



Budapest Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Építőmérnöki kar
Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszék

A látens hőáram átviteli együtthatójának szezonális vizsgálata örvény-kovariancia mérések alapján

TDK dolgozat

Sajti János
[sajtijan@gmail.com]

Konzulensek:
Torma Péter, egyetemi docens
Lükő Gabriella, doktorandusz

Tartalomjegyzék

Absztrakt	3
Abstract	4
1. Bevezetés.....	5
2. Módszertan	8
Elméleti háttér.....	8
Adatok minőségbiztosítása	11
3. Vizsgált tavak.....	12
3.1. Balaton	
3.2. Douglas-tó	12
3.3. Mendota-tó.....	13
3.4. Ngoring-tó	14
4. Eredmények.....	17
4.1. Balaton	
4.2 Douglas-tó	17
4.3. Mendota-tó.....	18
4.4. Ngoring-tó	20
4.5. Összehasonlítás.....	21
5. Diskusszió.....	22
6. Összefoglalás és következtetések.....	27
7. Köszönetnyilvánítás	28
8. Hivatkozások.....	28

Absztrakt

Az egyes mikrometeorológiai folyamatok közvetlenül meghatározzák a tavak termo- és hidrodinamikai folyamatait (hőmérsékleti struktúra, vízmozgások) és ezáltal a tó ökológiai állapotát, vízminőségét és üzemeltetési feladatait. Ezért fontos tisztában lennünk, a tavak feletti energiaháztartást befolyásoló tényezők pontos fizikai leírásával. A mikrometeorológiai tényezők alatt többek közt a víz-levegő határfelületen zajló impulzus- és hőcserefolyamatokat értjük. Napjainkban a turbulens hő- és impulzusfluxusokat leíró elméletek közül a Monin-Obukhov hasonlósági elmélet (Monin-Obukhov Similarity Theory – MOST) a legelterjedtebb. Jelenlegi tudásunk szerint ezzel az elmélettel és örvény-kovariancia (EC) mérőeszközökkel tudjuk legpontosabban becsülni így a látens (más néven párolgási) hőáramot és az abból közvetlenül levezethető elpárolgott vízmennyiséget. Az ilyen mérések alapján levezetett oceanográfiai összefüggések sokszor nem elegendően pontosak a nagyságrendileg kisebb meghajtási hosszal rendelkező, kontinensek belsejében elhelyezkedő tavaknál. Korábbi balatoni mérések rámutattak, hogy e felvetés helyes és ezáltal a MOST paraméterezések nem teljesen pontosak. Mérésekkel kimutatták, hogy a Balaton esetében a párolgási hőáramot jellemző átviteli tényező szezonálisan, vagyis időben periodikusan változik. Ennek pontos okára nem derült fény a kutatás során, azonban elengedhetetlen a jelenlegi modellek módosításához, és gyakorlati szempontból pedig a tavak vízmérlegének és hőmérsékleti viszonyainak becsléséhez.

Kutatásunk célja, hogy a szezonális változékonyságot kimutassuk – első lépésben – a Balatonhoz hasonló tulajdonságokkal rendelkező tavak esetében, figyelembe véve a vizsgált tó földrajzi és éghajlati elhelyezkedését. A kutatás során olyan tavakat keresünk, amelyeken részletes és időben kellő hosszúságú EC mérések történtek. Ezek feldolgozásával kiszámítjuk a párolgási átviteli tényezőt és meghatározzuk annak átlagos értékét havi időskálán. Amennyiben az átviteli tényezőben felfedezhető az éven belüli változékonyság vizsgálata, meghatározzuk az egyes tavakra ezek nagyságrendjét és jellemzőit. Kísérletet teszünk a szezonális jellegű változékonyság okainak feltárására, vagyis összefüggések keresésére a rutin hidrometeorológiai változókkal.

Összefoglalóan tehát, kutatásunk hosszútávú célja, hogy a tó párolgás számítását pontosítsuk havi és kisebb időléptékekre a tó vízmérlegének és hőmérsékleti struktúrájának pontosabb előrejelezhetősége érdekében.

Abstract

The individual micrometeorological processes directly determine the thermo- and hydrodynamic processes (temperature structure, water movements) of lakes and thus the ecological conditions, water quality, and operational tasks of the lake. Therefore, it is important to be aware of the exact physical description of the factors that influence the energy balance above the lakes. Micrometeorological factors include the momentum and heat exchange processes at the water-air interface. Nowadays, the Monin-Obukhov Similarity Theory (MOST) is the most widely used theory describing turbulent heat and momentum fluxes. According to our current knowledge, this theory, and the eddy-covariance (EC) measurements are the most accurate ways to estimate the latent (also known as evaporative) heat flux and the amount of evaporated water that can be directly derived from it. The oceanographic relationships derived from such measurements are often not sufficiently accurate for lakes in the interior of continents with orders of magnitude smaller fetches. Previous measurements in Lake Balaton have shown that this assumption is correct and that the MOST parameterizations are therefore not fully accurate. Measurements have shown that the transfer coefficient of the evaporative heat flux in Lake Balaton varies seasonally, i.e. periodically in time. The exact reason for this has not been revealed in the research, but it is essential for modifying the current models, and from a practical point of view, for estimating the water balance and temperature conditions of lakes.

The aim of our research is to show the seasonal variability - as a first step - for lakes with similar characteristics to Lake Balaton, taking into account the geographical locations and climatic conditions of the lakes under study. In the research, we will look for lakes where EC measurements have been carried out in detail over a sufficiently long period of time. These will be processed to calculate the evaporation transfer coefficient and to determine its average value on a monthly time scale. If the inter-annual variability of the transfer coefficient can be detected, the magnitude and the characteristics of the variability will be determined for each lake. An attempt will be made to identify the causes of the seasonal variability, i.e. to search for correlations with routine hydrometeorological variables.

In summary, the long-term goal of our research is to refine the calculation of lake evaporation to monthly and smaller time scales in order to predict the water balance and the temperature structure of the lake more accurately.

1. Bevezetés

A levegő-víz határfelületen játszódó mikrometeorológiai cserefolyamatok kulcs szereplői a tavak és a felszínközeli légkör termo- és hidrodinamikájának. Ezeknek egy része turbulens cserefolyamat, amelyet két fő csoportra oszthatunk, úgy, mint impulzus- és hőáramok. A turbulens hőáram esetében megkülönböztetünk érzékelhető (idegen szóval: szenzibilis) és párolgási (vagy látens) hőcserét (Arya 2001). Utóbbi abból adódik, hogy a párolgás endoterm folyamat, vagyis a halmazállapot-változás során hőt von el a folyadéktól. Egy tó esetében az impulzusáram hozza létre a vízmozgásokat (áramlás, hullámozás), míg a hőáramok a vízhőmérséklet megváltozását eredményezik (Lükő et al., 2022b). Ezáltal közvetlen kapcsolatban vannak egy tó ökológiai állapotával, vízminőségével és akár üzemeltetési feladataival. Utóbbira jó példa a Balaton vízszint-szabályozásának kérdése a klímaváltozás fényében, hiszen a tó vízmérlegében a legfontosabb veszteség a párolgás.

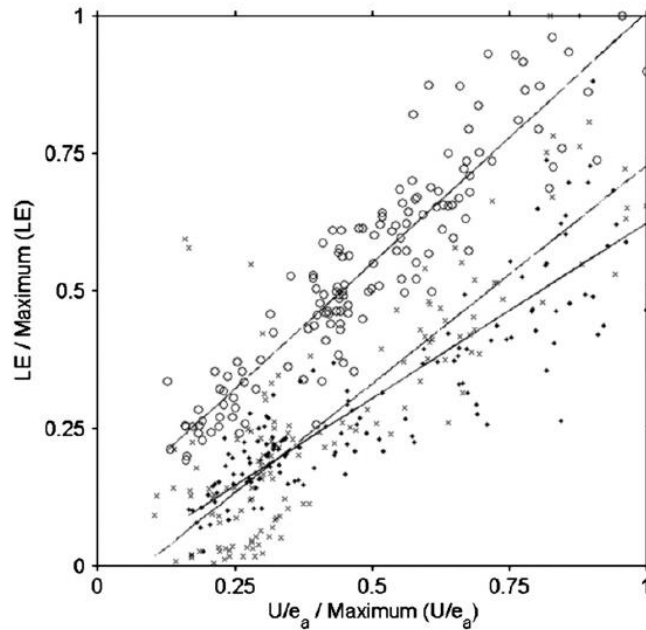
Következésképp fontos tisztában lennünk, a tavak energiaháztartását befolyásoló tényezők pontos fizikai leírásával. Napjainkban a turbulens hő- és impulzusáramokat leíró elméletek közül a Monin-Obukhov hasonlósági elmélet (Monin-Obukhov Similarity Theory – MOST) a legelterjedtebb, jóllehet csak számos alapfeltevés mellett érvényes (Monin és Obukhov 1954). A meteorológiai előrejelző modellek is általában ezt az elméletet követve határozzák meg a közvetlen felszín feletti légkör állapotát, illetve számolják a határfelületeken (levegő-talaj, levegő-víz) végbemenő impulzus-, hő- és más anyagcseréket. Erre az elméletre alapszik az örvény-kovariancia (eddy covariance – EC) mérési eljárás is, ami jelenleg az egyik legelfogadottabb fluxusmérési módszer (Foken, 2008). Az örvény-kovariancia mérés során nagy időbeli felbontással (legalább 10 Hz-es frekvenciával) szinkronizáltan mérjük az egyes állapotváltozókat (szél, léghő, légnedvesség vagy pl. CO₂), amelyek alapján levezethetők a különböző fluxusok (Lükő, 2020). Ezt követően további rutin meteorológiai mérések segítségével a MOST egyes paraméterei, mint például az érdességmagasságok is meghatározhatók.

A gyakorlatban rendszeresen egyszerűsítik le a cserefolyamatok számítását egyszerűbb összefüggésekre, amelyek nem igénylik egyenletrendszer megoldását és iterációt. Emiatt kiterjedten használják az átviteli együtthatók módszerét a határfelületeken zajló fluxusok számítására mind meteorológiai, mind oceanográfiai és tavi modellek esetében. A módszer lényege, hogy standard meteorológiai változók és egy átviteli együttható függvényében explicit módon számítjuk az adott fluxust. Például a párolgási (látens) hőáram esetében a szélesebesség, a függőleges értelmű vízgőzsűrűség-gradiens, valamint egy átviteli együttható szorzataként (illetve további légköri konstansok függvényében). Ezeket az átviteli együtthatókat jellemzően konstansnak vagy a szélesebesség függvényében változónak tekintik. A szenzibilis és látens hőáramok átviteli együtthatóinak jellemző értékeiről az 1. táblázat nyújt áttekintést. A táblázatban feltüntetett tanulmányok – Lükő et al. kivétel – konstansként kezelik ezeket.

1. táblázat: A turbulens hőáramokhoz tartozó átviteli együtthatók különböző tavakra (Lükő et al. 2022b alapján).

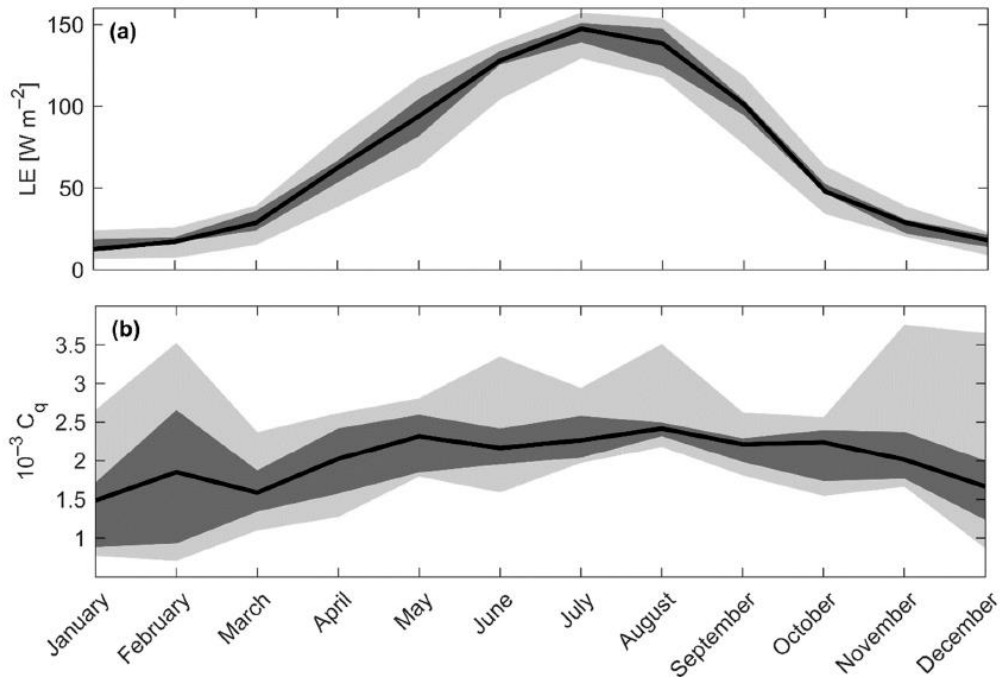
Tó	$10^{-3} C_{H10N}$ [-]	$10^{-3} C_{q10N}$ [-]	C_q/C_H [-]	Mélység [m]	Terület [km ²]	Referencia
Nagy Rabszolga-tó (Kanada)	0.40	2.00	5.0	41	27000	Blanken et al., 2003
Ross Barnett-tározó (USA)	1.10	1.20	1.1	3.7	135	Liu et al., 2009
Nam Co nagy tó (Tibeti fennsík, Kína)	1.30	1.40	1.1	33	2000	Wang et al., 2019
Nam Co kis tó (Tibeti fennsík, Kína)	1.40	1.50	1.1	14	1.4	Wang et al., 2019
Valkea-Kotinen-tó (Finnország)	1.00	1.00	1.0	2.5	0.4	Nordbo et al., 2011
Ngoring-tó (Tibeti fennsík, Kína)	1.49	1.36	0.9	17	610	Li et al., 2016
Taihu-tó (Kína)	1.40	1.00	0.7	1.9	2400	Xiao et al., 2013
Balaton (Magyarország)	1.80	1.20	0.7	3.2	600	Lükő et al., 2022b

Blanken és társai (2011) az észak-amerikai nagy tavak egyikének (Felső-tó) párolgását vizsgálva kimutatták, hogy a látens hőáramok összefüggése a vízszintes szélsébségnek és a vízgőznyomásnak a hányadosával bár jól korrelál, de a felállítható kapcsolat időszakok között változik. Három mért egyedi időszaknak (2009. október, 2009. december, 2010. augusztus) az értékeit mutatták be egy normalizált ábrán. (1. ábra). Jól láthatóan az egész pontfelhőre vonatkozóan nem lehetne kellően pontos lineáris kapcsolatot találni, de az egyes időszakokra a látens hőáram (LE) és U/e_a értékek pontpárjai egy-egy jellemző egyenes körül helyezkednek el. Tehát a kapcsolat az átviteli együttható és a hidrometeorológiai változók között időszaktól függően változhat.



1. ábra: A látens hőáram (LE) illetve a vízszintes szélesség (U) és vízgőznyomás (e_a) hányadosának normalizált pontpárjai a három különböző időszakban. 2009 október 9-12: teli körök, folytonos vonal; 2009 december 14-17: üres körök, szaggatott vonal; 2010 augusztus 24-27: x-ek, pontozott vonal. (Forrás: Blanken et al., 2011).

A Balaton esetében öt hónapra (május-szeptember) kiterjedő örvény-kovariancia mérések szintén azt mutatták, hogy a párolgáshő átviteli együtthatója számottevő változékonyságot mutat időben (Lükő et al., 2022b). Ez a szenzibilis hőáram esetében nem volt elmondható. Egy másik tanulmányban e változékonyságnak a szezonális jellegét és meghajtó folyamatait vizsgálták (Lükő et al. 2022a). A 2. ábrán az éven belüli változását láthatjuk a látens hőáramnak (a) és a párolgás átviteli együtthatójának (b). Mindkét idősor értékeit hosszútávú havi felbontású vízmérlegadatok és hidrometeorológiai mérések alapján számították vissza. Feketével a medián értékeket, sötét szürkével, az 50 %-os, világosszürkével a 10 %-os percentilisek vannak ábrázolva. Jól láthatóan a párolgáshő (LE) értékekhez hasonló jellegű görbét ír le az átviteli együttható (C_q) is, ami a nyár közepén tetőzik. Végeredményben a vízmérleg alapú számítások megerősítették az örvény-kovariancia mérések által mutatott szezonális változékonyságot.



2. ábra: Látens hőáram (a) és átviteli együtthatójának (b) éven belüli változékonysága havi bontásban a Balatonra. Az ábrán látható eredmények hosszútávú vízmérleg adatokon alapulnak. (Forrás: Lükő et al. 2022a).

Jóllehet indirekt módon (vízmérleg alapján) sikerült a Balatonra kimutatni az éven belüli ciklikusságot, azonban közvetlen mérés csak öt hónapra terjed ki, amivel ezt érdemben alá tudjuk támasztani. Irodalomkutatás alapján úgy találtuk, hogy másik tanulmányok nem foglalkoztak a levegő-víz határfelületen keresztüli párolgási hőáram átviteli együtthatójának szezonális változásával ez idáig. Továbbá az is kérdéses, hogy ha ez a szezonális változás valóban fennáll, akkor ez egy a Balatonra (nagy felület, kis mélység, elnyúlt alak) jellemző sajátosság vagy más tavakra is jellemző lehet?

Kutatásom hipotézise, hogy a párolgási átviteli együtthatót jellemezheti éven belüli változékonyság. E közvetlen EC mérések alapján igyekszem igazolni. Ehhez olyan további tavakat keresek, amelyeken több éven vagy hónapon keresztül EC méréseket folytattak. Az EC mérések alapján levezetem a párolgási átviteli együtthatókat és vizsgálom annak változékonyságát éven és évszakon belül havi felbontással. A kapott eredményeket összevetem egymással és a korábbi Balatoni mérésekkel. További statisztikai módszerekkel vizsgálom, hogy a szezonális szempontjából melyek a legfontosabb hidrometeorológiai vagy egyéb befolyásoló együtthatók, mint például az adott tó földrajzi, éghajlati vagy morfológiai jellemzői.

2. Módszertan

Elméleti háttér

Turbulens áramlás esetében egy állapotváltozó (x) felbontható az alábbi módon:

$$x = \bar{x} + x' \quad (1)$$

Ahol $\bar{x}$ a változó átlagértékét, x' pedig a turbulens fluktuációt, vagyis az átlagértéktől való pillanatnyi eltérést jelenti. Az állapotváltozó alatt érthetjük akár a szélsébség egy iránykomponensét, de skalár változókat is, mint például a léghőmérséklet, vízgőz-, CO₂-, NH₃-koncentráció stb. Vizsgálataim során az előbbi háromra volt szükség.

Bizonyított, hogy a felszínközeli rétegben a függőleges gradiense az egyes turbulens áramoknak (impulzus, hő, vízgőz stb.) zérus bizonyos feltételek fennállása esetén. Ilyen feltételek például, hogy a függőleges szélsébség átlagértéke zérus, a turbulencia kifejlődött és stacionárius, a felszín homogén stb. Ekkor a felszín közelében a fluxusokat és ezáltal a szélsébség, illetve a különböző állapotváltozók függőleges profiljait az ún. Monin-Obukhov hasonlósági elmélet írja le. Az elméletet és a hozzá tartozó feltételeket részletesen ismerteti például Arya (2001). Ilyen esetben a turbulens fluxusok számíthatók a vizsgált állapotváltozó és a függőleges sebesség fluktuációinak kovarianciájaként. Így tehát az $\overline{u'w'}$ az impulzus-, a $\overline{T'w'}$ a szenzibilis hő-, a $\overline{q'w'}$ pedig a vízgőz fluxusát adja meg. Tehát a felszíni rétegben e kovarianciák gradiense megközelítőleg zérus és függőleges irányban állandónak tekinthetjük:

$$\frac{\partial \overline{u'w'}}{\partial z} \approx 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial \overline{T'w'}}{\partial z} \approx 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial \overline{q'w'}}{\partial z} \approx 0 \quad (4)$$

Ahol u a vízszintes, w pedig a függőleges szélsébség komponens, T a hőmérséklet, q pedig a levegő pontos vízgőztartalmát jelenti. A kovarianciáját a függőleges irányú szélsébségnek (w) és a vízszintes irányú szélsébségnek (u), vagy bármelyik másik skalárnak (T , q) az alábbi módon számíthatjuk (Lükő 2020):

$$\begin{aligned} \overline{w'x'} &= \frac{1}{N-1} \sum_{k=0}^{N-1} [(w_k - \overline{w_k})(x_k - \overline{x_k})] = \\ &= \frac{1}{N-1} \left[\sum_{k=0}^{N-1} w_k x_k - \frac{1}{N} \left(\sum_{k=0}^{N-1} w_k \sum_{k=0}^{N-1} x_k \right) \right] \end{aligned} \quad (5)$$

Összefoglalva, ez tehát azt jelenti, hogy a teljes fluxus megegyezik a kovariancia értékével.

A gyakorlatban az örvény-kovariancia mérési technikáknál hasznosítjuk ezeket az egyenleteket és feltevéseket. Így a turbulens fluxusokat közvetlenül tudjuk számítani, amennyiben az adott állapotváltozókat nagy időbeli felbontással – nagy frekvencián, legalább 10 Hz-en – tudjuk mérni. A mért idősorokból az áramokat az alábbi alapösszefüggésekkel tudjuk számítani:

$$u_*^2 = -\overline{u'w'} \quad (6)$$

$$\frac{H}{\rho_a \cdot c_H} = \overline{T'w'} \quad (7)$$

$$\frac{LE}{\rho_a \cdot \lambda} = \overline{q'w'} \quad (8)$$

Ahol, u^* a szél-csúsztatósebesség, H a szenzibilis és LE a látens hőfluxus, ρ_a pedig a száraz levegő sűrűsége, c_H az állandó nyomáson vett fajlagos hőkapacitás és λ a látens párolgási hő értéke.

Az egyes áramok számítására a gyakorlatban elterjedt módszer az átviteli együtthatók alkalmazására alapszik, mivel nagy frekvenciás mérések ritkán érhetőek el. Ezek módszerek az együtthatók mellett rutin hidrometeorológiai állapotváltozók függvényében becsülik meg a fluxusokat. Az impulzusáramot paraméterezhetjük az aerodinamikai ellenállási együtthatóval (C_D). Ehhez hasonlóan a szenzibilis és látens hőáramot pedig átviteli együtthatókkal (C_H és C_q), melyeket Stanton- és Danton-számnak is neveznek. A paraméteres egyenletek az alábbiak szerint alakulnak:

$$u_*^2 = C_D \cdot U_z^2 \quad (9)$$

$$H = \rho_a \cdot c_{pH} \cdot C_H \cdot U_z \cdot (T_z - T_0) \quad (10)$$

$$LE = \rho_a \cdot \lambda \cdot C_q \cdot U_z \cdot (q_z - q_0) \quad (11)$$

Ahol U_z az átlag szélesebesség, T_0 a felszín hőmérséklete, q_0 a vízgőz koncentráció vagy sűrűség felszínen, míg z alsó index a mérési magasságban észlelhető értéket jelenti.

Követve a Monin-Obukhov hasonlósági elméletet (Monin és Obukhov 1954), az aerodinamikai ellenállási együttható és az egyes átviteli együtthatók az alábbiak szerint számíthatók:

$$C_{Dz} = \left(\frac{\kappa}{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right) - \psi_m\left(\frac{z}{L}\right)} \right)^2 \quad (12)$$

$$C_{Hz} = \left(\frac{\kappa}{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right) - \psi_m\left(\frac{z}{L}\right)} \right) \left(\frac{\kappa}{\ln\left(\frac{z}{z_{0H}}\right) - \psi_H\left(\frac{z}{L}\right)} \right) \quad (13)$$

$$C_{qz} = \left(\frac{\kappa}{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right) - \psi_m\left(\frac{z}{L}\right)} \right) \left(\frac{\kappa}{\ln\left(\frac{z}{z_{0q}}\right) - \psi_q\left(\frac{z}{L}\right)} \right) \quad (14)$$

Ahol, κ a Kármán konstans, z_0 az érdességi magasság, z_{0H} a hőmérsékletéhez, z_{0q} pedig a vízgőzsűrűséghez tartozó érdességi magasságok. ψ_m , ψ_H , és ψ_q stabilitási függvények a különböző légköri stabilitási (stabil, semleges, instabil) állapotok esetén. És L az úgy nevezett Obukhov hossz:

$$L = \frac{u_*^2 T}{\kappa g (T_* + 0.61 T q_*)} \quad (15)$$

Ahol T^* a hőmérsékleti skála, q^* a vízgőzre vonatkozó skála, míg g a gravitációs gyorsulás.

Az átviteli együtthatók meghatározásakor tehát, először a nagy frekvenciás mérésekből számítjuk a kovarianciákat (5. egyenlet), amelyekből meghatározzuk a fluxusokat (6-8 egyenletek). Ezután a MOST profilokra vonatkozó egyenleteiben (Foken, 2008, 2.61-2.63 egyenletek) ismeretlenként az érdeességi magasságok maradnak a stabilitás függvények kiválasztása után, mivel $T_* = \overline{T'w'}/u_*$ és $q_* = \overline{q'w'}/u_*$. Az érdeességi magasságok ismeretében pedig már az átviteli együtthatók is számíthatók a 12-14. egyenletekkel.

Adatok minőségbiztosítása

A kapott C_q idősorokat ezt követően ellenőrzöm és szűröm, amely során eltávolítom a kiugró értékeket, szűröm szélirány szerint, amikor a mérés lábnyoma nem a tófelszint éri, illetve leválogatom azon időszakokat, amelyek nem tekinthetők jégmentesnek. Az esetleges mérési hibákból származó jelentős (az átlaghoz képesti tízszeres) kiugrásokat elhagytam a végleges C_q idősoraimból. Fontos volt szélirány szerint is szűrni az értékeket, hiszen a tó párolgási viszonyainak meghatározásához a tó feletti légkört reprezentáló adatokra van szükség. A különböző örvény-kovariancia mérései adatbázisokban a kovarianciákból számított fluxusok érhetők el. Esetünkben csak olyan fluxus idősorokkal dolgoztunk, amelyeken a szükséges alapvető korrekciós számításokat elvégezték (Foken, 2008):

- irányforgatás,
- Webb-korrekció,
- Moore-korrekció,
- Schotanus-korrekció.

Mindegyik EC idősor 30 perces felbontással rendelkezett, amelyekből havi értékeket és statisztikai jellemzőket (medián, különböző percentilisek) vezettem le. Az összes számítást a *MathWorks* fejlesztőcég által létrehozott *MATLAB* matematikai szoftver segítségével végeztem, annak beépített funkcióit kihasználva.

Az C_q szezonális könnyebb értelmezhetőségének érdekében Pearson-féle lineáris korreláció vizsgálatot végeztem néhány hidrometeorológiai változóval:

$$R_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (16)$$

Ahol x a C_q együttható havi mediánjai, y pedig a kiválasztott hidrometeorológiai változók: szélsébség (U), víz- és léghőmérséklet (T_w és T_a), ezek különbsége (ΔT), specifikus páratartalom különbség (Δq), szélsébség-hőmérséklet különbség szorzat ($U \cdot \Delta q$), szélsébség-specifikus páratartalom különbség szorzat ($U \cdot \Delta q$) és a beérkező rövidhullámú napsugárzás nagysága (SW). Az áttekinthetőség érdekében a dolgozatban a korrelációs együttható négyzetét (R^2) adtam meg, ezzel eltüntetve a negatív értékeket.

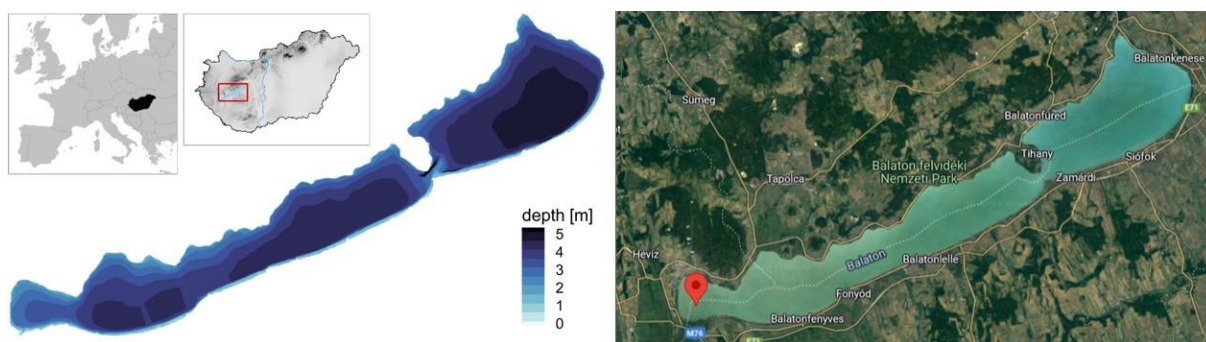
3. Vizsgált tavak

A C_q átviteli együttható éven belüli alakulását négy tóra vizsgáltam meg. Ezek közül az első Balaton volt, amely esetben a méréseket témavezetőim végezték. A másik három tó esetében a nemzetközi kutatói *Fluxnet* és *Ameriflux* adatbázisból tudtam letölteni az adatokat.

A fejezet végén lévő összefoglaló táblázatban (2. táblázat) feltüntettem a négy tóra vonatkozó fontosabb adatokat. Ezek az információk a tavak földrajzi elhelyezkedésére (szélesség, hosszúság, tengerszint feletti magasság), szabad vízfelületére, jellemző vízmélységeire, jellemző meghajtási hosszaira (D), a mérési magasságokra (z), jellemző szélsőségekre, illetve az adott tóhoz kapcsolódó publikációkra vonatkoznak.

3.1. Balaton

A Balaton a Dunántúlon helyezkedik el, tengerszint feletti 105 méteres magasságban. Klímájára egyaránt hatással van a csapadékosabb óceáni; szélsőséges hőmérsékletű, kevés csapadéku kontinentális; illetve a nyáron száraz télen csapadékos mediterrán éghajlat is. Ugyan hazánk legnagyobb taváról van szó, de vízfelszínéhez képest átlagos mélysége kicsiny, ezért sekélynek mondhatjuk. Észak-déli kiterjedése sehol sem haladja meg a 16 km-t így nagy meghajtási hosszal sem rendelkezik, ami átlagosan 6-8 km az uralkodó É-ÉNy-i szélirány esetében. A Keszthelyi-medence nyílt vízében volt a mérőállomás, ami a mérési adatokat szolgáltatta, így a szárazföldi hatások kevésbé befolyásolták a mért légköri viszonyokat. A mérés lábnyoma minden szélsőesség és irány esetében a vízfelület felett volt, így a mért adatokat ez esetben nem kellett szélirány szerint szűrni. Az örvény-kovariancia műszer 6,1 méteres mérési magasságban a vízfelszínhez képest. A szélsőesség adatokat egy CSAT3 típusú anemometer, míg a vízgőz koncentrációt egy EC150 típusú mérőeszköz szolgáltatta. A vízfelszín hőmérsékletét hosszúhullámú sugárzásmérő (Kipp & Zonen CNR1) idősorából számították a Stefan-Boltzmann törvény alapján (Lükő et al., 2022b). A mérés közel öt hónapot fed le 2019 májusa és októbere között.

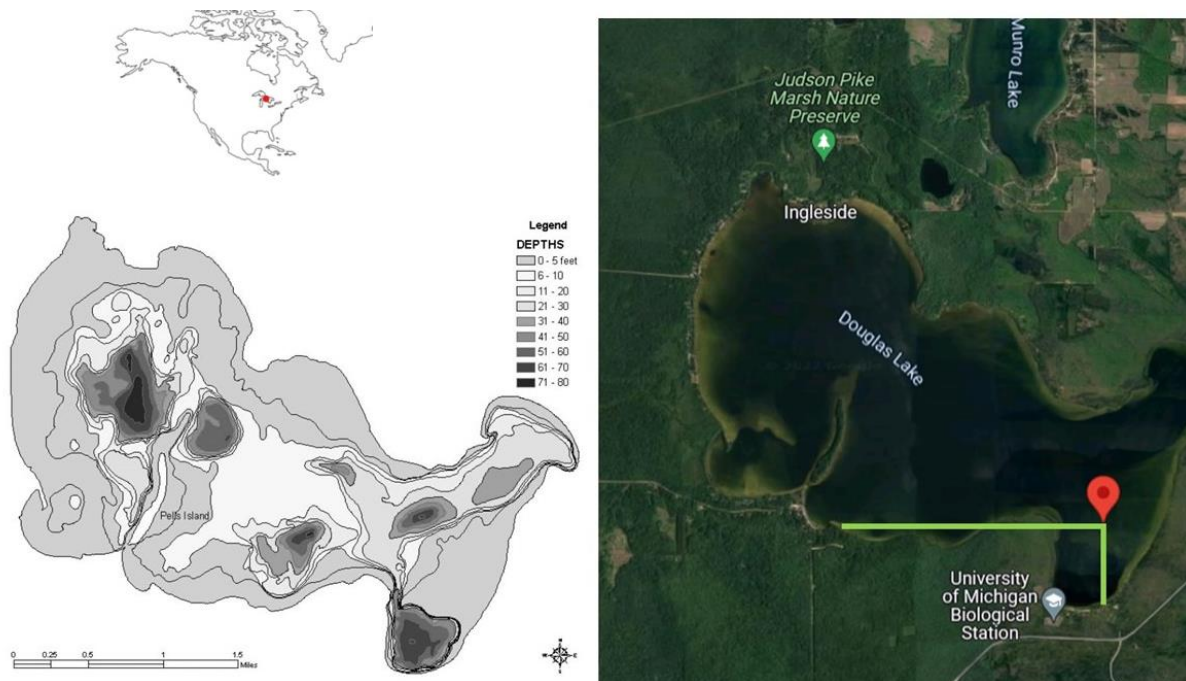


3. ábra: Mélységtérkép (balra) és ortofotó a Balatonról és környezetéről, bejelölve a mérés helyszínét (jobbra). (Forrása: <https://google.maps.com>)

3.2. Douglas-tó

Észak-Amerikában, az Amerikai Egyesült Államokban található Tennessee államban. A Douglas-tó egy mesterséges víztározó. Tengerszint felett 267 méteres magasságban terül el. A klímáját tekintve Magyarországhoz hasonlóan jól elkülöníthetően négy évszak van csapadékos szubtrópusi éghajlattal. A tó kiterjedése ($13,7 \text{ km}^2$) nem túl nagy a Balatonhoz képest, viszont kétszer olyan mély. Kis kiterjedése miatt logikus, hogy kisebb meghajtási

hosszal (átlagosan 1,6 km), de nagyságrendileg hasonló a két tó. A méréseket itt is a nyílt vízben végezték, viszont a szárazföld közelsége miatt a D-Ny-i síknegyedből érkező szélirányokat figyelmen kívül kellett hagyni a számítások során. A méréseket LI-7500 (LI-COR) gázanalizátorral és CSAT3 (Campbell) szónikus anemométerrel végezték 2,8 méteres magasságban; 2013 június-szeptember között, illetve 2014 május és októbere között.

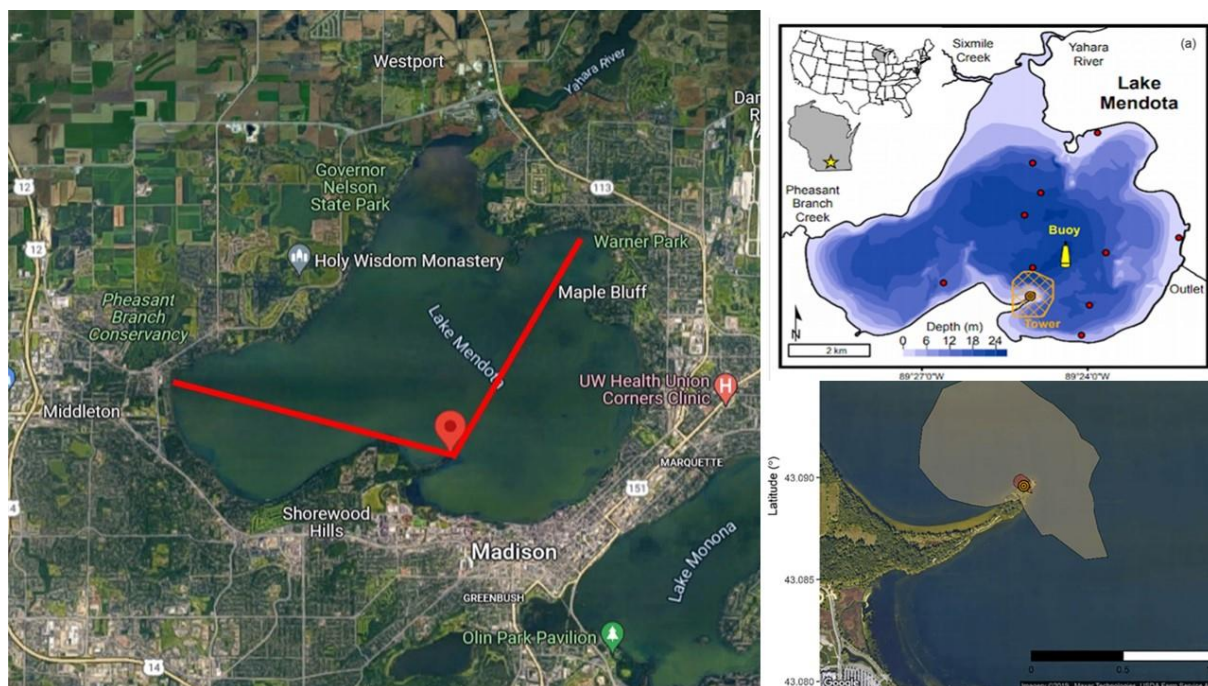


4. ábra: Mélységtérkép (balra) és ortofotó a Douglas-tóról és környezetéről (jobbra), bejelölve a mérés helyszínét, illetve az elfogadott szélirányokat ($<180^\circ$ szélirány $>270^\circ$).

(Források: <https://google.maps.com>,
<https://www.fishweb.com/maps/cheboygan/douglaslake/index.html>)

3.3. Mendota-tó

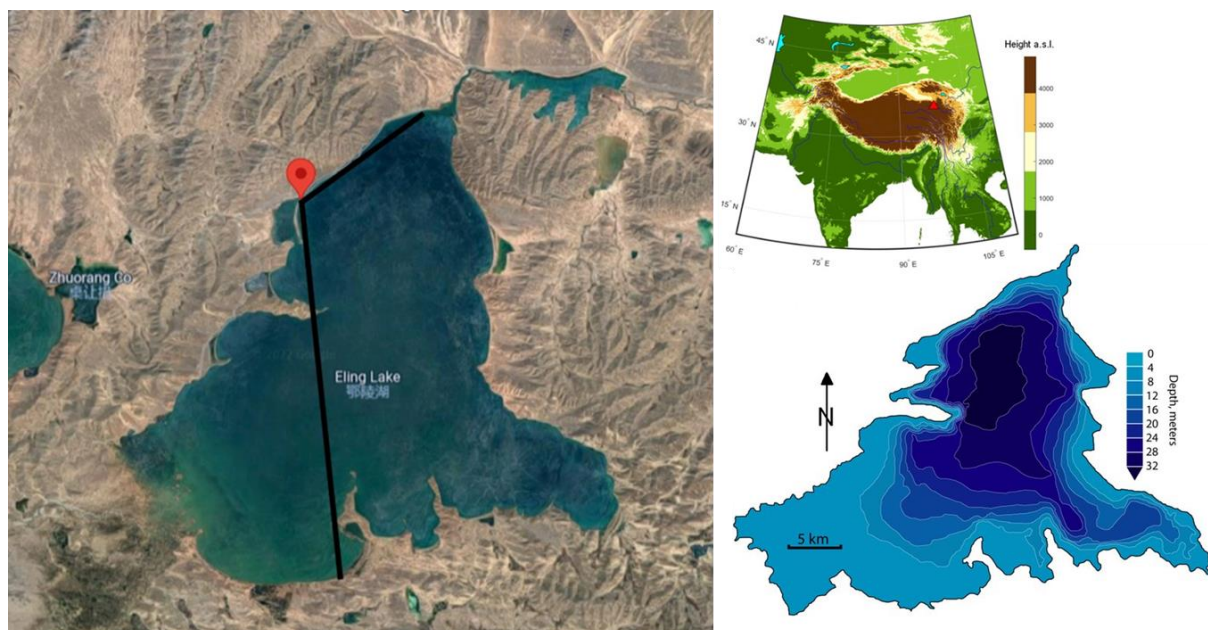
A Mendota-tó is az USA-ban található, Wisconsin államban, Madison városának északi részén fekszik. Tengerszint felett 259 méteres magasságban terül el. Nedves kontinentális az éghajlat, nedves, meleg nyárral, hideg, havas telekkel. Télen teljes felülete befagy. A mért időszakban a fagyott időszakokat kihagytam számításaimból, hiszen ilyen esetben nem levegő-víz határfelületi cserefolyamatokról van szó. Méretei igen hasonlatosak a Douglas Lake-hez, kicsit nagyobb kiterjedésű: $39,4 \text{ km}^2$, ennek megfelelően a meghajtási hossz is növekszik; de nagyobb mélységű. Mérési adatok csak 285° és 30° közötti szélirányok esetében állnak rendelkezésre, ugyan is egy félszigetről végezték a méréseket és nem a nyílt vízről. A Picnic Point névre hallgató félsziget benyúlik a déli part felől a tó geometriai középpontja felé. Az Campbell CSAT3 szónikus szélmérőt és LI-7500 típusú infravörös gázanalizátort 12,4 méteres magasságban helyezték el. Méréseket folyamatosan végeztek 2016 és 2021 között.



5. ábra: Ortofoto a Mendota-tóról és környezetéről (balra), bejelölve a mérés helyszínét, illetve az elfogadott szélirányokat ($<30^\circ$ szélirány $>285^\circ$), a tó mélységtérképe (jobbra fent), Picnic point mérés helyszín (jobbra lent). (Forrás: <https://google.maps.com>, Baldocchi et al. 2019)

3.4. Ngoring-tó

A tónak több neve is ismert: Ngoring, Eling Lake, Ngoreng Lake. Ázsiában, Kínában a Tibeti-fennsíkon helyezkedik el. Száraz kontinentális időjárású a régió, amit nagyban befolyásolnak a hegyvidéki hatások is, mivel a maga a tó is 4268 méterrel a tengerszint felett van (6. ábra). Vízfelülete az előző két tóhoz képest jelentősen nagyobb, a Balatonéhoz hasonló nagyságú ($610,7 \text{ km}^2$). Viszont közel sem olyan sekély, átlagos mélysége: 17,6 m. A mélységének köszönhetően a tó tartósan rétegzett a meleg évszakban, míg tartós jégtakaró alakul ki rajta télen. Átlagos meghajtsási hossza (6,6 km) a Balatonénál nagyobb, de maximuma pedig kisebb (29 km). A méréseket az északnyugati partról végezték CSAT3 anemométerrel és LI-7500 gázanalizátorral 3 méteres vízfelszín feletti magasságban. A korábbiakhoz hasonlóan csak a víz felől érkező adatokat vettem számításba, azaz 53° és 175° közötti szélirány-tartományban. Mért adatokat 2011 augusztusa és 2013 novembere között volt elérhető.



6. ábra: Ortofotó (balra) és mélységtérkép (jobbra) az Ngoring-tóról, jelölve a mérés helyszínét, illetve az elfogadott szélirányokat ($175^\circ > \text{szélirány} > 53^\circ$) (Forrás: Google Maps, Kirillin et al., 2021)

1. táblázat: A táblázatban a négy tó földrajzi elhelyezkedése, vízfelülete (A), átlagos és maximális mélysége (D), átl. és max. meghajtási hossza (F), mérési magasság (z), átl., max. szélsőbességek, illetve az adott tóval kapcsolatos publikációk.

Tó neve	Szélesség [°]	Hosszúság [°]	Tengerszint f. mag. [m]	A [km ²]	D _{ave} / D _{max} [m]	F _{ave} / F _{max} [km]	z [m]	U _{ave} / U _{max} [m/s]	Ref.
Balaton	46.7309	17.2774	105	596	3.3 / 12.2	5.2 / 48	6.1	3.9 / 12.6	(Lükő et al., 2022b)
Douglas-tó	45.5686	-84.6699	267	13.7	9.0 / 24.0	1.6 / 5.4	2.8	2.8 / 8.3	(Morin et al., 2018; Golub et al., 2021)
Mendota-tó	43.0896	-89.4158	259	39.4	12.8 / 25.3	4.6 / 6.2	12.4	2.9 / 32.8	(Baldocchi et al., 2020; Reed et al. 2018)
Ngoring-tó	35.0245	97.6497	4268	610.7	17.6 / 30.7	6.6 / 29	3	3.8 / 18.9	(Han, 2020; Han et al., 2020)

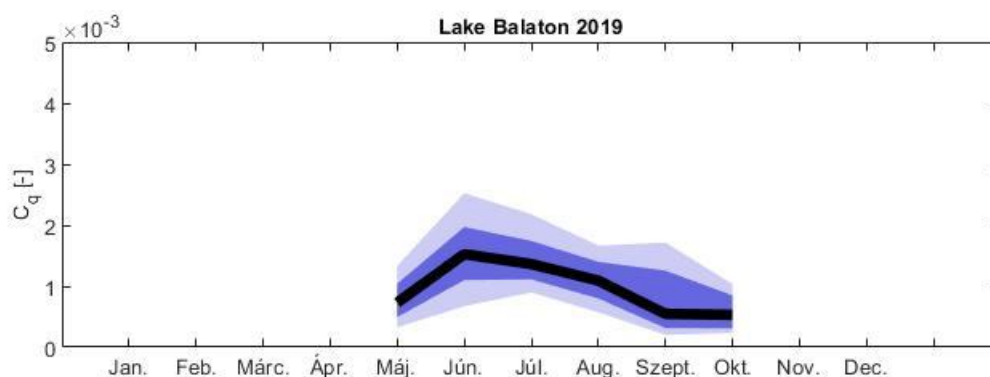
Mivel a kutatásban nem az átviteli együttható konkrét számértékeit szerettem volna összehasonlítani, hanem csak azok változását, ezért a mért adatokat nem számoltam át a standard 10 méteres magasságra vonatkoztatva. Ez azt jelenti, hogy a tavak közötti C_q érték eltérések nem mértékadóak.

4. Eredmények

Az alábbi fejezetben röviden ismertetem a levezetett párolgási átviteli együttható havi alakulását a négy vizsgált tó esetében. A könnyű követhetőség érdekében a 2. táblázat és a lenti ábrák színezési jelmagyarázata egyezik.

4.1. Balaton

A Balatonról csak öt hónap EC adat állt rendelkezésre, de a vízmérleg számítások (Lükő et al. 2022a) alapján a legnagyobb változékonyságot pont ezekben a nyári hónapokban mutat az átviteli együttható, mint ahogyan az 1. ábrán is látható. A cikkben (Lükő et al. 2022a) kapott eredményekhez képest valamivel kisebb értékeket kaptam a C_q -ra a vizsgált időszakban, de a görbe trendje igencsak hasonló. A legnagyobb szórás az értékek között a szélsőértékeknél van: júliusban és szeptemberben. A hatodik, októberi hónapra bemutatott értékek csak tájékoztató jellegűek, mert csak október 5-ével véget ért a mérési kampány. Tavaszi értékeink ugyan nincsenek, de jól láthatóan szeptember-október környékén ellaposodik a görbe, a fent bemutatott 1. ábrához hasonlóan. A medián maximum értékét az együttható a vizsgált időszakban júniusban veszi fel ($1,525 \cdot 10^{-3}$), minimumát pedig októberben $0,5309 \cdot 10^{-3}$. 2019 nyarán az átlagos medián érték 10^{-3} volt.

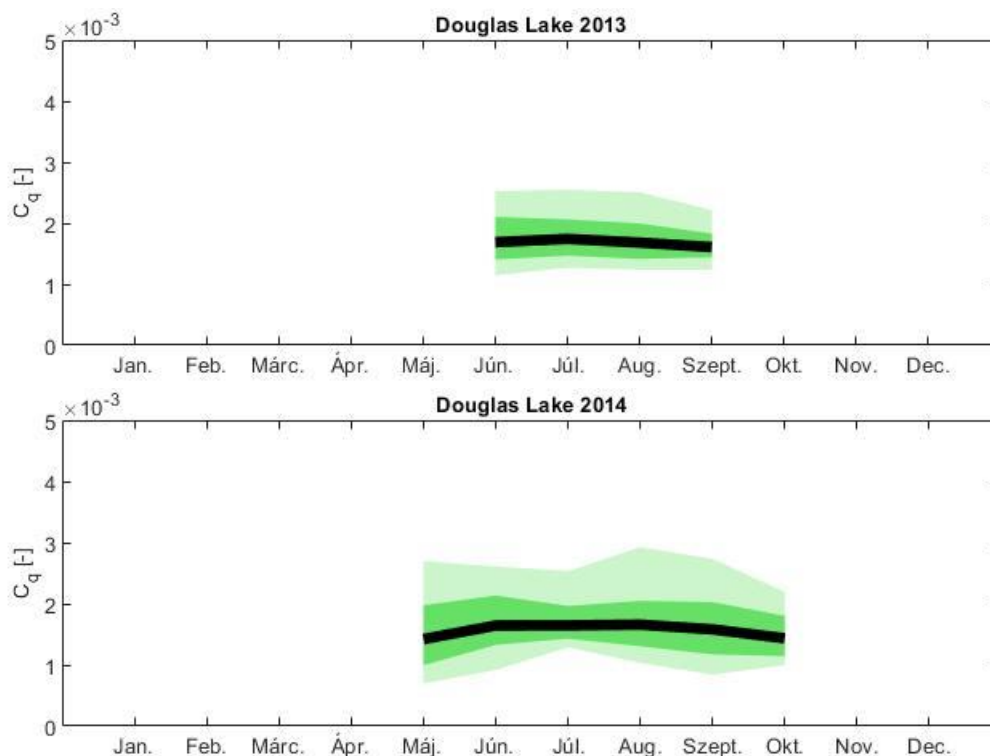


7. ábra: Az átviteli együttható (C_q) havi alakulása a Balatonon 2019 májusa és októbere között; fekete vonal: medián, sötétkék: 75%-os percentilis, világoskék: 90%-os percentilis

4.2 Douglas-tó

A Douglas-tó adatbázisában már két különböző év nyári hónapjaiban készültek mérésekről álltak rendelkezésre EC idősorok. 2013 júniustól szeptemberig (4 hónap), illetve 2014 májustól októberig (6 hónap). 2013-ban (8. ábra) nagy változékonyságot nem mutat a fekete vonallal jelölt medián. A minimális és maximális C_q medián értékek $1,61 \cdot 10^{-3}$ -ra és $1,74 \cdot 10^{-3}$ -ra adódtak. Ez alapján egy elhanyagolható maximum jelentkezett júliusban.

Ezzel szemben 2014 nyarán a Douglas tóra (9. ábra) már egyrészt kettővel több hónapra vonatkozó adatunk van. Másrészt pedig valamivel nagyobb változékonyságot a C_q értékekben. Egyértelműen nem lehet meghatározni melyik hónapban tetőzik az átviteli együttható, de jól látszik, hogy a tavaszi és az őszi hónapok irányában csökken értéke. $1,66 \cdot 10^{-3}$ -ról $1,44 \cdot 10^{-3}$ -ra, ami közel 15 %-os csökkenést jelent.



8-9. ábra: Az átviteli együttható (C_q) havi alakulása a Douglas-tavon 2013-2014 között; fekete vonal: medián, sötétzöld: 75%-os percentilis, világoszöld: 90%-os percentilis

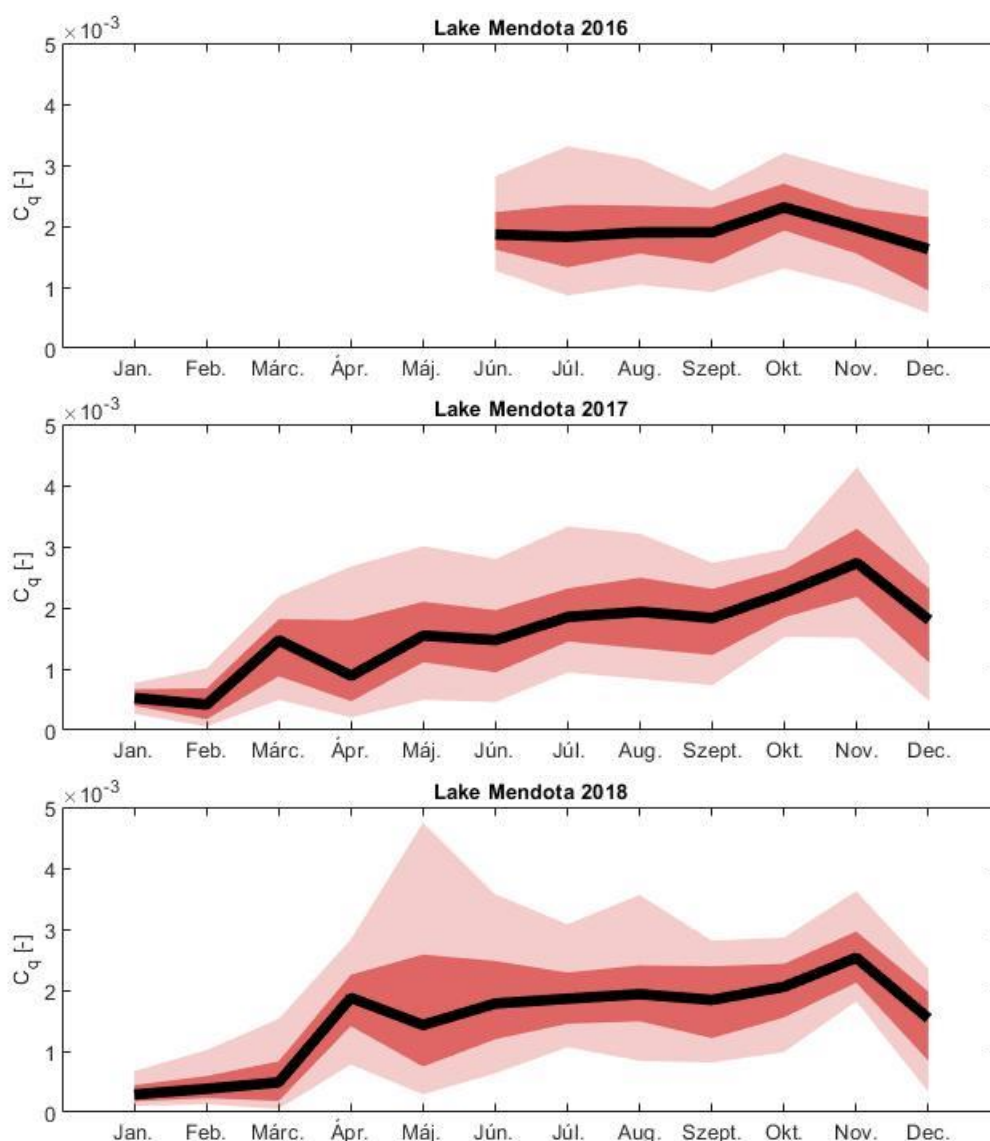
4.3. Mendota-tó

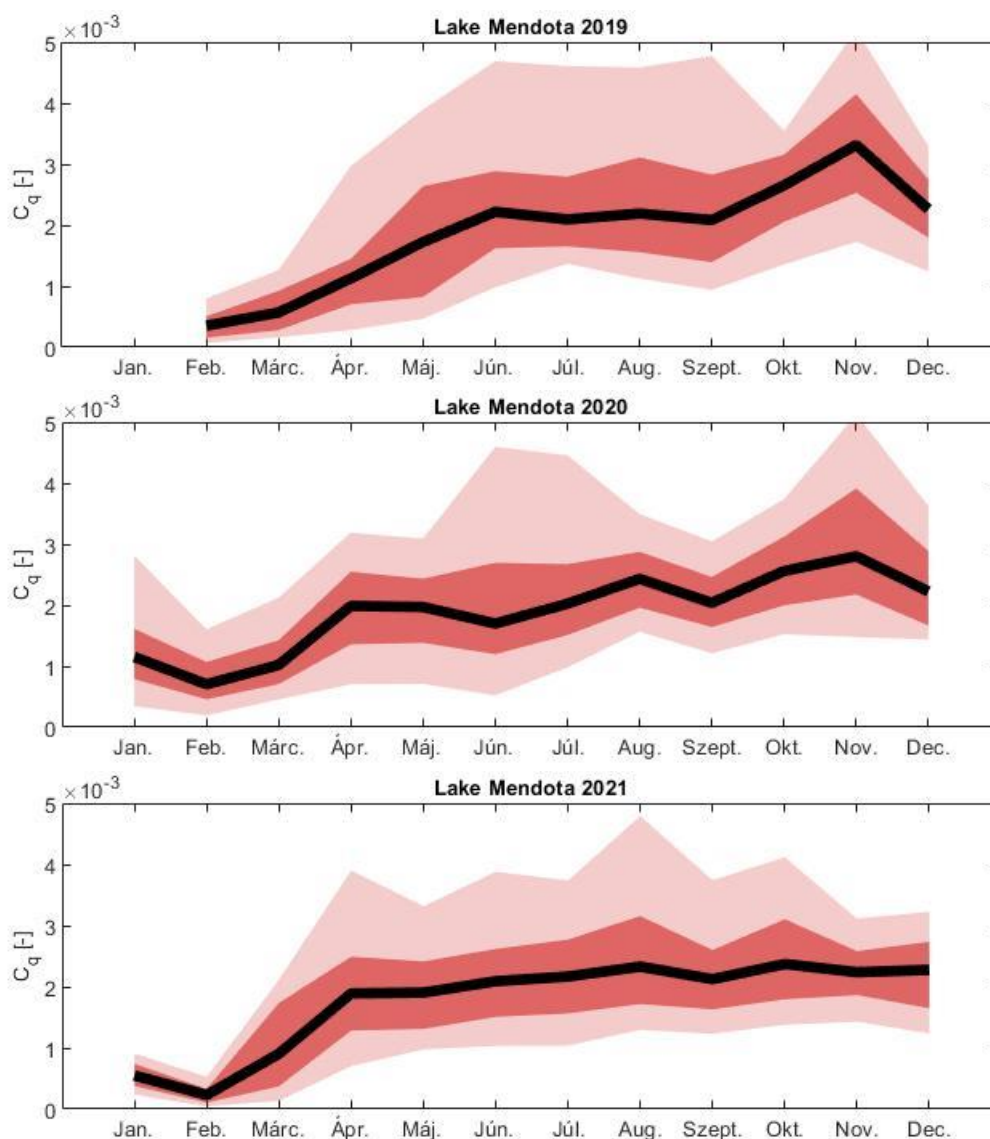
Szerencsére a Mendota-tóra nagyobb mennyiségű adat állt rendelkezésemre, több évre vonatkozólag (11. ábra), még őszi és téli hónapokra is. Az átviteli együtthatóknak számottevően nagyobb szórásuk van, mint a Balaton vagy a Douglas-tó esetében, főleg azon időszakokban, amikor magasabb a medián értéke is. A nyári hónapokhoz képest C_q értéke télen előbbi töredékére csökken vissza. Azonban szem előtt kell tartani, hogy a tó télen tartósan befagyhat, így azokat az időszakokat egyértelműen ki kell zárni a további vizsgálatokból. Míg nyáron a felszínhőmérséklet és a léghőmérséklet nagyon változékony, addig fagyott időszakban a felszínhőmérséklet lassabban változik, mint a léghőmérséklet. Ez vezethet ahhoz, hogy nagyobb a szórás nyári hónapokban, mint a téliekben. A jégborítottság miatt végeredményben tehát az áprilistól novemberig tartó időszak vehető figyelembe a szezonális vizsgálata során.

2017-ben láthatjuk az első teljes évre vonatkozó átviteli együtthatók változását, ha el is tekintünk a befagyott időszakoktól. A téltől a nyár felé haladva folyamatosan növekszik a C_q értéke, egy áprilisi visszaesést figyelmen kívül hagyva. A görbe egyértelműen novemberben tetőzik, majd csökkenni kezd, ahogy közeledünk az év végéhez. A Balatonnal ellentétben a havi felbontású C_q értékek maximuma a hat évből négyszer novemberre, kétszer pedig októberre esik. Az évszakos alakulás tekintetében az mondható el, hogy kora tavasszal és tavasz közepén erősebb emelkedést mutat, amely növekedés a nyári hónapokban megmarad ugyan, de jelentősen kisebb meredekséggel. A medián értékek globális maximuma $3,29 \cdot 10^{-3}$, amit 2019 novemberében vett fel. Legkisebb értékét a nyári hónapokra pedig $(0,89 \cdot 10^{-3})$ két és fél évvel korábban 2017 áprilisában veszi fel az átviteli együttható havi mediánjainak időszora. A téli hónapokat is figyelembe véve az átlagos érték $1,70 \cdot 10^{-3}$, de ha az adatokat csak április és november közt vesszük figyelembe, akkor $2,0 \cdot 10^{-3}$ az átlag. A négy tó közül itt a legnagyobb

az amplitúdó a minimum és a maximum értékek között. Összeségében tehát felfedezhető a Mendota-tó esetében is egy éven belüli ciklus, csak közel sem olyan szimmetrikus, mint a Balaton esetében. Ennek oka a tó morfológiai jellemzőivel magyarázható.

A Mendota-tó dimiktikus, kétszer keveredik át évente (Magee et al. 2019). Ebből az első a jégolvadás után következik be és kisebb mértékű, míg a második ősz közepén (októberben vagy novemberben). Ez utóbbi esetben a lehülő vízfelszín sűrűségének megnövekedése miatt alábukik és felszínre kerül a valamivel melegebb víz a mélyebb rétegekből, ugyanis a nyár alatt lassabban, de melegszik a mélyebb víztömeg is. Ez további energiafedezetet nyújthat a párolgás endoterm folyamatának még októberre és novemberre. Ezzel magyarázható tehát, hogy ennél a tónál eltolódik őszre a maximuma az átviteli együtthatónak.

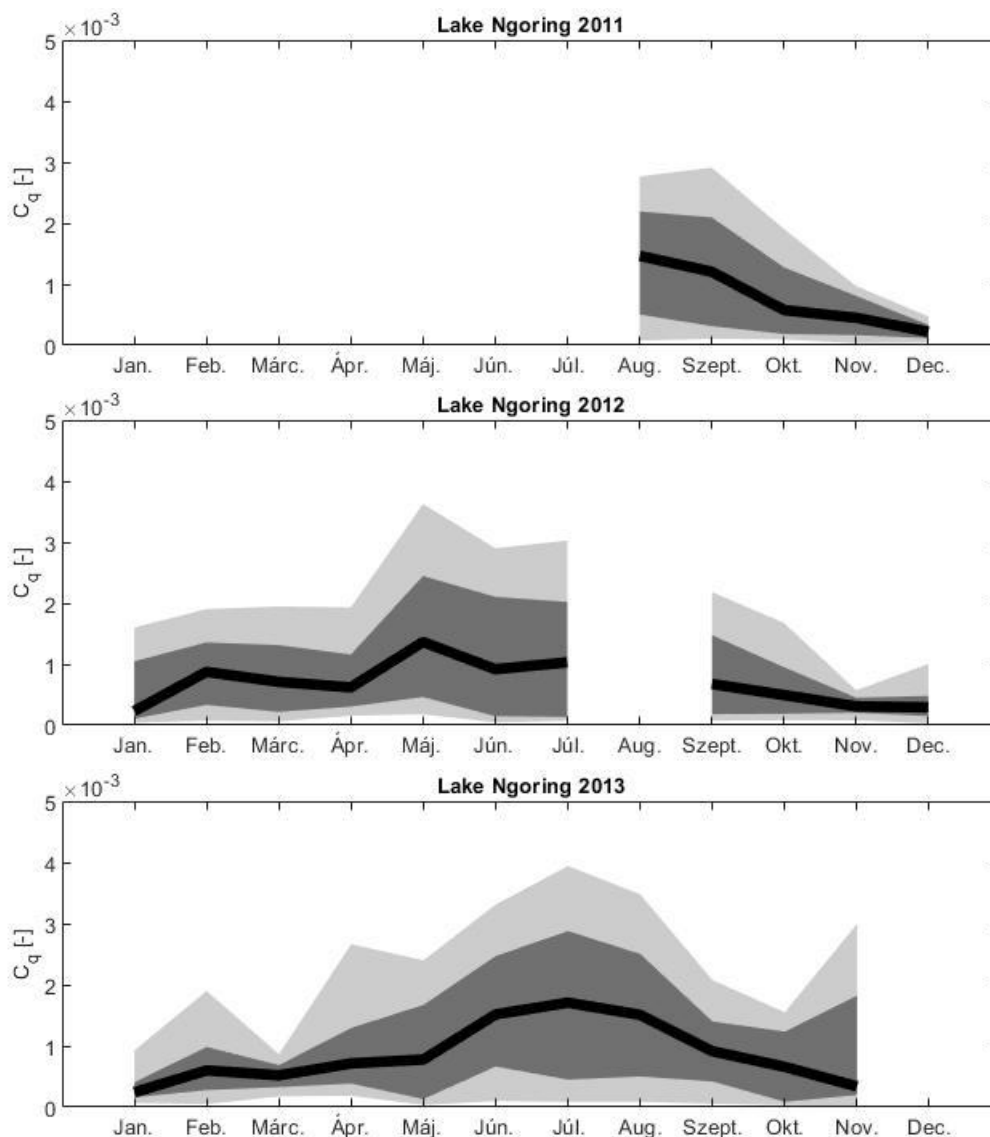




10-15. ábra: Az átviteli együttható (C_q) havi alakulása a Mendota-tavon 2016 és 2021 között; fekete vonal: medián, sötétpiros: 75%-os percentilis, világospiros: 90%-os percentilis

4.4. Ngoring-tó

Ennél a Tibeti-fennsíkon elhelyezkedő tónál is rendelkezésünkre áll teljes éves viszonylatra idősor. A mérési kampány 2011. augusztus és 2013. november közötti időszakban volt. Ennél a tónál is felfedezhető egy éves ciklikusság, de a Mendota-tóhoz hasonlóan itt is el kell vetnünk a jeges hónapokat (november-március). Legjobban a 2013-as éven mutatkozik ez meg, amikor maximális C_q medián értéket ($1,71 \cdot 10^{-3}$) augusztusra kaptuk. Áprilisra és októberre ez $0,71 \cdot 10^{-3}$ és $0,66 \cdot 10^{-3}$ -re csökkent le. Hasonlóan erős periodicitást 2012 nem mutat, bár ekkor augusztusról nincs információnk. 2011 szintén töredék év, de az hasonló képet mutat 2013-mal és augusztustól egyenletesen csökken C_q értéke.



16-18. ábra: Az átviteli együttható (C_q) havi alakulása az Ngoring-tavon 2011 és 2013 között; fekete vonal: medián, sötétszürke: 75%-os percentilis, világosszürke: 90%-os percentilis

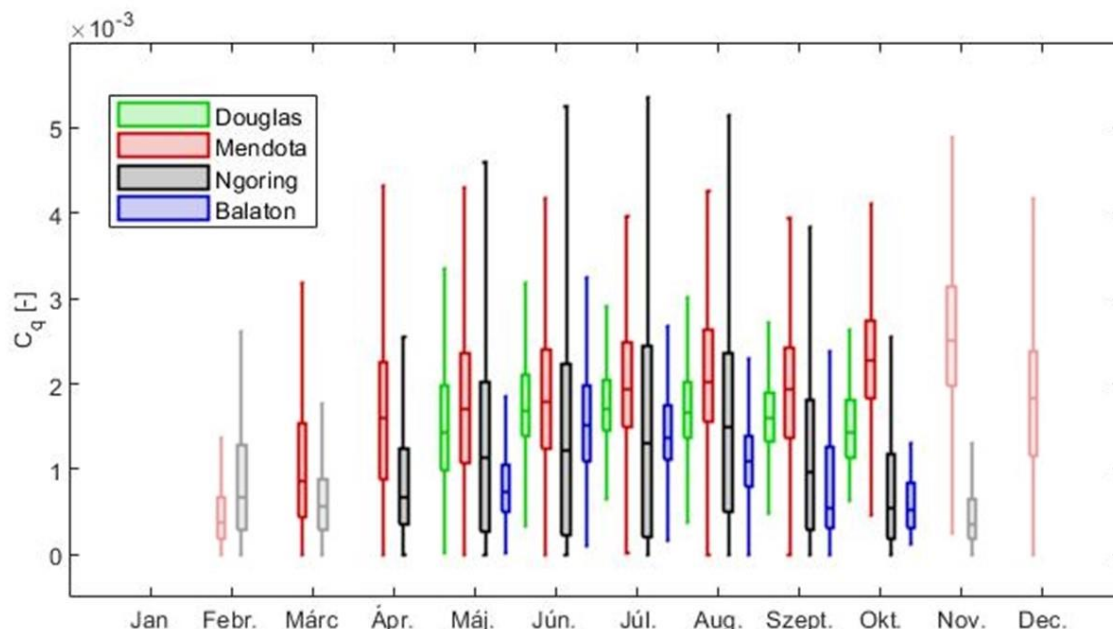
4.5. Összehasonlítás

Az alább látható 19. ábrán összegeztem tavanként és hónaponként a számított átviteli együtthatókat. Itt már kiszűrve azokat az időszakokat, amikor a vízhőmérsékletek alapján feltételezhető, hogy előfordulhatott jégborítottság, jegesedés vagy még olvadás az adott tavakon. Ezeket a hónapokat elhalványítottam az ábrán.

Első ránézésre is megállapítható, hogy az Ngoring-tó értékeiben sokkal nagyobb a szórás, havi tekintetben, mint a másik három tónál. Ez azért is lehet, mivel a hegyvidéki változatos időjárás nem mindig évszaknak megfelelő, és akár nyáron is lehet rövidebb ideig télire jellemző hűvösebb időszak. Egyrészt a Himalája felől érkező hideg szelek hatására, másfelől pedig a nagy tengerszint feletti magasságnak köszönhetően. Mindazonáltal, a viszonylag nagy szórás mellett a ciklikusság itt is megfigyelhető.

A két olyan tónál, ahol csak nyári hónapokra vonatkozó adatunk volt (Balaton, Douglas-tó) az összegzés nem mutat nagy eltérést a rájuk vonatkozó fentebb ábráktól érthető módon, hiszen mindegyik nyári hónapról egy vagy két évre vonatkozóan volt idősorunk. (7.-9. ábra)

A Mendotánál továbbra is megfigyelhetjük az átfordulások következtében létrejövő őszeleji csúcsot, illetve az áprilisi-májusi visszaeséseket. Ugyan utóbbi az összegzett ábrán már nem olyan jelentős, ugyanis vannak hónapok, ahol nem volt előjelváltás C_q meredekségében.



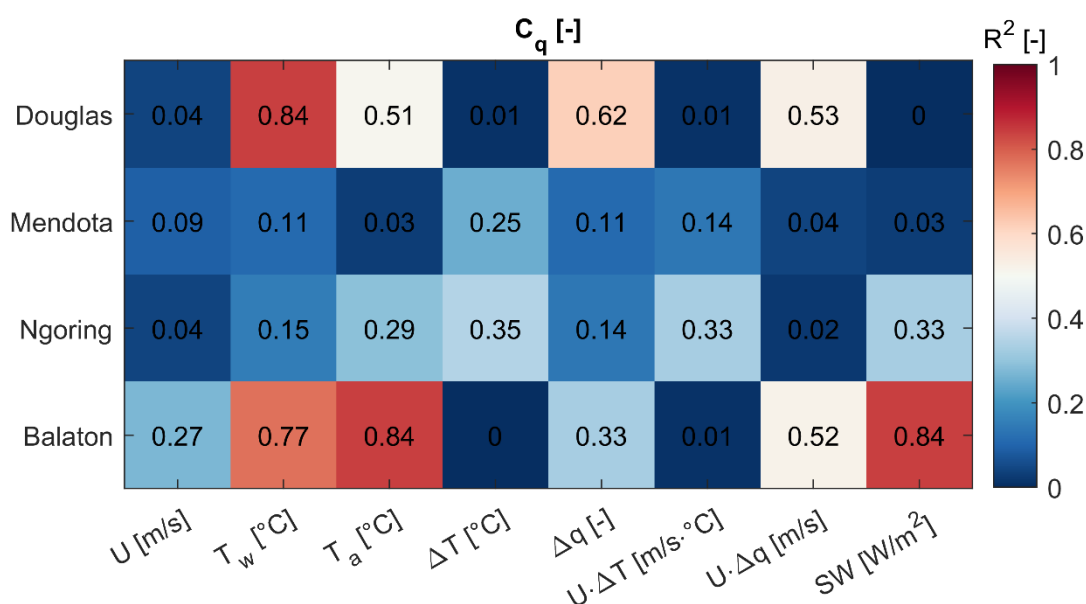
19. ábra: Az átviteli együttható (C_q) értékek változékonysága az egyes hónapokban a négy tóra. Az elhalványított hónapok a jégborított időszakokat jelölik. A dobozokban a 25-75 %-os percentiliseket és a medián értékek láthatók, a bajuszok a minimum és maximum értékeket ábrázolják. Elhalványítva azokat a hónapokat, mikor a tavak befagytak.

5. Diszkusszió

Az átviteli együttható éven belüli változékonysága és periodicitása egyértelműen észre vehető minden egyes tónál. Azonban az időbeli lefutás eltéréseket mutat, különösen a Mendota-tó esetében. Itt C_q értéke olvadástartól fagyásig alapvetően folyamatosan növekszik. Ez összhangban van a tó dimiktikus viselkedésével és a függőleges hőmérsékleti átfordulások időpontjaival. A Balaton és Ngoring tavak hasonló viselkedést mutatnak, miszerint C_q értéke nyáron éri el maximumát és melegedési és hűlési periódusok során C_q értéke közel szimmetrikusan növekszik, illetve csökken. Összevetve e három tó morfológiai jellemzőit, azt vehetjük észre, hogy a Balaton és az Ngoring tavak felületükben közel megegyeznek, míg előbbi rendkívül sekély, addig utóbbi egy mély tó, ahol kialakul hosszán fennálló rétegzettség. Átlag mélysége nagyobb, mint a Mendota-tónak, azonban egészen más klímával rendelkezik, hiszen tengerszint felett 4268 m-en helyezkedik el. A legkisebb változékonyságot a Douglas-tó mutatta, amely bár háromszor olyan mély, mint a Balaton, de rendkívül kis víztömeggel rendelkezik a felületéből adódóan (13.7 km²). Ezek alapján, összefoglalóan azt a következtetést tudom levonni, hogy az átviteli együttható éven belüli alakulása összefüggésben lehet a tó vízfelület és víztömeg jellemzőivel, ami – az éghajlati viszonyok mellett – alapvetően

meghatározza a tó hőmérsékleti és rétegződési és ebből adódóan a párolgás számára elérhető hőmennyiségre vonatkozó jellemzőit.

További összefüggések feltárásának érdekében, és hogy pontosabban lássuk a meghajtó folyamatokat az átviteli együttható alakulásában korreláció vizsgálatot végeztem. Mivel a párolgáshoz energia kell, így az összefüggések keresését és a korrelációs számítását a tó energiaháztartását legjobban befolyásoló vagy leíró alapvető hidrometeorológiai változókkal végeztem el. Ezek a szélesség, víz- és léghőmérséklet, ezek különbsége, a specifikus páratartalom vertikális különbsége, a szélesség és a hőmérsékletkülönbség szorzata, szélesség és specifikus páratartalom-különbség szorzata, illetve a beérkező rövidhullámú napsugárzás nagysága. A C_q együttható és az egyes változók közötti R^2 értékeket a 20. ábra mutatja.



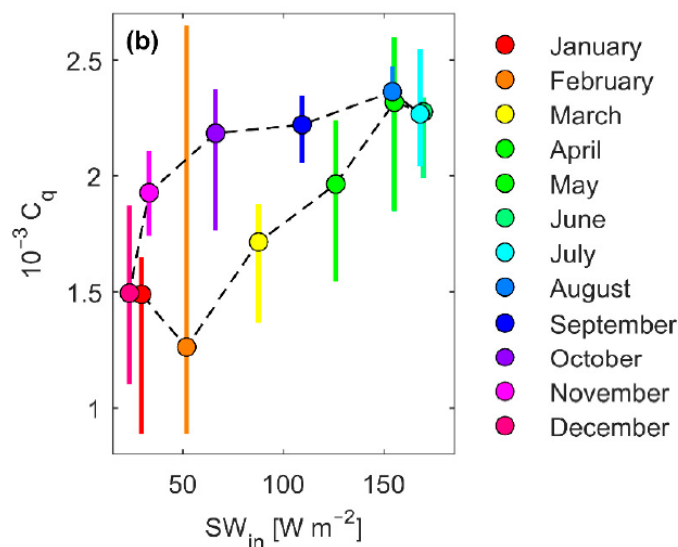
20. ábra: Az átviteli együttható (C_q) és az egyes változók korreláció négyzetei (R^2): szélesség (U), vízfelszín hőmérséklete (T_w), léghőmérséklet (T_a), hőmérsékletkülönbség ($\Delta T = T_w - T_a$), a levegő és a víz specifikus páratartalmának különbsége (Δq), szélesség és a hőmérsékletkülönbség szorzata ($U \cdot \Delta T$), szélesség és a specifikus páratartalom-különbség szorzata ($U \cdot \Delta q$), beérkező rövidhullámú napsugárzás (SW).

A Douglas-tónál C_q értéke legjobban a vízhőmérséklettel függött össze ($R^2 = 0,84$). Utána következett a specifikus páratartalom-különbség, illetve annak szorzata a szélességgel és végül a léghőmérséklet. Ezen a három változón kívül másra nem mutatott összefüggést a párolgási együttható a vizsgáltak közül. Ez arra enged következtetni, hogy a kis víztömeg esetében a gyorsan változó vízhőmérséklet befolyásolhatja C_q , ami egyúttal a mutatója a tóban tárolt energiának, ami a párolgásra fordítható. Ez azonban fenntartásokkal fogadható el, mivel itt csak kevés és csak nyári hónapokra vonatkozóan van adatunk. A Mendota-tónál ennél sokkal kisebb értékek jöttek ki a korrelációs együttható négyzetére. A legerősebb kapcsolatot C_q a hőmérsékletkülönbséggel (0,25), a hőmérsékletkülönbség és szélesség szorzatával (0,14) mutatta. Az átviteli együttható tehát szinte semmilyen érdemi lineáris összefüggést nem mutatott sem az energiamérleget jellemző mutatókkal (T_w , SW), sem pedig a páratartalommal, amely az átviteli együttható módszerben megjelenik (11. egyenlet). Az Ngoring-tó is a legnagyobb lineáris összefüggést a ΔT -re adta (0,35), de ezzel azonos nagyságrendű korrelációs együttható négyzet (0,33) adódott a szélesség-hőmérséklet

különbség szorzatnál és a beérkező rövidhullámú napsugárzásnál, amely utóbbi megint az energiamérleggel való kapcsolatot sejteti. A Balatonnál kaptam a legnagyobb értékeket a rövidhullámú sugárzás esetében (0,84). A vizsgálat során 0,84 lett a korrelációs együttható négyzete a léghőmérséklet esetében is, míg a vízhőmérséklettel való lineáris kapcsolat is erős (0,77). Emellett érdemes összefüggés (0,52) mutatkozott az $U \cdot \Delta q$ esetében is, ami alátámasztja az átviteli együtthatós módszer használhatóságát a Balatonra. A kis térfogatú tavak (Douglas – felülete miatt, Balaton – mélysége miatt) hamarabb átmelegszenek hasonló hőmérsékletre, mint a léghőmérséklet, így hasonló trendeket tudnak mutatni a párolgási átviteli együtthatóval, ezért lehet ennél a két tónál magasabb a korrelációs együttható négyzete. Az ezeknél lényegesen nagyobb hőmérsékleti tehetetlenséggel rendelkező Mendota és Ngoring tavaknál gyengébb lineáris kapcsolatokat találtam a vízhőmérséklettel és besugárzással, mint az energiamérleg mutatóival.

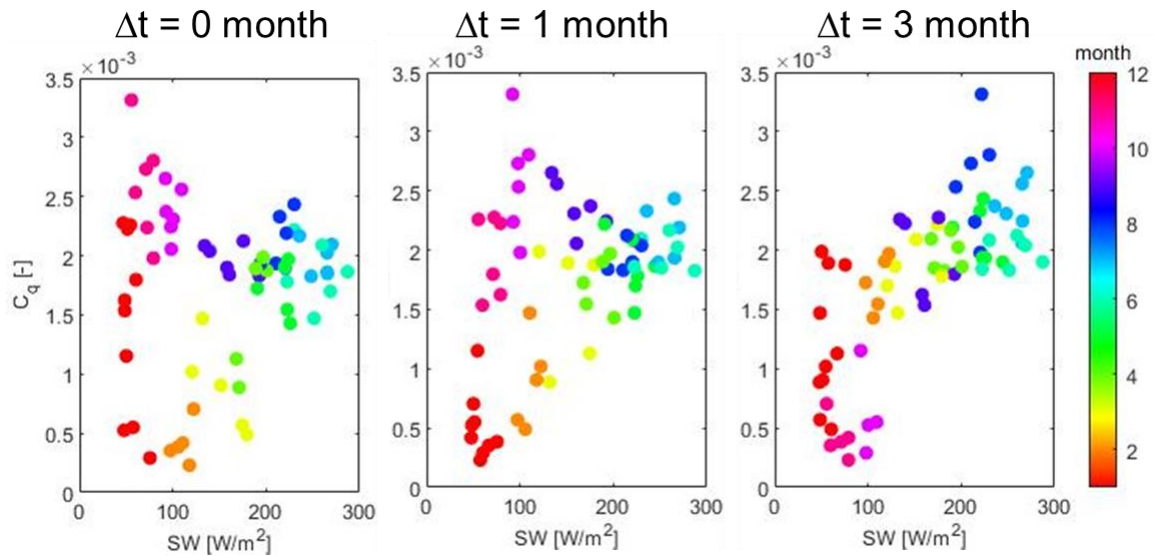
Alapvetően minden tónál más-más változó lett a domináns befolyásoló tényező, de mindegyiknél elmondható, hogy a hőmérséklet valamilyen módon megjelenik. A Mendotánál és az Ngoringnál csak rejtve a léghőmérséklet vízhőmérséklet különbségben találtam a többi változónál nagyobb összefüggést. Míg a másik két tónál a lég- és vízhőmérséklet vizsgálata külön-külön is nagy determinációs együtthatót adott. Ennek oka szintén a nagyobb hőmérsékleti tehetetlenségben rejlik, ugyanis a nagyobb víztömeg lassabban reagál a levegő hőmérsékleti változásaira, inkább azok különbsége változik hasonló ütemben, mint az átviteli együttható. Ez nemlineáris összefüggést (pl. hiszterézist) feltételez a hőmérséklet és az átviteli együttható között.

A Balaton esetében kimutatták, hogy hiszterézis kapcsolat van C_q és SW között (Lükő et al. 2022a). A 21. ábra ezt mutatja be, amelynek körbejárási iránya óramutató járásával ellentétes. A görbén szépen elkülönül a melegedési és a hűlési időszak és a fordulópont éppen abban az időszakban van, amikor az örvény-kovariancia mérések történtek (nyári hónapok). A fordulópont környezetében a hurokgörbe összeszűkül és emiatt kaptunk magas R^2 értékeket SW és C_q között. Ez tehát valamelyest félrevezető, mert a Balaton esetében sem beszélhetünk éves viszonylatban lineáris kapcsolatról. Ha lett volna EC adatunk a maradék hónapokra, akkor a hiszterézis görbének megfelelően jelentősen kisebb korrelációt mutatott volna a napsugárzás és az átviteli együttható.



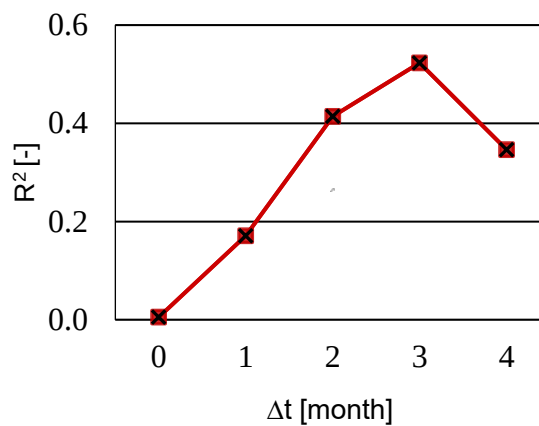
21. ábra: Az átviteli tényező (C_q) és a rövidhullámú sugárzás (SW) hiszterézis vizsgálata havi bontásban, és a hozzájuk tartozó 25-75 percentilisek; 11 évnyi vízmérleg adatok alapján számítva (Forrás: Lükő et al. 2022a)

Mivel a Mendota-tóra jöttek ki a legkisebb lineáris összefüggések az egyes változókra, továbbá itt volt a legváltozékonyabbak a C_q értékek, ezért a hiszterézis vizsgálatot erre a tóra végeztem el. Ez esetben is a rövidhullámú sugárzást választottam, mint az energiamérleg domináns komponensét. Ha ábrázolom az átviteli együttható havi mediánjait a beérkező rövidhullámú napsugárzások havi átlagainak függvényében (22. ábra első diagramm), akkor jól látszik, hogy a pontfelhőre igencsak nehézkes bármilyen görbét illeszteni. Ha C_q értékeihez eggyel korábbi hónap SW adatait párosítjuk ($\Delta t = 1$ hónap), akkor már felfedezhető a hiszterézis viselkedés (22. ábra középső diagramm). A pontfelhőt három részre bonthatjuk. Az első szakasz nem teljesen egyenletesen növekvő, ami januártól június tart. Eddig folyamatosan nő a besugárzások értéke és ezzel együtt melegszik a víztömeg is, de a tavaszi átkeveredés időpontja és mértéke miatt nagyobb eltérések vannak a különböző évek március, április, május C_q mediánjai között. A második szakasz a nyári és őszi eleji periódus. Ez hasonlóan a Balaton esetében a hurokgörbe fordulópontja. Ezt követi a nyári erős rétegződés felbomlása a hűlő felszín hatására kialakuló átkeveredés következtében, amikor a felszínre kerülő melegebb vízrétegek energiája tudja táplálni a párolgást, ezzel a C_q értékét magasabb értéken tartani vagy akár valamelyest növelni. Ebben az időszakban, már kisebb szögben érik a napsugarak a tó felszínét így a besugárzás értéke már csökken, ezért változik ilyen nagyot az értékek trendje. A harmadik szakaszban (november-december) történik a legnagyobb változás. A besugárzás alig változik viszont a tó teljesen lehül és be is fagy és már nem rendelkezik a tó elég energiával nagymértékű párolgáshoz. A Mendota-tó esetében az egy hónapos eltolással szépen megjelenik a hiszterézis viselkedés, amelyen inkább három szakasz különíthető el a Balaton esetében mutatott kettővel szemben. Ez a tó rétegződési és jegesedési viszonyaival jól magyarázható.



22. ábra: A havi párolgási átviteli együttható (C_q) a rövidhullámú sugárzás (SW) függvényében a hónapok szerint színezve, $\Delta t = 0, 1$ és 3 hónapos eltolásban (balról jobbra).

Abban az esetben, ha 3 hónappal korábbi SW értékeket rendelünk az átviteli együtthatóhoz (22. ábra harmadik diagramm). Akkor a pontjaink már egy egyenes köré rendeződnek, ha nem vesszük figyelembe azokat a hónapokat, mikor a tó felszíne fagyott. Ha korreláció vizsgálatot végzünk különböző hónapnyi eltolásokkal, akkor a legnagyobb determinációs együtthatót (R^2) 3 hónapos eltolással kaphatjuk (23. ábra). Tehát a napsugárzás változása csak három hónappal később lesz hatással, a párolgás mértékére és ezáltal az átviteli együttható nagyságára.



23. ábra: Az rövidhullámú sugárzás (SW) és a párolgási átviteli együttható (C_q) közötti korrelációs együttható négyzetek (R^2) a Mendota-tóra, ha $\Delta t = 0, 1, 2, 3$ és 4 hónappal toljuk el egymáshoz képest az értékeket.

6. Összefoglalás és következtetések

Az átviteli együtthatók módszere az egyik leggyakrabban alkalmazott eljárás a meteorológiai és tavi modellezés során. A módszer a párolgási (látens) hőáramot a szélesebbesség, a függőleges vízgőzsűrűség gradiensének és egy párolgási átviteli együttható (C_q) a függvényében határozza meg. Ezt az átviteli együttható a szakirodalom az esetek túlnyomó többségében konstansnak tekinti, illetve időnként a szélesebbesség függvényében határozza meg. Mindazonáltal két tanulmány rámutatott, hogy C_q értéke időszakról időszakra változhat és akár szezonális jellegű változással is bírhat.

Kutatásomban azt a hipotézist vizsgáltam, hogy a párolgási átviteli együtthatót jellemezheti egy éven belüli változékonyság. Ennek érdekében a Balaton mellett további három tóról gyűjtöttem össze örvény-kovariancia idősorokat, amelyek alapján levezettem C_q értékét először 30 perces felbontással, majd abból az adott hónapra jellemző medián értékét. A hipotézist alátámasztották a kapott eredmények, miszerint a mind a négy tó esetében felfedezhető egy szabályszerű éven belüli változás, vagyis a C_q érték szezonális. Az éven belüli változás mértéke számottevő, pl. a Mendota-tó esetében közel háromszorosára nő C_q értéke össze a tavaszi értékhez képest.

A tanulmányban vizsgáltam C_q ingadozásának okát korreláció analízissel. A meghajtó folyamatok feltárása még közel sem teljes, azonban az már szépen megmutatkozik, hogy C_q változása a tó energiamérlegével vagyis a párolgásra fordítható energiával van összefüggésben. A feltárt kapcsolatok nem lineárisak, mind a sekély Balaton, mind mély Mendota-tó esetében hiszterézis mutatkozik a rövidhullámú besugárzás és C_q értéke között. A hurokgörbe alakjának eltérése pedig jól magyarázható a tavak rétegződési jellemzőjével. Míg a Balaton polimiktikus, addig a Mendota-tó dimiktikus vagyis évi kétszeri átkeveredés jellemzi, amelynek időpontjai megközelítőleg egybe esnek a hurokgörbe töréspontjaival. A besugárzással kapott kapcsolat C_q változékonyságában amiatt is érthető, mivel havi léptékben a párolgás domináns meghajtója a rendelkezésre álló, párolgásra fordítható energia (Du et al., 2018). Ezt mutatják a havi léptékre kidolgozott párolgászámító módszerek is, mint pl. a Priestley-Taylor vagy a Penman-Monteith összefüggések (Lükő et al., 2022a).

A kapott eredményének fontos alkalmazási területe a klimatikus kutatások, amikor több évtizedre vonatkozóan modellezik a tavak hőmérsékletét és rétegződését. Ilyen esetekben a fenti eredmények alapján feltételezhető, hogy a modellszimulációkban konstans C_q használata mellett szisztematikus hibát vétünk a számított látens hőben, hiszen periodikusan alul és felül becsüljük azt és ezáltal a vízhőmérsékletet is, csak fordítva. A kapott eredmények alapján remélhető lehet a tavi levegő-víz határfelület párolgási hőcseréjének érdemi pontosítását, amely gyorsan és hatékonyan megoldható elvégre könnyen felállítható kapcsolat a párolgási átviteli együttható és az adott tóra érkező besugárzás (vagy esetleg más energiamérleg komponense) között. Javasolható tehát, hogy C_q értékét havi lépcsőben változtassuk hosszú idejű modellszimulációk során, amivel várhatóan mind a párolgott vízmennyiséget, mind a vízhőmérsékletet pontosabban fogjuk számítani.

7. Köszönetnyilvánítás

A Kulturális és Innovációs Minisztérium ÚNKP-22-3-I-BME-33 kódszámú Új Nemzeti Kiválóság Programjának a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alapból finanszírozott szakmai támogatásával készült.



8. Hivatkozások

- Arya, S.P. (2001): *Introduction to Micrometeorology*, Academic Press, 2. kiadás.
- Baldocchi, A.K., Reed, D.E., Loken, L.C., Stanley, E.H., Hurd, H., Desai, A.R. (2020): *Comparing Spatial and Temporal Variation of Lake-Atmosphere Carbon Dioxide Fluxes Using Multiple Methods* – Journal of Geophysical Research: Biogeosciences
- Blanken, P. D., Rouse, W. R., & Schertzer, W. M. (2003): *Enhancement of evaporation from a large northern lake by the entrainment of warm, dry air.* - Journal of Hydrometeorology, 4(4), 680– 693.
- Blanken, Spence, Hedstrom, Lenters, (2011) *Evaporation from Lake Superior: 1. Physical controls and processes* - Journal of Great Lakes Research 37 (2011) 707–716.
- Du, Q., Liu, H.Z., Liu, Y., Wang, L., Xu, L.J., Sun, J.H., Xu, A.L. (2018) *Factors controlling evaporation and the CO₂ flux over an open water lake in southwest of China on multiple temporal scales.* Int. J. Climatol. 38, 4723–4739
- Foken, T. (2008): *Micrometeorology*, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg
- Golub, M., Desai, A. R., Vesala, T., Mammarella, I., Ojala, A., Bohrer, G., Weyhenmeyer, G. A., Blanken, P. D., Eugster, W., Koebsch, F., Chen, J., Czajkowski, K. P., Deshmukh, C., Guérin, F., Heiskanen, J. J., Humphreys, E. R., Jonsson, A., Karlsson, J., Kling, G. W., Lee, X., Liu, H., Lohila, A., Lundin, E.J., Morin, T.H., Podgrajsek, E., Provenzale, M., Rutgersson, A., Sachs, T., Sahlée, E., Serça, D., Shao, C., Spence, C., Strachan, I.B. & Xiao, W. (2021): *New insights into diel to interannual variation in carbon dioxide, emissions from lakes and reservoirs* (Preprint). Environmental Sciences.
- Han, B. (2020): *Eddy covariance data in Ngoring Lake in Tibet from 2011 to 2013* [Data set]. Harvard Dataverse.
- Han, B., Meng, X., Yang, Q., Wu, R., Lv, S., Li, Z., Wang, X., Li, Y., & Yu, L. (2020): *Connections Between Daily Surface Temperature Contrast and CO₂ Flux Over a Tibetan Lake: A Case Study of Ngoring Lake.* Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 125(6).
- Li, Z., Lyu, S., Zhao, L., Wen, L., Ao, Y., & Wang, S. (2016): *Turbulent transfer coefficient and roughness length in a high-altitude lake, Tibetan Plateau.* - Theoretical and Applied Climatology, 124(3–4), 723– 735.

- Liu, H., Zhang, Y., Liu, S., Jiang, H., Sheng, H., & Williams, Q. L. (2009): *Eddy covariance measurements of surface energy budget and evaporation in a cool season over southern open water in Mississippi*. - Journal of Geophysical Research, 114, D04110.
- Lükő, G. (2020): *Momentum and heat exchange at the air-water interface of Lake Balaton from eddy-covariance measurements*, BME-VVT, M.Sc. Thesis, Budapest.
- Lükő, G., Torma, P., Weidinger, T. (2022a): *Intra-Seasonal and Intra-Annual Variation of the Latent Heat Flux Transfer Coefficient for a Freshwater Lake* - Atmosphere, 13, 352.
- Lükő, G., Torma, P., Weidinger, T., Krámer, T. (2022b), *Air-Lake Momentum and Heat Exchange in Very Young Waves Using Energy and Water Budget Closure* - Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 127, e2021JD036099.
- Magee, M R, McIntyr, P.B., Hanson, P.C. & Wu, C.H. (2019): *Drivers and Management Implications of Long-Term Cisco Oxythermal Habitat Decline in Lake Mendota, WI* – Environmental management 63, 396–407
- Monin, A.S. and Obukhov, A.M. (1954): *Basic Laws of Turbulent Mixing in the Atmosphere near the Ground*. Tr. Akad. Nauk SSSR Geofiz. Inst 24(151):163–87.
- Morin, T.H, Rey-Sánchez, A.C., Vogel, C.S., Matheny, A.M., Kenny, W.T., & Bohrer, G. (2018): *Carbon dioxide emissions from an oligotrophic temperate lake: An eddy covariance approach*, Ecological Engineering 114, 25-33.
- Reed, D.E., Dugan, H.A., Flannery, A.L., Desai, A.R. (2018), *Carbon sink and source dynamics of a eutrophic deep lake using multiple flux observations over multiple years* - Limnology and Oceanography Letters 3, 2018, 285–292.
- Wang, B., Ma, Y., Wang, Y., Su, Z., & Ma, W. (2019): *Significant differences exist in lake-atmosphere interactions and the evaporation rates of high-elevation small and large lakes*. - Journal of Hydrology, 573, 220– 234.
- Xiao, W., Liu, S., Wang, W., Yang, D., Xu, J., Cao, C. (2013): *Transfer coefficients of momentum, heat, and water vapour in the atmospheric surface layer of a large freshwater lake*. - Boundary-Layer Meteorology, 148(3), 479– 494.