

## A balatonvíz sótartalmának hosszútávú változása (1891-2022)

Vörös Lajos<sup>1,2</sup>, Tóth György István<sup>3</sup>, Látrányi-Lovász Zsófia<sup>4</sup>, Somogyi Boglárka<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> HUN-REN Balatoni Limnológiai Kutatóintézet, 8237, Tihany, Klebelsberg K. u. 3. (e-mail: voros.lajos@blki.hu, somogyi.boglarka@blki.hu)

<sup>2</sup> Víz tudományi és Vízbiztonsági Nemzeti Laboratórium, HUN-REN Balatoni Limnológiai Kutatóintézet, 8237, Tihany, Klebelsberg K. u. 3. (e-mail: voros.lajos@blki.hu, somogyi.boglarka@blki.hu)

<sup>3</sup> Országos Vízügyi Főigazgatóság, 1012 Budapest, Márvány u. 1/d. (e-mail: toth.gyorgy.istvan@ovf.hu)

<sup>4</sup> Kis-Balaton Üzemeltetés Keszthely, Nyugat-dunántúli Vízügyi Igazgatóság, 8360 Keszthely, Csík Ferenc sétány 4. (e-mail: lovasz.zsafia@nyuduvizig.hu)

DOI: 10.59258/hk.16462



### Kivonat

A Balaton szalinitásáról az első, az egész tóra kiterjedő elemzés 1891-ből Ilosvay Lajostól származik. A tizenkilencedik századi úttörő munkákat a Magyar Biológiai Kutatóintézet (mai nevén HUN-REN Balatoni Limnológiai Kutatóintézet) 1927. évi megnyitását követően modern analitikai módszerekkel végzett nagyobb tér- és időbeli felbontású mérések követték. A rendszeres és napjainkban is folyó monitoring az 1970-es években kezdődött a területileg illetékes vízügyi igazgatóságok, majd a környezetvédelmi felügyelőségek és legújabbban a megyei kormányhivatali laboratóriumoknak köszönhetően. A jelen tanulmány arra tesz kísérletet, hogy átfogó képet adjon a balatonvíz sótartalmának több mint egy évszázadot átívelő változásáról. Eredményeink szerint az összes ion koncentráció a tó egész területén a történelmi háttérnek tekinthető 450 mg/l értékről napjainkra 620-690 mg/l körülire nőtt. Eszerint a Balaton egészen az 1980-as évek elejéig édesvízű tó volt, de ma már édes-sós átmeneti víz. Az utóbbi fél évszázad folyamán a magnézium-ion koncentráció 0,7 mg/l, a nátrium-ion 0,6 mg/l, a klorid-ion 0,7 mg/l, a szulfát-ion 1,8 mg/l, a hidrogénkarbonát- és a karbonát-ion pedig 1,0 mg/l értékkel növekedett évente. Az összes ion koncentráció éves növekedése az 1970-es évektől kezdődően a Keszthelyi-medencében 4,2 mg/l, a Siófoki-medencében 5,0 mg/l volt. A fő ionok közül egyedül a kalcium-ion koncentráció nem változott a mérések kezdete óta, mert a Balatonban jelentős mértékű kalcit kiválás következik be, aminek következtében a befolyó vizek kalcium koncentrációja kevesebb mint felére csökken, és ez a folyamat a tavon belül is folytatódik nyugatról keletre haladva. A 2010 - 2022 évek vízmérlege, valamint a befolyó vizek átlagos kalcium-ion koncentrációi és a tóból távozó víz átlagos kalcium-ion koncentrációja közötti különbségek alapján a tóban kicsapódó kalcit mennyiség évente jelentősen különbözött, a legkisebb 25 ezer tonna/év, a maximum 125 ezer tonna/év volt, átlagosan pedig 75 ezer tonna/évnek adódott.

### Kulcsszavak

Salinizáció, hosszútávú adatok, édes-sós átmeneti víztípus, ionösszetétel változás, kalcit kiválás.

## Long term changes of salinity in Lake Balaton (1891-2022)

### Abstract

The first comprehensive analysis of water chemistry of Lake Balaton was performed by Lajos Ilosvay in 1891. The pioneering works of the nineteenth century were followed by more modern analytical methods, involving larger spatial and temporal resolutions, carried out by the Hungarian Biological Research Institute (nowadays known as the HUN-REN Balaton Limnological Research Institute) after its opening in 1927. The regular and ongoing monitoring, which continues to this day, began in the 1970s thanks to the relevant water management authorities and government laboratories. This study aims to provide a comprehensive overview of over a century of changes in the salinity of Lake Balaton. According to our results, the concentration of total ion concentration has increased from the historical background level of 450 mg/l to around 620-690 mg/l in recent times. According to this, Lake Balaton was a freshwater lake until the early 1980s, but today it has become a hyposaline water. Over the last half-century, the concentration of magnesium ions increased by 0.7 mg/l, sodium ions by 0.6 mg/l, chloride ions by 0.7 mg/l, sulphate ions by 1.8 mg/l, and bicarbonate and carbonate ions by 1.0 mg/l annually. The annual increase in the concentration of all ions has been 4.2 mg/l in the Keszthely basin and 5.0 mg/l in the Siófok basin since the 1970s. Among the major ions, only the concentration of calcium ions has not changed since the beginning of the measurements. This is because significant calcite precipitation occurs in Lake Balaton, causing the calcium concentration of inflowing waters to decrease by less than half. This process continues within the lake from west to east. Based on the differences between the water balance from 2010 to 2022, the average calcium ion concentrations of inflowing waters, and the average calcium ion concentration of the outflowing water, there were significant annual variations in the amount of calcite precipitation in the lake. The minimum was 25 000 tons/year, the maximum was 125 000 tons/year, with an average of 75 000 tons/year.

### Keywords

Salinization, long-term data, fresh-saline transitional water type, ion composition change, calcite precipitation.

## BEVEZETÉS

### A természetes vizek szalinitása

A természetes vizek tulajdonképpen sóoldatok, „s ahol víz van ott élet is van” (*Sebestyén 1963*). Egy víztest szalinitása (sótartalma) az összes ionos összetevő mennyiségét jelenti, amelyet „az élővilág csak kivételes esetben ala-

kít, általában alkalmazkodik hozzá” (*Felföldy 1987*). A vizek ionösszetételét a gyakorlatban kielégítően lehet jellemezni a négy fő kation ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ) és a négy fő anion ( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ) koncentrációjával. A többi gyakori elem, mint a N, P, Fe és számos mikroelem ionos komponensei biológiai/ökológiai szempontból jelentősek

lehetnek, de az esetek túlnyomó hányadában összes sórtalomhoz való hozzájárulásuk kicsi (Wetzel 1983). A szalinitást három fő tényező szabályozza: a vízgyűjtő terület geokémiai sajátosságai, a csapadék kemizmusa, a párolgás/kicsapódás mértéke és viszonya a tómederben. Lefolyással bíró tavakban a víz kémiai összetevői a vízgyűjtő területről való hozzáfolyásból és a légkörből származnak. Lefolyástalan tavakban felszín alatti hozzáfolyás, a párolgás és a sókiválás van jelentős hatással az ionkoncentrációra és összetételre. A sekély tavak sórtartalma dinamikusan változhat, kiszáradhatnak, ekkor sóvesztés történhet amiatt, hogy a kicsapódott sókat a szél kifújja a mederből.

A szalinitást az összes anion és kation koncentrációval jellemzik, és mg/l vagy meq/l egységben fejezik ki. Az összes oldott anyag, mint párlási maradék meghatározása 105 Celsius fokon gyakran alkalmazott módszer a sórtalom jellemzésére, de kevésbé pontos és informatív, mint az ionkoncentrációk mérése. A fajlagos elektromos vezetőképeség mértéke a legszélesebb körben elterjedt helyettesítője/kifejezője a szalinitásnak. Értéke függ az adott sóoldat (természetes víz) ionösszetételétől, koncentrációjától és a hőmérséklettől. Ezzel együtt azonos, vagy hasonló vegyi összetételű vizek esetén szoros összefüggésben van az összes ion koncentráció mértékével (Hammer 1986, Williams 1998, Wetzel 1983).

Minden kontinentális víz tartalmaz több-kevesebb oldott sót. Hammer (1986) széleskörűen elfogadott kategorizálása szerint édesvizekben az összes sórtalom kevesebb, mint 500 mg/l, szubszalin vizekben 500-3000 mg/l. A 3000 mg/liternél magasabb összes ion tartalmú vizek a sósvizek (Hammer 1986, Williams 1998). Felföldy (1987) osztályozási rendszere szerint az édesvíz kategória felső határa 600 mg/l.

A szalinitást jellemző négy fő kation és anion két csoportra osztható. A konzervatív ionok koncentrációja egy taven belül csak kismértékben van alávetve biotikus hatásoknak, miközben a dinamikus ionok koncentrációját a vízi élővilág metabolizmusa jelentősen befolyásolja (Wetzel 1983). A fő kationok közül a magnézium-, a nátrium- és a kálium-ion konzervatív viselkedésű, miközben a kalcium-ion koncentrációját jelentős mértékben befolyásolja a vízi flóra és fauna élettevékenysége. Kemény vizekben (ilyen a Balaton is) a kalcium koncentráció szezonálisan jelentős mértékben változhat, elsősorban az algák és a hínárnövények fotoszintézise eredményeként bekövetkező  $\text{CaCO}_3$  kicsapódás (biogén mészkőkiválás) miatt, ami együtt jár más tápelemek, pl. a foszfor együttes kiválásával (House 1990, Hamilton és társai 2009). A vízben oldatban lévő szervesetlen szénformák ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{CaCO}_3$ ) aránya pH függő, és mivel ezek mindegyike hozzáférhető az algák és a vízínövények számára, a  $\text{HCO}_3^-$  és a  $\text{CO}_3^{2-}$  a dinamikusan változó ionok közé tartozik. A szulfát-ion számos mikrobiológiai folyamatban jelentős szerepet játszik, ezért a dinamikus ionok közé sorolják. Aerob körülmények között az algák és vízínövények kénfelvétele nem befolyásolja számottevően a koncentrációját, ezért nagy tömegű és kiterjedésű nyíltvízben a szulfát-ion mennyisége viszonylag stabil, szulfát csapadék kiválás a

Balatonban sem következik be. A klorid-ion a nátrium- és kálium-ionhoz hasonlóan az állandó vizű tavakban nem mutat számottevő tér- és időbeli dinamikát, ezért felszíni vizekben ez a három ion tekinthető a legkonzervatívabb viselkedésűnek.

### A szalinizáció, mint világprobléma

A vizek ion koncentrációjának növekedése a földtörténet folyamán számos esetben természetes módon is bekövetkezett, amit elsődleges szalinizációnak is neveznek, szemben az emberi hatásra bekövetkezett, úgynevezett másodlagos szalinizációval, amely néhány évtized alatt vagy némely esetben ennél gyorsabban is végbe mehet (Herbert és társai 2015).

Az édesvizek sórtalmának növekedése a 21. század első évtizedeiben került az érdeklődés homlokterébe, amikor egyértelművé vált, hogy nemcsak az arid klímájú területeken jelentkezik, hanem egy növekvő globális probléma, amely hat az ivóvíz ellátásra, az ökoszisztémák állapotára, a biodiverzításra, a vízügyi infrastruktúra állapotára (Kaushal és társai 2021). A szalinizáció human hatásra bekövetkező kiváló okai ismertek. Mediterrán klímájú területeken a fás vegetáció gyérítése, az intenzív öntözés és a vizek elterelése a folyamat elsődleges kiváló oka. Emellett globális mértékben jelentkezik a bányászat, a kőolaj- és gázkitermelés, az utak sózása, a műtrágyahasználat, a tájhasználat változása következtében (Kaushal és társai 2005, 2021, Herbert és társai 2015, Zak és társai 2021). A városiasodás, a kommunális és ipari szennyvízkibocsátás, beépített, lefedett terület növekedése a vízgyűjtő területen szignifikánsan növeli az iontranszportot, többek között az építési anyagok korróziója, az utak sózása és a szennyvízkibocsátás következtében (Kaushal és társai 2017, Scott és társai 2019). A növekvő szalinizáció hatásait az éghajlatváltozás tovább erősíti (Le és társai 2018).

Az édesvizek szalinizációjára a huszadik század második felében a kutatók, a környezetvédők és a menedzserek kevés figyelmet szenteltek, annak ellenére, hogy sokasodtak ennek a világméretű problémának a jelei, igaz, elsősorban a száraz és félszáraz klímájú területeken (Williams 2001). Ennek a mérsékelt érdeklődésnek háttérében az állt, hogy olyan problémák, mint az eutrofizáció, vagy a mezőgazdasági eredetű peszticid szennyezés, illetve az ipari eredetű nehézfém szennyezés akut és súlyos problémaként jelentkezett világszerte (Canedo-Arguelles 2020).

A Balaton esetében sem volt ez másként. A fő ionok mellőzésének elsődleges oka a Balaton gyorsan bekövetkezett eutrofizálódása volt. A fonalas nitrogénkötő cianobaktériumok tömegtermelése a tó nyugati területein súlyosan veszélyeztette a víz fürdésre, üdülésre való alkalmasságát és az ivóvízkivételeket is (Herodek 1983), ami jelentős kutatási aktivitást generált, és elsősorban a foszforanyagcsere megismerése révén (Herodek és Istvánovics 1988, Istvánovics és társai 1986, Somlyódy és van Straten 1986) elvezetett a probléma orvoslásához, a jelentős vízminőségvédelmi beruházások megvalósításához. A világszerte folyó intenzív nehézfém kutatásból a Balaton sem

maradt ki (*Salánki és társai 1982, V-Balogh 1986, V-Balogh és Salánki 1986*), amelynek alapján szerencsére megállapítást nyert, hogy a vizsgált toxikus nehézfémek koncentrációi sem a vízben, sem a biótában nem haladták meg az egészségügyi határértékeket.

### A Balatonvíz vegyi jellemzőinek kutatása

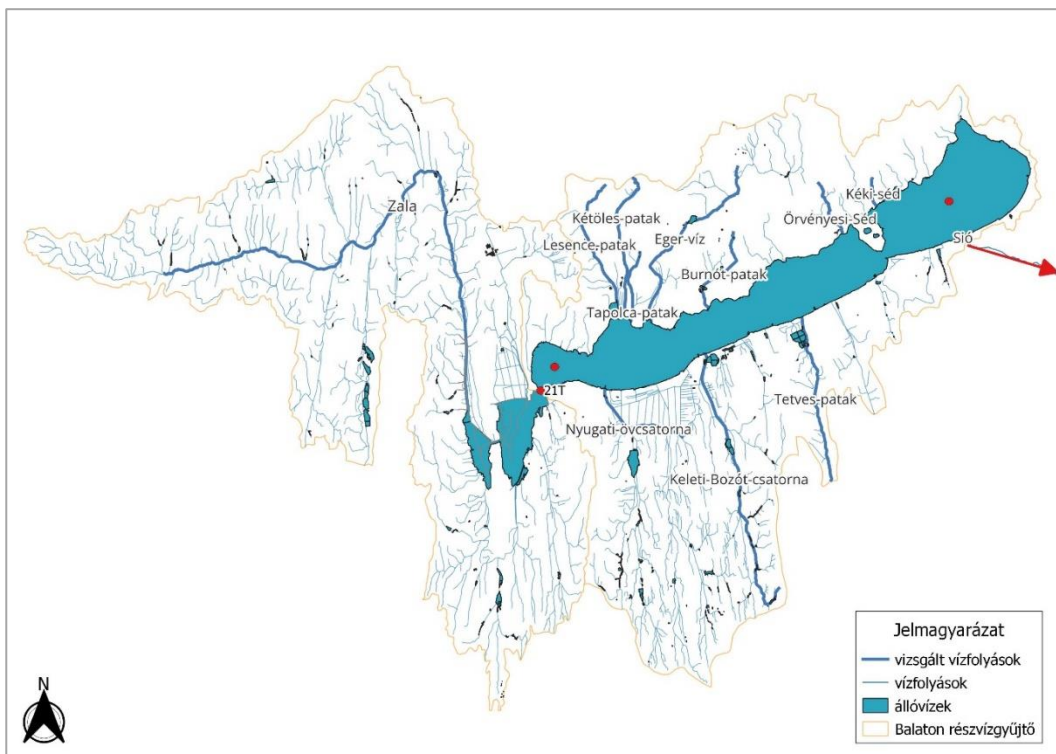
A Balaton vegyi jellemzőiről első ízben Kitaibel tesz említést, miszerint „a besűrített víz barnás-sárga, hígított ó-bor színű, kevés fehér csapadék válik ki belőle, sós-lúgos ízű, s a sárga kémpapírt gesztenye-barnára, a vöröset kékre változtatja (*Kitaibel 1829*). Az első, valóban kémiai tekinthető elemzés 1837-ből Sigmund Károlytól származik, de az általa közölt értékeket a későbbi elemzések nem erősítették meg (*Ilosvay 1898*). Az egy-egy vízmintára kiterjedő kvantitatív vizsgálatokat Preysz végzett 1862-ben, illetve Szilasi 1885-ben (*Ilosvay 1898*). Ezt követően az első, az egész tóra és a fő ionokra kiterjedő elemzés Ilosvay Lajostól származik, aki a méréseket 1891-ben 20 liter víz párlási maradékából végezte el (*Ilosvay 1898*). A tizenkilencedik századi úttörő munkákat a Magyar Biológiai Kutatóintézet (mai nevén Balatoni Limnológiai Kutatóintézet) 1927. évi megnyitását követően modern analitikai módszerekkel végzett, nagyobb tér- és időbeli felbontású és napjainkig tartó, többé-kevésbé rendszeres mérések követték. Ezeket az első, még az alapvető ismereteket lefedtető vizsgálatokat (*Müller 1929, Szabó 1930, Csegezy 1938*) követte Entz Béla munkássága, aki a tó egész területére kiterjedő mérések mellett vizsgálta a tavat tápláló vízfolyásokat is (*Entz 1952, 1953, 1959*). A Vízgazdálkodási Tudományos Kutató Intézet (VITUKI) bekapcsolódása a Balaton kutatásába további lendületet adott a munkának, Pásztó Péter 1957-1960 között végzett nagyszámú mérést a tavon (*Pásztó 1963*), ezt követően 1969-1979 között is számos vizsgálat köthető a VITUKI tevékenységéhez (*Németh és Pásztó 1976, Dobolyi és társai 1980*). 1975-től kezdve a területileg illetékes vízügyi igazgatóságok (Dél-Közép- és Nyugat-dunántúli Vízügyi Igazgatóság), majd a környezetvédelmi felügyelőségek laboratóriumai és legújabban a VKI monitoring keretében a megyei kormányhivatali laboratóriumok az egész tóra és a tavat tápláló vízfolyásokra kiterjedően végeznek sokrétű vízminőség vizsgálatot, amelynek részét képezi a nyolc fő ion koncentrációjának meghatározása is.

Ennek a gazdag tudományos háttérnek köszönhetően a Balaton sótartalmának növekedését a VITUKI kutatói már 1979-ben felismerték, megállapították, hogy a vízben található összes szervetlen ion koncentrációja a hatvanas évek végétől emelkedő tendenciát mutat, amit a tó környezetének erőteljesebb emberi igénybevételével, az emberi hatások fokozott növekedésével magyaráztak (*Dobolyi és társai 1980*). Virág 1998-ban balatoni adatok elemzésével

megállapította, hogy 1969 és 1995 között jelentősen megnőtt a víz elektromos vezetőképessége, a szulfát- és kloridionok töménysége növekvő tendenciát mutatott. Véleménye szerint „a balatonvíz fő ionjai koncentrációváltozására az utóbbi évtizedekben kevés figyelmet fordítottak, pedig ezeknek az ionoknak a mennyisége is ugyanolyan jelzőszámokat jelent a tóvíz minőségének alakulása szempontjából, mint más vegyületek” (*Virág 1998*). E korai felismeréseket követően azonban mindmáig nem született átfogó elemzés a Balaton sótartalmának változásáról. A jelen tanulmányban arra teszünk kísérletet, hogy ennek a sokszereplős és sok évtizede folyó munkának az eredményeire támaszkodva átfogó képet rajzoljunk a balatonvíz kémiai viszonyainak több mint egy évszázadot átívelő változásáról.

### ANYAG ÉS MÓDSZER

A Balaton sótartalmának hosszútávú változásai elemzésénél a Keszthelyi- és a Siófoki-medence adataira szorítkoztunk. A változások értékeléséhez felhasználtuk a publikált kutatási eredményeket, elsőként Ilosvay 1891-ben végzett négy mérését a Keszthelyi- és a Siófoki-medencéből (*Ilosvay 1898*), majd Müller (*1927*), Szabó (*1929*) és Csegezy (*1938*) Tihany térségéből származó mérési adatait. Entz 1950 és 1958 között az egész tóra és a befolyó vizekre is kiterjedő méréseiből a Keszthelyi-medencére és a Siófoki-medencére vonatkozó adatokat vettük figyelembe (*Entz 1952, 1959*), Pásztó részletes tanulmányából az 1957, 1958, 1959 és 1960-ból közölt adatokat (*Pásztó 1963*) és a VITUKI mérési eredményeit (*Németh és Pásztó 1976, Dobolyi és társai 1980*). Ezeket az úttörő jellegű méréseket 1975-től felváltotta egy rendszeres, az egész tóra kiterjedő monitoring, amelynek a Siófoki-medence és a Keszthelyi-medence nyíltvizére vonatkozó adatait az Országos Vízügyi Főigazgatóság (OVF) bocsátotta rendelkezésünkre. A Zala torkolati szelvényére vonatkozó adatsorok (1975-2021) a Nyugat-dunántúli Vízügyi Igazgatóság mérésein alapulnak, a többi befolyó víz adatai az OVF adatbázisából származnak. Elemzésünkben bemutatjuk az 1975-ös rendszeres monitorozás előtti mérési eredményeket, az ezt követő időszakot az évente négy-huszonöt alkalommal végzett mérések átlagértékeivel jellemezzük, utóbbiak képezik a trendszámítások alapját is. A balatoni mintavételi helyszíneket (Siófoki- és Keszthelyi-medence), a tó nyugati vízgyűjtő területét reprezentáló Kis-Balatoni Vízügyi Rendszer (KBVR) balatoni torkolatát (21T), a tó déli vízgyűjtőjéről eredő Nyugati-övesatorna, Keleti-Bozót-patak és a Tetves-patak, az északi vízgyűjtőről eredő Lesence-patak, Tapolca-patak, Kétöles-patak, Eger-víz, Burnót-patak és a Kéki-patak torkolati szelvényeit a tó vízgyűjtő területével egyetemben az *1. ábrán* tüntettük fel. A tó vízgyűjtőjén található felszín alatti vízminőségi megfigyelő kutak (összesen mintegy 3500 kút) ionösszetétel adatait az OVF bocsátotta rendelkezésünkre.



1. ábra. Vízkémiai mérésekhez kijelölt mintavételi helyek a Balatonon és vízgyűjtőjén (Piros pontok: KBVR torkolat (21T), Keszthelyi-medence, Siófoki-medence. A befolyó patakok mintavételi pontjai a torkolati szelvényénél találhatóak.)

Figure 1. Sampling locations for water chemistry measurements on Lake Balaton and its watershed (Red dots: KBVR outlet (21T), Keszthely basin, Siófok basin. The sampling points of the inflowing streams are located at the river mouth.)

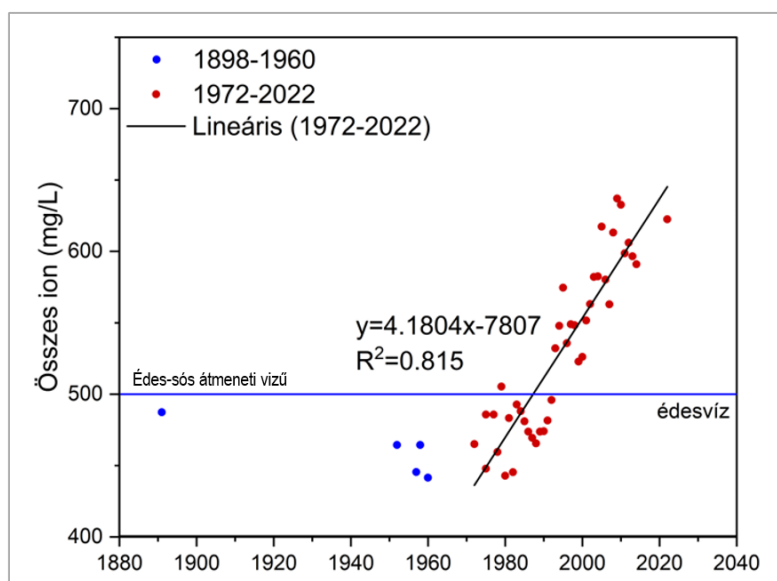
## EREDMÉNYEK, KÖVETKEZTETÉSEK ÉS JAVASLATOK

### Időbeli változások a Balatonban

A rendelkezésre álló nagyszámú, a rendszeres vizsgálatokból származó mérési adat alapján megállapítottuk, hogy a Balatonban 400-800  $\mu\text{S}/\text{cm}$  vezetőképesség tartományban a sótartalom ( $\text{mg}/\text{l}$ ) = 0,85 x elektromos vezetőképesség ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ). Szikes tavakban 3 000-30 000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  elektromos vezetőképesség tartományban a sótartalom ( $\text{mg}/\text{l}$ ) = 0,80 x elektromos vezetőképesség ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) (Bo-

ros és társai 2014). Balatoni adataink szerint az összes oldott anyag (párlási maradék) és az összes ion koncentráció között nincs szoros összefüggés és ráadásul az egyenes meredeksége is különböző az egyes medencékben.

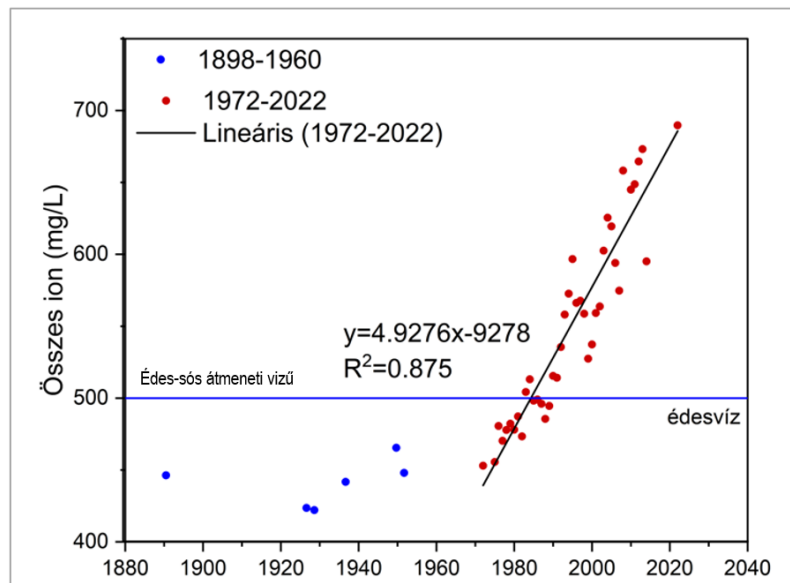
Az összes ion koncentráció a Keszthelyi-medencében a 19. század végétől egészen az 1970-es évek elejéig a történeti adatok tanúsága szerint érdemben nem változott, 450  $\text{mg}/\text{l}$  körüli volt. A hetvenes évektől kezdődően koncentrációja folyamatosan és tendenciózus nőtt, évente 4,2  $\text{mg}/\text{l}$  értékkel (2. ábra).



2. ábra. Az összes ion koncentráció változása a Keszthelyi-medencében 1891-2022 között  
Figure 2. The changes of total ion concentration in the Keszthely basin between 1891 and 2022

A Siófoki-medencében a változás tendenciája közel azonos volt, a történelmi háttérnek tekinthető 450 mg/l érték

a hetvenes évek elejétől szignifikáns, évi 5,0 mg/l körüli növekedést mutatott (3. ábra).



3. ábra. Az összes ion koncentráció változása a Siófoki-medencében 1891-2022 között  
Figure 3. The changes of total ion concentration in the Siófok basin between 1891 and 2022

Az összes ion koncentráción belül az egyes ionok változása jelentős mértékben eltért. A kationok közül a Mg-, Na- és K-ion koncentrációja szignifikánsan nőtt 1972 és 2022 között, ezzel ellentétben a Ca-ion koncentráció nem

mutatott szignifikáns időbeli trendet sem a Keszthelyi-, sem a Siófoki-medencében. Mindegyik anion koncentrációja szignifikáns időbeli növekedést mutatott 1972 és 2022 között mindkét tóterületen (1. és 2. táblázat).

1. táblázat. A fő ionok és az összes ion koncentráció éves növekedése (mg/l) 1972 és 2022 között a Keszthelyi-medencében  
Table 1. The annual growth of major ions and total ion concentrations (mg/l) between 1972 and 2022 in the Keszthely basin

| Ion   | mg/l  | r <sup>2</sup> | p                |
|---|-------|----------------|------------------|
| Ca <sup>2+</sup>  | 0,101 | 0,046          | nem szignifikáns |
| Mg <sup>2+</sup>  | 0,537 | 0,739          | < 0.0001         |
| Na <sup>+</sup>   | 0,465 | 0,735          | < 0.0001         |
| K <sup>+</sup>  | 0,047 | 0,426          | < 0.0001         |
| Cl <sup>-</sup>   | 0,467 | 0,801          | < 0.0001         |
| SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>                                 | 1,589 | 0,675          | < 0.0001         |
| HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> + CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> | 1,612 | 0,600          | < 0.0001         |
| Összes ion  | 4,180 | 0,819          | < 0.0001         |

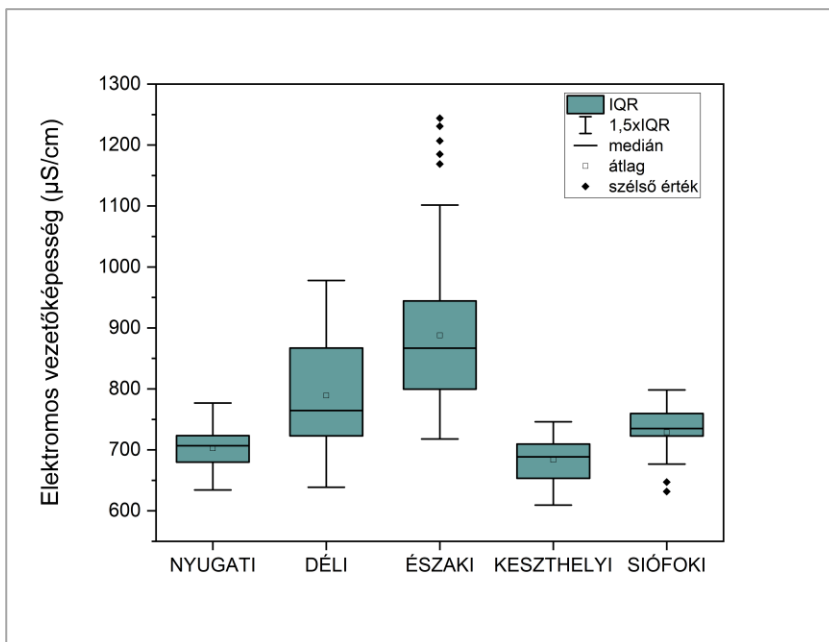
2. táblázat. A fő ionok és az összes ion koncentráció éves növekedése (mg/l) 1972 és 2022 között a Siófoki-medencében  
Table 2. The annual growth of major ions and total ion concentration (mg/l) between 1972 and 2022 in the Siófok basin

| Ion   | mg/l  | r <sup>2</sup> | p                |
|---|-------|----------------|------------------|
| Ca <sup>2+</sup>  | 0,029 | 0,019          | nem szignifikáns |
| Mg <sup>2+</sup>  | 0,701 | 0,842          | < 0.0001         |
| Na <sup>+</sup>   | 0,620 | 0,837          | < 0.0001         |
| K <sup>+</sup>  | 0,075 | 0,696          | < 0.0001         |
| Cl <sup>-</sup>   | 0,670 | 0,890          | < 0.0001         |
| SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>                                 | 1,792 | 0,821          | < 0.0001         |
| HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> + CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> | 1,074 | 0,444          | < 0.0001         |
| Összes ion  | 4,952 | 0,877          | < 0.0001         |

### A befolyó vizek hatása

A Balatonba torkolló vízfolyások hatását a 2010-2022 évek adatai alapján ismertettük. A Balaton legnagyobb részvízgyűjtőjéről (Zala vízgyűjtő) származó vizek a 21T jelű műtárgyon keresztül folynak be a tóba (1. ábra), itt érkezik a tó vízutánpótlásnak közel fele a mindössze 38 km<sup>2</sup> kiterjedésű Keszthelyi-medencébe. A fajlagos elekt-

romos vezetőképesség átlagos értéke a részvízgyűjtők közül itt a legkisebb, ezt kismértékben meghaladják a déli vízgyűjtőről származó vizek, az északi vízgyűjtő vizeinek szalinitása pedig kimagasló értékeket mutat. A Keszthelyi-medencében a vezetőképesség kissé alacsonyabb, mint a nyugati vízgyűjtőről befolyó vízben, a Siófoki-medencében a tóvíz sókoncentrációja kissé megnő (4. ábra).



4. ábra. A nyugati, a déli és az északi vízgyűjtő vízfolyásainak, valamint a Keszthelyi- és a Siófoki-medence vízének elektromos vezetőképessége (2010-2022 évek adatai)

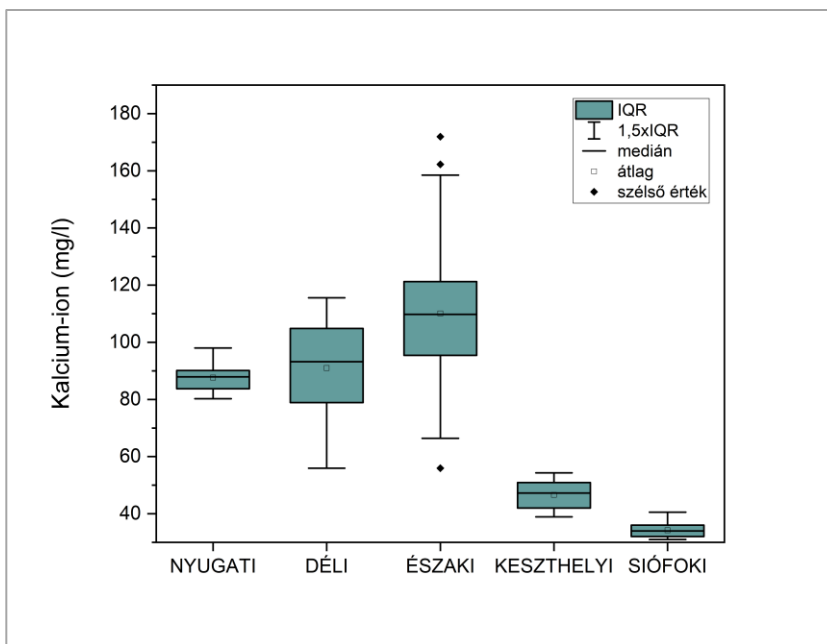
Megjegyzés: IQR – interkvartilis terjedelem

Figure 4. The electrical conductivity of the western, southern, and northern watershed rivers, as well as the water in the Keszthely and Siófok basins (data for the years 2010-2022)

Note: IQR – interquartile range

A kalcium-ion koncentráció a részvízgyűjtők között a vezetőképességgel arányosan változik, azonban a tóban nagyon markáns változás következik be. A Keszthelyi-me-

dencében a kalcium-ion koncentráció fele-harmada a befolyó víznek és értéke a Siófoki-medencében tovább csökken (5. ábra).



5. ábra. A nyugati, a déli és az északi vízgyűjtő vízfolyásainak, valamint a Keszthelyi- és a Siófoki-medence vízének kalcium-ion koncentrációja (2010-2022 évek adatai)

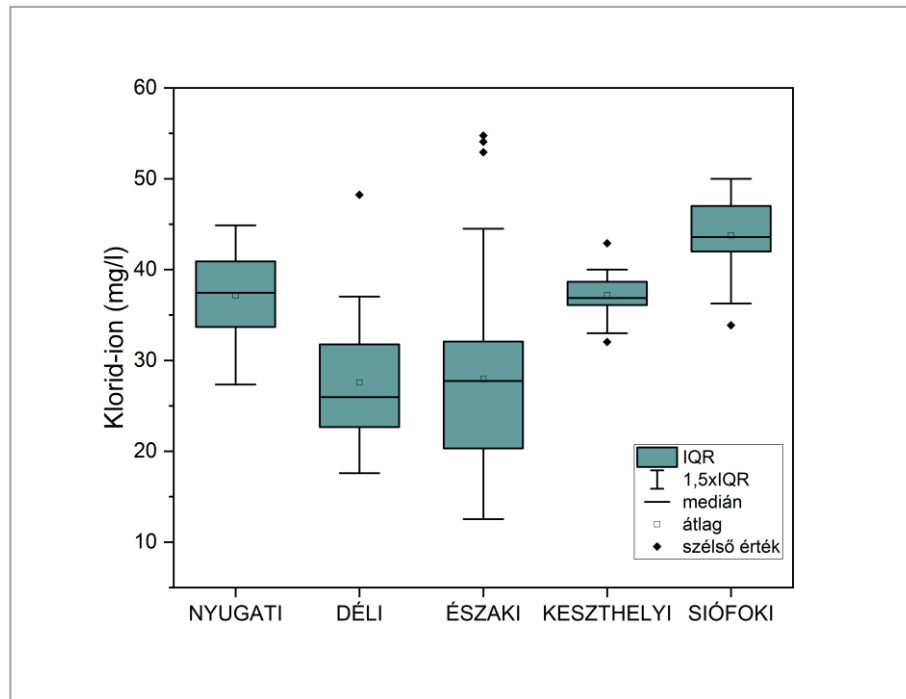
Megjegyzés: IQR – interkvartilis terjedelem

Figure 5. The calcium-ion concentration in the water of the western, southern, and northern watershed rivers, as well as the water in the Keszthely and Siófok basins (data for the years 2010-2022)

Note: IQR – interquartile range

A Keszthelyi-medencében a klorid-ion koncentráció megegyezik a befolyó Zala vízzel, a déli és az északi víz-

gyűjtőről származó vizek klorid-ionban szegényebbek (6. ábra).



6. ábra. A nyugati, a déli és az északi vízgyűjtő vízfolyásainak, valamint a Keszthelyi- és a Siófoki-medence vizének klorid-ion koncentrációja (2010-2022 évek adatai)

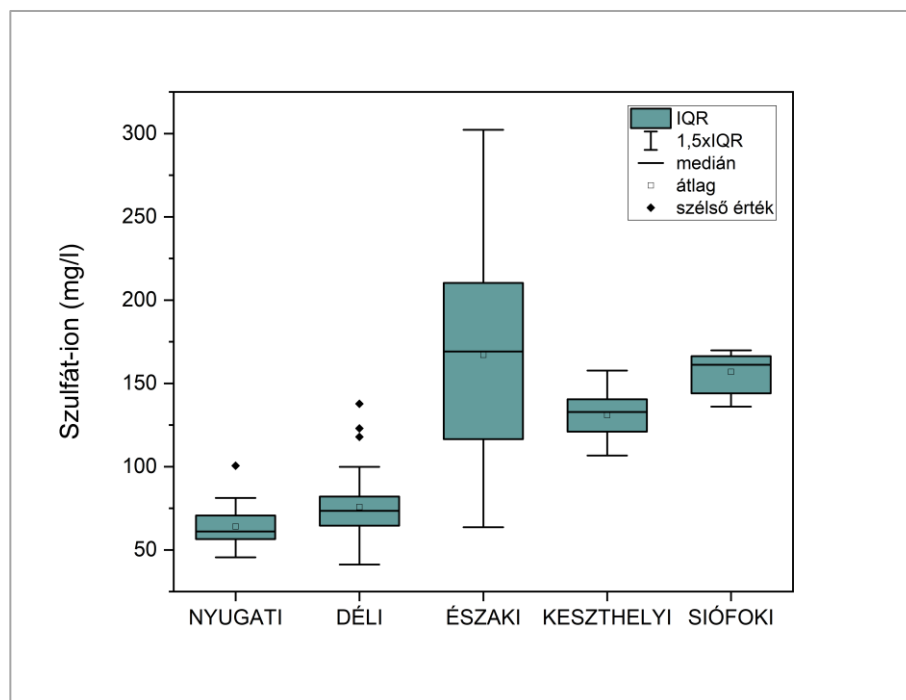
Megjegyzés: IQR – interkvartilis terjedelem

Figure 6. The chloride-ion concentration in the water of the western, southern, and northern watershed rivers, as well as the Keszthely and Siófok basins (data for the years 2010-2022)

Note: IQR – interquartile range

A szulfát-ion koncentráció ezzel ellentétesen változik, legalacsonyabb a Zala vízgyűjtőről származó vízben és jelentősen nagyobb az északi befolyókban, ami hatással van

a tó egész területére (7. ábra). Az északi vízgyűjtő szulfát gazdagsága megmutatkozik a felszín alatti vizek szulfát-ion koncentráció értékeiben is (8. ábra).



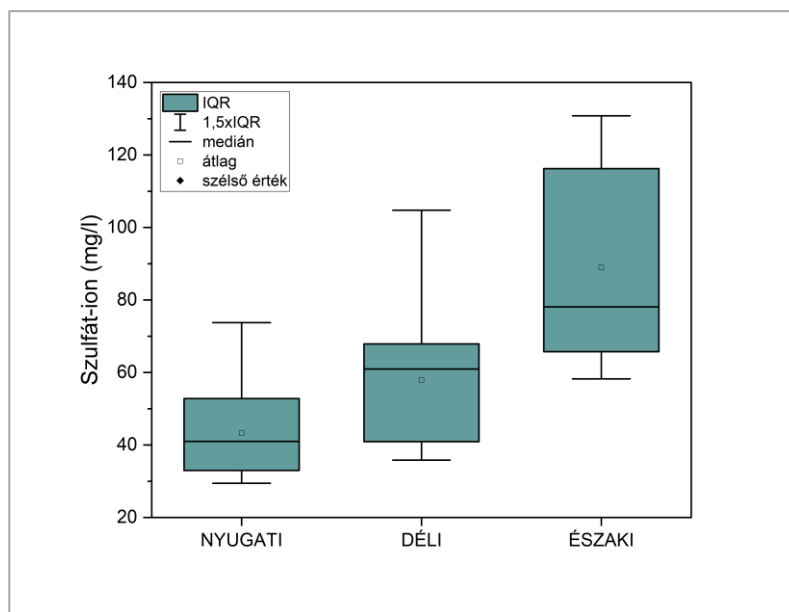
7. ábra. A nyugati, a déli és az északi vízgyűjtő vízfolyásainak, valamint a Keszthelyi- és a Siófoki-medence vizének szulfát-ion koncentrációja (2010-2022 évek adatai)

Megjegyzés: IQR – interkvartilis terjedelem

Figure 7. The sulphate-ion concentration in the water of the western, southern, and northern watershed rivers, as well as the Keszthely and Siófok basins (data for the years 2010-2022)

Note: IQR – interquartile range





8. ábra. A nyugati, a déli és az északi vízgyűjtő felszín alatti vizeinek szulfát-ion koncentrációja (2010-2022 évek adatai) Megjegyzés: IQR – interkvartilis terjedelem

Figure 8. The sulphate-ion concentration in the groundwater of the western, southern, and northern watershed areas (data for the years 2010-2022)

Note: IQR – interquartile range

#### A klorid-ion koncentráció változás okai

Az Egyesült Államok területén az utak jégmentesítése következtében télen néhány államban (Maryland, New York, New Hampshire) százszoros klorid-ion növekedést is észleltek (Kaushal és társai 2005). Az USA és Kanada mérési adatai révén ismert az amerikai nagy tavak sótartalmának másfél évszázados változása, a növekedés mértéke tavanként eltérő ugyan, de a Felső-tó kivételével mindenütt jelentős mértékű a klorid- és a szulfát-ion növekedése (Chapra és társai 2012). Délkelet-Wisconsin tavaiban az utóbbi harminc évben az átlagos klorid-ion koncentráció 19 mg/l-ről némely esetben 100 mg/l fölé nőtt (Thornton és társai 2015). Észak-Olaszországban mély szubalpin tavakban (Maggiore, Lugano, Como, Iseo, Garda) a Na<sup>+</sup> és a Cl<sup>-</sup> koncentráció 25 éves változását vizsgálva megállapították, hogy a koncentráció növekedést az utak sózása és a kommunális szennyvizek okozzák, a Cl<sup>-</sup> ion koncentráció növekedése utóbbiakban 0,03 és 0,05 mg/l között volt évente (Rogora és társai 2015). Európa egyik legnagyobb tavában, a Boden-tóban a klorid koncentráció 40 év alatt 2,3 mg/l-ről 5,5 mg/l értékre nőtt, itt az éves növekmény 0,08 mg/l volt (Müller és Gachter 2012). Japánban a 670 km<sup>2</sup> területű Biva-tóban a klorid-ion koncentráció a huszadik század utolsó két évtizedében 7,4 mg/l-ről 9,9 mg/l értékre nőtt (Aota és társai 2003). Németországban a káliumbányászat következtében nőtt meg a környező vízfolyásokban néhol extrém mértékben a sókoncentráció (Schulz és Canedo-Arguelles 2019). A szalinizáció az északi féltekén már jól dokumentált, egy nemzetközi összefogásnak köszönhetően létrehozott legnagyobb globális adatbázis 529 észak-amerikai és európai tó több mint tíz évet átfogó klorid koncentráció adatát tartalmazza (Dugan és társai 2017).

A Balatonban a klorid-ion koncentráció (50 mg/l) jelentősen meghaladja a nagy európai tavak értékeit (3-6 mg/l) és az éves növekedés mértéke is (0,5-0,7 mg/l) jelentősen nagyobb, mint az említett mély tavakban. A Balatonban 1972-2022 között az összes ion koncentráció másfélszeresére nőtt, a 450 mg/l-nek tekinthető természeti háttérértékről 690 mg/l értékre (2. ábra), azonban az északi féltekén megfigyelt általános trenddel ellentétben itt nem a klorid-ion növekedés állt a háttérben. Az anionok közül a hidrogénkarbonát és a szulfát-ion növekedés is meghaladta a klorid-ionét, a kationok közül pedig a magnézium-ion koncentráció növekedés meghaladta a nátrium-ionét (1. és 2. táblázat). Tekintettel arra, hogy a tó nyugati vízgyűjtőjéről származó víz leggazdagabb klorid-ionban, valamint figyelembe véve azt, hogy az utóbbi évtizedekben a fagyos napok számának csökkenése ellenére (KSH 2022) a klorid-ion koncentráció töretlenül növekedett a tóban, annak forrását nem az utak sózásában kell keresnünk, hanem elsősorban a tisztított (szerencsére foszforban viszonylag szegény) szennyvizek bevezetésében, amihez a tájhasználat változása is hozzájárul, miszerint a beépített terület részaránya az 1927-es 1,6%-os értékről napjainkra 6,0%-ra nőtt (Petrovszki és társai 2024). Tekintettel arra, hogy Európában és az USA-ban a megengedett klorid-ion koncentráció 250 mg/l, a Balatonban az utóbbi fél évszázad jelentős mértékű növekedése ellenére a klorid-ion koncentráció mértéke nem jelent veszélyt az ivóvíz kivételekre.

#### A sótartalom növekedés ökológiai hatásai

Annak ellenére, hogy az édesvizek szalinizációja világméretű jelenség, vízi élőlény együttesekre való hatása még jórészt ismeretlen (Astorg és társai 2021). A klorid-ion koncentráció határértéke Kanadában 120 mg/l, ugyanakkor kanadai tavakban és laboratóriumi kísérletekben kimutatták, hogy ez a felső határérték messze nem megfelelő a



vízi élővilág védelméhez, például lágy vizekben a *Daphnia* fajok szaporodása csökkent és pusztulásának mértéke nőtt 5 és 40 mg/l klorid-ion koncentráció tartományban (Arnott és társai 2020, Hintz és társai 2022). Kemény vizekben (ilyen a Balaton is) a zooplankton sokkal ellenállóbb a klorid-ion koncentráció növekedésével szemben (Elphick és társai 2011). A szalinizáció hatása a kovamoszat flórára a vízi élőlényegyüttesek közül a legjobban ismert. A planktonikus és bentikus kovamoszat együttesek összetétele és diverzitása sótartalom függő, az ionkoncentráció és az ionösszetétel alapvető meghatározója a kovamoszat közösségeknek. Egy széles szalinitási skálán csökken a közösség alfa diverzitása. Számos kovamoszat indexet dolgoztak ki a sótartalom mértékének becslésére és a múltbéli szalinitásváltozás is nyomon követhető a kovamoszat fossziliák elemzésével (Stenger-Kovács és társai 2023). Németországban sokszáz vízi élőhelyen mérték fel az idegenhonos *Amhipoda*, *Isopoda*, *Gastropoda* és *Bivalvia* fajok megtelepedését. Megállapították, hogy az emelkedő hőmérséklet és klorid koncentráció volt a növekvő inváziós kockázat legfontosabb előre jelző tényezője (Früh és társai 2012). A jelenlegi tudáshiány összefügg azzal is, hogy a kutatások zöme a nátrium- és a klorid-ion koncentráció változására fókuszált, miközben a többi ion koncentráció növekedésére kevés figyelmet fordítottak. A jelenség összetettsége miatt még nagyon messze vagyunk a szalinizáció következményeinek megismerésétől molekuláris, fiziológiai, populáció és ökoszisztéma szinten (Cunillera-Montcusi és társai 2022).

#### A szulfát-ion koncentráció változásai

A szulfát-ion koncentráció különböző emberi tevékenységek hatására napjainkban világszerte növekszik, annak ellenére, hogy Észak-Amerikában és Európában a légköri szulfát kiülepedés jelentős mértékben csökkent. A szulfát növekedés hatása a vízi ökoszisztémák szerkezetére és működésére azonban még nagyrészt ismeretlen, mindemellett a legkevésbé toxikus a vizekre jellemző nyolc fő ion közül. A szulfát-iont általában nem tekintik vízszennyező tényezőnek, ivóvízben megengedhető koncentrációja Európában és az USA-ban 250 mg/l, Kanadában 500 mg/l (Zak és társai 2021). A Balatonban mért jelentős mértékű koncentráció növekedése a huszadik század elejének 50 mg/l körüli értékeiről az ezredforduló utáni 160 mg/l körüli értékekre még biztosan nem jelent veszélyt a tóból történő ivóvíz kivételekre.

A fentiek alapján a Balaton folyamatosan növekvő szalinizációja, ezen belül is a huszadik század eleji természeti háttér értékhez képest a nátrium-ion és a magnézium-ion koncentráció duplázódása, a klorid-ion ötszörös és a szulfát-ion háromszoros növekedése szükségszerűen hatással van a tó ökológiai rendszerére, amely azonban néhány korai kezdeményezést kivéve (Balogh és társai 2009) nem képezte vizsgálatok tárgyát.

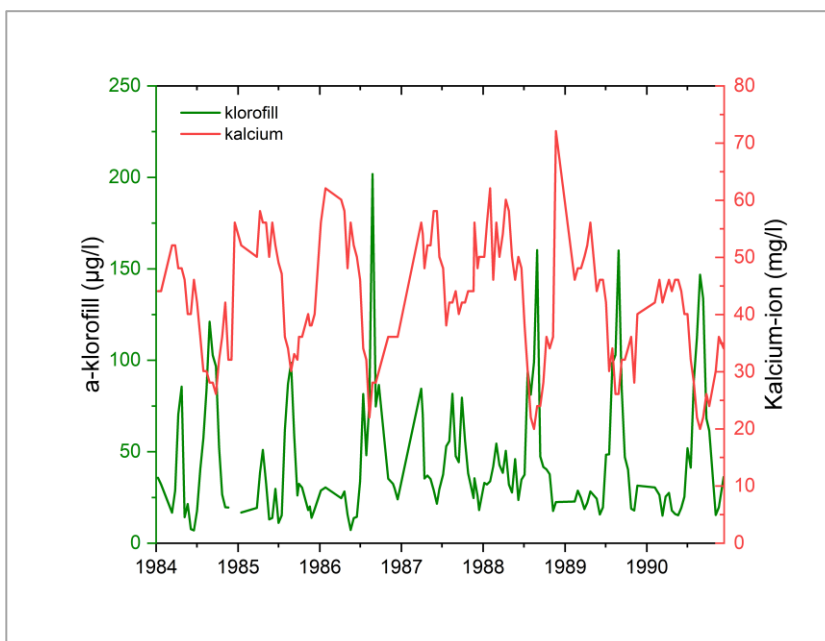
#### A dinamikus változó kalcium-ion

A rendelkezésre álló egy évszázadot átölelő adatok tanúsága szerint a tóban egyedül a kalcium-ion koncentrációja nem változott, 30-40 mg/l közötti értékek a jellemzők. Ennek háttérben az áll, hogy a befolyó vizek szerves szén rendszere nincs egyensúlyban a levegő CO<sub>2</sub> parciális

nyomásával, mert azokban a tartózkodási idő nem elégséges az egyensúly beállításához (Szilágyi 2003). A tóban viszont elegendő idő áll rendelkezésre ehhez, aminek következtében jelentős mértékű kalcit kiválás következik be, miközben a befolyó vizek kalcium koncentrációja kevesebb mint felére csökken, és ez a folyamat a tavon belül is folytatódik nyugatról keletre haladva (5. ábra). Ez a hossz tengely menti változás eredményezi azt, hogy a tóban nyugat-keleti irányban növekszik a Mg/Ca arány. Az utóbbi 20 évben a Mg/Ca arány a Zala torkolatában átlagosan 0,42, a Keszthelyi-medencében 1,24, a Siófokiban pedig 1,55 volt. Korábban Pásztó 1957-ben már megállapította, hogy kelet-nyugati irányban a tó hossz tengelye mentén fokozatosan csökken a magnéziumtartalom és nő a kalciumtartalom, annak következtében, hogy a magnéziumkarbonát ötvénszer jobban oldódik, mint a kalciumkarbonát. Emiatt a Keszthelyi-medencében több alkáliföldfém-karbonát válik ki a vízből, mint a Balaton bármely részén (Pásztó 1963) ami a Balatonból kiváló kalcit Mg-tartalmát is befolyásolja. A Keszthelyi-medencében a lebegő anyagban lévő kalcit MgCO<sub>3</sub> tartalma 2,5 mol% körüli, Balatonkenesénél 7-8 mol%-ot is elérhet (Müller és Wagner 1978, Nyirő-Kósa és társai 2018).

A 2010 és 2022 évek vízmérlege, a hozzáfolyás és a Sióon történő vízeresztés mennyiségi adatai (Kravinszkaja 2023), valamint a befolyó vizek átlagos Ca-ion koncentrációi és a tóból távozó víz átlagos Ca-ion koncentrációja (Siófoki-medence) közötti különbségek alapján kiszámítottuk a tóban kicsapódó kalcit mennyiségét. Az eltérő vízjárású évek között a mészkő kiválás mértékében nagy különbségek voltak, a legkisebb érték 25 ezer tonna/év, a maximum pedig 125 ezer tonna/év volt, átlagosan pedig 75 ezer tonna/évnek adódott. Ezek az adatok nagyon közel állnak az Entz által biogén mészkő kiválásként definiált 84 ezer tonna/év értékhez (Entz 1959). Györke (1982) „az oldott anyagokból élő szervezetek által átalakított üledék” mennyiségét 100-150 ezer tonna/év körülire becsülte, emellett van egy a fentiekől jelentősen eltérő becslés, amely szerint az évente kiülepedő kalcit mennyisége másfél millió tonna (Rostási és társai 2022).

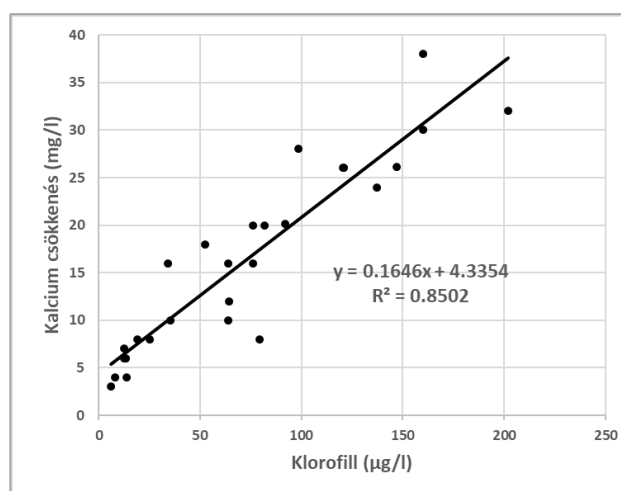
A biogén mészkő kiválás nyaranta jól megfigyelhető törékeny kéregként jelenik meg a balatoni hínárok hajtásain és levelein, emellett időszakosan elsősorban algatömegtermelés idején nagyobb területre kiterjedően megfigyelhető a kifehéredés (whitening) jelensége, amit a mikroorganizmusok méretű kalcit kicsapódás eredményez (Rostási és társai 2022). A biogén mészkő kiválás egyértelműen fotoszintézis függő, amit jól demonstrál a fitoplankton biomassza (a-klorofill) és a kalcium-ion koncentráció szezonális változása, amelyet az algában gazdag Keszthelyi-medence példáján mutatunk be a tó legproduktívabb időszakából. A két görbe egymás tükörképe, nyáron a tömegesen elszaporodott algák intenzív fotoszintézise következtében a kalcium-ion koncentráció jelentősen csökken, miközben a klorofill koncentráció nő, a klorofill csúcs egybeesik a kalcium minimummal. Az algatömegtermelési ciklus összeomlásával viszont a kalcium-ion koncentráció pontosan visszaállt a tavaszi egyensúlyi értékre, ami azt jelzi, hogy az így kivált kalcit visszaoldódott (9. ábra).



9. ábra. A kalcium-ion és az a-klorofill koncentráció szezonális változása a Keszthelyi-medencében (1984-1990)  
 Figure 9. The seasonal variation of calcium-ion and chlorophyll a concentrations in the Keszthely basin (1984-1990)

A biogén mészkőkiválás, pontosabban a biológiailag indukált mineralizáció (Pósfai 2020) a Balaton nyíltvizében egy időszakos jelenség, és az algában szegény vízterekben (pl. Siófoki-medence) kisebb vagy elhanyagolható mértékű. Ezt dokumentálja az az összefüggés (10. ábra), amely szerint a biogén mészkőkiválás (kalcium-ion koncentráció csökkenés) mértéke a Balatonban szorosan korrelál a fitoplankton produkcióval (nyári a-klorofill maximum). A biogén mészkőkiválás szezonális változásai szá-

mottevően befolyásolják a vízben oldott Mg/Ca arányt is, a fentebb ismertetett példában ez 0,8-2,2 között változott, hét éves átlagértéke 1,2 volt (10. ábra). A fenti eredmények azt dokumentálják, hogy a Balatonban évi 75 ezer tonna körüli becsülhető mészkőkiválás (pontosabban magnéziumtartalmú kalcit) nem, vagy túlnyomórészt nem biogén eredetű, az a széndioxidban túltelített befolyó vizek széndioxid tartalmának a levegő széndioxidja parciális nyomásával való egyensúlyba kerülésének eredménye.



10. ábra. A kalcium-ion nyári csökkenése az évenkénti a-klorofill maximum értékek függvényében (Keszthelyi-, Szigligeti-, Szemesi- és Siófoki-medence, 1984-1990)

Figure 10. The summer decrease in calcium-ion concentration as a function of annual maximum chlorophyll a in the Keszthely, Szigliget, Szemes, and Siófok basins (1984-1990)

## KONKLÚZIÓ

Az édesvizek szalinizációja világjelenség, a Balaton sem jelent ez alól kivételt. Az összes ion koncentráció változásai 130 évre visszamenően ismertek. Eredményeink szerint az összes ion koncentráció a tó egész területén a történeti háttérnek tekinthető 450 mg/l értékről napjainkra 620-690 mg/l körülire nőtt. Eszerint a Balaton egészen az 1980-

as évek elejéig édesvízű tó volt, de ma már édes-sós átmeneti vízű. A tó hossz tengelye menti változás sok kémiai komponens esetében jellemző. Keszthelytől Siófokig a kalcium-ion koncentráció csökken, ahogy a víz szerves szén rendszere egyensúlyba kerül a levegő szén-dioxid koncentrációjával. A betöményedés miatt a klorid, a szulfát, a nátrium és a kálium koncentrációja kissé nő.

Az összes ion koncentráció évenkénti növekedése az 1970-es évektől kezdődően a Keszthelyi-medencében 4,2 mg/l, a Siófoki-medencében 5,0 mg/l volt. A fentiek alapján a Balaton folyamatosan növekvő sótartalma, ezen belül a huszadik század eleji természeti háttér értékhez képest a nátrium-ion és a magnézium-ion koncentráció duplázódása, a klorid-ion ötszörös és a szulfát-ion háromszoros növekedése szükségszerűen hatással van a tó ökológiai rendszerére, amely azonban eddig nem képezte vizsgálatainak tárgyát.

A nyolc fő ion közül egyedül a kalcium-ion koncentrációja nem nőtt, 30-40 mg/l között értékek a jellemzők. A tóban a befolyó vizek szerves szén rendszere egyensúlyba kerül a levegő szén-dioxid koncentrációjának parciális nyomásával, aminek következtében a Balatonban jelentős mértékű mészkőkiválás (magnézium tartalmú kalcit) következik be. Az eltérő vízjárású évek között a mészkőkiválás mértékében nagy különbségek voltak, a legkisebb érték 25 ezer tonna/év, a maximum pedig 125 ezer tonna/év volt, átlagosan pedig 75 ezer tonna/évnek adódott. Az algák és a vízinövények fotoszintézise nyaranta jelentős ún. biogén mészkőkiválást okoz, azonban az így kivált kalcium-karbonát összel visszaoldódik.

## KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A közleményben bemutatott kutatás az RRF-2.3.1-21-2022-00008 számú projekt, valamint az MTA Fenntartható Fejlődés és Technológiák Nemzeti Program (FFT NP FTA) támogatásával valósult meg.

## IRODALOMJEGYZÉK

Aota, Y., Kumagai, M., Ishikawa K. (2003). Over twenty years trend of chloride ion concentration in Lake Biva. *J. Limnol.* 62. pp. 42-48. <https://doi.org/10.4081/jlimnol.2003.s1.42>

Arnott, S.E., Celis-Salgado, M.P., Valleau, R.E., DeSellas, A.M., Paterson, A.M., Yan, N.D. (2020). Road salt impacts freshwater zooplankton at concentration below current water quality guidelines. *Environ. Sci. Technol.* 54. pp. 9398-9407. <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c02396>

Astorg, L., Cagnon, J-C., Lazar, C.S., Derry, A.M. (2021). Effects of freshwater salinization on salt-naive planktonic eukaryote community. *Limnology and Oceanography Letters.* pp. 1-10. <https://doi.org/10.1002/lol2.10229>

Balogh Cs., B.Muskó I., G.-Tóth L., Purgel Sz. (2009). A vándorkagyló (*Derissena polymorpha*) vízszint csökkenésre és betöményedésre adott reakciója különböző laboratóriumi beállítások mellett. *Hidrológiai Közlemények.* 89. évfolyam 6. szám pp. 88-89.

Boros E., Horváth Zs., Wolfram G., Vörös L. (2014). Salinity and ionic composition of the shallow astatic soda pans in the Carpathian Basin. *Annales de Limnologie-International Journal of limnology.* 50. pp. 59-69. <https://doi.org/10.1051/limn/2013068>

Canedo-Arguelles, M. (2020). A review of recent advances and future challenges in freshwater salinization. *Limnetica,* 39. pp. 185-211. <https://doi.org/10.23818/limn.39.13>

Chapra, S.C., Dove, A., Warren, G.J. (2012). Long-term trends of Great Lakes major ion chemistry. *Journal of Great Lakes Research.* 38. pp. 550-560. <https://doi.org/10.1016/j.jglr.2012.06.010>

Cunillera-Montcusi, D., Beklioglu, M., Cañedo-Argüelles, M., Jeppesen, E., Ptacnik, R., Amorim, C.A., Arnott, S.E., Berger, S.A., Brucet, S., Dugan, H.A., Gerhard, M., Horváth Zs., Langenheder, S., Nejtgaard, J.C., Reinikainen, M., Striebel, M., Urrutia-Cordero, P., F.Vad Cs., Zadereev, E., Matias M. (2022). Freshwater salinization a research agenda for a saltier world. *Trends in Ecology and Evolution.* 37. pp. 440-453. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2021.12.005>

Csegezy G. (1938). Újabb adatok a balatonvíz összetételéhez. *Magy. Bio. Kut. Munk.* 10. pp. 424-428.

Dobolyi E., Jolánkai G., Tóth L. (1980). A Balaton vízminősége és a környezet hatása. In: Baranyi S. (szerk): A Balaton kutatása és szabályozása. VITUKI Közlemények 27. pp. 256-270.

Dugan H.A., Summers, J.C., Skaff, N.K., Krivak-Tetley, F.E., Doubek, J.P., Burke, S.M., Bartlett, S.L., Arvola, P.C., Jarjanazi, H., Korponai J., Kleeberg, A., Monet, G., Monteith, D., Moore, K., Rogora, M., Hanson, P.C., Weathers, K.C. (2017). Data Descriptor: Long-term chloride concentrations in North American and European freshwater lakes. *Scientific Data* 4. pp. 170101. <https://doi.org/10.1038/sdata.2017.101>

Elphick, J.R., Bergh, K.D., Bailey, H.C. (2011). Chronic toxicity of chloride to freshwater species. Effect of hardness and implications for water quality guidelines. *Environmental Toxicology and Chemistry.* 30. pp. 239-246. <https://doi.org/10.1002/etc.365>

Entz B. (1952). Horizontális kémiai vizsgálatok 1950. és 1952. nyarán a Balaton különböző biotópjaiban és néhány beömlő patak torokolatánál. *Annales Instituti Biologici Tihany.*

Entz B. (1953). Horizontális kémiai vizsgálatok 1950 és 1952 nyarán a Balaton különböző biotópjaiban és néhány beömlő patak torkolatánál. *Annal. Biol. Tihany* 21. pp. 29-48.

Entz B. (1959). Chemische Charakterisierung der Gewässer in der Umgebung des Balatonsees (Plattensees) und chemische Verhältnisse des Balatonwassers. *Annal. Biol. Tihany* 26. pp. 131-201.

Felföldy L. (1987). A biológiai vízminősítés. *Vízügyi Hidrobiológia* 13. pp. 1-258. VGI, Budapest.

Früh, D., Stoll, S., Haase, P. (2012). Physico-chemical variables determining the invasion risk of freshwater habitats by alien mollusks and crustaceans. *Ecology and Evolution.* 2. pp. 1843-2853. <https://doi.org/10.1002/ece3.382>

Györke O. (1982). A Balaton part- és mederszabályozása. *Vízügyi Közlemények.* 64. pp. 402-418.

Hamilton, S.K., Bruesewitz, D.A., Horst, G.P., Weed, D.B., Sarnelle, O. (2009). Biogenic calcite -phosphorus precipitation as a negative feedback to lake eutrophication. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 66. pp. 343-350. <https://doi.org/10.1139/F09-003>

- Hammer, U.T. (1986). Saline lake ecosystems of the world. Dr W.Junk Publishers, Dordrechts. p. 616.
- Herbert, E.R., Boon, P., Burgin, A.J., Neubauer, S.C., Franklin, R.B., Ardon, M., Hopfensperger, K.N., Lamers, L.P.M., Grill, P. (2015). A global perspective on wetland salinization : ecological consequences of a growing threat to freshwater wetlands. *Ecosphere* 6. pp. 1-43. <https://doi.org/10.1890/ES14-00534.1>
- Herodek S. (1983). A Balaton eutrofizálódása és a védekezés lehetőségei. Magyar Tudomány 7-8. pp. 506-518.
- Herodek S., Istvánovics V. (1988). Phosphorus metabolism and eutrophication control of Lake Balaton. *Verh. Internat. Verein. Limnol.* 23. pp. 517-521. <https://doi.org/10.1080/03680770.1987.11897973>
- Hintz, W.D., Arnott, S.E., Symons, C.E., Greco, D.A., McClymont, A., Brentrup, J.A., Cañedo-Argüelles, M., Derry, A.M., Downing, A.L., Gray, D.K., Melles, S.J., Relyea, R.A., Rusak, J.A., Searle, C.L., Astorg, L., Baker, H.K., Beisner, B.E., Cottingham, K.L., Ersoy, Z., Espinosa, C., Franceschini, J., Giorgio, A.T., Göbeler, N., Hassal, E., Hébert, M.-P., Huynh, M., Hylander, S., Jonassen, K.L., Kirkwood, A., Langenheder, S., Langvall, O., Laudon, H., Lind, L., Lundgren, M., Proia, L., Schuler, M.S., Shurin, J.B., Steiner, C.F., Striebel, M., Thibodeau, S., Urrutia-Cordero, P., Vendrell-Puigmitja, L., Weyhenmeyer, G.A. (2022). Current water quality guidelines across North America and Europe do not protect lakes from salinization. *PNAS* Vol. 119 No. 9. e2115033119. <https://doi.org/10.1073/pnas.2115033119>
- House, W.A. (1990). The prediction of phosphate coprecipitation with calcite in freshwaters. *Water Res.* 24. pp. 1017-1023. [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(90\)90124-O](https://doi.org/10.1016/0043-1354(90)90124-O)
- Ilosvay L. (1898). A Balaton vizének kémiai viszonyai. *Balaton Tud. Tanulm. Eredményei* I. 6. pp. 1-27.
- Istvánovics V., Vörös L., Herodek S., G-Tóth L., Tátrai I. (1986). Changes of phosphorus and nitrogen concentration and phytoplankton in enriched lake enclosures. *Limnol and Oceanogr.* 31. pp. 798-811. <https://doi.org/10.4319/lo.1986.31.4.0798>
- Kaushal, S.S., Groffman, P.M., Likens, G.E., Belt, K.T., Stack, W.P., Kelly, V.R., Band, L.E., Fisher, G.T. (2005). Increased salinization of fresh water in the northeastern United states. *PNAS*, 102. pp. 13517-13520. <https://doi.org/10.1073/pnas.0506414102>
- Kaushal, S.S. Duan, S., Doody, T.R., Haq, S., Smith, R.M., Newcomer Johnson, T.A., Newcomb, K.D., Gorman, J., Bowman, N., Mayer, P.M., Wood, K.L., Belt, K.T., Stack, W.P. (2017). Human-accelerated weathering increases salinization, major ions, and alkalization in fresh water across land use. *Applied Geochemistry* 83. pp. 121-135. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2017.02.006>
- Kaushal, S.S., Likens, G.E., Pace, M.L., Reimer, J.E., Maas, C.M., Galella, J.H., Utz, R., Duan, S., Kryger, J., Yaculak, A., Boger, W., Bailey, N., Haq, S., Wood, K., Wesel, B., Collison, D., Aisin, B. (2021). Freshwater salinization syndrome: from emerging global problem to managing risks. *Biogeochemistry* 154. pp. 255-292. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu21-16299>
- Kitabel Pál. P.K. (1829) *Hydrographica Hungariae praemissa auctoris vita edidit Joannes Schuster.* 2 tomi. (n. 8-r. LXVIII, 316 l. és 2 lev., 2 lev. és 407 l.) Pestini 1829. Typ. nobilis J. M. Trattner de Petrőza. A. E. M. T.
- KSH (2022). Központi Statisztikai Hivatal, 15.1.1.37. Magyarország és Budapest időjárásának adatai. [https://www.ksh.hu/stadat\\_files/kor/hu/kor0037.html](https://www.ksh.hu/stadat_files/kor/hu/kor0037.html)
- Kravinszkaja G. (2023). A Balaton és a tórészek havi vízháztartási jellemzőinek meghatározása, 2022. Középdunántúli Vízügyi Igazgatóság. Siófok. pp. 1-35.
- Le, TDH., Kattwinkel, M., Schützenmeister, K., Olson, J.R., Hawkins C.P., Schafer R.B. (2018). Predicting current and future background ion concentrations in German surface water under climate change. *Phil. Trans. R. Soc. B* 374:20180004. <https://doi.org/10.1098/rstb.2018.0004>
- Müller S. (1929). A Balaton vizének vegyelemzése. *Magy. Biol. Kut. Munk.* 2. pp. 145-156.
- Müller, B., Gachter, R. (2012). Increasing chloride concentrations in Lake Constance: characterization of sources and estimation of loads. *Aquat. Sci.* 74. pp. 101-112. <https://doi.org/10.1007/s00027-011-0200-0>
- Müller G., Wagner F. (1978). Holocene carbonate evolution in Lake Balaton (Hungary): a response to climate and impact of man. *Spec. Publ. int. Ass. Sediment.* 2. pp. 57-81. <https://doi.org/10.1002/9781444303698.ch4>
- Németh J., Pásztor P. (1976). A Balaton-víz szervesetlen ion-összetételének és összes sótartalmának vizsgálata. *Balaton Ankét* 3. MHT. Budapest.
- Nyíró-Kósa I., Rostási Á., Bereczk-Tompa É., Cora I., Koblar M. (2018). Nucleation and growth of Mg-bearing calcite in a shallow, calcareous lake. *Earth and Planetary Science Letters.* 496. pp. 20-28. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2018.05.029>
- Pásztor P. (1963). A Balaton vízminőségének vizsgálata. *VITUKI Tanulmányok és Kutatási Eredmények* 11. pp. 1-125.
- Petrovszki J., Szilassi P., Erős T. (2024). Mass tourism generated urban land expansion in the catchment of Lake Balaton, Hungary – analysis of long-term changes in characteristic socio-political periods. *Land Use Policy* In review.
- Pósfai M. (2020). A Balaton üledékének ásványai. *Földt. Közl.* 150.4.511 <https://doi.org/10.23928/foldt.kozl.2020.150.4.511>
- Rogora, M., Rosario, M., Kamburska, L., Salmaso, N., Cerasino, L., Leoni, B., Garibaldi, L., Soler, V., Lepori, F., Colombo, L., Buzzi F. (2015). Recent trends in chloride and sodium concentrations in deep subalpine lakes (Northern Italy). *Environ. Sci. Pollut. Res.* 22. pp. 19013-19026. <https://doi.org/10.1007/s11356-015-5090-6>
- Rostási Á., Rác K., Fodor M.A., Topa B., Molnár Zs., Weiszbürg T.G., Pósfai M. (2022). Pathways of carbonate sediment accumulation in a large, shallow lake. *Frontiers in Earth Science.* 10.3389/feart.2022.1067105. <https://doi.org/10.3389/feart.2022.1067105>
- Salánki J., V.-Balogh K., Berta E. (1982). Heavy metals in animals of Lake Balaton. *Water Research.* 16. pp. 1147-1152. [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(82\)90132-4](https://doi.org/10.1016/0043-1354(82)90132-4)
- Schulz, C.J., Canedo-Argüelles, M. (2019). Lost in translation: the German literature on freshwater salinization. *Philosophical Transactions R. Soc. B* 374:20180007. <https://doi.org/10.1098/rstb.2018.0007>

Scott, R., Goulden, T., Letman, M., Hayward, J., Jamieson, R. (2019). Long-term evaluation of the impact of urbanization on chloride levels in lakes in a temperate region. *Journal of Environmental Management* 244. pp. 285-293. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.05.029>

Sebestyén O. (1963). Bevezetés a Limnológiába. Akadémiai Kiadó, Budapest. p. 234.

Somlyódy, L., van Straten, G., (eds) (1986). Modelling and managing shallow lake eutrophication. Springer Verlag, ISBN3-540-16227-5. p. 386.

Stenger-Kovács C., Béres V.B., Buczkó, K., Tapolczai K., Padisák J., Selmezy G.B., Lengyel E., (2023). Diatom community response to inland water salinization: a review. *Hydrobiologia* 850. pp. 4627-4663. <https://doi.org/10.1007/s10750-023-05167-w>

Szabó Z. (1930). A Balaton vizének vegyelemzése. *Magy. Biol. Kut. Munk.* 3. pp. 488-500.

Szilágyi F. (2003). A vízpótlás hatása a Balaton és a Zala vizének ionösszetételére. Kézirat. BME Vízi Közmű és Környezetmérnöki Tanszék, Budapest.

Thornton, J.A., Slawski, T.M., Lin, H. (2015). Salinization: the ultimate threat of temperate lakes, with particular reference to Southeastern Wisconsin (USA). *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*. 33. pp. 1461-1475. <https://doi.org/10.1007/s00343-015-4368-3>

V.-Balogh K., Salánki J. (1986). Nehézfémek koncentrációjának időbeli változása a dévérkeszeg (Abramis brama L.) szerveiben eltérő szennyezettségű természetes vizekben. *Hidrológiai Közöny*, 66. évf. pp. 84-89.

V.-Balogh K. (1986). Szennyvíztisztító és vitorlástelep nehézfémzennyezésének jelzése Balatonfüred térségében. *Hidrológiai Közöny* 66. pp. 360-365.

Virág Á. (1998). A Balaton múltja és jelene. Egri Nyomda Kft. Eger. p. 904.

Wetzel, R.G. (1983). *Limnology*. Saunders College Publishing, Philadelphia.

Williams, W.D. (1998). Management of inland saline waters. *Guidelines of lake management* 6. ILEC, Japan. P. 108.

Williams, W.D. (2001). Anthropogenic salinization of inland waters. *Hydrobiologia* 466. pp. 329-337. [https://doi.org/10.1007/978-94-017-2934-5\\_30](https://doi.org/10.1007/978-94-017-2934-5_30)

Zak, D., Hupfer, M., Cabezas, A., Jurasinski, G., Auer, J., Kleeberg, A., McInnes, R., Kristiansen, S.M., Petersen, R.J., Liu H., Goldhammer T., (2021). Sulphate in freshwater ecosystems: A review of sources, biogeochemical cycles, ecotoxicological effects and bioremediation. *Earth Science Reviews* 212:103446. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103446>

## A SZERZŐK



**VÖRÖS LAJOS** Kutató professor emeritus, az MTA doktora, algológus, limnológus. A HUN-REN Balatoni Limnológiai Kutatóintézet Hidrobotanikai és Mikrobiális Ökológiai Kutatócsoportjában tavak és folyóvizek fitoplanktonjának elsődleges termelésével, ökológiájával, az eutrofizáció és a salinizáció hatásainak elemzésével foglalkozik. Kiemelten tanulmányozza a bakteriális méretű pikofitoplankton az édesvízi élőhelyek mellett extrém környezetben, többek között a Kárpát-medence szikes tavaiban, erdélyi és kazahsztáni hipersós tavakban. A Magyar Hidrológia Társaság tagja 1996 óta.



**TÓTH GYÖRGY ISTVÁN** Az Országos Vízügyi Főigazgatóság kiemelt műszaki referense, vegyész-mérnök. Tevékenységi területei: kémiai környezetanalitikai eljárások fejlesztése, validálása, szabványosítása, minőségirányítási rendszer bevezetésének koordinációja a vízvizsgálati laboratóriumokban, adatbázisok és állapotértékelési rendszerek kialakítása, a vízminőségi monitoring szervezése. Az MSZT MB714 vízvizsgálati nemzeti szabványosítási bizottság elnöke.



**LÁTRÁNYI-LOVÁSZ ZSÓFIA** Kiemelt műszaki referens, Kis-Balaton Üzemeltetési Igazgatóság, Nyugat-dunántúli Vízügyi Igazgatóság. Természetvédelmi és vízgazdálkodási szakmérnök végzettségét 2018-ban szerezte a Nemzeti Közszolgálati Egyetemen. Szakterülete a Kis-Balaton Vízvédelmi Rendszer üzemeltetése, kutatások szervezése, összefogása. A Magyar Hidrológia Társaság tagja 2018 óta.



**SOMOGYI BOGLÁRKA** Tudományos főmunkatárs, HUN-REN Balatoni Limnológiai Kutatóintézet. PhD fokozatát 2011-ben szerezte meg az Eötvös Loránd Tudományegyetemen, hidrobiológia szakterületen. Kutatási területe a fotoautotróf és heterotróf mikroorganizmusok (főként algák és baktériumok) dinamikájának és kapcsolatrendszerének vizsgálata természetes vizekben. Jelenlegi kutatásai vizes élőhelyek produkciobiológiai és mikrobiális ökológiai kérdéseire fókuszálnak, kiegészülve a korábban elkezdett molekuláris genetikai munkák folytatásával. 2008-tól a Magyar Hidrológiai Társaság tagja, 2023-tól a Limnológiai Szakosztály titkára.