



BUDAPESTI MŰSZAKI
ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM
Építőmérnöki Kar - építőmérnöki képzés 1782 óta

Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszék



A Balaton áramlásának, hőmérsékleti viszonyainak és határfelületi cserefolyamatainak modellezése és mérése

Torma Péter

egyetemi docens
torma.peter@epito.bme.hu

2020. december 16.

Áttekintés

i. Doktori kutatások (2011-2016)

- 3D tómodell fejlesztése, igazolása
- Szélmező interpoláció kidolgozása
- Vízhőmérséklet és rétegzettség szimulációk

ii. Mérési kampányok (2018, 2019)

- Határfelületi cserefolyamatok
- Tó energiaháztartása

iii. Tavi szél mérési kampány (2020)

Doktori kutatásom célkitűzései

- i. 3D Reynolds-átlagolt numerikus hidrodinamikai modell adaptálása és igazolása a Balatonra, amely előrejelzésre is alkalmas.
- ii. Szélmodell fejlesztése, amely képes a tó feletti szélmező térbeli változékonyságát leírni a hidrodinamikai modellezés igényeinek megfelelően, hagyományos meteorológiai mérések alapján.
- iii. A tó energiaháztartását meghatározó komponensek számítása, igazodva a szokásos, rendelkezésre álló hidrometeorológiai mérésekhez.
- iv. A tó térbeli hőmérséklet eloszlásának modellezése. Ehhez az adaptált hidrodinamikai modell turbulens keveredés leíró moduljának továbbfejlesztése.

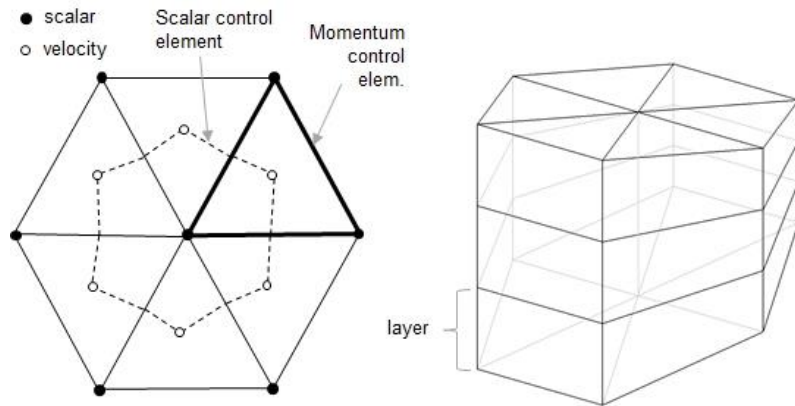
Tavi hidrodinamikai modell

- FVCOM (Finite Volume Community Ocean Model)
- Reynolds-átlagolt Navier-Stokes egyenletek,
- Smagorinsky és Mellor-Yamada v2.5 turbulencia modell,
- hidrosztatikus,
- másodrendű véges térfogat séma,
- párhuzamosított,
- időbeli diszkretizáció osztott (mode-splitting):
 - nagy időlépéssel 2D (external time step), mélység-átlagolt egyenletek alapján felszín
 - adott időlépésenként 3D áramkép a már számított vízfelszínhez.

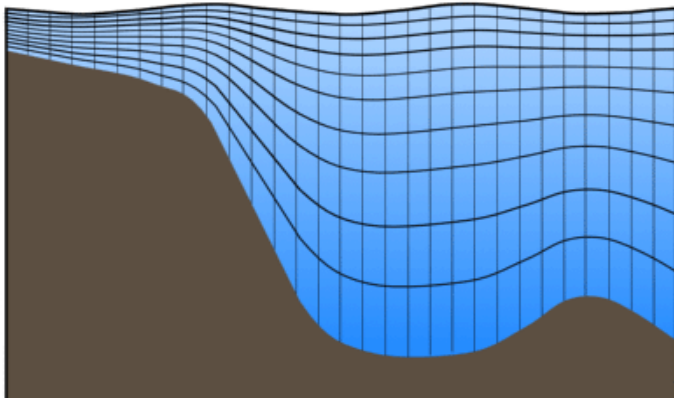
Rövid futási idő, így rövidtávú előrejelzésre is alkalmas nagy térbeli felbontás mellett is.

Térbeli diszkretizáció

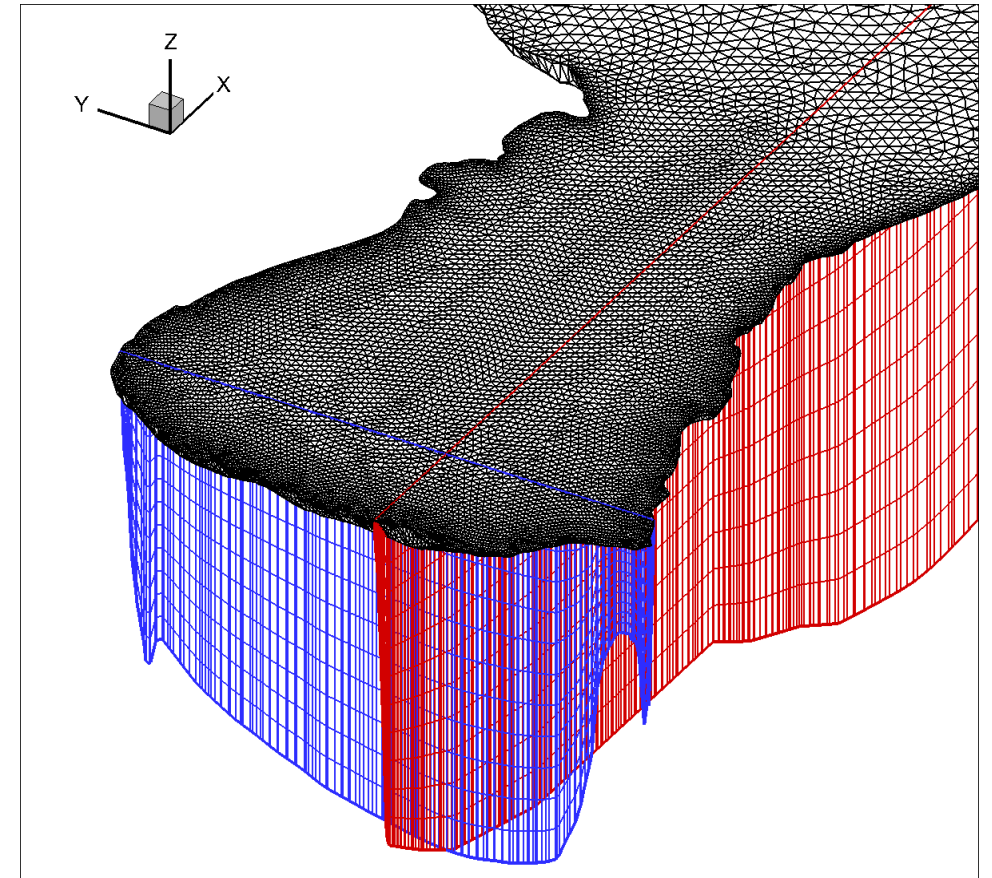
Vízszintesen: háromszög háló,



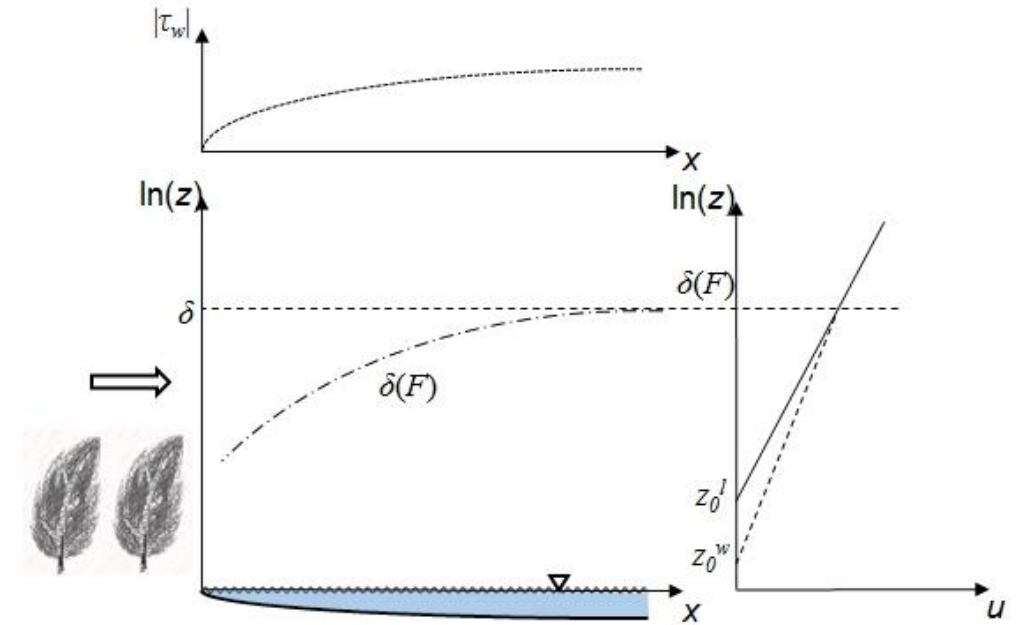
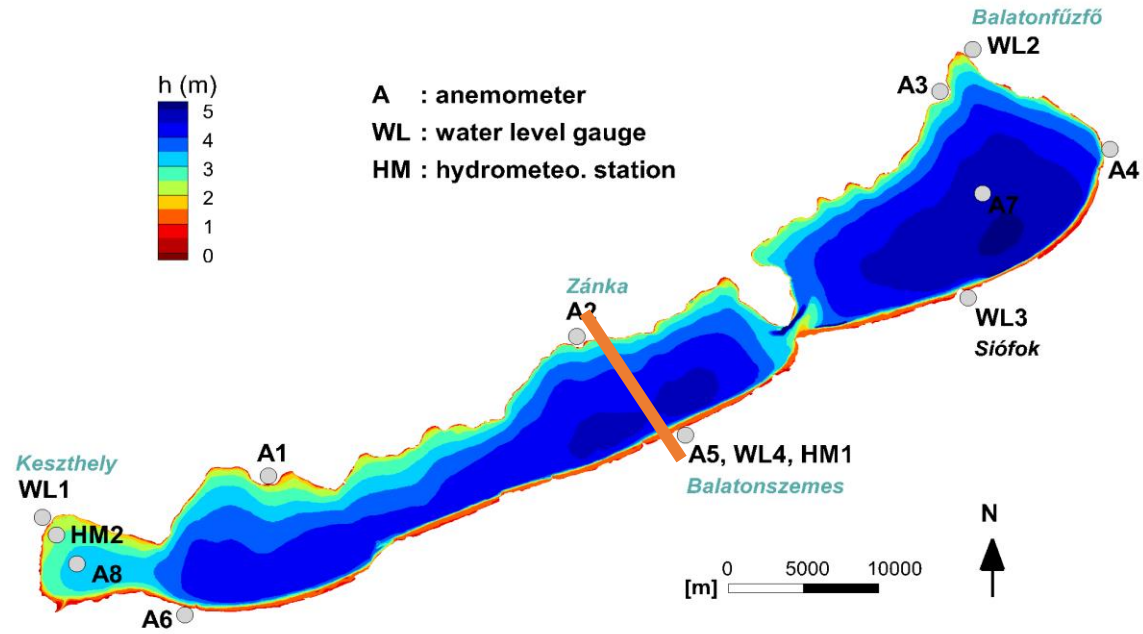
Függőlegesen: σ -koordináta,



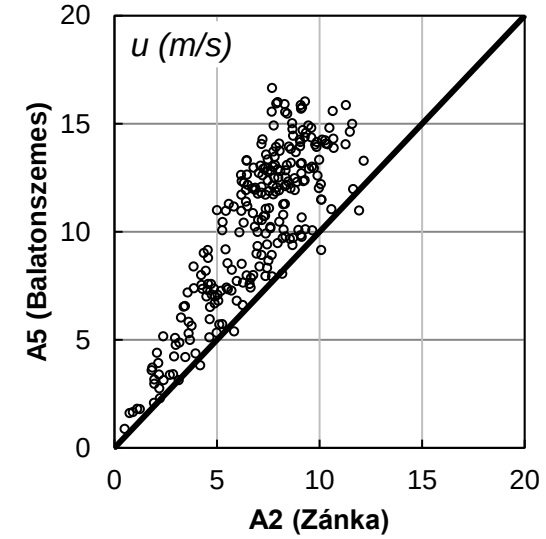
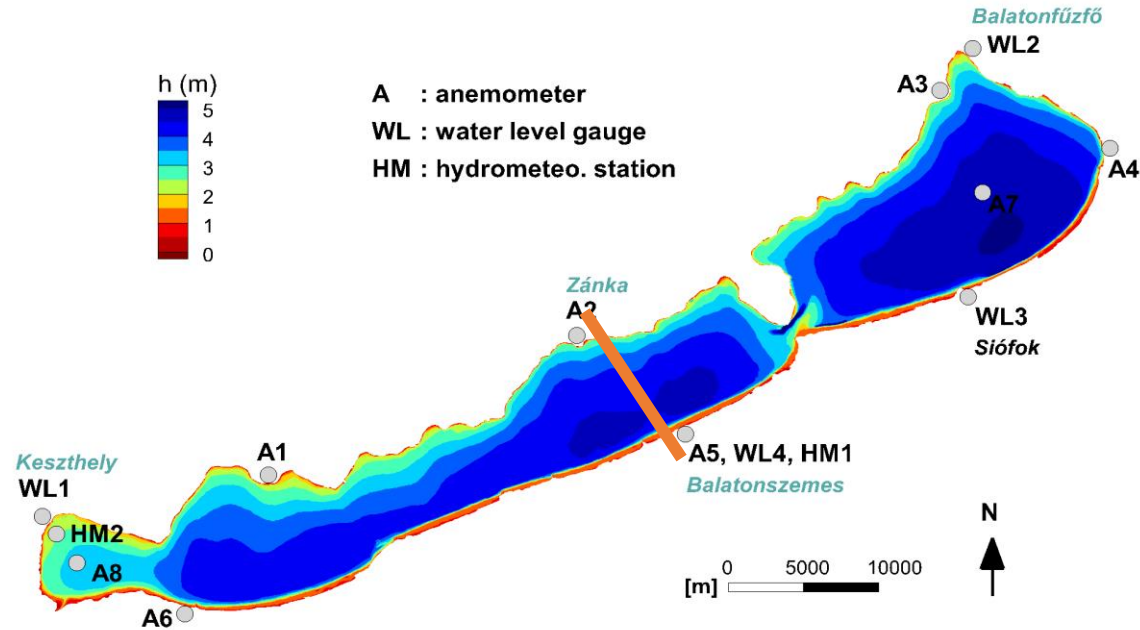
©The COMET Program



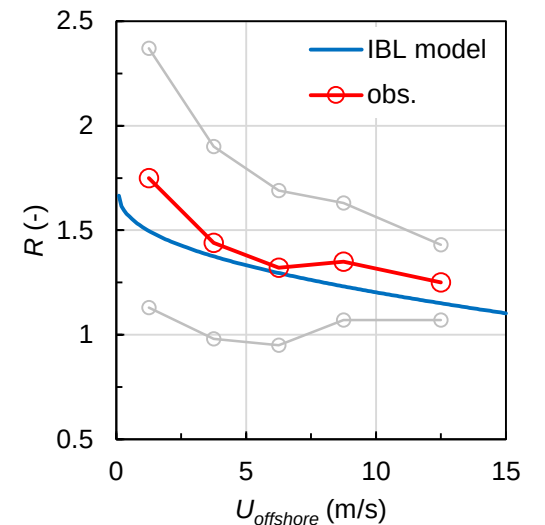
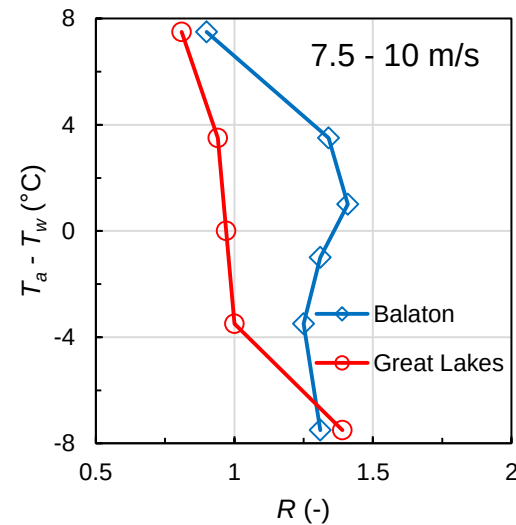
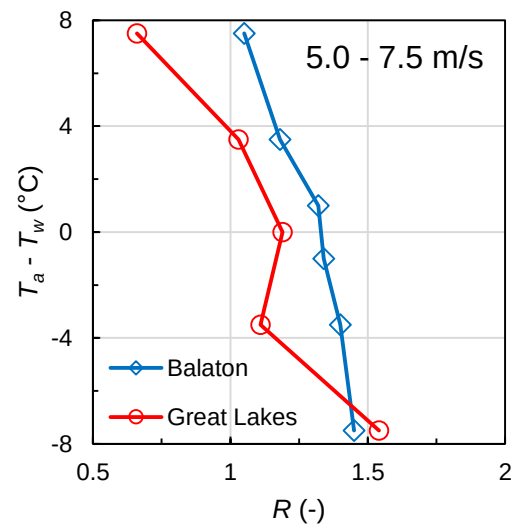
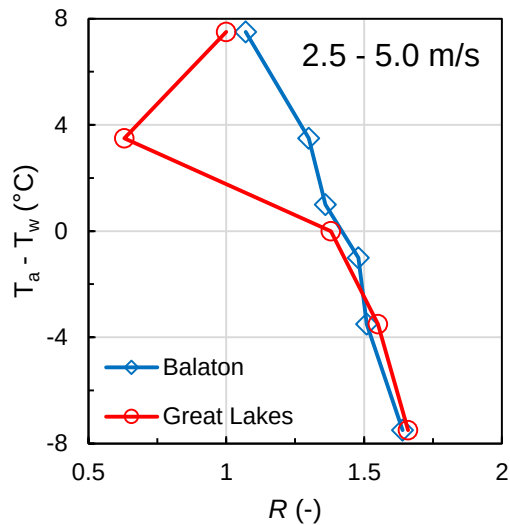
Belső határréteg a Balaton felett



Belső határréteg a Balaton felett



$$R = \frac{u_{A5}}{u_{A2}}$$

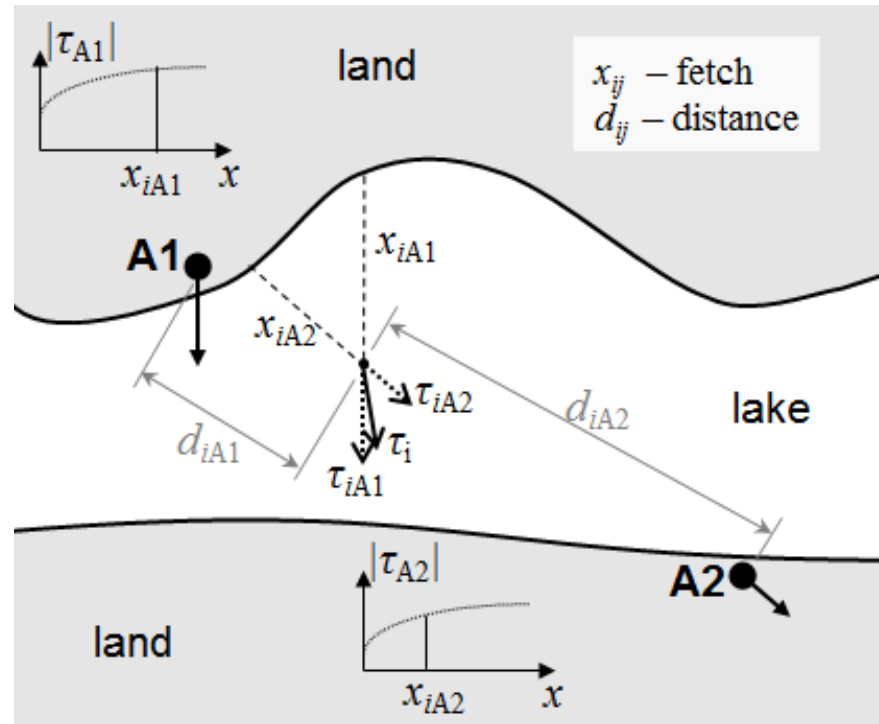
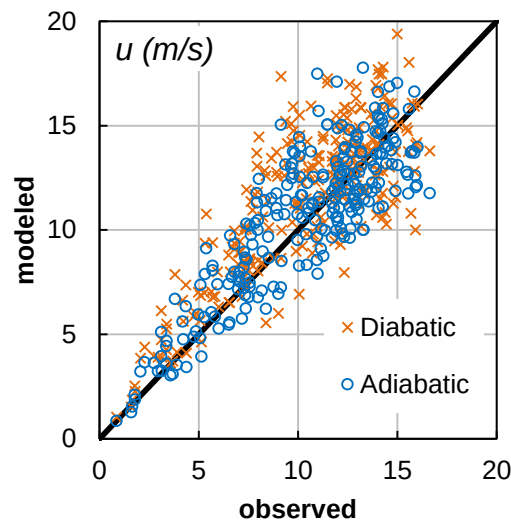
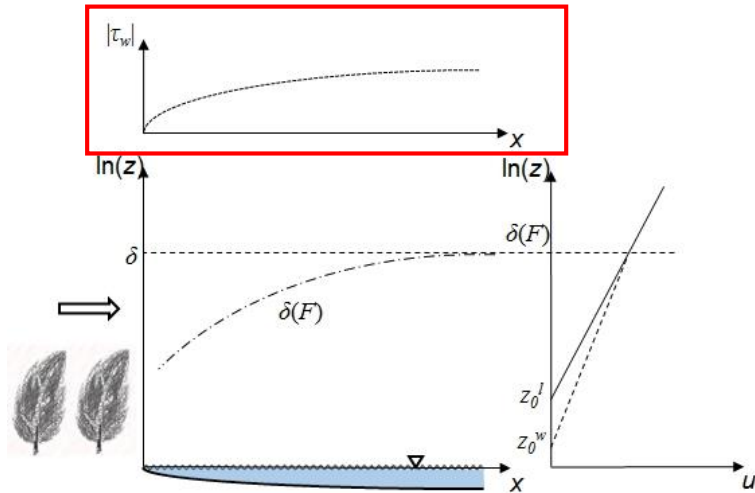


Vízszintes síkú szélmező interpoláció

Szél-csúsztatófeszültség mezők száma = szélmérők száma

A szélmérőtől vett távolság reciprokával súlyozunk
(inverse distance weighting, IDW)

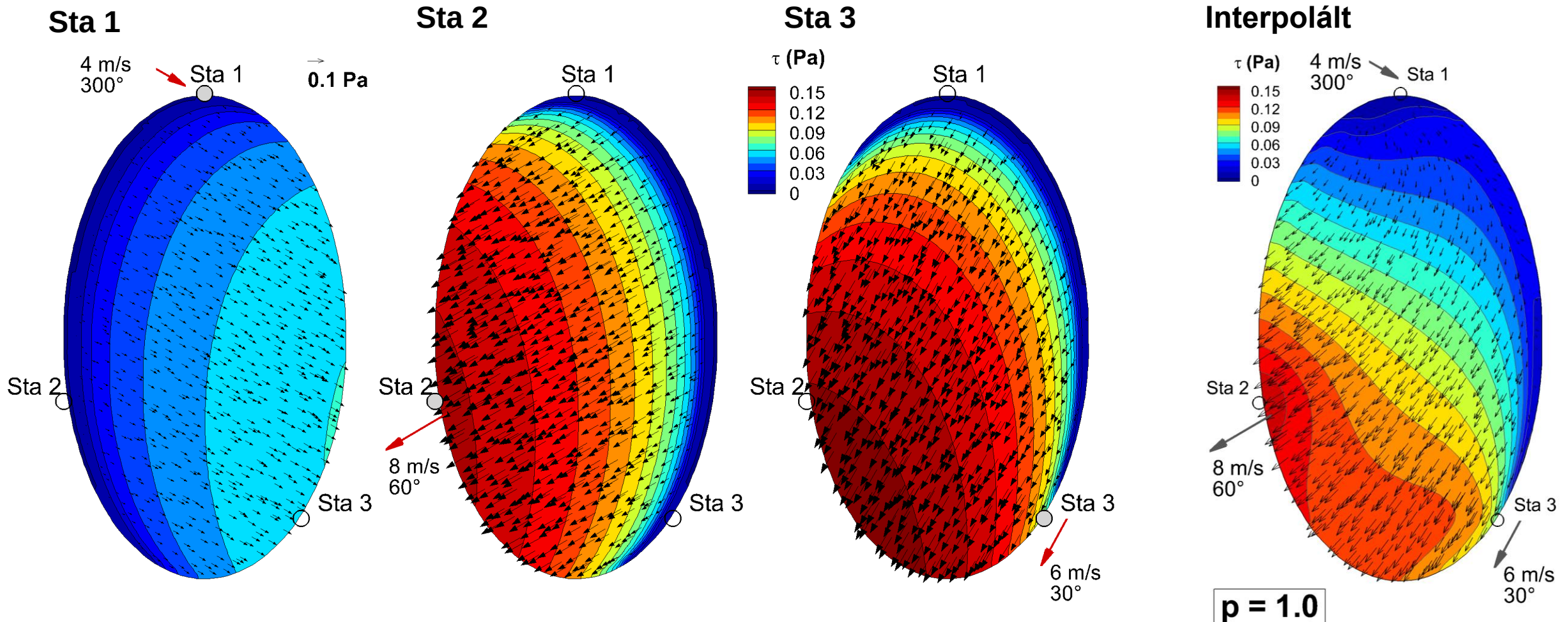
szabad paraméter: p hatványkitevő



$$\tau_i = \sum_{j=1}^N \frac{w_{ij} \cdot \tau_{ij}}{\sum_{j=1}^N w_{ij}}$$

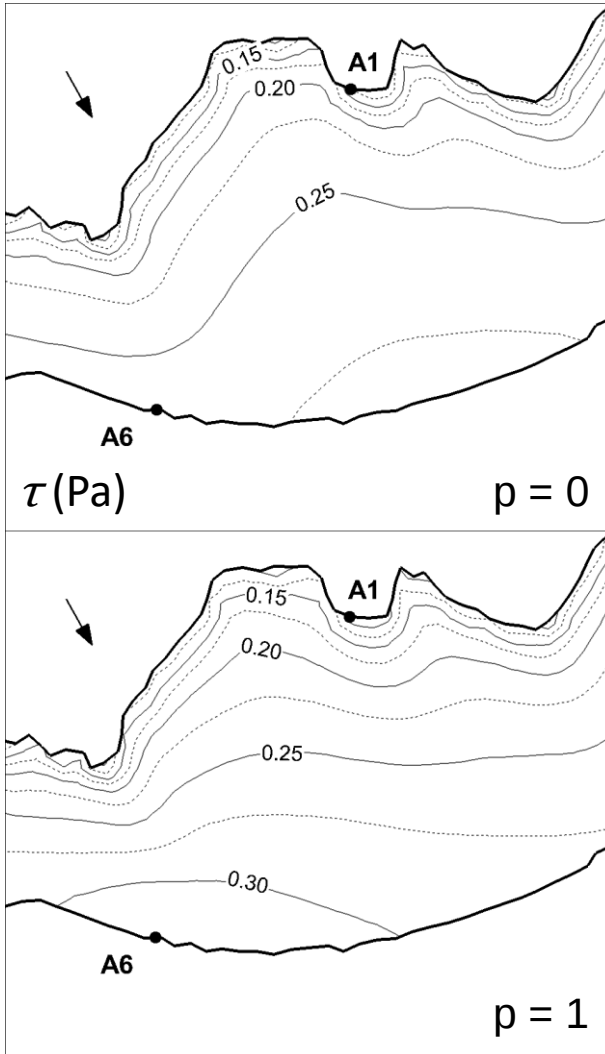
$$w_{ij} = \frac{1}{d(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j)^p}$$

Példa a szél-csúsztatófeszültség mező interpolációra

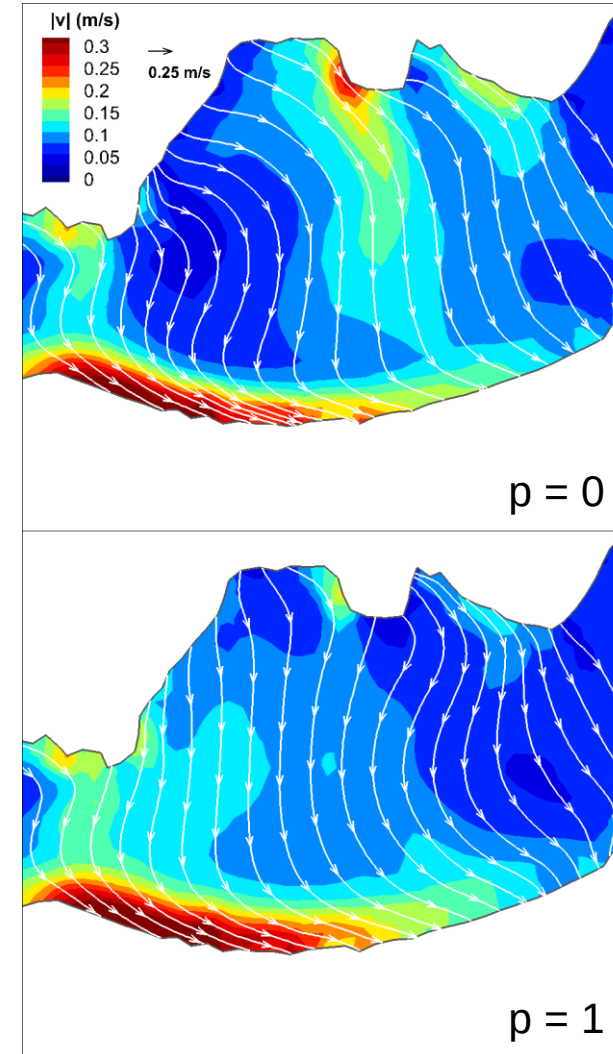


Szélmező változékonyságán hatása áramképre

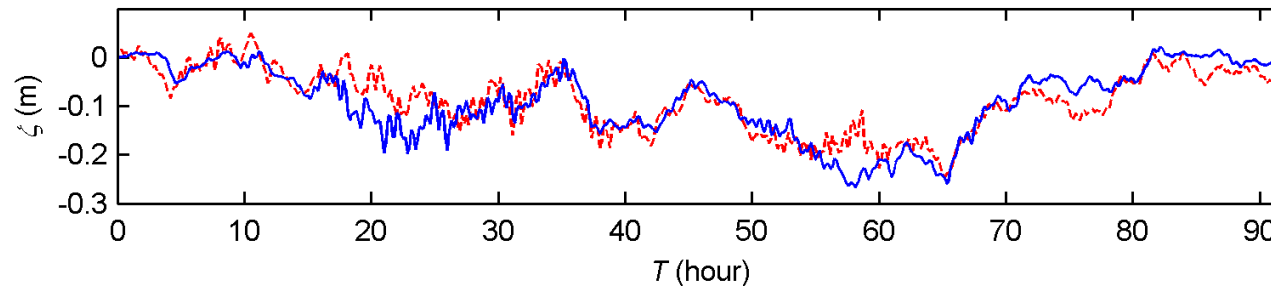
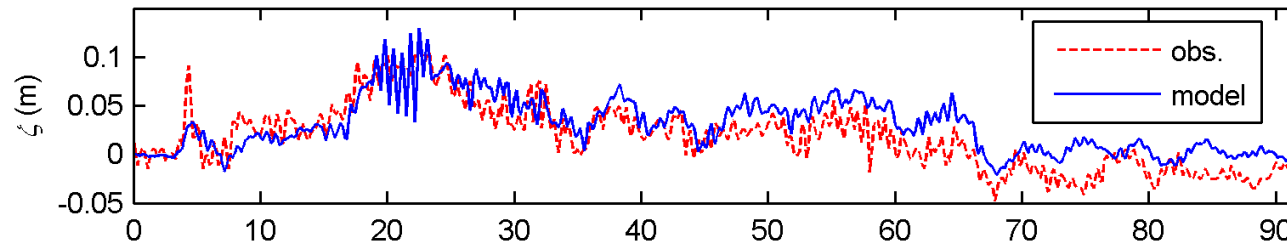
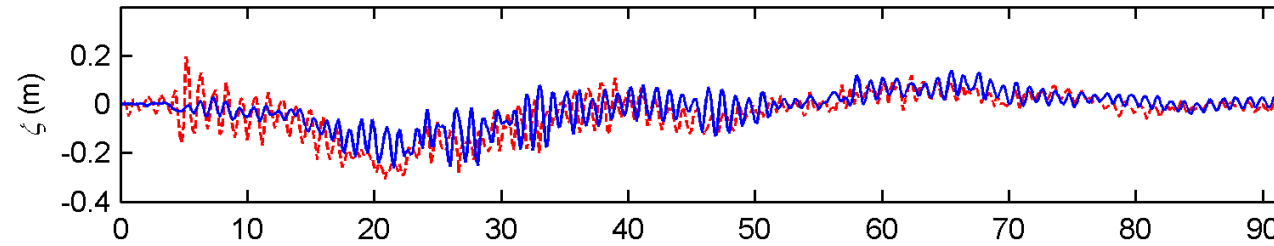
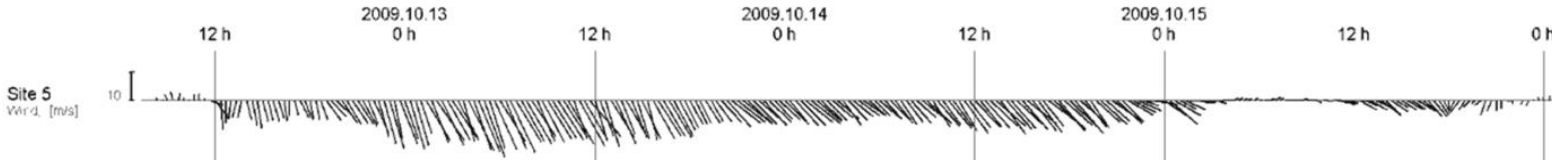
Szél-csúsztatófeszültség



Felszíni áramlás



Kalibráció és validáció: vízfelszín-kilendülés alapján



$$U_z = \frac{u_*}{\kappa} \cdot \left(\ln \left(\frac{z}{z_0} \right) - \psi_m \left(\frac{z}{L} \right) \right)$$

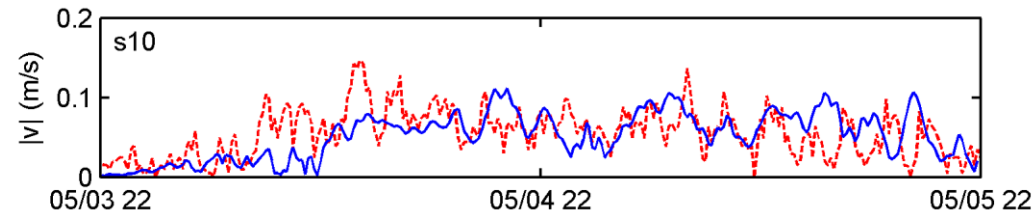
Charnock-képlet:

$$z_0 = \alpha \frac{u_*^2}{g}$$

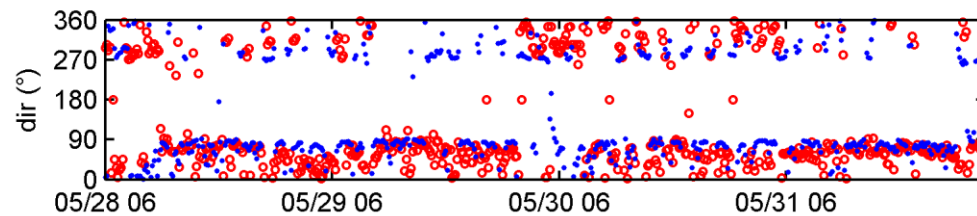
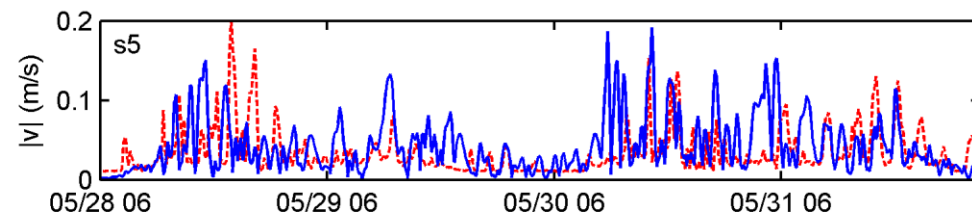
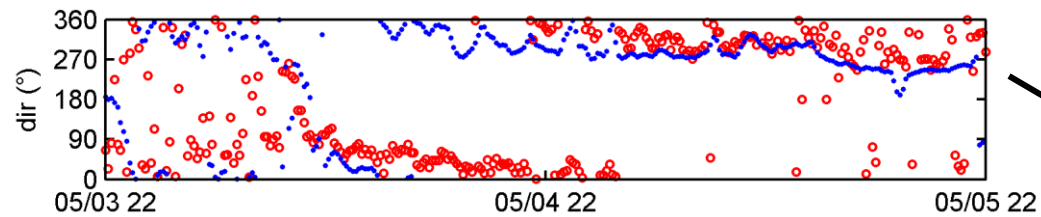
Irodalom alapján:

$$\alpha = 0.01 \div 0.02$$

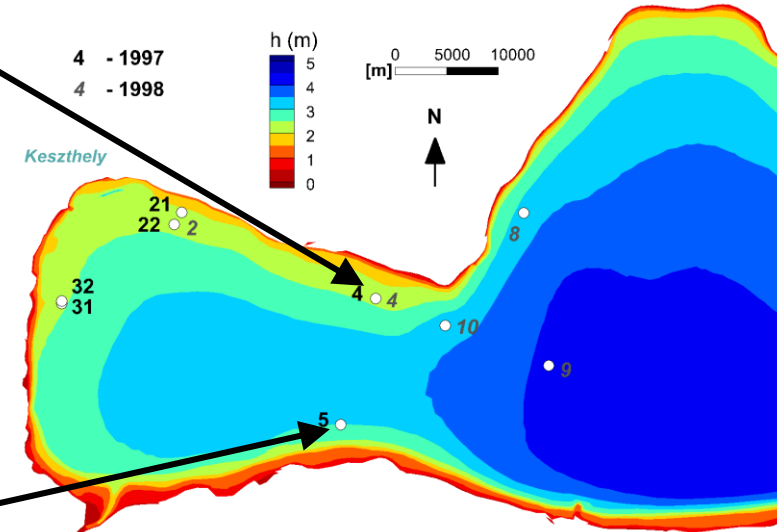
Kalibráció és validáció: áramlások segítségével



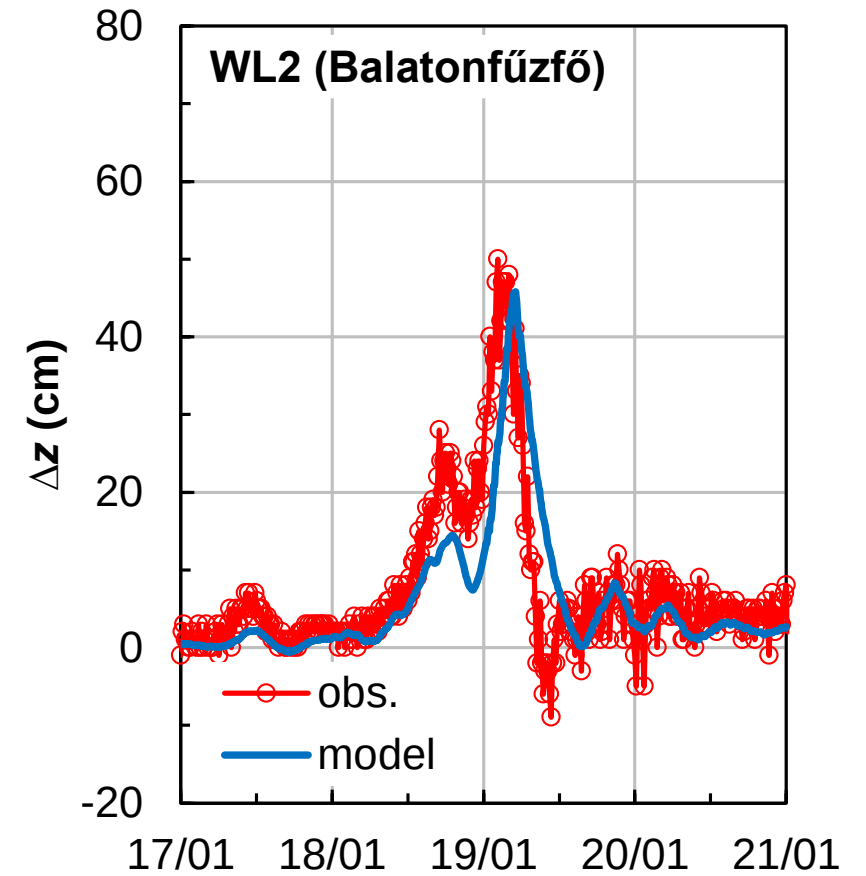
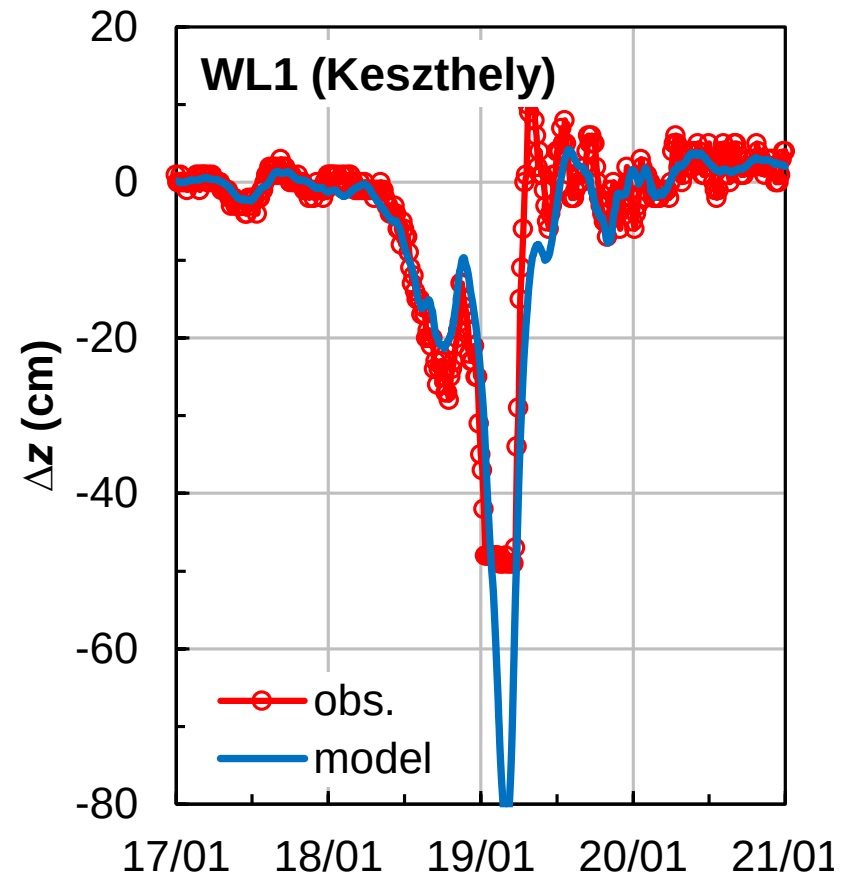
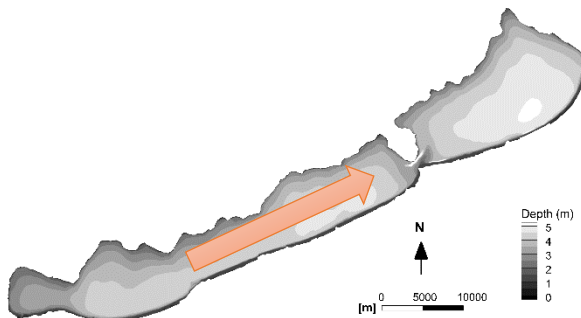
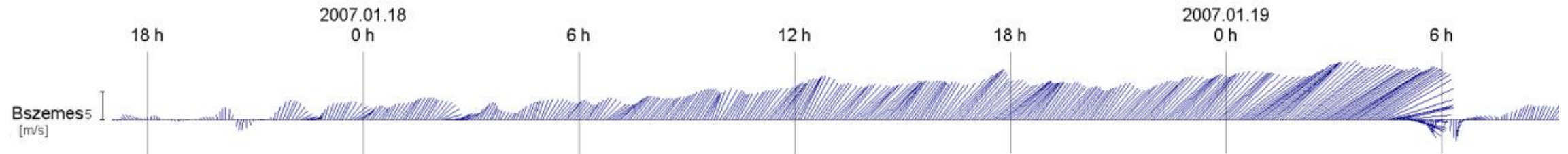
1998



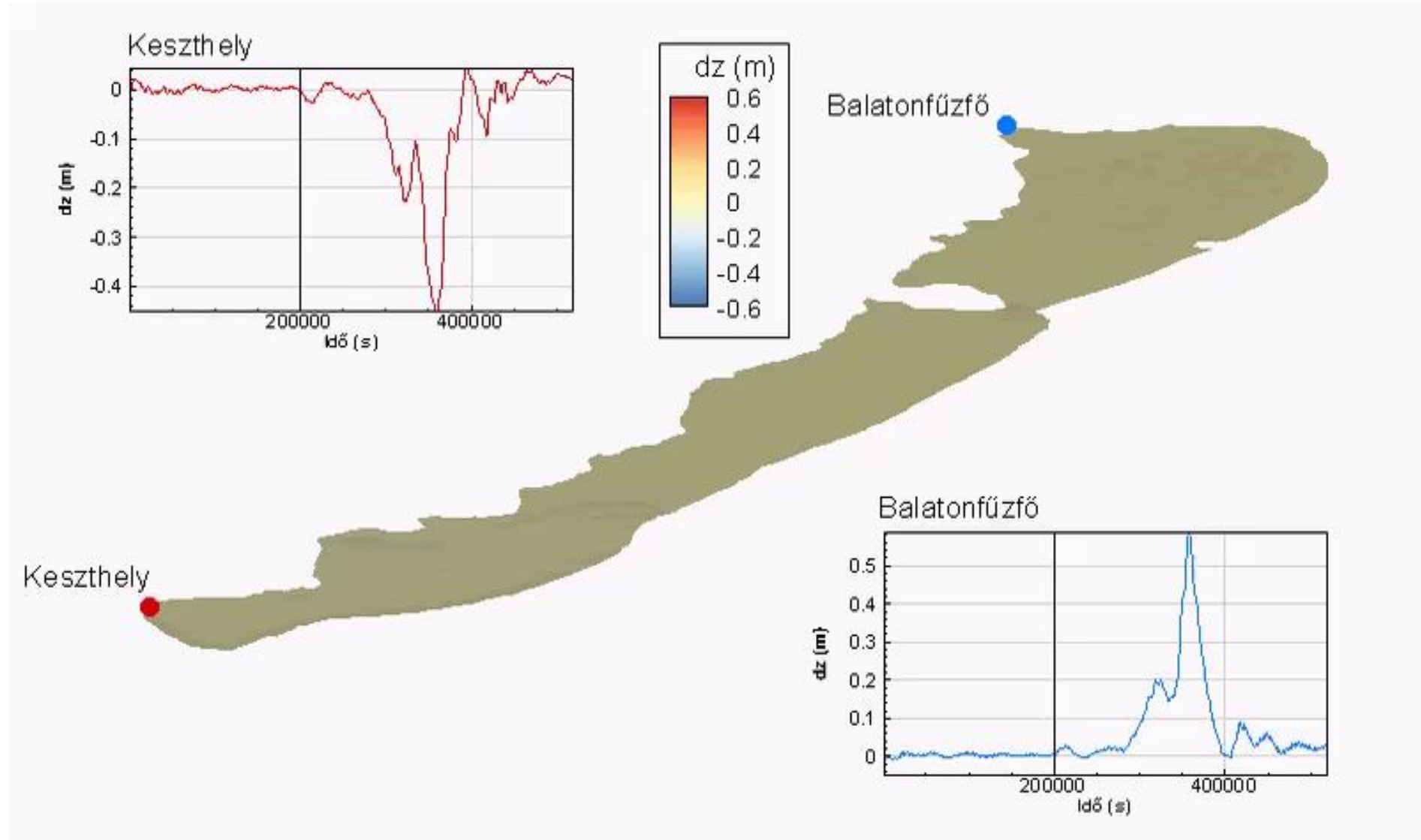
1997



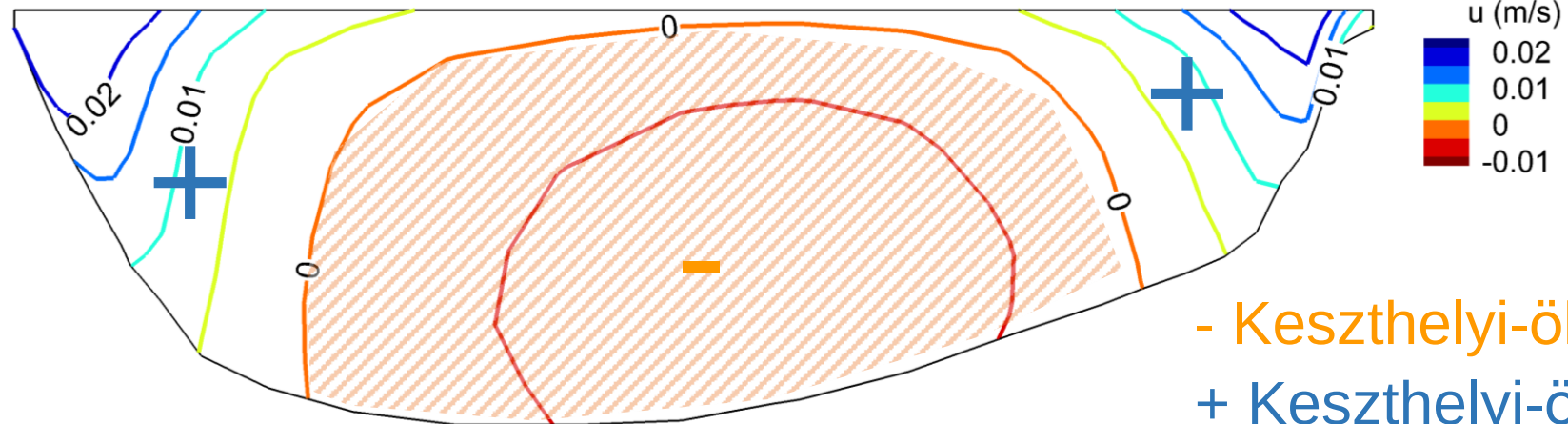
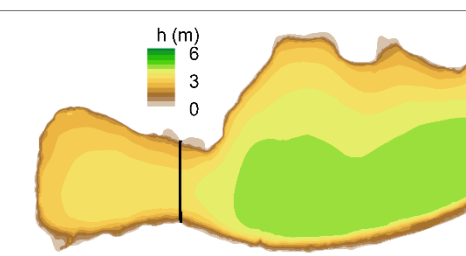
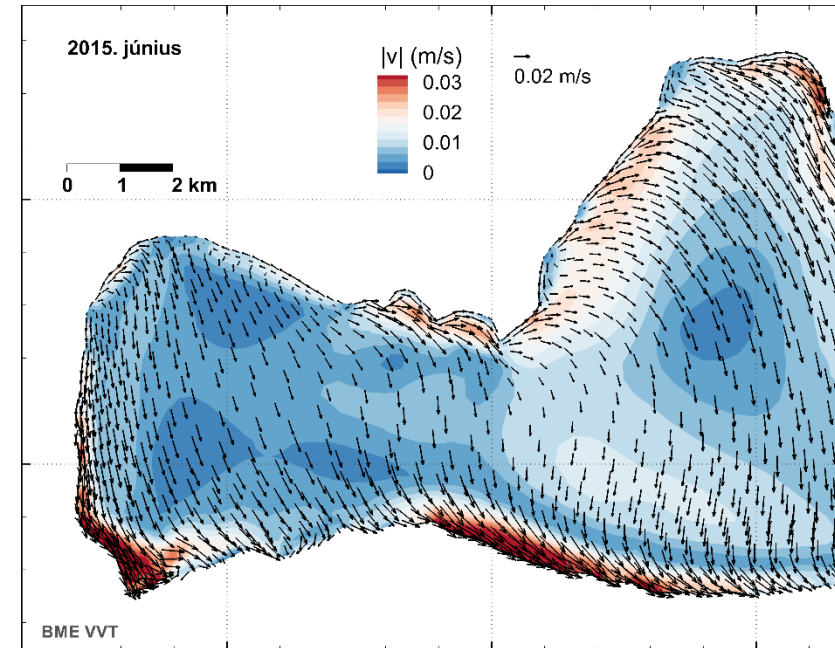
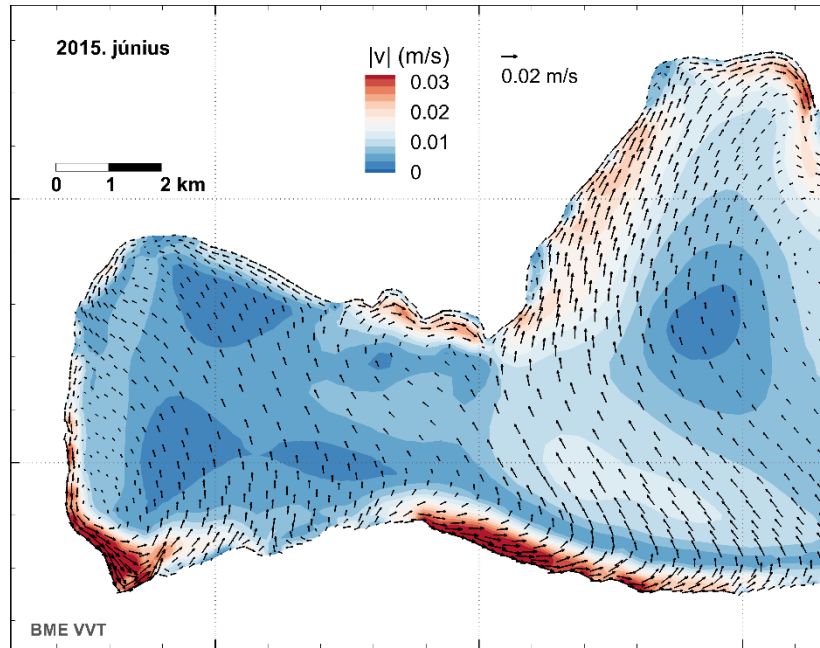
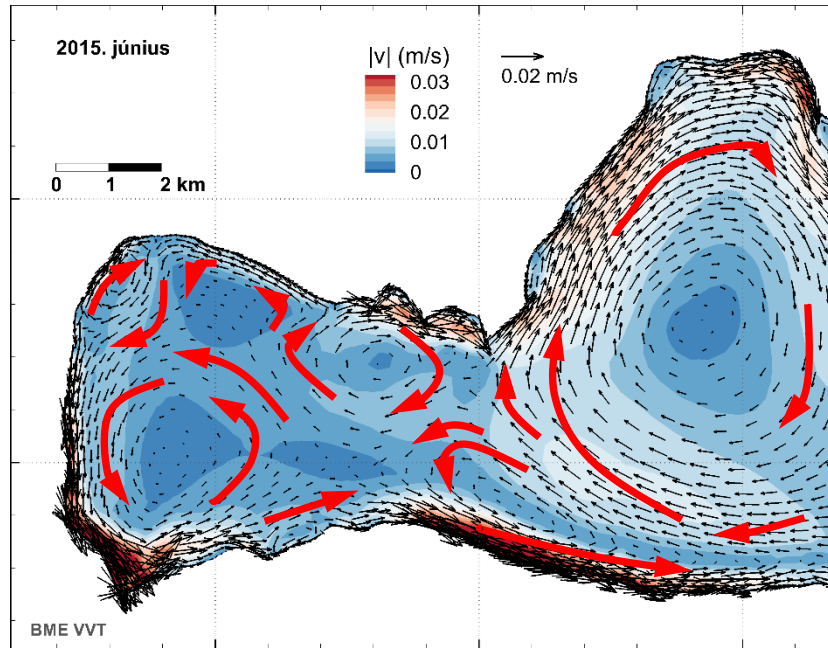
Egy extrém eset: Kyrill vihar



Egy extrém eset: Kyrill vihar

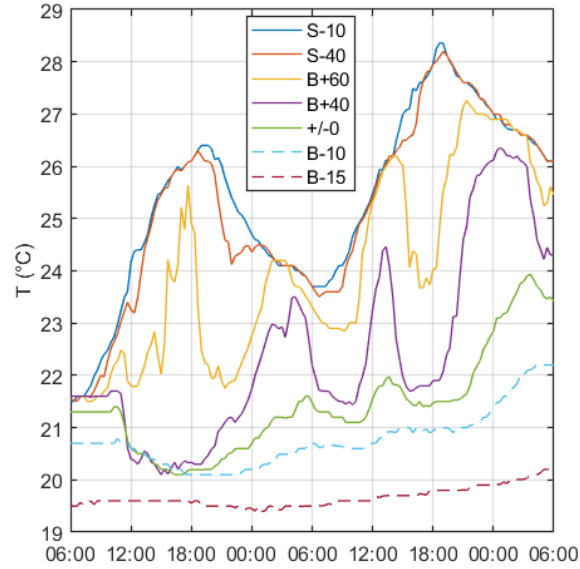


Balaton térbeli áramlási jellemzőinek vizsgálata

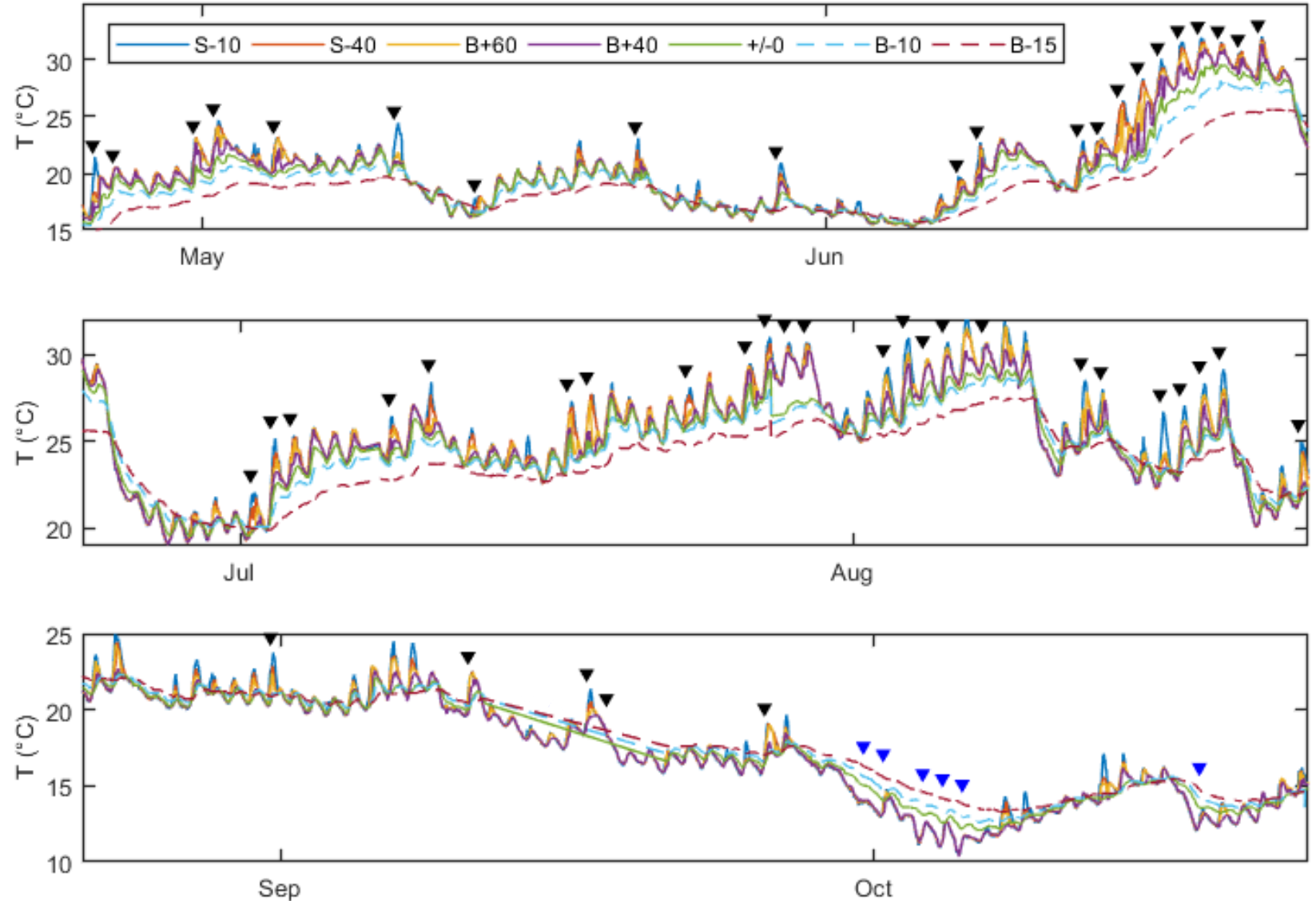


- Keszthelyi-öbölbe (Ny-ra)
+ Keszthelyi-öbölből (K-re)

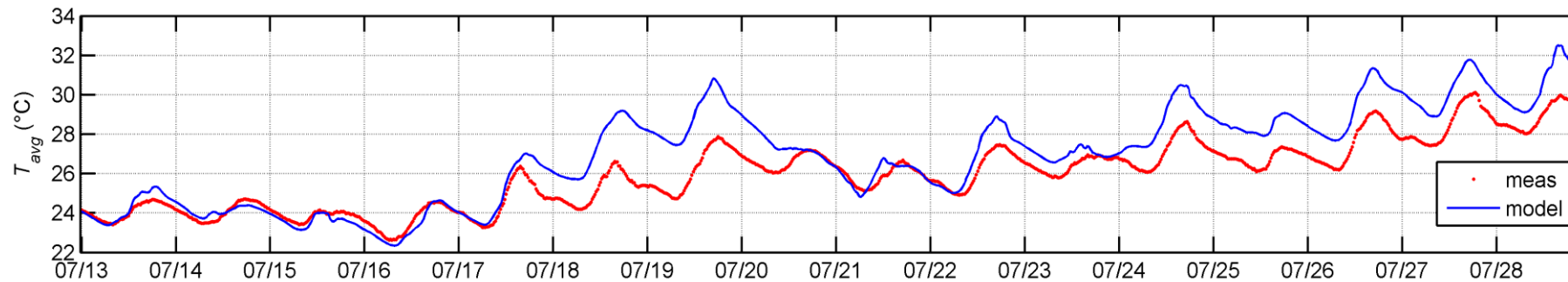
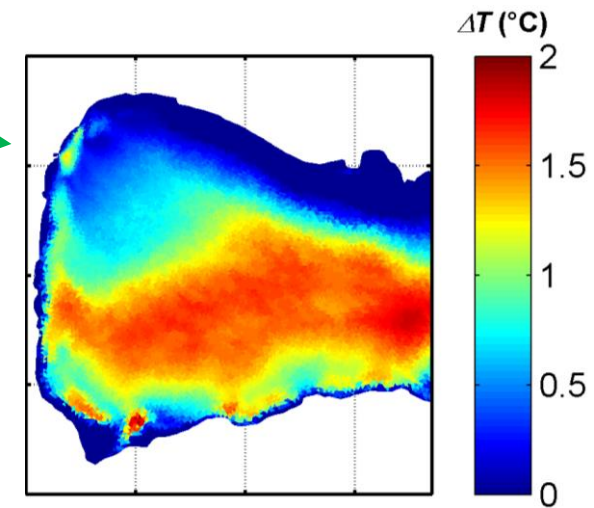
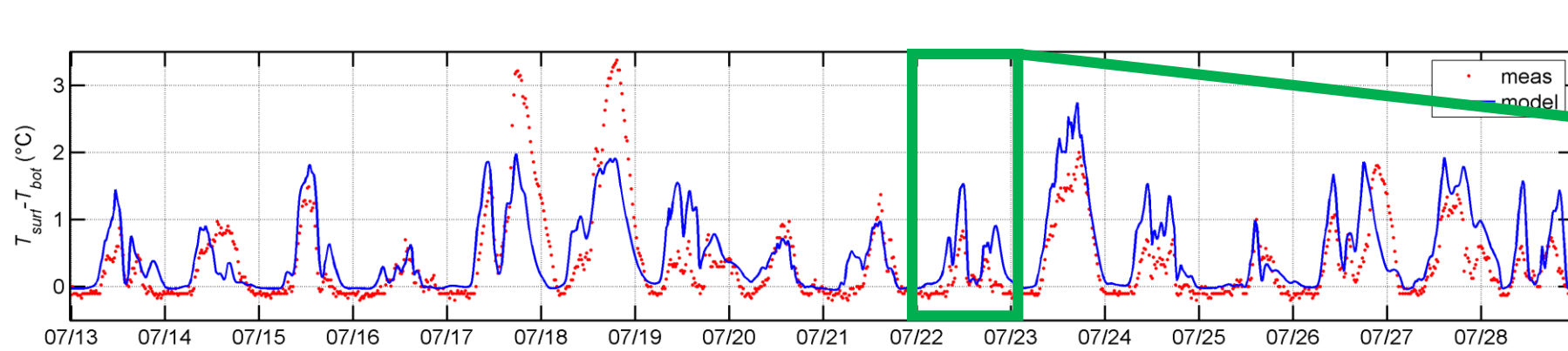
Napi ciklusú hőmérsékleti rétegződés



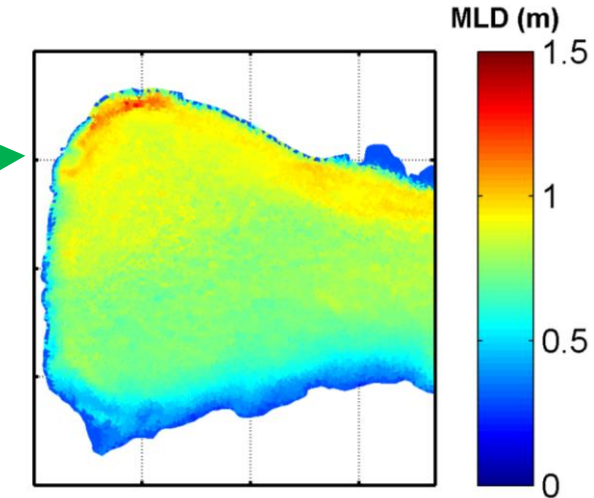
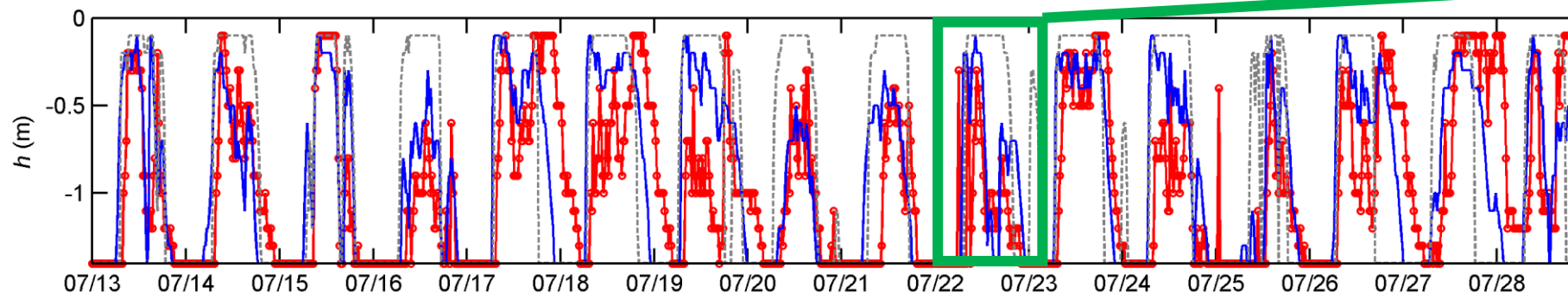
- 1 $^{\circ}\text{C}$ eltérés legalább 8 órán át
- 2013-ban:
 - Stabil: 55
 - Instabil: 6



Mért és modellezett hőmérséklet idősorok



Átkeveredett rétegvastagság



Rétegzettség kialakulásának egyszerűsített elvi feltétele

Szél keltette keveredés:

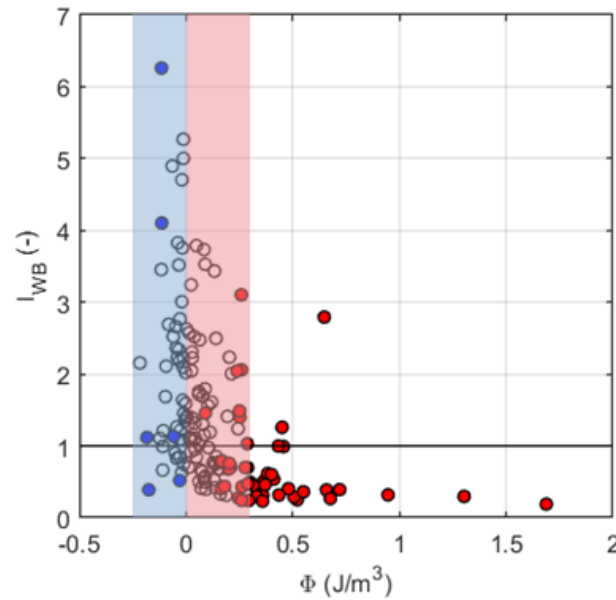
$$\sim \frac{u_*^3}{h}$$

Felszíni hőáramok indukálta rétegződés:

$$\sim \frac{u_f^3}{h} = -\frac{\alpha g \tilde{H}}{\rho c_p}$$

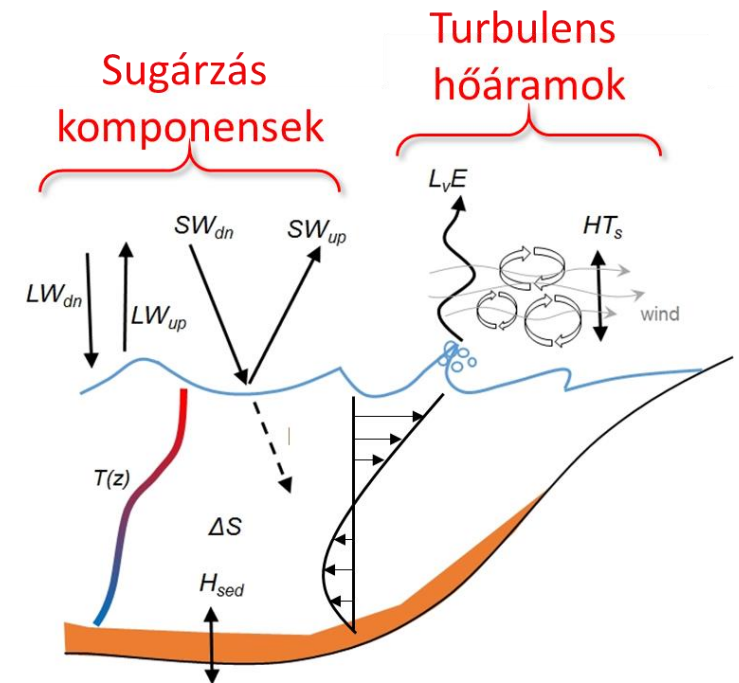
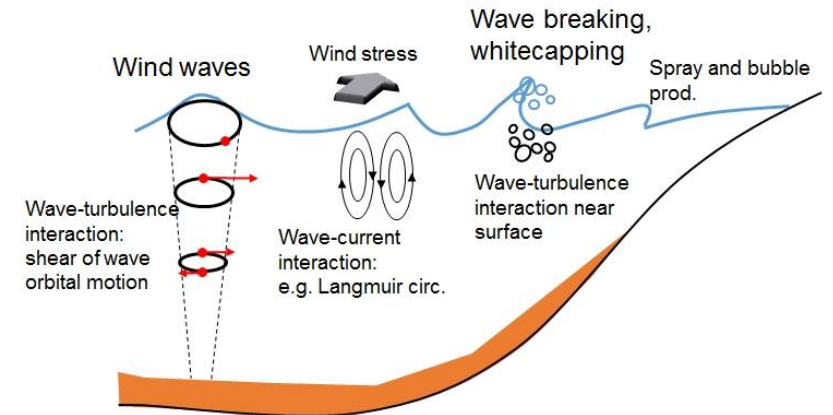
$$\Downarrow$$

$$I_{WB} = -\frac{u_*}{u_f}$$



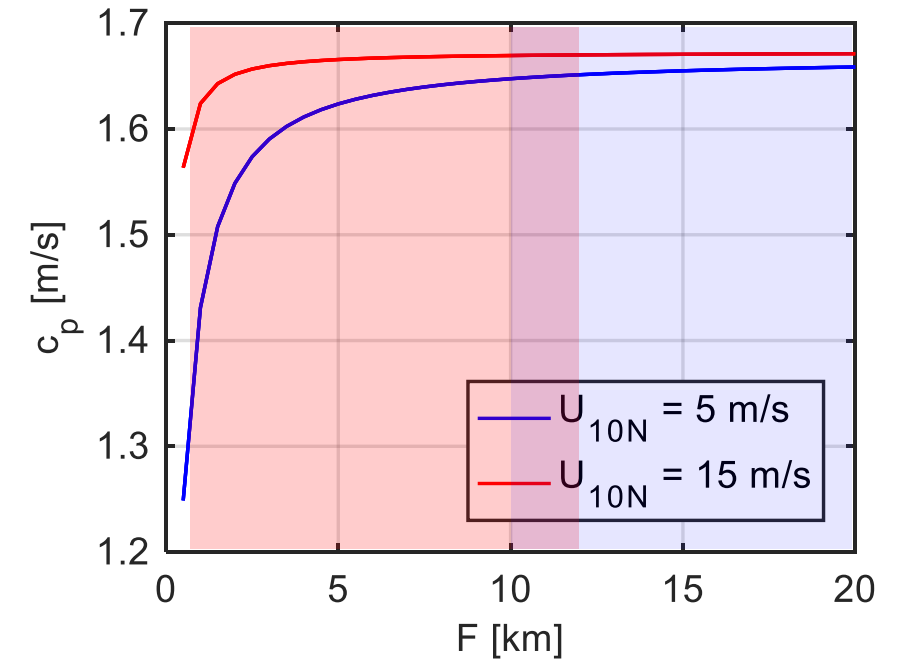
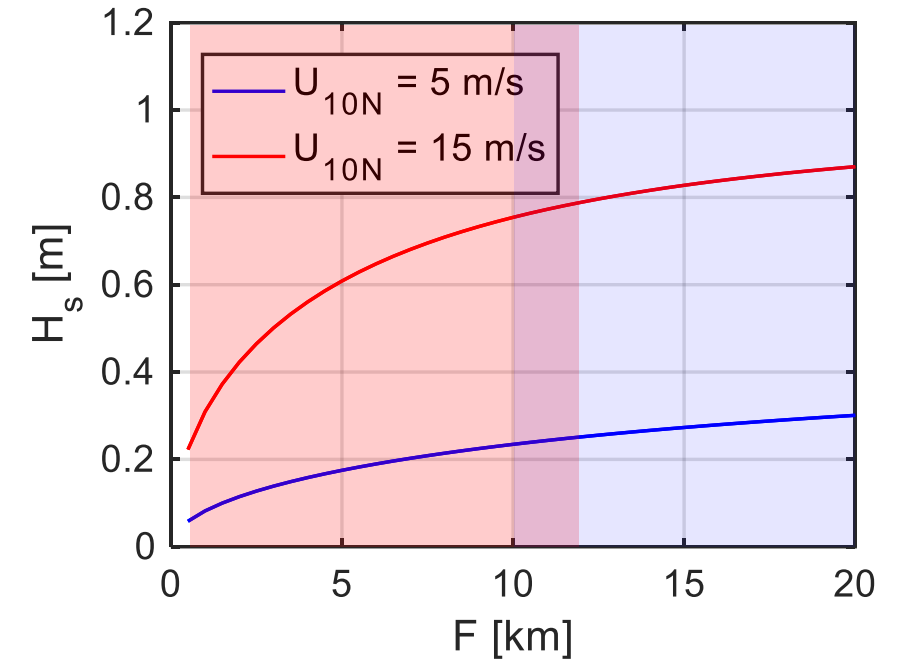
ϕ – rétegzettség erőssége

$$\phi = \frac{g}{h} \int_0^h [\bar{\rho} - \rho(z)] z dz$$



Meghajtási hossz szerepe

- jelentősen befolyásolja a hullámozás jellemzőit (H_s , c_p)
 - ezáltal a vízfelszín érdességét is
 - változik az ellenállás is
 - vízoldali keveredés
- óceáni körülmények $F > 10$ km
- Balaton $F \sim 8$ km
- hullámkor: $c_p/u_* \rightarrow$ fiatal hullámok



Balatoni jellemzői

- Meghajtási hossz limitált környezet: $F \sim 2\text{-}12 \text{ km}$

→ Tipikus hullámmagasság:

$$H_s = 20\text{-}50 \text{ cm}$$

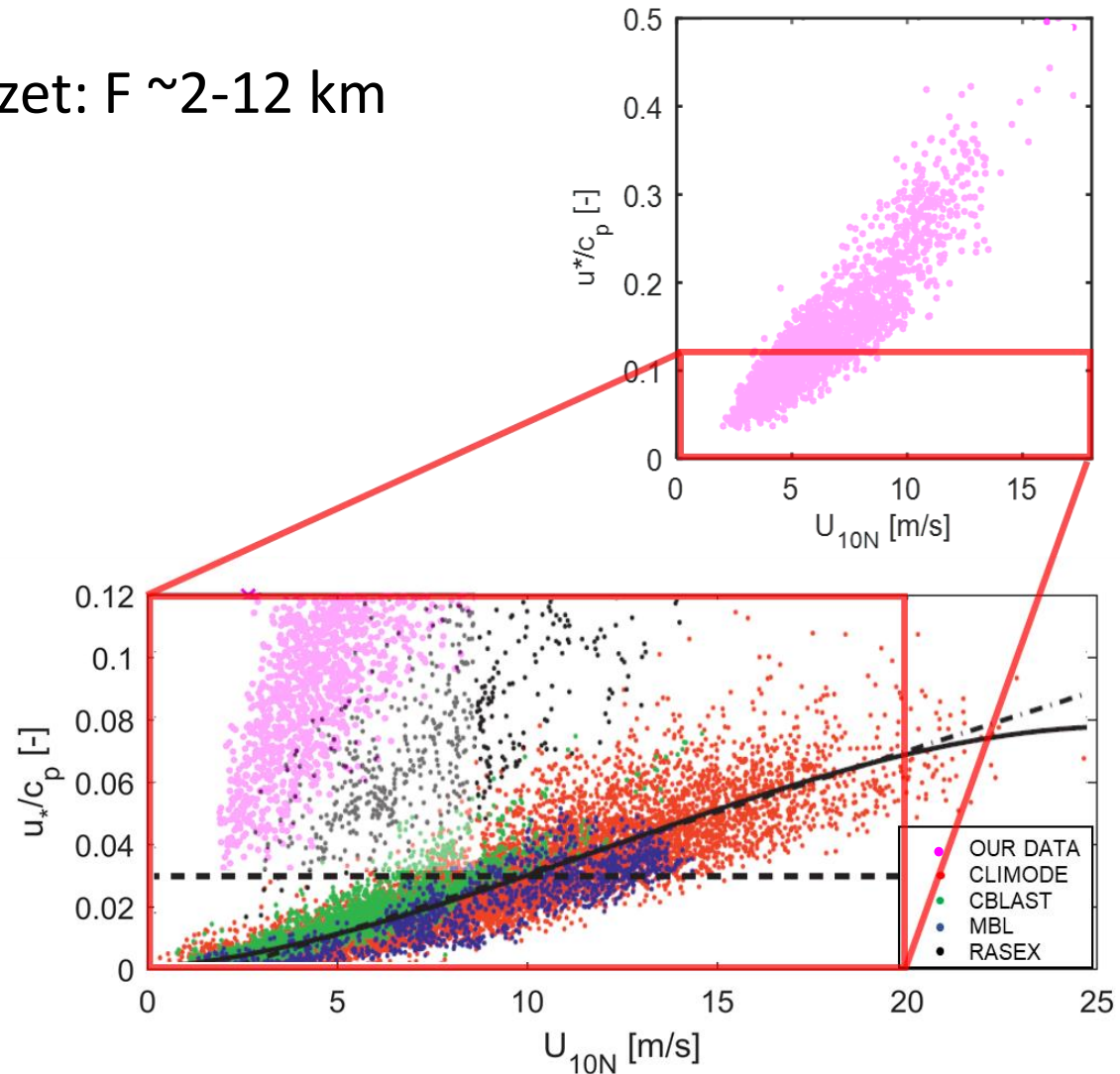
→ Alacsony fázissebesség:

$$c_p = 1.3\text{-}1.7 \text{ m/s}$$

→ Fiatal hullámok:

$$u_*/c_p > 0.1$$

- **Oceanográfiai összefüggések nem alkalmazhatók!**



Mérési kampány 2018 (1 hónap)

Station A:

$H = 1.4 \text{ m}$

$F = \sim 100 \text{ m}$



Station B:

$H = 3.3 \text{ m}$

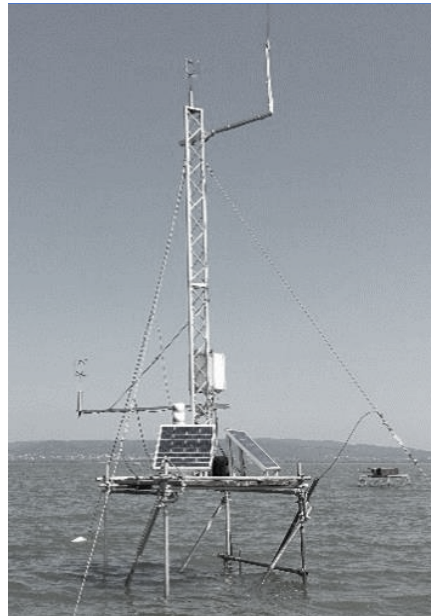
$F = \sim 3.5 \text{ km}$



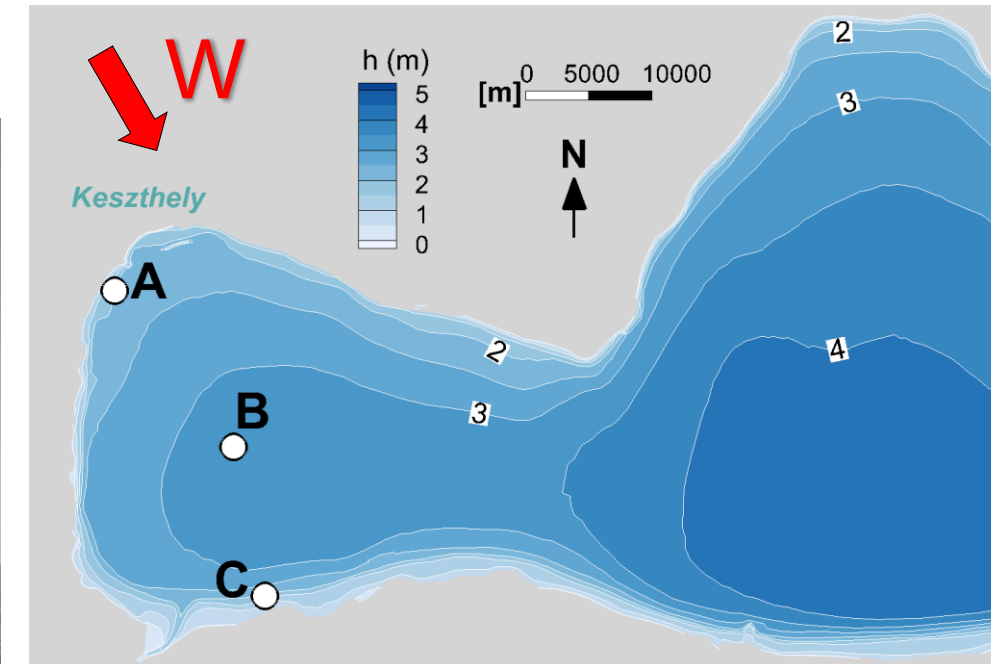
Station C:

$H = 1.5 \text{ m}$

$F = \sim 6 \text{ km}$



First Micrometeorological research
within Croatian-Hungarian collaboration



Műszerezettség

Station B:

Légköri oldal:

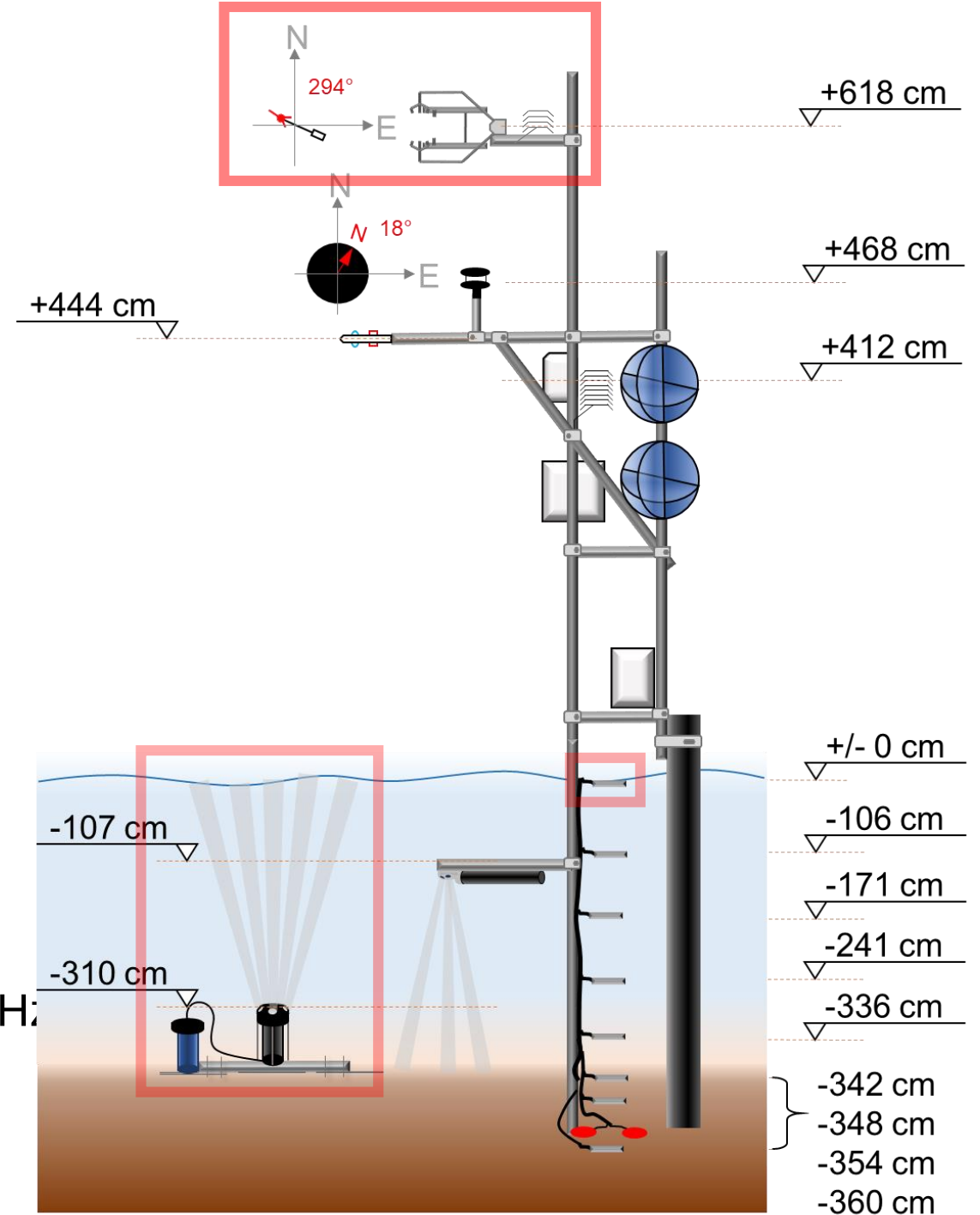
- Örvény-kovariancia (CSAT3+EC150) – 10 Hz
- Nettó sugárzás (Kipp & Zonen CNR4)
- Léghő- és nedvességmérő (HMP45)
- 2D anemométer (Campbell Windsonic)

Vízoldal

- Termisztorlánc 5+3 (Campbell T107)
- Hőárammérő (Hukseflux)
- Wave (Nortek Signature) – 4 Hz
- Sebességprofil (Nortek Aquadopp)

Station C:

- Szónikus anemométer (Gill Windmaster) – 10 Hz
- Léghő- és nedvességmérő (HMP45)
- Termisztorlánc (Campbell T107)



Turbulens áramok összefüggései

$$\rho_a \cdot u_*^2 = \rho_a \cdot (-\overline{u'w'}) = \rho_a \cdot C_{Dz} \cdot U_z^2$$

$$HTS = \rho_a \cdot c_{pH} \cdot \overline{T'w'} = \rho_a \cdot c_{pH} \cdot T_* \cdot u_* = \rho_a \cdot c_{pH} \cdot C_{Hz} \cdot U_z \cdot (T_z - T_0)$$

$$LvE = \rho_a \cdot \lambda \cdot \overline{q'w'} = \rho_a \cdot \lambda \cdot q_* \cdot u_* = \rho_a \cdot \lambda \cdot C_{qz} \cdot U_z \cdot (q_z - q_0)$$

pl. impulzusáram:

$$u_*^2 = C_{Dz} \cdot U_z^2$$

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

Monin-Obukhov hasonlósági elmélet

$$U_z = \frac{u_*}{\kappa} \cdot \left(\ln\left(\frac{z}{z_0}\right) - \psi_m\left(\frac{z}{L}\right) \right)$$

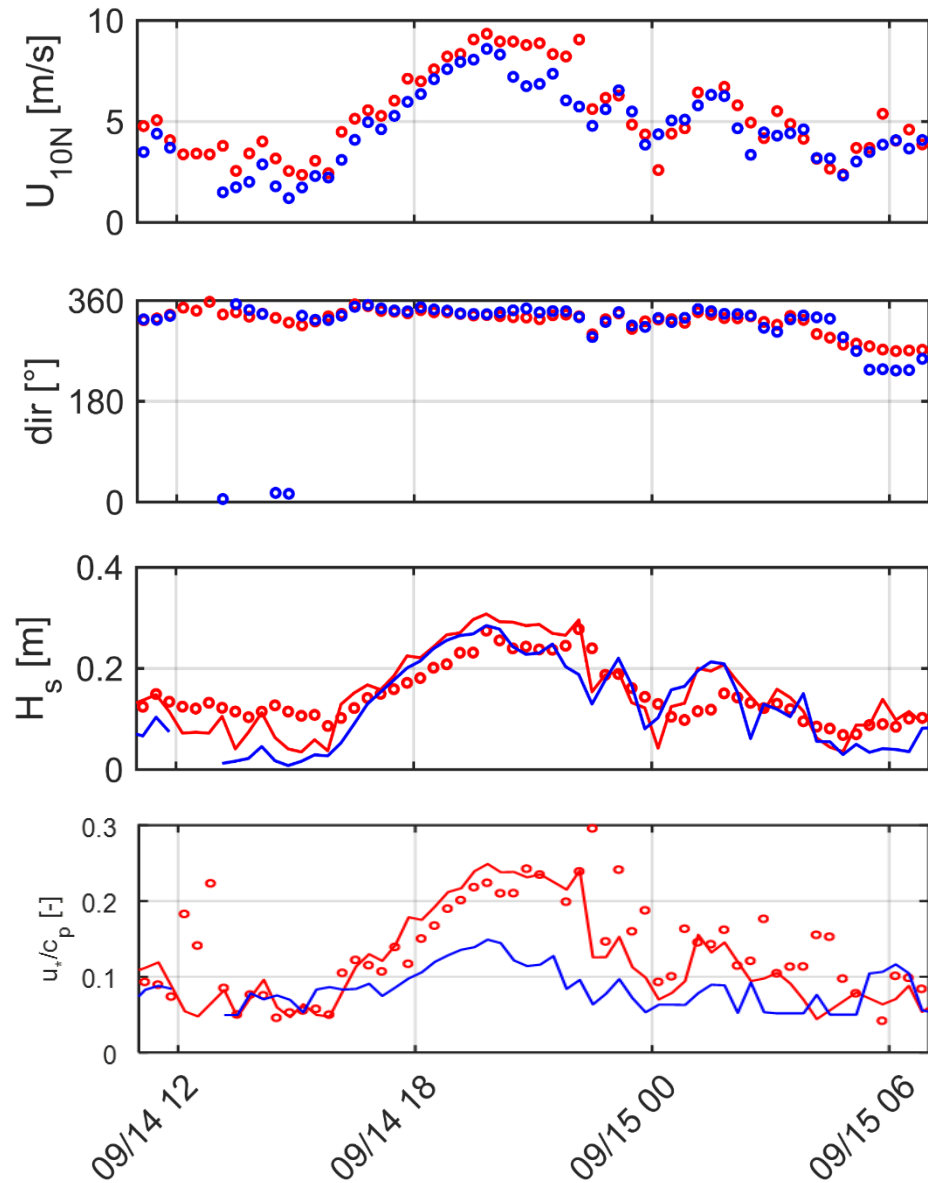
$$T_z - T_0 = \frac{T_*}{\kappa} \cdot \left(\ln\left(\frac{z}{z_{0H}}\right) - \psi_H\left(\frac{z}{L}\right) \right)$$

$$q_z - q_0 = \frac{q_*}{\kappa} \cdot \left(\ln\left(\frac{z}{z_{0q}}\right) - \psi_q\left(\frac{z}{L}\right) \right)$$

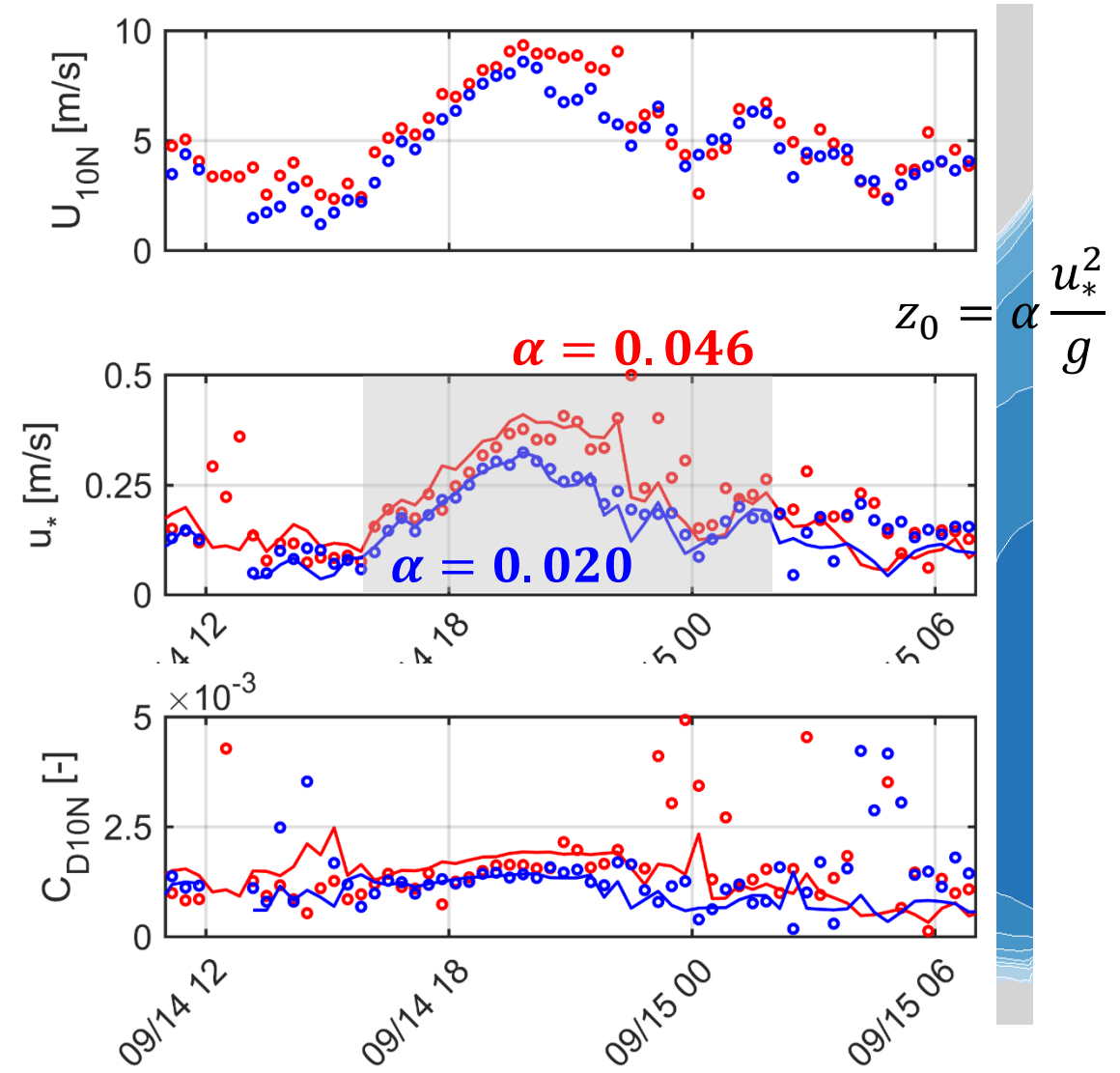
$$L = \frac{u_*^2 \cdot T}{\kappa \cdot g \cdot (T_* + 0.61 \cdot T \cdot q_*)} \quad \text{Obukhov-hossz}$$

- (1) Ellenállási tényezők
- (2) Logaritmikus profilok –
érdességi magasságok

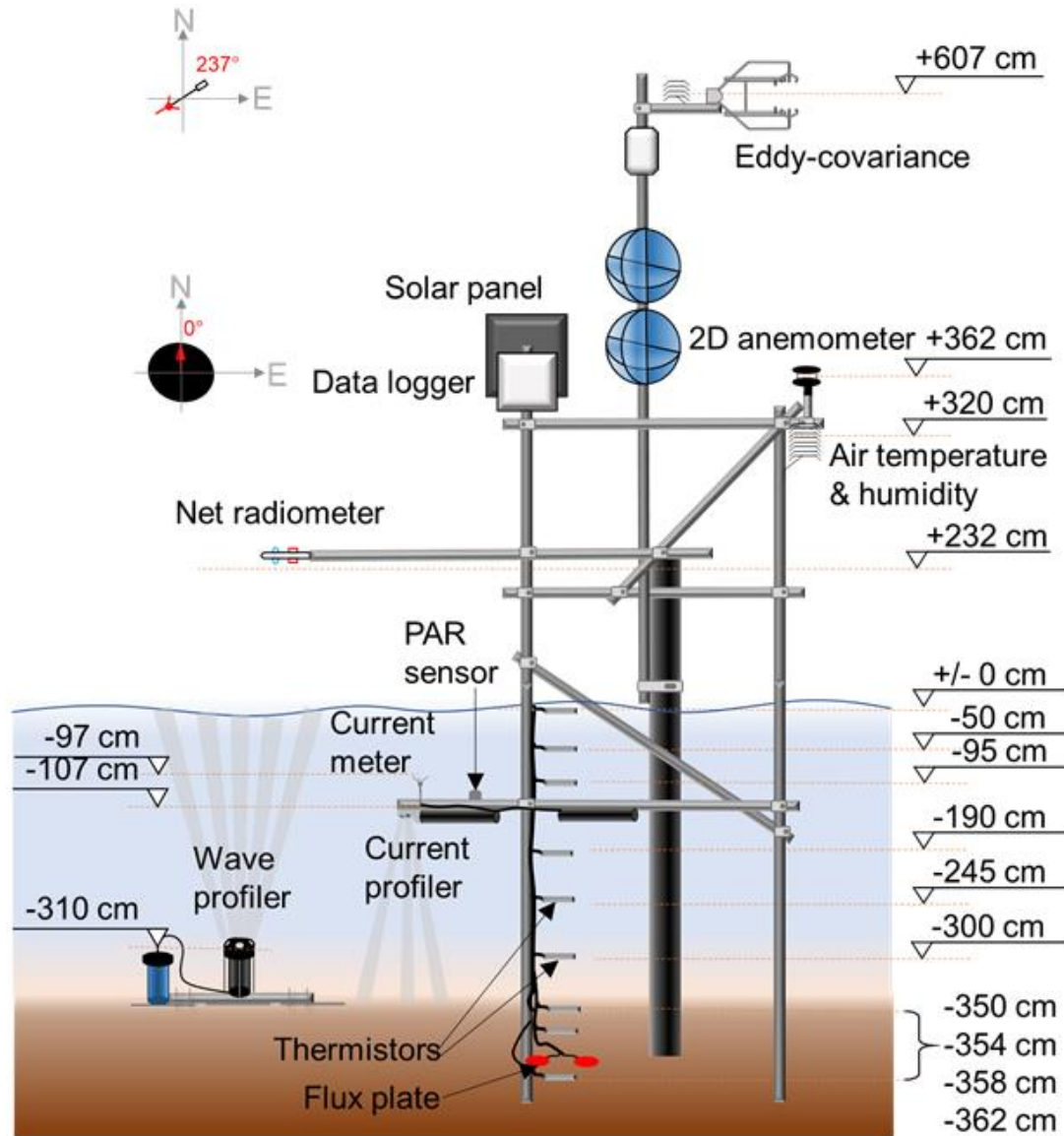
Térbeli változékonyság



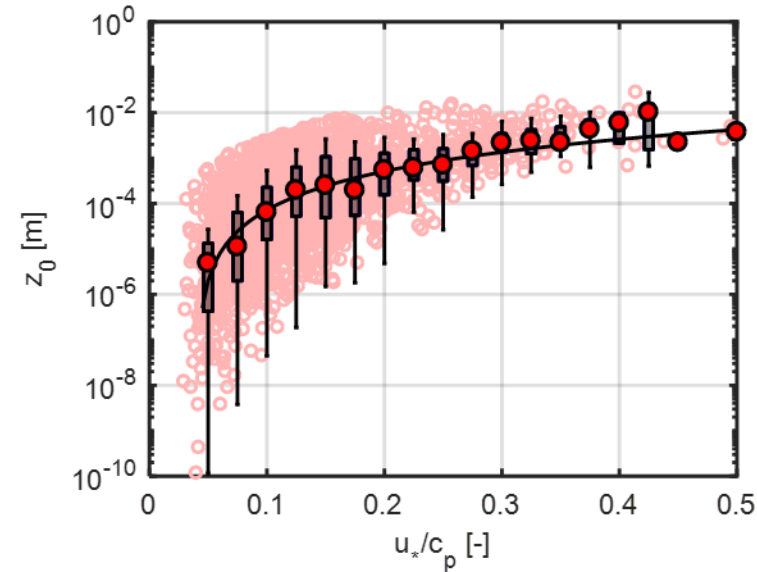
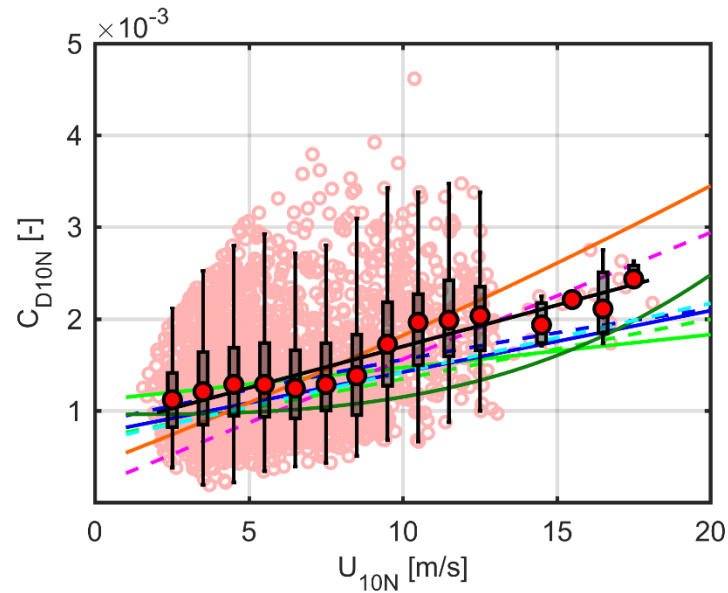
Fetch (km)	
B	C
3.5	6



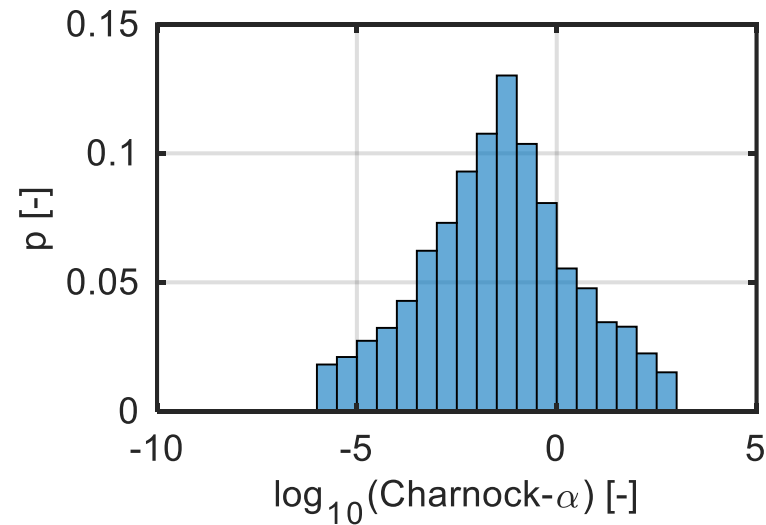
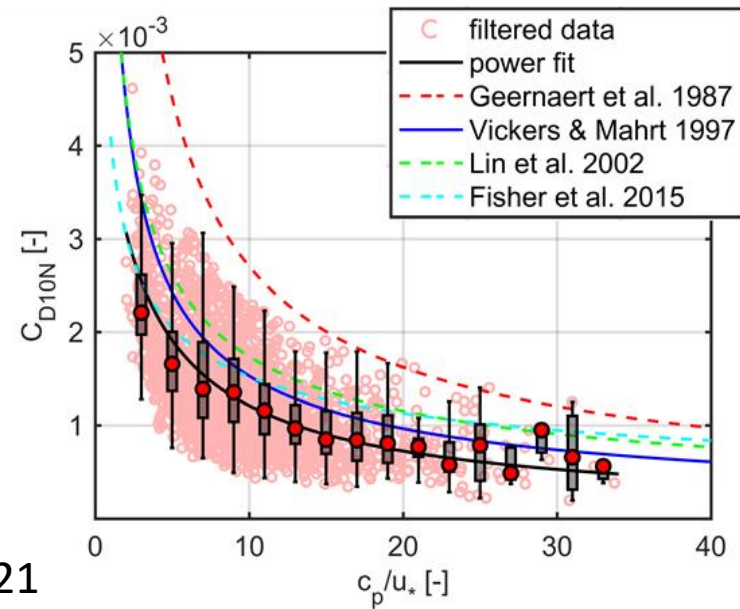
Mérési kampány 2019 (5 hónap)



Impulzusáram és aerodinamikai érdekesség



$$z_0 = \alpha \frac{u_*^2}{g}$$



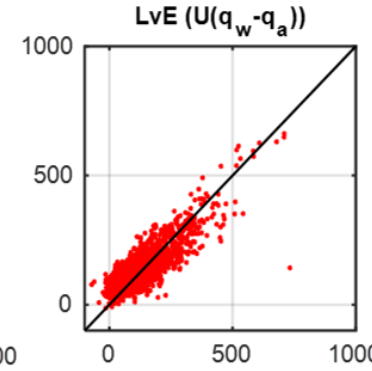
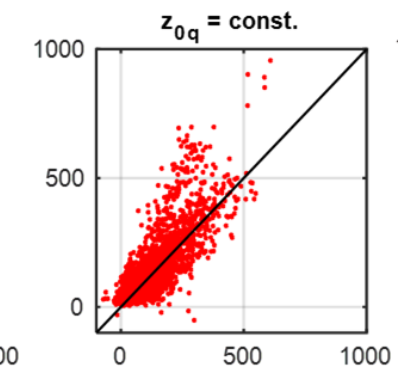
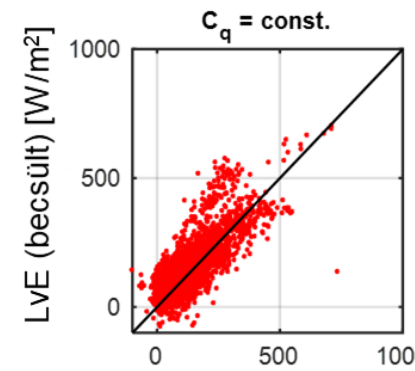
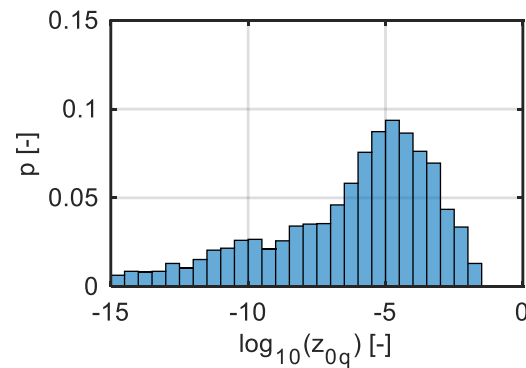
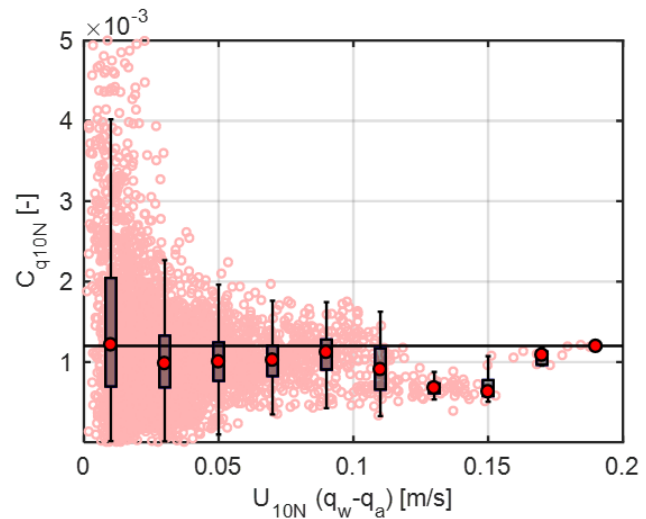
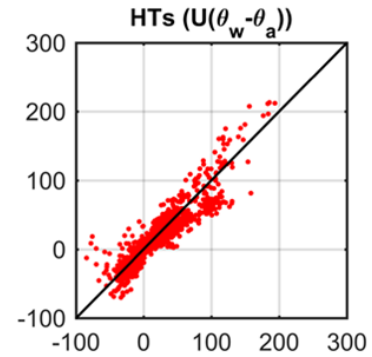
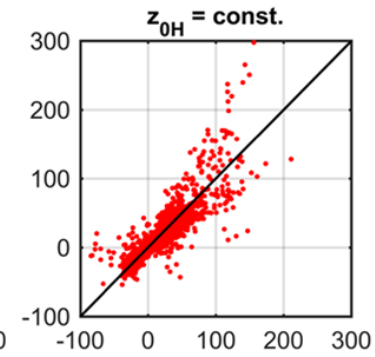
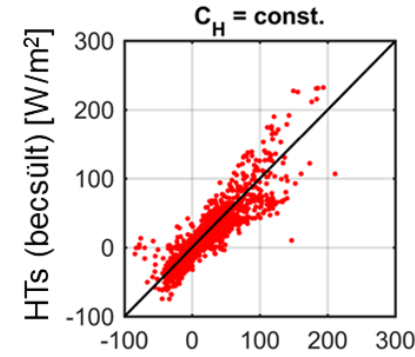
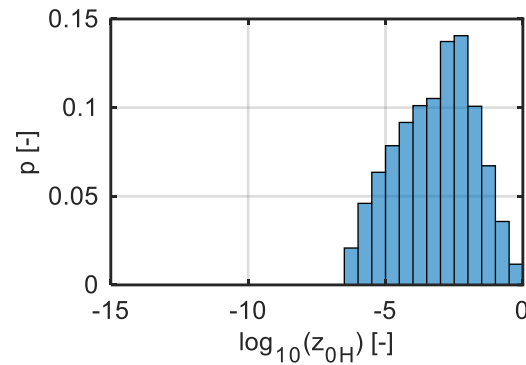
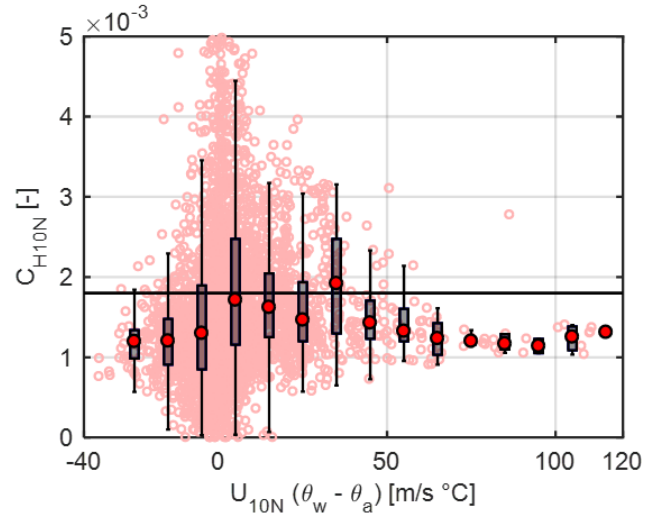
Irodalom átlag:

$$\alpha = 0.012$$

Balaton:

$$\alpha = 0.035$$

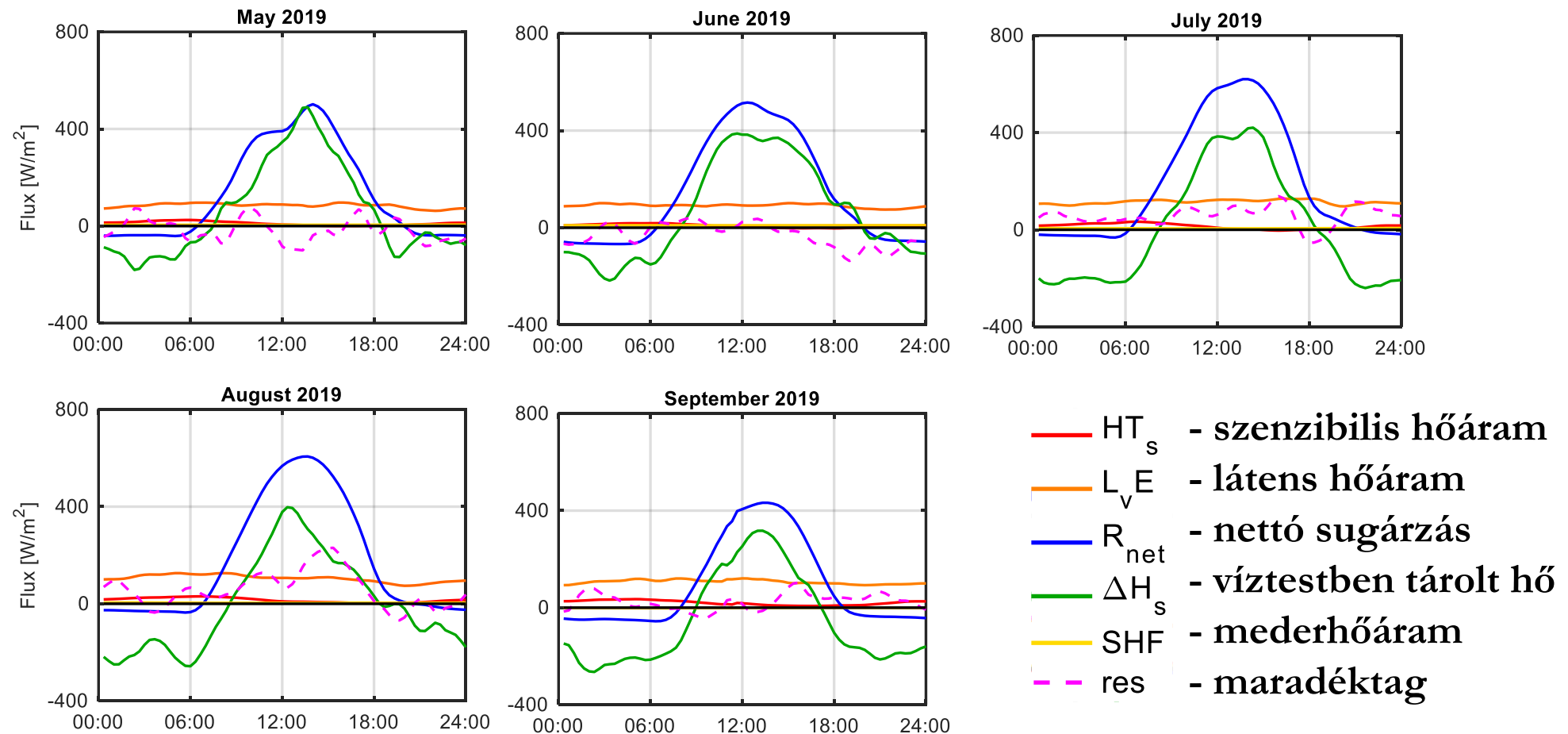
Szenzibilis és látens hőáramok és érdekességeik



Energiamérleg

Maradéktag:

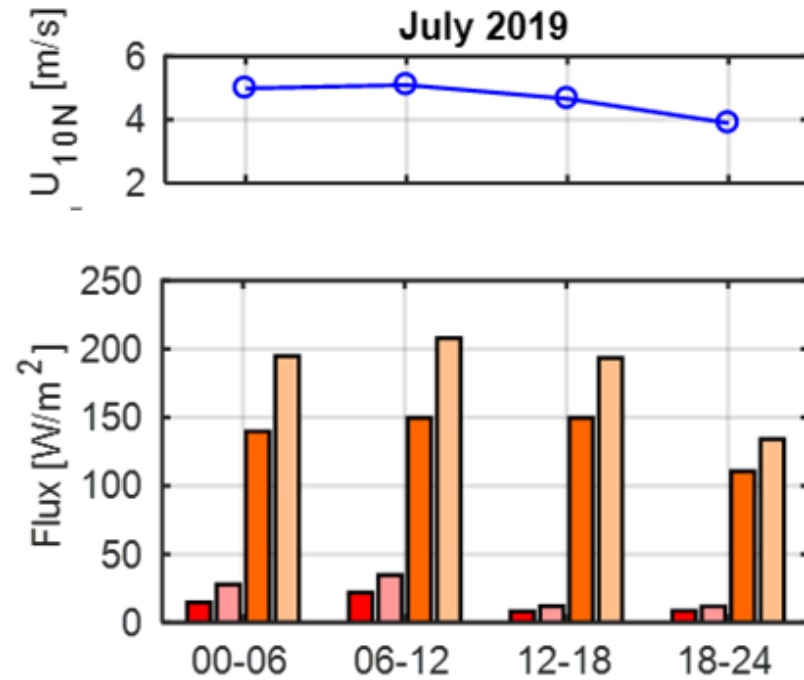
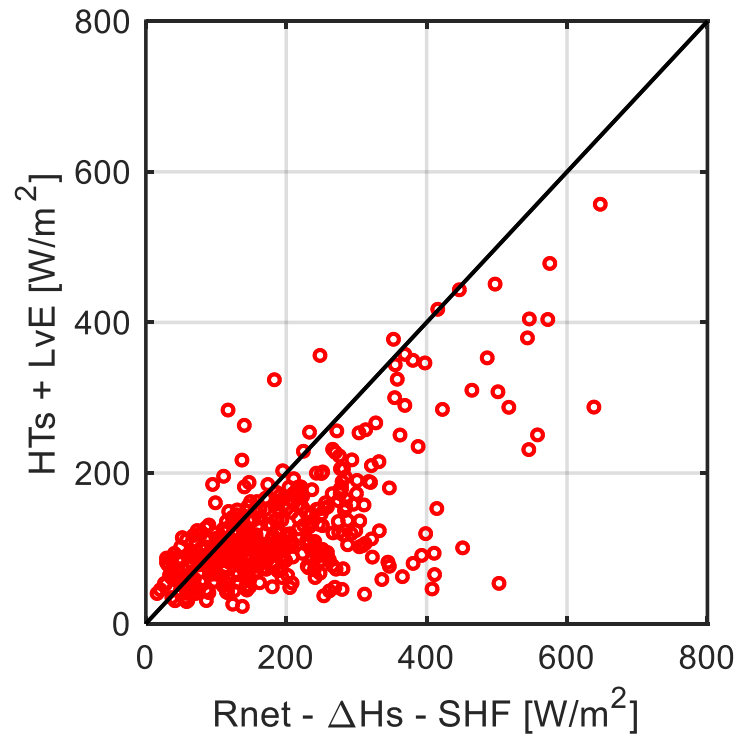
$$res = R_{net} - SHF - \Delta H_s - HT_s - LvE$$



Energiamérleg zárása

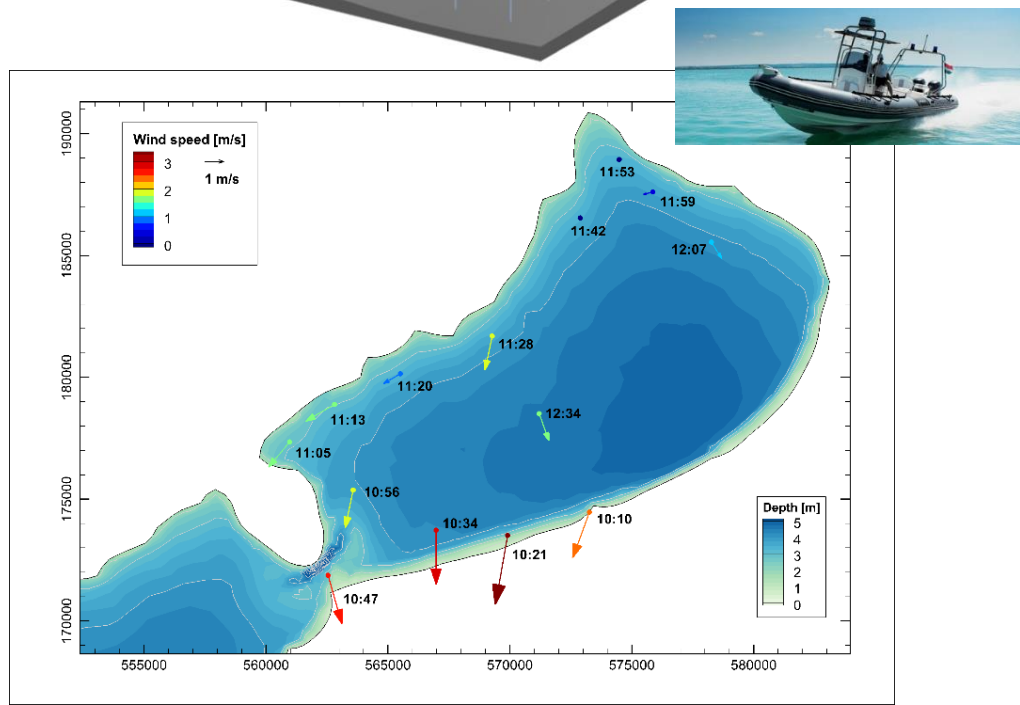
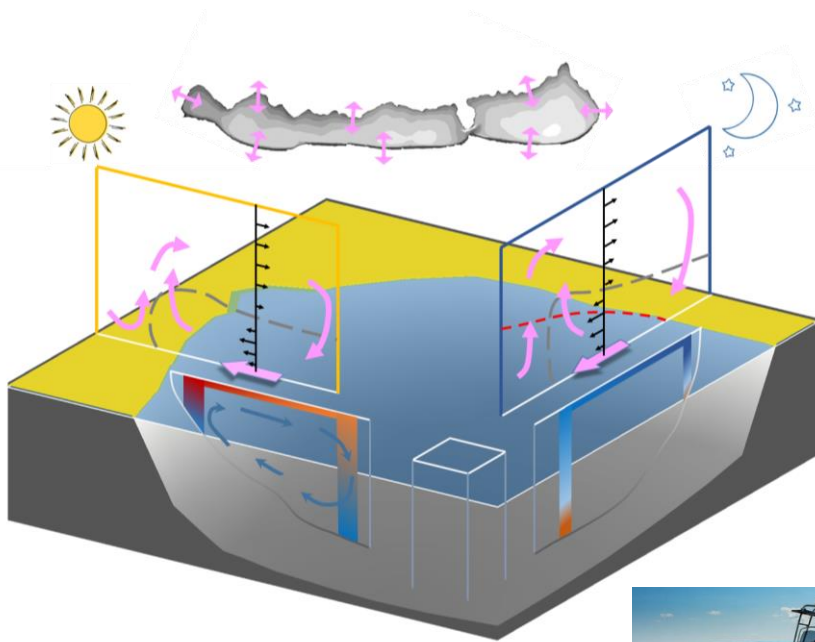
$$EBR = \frac{\sum(HTs + LvE)}{\sum(R_{net} - \Delta H_s - SHF)}$$

$$Bo = \frac{HTs}{LvE}$$

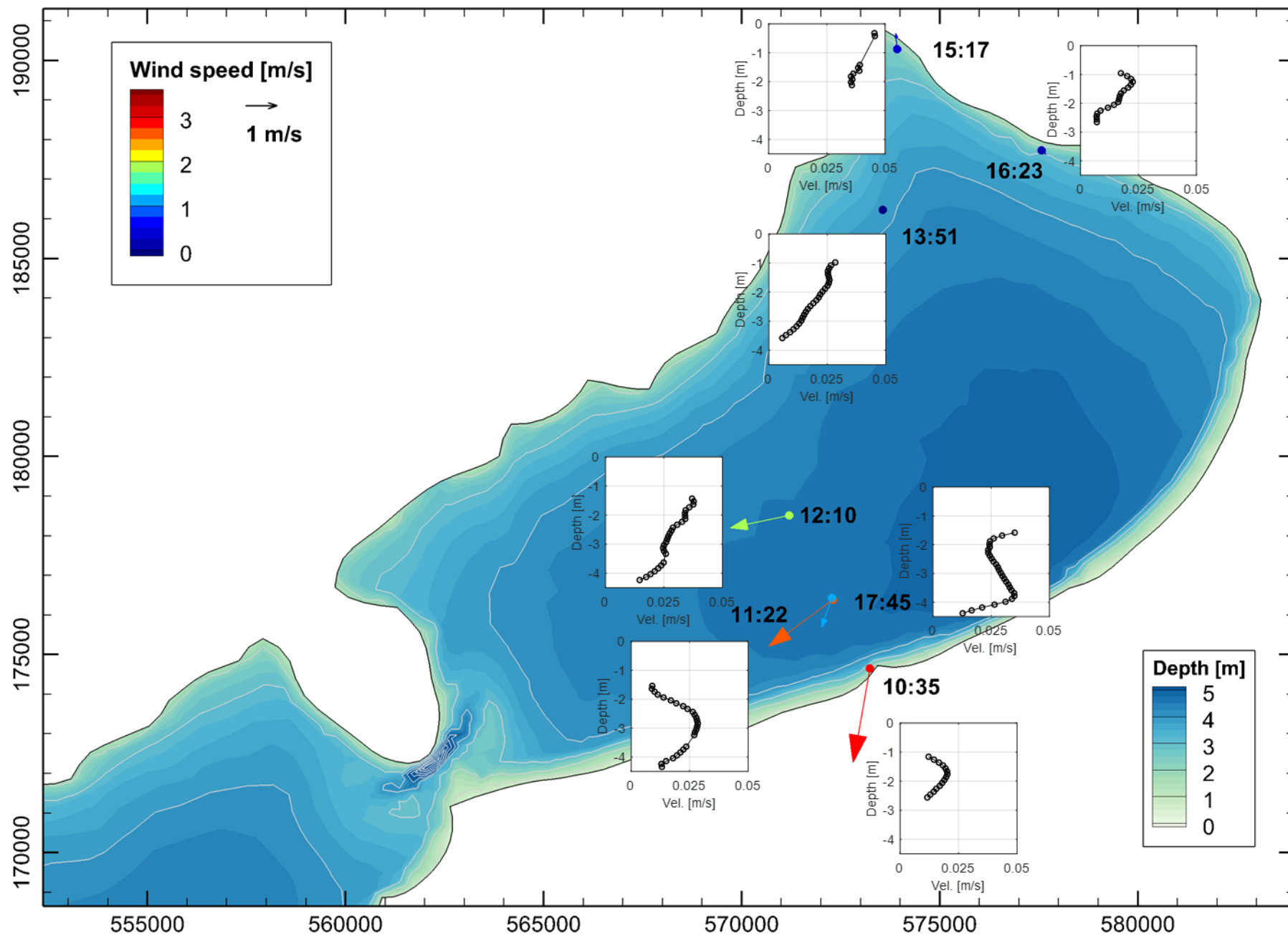


	May	June	July	Aug.	Sept.
EBR [-]	0.99	0.85	0.75	0.73	0.96
Bo [-]	0.05	0.06	0.13	0.11	0.15

„Tavi szél” mérés 2020



Temp [°C]



Köszönetnyilvánítás

- Dr. Weidinger Tamás (ELTE Meteorológia Tsz.)
- Dr. Krámer Tamás (BME VVT)
- Rehák András (BME VVT)
- Lükő Gabriella (BME VVT)

Köszönöm megtisztelő figyelmüket!

