 100 mérési ponton). Az egyes keresztjelvények közötti távolság 1–2 km volt. Az 1895-ös felmérést később további mérési pontokkal egészítették ki, majd az így kapott adatrendszerből született meg a tómeder egykori szintvonalas térképe (Lóczy 1902). Az összehasonlításhoz ennek a térképnek a szintvonalait digitalizáltuk, az alapadat pontsűrűsége a szoros területén 6–8 pont/km<sup>2</sup>-re becsülhető.

Lóczy térképe szerint (8. ábra) a szoros hasonló morfológiát mutat, mint a 2014-es vízi szeizmikus felmérés alapján szerkesztett térképen. A kút alakjában ugyanakkor eltérések láthatók. Az 1902-es térképen a kút árka jól követi a Tihanyi-félsziget partvonalát, alakja ÉK felé kissé elnyúltabb, mint NY-DNY-i irányban, és a mélyedés ÉK-i vége látszólag kiszélesedik (100 mBf-es szintvonal). A vízi szeizmika alapján látható, a kút D-i előterében talált üledéknyelv ezen a térképen is megjelenik, de szélesebbnek és kicsit magasabbnak mutatkozik. A kút alakjában a félsziget csücskénél, közel a szoros legmélyebb pontjához egy csapásváltás figyelhető meg, ettől NY-ra az árok lefutása



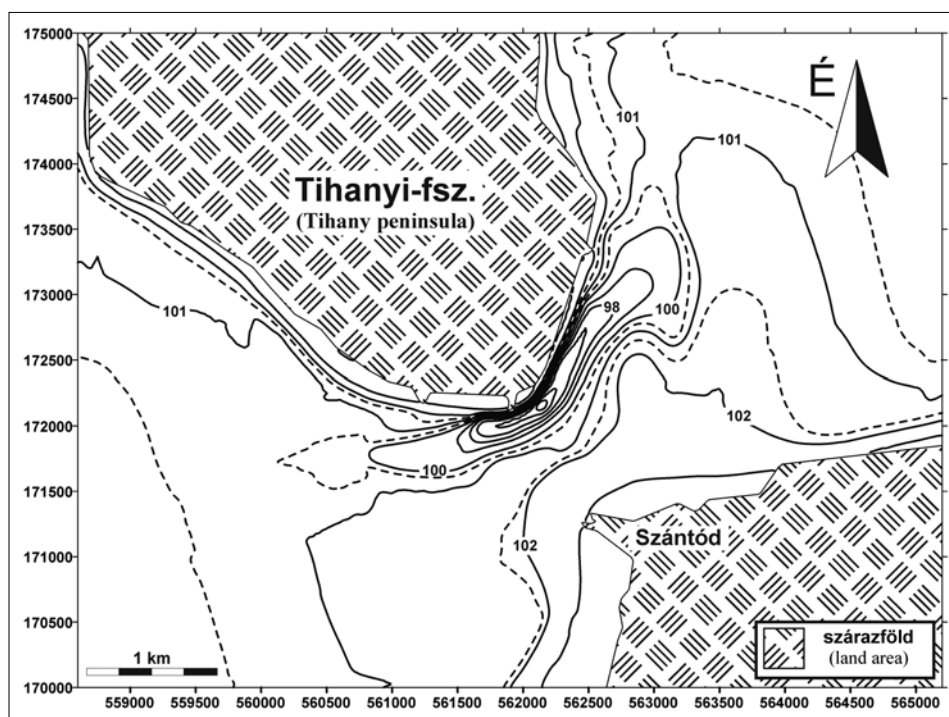
7. ábra | 1895-ös batimetriai felmérés térképének egy részlete a Tihanyi-szorosban mért vízmélység adatokkal (Pécs, Erdős 1898)

Figure 7 | Location of the data points and derived bathymetric map of the Tihanyi Strait based on the survey of 1895 (Pécs, Erdős 1898)

nagyjából egyenes, közel K–NY-i irányú. A kút legmélyebb pontja az új felméréssel összhangban 10–11 m között van.

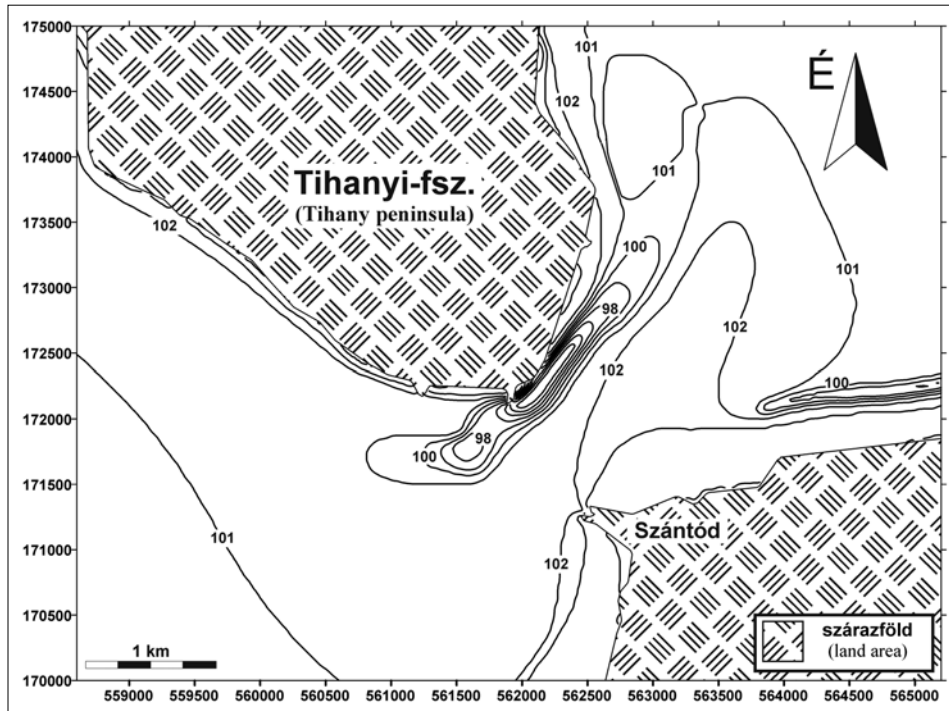
Az 1975-ös felmérés során Atlasz-Echolog műszer segítségével térképezték a tavat (Sass 1979). A felmérés egy-

mástól 1 km-re elhelyezkedő, a tó hossz tengelyére merőleges kereszt szelvények mentén történt. A mérőhajó 1 m-es vízmélységig volt képes a mederfenék letapogatására. A mélység adatokat a szelvény mentén 5–20 m-enként



8. ábra | A Tihanyi-szoros újraserkesztett szintvonalas térképe (mBf) a Magyar Királyi Földművelésügyi Minisztérium Vízhajó Osztályának 1892 és 1896 közötti botos felmérése (Lóczy 1902) alapján

Figure 8 | Reconstructed contour map of the Tihanyi Strait (mBf) based on survey of the Department of Hydrography of the Royal Hungarian Ministry of Agriculture 1892-1896 (after Lóczy 1902)

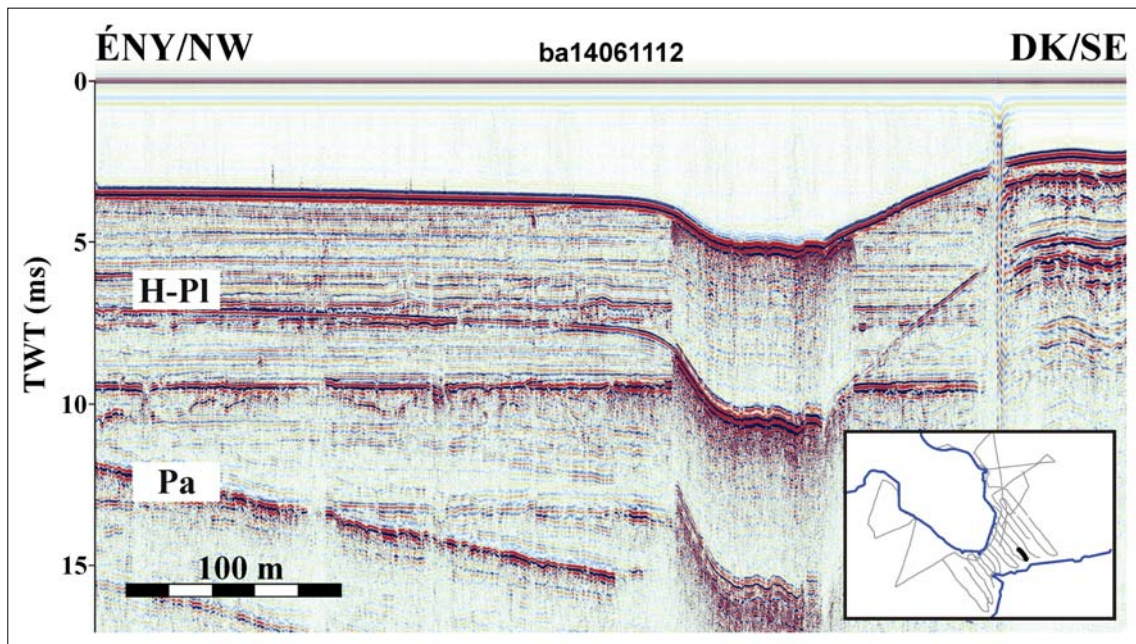


9. ábra A Tihanyi-szoros újraszerveztett szintvonalas térképe (mBf) a VITUKI 1975-ös szonáros felmérése szerint (Sass 1979 és Zlinszky et al. 2008 alapján)

Figure 9 Reconstructed contour map of the Tihany Strait (mBf) based on sonar survey of VITUKI 1975 (after Sass 1979 and Zlinszky et al. 2008)

rögzítették. A keresztshelvények között a parti sávban (2,2 m-es vízmélységig) 350 m-enként köztes shelvényeket vettek fel a szonáros adatok kiegészítésére. A szoros terü-

letén tehát legalább 5 db keresztshelvény futott keresztül, melyeket további partközeli shelvényekkel egészítettek ki. Ez a keresztshelvényekből adódóan átlagosan minimum



10. ábra A déli part közelében található, a parttal párhuzamos mélyedés (6 és 9. ábra) szeizmikus képe egy közel merőleges szeizmikus shelvényen, Szántódtól ÉK-re. A mélyedés láthatóan bevágódik a holocén tavi üledékekbe

Figure 10 Seismic profile showing the underwater incision parallel with the southern coastline (Figs 6 and 9) Northeast of Szántód. The depression cuts into the horizontally stratified Holocene mud

50 pont/km<sup>2</sup>-es adatsűrűséget jelentett, mely köztes szelvényekkel együtt akár duplája is lehetett.

A VITUKI-féle 1975-ös felmérés alapján készült térkép szerint (9. ábra) a szoros morfológiája még jobban hasonlít a 2014-es felmérés eredményéhez. Az árok alakja sokkal egyenesebb, és a szoros K-i oldalán már jól látszik az árokkal párhuzamos turzás. A kút mélyebb zónáinak kiterjedése az árok két végében az új térképen láthatóhoz képest kisebb, az árok maximális mélysége azonban közel azonos, kb. 10 m. A legmélyebb zónát itt is a félsziget csúcsánál találjuk. Ennek alakja azonban elnyúltabb, feltehetőleg az interpolációnak köszönhetően.

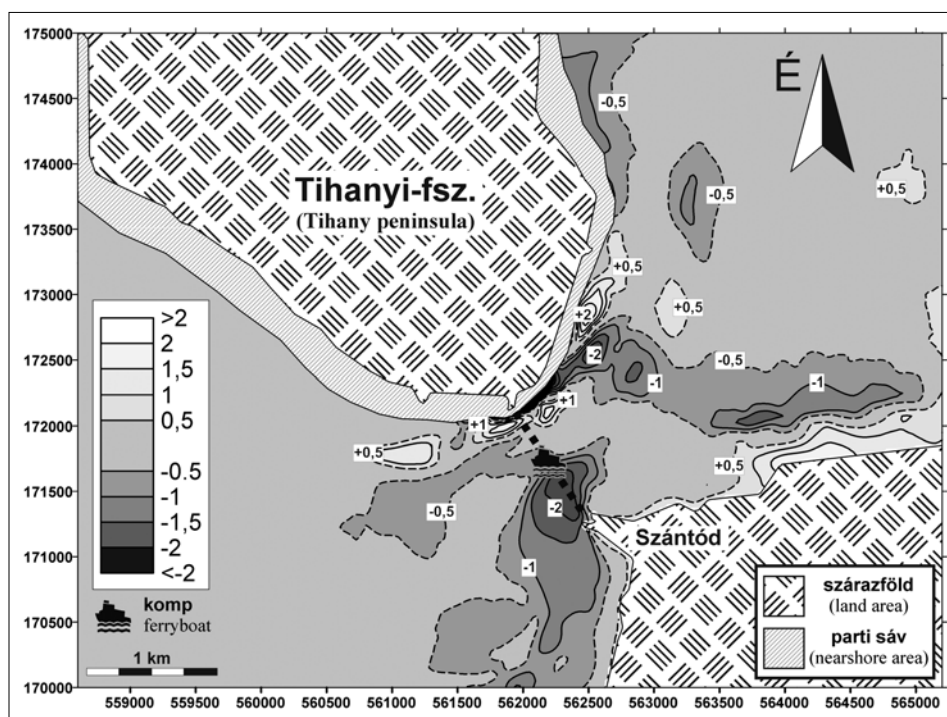
A VITUKI-térképen a Tihanyi-kúttal szemben, a túlsáron egy másik mélyedés is megjelenik 2–3 méteres vízmélységgel, melyet a Lóczy-féle térkép nem mutat. Ezt a mélyedést az új térképen is megtaláltuk, de mélysége itt kisebb (1–1,5 m). A 10. ábrán ennek a mélyedésnek a 2014-es felmérés szerinti metszete látható. A mélyedés a fiatal tavi iszapba vágódik be, és annak közel vízszintesen települő rétegeit rendre elvágja. A mélyedés aljában gázszaturációra és szervesanyag-felhalmozódásra utaló reflexió figyelhető meg, mely jelzi, hogy az árok feltöltődése jelenleg is tart.

Hasonló, bár jóval sekélyebb mélyedést találunk a 2014-es térképen a Szántód–Tihany komp útvonalánál is. Utóbbit egyik korábbi térkép sem mutatja. Feltételezésünk szerint ez az elmúlt évtizedekben végzett mederkostrások vagy a kompforgalom eredménye lehet. A fenti mélyedések hiánya a korábbi térképeken ugyanakkor adódhat

szimplán az alulmintavételezéséből is. A 1975-ös felmérés során a komp nyomvonalán valószínűleg nem futott szelvény, illetve a 1895-ös felmérés ábrázolt pontjait (7. ábra) összevetve a későbbi térképekkel úgy tűnik, hogy a D-i parttal közel párhuzamos árok területét egyetlen mintavételi pont sem érintette. A kérdéses mélyedések szélessége kisebb az 1975-ös mérésnél alkalmazott szelvénytávolságnál és a 1895-ös felmérés mintavételi gyakoriságánál (~200 m) is, emiatt ezek a kis léptékű változások a térképen nem állíthatók vissza.

Az elmúlt közel 100 év térképein mutatkozó különbségek kiemelésére az 1902-es Lóczy-térkép és a 2014-es vízi szeizmikus felmérés adatait felhasználva elkészítettünk egy különbségtérképet (11. ábra). Az így kapott térképen a világosszürke-fehér színek a pozitív változásokat („látszólagos feltöltődés”), a sötétszürke-fekete színek pedig a negatív változásokat („látszólagos kimélyülés”) mutatják. Az előbbieket alapján nyilvánvaló, hogy a különbségek javarészt az interpolációs eltérésekből és a georeferálásból adódó hibákat mutatják, ami az eltérő mintavételi sűrűség, a bizonytalan koordinátatranszformáció és a térképek nem megfelelő horizontális pontosságából következik. Az új felmérés egyébként a VITUKI 1975-ös felmérésének eredményeit nagyrészt validálja.

A 11. ábrán látható térkép fontos tanulsága, hogy a szoros területén az elmúlt közel 100 évben 2 m-nél nagyobb medermélység-változások nem vagy csak nagyon limitált kiterjedésben történtek. A jellemző üledékképződés és eróziós kimélyülés kisebb mint 0,5 m. A különbségtérkép



11. ábra A 2014-es felmérésből készített medermodell és az 1902-es Lóczy-féle medertérkép különbségtérképe

Figure 11 Difference map calculated from elevation models based on the seismic data (2014) and map of Lóczy (1902)

emellett szépen kiemeli a kút alakjának a térképek alapján is felismerhető kiegyenesedését és a korábban tárgyalt déli part közeli mélyedéseket is.

A különbségtérkép alapján az elmúlt 100 évben a szorosban enyhe kimélyülés volt jellemző. A szeizmikus szelvények tanúsága szerint ugyanakkor az áramlási rendszer üledékek felhalmozására is képes a szorosban, sőt még a kút belsejében is. Az áramlások által felhalmozott üledékek ma főleg a szoros K-i oldalán, elsősorban a kút déli oldalán található üledéknyelvet (víz alatti turzást/zátonyt) építik, illetve dél felől a kút lejtőire és a kút árkába is kerülhetnek be üledékek (3. ábra). A kút belsejében, az árok aljának kisebb gödreiben találunk csak üledék felhalmozódást. A területen jelentősebb kimélyülések a szántódi kikötő előterében és szoros DK-i részén jelentkeznek. A szeizmikus szelvényeken erózió a kút NY–DNY-i felében mutatható ki.

A kút alakjának kialakításában az áramlások meghatározó szerepét az árok keresztmetszetének alakja is megerősíti, amely nagyon hasonlít egy meanderező folyó profiljára. A kúthoz tartozó árok hidrodinamikai szempontból láthatóan nem egyetlen „kanyarulatként” viselkedik, hanem az áramlások függvényében fokozatosan változtatja ívét és alakját. Érdekes feladat lenne az árok alakjának szimulációja hidrodinamikai modellezéssel.

## Összefoglalás és konklúziók

2014 júniusában átfogó vízi szeizmikus térképezést végeztünk a Tihanyi-szoros területén, amelynek célja a meder alatti üledékek, valamint a mederfenék morfológiájának meghatározása volt. A szelvények értelmezése és a felmérés alapján készített mederfenéktérkép a korábbi felmérésekhez képest jóval részletgazdagabb és sűrűbb térbeli mintavételen alapuló képet adott a szorosban jelenleg zajló üledékképződésről és a batimetriai viszonyokról. A szeizmikus szelvények értelmezése, és az ennek alapján készült medertérkép archív felmérésekkel való összevetése a következő fő megállapításokhoz vezetett:

- 1) A Tihanyi-kút árka ma a Tihanyi-félsziget déli előterében, DNY–ÉK-i irányban húzódik, alakja közel egyenes. A kút legmélyebb pontja a félsziget D-i csücske előtt helyezkedik el, a tihanyi révkikötőtől 200–300 m-rel K-re, mélysége  $10,6 \pm 0,36$  m a 2014-es vízszinthez (104,7 mBf) képest. Az árok falának dőlésszöge nem haladja meg a  $10^\circ$ -ot.
- 2) A Tihanyi-kút árkának aktuális alakját alapvetően a szorosban jelentkező vízáramlás határozza meg. A víz itt képes erodálni a Balaton medrét, de a nagy áramlási sebességek mellett is van lehetőség limitált üledék felhalmozódásra. Az erózió nyomai elsősorban a kút NY–DNY-i oldalán, üledékfelhalmozódás a kút szárnyán, a szoros K-i felében és a kút fenekének kisebb gödreiben jellemző. A lerakódó üledékekben gázfelhalmozódás tapasztalható, mely megakadályozza a mélyebb rétegek szeizmikus leképezését.

- 3) A szeizmikus értelmezés és az új medermodell korábbi térképekkel való összevetése alapján a kút árkának időbeli változása látszik körvonalazódni. Ezt a változást elsősorban a tölengés miatti, a szorosban felgyorsuló tavi áramlás határozza meg. Az elmúlt közel 100 évben a változások afelé mutatnak, hogy a kút alakja közel egyenessé válik, legmélyebb pontja a Tihanyi-félsziget csücske előtt maradt, mélységében nem látni lényeges változást.

## Köszönetnyilvánítás

Ezúton szeretnénk köszönetet mondani mindazoknak, akik lehetővé tették a fenti tanulmány létrejöttét. A szeizmikus mérések a Geomega Kft. kivitelezésében, az ELTE Geofizikai és Űrtudományi Tanszékének szervezésében zajlottak. Külön köszönet illeti a cég vezetőjét, Tóth Tamást, aki a szeizmikus mérésekhez használt műszereket a tanszék rendelkezésére bocsátotta, valamint Szabó Lajos hajóskapitányt, aki a mérésekhez a hajózási logisztikát megszervezte. Köszönjük Prónay Zsoltnak a bírálat során nyújtott hasznos tanácsait. A kutatás pénzügyi hátterét az OTKA NK 83400 és 109255 K projektek biztosították. Hálásak vagyunk emellett az EGT/156/M4-0002 „Hidromorfológiai mérőgyakorlat kidolgozása építőmérnök és geofizikus hallgatók számára” c. projekt támogatásáért is.

## A tanulmány szerzői

Kiss Anna, Visnovitz Ferenc, Timár Gábor, Hámori Zoltán, Horváth Ferenc

## Hivatkozások

- Bada G., Szafián P., Vincze O., Tóth T., Fodor L., Spiess V., Horváth F. (2010): Teotektonikai viszonyok a Balaton keleti medencéjében és tágabb környezetében nagyfelbontású szeizmikus mérések alapján. *Földtani Közöny*, 140/4, 445–468
- Balázs A., Visnovitz F., Spiess V., Fekete N., Tóth Zs., Hámori Z., Kudó I., Horváth, F. (2013): Új szeizmikus mérések a Balatonon: beszámoló a 2011–2012. évi szelvényezésekről (2011–12). *Magyar Geofizika*, 54/2, 67–76
- Bendefy L. (1973): Krieger Sámuel 1776. évi tervezete a Balaton lecsapolásáról. *Hidrológiai Tájékoztató*, 13, 50–55
- Cholnoky J. (1936): *A Balaton*. Franklin Társulat, Budapest, 192 p.
- Cserny T. (2002): A balatoni negyedidőszaki üledékek kutatási eredményei. *Földtani Közöny*, 132/különszám, 193–213
- Cserny T., Corrada R. (1989): A Balaton medencéje és holocén üledékei részletes geofizikai-földtani vizsgálatának újabb eredményei. A MÁFI évi jelentése 1987. évről, pp. 341–347
- Horváth F., Sacchi M., Dombrádi E. (2010): A Pannon-medence üledékeinek szeizmikus sztratigráfiai és tektonikai vizsgálata a Dél-Dunántúli és a Balaton területén. *Földtani Közöny*, 140/4, 391–419
- Józsa J., Rákóczi L., Krámer T. (2012): Balaton Lake in Hungary. In: Bengtsson, L., Herschy, R. W., Fairbridge, R. W. (eds.): *Encyclopedia of lakes and reservoirs*. Springer Science+Business Media B.V., Dordrecht, pp. 91–95

- Karászi K. (1981): A tó vízrajzi és hidrológiai jellemzői. In: Illés I. (szerk): Tavunk, a Balaton. Natura, Budapest, pp. 63–67
- Krámer T., Józsa J. (2013). Sekély tavak szél keltette áramlásai: Kaotikus elkeveredéshez vezető tér- és időstruktúrák. *Természet Világa*, 2013/II. különszám, 46–49
- Krieger S. (1766): *Mappa exhibens lacus Balaton cum vicinatis suis etc.* Helytartótanácsi levéltár, Budapest.
- Környezetvédelmi és Vízügyi Minisztérium (2015): Balaton vízszintje 2014. január 1. – december 31. között, [http://www.kvvm.hu/balaton/lang\\_hu/vizszintb.htm](http://www.kvvm.hu/balaton/lang_hu/vizszintb.htm) (Utolsó letöltés: 2015. 10. 26.)
- Lóczy L. (1902): A Balaton tónak és környékének részletes térképe 1:75 000 mértékben, 4 lapon. A Balaton tónak és környékének térképatlasza. Magyar Földrajzi Társaság Balaton-Bizottsága, Budapest
- Pécs J., Erdős F. (1898): A Balaton vízrajzi fölvétele. *Vízrajzi Évkönyv*, 8, 86–94
- Sacchi M., Cserny T., Dövényi P., Horváth F., Magyar O., McGee T. M., Mirabile L., Tonielli R. (1998): Seismic stratigraphy of the Late Miocene sequence beneath Lake Balaton, Pannonian Basin, Hungary. *Acta Geologica Hungarica*, 41/1, 63–88
- Sass J. (1979): A Balaton vízrajzi felmérése. *Vízügyi Közlemények*, 4, 560–581
- Simpkin P. G., Davis A., (1993): For seismic profiling in shallow water, a novel receiver. *Sea Technology*, 34, 21–28
- Tóth T. (2004): High resolution geophysics provides optimal resolution on inland waterways. *First Break*, 22/9, 45–51
- Tóth T., Simpkin P., Vida R., Horváth F. (1997): Shallow water single and multichannel seismic profiling in a riverine environment. *The Leading Edge*, 16/11, 1691–1695
- Tóth Zs., Tóth T., Szafián P., Horváth A., Hámori Z., Dombrádi E., Fekete N., Spiess V., Horváth F. (2010): Szeizmikus kutatások a Balatonon. *Földtani Közlöny*, 140/4, 355–366
- Virág Á. (1997): A Balaton múltja és jelene. Egri Nyomda, Eger, 904 p.
- Visnovitz F., Balázs A., Horváth F., (2013): High-resolution seismic surveys in the Lake Balaton to image the stratigraphic architecture of Late Miocene basin fill beneath the lake. *Geophysical Research Abstracts*, 15, EGU2013-969
- Visnovitz F., Bodnár T., Tóth Zs., Spiess V., Kudó I., Timár G., Horváth F. (2015a): Seismic expressions of shallow gas in the lacustrine deposits of Lake Balaton, Hungary. *Near Surface Geophysics*, 13, 433–446
- Visnovitz F., Horváth F., Fekete N., Spiess V. (2015b): Strike-slip tectonics in the Pannonian basin based on seismic surveys at Lake Balaton. *International Journal of Earth Sciences*, 104, 2273–2285
- Zlinszky A., Molnár G. (2009): Georeferencing the first bathymetric maps of Lake Balaton, Hungary. *Acta Geodaetica et Geophysica Hungarica*, 44/1, 79–94
- Zlinszky A., Molnár G., Herodek S. (2008): A Balaton medrének digitális geomorfológiai vizsgálata. *Hidrológiai Közlöny*, 88/6, 239–241
- Zlinszky A., Molnár G., Székely B. (2010): A Balaton vízmélységének és tavi üledékvastagságának térképezése vízi szeizmikus szelvények alapján. *Földtani Közlöny*, 140/4, 429–438