

A Balaton üledék-víz határfelületén zajló hőcsere jellemzése és hatása

Török Sebestyén Dániel*, Torma Péter**, Weidinger Tamás***

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

** Víz tudományi és Vízbiztonsági Nemzeti Laboratórium, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Építőmérnöki Kar, Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszék, Budapest (e-mail: torma.peter@emk.bme.hu)

*** Eötvös Loránd Tudományegyetem, Meteorológia Tanszék, Budapest (e-mail: weidi@caesar.elte.hu)

[DOI:10.59258/HK.12337](https://doi.org/10.59258/HK.12337)



Kivonat

A tavi ökoszisztémák egyik legfontosabb fizikai paramétere a vízhőmérséklet, ami közvetlen hatással van a biológiai és a kémiai folyamatok dinamikájára. Az olyan sekély tavak esetében, mint például a Balaton, az üledék hőmérséklete szoros kapcsolatban áll a vízhőmérséklettel, ám ennek ellenére a vonatkozó irodalom túlnyomó részében mégis elhanyagolhatónak tekinti a két térrész közti hőcserét. Ez azonban nem minden esetben tehető meg, mivel bizonyos sekély tavak esetében az energiamérleg több, mint 30%-át is kiteheti az üledékekkel való hőcsere. Ezért kutatásunkban a Balaton üledék-víz határfelületén zajló hőcserét vizsgáltuk hosszú idejű mérési adatsorokra alapozva. A mérési program során nemcsak a víz- és üledék hőmérsékleteket monitoroztuk nagy időbeli felbontással, hanem hőárammérő korongok segítségével közvetlenül mértük az üledék felső rétegében a hőáramot is. A vizsgálatok során azt kaptuk, hogy a Balaton üledékének hővezetése olyan esetekben, mikor az üledéket nem zavarja meg a vízmozgás, illetve amikor stabil hőmérsékleti rétegződés jellemzi a határfelületet, jól jellemezhető egy konstans hővezetési együtthatóval, illetve, hogy a felületi hőcsere számottevően kihat az üledék feletti alsó víztér rétegződésére, amelynek jelentős hatása lehet a hidrobiológiai folyamatokra, mint például az oldott oxigénszint alakulására az üledék felszínén. Rámutattunk továbbá, hogy a mederhőáram elhanyagolásával a vízhőmérséklet jól modellezhető, azonban hatását a légkör-víz határfelületen zajló hőcserevel tudjuk kompenzálni. Ezzel elsősorban a szenzibilis, másodsorban pedig a párolgási hőcsere számításánál követünk el kismértékű hibát.

Kulcsszavak

Üledék-víz határfelület, hőcsere, hővezetés, mederhőáram, sekély tavak, Balaton.

Characterization and impact of heat exchange at the sediment-water interface in Lake Balaton

Abstract

Water temperature is one of the most important physical parameters in lake ecosystems that directly impacts the dynamics of ecological processes. In the case of shallow lakes, such as Lake Balaton, sediment temperature is closely related to water temperature, and thus, they can significantly influence each other. For this reason, we investigated the heat exchange at the sediment-water interface of Lake Balaton based on long-term measurements. During the measurement program, we monitored water and sediment temperatures and directly measured the sediment heat flux in the upper layer of the sediment using heat flux plates with high temporal resolution. In addition – based on the data series – energy balance calculations were performed for the upper layer of the sediment and for the entire water column. By our investigation, we found that: i) the heat conduction in Lake Balaton's sediment can be well characterized by a constant heat conduction coefficient when the sediment is not disturbed by water movements, and a stable temperature stratification occurs at the interface; ii) the molecular diffusion-type heat exchange at the interface and in the sediment can be significantly disturbed by water movements and density-driven pore water flows; iii) the surface heat exchange can have a significant impact on the stratification of the deep water layer above the sediment, so that it can have a significant impact on hydrobiological processes too, like dissolved oxygen levels on the sediment surface. In addition, we showed that by neglecting the sediment heat flux, the average water temperature could be modeled well; however, its effect must be compensated by the heat exchanges at the air-water interface. Consequently, we will make an error primarily in the sensible, and secondly in the evaporative heat exchange estimations.

Keywords

Sediment-water interface, heat exchange, heat conduction, sediment heat flux, shallow lakes, Lake Balaton.

BEVEZETÉS

A tavi ökoszisztémák egyik legfontosabb fizikai paramétere a vízhőmérséklet, ami közvetlen hatással van a biológiai és a kémiai folyamatok dinamikájára. Sekély tavak esetében, mint például a Balaton, a vízhőmérséklet időben és térben is meglehetősen változékony, mivel a meteorológiai folyamatok gyorsan képesek hatni a nagy vízfelületnek és a viszonylag kis vízmélységnek köszönhetően. Ennek eredményeképp a Balaton vízhőmérsékletét napi ciklusú ingadozás jellemzi a melegebb hónapokban – gyenge függőleges napközbeni rétegződéssel és éjszakai átkeveredéssel – amely javarészt a teljes vízoszlopra kiterjed és eléri a mederüledéket is (Lükő és társai 2022).

Az üledék-víz határfelület kiemelt fontosságú egy tó ökoszisztémájában, hiszen ezen a határfelületen intenzív tápanyag-, oxigén- és hőtranszport játszódik le. Az üledék szerepét jól példázza a 2019. évi balatoni algavirágzás, amelyet az üledékből visszaoldódó foszfor indított be. A foszfor felszabadulásához vezető biológiai és kémiai folyamatok szintén az üledék-víz határfelületén játszódtak le, amelyek közül kiemelt szerepe volt a vízoszlop hőmérsékleti rétegződésének (Istvánovics és társai 2022). A Balaton sekély tulajdonságának köszönhetően az üledék hőmérséklete szorosabb kapcsolatban áll a vízhőmérséklettel, mint mély tavak esetében, ahol a mederfenék feletti vízrétegek lassabban cserélődnek és azokat a meteoroló-

giai folyamatok hatásai is lassabban érik el (Wetzel 2001). A Balaton esetében modellvizsgálatokkal is kimutatták, hogy a közvetlen mederfenék feletti rétegződést érdemben befolyásolja az üledék-víz határfelületen zajló hőcsere (Torma és Krámer 2017).

Az üledék-víz határfelületen történő hőcsere jellemzően diffúziós folyamat, amelynek intenzitása és iránya alapvetően attól függ, hogy milyen előjelű és mértékű a hőmérséklet-különbség a víz és az üledék között. Emellett szerepet játszanak az üledék feletti vízréteg turbulencia viszonyai, illetve az üledékre jellemző molekuláris diffúzió, amely az üledék összetételétől és a víztartalmától függ (Fuente 2014). Az üledékrétegben a transzport-folyamatokat a molekuláris diffúzió dominálja, mely intenzitása felkeveredés, bioturbáció vagy gázok felszabadulása során növekszik (Bernhardt és társai 2014). Végezetül pedig, ha az üledékben lévő víz hőmérséklete nagyobb lesz, mint a felette elhelyezkedő vízoszlopé akkor a hőmérséklet keltette sűrűségkülönbség labilis környezetet hoz létre, ami a molekuláris diffúzióval jelentősen erőteljesebb konvekcióhoz vezet.

Korábbi tanulmányok megmutatták, hogy az üledék és víz közötti hőcsere különböző folyami és tavi környezetekben más és más nagyságrendben és időskálákon zajlik le, az órástól akár az éves nagyságrendig (Prats és társai 2011, Cyr 2012, Zdorovenova és társai 2021). Tavak hőmérsékleti modellezésével kapcsolatban fellelhető néhány tanulmány, melyeknél az üledékekkel való hőcsere részletes számításokkal vették figyelembe (Tsay és társai 1992, Fang és Stefan 1996, Golosov és Kirillin 2010, Torma és Wu 2019, Tasnim és társai 2021), azonban a közlemények túlnyomó többségében ezt elhanyagolhatónak tekintik. Ez azonban nem minden esetben tehető meg, mint ahogy arra már Wetzel (2001) is felhívta a figyelmet, miszerint bizonyos sekély tavak esetében az energiamérleg több, mint 30%-át is kiteheti az üledékekkel való hőcsere.

Jelen tanulmányunk célja az, hogy a Balatonra feltárjuk az üledék-víz határfelületen zajló hőcsere mértékét és jellemzőit a tavasz végétől ősze elejéig tartó időszakra, valamint, hogy meghatározzuk a szerepét a szezonális hőháztartásban és a hőmérsékleti rétegződésben. Közleményünk tisztán terepi mérések eredményein alapul. Az eddig általunk megismert tanulmányokban az üledék-víz határfelületen zajló hőáramot és az üledék hővezetési jellemzőit minden esetben csak hőmérsékletmérések alapján vezették le, figyelembe véve természetesen az üledék összetételét és a pórusvíz tartalmát. Ezen túlmutatva, a víz- és üledék-hőmérsékletek mellett közvetlenül mértük az üledék felső rétegében a függőleges irányú hőfluxust is.

MÓDSZERTAN ÉS ANYAG

Mérési helyszín és adatok

A Balaton energia-háztartását feltáró mérések – beleértve az üledék-víz hőcserejét is – 2019-ben történtek a Keszthelyi-medence közepén (46°43'60" É, 17°16'35" K) felállított hidrometeorológiai mérőállomáson (1. ábra), amelyet a BME Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszéke működtetett az ELTE Meteorológiai Tanszék és a Közép-dunántúli Vízügyi Igazgatóság közreműködésével. A mérési kampány 2019. május 18-tól október 7-ig tartott. Az állomás műszerezését az 1. ábra mutatja, míg az összes

mért állapotváltozót Lükő és társai (2022), illetve Istvánovics és társai (2022) tanulmányok ismertetik. Jelen vizsgálat alapját az üledékben és a víztérben elhelyezett hőmérők, illetve hőárammérő korongok szolgáltatja hőmérséklet és hőfluxus idősorok képezik. Ezeket 20 másodpercenként mértük, amelyekből 5 perces átlagokat számítottunk és rögzítettünk. Jelen vizsgálatban az ezekből származtatott 1 órás átlagértékekkel számoltunk.

A víztér és az üledék hőmérsékleti rétegződését kilenc darab T107 hőmérővel (Campbell Sci.) mértük, melyek közül hat 0,5 m-es kiosztással a vízoszlop mentén (T4-T9, lentől felfelé), egy a víz és üledék határfelületén (T3), kettő pedig az üledékben volt elhelyezve (T1-T2, lentől felfelé) (1. ábra). A hőáramot két darab, egymás mellett elhelyezett HFPO1 hőárammérő koronggal (Hukseflux) rögzítettük az üledék 8 cm-es mélységében. Az esetleges inhomogenitások és megzavarások hatásának felderítése és minimalizálása érdekében a hőárammérők esetében két műszert telepítettünk azonos szinten. Az üledékben elhelyezett szenzorok kiosztását külön mutatjuk a 2. ábrán. A műszerek üledékbe való telepítése az iszap megbolygatásával járt, ezért az üledék megzavarásának minimalizálása érdekében az iszapba egy PVC cső darabot nyomtunk be óvatosan, amelyen előre lyukakat és nyílásokat vágtunk és ezeken keresztül toltuk ki a műszereket a cső belsejéből a zavartalan üledéktérbe. A cső belsejét ezután visszatemetjük. A telepítés bűvármunkával történt.

Határfelületi hőáram meghatározása

A víz és üledék határfelületen a hőmérséklet-különbség hatására létrejövő függőleges irányú hőáram mérése közvetlenül nem megoldható, mert a hőárammérő korong felső felülete a vízzel érintkezne, ahol a vízmozgásnak köszönhetően turbulens és konvekciós hőcsere is zajlik. Ezek mérése a hőárammérő korong nem alkalmas, ezért a szárazföldi mikrometeorológiának a talajhőáram meghatározására kidolgozott eljárását adaptáltuk. A határfelületi hőáram kiszámításához az üledék felső rétegére írjuk fel az energiamérleget (Massman 1992, Liebenthal és Foken 2007). A réteg felső határa az üledék-víz határfelület, az alsó határa pedig az a szint, ahol a hőáramot mérjük. Az üledékben a vízszintes hőcsere (H_{horiz}) elhanyagolva a mérlegegyenlet az alábbi:

$$H_{hf} = \Delta S_{\bar{u}} + H_{mért} \quad (1)$$

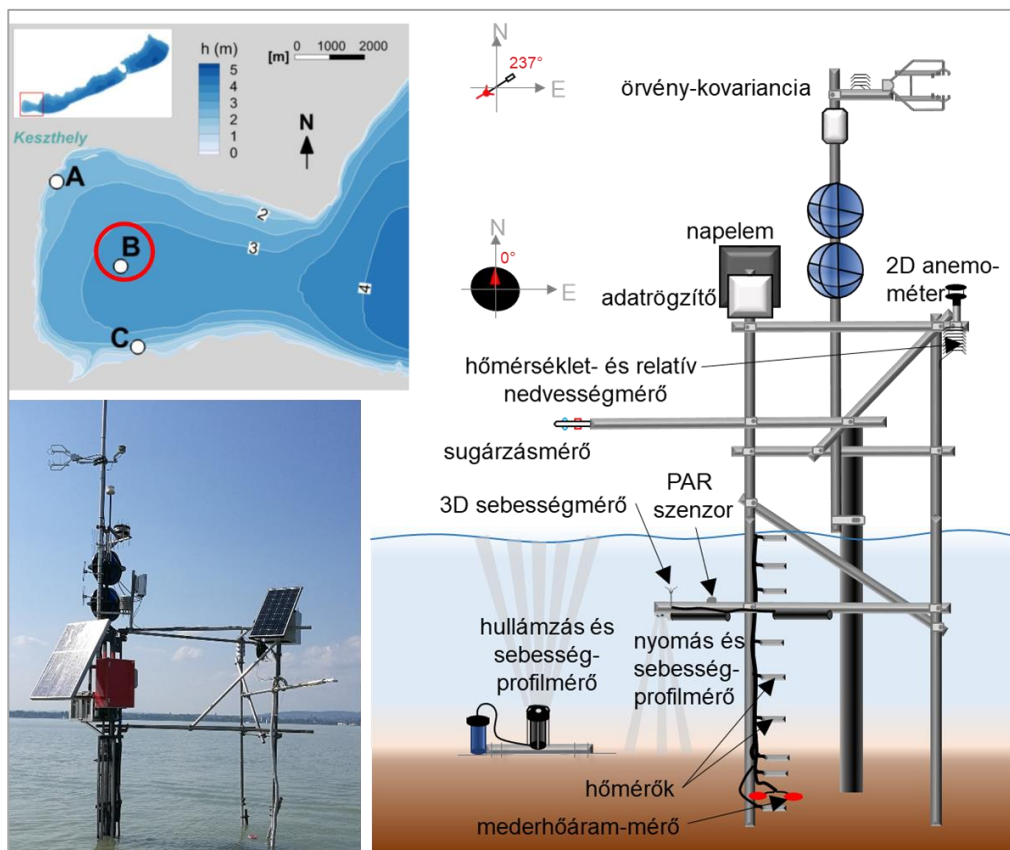
ahol H_{hf} a határfelületi hőfluxus, $H_{mért}$ a 8 cm mélyen mért hőfluxus, $\Delta S_{\bar{u}}$ pedig az üledékben tárolt energia.

Ez utóbbi az üledék időbeli hőmérséklet-változásából számítható (Fuente 2014):

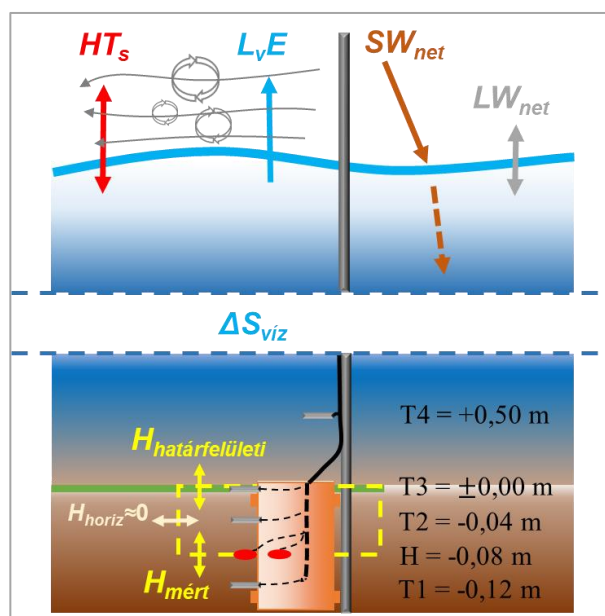
$$\Delta S_{\bar{u}} = \rho \cdot c_v \cdot h \frac{\partial T_{\bar{u}}}{\partial t} \quad (2)$$

ahol $T_{\bar{u}}$ a vizsgált üledékréteg átlaghőmérséklete, ρ az üledékréteg átlagos sűrűsége, illetve c_v annak állandó térfogaton vett fajhője, h a vizsgált üledék vastagsága, t pedig az idő.

A ρ és c_v tényezők meghatározásánál figyelembe kellett veyük az üledék víztartalmát, melyet a mérések alapján határoztunk meg. Ezeket jelen tanulmányban, első közelítésként függély mentén konstansnak tekintjük. A vizsgált üledékréteg átlaghőmérsékletét a három mélységben rögzített hőmérsékletek függély menti átlagolásával kaptuk. A 2. ábrán sárga szaggatott vonallal lehatároltuk a vizsgált üledékréteget.



1. ábra. Mérési helyszín és a hidrometeorológiai mérőállomás felépítése (Lükő és társai 2022)
 Figure 1. Measurement location and the setup of the hydrometeorological station (Lükő et al. 2022)



2. ábra. Tó és az üledék felső rétegének energiamérleg elemei, valamint a hőmérők (T) és hőárammérő korongok (H) telepítési elrendezése

Megjegyzés: Az üledék energiamérlegét a sárga szaggatott vonallal jelölt térrészre írtuk fel, határain a hőcserek jelölésével. Az egyes változókat „A tó energiamérlege (0D modell)” fejezetben ismertetjük

Figure 2. Energy balance components of the lake (above) and the upper layer of the sediment (below) as well as the installation arrangement of thermometers (T) and heat flux plates (H)

Note: The energy balance of the sediment was determined for the area marked with a yellow dashed line and by heat exchanges marked at its borders. The variables are described in the “Energy balance of the lake (0D model)” chapter

Hővezetési együttható

Bár a határfelületi mederhóáram számításához szükséges a hóáramokat is mérni egy adott mélységben, de egy az üledékre felállított hővezetési modell segítségével később kiküszöbölhetővé válhatna azok meghatározása. A hővezetési modell felállításához szükséges egy hővezetési együttható (α), melynek értékét az alábbi egyenlettel számítottuk (Smith 2002):

$$H_{mért} = \alpha \cdot \left. \frac{\partial T_{\bar{u}}}{\partial Z} \right|_{-z} \quad (3)$$

ahol z a mérés szintje.

A fenti egyenletben az egyetlen ismeretlen az α , amely meghatározása innen már közvetlenül megtehető. A $\partial T_{\bar{u}}$ a T_2 és T_1 hőmérők különbségéből számítható, amely időnként kiugró értéket mutat. A hirtelen nagy hőmérsékletváltozások nem magyarázhatók a hővezetés folyamatával, mérési hibára vagy esetleg hőfejlődéssel járó biológiai folyamatokra utalnak. Ezeket a kiugró értékeket kiszűrtük a vizsgálatok előtt az alábbi két feltétellel: i) egymást követő hőmérséklet között maximum ± 2 °C eltérés lehet; ii) az adat az 5 órás időszak átlagától annak szórásának háromszorosánál nem térhet el jobban. A kiszűrt adatokat lineáris interpolációval pótoltuk.

A tó energiamérlege (0D modell)

A víz-üledék közötti hőcsere szerepét a tó hőháztartásában egy nulldimenziós (0D) energiamérleg modellel vizsgáltuk. Egyrészt vizsgáljuk, hogy hogyan alakul a vízhőmérséklet, másrészt pedig a párolgás, illetve a szenibilis hóáram a mederhóáram figyelembevételével, illetve a nélkül. A tó egységnyi felületű vízoszlopára az energiamérleg egyenlete a következő (Lükő és társai 2022):

$$R_{sug} + HT_s + L_v E + \Delta S_{viz} + H_{hf} = 0 \quad (4)$$

ahol R_{sug} a nettó sugárzási hóáram, HT_s a szenibilis hóáram, ΔS_{viz} a vízoszlopban tárolt energia, $L_v E$ pedig a látens (párolgási) hóáram.

A nettó sugárzási hóáram a bejövő és kimenő rövid- (SW), illetve hosszuhullámú (LW) sugárzás komponensek összege (2. ábra). A vízben tárolt energia meghatározása – ΔS_{viz} és a $\Delta S_{\bar{u}}$ -hez hasonlóan – a mért vízhőmérsékletek alapján történt.

A turbulens hóáramokat (HT_s , $L_v E$) a modellben átviteli függvények segítségével határoztuk meg az alábbi képletekkel (Lükő és társai 2022):

$$HT_s = \rho_l \cdot c_l \cdot C_H \cdot u \cdot (\Delta T) \quad (5)$$

$$L_v E = \rho_l \cdot \lambda \cdot C_E \cdot u \cdot (\Delta q) \quad (6)$$

ahol ρ_l a levegő sűrűsége, c_l a levegő állandó nyomáson vett fajhője, u a szélesség, ΔT a vízfelszín és a légkör hőmérséklet különbsége, Δq pedig a specifikus nedvességtartalom-különbség a vízfelszín és a légköri mérési magasság között.

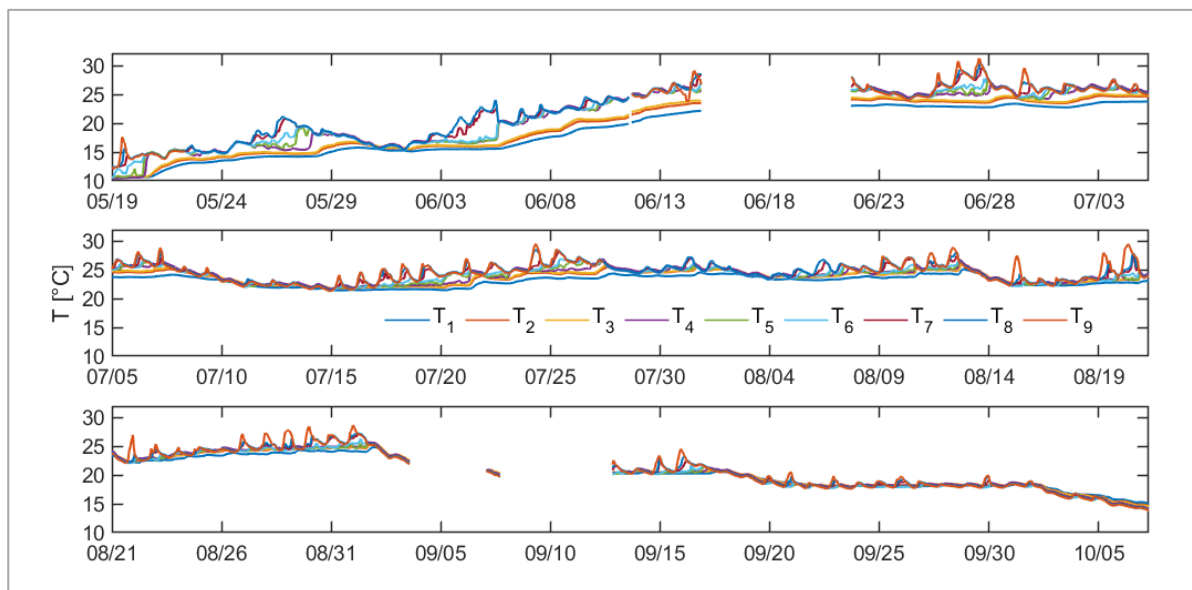
A λ párolgáshő a vízfelszín hőmérséklete alapján számítottuk, a szükséges meteorológiai állapotváltozókat a nyíltvízi állomás (1. ábra) rögzítette, míg a C_H és C_E átviteli tényezők kalibrálandó paraméterek voltak. Ez utóbbiak értékeit egymással egyezőnek vettük fel (Nordbo és társai 2011), ezzel csökkentve az energiamérleg modell kalibrálandó szabad paramétereit. A modell kalibrálása során a mért és modellezett függvényátlagolt vízhőmérsékletek egyezésére törekedtünk.

EREDMÉNYEK ÉS DISZKUZZIÓ

A víz- és üledék hőmérsékletek alakulása

A 3. ábrán a különböző mélységben elhelyezett hőmérők által rögzített víz és üledék hőmérsékletek idősorai láthatók óras felbontással május közepétől szeptember elejéig. Az időszak első felét egy intenzív melegezés jellemezte június közepéig, amely során a vízhőmérséklet közel monoton módon több mint 15 °C-ot emelkedett. A napi ciklusú hőmérsékleti rétegződés ebben az időszakban még gyenge volt. Két alkalommal (05/24-26 és 06/03-05) a felszíni vízhőmérséklet erőteljesebben megnövekedett a melegebb levegő hatására. Mindkét időszakot egy erőteljes szél keltette átkeveredés követte, aminek eredményeképp a mélyebb rétegek hőmérséklete, valamint ezzel az üledék-víz közötti hőmérséklet-különbség ugrásszerűen megnőtt (3. és 4. ábra). Ennek oka az üledék és a víz fajhőjének eltérése. Az időszak további részében (június végétől) erőteljes és igazán tartós hőmérséklet-változások nem voltak, a meleg évszakra jellemző napi ciklusú hőmérséklet-ingadozás és rétegződés figyelhető meg (6/a ábra), amelyeket a viharokkal együtt járó kisebb lehűlések és átkeveredések szakítottak meg. A június 15-20. és a szeptember 3-12. közötti időszakokban energiaellátási problémákból adódóan a víz- és üledék-hőmérsékleteket nem, vagy csak időszakosan tudta rögzíteni a mérőállomás.

A 3. ábrán a T1-T9 által mért hőmérsékletek láthatók. Jól megfigyelhető a víztest felmelegedése a tavaszi időszakban, és a kezdődő hűlési időszak a nyár végi és az ősz eleji időszakban. A tó átlagos hőmérséklete 22,9 °C volt a nyár során, ami jól illeszkedik a léghőmérséklet esetében mérthez. A teljes vízoszlopra átlagolt értékekből a legmagasabb hőmérséklet 27,4 °C, a legkisebb pedig 11,2 °C volt. Az ábrán látványosan megmutatkozik, hogy a mederben mért hőmérsékletek sokkal lassabban változtak, mint a víztér esetében, illetve a napi ingadozásuk is számottevően kisebb volt.



3. ábra. Víz- és üledék-hőmérsékletek alakulása

Megjegyzés: (T1-T2)- az üledék hőmérséklet, (T3)- az üledék víz határfelület hőmérséklet, (T4-T9)-a vízoszlop hőmérséklet

Figure 3. Evolution of water and sediment temperatures

Note: (T1-T2)-sediment temperatures, (T3)-sediment-water interface temperature, (T4-T9)-water column temperatures

A 4. ábra a víztér és az üledék közti hőmérséklet-különbséget mutatja a határfelület felett 0,5 m-re és az iszapban 4 cm mélyen telepített műszerek rögzített adatai alapján. Egyrészt megfigyelhető, hogy az üledéknek a hőmérséklet-változással szembeni tehetetlensége – fajhőjének köszönhetően – jóval nagyobb, mint a víznek. Ennek köszönhetően a napi ciklusú hőingások az üledékben nem voltak érzékelhetők, illetve legfeljebb pár tized Celsius-fokosak voltak, ellentétben a vízoszlopot jellemző markáns több fokos napon belüli változásokkal. Másrészt jól látszik, hogy a melegedési periódus során jelentős, akár 5 °C-os különbség alakult ki az alsó vízréteg és az üledék között, amely tartósan fennmaradt. Ez egy folyamatos stabilis rétegződést eredményezett az üledék felszíne felett, ami alapján feltételezhető, hogy a függőleges irányú turbulens keveredés ebben a rétegben visszafogottabb volt. Egy ilyen erősségű stabil rétegződésnek az üledék biokémiai folyamataira is számottevő kihatása lehet, mivel csökkenti a függőleges irányú cserefolyamatokat, többek közt a tápanyag- és oldott oxigén fluxusokat. Ez a tartós hőmérséklet-különbség a második időszak (július 3-5.) során csökkent vissza nullára. Július közepétől kezdve az üledék és a meder közeli víztér hőmérséklete már csak rövidebb időszakokra mutatott különbségeket, és azok mértéke is kisebb volt. Végezetül felhívjuk a figyelmet, hogy a vízhőmérsékletben megjelenő ugrásszerű hőmérséklet-változásokat július végétől az üledék hőmérséklete is lekövette. Ez a jelenség a következő fejezetekben ismertetett mederhóáramok, illetve a számított hővezetési együttható idősorain is megmutatkozott és arra enged következtetni, hogy megváltoztak az üledék hővezetési tulajdonságai.

A mederhóáram időbeli alakulása

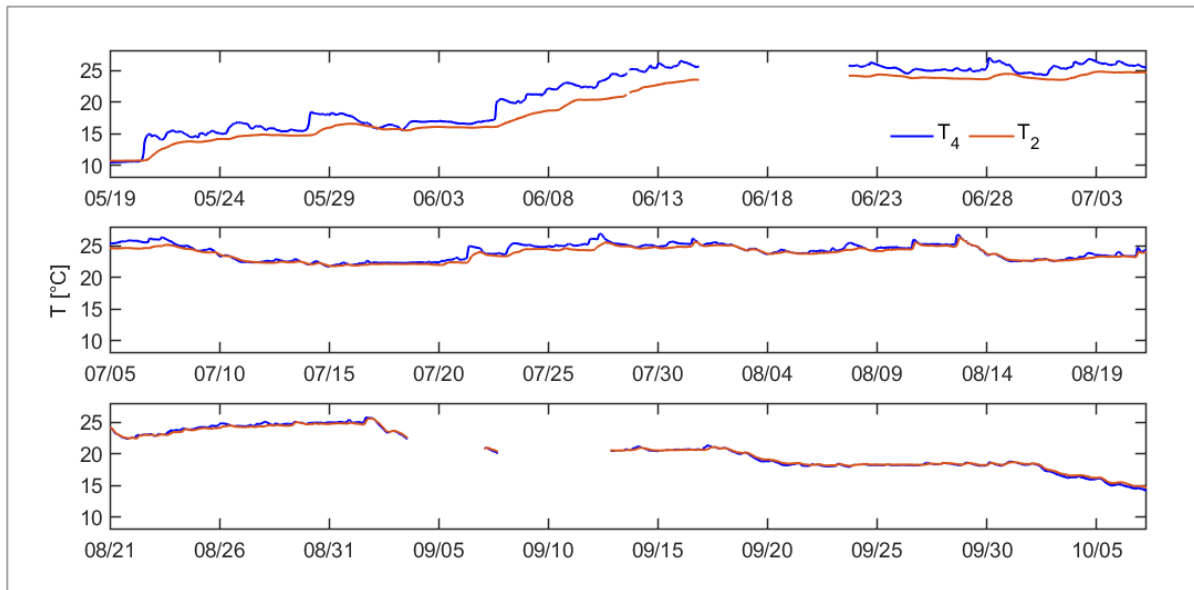
A mederhóáram idő menti alakulását az 5. ábra mutatja, amely alapján elmondható, hogy az üledék és a víztér közötti hőcsere tavasz végén és ősz elején irányt vált. A május közepén kezdődő mérés első két napjában negatív mederhóáram értékek voltak, ami azt jelenti, hogy akkor,

még ha kis mértékben is, de a meder hőt adott le a víztérnek (negatív előjelű). Ez a vízhőmérséklet növekedésével gyorsan megváltozott, és onnantól kezdve a hőáram iránya ellentétes lett, vagyis a nyári időszakban augusztus közepéig – pár rövid időszaktól eltekintve – az üledék mindvégig hőt vont el a víztérből (pozitív előjelű hőáram). A pár kivételes időszak a jelentős lehűléssel járó időjárási események hatására állt elő. Az ősz eleji időszak hasonló a tavasz végéhez, vagyis kis intenzitással ugyan, de ekkor már a meder adott át hőt a víztérnek. A vízhőmérséklet további csökkenésével ez a folyamat aztán erősebbé és tartóssá vált. A szezonális ciklust látva feltételezhető, hogy az üledék hőleadása mindaddig fennmarad, amíg a két közeg hőmérséklete közel kiegyenlítődik. Ennek időpontjára a jelenlegi mérésekből következtetést nem tudunk levonni, mert a mérések szerint a meder hőleadása még növekedett október első harmadában.

Az üledék-víz határfelületén kialakuló hőáram az, amely közvetlenül hatással van a víztér hőmérsékletére és rétegződésére. A határfelületi hőáramot és kapcsolatát az üledék 8 cm-es mélységében mért hőárammal az üledék felső rétegére felírt energiamérleg alapján vizsgáltuk (2. ábra). Az ábráról egyrészt jól kivehető, hogy a felületi hőáram jelentősen nagyobb a 8 cm-es mélységben rögzített képest, sokszor annak kétszeresét is meghaladja. Másrészt a felületi hőáram napi ciklusú ingadozása is számottevően nagyobb. Ez különösen igaz a melegedési periódust követő nyári hónapok során (július-augusztus), amikor az üledék hőmérséklete megközelítette a vízhőmérsékletet és a két közeg hőmérséklet-különbsége mindössze 1-2 °C. Ebben a periódusban a felületi és 8 cm mélyen észlelt hőáram napi átlagértéke kismértékben tér el, a kettő közti különbség a napi ingadozás során jelenik meg. A felületi hőáram a délelőtti órákban a besugárzás dominálta vízhőmérséklet-növekedéssel párhuzamosan megemelkedik, majd pedig az éjszakai lehűléssel a mélységi hőáram értéke alá csökken. Egy ilyen tipikus pár napos

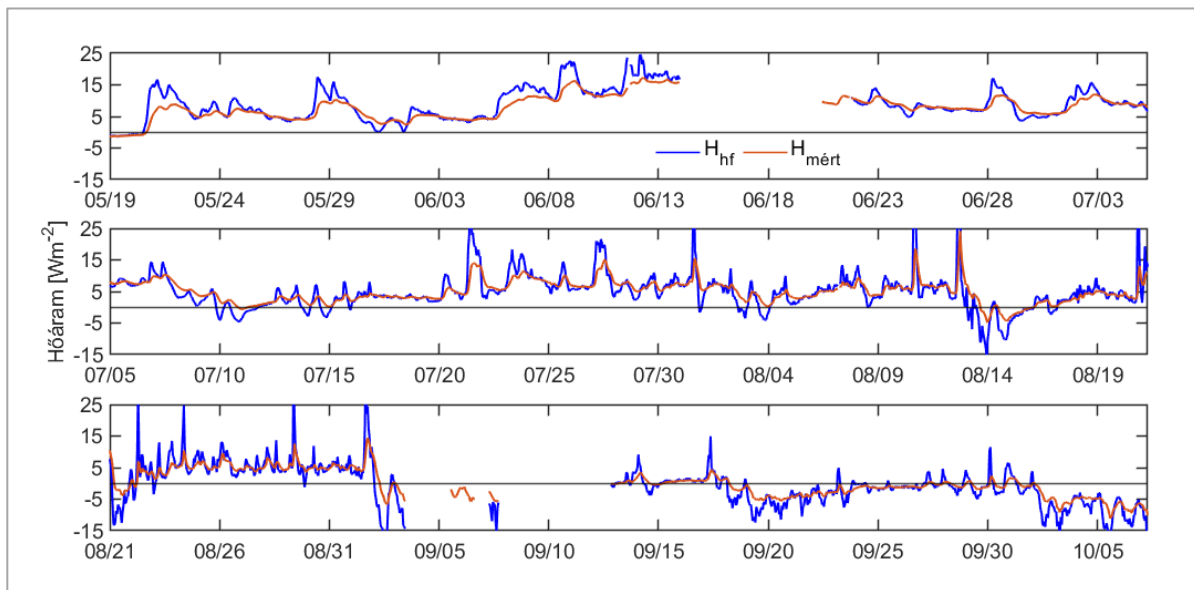
menetre mutat példát a 6. ábra. Ez azt jelenti, hogy az üledék felső (pár centiméteres) rétegében számottevően vál-

tozik a hőmennyiség, amely 8 cm-es mélységbe diffúzióval már részben jut csak le.



4. ábra. Az üledék (T_2) és az alsó vízréteg (T_4) hőmérsékletének alakulása

Figure 4. Evolution of sediment temperature (T_2) and water temperature (T_4) in the bottom layer



5. ábra. Felületre számított és az üledékben mért hőáramok idősorai

Megjegyzés: H_{hf} felületi hőáram, $H_{mért}$ üledék hőárama

Figure 5. Time series of heat fluxes calculated for the surface and measured in the sediment

Note: H_{hf} surface heat flux, H_{hf} sediment heat flux

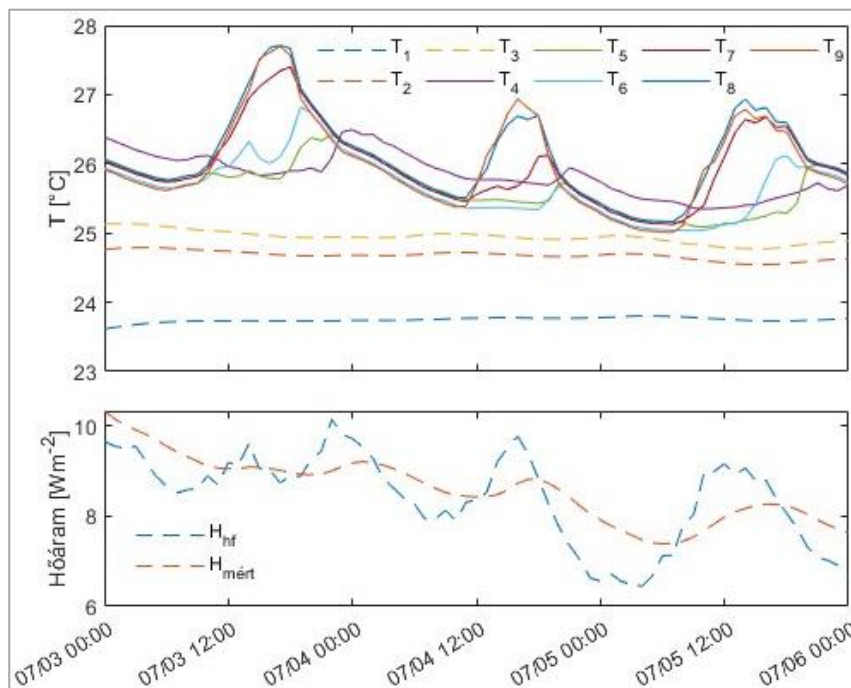
Ezek alapján elmondható, hogy a melegedési időszakban, amikor a víztér és az üledék hőmérséklete jelentősen eltér, a felületi hőcsere szignifikánsan meghaladja az üledék 8 cm-es mélységében mért értéket, annak akár kétszeresét is elérheti. Előbbi 2019 júniusában napokon át $10\text{--}25\text{ Wm}^{-2}$ között változott, vagyis ugyanolyan nagyságrendű volt, mint a levegő-víz határfelületen zajló szenzibilis hőcsere (Lükő és társai 2022). Ezzel szemben a nyári felmelegedést követő időszakban az üledékben mért hőáram jó közelítést ad az üledék-víz határfelületen zajló hőcséről napi skálán, azonban annak napi ciklusú intenzív ingadozását már nem képes megmutatni. A délutáni órákban az üledék hőfelvétele megnövekedett, majd az éjszakai és

hajnali órákban lecsökkent a kiegyenlítő üledék- és víz-hőmérsékleteknek köszönhetően.

A hőcsere napon belüli változása nem elhanyagolható, mivel fontos ökológiai szerepe lehet azáltal, hogy elősegíti az üledékréteg feletti víztér stabil rétegződését, csökkentve ezzel az ottani függőleges irányú keveredést. A stabil rétegzettség pedig csökkenti az oldott oxigén üledékhez való lejutását, amely – mint 2019-ben megtapasztaltuk – foszfor felszabaduláshoz és algavirágzáshoz vezetett (Istvánovics és társai 2022). A 7. ábra jól szemlélteti, hogy a víztér alsó 0,5 m-es mélységében kialakuló stabil hőmérsékleti rétegződés szoros összefüggésben van az üledék-víz határ-

felületen zajló hőcserevel. Az ábrán jelölt hőmérséklet-különbségeket a határfelületen (T_3) és attól 0,5 m-re elhelyezett (T_4) hőmérők adataiból számítottuk. Ez az erős lineáris kapcsolat – eltávolodva a medertől – gyorsan megszűnik, ugyanis a mederfenéktől 0,5 m-en és 1 m-en mért hőmérséklet-különbséggel a kapcsolat már elenyésző. Ez azt mutatja, hogy a vízoszlop felszíni rétegzettségéből nem lehet feltétlenül következtetni a mederfenék feletti rétegzettségére.

Két gyakran előforduló példát találtunk, amikor a mederhőáram képes fenntartani közvetlenül az üledék felett a rétegzettséget. Egyrészt az éjszakai órákban a napsugárzás hiányában a felszín hőmérséklete csökkenni kezd, ami megnöveli ott a víz sűrűségét. A megnövekedett sűrűség hatására a felszíni víz elkezd alábukni és ezzel átkeveri a vízoszlop egy részét. Másrészt enyhe szél (2-3 m/s) esetén a felszín szintén képes átkeveredni, de a teljes vízoszlop nem.

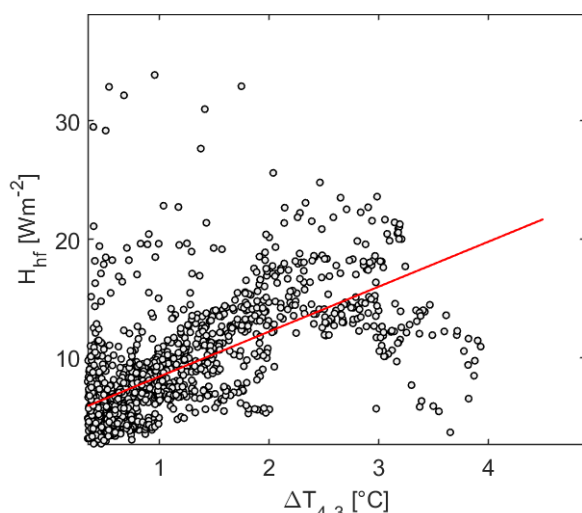


6. ábra. Víz- és üledék-hőmérsékletek (6/a), illetve a felületre számított és az üledékben mért hőáramok (6/b) napon belüli alakulása 2019/07/03 – 2019/07/06. között

Megjegyzés: (T_1 - T_2)-üledék hőmérséklet, (T_3)-üledék víz határfelület hőmérséklet, (T_4 - T_9)-vízoszlop hőmérséklet, H_{hf} felületi hőáram, H_{mert} üledék hőárama

Figure 6. Intra-daily development of water and sediment temperatures (6/a), and heat fluxes calculated for the surface and measured in the sediment (6/b) between 03/07/2019 - 06/07/2019

Note: (T_1 - T_2)-sediment temperatures, (T_3)-sediment-water interface temperature, (T_4 - T_9)-water column temperatures, H_{hf} surface heat flux, H_{mert} sediment heat flux



7. ábra. A mederfenék feletti hőmérséklet-különbség kapcsolata a felületi mederhőárammal. A hőmérséklet-különbség mértékegysége [$^{\circ}\text{C}$]

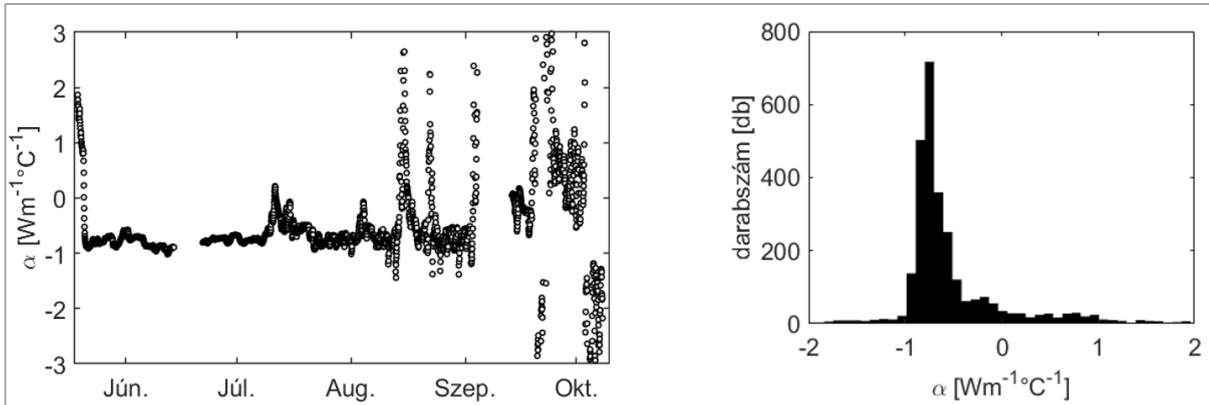
Figure 7. The relationship between the temperature difference above the lakebed and the heat flux at the sediment-water interface. The unit of the temperature difference is [$^{\circ}\text{C}$]

A felszíni üledék hővezetési jellemzői

Az üledék 8 cm-es mélységére vonatkozó hővezetési együtthatót a (3) összefüggés segítségével határoztuk meg. Mivel az üledék hőelnyelését tekintettük pozitívnak, így a jellemzően pozitív hőmérséklet-különbség esetében negatív előjelű, de abszolút értékében értelmezendő hővezetési együtthatót kaptunk. Ennek idősorát és statisztikai kiértékeléssel kapott eloszlását a 8. ábra mutatja. Május végétől augusztus közepéig pár rendkívül szeles időszaktól eltekintve a hővezetési együttható kis szórást mutat, értéke átlagosan $0,8 \text{ Wm}^{-1}\text{C}^{-1}$. Ezt követően elsőként a júliusi, majd az augusztusi szélviharoknak köszönhetően az üledék többször erősen felkeveredett és ezzel megváltozott a szerkezete, beleértve annak víztartalmát. Az üledék a viharok között valamelyest konszolidálódott, visszaállt az eredeti, átlagosnak mondható állapotára és ezzel a hővezetési együttható is újra megközelítette eredeti, jellemző értékét. A hővezetési együttható rövid idejű, de erőteljes ingadozásából arra következtethetünk, hogy az intenzív vízmozgás (áramlás és hullámozás) során a hőcsere nemcsak egy tisztán molekuláris diffúziós folyamat, hanem turbulens keveredés is történik.

A hővezetési együttható ingadozása szeptember közepétől tovább erősödött. Ellenben ekkor a nyári időszakhoz képest már nemcsak a szélesemények változtathatták meg a hőcserefolyamat jellegét, hanem az üledék rétegzettsége is. Amikor az üledék felszínének hőmérséklete a mélyebb réteg hőmérséklete alá csökkent, akkor instabil rétegzettség alakult ki. Ekkor a felszíni rétegben található pórusvíz

nagyobb sűrűségű lett, mint az alatta elhelyezkedő és sűrűségkülönbség keltette vízmozgás tudott megindulni. Ez azt eredményezi, hogy ekkor sem tisztán molekuláris diffúzió határozta meg a hőcsere nagyságát. Összeségében tehát mind a vízmozgás keltette turbulencia, mind pedig a sűrűségi áramlások összetett hőáramviszonyokat tudnak kialakítani.



8. ábra. Az üledék hővezetési együtthatójának időszora (balra) és statisztikai eloszlása (jobbra)

Az együttható medián értéke $-0,8$; átlaga $-0,3$; szórása $1,79 \text{ Wm}^{-1}\text{C}^{-1}$

Figure 8. Time series (left) and statistical distribution of the thermal conductivity coefficient (right) of the sediment
The coefficient has a median value of -0.8 , an average of -0.3 , and a standard deviation of $1.79 \text{ Wm}^{-1}\text{C}^{-1}$

Ezek vizsgálatát a hővezetési együttható és a hőárammérő korongok két oldalán mért hőmérséklet-különbségek alapján végeztük (9. ábra). A (3) egyenlet szerint négyféle eset fordulhat elő, miszerint dT és α négy különböző kombinációban fordulhat elő előjelüket ($dT < 0$ és $\alpha < 0$) tekintve. A négy eset az alábbi:

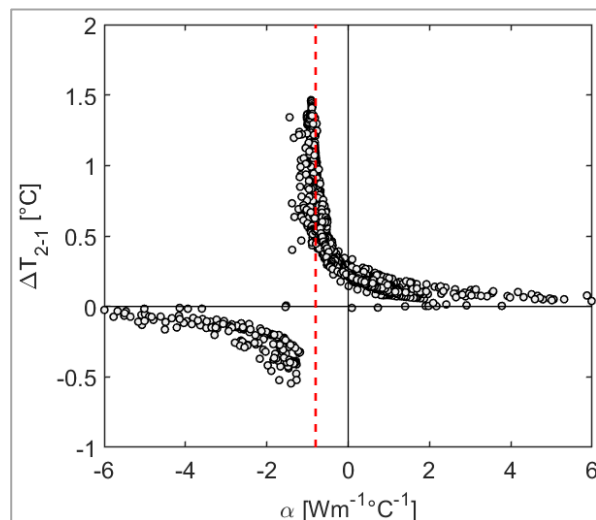
- I. $dT > 0$ és $\alpha < 0 \rightarrow H_{\text{mért}} > 0$;
- II. $dT > 0$ és $\alpha > 0 \rightarrow H_{\text{mért}} < 0$;
- III. $dT < 0$ és $\alpha < 0 \rightarrow H_{\text{mért}} < 0$;
- IV. $dT < 0$ és $\alpha > 0 \rightarrow H_{\text{mért}} > 0$.

Az I. eset az, amikor stabil a hőmérsékleti rétegzettség az üledékben és a hőáram iránya lefelé mutat, vagyis a víztértől az üledék felé. Ez teszi ki az esetek legnagyobb hányadát és ekkor zajlik tisztán molekuláris diffúzió, amely jól jellemezhető a kapott hővezetési együttható medián értékével ($\alpha = 0,8 \text{ Wm}^{-1}\text{C}^{-1}$). Látható, hogy dT növekedésével sem változik α értéke.

A II. esethez tartozó pontok olyan időszakokat mutatnak, amikor a dT pozitív, de a hőáram azzal ellentétes irányú, mivel α is pozitív. Vagyis annak ellenére, hogy stabil a hőmérsékleti rétegződés az üledékben, a hőáram iránya felfelé, a víztér felé mutat. Ez olyan tranziens esetet jelenthet, amikor a 8 cm mélységben lévő hőárammérő korongot közrefogó 4 és 12 cm mélyen mért hőmérsékleti profil nem monoton változik, hanem feltehetően inverzió alakult ki. Ilyenkor a hőmérséklet kis mértékben változhat csak, amit megerősít az ábra, mert ebben a II. esetben dT nem éri el a $0,5^\circ\text{C}$ -ot sem. Összevetve azonban a 8. ábrával látható, hogy ezek a szélviharok keltette erős vízmozgással járó rövidebb időszakok, vagyis amikor a felkeveredett, il-

letve fellazult üledékben a turbulens keveredés dominálta a hőcsere.

A III. esetben instabil a hőmérsékleti rétegződés az üledékben – az üledék felszíne hidegebb, mint a mélyebb része – és a hőáram iránya ellentétesre vált, a víztér felé mutat. Ilyen instabil rétegzettség mellett alakulhat ki a pórusvíz sűrűségi áramlása, ami a hőcsere megnövekedésével jár. Ezt megerősíti, hogy α értéke ebben a III. esetben abszolút értékben jelentősen nagyobb, mint $0,8 \text{ Wm}^{-1}\text{C}^{-1}$. Ilyen esetek – ahogy azt korábban írtuk – szeptember közepétől fordultak elő, ahogy az a 8. ábrán is látható. A IV. eset nem fordult elő.

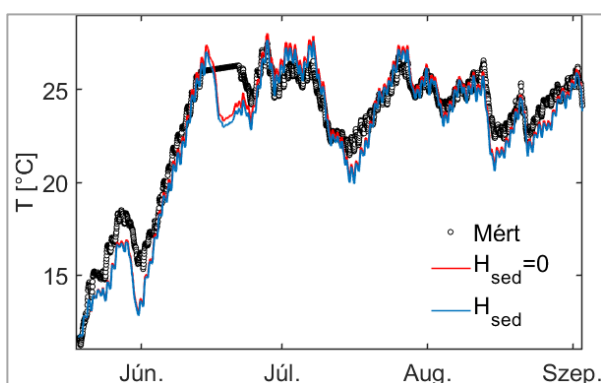


9. ábra. Hővezetési együttható (α) és az üledékben mért hőmérséklet-különbség (ΔT) kapcsolata

Figure 9. Relationship between the thermal conductivity coefficient (α) and the measured temperature difference (ΔT) in the sediment

A mederhóáram hatása a tó energiamérlegére

Végezetül azt vizsgáltuk, hogy a mederhóáram milyen hatással van a tó energia-háztartására. Ehhez a már előzőleg ismertetett egyszerű energia-háztartási modellt használtuk. Ez egy 0D-s modell, amivel a vízoszlopban tárolt teljes hőmennyiséget és az abból levezethető, függélymenti átlaghőmérsékletet határoztuk meg. Két változatot szimuláltunk: az első esetben elhanyagoltuk, míg a második esetben figyelembe vettük a meder-víz határfelületen zajló hőcsereét. Utóbbi esetben a határfelületre számított idősort írtuk elő a modellnek. A két szimulációval kapott vízhőmérsékleteket a 10. ábrán vetjük össze a mért értékekkel. Az energiamérleg modell mindkét esetben nagyon jó egyezést mutat a mértékekkel. A modell vízhőmérséklet számítására vonatkozó képességét a Nash-Sutcliffe hatékonysági mutató megerősítette. A mederhóáram figyelembevételével a hatékonysági mutató értéke 0,9, míg anélkül 0,89. Tökéletes egyezés esetén az értéke 1,0 lenne. A hatékonysági mutatóban jelentkező elhanyagolható különbség azt jelenthetné, hogy a mederhóáram szerepe elenyésző, azonban ez félrevezető. Ennek oka, hogy modellünk a légkör-víz határfelületen számított látens és szenzibilis hőcsereét a vízhőmérséklettől függően dinamikusan számítja. A víz és a légkör között egy ilyen sekély tó esetében, mint a Balaton, közel egyensúlyi állapot áll fenn. Ez azt jelenti, hogy ha a vízhőmérséklet csökken – például a mederhóáram hatására –, akkor a légkör-víz határfelületen zajló hőcsere is csökkenni fog és fordítva. Ez az (5) és (6) egyenletekből egyértelműen látszik. A szenzibilis hőcsere a hőmérséklet-gradienstől közvetlenül függ (5. egyenlet). A látens hőcsere esetében egyrésztől a párolgáshő függ a hőmérséklettől, másrésztől pedig a vízfelszín feletti telítődési nedvességtartalom értéke a specifikus nedvességtartalom-gradienstől (6. egyenlet). Mindkét hőcsere-folyamatot dinamikusan számította modellünk. Röviden tehát a mederhóáram a megváltozó vízhőmérsékleten keresztül kihat a légkör-víz felületi hőcserekre.

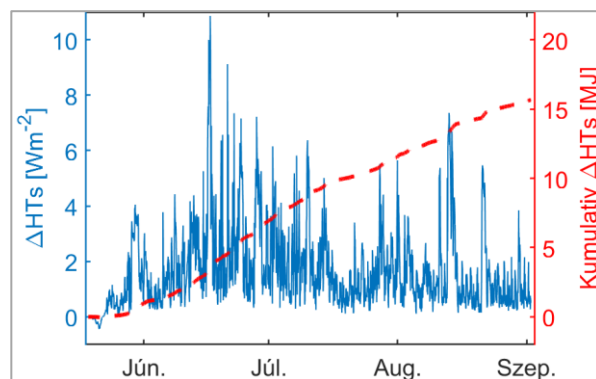


10. ábra. A mért vízhőmérséklet (Mért) és a modellezett átlagos vízhőmérsékletek alakulása a mederhóáram figyelembevételével (H_{sed}) és anélkül ($H_{sed}=0$)

Figure 10. Evolution of measured water temperature (Mért), and modeled average water temperatures with consideration of sediment heat flux (H_{sed}) and without consideration of sediment heat flux ($H_{sed}=0$)

A látens hőáramot időben összegezve majd elosztva a párolgáshővel és a vízsűrűséggel megkapjuk a teljes időszak

alatt elpárolgott vízmennyiséget ($E = \frac{\sum L_v E}{\rho_v \lambda}$). A három hónap (június-augusztus) során a tó párolgás értéke a mederhóáram elhanyagolásával 60 cm-re adódott, míg annak figyelembevételével 58 cm-re. A nyári időszakban mind a párolgás, mind a mederhóáram hűti a vízoszlopot és ezzel csökkenti a párolgáshoz rendelkezésre álló hőmennyiséget. A dinamikus egyensúlynak köszönhetően a mederhóáram elhanyagolásával valamelyest túlbecsültük a látens hőáramot és ezzel a tó párolgást is. A téli és/vagy átmeneti hónapokban várhatóan ez fordítva történik, mert ekkor az üledék hőt ad le a víztérnek, ellentétben a párolgással, amely mindvégig hőt von el. A nyári hónapokra kapott 3-4%-os eltérés így várható, hogy éves léptékben tovább csökken. Végezetül előbbihez hasonlóan vizsgáltuk az üledék-víz közötti hőcsere hatását a szenzibilis hőáram alakulására (11. ábra). A mederhóáram elhanyagolása a vizsgált tagok közül itt fejt ki legjobban hatását. A 11. ábrán a szenzibilis hőáramok különbségét ábrázoljuk a két vizsgált esetre, vagyis a mederhóáram nélküli idősből kivontuk a mederhóáram figyelembevételével kapott idősort. Ennek a különbségnek az átlaga $1,7 \text{ Wm}^{-2}$ -re adódott, ami a szenzibilis hőcsere átlagos értékéhez (22 Wm^{-2}) képest átlagosan 7-8%-os eltérést jelent. Ez a különbség már számottevő. A teljes időszakra összegezve a teljes szenzibilis hőcsere a két modellváltozat között meghaladta a 15 MJ-t. Összességében ez azt jelenti, hogy a mederhóáram elhanyagolásával bár képesek vagyunk jól becsülni a vízhőmérsékletet, de annak kárára, hogy közben hibát vétünk a légkör-víz határfelületen zajló hőcsereikben. Ennek a hibának nagyobb része a szenzibilis, míg kisebb hányada a látens hőcsere terhelé.



11. ábra. A szenzibilis hőáramok különbségének időszora a mederhóáram figyelembevételével és anélkül, illetve ennek kumulatív összege

Figure 11. The time series of the difference in sensible heat fluxes with and without consideration of the sediment heat flux, and its cumulative sum

KONKLÚZIÓK

Kutatásunkban a Balaton üledék-víz határfelületén zajló hőcsereét vizsgáltuk hosszú idejű mérési adatsorokra alapozva. A mérési program során nemcsak a víz- és üledék-hőmérsékleteket monitoroztuk nagy időbeli felbontással, hanem hőárammérő korongok segítségével közvetlenül mértük az üledék felső rétegében a hőáramot is. Az irodalomkutatás során hasonló mérésre nem találtunk példát, más kutatók ezidáig csak hőmérséklet mérésre alapozva jellemezték a mederhóáram mértékét. Vizsgálataink eredménye alapján következtetéseink az alábbiak:

- A mederhóáram mértéke a nyári hónapok túlnyomó részében jól számítható egy hődiffúziós egyenlettel, de csak olyan esetekben, amikor az üledéket nem zavarja meg a vízmozgás, illetve amikor stabil hőmérsékleti rétegződés jellemzi a határfelületet, vagyis a víztér hőmérséklete meghaladja az üledékét.
- A vizsgálatok során azt kaptuk, hogy ekkor a Balaton üledékének hővezetése jól jellemezhető egy konstans hővezetési együtthatóval, aminek értéke $0,8 \text{ Wm}^{-1}\text{C}^{-1}$. Ez az üledékben fellépő (ΔT_{2-1}) $0,5-1,5 \text{ }^\circ\text{C}$ közötti hőmérséklet-különbség tartományra érvényes a Keszthelyi-medence nyílt vizére. Ekkor a víztér-üledék közötti hőmérsékleti eltérés (ΔT_{4-3}) $0-4 \text{ }^\circ\text{C}$ között változik.

A hővezetéssel kapcsolatban az alábbi további következtetéseket tudjuk megfogalmazni:

- A szél keltette vízmozgás (áramlás és hullámzás) könnyen meg tudja zavarni a hőcsere folyamatát. Ekkor az üledék szerkezete megváltozik és a hőcserében komoly szerepet játszik a turbulens keveredés is.
- Instabil hőmérsékleti rétegződés szintén kialakulhat az üledékben tavasszal és ősszel. Ekkor a pórusvíz áramlása megindulhat, amelyet a sűrűségkülönbség hajt meg. Ekkor a hővezetési együttható értéke jelentősen megnövekszik, illetve az üledékben a hőmérséklet-gradiens számottevően kisebb, mint stabil rétegzettség esetén. Ilyen esetekben a hőmérséklet-gradiens értéke $-0,5 \text{ }^\circ\text{C}$ és $0,5 \text{ }^\circ\text{C}$ között alakul, mikor is az általunk levezetett hővezetési együttható elveszíti érvényességét.
- Az üledék-víz határfelületen zajló hőcsere számottevően nagyobb, mint az üledék 8 cm-es mélységében és a nyári meleg időszakban erőteljes napi ingadozást mutatott.
- Emellett a felületi hőcsere számottevően kihat az üledék feletti alsó víztér rétegződésére, amelynek jelentős hatása lehet a hidrobiológiai folyamatokra, például az oldott oxigénszint alakulására az üledék felszínén.

Fentiek mellett energiamérleg alapú modellezést végeztünk, hogy meghatározzuk a mederhóáram szerepét a függélyátlagolt vízhőmérséklet modellezésében. Ezzel kapcsolatban a fő következtetésünk, hogy a mederhóáram elhanyagolásával a vízhőmérséklet jól modellezhető, azonban a légkör-víz határfelületen zajló hőcserével ezt kompenzálni kell. Ezzel elsősorban a szenzibilis, másodsorban pedig a párolgási hőcsere számításánál követünk el kismértékű hibát.

Végezetül felmerül a kérdés, hogy az üledék és víz közötti hőcsere hogyan változik meg a hűvösebb évszakok során. Kérdés, hogy mikorra következik be az üledék és a víztér hőmérsékleti kiegyenlítődése? Ez a kérdés jelenleg csak modellezés segítségével válaszolható meg, ráadásul a mélyebb üledékrétegek hőmérsékletének feltételezése mellett. A téli hónapok során az üledékből hőleadást feltételezünk, ami elősegítheti, hogy az üledék felszíne felett a legnagyobb sűrűséggel járó $4 \text{ }^\circ\text{C}$ körüli vízhőmérséklet fennmaradjon, de ennek mértéke és időtartama szintén ismeretlen. Ez utóbbi kérdések miatt egy teljes évre kiterjedő mérési program végrehajtását látjuk célszerűnek elvégezni.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A közleményben bemutatott kutatás a Széchenyi Terv Plusz program keretében az RRF-2.3.1-21-2022-00008 számú projekt támogatásával, illetve a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal által finanszírozott K134559 számú OTKA kutatás keretében valósult meg. Továbbá az első szerző esetében a kutatás a Kulturális és Innovációs Minisztérium ÚNKP-22-3-I-BME-17 kód-számú Új Nemzeti Kiválóság Programjának a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alapból finanszírozott szakmai támogatásával készült.

IRODALOMJEGYZÉK

Bernhardt, J., Kirillin, G., Hupfer, M. (2014). Periodic convection within littoral lake sediments on the background of seiche-driven oxygen fluctuations. *Limnology and Oceanography: Fluids and Environments*, 4(1). pp. 17-33. <https://doi.org/10.1215/21573689-2683238>

Cyr, H. (2012). Temperature variability in shallow littoral sediments of Lake Opeongo (Canada). *Freshwater Science*, 31/3 pp. 895-907.

Fang, X., Stefan, H. G. (1996). Dynamics of heat exchange between sediment and water. *Water Resources Research*, 32(6). pp. 1719-1727. <https://doi.org/10.1029/96WR00274>

Fuente, A. de la (2014). Heat and dissolved oxygen exchanges between the sediment and water column in a shallow salty lagoon. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 119(4). pp. 596-613. <https://doi.org/10.1002/2013JG002413>

Golosov, S., Kirillin, G. (2010). A parameterized model of heat storage by lake sediments. *Environmental Modelling & Software*, 25(6). pp. 793-801. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2010.01.002>

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>

Liebethal, C., Foken, T. (2007). Evaluation of six parameterization approaches for the ground heat flux. *Theoretical and Applied Climatology*, 88(1-2). pp. 43-56. <https://doi.org/10.1007/s00704-005-0234-0>

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*, 127(12). <https://doi.org/10.1029/2021JD036099>

Massman, W. J. (1992). Correcting errors associated with soil heat flux measurements and estimating soil thermal properties from soil temperature and heat flux plate data. *Agricultural and Forest Meteorology*, 59(3-4). pp. 249-266. [https://doi.org/10.1016/0168-1923\(92\)90096-M](https://doi.org/10.1016/0168-1923(92)90096-M)

Nordbo, A., Launiainen, S., Mammarella, I., Leppäranta, M., Huotari, J., Ojala, A., Vesala, T. (2011). Long-term energy flux measurements and energy balance over a small boreal lake using eddy covariance technique. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 116(2). pp.

1-17. <https://doi.org/10.1029/2010JD014542>

Prats, J., Ramos, A., Armengol, J., Dolz, J. (2011). Comparison of Models for Calculation of Diel Sediment-Water Heat Flux from Water Temperatures. *Journal of Hydraulic Engineering*, 137(10). pp. 1135-1147. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0000434](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000434)

Smith, N. P. (2002). Observations and simulations of water-sediment heat exchange in a shallow coastal lagoon. *Estuaries*, 25(3). pp. 483-487. <https://doi.org/10.1007/BF02695989>

Tasnim, B., Jamily, J. A., Fang, X., Zhou, Y., Hayworth, J. S. (2021). Simulating Diurnal Variations of Water Temperature and Dissolved Oxygen in Shallow Minnesota Lakes. *Water*, 13(14). 1980. <https://doi.org/10.3390/w13141980>

Torma P., Krámer T. (2017). Modeling the Effect of Waves on the Diurnal Temperature Stratification of a Shallow Lake. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 61(2). pp. 165-175. <https://doi.org/10.3311/PPci.8883>

Torma P., Wu, C. (2019). Temperature and Circulation Dynamics in a Small and Shallow Lake: Effects of Weak Stratification and Littoral Submerged Macrophytes. *Water*, 11(1), 128. <https://doi.org/10.3390/w11010128>

Tsay, T., Ruggaber, G. J., Effler, S. W., Driscoll, C. T. (1992). Thermal Stratification Modeling of Lakes with Sediment Heat Flux. *Journal of Hydraulic Engineering*, 118(3). pp. 407-419. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1992\)118:3\(407\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1992)118:3(407))

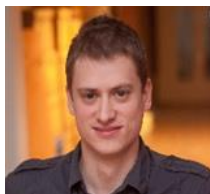
Wetzel, R. G. (2001). *Limnology, Lake and River Ecosystems (Third)*. London: Elsevier Academic Press.

Zdorovennova, G., Terzhevik, A., Palshin, N., Efremova, T., Bogdanov, S., Zdorovennov, R. (2021). Seasonal change in heat flux at the water-bottom sediment boundary in a small lake. *Journal of Physics: Conference Series*, 2131(3), 032080. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2131/3/032080>

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 Vésárhelyi Pál Építőmérnöki és Földtudományi Doktori Iskolában végzi.



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.



WEIDINGER TAMÁS 1983-ban szerzett meteorológus oklevelet, majd 1992-ben PhD fokozatot. Az Eötvös Loránd Tudományegyetem Meteorológia Tanszékén dolgozik 1983-tól. 2013-ban habilitált. Fő oktatási területe a meteorológia, a mikrometeorológia és a dinamikus meteorológia. Fő kutatási területei a határreteg-meteorológia, a felszíni energiamérleg komponensek, valamint különböző gáz-áramok (különösen az ozon és az ammónia) mérése és modellezése. A nemzetközi *Theoretical and Applied Climatology* folyóirat szerkesztője, valamint az Országos Meteorológiai Szolgálat Időjárás folyóiratának szerkesztőbizottsági tagja.