

HIDROLÓGIAI KÖZLÖNY

HUNGARIAN JOURNAL OF HYDROLOGY



ZAMÁRDI, 2003

A Balaton vízpótlása?
Tenni, de mikor és mit?



ZAMÁRDI, 2005

A MAGYAR HIDROLÓGIAI TÁRSASÁG LAPJA • 105. ÉVF. 1. SZÁM • 2025
JOURNAL OF THE HUNGARIAN HYDROLOGICAL SOCIETY • VOL. 105, ISSUE 1 • 2025



<https://doi.org/10.59258/HK>

A HIDROLÓGIAI KÖZLÖNY ELŐFIZETÉSE

A <https://www.hidrologia.hu/hidrologiai-kozlony-megrendelo-lap/> címen található űrlap kitöltésével és visszaküldésével megrendelhető nyomtatott formában a Hidrológiai Társaság szaklapja, a Hidrológiai Közlöny.

A kiadvány 2025. évi előfizetői díjai az alábbiak:

cégeknek 1-4. szám: 14 400 Ft/év

tagtársainknak 1-4. szám: 5 600 Ft/év

(Az árak az 5% Áfát, valamint a postaköltséget tartalmazzák.)



Hidrológiai Közlöny

A Magyar Hidrológiai Társaság lapja
Megjelenik háromhavonként

Főszerkesztő

Major Veronika

Főszerkesztő-helyettes és olvasószerkesztő

Konecsny Károly

Szakszerkesztő

Ács Éva

Szerkesztőbizottság elnöke

Szöllősi-Nagy András

Szerkesztőbizottság tagjai

Ács Éva, Bakonyi Péter, Baranyai Gábor, Baross Károly, Bíró Tibor, Bódis Gábor, Bozán Csaba, Csörnyei Géza, Engi Zsuzsanna, Fehér János, Fejér László, Gayer József, Hajnal Géza, Honti Márk, Ijjas István, Józsa János, Kerekesné Steindl Zsuzsanna, Keve Gábor, Kling Zoltán, Konecsny Károly, Koris Kálmán, Kovács Sándor, Licskó István, Major Veronika, Melicz Zoltán, Nagy László, Rákosi Judit, Rátky István, Román Pál, Szilágyi Ferenc, Szlávik Lajos, Szűcs Péter, Tamás János, Ungvári Gábor

Kiadó

Magyar Hidrológiai Társaság
1091 Budapest, Üllői út 25. IV. em.
Tel: +36-(1)-201-7655
Fax: +36-(1)-202-7244
E-mail: titkarsag@hidrologia.hu
Honlap: www.hidrologia.hu
A Kiadó képviselője: Váradai József, a Magyar Hidrológiai Társaság társelnöke



Indexelik

OJS, REAL, ROAD, COMPASS,
MATARKA
HU ISSN 0018-1323,
ISSN 2939-8495 (Online)

Tartalomjegyzék

Major Veronika: Előszó 3

INTERJÚ

VÍZGAZDÁLKODÁSUNK JÖVŐJE – Együttműködés és alkalmazkodás – korszakok határán a vízgazdálkodásban – Somlyódy Balázs interjúja V. Németh Zsolt vízgazdálkodásért felelős államtitkárral 4

TUDOMÁNYOS KÖZLEMÉNYEK

Honti Márk, Istvánovics Vera, Berecz Diána, Fülöp Bence, Herodek Sándor: A Balaton vízpótlása: Tenni, de mikor és mit? .. 6

Nagy Judit Barbara, Hajnal Géza, Szieberth Dénes, Torma Péter, Rehák András Miklós, Reska Zsombor János: A Hévízi-tó monitoring hálózata, annak fejlesztése, kiegészítése kampányjellegű mérésekkel 23

Török Sebestyén Dániel, Torma Péter: A Fertő-tó párolgásának vizsgálata párolgászámítási módszerek összehasonlításával 36

Szám Dorottya, Hetesi Zsolt, Bódi Tibor, Marosi Zoárd Ivor: Csapadékmintázatok vizsgálata a Tiszántúli Vízügyi Igazgatóság működési területén 46

Négyesi Klaudia, Nagy Eszter Dóra: Az ANFIS mesterséges neurális hálózat lehetséges bemeneti adatainak vizsgálata csapadék-lefolyás modellezés esetén 55

FÓRUM

Zsuffa István, Szöllősi-Nagy András, Bogárdi János: Puritán válasz Nagy Boldizsárnak 64

ESEMÉNYEK

Borsányi Mátyás, Laky Dóra: A települési vízgazdálkodás kihívása az ivóvíz biztonság javítása 69

Csurgai-Horváthné Kiss Henriett, Oláh Zoltán: KDTVIZIG – Három vármegye vizeit felügyeljük 73

Címlapkép: A Balaton vízszintingadozása, Zamárdi 2003 és 2005
(Fotó: Somlyódy László)



Hungarian Journal of Hydrology

Journal of the Hungarian Hydrological Society
Published quarterly

Editor-in-Chief

Veronika MAJOR

Deputy Editor-in-Chief and Copy Editor

Károly KONECSNY

Assistant Editor

Éva ÁCS

Editorial Board Chairman

András SZÖLLŐSI-NAGY

Editorial Board Members

Éva ÁCS, Péter BAKONYI, Gábor BARANYAI, Károly BAROSS, Tibor BÍRÓ, Gábor BÓDIS, Csaba BOZÁN, Géza CSÖRNYEI, Zsuzsanna ENGI, János FEHÉR, László FEJÉR, József GAYER, Géza HAJNAL, Márk HONTI, István IJJAS, János JÓZSA, Zsuzsanna KEREKESNÉ STEINDL, Gábor KEVE, Zoltán KLING, Károly KONECSNY, Kálmán KORIS, Sándor KOVÁCS, István LICSKÓ, Veronika MAJOR, Zoltán MELICZ, László NAGY, Judit RÁKOSI, István RÁTKY, Pál ROMÁN, Ferenc SZILÁGYI, Lajos SZLÁVIK, Péter SZÚCS, János TAMÁS, Gábor UNGváRI

Publisher

Hungarian Hydrological Society
H-1091 Budapest, Üllői út 25., Hungary
Phone: +36-(1)-201-7655,
Fax: +36-(1)-202-7244
Email: titkarsag@hidrologia.hu
Web: www.hidrologia.hu
Represented by: József VÁRADI,
Co-President of the Hungarian Hydrological Society



Indexed in

OJS, REAL, ROAD, COMPASS,
MATARKA
HU ISSN 0018-1323
ISSN 2939-8495 (Online)

Contents

Veronika MAJOR: Foreword 3

INTERVIEW

THE FUTURE OF OUR WATER MANAGEMENT –
Cooperation and adaptation – at the border of ages in water
management – Balázs SOMLYÓDY's interview with Zsolt
V. NEMETH, State Secretary for Water Management 4

SCIENTIFIC PAPERS

Márk HONTI, Vera ISTVÁNOVICS, Diána BERECSZ, Bence
FÜLÖP, Sándor HERODEK: Water transfer to Lake
Balaton: To do, but when and what? 6

Judit Barbara NAGY, Géza HAJNAL, Dénes SZIEBERTH,
Péter TORMA, András Miklós REHÁK, Zsombor János
RESKA: The monitoring network of Lake Hévíz, its
development and expansion with occasional measurements 23

Sebestyén Dániel TÖRÖK, Péter TORMA: Analysing the
evaporation of Lake Fertő and comparing evaporation
calculation methods in the context of climate change 36

Dorottya SZÁM, Zsolt HETESI, Tibor BÓDI, Zoárd Ivor
MAROSI: Analysis of Precipitation Data Series in the
TIVIZIG Operational Area (Hungary) 46

Klaudia NÉGYESI, Eszter Dóra NAGY: Analysis of input
combinations used by the ANFIS artificial neural network
for rainfall-runoff modelling 55

FORUM

István ZSUFFA, András SZÖLLŐSI-NAGY, János
BOGÁRDI: Puritan response to Boldizsár NAGY 64

EVENTS

Mátyás BORSÁNYI, Dóra LAKY: The challenge of urban water
management is to improve drinking water safety 69

Henriett CSURGAI-HORVÁTHNÉ KISS, Zoltán OLÁH:
KDTVIZIG – We supervise the waters of three counties 73

Cover photo: Water level fluctuations of Lake Balaton, Zamárdi 2003 and 2005
(Photo: László SOMLYÓDY)

Előszó



Sok víz, kevés víz, szennyezett víz... Van-e aktuálisabb téma, mint a vízgazdálkodásunk jövője? *Somlyódy Balázs* interjújában *V. Németh Zsolt*, az Energiaügyi Minisztérium vízgazdálkodásért felelős államtitkára válaszol a vízgazdálkodásunk

jövőjét érintő kérdésekre.

A Hidrológiai Közlöny 105. évfolyamának első számában (2025/1) megjelent valamennyi tudományos közlemény a vízkészletekkel foglalkozik.

„A Balaton vízpótlása: Tenni, de mikor és mit?” teszi fel – Somlyódy Lászlót idézve – újra a kérdést *Honti Márk, Istvánovics Vera, Berecz Diána, Fülöp Bence és Herodek Sándor*. A klímamodellek elemzésén alapuló mű rámutat, hogy 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.

Nagy Judit Barbara, Hajnal Géza, Szieberth Dénes, Torma Péter, Rehák András Miklós, Reska Zsombor János: A Hévízi-tó monitoring hálózata, annak fejlesztése, kiegészítése kampányjellegű mérésekkel című közleménye áttekinti a Hévízi-tóval kapcsolatos évszázados múltra visszatekintő kutatásokat és a jelenleg üzemeltetett monitoring rendszert. Bemutatja azokat a kampányjellegű mérés sorozatokat is, amelyek célja az évtizedek során megváltozott felszíni és felszín alatti áramlási viszonyok megismerése, valamint hidrometeorológiai mérésekkel alátámasztva a tó párolgásának, hőhőtartásának és ezek kombinálásával a vízmérlegének meghatározása.

A Fertő-tóval kapcsolatos vízgazdálkodási, vízminőség-védelmi és feltöltődési kérdések egymással szoros kölcsönhatásban vannak. Az éghajlatváltozás következtében a Fertő-tó vízmérlegét alakító tényezők is megváltoznak, amelyek összegzett hatására csökkenés figyelhető meg a tó vízkészletében. *Török Sebestyén Dániel és Torma Péter*: A Fertő-tó párolgásának vizsgálata párolgásszámítási módszerek összehasonlításával című közleménye a Fertő-tó párolgásának meghatározására energiamérleg elven alapuló számításokat javasol.

Szám Dorottya, Hetesi Zsolt, Bódi Tibor és Marosi Zóárd Ivor: Csapadékmintázatok vizsgálata a Tiszántúli Vízügyi Igazgatóság működési területén című munkájuk bemutatja, hogy nőtt a legalább 25 napig tartó csapadékmentes időszakok gyakorisága a Nagybjom település területén lévő hidrometeorológiai mérőállomás adatai szerint. Ez, valamint a terület talajviszonyai arra utalnak, hogy a

kívánatos mezőgazdasági hozamok eléréséhez egyre inkább szükségessé válik a precíziós öntözés és megoldandó feladattá válik a belvízveszélyes, alacsonyan fekvő területek optimális hasznosítása is.

A mesterséges neurális hálózatokat napjainkban már minden tudományterületen alkalmazzák. A hidrológiában is egyre több kutatás készül a mesterséges neurális hálózatok alkalmazhatóságának vizsgálatára, melyek közül csapadék-lefolyás modellezés esetén az egyik legígéretesebb hálózat az úgynevezett adaptív neuro-fuzzy következtető rendszer, avagy az ANFIS (*Adaptive Neuro Fuzzy Inference System*). *Négyesi Klaudia és Nagy Eszter Dóra*: Az ANFIS mesterséges neurális hálózat lehetséges bemeneti adatainak vizsgálata csapadék-lefolyás modellezés esetén című dolgozatában bemutatott kutatás során kilenc-kilenc eltérő input adatsorral kalibrált ANFIS alapú csapadék-lefolyás modell eredményeit hasonlították össze a Torna-patak és az Arany-patak vízgyűjtőire.

A FÓRUM rovat újra és újra betölti igazi szerepét, mivel teret ad a vitának. Ne feledjük, a konstruktív vita a szakma javára szolgál! A 2024/3 kötetünk e rovatában mutattuk be *Nagy Boldizsár* „Bős-Nagymaros: nemzetközi jog, politika, környezetvédelem” című könyvét, melyre ugyanabban a kötetben *Zsuffa István, Szöllösi-Nagy András és Bogárdi János* „Megszólalunk, mert megszólítottunk – Reflexiók Nagy Boldizsár könyvére” című írásukban reagáltak. A 2024/4 kötetünkben Nagy Boldizsár válaszát mutattuk be, melyet a Reflexiókra adott. Jelen kötetünkben *Zsuffa István, Szöllösi-Nagy András és Bogárdi János*: Puritán válasz Nagy Boldizsárnak című írása reagál Nagy Boldizsár válaszára.

ESEMÉNYEK rovatban a Magyar Hidrológiai Társaság Vízminőségi és Víztechnológiai Szakosztályának 18. Ivóvízbiztonsági konferenciáról számolunk be *Borsányi Máttyás és Laky Dóra* írásával, melynek címe: Települési vízgazdálkodás kihívása az ivóvíz biztonság javítása.

Az MHT XLII. Országos Vándorgyűlésének 2025-ben Székesfehérvár ad otthont. *Csurgai-Horváthné Kiss Henriett és Oláh Zoltán* írása segítségével bemutatjuk a Vándorgyűlés házigazdáját, a Közép-Dunántúli Vízügyi Igazgatóságot (KDT-VIZIG) és invitáljuk olvasóinkat egy tudás-gazdag szakmai találkozóra.

Köszönetemet fejezem ki a szerzőknek, a bírálóknak és a szerkesztőbizottságnak, hogy munkájukkal segítették a kötet megjelenését.

A Hidrológiai Közlöny 2024-ben külön kötetben megjelentette első angol nyelvű számát. A 2025-ben kiadásra kerülő angol kötetünkhöz is várjuk a magyar nyelvű dolgozatokhoz hasonlóan magas tudományos színvonalú angol nyelvű közleményeket! Az angol nyelvű kéziratokra vonatkozó közlési útmutató letölthető:

<https://tinyurl.com/5c32k7br>. Good luck! Dr. Major Veronika

a Hidrológiai Közlöny főszerkesztője

Vízgazdálkodásunk jövője

2024. augusztus 1-én az Energiaügyi Minisztérium államtitkáráként V. Németh Zsolt vette kézbe vízgazdálkodásunk irányítását. Rovatunkban Somlyódy Balázs segítségével kapunk választ a vízgazdálkodás jövőjét érintő kérdésekre.

Együttműködés és alkalmazkodás – korszakok határán a vízgazdálkodásban

Somlyódy Balázs

a Magyar Hidrológia Társaság társelnöke (e-mail: hk@hidrologia.hu)



Az interjúra készülve szembesültem vele, hogy azon kevesek egyike vagy, akiktől a víz kérdéséről a legszélesebb értelemben lehet és kell kérdezni. Sokan és sokat tudnak rólad, de Te hogyan mutatnád be magad az olvasóknak.

Családapa, mérnök, népzeneész, politikus, pálinka magánfőző. A kíváncsiság, az újdonság iránti igény meghatározó része életemnek. Mérnöki szemlélet, épített- és természetes környezetünk ismerete, megtapasztalása, alakítása, ez az, ami érdekelt. Első diplomám földmérő üzemmérnök. Azóta sem szakadtam el a műszaki területtől, hiszen később területfejlesztést is tanultam és szereztem diplomát. Voltam művezető, kítűzőmérnök, építész-vezető, építettem utakat, vízi közműveket, majd jött a léptékváltás. Műszaki szemlélettel lettem polgármester, majd országgyűlési képviselő, időszakonként mind a kettő. Közbe vidékfejlesztéssel és környezetvédelemmel is foglalkoztam, ahol sokat tanultam természetes- és megművelt környezetünkről.

Terepen kezdtem, bakancsban, amit manapság már csak hétvégén hordhatok, de szerencsére mindig olyan területekkel foglalkoztam, amihez kötődtem, kapcsolódtam. Így van ez máig. Visszagondolva lehet a víz az egyetlen, ami folyamatosan velem volt. Most mindenestre jól hangzik. Tervlapokon, munkaterületen, polgármesterként, beruházóként, vízi-közmű tulajdonosként vagy a Nyugat-Dunántúli Vízgazdálkodási Tanács tagjaként, a Vasivíz Zrt. felügyelő bizottsági tagjaként, vidékfejlesztésért-, természetvédelemért felelős államtitkárként, az elmúlt két évről nem is beszélve.

Mint vidékfejlesztésért, majd környezetvédelemért felelős állami vezető közel voltál a nagy rendszerek működtetéséhez. 2024. augusztus 1. óta a területi vízgazdálkodás tartozik hozzád. Hol tart szerinted hazánk vízgazdálkodása?

Két éve a víziközmű ágazat mondhatjuk, hogy a csőd szélén állt, de az ország legkiválóbb mérnökei, szerelői elkötelezetten, felelősen egyben tartották az ágazatot. Ma már talán kijelenthetjük, hogy a víziközmű ágazatot kiszámítható pályára állítottuk, a Nemzeti Vízművek ma hazánk negyedik legnagyobb állami cége. Az új, egységes, nem lakossági díjrendszer pedig lehetőséget nyújt a víziközmű rekonstrukciókra, még ha nem is elégséges mértékben.

Talán még rosszabb a helyzet a területi vízgazdálkodás területén, a vízügyi igazgatóságoknál és az Országos Vízügyi Főigazgatóságon. Első lépés tehát a szervezeti háttér megteremtése volt. Belekezdtünk egy bérfejlesztési programba, hogy elfogadható anyagi körülményeket teremtsünk. Ez egy folyamatos feladat. A gazdasági- és munkáltatói környezet figyelése és monitorozása elengedhetetlen.

A vízügyi igazgatóságokon hamar egyértelművé vált, hogy egy egyszeri bértömeg növeléssel nem tudjuk az elmúlt évek hiányosságát leküzdni, így három lépcsőben, alig több, mint két év alatt, összesen 60%-kal növeljük az ágazat bértömegét.

A víz egy megbonthatatlan körforgás, az elmúlt évtizedeket mégis a szervezeti tagoltság jellemezte. Nem csak a területi- és települési kérdések közötti távolság, de számos átszervezés, bizonytalanság nehezítette az optimális teljesítést. Elképzelhető, hogy a vízügy hányatott sorsa egy félreértésből vagy meg nem értésből fakad. Ha megnézzük, azt találjuk, hogy a vízgazdálkodással foglalkozó szakemberek történelmünk során mindig az aktuális társadalmi igényeket szolgálták. Egyáltalán nem evidens, de a vízgazdálkodásnak nincs önállóan értelmezhető vízgazdálkodási érdeke. A vízügyi szolgálat, amint azt a neve is jól jelzi, egy szolgálat, egy kezdeményező szervezet, amely terveket, lehetőségeket kínál, de nem önmaga megrendelője. Ebből fakad minden félreértés, hiszen mai vízrendszereink történelmi okokból, társadalmi-, gazdasági elvárások mentén épültek. Vizeink szabályozása idején a területhasználat volt a fő szempont, amit nem szabad megtagadnunk. De biztosan meg kell haladnunk. Legnagyobb kihívást a társadalmi és gazdasági igények újradefiniálása jelenti, a vízgazdálkodási kockázatok újraértékelése és ennek jogi-, üzemeltetési, gazdasági megvalósítása. Az elmúlt évtizedek folyamatai kikényszerítik a változtatásokat.

Szolnokon, a 2024. évi MHT Vándorgyűlés 400 fős hallgatóságának emlékezetes volt a vizes ágazatok egyesítéséről szóló kormánydöntés megszületése, hiszen másnap tartottad köszöntődet és bejelentetted a régen várt integrált vízgazdálkodás irányába tett kormányzati lépést. Mint ágazati vezetőnek mi az első vízügyes élményed, és hova tartunk?

2023 talán még meghatározóbb volt. A győri vándorgyűlésen szembesültem először a vizes társadalom egységes, egyöntetű fellépésével. Az önálló és erős identitása segítette a vízügyet az elmúlt évtizedekben. A határozott, hosszú távú elképzelések egy integrált, egységes vízgazdálkodási szervezet létrehozásáról magától értődő gondolatnak tűnt. Könnyű volt belátni, hogy az ágazat politikai- és anyagi megbecsülését helyre kell állítani, hogy a szakmai- és működési színvonal növelése újra előtérbe kerüljön. Nem esett nehezemre azonosulni a gondolattal.

Kevés hasonlóan mozgalmas fél évet éltem át. Az átszervezés rövid, „kisvizes” adminisztrációs időszakát egy jelentős árvíz követte. Hamar megtapasztalhattam a víz kiszámíthatatlanságát, a szakmai felkészültség, a

helyismeret és a fegyelem jelentőségét. Év végére már egyértelműen látszott, hogy megváltozott vízgazdálkodási lehetőségeink fenntartható pályára állítása messze túlmutat a vízgazdálkodáson és a vízügy keretein. Ha a szervezetfejlesztéssel kezdtem a gondolatot, akkor a szemléletformálással folytatom. Elkerülhetetlen, hogy áldozatokat hozzunk és növeljük a vízzel borított felületeket, növeljük a beszívargás és a párolgás esélyét. Szemléletünk középpontjába a készleteink védelme, pótlása, okszerű használata kell, hogy kerüljön. Ágazatokon és érdekeken átívelő kérdés. A víznek a tájban, épített- és természetes környezetünkben a helye és ennek a megteremtése – mármint a helynek – nem vízgazdálkodási kérdés vagy felelősség. Az érdekelteknek és a vizes szakmának szervezeti keretekben kell tudni a legjobb megoldásokon, ösztönzőkön, szabályozókon gondolkodni. Ez a gondolatiság vezérelte a Vízgazdálkodási Tárcaközi Bizottság kezdeményezését is. Egy szabályozott keretrendszer, fórum, ahol az egyes érdekek – jó sokan vannak: agrárium, település- és területfejlesztés, természetvédelem, turizmus – találkoznak, ütköznek. A vektorok eredője reményeink szerint a szemléletváltás, ami majd a jogszabályokban, üzemrendekben, felelősségi- és támogatási rendszerekben, hatósági engedélyeztetésben egyaránt kézzelfogható lesz.

Jól látom, hogy településekről és általában épített környezetünkről sajnós nem beszélünk eleget, ha vízgazdálkodásról van szó?

A települési vízgazdálkodás intézményrendszere, háttere kiforratlan. A Vízügyi Tudományos Tanács 2014. évi egyik anyagában, vagyis 10 éve azt írta, hogy a települési vízgazdálkodásnak nincs meg a hatékony működéshez szükséges intézményrendszere. Finanszírozása és egyáltalán finanszírozhatósága talán a legnagyobb kihívás. Ma szinte kizárólag a víziközmű rendszerekkel foglalkozunk, miközben a víz helyét városi környezetünkben is meg kell találnunk. Az egyén, az ingatlanulajdonos szerepvállalása itt is elengedhetetlen, amint azt a vízügy nagy elődei például Beszédes József oly nyilvánvaló egyszerűséggel fogalmazott meg: „A házad udvaráról ne ereszd el az eső és a hó levét, amíg nem használtad! Úgy határodból, vármegyéből, országodból, mert ez ingyen van, az Isten becses ajándéka.”. Azok közé az emberek közé tartozom, akik – némi túlzással, óvatosan mondom, de hisznek a szakmai fórumok, konferenciák hosszú távú eredményeiben. Mondok egy példát: polgármesterként és képviselőként végig követtem, sőt feladatomból a hulladékgyűjtés, a szelektív hulladékgyűjtés, a kezelés, hasznosítás megszervezése és ez ma már látható eredményeket tud felmutatni. Minden napjaink része, de ennek társadalmi elfogadtatása legalább annyira nehéz volt, mint ma a települési vízgazdálkodás gyakorlatának meghonosítása. A települési vízgazdálkodással, kiemelten a vizek helyben tartásával és a szennyvi-

A SZERZŐ



SOMLYÓDY BALÁZS, okleveles környezetmérnök, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, a Magyar Hidrológiai Társaság társelnöke.

zek hasznosításával sokat foglalkozunk, de – talán mert hiányzik a szervezett intézményrendszer – ezeken a területeken eredményekről csak elvétve és messze nem rendszereszerű működésről beszélünk. A cél a települési vízgazdálkodás, a használt vizek hasznosítása, a csapadékvíz-gazdálkodás sikeres megvalósítása. Az első lépések már régen időszerűek.

Mik az elkövetkezendő 1-1,5 év főbb céljai?

Látni kell, hogy az elmúlt évtizedekben a gazdaság, az ember, a társadalom alkalmazkodó képessége a megváltozott klímához, a vízkészletek csökkenéséhez, a szélsőségek teremtette kritikus helyzetekhez csak romlott. Hosszú távon kell gondolkoznunk, céljainkat összegezni, feladatokra bontani, első lépéseket megtenni. A Kvassay Jenő Tervnek, mint a nemzeti vízstratégiánknak a felülvizsgálatának nekilátunk. Bízom benne, hogy legalább koncepció szintjén eljutunk egy új keretrendszer megalkotásáig. A Vízgazdálkodási Törvény már 30 éves, ideje áttekinteni a változási szükségleteket. Szerintem sok van ilyen.

Bízom a Vízgazdálkodási Tárcaközi Bizottságban, számos rövid idő alatt elérhető eredményt látok, de az érdekek összehangolása nem egyszerű feladat. A víziközművek rekonstrukcióját új szintre kell emelnünk, az energiahatékonyság növelése mind a két szektorban hangsúlyozandó és természetesen nem adom fel a kistelepülések szennyvízkezelési problémáinak, az egyedi rendszerek kérdésének megoldását sem.

Ha lenne egy kívánságod, amit kizárólag a „víz kérdésre” áldozhatsz...

Azt hiszem a legnagyobb probléma vagy az újkori problémák gyökere ma a víz értékének szem elől veszítése. És ezt le tudom fordítani az egyén szintjére és politikai dimenzióra egyaránt. Amiből sok van nem, vagy kevésbé értékeljük. Még emlékszem diákmunkás koromból a ceglédi kanna fedeléből kortyolt vízre a répamezőn vagy a hegyi kútira a szőlőhegyen. A friss víz, a hideg víz nem volt evidencia. A víznek, ha gazdaságilag nem is volt a fogyasztó részére nagy értéke, de a friss, jó minőségű hideg víz komoly használati értéket képviselt. A megfizethető jóminőségű ivóvízhez való hozzáférésre a mindenkori kormányzat kifejezetten nagy figyelmet fordított. Ma – talán szerencsére – más jellegű problémákkal küzdünk. Az elmúlt 30 évben a víz értékének kérdése háttérbe szorult, kikerült a fő döntési mechanizmusok, szempontok közül. A kihívás pedig óriási: klímánk egyre szeszélyesebb, készleteink csökkennek, az igények pedig csak nőnek.



Köszönöm az interjút.

Somlyódy Balázs
a Magyar Hidrológiai Társaság társelnöke

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 rapszodikus változó le-

folyást okozva (Virág 2005, Horváth és társai 2011, Zlinszky és Timár 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 szűkülte (*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 felteveli, 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 rövidebbdel 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 tanulmányorozat (*Somlyódy 2005*), mely arra 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 tartogatható előnyöket, természeti okból nincs rá szükség (*Tomhácz 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 Vízzárási 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 vízszintemelés 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 partvédőművek magasításában 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 melegedő 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 időjárástól 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 (<i>Nováky 2003</i>)	nem, csak 1 jövőbeli éghajlat	nem, a hozzáfolyás a csapadékkal arányos
Honti és Somlyódy	2009	nem, leskálázás (<i>Nováky 2003, 2005</i>)	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 evapotranszspirációja 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 modellekként 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 különbözők, 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 paramétere 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 víz-mérleg-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 vízmenynyiség [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 számíthatunk.

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 [$^{\circ}C$], Cs' pedig a vízgyűjtő havi csapadékosszege [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:

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

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%	–

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 becsljük. 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 közelítettük.

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.

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 infrastruktúrális 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 alapelveit 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 lép a 4. pontra.
4. Nincs vízpótlás. Lépj az 5. pontra.
5. Következő hónap, 1. pont.

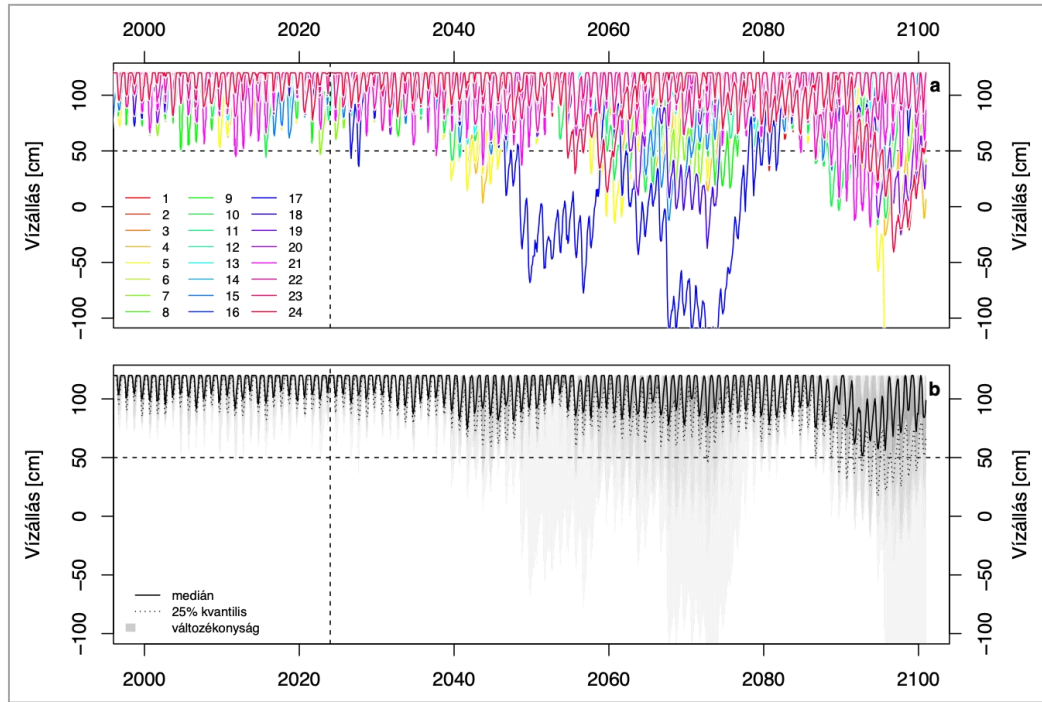
EREDMÉNYEK

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 víz-háztartásra 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*).

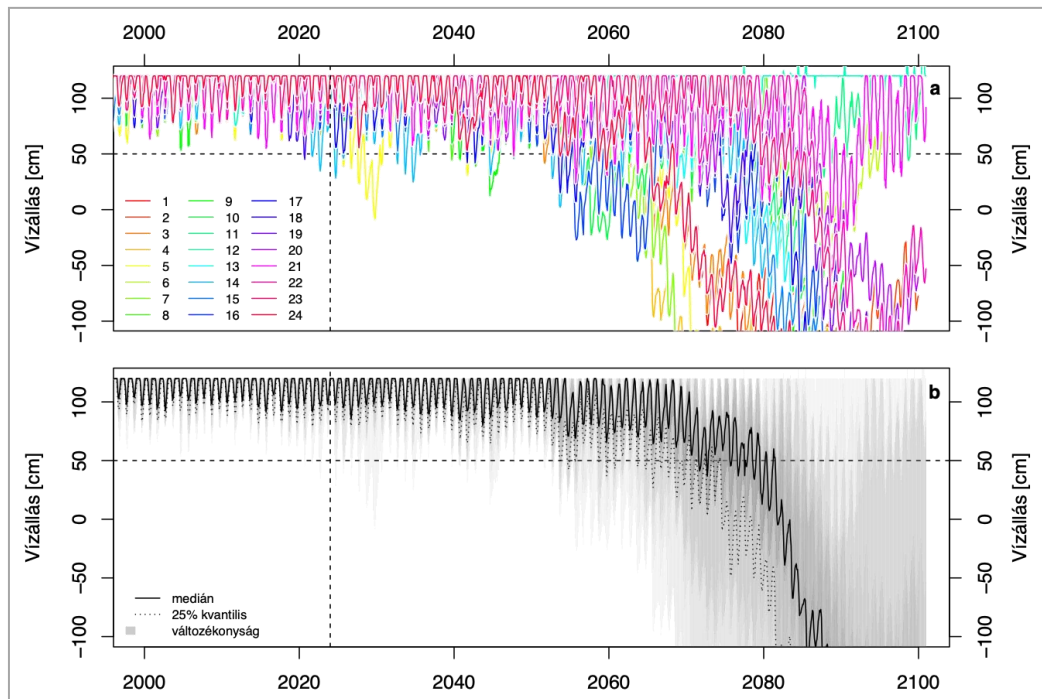
2040 után nő a modellek előrejelzései közötti különbség, majd az időhorizont távolodásával az extrém alacsony vízállások előfordulási gyakorisága növekszik, egyre több modellben fordulnak elő 50 cm körüli, vagy azt akár jelentősen alulmúló vízállások (*1. ábra*). Az RCP4.5 forgatókönyvben 2085 után már 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*).



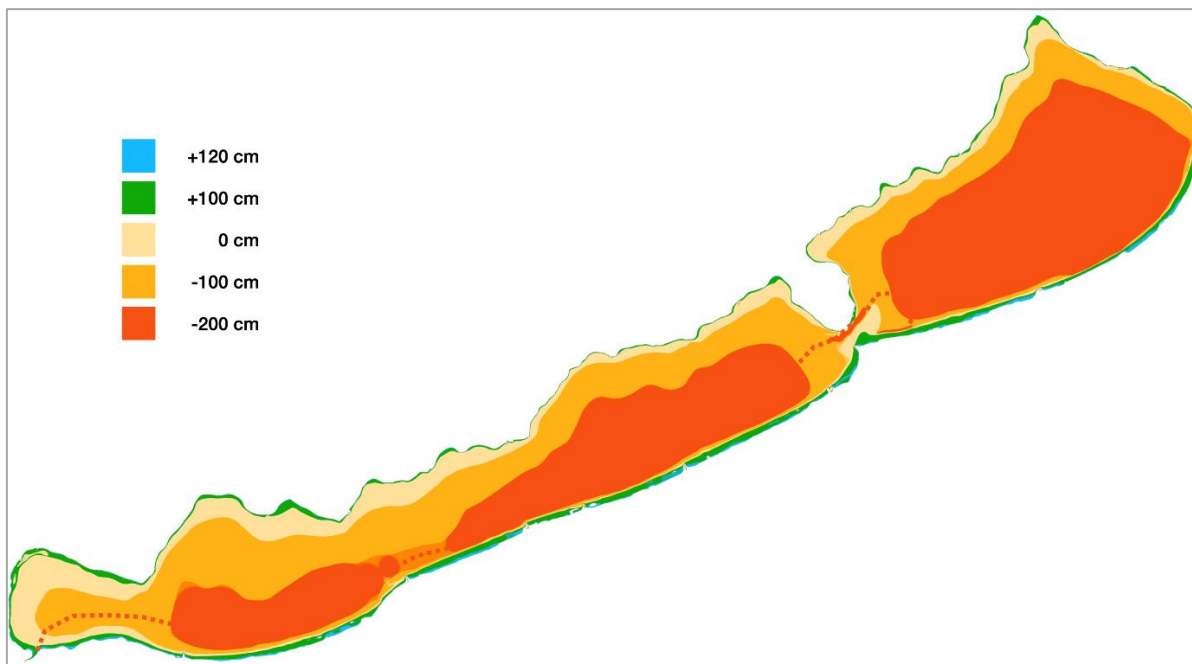
1. ábra. Az egyes Euro-Cordex modellpárok előrejelzései alapján számított havi vízállások a referencia leeresztési rend alkalmazásával az RCP4.5 forgatókönyvben. Az (a) panelen a vonalak színei az egyes modellpárokat jelölik az 1. táblázat sorszámaival. A (b) panelen a modellpár-ensemble előrejelzéseinek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

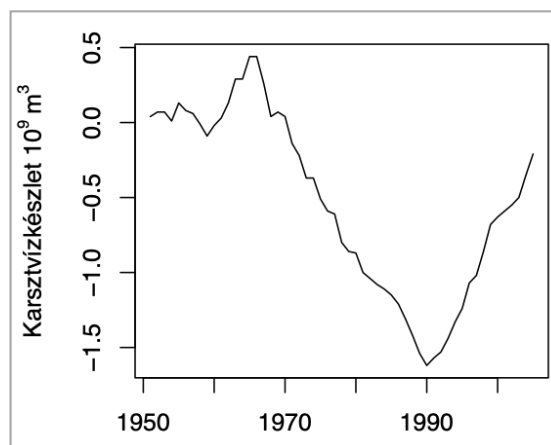
A vízpótlás lehetséges forrásai és időbeli korlátai

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 többre kerülne és változatoként a vízminőségi kockázat is némileg magasabb lenne, de az érdemleges pótláshoz szükséges vízkészlet megbízhatóan rendelkezésre áll (Mayer 2005).

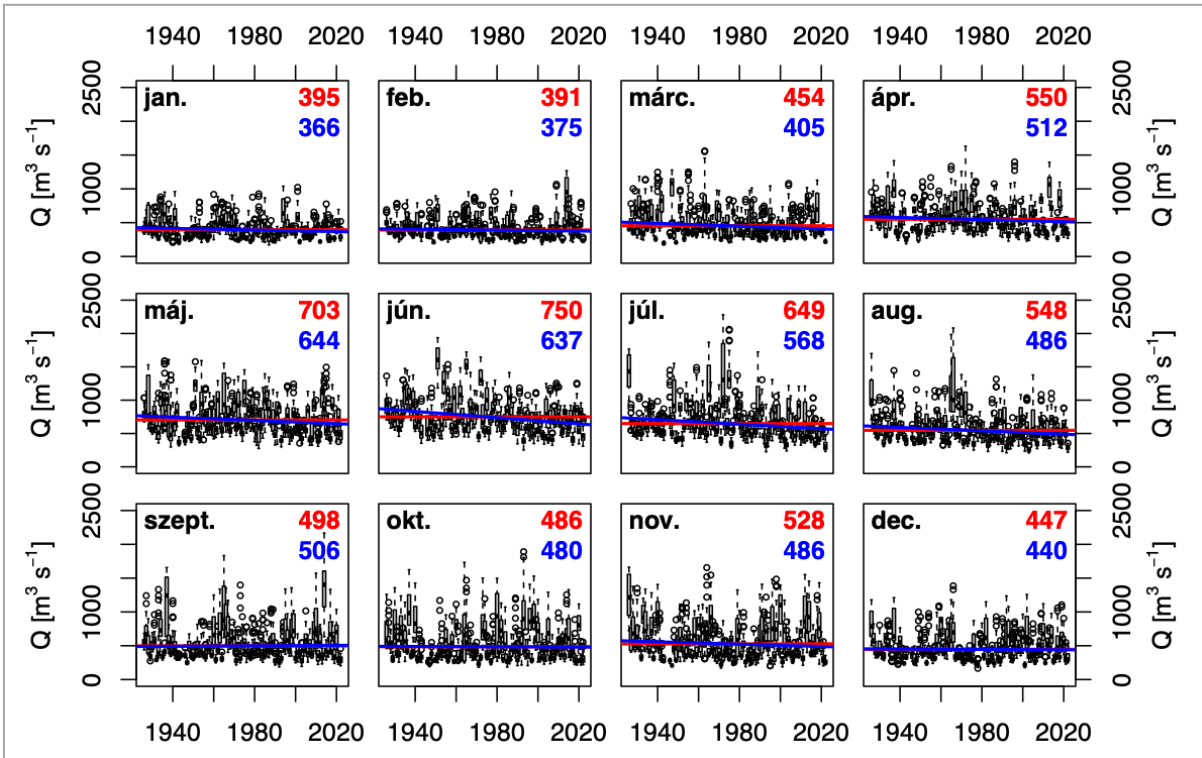
A karsztvíz pótlás átmeneti lehetőség, hiszen a korábbi bányászati szivattyúzás a gyakorlatban is megmutatta, hogy a tartós, nagymértékű kiemelés, egyéb problémák okozása mellett a karsztforrások hozamán keresztül végső soron a Balatonba érkező hozzáfolyást is csökkenti. Ugyanakkor a karsztvízből történő 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 alsómiholjáci (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.

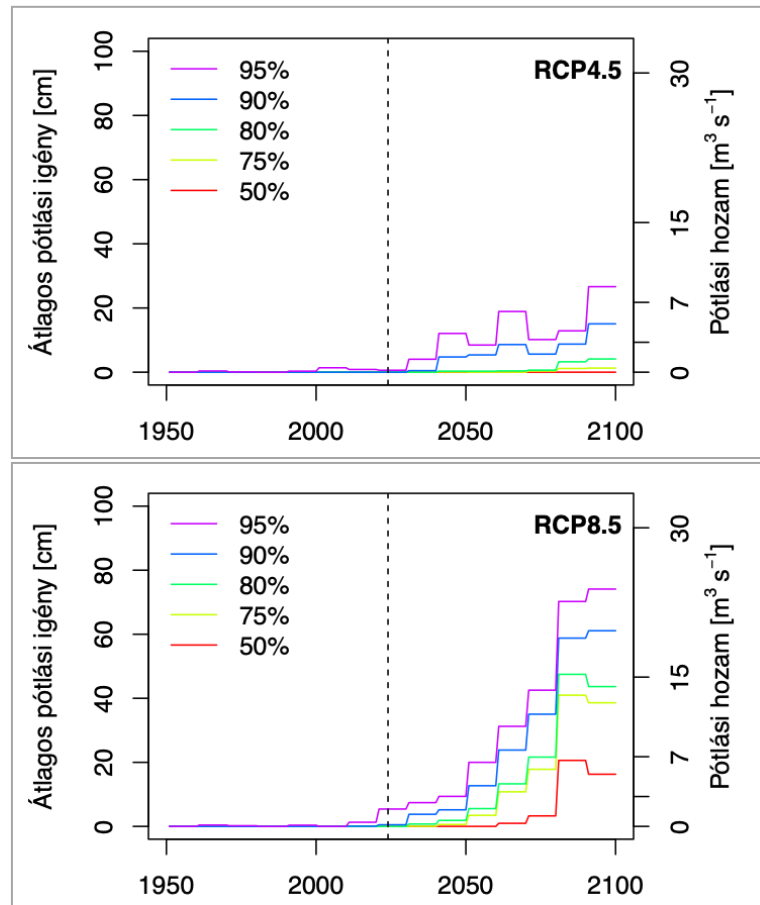
A legtöbb folyami pótlási megoldás bevezetése a Kis-Balatonra is érinti, de a tározók vízének kedvezőtlen minősége miatt a fenékpasztai zsilib nyáron gyakran zárva van. A balatoni és a forrásoldali vízminőségi és ökológiai kockázatok csökkentése érdekében a vizet főleg vegetációs időszakon kívül lehet pótolni. A Dráva bővízü 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 $+70 \text{ cm}$ 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 $+0 \text{ cm}$ feletti legyenek (7-8. ábrák). Itt már ahhoz is kb. $15 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ pótlási hozamra lenne szükség, hogy a vízállások $+50 \text{ cm}$ 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 összehangban 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 $+100 \text{ cm}$ 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 20. 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 segítette 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 vízszintcsökkenést 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-víz mennyiség 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 vízszintcsökkenést, extrém alacsony szinteknél pedig a 10 cm-es különbséget a tó használói nem érzékelnék számottevő javulásnak, különösen nem a probléma megoldásának.

A vízpótlás szükségessége

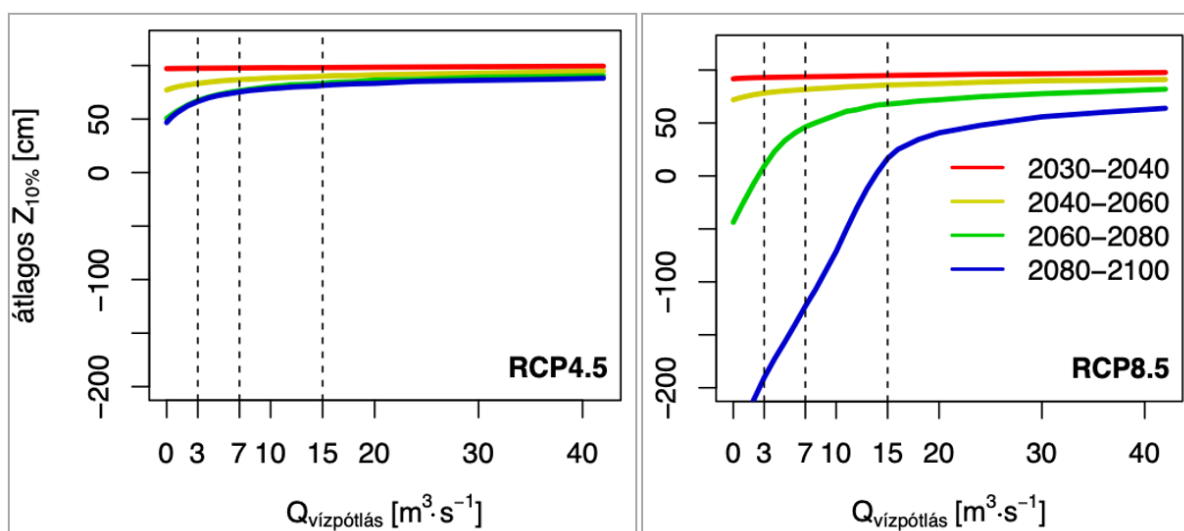
Az eredmények alapján a szükséges vízpótlás nagyságára és időzítésére csak valószínűségi előrejelzések tehetők, de a trend egyértelmű. A 2005-2020 közötti üvegházhatású gáz-kibocsátások és a csökkentésükre ténylegesen megtett intézkedések alapján az RCP8.5 forgatókönyvet tekintik a legvalószínűbbnek, 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-ismeretek ellenére sincs kidolgozott, megalapozott, jól előkészített terv a tó fenntartására. A vízpótlás előkészítésének halogatása ugyanilyen helyzetet teremtene 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 mikroklímáját 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 olyannyira befolyásolná a regionális klímát, hogy a tóra hulló csapadékmennyiség is növekedne. Az Alfölddel ellentétben (Tímár és társai 2023) a Balaton vízgyűjtőjén a tótól meszesbebbi 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 változó, 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)

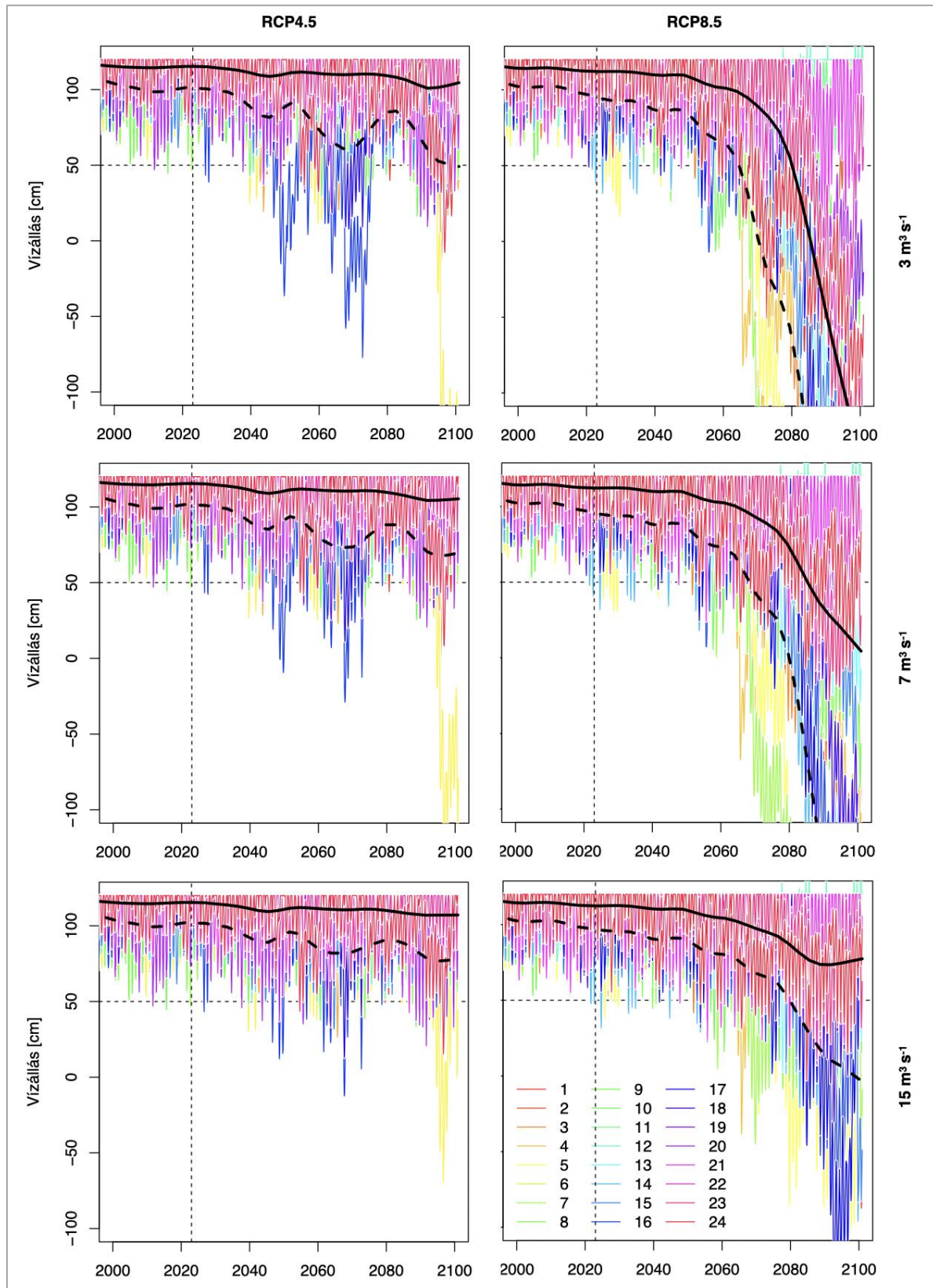
fokozatos átalakítását úgy, hogy a tó egy széles vízállástartományban is használható maradjon. Ehhez külföldi példák rendelkezésre állnak, hiszen a vizek többségénél jelentős a parti vízállás-ingadozás, illetve új, innovatív megoldások is alkalmazhatók.

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.

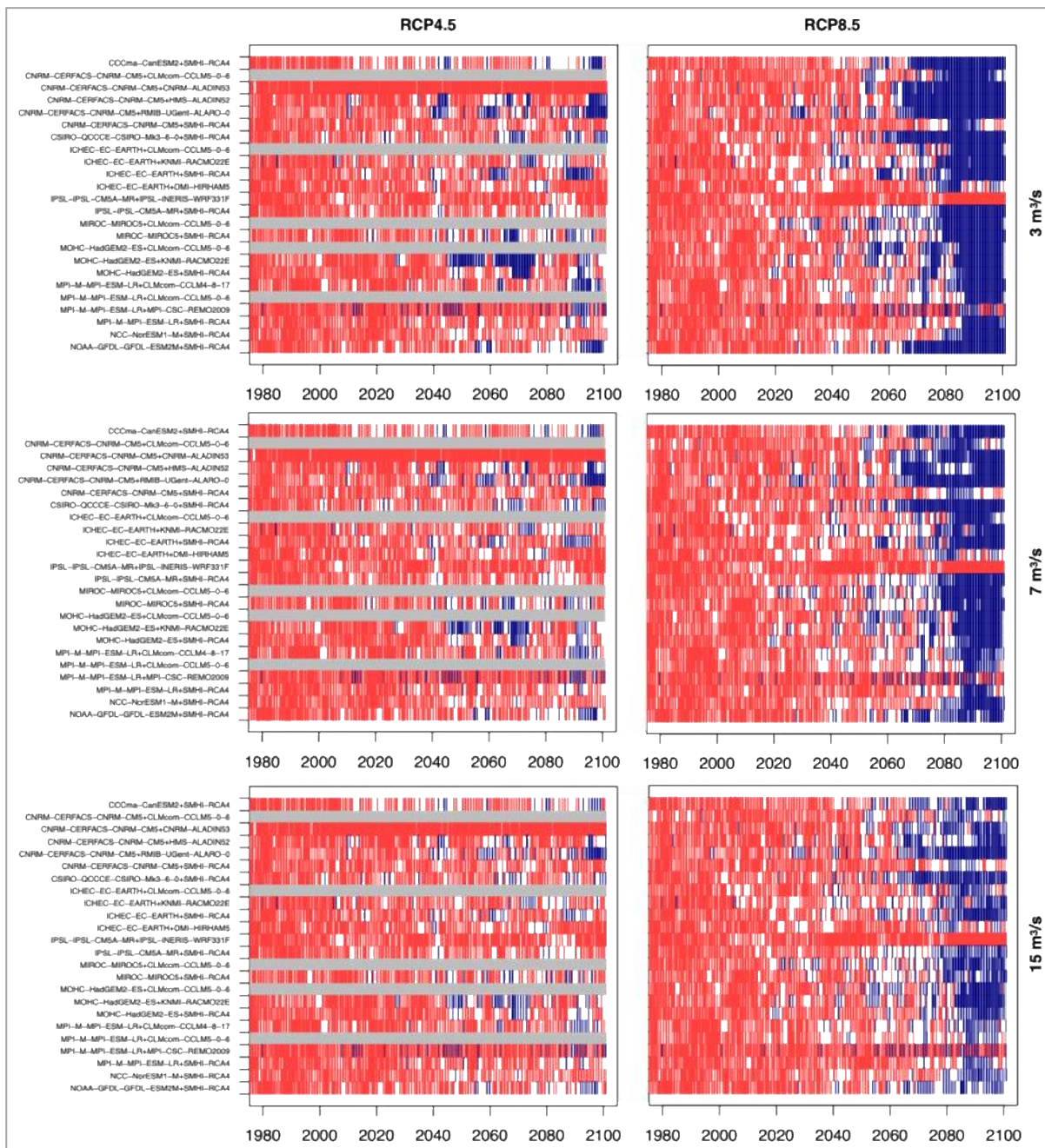
Az értelmesebben megvalósítható beruházások körét természetesen befolyásolja a tóhoz kötődő ösztönös gazdasági haszonhoz viszonyított költségkeret, azonban beavatkozás nélkül nagyon valószínű, hogy az elsősorban turizmusra épülő regionális gazdaság előbb-utóbb hanyatlani fog.

A menedzsment beavatkozások megvalósíthatósága számos természettudományos, technikai, politikai és üzemi problémára 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 modellpárok 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 fehérén 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 érdekelteltek kívánságaiban 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 felelőségi 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 vízhiánytartása 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 vízhiány – 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 vízméreg 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 vízhiány kedvezőtlen vízminőségi és ökológiai következményekkel jár. Ha a vízpótlás elérhető lenne, a jelenlegi vízszintszabályozási rend lazíthatóvá válna: mivel az alacsony vízhiány 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 m ³ s ⁻¹)	2030	2080	2. után rögtön	2060
4. Drávai/murai pótlási lehetőség megépítése (4-7 m ³ s ⁻¹) ^a	2040	–	2040	2080 ^c
5. További drávai/murai pótlási lehetőség megépítése (további 5-8 m ³ 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 vízhiánytartására. 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>

Giorgo, 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 nyárvégi vízállásának rekonstrukciója tölgyek évgyűrű vastagsága alapján. In: Szlávik, 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 éghajlatváltozás (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).* Vizvisszatartás. 2023. 03. 16. <https://www.ovf.hu/vizgazdalkodas-vizszolgaltatas/vizvisszatartas> (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>
- Szlávik 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 Közlöny*, 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., Timár 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 Kutatóintézetében, 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 Igazságosságért 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.

A Hévízi-tó monitoring hálózata, annak fejlesztése, kiegészítése kampányjellegű mérésekkel

Nagy Judit Barbara¹, Hajnal Géza¹, Szieberth Dénes¹, Torma Péter^{1,2}, Rehák András Miklós¹, Reska Zsombor János¹

¹ Víz tudományi és Vízbiztonsági Nemzeti Laboratórium, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Építőmérnöki Kar, Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszék, 1111 Budapest, Műgyetem rkp. 3. (e-mail: hk@hidrologia.hu)

² HUN-REN-SZTE Fotoakusztikus Környezetifolyamat-megfigyelési Kutatócsoport, 6720 Szeged, Dóm tér 9. (e-mail: hk@hidrologia.hu)

DOI: 10.59258/hk.18347



Kivonat

A Hévízi-tó és környezete a magyarországi fürdőkultúra és turizmus emblemikus helye. Ezzel összefüggésben vált a hazai karszt-kutatás egyik legfontosabb helyszínévé. Jelen tanulmány röviden felsorakoztatja a Hévízi-tóval kapcsolatos évszázados múltira visszatekintő kutatásokat, majd pedig azt kívánja összefoglalni, hogy napjainkban ezeket a korábbi tapasztalatokat, feltételezéseket milyen általunk végzett mérésekkel, vizsgálatokkal bővítjük ki. Ehhez szükségszerűen megjelenik a jelenleg üzemeltetett monitoring rendszer felépítése, amelyet saját fejlesztésű műszerekkel egészítettünk ki. Mindezek mellett bemutatjuk a kampányjellegű mérésorozatokot is, amelyek célja az évtizedek során megváltozott felszíni és felszín alatti áramlási viszonyok megismerése, valamint hidrometeorológiai mérésekkel a tó párolgásának, hőháztartásának és ezek kombinálásával a vízmérlegének meghatározása.

Kulcsszavak

Hévízi-tó, termálkarszt, monitoring-rendszer, hidrogeológia, tavi cirkuláció, hidrometeorológia.

The monitoring network of Lake Hévíz, its development and expansion with occasional measurements

Abstract

Lake Hévíz and its surroundings are emblematic of Hungarian bathing culture and tourism. In connection with this, it has become one of Hungary's most crucial karst research sites. The present study briefly lists the centuries-old research related to Lake Hévíz. Then, it will summarize how these earlier assumptions and experiences are expanded and supplemented by measurements and studies we have carried out. For this, we also describe the structure of the currently operated monitoring system, which has been augmented by self-developed instruments. In addition, we present our measurement campaigns, the aim of which is to get to know the surface and subsurface flow conditions that have changed over the decades and to determine the evaporation and water balance of the lake with hydrometeorological measurements.

Keywords

Lake Hévíz, thermal karst, monitoring system, hydrogeology, circulation, hydrometeorology.

BEVEZETÉS

A Hévízi-tó egy termálkarszt-forrás felett kialakult forrástó, amely a Dunántúli-középhegység főkarsztvíztárolójának egyik legjelentősebb természetes megcsapolója. Mindamellett, hogy népszerű turisztikai célpontként jelentős gazdasági értékkel rendelkezik, világviszonylatban is páratlan, védetté nyilvánított természeti érték, Európa legnagyobb termálvizes tava, amely egész évben fürödhető. A feltörő meleg forrásvíz magas kén-, rádium-, és ásványianyag-tartalmának köszönhetően számos gyógyulni vágyó látogatja meg az év bármely időszakában. A tavat tápláló forráscsoport azonban igen sérülékeny mind a hőmérséklet, mind a vízhozam, mind pedig a vízminőség tekintetében. A karsztvíztárolóból az 1950-es évektől kezdve a bányászattal párhuzamosan megkezdődtek a vízkitermelési munkák, amely mértéke meghaladta a helyi és regionális utánpótlódást, ezzel pedig a karsztvízháztartás átalakulásához vezetett. Ennek, a beszívárgási hiánynak, valamint a növekvő helyi vízkivételnek következményeként számos forrás hozama csökkent vagy teljesen el is apadt. A Hévízi-tó hozama a felére, hőmérséklete pedig a gyógyhatás szempontjából kritikus hőmérséklet alá csökkent.

A karsztvíz természetes tisztaságából eredően hatalmas értéket képvisel, hiszen a karsztvízbázisokból kitermelt víz akár közvetlenül is alkalmas lehet lakossági fogyasztásra. Ezek a vízbázisok mind hazánkban, mind pedig a világ számos részén az ivóvízellátás egyik fő bázisát adják, ezért különleges figyelmet igényelnek. Ezzel együtt azonban jellemzőik miatt igen sérülékenyek is. A védelem alapja pedig ebben az esetben az, ha megértjük a működésüket. Felszín alatti elhelyezkedésük miatt azonban nehezebb és körülményesebb a prevenció, a monitoring, valamint egy esetleges szennyeződés esetén a helyreállítás.

A másik fő felhasználási alternatíva a kitermelt termálvíz rekreációs célra való alkalmazása (fürdés, gyógyászat), vagyis nagy gazdasági potenciált is jelent a turizmus és vendéglátás terén. A Hévízi-tónak 2023-ban közel 700 ezer vendége volt (https://termalonline.hu/termal-hirek/kiderult-milyen-eve-volt-a-hevizi-tofurdonek#google_vignette). A városban eltöltött vendégéjszakák száma pedig még ennél is többre tehető. Mindezen szempontok különösen fontossá teszik, hogy az adott víztestről a lehető leg részletesebb adatokkal rendelkezünk a vízmennyiség és a vízminőség terén is.

A Hévízi-tó kutatástörténetének rövid áttekintése

A Hévízi-tó állapotával kapcsolatos feltárások már az 1700-as évek második felében vizsgálták a víz gyógyhatását és vegyi összetételét, azonban a részletesebb felmérési munkákat a Festetics családhoz fűződő fürdőfejlesztések hozták meg (Szántó 1993). A következő évtizedek során megtörtént az első kutatómerülés (Lóczy 1908), a tómeder felmérése (Hencz 1891), kémiai paraméterek vizsgálata (Weszelszky 1908), a víz-minták és iszap összetételének tanulmányozása (Weszelszky 1911, Windisch 1911) és a vízhozamra is született közelítő értékek (Cholnoky 1918). Később feltérképezték a tó hőmérsékleti és áramlási viszonyait (Moll 1941, Cziráky 1957), alátámasztották a víz vadózus jellegét (Szédeczky-Kardoss 1941), majd az ötvenes évektől kezdve rendszeressé váltak a tóforrás hozamának mérései (Kugler 1986), valamint a nehézbúvárok kutatómerülései (Ugray 1953, Cziráky 1954), végül az Amphora Könnyűbúvár Sport Klub tagjai 1975-ben fedezték fel a forrásbarlangot (Plózer 1976a, 1976b, 1977). A hetvenes évektől kezdve csökkenni kezdett a tó hőmérséklete a vízhozam csökkenése miatt, aminek számos kutató vizsgálta a kiváltó okait, valamint megoldási javaslatokat adtak a problémára (Kádár 1972, Böcker 1975a, 1975b, 1978, Horányi és Sugár 1975, Müller 1975, Lorberer 1979). A csökkenő hőmérséklet lehetséges okait a nyilvánosság elől eltitkolták, azonban vízhőfokvédelmi munkákat rendeltek el (Solt 2015). 1984-ben megkezdődtek az előkészítő munkák, ennek keretében számos paramétert vizsgáltak (Starosolszky 1984), majd a következő évben kiépítették a „kéményt” amivel a forrástól közvetlenül a fürdőépület alá vezették a beáramló meleg vizet (Haszpra 1985). Felmérték és összefoglalták a tó 1985-ös állapotát a vízhozamszabályozás tervezéséhez, melyet az ezt követő évben valósítottak meg (Böcker és társai 1986). 1990-ben a Hévízi-tó vízminőségének változásait tanulmányozták (Gorzó 1990), valamint a tó utánpótlódási kérdései is előtérbe kerültek (Sárváry 1991). A bauxitbányák bezárása után, valamint a 90-es években az ivóvízcélú vízkivételek csökkenése miatt megindult a karsztrendszer visszatöltődése, ezzel együtt pedig a Hévízi-tó hozama 30-40%-kal nőtt (Csepregi 2007). 2022-ben elkészült a Hévíz-Keszthelyi-hegység lokális modellje (Székely 2022).

ANYAG ÉS MÓDSZER

Az eredeti monitoring rendszer

A monitoring rendszert (1. ábra) 1989-ben létesítette az ALUTRÖSZT (Magyar Alumíniumipari Tröszt) és a Hévízi Szent András Reumakórház és Gyógyfürdő (Tóth 2017). A működtetést a Reumakórház végzi a Hévíz-tó és Felszín Alatti Vízyűjtő Területének Környezetvédelme Alapítvánnyal, melynek tagjai önkéntes munkát végeznek. Az Alapítványt a mérőhálózattal egy évben hozták létre. A monitoring rendszerrel mennyiségi és minőségi paraméterek észlelése történik a kutakban, a tóban, és a forrásbarlangban. Ezen felül a Hévízi-tó két leeresztő műtárgyának az ellenőrző hozamméréseit a Nyugat-dunántúli Vízügyi Igazgatóság (NYUDUVIZIG) végzi. A forrásbarlang, mint fokozottan védett barlang, a Balaton-

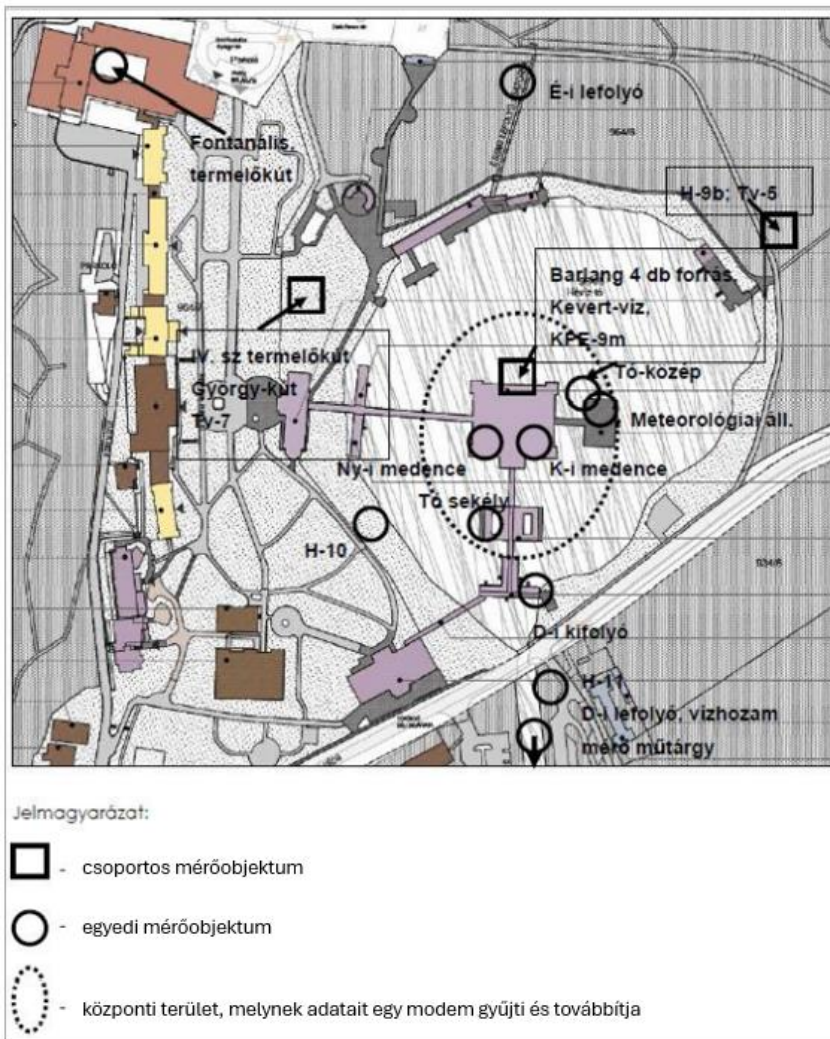
felvidéki Nemzeti Park Igazgatóság működési területén található. A Gyógytó és a Véderdő együttese alkotja a Természetvédelmi Területet, a természetvédelmi kezelésért a vagyongazdálkodó, a Hévízi Szent András Reumakórház és Gyógyfürdő felel.

A monitoring rendszer különféle paramétereket mér és rögzít, úgymint a különböző éghajlati, hidrológiai, hidrogeológiai jellemzők. Ezek alapul szolgálnak a biológiai monitoringnak, amely indikátor értékű zoo- és fitobentoszt, makrofita vegetációt mér (Tóth 2017). Mindezek mellett a Reumakórház rendszeresen (negyedévente) méri a két termelőkút nál és a tó egyes pontjain, a barlangban a vízkémiai és mikrobiológia paramétereit. A Fontánális (III. számú, B-14. kat.sz.) és a IV. számú (B-32. kat.sz.) termelőkút üzemeltetése felváltva történik, vízárával vannak felszerelve. A vízárárt havonta olvassák le, ezen felül rendszerességgel mintát vesznek, amiből bakteriológiai vizsgálatot is végeznek az 510/2023. (XI. 20.) Korm. rendeletnek megfelelően. Napi kb. 1100 m³ vizet vételeznek a kutakból. Éves szinten nagyjából 420 ezer m³ víz az engedélyezett mennyiség (tó hozamának kb. 3%-a). Korábban a György kutat használták termelésre, amely mára már csak megfigyelőként üzemel. A kitermelt vizet több helyen is felhasználják. A barlangi nyomásmérés adatain észlelhető a kutak termelésének ideje. Több megfigyelő hévíz- és talajvízkút van a tó körül. A különböző mért éghajlati, meteorológiai paraméterek közé tartozik többek között a légköri nyomás, léghőmérséklet, levegő harmatpont, szélirány, szélsebesség, szélirány, csapadékmennyiség és intenzitás, páratartalom, UV-B sugárzás. Az adatokat főképp a Reumakórház üzemeltetéséhez hasznosítják, azonban hidrogeológiai vonatkozású kutatásra is van lehetőség, hiszen az egymásba olvadó földrajzi tájegységek különleges adottságaiból következik, hogy hideg- és meleg karsztvizek keveredése jól vizsgálható ezen területen.

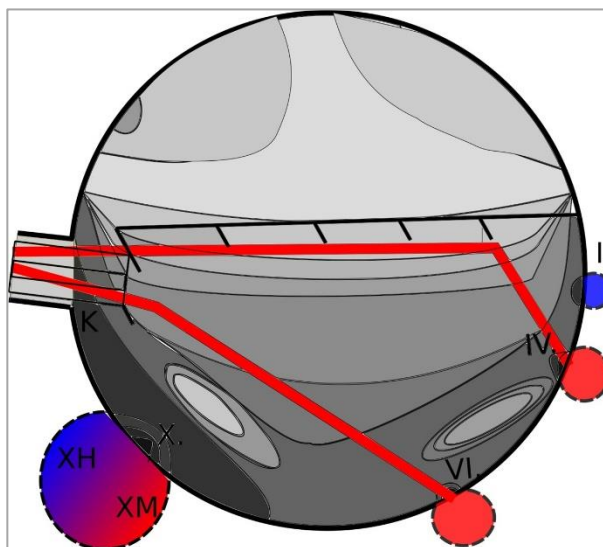
Víz alatti monitoring

A Gyógyfürdő részére a kutatóbúvárok két havonta végeznek méréseket. A mérések során a búvárok a forrásbarlangba telepített CTD szenzorokat (vezetőképesség, hőmérséklet, vízmélység regisztráló) a felszínre hozzák adatkinyerés céljából, majd visszahelyezik azokat a mérési helyekre. Ezek mellett kézi mérésekkel is kiegészítik az adatsorokat: a korábbiakhoz képest már csak a fontosabb helyeken történik hőmérsékletmérés. Racionalizálás után a rendszeres mérések helyei (2. ábra):

- I. (korábban II.) forrás: mindamellett, hogy ez a leghidegebb forrás, ez markánsan különbözik a mellette lévőktől vízminőség tekintetében is,
- IV. és VI. forrás: a két, fürdőépületbe bevezetett cső (kémény) „vízkivételi” helyei, ezek a legnagyobb hozamú meleg források,
- X. forrás: a bejáráthoz legközelebb fekvő, hasadékból található hideg (XH) és meleg (XM) források együttese. A meleg komponensnél a legmagasabb az oldott kénhidrogén koncentrációja,
- Kevertvíz (K): a forrásbarlangban a bejárat előtt, az egyes források összekeveredett vize.



1. ábra. Az eredeti monitoring hálózat főbb részei (Tóth 2017)
 Figure 1. The main parts of the original monitoring network (Tóth 2017)



2. ábra. Felülnézet a forrásbarlangban lévő rendszeres mérések helyeiről. Római számokkal jelölve a források helyei, valamint K-val a kevert víz mintavételi helye. A meleg (30 °C feletti) pirossal, a hideg (30 °C alatt) források kékkel jelölve. Piros vonalakkal jelölve a vízkivételi csövek, amelyek a meleg vizet a fürdőépületbe vezetik fel. A szürke árnyalatai a különböző mélységeket mutatják: a legsötétebb 48 méteres, a legvilágosabb 42 méteres mélység.

Figure 2. Top view of the locations of regular measurements in the spring cave. The locations of the springs are marked with Roman numerals, and the sampling location of the mixed water with K. Hot (above 30 °C) springs are marked with red, while cold (below 30 °C) are marked with blue colour. Red lines mark the pipelines lifting up hot water to the bath. The shades of gray show the different depths: the darkest is 48 meters, the lightest is 42 meters.

A kézi méréseket digitális hőmérőkkel végzik, melyek helyszíni ellenőrzése a Gyógyfürdő által biztosított, a forrásbarlangba telepített kalibrált üveghőmérővel történik. A mérési feladatok mellett a búvárok vannak megbízva a források és vízkivételi csövek – melyeket a forrásbarlangból néhány éve bevezettek egészen a két legnagyobb hozamú meleg forráshoz – kamerás vizsgálatával is. Korábban negyedévenként mintázták az egyes forrásokat, kevert vizet és a forrásbarlangból feláramló vizet 3 méterenként, a felszínig, majd akkreditált laborban történt a kiértékelésük.

Felszíni hidrológia monitoring

A Hévízi-tó vízszintjének szabályozásáért, illetve a tó hozamának elvezetéséért két leeresztő műtárgy felel: az Északi-, és a Déli-zsilip. A műtárgyak az elmúlt években rekonstrukción estek át, a KEHOP-4.1.0-15-2016-00050 projekt keretében. A Hévízi-tó átfogó tóvédelmi programjának megvalósítása projekt keretében. Az Északi-zsilip az Északi- vízlevezető csatorna 0+012 km szelvényében került kialakításra egy 0,94 m nyílású, fektethető acél zsiliptábla. Ezen műtárgy esetében a NYUDUVIZIG automata vízszintregisztrálója van beépítve, így a zsilip nyitásának függvényében az átbukási magaságból, tapasztalati képlet segítségével számítható a leeresztő műtárgyon elvezetett vízhozam értéke. Az uszadék leengedése az üzemeltetők elmondása alapján „szükségsezerűen” történik. A Déli-zsilip, amelyen a tó vízhozamának nagyjából $\frac{3}{4}$ -e kerül levezetésre, a Hévíz folyáson (2+727 és 2+740 km szelvény között) kialakított kombinált (vízszinttartó – felső zsilip, duzzasztómű – alsó zsilip és oldalvízkivételi mű) műtárgy. Mind a két zsilip három kamrából áll. A felső zsilipen nincsen átbukás, csak az uszadék levezetése esetén. A középső kamrához érkezik a zsilip alatt átvezetett NA 800 mm átmérőjű vízhozammérő cső. A Déli-zsilipen elvezetett vízhozam mérése a felső zsilip felett kialakított beton aknában egy ultrahangos vízhozammérő segítségével történik. A mérőcsőből kilépő víz visszatartását, ezzel együtt pedig a tó vízszintjének szabályozását az alsó zsiliptábla biztosítja, ahol a két szélső kamrán történik a túlfolyó víz elvezetése. Két helyen vízszintregisztráló műszert helyeztek el. Az oldal-zsilipen egyéb vízszolgáltatási lehetőségre van mód, azonban jelen üzem mellett nincsen átfolyás. Az üzemeltetők szóbeli közlése alapján tudjuk, hogy az átépítés előtt 50 l/s-ot vezettek le az É-i zsilipen, a Délin pedig 400 l/s-ot. Az átépítés után az arány 100-150 l/s és 300

l/s-ra változott, azonban tervezték a régi leengedési arányra való visszaállást. Általánosságban elmondható, hogy a reggeli órákban nyitnak a zsilipeken, ezáltal a tó vízszintje csökken. Kora délután a zsilipek zárásával a vízszint emelkedni kezd, majd beáll egy konstans szintre az este folyamán. A napi vízszintingadozás mindössze 2-3 cm.

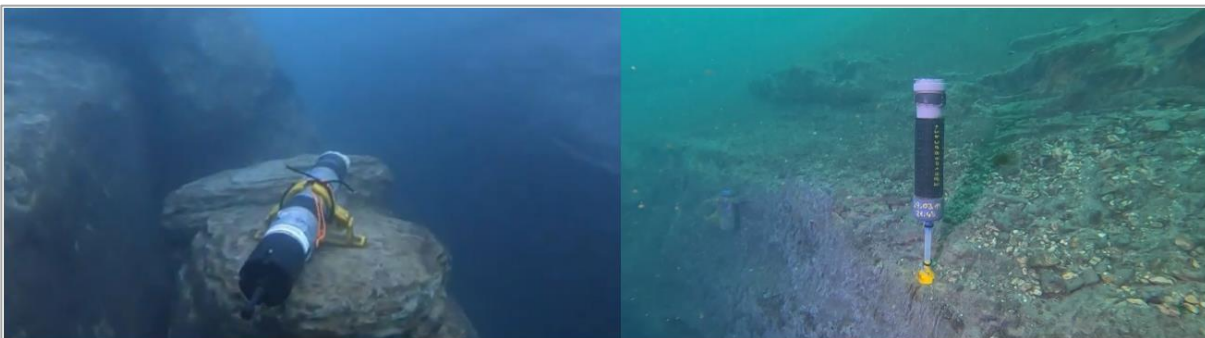
Az elmúlt időszakban szerzett tapasztalataink alapján elmondható, hogy a monitoring rendszer teljes felülvizsgálatára lenne szükség. A közeli hévíz- és talajvízkutak esetében a műszerek előregedtek, tönkrementek, így a legtöbbnél nincs folyamatos észlelés, csupán havonta egy kézi mérést végeznek (vízszintet regisztrálnak). A meteorológiai adatok esetén is jelentkeztek számottevő hiányos időszakok, paraméterek.

Az eredeti monitoring rendszer kiegészítése, műszerfejlesztések

Víz alatti mérések

A rendszeres víz alatti mérések egyrészt arra a kérdésre keresik a választ, hogy hogyan tűnik el a forrásból feláramló kén-hidrogén mennyisége. Ehhez a forrásbarlangban található tízes számú hideg és meleg források, valamint a kevertvíz mintázása történt meg. A fő komponenseket (szulfát, karbonát, klorid, kalcium, magnézium és nitrát, mint a szennyezés indikátora) vizsgáltuk meg a keveredés meghatározásához. A barlangi vizek mellett, a feláramló víz útját is leköveztük, 10 méterenként vett vízminták segítségével. A mintavételi helyeken a hőmérséklet mérése is megtörtént. A tapasztalatok azt mutatják, hogy a tóban létrejövő áramlások közel tökéletes keveredést biztosítanak. A forrásbarlangból kiáramló csóva hatása csupán csak néhány méteren érzékelhető, azon kívül mind a hőmérséklet, mind pedig a koncentráció homogén. Kivételt ez alól csak a nagy hőmérsékletkülönbség miatt létrejövő intenzív leáramlási zónák jelentenek.

A felszín alatti áramlások feltérképezéséhez a kráter két pontján (2. ábra fekete ponttal jelölt helyek) áramlásmérőt helyeztünk el. Az egyik (1. fénykép bal oldal) a fürdőépület felőli oldalnál lett rögzítve nyolc méteres mélységben. Ez az Aquadopp High Resolution (HR) profiler egy speciális ADCP, ami a Doppler-elvet felhasználva méri a vízoszlop rétegeinek háromdimenziós sebességvektorait, akár 8 Hz-es gyakorisággal. Mivel széttartó hangszarakkal mér, így a műszertől távolodva egyre nagyobb térbeli átlagolást végez.



1. fénykép Aquadopp (balra) és billenőtestes áramlásmérő (jobbra) elhelyezése a kráter különböző pontjain (Fotó: Szieberth Dénes)
Photo 1. Placement of Aquadopp (left) and tilting flow meter (right) at different points of the crater (Photo by Dénes Szieberth)

A másik (*1. fénykép jobb oldal*), egy általunk fejlesztett billenőtestes áramlásmérő műszer, ahol a műszer dőlésszöge függ az áramlási sebességtől. A műszertest függőlegestől való eltérését egy gyorsulásmérő szenzor érzékeli. Az ADXL345 szenzor a gravitációs vektor, valamint a gyorsulás tengelyekre vetített komponenseiből számítja a dőlés szögét és irányát. A műszer kialakításánál fontos szempont volt a kis energiafogyasztás, vízhatlanság, és a nyomásállóság. A szenzor adatait egy mikrokontrollerből, memóriaegységből, egy RTC modulból és akkumulátorból álló egység dolgozza fel és tárolja. A műszer tokozásának kialakítását a várható áramlási sebességek figyelembevételével határoztuk meg, az érzékenység és a méréshatár ugyanis függ a tokozás áramlási ellenállásától, a rá ható felhajtóerőtől és a dőlést lehetővé tevő rögzítőelem rugalmasságától. A műszer áramlási ellenállásának kalibrálása a BME VVT tanszék üvegcsatornájában történt meg. A műszer adatainak kiértékelését nehezíti, hogy a nem áramvonalas kialakítás miatt Kármán-örvénysorok alakulhatnak ki, ennek következtében a műszer imbolyog (*Sas 2024*).

Az áramlásmérőn kívül saját tervezésű és építésű hőmérséklet, vezetőképesség és vízszintmérő víz alatti kéziműszereket és loggereket is használunk. Az egyedi tervezés indoka a kereskedelemben kapható műszerek magas ára és a termálvizes környezetben tapasztalt alacsony élettartama.

Minden műszer hasonló módon és elven épül fel. A mérésekhez szükséges vezérlési feladatokat a kis fogyasztású ATmega328P processzoron alapuló mikrokontroller látja el, melynek programkódját az adott feladathoz, körülményekhez igazítjuk. A méréseket különféle szenzorokkal (ultrahangos távolságmérő, hőmérő, gyorsulásmérő) végezzük, melyekhez az RTC (Real Time Clock) modul segítségével tudunk pontos időt rendelni. Az adatok tárolására FRAM memóriát vagy SD kártya modult, az árammal való ellátáshoz pedig kis önkisülésű, a magasabb hőmér-

sékletet jobban toleráló lítium-vasfoszfát akkumulátort használunk. A heterogén mérési körülményeket (nyomás, vízállóság, rendelkezésre álló hely, megközelíthetőség) a tokozás kialakításnál vesszük figyelembe. A műszerek tervezéséhez és elkészítéséhez alacsony beszerzési költségű modulokat és nyílt szoftvereket használtunk, a terveket pedig szabadon elérhetővé tesszük kutatócsoportok és oktatási intézmények számára.

Megfigyelő kutak monitorozása

A felszíni mérések során megfigyelő kutaknál folytattunk folyamatos észleléseket. A korábbi terveink szerint több kútban szerettük volna pótolni a hiányzó vízszintregisztrálókat (Dataqua), azonban a Víz tudományi és Vízbiztonsági Nemzeti Laboratórium (VVNL) projekt keretében a beszerzések még nem valósulhattak meg. Azóta a Gyógyfürdő két kútban tudta pótolni ezeket a műszereket. A rendszeres méréseink a tó körül található H10, H11, György kútra, valamint egy alkalommal a H9 és H9a kútra terjednek ki. Havonta kiolvassuk az adatokat a hőmérő szondából, ami folyamatosan rögzíti az adatokat. Mérjük a kutakban kialakuló hőmérsékleti rétegződést is, 5-10 méterenként leengedett hőmérő szonda segítségével. Két mélységből vízmintákat veszünk (egy felszín közeli, és egy mélységi minta), amiben még a mintavételezés idejében vezetőképességet mérünk, majd a megvett mintákat laborban vizsgáljuk. A víz alatti mintákhoz hasonlóan, a vízben lévő szulfátot, kloridot, kalciumot, magnéziumot, nitrátot és kén-hidrogént vizsgáljuk.

A hőmérsékletek mérésére saját fejlesztésű műszert alkalmazunk (*2. fénykép*). A vízmintavételezés esetén, mivel a kutak tisztítószivattyúsására nincsen lehetőségünk, így a mintákat közvetlenül a szűrőzött részekről vesszük. Ehhez a *2. fényképen* látható dupla golyós bailert alkalmazzuk a mélységi mintavételre. A György-kút esetén külön problémát jelentett a nagyon kicsi, kb. 40 mm átmérőjű cső, így ebben az esetben egy mindkét végén visszacsapó szeleppel ellátott, kis méretű vízmintavevőt készítettünk.



2. fénykép Balra a hőmérsékletméréshez, jobbra a vízmintavételre használt műszerek (Fotó: Nagy Judit Barbara)
Photo 2. Instruments used for temperature measurement are on the left, and instruments used for water sampling are on the right
(Photo by Judit Barbara Nagy)

Az eddigi mérések során nem észleltünk szezonális változást a kutak és a barlangi vizek esetében sem. Csak a felszínhez közeli vízrétegek hőmérsékletét befolyásolja az

aktuális léghőmérséklet értéke, a mélyebb rétegeknél konstans hőmérséklet tapasztalható. A vízminták esetében elmondható, hogy a H10 és H11 kutakba nem jut talajvíz,

felszíni szennyezés, ugyanis a nitrogén és foszfortartalmuk nagyon alacsony. A kémiai paraméterek tekintetében sem láttunk szezonális változást.

Keressük a kapcsolatot a kutak és a forrásbarlang között (hőmérséklet és ionkoncentráció tekintetében). Az eddigi tapasztalatok azt mutatják, hogy sem a hideg, sem pedig meleg komponenssel nem egyeznek meg a kutakban lévő vizek. A György kút a korábbi termelőkút volt, a szűrőzés mélysége megegyezik a forrásbarlang mélységével, a hőmérséklete magasabb a többi vizsgált kúthoz képest, a vízminták alapján mégsem hasonlít a barlangban található vizekre. Ez alapján a forrás közelében igen bonyolult pályákon áramolhat a víz, hiszen még ilyen kis távolságokban sem fakad ugyanolyan minőségű víz. Valószínűsíthető, hogy ezen vizek keveréke áramlik a barlangban található forrásokhoz, ehhez pedig szükséges a keveredési arány meghatározása.

Kampányjellegű mérések

A rendszeres mérések mellett kampányjellegű méréseket is végeztünk több alkalommal, valamint a további mérések előkészítése is folyamatosan zajlik. A felszíni áramlásmérésekre eddig két alkalommal került sor, 2023.09.05-én és 2024.02.29-én. Ezen időpontok kiválasztásánál a kutatóbúvárok által észlelt áramlási irányok megváltozását tartottuk szem előtt. A vízhozammérések néhány havi rendszerességgel történtek, 2023. szeptembere és 2024. augusztusa között négy alkalommal. Hidrometeorológiai mérésekből egy nyári (2023. augusztus 22. és szeptember 10. közötti) és egy téli (2024. január 26. és február 28 közötti) mérési kampányt végeztünk, így a mérőállomás egy nyári, és egy téli időszakban átfogóan mérte a hidrometeorológiai meghajtó erőket. A kráterből és a forrásbarlangból egy alkalommal vettünk közetmintákat 2024.03.12-én.

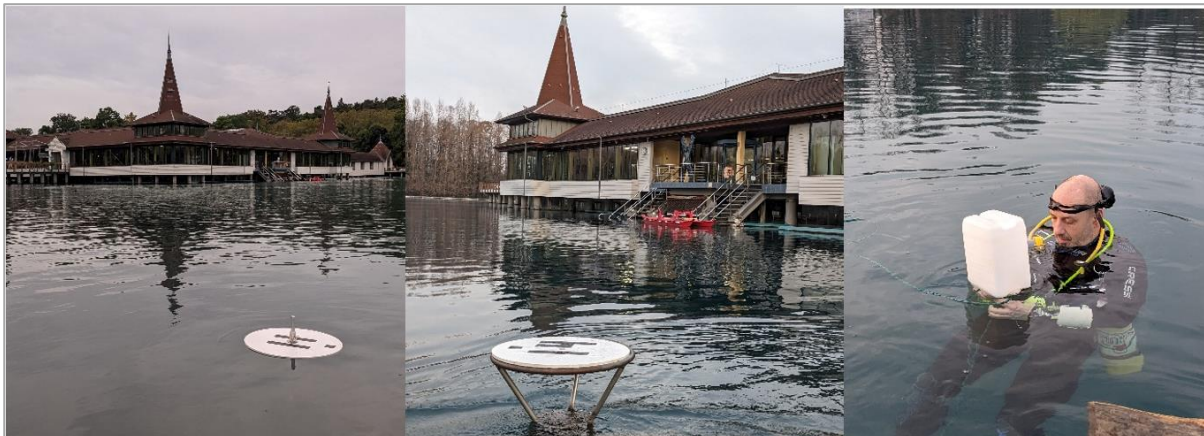
Felszíni áramlásmérések

A tóban kialakuló áramlásoknak három fontos szerepe is van: egyrészt, szabályozzák a tóban kialakuló hőmérsékleti eloszlást, másrészt az iszap mozgását (esetleges túlfolyását), harmadrészt pedig a gyógyhatású oldott komponensek mennyiségét, így a tó megfelelő működéséhez megkerülhetetlen a jelentőségük. A felszíni áramlásmérések módszertana egy korábbi mérési elven alapul, amelyet a kornak megfelelő, fejlett eszközökkel, nagyobb pontossággal lehet megvalósítani, ezzel pedig a megváltozott áramlási viszonyokat fel lehet tární. Elsőként Moll Károly vizsgálta 1941-ben a tó áramlási viszonyait. Leírta, hogy a vízszintes síkban történő vízmozgás két áramlatra osztható: az egyik észak felé mutató két félkör, mely visszafordul a találkozási pontnál, a másik ehhez hasonló, csak déli irányban, amit a talajalakulat okoz. Négy erős és kettő gyenge áramlást azonosított. A függőleges vízáramlást a forrástól való eltávolodás miatti lehülés, majd mélybe süllyedés okozza (Moll 1941). Később Cziráky (1957) is hasonló eredményekre jutott. A vizsgálat során a sebességet is számította a botúszók által megtett út, és a mért idő alapján. Ezt követően Starosolszky (1984) vizsgálta a tóban kialakuló áramlásokat a beépítendő „kémény” műszaki tervezése miatt. A mérések ebben az esetben is úszókkal, botúszókkal történtek, világító úszókkal kiegészítve.

A méréseket ugyanezen elv alapján végeztük el, azonban a használt eszközök nagyobb pontosságot, felbontást garantáltak. A vizsgálat elvégzéséhez a tóban a megfelelő pontosság miatt több ponton fix helyzetű korongokat helyeztünk el, amelyeknek a koordinátáit RTK GPS segítségével meghatároztuk. A mérés során úszók mozgását rögzítettük drónra szerelt kamera segítségével (5. fénykép). A kiértékelés során így az ismert koordinátájú pontokból georeferálhatóak a felvételek. A drónnal (DJI Mavic 2 Air) készített felvételeken az egyes jelzőanyagok mozgása nyomon követhető, ezzel pedig a felszíni áramlás iránya és nagysága is számíthatóvá válik.

Két alkalommal végeztünk ilyen mérést, mind a két alkalommal a fürdő zárása után, a zavartalan megfigyelések érdekében, a zsilipekkel szabályozott közel állandó éjszakai vízszint kialakulása előtt. Fontos szem előtt tartani, hogy az áramlás iránya és nagysága kapcsolatban van a leeresztő zsilipekkel végzett vízszint-szabályozással. A mérés megkezdéséhez az erre a célra készített fix pontok (3. fénykép) elhelyezésére és a koordinátájuk pontos meghatározására volt szükség. A fix korongok helyének megválasztásánál figyelembe vettük a feltételezett áramlási irányokat és azt, hogy a megfelelő pontossághoz szükséges, hogy egy képen több ismert koordinátájú pont is legyen, hasonló távolságokra. Egyrészt, fém rudakat használtunk a számozott korongok rögzítésére, másrészt a fürdőzők számára kialakított „pletykapadokat”. Az első mérés alkalmával azt tapasztaltuk, hogy a forráskráter közelében nem elegendőek a 2, 3 és 4 méteres fém rudak, így a következő alkalommal már búvárok segítségével bójákat rögzítettünk erre a részre, hogy sűríteni tudjuk az ismert koordinátájú pontokat. Az ilyen módon rögzített pontok azonban kisebb pontatlanságot vihetnek a mérésekbe a mozgásukkal, azonban a helyszíni viszonyok alapján ezt elfogadhatónak találtuk, szinte mozdulatlanok voltak a mérés ideje alatt. A másik lehetséges megoldás a drónnal való nagyobb repülési magasság lett volna, azonban a képek feldolgozása, a pontok felismerhetősége miatt ezt az opciót elvetettük.

Jelzőanyagként a tó ökológiájának, vízminőségének védelme miatt környezetbarát, néhány nap alatt lebomló, méhviaszból készített viaszkorongokat használtunk, amelyek esetleges eltűnésük esetén sem okoznak problémát. Az éjszakai órák esetében azonban nem volt biztosított a megfelelő megvilágítás, így a szürkület után már mécseseket használtunk az első mérés alkalmával. A szélesend miatt tükörsima volt a tó vízfelszíne, így a mécsesek használhatóak voltak, azonban a következő alkalommal – készülve az esetlegesen szelesebb időjárásra – már „tutajokon” úszó ledeket (4. fénykép) alkalmaztunk. A fix korongokat is hasonló módon világítottuk meg. A mérés során a mérőcsapat három részre oszlott: az egyik része egy csónakkal a viaszkorongok eleresztését végezte a forráskráter fölött, a másik a drónt irányította a szárazföldről, a harmadik része pedig a jelzőanyagok feltételezett áramlása szerint a végponton várakozott, majd begyűjtötte az úszó jelzőanyagokat.



3. fénykép. Fix helyzetű, ismert koordinátájú pontok elhelyezése rúdon (balra), „pletykapadon” (középen), bóján a kráter fölött (jobbra) (Fotó: Nagy Judit Barbara)

Photo 3. Placement of points with fixed positions and known coordinates on a pole (left), on a "gossip trap" (middle) and on a buoy above the crater (right) (Photo by Judit Barbara Nagy)



4. fénykép. Jelzőanyagként használt úszó ledek (balra), viaszkorong és ledsorok a fix pontok megvilágításához (jobbra) (Fotó: Nagy Judit Barbara)

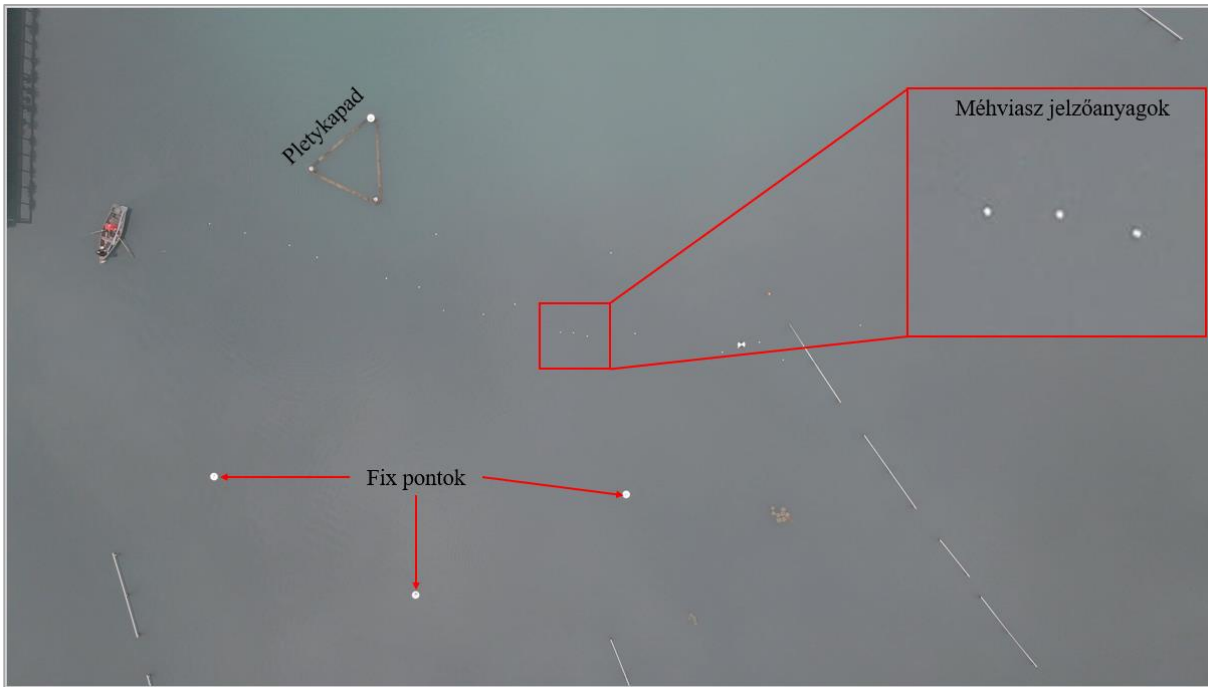
Photo 4. Floating LEDs used as indicators (left), wax disk, and rows of LEDs for lighting fixed points (right) (Photo by Judit Barbara Nagy)

A mérési eredmények feldolgozására többféle módszer is alkalmas lehet, melyek más-más pontossággal és idő-igénnyel rendelkeznek. Az egyik lehetséges megoldás a kézi feldolgozás pl. Autocad szoftverrel. Elsőként a georeferálást kell elvégezni, amely során a ferde kameraállásból készített felvételtől merőlegesre transzformált képet kapunk, ami így már valós koordinátákkal

rendelkezik, tehát méret-és koordináta helyes. Ebben az esetben egy megfelelő időbeli felosztást kiválasztva (pl. fél perc), az egymást követő képeken a jelzőanyagokat kijelölve, az általuk megtett utat lemérve számíthatóvá válik a sebesség és az irányuk. A másik lehetséges megoldást a Matlab szoftver használata jelenti. Ezzel az imént leírt munkafolyamat automatizálható. A drónra

szerezett kamera kalibrációja után, a kalibrációs paraméterek ismeretében, georeferálást követően feldolgozható a mérés. Ebben az esetben a videót framekre (képkockákra) bontjuk, majd kijelöljük a fix pontokat és a jelzőanyagokat is a kezdő képen. Ezután a Matlab minden egyes képen keresni fogja ezeket az objektumokat az előző képen látotthoz képest megadott pixelszámtartományon belül. Ennek a tartománynak a nagysága a várható sebesség nagyságától függ. A feldolgozás során ki-küszöbölhető a drón esetleges mozgásából adódó pontatlanság is. Ez gyakorlatilag képfeldolgozáson alapuló

áramlás mérési módszer (Large-scale particle image velocimetry - LSPIV eljárás), amellyel kétdimenziós elmozdulás vektorokat határozhatunk meg. Abból indulunk ki, hogy a vízzel együtt mozgó részecskék sebessége megegyezik a víz sebességével, így az egymást követő képkockákon keressük a mintázatokat (jelen esetben az úszó jelzőanyagot). A két egymást követő képkockán detektált és párosított jelzőanyagok által megtett út és az eltelt idő ismeretében számíthatóvá válik a víz áramlási sebessége (Fujita és társai 1998, Muste és társai 2008).



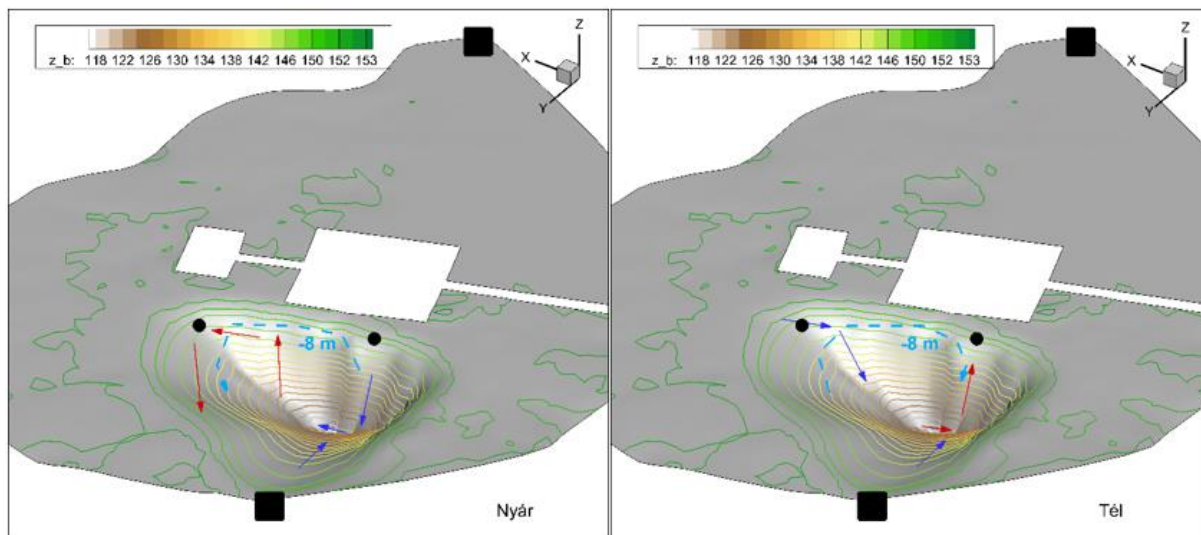
5. fénykép. Drónnal készített kép a fix pontokkal és a méhviasz jelzőanyagokkal (Fotó: Rehák András Miklós)
Photo 5. Drone image with fixed points and beeswax markers (Photo by András Miklós Rehák)

A két mérés idejének kiválasztásában a kutatóbúvárok által a merülések során tapasztalt forráskráterben megváltozó áramlási irányok voltak döntő jelentőségűek. A megfigyelésük szerint a nyári és téli időszakokban más a jellemző vízáramlási irány (3. ábra). A nyári időszakban a melegebb víz a forrásbarlangból a kráter keleti oldalán emelkedik a felszín felé, miközben a hidegebb víz a kráter nyugati oldalán áramlik a mélybe. Ezzel szemben, a téli időszak során ezek az áramlási irányok felcserélődnek: a melegebb víz a nyugati oldalon tör a felszínre, a keleti oldalon pedig a hidegebb víz bukik alá. Feltételezhető, hogy nem csak ez a két változat alakulhat ki. Ezen megfigyelések alátámasztására a kráter két pontján áramlásmérő lett elhelyezve, – a fentebb, a „Víz alatti mérések” fejezetnél leírt módon – amit a felszíni áramlásmérések eredményei kiegészíthetnek.

Vízhozammérések

Több alkalommal ellenőrző méréseket végeztünk mind a két leeresztő műtárgynál. Az Északi-zsilip esetén a folytonossági egyenletet alkalmazva határoztuk meg a

vízhozam értékeit. Ehhez az Északi-vízlevezető csatorna egyik alkalmas szelvényében, a zsilip felett geometriai-
lag felmértük a meder szelvényét, ezzel pedig a vízállás ismeretében átfolyási keresztmetszet meghatározható. A szelvényen átáramló víz sebességét a Doppler-elven működő ADV (Acoustic Doppler Velocimetry) Vector segítségével határoztuk meg. A műszer egy igen apró (1 cm^3) térfogatból gyűjt nagy időbeli felbontással adatokat. Háromdimenziós sebességek meghatározására alkalmazható, így legalább három jelzővel rendelkezik (120° -os szöveget zárnak be egymással), ami a műszer fejből kibocsátott jelek frekvenciáját érzékeli. A műszer tengelyébe eső sebességkomponensre érzékenyebb, azonban általános elhelyezés esetén ez nem jelent jelentős hibát. A mérések 8-64 Hz között történnek, aminek köszönhetően akár a turbulens fluktuáció is mérhető. A kiválasztott szelvényben több függvényben és több mélységben végeztük a méréseket. Az átfolyási keresztmetszetet részterületekre osztottuk, majd az ADV-vel mért adatsor feldolgozása után a vízhozam számítható.



3. ábra. A forráskráterben kialakuló áramlási cirkuláció
A piros nyíl a hideg, a kék nyíl a meleg, a szaggatott nyíl a cirkuláció irányát mutatja
Figure 3. Flow circulation in the crater

The red arrow shows the direction of cold, the blue arrow shows the direction of warm water, and the dashed arrow shows the direction of circulation

Az első mérés alkalmával a bukó geometriáját is felmértük, valamint meghatároztuk az átbukási magasságot. A bukóképletből, az (1) egyenlet szerint a korábban meghatározott vízhozammal a bukó vízhozamtényezője kifejezhető:

$$Q = \frac{2}{3} * \mu * B * \sqrt{2 * g} * H^{3/2} \quad (1)$$

ahol, Q – bukógát vízhozama [m^3/s]
 μ – bukógát vízhozamtényezője [-]
 B – bukógát szélessége [m]
 H – átbukási magasság [m]
 g – nehézségi gyorsulás [m/s^2]

A mérést a fürdővel való egyeztetés után megismételtük a bukó 10 cm-es nyitása után is, amivel ellenőriztük a vízhozamtényező értékét. Az így meghatározott tényezővel a későbbiek során az átbukási magasság alapján könnyen számíthatóvá válik az átfolyt vízhozam értéke. Az ezt követő két mérés során, két új szelvény geometriája és a mért sebességek alapján megismételtük a fent részletezett mérést, egy bukó nyitási érték esetén. Az értékek igen jó egyezést mutattak a NYUDUVIZIG által mért adatsorokkal.

A Déli-zsilipnél ADCP-vel (Acoustic Doppler Current Profiler) végeztünk vízhozam méréseket. Az ADV-hez hasonlóan ez a műszer is a Doppler-effektust használja a sebességek meghatározásához. Különbség a kettő között, hogy az ADCP esetében a jelkibocsátás és a jelfogadás ugyanazon „fejen” történik, éppen ezért, amíg átvált a kétféle funkció között, eltelik egy kis idő, így „vakzóna” alakul ki a műszer feje alatt. Mivel a mérés elve szerint a jelek a vízben található (és azzal együtt úszó) részecskékről verődnek vissza, így képes a meder feltérképezésére is, függőleges transzformáció segítségével pedig a vízmélységet is meghatározza. A mozgóhajós mérés során létrejövő sebességeloszlás és medergeometria alapján a vízhozam számítható. A sebességek irányát és nagyságát a műszer beállításától függő sűrűséggel kiosztott celláknaként számítja. A

cellák mérete ezen kívül függ a mozgó hajó sebességétől is. A mérés során kerestünk több alkalmas szelvényt is a Hévíz folyás zsilip alatti szakaszán, olyan időszakban, amikor a felső zsilipen nem volt uszadék leengedés, tehát nem volt átbukás. A kijelölt mérési szelvényekben az ADCP-t erre alkalmas trimaránra tettük, a fedélzeti komputerrel pedig a partról történt a vezérlés. A mérés során a part két oldaláról kötelekkel mozgattuk a mérőberendezést, ügyelve a megfelelő sebességre és az irányra. Olyan esetben, ha a műszer nem tudja megközelíteni a partéleket, a műszer és a parttól vett távolság és az aktuális mélység alapján (derékszögű háromszög feltételezésével), extrapolációval számítható a vízhozam. A számítógép végzi az adatrögzítést, és a mérést irányító WinRiver szoftver segítségével láthatjuk az aktuális mérések eredményét, amely függvényként számítja és kumulálja a vízhozamok eredményét is.

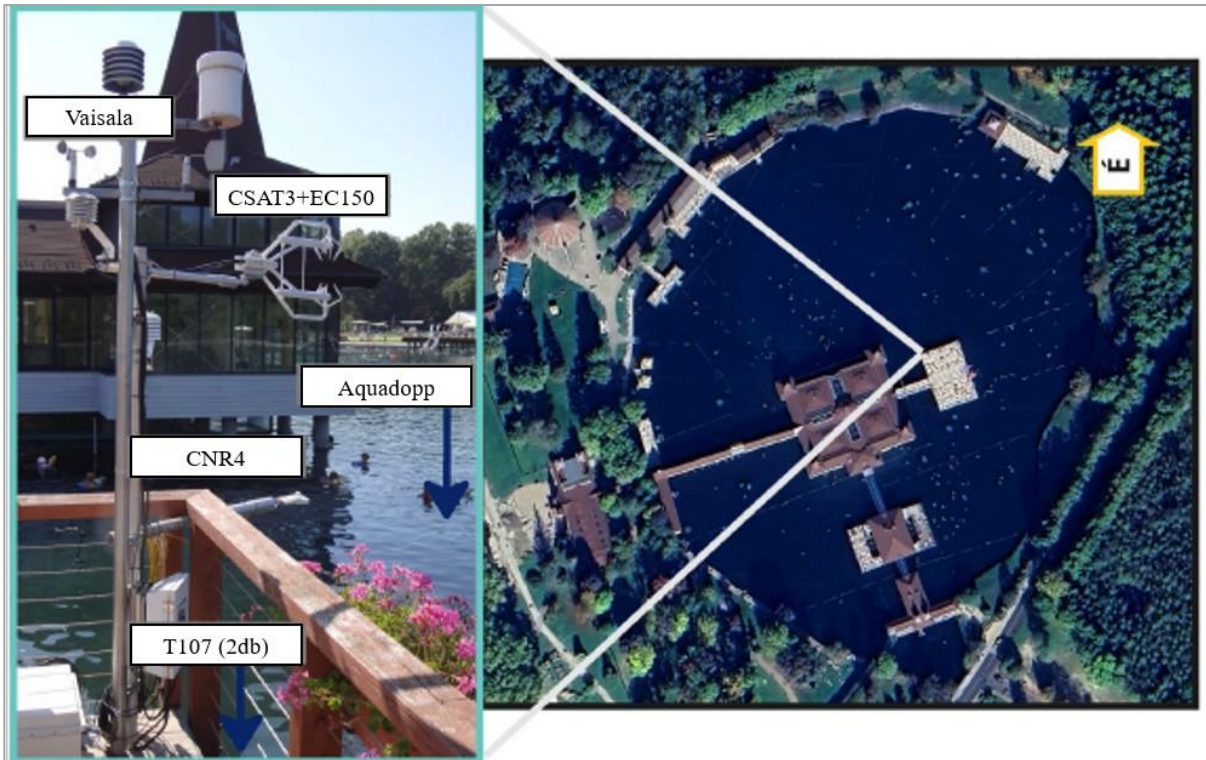
Hidrometeorológia

A Hévízi-tóra hidrometeorológiai mérőállomást telepítettünk (4. ábra) az előző nyár folyamán, ami a következő paramétereket rögzíti: szélesebesség, szélirány, léghőmérséklet és páratartalom, szenzibilis és látens hőáramok, szén-dioxid koncentráció és áram, csapadék, bejövő és kimenő rövidhullámú sugárzás, bejövő és kimenő hosszuhullámú sugárzás. A tóban az alábbi paramétereket mérjük: vízhőmérséklet két mélységben egyazon függvényben, illetve további pontokban egy-egy mélységben, sebességprofil különböző pontokban, vízállás a kifolyók előtt (Torma és társai 2024).

A hidrometeorológiai mérések egyik célja a tó hőháztartásának feltárása. Ennek meteorológiai szempontból a legerősebb meghajtója – beérkező melegvíz után – a beérkező rövidhullámú sugárzás, vagyis a napsugárzás, amely víz mélyebb rétegeibe is lejuthat a víz zavarosságának függvényében. Az energiamérleg többi komponense (turbulens hőáramok és a hosszuhullámú sugárzások) a víz-levegő határfelületen hat. A telepített műszerek között szerepel egy ún. örvény-kovariancia

műszeregyüttes, amely közvetlenül méri egyrészt a turbulens hőfluxusokat, így a látens (evaporatív) hőáramot vagyis a tó párolgást, másrészt pedig a tó szén-dioxid kibocsátását, illetve annak elnyelődését a tóba. Utóbbinak a vízterben kialakuló függőleges árama a tó rétegződésétől is függ, amelyet a feláramlás mellett a vízhőmérséklet függvény menti alakulása határoz meg. A függőleges folyamatok mellett jelentős szerephez jut a vízmozgással zajló horizontális transzport. A tó áramképét alapvetően

a beérkező melegvíz hozama, hőmérséklete és a kifolyási pontok elhelyezkedése, valamint azok átteresztőképessége határozza meg. Az áramképet valamilyen mértékben a szél módosíthatja. A vízmozgás nyomon követésére áramlásmérő műszert telepítünk, amelyet időnként áthelyezünk, hogy több pontban is feltárjuk a vízmozgás nagyságát és irányát. Mindezen méréseket a kifolyóknál történő vízhozammérésekkel kiegészítve, a tó párolgása és vízmérlege becslhetővé válik.



4. ábra. A telepített hidrometeorológia mérőállomás a tófürdő teraszán (Reska 2024). Az örvénykovariancia mérés a Campbell Scientific CSAT3 (háromdimenziós szélmérő) és az EC150 (nyílt utas gázanalizátor) műszerekkel történt. A sugárzásokat Kipp & Zonen gyártmányú CNR4 típusú nettó sugárzásérővel mértük. A vízfelszín alatt 20 és 70 cm-es mélységben mértük Campbell T107 típusú termisztorokkal a vízhőmérsékletet. Ellenőrzéséhez és minőségbiztosításához egy lassú szenzorral (Vaisala HMP45) rögzítettük a légkör hőmérsékletét és páratartalmát. A kráternél elhelyezett Aquadopp áramlásmérő helyét a nyíl jelzi.

Figure 4. The installed hydrometeorological measuring station on the terrace of the lake (Reska 2024). The vortex covariance measurement was performed with the Campbell Scientific CSAT3 (three-dimensional sonic anemometer) and EC150 (open-path gas analyzer) instruments. The radiations were measured with a CNR4 net radiation force manufactured by Kipp & Zonen. The water temperature was measured below the water surface at 20 and 70 cm depths with Campbell T107 thermistors. For checking and quality assurance, we recorded the temperature and humidity of the atmosphere with a slow sensor (Vaisala HMP45). The arrow indicates the Aquadopp flow measurement site at the crater.

Geológia

A Hévízi-tó pontosabb közettani megismerése céljából kutatóbúvár segítségével a forráskráterből (6. fénykép) és a forrásbarlangból is kőzetmintákat vettünk különböző mélységekből, a jellemző kőzetekből. Ezen kőzetek vizsgálata a BME Geotechnika és Mérnökgeológia Tanszékén fog megtörténni.



6. fénykép. Kőzetmintavétel a forrásbarlangban (Fotó: Szieberth Dénes)

Photo 6. Rock sampling in the cave (Photo by Dénes Szieberth)

ÖSSZEFOGLALÁS

Az eredeti monitoring rendszer kialakítása 1989-ben történt, mellyel többek között meteorológiai, hidrológiai, hidrogéológiai jellemzők mérése zajlik, valamint az üzemeltetők egyéb rendszeres méréseket is végeznek. A két leeresztő műtárgy rekonstrukción estek át az elmúlt években. A korábbi időszak tapasztalatai alapján a teljes monitoring rendszer felülvizsgálatára, az elöregedett, tönkrement műszerek cseréjére lenne szükség. A rendszeres mérések kiegészítésére saját fejlesztésű műszereket helyeztünk el a vizsgált terület több pontján. A tó körül elhelyezkedő kutakban folyamatos hőmérsékletregisztrálást végzünk egy adott mélységben, valamint havonta hőmérsékleti rétegződésre irányuló méréseket folytatunk. Vízmintákat veszünk két mélységből, melynek laboros kiértékelését végezzük. A tóban történő hőmérsékleti és vízminőségi vizsgálatokkal kiegészítve keressük a kapcsolatot a kutak és a forrásbarlang között. Az eddigi mérések alapján a kutakban lévő víz nem egyezik meg a forrásbarlangban található hideg vagy meleg komponenssel sem, tehát valószínűsíthető, hogy bonyolult áramlási pályákon keresztül ezek keveréke bukkan fel a forrásbarlangban. Ezen feltételezés mentén zajlik a keveredési arány meghatározása. Szezonális változást sem a hőmérséklet, sem pedig a vízminőség tekintetében nem tapasztaltunk. Mindemellett vizsgálatokat végzünk a forrásból feláramló kén-hidrogén útjának, mennyiségének megismerésére.

Az áramlás szabályozza a tó hőmérsékleti eloszlását, az iszap mozgását és a gyógyhatású oldott komponensek mennyiségét is, így döntő jelentősége van. A tóban lévő áramlási rendszer feltérképezésére a kráter két pontján áramlásmérőket helyeztünk el. Ezen méréseket kiegészítve felszíni áramlásmérésekre került sor, ami egy korábban megvalósított mérés módszertanán alapszik. Drónra szerelt kamerával rögzítettük különböző jelzőanyagok mozgását a tó felszínén, georeferálást követően pedig a felszíni áramlási iránya és nagysága számítható. A búvárok megfigyelése szerint időszakosan változik, hogy a fel- és leáramló víz a kráter mely oldalán emelkedik a felszínre és bukik a mélybe.

A felújított leeresztő műtárgyaknál különböző módszerekkel és több alkalommal ellenőrző vízhozamérésekre került sor. Az Északi-zsilip esetén jó egyezést mutattak az eredmények a NYUDUVIZIG által rögzített adatokkal, a Déli-zsilip esetén szükségesnek ítéltük másik módszerrel is elvégezni a vízhozam meghatározását.

A tó hőháztartásának feltárására, a párolgás és a tó vízmérlegének meghatározására hidrometeorológiai méréseket végeztünk. Ennek céljából hidrometeorológiai állomást és örvénykovariancia-műszeregyüttest telepítettünk a fürdő teraszán. A későbbiekben telepítésre kerülnek vízszintregisztráló műszerek a közeli talajvízkutakba, valamint talajnedvességmérőket helyezünk el a tó körül, amivel a tó és a talajvíz kapcsolatát szeretnénk feltárni.

A forráskráterből és a forrásbarlangból kőzetminta-vételezés történt, amellyel a tónál kialakult geológiai jellemzőkről kaphatunk pontosabb képet.

Bár a tó kutatástörténete egészen az 1700-as évekre visszavezethető, a mai napig igen jelentős vizsgálatok

zajlanak a tó működésével kapcsolatban. Vannak olyan kérdések, amikre korábban még nem kerestek választ, úgymint a tó párolgása, de akad olyan is, amit évtizedeken keresztül vizsgáltak, mégis, az új eredmények igen fontos információt szolgáltathatnak akár a tó megfelelőbb üzemeltetéséhez is.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A közleményben bemutatott kutatás az RRF-2.3.1-21-2022-00008 számú projekt támogatásával, a Széchenyi Terv Plusz program keretében valósult meg. Torma Pétert az MTA Bolyai Kutatási Ösztöndíj (00906/23), Nagy Judit Barbarát pedig a Kulturális és Innovációs Minisztérium, a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alapból finanszírozott Egyetemi Kutatói Ösztöndíj Program (EKÖP-24-3) támogatta.

Ezúton is köszönjük a Hévízi Szent András Reumakórház és Gyógyfürdő munkatársainak és a Nyugat-dunántúli Vízügyi Igazgatóságnak az együttműködésüket és az adat-szolgáltatást.

IRODALOMJEGYZÉK

510/2023. (XI. 20.) Korm. rendelet a közhasználatú fürdők létesítéséről és üzemeltetéséről

Böcker T. (1975a). A nyirádi víztelenítés hatásának vizsgálata, különös tekintettel a Hévízi-tóforrásra. – VITUKI témabeszámoló III. 3.3.3.4.

Böcker T. (1975b). Változások a Dunántúli-középhegység természetes karsztvízháztartásában. VITUKI 1975. évi Tudományos Napok 2. ülészak: A szénbányászattal kapcsolatos karsztvíz kérdések. 11 p.

Böcker T. (1978). Összefoglaló jelentés a hévízi tóval kapcsolatos kutatási tevékenységről. VITUKI 7631/1/4, Budapest, 1978.

Böcker T., Liebe P., Hóriszt Gy. (1986). A Hévízi-tó és a közvetlen környezetének állapota 1985-ben. Földtani Kutatás XXIX. évfolyam (4), pp. 71-83.

Cholnoky J. (1918). A Balaton hidrografiája, A Balaton tudományos tanulmányozásának eredményei. Budapest 1908 I. (2) függelék: pp 1-311.

Czirák J. (1954). A hévízi tó forráskráterének búváros vizsgálata. Hidrológiai Közöny. 1954/5-6.

Czirák J. (1957). Felszíni áramlás vizsgálatok a hévízi tavon. Hidrológiai Közöny. 1957/4.

Csepregi A. (2007). A karsztvíztermelés hatása a Dunántúli-középhegység vízháztartására – In: Alföldi, L.–Kapolyi, L. (szerk.): Bányászati karsztvízszint-süllyesztés a Dunántúli-középhegységben. Requiem a Dunántúli-középhegység karsztvízszint alatti bányászkodásáért. MTA Földrajztudományi Kutatóintézet, Budapest. pp. 77-106.

Fujita I., Muste M., Kruger A. (1998). Large-scale particle image velocimetry for flow analysis in hydraulic engineering applications. Journal of Hydraulic Research 36. pp. 397-414.

<https://doi.org/10.1080/00221689809498626>

Gorzó Gy. (1990). A Hévízi-tó vízminőségének változása. Hidrológiai Közöny 1990. 70. évf. 1. szám, pp 12-16.

- Haszpra O. (1985).* Kémény a hévízi-tóban. Élet és Tudomány 40 (7), pp. 195-196.
- Hencz A. (1891).* A hévízi forrás. Keszthelyi Hírlap, pp 16.
- Horányi Á., Sugár I. (1975).* Vizsgálatok a Hévízi-tó utánpótlódási viszonyairól. Vízgazdálkodási Tudományos Kutató Intézet, Tudományos Szemle 1 (1), pp. 68-77.
- Kádár I. (1972).* Hévízi tó múltja, jelene és jövője. Hévízi tó kutatása TV-s kamerával. Kézirat, Budapest, 5 p.
- Kugler Gy. (1986).* Hévízi-tó vízhozam szabályozása. Diplomaterv. Budapest Műszaki Egyetem, Vízgazdálkodási és Vízépítési Intézet, Vízépítési Tanszék
- Lóczy L. (1908).* Jegyzet Jordán Károly: A Hévízi tó fenekének fölmérése c. cikkéhez. A Balaton tudományos tanulmányozásának eredményei. Budapest 1908 II. (2). p 78.
- Lorberer Á. (1979).* Regionális vízföldtani vizsgálatok a Hévízi-tótágabb környezetében. VITUKI III. C. 5. pp. 1-19.
- Moll K. (1941).* A hévízfürdői tó hőmérsékleti vizsgálata. Hidrológiai Közlöny, 21. évf. 1-6. kötet, pp 1-14.
- Muste, M., Fujita, I., Hauet, A. (2008).* Large-scale particle image velocimetry for measurements in river environments. Water Resources Research 46:2008WR006950, p. 14. <https://doi.org/10.1029/2008WR006950>
- Müller P. (1975).* Újabb adatok a Keszthelyi-hegység és a Hévízi-tó hidrogeológiájához. Beszámoló a Magyar Karszt- és Barlangkutató Társulat tevékenységéről 1975 (2), pp. 153-154.
- Plózer I. (1976a).* Az Amphora Könnyűbúvár Sport Club Vízalatti Barlangkutató Csoportjának 1976. évi jelentése. — Beszámoló a Magyar Karszt- és Barlangkutató Társulat 1976. évi tevékenységéről, Budapest, pp. 260-264.
- Plózer I. (1976b).* A Vízalatti Barlangkutató Szakosztály 1976. évi jelentése. Beszámoló a Magyar Karszt és Barlangkutató Társulat 1976 évi tevékenységéről, Budapest, pp. 58-59.
- Plózer I. (1977).* A Hévízi-tó forrásbarlangjának feltárása. Karszt és Barlang (1-2), pp. 65-66.
- Reska Zs. (2024).* A Hévízi-tó háromdimenziós digitális ikrének fejlesztése. Szakdolgozat. BME Építőmérnöki Kar, Fotogrammetria és Térinformatika Tanszék.
- Sárváry I. (1991).* A Hévízi-tó utánpótlódásának kérdései. Hidrológiai Közlöny 71. évf. 1. szám, pp. 8-20.
- Sas D. (2024).* Áramlásirány-mérő műszer fejlesztése és tesztelése. Szakdolgozat. BME Vegyész- és Biomérnöki Kar, Szervetlen és Analitikai Kémia Tanszék.
- Solt P. (2015).* Az Amphora Búvár Klub kutatásai a Hévízi-tóban (Plózer István kutatóbúvár emlékére). A Magyar Földtani és Geofizikai Intézet Évi Jelentése, 2014-2015, pp. 131-142.
- Starosolszky Ö. (1984).* A Hévízi tó belső áramlásai. Hidrológiai Közlöny, 1984. 5. sz. pp. 323-332.
- Szádeczky-Kardoss E. (1941).* A Keszthelyi-hegység és a Hévíz hidrologiájáról. Hidrológiai Közlöny. 21. évfolyam, 1-6 kötet, pp. 15-28.
- Szántó E. (1993).* Hévíz. Nereus Kiadói Bt.
- Székely E. (2022).* „A Dunántúli-Középhegységi karsztvízszint-emelkedés okozta jelenségek állapotrögzítése, a várható emelkedés modellezése” projekt keretében készült Hévíz-Keszthelyi-Hegység lokális modell ismertetése a Smaragd-GSH Kft. jelentése alapján. Nyugat vizei. A Nyugat-Dunántúli Vízügyi Igazgatóság hivatalos lapja, 4. évf. 1. szám pp. 4-8.
- Torma P., Reska Zs., Nagy J.B., Hajnal G., Rehák A. (2024).* Analyzing the turbulent air-water fluxes and the energy balance of a geothermal lake. IAGLR 67. éves Konferenciája, Windsor, Kanada, 2024. május 20-24.
- Tóth Gy. (2017).* A Hévízi-tó vízgazdálkodási helyzete előadás. Balatoni Részvízgyűjtő Vízgazdálkodási Tanács ülése
- Ugray K. (1953).* Kiemelkedő búvárteljesítmények. Búvárismeretek, Közlekedési Kiadó, Budapest, pp. 144.
- Weszelszky Gy. (1908).* A Hévíz tó kémiai vizsgálatának előzetes eredményei. A Balaton tudományos tanulmányozásának eredményei. Budapest 1908 II. (2). pp. 80-82.
- Weszelszky Gy. (1911).* A keszthelyi Hévízi tó termékeinek kémiai vizsgálata. A Balaton tudományos tanulmányozásának eredményei. Budapest 1911 I. (6) függelék. pp. 1-20.
- Windisch R. (1911).* Jelentés a Hévízi vízvizsgálatokról. A Balaton tudományos tanulmányozásának eredményei. Budapest 1911 I. (6) függelék. pp. 21-24.
- https://termalonline.hu/termal-hirek/kiderult-milyen-eve-volt-a-hevizi-tofurdonek#google_vignette (Utolsó leltetés: 2024.09.13.)

ASZERZŐK



NAGY JUDIT BARBARA építőmérnöki BSc oklevelét 2021-ben, majd okleveles infrastruktúra-építőmérnöki MSc diplomáját 2023-ban szerezte a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetemen. Jelenleg az egyetem Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszékének doktorandusza. Kutatási tevékenységét alapképzéses hallgatóként kezdte, a Molnár János-barlanghoz kapcsolódó vizsgálatokkal. Doktori kutatásának témája a Hévízi-tó és térségének hidrogeológiai vizsgálata. A Víztudományi és Vízbiztonsági Nemzeti Laboratórium kutatási asszisztense. A Magyar Hidrológiai Társaságnak 2022 óta tagja.



HAJNAL GÉZA 1993-ban a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetemen (BME) építőmérnöki diplomát szerzett, 1994-ben ugyanott okleveles mérnök-tanári képesítést kapott. 2002-ben PhD fokozatot szerzett. 2008-tól a Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszék docense, 2017 és 2020 között tanszékvezető volt. Fő kutatási területe a hidrogeológia és a vízmérleg-számítás. Kétszer nyerte el a Bolyai János kutatói ösztöndíjat (2004-2006, 2008-2010) hidrogeológiai tárgykörű kutatásaival. 2020-ban a Pécsi Tudományegyetemen megvédte irodalomtudományi disszertációját.



SZIEBERTH DÉNES 1997-ben szerzett vegyészmérnöki diplomát, 2000-ben PhD fokozatot. Tanulmányainak befejezése óta a BME Szervetlen és Analitikai Kémia tanszékén dolgozik, 2011 óta docensként. Eredeti szakterülete a kémiai reakciók mechanizmusának modellezése. Ösztöndíjasként kutatott számos egyetemen (Kaiserslautern, Leuven, Antwerpen, Edinburgh, Sendai, Torino). 2014 óta érdeklődése a karsztvizek felé fordult, a vízanalítika mellett a víz alatti barlangokban végzett mérések és mintavételek, valamint az egyedi műszerek tervezése jelentik fő kutatási irányát.



TORMA PÉTER 2011-ben szerzett építőmérnök MSc oklevelet, majd 2016-ban PhD fokozatot. A Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem (BME) Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszékén dolgozik 2011 óta, 2019-től, mint egyetemi docens. Fulbright ösztöndíjasként a UW-Madison (USA) vendégkutatója volt a 2017/18-as tanévben. Kutatási területe a fizikai limnológia, a hidrometeorológia, különös tekintettel a víz-levegő határfelület turbulens cserefolyamatainak örvény kovariancia elvű mérésére, a tavak hőháztartása, valamint a numerikus hidrodinamikai modellezésére. A Magyar Hidrológiai Társaságnak 2023 óta tagja.



REHÁK ANDRÁS MIKLÓS 2009-ben a Debreceni Egyetemen környezettudományi (geográfus szakirány) diplomát szerzett. 2009-2012 között a Smaragd GSH KFT környezetvédelmi és vízgazdálkodási cégnél, majd 2012 májusa óta a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetemen a Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszéken tanszéki mérnök. 2023-ban Sztoczek József Emlékéremben részesült a laboratóriumban és terepi méréseken végzett munkájáért. Az ELTE Földtudományi Doktori Iskolájában 2018-ban abszolutóriumot szerzett a Molnár János barlanggal foglalkozó témájával.



RESKA ZSOMBOR JÁNOS 2023-ban írta első Tudományos Diákköri Konferenciára dolgozatát hidrometeorológia témában a Hévízi-tóról, mellyel 3. helyezést ért el és jelölte a kar az Országos Tudományos Diákköri konferenciára. 2024-ben a Dulovics Junior Szimpóziumon elnyerte a leginnovatívabb előadás díját és közönségdíjas is lett. 2024-ben szerzett építőmérnök BSc diplomát a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetemen. 2024 június óta a Zielinski Szilárd Építőmérnöki Szakkollégium Vízépítő tagozatának Tagozatvezetője. Jelenleg Infrastruktúra-építőmérnök mesterszakos hallgató víz- és vízi környezetmérnöki szakirányon. A Magyar Hidrológiai Társaságnak 2024 óta tagja.



A tükörsima felszíni – véderdő hatása a Hévízi-tavon (Fotó Nagy Judit Barbara)
The smooth-as-glass surface – The effect of shelter wood on Lake Hévíz (Photo by Barbara Judit Nagy)

A Fertő tó párolgásának vizsgálata párolgászámítási módszerek összehasonlításával

Török Sebestyén Dániel¹, Torma Péter^{1,2}

¹ Víz tudományi és Vízbiztonsági Nemzeti Laboratórium, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Építőmérnöki Kar, Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszék, Budapest (e-mail: toroks@edu.bme.hu)

² HUN-REN-SZTE Fotoakusztikus Környezetifolyamat-megfigyelési Kutatócsoport, Szeged (e-mail: torma.peter@emk.bme.hu)

DOI: 10.59258/hk.18333



Kivonat

Az éghajlatváltozás következtében a Fertő tó vízmérlegét alakító tényezők is megváltoznak, amelyek összegzett hatására csökkenés figyelhető meg a tó vízkészletében. A vízmérleget számos bizonytalanság terheli, és ezáltal a jövőbeli előrejelzéseket is. Ezek közül a legjelentősebb az evapotranszpirációnak, mint fő veszteségtagnak a pontos meghatározásából ered, így kutatásunk célja az ezt terhelő bizonytalanságok vizsgálata volt. A tó párolgása két részből tevődik össze, egyrészt nyílt vízfelületének párolgásából, másrészt nádasállományának párolgotatásából, melyet a meteorológiai folyamatok mellett a vegetációs folyamatok is alakítják, és így bár igen összetett folyamatról beszélünk, a gyakorlatban azt mégis nagyon egyszerű és pontatlan eljárással, az empirikus Meyer-képlet alkalmazásával számítják. Kutatásunkban a Meyer-féle párolgászámítási eljárást hasonlítottuk össze egy energiamérleg elvű eljárással 11 éves időszakra (2012–2022), amely során azt kaptuk, hogy a Meyer-módszer jelentősen túlbecsüli a párolgásokat, illetve annak klimatikus előrejelző képessége is bizonytalan, így használata a Fertő tó esetében megkérdőjelezhető. A tó vízmérlegét tekintve a Meyer-képletnél igen jelentős zárási hiba adódott, átlagosan -243 mm/év, míg az energiamérleg alapú módszernél jóval kisebb, -56 mm/év jött ki, tehát abban az esetben, mikor a párolgások fizikai alapon kerültek meghatározásra, számottevően jobb vízmérleg zárást kaptunk. Ezekből adódóan arra jutottunk, hogy a Fertő tó párolgásának meghatározására energiamérleg elven alapuló számításokat kell alkalmazni, mert azok nemcsak pontosabbak, hanem mivel fizikai alapokon nyugszanak, ezért mérések révén lehetőség van azok közvetett igazolására is.

Kulcsszavak

Fertő tó, párolgászámítás, nyílt vízfelület párolgása, nádas párolgotatása, éghajlatváltozás.

Analysing the evaporation of Lake Fertő and comparing evaporation calculation methods in the context of climate change

Abstract

As a result of climate change, the factors influencing the water balance of Lake Fertő are also changing, leading to a decrease in the lake's water resources. Many uncertainties burden the water balance and, thus, future forecasts. The most significant of them arises from the inaccurate determination of evapotranspiration as the primary loss component. Therefore, our research aimed to analyze the uncertainties associated with evaporation. The lake's evaporation consists of two components: evaporation from the open water surface and transpiration from the reed zones, shaped not only by meteorological factors but also by the physiological processes of the vegetation. We are faced with a complex process, in practice, it is still calculated using a very simple procedure, the empirical Meyer formula. In our research, we compared Meyer's evaporation calculation method with an energy balance-based one over an 11-year-long period (2012–2022). We found that the Meyer method significantly overestimates evaporation, and its climatic forecasting ability is also uncertain, making its use questionable for Lake Fertő. The Meyer formula showed a significant closure error regarding the lake's water balance, averaging -243 mm/year. In contrast, the energy balance-based method resulted in a much smaller one of -56 mm/year. This means that we achieved a significantly better water balance closure when evaporation was determined based on physical principles. As a result, we concluded that for determining the evaporation of Lake Fertő, energy balance-based calculations should be used, as they are more accurate and grounded in physical principles, allowing for verification through measurements.

Keywords

Lake Fertő, calculating evaporation, open water evaporation, evaporation of reed, climate change.

BEVEZETÉS

A Fertő tónál 2022-ben kialakult rekord alacsony vízállás újonnan felhívta a figyelmet a tó vízkészletének folyamatos csökkenésére, rámutatva egyúttal az esetleges jövőbeli vízpótlás kérdésére is. Ennek megválaszolásához elengedhetetlen a tó vízmérlegének pontos ismerete, amelyet jelenleg azonban több bizonytalanság terheli. Egyrészt a tó vízgyűjtő-területének egy részéről méretlen a lefolyás, és hasonló mondható el a felszín alatti hozzáfolyásról és elszívárgásról, amelyet a különböző vízmérleg-számításokban el is hanyagolnak (Soja és társai 2013, Fertő Konzorcium 2019).

Másrésztől számottevő bizonytalanságot okoz a párolgásnak a meghatározása, ami a vízmérleg veszteségének szinte teljes egészéért felelős. Ezt jelenleg a hazai gyakorlat egy egyszerű és pontatlan eljárással, a Meyer-féle összefüggés alkalmazásával határozza meg hazai nagy tavaink esetén (KDTVIZIG 2023, 2024). Míg előbbieket meghatározásához mérések szükségesek, addig a párolgásnál különböző párolgászámítási eljárások állnak rendelkezésre, ezáltal lehetőséget adva annak fizikailag megalapozottabb módon történő számítására, ha rutin meteorológiai és vízrajzi adatok rendelkezésre állnak a tó környezetében.

A Fertő tó párolgása két részből tevődik össze, egyrészt nyílt vízfelületének párolgásából, másrészt nádasállományának párolgotatásából, amelyet a meteorológiai meghajtok mellett a vegetációs folyamatok is alakítanak, így számítása jóval összetettebb és több bizonytalanságot tartalmaz (Kovács és Szilágyi 2009a, 2009b). Ennek ellenére mégis kevesebb figyelmet fordítanak rá, s ezáltal az ilyen irányú mérések is csak korlátozottan állnak rendelkezésre. A 2010-es évek elején történt pár szezonális mérési kampány, amelyek során a nádas evapotranszpirációját közvetlenül mérték (Kiss és Józsa 2014, Kiss és Torma 2014). Erre vonatkozóan a Kis-Balatonnál történtek még mérések, ahol Anda és társai (2014, 2017a, 2017b) többéves mérési sorozat keretén belül vizsgálták a nádas általi párolgotatás folyamatát, illetve annak számíthatóságát. Eredményeikre a Fertő tó esetében is lehet támaszkodni, ahogy ezt később bemutatjuk.

Kutatásunk célja a Fertő tó párolgását terhelő bizonytalanságok feltárása és csökkentése, különböző párolgászámítási módszerek összehasonlítása révén. Vizsgálataink során a teljes párolgás és párolgotatás számítására jelenleg alkalmazott empirikus Meyer-képletet egy összetettebb, fizikai alapokon nyugvó energiamérleg elvű eljárással hasonlítjuk össze, ahol a nyíltvíz és nádas párolgotatását több módszerrel is meghatározzuk. Ezek közül előbbire három számítási eljárást néztünk meg, míg utóbbinál Anda és társai (2014) által alkalmazott módszertant alkalmazzuk. A párolgást terhelő bizonytalanságok csökkentésével lehetővé válna a tó vízmérlegének pontosabb becslése. Ez lehetőséget adna pontosabb hosszútávú hidrológiai előrejelzésekre, amely lehetővé tenné a tó esetleges vízpótlásának mennyiségi meghatározását, illetve vízjátékának pontosabb jövőbeli leírását.

ANYAG ÉS MÓDSZERTAN

A Fertő tó egy sekély sztyepptó, amely Magyarország és Ausztria határán helyezkedik el. Átlagos mélysége 1,2 m, míg területe 320 km²-re tehető, melynek körülbelül felét (180 km²-t) borítja nádas (Soja és társai 2013). Teljes területének megközelítőleg 3/4-ed része osztrák, 1/4-ed része pedig magyar részen helyezkedik el. Ez utóbbinak hozzávetőleg 80%-át fedi nádas, míg előbbi esetében a nyílt vízfelület, ami jobban dominál. A tó vízgyűjtőterülete 1120 km², főbb befolyói osztrák részről a Wulka-patak, magyar oldalról pedig a Rákos-patak. A tóból történő lefolyás szabályozott módon, a Fertőszéli zsilipen keresztül történik, míg területén 12 helyen van kihelyezve csapadékmérő állomás, melyek adatait felhasználva nagy pontossággal számítható a tóra hulló csapadékösszeg. Emellett, a térségen számos helyen történnek meteorológiai mérések is.

A párolgászámítási vizsgálatokhoz a vízrajzi adatokat – tóhoz való hozzáfolyás (Q_{be}), leeresztés (Q_{ki}), csapadék (CS), tó vízszintváltozása (ΔH), vízhőmérséklet (T_w) – az Észak-dunántúli Vízügyi Igazgatóság szolgáltatta, míg a meteorológiai adatok – szélesebbesség (U), léghőmérséklet (T_a), relatív nedvességtartalom (RH), bejövő rövidhullámú sugárzás (SW_{in}) – a HungaroMet fertőrákosi mérőállomásról származnak. Minkét esetben napi értékek álltak rendelkezésre, így a párolgások is ennek megfelelően napi léptéken lettek meghatározva, amelyekből aztán később a havi és éves összegeket számítottuk. A meteorológiai

adatok a 2004 - 2022 közötti időszakra voltak elérhetőek, míg a vízhőmérsékletek a 2012 - 2022 intervallumra, így ennek megfelelően a párolgásokat is ez utóbbi időszakra tudtuk számítani. Két évre vonatkozóan, 2013-ra és 2017-re, örvény-kovariancia (EC) mérések eredményei – szenzibilis (HT_s) és látens hőáramok (L_vE) – is rendelkezésünkre álltak a nyári – kora őszi időszakokra. 2013-ban mind a nyílt vízfelületen, mind pedig a nádas felett történtek EC mérések, míg 2017-ben csak utóbbinál. Emellett, ezekben az időszakokban nagy időbeli felbontással – órás lépték alatt – vízhőmérséklet mérések is történtek. Ezeket felhasználva, a teljes tó párolgást – nyílt vízfelület és nádas együttes párolgása – három eltérő elven alapuló eljárással határoztuk meg: 1) vízmérlegből való számítással; 2) empirikus úton, Meyer-képlettel; 3) energiamérleg alapján.

Párolgás vízmérlegből való számítása

A vízügyi gyakorlatban egyik leginkább elterjedt módszer az állóvizek párolgásának meghatározására azok vízmérlegéből való számítása. Ilyen esetekben a párolgást a maradéktaggal tesszük egyenlővé, tehát a vízkészletet csökkentő és növelő tagok összegzése után, ami a mérleg-egyenlet zárásához még szükséges, azt mind a párolgásra terheljük. A számítás jellegéből adódóan, ez már magában foglalja a nyíltvíznek és a nádasnak is a párolgását, tehát rögtön a teljes tó párolgást adja eredményül. A Fertő tó vízmérleg egyenleténél egy olyan további egyszerűsítéssel élünk – követve a jelenlegi operatív eljárást –, hogy a felszín alatti hozzáfolyás, illetve elszívárgás hatását elhanyagoljuk (Soja és társai 2013). Ennek fő oka, hogy mérések hiányában, ennek hatása nem állapítható meg kellő pontossággal. Ezek alapján, a Fertő tó esetében használt vízmérleg egyenlet az alábbiakra egyszerűsödik:

$$CS - P + Q_{be} - Q_{ki} - \Delta H = M \quad (1)$$

ahol, P (mm) a teljes tó párolgást, M (mm) pedig a maradéktagot jelöli. Az egyenletben mindegyik vízkészlet-mennyiség tömlemléterben van kifejezve. A tagok közül a csapadék és leeresztés nagy pontossággal mérhető, ellenben a hozzáfolyás számításánál egy jelentős bizonytalanság van. Míg a tó nagyobb befolyóinak (Wulka- és Rákospatak) hozamai mérve vannak, addig a kisebb vízfolyások sok esetben méretlenek, a vízgyűjtő egy részéről érkező hozzáfolyással egyetemben, így azok értékét közelítéssel szokták felvenni. Ennek jelenleg alkalmazott módja, hogy a Rákos-patak hozamának kétszeresét veszik figyelembe a teljes magyarországi felszíni hozzáfolyás összegének meghatározására (Török és Torma 2024a). A tó vízkészletének megváltozása, a jelenlegi vízügyi gyakorlatban, a hónap első és utolsó napján mért vízállások különbségéből kerül kiszámításra, míg a maradéktag értékét zérusnak szokták feltételezni, hogy az egyenletet átrendezve kifejezhetővé váljon a párolgás.

Párolgás Meyer-képlettel való meghatározása

A Meyer-képlet egy empirikus Dalton-típusú összefüggés, amely nyílt vízfelületek havi léptéken való párolgásának számítását teszi lehetővé (Meyer 1942). Alkalmazásához elegendő rutin meteorológiai adatok ismerete, így a vízügyi gyakorlatban igen elterjedt módszernek számít a tavak, köztük a Fertő tó párolgásának a meghatározására. Miután az összefüggés nyílt vízfelületek párolgását adja

meg, az ÉDUVIZIG egy havonta változó nádkonstans bevezetésével (*I. táblázat*), amellyel a nyíltvízi eredményeket szorozzák fel, becsüli a nádas általi párologtatást. Ezáltal a teljes tóparólgás a nyíltvíz párologtatásának és nádas általi párologtatásnak a területtel súlyozott átlagából számítható. A vízügyi gyakorlatban a víz-nádas területére a 0,49-0,51 arányt alkalmazzák, így a továbbiakban mi is ezt vettük alapul. A párologtatás számításánál az ÉDUVIZIG a Meyer-képlet napi léptékre átszámított változatát használja, mely nyíltvíz és nádas esetében az alábbi módon alakul:

1. táblázat. Az ÉDUVIZIG által használt havi nádkonstans értékek a Fertő tóra (Eitzinger és társai 2009)

Table 1. Monthly reed coefficients for Lake Fertő used by ÉDUVIZIG

Hónap	XI - III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X
K_n	1,0	1,02	1,11	1,20	1,26	1,21	1,13	1,11

Párologtatás energiamérleg alapú eljárásokkal való számítása

Az energiamérleg alapú eljárások fizikai alapon számítják a párologtatást, a hatérfelületeken zajló energiacsere folyamatok révén. Ebből kifolyólag pontosabbnak számítanak az empirikus módszerekhez képest, ellenben alkalmazásuk gyakran nehezebb a szükséges adatok mennyisége miatt, melyek nem minden esetben állnak rendelkezésre. Vizsgálataink során négy energiamérleg alapú eljárást alkalmaztunk a Fertő tó párologtatásának meghatározására, melyből három a nyíltvíz, egy pedig a nádas párologtatásának a számítására vonatkozott. Ezek közül az egyik leggyakrabban használt eljárás a Penman-Monteith egyenlet, mely nyíltvíz párologtatásának számítása esetén az alábbi formában írható fel (Jensen és társai 2005, Lükő és társai 2022):

$$P_{PM} = \frac{\Delta \cdot (R_n + \Delta S + G) + \rho_a \cdot c_p \cdot \left(\frac{E_0 - e}{r_a} \right)}{\Delta + \gamma} \cdot \frac{1}{\lambda \cdot \rho_{TW}} \quad (4)$$

ahol, P_{PM} (mm nap⁻¹) a nyíltvíz napi párologtatása a Penman-Monteith egyenlet alapján, Δ (kPa °C⁻¹) a telítési vízgőznyomás függvény adott hőmérsékletre tartozó meredeksége, R_n (J m⁻² nap⁻¹) a nettó sugárzás, ΔS (J m⁻² nap⁻¹) a víztestben tárolt energia, G (J m⁻² nap⁻¹) a mederhőáram, ρ_a (kg m⁻³) a levegő sűrűsége, c_p (J kg⁻¹ °C⁻¹) a levegő fajhője, r_a (s m⁻¹) az aerodinamikai ellenállás, γ (kPa °C⁻¹) a pszichrometriai konstans, λ (J kg⁻¹) a látens párologtatóhő, ρ_{TW} (kg m⁻³) pedig a víz sűrűsége.

A következő, szintén gyakran használt párologtatási számítás módszer nyílt vízfelületekre a Priestley-Taylor egyenlet, mely a Penman-Monteith-hoz képest annyiban tér el, hogy a légkört leíró változók egy részét, egy konstans együtthatóval közelíti. Ennek megfelelően, az egyenlet a következőképpen írható fel (Metzger és társai 2018):

$$P_{PT} = \alpha \cdot \frac{\Delta \cdot (R_n + \Delta S + G)}{\Delta + \gamma} \cdot \frac{1}{\lambda \cdot \rho_{TW}} \quad (5)$$

ahol P_{PT} (mm nap⁻¹) a nyíltvíz napi párologtatása a Priestley-Taylor egyenlet alapján, α (-) pedig a Priestley-Taylor együttható, mely értékére 1,26 lett felvéve szakirodalmi ajánlások alapján (Nikolaou és társai 2023).

A harmadik energiamérleg alapú módszer, melyet a nyíltvíz párologtatásának számítására alkalmaztunk az egydimenziós General Ocean Turbulence Model (GOTM) volt,

$$P_{viz} = (E_0 - e) \cdot (0,294 + 0,056 \cdot U) \cdot n \quad (2)$$

$$P_{nád} = (E_0 - e) \cdot (0,294 + 0,056 \cdot U) \cdot n \cdot K_n \quad (3)$$

ahol P_{viz} és $P_{nád}$ (mm nap⁻¹) a nyíltvíz és nádas párologtatás, E_0 (hPa) a telítési vízgőznyomást, e (hPa) az aktuális vízgőznyomást, U (m s⁻¹) a szélesebbséget, n (-) a napok számát a hónapban, K_n (-) pedig a nádkonstans jelöli. Megjegyezzük, hogy az eredeti Meyer-képletben a telítési vízgőznyomás a vízhőmérséklet, míg az aktuális vízgőznyomás a léghőmérséklet függvénye, így számításukkor ezeket használtuk.

mely egy fizikai alapon működő hőmérsékleti és keveredési modell. A GOTM k-ε turbulencia modellt használ a vizgált vízszlop függőleg menti hőmérsékletének és keveredési mutatóinak a meghatározására, továbbá számítja a levegő-víz határfelületen zajló hőcsere folyamatokat is, beleértve a látens hőáramot, vagyis a tóparólgást (Istvánovics és társai 2022). A modell rutin meteorológiai adatokat használ, amiket a HungaroMet fertőrákosi mérőállomásának idősorai szolgáltatottak, míg a modellparaméterek tekintetében a Balatonnál használt értékek lettek átvéve (Török és Torma 2024b), melyek a Fertő tó esetében is jól használhatónak bizonyultak. A modell a hosszú idejű mért vízhőmérséklet idősorok mellett a 2017-es közvetlen EC-mérések szolgáltatotta látens hőáramokra lett igazolva, míg megbízhatóságát a Nash-Sutcliffe hatékonysági mutató (NS) és az átlagos négyzetes hiba gyöke (RMSE) alapján értékeltük.

A nádas általi párologtatás, mely jelen esetben magába foglalja mind a nádasnak, mind pedig az alatta lévő vízfelületnek a párologtatását, egy referenciapárologtatás és egy nádkonstans szorzataként került kiszámításra (Anda és társai 2014):

$$ET_0 \cdot K_c = ET_m \quad (6)$$

ahol, ET_0 a referenciapárologtatás (mm nap⁻¹), K_c (-) a nádkonstans, ET_m (mm nap⁻¹) pedig a nádas evapotranszpirációját jelöli. A referenciapárologtatás meghatározása a FAO 56 Penman-Monteith egyenlet alapján történt, mely az alábbi formában írható fel (Foken 2006, Török és Torma 2024a):

$$ET_0 = \frac{0,408 \cdot (R_n + \Delta S + G) + \gamma \cdot \left(\frac{900}{T_a + 273,15} \right) \cdot U \cdot (E_0 - e)}{\Delta + \gamma \cdot \Delta \cdot (1 + 0,34 \cdot U)} \quad (7)$$

ahol, T_a (K) a napi átlagos léghőmérséklet jelöli.

A K_c nádkonstans a (6) egyenletet átrendezve kifejezhető a nádas evapotranszpirációjának és a referenciapárologtatásnak a hányadosaként. Előbbi esetben rendelkezésükre álltak a 2013-as örvény-kovariancia mérések a május-június hónapokra (Kiss és Torma 2014), mely során közvetlenül a nádas felett történtek az észlelések, így tehát az ET_m a mért látens hőáramokból meghatározható vált, míg az ET_0 a FAO 56-os egyenletből volt számítható. Ilyen módon az említett két hónapra napi felbontással meg tudtuk határozni nádkonstansokat, melyeket aztán összevetettünk Anda és

társainak (2014) eredményeivel, melyek többéves mérési sorozat eredményeként álltak elő a Kis-Balatonra. Ahogy később részletesen ismertetjük (4. ábra), azt tapasztaltuk,

hogyan az általunk és általuk számított értékek jól egyeznek, így a továbbiakban az általuk levezetett havi értékeket használtuk a teljes időszakra (2. táblázat).

2. táblázat. Anda Angéla és társai (2014) által számított havi nádkonstans értékek normál időjárási viszonyok esetén
Table 2. Monthly reed coefficients calculated by Anda Angéla et al. (2014) in normal weather conditions

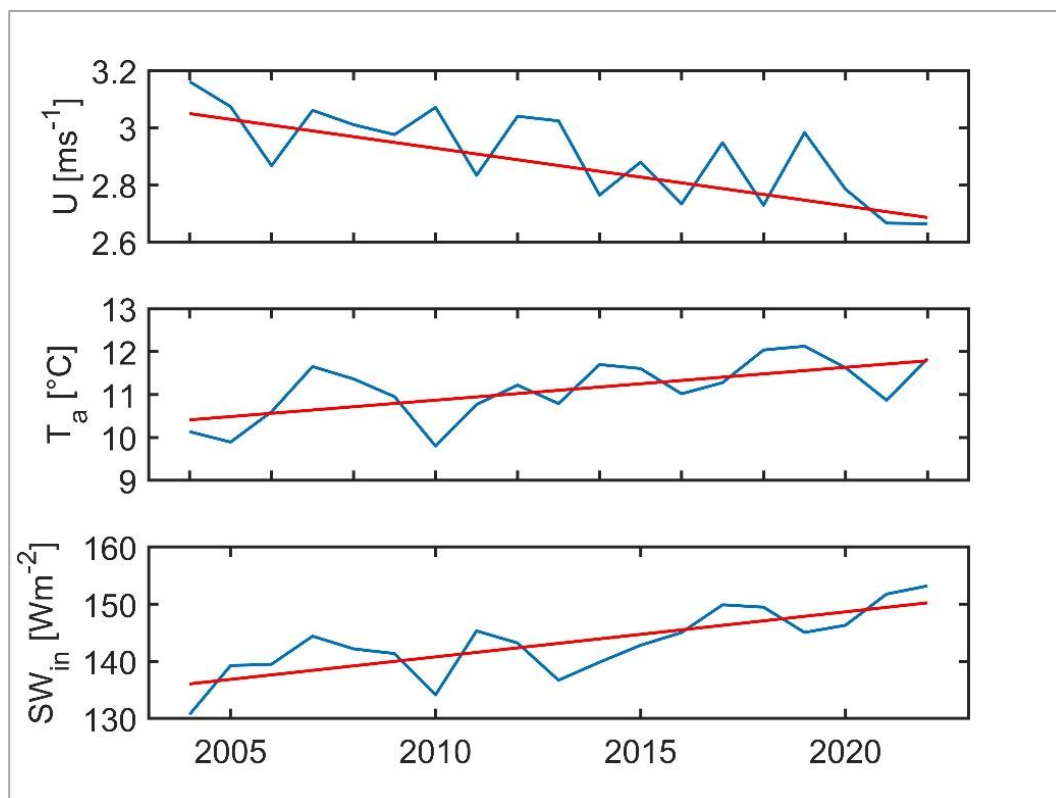
Hónap	IX - III	IV	V	VI	VII	VIII
K_c	0,77	1,03	1,23	1,40	1,51	0,99

EREDMÉNYEK ÉS DISZKUSSZIÓ

Fertő tó éghajlatának megváltozása

Az elmúlt közel két évtizedet nézve, jelentős változás figyelhető meg a párolgást befolyásoló meteorológiai változóknál. Az éghajlatváltozás következtében a szélsőségség (U) esetében csökkenő tendencia látható ($-0,19 \text{ m s}^{-1}/10 \text{ év}$), míg a léghőmérsékletnél ($0,72 \text{ °C}/10 \text{ év}$) és beérkező rövidhullámú sugárzásnál ($7,47 \text{ W m}^{-2}/10 \text{ év}$)

számottevő növekedés érzékelhető (1. ábra). Ezek ellentétesen hatnak a párolgásra, mivel míg az átlagszél csökkenő trendje a tó párolgás mértékének csökkenését kellene eredményezze, addig a léghőmérséklet és sugárzás növekedése éppen, hogy annak emelkedését. Ezáltal, csak a meteorológiai meghajtók alapján nem lehet egyértelmű következtetéseket levonni a Fertő tó párolgásának alakulásáról, illetve annak időben történő megváltozásáról.

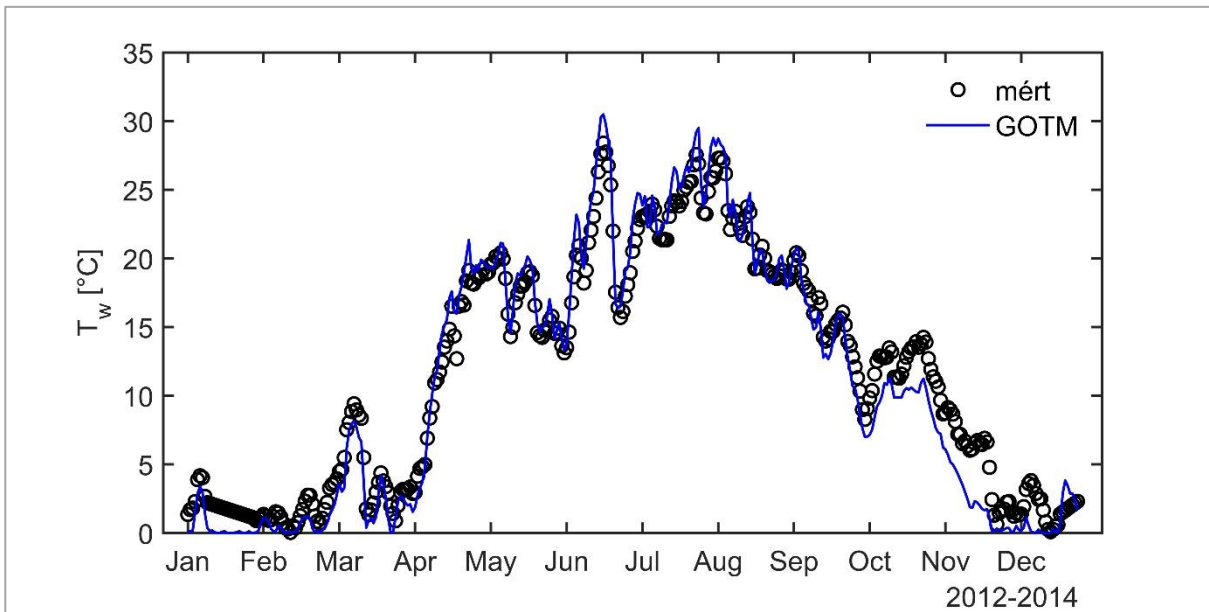


1. ábra. Szél (U), léghőmérséklet (T_a) és beérkező rövidhullámú sugárzás (SW_{in}) éves átlagának megváltozása 2004-2022 között
Figure 1. Changes in yearly means of wind (U), air temperature (T_a), and incoming shortwave radiation (SW_{in}) between 2004-2022

Fertő tó párolgása

A nyíltvíz párolgásának számítására használt egydimenziós GOTM modell a mért vízhőmérsékletekre lett igazolva, melyek 2012-2022 között álltak rendelkezésre. Az eredményeket összevetve a mérésekkel, az NS és RMSE mutatókra $0,93$ (-) és $2,02 \text{ °C}$ adódott. Szezonálisan nézve, a modell a nyári hónapokban kis mértékben felülbecsüli a mért vízhőmérsékleteket, míg az őszi végi - téli időszakban – mikor jelentősen lehűl az idő – alul.

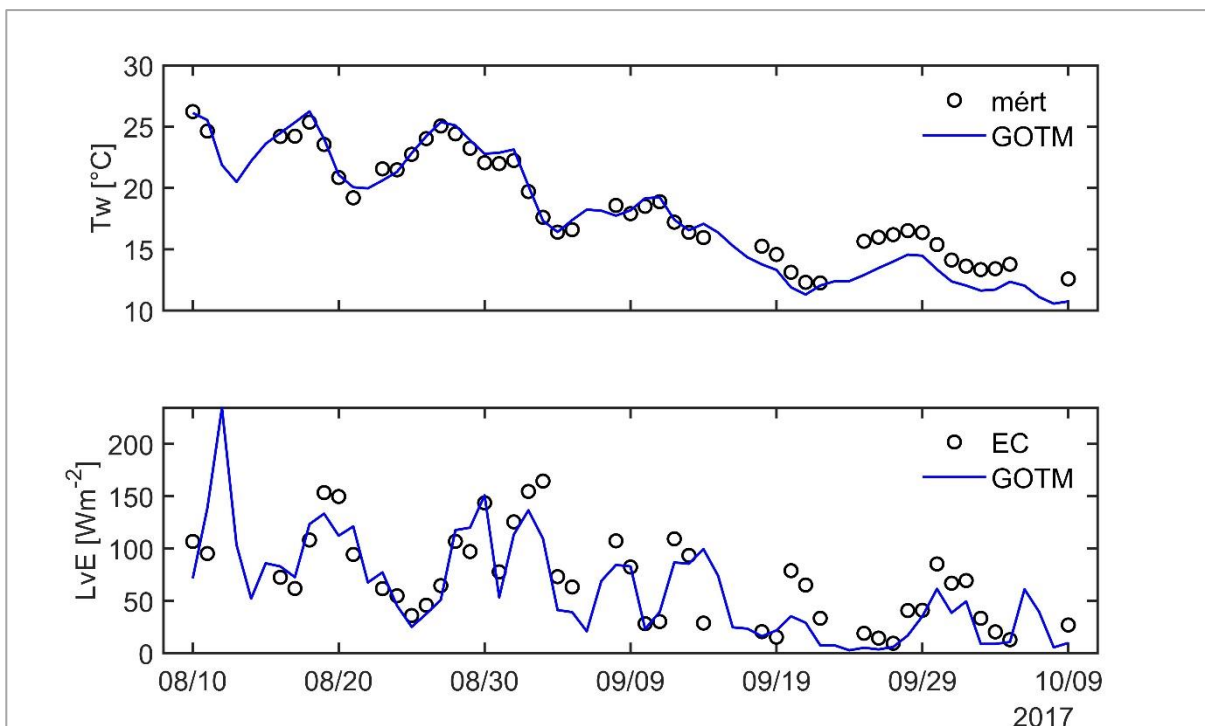
Mindazonáltal összességében jól szimulálja azok időbeli alakulását (2. ábra). Az eltérések egyrésztől adódhatnak abból, hogy a modellben konstans fényelnyelési együtthatót alkalmazunk, miközben annak értéke akár napon belül is nagyban meg tud változni, másrészt pedig abból, hogy míg a GOTM órási időbeli felbontással futott, és úgy kerültek meghatározásra a napi átlagos vízhőmérsékletek, addig a tónál történt napi észlelések nem feltétlenül reprezentálják a tényleges napon belüli átlagos értékeket.



2. ábra. Fertő tó mért és modellezett napi vízhőmérséklet-idősorai a 2013-as évre
 Figure 2. Measured and modeled daily water temperature time series of Lake Fertő for the year 2013

A modelleredményeket továbbá összehasonlítottuk a nyíltvízen történt örvény-kovariancia mérésekkel is (3. ábra), ahol a látens hőáramok mellett nagy időbeli felbontással – órás lépték alatt – a vízhőmérsékletek is rögzítésre kerültek. Ezt az összehasonlítást kizárólag a 2017-es évre tudtuk elvégezni, mivel 2013-ban a nyíltvízi mérések lábnyoma döntő többségben a nádasra esett. A vízhőmérsékletek tekintetében hasonló trend adódott, mint a napi méréseknél, tehát a modell nyáron kis mértékben felülbecsülte a mért értékeket, míg az idő lehűlésével elkezdte

őket alulbecsülni, ellenben ennek mértéke csökkent, az NS és RMSE mutatókra 0,92 (-) és 1,19 °C adódott. Megállapítható tehát, hogy a mért és modellezett értékek közötti eltérés egy része valóban magyarázható az időbeli felbontások különbözőségével, miután a napi léptékről áttértünk az órára, az RMSE ~0,83 °C-kal javult. A látens hőáramok esetében szintén jó egyezést adott a modell a mérésekkel – az NS-re 0,67 (-), míg az RMSE-re 24,26 W m⁻² adódott –, így az alkalmazhatónak bizonyult a tóparólgások számítására.

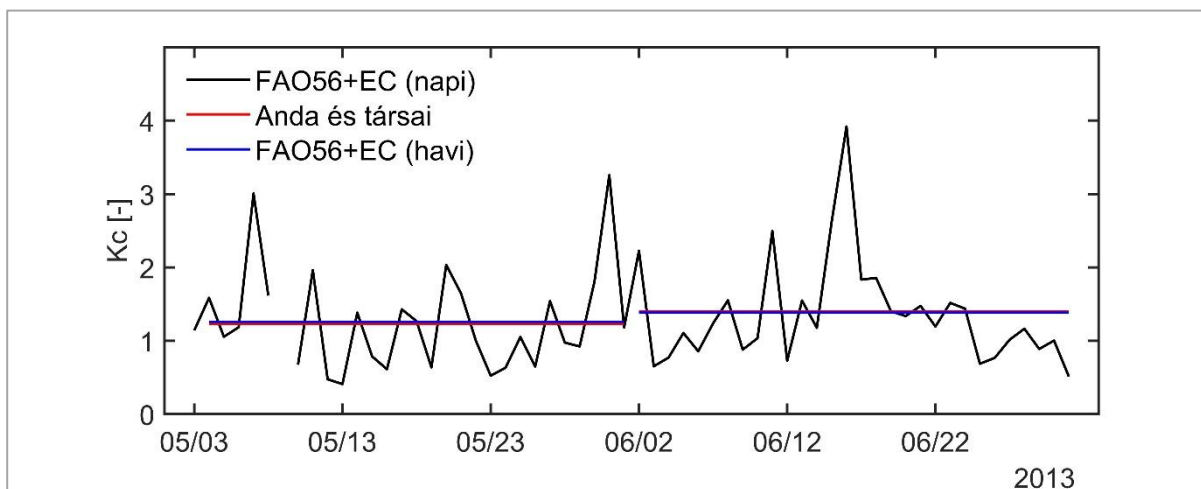


3. ábra. 2017-es örvény-kovariancia mérés során mért vízhőmérsékletek (felső ábra) és látens hőáramok (alsó ábra) alakulása a modellezett értékekhez képest

Figure 3. Measured water temperatures (top) and latent heat fluxes (bottom) during the eddy covariance measurement campaign in 2017 compared to the modeled values

A 2013. május és június hónapokban végzett örvény-kovariancia mérések alapján számított K_c nádkonstans értékeket a 4. ábra mutatja be. Az ábrán a napi értékeken túl, a számított havi átlagok is szerepelnek, továbbá összehasonlítás céljából *Anda és társai (2014)* által levezetett havi

nádkonstansok is feltüntetésre kerültek. Az említett két hónapban az általunk számított átlagok 1,26-ra (-) és 1,38-re (-) adódtak, míg náluk 1,23-ra (-) és 1,40-re (-), tehát nem volt lényegi eltérés közöttük. Ebből kifolyólag vettük át a többi hónapra is az általuk számított K_c értékeket (2. táblázat).

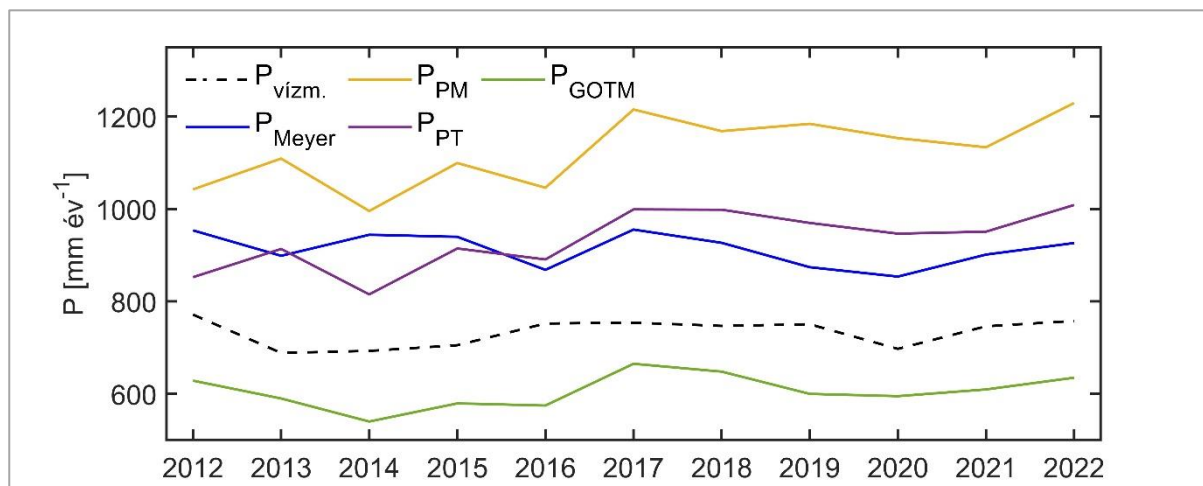


4. ábra. 2013-as örvény-kovariancia mérések alapján meghatározott napi K_c nádkonstans értékek, valamint az ezekből számított és *Anda és társai (2014)* által levezetett havi átlagok

Figure 4. Daily reed coefficients based on eddy covariance measurements in 2013 and monthly averages calculated from them and derived by *Anda et al. (2014)*

Annak érdekében, hogy energiamérleg alapon is számítani lehessen a teljes tó párolgást, a nyíltvíz párolgását és a nádas párolgatótatását leíró módszerek területtel súlyozott átlagát kellett figyelembe vennünk, mint ahogy a Meyer-képlet esetében. Ennek első lépéseként összehasonlítottuk a nyíltvíz párolgásának meghatározására használt eljárásokat az éves párolgásösszegek alapján (5. ábra), hogy a három energiamérleg alapú módszerből – Penman-Monteith, Priestley-Taylor, GOTM – ki lehessen választani azt, amelyikkel majd a teljes tó párolgást számítjuk. Az összehasonlításnál a vízmérleg alapú módszert is feltüntettük, mint viszonyítási alapot, ellenben megjegyzendő, hogy az már magába

foglalja mind a nyíltvíznek, mind pedig a nádasnak a párolgatótatását. Az eredmények alapján látható, hogy minden módszer – a GOTM kivételével – jelentősen túlbecsüli a vízmérlegből kapott összegeket, esetenként akár több száz milliméterrel, miközben azok még nem is tartalmazzák a nádas általi párolgatótatást, ami éves szinten meghaladja a nyíltvízi párolgást. A GOTM-hoz viszonyítva a Priestley-Taylor, a Meyer-hez hasonlóan, körülbelül másfélszer, míg a Penman-Monteith kétszer nagyobbra becsüli az éves párolgásösszegeket. Ebből kifolyólag, a teljes tó párolgás energiamérleg alapon való meghatározásánál, a nyíltvízi oldal az egydimenziós GOTM eredményeiből lett számítva.



5. ábra. Fertő tó nyílt vízfelületének éves párolgása a Penman-Monteith (P_{PM}), Priestley-Taylor (P_{PT}), GOTM (P_{GOTM}) és Meyer féle (P_{Meyer}) számítási módszerek esetében, illetve az éves tó párolgás vízmérlegmérleg alapon számítva ($P_{vizm.}$)

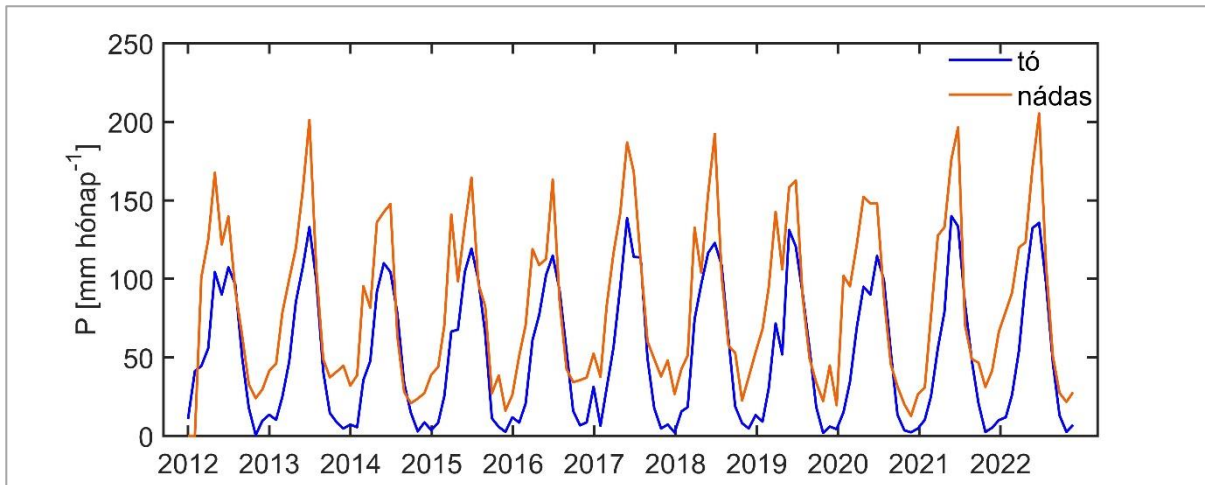
Figure 5. Annual open water evaporation of Lake Fertő in the case of the Penman-Monteith (P_{PM}), Priestley-Taylor (P_{PT}), GOTM (P_{GOTM}), and Meyer (P_{Meyer}) calculation methods, as well as the annual lake evaporation based on lake's water balance ($P_{vizm.}$)

Összehasonlítva az energiamérleg elven kapott nyíltvízi párolgást a nádas általi párolgatótatással (6. ábra) az látható, hogy a nádas majdnem egész évben többet

párolgatótat, mint a nyílt vízfelület. Ez alól egyedül a téli időszak képez kivételt, amikor ez kismértékben megfordul, ellenben kiemelendő, hogy ilyenkor a GOTM

alulbecsüli a mért vízhőmérsékleteket, tehát a modell több hőt ad le, mint amennyire valójában szükség lenne. Emellett fontos megjegyezni, hogy a vegetáción kívüli időszakokra nem ismerjük, hogy a nádas alatt milyen mértékű a vízfelület párolgása, míg a nádas fiziológiai folyamatai

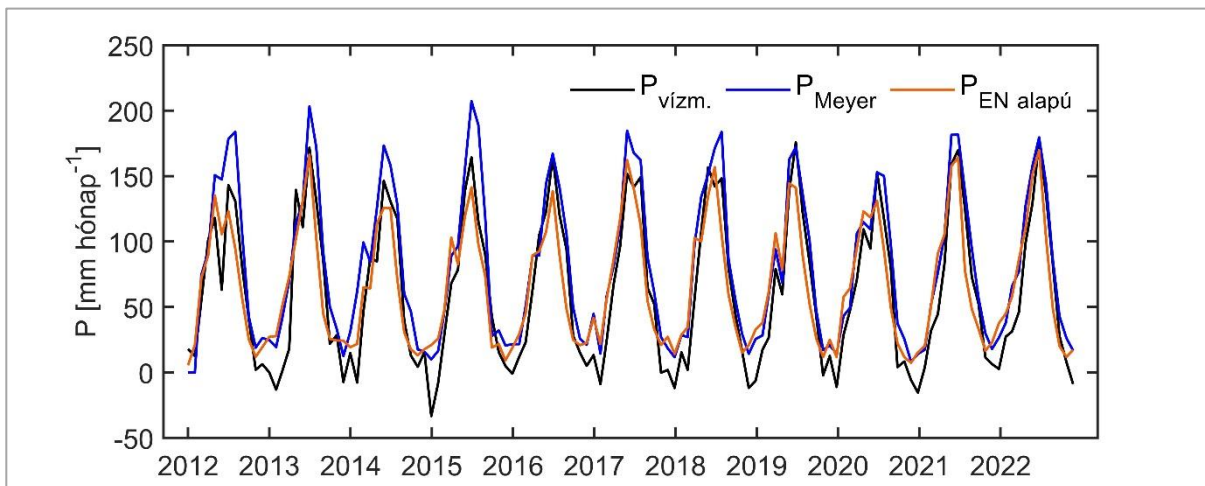
leállnak és nem párologtat. Ennek hatására ilyenkor a GOTM vélhetően valamelyest felülbecsüli a párolgást, így ezekben az időszakokban bizonytalanul mondható a tó-nádas közötti párolgási viszony, viszont a teljes évet nézve, a nádas általi párolgotatás dominál.



6. ábra. Fertő tó nyílt vízfelületének és nádasállományának havi párolgása energiamérleg alapján számítva
Figure 6. Monthly evaporation of the open water surface and reed zones of Lake Fertő based on energy balance calculations

A teljes tó párolgást nézve, a vízmérleg és energiamérleg (GOTM és FAO56) alapján számított eredmények közel azonos nagyságúra adódtak, míg a Meyer-képlet számottevően nagyobbra becsülte azokat. Az egyes módszerek közötti eltérés havi szinten esetenként a 30-40 mm-t is elérheti – elsősorban a Meyer-képletnél – míg éves léptéken a több 100 mm-t is meghaladhatja. Trendek tekintetében mind a vízmérleg, mind pedig az energiamérleg alapú módszer növekvő tendenciát mutat a tó párolgására, 22 és 81

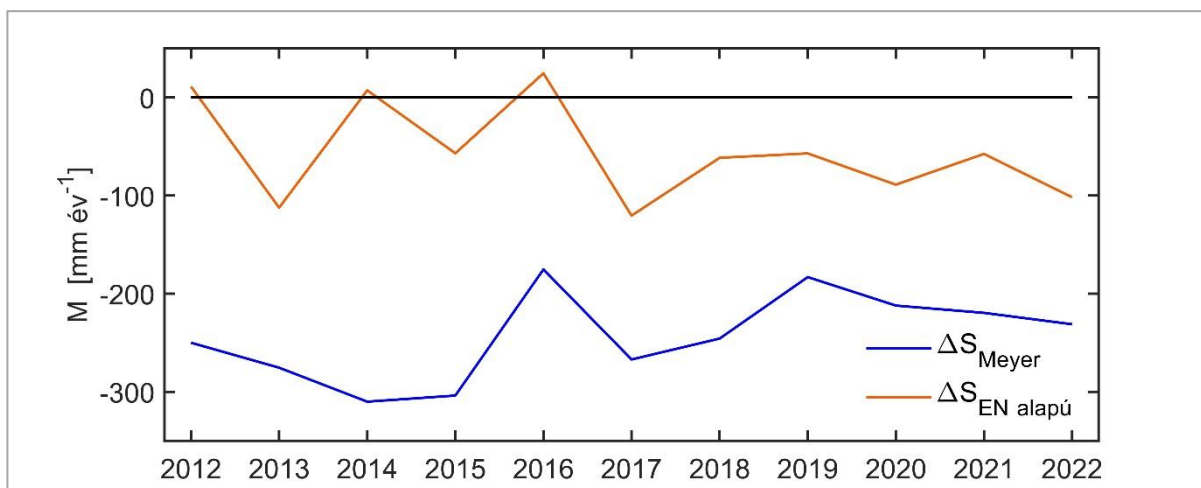
mm/10 évet. Ezzel szemben a Meyer-képlet esetében csökkenő trend látható, -43 mm/10 év, mely főként arra vezethető vissza, hogy a módszer nem képes figyelembe venni a sugárzás megváltozását, miközben döntően az biztosítja a párolgásra fordítható energiát (Lükő és társai 2022). Összességében tehát megállapítható, hogy lényegi eltérés van az egyes párolgászámítási módszerek között, viszont azok közül is kitűnik a Meyer-módszer, mely mind nagyságban, mind pedig trendben eltér a másik kettőtől.



7. ábra. Fertő tó havi párolgásértékei a vízmérleg, Meyer, és energiamérleg módszerekkel számítva
Figure 7. Monthly evaporation of Lake Fertő calculated by the water balance, Meyer, and energy balance methods

A párolgás ismeretében a vízmérleg egyenletből számíthatóvá válik a maradéktag (*1. egyenlet*), melyet ilyen módon a Meyer- és energiamérleg alapú eljárásokkal meg tudunk határozni. Éves szinten nézve alapvetően mindkét esetben hiányt lehet látni (8. ábra), mely a Meyer-módszer esetében évi átlagos -243 mm-re, míg az energiamérlegnél -56 mm-re adódott. Ezt azt jelenti, hogy éves léptéken veszteség van a rendszerben (elfolyás vagy elszivárgás), ami egyrésztől származhat a

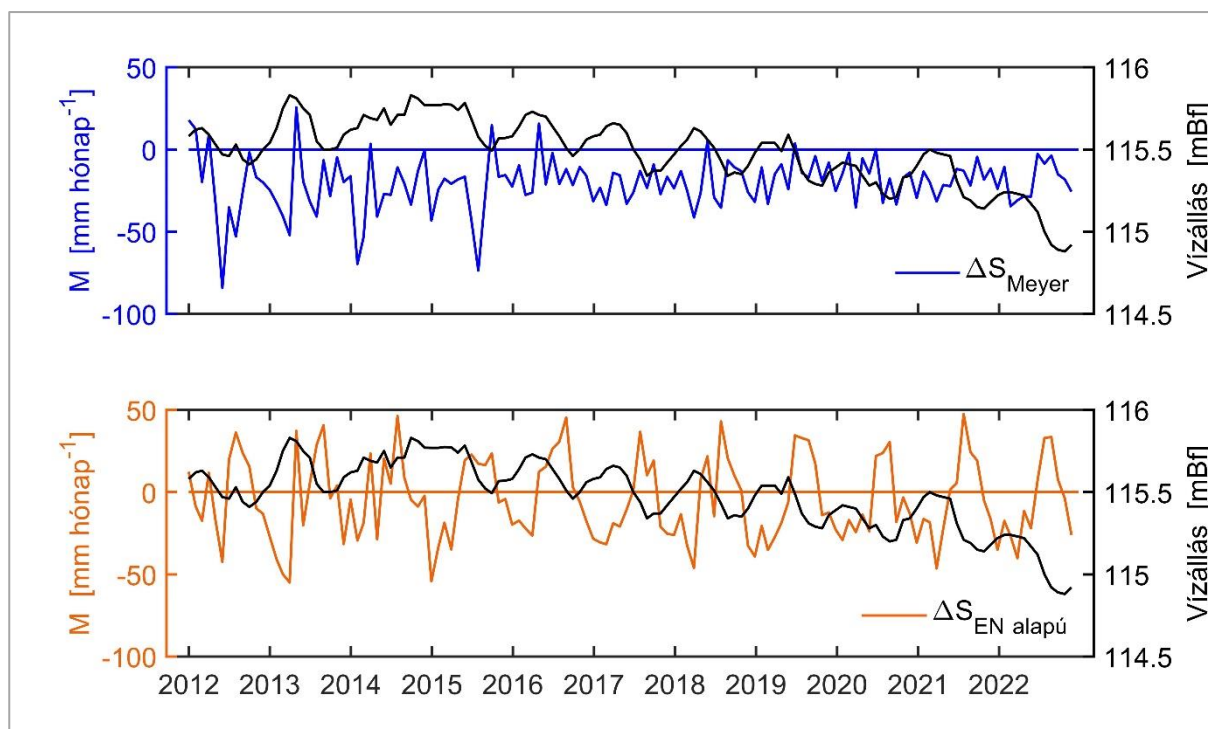
párolgás túlbecsléséből, másrészt pedig a felszín alatti vizek hatásának elhanyagolásából, illetve a méretlen vízgűjtőréssre vett közelítésből (Török és Torma 2024a). Az, hogy a Meyer-módszernél jelentősen nagyobbra adódtak a hiányok részben magyarázható azzal, hogy a vízmérleg- és energiamérleg alapú eljárásokhoz képest számottevően nagyobbra becsüli a párolgást (7. ábra), ami a tó vízkészletének szinte teljes veszteségéért a felelős.



8. ábra. Fertő tó vízmérleg egyenletéből számított éves maradvéktag értékek a Meyer- és energiamérleg alapú módszerek alapján
Figure 8. Annual residuals calculated from the water balance equation of Lake Fertő based on Meyer and energy balance methods

Havi szinten nézve a maradvéktagokat, a Meyer-képlet esetében – pár kivételtől eltekintve – mindig negatív érték jött ki, átlagosan -20 mm/hónap, míg azok energiamérleg elven való számításakor a nyári, illetve őszi időszakokban főként pozitív, míg máskor negatív eredmények adódtak, tehát az év folyamán egyaránt fordult elő többlet és hiány is a vízmérlegben. Átlagot tekintve összességében itt is negatív maradvéktag jelentkezik, ellenben annak értéke jóval kisebb, -5 mm/hónap. A zárási hiba időszakos előjelváltásának a feltételezhető oka a felszín alatti vizek hatása, amelyek hozzászivárgás esetén

növelik, elszivárgáskor viszont csökkentik a tó vízkészletét. Ezt támasztja alá, hogy azokban az esetekben mikor pozitív a maradvéktag, a tó vízszintje alacsonyabb, tehát ilyenkor a talajvíz szivároghat a tó irányába, és ez eredményezi a többletet, míg amikor negatív, akkor magasabb vízszintek vannak, így a tóból elszivárgás indulhat meg, ezzel okozva csökkenést a tó vízkészletében (9. ábra). Megjegyzendő, hogy a vízállás és a maradvéktag között egyedül az energiamérleg alapú eljárásnál mutatható ki kapcsolat, míg a Meyer-módszernél ilyesfajta összefüggés nem figyelhető meg.



9. ábra. Fertő tó vízmérleg egyenletéből számított havi maradvéktag értékek a Meyer- (felső) és energiamérleg (alsó) alapú módszerek alapján, párhuzamosan ábrázolva a tó fertőrákosi vízmércéjének havi vízállás idősorával. Az idősor minden hónap első napjának a vízállása alapján lett ábrázolva

Figure 9. Monthly residuals calculated from the water balance equation of Lake Fertő based on the Meyer (upper) and energy balance (lower) methods, plotted in parallel with the monthly water level time series of the lake's Fertőrákos staff gauge. The time series was plotted based on the water level of the first day of each month

ÖSSZEFOGLALÁS ÉS KONKLÚZIÓK

A Fertő tó vízmérlegét jelentős bizonytalanság terheli, ami elsősorban a párolgásnak, mint fő veszteségtagnak a pontos meghatározásából adódik. A tó párolgása két részből tevődik össze, egyrészt nyílt vízfelületének párolgásából, másrészt nádasállományának párolgotatásából, amelyet a meteorológiai folyamatok mellett a növény fiziológiai folyamatai is alakítják, így számítása jóval bizonytalanabb, mint a nyílt vízfelületé. Kutatásunk során a gyakorlatban alkalmazott Meyer- és vízmérleg alapú párolgászámítási eljárásokat hasonlítottuk össze több, energiamérleg alapú módszerrel, amelyek fizikai alapokon nyugszanak, hogy feltárjuk az egyes számítási eljárásokat terhelő bizonytalanságokat, továbbá, hogy képesek legyünk a tó párolgás megbízhatóbb meghatározására. Vizsgálataink eredménye alapján, az alábbi következtetésekre jutottunk:

- Az energiamérleg alapú Penman-Monteith és Priestley-Taylor eljárások jelentősen túlbecsülik a nyíltvízi párolgást, így azok alkalmazása a Fertő tó esetében elvetendő. Ezzel szemben az egydimenziós GOTM jó becslést adott a nyíltvízi párolgásra, míg a FAO56-os egyenlet az *Anda és társai (2014)* által levezetett nádkonstansokkal a nádas általi párolgotatást tudta kellő pontossággal visszaadni.

- A párolgászámítási módszerek összehasonlítása azt láttuk, hogy a vízmérleg és egyes energiamérleg alapú módszerek közel azonos nagyságúra becsülik a párolgást, illetve egyaránt növekvő trendet mutatnak rá. Ezzel szemben a Meyer-féle eljárás számottevően nagyobbra becsüli azt, ugyanakkor egy csökkenő trendet jelez évtizedes léptéken. Összevetve a vízmérleg egyenletből számított maradéktagokat azt tapasztaltuk, hogy bár mind a Meyer, mind pedig az energiamérleg alapú módszer összességében hiányt jelez a rendszerben, előbbi jelentősen nagyobbra becsüli azt, körülbelül négyszer akkora. Ezek alapján tehát arra jutottunk, hogy az empirikus Meyer-képlet alkalmazása a Fertő tó párolgásának számítására megkérdőjelezhető, mivel várhatóan nemcsak nagymértékben túlbecsüli tényleges párolgást, hanem annak hosszútávú klimatikus előrejelző képessége is bizonytalan.

- A nyíltvíz párolgásának és a nádas párolgotatásának energiamérleg elven való meghatározásával jóval jobb vízmérleg zárást kaptunk, mint a Meyer-képlet esetében. Továbbá, az energiamérleg alapú eljárások fizikai alapokon nyugszanak, ezért mérések révén lehetőség van azok közvetett igazolására is. Ezekből adódóan, a Fertő tó párolgásának meghatározására energiamérlegen elven alapuló számításokat kell alkalmazni.

- A vegetációs időszakban (május-szeptember) a nádas általi párolgotatás megközelítőleg 1,2-1,5-szöröse a nyíltvízi párolgásnak. Miután ez a tónak hozzávetőleg felét érinti, ennek hatása nem elhanyagolható, ellenben az erre irányuló mérések mégis hiányoznak, vagy csak korlátozott mértékben állnak rendelkezésre.

- Végezetül megjegyezzük, hogy számításainkat csak rövid idejű közvetlen párolgásmérésekre tudtuk igazolni, így a Fertő tó párolgásának pontosabb becsléséhez szükség lenne egy hosszútávú mérési sorozatra – legalább egy év –, mely keretein belül nagy időbeli felbontással kellene mérni a rutin meteorológiai adatokat, az összes sugárzási komponenst, a vízhőmérsékletet, továbbá a nyíltvízi és nádas feletti térségben a szenzibilis és látens

hőáramokat. Ennek elvégzése elengedhetetlen a tó vízkészlet-változásának pontosabb leírásához, illetve az esetleges vízpótlás mennyiségi meghatározásához.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A közleményben bemutatott kutatás a Széchenyi Terv Plusz program keretében az RRF-2.3.1-21-2022-00008 számú projekt támogatásával, valamint a Kulturális és Innovációs Minisztérium ÚNKP-23-3-I-BME-147 és ÚNKP-23-5-BME-454 kódszámú Új Nemzeti Kiválósági Programjának a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alapból finanszírozott szakmai támogatásával készült. A kutatást támogatta továbbá a 138176 számú OTKA projekt, valamint az MTA „Fenntartható Fejlődés és Technológiák Nemzeti Program” (FFT NPFTA). A második szerzőt az MTA Bolyai János Ösztöndíj (00906/23) támogatta.

IRODALOMJEGYZÉK

Anda, A., Silva, J., Soós, G., Teixeira da Silva, J. A. (2014). Evapotranspiration and crop coefficient of common reed at the surroundings of Lake Balaton, Hungary. *Aquatic Botany*, 116, pp. 53-59. <https://doi.org/10.1016/j.aquabot.2014.01.008>

Anda, A., Soós, G., Teixeira da Silva, J.A. (2017a). Leaf area index for common reed (*Phragmites australis*) with different water supplies in the Kis-Balaton wetland, Hungary, during two consecutive seasons (2014 and 2015). *Időjárás*, 121 (3), 265-284.

Anda, A., Soós, G., Teixeira da Silva, J. A. (2017b). Practical use of *Phragmites australis* to study evapotranspiration in a wetland zone of Lake Balaton (southwest Hungary). *Theoretical and applied climatology*, 127, 899-909. <https://doi.org/10.1007/s00704-015-1679-4>

Eitzinger, J., Kubu, G., Formayer, H., Haas, P., Gersdorfer, T., Kromp-Kolb, H. (2009). Auswirkungen einer Klimaänderung auf den Wasserhaushalt des Neusiedlersees. In: *Auswirkungen einer Klimaänderung auf den Wasserhaushalt des Neusiedlersees, Endbericht, Im Auftrag der Burgenländischen Landesregierung*, 2005. BOKU-Met Report 1 (ISSN 1994-4179; ISSN 1994-4187 (on-line).

Fertő Konzorcium (2019). Vízminőség-védelmi célú vízgazdálkodási kezelési terv készítését megalapozó vizsgálatok a Fertő tavon. Kutatási jelentés, AT-HU 53 Interreg projekt, Budapest.

Foken, T. (2006). *Micrometeorology*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg.

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), 1091-1106. <https://doi.org/10.1111/fwb.13903>

Jensen, M.E., Dotan, A., Sanford, R. (2005). Penman-Monteith Estimates of Reservoir Evaporation. *Impacts of Global Climate Change*, pp. 1-24. [https://doi.org/10.1061/40792\(173\)548](https://doi.org/10.1061/40792(173)548)

KDTVIZIG (2023). A Velencei-tó 2022. évi vízmérlege. <http://www.kdtvizig.hu>

KDTVIZIG (2024). A Balaton és a tórészek havi vízháztartási jellemzőinek meghatározása. <http://www.kdtvizig.hu>

Kiss M., Józsa J. (2014). A Fertő tó energiaháztartásának meghatározása örvény-kovariancia módszerrel. Hidrológiai Közlöny, 94(4), pp. 38-47.

Kiss M., Torma P. (2014). Sekély tavi energiaáramok fluxus-gradiens eljárás-alapú becslése örvény-kovariancia mérésekből. Hidrológiai Közlöny, 94(4), pp. 48-56.

Kovács Á., Szilágyi J. (2009a). Párolgásszámítási vizsgálatok hazai nagy tavainkon, I. Hidrológiai Közlöny, 89(2), pp. 47-50.

Kovács Á., Szilágyi J. (2009b). Párolgásszámítási vizsgálatok hazai nagy tavainkon, II. Hidrológiai Közlöny, 89(2), pp. 51-56.

Lükő, G., Torma, P., Weidinger, T. (2022). Intra-Seasonal and Intra-Annual Variation of the Latent Heat Flux Transfer Coefficient for a Freshwater Lake. Atmosphere, 13(2), 352. <https://doi.org/10.3390/atmos13020352>

Metzger, J., Nied, M., Corsmeier, U., Kleffmann, J., Kottmeier, C. (2018). Dead Sea evaporation by eddy covariance measurements vs. aerodynamic, energy budget, Priestley–Taylor, and Penman estimates. Hydrology and Earth System Sciences, 22 (2), 135-155. <https://doi.org/10.5194/hess-22-1135-2018>

Meyer, A.F. (1942). Evaporation from lakes and reservoirs, a study based on fifty years' Weather Bureau Records. Minnesota Resources Commission, St. Paul, Minnesota.

Nikolaou, G., Neocleous, D., Kitta, E., Katsoulas, N. (2023). Assessment of the Priestley-Taylor coefficient and a modified potential evapotranspiration model. Smart Agricultural Technology, 3, 100075 <https://doi.org/10.1016/j.atech.2022.100075>

Soja, G., Züger J., Knoflacher, M., Kinner, P., Soja, A. (2013). Climate impacts on water balance of a shallow steppe lake in Eastern Austria (Lake Neusiedl). Journal of Hydrology, 480, pp. 115-124. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.12.013>.

Török S.D., Torma P. (2024a). Fertő tó nyílt vízének párolgása és nádasállományának párologtatása az éghajlatváltozás tükrében. Magyar Hidrológiai Társaság XLI. Országos Vándorgyűlés, Szolnok, 2024. július 3-5.

Török, S.D., Torma, P. (2024b). Prediction of long-term changes of weak diurnal stratification in shallow lakes using artificial neural networks. Journal of Water and Climate Change. 15(8) pp. 3724-3737. <https://doi.org/10.2166/wcc.2024.032>

A SZERZŐK



TÖRÖK SEBESTYÉN DÁNIEL 1996-ban született Budapesten. Első (BSc) diplomáját 2019-ben szerezte a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem (BME) Építőmérnöki Karán, ahol aztán 2021-ben MSc államvizsgát tett. PhD képzését 2022-től kezdődően a BME Vásárhelyi Pál Építőmérnöki és Földtudományi Doktori Iskolában végzi. A Magyar Hidrológiai Társaság tagja 2023 óta.



TORMA PÉTER 2011-ben szerzett építőmérnök MSc oklevelet, majd 2016-ban PhD fokozatot. A Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem (BME) Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszékén dolgozik 2011 óta, 2019-től, mint egyetemi docens. Fulbright ösztöndíjasként a UW-Madison (USA) vendégkutatója volt a 2017/18-as tanévben. Kutatási területe a fizikai limnológia, a hidrometeorológia, különös tekintettel a víz-levegő határfelület turbulens cserefolyamatainak örvény-kovariancia elvű mérésére, a tavak hőháztartása, valamint a numerikus hidrodinamikai modellezésére. A Magyar Hidrológiai Társaság tagja 2023 óta.

Csapadékmintázatok vizsgálata a Tiszántúli Vízügyi Igazgatóság működési területén

Szám Dorottya^{1,2}, Hetesi Zsolt^{3,4}, Bódi Tibor⁵, Marosi Zoárd Ivor⁶

¹ Víz tudományi Kar, Területi Vízgazdálkodási Tanszék, Nemzeti Közszolgálati Egyetem, Baja (email: szam.dorottya@uni-nke.hu)

² Víz tudományi és Vízbiztonsági Nemzeti Labor, Nemzeti Közszolgálati Egyetem, Baja

³ Víz tudományi Kar, Víz- és Környezetbiztonsági Tanszék, Nemzeti Közszolgálati Egyetem, Baja (email: hetesi.zsolt@uni-nke.hu)

⁴ Természettudományi Kar, Matematikai és Informatikai Intézet, Pécsi Tudományegyetem, Pécs

⁵ Víz tudományi Kar, Víz- és Környezetbiztonsági Tanszék, Nemzeti Közszolgálati Egyetem, Baja (email: bodi.tibor@stud.uni-nke.hu)

⁶ Tiszántúli Vízügyi Igazgatóság, Debrecen (email: titkarsag@tivizig.hu)

DOI: 10.59258/hk.18331



Kivonat

A Tiszántúli Vízügyi Igazgatóság területe a Kárpát-medence egyik olyan régiója, amely az aszálytérképek szerint leginkább ki van téve az aszály mezőgazdaságot károsító hatásainak, és ahol az éghajlatváltozás növeli a szélsőséges időjárási események valószínűségét. Az aszályos és az extrém csapadékos időszakok gyakorisága itt egyaránt növekszik. Mindezek jobb megértése elengedhetetlen a vízgazdálkodás tervezéséhez és irányításához, valamint az adaptív, precíziós mezőgazdálkodás feltételeinek megteremtéséhez. A dolgozat alapjául szolgáló kutatás 16 hidrometeorológiai állomás 1964 és 2022 évek közötti napi csapadékadatait használta fel a Tiszántúli Vízügyi Igazgatóság területén. Megállapítottuk, hogy a szélsőséges csapadékesemények változása statisztikailag nem szignifikáns a 16 állomás összegzett adatai esetében 1964 és 2022 között. Viszont szignifikáns változásokat tapasztaltunk, miután az adatsort két azonos hosszúságú periódusra (1965-1993; 1994-2022) bontottuk fel további komparatív statisztikai vizsgálatok céljából. Sikerteljes kimutatnunk, hogy szignifikánsan nőtt a legalább 25 napig tartó csapadégmentes időszakok gyakorisága a Nagybjajom település területén lévő hidrometeorológiai mérőállomás adatai szerint. Ez, valamint a terület talajviszonyai arra utalnak, hogy a kívánatos mezőgazdasági hozamok eléréséhez egyre inkább szükségessé válik a precíziós öntözés és megoldandó feladattá válik a belvízveszélyes, alacsonyan fekvő területek optimális hasznosítása is.

Kulcsszavak

Csapadék, Tiszántúl, extrém időjárási jelenségek, aszály, klímaváltozás.

Analysis of Precipitation Data Series in the TIVIZIG Operational Area (Hungary)

Abstract

The-Trans Tisza Regional Water Directorate area is one of the regions of the Carpathian Basin most exposed to the adverse effects of drought on agriculture. Climate change here increases the likelihood of extreme weather events. It is also true that the frequency of drought and extreme precipitation periods is increasing. A better understanding of all this is essential for water planning and control of water management to create conditions of adaptive, precision farming. This paper's research used daily rainfall data from 16 Trans-Tisza Regional Water Directorate hydro-meteorological stations between 1964 and 2022. We have shown that the change in extreme precipitation events is not statistically significant for the aggregated data of the 16 stations between 1964 and 2022. However, significant changes were detected after splitting the data series into two periods of equal length (1965-1993; 1994-2022) for further comparative statistical analysis. We showed a significant increase in the frequency of periods without precipitation of at least 25 days, according to the data of the hydro-meteorological station in the area of Nagybjajom municipality. This, combined with the area's soil conditions, suggests that precision irrigation management is becoming essential to achieve desirable agricultural yields and that, where appropriate, it may be necessary to drain low-lying areas at risk of inland flooding.

Keywords

Precipitation, Trans-Tisza region, extreme weather events, drought, climate change.

BEVEZETÉS

Az éghajlatváltozás egyik legfontosabb hatása a szélsőséges időjárási események gyakoriságának növekedése, mind a hőszegnapok, mind az intenzív csapadékesemények tekintetében. Bár a csapadékkal kapcsolatos változások bizonytalanabbak, mint a hőmérsékletváltozással összefüggő trendek, számos régióban az extrém csapadékesemények egyértelmű növekedése figyelhető meg (McBean 2004, Bartholy és Pongrácz 2005, Stott 2016).

Adott vízgyűjtő esetében a csapadékeseményre adott válasz nagyságát és időtartamát számos peremfeltétel be-

folyásolja (Green és Nelson 2002, McCuen 2009). Leegyszerűsítve: a felszín alatti tárolás mértéke véges, és a lefolyás nélküli területeken a szélsőséges csapadék növeli a belvízi elöntések kockázatát. A lefolyással rendelkező vízgyűjtőkről a nem tárolt csapadékfelesleg a vízfolyásokon keresztül távozik. A rendkívül nagy csapadék ezért is növelheti az árvízveszélyt (Field és társai 2012). Szélsőséges esetekben villámárvizekre is számítani lehet, amelyek gyakorisága növekedhet (Czigány és társai 2013). Mindezen kockázatok mérséklésében és a mezőgazdasági gazdálkodás biztonságának megteremtésében fontos szerepet játszhat a csapadék időbeliségében rejlő tulajdonságok felkuta-

tása. A változások determinisztikus vagy sztochasztikus típusúak lehetnek. A determinisztikus folyamatokat leíró változók nem véletlenszerűen, hanem valamilyen törvényszerűség szerint változnak. A sztochasztikus folyamatok esetén a változás véletlenszerű. A determinisztikus folyamatok azonosításával csökkenthető a változékonyság hatása a vizsgált időjárási paraméterre (Ilyés és társai 2019), mint amilyen például a napi csapadékösszeg változása. Determinisztikus az a folyamat, amely teljesen előre jelezhető, sztochasztikus, amelynél az előrejelzés valószínűségi alapú.

A csapadék térben és időben erősen változó időjárási elem a Kárpát-medencében, ahol nehéz megjósolni az éghajlatváltozás hatásának nagyságát (Kristóf és társai 2017). A magyarországi adatsorok esetében több tanulmány (Bartholy és Pongrácz 2007, Kiss és társai 2019) is rámutatott az intenzív csapadékesemények számának növekedésére a történeti adatsorokban. Azt is megállapították, hogy Magyarországon a szélsőséges csapadékesemények visszatérési gyakorisága 1,2-2 szerezre nőtt (Pieczka és társai 2011, Pongrácz és társai 2014), miközben az éves országos csapadékösszeg csökkent 1901-2020 között ezen időszak átlagához képest (HungaroMet 2021). Különösen jelentős csökkenést mutat a tavaszi országos csapadékösszeg változása (-17,2%) 1901-2020 között ezen időszak átlagához képest (HungaroMet 2021). Sőt, az is igaz, hogy az éves és évszázkos országos csapadékösszegek változása az 1981-2020 közötti időszakban nem szignifikáns, de növekvő trendet mutat (HungaroMet 2021, Lakatos és társai 2021).

A csapadék és aszály szélsőségek értékelésére és a változások számszerűsítésére nemzetközileg elfogadott extrémítás indexek (Klein Tank és Können 2003, Alexander és társai 2006, Donat és társai 2013) szolgálnak, amelyeket Magyarországon több tanulmányban is alkalmaztak (Bartholy és társai 2013, Kis 2018, Hoffmann és Lakatos 2019, Szám és társai 2024). Az extrémítás-indexek különböző időskálákon (egy órától egy évig) alkalmazhatók. Statisztikai szempontból sok információ áll rendelkezésre a napi csapadékösszegek elemzéséből. A csapadékösszegek napi és havi bontásban való vizsgálata optimális az éghajlatváltozás hosszú távú hatásainak elemzéséhez is (Klein Tank és Können 2003, Alexander és társai 2006, Donat és társai 2013). A havi csapadékösszegek változása a vegetációs időszak alatt a mezőgazdaság szempontjából érdekes. Magyarország éghajlatán ez a körülbelül márciustól októberig tartó időszak, amikor a kultúrnövények növekedése és vízigénye jelentős. A vegetációs időszak pontos kezdete és vége természetesen több tényezőtől függ, többek között a termesztett növényfajtától is. Az is lényeges, hogy tudjuk, Magyarország melyik régiójáról beszélünk. Továbbá, hogy ott hogyan érvényesülnek az éghajlatváltozás hatásai (Mesterházy és társai 2015). A vegetációs időszakon belül a legtöbb növény esetében a virágzástól a betakarításig tartó legszűkebb időszak az, amikor a növény csapadékigénye a legjelentősebb.

A tanulmányunk alapjául szolgáló kutatásban a Tiszántúli Vízügyi Igazgatóság (TIVIZIG) 7021 km²-es alföldi működési területének csapadékváltozásait vizsgáltuk. Különböző aszályindexeken (például Pálfi-féle index, Hunga-

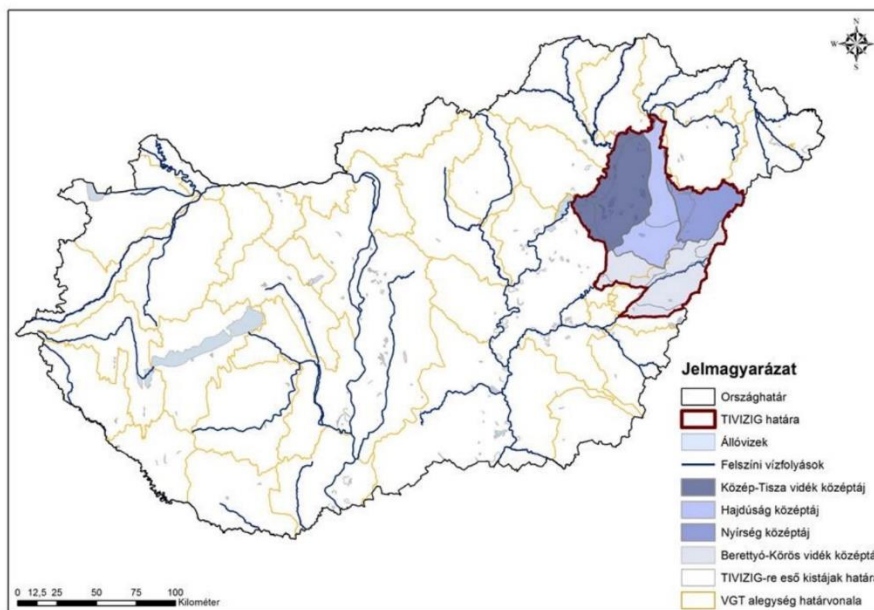
rian Drought Index) alapuló térképezések szerint a TIVIZIG területe a Kárpát-medence egyik olyan régiója, amely leginkább ki van téve az aszálynak (Gavrilov és társai 2020, Buzási 2021), továbbá a csapadék-extremitásoknak (Lakatos és társai 2007). Feltételeztük, hogy az éghajlatváltozás egyik hatása a csapadék-szélsőségekben lesz megfigyelhető: az átlagtól eltérő havi csapadékösszegek száma az idő múlásával jelentősen megnő. Ennek vizsgálata a vegetációs időszak és a naptári év során igen hasznos a gazdálkodás tervezése és a növényvédelmi beavatkozások optimális idejének meghatározása végett. A haszonnövények vízigénye jellemzően fenológiai fázishoz kötött, hasonlóan a kórokozók és kártevők megjelenéséhez.

További hipotézisünk egy korábbi tanulmány (Szám és társai 2024) eredményei alapján az volt, hogy a hosszabb csapadékmentes időszakok eloszlása eltér a vizsgált időszak első (1965-1993) és második felében (1994-2022).

A VIZSGÁLATHOZ FELHASZNÁLT ADATOK

Vizsgálati területünk a TIVIZIG működési területe volt, amely a 2-15 (jelű) Berettyó tervezési alegység és a 2-17 (jelű) Hortobágy-Berettyó tervezési alegység, amelyeket az 1242/2022 (IV.28.) kormányhatározat alapján Magyarország 2021. évi vízgyűjtő-gazdálkodási terve alapján határoltak le. Az Igazgatóság Tiszafüred, Rakamaz, Penészek, Biharkeresztes, Szeghalom és Püspökladány permtereplésekkel határolt területén 600 ezer ember él összesen 92 településen, beleszámítva a több mint 200 ezres lélekszámú Debrecent. Közigazgatási szempontból a működési terület amellel, hogy lefedi Hajdú-Bihar vármegyét, érinti Szabolcs-Szatmár-Bereg, Borsod-Abaúj-Zemplén, Jász-Nagykun-Szolnok és Békés vármegyét is. Itt négy köztes terület (1. ábra) található, amelyek kataszteri kijelölése az alábbiak szerint történik: Közép-Tisza-vidéki köztes terület (1.7), Nyírségi köztes terület (1.10), Hajdúsági köztes terület (1.11), Berettyó-Körös-vidéki köztes terület (1.12). A négy köztes terület helyi sajátosságokkal rendelkezik, de mindegyik túlnyomórészt sík, enyhe lejtésű, gyakran rossz vízvezetőségű terület, ahol extrém csapadékhiány hatására az aszályok, extrém sok csapadék hatására pedig a belvizek okozhatnak problémát. A területekre jellemző az évi 500-580 mm-es többéves (1901-2020) átlagos éves csapadékösszeg és a viszonylag enyhe, száraz, csapadékhiányos éghajlat. Ebből kifolyólag a szárazságtűrő növények öntözés nélkül is gazdaságosan termesztethők (VKGT 2017).

A TIVIZIG a vízrajzi adatelőállítási és adatszolgáltatási tevékenységét a fő állomások esetében ISO 9001:2015 szerint tanúsított minőségirányítási rendszerben végzi. A TIVIZIG működési területén összesen 24 db hidrometeorológiai állomás található (2. ábra). Tanulmányunkban ezek közül 16 db állomás csapadékadatát dolgoztuk fel (1. táblázat) az 1964-2022 közötti időszakra vonatkozóan. Ezek az állomások rendelkeznek a leghosszabb időszorral és legkisebb adathiányokkal, így esett ezekre a választásunk. Az adatokat minőségbiztosítási vizsgálatokat követően bocsátották rendelkezésünkre a TIVIZIG munkatársai. (A HungaroMet közel feleannyi automata időjárási mérőállomással rendelkezik a TIVIZIG területén. Legkorábbi méréseinek kezdete az 1997-es évre tehető, azonban a mérőállomásainak többsége csak a 2000-es évektől üzemel. Emiatt kizárólag csak a TIVIZIG adatait használtuk.)



1. ábra. A TIVIZIG működési területének lehatárolt alegységei (Forrás: TIVIZIG 2024)
 Figure 1. Delimited subdivisions of TIVIZIG's operational area (Source: TIVIZIG 2024)



2. ábra. A 24 hidrometeorológiai mérőállomásának elhelyezkedése a TIVIZIG három szakaszmérsőségén, melyeket különböző barna és sárga színek jelölnek (TIVIZIG 2024)
 Figure 2. Location of the 24 hydro-meteorological measuring stations in the three TIVIZIG stations, marked in different brown and yellow colours (TIVIZIG 2024)

1. táblázat. A TIVIZIG területén található hidrometeorológiai mérőállomások azonosításának adatai (TIVIZIG 2024)
Table 1. Primary data from hydrometeorological measuring stations in the TIVIZIG area (TIVIZIG 2024)

Sorszám	Állomás	Törzsszám	EOV _x (m)	EOV _y (m)	Balti alapszinthez viszonyított magasság (mBf)
1.	Hajdúnánás	180009	282491,00	824671,00	95,00
2.	Mezősas	002735	198923,00	840977,00	99,00
3.	Nyírábrány	003739	249136,00	873855,00	135,11
4.	Tiszacsege	180002	264929,00	792982,00	90,00
5.	Biharnagybajom	180014	209805,00	815485,00	86,00
6.	Darvas	180033	198494,00	822619,00	89,00
7.	Hajduböszörmény	180010	268255,00	824045,00	92,00
8.	Hajdúsámson	180016	254293,00	854682,00	129,00
9.	Hajdúszovát	180011	230164,00	832483,00	92,00
10.	Hortobágy	180012	250828,00	808378,00	89,00
11.	Kaba	180013	226285,00	818569,00	88,00
12.	Komádi	180038	184692,00	836212,00	89,00
13.	Nyíradony	180040	263999,00	864692,00	154,00
14.	Szeghalom	180036	187767,00	812328,00	90,00
15.	Szerep	180020	211253,00	808925,00	86,00
16.	Tiszafüred	180003	256445,00	778278,00	88,00

VIZSGÁLATI MÓDSZEREK ÉS EREDMÉNYEK

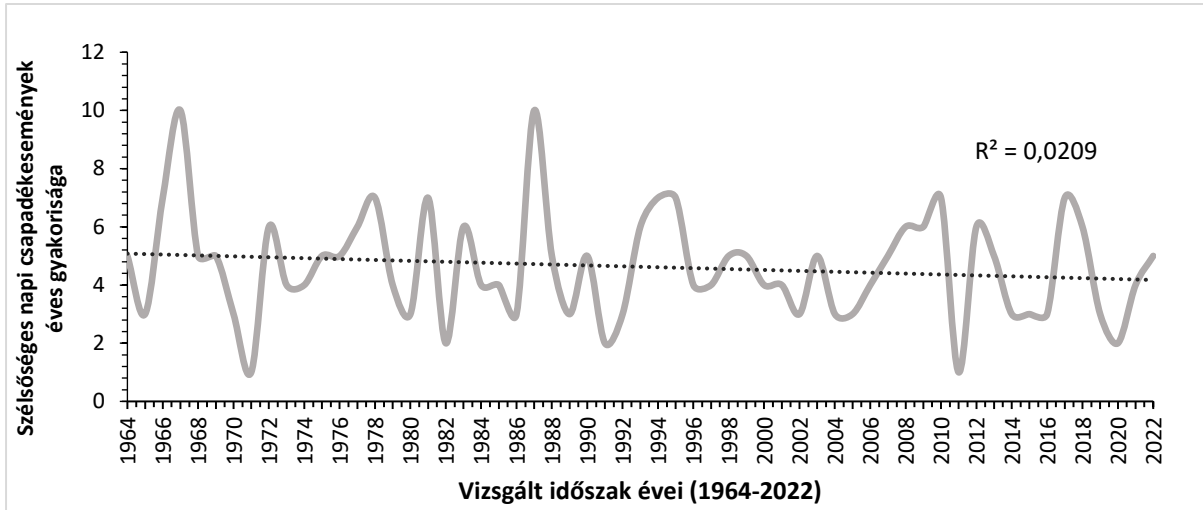
Első vizsgálatunkban meghatároztuk az 1964-2022 közötti időszakban a napi csapadékösszegek adataiból a maximális értékeket havonta. Ezt a 12 adatot átlagoltuk és kiszámítottuk a szórásukat is. Ezzel meghatároztuk azt a szélső értéket, amely küszöbnek tekinthető a szélsőséges napi csapadékösszeghez. Például, ha egy adott évben a 12 havi maximum napi csapadékösszeg átlaga 10 mm, szórása 4 mm, akkor a 18 mm-nél nagyobb napi csapadékösszeg az év bármely napján szélsőségesnek tekinthető, ezen definíció alapján.

1964-2022 között minden mérőállomás esetében meghatároztuk, hogy hány olyan nap volt, ami a definíció szerint szélsőségesnek tekinthető. A szórás kétszeresének értékét a 95%-os konfidenciaszint miatt választottuk. A 16 mérőállomáson mért, szélsőséges napi csapadékösszegek számát összegeztük minden évben (2. ábra). Ha a 16 mérőállomás adatainak átlagát vennénk, a lokálisan kiugró értékeket (például intenzív csapadékot egy-egy állomásnál) a többi állomás alacsonyabb értékei kiegyenlítik. Az átlagolás ezért hajlamos „elsimítani” a szélsőségeket, és elveszíteni azokat az információkat, amelyek az egyes állomások extrém értékeiben rejlik, az összeadás megtartja ezeket. Az így kapott adatsorra ezt követően lineáris trendet illesztettünk. A trendvizsgálat eredménye alacsony negatív korrelációt mutatott ki az idővel, ami nem szignifikáns csökkenést jelent. A szélsőséges csapadékösszegek gyakoriságát havi bontásban vizsgálva elmondható továbbá,

hogy azok száma főként júniusban és júliusban magas. Összefoglalva tehát, a fenti definíció szerinti szélsőséges csapadékesemények változása statisztikailag nem szignifikáns a 16 állomás összegzett adatai esetében 1964 és 2022 között. Lehetséges ennél jobb statisztikai megközelítést is kidolgozni a kérdésre, ez azonban kielégítő a területre vonatkozó tervezési feladatok meghatározásához.

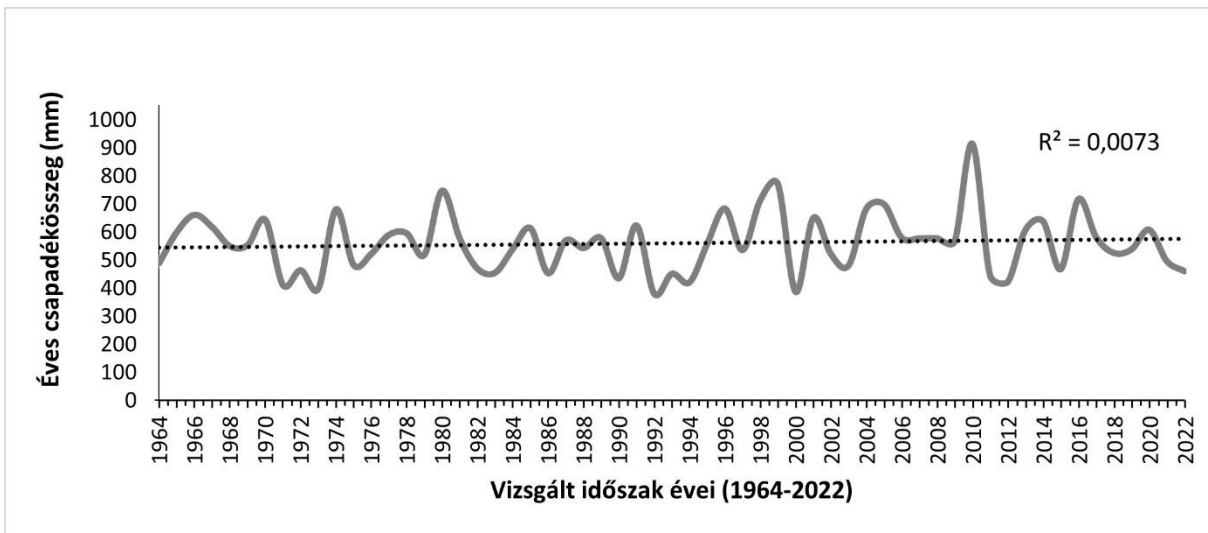
Második elemzésünk az éves csapadékösszegek és azok vegetációs perióduson belüli részének alakulására összpontosított a rendelkezésre álló adatok alapján. Vegetációs időszaknak az áprilistól szeptemberig tartó időszakot tekintettük, amely – a vizsgált területen – a három legnagyobb szántóföldi kultúra, a búza (*Triticum aestivum*), a kukorica (*Zea mays*) és a napraforgó (*Helianthus annuus*) (KSH 2024), valamint a zöldségfélék és a gyümölcsösök esetében releváns.

A 16 állomás éves csapadékösszegeit átlagolva a kapott eredmények nem mutatnak szignifikáns időbeli változást (3. ábra), a korreláció igen gyenge, fenntartásokkal kezelendő (a korrelációs együttható négyzete, vagyis a determinációs együttható: $R^2=0,0073$). A 16 állomás vegetációs időszakra eső csapadékösszegeinek átlagai ugyancsak nem mutatnak szignifikáns időbeli változást (4. ábra), itt is gyenge korrelációs értéket (a determinációs együttható értéke: $R^2=0,0005$) kaptunk a lineáris trend illesztésekor. Következésképpen statisztikailag nem lehet megerősíteni a csapadékösszeg szignifikáns csökkenését az idővel.



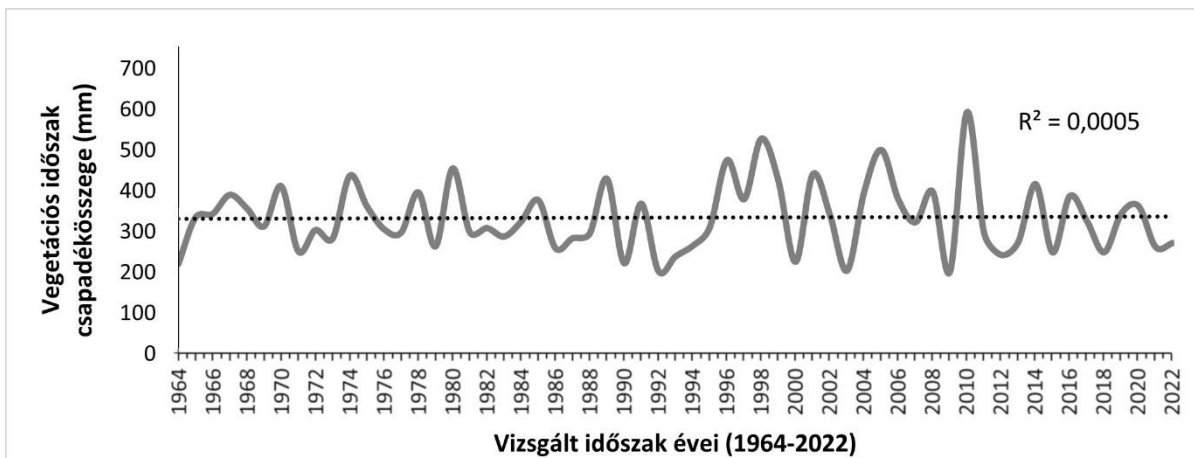
2. ábra. A havi csapadékmaximumok átlagtól kétszeres szórásnál nagyobb mértékben eltérő napi csapadékesemények előfordulásának éves gyakorisága a 16 mérőállomáson, és a gyakoriság-adatokra illesztett lineáris trend (TIVIZIG 2024)

Figure 2. Annual frequency of occurrence of daily rainfall events deviating from the average plus twice of the deviation derived from monthly rainfall maxima on the 16 stations, and the linear trend fitted to the frequency data (TIVIZIG 2024)



3. ábra. Éves csapadékösszeg a 16 hidrometeorológiai mérőállomás adatainak átlagából (TIVIZIG 2024)

Figure 3. Annual rainfall totals, from the average of 16 hydrometeorological measuring stations (TIVIZIG 2024)



4. ábra. A vegetációs időszak (április-szeptember) csapadékösszege 16 hidrometeorológiai mérőállomás adataiból (TIVIZIG 2024)

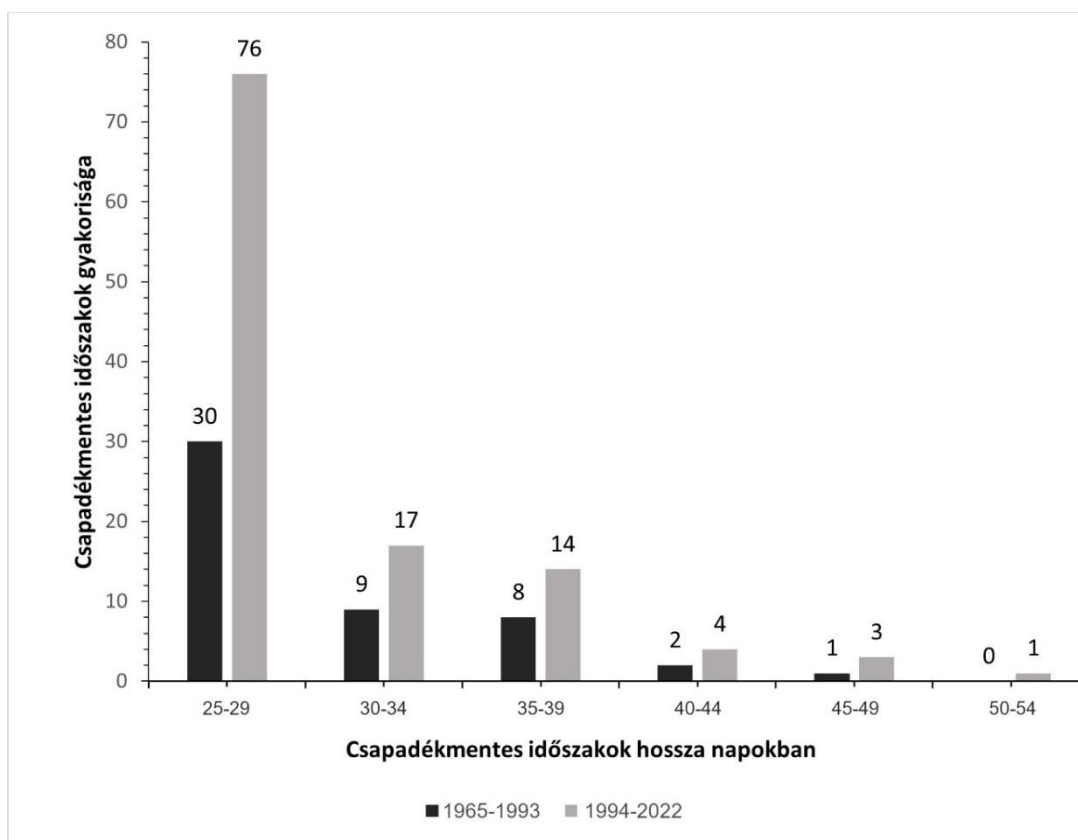
Figure 4. Rainfall total in the vegetation period (April to September) from the data of 16 hydrometeorological measuring stations (TIVIZIG 2024)

Az országos éves csapadékösszegek sem mutatnak csökkenést a HungaroMet elemzése szerint, az elmúlt évtizedekben nem szignifikáns növekedés figyelhető meg. Ez a növekedés az 1991 és 2020 közötti átlagos csapadékösszegek százalékos eltéréseinek idősorában is kimutatható. A HungaroMet eredményei azt is kimutatták, hogy a csapadékmennyiségek hosszú távú trendjei szezonálisak. Az 1901-től kezdődő idősorokban a négy évszak csapadékösszegeinek időbeli változékonysága sokkal nagyobb, mint az éves anomáliák idősoraié. A havi csapadékösszegek változása még nyilvánvalóbb tendenciákat mutat (HungaroMet 2021, Lakatos és társai 2021). Egy későbbi tanulmányban érdemes lenne megvizsgálni az 1964-2022 évek közötti időszak különböző csapadékeseményeit, évszakos vagy havi bontásban, a TIVIZIG területén.

Harmadik lépésként összehasonlítottuk az 1965-1993 és 1994-2022 közötti időszakokat. Meghatároztuk mindkét esetben a leghosszabb egymást követő csapadékmentes időszakok éves és azon belül a vegetációs időszakokra eső gyakoriságát. Feltételeztük, hogy a rendkívül hosszú csapadékmentes időszakok eloszlása szignifikánsan különbözik a két időszakban. Rendkívül hosszú csapadékmentes időszaknak tekintettük a 25 napos vagy annál hosszabb száraz időszakot. A csapadékmentes időszakok hossza 0 és 50 nap között mozgott, amelyeket növekvő tartományokba osztottunk. Az intervallumok határai: 25-29 nap, 30-34 nap, 35-39 nap, 40-44 nap, 45-49 nap, 50-54 nap. Az intervallumokba eső rendkívül hosszú csapadékmentes időszakok gyakoriságát hisztogramon ábrázoltuk (5. ábra), külön az 1965-1993 közötti időszakban és külön az 1994-2022 közötti időszakban.

A vizsgálathoz F-próbát használtunk, amely alkalmas két adatsor varianciái közötti szignifikáns különbségek megállapítására, feltételezve, hogy mindkét minta normál eloszlással közelíthető (Schumacker és Tomek 2013). Az összes állomás adatait figyelembe véve a kapott eredmények szignifikáns különbséget mutattak az 1965-1993 és az 1994-2022 közötti csapadékmentes napok gyakoriság eloszlásában: $\alpha=0,05$; átlag $m=31,67$ nap; $D=2207,47$ nap; $n=6$; $df=5$; $P=0,0195$; $F_{krit, jobb}=5,05$, azaz 95%-os konfidencia mellett a megadott hat db száraz periódus-intervallum (25-29 nap, 30-34 nap, 35-39 nap, 40-44 nap, 45-49 nap, 50-54 nap) esetére az F-próba értéke szignifikáns különbséget jelez a két időszakra. (Az eredményben α jelöli a szignifikanciaszintet, m a vizsgált csapadékmentes időszakok átlagos hosszát, D a csoportok közötti szórás négyzetösszegét ami az összvariancia, n a mintaméretet, df a szabadsági fokok számát, $F_{krit, jobb}$ a küszöbértéket.) Az aktuális csapadékintázat mellett a historikus adatok is jelentős szerepet játszanak az aszályok kialakulásában: egy jelentősen aszályos év után kevésbé szélsőséges meteorológiai viszonyok olyan vízkészleteket biztosíthatnak, amelyek felerősíthetik az egymást követő aszályos év káros hatásait. Hasonlóképpen, az előzmények alapvető szerepet játszanak a belvízi utak kialakulásában.

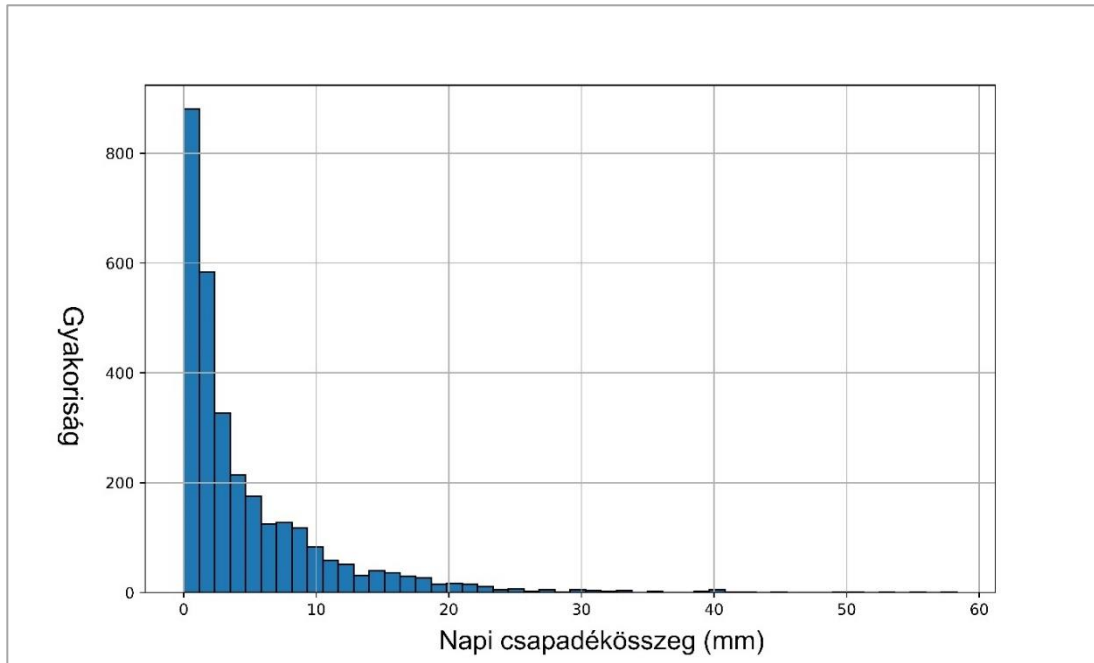
Statisztikailag tehát kimutatható, hogy a csapadékmentes időszak hossza jelentősen megnő az 1994-2022 közötti időszakban az 1965-1993 közötti időszakhoz képest. Ez összhangban van a HungaroMet országos méréseinek adataival.



5. ábra. A legalább 25 napos csapadékmentes időszakok gyakorisága 5 nap hosszúságú intervallumonként 1965-1993 és 1994-2022 között. Csapadékmentes napoknak tekintettük azokat a napokat, amikor a csapadékösszeg nem érte el a 0,1 mm-t.
Figure 5. Frequency of periods without rainfall of at least 25 days per 5-day interval between 1965-1993 and 1994-2022. Rainfall-free days were defined as days when the rainfall total was less than 0.1 mm.

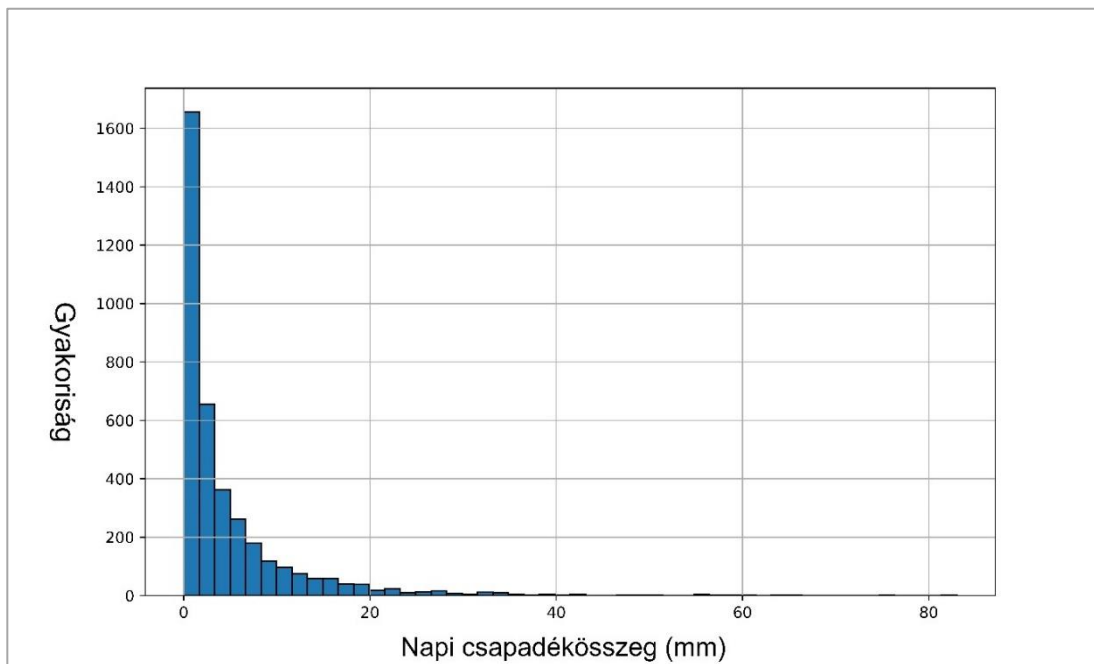
A 16 állomás közül véletlenszerűen kiválasztott biharnagybajomi állomáson az 1965-1993 és az 1994-2022 közötti időszakokra vonatkozóan összehasonlítottuk a csapadékos napok csapadék mennyisége szerinti eloszlását (6-7. ábra). Az elemzés úgy készült, hogy mindkét időintervallumban hisztogramot készítettünk a csapadékos napok számára attól függően, hogy hány mm csapadékot mértek az adott napon, tehát a dobozolás alapja a napi csapadék mennyisége volt. A két hisztogram (eloszlás) összevetésére kétmintás Kolmogorov-Szmirnov-tesztet alkalmaztunk. A Kolmogorov-Szmirnov-tesztre azért

esett a választásunk, mert eloszlásfüggetlen, így a segítségével nem csak normális eloszlásból származó adatok eloszlásai hasonlíthatók össze (Janssen és Laatz 2007). A teszt eredménye szignifikáns különbséget mutatott ki ($K-S=0,0550$, $P\text{-érték}=7,581 \cdot 10^{-5}$). A második időszakban a csapadékmentes napok száma (amikor a napi csapadékösszeg nem érte el a 0,1 mm-t) majdnem megduplázódott. Ugyanakkor a szélsőségesen csapadékos napok száma nőtt. Míg az első időszakban a napi rekord csapadékmennyiség 58,3 mm volt, addig a második időszakban 83,0 mm.



6. ábra. A csapadékos napok gyakorisága 1965 és 1993 között a biharnagybajomi állomáson (Julius AI Python program nyelvvel készített ábra)

Figure 6. Frequency of rainy days between 1965 and 1993 (Generated by Julius AI with Python programming language)



7. ábra. A csapadékos napok gyakorisága 1994 és 2022 között a biharnagybajomi állomáson (Julius AI Python program nyelvvel készített ábra.)

Figure 7. Frequency of rainy days between 1994 and 2022 (Generated by Julius AI with Python programming language)

ÖSSZEFOGLALÁS

Összefoglalva, a vízügyi szakemberek számára a jövő kihívása az lesz, hogy olyan műszaki megoldásokat dolgozzanak ki, amelyekkel a vízfelesleg és a vízhiány szélsőséges jelenségeit egyaránt mérsékelni lehet. Egyelőre ugyan az évi csapadékmennyiség és a vegetációs időszak csapadékmennyisége nem változik szignifikánsan, de a száraz periódusok száma és hossza szignifikánsan nőtt az elmúlt mintegy 30 évben, így a probléma felvetése valós. A gyakoribb szélsőséges időjárási események súlyos károkat okoznak, és ennek megelőzésére jól megtervezett alkalmazkodási intézkedéseket kell hozni. A hathatós intézkedések jól működő csapadék- és aszály-előrejelző rendszerek hozzáférhetőségén alapulnak. Ilyen például a minden agrárgazdálkodó számára elérhető nyílt online felület, az aszálymonitoring-hálózat, amely a vízügyi ágazat által létrehozott újszerű, komplex vízhiány-előrejelző rendszer. A csapadékszélsőségeket a gazdálkodási tervek és gyakorlatok megváltoztatása mellett ezt a mezőgazdasági biztosítások szempontjából is érdemes figyelembe venni. Ez az uniós szintű mezőgazdasági kockázatkezelési rendszerrel összefüggésben is fontos lehet, amely jelentős uniós költségvetéssel támogatja a mezőgazdasági biztosítási díjakat.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A közleményben bemutatott kutatás a Széchenyi Terv Plusz program keretében, az RRF 2.3.1 21 2022 00008 projekt támogatásával valósult meg.

IRODALOMJEGYZÉK

Alexander, L.V., Zhang, X., Peterson, T.C., Caesar, J. (2006). Global Observed Changes in Daily Climate Extremes of Temperature and Precipitation. *Journal of Geophysical Research*, p. 11, 5, pp. 1-22. <https://www.doi.org/10.1029/2005JD006290>

Bartholy, J., Pongrácz, R. (2005). Tendencies of extreme climate indices based on daily precipitation in the Carpathian Basin for the 20th century. *Időjárás*, p. 109, 1, pp. 1-20.

Bartholy, J., Pongrácz, R. (2007). Regional Analysis of Extreme Temperature and Precipitation Indices for the Carpathian Basin from 1946 to 2001. *Global and Planetary Change*, V. 57, I. 1-2, pp. 83-95. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2006.11.002>

Bartholy J., Barcza Z., Bihari Z.; Lakatos M.; Mészáros R., Pieczka I., Pongrácz R., Práger T., Radics K., Szerkesztők: Bartholy J., Pongrácz R. (2013). *Klímaváltozás. Eötvös Loránd Tudományegyetem*, Budapest, pp. 1-180.

Buzási A. (2021). *Climate Vulnerability and Adaptation Challenges in Szekszárd Wine Region, Hungary. Climate* 9(2):25. <https://www.doi.org/10.3390/cli9020025>

Czigány Sz., Pirkhoffer E., Lóczy D., Balatonyi L. (2013). *Flash flood analysis for Southwest-Hungary. Springer Geography*, pp. 67-82., ISBN: 978-94-007-6300-5

Donat, M.G, Alexander, L.V., Yang, H., Durre, I., Vose, R., Dunn, R.J.H., Willett, K.M., Aguilar, E., Brunet, M., Caesar, J., Hewitson, B., Jack, C., Klein Tank, A.M.G., Kruger, A.C., Marengo, J.A., Peterson, T.C., Renom, M., Oria Rojas, C., Rusticucci, M., Salinger, M.J., Sekele, S.S., Srivastava, A.K., Trewin, B., Villarroya, C., Vincent, L.A.,

Zhai, P., Zhang, X., Kitching, S. (2013). Updated Analyses of Temperature and Precipitation Extreme Indices since the Beginning of the Twentieth Century: The HadEX2 Dataset. *Journal of Geophysical Research*. p. 118, 5, pp. 2098-2118. <https://www.doi.org/10.1002/jgrd.50150>

Field, C.B., Barros, V., Stocker, T.F., Qin, D., Dokken, D.J., Ebi, K.L., Mastrandrea, M.D., Mach, K.J., Plattner, G.K., Allen, S.K., Tignor, M., Midgley, P.M. (eds.) (2012). *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, Cambridge University Press, p. 582. <https://www.doi.org/10.1017/cbo9781139177245>

Gavrilov, M.B., Radakovic, M., Sipos, Gy., Mezősi, G. (2020). Aridity in the Central and Southern Pannonian Basin. *Atmosphere* 11(12). pp. 1-19.

Green, J.I., Nelson, E.J. (2002). Calculation of Time of Concentration for Hydrologic Design and Analysis Using Geographic Information System Vector Objects. *Journal of Hydroinformatics*: p. 4, 2, pp. 75-81. <https://www.doi.org/10.2166/hydro.2002.0009>

Hoffmann L., Lakatos M. (2019). Növekvő csapadékintenzitás, magasabb mértékadó csapadékok a változó klímában. In: Bíró T. (ed.): *Országos Települési Csapadék-víz-gazdálkodási Konferencia. Tanulmányok. Dialóg Campus Kiadó, Budapest*, pp. 11-19.

HungaroMet (2021). Éves és évszakos csapadékösszegek változása Magyarországon. Internet: https://www.met.hu/eghajlat/eghajlatvaltozas/megfigyelt_hazai_valtozasok/homerseklet_es_csapadektrendek/csapadekosszegek/ (08.05.2024)

Ilyés Cs., Szűcs P., Turai E. (2019). Csapadékösszegek és talajvízszint idősorok spektrális elemzése. In: Bíró T. (ed.): *Országos Települési Csapadék-víz-gazdálkodási Konferencia. Tanulmányok. Dialóg Campus Kiadó, Budapest*, pp. 21-27.

Janssen J., Laatz W. (2007). *Statistische Datenanalyse mit SPSS für Windows. Springer Gabler Kiadó, Wiesbaden*, p. 569.

Kis A. (2018). *Csapadékextrémumok múltbeli tendenciái, jövőre becsült változásai és hidrológiai hatásai. Doktori értekezés, ELTE, Természettudományi Kar, Meteorológiai Tanszék, Budapest*, pp. 1-112. Internet: https://edit.elte.hu/xmlui/bitstream/handle/10831/41469/Disszertacio_kisanna_2018.pdf;jsessionid=BB7388EC0073A36D1A01F37A6CA78377?sequence=1 (08.05.2024)

Kiss T., Hetes, Zs., Füzi T. (2019). Az átlaghőmérséklet és a csapadékmennyiség alakulása Mosonmagyaróváron. *Statisztikai Szemle*: p. 97, 6, pp. 568-593.

Klein Tank, A.M.G., Können, G.P. (2003). Trends in Indices of Daily Temperature and Precipitation Extremes in Europe, 1946-1999. *Journal of Climate* 16(22), pp. 3665-3680. [https://www.doi.org/10.1175/1520-0442\(2003\)016<3665:TIHODT>2.0.CO;2](https://www.doi.org/10.1175/1520-0442(2003)016<3665:TIHODT>2.0.CO;2)

Kristóf E., Pongrácz R., Bartholy J. (2017). Távkapcsolati rendszerek hatása a Kárpát-medence térségére. *HUNGEO 2017: "Bányászat és környezet – harmóniában"*: Magyar földtudományi szakemberek XIII. világtá-

lálkozója. Program- és előadáskivonatok. Konferencia helye, ideje: Pécs, Magyarország, 2017.08.16.-2017.08.20. Budapest, Magyarhoni Földtani Társulat, pp. 75-76.

KSH (2024). Központi Statisztikai Hivatal

Lakatos M., Szentimrey T., Birszki B., Kövér Zs., Bihari Z., Szalai S. (2007). Changes of Temperature and Precipitation Extremes following Homogenization. *Acta Silvatica et Lignaria Hungarica: An International Journal in Forest, Wood and Environmental Sciences*, 3 (1), pp. 87–95.

Lakatos M., Bihari Z., Izsák B., Szentes O. (2021). Globális és hazai éghajlati trendek, szélsőségek változása: 2020-as helyzetkép. *Scientia et Securitas* 2(2), pp. 164-171. <https://www.doi.org/10.1556/112.2021.00037>

McBean, G.A. (2004). Climate Change and Extreme Weather: A Basis for Action. *Natural Hazards* 31(1), pp. 177-190.

<https://www.doi.org/10.1023/B:NHAZ.0000020259.58716.0d>

McCuen, R.H. (2009). Uncertainty Analysis of Watershed Time Parameters. *Journal of Hydrologic Engineering* 14(5). [https://www.doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0000011](https://www.doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000011)

Mesterházy I., Pongrácz R., Ladányi M. (2015). A vegetációs időszak számításának módszerei az 1951-2100 modellezett időszakban. In: Kovács E., Kúti Zs., Puskás J. (ed.) 7. Szőlő és Klíma Konferencia. Szombathely, Magyarország, p. 98, pp. 83-89., p.7.

SZERZŐK



SZÁM DOROTTYA növényorvos és agrármérnök tanár végzettséget szerzett a Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetemen (2022), jelenleg a Nemzeti Közszerződési Egyetem munkatársa, a Pécsi Tudományegyetem Biológiai és Sportbiológiai Doktori Iskolájának hallgatója. A Magyar Hidrológiai Társaság tagja 2022 óta.



HETESI ZSOLT fizika oklevelet és PhD fokozatot szerzett az ELTE TTK-n, jelenleg egyetemi docens a Nemzeti Közszerződési Egyetem Víz tudományi Karán, tudományos főmunkatárs a Pécsi Tudományegyetem Matematikai és Informatikai Intézetében. Kutatási területe a fenntarthatóság, sztochasztikus folyamatok modellezése a környezettudományban.



BÓDI TIBOR építőmérnöki BSc oklevelet szerzett a Nemzeti Közszerződési Egyetem Víz tudományi Karán 2023-ban. Szakdolgozatát a Tiszántúli Vízügyi Igazgatóság területének csapadékmintázatairól és vízrajzáról írta.



MAROSI ZÓÁRD IVOR okleveles építőmérnök és vízépítő szakmérnök, jelenleg a Tiszántúli Vízügyi Igazgatóság megbízott igazgatója és műszaki igazgatóhelyettese. Szakterületei a vízgazdálkodás, vízrajz, hidrológia. Részt vett a vízgyűjtő-gazdálkodási tervek készítésében, a Tisza-Körös-völgyi Együttműködő Vízgazdálkodási Rendszer üzemeltetési szabályzatának felülvizsgálataiban, a hidrológiai adatok kezelését segítő Vízrajzi Modul ágazati szoftver kifejlesztésében. A Magyar Hidrológiai Társaság tagja 1998 óta.

Pieczka, I., Pongrácz, R., Bartholy, J. (2011). Expected Trends of Regional Climate Change for the Carpathian Basin for the 21st Century. *International Journal of Environment and Pollution* 46 (1-2), pp. 6-17. <https://www.doi.org/10.1504/IJEP.2011.042605>

Pongrácz R., Bartholy J., Kis A. (2014). Estimation of Future Precipitation Conditions for Hungary with Special Focus on Dry Periods. *Időjárás* 118(4), pp. 305-321.

Schumacker, R., Tomek, S. (2013). Understanding Statistics Using R. Springer, New York, USA. https://www.doi.org/10.1007/978-1-4614-6227-9_11

Stott, P. (2016). How climate change affects extreme weather events. *Science* 352(6293), pp. 1517–1518. <https://www.doi.org/10.1126/science.aaf7271>

Szám D., Keve G., Fekete Á., Hetesi, Zs. (2024). Changing rainfall patterns & their impact on cereal crops in the Szentes district. *Időjárás* (in press)

TIVIZIG (2024). Tiszántúli Vízügyi Igazgatóság (ONLINE), <http://www.tivizig.hu/content/documents/VKGT.pdf>

VKGT (2017). Vízkészlet-gazdálkodási Térségi Terv a Tiszántúli Vízügyi Igazgatóság területére Elérhető: http://www5.tivizig.hu/content/documents/VKGT/VKGT_TIVIZIG.pdf

Az ANFIS mesterséges neurális hálózat lehetséges bemeneti adatainak vizsgálata csapadék-lefolyás modellezés esetén

Négyesi Klaudia¹, Nagy Eszter Dóra²

¹ Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszék, doktorandusz (e-mail: negyesiklaudia@edu.bme.hu)

² Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszék, adjunktus (e-mail: nagy.eszter@emk.bme.hu)

DOI: 10.59258/hk.18334



Kivonat

Napjainkban a mesterséges neurális hálózatok használata széleskörűen elterjedt számos tudományterületen, így a hidrológia területén is egyre több kutatás készül az alkalmazhatóságuk vizsgálatára. Csapadék-lefolyás modellezés esetén az egyik legígéretesebb hálózat az úgynevezett adaptív neuro-fuzzy következtető rendszer, avagy az ANFIS (*Adaptive Neuro Fuzzy Inference System*), melynek előnye, hogy hatékonyan ötvözi mesterséges neurális hálózatok taníthatóságát a fuzzy rendszerek rugalmas szerkezetével. Az ANFIS alkalmazása lehetővé teszi a nem lineáris környezeti folyamatok modellezését és a nem lineáris komponensek összefüggéseinek azonosítását, többek között az általunk alkalmazott Takagi-Sugeno típusú rendszer segítségével. Jelen kutatás során kilenc-kilenc eltérő input adatsorral kalibrált ANFIS alapú csapadék-lefolyás modell eredményeit hasonlítottuk össze a Torna-patak és az Arany-patak vízgyűjtőire. A modelleket MATLAB környezetben építettük fel az „anfis” függvény használatával. A vizsgált input adatsorok között szerepelt a csapadék, a megelőző napi vízhozam, a megelőző csapadék index, a hőmérséklet és a potenciális párolgás. A bemeneti adatok előfeldolgozása során megtörtént az adatsorok ellenőrzése, illetve standardizálása. A felépített modellek két csoportra oszthatóak: hat-hat modell esetében figyelembe vettük, további három-három modell esetében elhagytuk a vízhozam adatok bemeneti adatsorként történő felhasználását. A modellek érzékenységvizsgálata alapján a kezdeti kapcsolatok optimális értéke 2, amíg a maximális tanítási körök értékére 500 elegendőnek bizonyult. A mintaterületekre futtatott kilenc-kilenc modell eredményei alapján megállapítható, hogy az ANFIS alapú csapadék-lefolyás modellek megfelelő modellhatékonysággal rendelkeznek a kalibráció során, azonban a modellek teljesítménye a validáció során ettől lényegesen elmarad. A vízhozam adatokat inputként alkalmazó, illetve nem alkalmazó modellek esetén is azon modellek teljesítettek a legjobban, melyek az összes vizsgált input adatsort tartalmazták. Azonban a modellek bizonyos időpillanatokban kiugró értékeket eredményeztek, melyre a lehetséges magyarázat a mesterséges neurális hálózat számítási módszerében vagy szerkezetében keresendő.

Kulcsszavak

Adaptív Neuro-Fuzzy Következtető Rendszer, ANFIS, csapadék-lefolyás modellezés, mesterséges neurális hálózat, Arany-patak, Torna-patak.

Analysis of input combinations used by the ANFIS artificial neural network for rainfall-runoff modeling

Abstract

Artificial neural networks (ANNs) are gaining popularity across various scientific fields. Thus, studies to analyze the applicability of ANNs have also been appearing within the field of hydrology. In the case of rainfall-runoff modeling, one of the most promising networks is the Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS), which effectively combines the learning capability of neural networks and the flexible structure of fuzzy systems. ANFIS can model nonlinear phenomena and identify nonlinear components using, for example, the currently applied Takagi-Sugeno type system. In this study, nine-nine ANFIS-based rainfall-runoff models with different input datasets were compared for the catchments of Torna- and Arany-creek. The models were built using the MATLAB software and the "anfis" function. The input datasets included precipitation, antecedent discharge, antecedent precipitation index, temperature, and potential evaporation. The preprocessing of the data included the examinations of quality and standardization. The models can be divided into two groups: six-six models included antecedent discharge as an input, while three-three models did not use the antecedent discharge data. The sensitivity analysis of the models revealed that an optimal number of initial FIS was 2, and 500 training epochs were sufficient. Based on the results from the nine-nine models, ANFIS-based rainfall-runoff models demonstrated adequate model efficiency during calibration, but their performance decreased during validation. Whether the models used the discharge time-series as an input or not, the best-performing models were those that included all the examined input datasets. However, some models produced outlier values at certain time steps, which could be a result of the computational methods or the structure of the neural network.

Keywords

Adaptive Neuro Fuzzy Inference System, ANFIS, rainfall-runoff modeling, artificial neural network, Arany-creek, Torna-creek.

BEVEZETÉS

Napjainkban a mesterséges neurális hálózatok alkalmazása széleskörűen elterjedt minden tudományterületen, így

a hidrológiai alkalmazásukra is egyre több példát láthatunk. Ezen hálózatok előnye a nemlineáris folyamatok leírása, a gyors működés, a bemeneti adatok megválasztása-

nak lehetősége, illetve a modellezett idősor leképezésének folytonossága és differenciálhatósága. Azonban hátrány az adatigény, hiszen a kapcsolat pontos jellemzéséhez a lehető leghosszabb idősorokra van szükség, illetve a black-box működési elv, ami nem teszi lehetővé a folyamatok teljes megértését. További hátrány a korlátozott extrapolációs képesség, ugyanis amennyiben a tanítási idősor nem rendelkezik ritkán előforduló, de kiugró értékekkel, a hálózat nem fogja tudni leírni ezen eseteket a tesztelés során (*Fülöp és Józsa 1998*). A hidrológiai modellezésben az egyik legígéretesebb mesterséges neurális hálózat az úgynevezett adaptív neuro-fuzzy következtető rendszer, avagy az ANFIS (*Adaptive Neuro Fuzzy Inference System*) (*Chang és társai 2018*). Az ANFIS a mesterséges neurális hálózatok hatékony taníthatóságát ötvözi a rugalmas szerkezettel. Mindemellett képes a nem lineáris függvények modellezésére és a nem lineáris komponensek azonosítására a Takagi-Sugeno típusú rendszer segítségével. A tanítási algoritmus globális, melynek alapja a legkisebb négyzetek módszere (*Ang és társai 2023*). Előnye, hogy amellett, hogy rendelkezik a neurális hálózatok taníthatósági képességeivel, képes egy átláthatóbb struktúrát biztosítani, amely bizonyos mértékig lehetővé teszi a fizikai folyamatok interpretálását is (*Ang és társai 2023*).

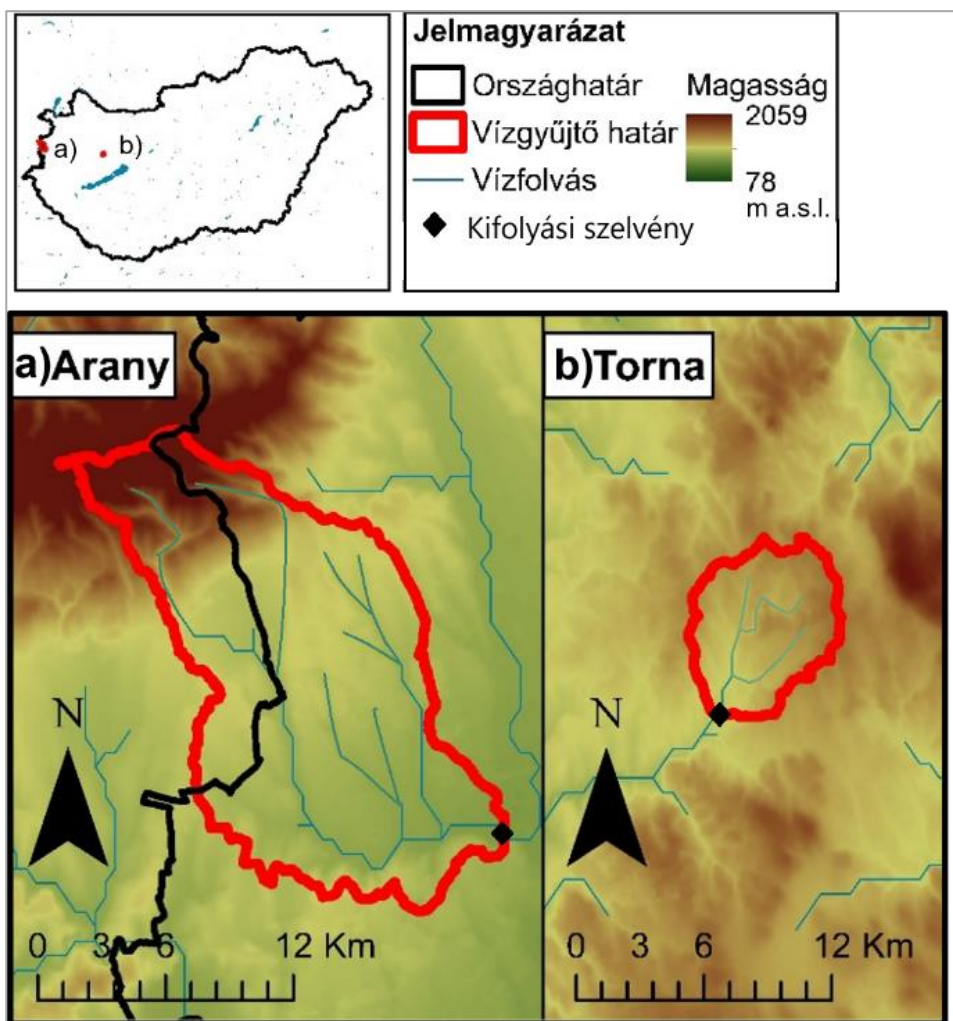
Számos nemzetközi publikáció alapján az ANFIS alapú hidrológiai modellek eredményei összevethetőek a regressziós (*Nayak és társai 2004, Ang és társai 2023, Rathnayake és társai 2023*), konceptuális (*Chang és társai 2016, Chang és társai 2018, Liptay 2022*) vagy akár fizikai (*Talei és társai 2010, Talei és Chua 2012, Talei és társai 2013*) modellek hatékonyságával, avagy képesek azonos vagy akár jobb hatékonyságot elérni. Az ANFIS alapú csapadék-lefolyás modellek alkalmasabbnak bizonyultak a tetőző vízhozamok becslésére (*Nayak és társai 2004, Tayfur és társai 2006, Wang és társai 2009, Talei és társai 2010*) az említett modellekhez képest, azonban ezen mesterséges neurális hálózat alkalmazása számos kihívást is jelent. Ezen kihívások közé tartozik, hogy a modellezés során alapvető fontosságú az adatok előzetes feldolgozása, az input adatok megválasztása, a tanítási, validálási és tesztelési idősor kijelölése, a hosszú-idejű változások figyelembevétele, a modellezett folyamatok értelmezhetősége és a paraméterek meghatározása (*Ang és társai 2023*).

A vizsgálat célja az ANFIS mesterséges neurális hálózat alkalmazhatóságának elemzése két magyarországi

vízgyűjtő csapadék-lefolyás modellezése során, melynek részét képezik az ANFIS korábbiakban ismertetett kihívásai különös tekintettel az input adatok megválasztására. Mivel az input adatok megválasztása és feldolgozása alapvetően meghatározza a modell hatékonyságát (*Talei és társai 2010*), a kutatás során mintaterületenként öt lehetséges bemenő adat 9 alternatív kombinációját vizsgáltuk mintaterületenként, ANFIS alapú csapadék-lefolyás modellek segítségével. A modellezéshez a MATLAB szoftver „anfis” függvénye kerül alkalmazásra. Az eredmények alapján meghatároztuk a javasolt input adatokat, illetve a neurális hálózat segítségével előállított modellek hatékonyságát.

VIZSGÁLT VÍZGYŰJTŐK

A modellezésre két kisvízgyűjtőt választottunk ki, melyek az Arany-patakhöz (Olad) és Torna-patakhöz (Városlőd) tartoznak. Ennek oka, hogy a kisvízgyűjtők hidrológiai modellezése kihívást jelenthet fizikai vagy konceptuális modellekkel, így egy mesterséges neurális hálózattal történő modell megoldást nyújthat, amennyiben rendelkezésre állnak a szükséges idősorok. A választott vízgyűjtők kellő adatellátottsággal rendelkeztek az ANFIS alapú csapadék-lefolyás modellek vizsgálatához, mely a szükséges vízhozam, csapadék, hőmérséklet és potenciális párolgás idősorokat jelentette. A vízgyűjtők és elhelyezkedésük az *1. ábrán* látható. A vízgyűjtők az ország nyugati részén találhatóak, az Arany-patak a Nyugat-dunántúli Vízügyi Igazgatóság területéhez, amíg a Torna-patak a Közép-dunántúli Vízügyi Igazgatóság területéhez tartozik. Az Arany-patak 106 km²-es vízgyűjtőterülettel, amíg a Torna-patak 20 km²-es vízgyűjtőterülettel rendelkezik. A vízgyűjtőkön jellemző átlagos esés 2,0% a Torna-patak, illetve 2,45% az Arany-patak esetén. A leghosszabb lefolyási hossz 9 km a Torna-patak vízgyűjtőjén, amíg 42 km az Arany-patak vízgyűjtőjén. A jellemző éves csapadék-összeg 650-750 mindkét vízgyűjtő esetén. A vizsgált vízgyűjtők területén a vályog a legmeghatározóbb talajképző kőzet, azonban Torna-patak esetén homokos vályog is nagymértékben található az AGROTOPO adatbázis alapján (*AGROTOPO 2019*). A területhasználatot tekintve az erdős területek aránya mindkét vízgyűjtő esetén jelentős, azonban az Arany-patak esetén számottevőek a mesterséges felületek is, amíg a Torna-patak esetén a mezőgazdasági területek le lehetők fel nagyobb mértékben (*CORINE 2019*).



1. ábra. A vizsgált vízgyűjtőterületek
Figure 1. The examined catchments

FELHASZNÁLT ADATOK

A kutatás során a modellek output adatsora a vízhozam (Q), lehetséges input adatsorai pedig az egy időlépéssel korábbi vízhozam ($Q(t-1)$), a csapadék (P), a hőmérséklet (T), a potenciális párolgás (PET) és a megelőző csapadék index (*Antecedent Precipitation Index, API*). A tanulmányhoz felhasználtuk az Arany-patak és a Torna-patak vízhozam idősorait 2001. január 1-től 2017. december 31-ig Olad és Városlőd állomásokra. Az adatsorok változó (átlagosan 15 perces) időbeli felbontással rendelkeztek, azonban a vizsgálathoz napi időbeli felbontással kerültek feldolgozásra hibaszűrő természete miatt. Jelen tanulmányban az ECMWF (*European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*) reanalízis (*C3S 2019*) adatbázist használtuk fel. Az egyes szcenáriókban felhasznált hőmérséklet és a potenciális párolgás idősorai a felszíni mérőállomásokról származtak (*ODP 2023*). A vizsgálatok részét képezte a megelőző csapadék index alkalmazása, melynek számítása az (1) egyenlet alapján történt:

$$API = \sum_{t=1}^M P_t k^t, \quad (1)$$

ahol P_t a csapadék t választott időablak esetén, k pedig egy tapasztalati érték, mely 0,8-0,98 (*Koehler és Linsley 1951*) közötti értéket vehet fel. A megelőző csapadék index információt szolgáltat a vízgyűjtőn található talaj telítettség állapotáról. Jelen kutatás során az index 7 napos időablakra

vonatkozó értékét alkalmaztuk, $k = 0,98$ konstans esetén szakirodalom alapján (*Kontur és társai 2003*). A mesterséges neurális hálózatok alkalmazása során elengedhetetlen lépés az adatok standardizálása, mely a (2) formula alkalmazásával történt (*Van Ooyen és Nienhuis 1992*):

$$x_n = f_{min} + \frac{(x_i - x_{min})}{(x_{max} - x_{min})} \cdot (f_{max} - f_{min}), \quad (2)$$

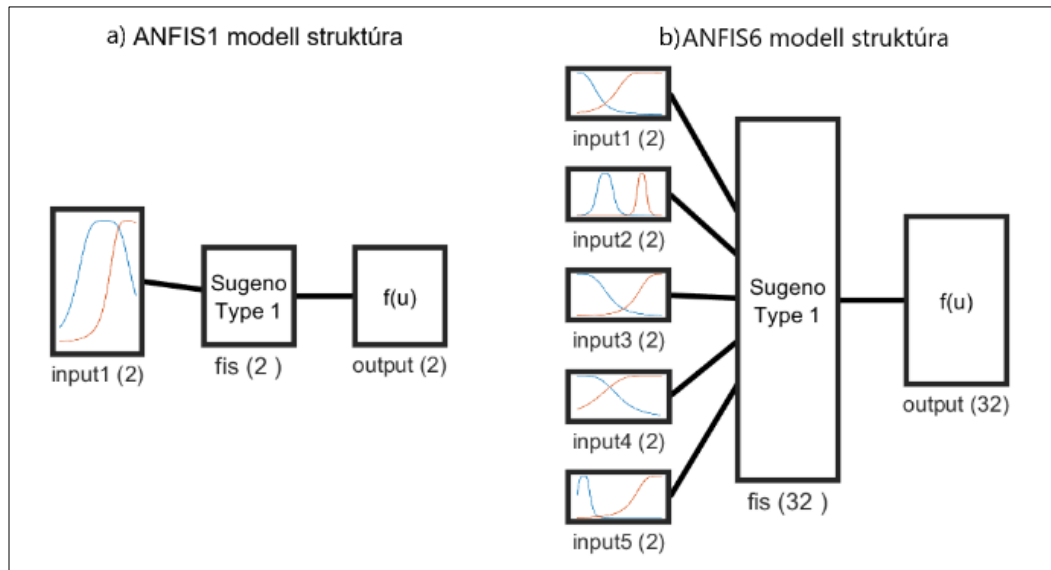
ahol a x_n standardizált adat, x_i a mért adat, f_{max} és f_{min} a kívánt értéktartomány, x_{min} és x_{max} a minimum és maximum értékei az adatsornak. Az értéktartományt $f_{min} = 0,1$ és $f_{max} = 0,9$ között vettük fel. A mesterséges neurális hálózatok esetén szintén gyakran alkalmazott adatelőkészítési eljárás a különböző szűrők alkalmazása a zajjal terhelt adatsorok esetén. Jelen kutatásban a napi időbeli felbontással rendelkező adatsorok esetén nem alkalmaztunk adatszűrést, ugyanis a kezdeti vizsgálatok során az adatok szűrése nem befolyásolta jelentős mértékben a modellek teljesítményét.

MÓDSZERTAN

A kutatás során az ANFIS modellek felépítése és alkalmazása MATLAB szoftver segítségével történt. Az alkalmazott függvény az „anfis”, melynek tanítási algoritmus hibrid, a legkisebb négyzetek módszerét és a hibavisszaterjesztéses gradiens módszert ötvözi. A fuzzy következtető

rendszer (FIS) automatikusan generált a függvény alkalmazása során az úgynevezett „grid partition” módszer segítségével (MATLAB 2024). A függvény futtatása során a bemeneti és kimeneti adatok alapján automatikusan történik a szabályok detektálása és a lineáris, il-

letve nem lineáris paraméterek hangolása. A 2. ábrán két generált szerkezet látható az ANFIS1 modell és az ANFIS6 modell példáján, előbbi esetben 1 input alapján 2 szabállyal, utóbbi esetben pedig 5 input alapján 32 szabállyal.



2. ábra. Példa a modellek szerkezetére az ANFIS1 és az ANFIS6 modellek esetén (Torna-patak)
Figure 2. Example of model structure in the case of ANFIS1 and ANFIS6 models (Torna-creek)

A MATLAB „anfis” függvényéhez megadható az input és output adatok tanítási adatsora (training data); egy validációs adatsor (validation data), mely megakadályozza a rendszer túltanítását; a mesterséges neurális hálózat szerkezetét megalapozó kezdeti kapcsolatok száma (initial FIS), illetve a maximális tanítási körök száma (epoch number). A modell érzékenységvizsgálata során a kezdeti kapcsolatok számára 2, 3, 4, 5 és 6 értékeket vizsgáltunk. Minél több a kapcsolati függvény a modellben, annál jobban növekszik a modell komplexitása, mely gyengébb modellteljesítményre vezethet az igazolás során (Chang és társai 2016, Bartoletti és társai 2017). Megvizsgáltuk, hogy hogyan befolyásolja a

modell teljesítményét, amennyiben a maximális tanítási körök értéke 5, 10, 40, 100, 200, 500, illetve 1000. A tanítási időszámok a teljes értéktartományt le kell fednie, hogy elkerülhető legyen a mesterséges neurális hálózattal történő extrapoláció. Ennek megfelelően a Torna-patak esetén 12 év hosszú adatsort, az Arany-patak esetén 13 év hosszú adatsort alkalmaztunk a hálózat tanítására. A Torna-patak esetében 2 évet, az Arany-patak esetén pedig 1 évet jelöltünk ki validációs adatsorként, amíg a modellek tesztelését mindkét esetben 3,5 éves időszor alapján végeztük el. Az 1. táblázatban a vizsgált modellekhez megválasztott input adatsorok láthatóak.

1. táblázat. Az eltérő ANFIS modellekhez választott input adatsorok.
Table 1. Input data of the different ANFIS models.

Modell	Input adatsorok
ANFIS1	Q(t-1)
ANFIS2	P, Q(t-1)
ANFIS3	P, Q(t-1), API
ANFIS4	P, Q(t-1), PET
ANFIS5	P, Q(t-1), PET, T
ANFIS6	P, Q(t-1), PET, T, API
ANFIS7	P, PET
ANFIS8	P, PET, API
ANFIS9	P, PET, API, T

A modell eredményeit négy különböző hibamutatóval vizsgáltuk. A determinációs együttható (R^2) mellett a hidrológiában gyakran alkalmazott Nash-Sutcliffe hatékonyság mutatószámot alkalmaztuk. A Nash-Sutcliffe hatékonyság mutatószám (NSE) értéke $-\infty$ és 1 közötti tartományban mozoghat. Minél közelebb van a számított érték

1-hez, annál jobbnak tekinthető a modell hatékonysága. Számítása a (3) képlet segítségével történik:

$$NSE = 1 - \frac{\sum(Q_{mért} - Q_{szim})^2}{\sum(Q_{mért} - Q_{átlag})^2} \quad (\text{Nash és Sutcliffe 1970}) \quad (3)$$

A négyzetes középérték hiba (RMSE) 0 és $+\infty$ közötti értékeket vehet fel. Minél jobbnak közelít a (4) egyenlet

alapján számított érték 0-hoz, annál nagyobb a modell hatékonysága.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Q_{mért} - Q_{szim}|} \quad (\text{Jackson és társai 2019}) \quad (4)$$

Az átlagos abszolút relatív hiba (MARE) egy adatsor esetén a negatív értékeket figyelmen kívül hagyja, illetve egy konstans érték segítségével kerül el a zérus értékkel járó számítási hibákat. Értéke 0 és $+\infty$ közötti tartományon mozoghat. Amennyiben az (5) egyenlettel számított érték közelítőleg 0, a modell teljesítménye kiváló:

$$MARE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{Q_{szim}^* - Q_{mért}^*}{Q_{mért}^*} \right| \quad (5)$$

2. táblázat. Hatékonyság mutatószámok értékei a különböző ANFIS modellek esetén.

Table 2. Values of model efficiency in the case of the different ANFIS models.

Modell	Folyamat	Arany-patak				Torna-patak			
		NSE	RMSE	R ²	MARE	NSE	RMSE	R ²	MARE
ANFIS1	Kalibráció	0,505	0,009	0,505	0,491	0,749	0,008	0,749	0,106
	Tesztelés	0,300	0,004	0,518	0,357	0,172	0,012	0,279	0,132
ANFIS2	Kalibráció	0,541	0,008	0,541	0,520	0,788	0,007	0,788	0,142
	Tesztelés	0,190	0,004	0,473	0,375	0,034	0,013	0,221	0,150
ANFIS3	Kalibráció	0,672	0,007	0,672	0,530	0,857	0,006	0,857	0,122
	Tesztelés	0,552	0,003	0,594	0,365	-1,563	0,022	0,087	0,145
ANFIS4	Kalibráció	0,532	0,008	0,533	0,317	0,804	0,007	0,804	0,122
	Tesztelés	0,377	0,003	0,607	0,271	0,159	0,012	0,257	0,136
ANFIS5	Kalibráció	0,685	0,007	0,685	0,632	0,843	0,006	0,843	0,109
	Tesztelés	0,360	0,004	0,446	0,501	-9,225	0,043	0,026	0,203
ANFIS6	Kalibráció	0,825	0,005	0,826	0,397	0,916	0,005	0,916	0,104
	Tesztelés	0,420	0,003	0,530	0,343	-3,011	0,027	0,049	0,201
ANFIS7	Kalibráció	0,218	0,011	0,218	1,531	0,105	0,015	0,105	0,771
	Tesztelés	-13,156	0,017	0,001	1,435	0,127	0,013	0,141	0,346
ANFIS8	Kalibráció	0,425	0,009	0,425	1,349	0,379	0,013	0,379	0,692
	Tesztelés	-0,355	0,005	0,113	1,031	0,075	0,013	0,115	0,311
ANFIS9	Kalibráció	0,473	0,009	0,474	1,300	0,439	0,012	0,439	0,651
	Tesztelés	-3,831	0,010	0,040	1,064	0,142	0,013	0,160	0,303

Ahogy az 1. táblázatban is látható volt, az első hat modell esetén vettük figyelembe az egy nappal korábbi vízhozam értékeket, mint bemeneti adat. Az Arany- és a Torna-patak esetén is megfigyelhető, hogy a kalibráció során minden esetben legalább megfelelő (NSE > 0,5), több esetben jó (NSE > 0,7) modellhatékonyságot képesek elérni az ANFIS alapú csapadék-lefolyás modellek. Azonban a tesztelés, avagy igazolás során a modellek többségének hatékonysága jelentősen csökken, ahogyan az a 3. ábrán is látható. Más magyarországi vízgyűjtőn elvégzett kutatás során Liptay (2022) is rávilágított a mesterséges neurális háló alapú csapadék-lefolyás modellek kiemelkedő modellhatékonyságára a tanítási időszak alatt, azonban arra is felhívta a figyelmet, hogy az igazolás során a modellek teljesítménye már sokkal gyengébb.

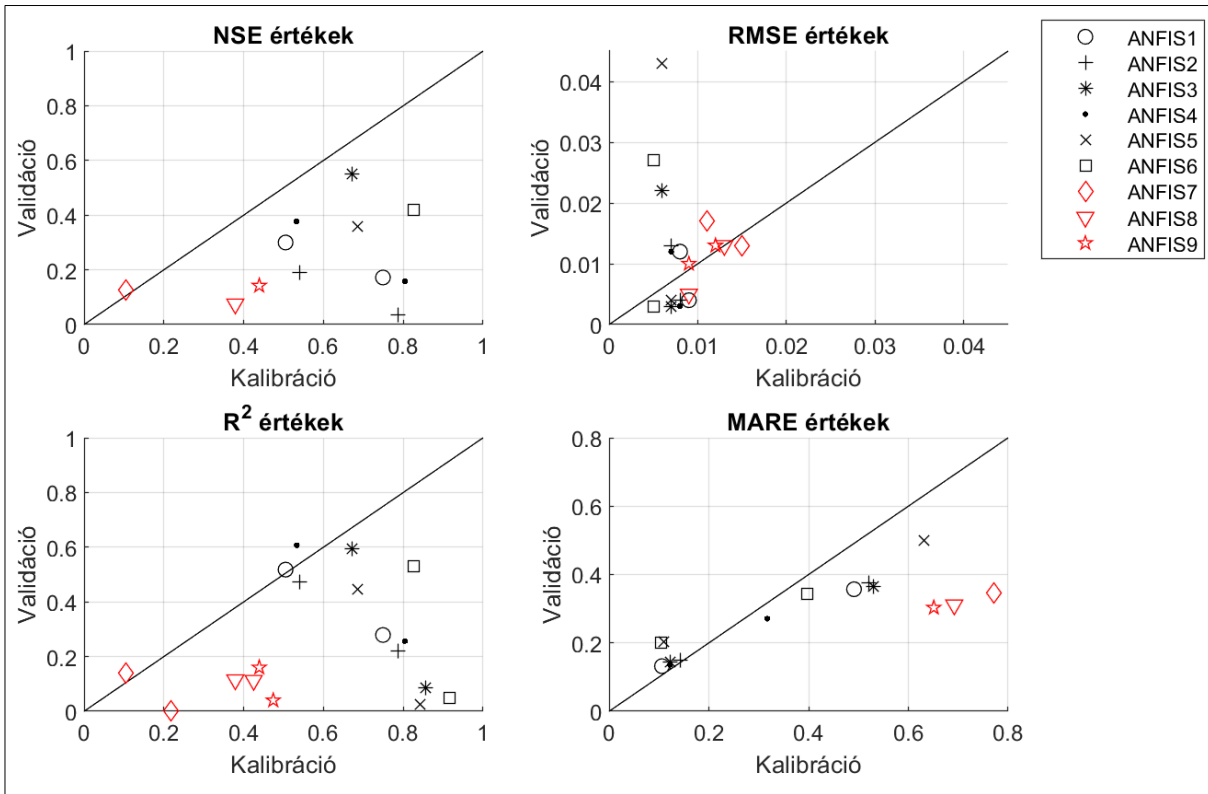
A modellhatékonyság mutatószámai alapján a megelőző vízhozam adatokat tartalmazó modellek közül az

ahol $Q_{szim}^* = Q_{szim} + \frac{Q_{átlag}}{100}$ és $Q_{mért}^* = Q_{mért} + \frac{Q_{átlag}}{100}$ (Pushpalatha és társai 2012).

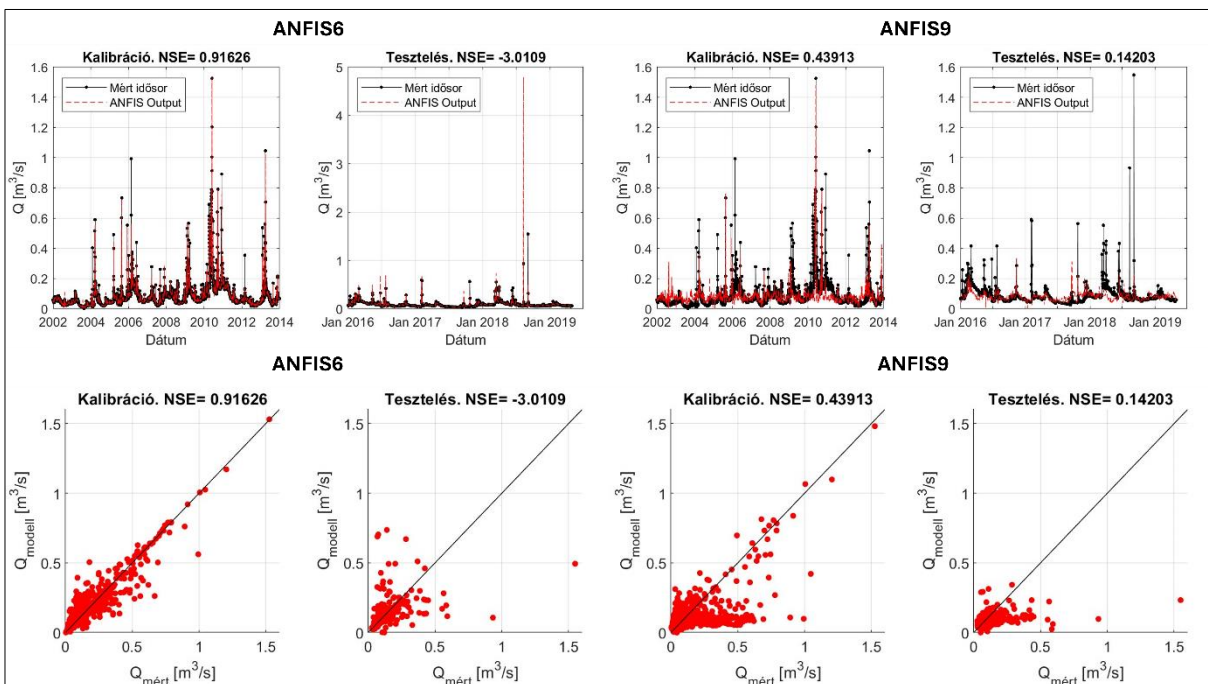
EREDMÉNYEK

Az érzékenységvizsgálat eredményei alapján a kezdeti kapcsolatok optimális száma 2, mivel amikor több kezdeti kapcsolatot alkalmaztunk, az rontotta a modell teljesítményét, valamint növelte a számítási időt is. A maximális tanítási körök értékére 500 elegendőnek bizonyult, biztosítva a modell hatékony konvergenciáját. A 2. táblázatban a kilenc ANFIS modell által elért hatékonyság mutatószámok értékei láthatóak a két vizsgált vízgyűjtő esetén.

ANFIS6, a vízhozamot input adatként nem alkalmazó modellek közül pedig az ANFIS9 az egyik leghatékonyabb modell struktúra a kalibrálás során. Ez a két modell, tekintve a vízhozamot alkalmazó, illetve nem alkalmazó modellek csoportjait, az összes vizsgált input adatsort tartalmazták. A 3. ábra alapján alacsonyabb hatékonysággal azon modellek rendelkeztek, amelyek nem használják a vízhozamot input adatként. A 4. ábrán láthatóak a két modell tanítási és tesztelési idősorai, illetve a modellezett és mért vízhozamok egymáshoz viszonyított értékei a Torna-patak esetén. Az ANFIS6 modell esetén a tanítási időszak alatt kimagasló a modell hatékonysága. A tesztelés során látható, hogy habár a legtöbb tetőzési értéket megközelíti a modell, van olyan árhullám, mely esetén jelentősen felülbecsli a tetőzés értékét a modell. Az ANFIS9 esetén a modell már több esetben alulbecsülte a mért vízhozamot a kalibráció során is. A tesztelés során a legnagyobb tetőzési vízhozamokat nem tudta a modell közelíteni.



3. ábra. Hatékonyság mutatószámok értékei a kalibráció és a validáció esetén.
Figure 3. Values of model efficiency in the case of calibration and validation.



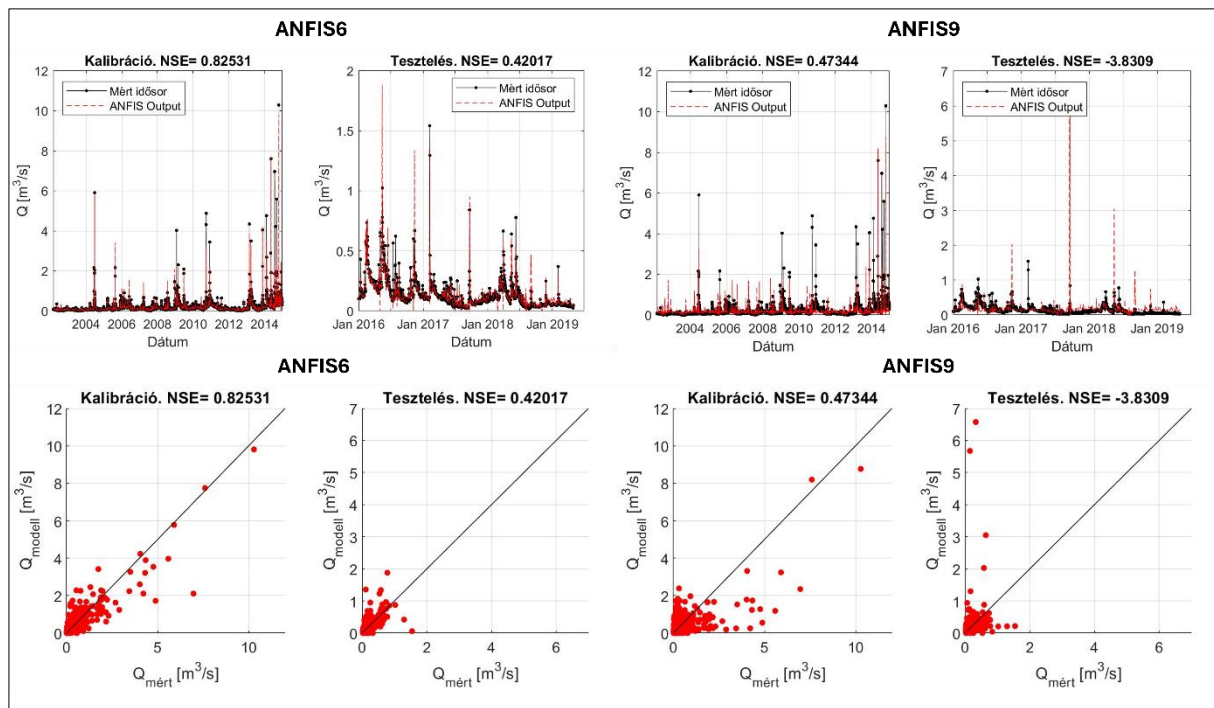
4. ábra. Az ANFIS6 és ANFIS9 modellek eredményei (Torna-patak).
Figure 4. The results of ANFIS6 and ANFIS9 models (Torna-creek).

A 4. ábra a Torna-patak esetén szemlélteti az ANFIS6 és ANFIS9 csapadék-lefolyás modellek eredményeit. Az ANFIS6 a tanítási és a tesztelési időszak során is megfelelő hatékonyságot mutat, amíg az ANFIS9 a kalibráció során több esetben alulbecsli a mért vízhozam értékét, a tesztelés során pedig számos esetben felülbecsli a tetőző vízhozam értékeket. Megfigyelhető,

hogy az ANFIS9 a tesztelés során egy esetben jelentős felülbecslést ad egy árhullám tetőzési vízhozamára. A 4. ábra és az 5. ábra alapján a Torna-patak és az Arany-patak esetén is megfigyelhető, hogy bizonyos esetekben az ANFIS modellek kiugró értékeket eredményeznek. A kiugró értékekre lehetséges magyarázat lehetne az extrapoláció, avagy a tesztelési adatsor nagyobb értékeket

tartalmaz, mint a tanítási idősor. Jelen kutatásban nem történt extrapoláció, így további lehetséges magyarázat

a neurális hálózat számítási módszerében vagy szerkezetében keresendő.



5. ábra. Az ANFIS6 és ANFIS9 modellek eredményei (Arany-patak).
Figure 5. The results of ANFIS6 and ANFIS9 models (Arany-creek).

DISZKUSSZIÓ

Az ANFIS típusú mesterséges neurális hálózat jelen kutatás során is biztató eredményeket adott csapadék-lefolyás modellezés esetén, azonban az ismert kihívások mellett számos újabb kérdés felmerült az alkalmazása során. Ahogyan az a korábbiakban ismertetésre került, az egyik elsődleges fontosságú feladat neurális hálózatok alkalmazása előtt az adatok előkészítése, melyhez elengedhetetlen az adatok gondos megválasztása és minőségének ellenőrzése, illetve az adatsorok standardizálása. További megfontolandó lehetőség az adatok előfeldolgozásához az adatok transzformálása vagy szűrő alkalmazása az adatsoron.

Az adatsorok feldolgozása mellett a tanítási és tesztelési időszakok megválasztása is alapvetően meghatározza a modell hatékonyságát. Az adatsorok megválasztása során az extrém értékekre is figyelemmel kell lenni, elkerülve az extrapolációt, illetve a kevés előfordulásból adódó alulbecsléseket a neurális hálózat által. Mivel a matematikai modellek alapvetően érzékenyek a kiugró értékekre, jelen kutatásban is az extrém értékek jelentették a legnagyobb kihívást az ANFIS számára. Ennek oka, hogy a modell reprezentativitása csökken olyan helyzetekben, melyek ritkán fordulnak elő. Kulcsfontosságú feladat a neurális hálózatok megtanítása a lehetséges extrém környezeti jelenségekre anélkül, hogy hibás extrém értékeket jelezzenek elő vagy hibás megfigyeléseket vegyenek alapul.

A neurális hálózatok használatának további lényeges kihívása a bemeneti adatok megválasztása, mely jelen kutatás fő témaköre. A bemeneti adatok megválasztása kapcsán nem elegendő a rendelkezésre álló adatsorok minőségi ellenőrzése. A modellezett vízgyűjtő meghatározó

hidrológiai folyamatai alapján szükséges átgondolni a lehetséges bemeneti adatsorokat. Ennek megfelelően a kutatásban vizsgált adatsorok mellett akár szél, hóolvadási vagy talajnedvességi adatsorok is javíthatják a modellek teljesítményét, amennyiben rendelkezésre állnak. Jelen két vizsgált vízgyűjtő alapján az elvárásoknak megfelelően a megelőző vízhozam jelentősen javítja a modellek teljesítményét. Emellett a megelőző csapadék index alkalmazása mutat javulást a hatékonyságot illetően, mely jellemzést adhat a vízgyűjtő talajnedvességéről, lefolyási tulajdonságairól.

A kutatást számtalan irányban lehet továbbfejleszteni, illetve kiegészíteni. Egy meghatározó irány lehet az ANFIS hálózat felépítésének elemzése, eltérő számítási módszer alkalmazása. Mindemellett napjainkig is csekély tanulmány található az eltérő mesterséges neurális hálózatok vizsgálatára hazánkban, annak ellenére, hogy rengeteg más modell alkalmazására lenne lehetőség, akár LSTM (Long Short Term Memory), SVM (Support Vector Machine), GP (Genetic Programming) vagy mély tanulás (Deep Learning). A mesterséges intelligencián alapuló modellek mellett elemezhető irány lehetne a mesterséges neurális hálózatok és az egyéb modellek, például autoregressziós modellek ötvözése.

ÖSSZEFOGLALÁS

A mesterséges neurális hálózatokat napjainkban már minden tudományterületen alkalmazzák. A hidrológia területén is egyre több kutatás készül a mesterséges neurális hálózatok alkalmazhatóságának vizsgálatára, melyek közül csapadék-lefolyás modellezés esetén az egyik legígéretesebb hálózat az úgynevezett adaptív neuro-fuzzy következtető rendszer, avagy az ANFIS (*Adaptive Neuro Fuzzy*

Inference System). Az ANFIS előnye, hogy hatékonyan ötvözi mesterséges neurális hálózatok taníthatóságát a fuzzy rendszerek rugalmas szerkezetével. Az ANFIS képes a nem lineáris függvények modellezésére és a nem lineáris komponensek azonosítására a Takagi-Sugeno típusú rendszer segítségével. Az ehhez alkalmazott tanítási algoritmus globális, melynek alapja a legkisebb négyzetek módszere (Ang és társai 2023).

Jelen tanulmányban összehasonlítottunk kilenc eltérő input adatsorral rendelkező ANFIS mesterséges neurális hálózat alapú csapadék-lefolyás modellt a Torna-patak és az Arany-patak vízgyűjtőire. A modelleket MATLAB szoftver segítségével építettük fel az „anfis” függvény használatával. A vizsgált input adatsorok között szerepelt a csapadék, a megelőző napi vízhozam, a megelőző csapadék index, a hőmérséklet és a potenciális párolgás, melyek előfeldolgozása során megtörtént az adatsorok ellenőrzése, illetve standardizálása. A modellek két csoportra bonthatóak: hat modell tartalmazza a megelőző vízhozamot input adatként, amíg három modell nem használ vízhozam adatokat bemeneti adatsorként. A modellek érzékenységvizsgálata alapján a kezdeti kapcsolatok optimális értéke 2, mivel a több kezdeti kapcsolat alkalmazása rontotta a modell teljesítményét, valamint növelte a számítási időt. A maximális tanítási körök értékére 500 elegendőnek bizonyult, biztosítva a modellek hatékony konvergenciáját. A vizsgált kilenc modell eredményei alapján megállapítható, hogy az ANFIS alapú csapadék-lefolyás modellek megfelelő modell hatékonysággal rendelkeznek a kalibráció során, azonban a modellek teljesítménye csökken az igazolás során. Mindkét csoport esetén azon modellek teljesítettek a legjobban, melyek az összes vizsgált input adatsort tartalmazzák. Azonban a Torna-patak és az Arany-patak vizsgálata során az ANFIS modellek bizonyos időpillanatokban kiugró értékeket eredményeztek. A kiugró értékekre lehetséges magyarázat lehetne az extrapoláció, azonban jelen kutatásban a tesztelési idősor értéktartománya nem lépte túl a tanítási idősor értéktartományát. A további lehetséges magyarázat a neurális hálózat számítási módszerében vagy szerkezetében keresendő.

A vizsgált ANFIS alapú csapadék-lefolyás modellek fejlesztéséhez további elemzések szükségesek. A kutatás továbbfejlesztése során az adatok előfeldolgozási lehetőségeinek széleskörű feltárása segítheti a modellek hatékonyságának növelését. A kiugró értékek kezelésére a jövőbeli kutatás során elengedhetetlen a számítási módszer és a hálózat szerkezetének felülvizsgálata. A jelen tanulmányban alkalmazott Takagi-Sugeno rendszer helyett vizsgálható lehetne a Mandami-típusú rendszerek alkalmazása, illetve az optimalizációs módszerek hibrid alkalmazása helyett csak a hiba visszaterjesztéses gradiens módszer használata. Mindemellett vizsgálati lehetőség az eltérő módszerek alkalmazása a FIS generálására, hogy elérhető legyen a lehető legjobb modellelhatékonyságot eredményező modell struktúra.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A közlemény a Kulturális és Innovációs Minisztérium ÚNKP-23-3-I-BME-167 kódszámú Új Nemzeti Kiválóság

Programjának a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alapból finanszírozott szakmai támogatásával készült.

IRODALOMJEGYZÉK

AGROTOPO (2019). <https://www.mta-taki.hu/hu/osztalyok/kornyezetinformatikai-osztaly/agrotopo> (Letöltve: 2019.10.25.)

Ang, Y., Talei, A., Zahidi, I., Rashidi, A. (2023). Past, Present, and Future of Using Neuro-Fuzzy Systems for Hydrological Modeling and Forecasting. *Hydrology*. 10. 36. <https://doi.org/10.3390/hydrology10020036>

Bartoletti, N., Casagli, F., Marsili-Libelli, S., Nardi, A., Palandri, L. (2017). Data-driven rainfall/runoff modelling based on a neuro-fuzzy inference system. *Environmental Modelling & Software*. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.11.026>

Chang, T.K., Talei, A., Alaghmand, S., Ooi, M. (2016). Choice of Rainfall Inputs for Event-based Rainfall-Runoff Modeling in a Catchment with Multiple Rainfall Stations Using Data-driven Techniques. *Journal of Hydrology*. 545. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.12.024>

Chang, T.K., Talei, A., Chua, L., Alaghmand, S. (2018). The Impact of Training Data Sequence on the Performance of Neuro-Fuzzy Rainfall-Runoff Models with Online Learning. *Water*. 11. 52. <https://doi.org/10.3390/w11010052>

C3S (2019). *Copernicus Climate Change Service ERA5-Land reanalysis*. Copernicus Climate Change Service, 15/09/2019. <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/home> (Letöltve: 2019.09.18.)

CORINE (2019). *Land Cover-Copernicus* <https://land.copernicus.eu/pan-european/corine-land-cover> (Letöltve: 2019.10.25.)

Fülöp, I., Józsa, J. (1998). A neurális hálózatok világa. *Hidrológiai Közlöny*, 78. évfolyam, 4. szám, p. 250.

Jackson, E., Roberts, W., Nelsen, B., Williams, G., Nelson, E., Ames, D. (2019). Introductory overview: Error metrics for hydrologic modelling – A review of common practices and an open source library to facilitate use and adoption. *Environmental Modelling & Software*. 119. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2019.05.001>

Kohler, M.A., Linsley, R.K. (1951). Predicting the runoff from storm rainfall. *Weather Bureau Research Papers*. Washington.

Kontur, I., Koris, K., Winter, J. (2003). Hidrológiai számítások. Lanograf Kft., Gödöllő.

Liptay, Z. (2022). Neurohydrological prediction of water temperature and runoff time series. *Acta Hydrologica Slovaca*. 23. pp. 190-196. <https://doi.org/10.31577/ahs-2022-0023.02.0021>.

MATLAB (2024). *MATLAB Documentation – anfis*. <https://www.mathworks.com/help/fuzzy/anfis.html>

ODP (2023). *Meteorológiai Adattár* <https://odp.met.hu/> (Letöltve: 2023.09.25.)

Nash, J.E., Sutcliffe, J.V. (1970). River flow forecasting through conceptual models. Part I – A discussion of principles. *Journal of Hydrology* 10, 282–290. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(70\)90255-6](https://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6)

Nayak, P.C., Sudheer, K.P., Rangan, D.M., Ramasastri, K.S., (2004). A neuro-fuzzy computing technique for modeling hydrological time series. *J. Hydrol.* 291 (1–2), pp. 52–66. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2003.12.010>

Pushpalatha, R., Perrin, C., le Moine, N. Andréassian, V. (2012). A review of efficiency criteria suitable for evaluating low-flow simulations. *Journal of Hydrology.* 420-421, 171-182. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.11.055>

Rathnayake, N., Rathnayake, U., Chathuranika, I., Dang, L., Hoshino, Y. (2023). Cascaded-ANFIS to simulate nonlinear rainfall-runoff relationship. *Applied Soft Computing.* 147. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2023.110722>

Talei, A., Chua, L. (2012). Influence of lag time on event-based rainfall–runoff modeling using the data driven approach. *Journal of Hydrology.* s 438–439. pp. 223–233. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.03.027>

Talei, A., Chua, L., Quek, C. (2010). A novel application of a neuro-fuzzy computational technique in event-based rainfall–runoff modeling. *Expert Systems with Applications.* 37. pp. 7456-7468. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2010.04.015>

Talei, A., Chua, L., Quek, C., Jansson, P. (2013). Runoff forecasting using a Takagi–Sugeno neuro-fuzzy model with online learning. *Journal of Hydrology.* 488. 17–32. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.02.022>

Tayfur, G., Singh, V., Asce, F. (2006). ANN and Fuzzy Logic Models for Simulating Event-Based Rainfall-Runoff. *Journal of Hydraulic Engineering.* [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2006\)132:12\(1321\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2006)132:12(1321))

Van Ooyen, A., Nienhuis, B. (1992). Improving the convergence of the backpropagation algorithm. *Neural Networks* 5 (3), pp. 465–471. [https://doi.org/10.1016/0893-6080\(92\)90008-7](https://doi.org/10.1016/0893-6080(92)90008-7)

Wang, W., Chau, K., Cheng, C., Qiu, L. (2009). A Comparison of Performance of Several Artificial Intelligence Methods for Forecasting Monthly Discharge Time Series. *Journal of Hydrology.* 374. pp. 294-306. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.06.019>

SZERZŐK



NÉGYESI KLAUDIA 2022-ben szerzett okleveles infrastruktúra-építőmérnök diplomát a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Építőmérnöki Karán, jelenleg a Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszék harmadéves doktorandusz hallgatója. Doktori témájának címe „Kisvízgyűjtők csapadék-lefolyás kapcsolatának modellezése”. 2020 óta a Magyar Hidrológiai Társaság tagja.



NAGY ESZTER DÓRA okleveles infrastruktúra-építőmérnök (Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, 2017), 2023-ban szerzett PhD fokozatot a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetemen a földtudományok területén, építőmérnöki tudományágból. 2022 óta főállású oktató, jelenleg a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszékén adjunktus. Túlnyomórészt hidrológiával, vízkészlet-gazdálkodással kapcsolatos tárgyakat oktat, fő kutatási területe a kisvízgyűjtők hidrológiája és a csapadék-lefolyás modellezés. 2016 óta a Magyar Hidrológiai Társaság tagja.

Fórum

A FÓRUM ad teret a vitának. Ezért itt tettük itt közzé Nagy Boldizsár **KÖNYVÉNEK ISMERTETÉSÉT**. A könyvre Zsuffa István, Szöllősi-Nagy András és Bogárdi János **REFLEXIÓ** címmel fejtette ki véleményét, melyre Nagy Boldizsár **VISSZHANG** címmel válaszolt. Zsuffa István, Szöllősi-Nagy András és Bogárdi János **REFLEXIÓ ÚJRA** címmel észrevételt tett Nagy Boldizsár hozzászólására, melyet most adunk közzé. Tanulságos olvasmány maga a könyv, a megszólított szerzők reflexiói és Nagy Boldizsár észrevételei is.



Könyvismertetés

Nagy Boldizsár: **Bős-Nagymaros: nemzetközi jog, politika, környezetvédelem**

Gondolat Kiadó, 2024, 410 oldal

[Bős-Nagymaros: nemzetközi jog, politika, környezetvédelem](#)



Reflexió

Zsuffa István, Szöllősi-Nagy András, Bogárdi János: **Megszólalunk, mert megszólítottunk – Reflexiók Nagy Boldizsár könyvére**

[Megszólalunk, mert megszólítottunk – Reflexiók Nagy Boldizsár könyvére megtekintése](#)



Visszhang

Nagy Boldizsár: **A módszerről és a lényegről. Puritán válasz Zsuffa Istvánnak, Szöllősi-Nagy Andrásnak és Bogárdi Jánosnak**

[Visszhang megtekintése](#)

Reflexió újra

Puritán válasz Nagy Boldizsárnak

Zsuffa István¹, Szöllősi-Nagy András^{1,2}, Bogárdi János^{1,2}

¹ Nemzeti Közszolgálati Egyetem, Víz tudományi Kar, Víz- és Környezetpolitikai Tanszék

² Kőszegi Felsőbbfokú Tanulmányok Intézete (iASK)

DOI: 10.59258/hk.18350



Örülünk, hogy Nagy Boldizsár reagált (*Nagy 2024b*, továbbiakban: „*Visszhang*”) a könyvére (*Nagy 2024a*) adott „*Reflexió*”-nkra (*Zsuffa és társai 2024*). Így létrejött egy nyilvánosság előtt zajló vita, ami jelentős hiánypótlásnak számít a Bős-Nagymaros-ügyben, még ennyi év után is. Ez mindenféleképpen öröndetes, még akkor is, ha az álláspontok kibékíthetetlennek tűnnek és csekélynek látszik az esély bármiféle használható szintézisre. Pedig 30 év távlatból, az azóta történtek és a mérési eredmények figyelembevételével ideje lenne objektíven megítélni a jelenlegi helyzetet és mindazokat az immár történelminek számító lépéseket és tényeket, melyek következményei a pillanatnyi helyzetet erősen meghatározzák.

A „*Visszhang*”-ra adott válaszainkat azzal kezdjük, hogy reflektálunk Nagy Boldizsár azon megjegyzésére, ami a Duna hasznosításáról beszélő „*sarlatánok*”-ra, „*fantaszták*”-ra és „*csalók*”-ra vonatkozik. Felmerül a kérdés, hogy mégis kikre gondolt itt a vitapartnerünk? Ránk? A magyar vízügyi szolgálatra? Netán az összes olyan hazai és külföldi vízépítő mérnökre, akik valaha is foglalkoztak a Duna hasznosításával? ... Javasoljuk, hogy Nagy Boldizsár fejezze be a sanda célozgatásokat és fogalmazzon nyíltan és egyértelműen.

Ezt követően Nagy kétszer is kifogásolja, hogy a „Dunacsúny” megnevezést használjuk „Dunacsún” helyett. Tájékoztatóul: a „Dunacsúny” földrajzi név számos pub-

likációban és honlapon is így szerepel, köztük olyanokon is, melyek a környékhez köthetőek (lásd például az egyik legfontosabb szlovákiai magyar lap, a pozsonyi székhelyű Új Szó honlapját: <https://ujsoz.com/dunacsunya>).

A „Visszhang” további részeiben Nagy megkísérli a „Reflexió”-ban összegzett 4 alapállításunk cáfolatát; majd a kísérlet végén megállapítja, hogy „gyakorlatilag minden pont cáfolatát” megadta. Tekintsük át ezeket az alapállításokat és Nagy Boldizsár rájuk adott cáfolat-kísérleteit:

1. alapállításunk: *"A dunacsúnyi tározóban nem következett be eutrofizációból eredő vízminőségromlás az elterelést követő 30 éves időszakban"*.

Kerestük, de nem találtuk Nagy Boldizsár írásában azokat a részeket, melyek cáfolni hivatottak ezt az alapállítást. Találtunk viszont olyan mondatokat, melyek lényegében elismerik az állításunk igazságtartalmát. A logika és a nyelvtan szabályai szerint ugyanis nem lehet másként értelmezni Nagy következő megjegyzését: „Abból, hogy nem romlott (tovább) a vízminőség a tározóban, nem következik, hogy kívánatos minőségű.” Szintén összhangban van az alapállításunkkal a vitapartnerünk azon megjegyzése, ami az eutrofizációt a „jelen állapot összetett értékelésének” „parányi részlemeként” tünteti fel.

És hogy miért nem „kívánatos minőségű” a tározó vize? Azért, mert a vízminőség látványos javulása ellenére, a Duna továbbra is befogadja különböző mezőgazdasági, ipari és kommunális eredetű szennyezéseknek. Ráadásul, bizonyos különleges szennyezésekben (pl. mikroműanyagok) még növekedést is lehetett észlelni az elmúlt években (Pannonhalmi és Varga 2021). Ezeknek azonban semmi közük a tározóhoz tekintve, hogy a vízlépcsőrendszer nélkül is ott lennének a Dunában.

Tehát az első alapállításunkkal Nagy Boldizsár valójában egyetért.

2. alapállításunk: *„A szigetközi talajvíz, valamint a Szigetköz felszín alatti ivóvízkincse nem szennyeződött el és nem került veszélybe a dunacsúnyi tározó üzembehelyezésének következtében. A szigetközi talajvíz, a 2022-es VGT3 (OVF 2022) szerint a »jó« vízminőségi kategóriába tartozik”.*

Ezt az állítást Nagy Boldizsár a Vízyűjtő-Gazdálkodási Terv (VGT3) (OVF 2022) 6-7 mellékletére hivatkozva próbálja cáfolni rámutatva arra, „hogy mind a rajkai, mind a dunaremete-i vízbázis jelentősen veszélyeztetett (3-as) minősítést kapott a vízyűjtő-gazdálkodási terv második felülvizsgálatakor (Vízyűjtő-gazdálkodási Terv 2022, 6-7. melléklet)”. (Feltételezzük, hogy a vitapartnerünk a két vízbázis „összesített veszélyeztetettség” szerinti minősítésére utal.)

Fontos tisztázni, hogy a két nevezett vízbázis a ’távlati partiszűrési’ kategóriába tartozik (OVF 2022: VGT3 6-7 melléklet). A „Szigetköz felszín alatti ivóvízkincse” viszont elsősorban a mélyebben található rétegvizeket jelenti. Ezekre a rétegvizekre nem vonatkozik a VGT3 6-7 mellékletének partiszűrési vízbázisokra tett megállapításai. Ráadásul, szemben a nevezett távlati vízbázisokkal, a

Szigetköz alatti rétegvizek jelenleg is ivóvíz célú kitermelés alatt állnak. A kitermelést végző cég tanúsága szerint (Szigetközi Friss Víz honlap), a kitermelt majd palackozott víz minősége kiváló olyannyira, hogy mindenfajta kezelés nélkül alkalmas emberi fogyasztásra.

Nem szerencsés partiszűrési vízbázisok veszélyeztetettsége alapján következtetéseket levonni a felszín alatti vízkészletekre tekintve, hogy a partiszűrési elsősorban a folyó felszíni vízkészleteire támaszkodik, azokat termeli ki; a kutak hozamainak csak egy kisebb hányada származik a talajvízből. A VGT3 6-7 melléklete szerint, a nevezett két szigetközi partiszűrési vízbázis minősítése a Duna felszíni vizeinek minősége és dinamikája következtében lett „jelentősen veszélyeztetett”, és nem pedig a felszín alatti vizek állapota és/vagy veszélyeztetettsége miatt. Az „összesített veszélyeztetettség” minősítési összetevői közül például a „Felszíni víz szennyeződéséből fakadó veszélyeztetettség”, valamint az „Árvízi veszélyeztetettség” szerint jelentősen veszélyeztetett mindkét vízbázis (OVF 2022: VGT3 6-7 melléklet).

Jelentősen veszélyeztetett a két vízbázis még a „Vízadó földtani közeg veszélyeztetettsége” minősítési összetevő szerint is (OVF 2022: VGT3 6-7 melléklet). Partiszűrési esetén ezt a veszélyt a meder állapotában bekövetkező változások (erózió, feliszapolódás) okozhatják (OVF 2022). Az erózió a kút és a meder közötti szűrőréteget csökkenti, a feliszapolódás meg a vízminőség romlását, ammónium és vas megjelenését idézi elő a termelő kutakban (OVF 2022). Tehát ez a veszélyeztetettség is a kutakba jutó felszíni eredetű vizek nem megfelelő minőségével van összefüggésbe és nem pedig a felszín alatti vízkészletek állapotával/veszélyeztetettségével.

Valójában csak „A vízbázis szennyeződés veszélyeztetettsége” és a „A vízbázis területhasználatból fakadó veszélyeztetettsége” (OVF 2022: VGT3 6-7 melléklet) minősítési összetevők alapján lehetne a felszín alatti vízkészletek állapotára és veszélyeztetettségére következtetni. E szempontok alapján azonban a Rajka-Dunakiliti partiszűrési vízbázis nincs veszélyben (2 db 1-es minősítés) (OVF 2022: VGT3 6-7 melléklet). Ez tehát egy újabb érv a mellett, hogy a vízbázissal szomszédos dunacsúnyi tározó nem terheli, nem szennyezi a felszín alatti vizeket. (A Dunaremete-Lipót partiszűrési vízbázis csak egyetlen minősítési összetevőben különbözik a Rajka-Dunakiliti vízbázistól: „A vízbázis területhasználatból fakadó veszélyeztetettsége” alapján ugyanis „közepes veszélynek” van kitéve (OVF 2022: VGT3 6-7 melléklet). Ezt azonban a vízbázis védőterületén található pontszerű és diffúz szennyezőforrások okozzák és nem pedig vízbázistól 18 km-re lévő dunacsúnyi tározó.)

Végül, ha megvizsgáljuk a Duna magyarországi szakaszának többi (összesen 67 db) partiszűrési vízbázisát, akkor kiderül, hogy az összesített veszélyeztetettség alapján mindegyik a „jelentősen veszélyeztetett” kategóriába – néhány még annál is rosszabbra – tartozik (OVF 2022: VGT3 6-7 melléklet). Ráadásul úgy, hogy a minősítési összetevők szerinti minősítések is gyakorlatilag azonosak a Rajka-Dunakiliti és a Dunaremete-Lipót vízbázisok minősítéseivel (OVF 2022: VGT3 6-7 melléklet).

Tehát Nagy Boldizsár cáfolata második alapállításunkat illetően téves.

3. alapállításunk: „A szigetközi hullámtér ökoszisztémái nemhogy nem pusztultak el, hanem – köszönhetően a kiépített vízpótlórendszernek és a Duna vízminőségében végbe ment javulásnak – még a BNV előtti időkhöz képest is jelentős állapotjavuláson mentek keresztül.”

Ezt Nagy Boldizsár többirányból is iparkodott cáfolni. Újfént hivatkozott például a VGT3-ra (OVF 2022) (ezúttal a 6-1 mellékletre) hangsúlyozva, hogy „A Duna és mellékágai felszíni vízminősége a Vízyűjtő-gazdálkodási terv második, 2022. évi felülvizsgálatakor a Víz Keretirányelv kategóriái szerinti ötfokú skálán 3-as („mérsékelt”) minősítést kapott, akárcsak 8 évvel korábban. (Könyv, 346. o., megjelölt forrás: *Vízyűjtő-gazdálkodási Terv 2022, 6-1 melléklet*)”

Kerestük, ám nem találtuk a „Duna és mellékágai” nevű víztestet a VGT3 6-1 mellékletében; miként a „felszíni vízminőség” kategóriát sem. Feltételezzük tehát, hogy Nagy Boldizsár a „Duna Szigetköznel” és a „Szigetközi HTVP főág” (HTVP: HullámTéri VízPótló rendszer) nevű víztestekre, illetve a „Víztest integrált állapota PBT komponensekkel együtt” (PBT: Perzisztens, Bioakkumulatív és Mérgező) kategóriára utalt, mely kategória szerint valóban „mérsékelt” minősítésű mindkét víztest. A két víztest közül viszont csak a második releváns tekintve, hogy az alapállításunk a hullámtérre vonatkozott és nem a főmederre.

Megvizsgálva a Szigetközi HTVP főág állapotértékelésének összetevőit kiderül, hogy az integrált értékelést az a „Kémiai állapot” húzza le, mely szerint a víztest „nem jó” állapotban van a kadmium és vegyületei által okozott szennyezés miatt (OVF 2022: VGT3 6-1 melléklet). Csak-hogy ez a szennyeződés ipari, mezőgazdasági, közlekedési és természetes eredetű (Szentes 2023), vagyis semmi köze a vízlépcsőrendszerhez. Egyébként, a kémiai állapoton kívül, 5 értékelési szempont szerint „kiváló”, 10 szerint „jó” és csak egy szempont szerint „mérsékelt” a Szigetközi HTVP főág minősítése. Közbevetőleg: az alapállításunk igazságát bizonyítja a víztest „Ökológiai állapot” szerinti „jó” minősítése (OVF 2022, 6-1 melléklet). Végül, ha megnézzük a Duna többi magyarországi „vízfolyás típusú” víztestének (7 db) integrált értékelését, akkor kiderül, hogy azok is mind a mérsékelt kategóriába tartoznak (OVF 2022: VGT3 6-1 melléklet).

Ennél az alapállításnál Nagy Boldizsár újból felelgeti azt a vádat, mely szerint a szigetközi vízpótlórendszer nem alkalmas az árvizek szimulálására. Csak ismételni tudjuk azt, amit a „Reflexió”-ban már kifejtettünk: ez a vád tényszerűen nem igaz. Olyannyira nem, hogy a rendszer még olyan közepes dunai vízhozamok mellett is képes az ökológiai célú részleges árvízi elöntések generálására, melyekhez hasonló vízhozamok esetében elmaradtak az elöntések a vízlépcsőrendszer előtti időkhöz (Tatai 2016, Jakus és társai 2024). Az elárasztást a Szigetközi Üzemelési Bizottság kezdeményezi, amennyiben a hidrológiai feltételek megfelelnek a Szigetközi Hullámtéri Vízpótló Rendszer Üzemelési Szabályzatában rögzítetteknek. Legutóbb 2023 tavaszán történt ilyen árasztás, ahogy arról az ÉDUVIZIG közösségi oldalon közzétett tájékoztatása is tanúskodik

(Észak-Dunántúli Vízügyi Igazgatóság facebook oldal). (2024 tavaszán nem volt árasztás, mivel nem voltak meg a hidrológiai feltételek: a Duna vízhozama nem haladta meg a 2 500 m³/s-ot.) Javasoljuk a vitapartnerünknek, hogy ezt a szálát engedjék végre el.

Tehát Nagy Boldizsár cáfolata harmadik alapállításunkat illetően téves.

4. alapállításunk: „A BNV tervezett és/vagy maradék műtárgyai nem növelik az árvizek és földrengések okozta veszélyeztetettségét.”

Az alapállítás árvízi veszélyeztetettség növekedését tagadó részét Nagy Boldizsár az ÉDUVIZIG (2020) tanulmányára támaszkodva igyekszik cáfolni. Ez a tanulmány a növekvő árvízszintek okaként három fő folyamatot nevez meg, melyekből kettő – a szigetközi hullámtér feltöltődése és a hullámtér benőtsége fokozódása – a vízlépcsőrendszer előtti időkhöz is jelen volt. A harmadik ok a főmeder benőtsége, ami valóban a Duna elterelésének tudható be. Ám nem szabad megfeledkezni a vízlépcsőrendszer pozitív árvízvédelmi hatásáról sem; vagyis arról, hogy árvízkor 3 000 m³/s vízhozamot az üzemvízcsatorna vezet le, mellyel jelentős mértékben tehermentesíti a régi árvízi medret.

Az összkép tisztázása érdekében hasonlítsuk össze a 2024-es árvizet az 1991-essel. A 2024-es árvíz tetőzése Rajkánál és Dunaremeténél 27 illetve 62 cm-el elmaradt az 1991-es tetőzésekhez képest úgy, hogy a 2024-es árvíz vízhozamának tetőzése Dévénynél 520 m³/s-al magasabb volt, mint az 1991-es árvízé. Ez egyértelmű bizonyíték arra, hogy az üzemvízcsatorna árvízcsökkentő hatása még ma is jóval erősebb, mint a feltöltődés és a benővényesedés árvízszinteket emelő hatása.

A fentiekből még az is következik, hogy a vízlépcsőrendszer nélkül a 2002-es, 2013-as és 2024-es nagy dunai árvizek biztosan még magasabb szinteken tetőztek volna a Rajka és Szap közötti szakaszon. Másrésztől viszont tény, hogy még így is vízállásrekordot döntött a 2013-as árvíz Rajkánál és Dunaremeténél; továbbá az is, hogy a feltöltődés és a benővényesedés rontotta az árvízi meder levezető képességét az elterelés óta. Az árvízi veszélyeztetés problémája továbbra is egy megoldásra váró feladat a Szigetközben, ahogy azt az ÉDUVIZIG (2020) tanulmánya is hangsúlyozza.

Nagy Boldizsár meg sem kísérel cáfolni a megnövekedett földrengésveszélyt tagadó állításunkat (4. alapállítás második része). Más híján csak feltételezhetjük, hogy azért, mert ezt a vádat még ő is vállalhatatlannak tartja. Nem melleleg, a földrengéssel való riogatás még a hágai per magyar beadványába (*Magyar Köztársaság 1994*) is bekerült. A vízlépcsőrendszer eredeti tervével kapcsolatban ugyanis a beadvány 5.105.-ös pontja leszögezi: abban az esetben, ha a csúcsidőszakban „a Gabčíkovo -i vízlépcső gátja földrengés vagy más okokból átszakadna, egy olyan árhullám keletkezne, amely meghaladja a legnagyobb mért árvizet és hatással lenne az egész Gabčíkovo és Nagymaros közötti térségre” [fordítás a szerzőktől] (*Magyar Köztársaság 1994*). A földrengés-szenárió rendszeresen visszaköszönt a Duna Kör különböző

megnyilvánulásaiban is; Vargha János még egy 1999-es publikációban is megemlíti (Vargha 1999). Sajnos valószínű, hogy a Duna Kör hamis propagandájának hatékonysága miatt, még ma is sokan vannak ebben az országban, akik kritikátlanul elhiszik, hogy a nagymarosi gátat (ha megépült volna) földrengés szakította volna át, melynek következtében „emeletmagas árhullám” pusztította volna el Budapestet.....

Tehát Nagy Boldizsár cáfolata negyedik alapállításunkat illetően téves.

Megállapítható, hogy Nagy Boldizsár a négy alapállításunk közül eggyel egyetért, a másik hármat pedig nem sikerült cáfolnia. Ami pedig az alapállításaink részletes bizonyításait illeti, azokat az olvasó megtalálja a jelen vita alapját képező publikációkban (Zsuffa és társai 2023).

Írása végén Nagy Boldizsár még megenged magának egy személyeskedő csúsztatást és megvádol minket azzal, hogy azért akarjuk ilyen „elszántan visszaszorítani a kritikát”, mert szándékunkban áll komoly anyagi hasznot húzni az Insula Magna projektből. Ez tételesen nem igaz. Fontosnak tartjuk tisztázni még azt is, hogy semmiféle politikai megbízatást vagy elvárást nem teljesítettünk/teljesítünk a tanulmány és a cikk megírásakor, illetve a jelen vita során. És korábban sem.

Terjedelmi korlátok miatt csak részben tudunk reagálni a Nagy Boldizsár „Visszhang”-jában felvetett témákra. Ez a Bős-Nagymaros viták természetéből adódóan történhetett így. Amíg ugyanis egy hamis állítás terjesztéséhez elég egy-két mondat, addig az arra adott adekvát cáfolat általában egy sok-mondatos, fél-egész oldal terjedelmű szöveget igényel.

A kérdés 2025-ben már nem az, hogy az eredeti tervek megvalósulnak-e; hanem az, hogy a két ország a 28 évvel ezelőtti hágai ítélet értelmében megállapodják végre egymással. Végző soron egy jogászt kéne a legjobban zavarjon az, ha egy jogvita évtizedekig orvosolatlanul húzódik. A megállapodáshoz az is kell, hogy az egymásra ujjal mutogatás és személyeskedés helyett beismerjük a téves ítéleteket és lépéseket. Mennyivel előrébb lennének például, ha Nagy Boldizsár elismerné legalább azt, hogy döntő hiba volt annak idején ideológiai okokból visszautasítani a D variánst tekintve (Sámsondi Kiss 2019), hogy annak megvalósulásával éppen az az energiamegosztás realizálódott volna, amit most ő követel igen határozottan?

IRODALOMJEGYZÉK

ÉDUVIZIG (2020). Vízyűjtő-gazdálkodási terv (VGT) 2022, Jelentős vízgazdálkodási kérdések. 1-1 Szigetköz vízyűjtő-gazdálkodási tervezési alegység, pp. 15–16.

Észak-Dunántúli Vízügyi Igazgatóság facebook oldala:
https://www.facebook.com/permalink.php?story_fbid=608506251312820&id=100064603514788&ref=embed_post

Jakus Gy., Kertész J., Mohácsiné Simon G., Pannonhalmi M. (2024). Az újjászülető Szigetköz, Hidrológiai Közöny, 104. évf. 1.sz., pp. 17-34.
<https://doi.org/10.59258/hk.14994>

Magyar Köztársaság (1994). Case concerning the Gabcikovo-Nagymaros project (Hungary/Slovakia). Memorial of the Republic of Hungary. Volume I.. International Court of Justice.

Nagy B. (2024a). Bős-Nagymaros: nemzetközi jog, politika, környezetvédelem Gondolat Kiadó, 2024, p. 410.

Nagy B. (2024b). A módszerről és a lényegről. Puritán válasz Zsuffa Istvánnak, Szöllősi-Nagy Andrásnak és Bogárdi Jánosnak. Hidrológiai Közöny. 104. évf. 4. szám. pp. 68-72. <https://doi.org/10.59258/hk.17593>

OVF (2022). Magyarország Vízyűjtő-gazdálkodási Terve – 2021. Országos Vízügyi Főigazgatóság. p. 686.

Pannonhalmi M., Varga P. (2021). A vízügyi szolgálat vízminőség vizsgálatainak 50 éve Magyarországon a Duna példáján. Vízügyi Közlemények, CIH. évfolyam 2021. évi 1. füzet. pp. 43-85.

Sámsondi Kiss Gy. (2019). A Duna mégis összeköt. Kairosz Kiadó. p. 432.

Szentes D. (2023). Nehézfémzennyezés a talajban: kadmium (Cd). Agroforum. <https://agroforum.hu/szakkikkek/talajelet/nehezfemszennyezés-a-talajban-kadmium-cd/#:~:text=A%20mez%C5%91gazdas%C3%A1gb%C3%B31%20a%20kadmiumtartalm%C3%BA%20m%C5%B1tr%C3%A1gy%C3%A1kb%C3%B31,lehet%20a%20szervezet%C3%BCnkbe%20jut%C3%B31%20kadmiumnak>.

Szigetközi Friss Viz honlap: <https://www.szigetkozifriszviz.hu/index.html> (Letöltés: 2025.02.10)

Tahy Á. (2025). Személyes közlés.

Tatai R. (2016). A szigetközi hullámtéri vízpótló rendszer üzemeltetése, árasztási tapasztalatok. Magyar Hidrológiai Társaság, XXXIV. Országos Vándorgyűlés. Debrecen.

Új Szó honlap: <https://ujso.com/dunacsuny> (Letöltés: 2025.02.10)

Vargha J. (1999). A Bős-nagymarosi vízlépcső környezeti kockázatai. In: Karátson D. & Száraz M. Gy. (szerk.), Magyarország földje. Pannon Enciklopédia. Kertek 2000 Könyvkiadó.

Zsuffa I., Szöllősi-Nagy A., Bogárdi J. (2023). Insula Insolita – Szigetköz és Bős-Nagymaros párhuzamos története. Hidrológiai Közöny, 103. évf. 2. szám, pp. 4-23. <https://doi.org/10.59258/hk.11537>

Zsuffa, I., Szöllősi-Nagy, A., Bogárdi, J. (2024). Megszólalunk, mert megszólítottunk – Reflexiók Nagy Boldizsár könyvére. Hidrológiai Közöny, 104. évf. 3. szám, pp. 77-81. <https://doi.org/10.59258/hk.16464>

A SZERZŐK



ZSUFFA ISTVÁN 1991-ben kiváló minősítésű vízépítő mérnöki diplomával fejezte be tanulmányait a Budapesti Műszaki Egyetemen. PhD fokozatát 2001-ben a Wageningen-i Egyetemen (Hollandia) szerezte a környezettudományok terén. PhD kutatásának témája: többkritériumú döntéstámogató rendszerek alkalmazása folyami árterek ökológiai revitalizációjához. 2001-től 2012-ig a VITUKI-ban dolgozott, ahol számos hazai és nemzetközi kutatás-fejlesztési projektben vett részt, melyek közül a legjelentősebb a koordinációjával lebonyolított EU támogatású WETwin projekt. Ez a nemzetközi projekt európai, afrikai és dél-amerikai vizes élőhelyek ökológiai revitalizációjával foglalkozott. 2012-től dr. Zsuffa a VITUKI Hungary Mérnökiroda kft. alkalmazásában áll, ahol jelenleg vízkészlet-gazdálkodási és előrejelzési célú csapadék-lefolyás modellrendszereket fejleszt magyarországi kis- és közepes vízgyűjtőkre. Kutatás-fejlesztési tevékenységek mellett, hidrológiát, hidrológiai modellezést és hidrometriát is tanít a Nemzeti Közszolgálati Egyetem Víz tudományi Karán és az ELTE TTK-n.



SZÖLLÖSI-NAGY ANDRÁS vízmérnök, hidrológus, Dr. Techn., PhD, Dr. Habil., az MTA doktora, Prof. Dr. HC mult., egyetemi tanár a Nemzeti Közszolgálati Egyetem Víz tudományi Karán, a Felsőfokú Tanulmányok Intézete (iASK), Kőszeg, tudományos tanácsadója; a nemzetközi Sustainable Water Futures Programme (Jövő Fenntartható Vízgazdálkodása), Brisbane, Ausztrália, elnöke. Korábban húsz évig az UNESCO Nemzetközi Hidrológiai Program (IHP) főtitkára, később Kormányközi Tanácsának elnöke, majd a delfti (Hollandia) UNESCO-IHE Institute of Water Education rektora. A Hidrológiai Közlemény szerkesztőbizottságának elnöke, korábbi főszerkesztője. Hazai szakmai pályáját a VITUKI-ban kezdte Kienitz Gábor Rendszerhidrológiai Osztályán és a VITUKI tudományos főigazgatóhelyetteseként fejezte be 1989-ben. Eközben a IIASA-ban és a kanadai Waterloo Egyetemen dolgozott. A Magyar Mérnök Akadémia tagja és alelnöke, valamint a Magyar Természettudományi Társulat alelnöke.



BOGÁRDI JÁNOS 1969-ben szerzett építőmérnöki és 2019-ben arany diplomát a Budapesti Műszaki Egyetemen. 1971-ben a Padovai Egyetemen (Olaszország) nyert posztgraduális diplomát hidrológiából. Mérnökdoktori képesítését (Dr.-Ing.) a németországi Karlsruhei Egyetemen szerezte 1979-ben. Asszisztensként dolgozott a BME Vízgazdálkodási tanszékén (1969-1971) majd a Karlsruhei Egyetemen (1974-1979), ahol 1980-1983 között szenior kutató is volt. Több éven át működött konzultánsként Németországban és Afrikában (1971-1973 és 1983-1985 között). 1985 és 1988 között az Asian Institute of Technology (AIT, Thaiföld) docense (associate professor). 1989 és 1995 között a Wageningen-i Mezőgazdasági Egyetem tanszékvezető egyetemi tanára. 1995-től 2003-ig az UNESCO főmunkatársa és a Fenntartható Vízgazdálkodás Szekció vezetője Párizsban. 2003 és 2009 között az ENSZ Egyetemének bonni Környezet és Emberi Biztonság (UNU-EHS) intézetének alapító igazgatója. 2007 -2009 között az UNU európai vicerektora. 2009-től 2012-ig a Bonni Egyetem Fejlesztéskutatási Központján (ZEF) belül működő nemzetközi Global Water System Project (GWSP) végrehajtó igazgatója. 2004-től a Bonni Egyetem Mezőgazdasági Karának ko-optált professzora. 2012 óta a ZEF „Senior Fellow”-ja. 2016-tól az AIT tiszteletbeli külső professzora. 2017 óta kőszegi Felsőfokú Tanulmányok Intézetének tudományos tanácsadója, 2022-től a mexikói Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo (UAEH) tiszteletbeli vendég professzora. Több mint 240 tudományos publikáció szerzője vagy társszerzője. Több, főleg közép európai egyetem kitüntetője. A Varsói Mezőgazdasági Egyetem (1996), a BME (1997) és a Nizsnij Novgorod-i Állami Építészeti és Építőmérnöki Egyetem tiszteletbeli doktora (Dr.h.c.). 2008-ban a Cannes-i nemzetközi Vízdíj (Grand Prix des Lumières de l'Eau) kitüntetője. 2021-ig a MHT Hidrológiai Közlemény szerkesztőbizottsági tagja. 2017 óta a MHT tiszteletbeli külföldi tagja.



A MAGYAR HIDROLÓGIAI TÁRSASÁG Vízminőségi és Víztechnológiai Szakosztályának 18. Ivóvízbiztonsági konferenciájáról számolunk be.

A települési vízgazdálkodás kihívása az ivóvíz biztonság javítása

Borsányi Mátyás¹, Laky Dóra²

¹ MHT Vízminőségi és Víztechnológiai Szakosztály elnöke (e-mail: borsanyim@gmail.com)

² MHT Vízminőségi és Víztechnológiai Szakosztály titkára (e-mail: laky.dora@emk.bme.hu)

Az 2024. október 18-án rendezett Ivóvízbiztonsági konferencia témái a következők voltak: a népegészségügyi követelmények áttekintése, az ivóvízellátási lánc kockázatfelmérésre és alkalmazott kockázatkezelésre alapozott üzemeltetése, vízkezelő technológiákkal kapcsolatos aktuális kérdések, a szolgáltatott ivóvízminőség biztonságának veszélymegelőzésre alapozott javítása. A konferencia előadásainak bemutatása kapcsán röviden ismertetjük az ivóvízbiztonsági terv-program hazai megalapozását, célkitűzését.

IVÓVÍZBIZTONSÁGI TERVEZÉS HAZAI SZABÁLYOZÁSA

Az Ivóvízbiztonsági terv-program hazai szabályozását az 5/2023 (I.12.) Kormányrendelet (Korm. rend. az emberi fogyasztásra szánt vízre (ivóvíz) – ivás, főzés, ételkészítés, egyéb háztartási cél - minőségi követelményeire, az ivóvízhez való hozzáférés javítására és a vízminőség-ellenőrzés rendjére) 7§. és 6. sz. melléklet tartalmazza.

A vízbiztonsági terv (a továbbiakban VBT) program minden típusú és méretű ivóvízellátáshoz adaptálható, és a tapasztalatok szerint valamennyi társadalmi-gazdasági környezetben hatékonyan alkalmazható. A vízbiztonsági tervezés megközelítést világszerte alkalmazzák, mint a biztonságos ivóvíz biztosításának legjobb gyakorlatát.

A VBT kockázatértékelést ír elő, amely magában foglalja a vízellátási lánc elemeit a vízgyűjtőtől és vízbeszerzéstől a fogyasztóig, a műszaki rendszer és a vízminőségi ellenőrzést is összpontosítva a kiemelt veszélyeseményekre, azok kockázatára, valamint a kockázatkezelés eredményességének nyomon követésére.

Ahol a kockázatokat nem lehet azonnal kezelni, a VBT-program szerinti megközelítés lehetővé teszi a szükséges fejlesztések időbeli ütemezését (un. gördülő fejlesztés-tervezés).

A vízbázisok és nyersvízforrások esetében az ivóvízellátást kiszolgáló víztestek legtöbbször jóval nagyobb kiterjedésűek, mint az ivóvízbázisok. A *Víz Keretirányelv (2000/60/EK európai parlamenti és tanácsi irányelv)* szabályozza a víztestekre és un. védett víztestek létrehozására vonatkozó szabályokat (vízügyi ágazati, veszélyfeltárási és kockázatértékelési feladat), a felülvizsgált Ivóvíz Irányelv pedig a vízellátási lánc nyersvíz kivételre vonatkozó veszélyek értékelését. A két terület elválik egymástól, nincs kettős szabályozás.

Az Irányelv javaslat egyik fő eleme a vízminőségi előírások aktualizálása volt. A felülvizsgált irányelv kockázati alapú megközelítést vezet be a vízminőség ellenőr-

zésére. Ez hosszú távon csökkenti a monitoring költségeit, ugyanakkor garantálja az elérhető legjobb ivóvízminőséget.

Az emberi fogyasztásra szánt vízzel érintkező anyagok higiéniai követelményeinek meghatározására un. európai pozitív listák is bevezetésre kerülnek, a cél az ilyen anyagok minőségének javítása, az emberi egészség védelme, az ivóvíz szennyeződésének elkerülése érdekében. A jogszabály teljes körű alkalmazása 2026 decemberéig időt ad az érdekelt szereplőknek, hogy fokozatosan alkalmazkodjanak az új követelményekhez. A közegészségügy védelme érdekében tett jelentős lépésként az Európai Bizottság egy sor, egymással összefüggő szabályozási keretet hozott létre, amelyek célja az emberi fogyasztásra szánt vízzel érintkező anyagok biztonságának biztosítása.

A 18. IVÓVÍZBIZTONSÁGI KONFERENCIA

A Magyar Hidrológiai Társaság Vízminőségi és Víztechnológiai Szakosztályának 2024-ben is kiemelt programja volt az ivóvízszolgáltatók és a vízbiztonsági tervezési programokat támogató szervezetek figyelmének felhívása a megújult nemzetközi és hazai követelményrendszer változásaira. Az alábbiakban e témakörben tartott konferencián megfogalmazott előadói ajánlásokat ismertetjük. Az MHT Vízminőségi és Víztechnológiai Szakosztálya a Fővárosi Vízművek Üzemi Szervezetével közösen szervezett konferencia támogatói voltak a Magyar Víziközmű Szövetség, a BME Vízi Közmű és Környezetmérnöki Tanszék, a Víz tudományi és Vízbiztonsági Nemzeti Laboratórium, valamint az MHT Vízellátási Szakosztálya.

A 18. Ivóvízbiztonsági konferencia előadásai és az előadók ajánlásai

Bíró Barbara (Debreceni Vízmű Zrt.): Szeretlen arzénformák elválasztástechnikái: módszerek és gyakorlati alkalmazásuk szerepe az ivóvízkezelésben

A módszernek köszönhetően célzott problémakezelés érhető el. A technológiákban használt vegyszerek beállításainak gyors korrigálásával a domináns formának megfelelő beavatkozásra van lehetőség (oxidálószer vagy koaguláns dózis emelése), mellyel a lakosság terhelése időben és mennyiségben is minimálisra redukálható, ami komoly előnyökkel jár a vízi közmű szolgáltatások üzemeltetésében és a vízbiztonság terén is, hiszen arzén határérték túllépés esetén a szolgáltatott víz „kifogásolt” minősítési kategóriába esik, azaz akár a víz fogyasztására vonatkozó korlátozást is elrendelhet az illetékes egészségügyi hatóság. A mérési módszer alapos kidolgozását

követően annak országos szinten történő alkalmazásával elenyésző költség ráfordítás mellett jelentősen növelhető az ivóvízbiztonság.

Csörnyei Géza (Fővárosi Vízművek Zrt.): Hogyan tovább vízbiztonság?

Ajánlások a közeljövő vízgazdálkodási kihívásaira, települések és üzemeltetők számára:

- Zöld infrastruktúra fejlesztése: Zöldtetők, esőkertek, víztározók a csapadékvíz kezelésére.
- Vízyűjtő rendszerek és tározók fejlesztése: A hirtelen lezúduló csapadékvíz tartalékolása.
- Szűrkevíz újrahaszonításának ösztönzése, könnyen integrálható technológiai megoldások.
- Szigorúbb szankciók bevezetése, a vízbázis védőterületek folyamatos monitoringja.
- Integrált növényvédelem ösztönzése, a növényvédőszer-használat csökkentése, kiváltása.
- Szennyvíztisztító telepek fejlesztése, új típusú szennyzők hatékony eltávolítása.
- Kampanyok indítása a lakosság körében a fenti témakörökben.
- Településszerkezet-terv módosítás vízbázisvédelmi véleményeztetése.
- Vízforrások védelme, a vízgazdálkodás hatékonyabbá tétele és az innovatív megoldások támogatása.
- Vízbázisvédelmi hozzájárulás a növényvédőszer-használatra.
- Új építésnél a szűrkevízhasználat, felújításnál az idős belső víziközműhálózatok felújításának előírása.
- Vízbiztonsági kockázatelemző szakember kötelező alkalmazása.

Gergely Gergő (Dunántúli Regionális Vízmű Zrt.): Van másik út!? Még egy esély a biológiai ammónium eltávolításnak

A víziközmű szolgáltatóknak felelős üzemeltetőként mindent meg kell tenniük annak érdekében, hogy az ismert vízminőségi problémákra – ha van ráhatásuk – mielőbb megoldást találjanak. A klorát probléma ugyan csak 2026-tól „élesedik”, de ha a szolgáltatóknak van lehetősége változtatni, akkor az ivóvízbiztonságot szem előtt tartva minden lehetőséget meg kell ragadnia annak érdekében, hogy fogyasztók egészségvédelme érdekében minimalizálja az ivóvíz klorát tartalmát. A helyi adottságok és vízminőségi paraméterek kellően szigorú elemzése alapján kiválasztott helyszíneken, a 21. századi színvonalú üzemirányító rendszerek nyújtotta támogatás és felügyelet mellett, a biológiai ammónium eltávolítás egy fenntartható, és ivóvízbiztonsági szempontból is megfelelő alternatívája lehet a nátrium-hipokloritos oxidációt alkalmazó törésponti klórozásos technológiáknak.

Horváth Tibor (ProMinent Magyarország Kft.): Helyszínen előállított alacsony klorát tartalmú fertőtlenítőszer

- A klorát határérték bevezetése szükségessé teszi a vízkezelő rendszerek átgondolását, új innovatív technológiák bevezetését a vízkezelés, fertőtlenítés során.
- A különböző sóelektrolízises rendszerek helyben előállítják elő a nátrium-hipokloritot, hipoklórossavat, vagy klórgázt, mely sok hasznos tulajdonságot biztosít.

- A felsorolt készülék kivitelekkel szinte minden alkalmazáshoz a megfelelő fertőtlenítési eljárás áll rendelkezésre.

- Ezért ezen korszerű technológiák bevezetése a magyarországi vízkezelő rendszerekbe nagyon ajánlott és mind az üzemeltetőknek, mind a fogyasztóknak számos előnnyel jár.

- Törekvünk, hogy ezen eszközöket megismertethessük a tervezőkkel, leendő felhasználókkal, üzemeltetőkkel, mely egyik kiemelt célja ezen előadásunknak is.

Laky Dóra, Souha Neguez (BME, Víz Közmű és Környezetmérnöki Tanszék): Klorát ion az ivóvízben – hazai üzemeltetők körében végzett kérdőíves felmérés eredményei

Kutatásunk célja az ivóvízbiztonság javítása az 5/2023 (I.12) Kormányrendeletben új paraméterként megjelenő klorát ion kapcsán, a megelőzésen alapuló kockázatsökkentő tevékenységek körének felmérése elsősorban a hazai üzemeltetői gyakorlat tapasztalatai alapján.

A vizsgált ivóvízkezelő telepek közül elsősorban a törésponti klórozást nátrium-hipoklorittal megvalósító technológiák érintettek a klorát-ion problémában. Ezeknél a tisztítástechnológiáknál az eltávolított ammónium ion mennyisége és a klorát ion koncentráció között nem határozható meg összefüggés, ami felhívja a figyelmet arra, hogy az ammónium ion eltávolításhoz beadagolt vegyszer mennyisége mellett egyéb tervezési és üzemeltetési szempontok is kulcsfontosságúak a klorát ion mennyiségének minimalizálásában. A nemzetközi szakirodalom (Stanford és társai 2011, Coulombe és társai 2019) szerinti ajánlások, melyekkel a megismert hazai tapasztalatok is egybevágnak:

- Nátrium-hipoklorit oldat szállítási gyakoriságának minimalizálása
- Régi és új nátrium-hipoklorit oldat keveredésének kerülése
- Szállítást követően a nátrium-hipoklorit oldat hígítása
- Tárolási idő minimalizálása
- Tárolás alacsony hőmérsékleten, napfénytől védett helyen
- Klorát szint rendszeres mérése a nátrium-hipoklorit oldatokban
- pH rendszeres mérése, pH érték 11-13 között tartása
- Hígított nátrium-hipoklorit oldatok koncentrációjának rendszeres ellenőrzése
- Vegyszertartályok rendszeres tisztítása

A technológiák optimalizálásával, az üzemeltetés fentiek szerinti megváltoztatásával azonban nem feltétlenül lehet a határérték alá csökkenteni a kezelt víz klorát ion koncentrációját, sok esetben csak a technológia megváltoztatásával biztosítható a 0,25 mg/l alatti klorát koncentráció.

Molnár Attila (Északmagyarországi Regionális Vízművek Zrt.): Vízbiztonsági kockázatok kezelése az Északmagyarországi Regionális Vízművek Zrt.-nél

Magyarországon az egészséges ivóvíz mindenki számára elérhető, de hogy ez így is maradjon mind mennyi-

ségi, mind minőségi szempontból a kockázatokat csökkenteni kell. Új technológiák bevezetése, regionalitás kihasználása, kiépítése. A bezárt vízbázisok újra vizsgálása, technológiai javaslat. Víz visszatartás, tározók létrehozása, vízbázisként való kezelése. A területi és települési vízgazdálkodás harmóniájának megteremtése.

Nagy Anita (Észak-zalai Víz- és Csatornamű Zrt.): Egervár vízmű technológiájának tervezése

A 2018-2023 KEHOP során 2 db biotechnológia és 4 db vegyszeres vízkezelő technológia létesült az Észak-zalai Víz- és Csatornamű Zrt. üzemeltetési területén. A tervezés kezdetén vizsgálni kell a vízbázis mennyiségi állapotát.

Készlet problémák. A kutak előbb készüljenek el, mint a vízkezelő technológia. A nyersvíz minőségéhez kellene tervezni a vízkezelő technológiákat és nem típus-terveket kellene kivitelezni.

Felül kellene vizsgálni a membránszűrők alkalmazását az ivóvízkezelésben. Költséges beruházás és üzemeltetés, 8 -10 év élettartam. A technológiai vízigénye a napi termelt vízmennyiség 10-15%-át is eléri! A biotechnológiai fázis lezárásaként a költséges membránszűrők helyett UV csírátlanító berendezést és biztonsági homokszűrőt kellene alkalmazni.

A klorát határértéknek való megfelelés az előzetes mérések alapján nehézségekbe ütközik. Ez valószínűleg a biotechnológiák térnyerését hozza el. Metángáz tartalmú vizek esetén kiemelt fontosságú a megfelelő határfokú gáztalanítók létesítése. Tapasztalataink alapján a B „fokozatú (0,8 - 10 NI /m³)” CH₄ vizek nem megfelelőek a nitrifikáló baktériumok számára. A biotechnológia létesítése előtt javasolt kisüzemi kísérleteket elvégezni és megvizsgálni, hogy a nitrifikáló baktériumok a szűrőtölteten képesek-e elszaporodni.

Nagy Nikolett (Duna Menti Regionális Vízmű Zrt.): Duna Jobbparti Regionális Vízellátó Rendszer víztermelésének, vízellátásának kapacitásbővítő fejlesztése

Hálózat hidraulikai modellezés használata elengedhetetlen egy fővezeteki rendszer kapacitásbővítési feladatainak meghatározásánál, hisz a teljes rendszer vizsgálata nélkül megbízhatóan nem határozhatók meg az új létesítmények szükséges, jellemző paraméterei. A meglévő és tervezett rendszer analízise, felülvizsgálata során, a kapott eredmények alapján egy olyan szintű rendszerfejlesztési stratégia kidolgozására nyílik lehetőség, mely a napi üzemeltetés optimalizálását is elősegíti.

Sebestyén Ágnes, Bufa-Dórr Zsuzsanna, Vargha Márta (Nemzeti Népegészségügyi és Gyógyszerészeti Központ, Közegészségügyi Laboratóriumi és Módszertani Főosztály): Épületek belső hálózatának kockázattértékelése

Az ivóvízminőség területén a kockázatalapú szemlélet erősödik, az ivóvízminőségi problémák tekintetében pedig a geológiai (nyersvíz) eredetű szennyezőkről a

hangsúly a másodlagos szennyezők felé tolódik. Emiatt is vált kiemelt területté az EU-s és a hazai szabályozásban is épületek kockázattértékelése. Az elsőbbségi intézmények kockázattértékelése jogszabályi előírás, de más épületeknél is fontos, hogy megjelenjen ez a fajta szemlélet a tervezés és az üzemeltetés során is. A tervezésnél figyelembe kell venni, hogy megfelelő legyen a méretezés, ne alakuljanak ki pangó szakaszok. A hálózatok szigetelése legyen megfelelő, hogy a használati melegvíz megfelelően meleg (>50°C minden csapon), az ivóvíz megfelelően hideg (<20°C) legyen. A beépített anyagok megválasztása, minősége fontos tényező a másodlagos szennyeződések megjelenése szempontjából, amely területen kiemelt szerepet kap a termékengedélyezés. A bejövő víz kezelése, vagy kiegészítő fertőtlenítése is szükséges lehet (pl. kórházakban), de fontos az előnyök és hátrányok mérlegelése és a vízkezelő rendszerek megfelelő üzemeltetése. Az épületek üzemeltetése során figyelmet kell fordítani arra, hogy a nem használt szakaszok rendszeresen, valamint a hosszabb üzemszünet (pl. tanítási szünet a gyermekintézményekben) után az egész hálózat legyen átöblítve, a csaptelepek legyenek rendszeresen tisztítva, vízkötelenítve, egészségügyi intézményekben fertőtlenítve. A felújítások során pedig érdemes megfontolni, hogy milyen új anyagok kerüljenek beépítésre. A felhasználókat is tájékoztatni kell az első használat előtti átöblítés fontosságára, valamint fel kell hívni a figyelmet, hogy étel-ital készítésekor ne a melegvizet használják. Fontos az épületen belüli víztisztítók, vízadagolók kapcsán is a megfelelő üzemeltetés és karbantartást, valamint a felhasználók tájékoztatása a használattal kapcsolatos előírásokról.

Az előadások elérhetőek az alábbi linken: <https://www.hidrologia.hu/18-ivovizbiztonsagi-konferencia/>

A korábbi szakmai napok anyagai a következő linken érhetőek el:

http://regi.hidrologia.hu/index.php?option=com_content&task=view&id=807&Itemid=263

IRODALOMJEGYZÉK

5/2023 (I. 12.) Kormányrendelet az ivóvíz minőségi követelményeiről és az ellenőrzés rendjéről

Víz Keretirányelv - Az Európai Parlament és a Tanács 2000/60/EK [2000. október 23.] irányelve a vízpolitika terén a közösségi fellépés kereteinek meghatározásáról

Stanford, B.D., Pisarenko, A.N., Snyder, S.A., Gordon, G. (2011). Perchlorate, bromate, and chlorate in hypochlorite solutions: Guidelines for utilities Journal – American Water Works Association, 103(6), pp. 71–83. <https://doi.org/10.1002/j.1551-8833.2011.tb11474.x>

Coulombe, L., Legay, C., Sérodes, J., és Rodriguez, M. J. (2019). Management of hypochlorite solutions used for water treatment in small drinking water systems. Water Practice and & Technology, 14(2). pp. 380-390. <https://doi.org/10.2166/wpt.2019.025>

A SZERZŐK

BORSÁNYI MÁTYÁS Dr. tech., okleveles vegyészmérnök a Budapesti Műszaki Egyetemen biokémia és élelmiszertechnológia szakon végzett. Az 1970-es évektől az Országos Közegészségügyi Intézetben dolgozott, a Vízbiztonsági Osztály megalapítója, vezetője volt. Fő szakterülete az ivóvízminőség-szabályozás, a biotechnológiai ivóvízkezelés, az ivóvízfertőtlenítés. A hazai (MSZ) és nemzetközi (ISO, CEN) vízvizsgálati szabványokat, az EU ivóvízminőségi előírásokat kidolgozó (ENDWARE) munkacsoportok tagja volt. A WHO vízbiztonság-tervezés program hazai bevezetésének előkészítője. Az 1970-es évektől a Magyar Hidrológiai Társaság Vízbiztonsági (korábban Vízkémiai) és Víztechnológiai Szakosztály tagja, titkára, jelenleg elnöke.



LAKY DÓRA PhD, okleveles építőmérnök, a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Építőmérnöki Karán a Vízi Közmű és Környezetmérnöki Tanszék egyetemi docense. Fő szakterülete a víztisztítás, ezen belül főként a felszín alatti vizek tisztítási technológiái (arzenmentesítés, ammónium eltávolítása, vas- és mangántalanítás, melléktermékek képződésének problémaköre). A Magyar Hidrológiai Társaság Vízbiztonsági és Víztechnológiai Szakosztályának titkára.

Esemény



Az MHT XLII. Országos Vándorgyűlésének 2025-ben Székesfehérvár ad otthont. Csurgai-Horváthné Kiss Henriett és Oláh Zoltán írása segítségével bemutatjuk a Vándorgyűlés házigazdáját, a Közép-dunántúli Vízügyi Igazgatóságot (KDTVIZIG).

KDTVIZIG: Három vármegye vizeit felügyeljük

Csurgai-Horváthné Kiss Henriett¹ és Oláh Zoltán²

¹ osztályvezető, Közép-dunántúli Vízügyi Igazgatóság, 8000 Székesfehérvár, Balatoni út 6. (e-mail: kiss.henriett@kdtvizig.hu),

² műszaki igazgató-helyettes, Közép-dunántúli Vízügyi Igazgatóság, 8000 Székesfehérvár, Balatoni út 6. (e-mail: olahzoltan@kdtvizig.hu)

Kivonat

2025-ben Székesfehérváron a Közép-dunántúli Vízügyi Igazgatóság (KDTVIZIG) lesz a házigazdája a Magyar Hidrológiai Társaság XLII. Országos Vándorgyűlésének. A 2025 júliusára tervezett nagyszabású, hagyományos szakmai esemény remek apropót szolgáltat arra, hogy idő- és térbeli utazásra invitáljuk Olvasóinkat a Dunántúl vizekben és teendőkben gazdag vidékére, a KDTVIZIG területére, bemutatva különleges feladataikat.

Kulcsszavak

Közép-dunántúli Vízügyi Igazgatóság, Országos Vándorgyűlés, Magyar Hidrológiai Társaság.

KDTVIZIG: We supervise the waters of three counties

Abstract

In 2025, the Central-Transdanubian Water Directorate (KDTVIZIG) will host the XLII Annual National Conference of the Hungarian Hydrological Society in Székesfehérvár. The large-scale, traditional event planned for July 2025 provides a wonderful opportunity to invite our readers on a journey through time and space to the region of Transdanubia, to the territory of the directorate, presenting our special tasks.

Keywords

Central-Transdanubian Water Directorate, Annual National Conference, Hungarian Hydrological Society.

A KEZDETEKTŐL...

A Közép-dunántúli Vízügyi Igazgatóság (KDTVIZIG) területén már a szervezet megalakulása előtti időben is igen változatos és színvonalas vízgazdálkodási tevé-

kenység folyt, de a jelenlegi felépítést a napjainkban érvényes működési területtel 1953. november 1-jén hozták létre (*1. táblázat*).

*1. táblázat. Az igazgatóság számokban
Table 1. Characteristics of Directorates*

Működési terület	13 000 km ²	Települések száma:	439
Elsőrendű árvízvédelmi fővédvonalak hossza	242 km	Folyók	120 fkm (Sió)
Belvízcsatornák hossza	535 km	Vízfolyások:	2391 dombvidéki,
Nagytavak:	Balaton Velencei-tó		402 km síkvidéki
Szivattyútelepek száma	5 db	Víztározók száma:	18
összkapacitás	9,42 m ³ /s	befogadóképességük	30 483 000 m ³

A KDTVIZIG-et olyan különleges feladatokon keresztül mutatjuk be, melyek a nevével öregbítk és betekintést engednek a szakma számára az egyes háttéranyagokba.

A 2000-ES ÉVEK BERUHÁZÁSAI

Az Európai Unió a Kohéziós Alapban és az Európai Regionális Fejlesztési Alapban elkülönített források révén a 2007-2013 és 2014-2020-as programozási időszakokban meghirdetett operatív programok keretében nemcsak vízügyi fejlesztésekre biztosítottak jelentős támogatást, hanem ezeknek a támogatásoknak a felhasználásával nagy

volumenű környezetvédelmi és épületenergetikai beruházások is megvalósulhattak.

A 2007-2013. programozási időszakban került sor a Séd-Sárvízi Malom-csatorna és a Szekszárd-Bátai főcsatorna komplex vízrendezésére, összesen 106 km vízfolyás rendezésével és 40 db kisebb-nagyobb műtárgy építésével, rekonstrukciójával. A Szekszárd-Bátai főcsatorna esetében az éghajlatváltozás mellett további problémát okozott, hogy a vízfolyás 0+000 km szelvénye közelében az 1872-ben megépített bátai torkolati zsilip magas küszöbszintje akár 20-22 km hosszan is visszaduzzasztotta a főcsatorna

medrében levonuló vizeket. Ez, az egyébként kiváló termőhelyi adottságokkal rendelkező térségben tartósan magas talajvízállást, belvízi helyzetben pedig felszíni elöntéseket is okozott, valamint veszélyeztette az öblözetben lévő települések biztonságát.

A vízügyi fejlesztések mellett komoly szakmai kihívást jelentett a jogutód nélkül megszűnt Peremartoni Vegyipari Vállalat által hátrahagyott környezeti károk felszámolása, amelyre szintén pályázati forrás biztosított lehetőséget. A területen 1923-1992 között folytatott vegyipari tevékenység során keletkezett hulladékokat műszaki védelem nélkül deponáltak a vállalathoz tartozó nyílt karsztos terület felszíni mélyedéseiben, illetve ott végezték a göngyöleg égetését is. A terület közvetlenül határos a Pétfürdői vízbázis "B" hidrogeológiai védőterületével, emiatt kiemelten fontos feladat volt a terület kármentesítése. Az alkalmazott műszaki beavatkozási technológia a lehető legnagyobb arányban nyersanyagként hasznosította a felhalmozott hulladékot és a szennyezett talajt. A projekt megvalósításával az érintett területen a környezetszennyezés megszűnt, a terület környezeti állapota javult, a hulladékok jelentős részének hasznosításával az utókorra hátrahagyott környezetvédelmi teher csökkent.

A 2014-2020-as programozási időszakban újulhatott meg az Igazgatóság működési területén található nagytavak, dombvidéki vízrendszerek, vízfolyások és műtárgyak vízgazdálkodási tevékenysége is. Mind a Balaton és a Velencei-tó, mind pedig dombvidéki vízfolyásaink profitáltak abból a több mint 55 milliárd forint vissza nem térítendő támogatásból, melynek segítségével újjáépültek műtárgyaink, korszerűbb lett az üzemirányítási rendszerünk és a monitoring hálózatunk, jelentős mederrekonstrukciós munkálatok valósultak meg vízfolyásainkon.

A legnagyobb figyelem mind a szakma, mind a gazdasági szereplők, mind pedig a civil szféra részéről két nagytavunkat övezi. Legnagyobb szabású beruházásaink éppen ezért e két nemzeti kincsünket érintették. A Balatonon megvalósított projektek új szintre emelték a tó vízgazdálkodását. A Velencei-tó partvédő műveinek rekonstrukciója és innovatív úszómű vendégmólók kialakítása hozzájárult a rendezett tóhasználat feltételeinek megteremtéséhez.

A BALATON LEVEZETŐ RENDSZERÉNEK KORSZERŰSÍTÉSE

A közel 20 milliárd forint összköltségű projekt számos olyan elemmel gazdagította a magyar vízgazdálkodást, melyek unikumnak tekinthetők nem csupán hazai, hanem nemzetközi relációban is. Ha a beruházásról beszélünk, annak két nagy alkotóelemét kell kiemelnünk: a Balaton vízszintszabályozását és a hajózást új alapokra helyező nagyműtárgyakat, valamint a Sió-csatorna rekonstrukcióját. A projektben megvalósult valamennyi fejlesztés célja, hogy a kor klímakövetelményeihez igazítsa, sokkal rugalmasabbá tegye a Balaton vízkészletének kezelését. Ehhez szükségesek a modern műszaki létesítmények, de elengedhetetlen az is, hogy nőjön a Sió-csatorna vízlevezető képessége.

A Balaton vízszintjének medertározáson alapuló szabályozása kizárólag a siófoki vízleeresztő zsilip segítségével valósítható meg. A régi leeresztő zsilipet 1947-ben helyezték üzembe és a Balatont egészen 1999-ig elkerülte az igazán szélsőséges vízjárás. A 2000-tól kezdődő 15 éves időszakban azonban mindkét véglet bekövetkezett. Elsőként egy négy évig (2000-2003 között) tartó súlyos vízhiány és az abból fakadó extrém kisvíz volt a jellemző, majd 2014-ben ennek ellenkezője, a tartós, nemkívánatosan magas vízszint, aminek következtében több mint fél évig tartó, 50 m³/s kapacitású vízeresztés vált szükségessé.

A fentiek miatt új szempontok, tanulságok, és mindezek alapján a levezető rendszerrel szembeni új elvárások fogalmazódtak meg. A Balaton vízszinttartásának az üzemeltetési engedélyben megfogalmazott követelményeit az előzőekben ismertetett időjárási anomáliák miatt kevésbé lehetett teljesíteni, hiszen aszályos időszakban a minimális vízszintek alatti, nedves időszakban a maximális vízszintek feletti vízállások fordulnak elő. A klímaváltozás hatásainak mérséklése, a szélsőséges időjárási események gyakorisága tehát a tóban történő többlet-tározás lehetőségének megteremtését igényelte. Ennek eszköze volt szabályozási szint maximumának emelése, ami az eddigieknél szélesebb tartományban történő vízkészletgazdálkodásra ad lehetőséget. Így alapvetően vált szükségessé a szabályozó műtárgyak átépítése és a Sió-csatorna vízlevezető képességének javítása.



1. kép. Siófoki zsiliprendszer és közösségi tér (Fotó: KDTVIZIG)
Image 1. Siófok lock system and community space (Photo: KDTVIZIG)

Vízleeresztő zsilip

Az elbontott siófoki zsilipegyüttes több mint 70 eszten-deje épült. A Balaton vízszintszabályozását biztosító régi nagyműtárgyak már a 2000-es évek elejére elérték a tervezett műszaki élettartamukat, ám a létesítmények pusztá fel-újítása nem hozta volna magával a kívánt műszaki biztonságot, így a létesítmények helyett újakat kellett építeni.

A siófoki vízleeresztő zsilip építésének célja a Balaton magasabb üzemi vízszintjéhez társított nagyobb vízeresztő képesség biztosítása, valamint a korábbinál rugalmasabb szabályozási lehetőségek megteremtése volt.

Az elbontott leeresztő zsilip névleges kapacitása 80 m³/s volt, azonban a műtárgy kora, állapota miatt 50 m³/s-nál nagyobb hozamú eresztésre tartósan nem volt képes. A meglévő környezeti adottságokat és a megváltozott klimatikus helyzetet, így az új műtárggyal szemben támasztott követelményeket figyelembe véve a 80-100 m³/s hozamra történő kiépítés mellett született döntés

A régi síktáblás, kézi mozgatású 2 db, egyenként 2 m x 4 m nyílásszélességű elzárószerkezet helyett 2 db, 2 m x 8 m nyílású, nyílásonként 1-1 db szegmens elzárószerkezet készült, hidraulikus mozgatással.

Hajózsilip

A siófoki hajózsilip építésének célja a már meglévő, de a régi műtárggyal a továbbiakban már nem megfelelően biztosítható hajózási lehetőség helyreállítása volt. A hajózsilip esetében alkalmazott innováció a másodlagos vízleeresztő képesség biztosítása volt. Ehhez a műtárgy alsófői elzárásának újragondolására, szegmens táblás kialakítására volt szükség. A zsilip ezen funkciója által a Balaton magasabb üzemi vízszintjéhez alkalmazkodó, összességében nagyobb vízeresztő képesség is társul.

Az elbontott 12 m x 85 m alapterületű, alsó és felső nyílásnál egyaránt támkapus elzárású hajózsilip helyén

12 m x 90 m hasznos hajózási méretű (felvizen támkapus, alvizen szegmenszárású) műtárgy épült. Az alvízi szegmenszárás lehetővé teszi a biztonságosan szabályozható vízeresztést, ha leeresztő zsilip karbantartás vagy egyéb ok miatt nem tudja ellátni feladatát. Így a zsilipek segítségével a Balaton vízkészletét csökkentő vízkormányzás minden körülmény között biztosítva van.

Balatonkiliti mederduzzasztó

A Balatonkiliti mederduzzasztó építésének célja egyrészt a vízleeresztésben és a hajók átvezetésében való részvétel volt. Másrészt a műtárgy által biztosítani tudjuk Siófok belterületén az ökológiai vízigényt, azaz a vízeresztések időszakán kívül is esztétikus, vízzel telt megjelenést tudunk biztosítani a Sió-csatorna közel 2 km-es belterületi szakaszának. A műtárgy elhelyezésekor és szerkezeti kialakításakor figyelembe vettük a város távlati fejlesztési elképzeléseit is, így a régi duzzasztómű alvizen, attól ~700 m-rel lejjebb épült meg az új duzzasztómű. Ezzel a duzzasztott, tárolt víztömeg megnövekedett. A régi elbontott, egynyílású duzzasztó helyett kétnyílású, 12 m széles hajózási és 8 m széles duzzasztó nyílású, nyílásonként billenőtáblás elzáró szerkezetű műtárgy épült.

Üzemirányítás és közösségi tér

A megépült műtárgyak együttes kezelése és irányítása – modern irányítástechnikával, távfelügyelettel ellátott módon – az újonnan megépült üzemirányítási épületből történik. Az épület a leeresztő és a hajózsilip közötti területen épült meg. Az energiaellátása megújuló energiával valósul meg. Hangsúlyos újdonságként említhető, hogy a korábban elzárt üzemi terület megnyílt a nyilvánosság előtt. A séta- és pihenővezetekkel tarkított zóna látogatása betekintést enged a vízügyi ágazat tevékenységébe. Emellett Siófok igen modern tájépítészeti elemmel lett gazdagabb a lakosság és a városba látogatók öröme. Az építészeti nívót jelzi, hogy a projekt keretében átépített

műtárgyegyüttest a 2024-es Víz Világnapja alkalmából Lampl Hugó Emlékplakettal tüntették ki, mint a legszebben kivitelezett és legkiválóbb technológiát alkalmazó vízügyi létesítményt.

Sió-csatorna

A vízszintszabályozó műtárgy megnövekedett kapacitása megkövetelte a Sió-csatorna megújítását, a megfelelő átteresztőkapacitás folyamatos biztosítása érdekében. A Sió-csatorna jelenleg, a felújítást követően teljes hosszában képes fogadni és károkozás nélkül továbbítani a Balaton vízeresztéséből adódó többletterhelést. Emellett – a vízeresztés időszakában – lehetővé válik a hajózási igények biztonságos kielégítése is. A Sió-csatorna legfontosabb rekonstrukciós munkái a következők voltak: meder-, töltés- és depóniarendeztés, kotrási munkák és vízügyi mű-

tárgyak felújítása. A Pincehely és Ozora térségében kialakított vizes élőhely projekteleme által kitágulnak a lehetőségek egy zöld-kék infrastruktúra fejlesztésre, melynek fő szempontja a vízviszatarthatás.

ÁTFOGÓ KÖRNYEZETI MEGFIGYELŐ ÉS TÁJÉKOZTATÓ RENDSZER A BALATONON

A jelen klimatikus viszonyai között a Balaton vízmennyiségi és -minőségi állapotának mérése, az adatelemzés, az értékelés, a vízminőségi problémák kezelése különös jelentőséget kap. Ezt a törekvést szolgálta az a projekt, mely segít válaszokat találni arra, hogy a tó mint ökológiai rendszer miként reagál az éghajlatváltozásra és, hogy a reakciók mennyiben következnek globális és mennyiben helyi folyamatoktól. A fejlesztés továbbá a tájékoztató rendszerek kiépítésével hozzájárult a tájékoztatás reformjához.



2. kép. Szigetüzemű hidrometeorológiai és vízminőségi kutatóállomás a Balatonon (Fotó: KDTVIZIG)
Image 2. Island-operated hydrometeorological and water quality research station on Lake Balaton (Photo: KDTVIZIG)

A projekt keretében a Balaton négy eltérő fizikai- kémiai- és ökológiai- paraméterekkel jellemezhető medencéjében, – Siófok, Balatonszemes, Szigliget, valamint Keszthely térségében – szigetüzemű hidrometeorológiai és vízminőségi kutatóállomások létesültek. Ezeket túl további műszerek (pl. nyomásmérő szondák) telepítésére kerül sor a Balaton parti sávjában, valamint több laboratóriumi eszköz beszerzése is megvalósult. A műszerek által gyűjtött adatok az átfogó tájékoztatási- és döntéstámogató rendszer adatbázisába kerülnek, mely több szervezethez tartozó alrendszer összekapcsolásával jött létre. Az adatbázis hozzásegíti a döntéshozókat a klímaváltozással szembeni érzékenység megértéséhez és a megalapozott döntések meghozásához. Az információk digitális tájékoztató táblákon, mobil alkalmazásokon és nyilvános honlapon keresztül megtekinthetőek a civil érdeklődők számára is (*Balaton Portál*).

A kutatóállomásokat a Közép-dunántúli Vízügyi Igazgatóság és a projektben együttműködő egyik partnerszervezete, az HungaroMet Magyar Meteorológiai Szolgáltató Nonprofit Zrt. üzemelteti. A kutatóállomások helyet biztosítanak a Balaton viharjelzőrendszer be- rendezései számára is.

PREVENTÍV INTÉZKEDÉSEK A BALATONT ÉRINTŐ VÍZMINŐSÉGI PROBLÉMÁK HOSSZÚTÁVON FENNTARTHATÓ KEZELÉSÉRE

A Balatont érő terhelések enyhítésére az elmúlt három évtizedben számos intézkedés történt. Több kisvízfolyás torlathoz közeli szakaszán olyan műszaki létesítmények épültek, amelyek alkalmasak az érkező hordalék és felgyülemlett szerves tápanyagok visszatartására. A fejlesztés keretében ezeknek a műszaki létesítményeknek a reaktiválása, rekonstrukciója történt meg a közelmúltban, hogy funkciójukat a jövőben is maradéktalanul be tudják tölteni a tó vízminőségének megóvása érdekében.

A Balaton vízminőségének hosszútávú védelme, a vízminőség javítása elképzelhetetlen a Kis-Balaton Vízáradalmi Rendszer megfelelő működése nélkül. Ezért a projekt egyik fő eleme a rendszer 4T illetve 21T zsilipjeinek teljeskörű építészeti, gépészeti és villamos felújítása volt.

Az északi parton a Tapolca-, a Lesence-, a Kétöles- és a Világos-patak, a Középvízi-csatorna, és a Nemesvitai-övärok a Lesence nádas szűrőmezővel kiegészülve alkotják a Lesence vízrendszert, amely egyfajta szűrő funkciót lát el. A nádas szűrőmező nemcsak hordalékfogóként szol-

gál, hanem a tápanyagok megkötése révén is kedvező hatást gyakorol a Balaton vízminőségére. A Tapolcai-medence vizei a Lesence nádas szűrőmezőre kormányozha-

tók, ahol a megfelelő tartózkodási idő és a növényzet tápanyagfelvétele miatt a szűrőmezőről kifolyó vizek minősége kedvezőbb.



3. kép. A Lesence-patak nádas szűrőmezővel kiegészített vízrendszere (Fotó: KDTVIZIG)
Image 3. The water system of the Lesence creek supplemented with wetland (Photo: KDTVIZIG)

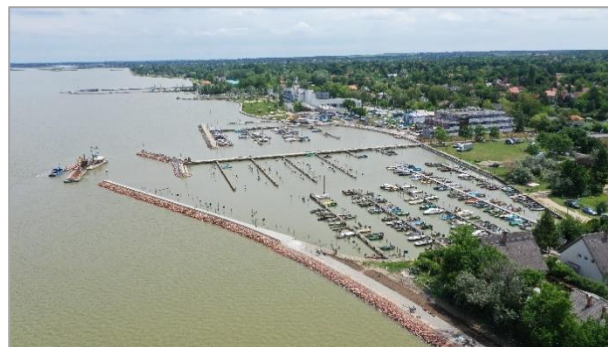
A projektben hat kisvízfolyás (Lovasi-séd, Kéki-patak, Örvényesi-séd, Burnót-patak, Eger-víz, Cinege-patak) torkolati szakaszán a meglévő hordalékfogók, uszadékfogók felújítása, új műtárgyak építése, mederburkolatok rekonstrukciója történt meg, valamint sor került a Lesence nádas szűrőmezőhöz hasonló feladatot ellátó Lovasi-tározó rehabilitációjára is.

A Balatonba jutó tápanyagterhelés és a vízminőségvédelmi létesítmények hatásfokának folyamatos nyomon követése érdekében a tavat tápláló vízfolyásokon vízmennyiségi és vízminőségi monitoring állomások létesültek.

VELENCEI-TÓ – VELENCEI-TAVI PARTFAL KOMPLEX, FENNTARTHATÓ REHABILITÁCIÓJA

Bár a projekt leglátványosabb eleme a tó arculatát alapvetően meghatározó, ám elavult, vasbeton szerkezetű partvédőművek rekonstrukciója, több, vízminőséget javító, a táj adottságait, valamint természetvédelmi értékeket és társadalmi igényeket szem előtt tartó beavatkozás is megvalósult. A projekt keretében 47 partszakaszon történt meg az épített partfalak hatályos jogszabályoknak megfelelő magasságú rehabilitációja többféle partfalépítési technológia alkalmazásával, az adott helyszín jellegéhez, és az üzemeltetés során felmerülő speciális igényekhez egyaránt igazodva. A betonba rakott terméskő rakat előtt kőszórás biztosítja a jégvédelmet, valamint a hullámmászából adódó energia elnyelését. A partfalrekonstrukció mellett az öb-

lökben és számos védett, természetvédelmi területen – a vízáramlás javítása érdekében – kotrások valósultak meg. A kiemelt mederanyagból költőszigetek kialakítására került sor a nádas lápi részén, mely számos madárfajnak nyújthat fészkelőhelyet. Megtörtént a Velencei-tóba torkolló vízfolyások és a vízminőségi hordalékfogó tározók rendezése is. A kialakított 6 db természetes ívóhely és 2 db fenntartható halbölcső nagyban elősegíti, hogy a halak szaporodásukhoz természetközeli élőhelyet találjanak. A sekély víz és vízpart pedig számos élőlénynek nyújt majd táplálkozó- és szaporodóhelyet.



4. kép. Velencei-tó és az agárdi Béke utcai kikötő – előtérben felújított hullámtörő és rézsűs partfal szakasz (Fotó: KDTVIZIG)

Image 4. Lake Velence and the Béke Street harbor in Agárd – renovated breakwater and sloping shore wall section in the foreground (Photo: KDTVIZIG)

DOMBVIDÉKI FEJLESZTÉSEK – FEHÉRVÁRCSURGÓI-TÁROZÓ, VÁLI-VÍZ, SZENT LÁSZLÓ-PATAK

Az Európai Unió 2014-2020 közötti fejlesztési programjai közül kiemelkedően fontosak voltak a dombvidéki vízgazdálkodás feltételeinek javítását célzó beruházások. A KDTVIZIG működési területén több olyan fejlesztés valósult meg, melyek javították a vízfolyások környezetében az árvízi biztonságot, lehetőséget nyújtottak a mezőgazdasági és természetvédelmi célokhoz igazodó vízkormányzásra. Az éghajlatváltozáshoz köthető vízkáresemények, melyeket leginkább a szélsőséges csapadékvevényesség okozott, rámutattak arra, hogy időszerű a Fehérvárcsurgói-tározó fejlesztése, a Váli-víz és a Szent László-patak medrének és műtárgyainak rekonstrukciója, környezetük rehabilitációja.



5. kép. A Fehérvárcsurgói-tározó fenékleürítő műtárgya (Fotó: KDTVIZIG)

Image 5. The Fehérvárcsurgó reservoir bottom discharge unit (Photo: KDTVIZIG)

A Fehérvárcsurgói-tározó árvízvédelmi fejlesztése, vízhasznosítási célú bővítése rendkívül időszerű vízügyi beruházásnak minősült a térségben. A tározótér és a műtárgyak felújítása, a megújult monitoring és üzemirányítási rendszer jelentősen növelte a Gaja-patak alsó szakaszán és a Nádor-csatomán a mezőgazdasági vízszolgáltatás biztonságát, az üzemeltetés rugalmasságát, illetve lehetővé tette az újabb vízigények kielégítését úgy, hogy közben az árvízi biztonság nem csökken. Az árvízvédelmi fejlesztés mellett a vízrendszer későbbi, megfelelő szintű üzemeltetéséhez a projektben kiemelt szerepet kapott egy korszerű monitoring és üzemirányítási rendszer kiépítése is. A rendszer részeként telepítésre került egy nagy felbontású meteorológiai miniradar is, amely a tározó optimális üzemeltetését biztosító korszerű üzemirányítási rendszer fő elemeként lehetővé teszi a vízgyűjtő területen a csapadékjelenségek eloszlásának és intenzitásának azonnali érzékelését, a nagy-csapadékok biztonságos idejű előrejelzését. A fejlesztés nyomán javult a vízrendszer állapota, erősödött a tározó alatti Gaja-szakasz és a Nádor-csatorna zöldfolyosó-jellege, javult a vízhez kötődő szárazföldi élőlények élettere.

A Mezőföld két legjelentősebb dombvidéki vízfolyásán – a Váli-vízen és a Szent László-patakon – a klimatikus érzékenységet ellensúlyozandó jelentős mederrendezések, műtárgyrekonstrukciók, műtárgyépítések, tározó építések

és átépítések, töltésépítések, fenntartó út rekonstrukciók, aszálymonitoring-rendszer kiépítések és eszközbeszerzések történtek. Ezek nyomán nőtt a vízfolyások mentén húzódó települések árvízi biztonsága, javult vízvezető képességük, egyenletesebbé vált vízhozamuk, nőtt a vízviszatarthatás lehetősége. Fontos szempont volt, hogy a vízfolyások visszanyerjék természetes ökológiai állapotukat, ezt szolgálták a növényzettelépítések és a vizes élőhelyek kialakítása.

AZ ELMÚLT 15 ÉV KÜLÖNLEGES VÍZGAZDÁLKODÁSI ESEMÉNYEI

A vörösiszap-katasztrófa - az elmúlt évtized egyik legjelentősebb vízminőségi kárelhárítása (Cosult-Info Kft. 2020).

A Kolontár külterületén lévő vörösiszap-tározó gátszakadásával Magyarország történelmének legsúlyosabb ipari katasztrófája következett be. A katasztrófa következtében 10 lakos életét vesztette, 286 fő szorult egészségügyi ellátásra és ezek közül 120 fő hosszabb kórházi kezelésre.

2010. október 4-én 12:10-kor a Magyar Alumínium Termelő és Kereskedelmi Zrt. (MAL Zrt.) ajkai timföldgyáranak kolontári X. vörösiszap-tározójánál átszakadt a gát. A vörösiszappal szennyezett víz azonnal elöntötte Kolontár települést, majd pedig az elöntés érintette Devecsert, Somlóvásárhelyt, Somlójenőt, Tüskevárt, Apácatornát és Kisberzsényt. A Torna-patakon levonuló vörösiszap-árhullám elérte és szennyezte a Marcalt, majd tovább haladva a Rábát és a Mosoni-Dunát.

Az életveszélyessé vált, illetve a vörösiszappal szennyeződött lakásokból, Kolontárról, Devecserből és Somlóvásárhelyről 390 embert azonnal ki kellett menekíteni és további 110 személy kitelepítéséről kellett haladéktalanul gondoskodni. 367 belterületi ingatlant ért károsodás, melyek döntő részét el kellett bontani, kisebb részét helyreállították. A lúgos iszap 1 017 hektár mezőgazdasági területet árasztott el, megsemmisítve az ott található mezőgazdasági kultúrákat. A károsult mezőgazdálkodók száma 731 fő volt. A lúgos iszap felbecsülhetetlen humán, gazdasági és ökológiai károkat okozott a térségben.

A szennyezéssel érintett három vízügyi igazgatóság, a Közép-dunántúli, az Észak-dunántúli és a Nyugat-dunántúli Vízügyi Igazgatóság III. fokú vízminőségvédelmi készütséget rendelt el. Ennek során sokrétű műszaki beavatkozásokra került sor. Széles körű megfigyeléseket, méréseket kellett végezni (vízállás, vízhozam és vízminőség mérések, üledék-mintavételek, iszapvizsgálatok történtek). Távjelző vízmércék, valamint vízminőségi monitoring állomások létesültek a Torna-patakon.

Egyedi vízminőségvédelmi beavatkozások alkalmazására került sor: fenékküszöböket építettek a Torna-patakon és a Marcalon, mögöttük ülepítőtereket alakítottak ki, az erősen lúgos kémhatású vörösiszap-zagy semlegesítésére gipszet adagoltak és savazást alkalmaztak a levonuló árhullám pH értékének csökkentésére, valamint igénybe vettek vízsugaras levegőztető berendezéseket.

A szennyezéssel érintett területek és a vízfolyások rehabilitálása érdekében elvégezték a vízfolyások medrének és hullámterének, valamint a csatornamedreknek és a padkának a kotrását, lepelkotrást, a kikotort anyag, mint veszélyes hulladék elszállítását és szakszerű elhelyezését a MAL Zrt. üzemi területén.

Élővizet érintően ilyen mértékű ipari katasztrófát követő vízminőségvédelmi beavatkozásra Magyarországon nem volt példa. A három érintett vízügyi igazgatóság példátlanul komplex és sikeres szakmai munkát végzett azon cél érdekében, hogy a szennyezettségtől megvédjék a Dunát és az érintett területen lévő ivóvízbázisokat. A védekezésben együttműködtek és az eredményhez hozzájárultak a vízügyi szervek mellett az egyetemek, a laboratóriumok, a vállalkozások és a civil lakosság is.

2. táblázat. A szállítandó hajók adatai
Table 2. Characteristics of the ships to be transported

	Komp	Személyszállító
Hosszúság (m)	45	35
Szélesség (m)	11,4	11
Merülés (m)	1,2	1,5
Szükséges magasság vízszint felett (m)	5	

A „Balaton levezető rendszerének korszerűsítése” elnevezésű beruházás keretében a siófoki műtárgyegyüttes és a Balatonkiliti duzzasztó újjáépítése mellett a Sió-csatornán több helyütt került sor mederrekonstruktív munkálatokra, azonban maradtak olyan szakaszok, melyeket szükséges volt jókarba helyezni a szállítás végrehajtása érdekében. A beavatkozások megtervezése során továbbá – a hajók paramétereire igazítva – olyan szempontokat is figyelembe kellett venni, mint a Keselyüsi és a Siófoki hajózsilip, valamint a Balatonkiliti mederduzzasztó méretei, a csatorna hidjainak fix magassági korlátai, a kanyarulati viszonyok javítása.

A tervezéshez kapcsolódó modellfuttatások alapján a 35 m³/s vízeresztés során kialakuló felszingörbe túnt optimális mértékadó vízszintnek, mivel minimálisan 15,4-16,0 m szélességű és 2,2 m mélységű hajózási úrszelvény biztosítása látszott szükségesnek.

A hidrometeorológiai körülmények és az előrejelzések alapján a 2023 nyár eleji periódus volt alkalmas a szállításra. A szállítást megelőzték többek között az alábbi feladatok:

- műtárgyak üzempróbája,
- a legutóbbi mederrendezés óta eltelt időben keletkezett akadályok megszüntetése,
- aktuális vízállás- és vízhozam adatokat megjelenítő webes alkalmazás fejlesztése,
- Vízrajzi Modul mobilalkalmazás tesztelése és éles üzembe helyezése,
- ideiglenes vízmércék telepítése a kritikus hídszelvényekhez és magassági alappontok létesítése a szintezéshez,

A BAHART hajók szállítása a Balatonra 2023-ban (Dobó és társai 2023).

A vízügyi ágazat, ezen belül a területileg illetékes KDTVIZIG jelentős szakmai feladatot kapott 2023 nyarán. A Balatoni Hajózási Zrt. (BAHART) 2021 elején megkezdte hajóflottája modernizálását a flotta bővítésével, ami 2 db új komp és 2 db új személyszállító katamarán beszerzését jelentette. A Révkomáromban gyártott hajókat a Dunán és a Sió-csatornán keresztül kellett eljuttatni rendeltetési helyükre, a Balatonra.

A hajószállítás megvalósításához a Sió-csatornán több beavatkozást is el kellett végezni. A csatorna időszakosan hajózható IV. osztályú hajóút, azaz a csatorna mederveviszonyai mellett legfeljebb 85,0 m hosszú, 9,5 m szélességű és 2,5 m merülésű hajó biztonságos közlekedése oldható meg, a Balatonból történő, megfelelő mértékű vízeresztés esetén. A hajók szélessége viszont ezt az értéket meghaladta.

- hídszelvények ellenőrző geodéziai bemérése,
- ár- és belvízvédelmi intézkedések.

Az előzetes ütemtervek a Balaton vízkészletének 8-17 cm közötti felhasználását prognosztizálták, 20-40 nap alatt. A hajókonvojt a SAM hajógyár állította össze. A végleges állapot szerint a kompok mozgatása darabonként egy vonó- és egy tolóhajóval, míg a katamaránoké darabonként egy vonóhajóval és két farpozícionáló motorcsónakkal valósult meg. Része volt még a katamaránok felszerkezetét szállító uszály és annak vontatóhajója is. A konvoj előtt időelőnyvel mozgott egy mérőhajó, továbbá egy úszómunkagép, illetve az azt mozgató vontatóhajó.

A tényleges végrehajtás fázisa a vízeresztés megindításával 2023. június 13-án 8:00 órakor vette kezdetét. A 2022-ben tapasztalt, tartósan vízhiányos időszak miatt ennél korábban nem volt kivitelezhető a szállítás.

A konvoj 2023. június 21-én indult Révkomáromból völgyemenetben a Dunán és június 22-én estére ért a Sió-csatorna torkolatához. A folyamatos mérések alapján látható volt, hogy az alsó szakaszon 40 m³/s-ra, a felső szakaszon 45 m³/s-ra kell növelni az eresztés mértékét az elvárt felszingörbe beállítása érdekében. A Sió-csatorna szakaszain végig hajózva, a konvoj június 27-én ért el a Balatonkiliti duzzasztó alvérére, ahol megtörtént az áthaladás a duzzasztóművön. Az áthaladás után azonnal megkezdődött a vízeresztés fokozatos csökkentése, végül július 3-án megtörténhetett a BAHART hajók és a kiszolgáló műszaki úszógétségek átszilipelése a Siófoki hajózsilipen keresztül a Balatonra.



6. kép. A konvoj átkelése a Siófoki Hajózsilipen (Fotó: KDTVIZIG)
Image 6. The convoy crossing the Siófok Shipyards (Photo: KDTVIZIG)

A feladat végrehajtása során több innovatív informatikai fejlesztés bevezetésére is sor került, melyek sikeres vizsgát tettek: bebizonyosodott, hogy a jövőbeli védekezési feladatoknál is nagy segítségére lehetnek a döntéshozóknak, irányítóknak. Összefoglalva elmondható, hogy a Sión végrehajtott szállítás az optimista ütemtervnek megfelelően zajlott. A Balatonból 6,5 cm vízmagasságnak megfelelő vízkészlet került felhasználásra, ami jelentősen alulmúlta az előzetesen prognosztizált értékeket. A szállítás sikeresen lezárult, amihez valamennyi résztvevő munkája hozzájárult, ezen belül is elengedhetetlen volt a vízügyi kollégák felkészültsége és helytállása.

TISZTELT VÁNDORGYŰLÉS VENDÉGEINK!

Röviden szeretnénk volna bemutatni az Igazgatóság utolsó két évtizedének történetét, tevékenységét, véde-

kezéseit és fejlesztéseit. Mindenkit szeretettel várunk Székesfehérvárra.

További információk az igazgatóságról: www.kdtvizig.hu

A vándorgyűlés bemutatkozó filmje az alábbi linken tekinthető meg:

https://youtu.be/lv6phqG4kmo?si=wzvwLg3E0-aRj_FY

IRODALOMJEGYZÉK

Balaton Portál, <https://atfoglobalaton.vizugy.hu>

Cosult-Info Kft. (2020). A 2010. októberi vörösiszap-katasztrófa vízminőségi kárelhárítása,

Dobó K., Sztojcsév Zs., Varga B. (2023). Révkomáromtól Siófokig – hajószállítás, Sodorvonal, VI. évfolyam, 3. szám

SZERZŐK



CSURGAI-HORVÁTHNÉ KISS HENRIETT okl. geológus (Eötvös Loránd Tudományegyetem, Természettudományi Kar, 1999.), közbeszerzési referens (OKJ: 52 343 01, 2015.). Az egyetem elvégzése után multinacionális környezetvédelmi tanácsadó cég mérnökeként felszín alatti szénhidrogén szennyeződések felszámolásában vett részt. 2008 óta a Közép-dunántúli Vízügyi Igazgatóság illetve jogelődjének állományában kezdetben környezetvédelmi ügyintéző, majd csoportvezető, 2017-től az induló KEHOP projektek koordinálására létrehozott Projekt osztály vezetője.

OLÁH ZOLTÁN építőmérnök (Eötvös József Főiskola, Műszaki Fakultás, 2000.), vízügyi közigazgatási szakokleveles tanácsadó (Nemzeti Közszolgálati Egyetem, 2022.). 2000-től kezdődően építőipari kivitelezésben, mélyépítési területen építésvezető, 2003-2005

között a Közép-dunántúli Környezetvédelmi Felügyelőségen műszaki ügyintéző. Ezt követően 2005-től minőségvizsgáló laboratóriumban aszfaltvizsgáló mérnökként dolgozott. 2008 óta a Közép-dunántúli Vízügyi Igazgatóság állományában előbb tőszabályozási ügyintéző, majd csoportvezető, ezt követően 2014-től az Árvízvédelmi és Folyógazdálkodási Osztály vezetője. A Balatont és a Velencei-tavat érintő KEHOP projektekben szakterületi vezető. 2024. november 1-től kezdődően a Közép-dunántúli Vízügyi Igazgatóság műszaki igazgatóhelyettese.



A **HIDROLÓGIAI KÖZLÖNY** elsősorban hidrológiával, vízgazdálkodással és a kapcsolódó szakterületeket érintő tudományos megalapozottságú szakmai közlemények megjelentetésére ad teret. Ezek mellett a **FÓRUM** rovatban lehetőség van szakmai érdekességek, újdonságok közzétételére is. A **TÖRTÉNELMI PILLANATKÉP** rovatban a régmúlt vízügyi eseményeinek állítunk emléket. Módot adunk továbbá szakkönyvek bemutatására a **KÖNYVISMERTETÉS** rovatban.

A közlésre szánt kéziratot elektronikus formában lehet benyújtani Word (.doc vagy .docx) állományban, maximum 30 oldal terjedelemben a hk@hidrologia.hu e-mail címre. Eredeti műveket, azaz más folyóiratban, kiadványban korábban még nem közölt kéziratokat fogadunk el. Amennyiben a kézirat tartalma már valamilyen formában megjelent hazai vagy külföldi (idegennyelvű) kiadványban, illetve másodközlésnek minősül, azt a kézirat beküldésekor jelezni kell.

A kézirat mellett lehetőség van a témához szorosan kapcsolódó további elektronikus formátumú információk (pl. Excel file, előadás pdf formátuma, videó) csatolására is, melyek a közlemény online változatával együtt jelennek meg.

A kézirat beérkezését követően a Szerkesztőbizottság visszaigazolást küld a szerzőnek és a közleményt szakmai bírálóknak adja ki. A bírálatok alapján a kéziratot a Hidrológiai Közlöny: a) elfogadja megjelentetésre; b) javításokat, kiegészítéseket, módosításokat javasol; c) nem fogadja el közlésre. A közlésre elfogadott kézirat esetében a grafikus elemeket (ábra, kép, táblázat) külön elektronikus állományban is meg kell küldeni a Szerkesztőség részére.

FORMAI KÖVETELMÉNYEK

Kérjük, közleményük készítésekor tanulmányozzák a részletes közlési útmutatót (https://www.hidrologia.hu/wp-content/uploads/2024/04/Hidrologiai-Kozlony-Kozlesi-Utmutato_MAGYAR_2024.pdf), melyből közzéteszünk néhány előírást:

A szakmai közlemény kötelező részei: cím, szerző(k) teljes neve, a szerző(k) munkahelye és e-mail címe, magyar nyelvű kivonat, magyar kulcsszavak, angol nyelvű cím, angol kivonat (Abstract), angol kulcsszavak (Keywords), törzsszöveg fejezetekre tagolva, irodalomjegyzék, szerző(k) életrajzi adatai és fényképe (portrékép). Az ábra-, kép- és táblázatcímek angol változatát is meg kell adni.

A használt betűtípus: Times New Roman, szimpla sorközzel, sorkizárt rendezéssel. Az oldal A4-es méretű, 2,5 cm-es margóval.

A közleményben más szerzők műveiből átvett szövegrészeknél, ábráknál, fényképeknél, táblázatoknál, internetes forrásoknál, adatbázisoknál feltétlenül hivatkozni kell a felhasznált forrásra. Kérjük, hogy lábjegyzetet ne használjanak.

2024-től már angol nyelvű kéziratokat is fogadunk, melyek külön kötetbe rendezve jelennek meg. Az angol nyelvű kéziratok részletes közlési útmutatója: https://www.hidrologia.hu/wp-content/uploads/2024/04/Hidrilogiai-Kozlony-Kozlesi-Utmutato_ANGOL_kivonat.pdf