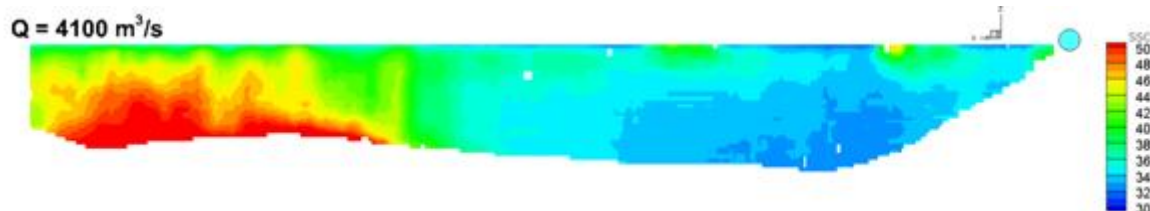




Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem  
Építőmérnöki Kar  
Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszék

## Tudományos Diákköri Konferencia 2014

Pontbeli zavarosságmérésen alapuló hordalékhozam becslő  
eljárás implementálása a Dunára



Készítette: Kutai Rebeka Debóra

Konzulensek: Dr. Baranya Sándor

Török Gergely Tihamér

## Tartalom

|                                                                                                                |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Bevezetés.....                                                                                                 | 4  |
| 1. Hordalék keletkezése.....                                                                                   | 6  |
| 2. Vízfolyások geomorfológiai hossz-szelvénye .....                                                            | 7  |
| 3. Hordalékok csoportosítása.....                                                                              | 8  |
| 4. A kutatás, valamint a dolgozat célja.....                                                                   | 9  |
| 5. Mérési módszerek.....                                                                                       | 10 |
| 5.1. Kézi mintavevők.....                                                                                      | 10 |
| 5.2. Automatikus mintavevők .....                                                                              | 13 |
| 5.3. Indirekt módszerek .....                                                                                  | 14 |
| 6. Alkalmazott mintavevők és módszerek.....                                                                    | 17 |
| 7. Zavarosság.....                                                                                             | 17 |
| 8. A mérések bemutatása.....                                                                                   | 21 |
| 8.1. vízmintavételek .....                                                                                     | 21 |
| 8.2. zavarosság mérés.....                                                                                     | 21 |
| 8.2. vezetőképesség mérés.....                                                                                 | 22 |
| 8.3. laboratóriumi feldolgozás .....                                                                           | 22 |
| 8.3.1. összes szárazanyag tartalom meghatározása .....                                                         | 23 |
| 8.3.2. lebegőanyag tartalom meghatározása.....                                                                 | 24 |
| 8.3.3. vezetőképesség mérés.....                                                                               | 24 |
| 8.3.4. szemösszetétel vizsgálat .....                                                                          | 25 |
| 8.4. Terepi mérés .....                                                                                        | 25 |
| 9. Eredmények bemutatása.....                                                                                  | 27 |
| 9.1. mérési időszak hidrológiai adatai .....                                                                   | 27 |
| 9.1.1. vízállás idősor.....                                                                                    | 28 |
| 9.1.2. vízhozam-vízállás görbe.....                                                                            | 28 |
| 9.1.3. vízhozam idősor .....                                                                                   | 29 |
| 9.2. vízmintákból kapott lebegőanyag tartalom idősora.....                                                     | 30 |
| 9.3. zavarosság idősorok .....                                                                                 | 31 |
| 9.4. zavarosság alapú lebegőanyag tartalom meghatározás .....                                                  | 32 |
| 9.5. vízállás és hordaléktöménység kapcsolatának nem permanens jellege .....                                   | 33 |
| 9.6. vízhozam és lebegőanyag tartalom kapcsolatának kimutatása vízminták alapján .....                         | 34 |
| 9.7. vízhozam és lebegőanyag tartalom kapcsolatának kimutatása zavarosságadatok alapján .....                  | 35 |
| 9.8. lebegtetett hordalék szemösszetételének változása .....                                                   | 36 |
| 9.9. Összes szárazanyag tartalom és lebegőanyag tartalom hányadosának vizsgálata a vízhozam függvényében ..... | 37 |

|                                                                                                              |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 9.10. ADCP mérések .....                                                                                     | 38 |
| 9.10.1. Sebesség eloszlása a keresztshelvény mentén .....                                                    | 39 |
| 9.10.2. Lebegőanyag tartalom eloszlás a keresztshelvény mentén .....                                         | 39 |
| 9.10.3. Fajlagos hordalékhozam eloszlás a keresztshelvény mentén.....                                        | 40 |
| 9.10.4. Vízhözam és hordalékhozam közötti kapcsolat.....                                                     | 41 |
| 9.10.5. Part menti lebegőanyag tartalom és teljes shelvényen átaramló hordalékhozam közötti összefüggés..... | 42 |
| 10. Összefoglalás.....                                                                                       | 44 |
| 11. Következtetések.....                                                                                     | 45 |
| Köszönetnyilvánítás .....                                                                                    | 46 |
| Hivatkozások .....                                                                                           | 47 |

## Bevezetés

A folyómedrek morfológiai változásait alapvetően a hordalékszállítási viszonyok térbeli és időbeli eloszlása határozza meg. A vízfolyások hordalék elragadó és szállító képességétől függően a meder erodálódhat, vagy épülhet. Ha a hordalékszállító képesség (amit a fenék-csúsztatófeszültség, illetve turbulencia jellemez) annyira lecsökken, hogy az áramlás a vízben található szilárd szemcsék egy részét már nem tudja tovább szállítani, akkor ott hordalék lerakódás megy végbe. Magasabb fenék-csúsztatófeszültség és turbulencia esetén pedig medererózió következik be.

A folyó által szállított hordalékokat három csoportba oszthatjuk: lebegtetett hordalék, görgetett hordalék, valamint oldott anyag, amely nem vesz részt a morfológiai folyamatokban. A lebegtetett hordalék esetén a szemcsék nagysága akkora, hogy a szemcse súlya és a rá ható felhajtóerő nagysága elhanyagolhatóan kicsi a turbulencia okozta erőviszonyokhoz képest, ezért a vízzel együtt mozognak és a teljes vízoszlopban el van keveredve. A görgetett hordalék mozgását a súly, elragadó és súrlódási erők határozzák meg. Az erők eredőjéből adódóan, a görgetett hordalék a mederfenékkal párhuzamos irányba „halad”, ez a mozgás lehet gördülés, csúszás vagy ugrálás, de mindig a mederfenék közvetlen közelében. (Garcia, 2008)

A hordalékáramlás részletes elemzése azért fontos számunkra, hogy tisztába legyünk vízfolyásunk természetes mederalakulásával, valamint az emberi beavatkozások által megváltoztatott hordalékviszonyok hatásaival. Ezek a mesterséges beavatkozások lehetnek például duzzasztóművek, folyószabályozási művek, hidak, különböző kereszt- és hossz-irányú műtárgyak. A mesterséges úton megváltoztatott hordaléktranszport folyamatok különböző problémákat eredményezhetnek: tározók és kikötők feliszapolódása, vízlépcsők alvízi oldalán történő medermélyülés, műtárgyak megrongálódása, hajózási út szűkítése stb. Ezért nagyon fontos feladat a hordalékszállítás részletes elemzése és megismerése. Az ehhez kapcsolódó vizsgálatok alapvetően három pilléren állnak: terepi mérések, laboratóriumi kísérletek valamint számítógépes modellezés.

A lebegtetett hordalék vizsgálatához Magyarországon és külföldön is folyamatosan fejlesztettek ki a hordalékviszonyok meghatározására eszközöket, azonban a vizsgálati eljárásokon még tovább kell dolgozni. A hordalék mennyiségét meghatározó mérések és eljárások sokkal összetettebbek, mint a hidrológiai adatok meghatározása egy vízfolyásnál (magyarországi folyók esetén hordalék-mennyiségi adatok sokkal kisebb számban vannak,

mint a hidrológiai értékek). Azonban mind a hidrológiai, mind a hordalék-mennyiségi adatokra egyaránt szükség van vizeink morfordinamikai vizsgálatához.

Jelenleg a lebegtetett hordaléktranszport jellemzőinek meghatározása elég költséges és összetett folyamat. Ez jelentősen hátráltatja a szükséges mennyiségű és minőségű adatszolgáltatást. Gyakorlatban ez a korszerű berendezések megbízható kalibrálását (amely előrelépést jelentene), valamint hordaléktranszport modellek megfelelő paraméterezését jelentősen hátráltatja. A kutatás célja egy költséghatékonyabb, ugyanakkor megbízható és részletes adatszolgáltatást biztosító eljárás kidolgozása és megalkotása.

## 1. Hordalék keletkezése

A hordalék keletkezése az eróziós folyamatokhoz köthető, vagyis amikor a szilárd részek az alapkőzetből lemállanak. Az erózió bekövetkezésének több kiváltója lehet: víz, szél, gleccser valamint állati és növényi tevékenységek. A folyami hordalékok szállítását a víz okozza. A természetes erózió lassú folyamat, évszázadokban, évezredekben mérhető, azonban az emberi tevékenységek hatása ennél jelentősen gyorsabb. A hordalék vándorlását valamint a morfodinamikai hatásait az 1. ábra mutatja.



1. ábra: Hordalék vándorlása valamint morfodinamikai hatásai (Baranya és Józsa, 2011)

A szilárd részek mozgását általában a csapadék indítja be, amely az instabil szemcséket kimossa az alapkőzetből. Az alapkőzetet alkotó szilárd szemcsék mozgását eredményezheti a földcsuszamlás, az iszapáradat valamint a gleccserár is. Ezek után a hordalékszemcsék erek, vízmosások, patakok, folyók medreiben mozognak a befogadó felé. Az elragadott és szállított hordalék mennyisége függ többek között a vízhozamtól, a vízfelszín esésétől, meder geometriájától stb. Ezek alapján a befogadó felé haladva nem várhatunk egyértelmű tendenciát a hordalékhozam tekintetében. Például a vízfelszín esésének hirtelen csökkenése a hordalékszállító képesség jelentős csökkenését eredményezi, ami a hordalék lerakódáshoz

vezet. Ez a folyamat eredményezi az ún. kontinentális delta kialakulását (pl. Kisalföld), illetve a torkolatok közelében fokozatosan tapasztalható kiülepedést. A szedimentáció következtében feltöltődések, gázlók, szigetek és deltatorlatok jöhetnek létre.

## 2. Vízfolyások geomorfológiai hossz-szelvénye

A folyóknak három szakaszjellegét különböztetjük meg: felső, alsó valamint középső. Vannak olyan folyók, ahol csak egy szakaszjelleg teljesül, de nagyobb vízfolyásoknál mind a három előfordul a természetföldrajzi és geológiai viszonyok függvényében.

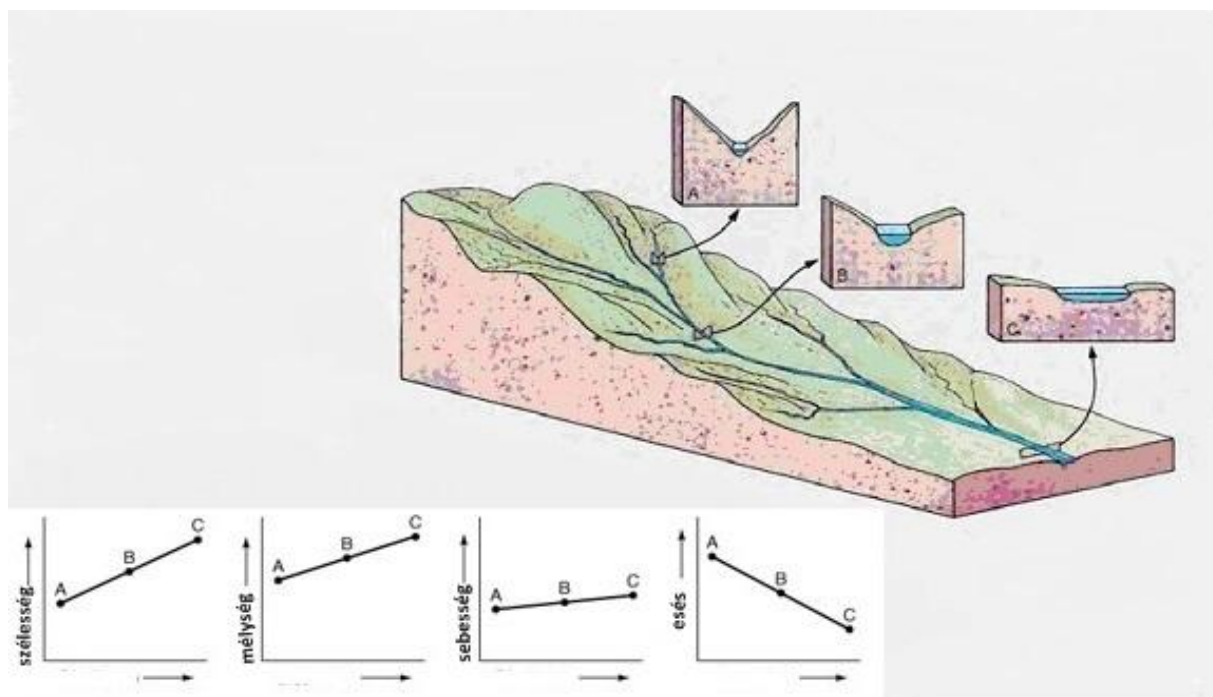
Felsőszakasz-jelleg akkor alakul ki egy folyóban, amikor az áramlás hordalékszallító képessége meghaladja a felvízről érkező hordalék szállításához szükséges kapacitást. Ebben az esetben a "felesleges" munkavégző képességével megtámadja a medrét és eróziót fejt ki. Ezek a folyók V-alakú völgyet alakítanak ki, vagyis a meder alját mélyíti, azonban csak kis mértékben szélesíti. Ez a folyamat több részből tevődik össze: a mederben áramló víz magával ragadja a durvább szemcsét, amellyel a medret csiszolja és koptatja, majd a lepattintott törmelékdarabok egymáshoz ütődve aprózódnak, őrlődnek tovább. A rendelkezésre álló hordalékanyag miatt, ezen a szakaszon a görgetett hordalék dominál.

A középsőszakasz-jelleg esetén a hegyből kilépő folyó sebessége és így a munkavégző képessége is annyira lecsökken, hogy az áramlás hordalékszallító kapacitása közel megegyezik a hordalék elszállításához szükséges munkával. A hirtelen eséscsökkenés következtében egyből lerakja az általa szállított hordalék nagy részét, így hordalékkúpok keletkeznek. A szedimentációs szakasz után a folyó elszállítja ugyan a felvízről érkező szemcséket, de a medrét már nem tudja mélyíteni, vagyis dinamikus egyensúlyi állapotban van. A lecsökkent sebességű vízfolyások jellemző tulajdonsága, hogy a medre kanyargós és oldalazó erózióval szélesíti a völgyét. A kanyar domború oldalán az erősebb vízáramlás miatt pusztul a part, alámosott part alakul ki. Homorú partja épül, ott pedig övzátonyok keletkeznek.

Alsószakasz-jellegű vízfolyásoknál a folyó munkavégző képessége kisebb, mint ami az érkező hordalék elszállításához szükséges, ezért nem tudja azt teljesen továbbszállítani, így egy részét lerakja. A lerakott hordalékból zátonyokat, szigeteket épít a medrében. Ezek több ágra szakadásra, valamint a régi meder elhagyására kényszerítik a folyót. A mederben lerakódott hordalék az áramlást a partok felé szorítja, ezért a partok is erodálódnak, amely következtében újabb hordalék kerül a mederbe. A feltöltődő tevékenység miatt újabb

szétágazások, majd az ágak lefüződésével holtágak keletkeznek. Alsószakasz-jellegű vízfolyáson a lebegtetett hordalék dominál a görgetettel szemben. Ez részben azzal magyarázható, hogy a felsőszakaszból származó görgetett hordalékok jelentős része apró szemcsékre koptat. Másrészt pedig a folyó hordalékszállító képessége már alig teszi lehetővé nagyobb szemcsék mozgását.

A vízfolyás sematizált geomorfológiai hossz-szelvényét és a jellemző mederalakokat a 2. ábra mutatja.



2. ábra: Vízfolyás geomorfológiai hossz-szelvénye (geocaching.com, 2011)

### 3. Hordalékok csoportosítása

A hordalékot kétféle osztályozás alapján jellemezhetjük. Az egyiknél a szállítás módját vesszük figyelembe, a másiknál pedig a hordalék eredetét.

Európában terjedt el a szállítási mód szerinti csoportosítás, ahol lebegtetett és görgetett részt különböztetünk meg. A lebegtetett hordalék az áramlás turbulens jellegének köszönhetően a teljes vízoszlopban átkeveredve utazik. Görgetett hordalékról akkor beszélünk, amikor a szemcsék a mederfenék közelében gördülnek, csúsznak és ugrálnak, vagyis a mederrel párhuzamosan, annak felületén mozognak. Az áramlás hordalékszállító kapacitásának, illetve a mederanyag függvényében anyaga a finom homoktól a durva kavicsig változhat.

A hordalék eredete szerinti osztályokba sorolás az Egyesült Államokból származik. Itt vízgyűjtőből bemosott, mederanyagból felkevert, valamint mederanyag hordalékot különböztetünk meg. A két osztályozási rendszert az 1. táblázat ismerteti.

1. táblázat: Hordalékok csoportosítása (Garcia, 2008)

| teljes hordalékmennyiség                                            | osztályozási rendszer                          |                                                  |
|---------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------|--------------------------------------------------|
|                                                                     | hordalékvándorlás módja<br>alapján             | szemcse méret alapján                            |
| vízgyűjtőből bemosott<br>hordalék<br>(wash load)                    | lebegtetett hordalék<br>(suspended load)       | vízgyűjtőből bemosott<br>hordalék<br>(wash load) |
| lebegtetett mederanyag<br>hordalék<br>(suspended bed-material load) | lebegtetett hordalék<br>(suspended load)       | mederanyag hordalék<br>(bed-material load)       |
| görgetett mederanyag<br>hordalék<br>(bed load)                      | görgetett mederanyag<br>hordalék<br>(bed load) | mederanyag hordalék<br>(bed-material load)       |

A lebegtetett hordalék olyan hordalék, amely az áramlás turbulenciája által, lebegtetve mozog. A görgetett hordaléktól alapvetően abban különbözik, hogy mozgását elhanyagolható mértékben szabja meg a szemcse súlya és a felhajtóerő, pályáját főleg a turbulencia okozta erők határozzák meg. A vízgyűjtőből bemosott hordalék a mederfenéken található hordaléknak csak néhány százalékát alkotja és általában iszapot és agyagot tartalmaz. A görgetett mederanyag hordalék nagyobb méretű szemcséket tartalmaz, mint a vízgyűjtőből bemosott hordalék.

A vízgyűjtőről bemosott hordalék nem képes kiüledni, alacsony turbulencia hatására is a víztérben lebeg. Emiatt nem befolyásolja a folyó morfodinamikai változásait, így vizsgálatunk szempontjából irreleváns. A lebegtetett és a görgetett mederanyag hordalék kapcsolatban van a mederrel, ezért a morfodinamikai változások megismeréséhez ez a két csoport fontos. Jelen kutatás során az Egyesült Államokból származó csoportosítást fogjuk használni és a lebegtetett mederanyag hordalékot vizsgáljuk.

#### 4. A kutatás, valamint a dolgozat célja

A TDK dolgozat célja a megelőző kutatásban (Nagy, 2014) készített lebegtetett hordalékmérési eljárás további pontosítása. Ez várhatóan hozzájárul a hazai hordalék

monitoring tudományosan megalapozott módon való kiépítéséhez. Egy olyan eljárást akarunk kifejleszteni, amely költséghatékonysága mellett részletes adatot szolgáltatna a lebegtetett hordalék jellemzőiről. A dolgozat célja a megelőző kutatás során felmerült problémákra való megoldási javaslat kidolgozása, valamint ezen keresztül a mérési eljárás pontosítása. Az előző kutatás elsősorban a különböző vízjárások és a hozzájuk tartozó lebegtetett hordalékmennyiség közötti kapcsolatot vizsgálta. Jelen TDK munka fő célja ennek az összefüggésnek terepi és laboratóriumi méréseken alapuló további elemzése.

## 5. Mérési módszerek

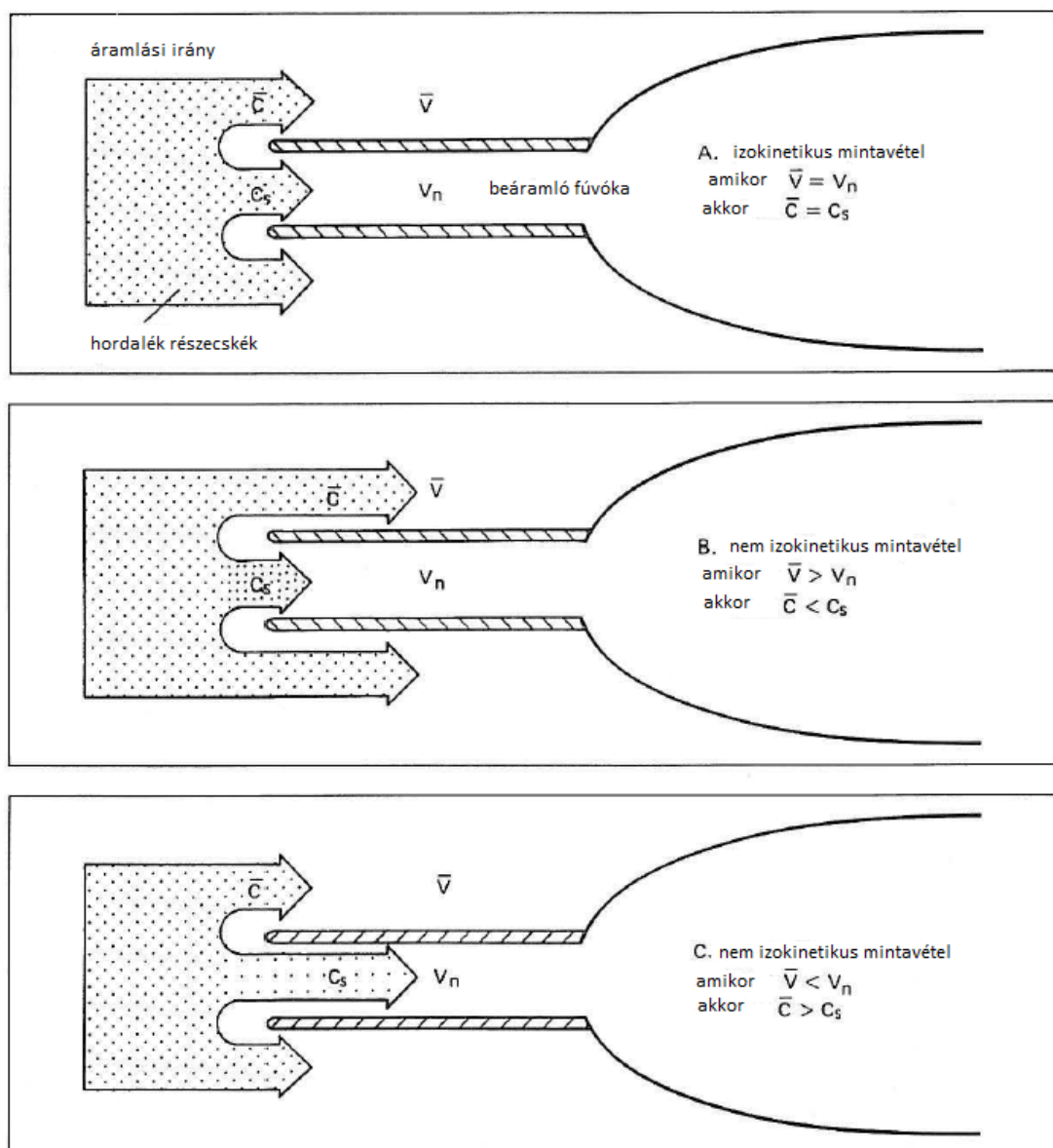
Lebegtetett hordalékmérési módszereket három fő csoportba sorolhatjuk: kézi mintavétel, automatikus mintavétel valamint indirekt módszerek.

Kézi és automatikus mintavevők esetén adott mennyiségű vízmintát merítünk a víztestből. Ezek után a hordalékot leülepítjük, és laboratóriumi mérésekkel állapítjuk meg a hordalék mennyiségét és a szemösszetételt. Indirekt módszer esetén fényjel, hangjel vagy lézer segítségével állapítjuk meg a hordalék mennyiségi és fizikai tulajdonságait.

### 5.1. Kézi mintavevők

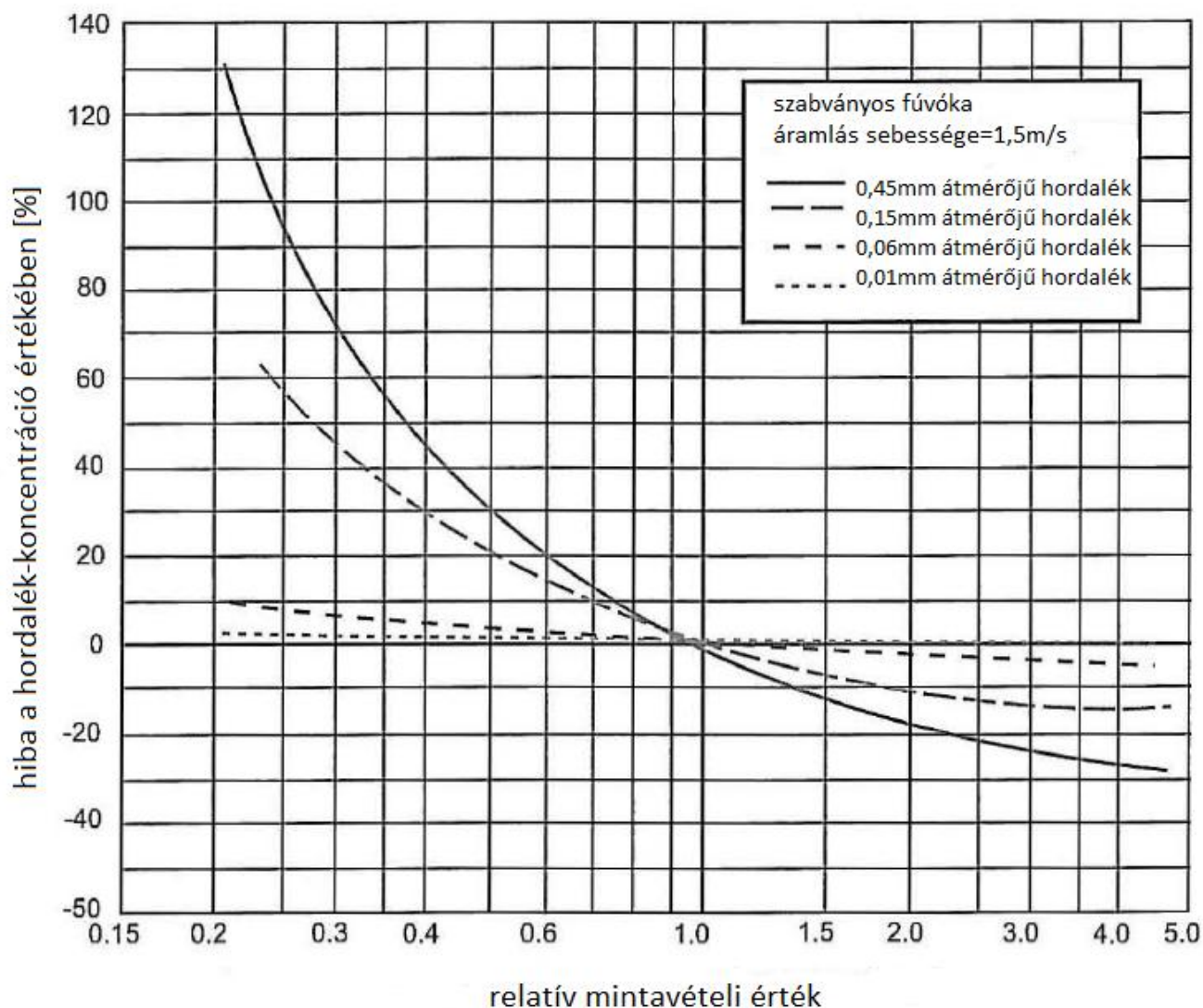
Pillanatnyi mintavevő (instantaneous sampler) alkalmazható olyan áramlások esetén, ahol az izokinetikus mintavevő kritériumai nem teljesülnek: mintavétel mélysége nagyobb, mint 0,3 m és az átlagsebesség nagyobb, mint 0,5 m/s.

Izokinetikus mintavevőknél (isokinetic sampler) a mintavevő szivattyúzási sebességének a lehető legjobban meg kell közelítenie a vízfolyás sebességét, mert így akkor kapunk az áramlással azonos hordalék-koncentrációjú mintát. Ha a mintavétel sebessége kisebb, mint az áramlás sebessége, akkor nagyobb koncentrációjú mintát kapunk, mint a vízfolyásé. Ellenkező esetben kisebbet. Ezt az összefüggést mutatja a 3. ábra.



3. ábra: Áramlás és a szivattyúzási sebesség közötti eltérés hatása a vízminta hordalék-koncentrációjára (Garcia, 2008)

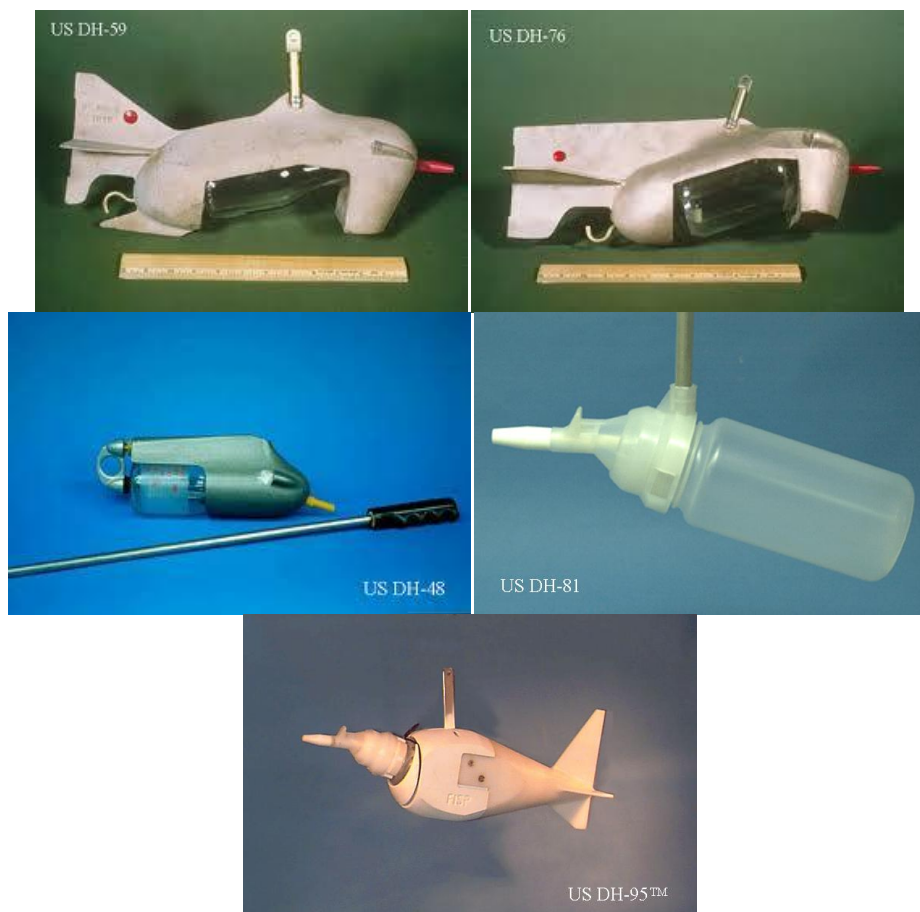
A sebességkülönbség által okozott hibaértéket a 4. ábra mutatja a hordalékszemcse átmérőjének függvényében. A relatív mintavételi érték egyenlő a szivattyúzási és az áramlás sebességek hányadosával.



4. ábra: A sebességkülönbség által okozott hiba a hordalék-koncentráció értékében (Garcia, 2008)

Palackos mintavevő (rigid-bottle sampler) műszer úgy van kialakítva, hogy a fúvókája a vízfolyásba engedve az áramlási iránnyal szembe nézzen. Így a víz egy része beáramlik a palackba a nyíláson keresztül.

US DH-81, US DH-48, US DH-59, US DH-76, és US DH-95 mintavevők működése a hidrosztatikai nyomás és a légnyomás kiegyenlítésén alapul.



5. ábra: US DH-81, US DH-48, US DH-59, US DH-76, és US DH-95 mintavevők (Davis, 2005)

Zsákos mintavevőnél (bag sampler) a zsákot még a vízfelszín fölött lezárják. Ezek után eresztik a vízfolyásba, ahol a megfelelő mélységben kinyitják a mintavétel elvégzésére.

Szivattyús mintavevőknél szintén pontbeli mintát tudunk venni, amiből a hordalék jellemzői labormérésekkel határozható meg. A szivattyút a mérőcsónakra helyezzük el, amelyhez egy kis átmérőjű tömlőt csatlakoztatunk. Egy súly segítségével tudjuk a tömlő függőleges helyzetét biztosítani a mintavétel folyamán.

A kézi mintavevőket Garcia könyve alapján mutattam be (Garcia, 2008).

## 5.2. Automatikus mintavevők

Az automatikus mintavevők egy szivattyúból, egy palackból, egy minta elosztóból, egy működtetési és egy befogadó részből állnak. Ezeknél a mintavevőknél is fontos, hogy a szivattyúzási sebesség a lehető legjobban közelítse meg az áramlási sebességet, mivel így nem változik meg a minta hordalék-koncentrációja. A kiválasztott pontokban mintát

szivattyúznak, amely az ülepítőhengerbe kerül. Egy erre a célra szolgáló berendezés lefényképezi a kiülepített mintát, amiből a hordalék jellemzői számszerűsíthetők.

### 5.3. Indirekt módszerek

Az indirekt módszerek ismertetését Wren és Kuhnle által publikált cikk alapján készítettem el (Wren és Kuhnle, 2002).

OBS (optical backscatter sensors) műszer infravörös vagy látható fényt bocsát a vizsgálandó víztestbe. A kibocsátó pont körül elhelyezkedő fotodiódák érzékelik a vízben lévő hordalékról visszavert fényt. Empirikus kalibráció segítségével tudunk a visszavert jel mennyiségéből kapott zavarosság értékekből hordalék koncentrációt meghatározni. Az OBS könnyen hozzáférhető és viszonylag olcsó készülék. A műszer által mérhető részecske mérettartománya 200-400 $\mu$ m, a hordalék koncentráció pedig 100 g/L.



6. ábra: OBS műszer (Nagy, 2014)

Optikai átvitel (optical transmission) elvén működő műszer fényt bocsát a mintába, aminek egy részét a hordalék elnyeli, visszaveri, illetve szétszór. A fényforrással szemben elhelyezett szenzor méri a fény csillapítását, amelyből empirikus kalibráció segítségével meghatározható a hordalék koncentráció. A készülék geometriai méretei határozzák meg a minta térfogatát. Ezek az eszközök viszonylag alacsony áron beszerezhetők.

Fókuszált fénysugár visszaverődése (focused beam reflectance): A minta magas fordulatszámon történő forgatása közben a műszer lézerét a minta egy pontjára kell fókuszálni. A forgás miatt a lézer a hordalékrészecskékről visszaverődik. A visszaverődési

idő alapján tudjuk a részecskék méretét meghatározni. A mérhető részecskék mérettartománya 1-1000 $\mu\text{m}$ , a hordalék koncentrációé pedig 0,01-50g/L.

Lézersugár elhajlás (laser diffraction): Egy lézersugarat a mintába irányozva a részecskék szétszórják, elnyelik, vagy visszaverik azt. Egy detektor segítségével a szétszórt fény szórási szögét tudjuk meghatározni. Ennek a szögnek az ismeretében tudjuk meghatározni a részecskék méretét. Az optikai lézer hossza 2,5-5cm, a mérhető részecskeméret tartománya 1,25-250 $\mu\text{m}$  vagy 2,5-500 $\mu\text{m}$ , a hordalék koncentráció pedig legfeljebb 5g/L. Ezek az eszközök viszonylag költségesek, azonban könnyen hozzáférhetők.



7. ábra: LISST műszer (uni-koblenz- landau.de, 2014)

Az akusztikus (acoustic) elven működő műszer magas frekvenciájú hangot (1-5MHz) bocsát ki a vizsgálandó vízmintába. A benne található hordalék szemcsék a jel egy részét visszaverik, amit a műszer érzékel. A visszavert jel lehetővé teszi, hogy a hordalék koncentrációt meghatározzuk. A visszavert hang amplitúdója függ a szemcsemérettől, a koncentrációtól, valamint a kibocsátott hang frekvenciájától. Ezt kihasználva több frekvencia használata esetén meg tudjuk határozni a szemösszetételt és a koncentrációt.



**8. ábra: Összeszerelt ADCP műszer**

Ultrahang frekvencián a műszer által mérhető részecske mérettartománya  $62\text{-}2000\mu\text{m}$ , a koncentráció legfeljebb  $30\text{g/L}$ . Az akusztikus technológia még napjainkban is fejlesztés alatt áll.



**9. ábra: ADCP műszer (Nagy, 2014)**

A nukleáris (nuclear) technológia a röntgen és gamma sugárzás visszaverődésén és csillapodásán alapul. Egy empirikus kalibráció segítségével tudjuk a hordalékszemcsékről visszavert sugárzásból a koncentrációt meghatározni, amely  $0,5\text{-}12\text{g/L}$ -es tartományban lehet.

A minta térfogata függ a műszer geometriájától. A nukleáris eszközök nehezen elérhetőek és manapság kevés helyen használják vízfolyások hordalékmennyiségének mérésére.

A színek visszaverődés (spectral reflectance) módszere a látható, vagy az infravörös fény visszatükröződése és a víz tulajdonságai közötti kapcsolatot veszi alapul. A sugárzást kézi, légi vagy műholdas spektrométerrel mérik. Ennél az eljárásnál a mérési terület sokkal nagyobb, mint a többinél, hiszen itt akár néhány  $\text{km}^2$  is lehet a vizsgálandó terület. Ezt a módszert tengeri környezetben szokták alkalmazni.

Digitális optikai (digital optical): A CCD (charge-coupled device) rögzíti a víz-hordalék keveréket. Ezt a felvétel lehet elemezni, amelyből megállapítható a hordalékrészecskék mérete valamint a koncentráció. A számítógépes, valamint a képfeldolgozó technológiát kell fejleszteni a módszer hasznossága érdekében.

Rezgő cső (vibration tube): A vízmintát átvezetik egy ismert frekvenciával rezegtetett csövön. A víz sűrűsége befolyásolja a rezgés frekvenciáját, amelyből a hordalék koncentrációt tudjuk meghatározni. Azonban számos más tényező is befolyásolja a frekvenciát: a cső falára tapadt szemcsék, oldott szilárd anyag, valamint a hőmérséklet. Ezekkel mind számolni kell, hogy pontos értéket kapjunk. 1g/L-es koncentráció felett működik megbízhatóan a készülék.

Ütközési mintavevő (impact sampler): A készülék működése a lendület átvitelén alapszik. A hordalék részecskék lendületének mértékét méri egy érzékelő. Az észlelt hatás függ a tömegtől, a sebességtől és a szögtől. Folyami közegben sok technikai probléma merül fel.

## 6. Alkalmazott mintavevők és módszerek

Kézi mintavevők közül méréseink során a szivattyúsat használjuk. Ennek a műszernek a fejlesztése is célunk volt a kutatásaink során, hogy minél pontosabb mérési eredményekhez jussunk. Indirekt módszerek előnyeit kihasználva, OBS és ADCP műszerekkel alkalmazására is sor került. Az OBS zavarosság-mérő eszköz közvetlenül méri a zavarosságot, amelyből hordaléktöménységet tudunk meghatározni. Az ADCP műszerrel által mért visszavert jel erőssége alapján lehetséges a hordalék koncentráció becslése.

## 7. Zavarosság

Kemker által publikált cikk alapján mutatom be a zavarosság és a lebegőanyag tartalom közötti összefüggést (Kemker, 2014).

A hordalékok osztályozása alapján a morfológiai folyamatokat a görgetett hordalékon kívül csak a lebegtetett mederanyag hordalék befolyásolja. Korábbi mérések és elemzések során arra a megállapításra jutottunk, hogy a vizsgált vízmintákban található részecskék nagy százalékban oldott formában vannak jelen. Ezért szükséges az oldott és lebegő anyag szétválasztása, mivel morfodinamikai változások vizsgálatához csak a lebegő rész meghatározása szükséges.

A vízben található részecskék méretük alapján két részre bonthatóak. Két mikronnál nagyobb részecskék a lebegőanyagok, annál kisebbek pedig az oldott anyagok. A lebegő anyagokat a szervesetlen anyagok, a baktériumok és az algák alkotják, amelyek a szárazanyag-koncentrációba is beletartoznak. A szerves részecskék lebomló anyagai is beleszámítanak a lebegőanyag-koncentrációba. A szemcsemérettől függően, a lebegőanyag egy része (pl. homok, iszap, vagy agyag) kiülepedik a mederfenékre, amikor alacsony az áramlás turbulenciája. A fennmaradó részecskéket, amelyek nem ülepednek ki, nevezzük kolloidnak.



10. ábra: Víztestben található részecskék (Kemker, 2014)

A zavarosság a víz fényáteresztő képességét jellemzi, amelyet optikai módszerrel tudunk meghatározni. Zavaros a víz, ha homályos, más színű, vagyis megváltozik a fizikai megjelenése. A részecskék által szétszórt fény mennyisége a zavarosságtól függ, vagyis minél több a lebegtetett és oldott anyag a vízben, annál zavarosabb a víz. A zavarosságból tehát közvetlenül nem lehetséges a lebegőanyag mennyiségét meghatározni.



11. ábra: Zavaros víz különböző bomló növények hatására (Kemker, 2014)

A különböző színű oldott szerves anyag befolyásolja a zavarosságot, de nem tartozik bele az összes oldott szilárd anyagok csoportjába.

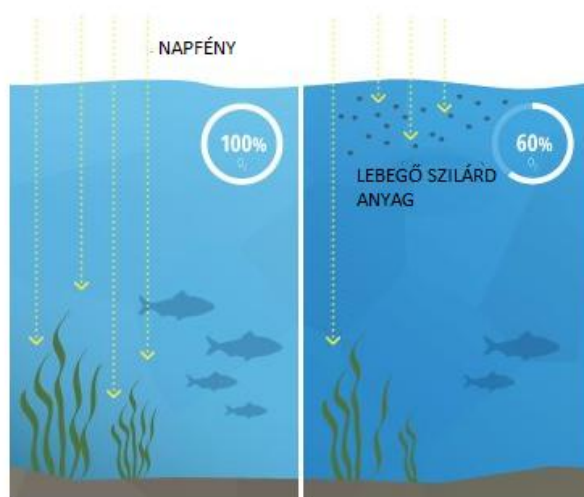


12. ábra: Zavarosságot okozó és összes lebegő részecske közötti összefüggés (Kemker, 2014)

A zavarosság és a teljesen lebegtetett hordalék mennyisége a két legfontosabb tényező a víz minőségének meghatározása során. Ezek a lebegő részecskék talajerózióval, lefolyással, felkeveredéssel, bevezetéssel vagy algavirágzással kerülnek a vízfolyásba. A túlzott

menyiségű lebegő anyag ronthatja a víz minőségét, valamint morfodinamikai szempontból jelentős szerepet tölthet be a meder geometriai változásában.

A zavarosság gátolja a napfény bejutását a víztestbe és ezzel együtt a fotoszintézist is. A fotoszintézis csökkenésével veszélybe kerülnek a növények, valamint lecsökken az oldott oxigén kibocsátás. Az óceánok, tavak, folyók alján a kis mennyiségű napfény miatt elpusztulnak a növények.



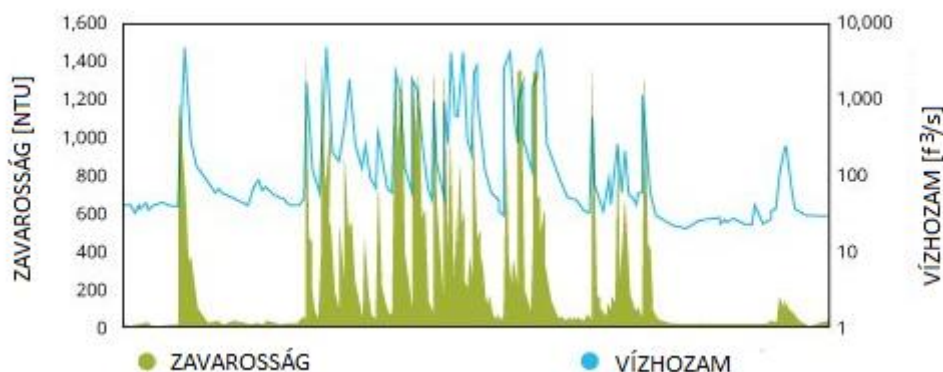
13. ábra: Lebegő szilárd anyag hatása a növény- és állatvilágra (Kemker, 2014)

A zavarosság növekedését a fokozott erózió is okozhatja egy vízfolyás esetén, ezért az erózióknak hosszú távú hatása az élőhely minőségének csökkenése lehet.



14. ábra: Erózió okozta zavarosságnövekedés (Kemker, 2014)

Víztestek zavarosságát szennyezőanyagok is okozhatják: baktériumok, egysejtűek, tápanyagok (például a nitrátok és foszfor), növényvédő szerek, higany, ólom és más fémek. Ezek a szennyezőanyagok, főleg a nehézfémek károsak és gyakran mérgezőek a vízi élővilágok számára. A tápanyagok pedig elősegítik az algák kivirágzását.



15. ábra: Zavarosság és vízhozam közötti kapcsolat (Kemker, 2014)

A zavarosság az összes lebegő szilárd anyag tömegét fejezi ki egységnyi térfogatú vízben, mértékegysége tömeg/térfogat. A legpontosabb meghatározás a szűrési-mérési vízminta elemzés. Ez a meghatározási nagyfokú precizitást kíván, hiszen nagyon alacsony tömegeknél kis hiba nagy relatív hibát eredményez.

A másik alkalmazott zavarosság mérő eljárás OBS típusú műszerrel történt. Itt a berendezés NTU (Nephelometric Turbidity Unit - Nefelometriás Zavarossági Egység) mértékegységben szolgáltatja a mérési adatait.

## 8. A mérések bemutatása

### 8.1. Vízmintavételek

A Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem előtt található Zöld Sziget úszóműnél 2014. szeptember 1. és 24. között, 24 óránként vettem vízmintát, amelyet később laborban kerültek elemzésre. A mintavétel a kihelyezett RCM-9 műszer közvetlen közelében történt.

### 8.2. Zavarosságmérés

A Zöld Sziget úszóművön elhelyezett RCM-9 (Recording Current Meter) műszer 10 percenként detektálta és tárolta az adatokat 2014. augusztus 29. és október 2. között. Kutatásom során ezeket a zavarosság és a vezetőképesség idősorokat használtam fel.

A vizek zavarosságát a kibocsátott infravörös fény részecskéken való szóródása alapján, a korábbiakban ismertetett módon méri a műszer.

## 8.2. Vezetőképesség mérés

A műszer másik szenzora két toroidból álló induktív cella segítségével méri a vezetőképességet vizes közegben. A primer toroid a cellafuraton keresztül hurokáramot indukál. Ez feszültséget gerjeszt a szekunder toroidban. A kompenzáló áram a kompenzáló tekercsben ellentétes irányú hurokáramot hoz létre. Ez az áram addig van kiegyensúlyozva, amíg az eredő hurokáram és a szekunder tekercselés feszültsége is nulla. A kívánt áram a kompenzáló tekercsben a víz vezetőképességének a mértékét adja meg.



16. ábra: RCM-9 műszer

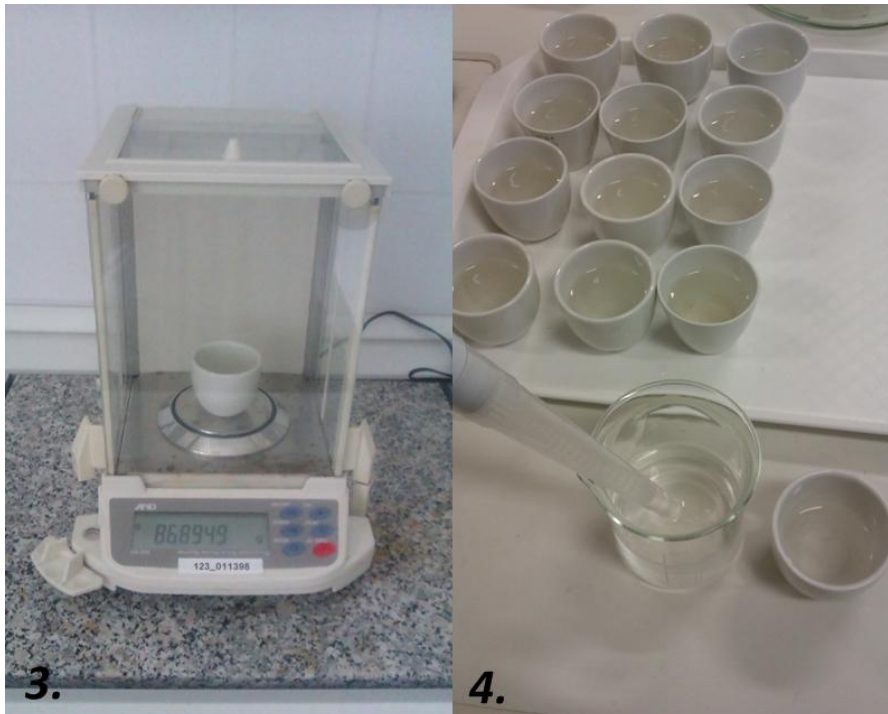
## 8.3. Laboratóriumi feldolgozás

A napi vízmintavételek és a mozgóhajós mérés során vett mintáknál laboratóriumban határoztam meg az összes szárazanyag és a lebegőanyag tartalmat, valamint a vezetőképességet. Külső laboratóriumot felkérve szemösszetétel vizsgálatot végeztek 3 mintán.

### 8.3.1. Összes szárazanyag tartalom meghatározása

Az összes szárazanyag, valamint lebegőanyag tartalom meghatározást a Vízi Közmű és Környezetmérnöki Tanszék akkreditált laboratóriumában végeztem. A kiértékelés az alábbi pontokból áll:

1. A kemencében 105 °C-on 4 órán át szárítom az üres tégelyeket.
2. Analitikai mérleggel lemérem a tégelyek tömegét grammban kifejezve tízezrelékes pontossággal.
3. Minden vízmintát kiporciózok a tégelyekbe 40 milliliterenként.
4. A vízmintákat kemencébe helyezem és 24 órán át 105 °C-on tömegállandóságig szárítom.
5. Kihűlés után a tégelyek tömegét újra lemérem a szárítás után visszamaradt szárazanyag tartalommal együtt.
6. A két lemért tömegértéket egymásból kivonva megkapom, hogy 40 ml mintában hány g szárazanyag található, majd ezt átszámítva mg/L-es értékre a lebegtetett hordaléktöménység értéket kapom meg.



17. ábra: Összes szárazanyag tartalom meghatározása (analitikai mérleg, kiporciózás)

### 8.3.2. Lebegőanyag tartalom meghatározása

1. A kemencében 105 °C-on 2 órán át szárítom a 450 nm pórusméretű szűrőpapírokat.
2. Analitikai mérleggel lemérem a papírok tömegét grammban kifejezve százvezrelékes pontossággal.
3. Minden vízmintából 100 ml-nyit átszűrök a szűrőpapírokon.
4. A vízmintákat kemencébe helyezem és legalább 4 órán át 105 °C-on tömegállandóságig szárítom.
5. Kihűlés után a tégelyek tömegét újra lemérem a szárítás után visszamaradt lebegőanyag-tartalommal együtt.
6. A két lemért tömegértéket egymásból kivonva megkapjuk, hogy 100 ml mintában hány g lebegőanyag található, majd ezt átszámítva mg/L-es értékre lebegőanyag-tartalom kifejezhető.



18. ábra: Lebegőanyag tartalom meghatározása (vákuumszűrés, analitikai mérleg)

### 8.3.3. Vezetőképesség mérés

A laboratóriumi vizsgálatunk során lehetőségem volt a minták vezetőképességének meghatározására is. A mérés eszköze egy egymással szembekapcsolt elektródákból álló műszer. Ezek az elektródák rendszerint grafitból, platinából vagy rozsdamentes acélból

készülnek. Az áramelektrodok biztosítják a méréshez szükséges erősségű áramot, a feszültségelektrodok pedig mérik az ohmikus feszültségesést a mérendő oldaton. Az ismert értékű áramerősség és a mért feszültségesés alapján kerül meghatározásra az oldat vezetőképessége. Minden oldat vezetőképessége hőmérsékletfüggő, tehát egy vonatkoztatási hőfok segítségével kompenzálni kell a mérendő közeg hőmérsékletfüggő tulajdonságait. Tehát vezetőképesség-méréskor elegendő az elektrodás mérőcellát belelógatni a mérni kívánt közegbe, majd a hozzákapcsolt műszer kijelzőjéről leolvasható a vezetőképesség értéke  $\mu\text{S}/\text{cm}$ -ben, a minta aktuális hőmérsékletével együtt.



19. ábra: Vezetőképesség mérés

#### 8.3.4. Szemösszetétel vizsgálat

A szemösszetétel vizsgálatra az FTV Geotechnikai, Geodéziai és Környezetvédelmi Zrt. talajmechanikai laboratóriumában került sor. Itt három, különböző napon vett vízminta lett bevizsgáltatva, melyek különböző vízállásoknál lettek véve.

#### 8.4. Terepi mérés

2014. szeptember 17-én ( $4100\text{m}^3/\text{s}$ ) Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem előtt található keresztmetszvény mentén, amely magában foglalja az ún. Zöld Sziget úszóművet (20. ábra), valamint 5 függélyben hajtottunk végre ADCP méréseket. Az 5 függély 5-5 pontjában

vízmintákat is vettünk a mérés során, melyeket később a laboratóriumban elemeztünk. A mozgóhajós ADCP méréssel adott szelvénymenti sebességeloszlásokat kaptunk meg, amelyeket később a hordalékhozam meghatározásánál használtam fel.



20. ábra: Vizsgált keresztaszelvénny a Dunán



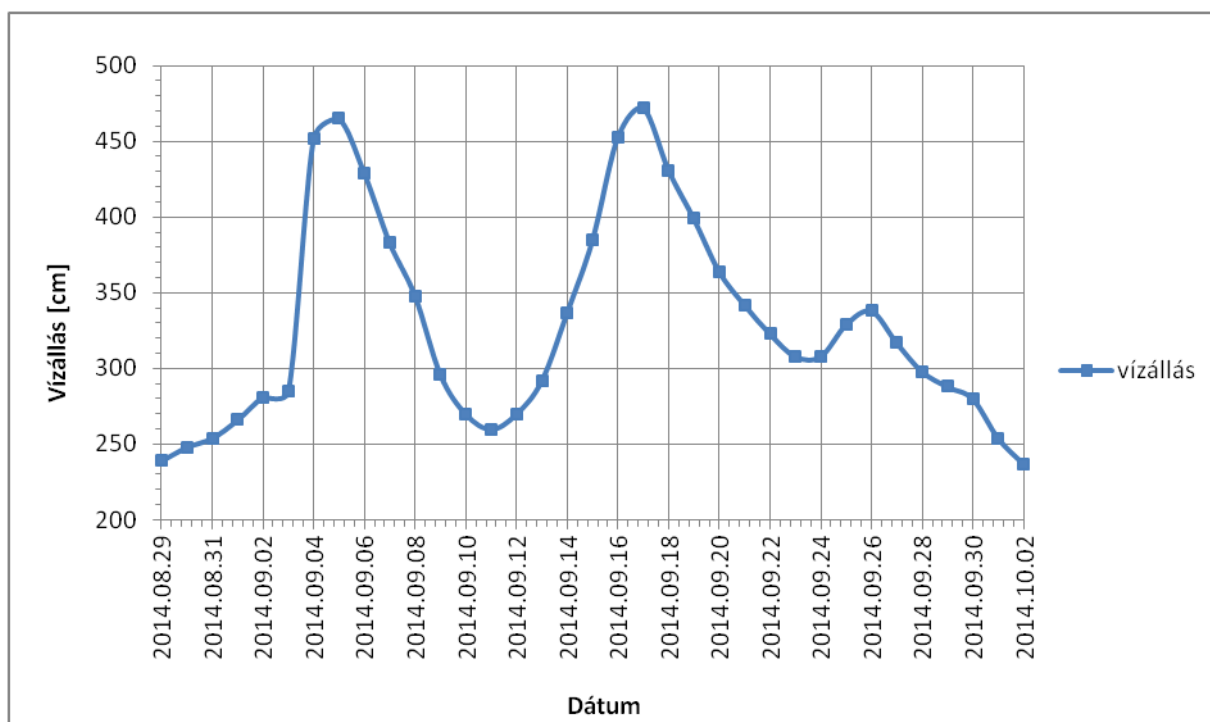
21. ábra: Csónak valamint az oldalához rögzített ADCP műszer

## 9. Eredmények bemutatása

### 9.1. Mérési időszak hidrológiai adatai

A méréseket 2014. augusztus 29. és október 2. között végeztük el. Ebben az időszakban folyamatos zavarosság és vezetőképesség mérés történt, valamint a napi rendszerességgel vett, pontbeli mintavételek révén összes szárazanyag, lebegőanyag tartalom, valamint a laborban meghatározott vezetőképesség értékek álltak rendelkezésemre.

### 9.1.1. Vízállás idősor

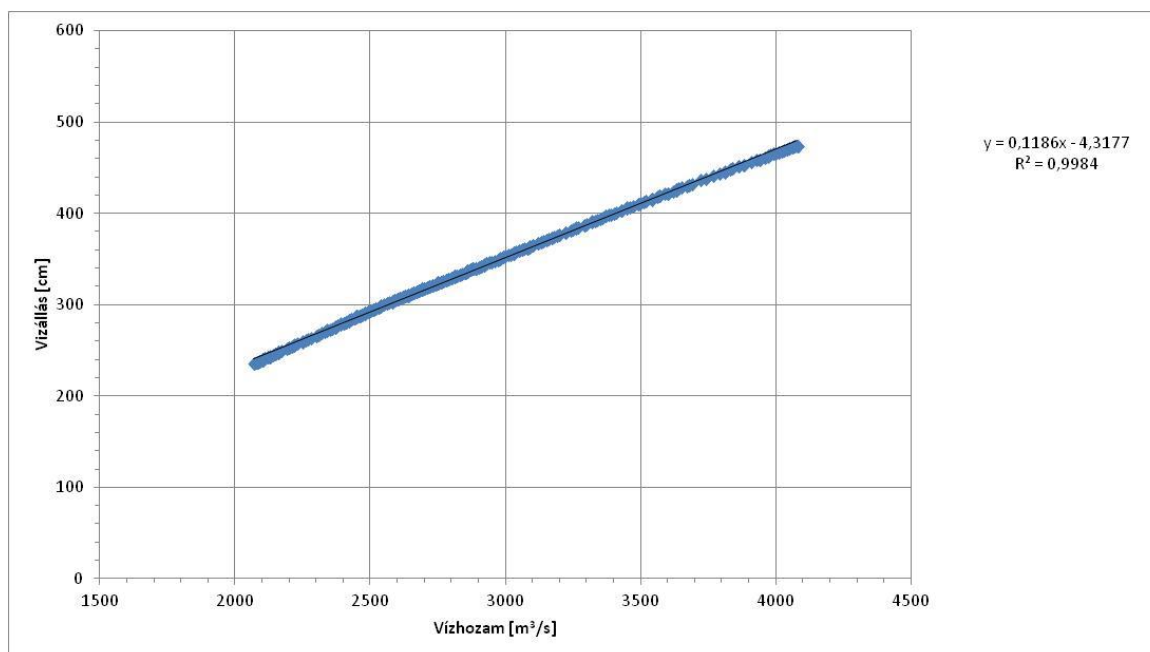


22. ábra: Vízállás idősor a mérési időszakra

A vízállási adatokat a budapesti vízmérce alapján vettem fel, ahol a Duna 1646,5 fkm-énél található a '0' pontjának jelenlegi magassága 94,98 mBf. A teljes mérési időszak alatt két nagyobb árhullám érkezett. Az első árhullám 2014. szeptember 5-én 465 cm-es, a második szeptember 17-én 472 cm-es állással tetőzött Budapesten. Egy kisebb árhullám is érkezett ezek után, amely szeptember 26-án érte el a maximumot 338 cm-rel, melyet a 22. ábra mutat.

### 9.1.2. Vízhozam-vízállás görbe

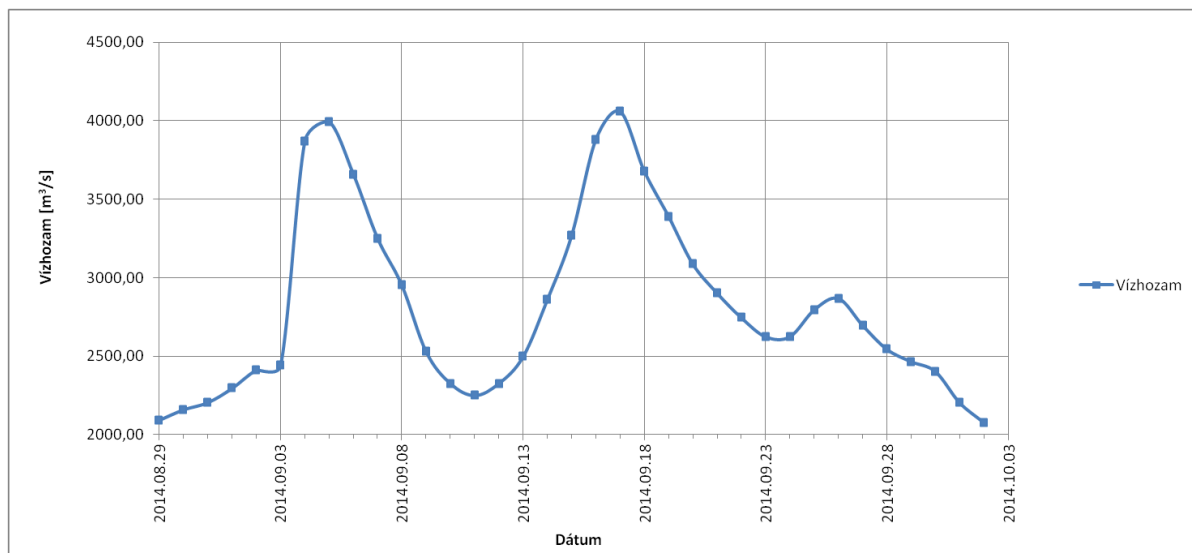
Mivel nem állt rendelkezésre a teljes mérési időszakra vízhozam érték, ezért 2014. szeptember 12. és október 3. közötti időszakból származó budapesti vízállás és vízhozam idősorok alapján számoltam ki az időszakra a vízhozamokat a vízállások függvényében. A 23. ábrán a vízállás és vízhozam összetartozó értékpárokat ábrázoltam, majd ebből egy regressziós egyenes egyenletét ( $Q=8,4204 \cdot H+40,988$ ) kaptam meg, amellyel vízhozam értékeket már meg tudtam határozni.



23. ábra: Q-H görbe (Budapest, Duna 1646,5 fkm)

### 9.1.3. Vízhhozam idősor

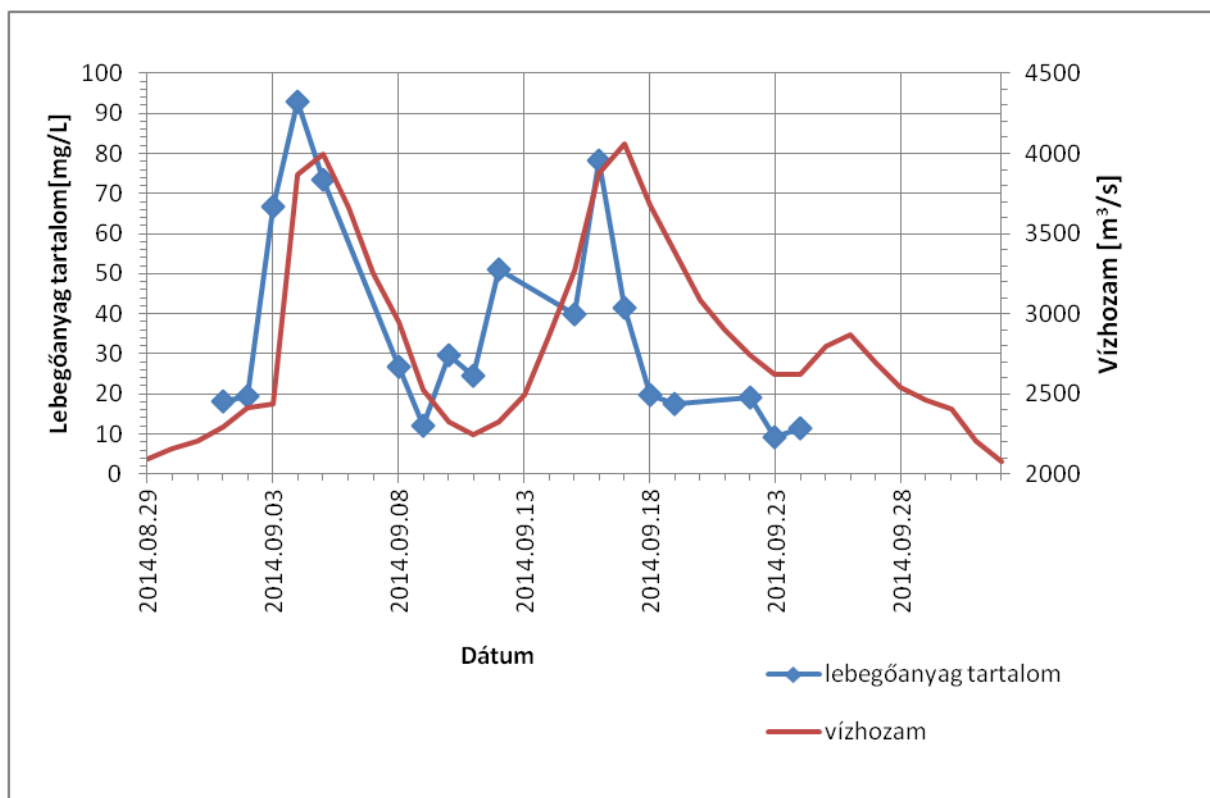
A vízhozam-vízállás görbe alapján kapott regressziós egyenes egyenletével becsült vízhozam értékekből előállított vízhozam-idősort a következő ábrán mutatom be. A 24. ábrán megfigyelhető a 2 nagyobb valamint az ezeket követő 1 kisebb árhullám. Az első árhullám 2014. szeptember 5-én 3990 m<sup>3</sup>/s-mal, a második pedig szeptember 17-én 4060 m<sup>3</sup>/s-mal tetőzött Budapesten. A kisebb árhullám szeptember 26-án érte el a maximumot 2870 m<sup>3</sup>/s-mal.



24. ábra: Vízhozam idősor a mérési időszakra

## 9.2. Vízmintákból kapott lebegőanyag tartalom idősora

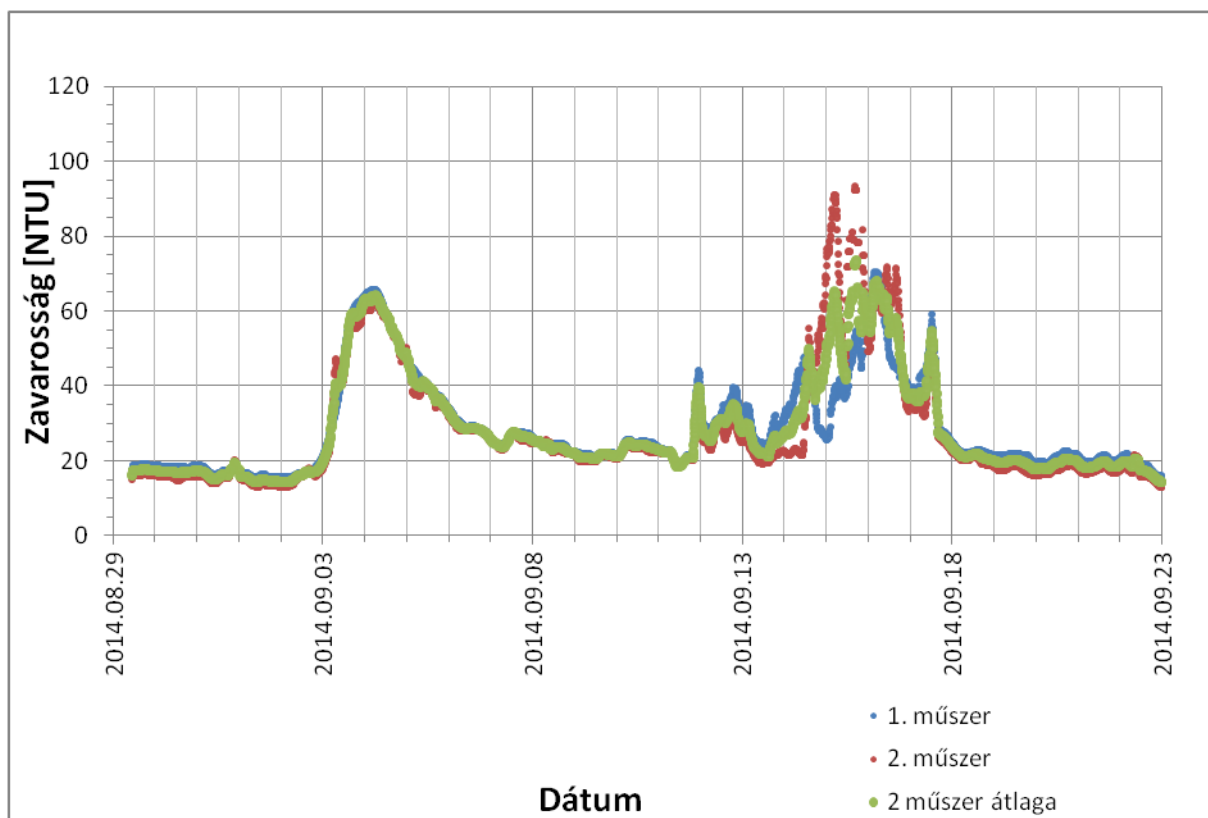
A teljes mérési időszak alatt 18 alkalommal vettem vízmintát az RCM-9 műszer közvetlen közelében. A mintákat laboratóriumban elemeztem, amely során a lebegőanyag tartalmát határoztam meg. Ezeket az értékeket, valamint a vízhozam adatokat a 25. ábrán láthatóak. A két idősor hasonló tendenciával fut le. Az is látható, hogy a lebegőanyag tartalom értéke hamarabb tetőzik, mint a vízhozamé. A lebegőanyag tartalom 2014. szeptember 4-én 93,10 mg/L-es valamint szeptember 16-án 78,20 mg/L-es értékkel érte el a legmagasabb értékeket. Ezek egy nappal előzik meg a vízhozam értékek tetőzését.



25. ábra: Lebegőanyag és vízhozam idősorok a mérési időszakra

### 9.3. Zavarosság idősorok

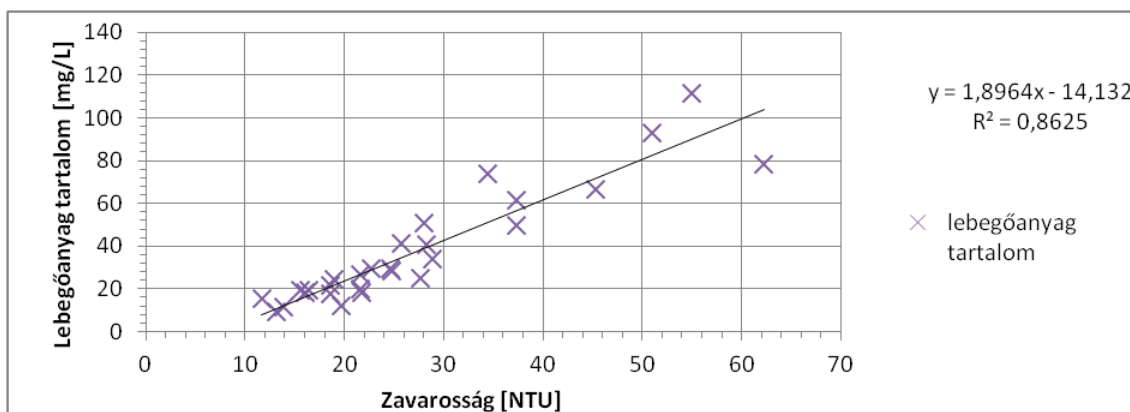
Az RCM-9 műszer által rögzített értékekből zavarosság-idősort állítottam elő a 2014. augusztus 29. és szeptember 23. közötti időszakra. Egyidejűleg két RCM-9 műszer lett elhelyezve a Zöld Sziget úszóműre. A két műszer által mért értékek összehasonlításával azok megbízhatóságát vizsgáltuk. A 26. ábrán látható a 2 műszer által mért zavarosság-idősor, valamint ábrázoltam az idősorok átlagát. Az első árhullám 2014. szeptember 5-én tetőzött és a zavarosság idősorban is jól kirajzolódik az árhullám lefolyása. A második árhullámnál azonban már szórnak az értékek. Lehetséges, hogy valamilyen külső befolyásoló tényező (pl. fennakadt uszadék) megjelenése okozta a megbízhatatlannak vélt mért értékeket.



26. ábra: Zavarosság idősorok a mérési időszakban a 2 műszer által

#### 9.4. Zavarosság alapú lebegőanyag tartalom meghatározás

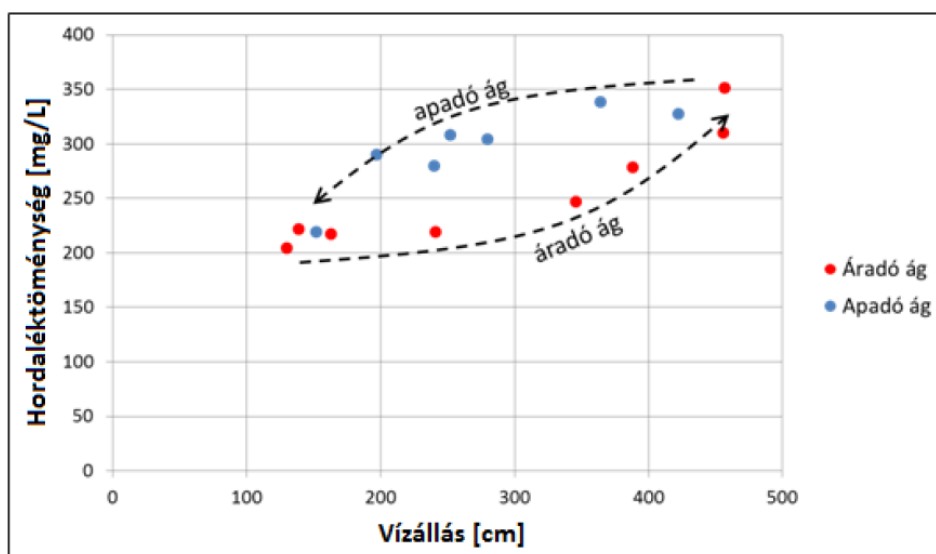
2014. május 16. és június 3. (Nagy, 2014) valamint szeptember 1. és szeptember 24. közötti időszakokra áll rendelkezésemre az RCM-9 műszer által mért zavarosság értékek, valamint elemezett vízminták lebegőanyag tartalmak. A 27. ábrán a zavarosság és lebegőanyag tartalom értékpárokat jelenítettem meg. A pontokra illesztett regressziós egyenes egyenletét használtam fel később, amikor zavarosság idősorból lebegőanyag tartalom idősort becsültem, melyeket vízhozam értékkel ábrázolok.



27. ábra: Lebegőanyag tartalom és zavarosság közötti összefüggés

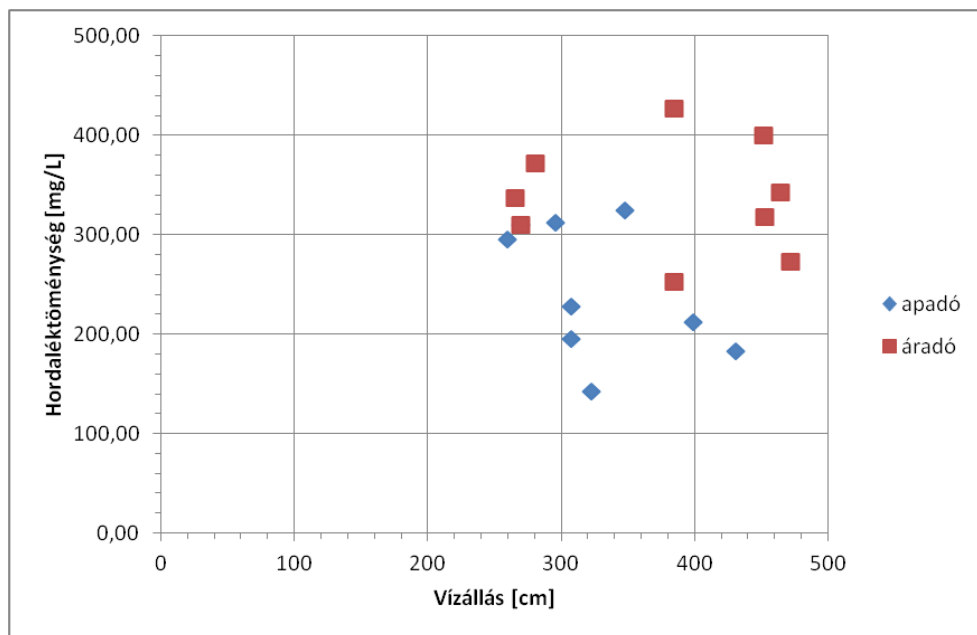
### 9.5. Vízállás és hordaléktöménység kapcsolatának nem permanens jellege

Korábbi elemzések során a hordaléktöménységet ábrázolva a vízállás függvényében az árhullám áradó és apadó ága egymástól elkülönülve, hurokgörbe szerűen rajzolódott ki (28. ábra).



28. ábra: Vízállás és a vízminták alapján előállított hordaléktöménység kapcsolata (Nagy, 2014)

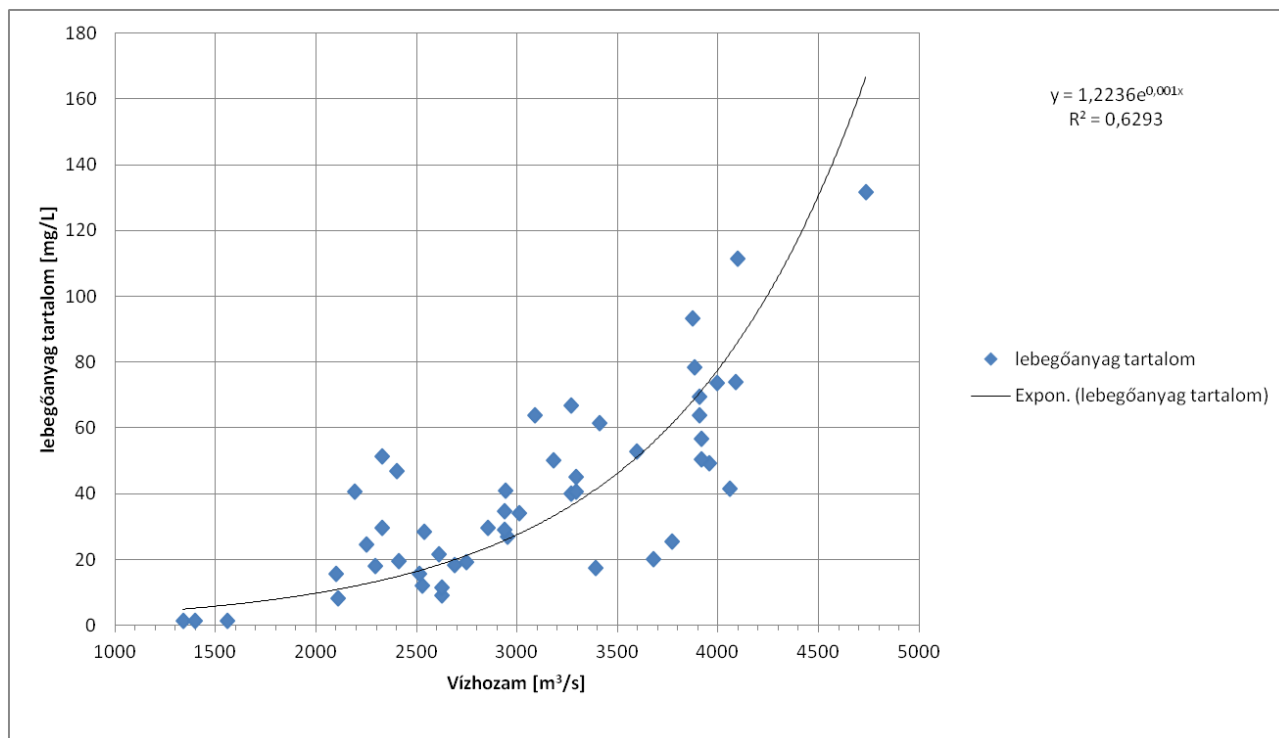
A mostani elemzésnél (2014. ősz) megfigyelhető, hogy adott vízállás értéknél az áradó ágban adódnak a nagyobb hordaléktöménység értékek (29. ábra). Itt nem különül el az árhullám apadó és áradó ága ezért további mérésekre van szükség.



29. ábra: Árhullám áradó és apadó ágának szétválasztása

## 9.6. Vízhozam és lebegőanyag tartalom kapcsolatának kimutatása vízminták alapján

A továbbiakban megvizsgáltam a 2014. május 16. és június 3. valamint szeptember 1. és szeptember 24. között vett vízminták vízhozam és lebegőanyag tartalom összefüggését (30. ábra). A lebegőanyag tartalmat a 8.3.2. fejezetben leírt eljárás alapján kaptam meg. A vízhozamot a 9.1.2. fejezetben ismertetett vízállás-vízhozam görbe alapján határoztam meg.



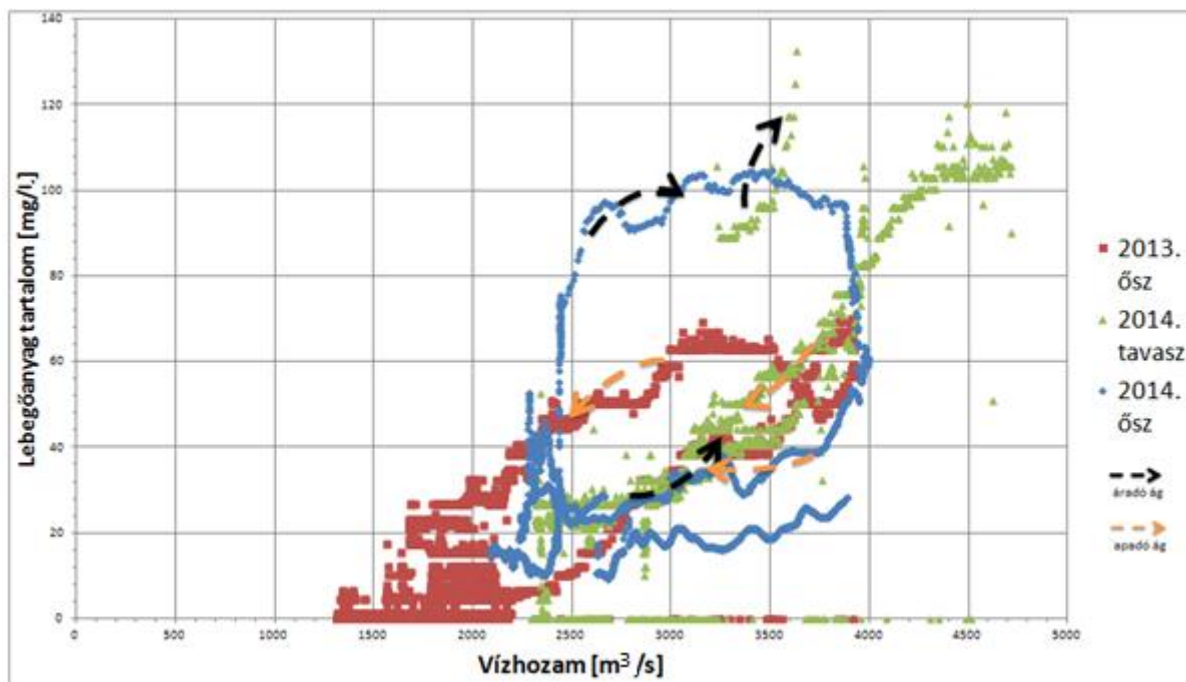
30. ábra: Vízhozam és lebegőanyag tartalom kapcsolata

A ponthalmazra illesztett függvény arra enged következtetni, hogy a lebegőanyag tartalom a vízhozamtól exponenciális jelleggel függ (30. ábra). A görbe kvalitatív jelleggel írja le a két mennyiség közötti kapcsolatot, a vizsgálati szelvényre vonatkozóan.

Látható, hogy az illesztett görbe nem alkalmas a vízhozam és lebegőanyag tartalom közötti kapcsolat megbízható, kvantitatív leírására ( $R^2=0,6293$ ).

### 9.7. Vízhozam és lebegőanyag tartalom kapcsolatának kimutatása zavarosságadatok alapján

RCM-9 műszer által mért zavarosság idősor (2013. szeptember 10-26, 2014. május 10 - június 6, augusztus 28 - szeptember 23) értékeiből lebegőanyag tartalmat számoltam minden egyes zavarosság adatahoz a 9.4. fejezetben bemutatott regressziós egyenes egyenlete alapján. Ehhez az idősorhoz a napi vízhozamok előzetes meghatározása után minden zavarosság értékhez interpolációval becsültem a vízhozam értéket (feltételezve a lineáris változást). Így a három mérési időszakban az összes RCM-9-es zavarossághoz párosítani tudtam egy vízhozam értéket. Ezeket az adatpárokat jelenítettem meg a 31. ábrán .



31. ábra: Lebegőanyag tartalom a vízhozam függvényében

2013. őszi kutatás során a vízminták laboratóriumi vizsgálatoknál csak az összes szárazanyag tartalom került meghatározásra. Azonban így visszamenőleg a zavarosság idősorból lehetőség nyílik az egyes vízminták lebegőanyag tartalmának meghatározására.

2013. évi mérések során a hurokgörbe felső ívén találhatóak az árhullám apadó ág értékei, az alsón pedig az áradó ág értékei. A 2014. évi méréseknél azonban ez fordítva van, a felsőn az apadó, az alsón pedig az áradó ág értékei találhatóak.

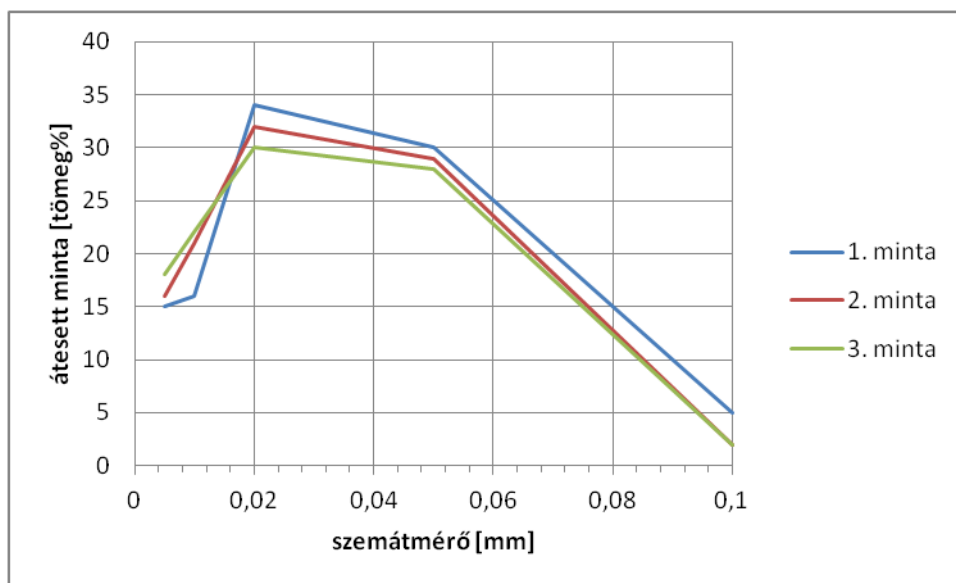
## 9.8. Lebegtetett hordalék szemösszetételének változása

Kiválasztott lebegtetett hordalékminták szemösszetételének meghatározását az FTV Zrt. laboratórium végezte el. Három különböző vízhozamnál vett minta került elemzésre. Ezek az értékek az alábbi táblázatban találhatóak.

2. táblázat: Vízhozam értékek a 3 mintánál

|                                    | 1. minta | 2. minta | 3. minta |
|------------------------------------|----------|----------|----------|
| vízhozam [ $\text{m}^3/\text{s}$ ] | 3676,99  | 2744,28  | 2623,04  |

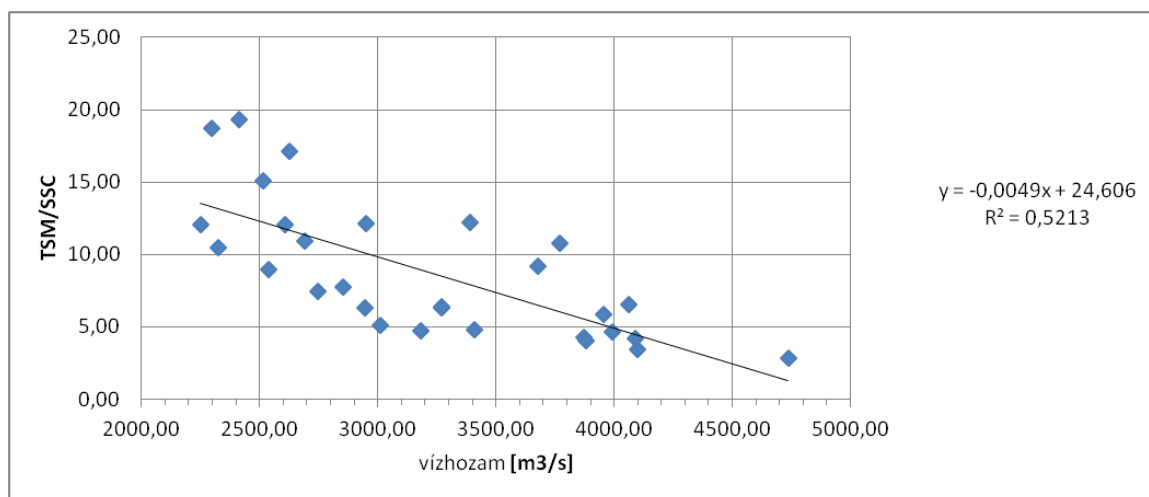
A 32. ábrán jól látható, hogy kisebb vízhozamnál a legfinomabb frakció aránya nagyobb, mint nagyobb vízhozam esetén. A durvább frakcióknál épp fordított jelleg mutatkozik: a vízhozam növekedésével a durvább frakciók aránya nő. Vagyis a vízhozam csökkenésével a lebegtetett hordalék szemösszetétele finomodik.



32. ábra: Szemösszetétel a 3 mintánál

### 9.9. Összes szárazanyag tartalom és lebegőanyag tartalom hányadosának vizsgálata a vízhozam függvényében

2014 tavaszi és őszi vízmintáknál összes szárazanyag (TSM) és lebegőanyag (SSC) tartalmat is meghatároztam a laboratóriumi elemzés során. Minden mintavételi idő és ponthoz rendelkezésemre áll egy vízhozam érték, amit a 9.1.2. fejezet alapján kaptam meg. Így a TSM és SSC hányadosát ábrázoltam a vízhozam függvényében, melyet a 33. ábrán láthatunk.



33. ábra: TSM és SSC hányadosa a vízhozam függvényében

## 9.10. ADCP mérések

2014. szeptember 17-én végeztünk a teljes keresztshelvény mentén, valamint 5 függélyben ADCP méréseket.

ADCP mérésnél a visszavert hangjel-erősség értékéből kalibráció során lebegtetett hordaléktöménység adatokat tudtam meghatározni. A kalibrációt az állóhajós mérések függélyeinek öt pontjában vett vízminta lebegőanyag tartalmát és a hozzá tartozó, ADCP visszavert jelerősség pontpárokat használtam fel. A mozgóhajós, shelvény menti mérésekből származó visszavert jelerősség eloszlásból shelvény menti hordaléktöménység eloszlás a kalibrációs összefüggés segítségével számítható.

A mozgóhajós mérés során sebességeloszlás adatokat kaptam meg a teljes keresztshelvény mentén. A shelvény menti hordaléktöménység és vízsebesség összetartozó értékeinek szorzata az adott cella fajlagos hordalékhozamát adja. A fajlagos értékek shelvény menti integrálásával a teljes lebegtetett hordalékhozamot lehet megállapítani.

Az adatok feldolgozását Baranya és Józsa által publikált cikkben ismertetett eljárás alapján végeztem el (Baranya és Józsa, 2010).

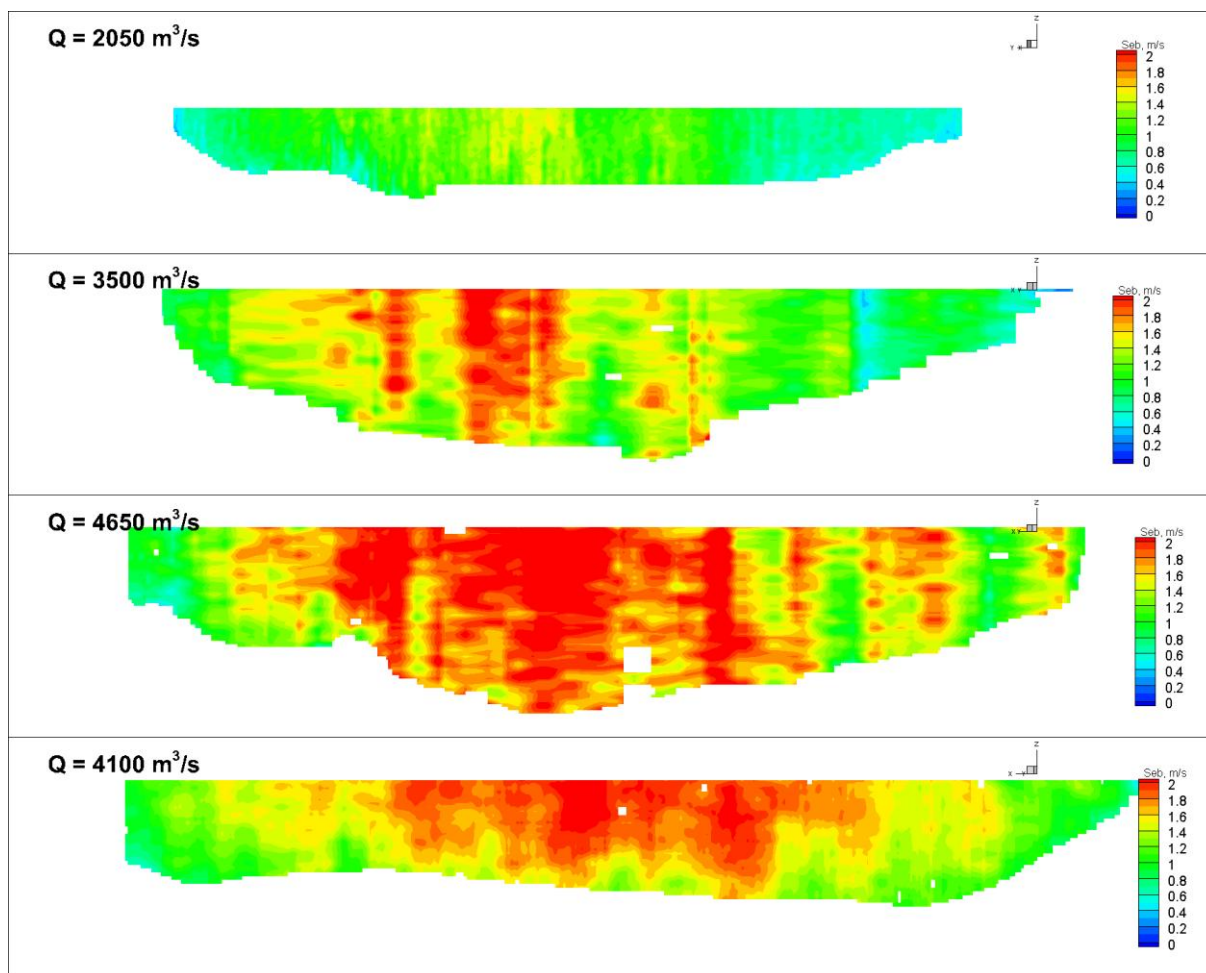
Összesen 4 expedíciós mérést hajtottunk végre. A 3. táblázatban az egyes mérések vízhozam értékei találhatóak.

3. táblázat: Expedíciós mérések vízhozamai

| dátum       | vízhozam [ $\text{m}^3/\text{s}$ ] |
|-------------|------------------------------------|
| 2013.09.16. | 2050                               |
| 2013.09.20. | 4650                               |
| 2014.05.13. | 3500                               |
| 2014.09.17. | 4100                               |

### 9.10.1. Sebesség eloszlása a keresztaszelvénymentén

Adatok feldolgozása után a sebességértékeket kapjuk meg az egyes cellákra, amelyek szelvény menti teljes eloszlását a 34. ábrán láthatjuk. Megfigyelhető, hogy a sodorvonal mentén legnagyobb a sebesség értéke, valamint a Duna két partjánál mért sebességek különbsége minimális.

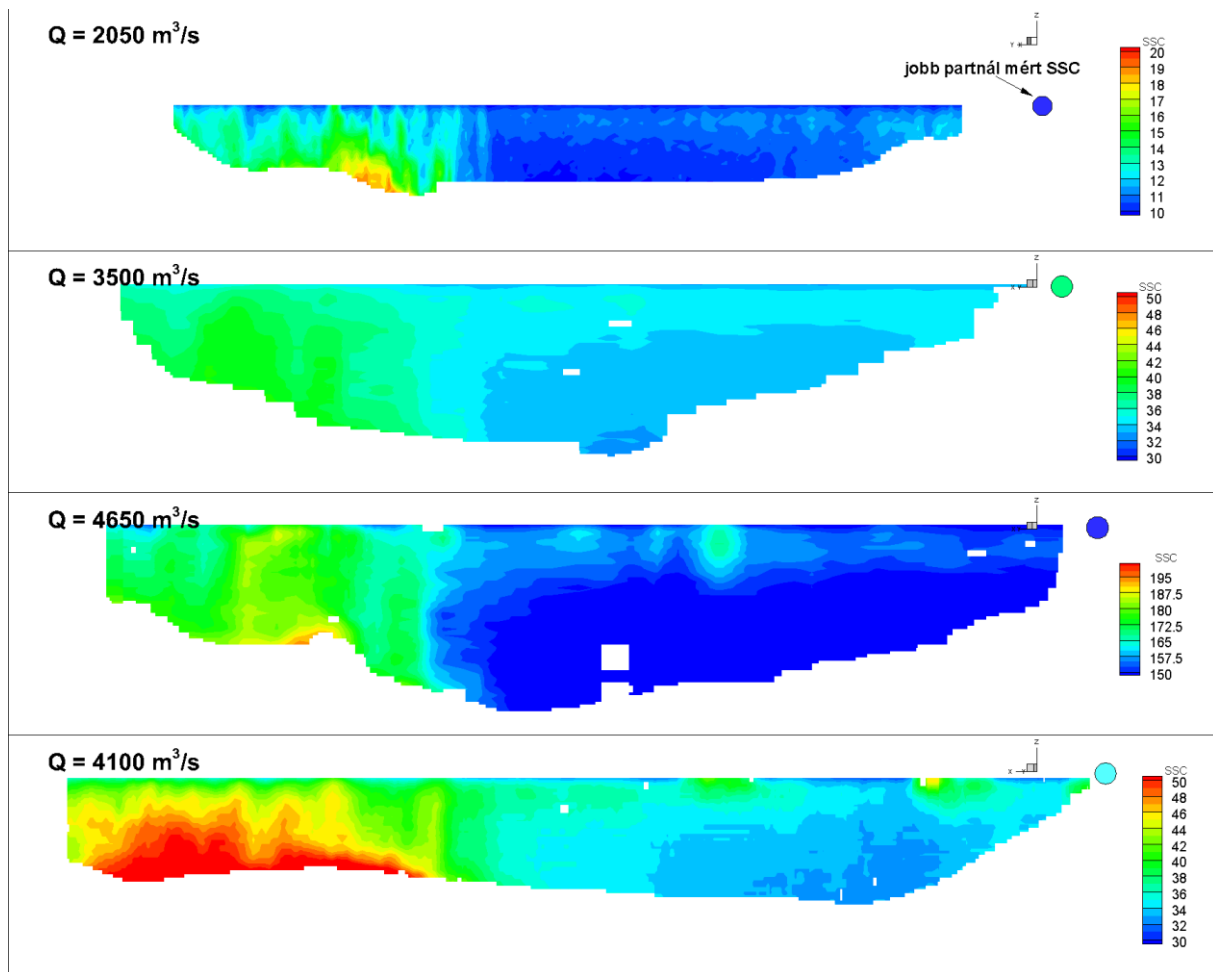


34. ábra: Sebesség eloszlása a keresztaszelvénymentén a négy expedíció során

### 9.10.2. Lebegőanyag tartalom eloszlás a keresztaszelvénymentén

Korábbi terepi mérés során vett vízmintáknál az összes szárazanyag tartalmat határoztuk meg. A 9.9. fejezetben megállapított összefüggés alapján kiszámoltam a függélyek mentén vett

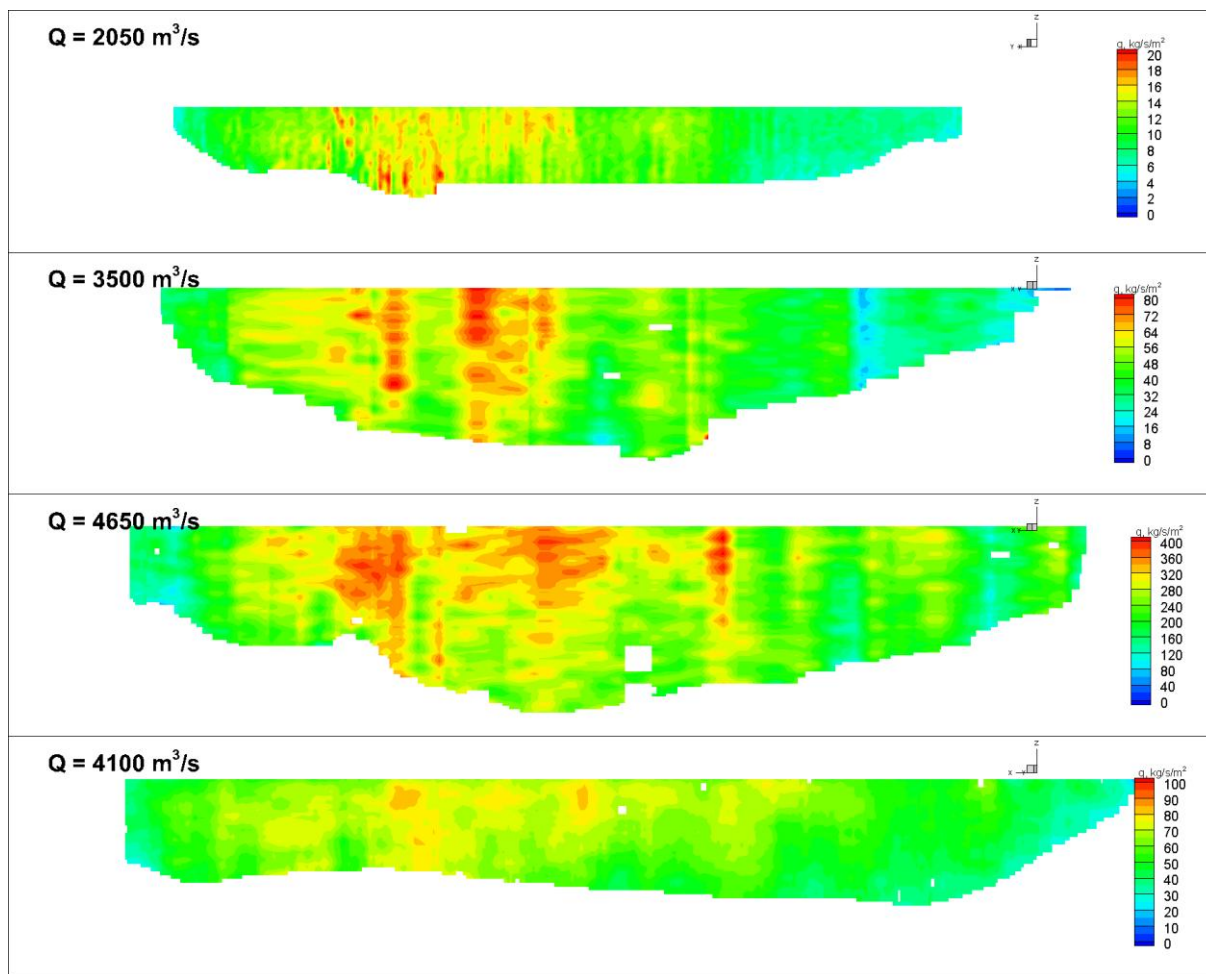
vízminták lebegőanyag tartalmát az összes szárazanyag tartalom és a vízhozam alapján. Ezek az értékek visszavert jelerősség és lebegőanyag tartalom közötti összefüggés felállításához szükségesek. Így minden cellához a visszavert jelerősség alapján egy lebegőanyag tartalom értéket tudunk rendelni, melyeket a 35. ábrán láthatunk. Viszonyításképpen a jobb partnál mért SSC értéket is megjelenítettem az ábrán. A lebegőanyag tartalom eloszlásnál a bal part közelében találhatók a nagyobb értékek.



35. ábra: Hordalékkoncentráció eloszlás a keresztaszelvénymentén a 4 expedíció során

### 9.10.3. Fajlagos hordalékhozam eloszlás a keresztaszelvénymentén

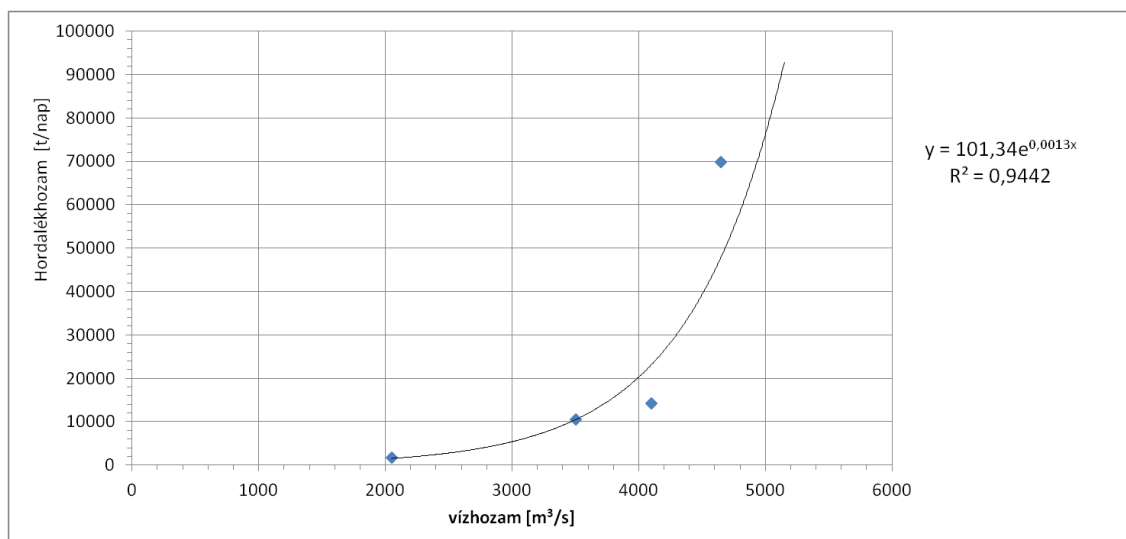
Fajlagos hordalékhozamot a sebesség valamint az előzőekben meghatározott lebegőanyag tartalom összeszorozásával tudunk kiszámolni. A szelvény menti fajlagos hordalékhozam eloszlást a 36. ábrán láthatjuk. Ezen értékek összegzésével kapjuk meg a teljes keresztaszelvényen átáramló hordalékhozamot.



36. ábra: Fajlagos hordalékhozam eloszlás a keresztaszelvénny mentén a 4 expedíció során

#### 9.10.4. Vízhhozam és hordalékhozam közötti kapcsolat

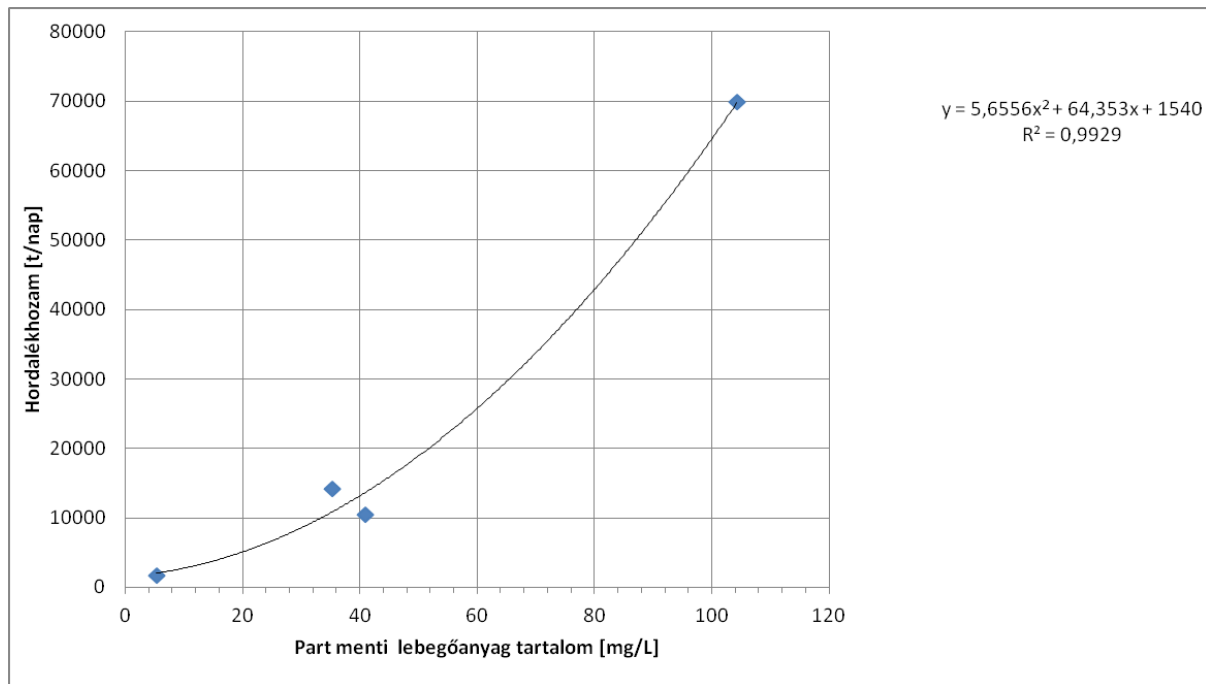
Az ADCP mérései által kiszámított fajlagos hordalékhozam alapján meghatároztam a teljes keresztaszelvénnyen átáramló hordalékhozamot. A vízhhozamokat pedig a 9.1.2. fejezetben meghatározott regressziós egyenes egyenlete alapján számítottam ki. Ezeket az értékpárokat jelenítettem meg a 37. ábrán. A pontokra illesztett függvény segítségével látható, hogy a hordalékhozam vízhhozamtól exponenciális jelleggel függ. Azonban négy expedíciós mérés eredménye nem elég a megbízható kapcsolat felállítására.



37. ábra: Vízhozam és hordalékhozam közötti kapcsolat

#### 9.10.5. Part menti lebegőanyag tartalom és teljes szelvényen átáramló hordalékhozam közötti összefüggés

Az expedíció időpontjában mért zavarosság értékekből a 9.4. fejezetben felállított kapcsolat alapján part menti lebegőanyag tartalmat számoltam a négy mérési időponthoz. Majd ezek függvényében ábrázoltam a keresztshelvényen átáramló hordalékhozam értékeket (38. ábra). Új kapcsolatot állítottam fel a két mennyiség között, hiszen eddigi kutatások során lineáris kapcsolat volt feltételezve. Megjegyezném, hogy megbízható összefüggés megállapításához szükséges további expedíciós mérés.



**38. ábra: Part menti lebegőanyag tartalom és teljes keresztszelvényen átáramló hordalékhozam kapcsolata**

## 10. Összefoglalás

Kutatásom során egy korábbi vizsgálat folytatásaként hordalékhozam becselő eljárás további vizsgálatával és kidolgozásával foglalkoztam.

Először a hordalék keletkezését, valamint a vízfolyások geomorfológiai hossz-szelvényét ismertettem, majd a hordalék csoportosítását és az általam kiválasztott osztályozást mutattam be. A következő részben egy külföldi tanulmány alapján a mérési módszereket és az általunk használt eljárásokat és eszközöket írtam le részletesen. A mérési eredmények bemutatása előtt a zavarosság és hordalék mennyisége közötti összefüggést ismertettem, szintén külföldi szakirodalom alapján.

A dolgozatom utolsó részében ismertettem a kutatás során használt mérési eljárásokat, majd az ezekből származó eredmények kiértékelését:

Naponta vett vízminták lebegőanyag tartalmának meghatározása után azokat a vizsgált időszak vízhozam idősorával (Q-H görbe és vízállás idősor alapján) vettem össze.

RCM-9 műszerek 10 percenként detektált zavarosságadatait dolgoztam fel, hasonlítottam össze egymással.

A vízminták laboratóriumban meghatározott lebegőanyag tartalmát ábrázoltam a mintavétel időpontjában rögzített zavarosság értékkel. Majd ennek a két értéknek a kapcsolatát határoztam meg (korábbi mérések eredményeit is felhasználtam).

A vízminták lebegőanyag tartalmát a mintavétel időpontjára kiszámolt vízhozam értékekkel ábrázoltam. Az összetartozó pontokra illesztett görbe a kapcsolat kvalitatív leírására alkalmas.

A zavarosság idősorából számolt (korábban meghatározott regressziós egyenlet alapján) lebegőanyag tartalmat a hozzá tartozó vízhozam értékek függvényében vizsgáltam.

Külső laboratórium által meghatározott lebegőanyag szemösszetételt a vízhozam változásával hasonlítottam össze. Azt a következtetést vontam le, hogy a vízhozam növekedésével a lebegőanyag durvulása várható.

A mozgó- és állóhajós mérések eredményeit és a belőle meghatározott mennyiségeket (lebegtetett hordaléktöménység, lebegtetett hordalékhozam) ismertettem.

Végül a part közeli lebegtetett hordaléktöménység és a teljes szelvényen átáramló lebegtetett hordalékhozam közötti kapcsolatot határoztam meg.

## 11. Következtetések

A kutatás során az alábbi következtetésekre jutottunk:

1. Jelenlegi kutatásnál az összes szárazanyag tartalmat (TSM) szilárd (SSC) és oldott anyag tartalomra szétválasztva vizsgáltam. Kutatásomban csak a szilárd anyag tartalom mennyisége a lényeges, valamint ezen belül is a mederanyagból felkevert része. A szilárd fázis további szétválasztására több szemösszetétel vizsgálatra van szükség, különböző vízjárási állapotok esetén.
2. A zavarosság és lebegőanyag tartalom kapcsolatának megerősítéséhez további nagy számú mintavételre és azok elemzésére van szükség.
3. A két RCM-9 műszer egyszerre történő kihelyezésével és párhuzamos alkalmazásával igazoltam a műszerek megbízhatóságát.
4. Az első pontban megfogalmazottakat figyelembe véve új kapcsolatot állítottam fel a part menti, valamint a szelvényeken átáramló hordalék mennyiség között. Azonban a 4 expedíciós mérés során kapott 4 adatpár nem elegendő a megbízható kapcsolat meghatározásához.
5. Erős kapcsolatot sikerült kimutatni a vízhozam és a TSM, SSC hányadosa között. Látható, hogy minél nagyobb a vízhozam, annál jobban közelíti az SSC értéke TSM-et.

Az előző és a jelenlegi kutatások sem elegendőek a pontbeli zavarosság mérésen alapuló hordalékhozam becselő eljárás megbízható felállításához, azonban további célirányos mérések és mintavételek hozzájárulnának az eljárás fejlesztéséhez.

További kutatásom terve, hogy részletesebben elemezem a hordalék szemösszetételét, hogy szét tudjam választani a szilárd részt mederanyagból felkevert, valamint vízgyűjtőből bemosott fázisra. Mivel morfordinamikai változás szempontjából csak a mederanyagból felkevert hordalék fontos. A part menti hordaléktöménység és a teljes szelvényen átáramló hordalékhozam közötti megbízható kapcsolat meghatározásához pedig több mérési expedícióra lenne szükség. További mérésekkel és elemzésekkel egy részletes adatszolgáltatási eljárást lehetne kidolgozni és megalkotni.

## Köszönetnyilvánítás

Köszönetemet szeretném kifejezni elsősorban konzulenseim felé. Hálásan köszönöm Dr. Baranya Sándor témavezetését, segítőkészségét és Török Gergely Tihamér folyamatos segítségét, ötleteit.

Hálásan köszönöm Pozsgai István méréseinknél és napi mintavételeinknél nyújtott segítségét. Továbbá köszönöm Tóth Károlynak, aki szintén segítségünkre volt a mozgóhajós mérés során.

Köszönöm szépen Kiss Melindának, aki az RCM-9 műszer adatainak feldolgozásában segített nekünk.

Köszönöm szépen Musa Ildikónak, hogy mintaelemzéseim során igénybe vehettem a Vízi Közmű és Környezetmérnöki Tanszék laboratóriumát.

Köszönöm szépen Rákóczi Lászlónak a hasznos megjegyzéseket és tanácsokat.

Köszönöm szépen a Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszéknek, hogy a méréseinkhez szükséges eszközöket rendelkezésünkre bocsátották, valamint a vizsgálatok során jelentkező költségek anyagi háttérét biztosították.

Végül köszönetemet szeretném kifejezni Frenyó Krisztinának, aki megmutatta a mintaelemzés lépéseit. Köszönöm szépen Pomázi Flórának, aki segített a laboratóriumi elemzések és a napi mintavételek során.

## Hivatkozások

1. Józsa J., Baranya S. (2010): Hidromorfológia MSc. HEFOP jegyzet. BME. Budapest
2. M. Garcia (2008): Sedimentation Engineering: Processes, Measurements, Modeling, and Practice
3. C. Kemker (2014): Fundamentals of Environmental Measurements: Turbidity, Total Suspended Solids & Water Clarity (<http://www.fondriest.com/environmental-measurements/parameters/water-quality/turbidity-total-suspended-solids-water-clarity/>)
4. Baranya S., Józsa J. (2010): ADCP alkalmazása lebegtetett hordalék koncentráció becslésére
5. Nagy K. (2013): Operatív folyami lebegtetett hordalék monitoring tudományos megalapozása korszerű mérési módszerekkel (BME TDK)
6. Nagy K. (2014): Operatív folyami lebegtetett hordalékmérés fejlesztése (BME BSc Diplomamunka)
7. Daniel G. Wren, Roger A. Kuhnle (2002): Turbidity and Other Sediment Surrogates Workshop, SURROGATE TECHNIQUES FOR SUSPENDED-SEDIMENT MEASUREMENT (<http://water.usgs.gov/osw/techniques/TSS/wren.pdf>)
8. geocaching.com - TerryDad2 (2011): River Geomorphology of the Merced River ([http://www.geocaching.com/geocache/GC2M37Q\\_river-geomorphology-of-the-merced-river](http://www.geocaching.com/geocache/GC2M37Q_river-geomorphology-of-the-merced-river))
9. B. E. Davis (2005): A Guide to the Proper Selection and Use of Federally Approved Sediment and Water-Quality Samplers ([http://water.usgs.gov/osw/pubs/OFR\\_2005\\_1087/](http://water.usgs.gov/osw/pubs/OFR_2005_1087/))
10. Universitat Koblenz honlapja (2014): Field equipment (<http://www.uni-koblenz-landau.de/landau/fb7/umweltwissenschaften/uphys-de/instrumentation/field>)