

A Balaton vízpótlása: Tenni, de mikor és mit?

Honti Márk¹, Istvánovics Vera², Berecz Diána³, Fülöp Bence⁴, Herodek Sándor⁵

¹ HUN-REN–BME Vízgazdálkodási Kutatócsoport, BME Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszék, Víztudományi és Vízbiztonsági Nemzeti Laboratórium, H-1111 Budapest, Műegyetem rkp. 3. (e-mail: mark.honti@gmail.com)

² BME Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszék, H-1111 Budapest, Műegyetem rkp. 3. (e-mail: istvanovics.vera@gmail.com)

³ PADON Alapítvány és BME Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszék, H-1088 Budapest, Krúdy Gyula utca 16-18. (e-mail: diana.berecz@pad.network)

⁴ Alkalmazott Víztudományi Intézet és BME Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszék, H-1082 Budapest, Horváth Mihály tér 4. (e-mail: fulop.bence@trinityenviro.hu)

⁵ HUN-REN Balatoni Limnológiai Kutatóintézet, H-8237 Tihany, Klebelsberg Kunó utca 3. (e-mail: herodek.sandor@blki.hu)

DOI:10.59258/hk.18346



Kivonat

A Balaton vízháztartása az éghajlatváltozás miatt jelentős átalakuláson megy keresztül. Az éves természetes vízkészletváltozás, vagyis a természetes vízforgalom egyenlege az előrejelzések többsége szerint egyre többször negatívba fordul. Ezért éghajlati modelledményekre támaszkodó hidrológiai és vízszintszabályozási modellekkel vizsgáltuk a tó vízszintjének várható változásait az optimista RCP4.5 és a realista RCP8.5 IPCC forgatókönyvekre. Az optimista éghajlati forgatókönyvben a tó jelenlegi alakja egészen a század végéig fennmarad, bár a vízállás – vízpótlás hiányában – átmenetileg többször nagyon alacsony tartományokba süllyed. A csak leeresztésre támaszkodó vízszintszabályozás ezeket a kilengéseket nem tudja megakadályozni, ezért a tóhasználat ma szokásos módjait 2040 után már valószínűleg csak időszakos vízpótlással lehet fenntartani. A realista forgatókönyvben a század utolsó harmadában a vízmérleg drámai romlása miatt a tó tartósan lefolyástalanná válik és jelenlegi kiterjedése is csak jelentős, a század vége felé már tartósan üzemelő vízpótlással tartható fenn. Az éghajlatváltozás és a kezelési módjának szánt tartósan magas vízállás is kedvezőtlen vízminőségi és ökológiai következményekkel jár. A vízpótlás lehetőségének megteremtésével lazítható lenne a jelenleg tározásra optimalizált vízszintszabályozási rend és ezzel enyhíthetők lennének a negatív ökológiai hatások. Ugyanakkor mivel a vízszintingadozások a jövőben minden előrejelzés szerint még egy fenntartható módon megtervezett vízpótlás mellett is elkerülhetetlenek lesznek, ezért haladéktalanul meg kell kezdeni az infrastruktúra és a vízhasználók felkészítését a változó vízszintekre.

Kulcsszavak

Vízháztartás, éghajlatváltozás, Balaton, fenntarthatóság, vízszintszabályozás, hidrológiai modellezés.

Water transfer to Lake Balaton: To do, but when and what?

Abstract

The water balance of Lake Balaton is undergoing significant changes due to climate change. The average natural water balance is projected to gradually turn negative. Therefore, we used hydrological and water level regulation models based on climate model results to investigate the expected changes in lake water levels for the optimistic RCP4.5 and realistic RCP8.5 IPCC scenarios. In the optimistic climate scenario, the current shape of the lake is maintained until the end of the century, although the water level temporarily drops to very low levels several times in the absence of water transfer. Water level regulation based on draining alone cannot prevent these fluctuations, and therefore currently dominant ways of using the lake are likely to be maintained after 2040 only through intermittent water transfer. In the realistic scenario, the dramatic deterioration of the water balance in the last third of the century will result in eliminating outflow from the lake almost permanently, and its current extent can only be maintained by a significant water transfer, which will have to become permanent towards the end of the century. Climate change and the persistently high levels meant as a mitigation measure both have a negative impact on water quality and ecology. The possibility of water transfer could relax the current water level regulation regime—which is currently optimised for storing water in the lake itself—and thus mitigate its negative ecological impacts. However, as water level fluctuations are predicted to be unavoidable in the future, even with sustainably moderate water transfer, the preparation of infrastructure and water users for changing water levels must begin immediately.

Keywords

Water balance, climate change, Lake Balaton, sustainability, water level regulation, hydrological modelling.

BEVEZETÉS

A Balaton Közép-Európa legnagyobb sekély tava (605 km² felület és 3,52 m átlagos mélység +100 cm-es síófoki vízállásnál, a tó vízgyűjtője 5 774 km² a tóval együtt [Kutics 2019]). A tó a XIX. század közepéig lényegében szabályozatlan, időszakos lefolyású volt (Virág 2005). Emiatt hosszú távon a vízszint több méteres ingadozást mutatott az időjárási és az éghajlati ingadozásokat követve, a levezetés mentén pedig rapszodikusán változó le-

folyást okozva (Virág 2005, Horváth és társai 2011, Zlinszky és Tímár 2013). A tó vízszintjének kiszámíthatatlan változása megnehezítette az emberi használatok jelentős körét, így először a közlekedési lehetőségek megteremtésének és az árvízveszély mérséklésének, majd később a már 1822-ben elinduló, de a tó felé csak fokozatosan forduló turisztikai fejlesztés (Schleicher 2014) érdekében a vízszint stabilizálásának igénye merült fel. A vízszintszabályozás kulcskérdés volt a Balaton körül és a Sió mentén

1776-tól, Krieger lecsapolási tervétől (*Virág 2005*) egészen a XX. század közepéig, amikor a Sió-zsilip és a levezető meder kapacitását sikerült annyira kiépíteni, hogy leeresztéssel hatékonyan szabályozhatóvá vált a vízállás (*Szlávik 2005*). Ezután mintegy 50 évig a vízszintszabályozás kikerült a közérdeklődés látóteréből, bár a szabályozási szintek által közrefogott "optimális" vízszinttartomány turisztikai szempontokra hivatkozva fokozatosan szűkült (*Varga 2005*).

Az 1876-2023 időszakban a legkisebb feljegyzett vízállás -39 cm volt (1921. december 14.), míg a maximum +195 cm (1879. június 4.). A szabályozási keretek kialakítása után az ingadozás csökkent, a modern minimum +16 cm volt (1949), mely csak 24 cm-rel maradt alatta az akkori alsó szabályozási szintnek.

A csupán leeresztéssel történő vízszintszabályozás feltetelezi, hogy a Balatonban hosszú távon és jórészt évszakosan is víztöbblet van, vagyis, hogy a tó természetes vízmérlege pozitív. Ellenkező esetben csak a túl magasnak tartott vízszintek előfordulását tudja a leeresztés megakadályozni, a nemkívánatos alacsony vízszintek nem szabályozhatók. A szabályozatlan kor rekonstruált vízszintváltozásai azt mutatják, hogy hosszú távon a természetes vízmérleg az éghajlat ingadozásainak megfelelően, a modern emberi elvárásoknál szélesebb tartományban változik. A mintegy 2 méteres vízszintingadozás nem kiemelkedően nagy a régió nagy tavai között (*Hinegk és társai 2022*), ugyanakkor a Balatonban ez a meder sekélysege miatt nagyon jelentős relatív térfogatváltozással jár. A -50 és +150 cm-es síófoki vízállás között a Balaton térfogata majdnem megduplázódik (1,27-ről 2,45 km³-re), míg a nagy prealpin tavakban ekkora szintváltozás csupán 0,5-2% térfogatváltozást okoz (*Hinegk és társai 2022*). Így a mélyebb tavakhoz képest a Balaton fokozottan sérülékeny az éghajlati ingadozásokkal szemben. Ezt röviddel a kellő leeresztési kapacitás kiépítése után, már az 1970-es években felismerték és tervek készültek a tó mesterséges vízpótlására, mellyel a vízszintszabályozás eszköztára teljeskörűvé válhatott volna (*Somlyódy 2005*).

A vízszint-kérdés az éghajlatváltozás miatt került újra napirendre: a 2000-2003 közötti aszály és vízszintcsökkenés országos visszhangot keltett. A vízügy, a VITUKI, majd Országos Vízügyi Főigazgatóság (OVF) által 1921 óta készített vízmérlegben 2000-2003 előtt sosem tapasztaltak olyan éveket, melyekben a Balaton természetes vízkészletváltozása (TVK; a csapadék és a hozzáfolyás, mint bevétel, valamint a párolgás, mint kiadás egyenlege) negatív lett volna, vagyis a tó vízszintje éves léptéken leeresztés nélkül is csökkent volna. A negyedik aszályos nyár után, 2003-ban bekövetkező több évtizedes negatív vízállás-rekordra reakcióként született a vízpótlás szükségességét vizsgáló tanulmány sorozat (*Somlyódy 2005*), mely arra a következtetésre jutott, hogy a külső vízpótlás nem indokolt, mert (i) a negatív TVK akkor még annyira különleges volt, hogy nem lehetett megbecsülni a várható visszatérési gyakoriságát (vagyis a 2000-2003 közötti aszály még az akkori éghajlatváltozási forgatókönyvekben is nagyon szélsőségesnek számított), (ii) a vízszintcsökkenés nem okozott vízminőségi problémákat, (iii) a legolcsóbban

megvalósítható rábai vízpótlás nem biztosított volna elegendő pótlási kapacitást, és (iv) így a kockázatok meghaladták volna a beavatkozástól várható nyereséget. Vízpótlást kizáró ok nem merült fel, a beavatkozás egyszerűen nem volt indokolt (*Mayer 2005*). „A vízszint változásának hatása a Balaton ökológiai állapotára” (BALÖKO) című projekt részletes terhelési, vízminőségi és ökológiai vizsgálatai sem igazoltak kizáró okot, de több élőlény csoport esetében azt állapították meg, hogy a 0 cm alatti vízállások rövid idő alatt is kritikus változásokat okozhatnak (*Herodek 2007*). Nem tudjuk, hogy mekkora lenne a kritikus vízállás, ha a vízszint tartósan (pl. évtizedes távon) alacsony maradna.

A 2003-as vizsgálat kimutatta, hogy az alacsony vízállás elkerülése elsősorban társadalmi szempontból tartogathat előnyöket, természeti okokból nincs rá szükség (*Tombác és társai 2005*). A 0 cm feletti tartományban az alacsony vízszint nem okozott vízminőségi problémákat és előnyösen hatott a parti öv életközösségeire, míg a vízhasználók akkoriban már 50 cm alatt komoly használati kellemetlenségeket tapasztaltak.

2004 után a negatív TVK-jú évek rendszeresen visszatérése nyilvánvalóvá tette, hogy 2000-2003 nem egy egyszeri katasztrófa volt, hanem a változó éghajlat egyik első jelentős hatása. A vízpótlás témája azonban a szakmai és a szélesebb társadalmi diskurzusban is háttérbe szorult, ugyanis a probléma más eszközökkel is kezelhetőnek látszott. A szabályozás – külső tározási lehetőségek hiányában és a 2003-as menedzsment-javaslatok nyomán – a medertározás fokozása irányába mozdult, ami a szabályozási szint 120 cm-re emelésében vált végleg hivatalos gyakorlattá, összhangban a Nemzeti Vízzáratási vízvisszatartási koncepciójával. A medertározás (vagyis a korábbinál magasabb vízszint tartása) valóban képes csökkenteni az alacsony vízállások bekövetkezési valószínűségét (*Koncsos és társai 2005*). A számítások szerint +10 cm vízszintemeléssel felezi egy extrém alacsony vízállás előfordulási gyakoriságát. A medertározás azonban csak akkor lehet eredményes szabályozási eszköz, ha a magasabb vízállás nem okoz nagyobb károkat, mint a kivédeni kívánt alacsony, és ha a vízhasználók értékelik az alacsony vízállások ritkulását, vagyis nem szoknak hozzá az új rendszerhez az emeléssel párhuzamosan feljebb tolva a nekik már túl alacsonynak számító vízszint-tartományt. A 2018-2019-ben OVF megbízásában végzett szakértői és döntéshozói interjúk, valamint a 2022-ben az Innovációs és Technológiai Minisztérium (ITM) megbízásában készült komplex Balaton Klíma tanulmányok (*Balaton Algavirágzás Konzorcium 2022, Balaton Klíma Konzorcium 2022*) kimutatták, hogy a 2016 óta emelt szabályozási vízszint megszokássá alakuló társadalmi érzékelése kapcsán előrevetíthető az aszályos időszakokban a társadalmi aggodalom és az ebből következő magasabb vízszint iránti társadalmi igény, valamint a vízpótlás gazdasági és turisztikai szempontú mérlegelése és egy jövőbeli beavatkozás. Az elmúlt évek szélesebb körű társadalmi kommunikációjában tetten érhető és a fent említett két tanulmány is rámutat arra, hogy az alacsony vízszintekkel szembeni aggodalom nagyobb az össztársadalmi érzékelésben, mint a magas vízszint és az abból következő kihívások kezelésének igénye (pl. előnté-

sek). A parti zóna fejlesztési terveiben, és a partvédművek magasztásában is az ilyen típusú társadalmi igények kiszolgálása manifesztálódik.

A 2019-ben bekövetkezett rekordmértékű alga-tömeg-produkció közvetetten szintén az éghajlatváltozás eredménye (Istvánovics és társai 2022). Az, hogy az algák növekedését a tartós hőretegződés nyomán az üledékből felszabaduló foszfor táplálta, újabb kényszereket teremt a vízszintszabályozással szemben. A meleg, szélcsendes nyári napokon kialakuló hőretegződés tartóssága ugyanis rendkívüli mértékben érzékeny a vízállásra és már pár deciméterrel alacsonyabb vízállás is képes megakadályozni a hőretegződés stabilizálódását. A vízminőségi problémák miatt a medertározás a melegező éghajlat alatt már a jelenlegi mértékében is fenntarthatatlanná válik, vagyis elveszítjük az egyetlen ma is rendelkezésre álló, az elővigyázatosság elvét követő vízgazdálkodási cselekvés lehetőségét.

A vízszintszabályozás jövőbeli lehetőségeit akkor vizsgálhatjuk kellő körültekintéssel, ha a jövő hidrológiai viszonyait is megalapozott módon vagyunk képesek leírni. A hidrológiai folyamatok jelentősen függenek az időjárásról és tá-

gabb értelemben az éghajlattól. A jövő éghajlata azonban bizonytalan egyrészt amiatt, hogy a folyamatban lévő klímaváltozásra adandó emberi válaszok előre nem meghatározottak, a jövőt a mostani és későbbi cselekedeteink is befolyásolják, vagyis különböző forgatókönyvek valósulhatnak meg, másrészt az éghajlati rendszer bonyolultsága miatt még ismert peremfeltételek mellett is csak eltérő, közelítőnek tekinthető előrejelzések tehetők. Jelenleg a jövő éghajlatára vonatkozó legjobb előrejelzéseket az éghajlati modellek eredményeiből meríthetjük, tehát egy modern vizsgálatnak ezeken kell alapulnia. Az elérhető éghajlati modellek sokasága együttesen alátámasztja, hogy egy-egy modell eredménye csak egy lehetséges trajektóriát ír le, a jövőre és annak bizonytalanságára vonatkozó tudásunk csak a modellek eredményeinek összességével írható le (Ensemble-módszer). Mivel a jövő a múlthoz képest jelentős hidrometeorológiai változásokat tartogat, így a vízgyűjtő viselkedését szintén modellezéssel kell vizsgálni, hiszen a múlt megfigyelései a jövőre nézve már csak kevésbé lesznek reprezentatívok (Milly és társai 2008). A Balaton vízháztartását korábban vizsgáló tanulmányok nem tettek maradéktalanul eleget a fenti követelményeknek (1. táblázat).

1. táblázat. A Balaton vízháztartásának korábbi vizsgálatai és megfelelésük a modern előrejelzési követelményeknek
Table 1. Former studies on the water balance of Lake Balaton and their compliance to modern preconditions of forecasting

Tanulmány	Év	Éghajlati modellen alapuló klímaprognózis	Éghajlati bizonytalanság megjelenítése	Vízgyűjtőmodell használata
Somlyódy és Honti	2005	nem, leskálázás (Nováky 2003)	nem, csak 1 jövőbeli éghajlat	nem, a hozzáfolyás a csapadékkal arányos
Honti és Somlyódy	2009	nem, leskálázás (Nováky 2003, 2005)	részben, 3 jövőbeli forgatókönyv, mindre 1-1 előrejelzés	nem, a hozzáfolyás a csapadékkal arányos
VITUKI Hungary	2016	igen, ALADIN-Climate	nem, csak 1 jövőbeli éghajlat	igen

Ugyanakkor ezek a tanulmányok egyhangúlag jelölték ki a nagyléptékű trendet: a melegedés miatt a Balaton párolgása és a vízgyűjtő evapotranszpirációja növekedni fog, ami a csapadék változásától nagyjából függetlenül is a természetes vízmérleg egyenlegének csökkenésével jár. Ennek következménye, hogy az alacsony vízállások a szabályozás jelenlegi eszközei mellett mindenképpen gyakoribbak lesznek. A 2003 utáni években rendszeresen visszatérő negatív természetes vízmérleg alátámasztja ezeket az eredményeket: a vízmérleg romlásának fő oka a hozzáfolyás csökkenése volt (VITUKI Hungary 2016, Kutics és társai 2016). A már azóta is melegebbé vált éghajlaton a csapadék kis mértékű változása mellett a hozzáfolyás radikálisan csökkent. Ez rámutat arra, hogy a vízgyűjtő hidrológiájának kellő részletességű leírása elengedhetetlen a megbízható előrejelzések készítéséhez. Ugyanakkor a jövő szabályozási lehetőségeinek meghatározásához nemcsak az átlagos, nagyléptékű változást, hanem a változékonyságot és az előrejelzések bizonytalanságát is ismerünk kell.

A Balaton jövőbeli vízháztartására viszont eddig nem készült még olyan előrejelzés, amely megfelelően reprezentálná az éghajlati bizonytalanságot, miközben elfogadható hidrológiai modellek segítségével számítaná az éghajlat hatását a vízmérleg elemeire. Jelen tanulmány célja ennek a hiánynak a pótlása.

MÓDSZEREK

Éghajlatváltozás

A jövőbeli hidrológiai viszonyok előrejelzéséhez különböző regionális klímamodellek havi csapadék- és lég-hőmérséklet-szimulációit használtuk. A modellek az 5. IPCC jelentésben (IPCC 2014) definiált "közepes/reális" RCP4.5 és "magas kibocsátású" RCP8.5 forgatókönyvön (RCP: Representative Concentration Pathway) alapultak, melyek azzal számolnak, hogy a sugárzási kényszer a század végéig rendre 4,5, illetve 8,5 W m⁻²-en stabilizálódik. Ez mintegy 2 °C és 4 °C globális átlaghőmérséklet-emelkedést jelent (Rogelj és társai 2012).

A regionális klímamodellek (RCM-ek) számára különböző globális cirkulációs modellek (GCM-ek) biztosítják a futtatáshoz szükséges kezdeti- és peremfeltételeket. A globális modellek rácsfelbontása 200-250 km körüli, ami nem elég pontos a regionális változások leképezéséhez. Ezt felismerve fejlesztették ki az ún. beágyazott modellekkel történő szimulációt, ahol a globális modellek eredményei lesznek a regionális modellek bemenő paraméterei (Giorgio 1990). Utóbbiak képesek a globális modellek eredményeit területileg finomabb, átlagosan 10-25 km-es számítási hálóra lebontani.

A jövőbeli éghajlat alakulását az Euro-Cordex adatbázisból származó 24 különböző globális- és regionális éghajlati modell-párossal vizsgáltuk (2. táblázat). A model-

lek szerkezete és eredményei is különböznek, de jelenleg nem tudjuk eldönteni, hogy melyik modellpár jósolja meg legjobban a jövő éghajlatát. A jövő bizonytalanságát az

összes modellpár eredményeivel írjuk le: az összes eredmény átlaga a legvalószínűbb változás, szórása pedig az éghajlatváltozás bizonytalansága.

2. táblázat. Az előrejelzésekhez használt globális–regionális klímamodell-párok. Az IPCC forgatókönyv alatti ✓ jelöli, hogy a modelledmények 2099 végéig elérhetők (Euro-Cordex 2009)

Table 2. Pairs of global and regional climate models used in forecasting. The ✓ sign under the IPCC scenario indicates data availability until the end of 2099 (Euro-Cordex 2009)

	Globális modell	Regionális modell	RCP4.5	RCP8.5
1	CCCma-CanESM2	SMHI-RCA4	✓	✓
2	CNRM-CERFACS-CNRM-CM5	CLMcom-CCLM5-0-6		✓
3	CNRM-CERFACS-CNRM-CM5	CNRM-ALADIN53	✓	✓
4	CNRM-CERFACS-CNRM-CM5	HMS-ALADIN52	✓	✓
5	CNRM-CERFACS-CNRM-CM5	RMIB-UGent-ALARO-0	✓	✓
6	CNRM-CERFACS-CNRM-CM5	SMHI-RCA4	✓	✓
7	CSIRO-OCCCE-CSIRO-Mk3-6-0	SMHI-RCA4	✓	✓
8	ICHEC-EC-EARTH	CLMcom-CCLM5-0-6		✓
9	ICHEC-EC-EARTH	KNMI-RACMO22E	✓	✓
10	ICHEC-EC-EARTH	SMHI-RCA4	✓	✓
11	ICHEC-EC-EARTH	DMI-HIRHAM5	✓	✓
12	IPSL-IPSL-CM5A-MR	IPSL-INNERIS-WRF331F	✓	✓
13	IPSL-IPSL-CM5A-MR	SMHI-RCA4	✓	✓
14	MIROC-MIROC5	CLMcom-CCLM5-0-6		✓
15	MIROC-MIROC5	SMHI-RCA4	✓	✓
16	MOHC-HadGEM2-ES	CLMcom-CCLM5-0-6		✓
17	MOHC-HadGEM2-ES	KNMI-RACMO22E	✓	✓
18	MOHC-HadGEM2-ES	SMHI-RCA4	✓	✓
19	MPI-M-MPI-ESM-LR	CLMcom-CCLM4-8-17	✓	✓
20	MPI-M-MPI-ESM-LR	CLMcom-CCLM5-0-6		✓
21	MPI-M-MPI-ESM-LR	MPI-CSC-REMO2009	✓	✓
22	MPI-M-MPI-ESM-LR	SMHI-RCA4	✓	✓
23	NCC-NorESM1-M	SMHI-RCA4	✓	✓
24	NOAA-GFDL-GFDL-ESM2M	SMHI-RCA4	✓	✓

A valószínűségi eloszlások változásának vizsgálatához szokásos egy referencia és egy jövőt reprezentáló időszakot kijelölni az éghajlatváltozás hatásainak statisztikai vizsgálatánál. A két sokaság paramétereinek közötti eltérések mutatják az eloszlások megváltozását. Itt a jövőben várható viszonyokat az éghajlatváltozás folyamatában vizsgáljuk, mivel fontos a hidrológiai hatások időbeli kifejlődésének kimutatása. Ugyanakkor az éghajlati és hidrológiai modellek hibáinak kiküszöböléséhez szükséges a referencia-időszak kijelölése, mivel a hibák ez alapján korrigálhatók. Feltételezzük, hogy vízháztartási szempontból a közelmúlt éghajlatát az 1981-2015 közötti időszak jellemzi. A regionális éghajlati modellek számos időjárási

változót szimulálnak, de előrejelzéseik közül csak az átlaghőmérsékletet és a csapadékösszeget használtuk fel, mert a további szimulált meteorológiai paraméterek bizonytalansága meghaladja a várt változás mértékét.

A vízháztartás modellezése

A Balaton havi vízháztartási adatait 1921-2015 időszakra Varga György (OVF) bocsátotta rendelkezésünkre (Varga és társai 2019, Varga Gy. szóbeli közlése). A vízmérleg-számításban a korábbi tanulmányokhoz hasonlóan a természetes vízkészletváltozást használjuk:

$$\Delta V = TVK - L \pm U = (Cs + H - P) - L \pm U \quad (1)$$

ahol ΔV a tó víztérfogatának változása [m^3], TVK a természetes készletváltozás [m^3], Cs a tó felületére hulló csapadék [m^3], P a vízfelület párolgása [m^3], L a leeresztett vízmennyiség [m^3], U pedig a vízhasználat egyenlege [m^3] (utóbbi elhanyagolható). Az egyenletet vízállás mértékegységben, vagy térfogat helyett vízállásváltozásra írják fel (Somlyódy és Honti 2005), feltételezve, hogy a tó felülete a korlátos vízállásváltozás miatt állandónak tekinthető. Esetünkben ez nem alkalmazható, mert egyes forgatókönyveknél a térfogat és a felszín jelentős változására számítnak.

A tó vízállás-felszín összefüggését a VITUKI Hungary medermorfológiai adataira (VITUKI Hungary szóbeli közlése) illesztett harmadfokú polinom-regresszióból számítjuk:

$$A = 8,96 \cdot 10^{-9} Z^3 - 4,44 \cdot 10^{-6} Z^2 + 0,0102Z + 567,61 \quad (2)$$

ahol A a tó felülete [km^2], Z pedig a siófoki vízmérce szerinti vízállás [mm].

A tófelület jövőbeli párolgásának becsléséhez a Balaton múltbeli vízmérlegében megadott havi párolgást fejeztük ki a havi csapadék és hőmérséklet függvényében:

$$P = 19 \cdot (6,184 \exp(0,0669T) - \exp(0,0569T + 0,00074 Cs' + 1,6122)) \quad (3)$$

ahol T a havi átlaghőmérséklet [$^{\circ}\text{C}$], Cs' pedig a vízgyűjtő havi csapadékösszege [mm].

A hozzáfolyást hidrológiai modellezéssel határoztuk meg. A Kuczera és társai (2006) által kifejlesztett logSPM és a Honti és társai (2013) által továbbfejlesztett konceptuális hidrológiai modellt havi léptéken kalibráltuk a Balaton vízgyűjtőjére. A modell az úgynevezett telített hozzáfolyási pályák elvén alapul. Feltételezi, hogy a vízgyűjtő feltalajának átlagos víztartalma nemlineárisan befolyásolja a csapadékesemények során tapasztalható lefolyási tényező és az alaphozam illetve a felszínalatti lefolyás értékét. A vízgyűjtő felületi víztelítettségét az átlagos nedvességtartalom (h_s [mm]) alapján, a hervadáspont (HP [mm]), a vízmegtartó-képesség (VK [mm]) és a teljes telítettség (TT [mm]) vízgyűjtő-léptékű analógiájával számítjuk.

A terület közepes telítettséghez tartozó talajnedvessége a teljes telítettség és a vízmegtartó-képesség átlaga:

$$h_{s50} = \frac{TT+VK}{2} \quad (4)$$

A telítési folyamatot leíró szigmoid függvény TT és VK között nyúlik el:

$$f_{sat} = \frac{1}{1+\exp\left(\frac{8(h_{s50}-h_s)}{TT-VK}\right)} - \frac{1}{1+\exp\left(\frac{8h_{s50}}{TT-VK}\right)} \quad (5)$$

ahol f_{sat} a vízgyűjtő telített felületének aránya [–], h_s pedig az aktuális átlagos talajnedvesség [mm]. Egy adott időlépésben a felszíni lefolyás (FL [mm]) a telített felületeken 100%-os, a telítetleneken 0%-os lefolyási tényezővel számítható:

$$FL = f_{sat} Cs' \quad (6)$$

ahol Cs' a vízgyűjtőre hulló csapadék [mm]. A felszíninél lassabb felszínalatti lefolyás (FAL [mm]) is csak a víztelített területeken képződik:

$$FAL = f_{sat} FAL_{max} \quad (7)$$

ahol FAL_{max} [mm] a utánpótlódás maximális mennyisége. A területi párolgást a HP és VK talajnedvességi szintek alapján becsüljük. Feltételezzük, hogy a tényleges területi párolgás akkor lesz a potenciális érték 50%-a, amikor az átlagos talajnedvesség HP és (HP+VK)/2 között félúton van (ez $pF=3,3$ hozzáférhetőségnek felel meg a talaj víztartóképeségét leíró van Genuchten modellben [van Genuchten 1980]). Így:

$$f_{et50} = \frac{3HP+VK}{4} \quad (8)$$

$$k_{et} = \frac{10}{f_{et50}} \quad (9)$$

és ekkor a tényleges és a potenciális evapotranspiráció (ET és PET, [mm]) aránya ugyanazzal a szigmoid-struktúrával írható le, mint f_{sat} :

$$\frac{ET}{PET} = \frac{1}{1+\exp(-k_{et}(h_s-h_{s50}))} - \frac{1}{1+\exp(k_{et}h_{s50})} \quad (10)$$

A modell bemeneti adatai a havi csapadék, hőmérséklet és potenciális evapotranspiráció, mely utóbbit a Balaton vízfelületi párolgásából (P' [mm]), a P_{mult} dimenzió nélküli szorzótényezővel közelítünk.

A vízgyűjtő talajnedvesség-mérlege a következőképpen alakul:

$$d h_s = Cs' - FL - FAL - P' P_{mult} ET/PET \quad (11)$$

Ezt – az integrálás algoritmusától függően – differencia-, vagy differenciál-egyenletet kell megoldani a modell futtatásához. A teljes hozzáfolyás (H' [vízgyűjtő mm]) minden lépésre:

$$H' = FL + FAL \quad (12)$$

A hozzáfolyás modelljét az 1985-2015 időszak adataira kalibráltuk. A legjobb illeszkedést biztosító paramétereket a 3. táblázat tartalmazza.

3. táblázat. A csapadék-lefolyás modell optimális paraméterei
Table 3. Optimal parameter values of the rainfall-runoff model.

Paraméter	Jelentés	Érték	Mértékegység
TT	A vízgyűjtő teljes telítettségéhez tartozó átlagos víztartalom	1578	mm
VK	A hozzáfolyás leállásához tartozó átlagos víztartalom	717	mm
HP	A vízgyűjtőpárolgás leállásához tartozó átlagos víztartalom	554	mm
L_{max}	Az utánpótlódás maximális mennyisége	392	mm/év
P_{mult}	A potenciális evapotranspiráció szorzótényezője	141%	–

A hidrológiai modellt számos szisztematikus hiba terheli. Az éghajlati modellek még többéves léptéken sem tudják megfelelően szimulálni a referencia-időszak időjárását, a párolgás- és hozzáfolyás modellek is tartalmaznak nem véletlenszerű hibákat. Ezeket ki kell ahhoz küszöbölni, hogy a jövőre vonatkozóan is abszolút előrejelzéseket lehessen tenni.

Először a meteorológiai adatok szisztematikus hibáit korrigáltuk a referencia-időszak alapján az egyszerű lineáris skálázás módszerével (Luo és társai 2018). A modellezett csapadék- és hőmérséklet adatokat beszoroztuk úgy, hogy a referencia-időszakban mért és az arra modellezett átlagok megegyezzenek. A jövő vonatkozásában – egyéb információk hiányában – feltételeztük, hogy a modellek múltra vonatkozó relatív hibája a jövőre nézve is reprezentatív. Utána a modellezett párolgás- és hozzáfolyás adatokkal jártunk el ugyanígy. Az első lépés csak a meteorológiai tényezők független hibáit küszöbölte ki, míg a másodikban lehetőség nyílt a két tényező együttes hibái nyomán fellépő hatások kompenzálására. A két lépéssel biztosítottuk, hogy a referencia-időszakra vonatkozó Cs, P és H komponensek, valamint ezután a TVK átlaga is megegyezzen a vízmérleg megfelelő elemeivel.

Leeresztés

Bár a fent részletezett eljárással a TVK múlt- és jövőbeli értékei és valószínűségi eloszlásai már összehasonlíthatók, a vízszintre csak akkor tudunk megállapításokat tenni, ha kiküszöböljük a múltbeli szabályozási rend változásait és a szabályozás időnkénti esetlegességét. Ehhez egy egységes "referencia-stratégiát" alkalmazunk a múltra és a jövőre. Az egyszerűség kedvéért a referencia-stratégia a következő primitív, de vízleeresztési szempontból konzervatív algoritmust használja havi léptéken:

1. A vízszint meghaladja a 120 cm-t? Ha igen: 2. pont, ha nem: 3. pont.
2. Leeresztés legfeljebb 120 cm-ig, maximum 100 m³/s kapacitással. Lépj a 4. pontra.
3. Nincs leeresztés. Lépj a 4. pontra.
4. Következő hónap, 1. pont.

Ez a stratégia természetesen nem lenne alkalmas a tó vízszintjének valós szabályozására, mivel nem tartalmaz évszakos különbségeket és a hónapon belüli eseményeket sem kezeli, de a vízszint hosszútávú vizsgálatára megfelelő, hiszen a jelenlegi infrastrukturális adottságokat is meghaladó mértékben maximalizálja a medertározást.

Vízpótlás

Mayer (2005) elemezte a Balaton vízpótlásának műszaki lehetőségeit. A vízpótlás lehetséges nagyságának és idejének meghatározásához – az EU természeti irányelveinek betartásával – a Balaton és a pótláshoz felhasznált felszíni vagy felszín alatti víztest és a pótló vizet a Balatonba vezető víztestek szempontjait is figyelembe kell venni. A vízpótlás alapelve, hogy a beavatkozásokat, a pótlás intenzitását és a járulékos (ökológiai) kockázatokat minden érintett víztestben minimalizálni kell, vagyis a vízpótlást csak az extrém alacsony vízállások elkerülésére szabad használni (Mayer 2005, Tamás és társai 2005).

A vízpótlás hatásának elemzéséhez először az időben erősen változó elméleti pótlási igényt számítjuk ki, egy felvett pótlási küszöb alatti hiány azonnalinak feltételezett megszüntetésével. Ebből meghatározzuk a minimális beavatkozás alapelvét tiszteletben tartó optimális pótlási szinteket és azt az időszakot, amikor a pótlás a forrás és a Balaton szempontjából sem ellenjavallt. Végül ezek jellemző kiépítési kapacitásaival vizsgálhatjuk a vízállásra gyakorolt hatást. A vízpótlás algoritmusa a következő:

1. A vízszint alulmúlja a pótlási küszöbszintet? Ha igen: 2. pont, ha nem: 4. pont.
2. Ebben a hónapban megengedett a pótlás? Ha igen: 3. pont, ha nem: 4. pont.
3. Vízpótlás működtetése a kiépítési kapacitással. A hónap végén lépj a 4. pontra.
4. Nincs vízpótlás. Lépj az 5. pontra.
5. Következő hónap, 1. pont.

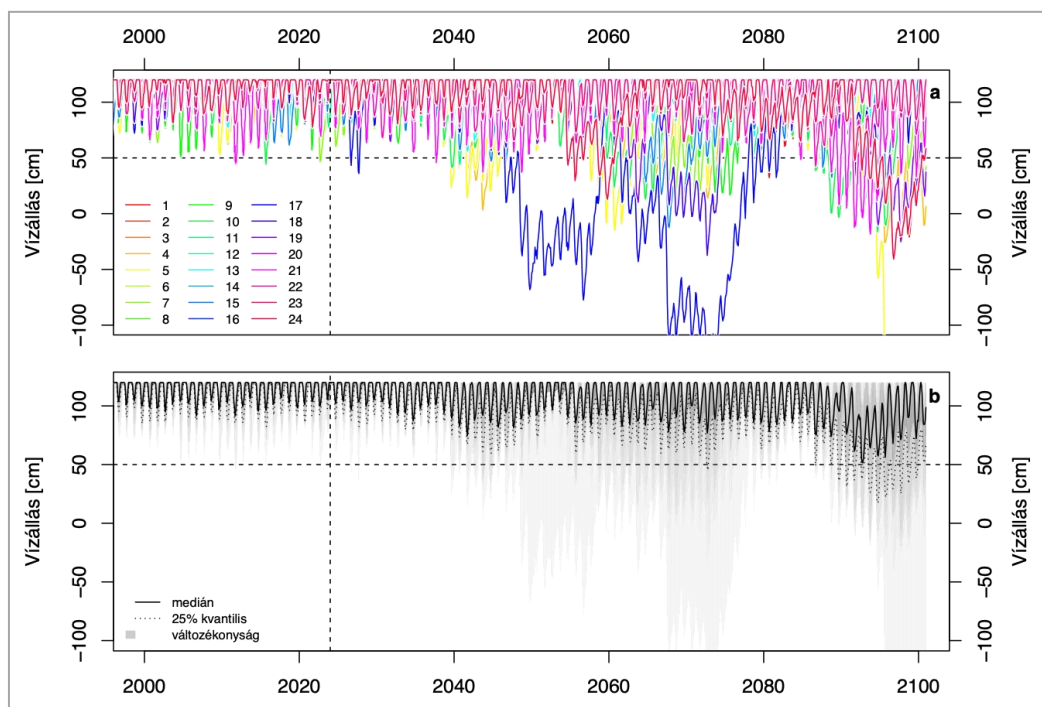
EREDMÉNYEK

Vízállások csak leeresztés szabályozással

Az egyes éghajlati modellpárok változatos képet festenek a havi vízállások alakulásáról. Az egyes modellpárok még a csapadékváltozás várható előjelében sem egyeznek, de abban igen, hogy a hőmérséklet növekedni fog. A vízháztartásra gyakorolt hatás így változatos. Az RCP 4.5 forgatókönyvön futtatott modellpárok között ennek ellenére konszenzus van arról, hogy kb. 2040-ig nem várható a jelenlegi vízszint-rezsim jelentős megváltozása (1. ábra).

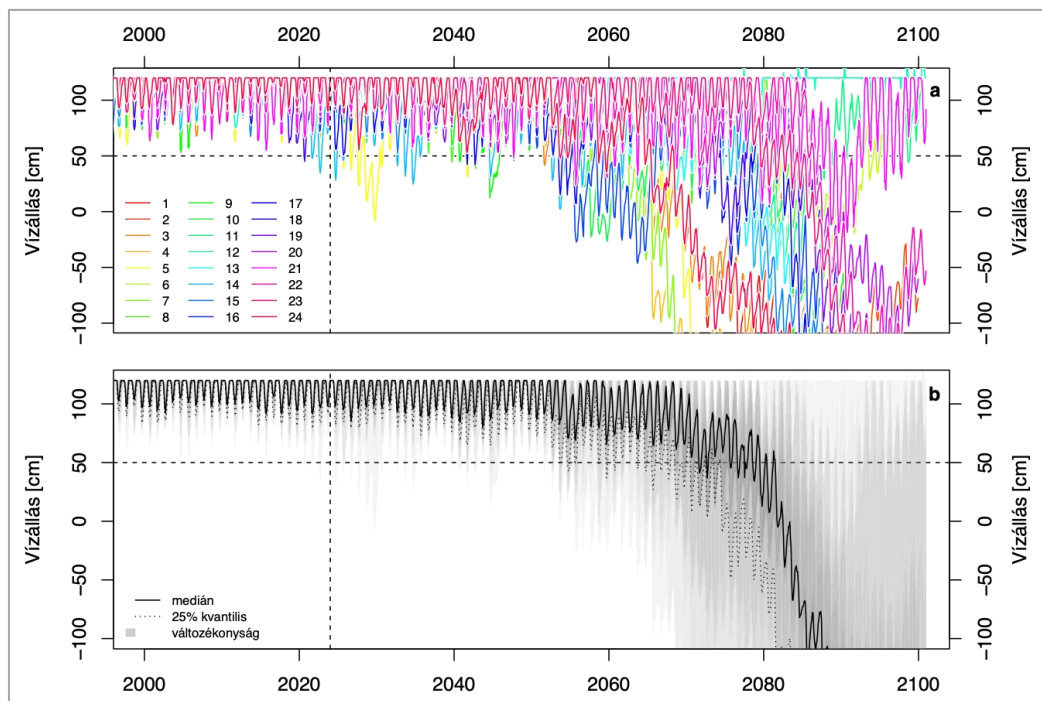
2040 után nő a modellek előrejelzései közötti különbség, majd az időhorizont távolodásával az extrém alacsony vízállások előfordulási gyakorisága növekszik, egyre több modellben fordulnak elő 50 cm körüli, vagy azt akár jelentősen alulmúló vízállások (1. ábra). Az RCP4.5 forgatókönyvben 2085 után már csak a modellek kisebbsége számol a jelenleg szokásos vízállás-tartomány fenntarthatóságával. Ez azt jelenti, hogy a csak leeresztésen alapuló vízszintszabályozás hosszútávon életképtelen, vagyis a vízállás távlatilag még akkor is csak úgy tartható az emberi hasznosítás szempontjából elfogadható tartományban (50-120 cm), ha megvan a külső vízpótlás lehetősége. A magas szabályozási szint nyilvánvalóan nem fogja kompenzálni a TVK változás vízszintcsökkentő hatását. Ugyanakkor egy kivétellel a modellek a század végéig nem számítanak a vízmérleg tartós felborulásával, vagyis az RCP4.5 forgatókönyvben a tó várhatóan hosszabb távon sem fogja a jelenlegi alakját megváltoztatni.

Az RCP8.5 forgatókönyvben a helyzet 2050-ig hasonlít az RCP4.5 eredményekhez, de az időszakosan 50 cm-t alulmúló vízállások már napjainktól is előfordulhatnak (2. ábra). 2050-től a melegedés miatt fokozatosan romló vízmérleg a vízállást fordulópontra juttatja: a modellek többsége szerint fokozatosan gyorsuló apadás kezdődik. 2070 után a tó már csak időlegesen és alacsony valószínűséggel tér vissza az általunk preferált vízállás-tartományba (2. ábra), a medián vízállás 2095-ben már csak -200 cm. Ez azt jelenti, hogy tartósan és jelentősen csökkenni fog a tó teljes és a nyíltvíz felülete is (3. ábra).



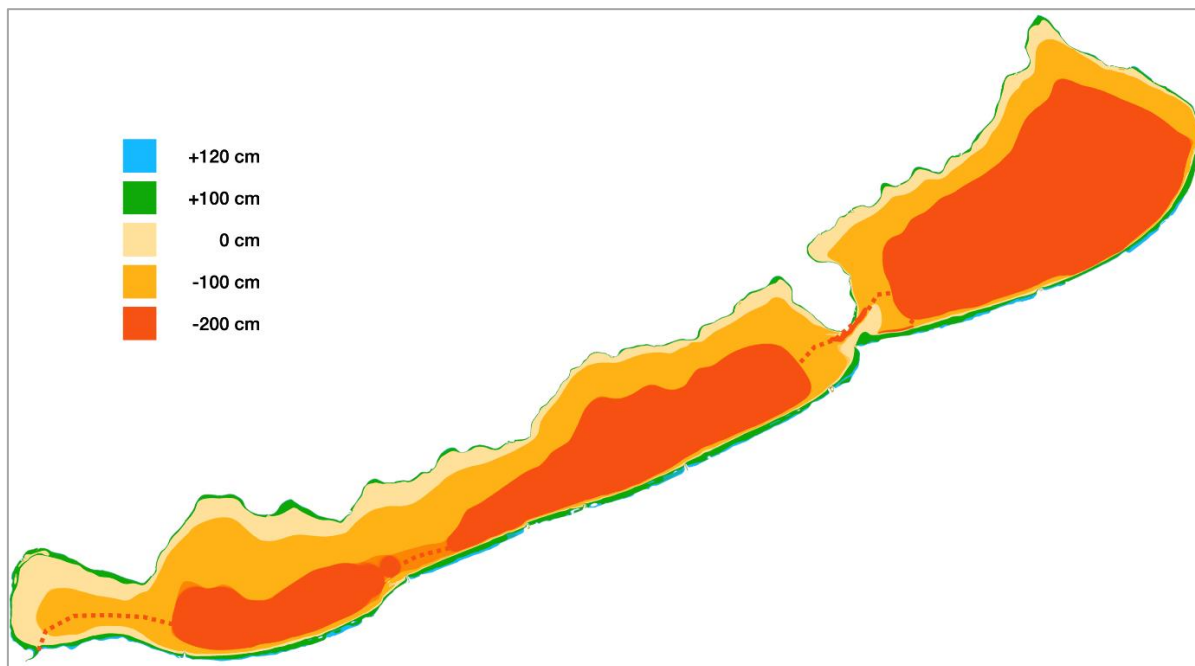
1. ábra. Az egyes Euro-Cordex modellpárok előrejelzései alapján számított havi vízállások a referencia leeresztési rend alkalmazásával az RCP4.5 forgatókönyvben. Az (a) panelen a vonalak színei az egyes modellpárokat jelölik az 1. táblázat sorszámaival. A (b) panelen a modellpár-ensemble előrejelzéseinek mediánja, 25%-os kvantilis és szürke árnyalással a teljes lefedett tartománya látható. Szaggatott egyenes vonalak jelölik a jelent, illetve az 50 cm-es küszöb-vízállást

Figure 1. Monthly stage of Lake Balaton calculated for the Euro-Cordex climate model pairs under the RCP4.5 scenario using the reference draining strategy. Colors distinguish between the trajectories of climate model pairs on panel (a), numbers refer to the rows of Table 1. On panel (b) the thick line indicates the median of the model ensemble, the dotted line is the 25% quantile, and the shaded area covers the entire ensemble variability



2. ábra. Az egyes Euro-Cordex modellpárok előrejelzései alapján számított havi vízállások a referencia leeresztési rend alkalmazásával az RCP8.5 forgatókönyvben. Az (a) panelen a vonalak színei az egyes modellpárokat jelölik az 1. táblázat sorszámaival. A (b) panelen a modellpár-ensemble előrejelzéseinek mediánja, 25%-os kvantilis és szürke árnyalással a teljes lefedett tartománya látható. Szaggatott egyenes vonalak jelölik a jelent, illetve az 50 cm-es küszöb-vízállást

Figure 2. Monthly stage of Lake Balaton calculated for the Euro-Cordex climate model pairs under the RCP8.5 scenario using the reference draining strategy. Colors distinguish between the trajectories of climate model pairs on panel (a), numbers refer to the rows of Table 1. On panel (b) the thick line indicates the median of the model ensemble, the dotted line is the 25% quantile, and the shaded area covers the entire ensemble variability



3. ábra. A Balaton 1 m-nél mélyebb, és így potenciálisan nyílt vízként megmaradó részének kiterjedése a jelenlegi mederben különböző nyugalmi vízállásoknál. Az egyes extrém küszöbök elérési ideje az RCP8.5 forgatókönyv 10% kvantilis/medián vízállásai alapján: 0 cm: 2078/2083, -100 cm: 2081/2086, -200 cm: 2088/2095

Figure 3. Distribution of area deeper than 1 m (which is likely to remain as open water) under distinct stages. Indicated thresholds will be reached under RCP8.5 based on the 10% quantile/median stage as follows: 0 cm: 2078/2083, -100 cm: 2081/2086, -200 cm: 2088/2095

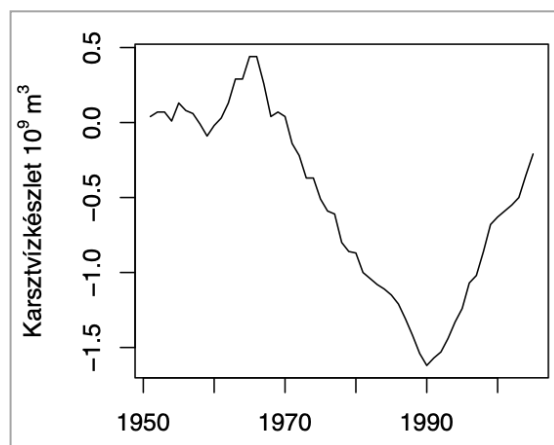
A vízpótlás lehetséges forrásai és időbeli korlátai

Külső pótlás a Rába, Duna, Mura és Dráva folyókból lehetséges (Mayer 2005). Belső pótlás a korábbihoz hasonló karsztvíz-szivattyúzásával végezhető. A rábai vízpótlást műszaki egyszerűsége ellenére a 2003-as vizsgálat (Somlyódy 2005) elvetette, mert a pótláshoz szükséges vízkészlet már akkor sem állt megbízhatóan rendelkezésre. A dunai, a Sión keresztül történő pótlás a Duna vízminőségi problémái, a műszaki bonyolultsága és a tó keleti részébe történő bevezetés miatt nem javasolt. A Drávából, illetve a Murából történő pótlás a rábainál többbe kerülne és változatontként a vízminőségi kockázat is némileg magasabb lenne, de az érdemleges pótláshoz szükséges vízkészlet megbízhatóan rendelkezésre áll (Mayer 2005).

A karsztvíz pótlás átmeneti lehetőség, hiszen a korábbi bányászati szivattyúzás a gyakorlatban is megmutatta, hogy a tartós, nagymértékű kiemelés, egyéb problémák okozása mellett a karsztforrások hozamán keresztül végső soron a Balatonba érkező hozzáfolyást is csökkenti. Ugyanakkor a karsztvízből történő pótlásnál nincs vízminőségi kockázat és a szivattyúzás újraindítása nagyon kevés fejlesztéssel megoldható (Mayer 2005).

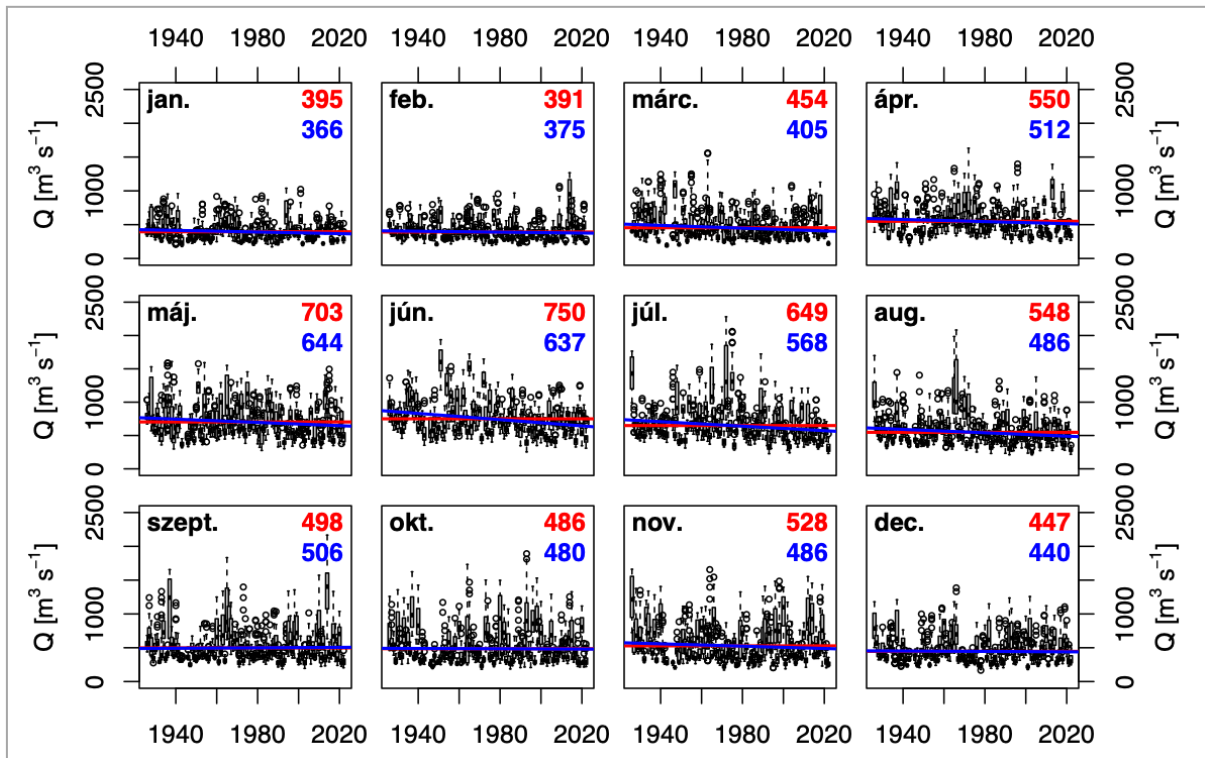
A dunántúli főkarsztvíztároló vízkészlete a korábbi bányászati szivattyúzások alatt majdnem 2 milliárd m^3 -rel csökkent (Csepregi 2007). A nagyléptékű vízkiemelés le-

állítás után a vízkészlet 15 év alatt megközelítette a bányászat előtti szintet. Az 1990 és 2005 közötti regenerálódás átlagos sebessége $97 \text{ millió m}^3 \text{ év}^{-1}$ volt, amely $3,1 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ állandó hozamnak felel meg (4. ábra). A karsztvízkészletből történő vízpótlás kapacitását a fenntarthatóság és a karsztvíz-táplálta vizek fennmaradása miatt jóval a $97 \text{ millió m}^3 \text{ év}^{-1}$ alatt kell megszabni, vagyis a pótlás a Balaton vízszintjét évente kevesebb, mint 16 cm-rel emelheti.



4. ábra. A dunántúli főkarsztvíztároló vízkészletének görgetett egyenlege 1951-2005 között (Csepregi 2007 nyomán)

Figure 4. Water resources of the Transdanubian main karst aquifer between 1951 and 2005 (modified from Csepregi 2007)



5. ábra. A Dráva alsómihljáci (Donji Miholjac, Horvátország) szelvényének havi hozamai 1926-tól 2022-ig (Global Runoff Data Center)

Magyarázat: Az egyes hónapokon belüli vízhozam-eloszlást Box-diagramok szemléltetik. A piros vonal és a piros szám a teljes megfigyelési időszakra vonatkozó átlag, a kék vonal a teljes időszakra illesztett lineáris trend. A kék szám a trendvonal szerinti hozam 2022-ben

Figure 5. Monthly discharge of the Dráva river at Donji Miholjac (Croatia) 1926-2022 (Global Runoff Data Center)

Comment: Each month has a Boxplot from the daily discharge. The red line and number stand for the mean discharge over the entire period, the blue line is the linear trend. The blue number is the value of the trend line in 2022

A Dráva hozamai az 1926-2022 időszakban szeptember kivételével minden hónapban csökkentek (5. ábra). A legnagyobb relatív csökkenés júniusban és júliusban tapasztalható. Ugyanakkor a hozam még így is minden hónapban legalább egy nagyságrenddel meghaladja a korábban vizsgált vízpótlási hozamot ($7 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) (Mayer 2005). Ugyanakkor a Dráva medre fokozatosan mélyül (Pomázi és társai 2023), az ártéri elöntések gyakorisága csökken (Baranya és társai 2020), tehát a vegetációs időszakban kerülendő a vízkivétel.

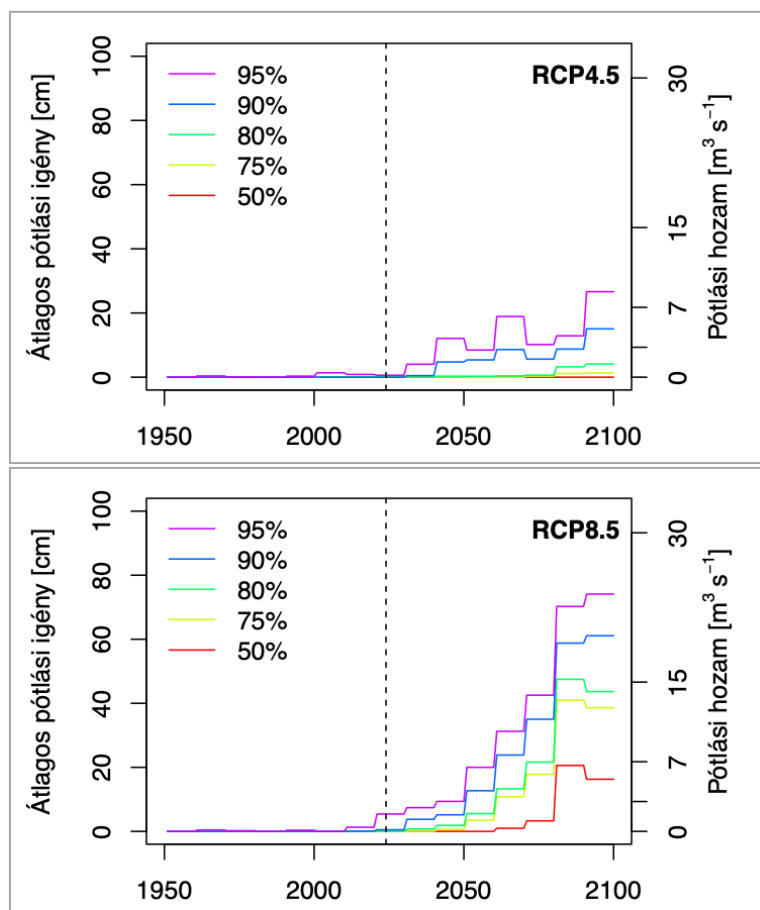
A legtöbb folyami pótlási megoldás bevezetése a Kis-Balatont is érinti, de a tározók vizének kedvezőtlen minősége miatt a fenékpasztai zsilip nyáron gyakran zárva van. A balatoni és a forrásoldali vízminőségi és ökológiai kockázatok csökkentése érdekében a vizet főleg vegetációs időszakon kívül lehet pótolni. A Dráva bővizű tavaszi hónapjait kihasználva a 7 hónapra bővített téli félévben (október elejétől április végéig) célszerű a vízpótlás elérhetőségével számolni.

A Balaton vízpótlási igényét természetesen befolyásolja, hogy hogyan definiáljuk az elkerülni kívánt extrém alacsony vízállást. A 2000-2003 aszály tapasztalatai alapján a +50 cm-es vízállás vízhasználati szempontból már problémás, mivel ekkor számos, főleg déli parti strandon és kikötőben nehezíti a sekély víz és az elszaporodó vízi növényzet a szokásos használatot. A vízpótlás intenzitásá-

nak minimalizálása érdekében azzal számolunk, hogy a pótlás csak több hónap alatt tudja kompenzálni a vízhiányt, így a pótlási küszöb és a kritikus vízállás közé egy biztonsági sávot kell beiktatni. Ezért a vízpótlást úgy tervezzük, hogy 50 cm-rel a referencia szabályozási szint (itt +120 cm) alatt (itt +70 cm-es vízállásnál) kapcsolható be. Ekkor a vízszint-előrejelzések alapján kiszámítható az elméleti pótlási igény.

Szabályozás leeresztéssel és vízpótlással

Az elméleti vízpótlási igény az RCP4.5 forgatókönyvben az 50%-os biztonsági szinten – vagyis, hogy a vízpótlás 50% valószínűséggel elegendő lesz a vízállás pótlási küszöb felett tartásához – az évszázad végéig elhanyagolható (6. ábra). A 90%-os biztonsághoz, ami nagyjából annak felel meg, hogy kb. 10 évente lesz extrém alacsony vízállás, már 2040 körül szükséges évi mintegy 10 cm-t pótolni. Ez évente 7 hónapos üzemelési ablakkal számolva $3 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ kiépítési hozamot feltételez. A 95%-os biztonsághoz kb. kétszer ekkora pótlási igény tartozik, ami már közel van a műszakilag megvalósíthatónak tartott határhoz ($7 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) (Mayer 2005). Az RCP8.5 forgatókönyvben a pótlási igény már a jelentősen exponenciálisan növekszik a 2080-as évekig (6. ábra), a műszakilag fedezhető kapacitás által nyújtott biztonság ezzel párhuzamosan csökken. A korábban vizsgált, megvalósíthatónak ítélt kapacitásokkal a század végén már csak 50% biztonság érhető el.



6. ábra. Elméleti pótlási igények az RCP4.5 (felül) és RCP8.5 (alul) éghajlati forgatókönyvekben. A bal tengely az éves átlagos pótlandó vízszintet, a jobb tengely egy évente legfeljebb 7 hónapon át üzemelő pótlás kapacitását mutatja

Figure 6. Theoretical transfer demand in the RCP4.5 (top) and RCP8.5 (bottom) scenarios. The left axis shown the mean annual demand as stage, the right one the necessary transfer discharge that would be operated for at most 7 months annually.

A pótlás hatékonyságát a pótlási hozam és a pótlás esetén megvalósuló extrém alacsony vízszintek viszonya fejezi ki. A vízpótlás mennyiségének növelése eleinte meredeken növeli a kialakuló legkisebb vízállásokat, de egy határon túl már nincs értelme a vízpótlás fokozásának, mert a leeresztés szabályozási szinthez kötése miatt a bevezetett víz egy részét kisvártatva le is eresztjük (7. ábra). Az RCP4.5 forgatókönyvben a bármelyik forrásból fedezhető $3 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ -os pótlás már nagy biztonsággal +70 cm felett tartja a vízállást, vagyis a mai szabályozási szinttől mért távolság az évek 90%-ában kisebb, mint 50 cm. A $7 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ugyanakkor a több, mint kétszeres hozam ellenére sem jár 2060 előtt jelentős javulással. Az RCP8.5 forgatókönyvben 2060 után a $7 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ viszont csak arra elég, hogy az alacsony vízállások többnyire +0 cm feletti legyenek (7-8. ábrák). Itt már ahhoz is kb. $15 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ pótlási hozamra lenne szükség, hogy a vízállások +50 cm fölött maradjanak. A pótlás hatékony kapacitása 2080-tól jelentősen megnő, a $15 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ már az 50 cm-hez sem elég.

Mivel a vízpótlás kiépítési kapacitása nem változhat évről évre az éghajlati ingadozások szerint, a vízpótlás részletes elemzéséhez fix kapacitású pótlások hatását is vizsgáltuk. Ehhez a különböző vízforrások terhelhetőségét figyelembe véve évente legfeljebb 7 hónapon keresztül üzemelő 3, 7 és $15 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ hozamokat vettünk fel. Az előbbi eredményekkel összhangban az RCP4.5 forgatókönyvben

már a $3 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ is elég ahhoz, hogy a medián vízállás a század végéig se csökkenjen +100 cm alá, vagyis a mai szabályozási szinttől 20 cm-en belül maradjon (8. ábra). Az ennél nagyobb hozamok kiépítése nem jár jelentős vízállás-nyereséggel, az ötször akkora $15 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ is csak a 10%-os vízállás-percentilist tudja 20 cm-rel feljebb tolni. Az RCP8.5 forgatókönyvben 2060-ig nincs nagy különbség a medián és 10%-os vízállásban a pótlási kapacitás függvényében, de 2070 után már csak a $15 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ tudja a vízállások zuhanását megállítani (8. ábra). Ugyanakkor a pótlás nélküli változathoz képest már a $3 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ kapacitású pótlás is elegendő ahhoz, hogy 2060-ig az extrém alacsony vízállások mintegy 30 cm-rel feljebb kerüljenek.

A vízszintszabályozás potenciális eszközeinek – leeresztés és vízpótlás – használati aránya is jelentősen változik 2100-ig. A leeresztés gyakorisága és mennyisége mindkét éghajlati forgatókönyvben fokozatosan csökken (9. ábra). Az RCP4.5 forgatókönyvben a 19 vizsgált modellpárból csak 3 olyan volt, ahol nem volt szükség vízpótlásra ahhoz, hogy a vízszint a szabályozási szint 50 cm-es körzetében maradjon. A 16 pótlást előíró modell közül 11 esetében a szükséges összes pótlás jóval meghaladta az 50 cm-t, vagyis a 300 millió m^3 -t. Az RCP8.5 forgatókönyvben az eredmények még ennél is egyhangúbbak: a legvalószínűbb kimenetel az, hogy a 21. század végén folytonos és jelentős pótlásra szorul majd, leeresztés pedig akár évtizedekig sem történik.

DISZKUSSZIÓ

Az eredmények bizonytalansága

Az eredmények bizonytalansága és hihetősége az alkalmazott éghajlati- és hidrológiai modellek előrejelzési képességén múlik. Míg a szisztematikus hibák kiszűrése segített az átlagos szimulált TVK és a valóság összeillesztésében, a modellezett és a valós változékonyság eltérései esetében ilyen korrekcióra nincs mód. Ez tükröződik a referencia-időszakra szimulált vízállásokban is. Egyetlen modellpár sem szimulált a 2000-2003 aszályhoz hasonló extrém eseményt a referencia-időszakban, mert az azt létrehozó időjárási ingadozás a modellekben nem állt elő. Emellett a számításokban alkalmazott szabályozási stratégia is eltért a valóstól. Fontos megérteni, hogy a referencia-időszakra szimulált eredményeket a múlt alternatíváiként, nem pedig annak reprodukciójaként kell tekintenünk, tehát egyes események előfordulása, illetve időzítése nem kell, hogy megegyezzen a múltban és a szimulációkban. A szimulációk megfelelőként fogadhatók el, ha a trendszerű változásokat le tudják képezni.

A több modellpáron alapuló vizsgálat előnye az, hogy segít a hibáktól függetlenül jelenlévő általános mintázatok felismerésében, valamint az előrejelzések bizonytalanságának felmérésében. A modellpárokhoz tartozó vízszintek jóval szűkebb sávban ingadoztak a múltban, mint a jövőben. Ez – az egyes modellek hibáitól függetlenül – azt tükrözi, hogy a jövőben többféle alternatív forgatókönyv is megvalósulhat még ugyanolyan átlagos melegedés mellett is.

A fokozott vízszintesökkenést előrejelző modellpárok eredményei mindkét éghajlati forgatókönyvben jóval szélsőségesebbek, mint a 2000-2003-ban, vagy a 2012-ben és 2022-ben megfigyelt aszály. Ez hangsúlyozza, hogy a mederbeli tározással elérhető többlet-vízmennyiség elhanyagolható a várható változásokhoz képest, azaz nem nyújt kielégítő biztonságot a Balaton turisztikai célú hasznosításához. A +110-ről +120 cm-re emelt felső szabályozási szinttel elért 10 cm többlettározás reálisan csak néhány hónappal késleltetheti a vízszintesökkenést, extrém alacsony szinteknél pedig a 10 cm-es különbséget a tó használói nem érzékelnék számottevő javulásnak, különösen nem a probléma megoldásának.

A vízpótlás szükségessége

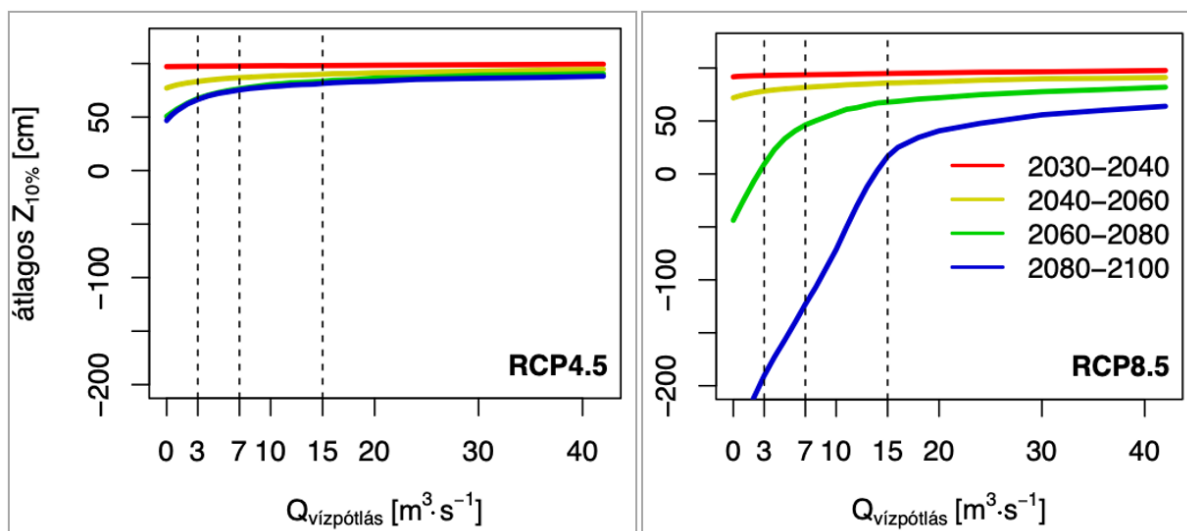
Az eredmények alapján a szükséges vízpótlás nagyságára és időzítésére csak valószínűségi előrejelzések tehetők, de a trend egyértelmű. A 2005-2020 közötti üvegházhatású gáz-kibocsátások és a csökkentésükre ténylegesen megtett intézkedések alapján az RCP8.5 forgatókönyvet tekintik a legvalószínűbbnek, legalábbis 2050-ig (Schwalm és társai 2020). A vízpótlás megvalósításának időzítését és a kiépítendő kapacitást az alacsony vízállásokkal szemben elérni kívánt biztonság határozza meg. A jelenleg hatályos szabályozási rend – jórészt 2003 tapasztalatai alapján – a nagyon ritkán jelentkező alacsony vízszinteket is el akarja kerülni, vagyis a biztonsági elvárásai magasak. Ebben a szellemben a közeljövőben legvalószínűbb RCP8.5 forgatókönyv szerint már most is, az RCP4.5 forgatókönyv szerint 2040-től lehet szükség vízpótlásra. A

magas biztonság egyik forgatókönyvben sem tartható fenn folyamatosan a műszakilag egyszerűen megvalósítható pótlási megoldásokkal. 2045 után mindkét forgatókönyvben előfordulnak átmeneti, de extrém alacsony vízállások még a legnagyobb vizsgált pótlási kapacitás ($15 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) mellett is.

A legvalószínűbb esetben a pótlási igény fokozatosan fog nőni. Ezért, valamint a jelenlegi biztonsági szint hosszútávú fenntarthatatlansága és a jövő bizonytalansága miatt a pótlási kapacitás fokozatos kiépítését javasoljuk (4. táblázat). Ezzel párhuzamosan az infrastruktúrát fel kell készíteni a változó, gyakran alacsony vízszintekre. A vízhasználóknak – a minimális beavatkozás alapelveinek tiszteletben tartása miatt – a pótlási lehetőségektől függetlenül szintén el kell fogadniuk az elkerülhetetlen vízszintváltozásokat és azt is, hogy hosszabb távon a Balaton jelenlegi alakja valószínűleg csak mesterséges beavatkozással tartható fenn.

Ahogy a 2000-2003 közötti aszályt sem lehetett előre megjósolni, úgy a szimulációkban is gyakran hirtelen lesz szükség többéves vízpótlásra. Tekintettel a vízpótlás kockázatos voltára és az előkészítés és építés időigényére, éghajlati forgatókönyvtől függetlenül mihamarabb el kell végezni az előkészítést és a tervezést. A jelent és a közelmúltat legjobban közelítő RCP8.5 forgatókönyvben már ma is számottevő esélye van annak, hogy a pótlási küszöb alá süllyed a vízállás.

A vízpótlás lehetőségének gyors megteremtése azért is fontos lenne, mert a biztonsági okokból magasan tartott vízszint vízminőségi és ökológiai problémákat okoz (Zlinszky 2013, Tóth 2016, Istvánovics és társai 2022). Ha a vízpótlás lehetséges lenne, már nem lenne vízmennyiségi szempontból sem annyira kockázatos a mainál alacsonyabb nyári vízszinteket tartani a következő évtizedekben, amivel a felmelegedés által súlyosbított vízminőségi problémák előfordulását hosszabb távon is a mai, alacsony valószínűségen lehetne tartani. Az egyes pótlási megoldások szükségessége jelenleg csak valószínűségi alapon becsülhető, hiszen nem jelezhető előre, hogy a következő többéves aszály pontosan mikor fog érkezni. Ezért is fontos, hogy az előkészítés időigényes folyamata minél előbb elkezdődjön, hogy szükség esetén ne kelljen megfontolatlan döntéseket hozni. Tanulnunk kell a Balatonhoz hasonlóan sekély, de még kisebb térfogatú és ezért még sérülékenyebb Velencei-tó esetéből: a Velencei-tó átlagosan 100 évenként kiszáradt, amióta azonban turista-tó lett, a közönség állandónak érzékeli. A szakma tudta, hogy nem az, ezért belső vízpótlási lehetőségként megépült a Zámolyi- és a Pátkai-tározó. Már a tározók építésekor tudni lehetett, hogy ezek nem képesek végleg megváltoztatni a tó időszakos jellegét, de a kiszáradás gyakoriságát csökkenthetik. A tározókban azóta fellépő vízminőségi problémák miatt a tározott vízkészlet nagy része nem vezethető a tóba, mely az utóbbi években ismét elindult az éghajlatváltozás miatt talán a tartós kiszáradás felé. Mindezen háttér-ismertetek ellenére sincs kidolgozott, megalapozott, jól előkészített terv a tó fenntartására. A vízpótlás előkészítésének halogatása ugyanilyen helyzetet teremtené a Balatonnál is.



7. ábra. Az évente maximum 7 hónapon át üzemelő vízpótlás hozamának és a vízállás 10%-os percentilisének kapcsolata az RCP4.5 (balra) és RCP8.5 (jobbra) forgatókönyvekben az évszázad végéig (A szaggatott vonalak a 3, 7 és 15 $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ pótlási kapacitásokat jelölik)

Figure 7. Dependence between the available transfer discharge (operated for at most 7 months annually, on x axis), and the achievable 10% quantile of stage (y axis) in RCP 4.5 and RCP8.5 (Dashed lines indicate the discharges of 3, 7, and 15 $\text{mm}^3 \text{s}^{-1}$)

Egyéb beavatkozási lehetőségek

A leeresztés és a külső vagy belső vízpótlás mellett alkalmazkodással kell törekedni arra, hogy a vízgyűjtő használata ne rontsa, hanem javítsa a tó vízmérlegét. A hozzáfolyást növelő beavatkozások ugyanakkor negatív módon befolyásolnák a vízgyűjtő mikroklimáját és élıhetőségét, hiszen ellentétben állnak a vízvisszatartás és a fokozott párologtatás általános alapelveivel (OVF 2023). Hatásosan akkor lehetne mind a vízgyűjtő, mind a tó helyzetén javítani, ha a vízgyűjtőn elpárolgott víz olyanmire befolyásolná a regionális klímát, hogy a tóra hulló csapadékmennyiség is növekedne. Az Alfölddel ellentétben (Tímár és társai 2023) a Balaton vízgyűjtőjén a tótól meszszebbi területeken kevés a lapos, elárasztható, tartós párologtatásra alkalmas terület, így ennek megvalósíthatósága szinte kizárt.

A vízszintszabályozással szemben támasztott követelmények többsége társadalmi eredetű. Így a vízháztartási problémák kezelésének egyik módja az is, ha a vízállás menedzselése mellett a társadalmi igényeket, vagy az azokat befolyásoló infrastrukturális adottságokat menedzseljük. Az előrejelzések alapján az alacsony vízállások előfordulása a szabályozási módtól függetlenül elkerülhetetlen, a kérdés csak a gyakoriság és az, hogy milyen, a használók által megszokott vízszinthez viszonyítjuk az alacsony vízállást. Ezért a vízszintszabályozásra jövőben nehezedő terhek enyhítésére fel kell készíteni a tóhasználókat a változékony, néha jelentősen lecsökkenő vízállásokra, hangsúlyozva, hogy (i) a vízszint ingadozása alapvetően a tó természetes tulajdonsága, és (ii) az ingadozás várható fokozódása az éghajlatváltozás elkerülhetetlen következménye. Az elfogadás elősegítéséhez meg kell kezdeni a parti infrastruktúra (strandok, kikötők, partvédelem)

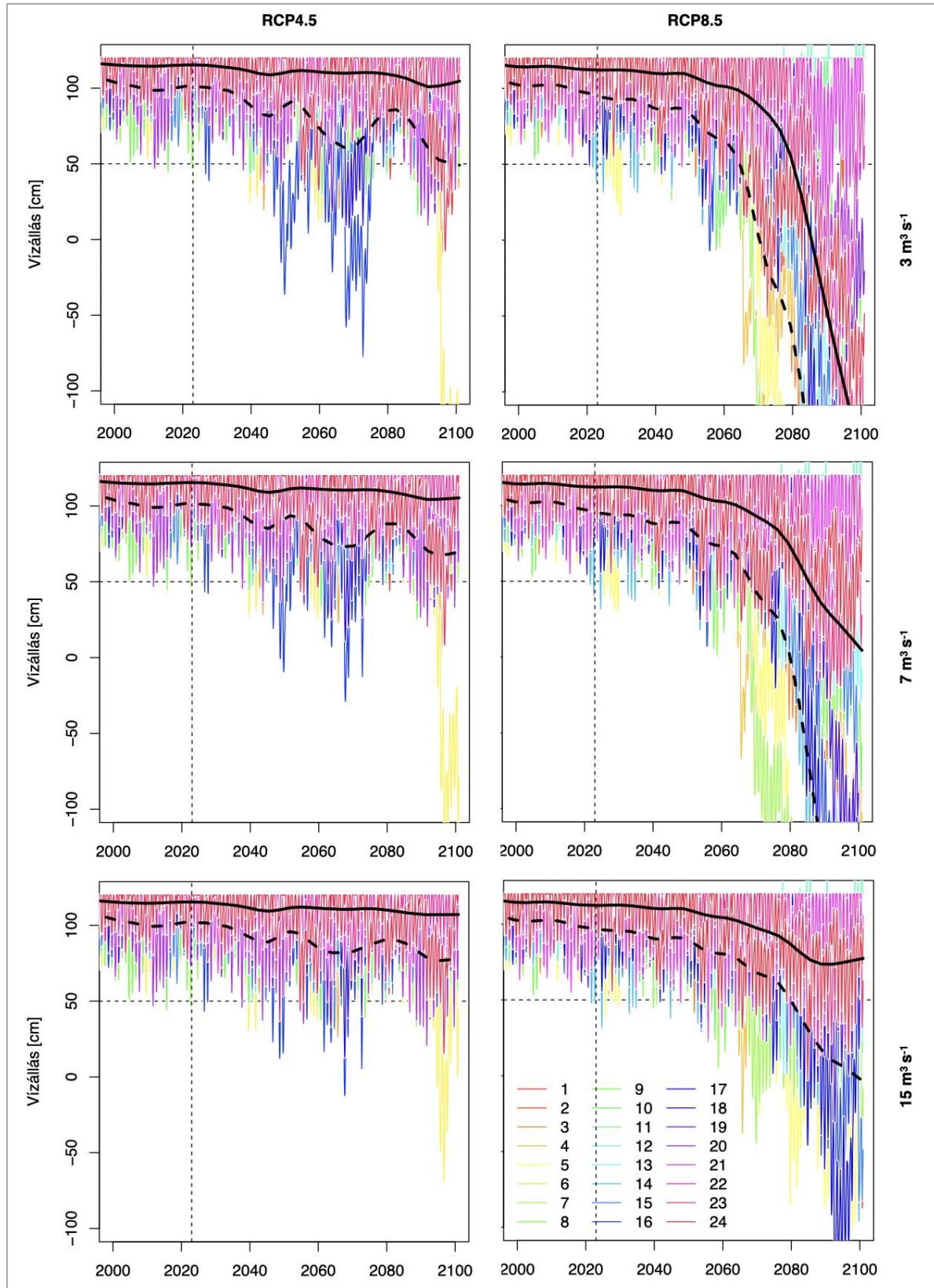
fokozatos átalakítását úgy, hogy a tó egy széles vízállástartományban is használható maradjon. Ehhez külföldi példák rendelkezésre állnak, hiszen a vizek többségénél jelentős a parti vízállás-ingadozás, illetve új, innovatív megoldások is alkalmazhatók.

MEGVALÓSÍTHATÓSÁGI KÉRDÉSEK

A változó körülmények miatt biztos, hogy a Balaton vízszintszabályozása az évszázad végéig jelentős direkt és indirekt költségekkel fog járni. Az infrastrukturális beruházások költségei csökkenthetők, ha pl. a vízpótlás előkészítésével párhuzamosan – és kellő kommunikációs előkészítés után – lejjebb viszik a szabályozási szinteket annyira, hogy a partvédelmi művek teljes körű kibővítése elkerülhető legyen. A kiépítendő vízpótlási kapacitás csökkenthető, ha a tóhasználók szélesebb tartományú ingadozást is el tudnak fogadni.

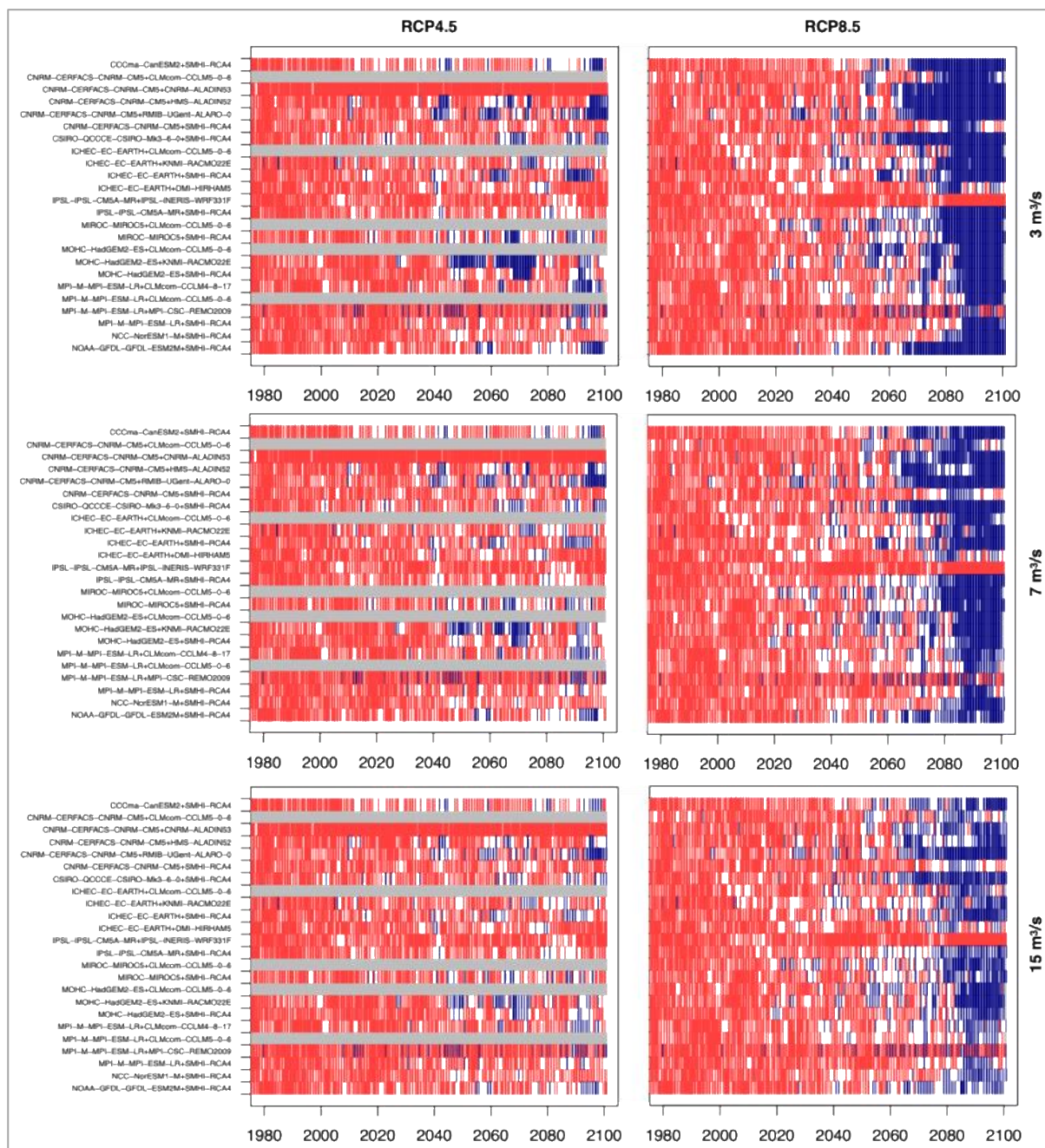
Az értelmesebben megvalósítható beruházások körét természetesen befolyásolja a tóhoz kötődő ösztársadalmi gazdasági haszonhoz viszonyított költségkeret, azonban beavatkozás nélkül nagyon valószínű, hogy az elsősorban turizmusra épülő regionális gazdaság előbb-utóbb hanyatlani fog.

A menedzsment beavatkozások megvalósíthatósága számos természettudományos, technikai, politikai és üzemetelési probléma tisztázásától is függ. Ilyen pl. a drávai/murai pótlási megoldásoknál a szomszédos országok beleegyezése, az átvezetés nyomvonala, a Kis-Balatonba való bevezetés, megkerülés, vagy rövidre zárás kérdése, a Kis-Balaton működése, az ökológiai kockázatok becslése, a Zala mentén a vízhasználat kérdése a század várhatóan száraz második felében, az esetleges pótlási/fenntartási költség viselőinek köre, stb. Ezek vizsgálata nélkül a jövő szabályozása nem tervezhető.



8. ábra. Az évente maximum 7 hónapon át üzemelő vízpótlás hatása a vízszintek alakulására az RCP4.5 és RCP8.5 éghajlati forgatókönyvekben (A színes vonalak az egyes éghajlati modellt párok alapján számított havi vízszinteket mutatják, a vastag fekete vonal a medián, a szaggatott fekete vonal a 10%-os percentilis)

Figure 8. Effect of water transfer (7/12 months) on stage in RCP4.5 and RCP8.5 (Colors indicate the specific climatic model pairs, the thick black line is the median, the dashed line is the 10% quantile)



9. ábra. Modellezett leeresztési (piros vonal) és vízpótlási (kék vonal) szabályozási beavatkozások a különböző éghajlati forgatókönyvekben, különböző pótlási kapacitások esetén. (Leeresztés +120 cm felett történik, a pótlás +70 cm alatt kapcsol be, de csak októbertől áprilisig. A fehérre hagyott hónapokban nincs beavatkozás, a szürke sávok adathiányt jelölnek.)

Figure 9. Modelled drainage (red) and transfer events under different climate model pairs and under different transfer capacity (Drainage occurs above +120 cm. Transfer happens under +70 cm between October and March. White areas indicate no action, grey stands for data gaps)

TÁRSADALMI KERETEK

A térség érdekeltjei között konszenzus van abban, hogy a tó jelenlegi fejlődése nem fenntartható, az éghajlatváltozás okozta kihívások kezeléséhez a társadalmi oldalon is változtatásokra és fejlesztésekre van szükség. A Balaton szakértői, államigazgatási, térségi önkormányzati és civil érdekeltjei mind igénylik egy kiterjedt, széles körű monitoring rendszer kialakítását. Az elképzelt rendszernek képesnek kell lennie a vízminőség és vízállás összefüggéseinek komplex figyelemmel követésére, így orvosolni tudná a megbízható információkkal kapcsolatos ösztársadalmi hiányérzetet (OVF 2019, Balaton Klíma Konzorcium 2022).

A térségi érdekelt kivánságaiban karakteresen megjelenik az átfogó, szakmai alapokon nyugvó, erős jogkörökkel rendelkező vízkormányzás, amely biztosítani tudná a hosszútávú, adatokon alapuló tervezést, erősítené a társadalmi szemléletformálást, rezilienciát és adaptációt, miközben a helyi döntéshozóknak folyamatos szakmai támogatást adna és egyben olyan felelősségi köröket vehetne át, mely jelenleg rövidtávú, társadalmi igények által vezérelt kényszerpályákra állítja ezeket a igazgatási működéseket. Míg a vízállás kérdésében a magasan tartott vízszint alapjaiban átalakította a természetes állapotról alkotott elvárásokat, addig a természetközelséghez társított életmód és

turizmus fokozódó népszerűsége olyan tájképi sajátosságok fenntartásának igényét erősíti, melyek közvetlenül vagy közvetetten hozzájárulnak a tó jó környezeti állapotának megfelelő biztosításához (pl. nádasok jelenléte, rövid ellátási láncok és bioélelmiszerek igénye, az úgynevezett „slow”- és négyévszakos turizmus). A fenntartható szabályozás széleskörű elfogadottságának ezért feltétele, hogy az egymással konfliktusban álló elvárások felszínre és feloldásra kerüljenek. Jelenleg a társadalmi szemléletformálás mellett a hosszú távú, szakmai alapú adaptációs stratégia kialakítása és megvalósítása szempontjából is kedvezőtlen, hogy a különböző térségi érintettségű szakmai és társadalmi szereplők – saját értékelésük szerint is – egymással jellemzően nem kommunikálnak, nem egyeztetik a fejlesztési terveiket, versengenek a lehetőségekért, gátolva az össztársadalmi konszenzuson alapuló, átlátható és fenntartható tervezést.

ÖSSZEFOGLALÁS

A Balaton vízháztartása az éghajlatváltozás miatt jelentős átalakuláson megy keresztül. Az átlagos természetes vízkészletváltozás a klímamodellek többsége szerint fokozatosan csökkenni fog, az éghajlati forgatókönyvtől függően egészen a negatív tartományig. Az IPCC RCP4.5 forgató-

könyvben a tó jelenlegi alakja egészen a század végéig fennmarad, bár a vízállás – vízpótlás hiányában – átmenetileg többször nagyon alacsony tartományokba süllyed. A csak leeresztésre támaszkodó vízszintszabályozás ezeket a kilengéseket nem tudja megakadályozni semmilyen szabályozási szint előírásával. Ezért a tóhasználat ma szokásos módjait 2040 után már valószínűleg csak vízpótlással lehet fenntartani. Az RCP8.5 forgatókönyvben a század utolsó harmadában a vízmérleg drámai romlása miatt a tó tartósan lefolyástalanná válik és jelenlegi kiterjedése is csak jelentős vízpótlással tartható fenn. Az idővel fokozódó pótlási igény miatt a pótlási kapacitásokat éghajlati forgatókönyvtől függetlenül lépcsőzetesen célszerű növelni. Az éghajlatváltozás és a tartósan magas vízállás kedvezőtlen vízminőségi és ökológiai következményekkel jár. Ha a vízpótlás elérhető lenne, a jelenlegi vízszintszabályozási rend lazíthatóvá válna: mivel az alacsony vízállás kezelhető lesz, okafogyottá válik a vízszint tartósan magas értékre való szabályozása és ezzel enyhíthetők a negatív ökológiai hatások. Ez azt jelenti, hogy a kockázatelemzési és tervezési munkákat mielőbbi el kell kezdeni. Mivel a vízszintingadozások a jövőben minden előrejelzés szerint elkerülhetetlenek lesznek, haladéktalanul meg kell kezdeni az infrastruktúra és a vízhasználók felkészítését a változó vízszintekre.

4. táblázat. A vízpótlás előkészítésének, tervezésének és megvalósításának javasolt időpontja az egyes éghajlati forgatókönyvekben közepes és nagy vízszintszabályozási biztonság esetén

Table 4. Proposed timeline for designing and implementing the water transfer infrastructure under moderate and strict level safety demands

Akció	RCP4.5		RCP8.5	
	vízszintszabályozási biztonság			
	nagy	közepes	nagy	közepes
1. Vízpótlási lehetőségek és kockázatok felülvizsgálata	most	most	most	most
2. Vízpótlás megtervezése	1. után rögtön	1. után rögtön	1. után rögtön	1. után rögtön
3. Karsztvízből történő pótlás lehetőségének kiépítése (3 m³ s ⁻¹)	2030	2080	2. után rögtön	2060
4. Drávai/murai pótlási lehetőség megépítése (4-7 m³ s ⁻¹) ^a	2040	–	2040	2080 ^c
5. További drávai/murai pótlási lehetőség megépítése (további 5-8 m³ s ⁻¹) ^{a,b}	2090	–	2080 ^c	–

^a: A nagyobb hozam akkor szükséges, ha a karsztvízből történő pótlás nem folytatható.

^b: Esetleg az előzőtől eltérő nyomvonalon, hogy a bevezető vízfolyások terhelése mérsékeltebb maradjon.

^c: Az vízszinttartási biztonság csökkenése így is elkerülhetetlen.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A kutatást az NKFIH K-134559 számú OTKA pályázata, az MTA Fenntartható Fejlődés és Technológiák Nemzeti Programjának „Fenntartható technológiák” alprogramja és a Víz tudományi és Vízbiztonsági Nemzeti Laboratórium (RRF-2.3.1-21-2022-00008) támogatta.

IRODALOMJEGYZÉK

Balaton Algavirágzás Konzorcium (2022). A megjelent balatoni algavirágzás okainak felkutatása és intézkedési javaslatok kidolgozása. Cselekvési Terv. ITM Klíma- és Természetvédelmi Akcióterv (BALATON-ZFR-2020/1)

Balaton Klíma Konzorcium (2022). Hazai vizeink komplex éghajlati alkalmazkodását segítő fejlesztési prioritások kidolgozása, Megvalósíthatósági Tanulmány. ITM Klíma- és Természetvédelmi Akcióterv (VÍZ-ZFR-2020/1)

Baranya S., Fleit G., Németh D., Sütő M. (2020). A Dráva-folyó 0-236 fkm-ek közötti szakaszán jelentkező medersüllyedés okainak feltárása. LIFE17NAT/HU/000577 "Bölcs vízgazdálkodás a Dráva mentén az ártéri erdők megőrzése érdekében". Dél-dunántúli Vízügyi Igazgatóság. <https://wisedrava.wwf.hu/sitemedia/letolthetoanyagok/1632218602.pdf>

Csepregi A. (2007). A karsztvíztermelés hatása a Dunántúli-középhegység vízháztartására. In: Alföldi L. és Kapolyi L. (szerk.) Bányászati karsztvízszint-süllyesztés a Dunántúli-középhegységben. MTA Földrajztudományi Kutatóintézet Budapest, pp. 77-112.

Euro-Cordex (2009). <https://www.euro-cordex.net>

Giorgio, F. (1990). Simulation of regional climate using a limited area model nested in a general circulation model. Journal of Climate 3. pp. 941-963. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1990\)003<0941:SORCUA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1990)003<0941:SORCUA>2.0.CO;2)

- Global Runoff Data Center*
<https://www.bafg.de/GRDC>, alapítva 1988-ban (letöltve: 2024.10.15.).
- Herodek S. (2007).* A vízszint változásának hatása a Balaton ökológiai állapotára (3B022-04 BALÖKO), MTA Balatoni Limnológiai Kutatóintézet, Tihany.
- Hinegk, L., Adami, L., Zolezzi, G., Tubino, M. (2022).* Implications of water resources management on the long-term regime of Lake Garda (Italy). *Journal of Environmental Management* 301. 113893. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113893>
- Honti M., Somlyódy L. (2009).* Stochastic water balance simulation for Lake Balaton (Hungary) under climatic pressure. *Water Science & Technology* 59(3). pp. 453-459. <https://doi.org/10.2166/wst.2009.886>
- Honti, M., Stamm, C., Reichert, P. (2013).* Integrated uncertainty assessment of discharge predictions with a statistical error model, *Water Resources Research*, 49. pp. 4866-4884. <https://doi.org/10.1002/wrcr.20374>
- Horváth E., Kern Z., Morgós A., Grynaeus A. (2011).* A Balaton természetes vízkészlet-változásának és nyár- végi vízállásának rekonstrukciója tölgyek évgyűrű vastagsága alapján. In: Szilávik, L., (Szerk.) Magyar Hidrológiai Társaság 29. Országos Vándorgyűlése, Magyar Hidrológiai Társaság, Budapest. pp. 485-500.
- IPCC (2014).* Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC, Geneva, Switzerland.
- Istvánovics, V., Honti, M., Torma, P., Kousal, J. (2022).* Record-setting algal bloom in polymictic Lake Balaton (Hungary): A synergistic impact of climate change and (mis) management. *Freshwater Biology*, 67(6). pp. 1091-1106. <https://doi.org/10.1111/fwb.13903>
- Koncsos L., Honti M., Somlyódy L. (2005).* A Balaton vízháztartásának statisztikai vizsgálata. *Vízügyi Közlemények*, 87 "Balaton különszám". pp. 125-144.
- Kuczera, G., Kavetski, D., Franks, S., Thyer, M. (2006).* Towards a Bayesian total error analysis of conceptual rainfall-runoff models: Characterising model error using storm-dependent parameters, *J. Hydrol.* 331. pp. 161-177. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.05.010>
- Kutics K. (2019).* Evolution of water quality of Lake Balaton. *Ecocycles*, 5 (2): pp. 44-73. <https://doi.org/10.19040/ecocycles.v5i2.149>
- Kutics K., Kravinszkaja G., Varga Gy. (2016).* A Balaton és teljes vízgyűjtő-területének átfogó hidrológiai vizsgálata, különös tekintettel a lefolyási viszonyok drasztikus változására és a hozzáfolyás csökkenésére. MHT XXXIV. Országos Vándorgyűlés, Debrecen.
- Luo, M., Liu, T., Meng, F., Duan, Y., Frankl, A., Bao, A., De Maeyer, P. (2018).* Comparing Bias Correction Methods Used in Downscaling Precipitation and Temperature from Regional Climate Models: A Case Study from the Kaidu River Basin in Western China. *Water* 10(8): 1046. <https://doi.org/10.3390/w10081046>
- Mayer I. (2005).* A Balaton vízpótlásának lehetőségei. *Vízügyi Közlemények*, 87 "Balaton különszám". pp. 249-281.
- Milly, P.C.D., Betancourt, J., Falkenmark, M., Hirsch, R.M., Kundzewicz, Z.W., Lettenmaier, D.P., Stouffer, R.J. (2008).* Stationarity Is Dead: Whither Water Management? *Science* 319(5863). pp. 573-574. <https://doi.org/10.1126/science.1151915>
- Nováky B. (2003).* A Balaton vízpótlása és az éghajlat-változás (kézirat).
- Nováky B. (2005).* A Balaton vízpótlása és az éghajlat. *Vízügyi Közlemények*, 87 "Balaton különszám". pp. 105-123.
- OVF (2019).* Országos Vízügyi Főigazgatóság Balaton Munkacsoport: Szintézis Jelentés. 54 pp.
- OVF (2023).* Vízügyi Szolgáltatás. 2023. 03. 16. <https://www.ovf.hu/vizgazdalkodas-vizszolgaltatas/vizviszaltartas> (Letöltve: 2024.02.29.)
- Pomázi F., Baranya S., Ermilov A.A., Török G.T., Horváth G., Pál I. (2023).* Az Alsó-Dráva antropogén és természetes hatásokra bekövetkezett függőleges mederváltozásainak vizsgálata. *Hidrológiai Közöny* 103(1). pp. 32-47. <https://doi.org/10.59258/hk.10988>
- Rogelj, J., Meinshausen, M., Knutti, R. (2012).* Global warming under old and new scenarios using IPCC climate sensitivity range estimates. *Nature Climate Change* 2. pp. 248-253. <https://doi.org/10.1038/nclimate1385>
- Schwalm, C.R., Glendon, S., Duffy, P.B. (2020).* RCP8.5 tracks cumulative CO2 emissions. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA* 117. pp. 19656-19657. <https://doi.org/10.1073/pnas.2007117117>
- Schleicher V. (2014).* Kulturális kölcsönhatások a Balaton térségében 1822–1960 között (Óslakosok, fürdővendégek, nyaralók). Doktori disszertáció, Eötvös Loránd Tudományegyetem, Bölcsészettudományi Kar, Történelemtudományok Doktori Iskola. <http://doktori.btk.elte.hu/hist/schleicher/veronika/tezis.pdf>
- Somlyódy L. (2005).* A balatoni vízpótlás szükségessége: tenni, vagy nem tenni? *Vízügyi Közlemények*, 87 "Balaton különszám". pp. 9-62.
- Somlyódy L., Honti M. (2005).* The case of Lake Balaton: How can we exercise precaution? *Water Science & Technology* 52(6). pp. 195-203. <https://doi.org/10.2166/wst.2005.0168>
- Szilávik L. (2005).* A Sió-vízrendszer szabályozásának és a balatoni vízpótlás gondolatának történeti áttekintése. *Vízügyi Közlemények*, 87 "Balaton különszám". pp. 365-379.
- Tamás P., Vári A., Ferencz Z. (2005).* Lakossági és elit csoportok véleménye a Balaton-régió problémáiról és a vízpótlás lehetőségeiről. *Vízügyi Közlemények*, 87 "Balaton különszám". pp. 313-327.
- Timár G., Jakab G., Székely B. (2023).* A Step from Vulnerability to Resilience: Restoring the Landscape Water-Storage Capacity of the Great Hungarian Plain – An Assessment and a Proposal. *Land* 13: 146. <https://doi.org/10.3390/land13020146>

Tombác E., Gulyás P., Mozsgai K. (2005). A balatoni vízpótlás lehetséges megoldásainak környezeti vizsgálata. *Vízügyi Közlemények*, 87 "Balaton különszám". pp. 283-312.

Tóth V.R. (2016). Reed stands during different water level periods: physico-chemical properties of the sediment and growth of *Phragmites australis* of Lake Balaton. *Hydrobiologia* 778. pp. 193-207.

<https://doi.org/10.1007/s10750-016-2684-z>

van Genuchten, M.Th. (1980). Closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44. pp. 892-898. <https://doi.org/10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x>

Varga Gy. (2005). A Balaton vízháztartási viszonyainak vizsgálata. *Vízügyi Közlemények*, 87 "Balaton különszám". pp. 93-104.

Varga Gy., Jakus Á., Kravinszkaja G. (2019). A közel-múltban előfordult hidrometeorológiai szélsőségek hatása a Balaton vízjárására. *Hidrológiai Közlemények*, 99. évfolyam, 2. szám, pp. 3-13.

Varga Gy. *szóbeli közlése* (2024).

Virág Á. (2005). A Sárvíz, a Kapós és a Sió szabályozásának első tervei. *Vízügyi Közlemények*, 87 "Balaton különszám" pp. 329-364.

VITUKI Hungary (2016). A Balaton vízforgalmának a klímaváltozás hatására becsült változása. D4.11 A klímaváltozás hatása a felszíni vizekre. Kutatási jelentés. VITUKI Hungary Kft.

VITUKI Hungary *szóbeli közlése a Balaton medermorfológiájáról* (2018).

Zlinszky A. (2013). Mapping and conservation of the reed wetlands on Lake Balaton. PhD Thesis, ELTE, Budapest. http://teo.elte.hu/minosites/tezis2013_angol/a_zlinszky.pdf

Zlinszky A., Tímár G. (2013.) Historic maps as a data source for socio-hydrology: a case study for Lake Balaton wetland system, Hungary. *HESS* 17: 4589-4606. <https://doi.org/10.5194/hess-17-4589-2013>

A SZERZŐK



HONTI MÁRK építőmérnök, 2000-ben szerzett oklevelet a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetemen. Jelenleg a HUN-REN-BME Vízgazdálkodási Kutatócsoport tudományos tanácsadója. Főbb kutatási területei a vízminőségi és hidrológiai modellezés és az éghajlatváltozás hatásainak vizsgálata. Az MHT tagja 2020 óta.



ISTVÁNOVICS VERA az Eötvös Loránd Tudományegyetemen szerzett biológus oklevelet. Az MTA (HUN-REN) Balatoni Limnológiai Kutatóintézetben, majd az MTA-BME (HUN-REN-BME) Vízgazdálkodási Kutatócsoportjában dolgozott. Kutatómunkájának homlokterében az eutrofizálódás különböző aspektusainak vizsgálata áll. Az MHT tagja 1999 óta.



BERECZ DIÁNA kulturális antropológus, szocio-hidrológiával foglalkozik, integrált vízgazdálkodási projektek társadalmi vonatkozásait vizsgálja. A PAD Alapítvány a Környezeti Igazságossáért igazgatója, és jelenleg a BME Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszék kutatója.



FÜLÖP BENCE a BME-n szerezte építőmérnöki diplomáját. Számos országban megfordult tanácsadó mérnökként. 2018-tól a OVF Balaton Munkacsoportját vezette. Korábban az NKE Fenntartható Fejlődés Intézetének, jelenleg a BME Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszékének kutatója. 2004 óta a Trinity Enviro, míg 2019-től az Alkalmazott Víz tudományi Intézet ügyvezetője. Az MHT tagja 2024 óta.



HERODEK SÁNDOR az Eötvös Loránd Tudományegyetemen szerzett biológia-kémia szakos tanári diplomát. 1957-től 2010-ig a Balatoni Limnológiai Kutatóintézetben dolgozott, ahol 1990-től 2004-ig igazgató volt. Fő kutatási területe a Balaton vízminőségét súlyosan rontó eutrofizálódás kimutatása, ebben a foszforterhelés szerepének igazolása és annak vizsgálata volt. A század eleji nagy aszály hatására kutatta a vízszintváltozás hatását a Balaton ökológiai állapotára. A biológiai tudományok doktora és az MHT tagja 1973 óta, jelenleg szenior tag.