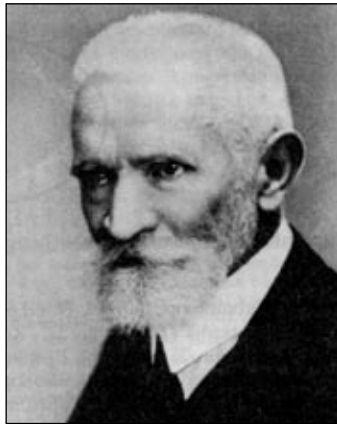


VINCZE MIKLÓS – KOZMA PÉTER

# Tó lengések a Balatonon, a fjordokban és a laboratóriumban

Éppen 110 éve látott napvilágot Cholnoky Jenőnek (1. ábra), a magyar földrajztudomány egyik legnagyobb alakjának világraszóló tanulmánykötete, *A Balaton limnológiája*, melyben sok egyéb mellett elsőként adott helyes tudományos magyarázatot a tó lengések keletkezésére. A tó lengések zárt vagy félig nyitott állóvízi medencék víztükrén kialakuló kicsiny, jellemzően néhány deciméteres függőleges kitérésű, ámde hatalmas, a tó méretével összemérhető hullámhosszú állóhullámok. A jelenség a Balatonon is megfigyelhető, aminek fölismerése szintén Cholnokyhoz kötődik. Rendkívül alapos balatoni mérései mindmáig az ilyen irányú vizsgálatok mintájául szolgálnak szerzte a világon. A tó lengések tanulmányozása korántsem lezárt terület, például az ELTE Kármán Tódorról elnevezett hidrodinamikai laboratóriumában a közelmúltban elvégzett egyszerű kísérletek olyan részjelenségekre mutattak rá, melyek az eddigi helyszíni vizsgálatok során elkerülték a kutatók figyelmét.



1. ábra:  
Cholnoky Jenő (1870-1950)

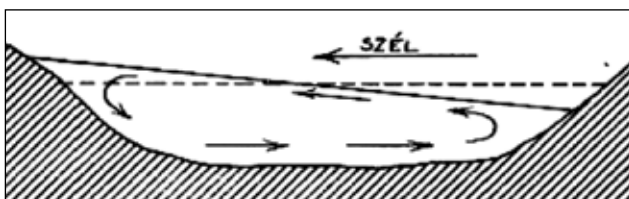
ugyanabban a folyóiratban, amelyikben nevezetes cikkét közölte, hogy alighanem valami hiba van a számításban...” [1].

Cholnoky mestere, *Lóczy Lajos*, illetve az ő kezdeményezésére megalakult *Balaton Bizottság* szolgáltatotta az első tudományos bizonyítékokat a tófelszín szél miatti egyenletes megdőlésére. Ehhez a Balaton keleti és nyugati végén, Kenesén és Keszthelyen egyidejű vízszintméréseket végeztek egy ötletes műszerrel, a limnográfával: „Gondoljuk el, hogy a part közelében szűk, vascsövekkel bélelt kis kutat mélyesztünk le, ennek a kútnak alsó végét csövel összekötjük a Balatonnal. A kútban a víz – a közlekedő csövek törvényének értelmében – mindig olyan magasan áll, mint a Balatonban. A kút vizének felszínén üres fémdoboz úszik, a dobozból pálcica emelkedik föl s ennek a végére derékszögben meghajlítva, írószerszámot erősítünk. A pálcica vége egy asztalhoz erősített vezetékben mozoghat föl és le. ... Az írószerszám elé olyan hengert állítunk, amelyik függőleges tengely körül foroghat. A hengert óramű hajtja, úgyhogy egy hét alatt a henger teljesen körülforoghat. A hengerre beosztott papírost erősítünk, úgyhogy a beosztások a napoknak és óráknak felelnek meg. Az író most az előtte elvonuló papírosra szépen feljegyezi a vízállásokat. ... A kenesei műszer áradást jelzett akkor, amikor a keszthelyi apadást és fordítva.” [1]

## Szél a víz fölött

Ha egy tó fölött folyamatosan egyirányú, például nyugati szél fúj, az belekapva a felszín hullámaiba magával ragadja, s a medence keleti partja felé hajtja a vizet. A tó eközben nem lép ki a medréből, tehát a felszíni folyadékrészecskék szélirányú mozgását a fenéken visszaáramlás kell hogy kísérje, mégpedig ugyanakkora vízhozammal. Ez az egyensúly csak úgy jöhet létre, hogy a felszín enyhén „megbillen” a 2. ábrán látható módon. E megdőlés mindaddig fennmarad, amíg a szél fúj. Ez az egyszerű jelenség komoly tudományos vitákra adott alkalmat a múlt századfordulón. Néhányan még létezését is kétségbe vonták. Cholnoky így anekdotázott: „Volt egy német tudós, aki a legnehezebb felsőmatematikai számítással kimutatta, hogy a szél a víz felszínén nem okozhat denivelációt (vízduzzasztást). Aztán nyáron elment Sylt tengerparti fürdőbe s éppen benne ült a vízben, amikor olyan heves vihardagály keletkezett, hogy alig tudott partra menekülni. Akkor aztán megírta

2. ábra: Vízduzzasztás a víz fölötti egyenletes szél miatt. Részlet Cholnoky 1936-ban megjelent *Balaton* című művéből



## Tó lengések

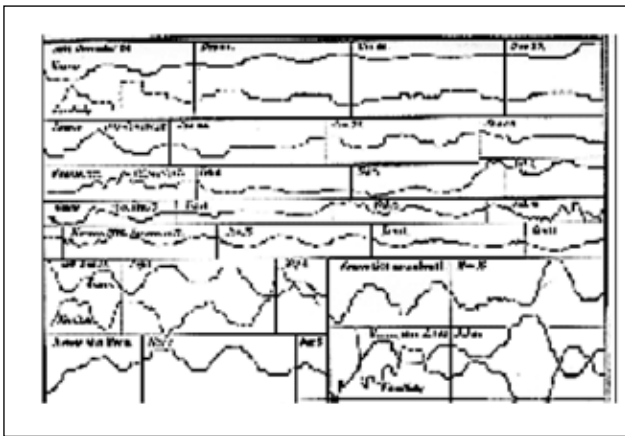
Ha a szél eláll, a víztükör döntöttsége instabillá válik, s olyan víz-áramlatok indulnak be, melyek igyekeznek e ferdeséget kiegyenlíteni. A víz tehetetlensége miatt a felszín túllendül az egyensúlyt jelentő vízszintes helyzetben, és ellentétes irányú megdőlésbe csap át. Mivel ezen új állapot szintűgy nem stabil, ismét beindul a fenti folyamat. A vízfelszín billegése mindaddig tart, míg a víz belső súrlódása és az aljzattal való kölcsönhatás le nem csillapítja. Ugyanazt a „lötyögést” láthatjuk tehát hatalmas mérettartományban, mint a konyhában egy vízzel töltött edény megbillentése után [2]. E jelenséget magyarul tó lengésnek, a nemzetközi szakirodalomban seiche-nek nevezik. A seiche francia kifejezést Francois Alphonse Forel használta először a jelenségre a Genfi-tó mintegy 70 perces lengéseinek vizsgálatakor. A francia geográfusok úttörő mérései a Genfi-tónál történtek Cholnoky limnográfjaihoz hasonló eszközökkel, a XIX. század végén. A tó kitűnő kísérleti terepnek bizonyult; gyakran 10-20 perióduson át követhető volt a seiche, mielőtt elhalt [3].

Mindennapi tapasztalataink alapján sejtethetjük, hogy egy ilyen vízszintingadozás lengésideje erősen függ a tó (vagy edény) hosszától, illetve a víz mélységétől. Ugyanolyan mély medencék közül a hosszabbnál, egyforma hosszúak esetén pedig a sekélyebbnél

várható nagyobb periódusidő. Például a Genfi-tó legnagyobb hossza mintegy 60 km, melyhez 300 m átlagos mélység társul. A hasonló nagyságú, 77 km-en elnyúló Balaton ezzel szemben átlagosan mindössze 3 m mély (közepes vízállásnál). A „magyar tenger” hossz – mélység aránya a legnagyobb Európa tavai között!

### A Balaton lengései

Bár a Balaton vizének lengése régóta általánosan ismert volt a földrajztudósok körében, mégis a szenzáció erejével hatott Cholnoky 1897-es eredménye: a limnográfok milliméterpapírjain egyértelműen kirajzolódott a világon addig ismert legnagyobb periódusú, 12 órás tó lengés grafikonja (3. ábra). A meglepetést elsősorban az a fölismerés okozta, hogy ilyen sekély vízben egy ilyen kicsiny, mindössze néhány deciméteres amplitúdójú lassú vízmozgás tartósan, napokon keresztül fennmaradhat. Sekély medencében ugyanis a víz sűrűdése az aljzaton lényegesen nagyobb mértékben csilla-



3. ábra: A Balaton limnogramjai, melyeken kitűnően követhető a 12 órás oszcilláció

pítja az áramlásokat, mint egy mély tó esetében. A limnogramon azonban jól látható, hogy a balatoni lengés 6-8 perióduson, tehát akár négy napon át is észlelhető volt, míg teljesen lecsillapodott.

Am korántsem minden balatoni tó lengés 12 órás. Ha például a víztükör kezdeti megdőlését északnyugati szél okozza, a lengés a tó hossz tengelyére merőleges irányban indul meg; márpedig a tó legnagyobb szélessége mindössze 14 km. Ez pedig csupán 40 perces periódusidejű lengéseket tesz lehetővé. Természetesen a valóságban a különböző irányú lengések egyszerre vannak jelen, az aktuális széliránytól függően: északnyugati szelek után a „kis” lengések, északkeleti vagy délnyugati légáramlás mellett pedig a „nagyok” hatása a markánsabb.

Tovább bonyolítja az áramlási viszonyokat, hogy a keskeny (1,6 km-es) Tihany-szántódi szűkület a Balatont szinte két különálló medencére bontja, s ezek gyakran egymástól független lengéseket is végeznek. Nem véletlen, hogy éppen itt, a tihanyi „kútban” a legnagyobb a tó mélysége, 10-12 méter. A tó lengések miatt ugyanis a felszín alatt ide-oda áramló víz a keskeny szorosban olyannyira felgyorsul, hogy nem engedi leülepedni az iszapot, illetve kimosza azt [4].

### A tó lengések fizikája

Amikor egy rugóra erősített golyót kissé kitérítünk az egyensúlyi helyzetéből, rezegni kezd. Ha a rugó golyóval átellenes végét egy másik golyóhoz rögzítjük, azt pedig egy újabb rugóval egy következőhöz, és így tovább, az elmozdított golyó rezgésbe hozza a

szomszédait is, miáltal a kitérülés végigterjed az egész golyósoron. Ha képzeletbeli rugóinkat gondolatban végtelen rövidnek, golyóinkat pedig végtelen kicsinek tekintjük, az elrendezésünk egyetlen vékony húrt eredményez, a kis rezgések terjedése pedig nem más, mint egy időben és térben periodikus tovahaladó hullám a húron. E gondolat kísérlet természetesen kiterjeszthető rugókkal összekapcsolt golyókból álló kétdimenziós rácsra is; ami az előbbi határesetben egy rezgő hártya lesz. A hártya síkjára merőleges kitérések ekkor úgy terjednek tova, mint a kicsiny, nyugodt vízhullámok egy tóban. A valóságban nincsenek végtelen hurok vagy hártvány. A hullámterjedés szempontjából tehát lényeges lehet a peremfeltételek ismerete, azaz, hogy a golyósor utolsó tagjának vagy a rács határán elhelyezkedőknek mit „engedünk meg”. Másképpen fordulnak ugyanis vissza a hullámok a peremektől, ha az ott lévő golyókat szabadon mozogni hagyjuk, s máshogy, ha ezt megtiltjuk nekik. Szabad végről az odaérkező hullám azonos fázisban, befogott végről pedig ellentétes fázisban verődik vissza.

Bármik legyenek is a peremfeltételek, a visszavert hullámok találkoznak az oda felé haladókkal, s hatásuk összeadódik: erősíthetik, gyengíthetik, esetenként pedig kiolthatják egymást. Amennyiben az eredő hullámzás éppen olyan, hogy a húr egy tetszőleges pontján a rezgés amplitúdója mindvégig állandó marad, állóhullámokról beszélünk. Ekkor a hullámakat nem látjuk tovaterjedni. Azon pontok, melyeken az eredő kitérés nulla (csomópontok) végig nyugalomban vannak, a legnagyobb amplitúdót pedig mindig a szomszédos csomópontok közti távolság felezőpontjában, a duzzadóhelyeken kapjuk. Az állóhullámok kialakulása szempontjából lényeges, hogy milyen peremfeltételeket rovunk ki. Ha a perem rögzítettek, nyilván olyan állóhullámzás áll elő, hogy itt csomópontok legyenek (pl. gitárhúr, dob). Ha viszont a peremek szabadon „lifeghetnek”, duzzadóhelyek lesznek (pl. súlytalanságban lebegő rezgő rúd vagy membrán). Vegyes peremfeltételt is elképzelhetünk (pl. satuba fogott rúd vagy membrán), ekkor a rögzített végen csomópontokat, a szabad végen duzzadóhelyeket észlelünk.

Ha mindkét vég szabad, az egydimenziós esetben azon állóhullámok elégíthetik ki a peremfeltételeket, melyeknél a rezgéshez tartozó hullámhossz egész számszor fér rá a húrra vagy rúdra. Ekkor a periódusidőre az alábbi összefüggés érvényes:

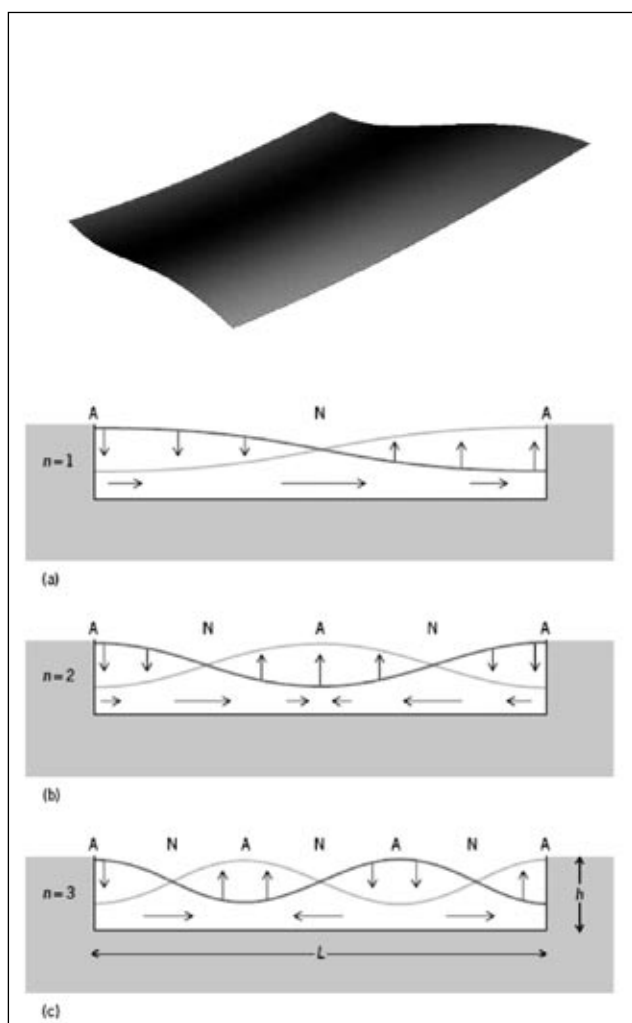
$$T_n = \frac{2L}{n \cdot c}, \quad (1)$$

ahol L a húr/rúd hossza, c a hullám terjedésének sebessége, n pedig tetszőleges pozitív egész szám, a csomópontok száma. A rezgés alapharmonikusát n = 1 jellemzi. A nagyobb n-hez tartozó állóhullámok a felharmonikusok, melyek frekvenciája az alapharmonikusénak egész számú többszöröse [2]. Egy téglalap alakú membránon kialakuló állóhullámok periódusideje szabad perem esetén így írható:

$$T_{n,m} = \frac{2L}{c} (\alpha^2 m^2 + n^2)^{1/2}, \quad (2)$$

ahol n és m két tetszőleges egész szám lehet, hiszen a téglalap merőleges szélei egymástól részben függetlenül húrként rezegnek, egyikük az n-edik, másikuk az m-edik harmonikus, α a szélesség és a hosszúság aránya. Ha m = 0, akkor (2) átmege az (1)-be [3]. Amint a megszokott vízhullámokat a membrán haladó hullámához hasonlítottuk, a tó lengések állóhullámoknak tekinthetők (4. ábra). Az esetek többségében a tómeder alakja jól közelíthető egy függőleges peremű káddal, ami a víz függőleges mozgására szabad peremfeltételt jelent. A víz felszínén a hullámok terjedési sebessége  $c = \sqrt{gH}$ , ahol H a víz átlagos mélysége, g pedig a gravitációs gyorsulás. A periódusidő (1), (2) képletei alapján látható, hogy a periódusidő H négyzetgyökével fordítottan arányos, jó egyezésben a Genfi-tó és a Balaton lengésének és mélységének viszonyával.

Bár a tó lengések során mindig az alapharmonikus jelenik meg legmarkánsabban, már Cholnoky kimutatta a balatoni limnogramjaiból a „nagy” tó lengés első, 6 órás periódusú felharmonikusát (4b

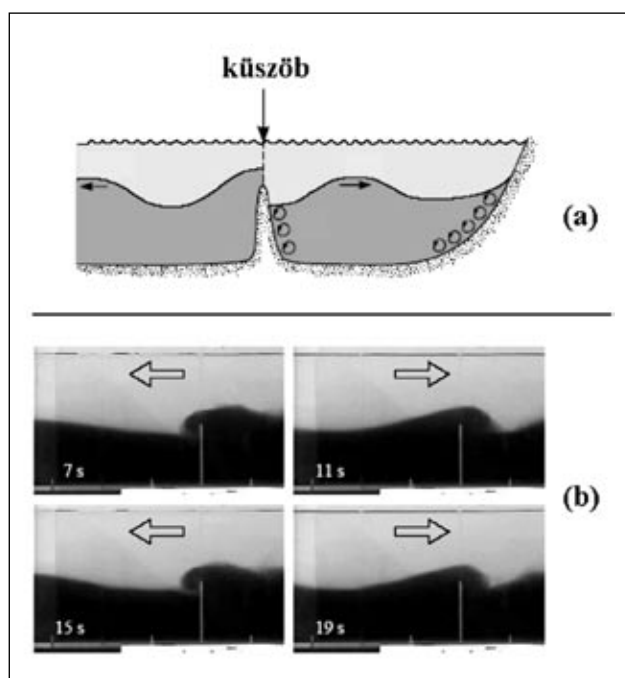


4. ábra: Törlengések, mint szabad végű állóhullám-módusok. A folytonos és szaggatott szinuszos vonalak a vízfelület két szélső helyzetét jelölik. A vízszintes nyilak a vízáramlás helyi irányát mutatják, míg a függőleges nyilak a vízfelszín helyi mozgásirányát a folytonos vonalnak megfelelő esetben. (a) az alapharmonikus ( $n = 1$ ), (b) az első felharmonikus ( $n = 2$ ), (c) a második felharmonikus. A : duzzadóhelyek, N : csomópontok.

ábra). A téglalap alakú membrán viselkedése pedig kiválóan leírja a Balaton független hosszirányú és keresztirányú lengéseit. Említettük, hogy a tihanyi rév a Balatont két almedencére osztja, melyek esetenként egymástól függetlenül is lenghetnek. Amikor az oszcillációk úgy alakulnak, hogy a Tihanyi-félsziget egyik oldalán éppen lent van a vízszint, másik oldalán pedig éppen fönt, olyan heves kiegyenlítő áramlás indulhat meg, hogy a szűkületben a víz a budapesti Duna-szakasz sebességével áramlik, a szoroson átkelni vágyó vitorlázók bosszúságára [1, 4].

#### Törlengések rétegzett folyadékokban, aljzati küszöb fölött

A norvégiai Gullmar-fjord az Atlanti-óceánba nyílik, kijáratánál az aljzaton egy éles küszöb található (5a ábra). Az ilyen rendszerekben szintén létrejöhet seiche, ám kissé más jellegű, mint teljesen zárt medencékben [5]. A téglalast alakúnak tekinthető fjord kijáratánál ugyanis nem kell megkövetelnünk a vízszintes áramlási se-



5. ábra: (a) A Gullmar-fjord vázlatos rajza (forrás: [5]). (b) Az ELTE Kármán Laboratóriumában végzett modellkísérlet 4 másodperces időközökkel egymást követő négy képkockája. A nyilak a (képen láthatatlan) kicsiny felszíni törlengés következtében beinduló belső áramlás aktuális irányát jelölik. Jól láthatók a balra-jobbra periodikusan leszakadó örvények.

besség eltűnését, ez pedig azzal egyenértékű, hogy olyan állóhullámok alakulhatnak ki a vízfelszínen, melyek esetében a kijáratnál csomóvonal van, akárcsak az egyik végén satuba fogott membrán rögzített végén. Ekkor az állóhullám harmonikusainak rezgésidője így alakul:

$$T_n = \frac{2L}{(n-1/2) \cdot c} \quad (3)$$

Fontos különbség továbbá az eddig említett tavakhoz képest, hogy a fjordban és a szomszédos óceáni részen is markáns rétegzettség figyelhető meg, hiszen a fjordba rendkívül lassan édesvíz ömlik egy olvadó gleccserből, mely így elkeveredés nélkül fölfekszik az óceáni sós víz tetejére. A két réteg élesen elkülönül; ilyenkor a belső elválasztó felület mozgását is érdemes vizsgálni.

A „fjordlengést” nem a szél miatti duzzasztás, hanem az árapály okozta csekély vízszintemgdőlés indítja be. A felszín lengését – amint azt tavak esetében is láttuk – a felszín alatt heves ide-oda áramlás kíséri. A Gullmar-fjordot modellező laboratóriumi kísérleteink egy 5 méter hosszú üvegcsőben zajlottak [6]. A kád alján egy néhány cm magas, függőleges műanyag lapot rögzítettünk: ez modellezte a küszöböt. A küszöb fölé egy másik, kihúzható műanyag lapot helyeztünk, mely mintegy zsilipként két részre osztotta a medencét. A kád mindkét oldalát a küszöb magasságáig kék színűre festett sós vízzel töltöttük föl, majd erre lassan csapvizet rétegeztünk. Az egyik oldalon a csapvizet 1-2 mm-rel magasabbra töltöttük, ezzel modellezve a felszín szél vagy árapály miatti megdőlését. A zsilip kihúzása után e csekély, szinte láthatatlan magasságkülönbség indította be az áramlást.

A kísérlet képein (5b ábra) jól látható, amint a belső áramlás az aljzati küszöb fölött áthaladva „megbotlik”, s a leváló örvény a küszöb túloldalán lenyomja maga alatt a réteghatárt. A fjordlengés következő félperiódusában a belső áramlás iránya is megfordul; ekkor a perem másik oldalán szakadnak le örvények, és így tovább, heves

belső hullámzást keltve a réteghatáron. Arra az érdekes következtésre jutottunk tehát, hogy egy felszín alatti akadály a víztükör kicsiny, nehezen észlelhető ingadozásait egy erőteljes, könnyen mérhető belső hullámveréssé alakítja. Ennek időfejlődését megvizsgálva ki lehetett mutatni nemcsak a tőlengés alapharmonikusának, hanem – jóval kisebb súllyal – az első két felharmonikusnak is a jelenlétét. Ez egyben egy új módszert is kínálhat a tó/őrfjordlengések pontos mérésére. Érdekes volna például a Balaton medrén egy néhány méter hosszú mesterséges küszöböt felállítani, arra műszereket szerelni, s így kimutatni a tőlengéseket.

### A tőlengés általánosítása

A réteghatár megfigyelt lengése úgy is értelmezhető, hogy a zsilip két oldala közt lévő nyomáskülönbség indította be az áramlást. A nyomáskülönbség oka természetesen a felső réteg magasságkülönbsége volt, ami tőlengést keltett. Fölvetődik a kérdés, hogy megfigyelhető-e hasonló lengés, ha a nyomáskülönbséget nem magasságkülönbség, hanem a két oldal közti sűrűségkülönbség okozza. Ennek megválaszolásához kísérleti elrendezésünket a **6. ábrán** látható módon változtattuk. A kád bal oldalát a küszöb magasságáig kékre festett sós vízzel töltöttük föl, amelyre közepesen sós vizet rétegeztünk, a zsilip jobb oldalán pedig sárgára festett csapvízzel töltöttük meg a medencét, a baloldali rétegek összmagasságáig. Az áramlást a zsilip fölhúzásával indítottuk meg.

A különböző sűrűségű folyadékok mindig arra törekszenek, hogy a Föld gravitációs terében minimalizálják a helyzeti energiájukat. Ez úgy történhet meg, hogy függőleges egyensúlyi rétegződés alakul ki, melyben a nagyobb sűrűségű összetevők mélyebben helyezkednek el. Esetünkben a kád jobb oldalán tárolt édesvíz elkezd legfőképpen balra áramlani, kiszorítva a sós rétegeket, melyek ekkor a küszöb fölött „belső vizesésként” átbukva jobbra áramlanak. A kialakuló áramlási kép (**6b ábra**) tehát sokkal összetettebb, mint korábban; mégis, megfigyeléseink során tisztán észlelhető volt a vizesés vízhozamának periodikus lüktetése, amit az előző esethez hasonlóan a leváló örvények okoztak. A lengés periódusideje itt is megegyezett a kád hosszának megfelelő alapharmonikusával.

Azt mondhatjuk tehát, hogy ha nincs magasságkülönbség, de van sűrűségkülönbség a két oldal között, akkor szintén megjelenik egyfajta tőlengés, bár nem a felszínen. Az egyensúlyi rétegződés kialakulásakor az azonos nyomású pontokat összekötő szintvonalak (izobárok) végeznek éppen olyan állóhullámzásokat, mint a klasszikus felszíni tőlengés, és ezen hatást erősíti föl az éles belső küszöb jelenléte. Az izobárlengésnek szintén lehet környezeti jelentősége. Például olyan, egymással összekötött medencék víz-cseréjekor, melyek közül az egyikben ipari szennyező anyagok vannak, s emiatt a két medence közt sűrűségkülönbség lép föl. Az ezeket összekötő küszöb fölött ekkor lengés alakulhat ki, mely módosíthatja a szennyvíz szétterjedésének ütemét. Az izobárlengéskor ugyanis a másik medencébe átáramlott káros anyagok egy része időközönként vissza is juthat a forrásába [7].

A tőlengések gazdag jelenségek köre tehát mindmáig tartogat gyakorlati haszonnal is kecsegtető újdonságokat. Reméljük, hogy laborkísérleteink nyomán a közeljövőben olyan új módszert sikerül kidolgoznunk a tőlengések helyszíni vizsgálatára, mellyel újabb lépést tehetünk a Cholnoky Jenő által megkezdett úton.

### IRODALOM:

- [1] Cholnoky J. (1936) Balaton. Franklin, Budapest
- [2] Tél T. (2003) Környezeti áramlások. kézirat, ELTE, Budapest
- [3] McGraw-Hill Encyclopedia of Science and Technology, 9. kiadás, 2003
- [4] Frisnyák S. (1988) Magyarország földrajza. Tankönyvkiadó, Budapest
- [5] R. Parsmar, A. Stigebrandt (1997) Observed damping of barotropic seiches through baroclinic wave drag in the Gullmar fjord. *Journal of Physical Oceanography* 27
- [5b] Vincze M. et al., Surface “seiche” magnified over a thin sill in stratified fluids (publikálás alatt)
- [6] G. Lawrance et al. (2004) Summer exchange between Hamilton harbour and lake Ontario. Deep-Sea Research II 51

LACZIK BÁLINT

## Edinburgh – észak Athénja

**E**dinburgh csodálatos; olykor borzongató, ódon titkokat sugárzó, pár lépéssel távolabb színes, harsányan vidám és fiatal. Az óváros kanyargós sikátoraiban hirtelen felbukkanó hidak alatt több emelettel lejjebb kacskaringóznak a keresztutcák. A komor kövekkel fedett terek oldalain nyíló szűk, meredek lépcsők olykor nyaktörő mélységbe, máskor szédítő magasságokba vezetnek.

A lakóházak falai néha éppenséggel egy, kopott sárgakövekkel tele, vén temető kriptáira támaszkodnak. A város egykori vesztőhelye ma vidám, virágos tér, közepén jókora bronztábla sorolja fel az évszázadok során itt kivégzett köztörvényes és politikai bűnösöket, valamint boszorkányokat. A patinás egyetem bonctani előadásaira az 1820-as években William Burke és William Hare tucatjával szállították a saját gyilkos praxisukból származó, friss hullákat. Hare rávallott cimborájára, aki így maga is mihamar az orvosképzés szemléltető tárgyaként fejezte be dicstelen pályafutását.

A gazda sírja mellett sok éven át hűségeen örökdő Bobby kutyája szobrocskája éppúgy a városkép része, mint a Dr. Jekyll és Mr. Hyde borzongató pszichothrillerének eredeti történetét bemutató színes falfestmény. Az ősi vár fokán nem délben, hanem éppen egy órával később dörög el a pontos időt jelző ágyúlövés, és a kazamatákban egykor sýnlődő foglyok akombákomjai az eredeti cellaajtókon silabizálhatók.

A várbeli vad tivornya és kegyetlen gyilkosságok hangulatát az eredeti helyszín durva kőfalain, a girbegurba lépcsők felett kifejező árny- és hangjátékok idézik. A brit birodalom sok-sok háborújában életüket áldozó skót hősök központi emlékművénel ma is sokan lapozgatják a vesztéség-nyilvántartások vastag köteteit.

### James Watt eredeti, atmoszférikus gőzgépe

