

M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

Építőmérnöki Kar

TDK dolgozat (2018)

Tavi nádassziget körüli hullámváz feltárása

Készítette:

Komoróczy Zsuzsa

Konzulens:

Dr. Krámer Tamás

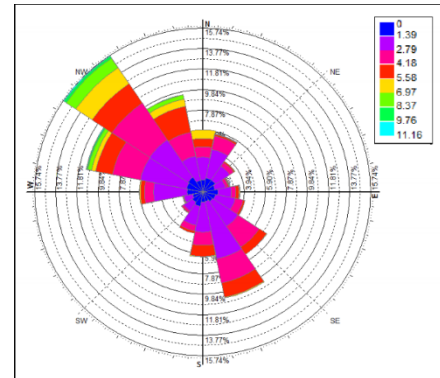
Szilágyi Mariann

# 1 Tartalomjegyzék

1	Tartalomjegyzék.....	2
2	Bevezetés.....	3
3	A mérés helyszíne – a Fertő magyarországi része .....	5
4	A mérésekhez használt eszközök .....	7
4.1	DJI Phantom 3 Standard drón.....	7
4.2	Aquadopp Profiler 1MHz .....	8
4.3	Hidrometeorológiai állomás .....	9
4.4	A mérések kiértékeléséhez használt alkalmazások .....	11
4.4.1	MATLAB® .....	11
4.4.2	A felhasznált MATLAB szkriptek .....	11
4.4.3	Tecplot 360.....	12
5	A méréssorozat fizikai háttere.....	14
5.1	A hullámozás jelenségtana .....	14
5.2	Elhajlás vagy diffrakció.....	16
5.3	Vízhullámok szórása.....	16
5.4	Vízhullámok diszperziója.....	17
5.4.1	Vízhullámok abszorpciója.....	18
6	A mérés .....	19
6.1	A helyszín bemutatása .....	20
6.2	Drónozás.....	21
7	Mérési eredmények bemutatása .....	24
7.1	A drónos mérés .....	24
7.2	Áramlási viszonyok a nádassziget körül .....	25
8	Konklúzió.....	27
9	Köszönetnyilvánítás .....	28
10	Irodalomjegyzék.....	29
11	Ábrajegyzék .....	30
12	Melléklet.....	31

## 2 Bevezetés

Jelen kutatás fő tárgya a Fertő-tavon a szél által keltett hullámok viselkedésének feltárása nádassziget környezetében, helyszíni méréseken keresztül. A hullámok hidraulikai terhelést fejtenek ki a nádasra, egyúttal az övező tómeder üledékvándorlását is erőteljesen befolyásolják. A kutatás alapvetése az, hogy a széljárás a hullámszásban is következetes eloszlást okoz, és ez terepi körülmények között végzett hidrodinamikai mérésekből kimutatható.



1. ábra Szélrózsa a Fertő tavon

A vizsgálat alapja, hogy tavak, állóvizek áramlását elsősorban a szél okozza, ezen áramlások pedig hatással vannak a meder felszínére. A Fertő tavon ez a jelenség akár a Google térképén is nyomon követhető. A kutatási területünknek választott nádassziget körül ugyanis az évek során feliszapolódás történt, aminek következtében a kis sziget elkezdett terjeszkedni. Az alábbi képkockákon az is látszik, hogy a növekedés egyfajta DK-i irányú megnyúlást okoz, amit a Fertőn jellemző DK-i uralkodó széliránnyal lehet összefüggésbe hozni.



2. ábra A nádassziget változása az évek során

Kutatásunk során erre a jelenségre szeretnénk bizonyítékot találni. Mivel a meder átrendeződése hosszú folyamat és a korábbi évekből nem áll rendelkezésünkre mederfelmérés, így jelenleg be kell érünk az áramlási struktúrából adódó felvetésünkkel, illetve egy idén nyáron ADCP-vel készített mederfelvétellel.

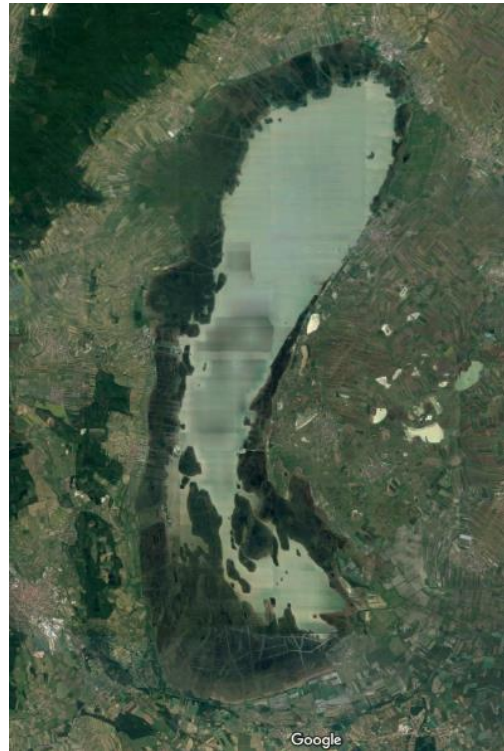
A területen kiválasztottunk egy nagyjából forgásszimmetrikus nádasszigetet, mely körül méréseket végeztünk a nyár folyamán, mégpedig olyan felbontással, amelyből a hullámok terjedése is kimutatható. A mérések során kétféle eljárást alkalmaztunk. Elsősorban doppler-elvű ultrahangos sebességmérővel vizsgáltuk a nádas körüli áramlásokat a mélység mentén egyenletesen elosztott rétegekben. Ezt egy drónos méréssel egészítettük ki, amikor is állandó magasságból, a nádastól nem messze beszórt jelölőanyagok terjedési sebességét illetve irányát követtük. A mérések során egy a nádastól nem messze felállított hidrometeorológiai állomással határoztuk meg a vízi mérésekkel egyidejű szélirányt.

A kutatás során a pontbeli mérésekre olyan alkalmas elemzési eljárást keresünk, amellyel a hullámzás széliránytól függően elemezhető és kimutathatóvá válnak a meghatározó hullámjelenségek: a beeső hullámok részleges visszaverődése, a nádasszigeten áthaladó hullámok csillapodása, valamint a megkerülő hullámok elhajlása.

### 3 A mérés helyszíne – a Fertő magyarországi része

A Fertő Magyarország északnyugati határa mentén, Sopron közelében található és egyetlen hazai településen keresztül közelíthető meg közúton egyszerűen, Fertőrákosról. A további hazai településekről a tóhoz való eljutást a jelentős nádas akadályozza. A nádasok a tó túlnyomó részét foglalják el, jellemzően a hazai rész 80%, míg az ausztriai oldal 50% nádas.

Az ellaposodott medencét, ahol a Fertő kialakult, több vízfolyás által szállított víz táplálta. Ezek a folyások azonban nem csak vizet, hanem hordalékot is szállítottak és ez lerakódott a medencében így kialakult egy lefolyástalan terület a mai Fertő tó. Jelenlegi víz utánpótlása elsődlegesen a csapadékok mennyiségén múlik. Így jelentős ingadozások, sőt kiszáradások jellemzik a tó közelmúltbeli történetét. Így 1864-69 között a tó kiszáradt, míg 5 évre rá, 1874-ben jelentős árvizet okozott.



3. ábra A Fertő a GoogleMaps műholdképén

A tó tájolása észak-déli. Egyes időjárási körülmények között, köszönhetően az ellaposodott területnek és a környező domboknak nagy sebességű viharos szelek csapnak le a tóra. Ilyenkor az északi és déli partok között jelentős vízszint különbség figyelhető meg.

A tó jelentős része Ausztria területéhez tartozik és a nagyjából 315km<sup>2</sup> területből csak 75km<sup>2</sup> tartozik Magyarországhoz.

A világörökség részét képező tó a Kárpát medence harmadik legnagyobb tava a Balaton és a mesterségesen kialakított Tisza-tó után. Mélysége jellemzően 0,6m körül alakul, így a nyári időszakokban nem ritka a 29-30°C-os vízhőmérséklet sem. A magas nyári vízhőmérséklet, a lefolyástalanság, illetve a vízutánpótlás időszakossága miatt a tóban a sótartalom igen magas, több mint 30 szorososa a Balatonénak.

A viszonylag magas só tartalom mellett meg kell említeni a hazai vizeink közül kiemelkedő lúgosságát, ami vízben végbemenő lebontó folyamatok eredményeként alakult ki.

A természetvédelmi terület turisztikai szempontból egyre jelentősebb. A tó környékén végrehajtott beruházások miatt a pihenésre vágyók egyre kedveltebb úticélja. A nádasokban ritka

madárfajok figyelhetőek meg. Az osztrák oldalon strandokat alakítottak ki. Egyre jelentősebb a horgászturizmus is, bár a Fertő halbiológiai szempontú kutatása, feltérképezése korán sem teljes. Az invazív fajok megjelenése a tavon ezen kutatásokat tovább hátráltatják.



*4. ábra A Fertő Fertőrákos kikötőből, a távolban nagy kiterjedésű nádasszigettel*

## 4 A mérésekhez használt eszközök

### 4.1 DJI Phantom 3 Standard drón

A DJI Phantom 3 egy négyrotoros, nagyfelbontású kamerával és optikai képstabilizátorral felszerelt drón. A videókat a fedélzeti MicroSD kártyájára tudja rögzíteni akár 2704x1520p-s felbontásban, mindezt másodpercenként 30(fps) képkocka sebességgel. HD felbontásban (1280x720pixel) ez akár 60fps is lehet, amely ugyan alacsonyabb felbontásban, de másodpercenkénti 60 képkockával egyes esetekben, a gyorsabb lefolyású eseményeket pontosabban lehet követni. A beépített Wi-Fi kapcsolatán keresztül a készített videófolyamot, alacsonyabb felbontásban, de képes az irányító konzolra továbbítani, így élőképet biztosítva a vezetőknek a pontos irányításhoz. Az élőkép átlagosan 220ms-os késleltetéssel érkezik meg a konzolra és a videófolyam maximum 720p-s lehet.



5. ábra DJI Phantom 3 drón. A hasán jól megfigyelhető a méréseinkhez felhasznált kamera a hozzátartozó gimballal.

Természetesen fontos, hogy a drón kamerája megfelelő látószöveget kínáljon, hogy ne túl nagy magasságból keljen a tervon végbemenő folyamatokat vizsgálni. A drón kamerája 94°-os látószöggel rendelkezik, ami az esetünkben kielégítőnek mondható. A kamera fényereje f/2.8, ami tekintettel a külső helyszínre, a méréseinkhez tökéletesen megfelelt.

Fontos megemlíteni azt, hogy a kamera fizikai képstabilizátorral rendelkezik, ez az úgynevezett gimball, ami képes az adott objektumon tartani a kamerát, a drón tetszőleges mozgása mellett. A gimball a kisebb szélhajtások hatásait is képes kompenzálni, így téve a drónt a méréseinkhez tökéletes eszközzé.

A drón és az irányító konzol közötti maximális távolság nagyjából 1km lehet és ezen távolságon belül a beépített GPS szenzornak köszönhetően akár önálló útvonal repülésre is képes az eszköz.

Fontos még megemlíteni, hogy egy-egy repülés 20-25 percig tarthat, ugyanis a fedélzeti akkumulátor, ennyi repülésre elegendő energiát képes tárolni. A méréseket tartalék akkumulátorokkal végeztük, így csak a csere idejére kellett félbeszakítani a repülést.

A drón irányításához egyaránt választható megfelelő Androidos vagy IOS-ses mobil eszköz. A mérések során Android operációs rendszert futtató Samsung Tablet-et használtunk.

A drónt a biztonságos műszaki, repüléstechnikai és baleset megelőzési megfontolásokból a mérés ideje alatt, kizárólag a drónok irányításában nagy tapasztalatot szerzett Rehák András vezethette, a mérést vezetőik instrukciói alapján.

## 4.2 Aquadopp Profiler 1MHz

A konkrét méréseket a NORTEK AS cég Aquadopp terméksorozatának eszközeivel végeztük el. A NORTEK az eszközöket elsősorban az óceánok kutatásában használja fel, így az áramlási viszonyokat mérő eszközöket is több kategóriában kínálja. A méréseinket az Aquadopp Profiler 1MHz típusú eszközzel végeztük.

A PUV hullámmérőt, amely a hullámok magasságának, periodicitásának és spektrumának meghatározására képes a nyomás és az orbitális sebesség függvényében, a tó egy kiválasztott nádasszigetének megfelelő környezetébe telepítettük.

Az eszköz 1m-től 85m vízmélységig képes pontos mérési adatokat szolgáltatni, így a kiválasztott vízmélységet is ehhez a mérési tartományhoz igazítottan választottuk ki, ami 1,5m volt, a műszer helyétől függően.

Az eszköz akusztikus Doppler elven működik (ADCP) és négy különböző mérési opcióval rendelkezik. Az időjárási és más környezeti behatások ellen védett eszköz pontos hidrodinamikus adatokat szolgáltatott, amely mérési eredmények feldolgozása a TDK dolgozatom elsődleges feladata.



6. ábra Aquadopp Profiler 1MHz



Természetesen az eszköz az itt felhasznált tulajdonságain túl akár ár-apály jelenségek kutatásához, vagy vízhozam mérésekhez is alkalmazható.



7. ábra San Francisco partjainál az óceán hullámadatainak mérésére előkészített Aquadopp Profiler 1MHz készülék. A kép <https://soundwaves.usgs.gov/2006/04/> oldalról származik, ahol az Egyesült Államok Földrajzi Kutatóközpontjának (USGS) szakemberei által végzett kutatásokról számolnak be.

### 4.3 Hidrometeorológiai állomás

A tavon, a nádassziget közelében egy hidrometeorológiai állomást létesítettünk a nyár folyamán. Az állomás alapját egy 4m magas, könnyűfémvázas szerkezet adja, amelyen különböző műszereket helyeztünk el. Ezen műszerek közül, mivel más mérésekkel párhuzamosan valósítottuk meg ennek a dolgozatnak a méréseit, kizárólag a szélmérő műszerre volt szükségem.



8. ábra CSAT3

Az állomáson megtalálható műszerek közül a munkához, a Campbell Scientific cég CSAT3 nevű szélmérő műszere volt elengedhetetlen. Ez a műszer, az Aquadopp működésével párhuzamosan, folyamatosan rögzítette a tavon uralkodó szélirányokat, illetve azok erősségét a sziget közelében.

A CSAT3 UWS (Ultrasonic Wind Sensor) 3D típusú, azaz horizontális és vertikális szél-erősség mérésére is alkalmas. A szélszenzor mozgó részek nélkül képes mérni a szél erősségén kívül annak irányát is. A berendezésben nincsenek mozgó alkatrészek, ellentétben a háromkanalas sebességmérőkkel, melyek elakadhatnak, eltörhetnek vagy elhasználódhatnak, így hosszútávon és bármilyen időjárási körülmények között használható. Az ultrahangos berendezés 65m/s maximális szélesebességig képes adatokat szolgáltatni a berendezéshez rögzített koordináta rendszer 3 irányának megfelelően. Negyedik komponensként a szél erőssége kerül rögzítésre a hozzá kötött adatrögzítő berendezésen. Az adatokat idősorosan lehet rögzíteni, így a megfigyelés időpontja alapján a mért adatok később feldolgozhatóak. A megfigyelt időszakban a maximális közeli erősségű szélre nem kellett számítanunk, hiszen a maximális felső érték több mint 200km/h-s szélerősséget jelentene.

A berendezés által rögzített szélesebességet és irányt idősorosan kaptuk meg, egyenletes időközönként rögzítve az állomásnál kialakult szélviszonyokat.

Rendkívül sokoldalú, leggyakrabban vízi vagy parti mérésekre használt eszköz.



9. ábra A telepített hidrometeorológiai állomás

## 4.4 A mérések kiértékeléséhez használt alkalmazások

A terepen végzett méréseken összegyűjtött hatalmas adatmennyiség feldolgozására két szoftvert használtam fel. Először a MATLAB nevű numerikus számítások elvégzésére kifejlesztett szoftvert és az ezt irányító programozási nyelvet. Az így előállt, feldolgozott adatokat a Tecplot 360 adatvizualizációs alkalmazással tettem értelmezhetővé.

### 4.4.1 MATLAB®



A Szoftvert a MathWorks cég fejlesztésében áll és sok más numerikus modellezésre alkalmas programmal kompatibilis.

Elsősorban numerikus számítások gyors és pontos elvégzésére alkalmas alkalmazás a mérnökök és a képfeldolgozással foglalkozó szakemberek gyakran használt eszköze. A használhatóságát és a népszerűségét az M-code nyelvnek is köszönheti. Az adataink feldolgozásához készült szkriptek is ebben az M nyelvben készültek.

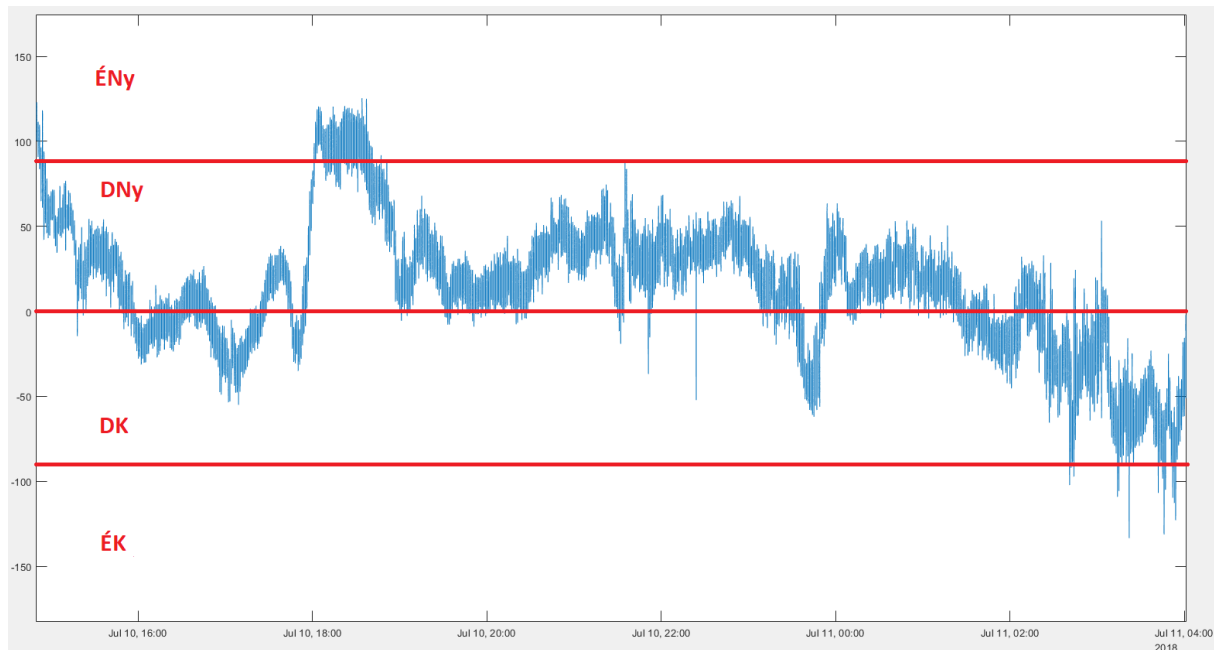
A szkriptek elsődleges feladata volt, hogy az adatok felhasználhatóak legyenek a Tecplot 360 alkalmazásban, így a rendelkezésünkre álló adatokat rendszereztük, majd pedig egy 2 dimenziós spektrummá alakítottuk át. Mivel a MATLAB az igényeinkhez képest szerényebb numerikus modellezésre alkalmas, így a kapott eredményeket egy szkript segítségével elnyerték végső formátumukat, amely így Tecplot kompatibilis lett

A program az olyan nagyméretű strukturált adathalmazok feldolgozására is képes, mint amik a Fertő-tavi méréseink során előálltak. A nyers adatok nagyságrendje Gigabyte-os volt és egy-egy adatsor feldolgozása a rendelkezésre álló 8. generációs i7 CPU-n is órákig tartott. A gépben az ideálistól kevesebb, 8GB memória állt csak rendelkezésre.

### 4.4.2 A felhasznált MATLAB szkriptek

A széladatok feldolgozásához beolvastam a mért adatokat, amelyeket a CSAT3-as műszer külön x,y és z vektorokként ad meg, illetve hozzájuk rendel egy timestamp időbélyeget. Az adatok kiolvasásához két dolgot kellett megjeleníteni. Az egyik a szélesebesség eredője, ehhez egy 3 dimenziós pitagorasz tételre volt szükség. A másik megjeleníteni kívánt komponens az szélirány, amelyet a szél É-kal bezárt szögeként vettem, abból kiindulva, hogy a műszer É-i tájolása az x koordinátát adja, így ide pedig egy sima arcus tangens függvényre volt szükség. Ez azt eredményezte, hogy a kapott diagrammon nem azt kaptam meg, hogy merről fúj a szél,

hanem azt hogy merre, illetve a kapott szögek  $-180^\circ$  és  $+180^\circ$  közé kerültek. Az ábrára azonban már azt tüntettem fel, hogy az adott szögtartomány milyen szélirányt jelent.



10. ábra Szélirányok ábrázolása Matlab-ben

Az áramlásmérések megjelenítése ennél sokkal bonyolultabb feladat, és nem is saját kezűleg írt szkripteket használtam fel. Az első szkript az Aquadopp által mért nyomás, és x,y irányú sebességvektorokat megfelelő struktúrába rendezte, majd a következő szkripttel a kinyert adatokból 2D-s spektrumokat hoztam létre az idő függvényében. Végül pedig egy, a Tecplot által ismert formátumba konvertáltam őket.

#### 4.4.3 Tecplot 360



A Tecplot két és háromdimenziós modellek készítésére alkalmas szoftver. A modellek animálása során nagy könnyebbséget okoz a kép kimerevítésén kívül az időbeni előre és hátra léptetési lehetőség, így nem szükséges újra és újra az elejétől lefuttatni az idősorunkat, elegendő a kérdéses intervallumon való lépdelés.

A szoftver előnye a könnyű kezelőfelület, a nagymértékű személyre szabhatóság és a modellben való utólagos szerkesztések lehetősége.

Az alkalmazás előnye, hogy Python szkriptekkel bővíthető az eszköztára és így a modellezési folyamatok sok eleme testre szabhatóan automatizálható, megkönnyítve a mérnöki munkát.

Sokoldalúságára jellemző, hogy a különböző mérnöki területeken hatékonyan használható. Így sikerrel vethetik be nem csak az építőmérnökök, de a gépész- és vegyészmérnökök is.

Az elkészült vizualizációs modellek a népszerű állókép formátumok mellett mint PNG, vagy JPEG, PostScript, vagy akár TIFF formátumban is rendelkezésre állhatnak. Az időben változó folyamatok modellezésére a leggyakoribb video formátumok közül választhatunk.

## 5 A méréssorozat fizikai háttere

### 5.1 A hullámozás jelenségtana

A folyadékdinamikában a szél keltette hullámok (magyarul közönségesen „víz-hullámok”, míg angolul „wind waves” – „szél-hullámok”) azok a felszíni hullámok, amelyek a vízszintes irányú légáramlás, azaz a szél hatására keletkeznek a vízfelszíneken: az óceán, a tengerek, a tavak, a folyók, sőt még a pocsolyák felszínén is.

A szél keltette hullámok kialakulását az alábbi öt fő tényező befolyásolja:

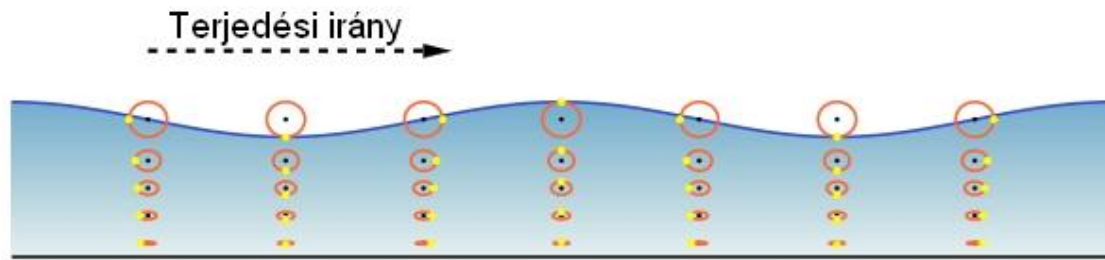
- a szélesebesség;
- a szél által mozgásba hozott vízfelszín hosszanti (szélirányba eső) kiterjedése, esetleg kifutása(fetch);
- a „fetch” szélessége (szélre merőleges irányú kiterjedése);
- a szélfúvás időtartama;
- a vízmélység:  $h$ .

A fenti hatások együttese alakítja ki a hullámok méretét. Bármely tényező növekedése a hullámok méretének növekedéséhez vezet. A hullámok fő jellemzői a következők:

- a hullámok magassága:  $H$  (a hullámvölgy aljától a hullámhegy tetejéig);
- a hullámok hosszúsága:  $L$  (két szomszédos hullámhegy közötti távolság);
- a hullámok periódusideje:  $T$  (két egymást követő hullámhegy beérkezése közötti idő adott helyen);
- a hullámok iránya.

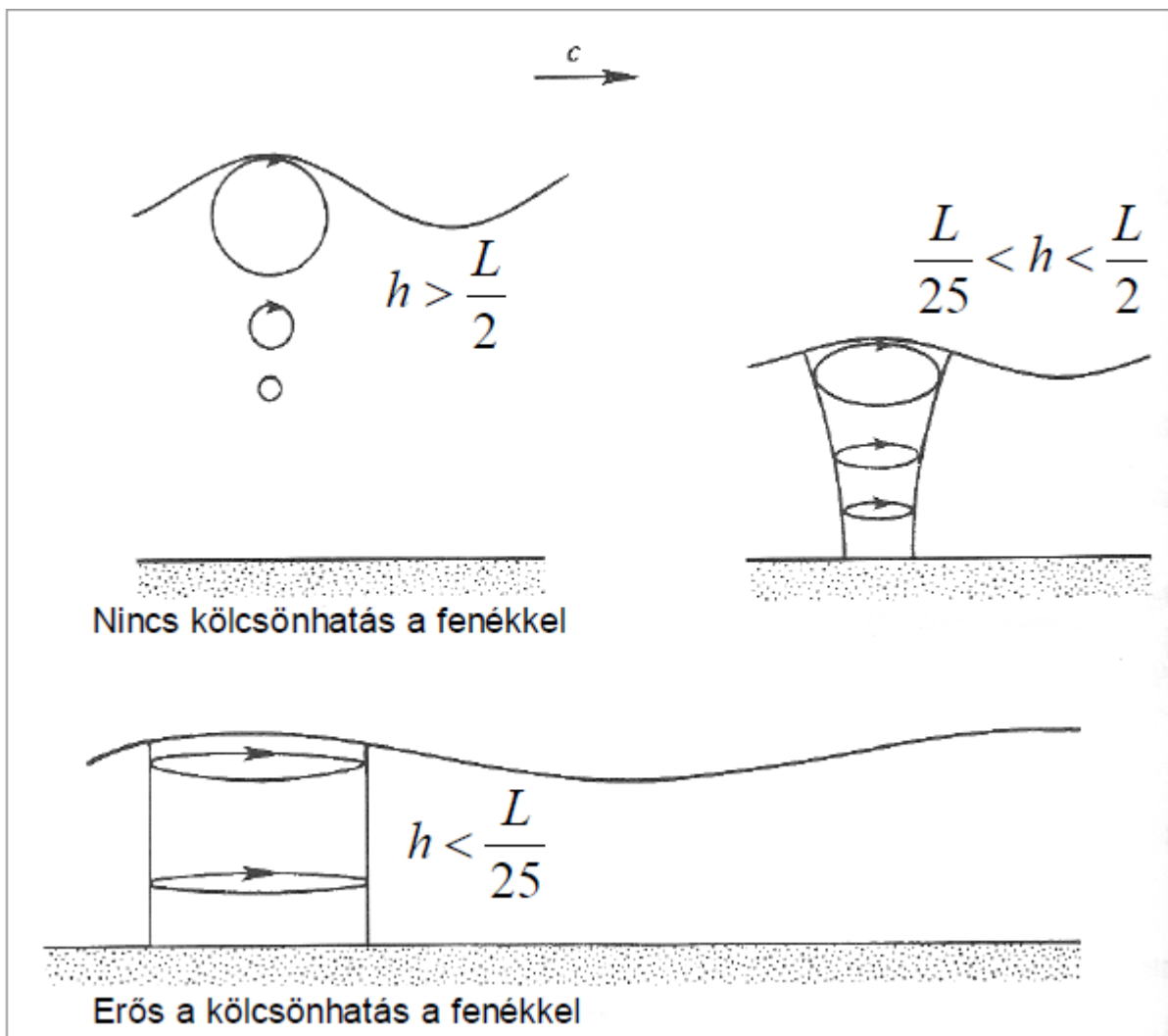
A szél keltette hullámok fizikai szempontból kapilláris hullámok, más néven felületi feszültségi hullámok (ilyenek a hullám-fodrok), vagy külső, más néven felületi gravitációs hullámok lehetnek.

A „tisztá” kapilláris hullámok két közeg határfelületén létrejövő olyan hullámok, melyek dinamikáját egyedül a felületi feszültség határozza meg. A kapilláris hullámok igen kicsik, hullámhosszuk nem haladhatja meg a néhány mm-t. A kicsit nagyobb hullámok átmenetet képeznek a felületi gravitációs hullámok felé, és így elnevezésük kapilláris-gravitációs hullám. Ezek dinamikáját már a gravitáció és a folyadék tehetetlensége (inerciája) is befolyásolja a felületi feszültség mellett.



11. ábra A vírzészecskék mozgása a víz hullámban

A hullámokban tehát a víz átlagsebessége nulla, csak a hullámenergia továbbítódik. A vírzészek valójában szinte egy helyben maradnak és ott a felszínen kör-, a mélyben pedig egyre kisebbedő és laposodó ellipszis pályákon (trajektóriákon) mozognak: orbitális mozgást végeznek.

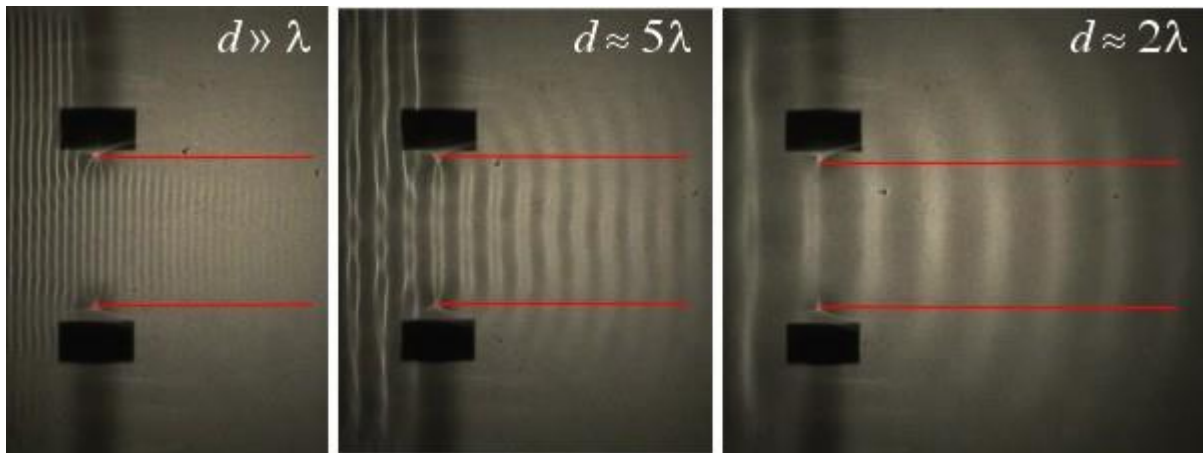


12. ábra A vírzészecskék kölcsönhatása a fenéssel

Ha a víz hullámok útjába akadályok kerülnek, akkor a víz hullámok elhajlása, szóródása, diszperziója figyelhető meg. Ezek a jelenségek hullámkádokban modellezhetőek.

## 5.2 Elhajlás vagy diffrakció

Mindennapos tapasztalat, hogy a hullámok - hasonlóan a fényhez - egyenes vonalban terjednek. Amennyiben a hullámtérbe helyezett akadály mérete kezdi megközelíteni a hullámhossz nagyságrendjét, az egyenes vonalú terjedéstől jelentős eltérések mutatkoznak, ami azt jelenti, hogy a hullám olyan térrészbe is behatol, ahova az egyenes vonalú terjedés alapján nem jutna el (optikai analógia alapján árnyéknak nevezzük ezt a tartományt). Ez az egyenes vonalú terjedéstől való eltérés az elhajlás, vagy idegen szóval a diffrakció jelensége.



13. ábra Az elhajlás jelenségének szemléltetése hullámkádban. Jól megfigyelhető a rés szélességének és a hullámhossznak a függvényében hogyan változik az elhajlás.

Az elhajlás mértékét a rés szélességének és hullámhossznak a viszonya határozza meg: minél inkább megközelíti a rés szélessége a hullámhosszat, annál jelentősebb az árnyéktérbe való behatolás.

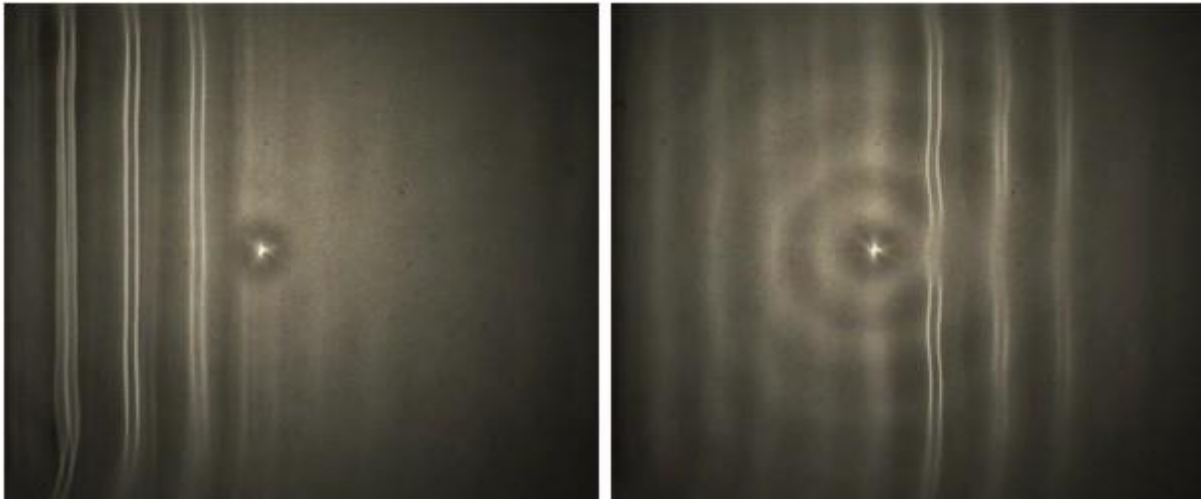
A hullámfelület minden egyes pontja elemi hullámforrásnak tekinthető, és a hullámtér egy adott pontjában megfigyelhető hullámjelenséget ezen elemi hullámok interferenciája határozza meg.

## 5.3 Vízhullámok szórása

Ha a hullámok útjába a hullámhossznál kisebb méretű akadályt helyezünk, akkor az akadály a beeső hullám hatására hullámforrássá válik, az akadályból körhullám indul ki. Ez a jelenség a hullámok szórása.



A jelenséget a Huygens-Fresnel-féle elv alapján értelmezhetjük: amikor a beeső hullámfront eléri a gyakorlatilag pontszerű akadályt, az adott pont elemi hullámforrásnak tekinthető. Az innen kiinduló elemi hullám a szórt hullám.

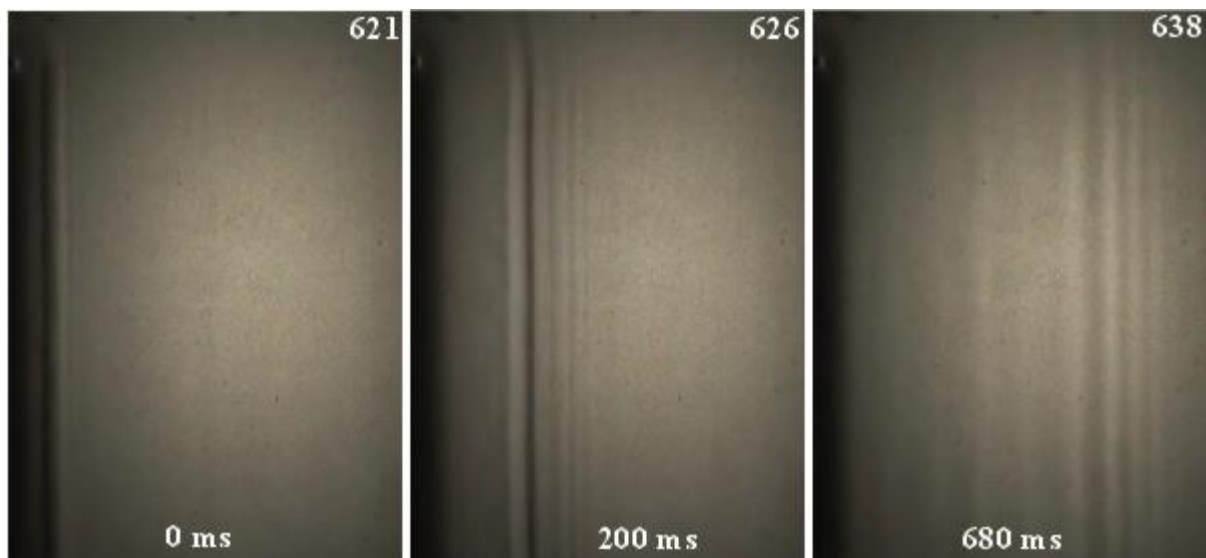


14. ábra Szórt hullám kialakulása hullámkában

#### 5.4 Vízhullámok diszperziója

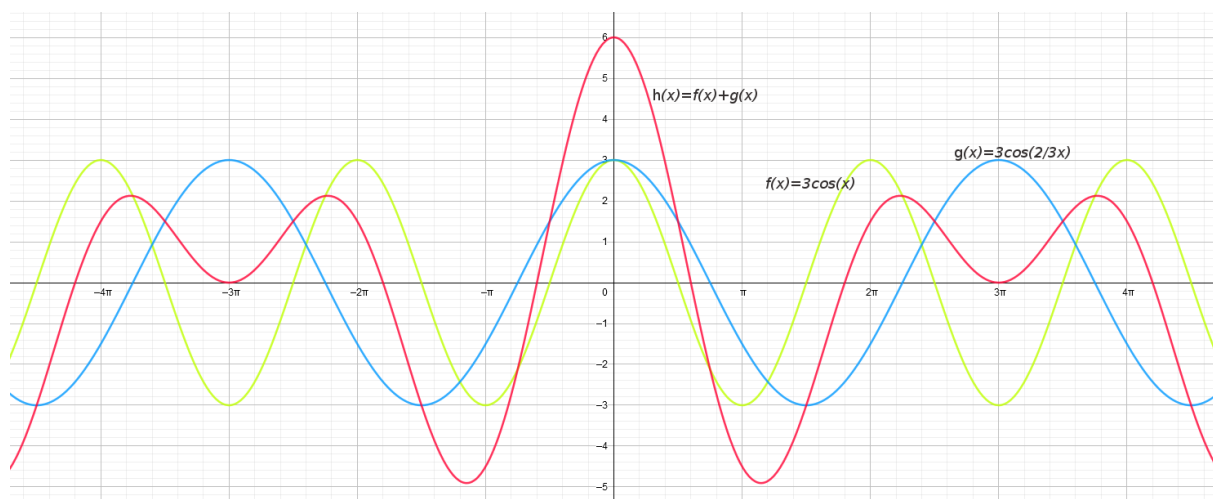
A hullámhegyek egymáshoz viszonyított távolsága változik a hullámvonulaton belül, a hullámvonulat elején közelebb vannak a hullámhegyek, míg a végén a köztük lévő távolság nagyobb. A felvételen látszik, hogy a hullámvonulat rövidebb periódusú részei gyorsabban terjednek, mint hosszabb periódusú rész.

Diszperzióról akkor beszélünk, amikor a (térben végtelen kiterjedésű) szinuszos hullámoknak a terjedési sebessége függ a hullámhosszuktól.



15. ábra Disszperzió hullámkában

Egy térben lokalizált hullámjelenséget - egy véges hosszúságú hullámvonulatot - egy adott hullámhossztartományba eső, különböző hullámhosszúságú szinuszos hullámok összegeként állíthatunk elő. A hullámhossz tartomány annál szélesebb, minél rövidebb a hullámvonulat. Amennyiben a szinuszos (más néven a monokromatikus) összetevők terjedési sebessége függ a hullámhosszuktól, azaz diszperzió lép fel, akkor az összetevők egymáshoz viszonyított helyzete változik a terjedés során. Ez pedig nyilván azt eredményezi, hogy az összegükként kapott eredő hullámjelenség tér- és időbeli tulajdonságai is változnak a terjedés során.

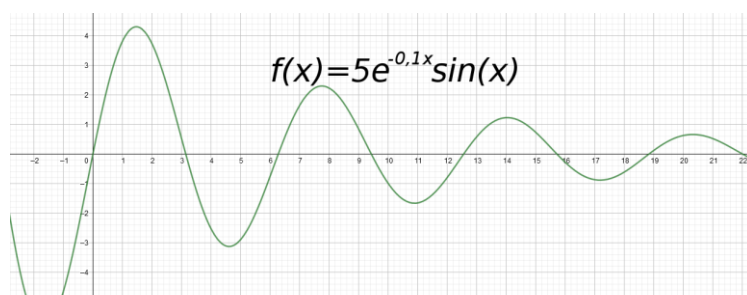


16. ábra Eredő hullám kialakulása (piros), két különböző frekvenciájú szinuszos hullám (zöld és kék) összegeként

### 5.4.1 Vízhullámok abszorpciója

A vízhullámokra is igaz, hogy a rezgési energia egy része a közegben, jelen esetben a vízben, más típusú energiává változik. Jellemzően a belső surlódás miatt hőenergiává, így a vízhullám fizikai jellemzői megváltoznak. Csökken az amplitudó. A csökkenés mértéke a megfigyelések alapján a közeg anyagi minőségétől függ, amit a közeg abszorpciós együtthatójával jellemezhetünk. Másrészt a csökkenés mértéke exponenciálisan függ ettől az együtthatótól. [1]

Az abszorpció jelenségére, talán az egyik legjobb példa a Nap fényének a tenger fenék felé egyre csökkenő intenzitása. Itt az is megfigyelhető, hogy az abszorpciós együtthatón túl a hullám frekvenciája is befolyással van az elnyelődésre. Mélyebb rétegekbe csak a Nap színekének kék összetevője jut el, a többi már hamarabb elnyelődik.



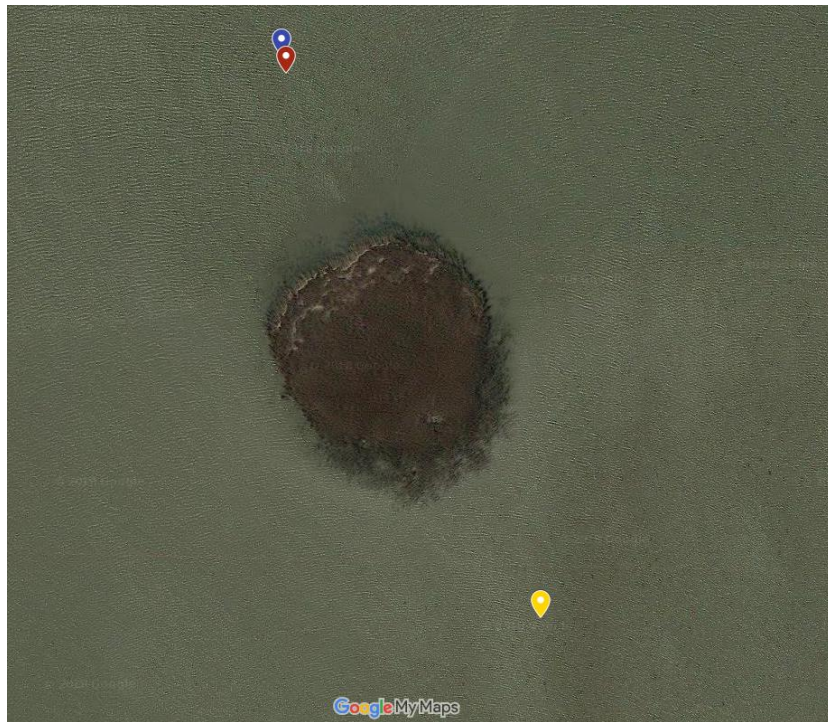
17. ábra Hullámabszorpció bemutatása a GeoGebra alkalmazásban

## 6 A mérés

A terepi mérések június 26-tól augusztus 17-ig folytak. A mérések folyamatosan, kisebb megszakításokkal történtek. Csupán az akkumulátor valamint a memóriacsere pár pillanatáig függesztettük fel őket.

A hidrometeorológiai állomást a szigettől É-ra a piros pontban helyeztük el, innen folyt a széladatok begyűjtése. Az elhelyezés oka a Fertő-re jellemző ÉNy-i uralkodó szélirányból fakad.

Az Aquadoppal való mérések nem egy helyről történtek. Először a hidrometeorológiai állomástól nem messze, a késsel jelölt pontban helyeztük el, ám július 26-án áthelyeztük a szigettől délre fekvő sárgaszínű pontba. Ennek oka, hogy a déli részre eredetileg egy másik műszert telepítettünk, ám az a sekély vízben nem működött megfelelően. A csere következtében az áramlásmérő és a sziget állásán egy  $180^\circ$ -os fordulat jött létre. Ez azért szerencsés, mert a jellemző széljárások mellett a sziget mindkét oldaláról sikerült adatokat gyűjtenünk.



18. ábra A mérési pontok elhelyezkedése a sziget körül. A kék jel a meteorológiai állomás helyzetét, a piros az Aquadopp 2018. július 26-ig, a sárga pedig a 2018. július 26-tól aktuális helyzetét jelöli.

## 6.1 A helyszín bemutatása

Vizsgálandó területnek egy 90-100 m átmérőjű nagyjából forgásszimmetrikus szigetet választottunk Fertőrákostól délre. A sziget egyfajta öbölben helyezkedik el, ennek köszönhetően egyik irányból sem jellemző kiugróan nagy környezeti ráhatás, illetve a vízi forgalom sem számottevő ebben a térségben, így a műszereinket is nyugodt szívvel hagyhattuk kint a vízben.



19. ábra A nádassziget elhelyezkedése a tavon a Goole Mapsen

A sziget körül mélyebb 0,5-1,5 m-es vízréteg található, ami lehetővé tette az áramlásmérő műszer kihelyezését. Ezt a szigettől D-re valósítottuk meg, attól 100 m-es távolságban. Fontos volt, hogy a műszer ajánlott legkisebb mélységét elérő vízszintnél helyezzük ki a műszert. Tekintettel a Fertő adottságaira a fenéken található üledék, amely néhol 50cm-t is elérhet, felett tartjuk a műszert. Ezért a méréshez egy megfelelő méretű talapzatot használtunk, amely biztosította az iszapra való felfekvést. A műszer helyének jelölésére egy jelzőrudat használtunk.

A sziget átelles oldalán, az Aquadoppal szemben az anemométerünket a szigettől északra helyeztük el, a szigettől hasonló távolságban. A 7. ábrán csak egy ideiglenes elhelyezés látszik mivel ehhez a méréshez a szelet a nyílt vízben mértük.

Az alappontokat, saját készítésű tárcsákkal jelöltük meg oly módon, hogy a szigetet teljesen körbe vegyük. A 10 tárcsa sziget körüli elhelyezkedését az alábbi ábra szemlélteti. Az ábrán feltüntettük a hidrometeorológiai állomás és a csere utáni helyzetét az Aquadoppnak.

A 20. ábrán az alappontok hozzávetőleges helyzetét a fekete-fehér jelölés mutatja.



20. ábra A mérési helyszín sematikus ábrázolása a Google Maps műholdfotóján

## 6.2 Drónozás

A nádassziget körül drónos méréseket is folytattunk. A terület körül alappontokat létesítettünk, amelyeket fekete-fehér, messziről is jól látható korongokkal megjelöltünk. A korongokat a mérések kivitelezéséhez magunk készítettük. A pontok kijelöléséhez geodéziai GPS-segítségével a koordinátákat pontosan bemértük. Az adott szélirány figyelembevételével helyezkedtünk el a szigetecskénk körül, majd a mérés zavartalansága érdekében a csónakot rögzítettük és megvártuk a víz nyugalmi állapotba kerülését, amit a csónak mozgása megzavart. A drónt csak ezek után bocsájtottuk fel és a felszállása után a motorcsónakról jelölőanyagokat szórtunk a vízbe.

Jelölőanyagként csak olyan anyagot használhatunk, amely rövid, pár napos bomlási idővel rendelkezik. A környezetbarát anyag használatán felül szempont volt, hogy a drónfelvételeken jól látszódnak, ezért a víz színétől elütő színű anyagot választottunk.

Végül, hosszas kísérletezés után fehér színű, 8-10 cm átmérőjű, méhviasz korongokra esett a választásunk. A méhviasz lebomlási ideje nagyjából 30 nap, így nem okoz nagy környezeti károkat, ennek ellenére a mérések után igyekeztünk összegyűjteni az összeset, főleg mivel így a további mérésekhez is fel tudtuk őket használni.

A próbamérések során kiderült, hogy habár a fehér jelzőanyag megfelelően kontrasztos a víz színéhez képest, napsütéses időben mégsem a legjobb választás, ugyanis a nap víztükroin való csillogása 50 m magasságból nehezen megkülönböztethető az általunk beszórt jelölőanyagoktól. Ezt kiküszöbölendő a drón kamerájára felszereltünk egy polarizációs szűrőt, a víz felületéről visszaverődő fényhullámok kiszűrésére. A kiszűréshez a megfelelő beállítást többszöri felengedés után tudtuk úgy megoldani, hogy a zavaró tükröződések kiküszöböljünk.

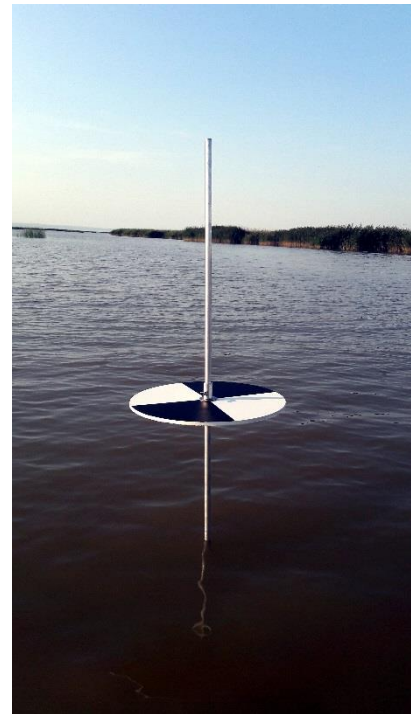
Az éles mérések során a sziget körül egymástól körülbelül egyenlő távolságokra elhelyeztük az alappontjainkat, majd a széljárásnak megfelelően a szél felőli oldalról vonal mentén elengedtük a jelzőanyagjainkat. Sajnálatos módon azonban felszálláskor azzal kellett szembesülnünk, hogy a szigetünk jóval nagyobb kiterjedésű, mint az eddigi területeink voltak, és az eddigi mérések során alkalmazott 50 m-es magasságból nem látszik a teljes mérési terület, sőt a nádas



21. ábra A Phantom 3 indítása a mérés előtt

sem fogható be teljes terjedelmében. Megpróbálkoztunk magasabbról vizsgálni a területet, ám a teljes terület befogásához alkalmas repülési magasságból már nem látszanak az elengedett méhviasz korongjaink, így ez az eljárás sem bizonyult megfelelőnek.

A továbbiakban felvetődött, hogy a teljes sziget helyett, csupán a szélirány felőli oldallal foglalkozunk. Ehhez az eddig alappontjaink átkonstruálására van szükség. A kör lakú elrendezés helyett egy a nádassziget előtti kisebb távolságokat felölelő hálózat létesítése lenne a feladat. Ezzel a módszerrel habár a teljes sziget körüli áramlási struktúrákat nem tudnánk vizsgálni, ám a felületen keletkező abszorpciót és hullám-refrakció kezdetét még így is szemléltetni tudnánk.



22. ábra Az egyik alappontunk

## 7 Mérési eredmények bemutatása

### 7.1 A drónos mérés

Ahogy már a fentiekben írtam a drónos méréseknek nem lett számottevő eredménye, azonban így sem bizonyultak haszталannak. Próbálkozásaink során kiderült, hogy a választott jelölőanyagok színben és méretben is megfelelőek a mérésekhez, habár napsütéses időben egy erőteljesebb színű anyag esetén nem lenne szükség a polarizációs szűrőre.

A nádas körüli mérés során kiderült, hogy a sziget méretei mellett alappontjaink és legfőképp jelölőanyagaink mérete elhanyagolható, így ha egyszerre szeretnénk vizsgálni a területünkön végbemenő eseményeket, más megoldási módszerhez kell folyamodnunk.

Az egyik ilyen módszer lehetne az, ha a meglévő drónunkat lecserélnénk egy jobb képfelbontására, amely egyben nagyobb látószögű is. Egy 4k-s UHD kamerával felszerelt 3840x2160 pixel felbontásra képes eszközzel már nem kéne az 50 m-es repülőmagasságra szorítkoznunk, ugyanis ezzel a felszereltséggel akár 70-80 m-es magasságból is észlelhetnénk a beszórt méhviaskorongjainkat. Ilyen magasságból pedig már látszana a sziget, illetve a körülötte telepített alapponthálózat is, így pontosan végig lehetne követni a jelölőanyagok mozgását.

Másik megoldás lehetne a problémánkra, ha egy helyett több, összehangolt drónnal vizsgálnánk a területet. Egy ilyen kötelékrepülésben végzett mérés lényege az lenne, hogy maradunk az eddigi 50 m-es repülőmagasságunknál, ám több drónnal, nagyobb területet tudunk lefedni, ezáltal megint oda jutunk, hogy képesek vagyunk a teljes területünket vizsgálni. Ennek az eljárásnak a nehézségét az okozza, hogy a különböző eszközökkel felvett képeket össze kell illeszteni, ám ebben segítségünkre vannak a kijelölt alappontok.

A harmadik lehetőség egy költséghatékony eljárás az előző kettőhöz képest. A probléma abból adódik, hogy a szigetünk túl nagy. Ezt kiküszöbölendő lehetne keresni egy hasonló adottságokkal rendelkező (forgásszimmetrikus), ám a meglévőnél jóval kisebb szigetet. Így a meglévő műszerparkunkat se lecserélni, se kiegészíteni nem kellene.

Miután ez csupán egy kiegészítő mérés, lehetőség van arra is, hogy maradunk a meglévő területen a meglévő műszerrel. Ebben az esetben azonban le kell mondanunk a teljes körű vizsgálatról és el kell fogadnunk, hogy az áramlási mezőket csak részleteikben tudjuk vizsgálni. Ezt pedig két részre szedném, ugyanis az érdekesebb rész, hogy a sziget előtt és után hogyan viselkednek a jelölőanyagokat. A sziget előtt elengedve a korongokat megfigyelhetjük, egy részük hogyan „nyelődik el” a nádasban, a maradék pedig hogyan válik ketté a sziget közelében és

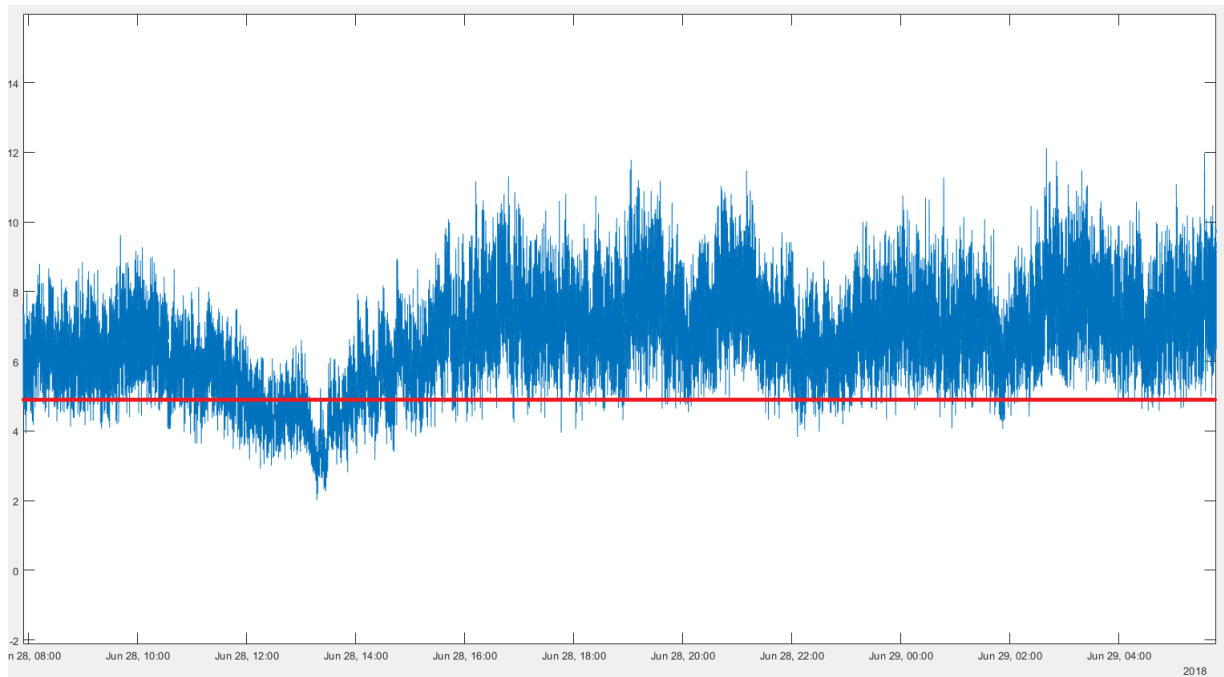


kerüli meg azt. A másik oldalról pedig azt vizsgálhatnánk, hogy az áramvonalak hogyan találkoznak újra.

## 7.2 Áramlási viszonyok a nádassziget körül

Az egész nyarat felölelő mérések következtében hatalmas adathalmaz áll rendelkezésünkre a nádas körüli áramlásról, ám felesleges lenne az egészet figyelembe vennünk.

Abból indultunk ki, hogy a kisebb szélesség kisebb hatást tud csak kifejteni a tóra, így az 5 m/s alatti értékeket nem is vettük figyelembe. Ez az intervallum szűkítés azonban még messze nem elegendő, ugyanis időtényező is fontos szerepet játszik. Nem elegendő egy nagyobb szél-lökés, ahhoz, hogy a tavi hullámmérés idomuljon a szélirányhoz legalább 10-15 percig állandó irányból kell fújni. Ez persze magában még nem elegendő, ugyanis az idomulás utáni időre van szükségünk, tehát az azonos irányú szeleknél a 10 perc utáni értékek relevánsak számunkra.



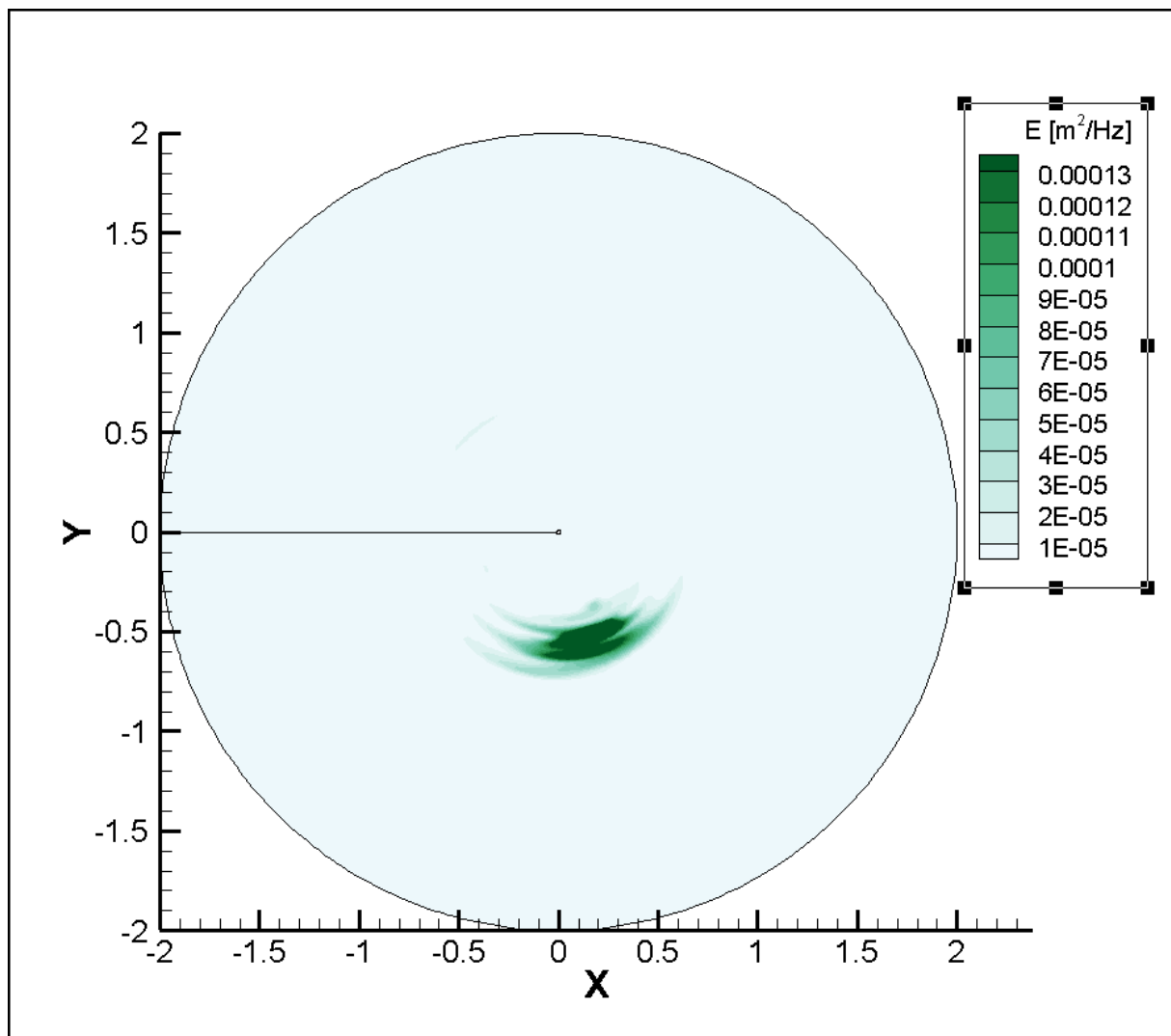
23. ábra A június 28-29-ei mérések során a szélesség szinte végig a kívánt 5 m/s-os határ felett

A széladatok ábrázolása a mellékletben található, ahol a már leválogatott, 5 m/s feletti szél-erősségek és a hozzájuk tartozó szélirányok közül illusztráltam párat. Érdekes módon az figyelhető meg, hogy habár a szélrózsa minden irányából detektált az anemométer értékeket, a valóban nagy sebességű szelek mind az uralkodó DNy-i irányból érkeztek, illetve 1-2 alkalommal felfedezhető még D-i vagy Ny-i széljárás is az 5m/s-os határ felett.

Ezen felül meg kell jegyezzem, hogy a nyári mérési időszak nem volt a legmegfelelőbb a szélérés szempontjából, ugyanis többször is előfordult, hogy akár 4-5 napig se érte el a szélsebesség még a 3 m/s-os értéket sem, vagy csupán pár percig tartó nagyobb szélökések jelentek meg.

A feldolgozás másik oldala az áramlásmérések feldolgozása. Itt is ugyanaz a probléma áll fenn, mint a széladatok esetén, túl sok az adat és nincs mindenre szükségünk. Mivel a széladatakból már leválogattuk a megfelelő értékeket, így itt már csak a hozzájuk tartozó időintervallumokat kellett hozzárendelni.

Miután a szélirányok nem mutattak túl nagy változatosságot a mérések folyamán, így a létrehozott spektrumokon is repetitíven ugyanazok az értékek mutatkoztak meg.



24. ábra Egy DNy-i szél által keltett áramlás spektruma

## 8 Konklúzió

A mérések feldolgozásából több minden is kiolvasható. A széladatokból előállított diagrammok segítségével megállapíthatjuk, hogy a nádassziget körül DNy-i széljárás az uralkodó, amely nem meglepő tekintve, hogy az egész tóra is ez jellemző.

Az is jól látszik, hogy nagyobb szélességekre is csak a DNy-i irányból lehet számítani, illetve elvétve vagy D-i vagy Ny-iből. Az ezeken felül jelentkező szélirányok roppant kaotikus módon jelentkeznek, ráadásul 3-4 m/s-nál nem is nagyobbak.

A kezdeti felvetésünk szerint kisebb-nagyobb előfordulással, de minden fő irányból éri a nádasszigetünket erősebb szél. Ez alapján idő és költséghatékony módon kihasználtuk volna a sziget forgásszimmetriáját és csupán egy helyről akartuk vizsgálni a szél által keltett áramlást. Az adott szélirány É-i irányba forgatásával a műszerünk helye „vándorol”, így a sziget körül minden irányból meg lehetne figyelni az áramlási viszonyokat a nélkül, hogy a műszert ténylegesen elmozdítanánk.

A kapott eredmények alapján azonban az eredeti ötletünk nem kivitelezhető, nincsenek hozzá megfelelő környezeti adottságok, A meglévő 3 szélirány túlságosan kis szegmensét takarja le az áramlásmérőnek, így a sziget főirányhoz képesti két oldaláról semmilyen információnk nem született. A későbbiekben érdemes lenne a sziget hiányzó két oldalára is felállítani a műszert, hogy arról is kaphassunk valamiféle információt.

## 9 Köszönetnyilvánítás

Ez úton szeretném megköszönni konzulensemnek Dr. Krámer Tamásnak (egyetemi docens, Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszék) a téma megválasztását, majd pedig a kutatás közben nyújtott segítségét. Szeretném megköszönni másik konzulensemnek is Szilágyi Mariannak (doktorandusz, Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszék) a terepi méréseken nyújtott útmutatásáért és az adatok feldolgozásában nyújtott segítségéért. Ezeken felül pedig szeretnék köszönetet mondani Rehák Andrásnak (tanszéki mérnök, Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszék), Pozsgai Istvánnak (műszaki oktató, Vízépítés és Vízgazdálkodási Tanszék), valamint az Észak-dunántúli Vízügyi Igazgatóság Hansági Szakasz mérnökségének a Fertő-tavi mérések során nyújtott segítségét.

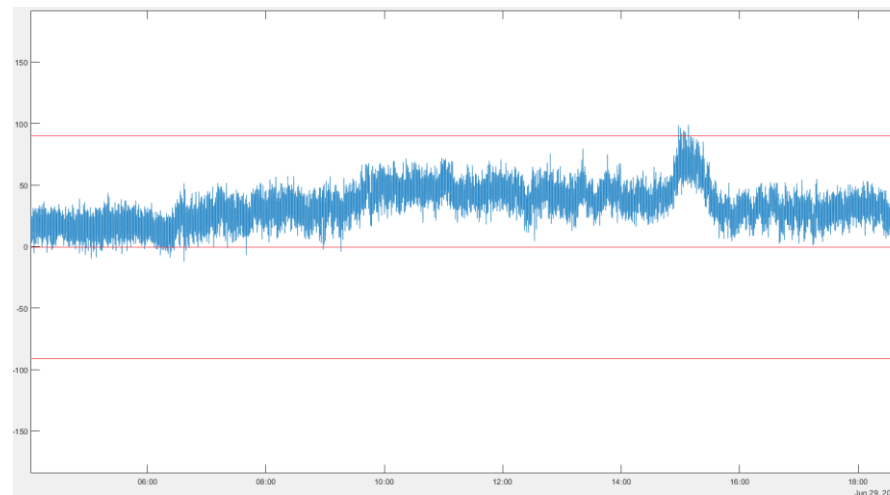
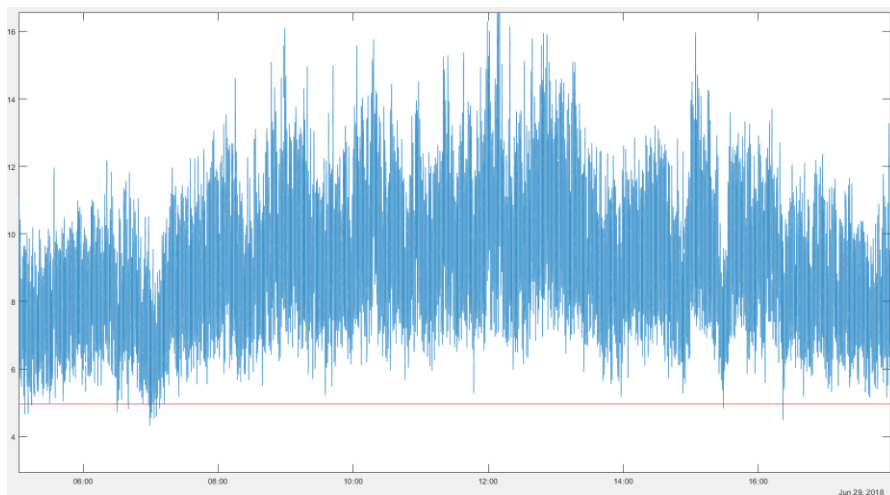
## 10 Irodalomjegyzék

1. Budó Ágoston: Kísérleti Fizika I. 317. o. (Kilencedik kiadás, Tankönyvkiadó, Budapest, 1986)
2. <https://hu.wikipedia.org/wiki/Fert%C5%91> (2018.10.20.)
3. <http://www.ferto-neusiedlersee.hu/index.html> (2018.10.20.)
4. <http://www.nortekgroup.com/products/aquadopp-profiler-1-mhz> (2018.10.21.)
5. [http://titan.physx.u-szeged.hu/~julio/Dokumentum\\_Mech-HullOptKis.html?fbclid=IwAR0WI6Q-6AEclnhZNaI4GAoHipfQSVM0hbb-TeQHPjBqNSMPpQzXBb-fE0qM#id319036](http://titan.physx.u-szeged.hu/~julio/Dokumentum_Mech-HullOptKis.html?fbclid=IwAR0WI6Q-6AEclnhZNaI4GAoHipfQSVM0hbb-TeQHPjBqNSMPpQzXBb-fE0qM#id319036) (2018.10.21.)
6. <http://elte.prompt.hu/sites/default/files/tananyagok/Oceanografia/ch05s03.html> (2018.10.21.)
7. Kiss M, Physical interaction mechanisms at the littoralpelagic interface of shallow lakes
8. Homoródi K, Investigation and modelling of wind induced waves in shallow water
9. Lükő G, Analysis of UAV-based topography and river flow measurements

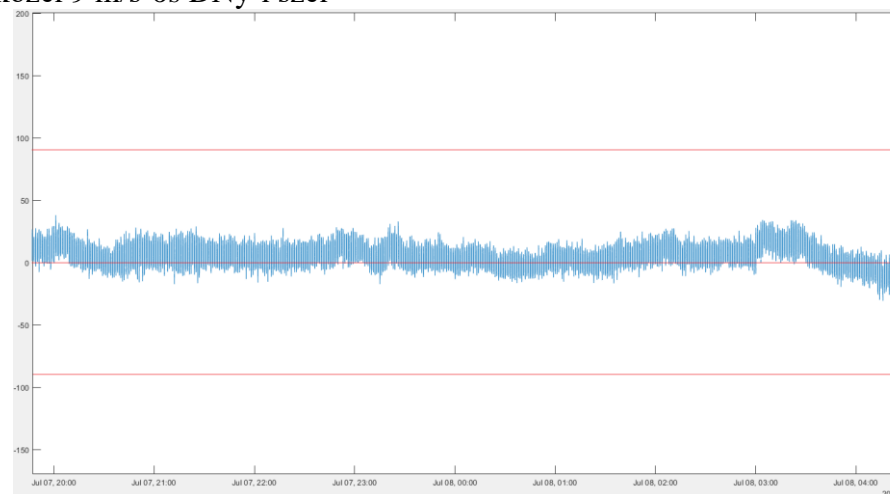
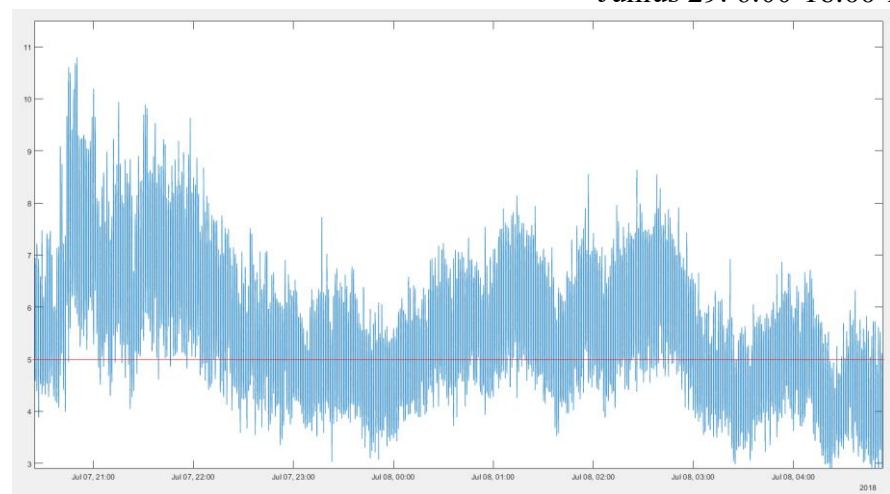
## 11 Ábrajegyzék

1. ábra Szélrózsa a Fertő tavon.....	3
2. ábra A nádassziget változása az évek során .....	3
3. ábra A Fertő a GoogleMaps műholdképén .....	5
4. ábra A Fertő Fertőrákos kikötőből, a távolban nagy kiterjedésű nádas félszigettel.....	6
5. ábra DJI Phantom 3 drón. A hasán jól megfigyelhető a méréseinkhez felhasznált kamera a hozzátartozó gimballal. ....	7
6. ábra Aquadopp Profiler 1MHz.....	8
7. ábra San Francisco partjainál az óceán hullámadatainak mérésére előkészített Aquadopp Profiler 1MHz készülék. A kép <a href="https://soundwaves.usgs.gov/2006/04/">https://soundwaves.usgs.gov/2006/04/</a> oldalról származik, ahol az Egyesült Államok Földrajzi Kutatóközpontjának (USGS) szakemberei által végzett kutatásokról számolnak be. ....	9
8. ábra CSAT3 .....	9
9. ábra A telepített hidrometeorológiai állomás .....	10
10. ábra Szélirányok ábrázolása Matlab-ben.....	12
11. ábra A vízrészecskék mozgása a vízhullámban .....	15
12. ábra A vízrészecskék kölcsönhatása a fenéssel .....	15
13. ábra Az elhajlás jelenségének szemléltetése hullámkádban. Jól megfigyelhető a rész szélességének és a hullámhossznak a függvényében hogyan változik az elhajlás.....	16
14. ábra Szórt hullám kialakulása hullámkádban .....	17
15. ábra Disszperzió hullámkádban .....	17
16. ábra Eredő hullám kialakulása (piros), két különböző frekvenciájú szinuszos hullám(zöld és kék) összegeként .....	18
17. ábra Hullámabszorpció bemutatása a GeoGebra alkalmazásban .....	18
18. ábra A mérési pontok elhelyezkedése a sziget körül. A kék jel a meteorológiai állomás helyzetét, a piros az Aquadopp 2018. július 26-ig, a sárga pedig a 2018. július 26-tól aktuális helyzetét jelöli. ....	19
19. ábra A nádassziget elhelyezkedése a tavon a Google Mapsen.....	20
20. ábra A mérési helyszín sematikus ábrázolása a Google Maps műholdfotóján .....	21
21. ábra A Phantom 3 indítása a mérés előtt .....	22
22. ábra Az egyik alappontunk.....	23
23. ábra A június 28-29-ei mérések során a szélesség szinte végig a kívánt 5 m/s-os határ felett.....	25
24. ábra Egy DNy-i szél által keltett áramlás spektruma .....	26

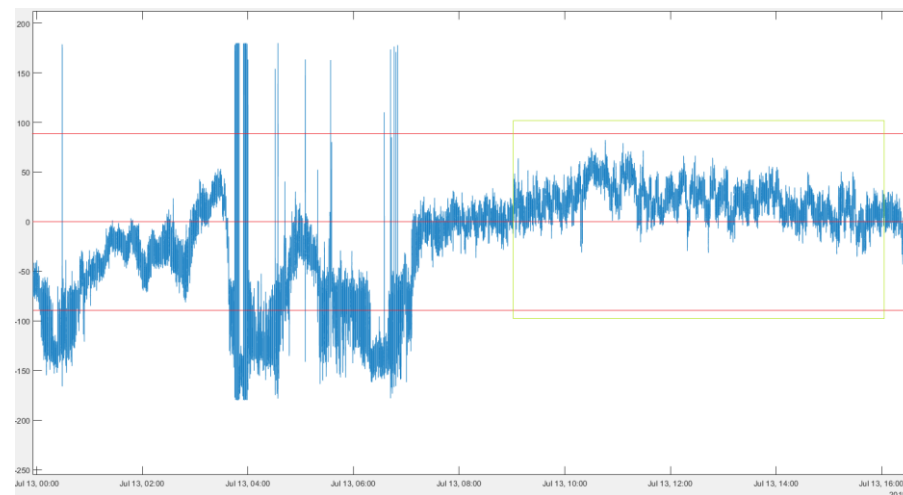
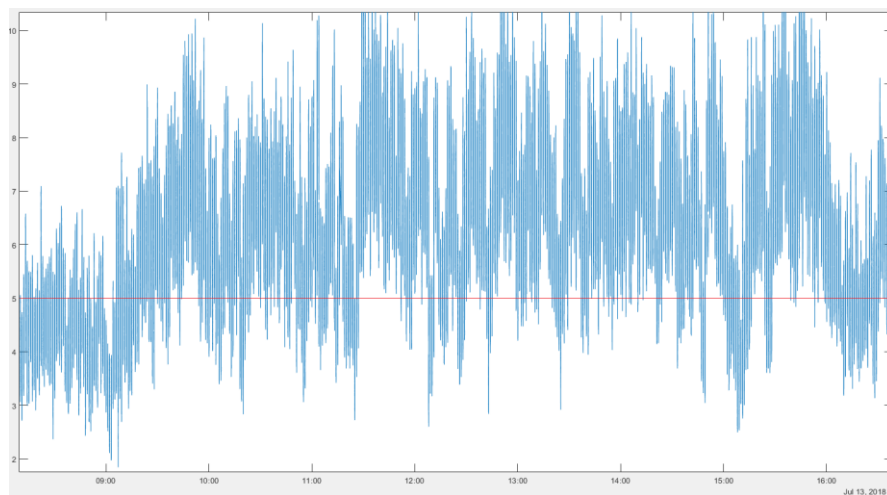
## 12 Melléklet



Június 29. 6:00-16:00-ig közel 9 m/s-os DNy-i szél



Július 7-8 éjszaka közel állandó irányú Ny-i szél fúj



Július 13.-án reggel minden irányból detektáltunk szelet, ám 5 m/s fölé csak 9 óra tájt ment, mikor is beállt a DNy-i szélirány