

OTKA zárójelentés

Sekély tavak fizikai folyamatainak kölcsönhatása tér- és időbeli léptékeken keresztül
K-120551

Részletes szakmai beszámoló

Kutatásunk több, egymáshoz kapcsolódó témában mozdította előre a sekély tavak fizikai folyamatainak különböző időskálájú megértését. Munkánk során jelentős mérési adathalmazt gyűjtöttünk a Balaton Keszthelyi medencéjében és a Fertő tó déli részén hidrometeorológiai, hidraulikai és vízminőségi változók folyamatos helyszíni mérésével. Az adatok segítségével az alkalmazott ökológiai és morfológiai kutatásokat és a tógazdálkodást is támogatni képes, igazolt modelleket építettünk fel egy tófüggő turbulens átkeveredésétől a teljes tavat átfogó üledékvándorlási mintázatáig terjedő széles időbeli és térbeli skálán. A főbb eredményeket a kutatási tervünk tagolása szerint három alcím alatt foglaljuk össze.

1. Vízből kiemelkedő vízinövények áramlástan hatása

A kutatás egyik célja a vízből kiemelkedő lágyszárú növényzet hatását meghatározni a szélre, a hullámozásra, a hordalékvándorlásra és a hosszútávú mederváltozásokra.

A kutatás célterülete a Fertő tó volt, ahol a vízi növényzet előretörése volt az elmúlt kétszáz évben az egyik legfontosabb hidromorfológiai hatástényező. Jelentős a nádborítottság és másodlagosan egyes sekélyebb területeken foltos mintázattal megjelenik a tenger melléki káka is, ezért erre a két növényfajra irányultak a vizsgálataink. Az egyik mintaterület a Fertőrákosi-öböl déli oldalán egy 100 m átmérőjű, az összefüggő parti nádasóvtól különálló nádassziget volt, míg a másik a Homoki-öböl utóbbi 1-2 évtizedben megerősödött kiterjedt kákása.

2017. és 2021. között minden évben végeztünk mérést a Fertőn. 2017-ben egy hónapig folyamatosan mértük két pontban a szélesebbéget, két függőben áramlási sebességprofil, hullámozást és mélység menti vízhőmérséklet-profil. A hullámozás mélység menti turbulenciakeltő hatását a káka körül három nagyfelbontású doppler sebességmérővel mintáztuk az időszak alatt. 2018. júniusban pedig egy hónapig a nádassziget körül végeztünk méréseket az előzővel szinte azonos műszerezettséggel. Kúpos végű rudak behatolásának mérésével (penetrométerrel) feltérképeztük a mederanyag összetételét.

A pontbeli méréseinket a kákamezőben kiegészítettük légi felvételezésen alapuló felszíni sebességméréssel, amely Lagrange-i szemléletű részecskekövetésen (LSPTV) alapul. Igazoltuk, hogy a méhviasszából készült korongok alkalmasak drónfelvételek nyomjelzőjeként. Megvalósítottuk és igazoltuk a módszer képfelismerő és képtranszformációs eljárásait. A 2019. márciusban végrehajtott mérésünk során az LSPTV technológiával kapott eredményeket összehasonlítottuk a rögzített 3D áramlásméréseinkkel. Ennek a Lagrange-i távérzékeléses módszernek a sekély tavi alkalmazása megmutatta, hogy további fejlesztésekkel egy gyorsan bevethető, nagyobb területet átfogni képes mérési módszertan dolgozható ki mérsékelt szezoni időszakokra. Hátrányként azonosítottuk azt, hogy a jelzőkorongok észlelt mozgásából nem lehetett egyértelműen elkülöníteni a szél, a hullámozás és az áramlás sodró hatását, és ez korlátozza az elemi folyamatok, köztük a lebegtetett üledék sodródási mintázatának vizsgálatát a vízi növényzet árnyékterében.

2019. augusztusban a Fertő tó déli nádasövének vízforgalmát vizsgáltuk, különös tekintettel a nyílt tó és nádasöv közötti szél keltette vízcserére. Tucatnyi berendezésből álló mérőhálózattal mintegy egy hónapig rögzítettük a vízállás- és a vízhőmérséklet-ingadozását. Ezek között első éles alkalommal vetettük be a műegyetemi fejlesztésű autonóm, napelemes berendezéseket, amelyek végül megbízható idősorokat szolgáltatottak a csatornarendszer reprezentatív pontjaiból. Szeptemberben hidrodinamikai modellezéssel meghatároztuk a vízkilendülés területileg változékony dinamikáját a nyílt tavi nádasszegély mentén. Feltártuk, hogy a nádasövből fakadóan egy széliránnyal ellentétes háttéráramlás uralkodik, a kilendülő nyíltvíz pedig jellemzően 1-1,5 km-re hatol be a nádascsatornába, magával hozva a nyílt tavi lebegtetett üledéket és tápanyagot. Ezek a folyamatok meghatározóak a víz és a nádasállomány minőségére, időbeli alakulásukra.

A kákafoltok összegzett hatásának leírására numerikus hullámvizsgálatokat végeztünk, amelyek a foltok nyomában történő üledékképződés magyarázatának kulcsfontosságú változói. Ezek a tanulmányok – amelyeket terepi kísérleteinkkel igazoltunk – lehetővé tették számunkra, hogy elkülönítsük a különböző hullámjelenségek hozzájárulását. Hosszú megfigyelési adatsorok statisztikai elemzésével azonosítottuk a szélirány, a szélesség és a vízszint azon kombinációit, amelyek a meder-csúsztatófeszültségekben relevánsak. Kimutattuk, hogy a kákafoltokról való hullámviszaverődés elhanyagolható, a hullámenergia elsősorban diffrakcióval jut be a káka árnyékzónájába, és már néhány méteres meghajtási hosszánál is számottevő lesz a szél által helyben keltett hullámvíz hozzájárulása. Azt is kimutattuk, hogy a növényzet által okozott feltöltődés a hullámterjedésre kevésbé hat vissza, de a mederfelszínre lehetővé teszi a periodikus mozgásra annál jóval erősebben.

A nádassziget körül numerikus szimuláció segítségével vizsgáltuk az áramlás és a hullámvíz együttes mederalakító hatását. A fenék-csúsztatófeszültség eloszlását hathónapnyi reprezentatív szélmeghajtás mellett nemcsak a jelenlegi medergeometriára határoztuk meg, hanem a sziget körül vízszintesre lemélyített képzeletbeli mederre is, jelképezve a nádassziget megjelenése előtti állapotot. Megállapítottuk, hogy a felmérési adatokban az uralkodó szélirány alatti oldalon (a nádás árnyékterében) megfigyelhető többlet-feltöltődés és finomabb mederanyag-szemösszetétel összhangban van a csúsztatófeszültségek hosszú idejű átlagértékeinek eloszlásával. Az átlagos hullámmagasság a nádassziget gyakran leárnyékolt oldalán lecsökken, de ezt nagyrészt ellensúlyozza, hogy az itteni feltöltődött mederszinten a kisebb hullám mégis nagyobb turbulenciát képes kelteni. Ennek eredményeképp a felkeveredéshez szükséges csúsztatófeszültség meghaladási valószínűsége a jelenlegi aszimmetrikus mederben igen hasonló a sziget körül. Kimutattuk, hogy ezzel szemben a képzeletbeli, vízszintesre mélyített meder esetén a sziget uralkodó árnyékterében a csúsztatófeszültség időbeli átlaga határozottan lecsökken. A hullámvíz keltette orbitális mozgás a mélyebb fenékre leérve fokozottabban gyengül, bőven ellensúlyozva azt, hogy a nagyobb vízmélységben kissé magasabb hullámok képesek kifejlődni. A numerikus eredmények statisztikai elemzésén keresztül tehát kimutattuk, hogy a nádassziget körül a jelenlegi mederforma kialakulása felé mutató kiülepedés dominál.

Hasonló módszertannal tártuk fel a Balaton üledékvándorlási mintázatait is, különös tekintettel a tó nyugati medencéire. Valószínűségi elvű, Lagrange-i szemléletű részecskekövetéssel azonosítottuk a lebegtetett üledék áramlással való sodródásának uralkodó útvonalait és a (múltbeli és lehetséges jövőbeli) üledékcsapadék vízgyűjtő területét, azaz a csapadékos üledék valószínű kiindulási pontjait. A vízgyűjtő területeket összevetettük az áramlás és hullámvíz eredő

üledékmozgató erejének és a mederanyag kémiai és szemösszetételének területi eloszlásával, ami tudományos alapot ad a Balaton vízminőségi célú kotrásainak költséghatékony tervezéséhez is.

Ugyanebben a témában bekapcsolódtunk több hazai intézmény kutatóinak együttműködésébe abból a célból, hogy a Balaton 1978-1984 között gyűjtött mintegy 5000 mederanyag-minta foszfortartalmának pontfelhőjéből regresszióval megbecsüljük az oldható P-tartalom folytonos területi eloszlását a tóban. Ezúttal a mérésekhez tartozó 1975. évi medergeometrián, a teljes tavat egyenletesen felbontó számítási hálón végeztük el a hosszú idejű szimulációt, és ebből levezettük a fenék-csúsztatófeszültség és a hullámmagasság két-két kritikus értékének meghaladási valószínűségét. Ezek a hidraulikai segédváltozók vezérelték más (medermorfológia és a vízi növényzet) segédváltozók mellett a mederüledék foszfortartalmának kriging interpolációját. A regressziós modell 0,23 R² értékkel nem mutat erős korrelációt a segédváltozókkal, ennek ellenére a validálás eredménye alapján a regressziós krigelés után a végleges térkép pontossága magas volt (R²=0,81). Az oldható P újraelemzése a korábbi térképeknél jóval nagyobb részletettségű. Mivel ez az öt évtizeddel ezelőtti felmérés volt azóta is a balatoni mederüledék egyetlen átfogó kémiai felmérése, így a hosszú időtávú üledékfolyamatok változása feltérképezéséhez referenciaként szolgál.

2. Advekción, mélység menti hatások és helyi termelődés szerepe a vízminőség időbeli alakulásában

A kutatási program következő elemének célja feltárni az áramlások sodrása, a függőleges hatások és a helyi termelődés szerepét a helyi fizikai változók időbeli alakulásában. Ennek a kutatásnak az volt a kiinduló feltevése, hogy a Balaton Keszthelyi-medencéjének partközeli mérőállomásán évek óta megfigyelhető hirtelen, meteorológiai behatással nem magyarázható hőmérsékleti és vízminőségi változásokat (pl. ugrásszerű hőmérsékleti növekedés a mélyebb vízrétegekben, az oldott oxigén koncentrációjának növekedése az éjszaka folyamán) a vízszintes irányú transzportfolyamatok okozzák. Ezeket a folyamatokat egyetlen pontban való méréssel természetesen nem lehet megfigyelni. Ezért kibővítettük a mérőállomást egy vízsebességet mérő akusztikus doppler műszerrel és egy kb. 30 méter élhosszúságú egyenlő oldalú háromszög csúcaiban elhelyezkedő termisztorlánc-együttessel, mely nagy időbeli és térbeli sűrűségű mérésekkel (5 centiméteres mélység-lépésekben és perces leolvasással) a sebességmérő által megfigyelt vízszintes mozgás révén bekövetkező (és így az egyes láncokat eltérő időben elérő) változásokat volt hivatott érzékelni.

A kibővített műszerezettségű mérés 2017. júliustól szeptemberig, majd ezután 2020-ig májustól októberig működött üzemszerűen. A termisztorokat 0,1°C pontosságra kalibráltuk. Az egyperces sűrűségű mérés nyomán mérési szezononként és mélységi szintenként többszázezer rekordot rögzítettünk. A rendszer a korábbi mérésekkel ellentétben —melyek csak 5 mélységet figyeltek egyetlen helyen, szemben az új rendszer által alkalmazott 30-35 mélységgel— pontosan nyomon követhetővé tette a hőrétegződési események kialakulását, fennállását és felbomlását. Bár a partközeli mérőállomás viszonylag sekély vízben áll (a vízmélység 100-170 cm a tó vízállásának függvényében) és a Balaton polimiktikus, vagyis gyakran átkeveredő tó, az átmeneti hőmérsékleti rétegződés és az ennek következtében felépülő függőleges vízminőségi heterogenitás a nyári időszakban igen gyakorinak bizonyult. Minden évben kb. 4 gyors felmelegedéshez kötődő nagyobb és számos kisebb eseményt figyeltünk meg, amikor is a hőmérsékleti gradiens meghaladta a 2-3°C m⁻¹ értéket (a legnagyobb, óráig fennálló különbség némileg több, mint 4°C eltérés volt 50 cm mélység mentén). Az ilyen erős hőrétegződés gyakorlatilag megakadályozza a függőleges transzportot a vízoszlopban, mivel a nagy sűrűségkülönbség az alsó és a felső rétegek között

stabilizálja az egyes rétegek helyzetét. A függőleges különbségek mellett az abszolút hőmérsékletek is figyelmet érdemelnek, 2017-ben először mértünk 33°C-os vízhőmérsékletet 0,5 m-es mélységben, amely rekordmagasnak számít(ott) és nem volt köthető rekordmagas léghőmérséklethez. Az erős stabil rétegződés következményei az oldott oxigén koncentrációjában is jelentkeztek: a vízrétegek elszigetelődése megakadályozta a légkörből, illetve a jobban bevilágított felsőbb rétegekben folyó fotoszintézisből érkező oxigén-utánpótlás lejutását a mélybe, amely ott csökkenő oxigénkoncentrációkhoz vezetett. A partközeli mérőállomáson az oldott oxigén sosem fogyott el teljesen a fenékközeli rétegekből, de előfordult 1 mg/L körüli, rendkívül alacsony érték is.

Bár a nagy sűrűségű mérés feltárta a hőrétegződés gyakoriságát a Balaton parti zónájában, az eredeti célkitűzést, vagyis a vízszintes transzportfolyamatok irányérzékeny hőmérsékleti észlelését nem sikerült elérni. A háromszög-rendszer két pontja (a mérőállomás és a nyíltvíz felé eső pont) viselkedése jellemzően megkülönböztethetetlenül hasonló volt, míg a szinte ugyanolyan vízmélységű pontban álló, de egy parti nádashoz némiképp közelebb álló harmadik pontban olykor egészen eltérő hőmérsékleti profilok alakultak ki. A mérések a korábbiakhoz hasonlóan kimutatták a vízszintes transzportfolyamatok ritka vízminőségi hatásait, vagyis a hirtelen szélsőséges változás miatt beinduló (viszonylag) gyors áramlások által a helyszínre szállított "idegen" víz megjelenését, de a mozgások irányára nem lehetett az adatokból következtetni, és olyan áramlási irányt sem találtunk, amelyre jellemző lett volna az "idegen" víz szállítása. A magyarázhatatlan változékonyság oka lehet, hogy az "idegen" víz érzékelésének feltétele, hogy a transzport — ismeretlen elhelyezkedésű — forrásterületén eltérő hőmérsékleti és/vagy vízminőségi állapotok uralkodjanak, mint a mérési helyszínen.

A vízsebesség-mérések eredményei alapján a partközeli mérőállomás környékén a vízszintes áramlások igen lassúak. Még nagy viharok alkalmával sem érkezett víz messzebből, mint 1-1,5 km, az idő nagy részében jellemző milliméter per másodperc nagyságrendű áramlási sebességek esetén a víz által bejárható napi rádiusz pedig kevesebb, mint 100 m, vagyis a transzportfolyamatok közeli területek között szállíthatnak vizet. Ez alapján az egy pontban megfigyelhető vízminőség döntően a helyi folyamatok függvénye, és csak elenyésző mértékben függ a medence távolabbi részein zajló történésektől. Ha az algákra jellemző 3 napos generációs idővel számolunk, a medence távoli pontjai közötti utazási idő még kedvező esetben is több generáció élettartamát teszi ki, vagyis az időnként megfigyelhető, teljes medencét kitöltő virágzásokat jellemzően olyan időjárás kíséri, amely mindenhol kedvező az algák számára.

A projekt időtartama alatt a vízminőség változóan alakult, mely erősen hatott a kutatás menetére is. A 2017-es év alga-biomasszája megfelelt a 2004 óta tapasztalható átlagnak, míg 2018-ban rekord-kevés alga volt a nyári időszakban. 2019-ben a nyár látszólag átlagosan indult, de partközeli állomásunknak sikerült először észlelni az összes méréssel foglalkozó szervezet közül, hogy az augusztus-szeptemberi alga-tömegprodukción minden korábbi, dokumentált mértéket meghaladóan nagy volt. Az a-klorofillban kifejezett biomassa jóval meghaladta a 300 $\mu\text{g L}^{-1}$ értéket, amely a korábbi eutrofizációs időszak csúcsának másfél-kétszerese. Műholdképek elemzésével kimutattuk, hogy a tömegprodukción a Keszthelyi- és Szigligeti medencék nyílt vizében fejlődött ki és napokkal később, a szél keltette áramlások hatására érkezett meg a mérőállomáshoz. 2020. és 2021. a korábbi évekhez képest magas algabiomasszát hozott, de ezek meg sem közelítették a 2019-es csúcsot, vagyis a vízminőség változékonny maradt. A 2019-es események után a kutatást az algavirágzáshoz vezető fizikai és kémiai körülményekre koncentráltuk.

A 2019-es rekord-algavirágzáshoz szükséges tápanyagot a monitoring-adatok szerint csak az üledékből érkező belső terhelés biztosíthatta, hiszen a nyár folyamán jelentősebb külső tápanyagterhelés nem érkezett. Az azonban kérdéses volt, hogy mi válthatta ki a virágzáshoz szükséges 10-12 t P felszabadulását. A 2019. őszén kialakított hipotézist a 2020-ban fizikai oldalról sikerült is igazolni a medenceközepi mérőállomás oxigénszenzorokkal való kibővítésével. A Keszthelyi-medence mély, nyílt vizében a nyári időszakban 2019-ben a visszamenőleges modellezés szerint többször is kialakulhatott olyan több napig fennálló erős hőmérsékleti rétegzettség, hogy a fenékközeli rétegekből teljesen elfogyott az oldott oxigén és a redukálttá váló üledékfelszín már nem tudta visszafogni a mélyebbről érkező tápanyagáramot. 2020-ban és 2021-ben, bár nem követte rekordnagyságú algabiomassza, több ilyen (erős hőrétegzettség nyomán kialakuló fenékközeli, akár 40-50 cm vastagságban fennálló oxigénhiány) eseményt kimértünk a medenceközepi hidrometeorológiai mérőállomáson. A belső terhelés felszabadulásához szükséges fizikai és kémiai körülmények tehát az elmúlt években rendszeresen fennálltak, de azt még nem tudjuk, hogy a felszabadulás pontosan milyen mechanizmussal megy végbe és milyen folyamatok döntik el, hogy az algabiomassza ki tudja-e használni a lehetőséget, valamint azt, hogy milyen változásokkal lehetne elérni a változó éghajlat mellett e potenciálisan káros vízminőségi következményű hőrétegződési események ritkítását.

A partközeli mérőállomás majd 2 évtizedes adatsorának segítségével kimutattuk, hogy a hőrétegződésre való hajlam az időjárási körülményektől függ, de a rétegzettség várható fennállásának hosszát a vízszint befolyásolja a legerősebb mértékben. A 2015-2020. időszakban a nyarak jellemzően csapadékosak voltak, ami a szabályozási szint először próbaüzemi, majd véglegesített emelése mellett lehetővé tette a tó vízszintjének folyamatos magasan tartását. Az elemzések szerint az éghajlatváltozás nyomán a hőrétegzettség — és ezáltal a potenciális magas algabiomassza kialakulásának — valószínűsége a következő 3 évtizedben meg fog duplázódni. Ezt még pár évtizedig kompenzálni lehetne a tó nyári végi vízszintjének csökkentésével, ami a csapadék szezonális átrendeződése miatt vízháztartási szempontból kedvezőbb lenne, mint a múltban tavaszig alkalmazott alacsony vízállás. Ez a változtatás a szükséges jogszabálymódosítások mellett azt is igényelné, hogy a közvélemény felkészüljön a Balaton vízállásának a jövőben amúgy is elkerülhetetlen változékonyságára.

3. A Balaton termodinamikai modellje

A pályázat kutatási céljai között szerepelt egy teljes tóra kiterjedő termodinamikai modell kifejlesztése, amely alkalmas hosszú idejű szimulációkra, figyelembe veszi a hullámozás okozta elkeveredést és leképezi a mélység menti hőmérsékletkülönbségeket és a tavi áramlások hatását is. Első modellkísérleteink kimutatták, hogy egy ilyen modell felállításához, kalibrálásához és elfogadható igazolásához a rendelkezésre álló adatsorok nem voltak megfelelőek. Ennek két fő okát azonosítottuk: Egyrészt a part menti mérések nem tudják jól visszaadni a tó átlagos energiaháztartását, másrészt pedig az erősen meghajtaslimitált környezetben a víz és légkör közötti turbulens cserefolyamatokat (impulzusáramot, szenzibilis és látens hőáramokat) nem képesek jól megbecsülni az irodalomban fellelhető összefüggések, amelyeket szinte kizárólag oceanográfiai kutatások során vezettek le.

E két probléma feloldására, először 2018 szeptemberében egy hónapig, majd 2019-ben egy teljes melegszezonon át egy hidrometeorológiai állomást állítottunk üzembe a Keszthelyi-medence nyílt vizében. Ez az állomás – a balatoni kutatások történetében először – rögzítette mindazon

állapotváltozókat, amelyek alapján felállítható a Balaton energiamérlege. A légköri oldalon rögzítettük a beérkező és kimenő rövid- illetve hosszúhullámú sugárzáskomponenseket, a léghőmérsékletet és légnedvesség tartalmát. Egy örvénykovarianca-műszeregyüttessel nagy időbeli felbontással (10 Hz) kimértük a turbulens cserefolyamatokat, vagyis közvetlenül a szél-csúsztatófeszültséget, a szenzibilis hőcserét és a látens (párolgási) hőfluxust. A vízoldalon félméteres felbontásban mértük mélység mentén a vízhőmérsékletet és ezáltal a vízhőmérséklet által alakított rétegződést, továbbá három mélységben az üledék hőmérsékletét is mértük. Emellett hőárammérők segítségével rögzítettük az üledék-víz közötti hőcserét is. A turbulens cserefolyamatok becslésének érdekében ezzel egy időben fenékre telepített műszerrel mértük a vízfelszín hullámzását is.

A mérési eredmények alapján első lépcsőben levezettünk egy olyan új impulzusáram-becslő eljárást, amely meghajtáslimitált vízfelszínre alkalmazható. Vizsgálatainkban azt kaptuk, hogy az óceáni környezettel ellentétben a meghajtási hossz korlátozottságának következtében ún. rendkívül fiatal hullámok alakulnak ki, amelyek érdesebb felszínt jelentenek a légmozgás számára és ezzel jelentősen megnövekszik a vízfelszínen ható szél-csúsztatófeszültség. Ennek eredménye egy erőteljesebb függőleges keveredés a tóban. Egyúttal a szenzibilis és a párolgási hőcserére becslő összefüggéseket határoztunk meg, amelyek közvetlenül alkalmazhatóak a Balatonra. Ezek nemcsak a tó áramlástan és termodinamikai modellezése szempontjából relevánsak, hanem a meteorológiai előrejelző-modellekbe is közvetlenül beépíthetők, mivel azok a felszínközeli 10 m vastagságú réteget peremfeltételként, paraméterezés útján modellezik. Összefüggéseinkkel tehát javíthatók a Balaton térségére vonatkozó előrejelzések.

Emellett eredményeink rámutattak, hogy a párolgási hőáramot meghatározó összefüggésben az átviteli együttható értéke erős évszakos változékonyságot mutat. Ezt az új eredményt alátámasztották a Balatonra vonatkozó vízmérleg-vizsgálataink, amelyekben levezettük, hogy az együttható éves ingadozást mutat, amelynek a legfőbb meghajtó folyamata a beérkező rövidhullámú sugárzás. Hangsúlyozzuk, hogy ez új kutatási irányt nyitott, mivel ezt az együtthatót a szakirodalom időben állandó értéknek tekinti.

Az üledék-víz közötti hőcsere nagyságára vonatkozóan azt kaptuk, hogy az rövid időskálán nem elhanyagolható tényező, mivel képes a fenéközeli hőmérsékleti rétegződést hosszabban fenntartani, és ezáltal megakadályozni a tó teljes vízoszlopának átkeveredését az éjszakai órákban. Mint láttuk, ez pedig összefüggésben áll az üledék felszínének oxigénviszonyaival és ezen keresztül az üledékből történő foszforfelszabadulással.

Ugyanezen 2019-es adatsorok segítségével feltártuk a Balaton energia- (és hőháztartási) mérlegét. Eredményeink két fő dologra mutattak rá: Egyrészt az örvénykovariancia-mérések alábecsülik a valós turbulens hőáramokat, azonban ennek mértékéről a nemzetközi szakirodalom ez idáig csak szárazföld fölött tudott közelítő értékkel szolgálni. Kimutattuk, hogy az energiamérleg zárása havi léptékben átlagosan 85%-os, azaz a mérleg 15%-át nem képes megmagyarázni. Másrészt be tudtuk bizonyítani, hogy az energiamérleg zárási hibája nem javítható meg az elvárt pontossággal a Bowen-arány alapján, amelyet a leggyakrabban alkalmaznak ilyen célra a meteorológia területén. Az örvénykovarianca-módszer a szenzibilis hőáramokat nagyobb mértékben becsüli alul.

A fenti vizsgálatok eredménye egyrészt, hogy jelenleg már az elvárt pontossággal meg tudjuk határozni a turbulens impulzus- és hőáramokat olyan meghajtáslimitált tavakra, mint amilyen a Balaton vagy a Fertő. Másrészt immáron rendelkezésünkre állnak olyan adatsorok, amelyek bár

kis területre reprezentatívak, de szükségesek egy termodinamikai modell kalibrálásához és igazolásához. Ezek alapján, felépítettünk és igazoltunk a Balaton nyílt vizére egy függőleges, egydimenziós hőmérsékleti modellt, amellyel lehetőségünk volt a rétegződési viszonyok reprodukálására, illetve a vízállás függőleges keveredésre kifejtett hatásának meghatározására. Mint fent leírtuk, ezzel lehetővé vált az algavirágzás okainak vizsgálata. Emellett ez a modell már alkalmas olyan hosszú idejű szimulációk vizsgálatára, amellyel feltárható a tó hőmérsékleti struktúrájának megváltozása a klímaváltozás és az emberi tevékenység (vízszintszabályozás) hatására.

Tudományos közlemények jegyzéke

Az összes cikkben megjelöltük az NKFIH jelen kutatási témára adott támogatását.

Nemzetközi cikk

1. Honti, M., Istvánovics, V. (2019). Error propagation during inverse modeling leads to spurious correlations and misinterpretation of lake metabolism. *Limnology and Oceanography: Methods*, 17(1), 17-24., <http://doi.org/10.1002/lom3.10293>
2. Istvánovics, V., Honti, M. (2021). Stochastic simulation of phytoplankton biomass using eighteen years of daily data-predictability of phytoplankton growth in a large, shallow lake. *Science of the Total Environment*, 764, 143636., <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143636>
3. Lükő, G., Torma, P., Weidinger, T., Krámer, T. (2022). Air-Lake Momentum and Heat Exchange in Very Young Waves Using Energy and Water Budget Closure. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. *Befogadva*. <https://doi.org/10.1029/2021JD036099>
4. 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>
5. Kocsis, M., Szatmári, G., Kassai, P., Kovács, G., Tóth, J., Krámer, T., Homoródi, K., Pomogyi, P., Szeglet, P., Csermák, K., Makó, A. (2022). Soluble phosphorus content of Lake Balaton sediments. *Journal of Maps*, 1-9. <https://doi.org/10.1080/17445647.2021.2004943>

Magyar cikk

1. Cinkler, T., Krámer, T., Rehák, A., Józsa, J., Csonthó, M., Nagy, Z., Jászberényi, Á. (2020). Okos tavak. *Híradástechnika: Hírközlés-informatika*, 75(1), 47–52.
2. Lükő, G., Torma, P., Weidinger, T., Krámer, T. (2021). Hullámmódosított turbulens impulzusáram mérése és becslése a Balaton légkör-víz határfelületén. *Hidrológiai Közlöny*, 101(1), 52-60.
3. Szilágyi, M., Homoródi, K., Józsa, J., & Krámer, T. (2021). Nádassziget hullámmódosító hatása – numerikus vizsgálatok. *Hidrológiai Közlöny*, 101(1), 61–73.

Konferenciaközlemény

1. Lükő, G., Torma, P., Krámer, T., Weidinger, T., Vecenaj, Z., Grisogono, B. 2020. Observation of wave-driven air–water turbulent momentum exchange in a large but fetch-limited shallow lake. *Advances in Science and Research*, 17, 172-182. <https://doi.org/10.5194/asr-17-175-2020>
2. Szilágyi, M., Homoródi, K., & Krámer, T. (2021). Investigation of Wave Dynamics around a Vegetation Patch in a Shallow Lake. *Proc. 12th Eastern European Young Water Professionals Conference. Water Research and Innovations in Digital Era, Riga, Latvia, 31 Mar.–2 Apr. 2021*, 244-251.

Konferenciaelőadás absztrakttal

1. Lükő, G., Torma, P., Krámer, T., Weidinger, T., Vecenaj, Z., Grisogono, B., Lázár, I. (2021). Internal boundary layer development over lake surface in case of very young waves. *EMS Annual Meeting*, online 6-10 Sep. 2021.
2. Szilágyi, M., Krámer, T., Cinkler, T., Rehák, A., Józsa, J., Csonthó, M., Jászberényi, Á. (2021). A lightweight, autonomous, down-looking wave gauge array in shallow lakes. *Publications of the Institute of Geophysics, Polish Academy of Sciences; Geophysical Data Bases, Processing and Instrumentation*, 434 (E-11)(3), 123-125.

Egyéb előadás

1. Krámer T., Homoródi K., Torma P., Szilágyi M., Józsa J. (2021): A Fertő nádasainak hatása a vízforgalomra – kitekintés az okos tavak felé. Nagy Tavak előadóülés, MTA „Nagytavaink vízminőségi állapota és kezelési lehetőségei” vízügyi szakági értekezlet, 2020.03.11., Észak-Dunántúli Vízügyi Igazgatóság, Győr.
2. Krámer T. (2020): A Fertő tavi nádasok és csatornarendszer áramlástanai vizsgálatának tapasztalatai. „Nagytavaink vízminőségi állapota és kezelési lehetőségei” vízügyi szakági értekezlet, 2020.03.11., Észak-Dunántúli Vízügyi Igazgatóság, Győr.
3. Krámer T. (2019): Vízi növények és a vízmozgás közötti kölcsönhatás megfigyelése a Fertőn. MTA 191. közgyűlése, 2019.05.09., <https://mta.hu/esemenynaptar/2019-05-09-nagy-tavaink-2789>