



Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem  
Építőmérnöki Kar  
Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszék

**Torma Péter**

**Szél keltette vízmozgás és hőmérséklet eloszlás  
modellezése sekély tavakban**

Doktori értekezés téziszfüzet

Témavezető:

Dr. Krámer Tamás

Budapest, 2016. február

## A kutatás előzményei

Hazai tavaink többsége sekély tó, amelyek jelentős ökológiai értékük mellett számos vízgazdálkodási feladattal bírnak. A Balaton Közép-Európa legnagyobb természetes tava. Területe közel 600 km<sup>2</sup>, partvonalának hossza 235 km, míg átlagos mélysége mindössze 3.5 m. Ökológiai állapota, vízminősége és a víztest minden fenntartási, üzemeltetési feladata közvetlen kapcsolatban áll a tó vízmozgásaival. A Balaton vízmozgásainak részletesebb megismerésére terepi mérések sorozatába kezdtek a hatvanas években, míg a nyolcvanas évektől a terepi méréseket elkezdték kiegészíteni a numerikus modell vizsgálatok, amelyekkel a teljes víztestre terjeszthettük ki az ismereteinket pontszerű mérések alapján. A Balaton áramlásával kapcsolatos kutatások tehát immáron több, mint 50 éves múltra tekintenek vissza.

A vízmozgás kihatással van arra, hogyan hatnak a különböző tényezők a tóra, így alapvetően befolyásolja a tó ökológiai állapotát is. A legfontosabb dinamikus folyamatok a vízszintes síkú áramlások, a függőleges irányú vízmozgások (beleértve a vízszint-ingadozásokat, hullámzást, fel- és leáramlásokat) és a turbulens keveredés. Hogy pár példát említsek: a horizontális áramlások felelősek a nagyobb léptékű advektív vízszállításért; a hullámzás közreműködik a függőleges irányú keveredésben, valamint lebegésbe hozza az üledéket; a turbulens keverés felelős a kisléptékű keveredésért mind vízszintes, mind függőleges irányban. Továbbá mindezen folyamatok nem függetlenek egymástól. Az áramlás turbulenciát okoz ugyanúgy, mint a hullámzás keltette orbitális vízmozgás. Ezek intenzitása és eloszlása változó, ami a turbulencia intenzitásának eloszlásának erős anizotrópiájához vezet. A vízszint-ingadozások jelentősen kihatnak az áramlásokra és a vízcseré-folyamatokra, mivel periodikusan változó vízmozgást, vízlevegőcserét hoznak létre. Továbbá a víz hőmérséklete, mint fizikai paraméter szorosan közrejátszik az ökológiai és vízminőségi folyamatokban. A tavon belüli hőmérséklet-eloszlást meghatározzák mindezen említett dinamikus folyamatok. A különböző vízmozgásokat számos tényező alakítja, úgy, mint a mederalak, a partvonal geometriája, a szélklíma, a szélnek való kitettség, a klimatikus viszonyok, a befolyások és kifolyások elhelyezkedése. A hidrodinamikán túl, az egyes meteorológiai hatásokat is matematikai modellekkel kell leírunk, ahhoz hogy egy előrejelzésre is alkalmas modellrendszer állíthassunk fel egy tóra, e kutatás során a Balatonra.

Az elmúlt két évtized kutatási programjai leginkább a nagy időléptékű folyamatokra összpontosultak, mint pl. az eutrofizáció, az üledékmozgás, a vízkészlet-változások, a vízminőség romlása. Mindazonáltal, a Balatonra hiányzik egy előrejelző rendszer, amely kellően részletes mind a fizikai folyamatok leírásában, mind térbeli felbontásában. Doktori kutatásom legfőbb célja, hogy felállítsak egy 3D hidrodinamikai modellt a Balatonra, amely egy későbbi előrejelző rendszer alapjául szolgálhat.

## Célkitűzések

Ez az alapötlet vezérelte és határozta meg doktori kutatásom általános irányát. A részletesebben megfogalmazott célok és alapfeladatok a következők:

- Egy háromdimenziós Reynolds-átlagolt numerikus áramlástanai modell felállítása és igazolása a Balatonra. A megfelelő modelltől elvárt, hogy rövid futási idővel rendelkezzen, rugalmas és kellően részletes. A modellt a lehető legtöbb vízmozgás típusra igazolni kell, így a vízszint-ingadozások, az áramlások és a turbulens keveredés helyes számítására.
- Egy szélmodell felállítása, amely képesen visszaadni a szél-csúsztatófeszültség tó feletti eloszlását a hidrodinamikai modellezéshez szükséges pontossággal. A vízmozgást a szél kelti, ezért a tó feletti széleloszlás vizsgálata alapvetően fontos.
- A tó hőmérsékleti rétegződésének modellezése. Ehhez a tó energiaháztartásának részletes vizsgálata szükséges. Számítási módszer felállítása és igazolása az energiaháztartási komponensek meghatározására, amely igazodik az elérhető szokásos mérésekhez és a szükséges pontossággal bír.
- A tó hőmérsékleti rétegződésének kialakulása szempontjából lényeges folyamatok szerepének, úgy, mint az áramlás és a hullámozás turbulens keverésének meghatározása.

## Kutatási módszer

A tavi hidrodinamikára, a tó feletti széleloszlás meghatározására és az energiaháztartási komponensek számítására determinisztikus modelleket adaptálok és állítok fel. A kutatás gerincét a hidrodinamikai modellezés alkotja, de az egyes hidrometeorológiai tényezők, mint peremfeltételek részletes vizsgálata és modellezése elengedhetetlen. Következésképp a kutatás valamelyest multidiszciplináris jellegű, a hidraulika tudományterülete mellett megjelenik a meteorológia, a hidrológia és termodinamika.

Az alkalmazott áramlástanai modell (FVCOM) a Reynolds-átlagolt Navier-Stokes egyenleteket oldja meg egy két-egyenletes turbulencia modell lezárással. Az adaptált hidrodinamikai modellt továbbfejlesztettem a hullámozás keltette turbulens keveredés leírásához. Hatékony sémákkal bővítettem a fázisátlagolt turbulens modell egyenleteit, amelyek leírják a nem-megtörő hullámozás keltette keveredést.

A fejlesztett szél-csúsztatófeszültség modellje egy fél-algebrai, heurisztikus modell kiegészítve egy hatékony interpolációs sémával, amely megadja a szél eloszlását a belső légköri határréteg és a szélklíma változékonyságának hatására a hidrodinamikai modellezés igényéhez igazodva. A belső légköri határréteg modellje megadja a pillanatnyi szél-csúsztatófeszültséget a szél irányának vonalában, míg az interpolációs séma biztosítja a mezo-skálájú szélklíma változékonyságának figyelembe vételét.

A tó hőmérsékleti eloszlásának modellezéséhez szükséges energiaháztartási komponensek számítására olyan módszert alkalmazok és igazolok, amely igazodik a rendelkezésre álló, szokásos mérési adatokhoz. A turbulens hőáramokat egy profil alapú eljárással számolom, amely a fluxus-gradiens és a Monin-Obukhov hasonlósági elméleten alapul. A módszert örvény-kovariancia mérések segítségével igazolom. A sekély tavi környezet sajátosságait figyelembe veszem és elemzem.

## Új tudományos eredmények összefoglalása tézispontokban

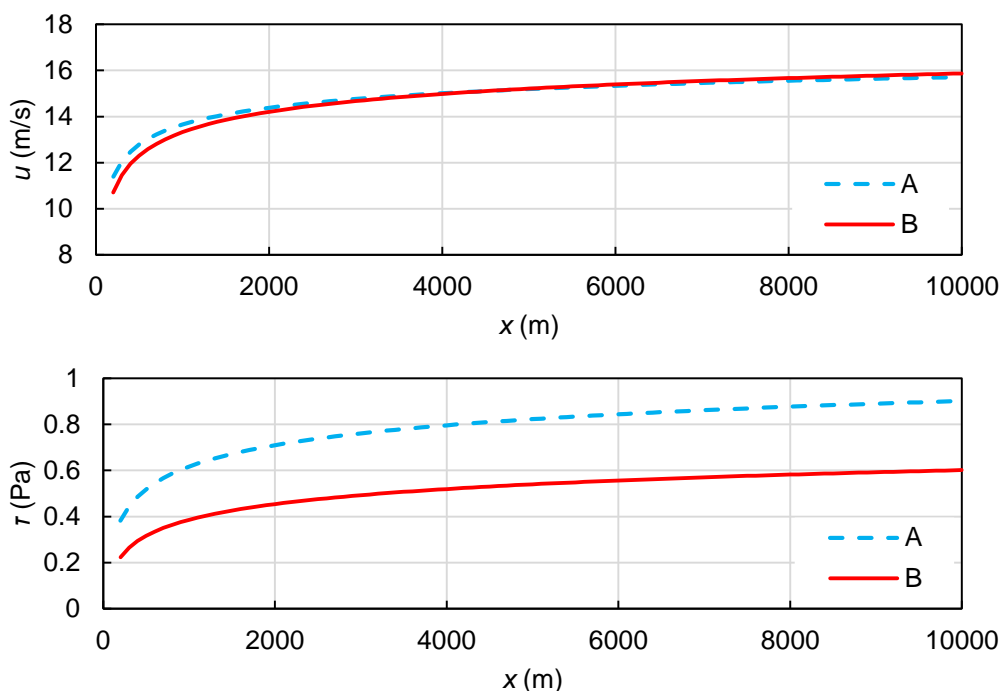
A doktori kutatásban átfogó hidrodinamikai és termodinamikai modellezés valósult meg egy sekély tóra, a Balatonra. Az alkalmazott módszerek és modellek kiterjeszthetők más sekély tavakra is, miután azok helyszíntől függetlenek. Egy előrejelző rendszer szükségessége egyértelmű és a létrejött modellrendszer ennek megfelelő alapjául szolgálhat. Az alábbiakban a legfontosabb új tudományos eredményeket tézisek formájában foglalom össze.

### Tézis 1

*A belső légköri határreteg és a szél-csúsztatófeszültség modelljének paraméterezése*

Kimutattam, hogy a tó feletti belső légköri határreteg adiabatikus modelljének végtelen számú paraméterkombinációja egymással közel egyező vízszintes szélprofil eredményez. Ezáltal a modell nem kalibrálható egyértelműen a szokványos, különböző meghajtási hosszú pontokban végzett, egyidejű szélmérések segítségével. Vizsgálataimmal feltártam a határreteg-fejlődés modelljének paramétereinek közötti kapcsolatot. [2]

A belső határreteg (internal boundary layer, röviden: IBL) modell szolgáltatja a szélmérő állomáson keresztülhaladó pillanatnyi szél-csúsztatófeszültség eloszlását a szél irányában, mégpedig oly módon, hogy az állomásnál a mért és a modellezett szélsébség megegyezik. Az IBL profil számítási eljárása két szabad paraméterrel bír, a part ( $z_0$ ) és a víz érdesség-magasságával, az utóbbi a Charnock-féle  $\alpha$  paraméteren keresztül. Kimutattam, hogy számos olyan paraméter-kombináció létezik, amely azonos vízszintes szélsébség-eloszlást, de merőben eltérő szél-csúsztatófeszültségeket eredményez, illetve fordítva. Meghatároztam ezeknek az egyenértékű paraméter-kombinációknak a halmazát a víz és a part érdesség-magassága arányának függvényében.



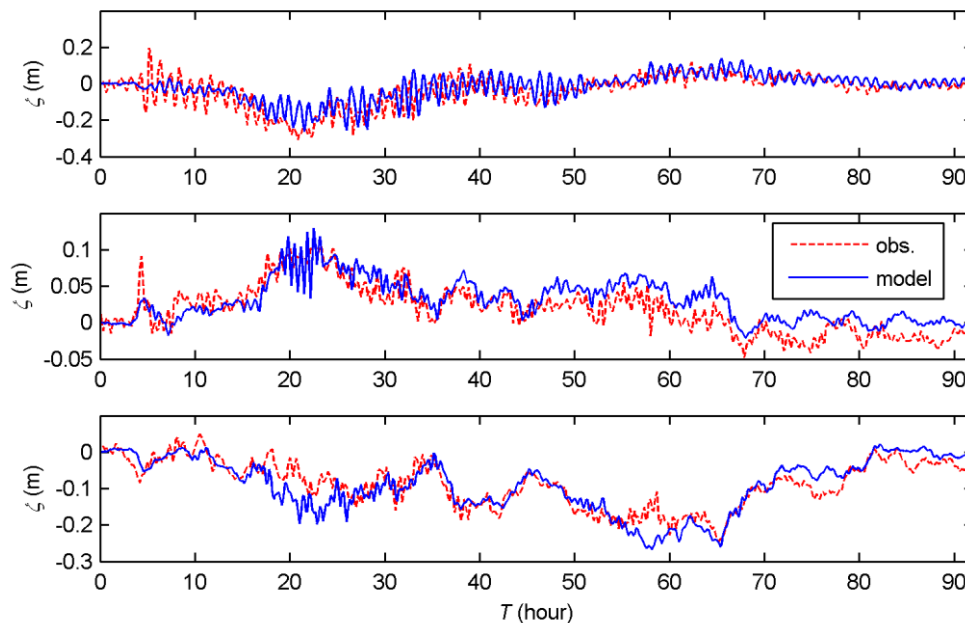
1. **ábra:** A szélesség (felső ábra) 10 magasságban és a szél-csúsztatófeszültség meghajtási hossz-menti eloszlása a tó felett a légköri belső határréteg modelljével számítva. A eset (szaggatott):  $\alpha = 0.073$  and  $z_0' = 0.6$  m, B eset (folytonos):  $\alpha = 0.0185$  and  $z_0' = 0.5$  m.

## Tézis 2

### *Hidrodinamikai modell bevonása a szél-csúsztatófeszültség modelljének kalibrációjába*

**Bebizonyítottam, hogy az IBL modelljének kalibrációja határozottá tehető azzal, hogy a szélességek illesztése mellett egy, a tófelszínen ható csúsztatófeszültségre is adunk kiegészítő feltételt. Megmutattam, hogy ez a kiegészítő feltétel biztosítható azzal, hogy a tó mért szél keltette kilendüléséhez igazítjuk a hidrodinamikai modellel számítottat. Ekkor a hidrodinamikai modellt a szélmodellel előállított szél-csúsztatófeszültség-mezővel hajtjuk meg. [2, 4]**

Az 1. számú tézis értelmében az IBL modell nem kalibrálható még abban az esetben sem, ha több, különböző meghajtási hosszú szélességmérés rendelkezésre áll. A hiányzó feltétel biztosítható a turbulencia mérésével (pl. örvény-kovariancia módszerrel). A szokványos szélmérések jellemzően átlagos szélességet szolgáltatnak 5–60 perces átlagolási intervallummal, amelyből a lokális szél-csúsztatófeszültség nem vezethető le. A kiegészítő kalibrációs feltétel előállítható oly módon, hogy a modellezett vízszint-ingadozásokat a vízrajzi állomásokon mértékhez igazítjuk, biztosítva ezzel azt, hogy a tavat érő szél erő, vagyis a szél-csúsztatófeszültség tófelszínen vett integrálja, szintén igazolva lesz



2. ábra: Modellezett és mért vízszint-ingadozások idősora a Balaton különböző vízmércéinél, 2009. 10. 12. 8:00 és 2009. 10. 16. 04:00 között.

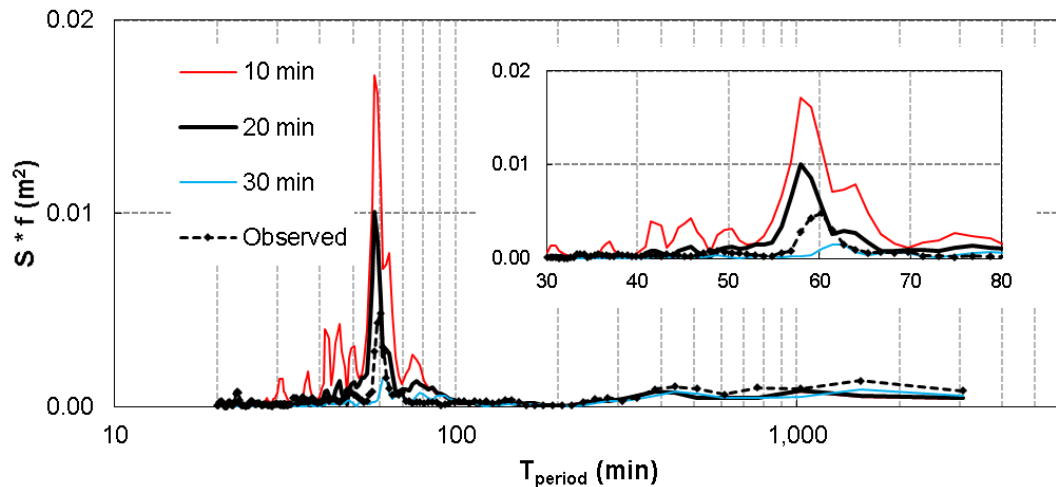
### Tézis 3

*A modellezett szél-csúsztatófeszültség időbeli átlagolásának hatása a tó vízmozgására*

Numerikus vizsgálatokkal azonosítottam a szél-csúsztatófeszültség időbeli átlagolásának szerepét a tó hidrodinamikai válaszában. A szél-csúsztatófeszültség IBL modell alapú meghatározása egyensúlyi állapotot feltételez, így a szélesebbesség pontbeli ingadozására a tó fölé extrapolált belső határréteg a valósággal szemben azonnal reagálna. A szélesebbesség-ingadozások keltette túlzott szélró csillapítása érdekében a szélesebbesség időbeli átlagát képezzük és használjuk hidrodinamikai modellezési célokra. A vízlevegés modellezésén és az abból származtatott energiasűrűség-spektrumoknak az elemzésén keresztül kimutattam, hogy a Balaton esetében az alkalmas átlagolási intervallum 20 és 30 perc között van keresztirányú szelekre, azonban nem lehet egy, a teljes tóra egységesen alkalmazható optimális időátlagot meghatározni. [2]

A szokványos szélmérések során az átlagos szélesebbesség kerül tárolásra 5 perces vagy annál durvább időbeli felbontással. Hidrodinamikai szimulációkat végeztem különböző szélátlagolási intervallumok alkalmazásával annak érdekében, hogy meghatározzam az időbeli felbontás hatását a modellezett tavi vízmozgásokra. A Balaton esetében, a jellemző keresztirányú (É-ÉNY) szelek esetére kimutattam, hogy az alkalmas átlagolási intervallum elegendően pontosan körülhatárolható, azonban nem található egy olyan átlagolási intervallum, amellyel a modellezett keresztirányú vízlevegés-komponensek és az abból számított energiaspektrumok minden egyes vízmércénél egyformán jól illeszkednek a mért értékekhez. Ez egy olyan hipotézisre vezet, hogy a szél-csúsztatófeszültség időbeli átlagolási intervallumának igazodnia kell

a tó geometriájából eredő vízlevegés-spektrumokhoz, és miután az egyes tórészekre eltérő vízlevegési hullámhosszok jellemzőek, egy egységesen jó átlagolási intervallum nem létezik.



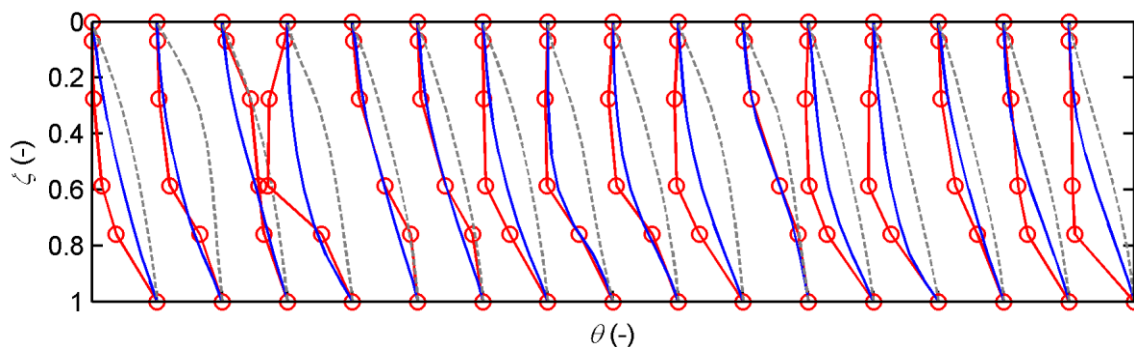
**3. ábra:** Mért és modellezett vízszint-idősorok alapján számított frekvenciával súlyozott energiaspektrumok. Az egyes görbék a különböző időátlagolási intervallumoknak felelnek meg.

#### Tézis 4

*Hullámozás keltette turbulens keveredés és hőmérsékleti rétegzettség modellezése sekély tóban*

Sekély tavakban jellemzően napi ciklusú hőmérsékleti rétegződés alakul ki, amennyiben a besugárzott hőmennyiség képes felülkerekedni a vízmozgás advektív és diffúzív keveredésén. Numerikus modellvizsgálatokon keresztül bebizonyítottam, hogy a hullámozáshoz köthető orbitális vízmozgás által keltett turbulens keveredés nagyságrendekkel nagyobb, mint ami a megtörő hullámokkal és az áramlás nyírási produkciójával keletkezik. A nem-megtörő hullámozás keltette turbulens keveredéssel kiegészítettem a fázisátlagolt alapegyenletek megfelelő tagjait és kimutattam, hogy ez elengedhetetlen ahhoz, hogy pontosan modellezhessük egy sekély tó függély menti hőmérséklet-eloszlását. [1, 7]

Vizsgáltam a függőleges hőmérsékleti eloszlás alakulását az áramlás és a nem-megtörő hullámozás hatására. A nem-megtörő hullámozás keverését beépítettem a turbulencia-modellbe és ezáltal nemcsak a felszíni és fenéken kialakuló hőmérsékleteket számítottam pontosan, hanem a teljes mélység menti hőmérséklet-eloszlást, és ezáltal az átkeveredett rétegvastagság időbeli alakulását is. Mindezeket a Balaton egy függély menti hőmérsékleti profiljának modellezésén keresztül mutattam ki. A tóban jellemzően napi ciklusú hőmérsékleti rétegződés alakul ki, noha a felső vízrétegek még gyenge és közepes szélviszonyok esetén is elég jól átkevertek.



4. **ábra:** Napi dimenziómentes hőmérsékletprofilok a Keszthely melletti hidrometeorológiai állomásnál egymást követő 16 napon. Piros vonal körökkel = mért; kék vonal = modellezett, a hullámozás keltette turbulens keveredés hatásának beépítésével; szürke szaggatott = modellezett, az eredeti Mellor-Yamada 2.5 turbulencia modell alkalmazásával.

A hullámozás és az áramlás közötti energia-közvetítésére két gyakran alkalmazott módszer egyrészt a fenék-csúsztatófeszültségen keresztüli összekapcsolás, másrészt a radiációs feszültségek meghatározása, amelyek a Reynolds-átlagolt Navier-Stokes egyenletekben mint impulzus-forrástagok jelennek meg. Ezek a megközelítések jelentősen módosítják a turbulencia térbeli eloszlását, ám nem képesek pontosan és teljes egészében leírni a hullámozás keltette turbulens keveredést. Az eredmények azt mutatják, hogy a hullámozási energia disszipációját turbulens termelésként és keveredésként kell továbbítani a fázisátlagolt áramlást leíró egyenletek felé.

## Tézis 5

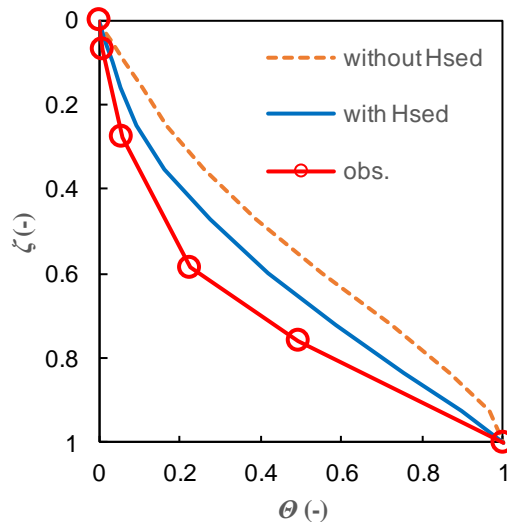
*A meder hóáramának hatása a víz függő menten hőmérséklet eloszlására*

Vizsgálatokon és a függőleges hőmérsékleti profil numerikus modellezésén keresztül kimutattam, hogy a sekély Balaton esetében a meder hóáram nem hanyagolható el akkor, ha a víz hőmérséklet függő menten eloszlását kívánjuk meghatározni.

[1, 7, 9]

A mederüledék és a víz vizsgálati függőben mért hőmérsékletének vizsgálatával kimutattam, hogy gyenge és közepes szél mellett a víz hőmérséklet gradiensét a kevésbé átkevert fenék fölötti határ rétegben a meder és a víztér közötti hóáram határozza meg. A meder-hóáram számításához a mederüledékben mért hőmérséklet-idősorok segítségével felállítottam és kalibráltam egy 1D hővezetési modellt. A meder-hóáram azonos nagyságrendű, mint a vízfelszínen fellépő szenzibilis hóáram és ezért nem elhanyagolható. Noha a meder hóáram nem képvisel jelentős részt a hosszú távú energiamérlegben, mégis jelentősen befolyásolja a hőmérséklet rövidtávú eloszlását.





**5. ábra:** Időátlagolt mért (piros vonal körökkel) és modellezett dimenziómentes hőmérséklet profilok a Keszthely melletti hidrometeorológiai állomáson 2013. 07. 13. és 2013. 07. 29. között a meder hóáramának figyelembe vételével (kék vonal) és anélkül (narancssárga szaggatott vonal).

## A disszertációhoz kapcsolódó publikációk listája

### Lektorált folyóiratok

1. Torma P., Krámer T. 2016 „Modelling wave action in the diurnal temperature stratification of a shallow lake” *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, (beküldve).
2. Torma P., Krámer T. 2016. „Wind shear stress interpolation over lake surface from routine weather data considering the IBL development” *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, (elfogadva).
3. Kiss M, Torma P (2014): „Az energiaáramok fluxus gradiens eljárás alapú becslése örvény-kovariancia mérésekből” *Hidrológiai Közlöny*, 94(4), pp. 48-56.

### Konferencia cikkek

4. Torma, P. 2012. „Towards a hydrodynamic forecasting system for Lake Balaton” In: Józsa János, Lovas Tamás, Németh Róbert (eds.), *Proceedings of the Conference of Junior Researchers in Civil Engineering*, Budapest University of Technology and Economics, Budapest, Hungary, pp. 255-261.
5. Krámer, T., Józsa, J., Torma, P. 2012. „Large-scale mixing of water imported into a shallow lake” In: *3rd International Symposium on Shallow Flows*. Iowa, USA, pp. 354-357.
6. Torma, P. 2014. „Balatoni modellek” In: Váradi József (ed.) *A víz hiánya és többlete mint potenciális veszélyforrás konferencia*. Budapest, Hungary, pp. 89-103.

### **Konferencia absztraktok**

7. Torma, P., Krámer, T. 2015. „Modeling wind-induced hydrodynamics of shallow Lake Balaton” *FVCOM Users workshp*, Bedford Institute of Oceanography, Dartmouth, Canada.
8. Torma, P. 2013. „Assisting floodrisk management behind levees and lake storm warning using hydroinformatics” In: *International Doctoral Symposium in Structural and Hydraulic Engineering: Disaster Prevention, Mitigation and Restoration*. Hokkaido University, Sapporo, Japan, p. B11.
9. Torma, P. 2011. „3D turbulence modelling extended to thermal stratification” In: *5th European Postgraduate Fluid Dynamics Conference*. Göttingen, Germany, p. 16.

### **Egyéb**

10. Torma, P., Homoródi, K., Krámer, T. 2014. „A Marina Fűzfő kishajó-kikötő hullámtörő mólójának áramlástanai és üledékdinamikai hatásai” *Kutatási jelentés*, BME Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszék, p. 39.