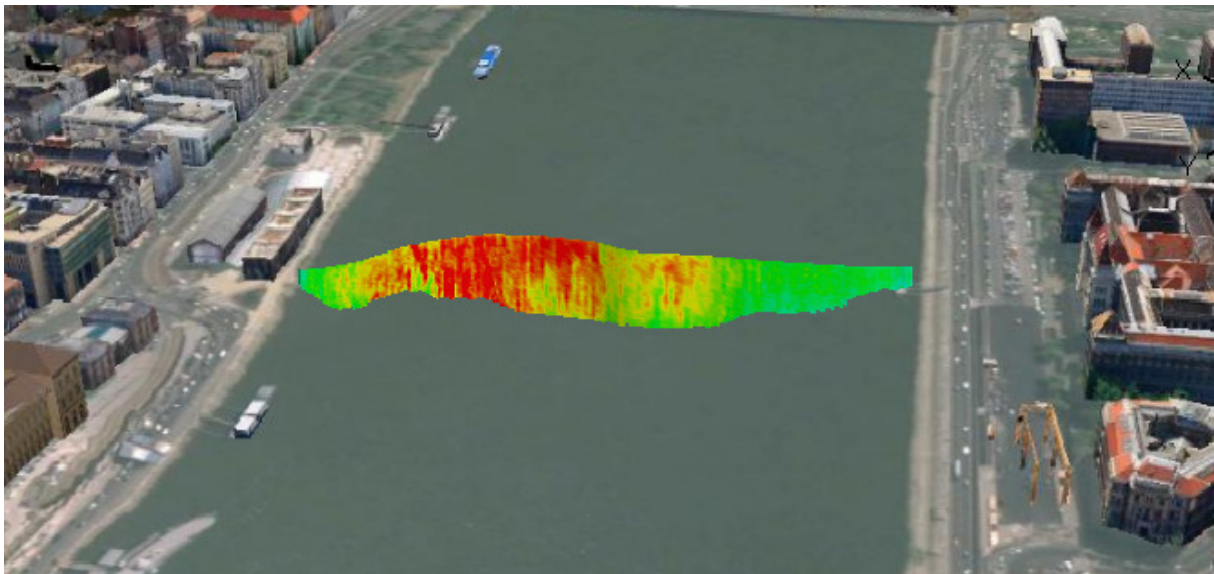




Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Építőmérnöki Kar
Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszék

Tudományos Diákköri Konferencia, 2013

Operatív folyami lebegtetett hordalék monitoring
tudományos megalapozása korszerű mérési módszerekkel



Készítette: Nagy Krisztina

Konzulensek: Dr. Baranya Sándor
Kiss Melinda
Török Gergely Tihamér

Tartalomjegyzék

Tartalmi kivonat.....	2
1 Bevezetés.....	3
2 Vízfolyások hordalékszállítása	5
2.1 A hordalék keletkezése.....	5
2.2 A hordalék mozgása	5
2.3 A lebegtetett hordalék mérési módszerei és eszközei.....	6
3 Lebegtetett hordalékvizsgálattal foglalkozó tanulmányok	10
4 Felhasznált eszközök bemutatása	12
4.1 Gyorsmintavevő (Szombathelyi típusú):	12
4.2 ADCP (Accoustic Doppler Current Profiler):	13
4.3 Zavarosságmérő műszer (Turbidity Sensor 3612B).....	14
5 Mérési hely bemutatása, mérések menetének ismertetése.....	16
5.1 Mérési hely bemutatása.....	16
5.2 Mérések menetének ismertetése	18
5.2.1 Partközeli mérés.....	18
5.2.2 Függélymenti mérés	21
5.2.3 Mozgóhajós ADCP mérések.....	22
6 Mérési eredmények ismertetése	23
6.1 Pontbeli vízminták elemzése	23
6.2 Zavarosság- és vízmintákból kapott hordaléktöménység idősorok összevetése	26
6.3 ADCP adatok felhasználása a szelvény menti hordaléktöménység bemutatására	30
6.4 ADCP mérésből származtatott keresztshelvények menti hordalékadatok.....	32
6.5 Hordalékhozam beclése az előzőek alapján, kérdéses pontok, szűk keresztmetszetek áttekintése.....	33
7 Összefoglalás	36
8 Következtetések	37
Hivatkozások.....	39

Tartalmi kivonat

A TDK dolgozat célja egy olyan lebegtetett hordalék mérési eljárás kidolgozása, amely várhatóan jelentősen hozzájárul a hazai hordalék monitoring tudományosan megalapozott módon való kiépítéséhez. A vizsgált eljárásban a Duna egy part közelében kijelölt pontjában különböző eljárásokkal (hagyományos mintavételi módszerek, optikai elvű zavarosságmérés, akusztikus elvű mérés) meghatározott lebegtetett hordalék töménység és az adott szelvény hordalékhozamának kapcsolatát keressük. Célom egy olyan eljárás kifejlesztése és tesztelése, amely költséghatékony és nagyságrendekkel részletesebb adatokat szolgáltatna a gyakorlatban eddig alkalmazott nagy mérésigényű hordalékhozam számító eljárásokkal szemben. A mérés helyszíne a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem főépülete előtti hajókikötő volt illetve az általa kijelölt keresztshelvény.

Az eljárás alapvetően abból áll, hogy egy optikai elven működő zavarosságmérővel (OBS – Optical Backscatter Sensor) a folyó egy előre kijelölt pontjában folyamatosan (jelen vizsgálat keretében néhány héten keresztül), relatíve nagy időbeli felbontással (pl. 10 perc, 1 óra) rögzítjük a zavarosság értékét, illetve ezzel párhuzamosan, adott időpontokban közvetlen vízmintavétel által szolgáltatott hordaléktöménység adatok alapján kalibráljuk a műszert. A pontbeli töménység adatokat korszerű laboratóriumi vizsgálati úton állítottam elő. A kalibráció után az OBS-szel mért zavarosság idősből a mérési pontra jellemző lebegtetett hordalék töménység közvetlenül származtatható. Mivel a keresztshelvény menti hordaléktöménység eloszlása szinte biztosan nem teljesen egyenletes, ahhoz, hogy a szelvényen mindenkor átáramló hordalék mennyiségét meg tudjuk határozni a pontbeli adatokat ki kell tudnunk terjeszteni a teljes keresztshelvényre. Ehhez célirányosan, különböző hidrológiai állapotok mellett a folyó keresztshelvényének mentén több függély mentén több mélységében vettünk vízmintákat és kerestük a kapcsolatot a szelvény menti és a folyamatosan rögzített part menti adatok között. A hordalékhozam számításához és a mérés további korszerűsítéséhez mozgó-, illetve állóhajós ADCP méréseket is végrehajtottunk, amivel részletes sebességadatokat nyerünk, valamint még nagyobb térbeli felbontású, szelvény menti hordaléktöménység eloszlást vagyunk képesek előállítani.

1 Bevezetés

A természetes vízfolyások egyik alapvető jellemzője, hogy medrüket maguk alakítják a hidrológiai, hidraulikai és geomorfológiai viszonyoktól függően. A vízfolyások medre folyamatos kölcsönhatásban van az áramlással, ami a víz mellett szilárd szemcséket is szállít, a vízfolyás hordalékát. A hordalék vízben való mozgását számos tényező befolyásolja, ami a transzportfolyamatok komplexitását eredményezi. A hordalékmozgás vizsgálata egy hosszú időre visszatekintő tudományág, ismereteink mégis korlátozottak a jelenségről. A hordalék vízben való mozgásának leírása a természetes vízfolyások mederváltozási folyamatai mellett a folyók életébe való mesterséges beavatkozások hatáselemzésekor kap különösen fontos szerepet. Hazánkban alig található olyan folyó, amelyen ne történtek volna szabályozási munkák. A folyószabályozás szükségességét jelen dolgozat nem hivatott tárgyalni, de a gazdasági és társadalmi igények egyértelmű okot szolgáltatnak. Gondoljunk csak az árvízvédelmi vagy éppen a hajózási célú folyószabályozási tevékenységekre. Legalább ilyen fontos cél a folyami élőhelyek állapotértékelése, állapotjavítása, ami szoros kapcsolatban áll a folyó által szállított hordalékkal, ha pl. az értékes élőhelyeknek számító mellékágak feliszapolódási problémáját tekintjük. Ismert jelenség az folyók hullámterének lassú, de permanens feltöltődése is, ami az árvízkor az oda kijutó finom hordalék kiülepedésével magyarázható. Folyók hordalékszállításához kapcsolódó mérnöki problémák – a teljesség igénye nélkül – pl. tározók feliszapolódása, vízlépcsők alvízi szakaszain kialakuló medermélyülés, kikötők feliszapolódása, folyószabályozási művek stabilitása, hídpillérek stabilitása, stb. Az említett példák a közvetlen mérnöki feladat mellett számos területre kihatnak (gazdaság, társadalom, energiatermelés, természetvédelem, stb.), így könnyen belátható, hogy az áramlási és hordalékszálítási jelenségek minél pontosabb megismerése fontos mérnöki feladat.

Ahhoz, hogy folyóink természetes vagy emberi beavatkozások hatására kialakuló morfológiai változásainak folyamatait megértsük, különböző vizsgálati eljárásokat alkalmazhatunk. A témával foglalkozó kutatások alapvetően a terepen végrehajtott mérésekre, laboratóriumi, ún. kisminta kísérletekre és a manapság már igen széles körben alkalmazott számítógépes szimulációkra épülnek. A legpontosabb képet a múltbeli morfordinamikai folyamatokról a terepi mérésekkel kaphatunk, a modelleket pedig elsősorban jövőbeli beavatkozások hatásvizsgálatainál alkalmazzák. Folyók hordalékszállításának helyszíni vizsgálatára már számos eszközt fejlesztettek ki hazai és külföldi kutatóintézetek és gyakorló- a vizek vizsgálatával foglalkozó intézmények és természetesen folyamatos fejlesztés alatt állnak a vizsgálati módszerek. Ahogy azt a későbbiekben ismertetem, a hordalékmozgás kapcsán megkülönböztetjük a lebegtetett- és görgetett hordalékmozgást. A hordalék mennyiségének mérése a hidrológiai adatok rögzítéséhez képest költségesebb és összetettebb eljárás, ami sajnos a hazai vízügyi ágazat működésében azt eredményezte, hogy a hordalékmérések esetlegesen még a nagy folyóinkra is, adatok pedig mérsékelt számban állnak rendelkezésre.

Jelen kutatásban azt tűztük ki célul, hogy a jelenlegi, a vízügyi ágazatban alkalmazott lebegtetett hordalékmérési eljárással szemben egy olyan módszert dolgozzunk ki, ami csekély költségtöbblettel a jelenleginél nagyságrendekkel nagyobb és folyamatos hordalékadatot szolgáltat egy folyó kiválasztott szelvényére. Az eljárás nagyon tömören megfogalmazva abból áll, hogy a hagyományos pontbeli szivattyús mintavételi eljárás mellett egy, a folyó partjára (egy hajókikötőre) telepített optikai zavarosságmérőt alkalmazunk, amely ugyan pontbeli, de rendkívül nagy időbeli felbontású adatsort szolgáltat. A zavarosság adatokat a műszer helyén végzett mintavételezéssel és kiegészítő mérésekkel

kalibráljuk, majd a partközeli pontbeli hordaléktöménység adatokat kiterjesztjük a teljes folyó keresztszelvényre, ami alapján, a szelvényen átáramló lebegtetett hordalékhozam számítható. A keresztszelvényen átáramló hordalékhozam becslésére a szelvény különböző függélyeiben, azon belül is több pontban vett vízmintákat, rögzített pontú és mozgóhajós ADCP méréseket alkalmazunk. Az eljárás kidolgozása során több kérdés és látszólagos akadály merült fel, amelyekre ebben a tanulmányban igyekszünk választ adni.

A dolgozat első részében a folyók hordalékszállításával kapcsolatban adok egy áttekintést elsősorban Bogárdi János, a hazai hordalékkutatás egyik legelismertebb professzorának könyvére támaszkodva, majd további, a módszer kidolgozását alapvetően meghatározó tudományos tanulmányok rövid bemutatását végzem el. A dolgozat törzsében részletesen bemutatom a kutatás során alkalmazott eszközöket, a mérések menetét és tanulságait, majd a feldolgozás során kapott eredmények bemutatásával foglalkozom. A dolgozat végén összefoglalom a kutatás aktuális eredményeit, következtetéseket vonok le és jövőbeli fejlesztési irányokat fogalmazok meg.

2 Vízfolyások hordalékszállítása

Mivel a magyar nyelvű szakirodalomban a vízfolyások hordalékszállításával kapcsolatos témában kevés tanulmány található, fontosnak tartottam egy szemelvényt készíteni Bogárdi János professzor „Vízfolyások hordalékszállítása” című könyvéből (Bogárdi, 1971) kiegészítve azt a BME Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszékén, a Hidromorfológiai MSc. tantárgyhoz szerkesztett jegyzetből kigyűjtött részekkel (Józsa és Baranya, 2011). A felhasznált könyv rendkívül részletesen taglalja hordalékmozgás jelenségét, itt viszont csak egy, a jelen kutatás szempontjából releváns, rövid kivonatot szeretnék bemutatni, hogy az olvasónak egy általános, pontos szakmai alapokon nyugvó képe alakuljon ki a témával kapcsolatban. A hordalékmozgás módjai közül a lebegtetett hordalékkal kapcsolatos kérdéseket tárgyalom, mert a dolgozat fő témáját ez adja.

2.1 A hordalék keletkezése

Hordalék: A vízfolyásokban a vízzel együtt mozgó szilárd anyagok összessége. Két részre bonthatjuk: ásványi anyagokból és szerves anyagokból tevődik össze, melyek közül mi elsősorban az ásványi anyagokkal fogunk foglalkozni. Szerves anyagok nagyobb mértékben hulladékanyagokként fordulhatnak elő a vizekben. Jelenlétük alkalmoszerű, mozgásuk pedig rendszertelen.

Keletkezése: Erózió következtében, kőzetek mállásával, elbomlásával alakul ki. A hordalékképződés nem más, mint az erózió okozta talajvesztés.

Hordalékmennyiség függ:

- földrajzi fekvés
- geológia
- klimatikus és fizikai viszonyok
- növényzet
- árvíz

Összesen 101,49 millió km²-nyi vízgyűjtőterület vesz részt az óceánokba való víz- és hordalékszállításban. Földünk vízfolyásai évenként átlagosan 18,29 milliárd tonna hordalékot szállítanak. Ez azonban a teljes, ún. gross-eróziónak csak egy részét képezi.

Szemcseméret: A mérnöki gyakorlatban csak a 0,002 mm-nél nagyobb szemnagyságú anyagot tekintjük hordaléknak.

Szemalak: A gömbölyűre koptatottól egészen a lapos, éles, pikkelyszerű formáig, bármilyen alakban előfordulhat. Mindez függ a szemcse anyagától és az általa megtett úttól.

2.2 A hordalék mozgása

A víz mozgása során a helyzeti energiából mozgásivá alakult energiának egy része használdik fel hordalékszállítására. A mozgó hordalék energiát emésztve mindig csökkenti a víz sebességét, így csökken a hordalékszállító-képesség is. Ez határozza meg a hordalékszállító-képesség felső határát.

A hordalékmozgást tekintve beszélhetünk görgetett és lebegtetett hordalékról.

Görgetett hordalék: A mederfenéken csúszva, gördülve mozgó hordalék, melynek mederrel való érintkezése állandó. Mennyisége a keresztmetszvényen belüli elhelyezkedéstől, illetve a vízjárástól is függ, hiszen például kisebb hegyvidéki folyóknál alacsony vízállásnál nincs elég energia a hordalékszállításra. Görgetett hordalékhoz sorolják az ugráló-lüktetésszerű hordalékmozgást is. A

görgetett hordalékszemek mozgása történhet sima mederben is, de közben legtöbbször homokhullámok, dűnék vagy antidűnék alakulnak ki.

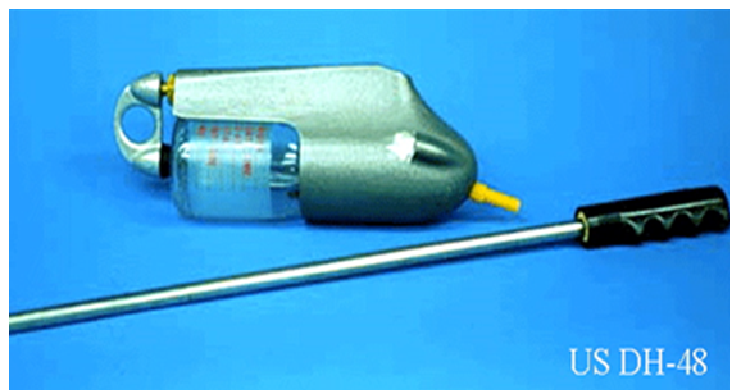
Lebegtetett hordalék: A vízben lebegtetett állapotban, a víz sebességével közel azonosan mozgó szemcséket lebegtetett hordaléknak nevezzük. A hordalékot lebegésben tartó erő állandóan változik, ezért a hordalék mennyisége és milyensége is állandó változásnak van kitéve. Ha ez az erő csökken, a durvább hordalékszemek lebegése fokozatosan megszűnik, ha viszont nő, a mederfenékről fokozatosan további, nagyobb méretű szemcsék is lebegő állapotba kerülhetnek. Lebegtetett hordalékszállítás leginkább a kisesésű folyószakaszokra jellemző. Nagyesésűeknél a finom hordalékanyag hiánya miatt a görgetetthez viszonyítva általában kisebb a lebegtetett hordalék mennyisége.

Zátonyvándorlás: A hordalékmozgás különleges fajtája, mely mozgómedrű folyószakaszok jellemzője. A zátonyok alakja, mérete a görgetett hordalékszállítás révén változik. A vándorlási sebességet a Froude-szám, valamint a vízfolyás sebességének és a vizsgált szemnagyság ülepedési sebességének függvényében lehet meghatározni.

2.3 A lebegtetett hordalék mérési módszerei és eszközei

Vízmintavevők: Bizonyos térfogatú hordalékos víz meríthető velük az adott víztestből, amelyből a hordalékot leülepítve, laboratóriumi mérésekkel állapíthatják meg a hordalékszálítást jellemző hordaléksúlyokat és szemnagyságokat. Azok a műszerek működnek a legmegbízhatóbban, amelyeknél a vízmintavétel sebessége mindig azonos a vízfolyás sebességével. A mintavevő pontossága nagymértékben függ a hordalék szemnagyságától is. A 0,06 mm-nél nagyobb szemnagyságok esetén a különböző vízmintavevőknél már lényeges eltérések mutatkoznak. Fontos továbbá, hogy a beömlési nyílás a vízáramlásra merőleges legyen.

- a) *US D-43; US P-46; US DH-48 (1. ábra), izokinetikus mintavevők:* A hidrosztatikus nyomás és a légnyomás önműködően kiegyenlítődik minden mélységnél. Ez megakadályozza a vízminta kezdeti gyors beáramlását. A műszer áramvonalas bronztest, a vízminta gyűjtésére szolgáló cserélhető üvegedénnyel, valamint az üvegedény térfogatának ötszörösét kitevő légtartállyal.



1. ábra US DH-48 mintavevő.

- b) *dugós vízmintavevő üveg:* Durvább lebegtetett hordaléknál nem alkalmazható, mert a vízbeömlés sebessége nem azonos a vízfolyás sebességével és a vízáramlás sem éri merőlegesen a beömlési nyílást.

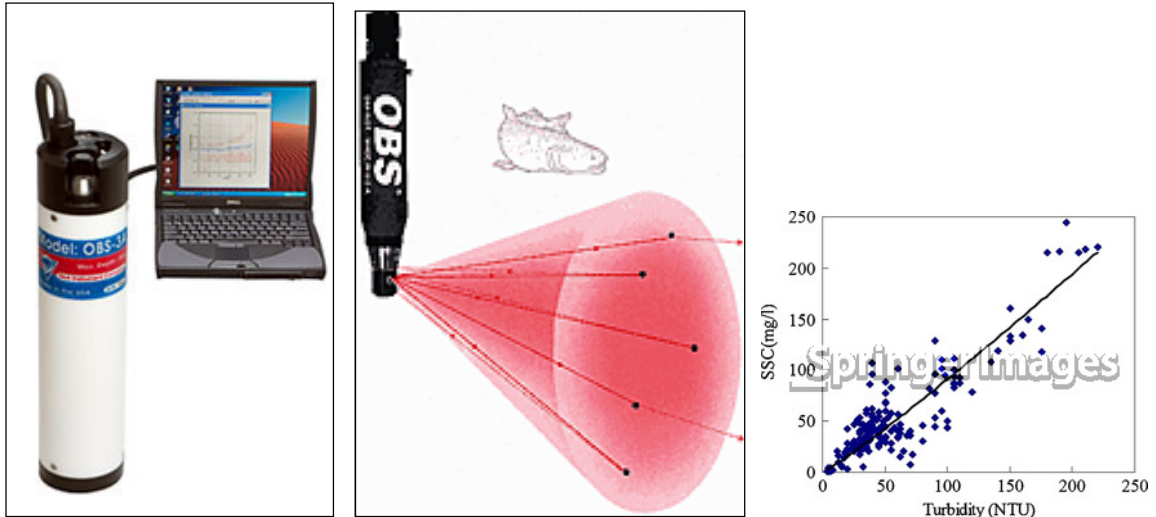
- c) *Radioaktív töménységmérők*: (napjainkban már nem használatosak)
- d) *Automatikus vízmintavevők*: Tulajdonképpen az a) pont alatti vízmintavevők különböző változatai közé sorolhatók. A kiválasztott függély adott pontjából bizonyos időközönként automatikusan mintákat szivattyúznak, melyet a berendezés tározott ülepítőhengerbe önt. A mintát ülepítés után a külön erre a célra szolgáló berendezés automatikusan lefénnyképezi, a kiülepített vizet pedig visszavezeti a folyóba. Minden mintavétellel egyidejűleg félretesz egy külön mintát a szemnagyság és szemösszetétel laboratóriumi meghatározásának céljából.
- e) *Mintavevő mérce*: Az egyes mintavevők egymás fölé helyezve, áradó víznél, különböző növekvő vízállásoknál gyűjtik be a mintát. Rendszerint valamilyen víziműtárgy falára vagy pillérére van erősítve, és így általában a vízfolyás széléről veszi a mintát. A teljes szelvényre mértékadó töménységet csak a helyi viszonyoktól függő korrekcióval lehet meghatározni.
- f) *szivattyús mintavevők*: (**2. ábra**) szintén pontbeli mintát vehetünk a lebegtetett hordaléktartalom meghatározásához. Szokásos elemei a mérésnek az alábbiak: 1) a mérőcsónakon elhelyezett szivattyú; 2) a szivattyúhoz csatlakozó tömlő, minél kisebb átmérőjű, hogy az alaki ellenállása ne legyen jelentős; 3) szívócső, ahol a mérés beállításainak megfelelően az áramlási sebesség hasonló, mint a folyóban; 4) súly, ami biztosítja a tömlő végének egyszerű pozicionálását. Hogy az áramlás lüktető jellegéből adódó pontatlan becslést elkerüljük és a minták laboratóriumi feldolgozásához szükséges mennyiség rendelkezésre álljon, relatíve hosszú idejű méréseket kell előirányozni, természetesen a kezelhető víztérfogatokat szem előtt tartva (10-25 literes minták).



2. ábra Szivattyús mintavétel.

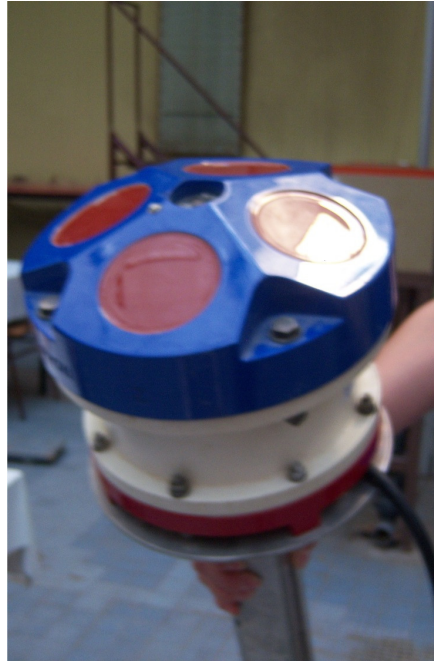
- g) *optikai elven működő zavarosságmérők*: (Optical Backscatter Sensors - OBS). A mérési módszer alapja az optikai sugárzás szóródása: ha egy szilárd részecskéket tartalmazó közegbe optikai sugárzás lép be, akkor ez a sugárzás az ott lévő részecskéken a tér minden irányába szóródik. Az eszköz (**3. ábra**) tehát egy infravörös sugarat küld a mintázott pontba, ahonnan a hordalék szemcsékről a fény megtörik. Az eszköz bizonyos pontokban méri a sugárzás mértékét, ami pedig elsősorban a víz zavarosságától, ami pedig a hordalék töménységétől

függ. Amennyiben ismert a kalibrációs összefüggés, az eredmény alapján a hordaléktöménységre tehetünk becslést. Megjegyezzük, hogy a fény szóródását a hordalékszemcse mérete is erősen befolyásolja, ezért az összefüggés kalibrálását minden mérés esetén végre szükséges hajtani. A műszert részletesebben bemutatom a dolgozat következő részében.

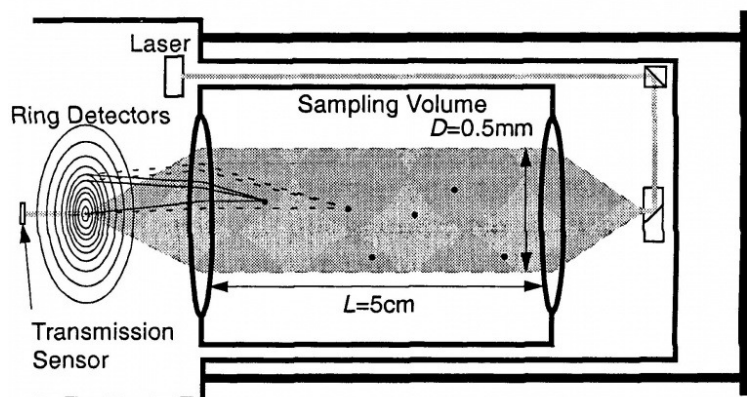


3. ábra Optikai elven működő zavarosságmérő.

- h) *akusztikus elven működő eszközök*: pl. ADCP (**4. ábra**), Az akusztikus mérőeszköz által kibocsátott hang lebegtetett hordalékról való visszaverődésének jelerőssége ugyanis kapcsolatban van a hordalék fizikai jellemzőivel (szemcseméret, töménység, alak, stb.), továbbá számos más paraméterrel, mint például a víz hőmérséklete, sótartalma, a mérőműszer frekvenciája vagy elektromos feszültsége. Terepi mérések során az ADCP mérésekkel párhuzamosan végrehajtott hordalék-mintavételezés eredményeinek felhasználásával és elemzésével lehetségessé válik a felsorolt ismeretlen paraméterek bearányosítása, aminek segítségével egy, a mérési helyszínre és a mérőeszköze jellemző kapcsolat állítható fel a műszer által rögzített visszavert jelerősség és a lebegtetett hordalék töménysége között. A mérési eljárás nagy előnye, hogy nem pontbeli, hanem függvény menti adatokat mér, sőt, mivel a sebességméréssel egyidejűleg történik a hordalékhozam közvetlenül mérhető. Az eljárás hátránya, hogy a mért jelerősség és a hordaléktöménység közötti kapcsolat leírása számos bizonytalanságot rejt magában, ezért a kalibrálásnál nagyon körültekintően kell eljárni. A műszert részletesebben ismertetem a későbbiekben.
- i) *lézeres hordalékmérő eszközök*: Közvetlenül kaphatunk információt a hordalékszemcsék méretéről és a töménységről. A műszer (**5. ábra**) a lézer hordalékszemcsék okozta elhajlását és szóródását elemzi. A részecskék által többféle szögben szórt fényt egy többelemű detektor érzékeli és létrehoz egy diffrakciós képet. A diffrakciós kép-adatokat, megfelelő optikai modell és matematikai eljárás alkalmazásával transzformálják, aminek eredményeként az a teljes térfogat részeit diszkrét számú méretosztályba sorolja, térfogati szemcseméret eloszlást eredményezve.



4. ábra ADCP.



5. ábra Lézeres hordaléktöménység mérő.

3 Lebegtetett hordalékvizsgálattal foglalkozó tanulmányok

A következőkben három tanulmány legfontosabb eredményeit ismertetem, amelyeket közvetlenül fel tudtam használni a vizsgálataim során. A témával foglalkozó irodalom értelemszerűen ennél gazdagabb, de itt csak a dolgozat témája és a hazai vizsgálatok szempontjából legrelevánsabb vizsgálatokkal foglalkozom.

Haimann *et al.* (2013) az ausztriai lebegtetett hordalék monitoring stratégiát mutatja be. Direkt és indirekt eljárások kombinációjával mérték több osztrák Duna-szakasz lebegtetett hordalék-transzportjának térbeli és időbeli változékonyságát. Ennek során optikai zavarosságmérővel folyamatos méréseket végeztek a folyó parti pontjában, amelyet a mérőeszközhöz közel vett vízmintákkal kalibráltak. Emellett további, keresztshelvény menti mérésekkel vizsgálták a lebegtetett hordalék szelvény menti eloszlását. A mérési eredményekből származtatott korrekciós tényezők segítségével becsülték a lebegtetett hordalékhozamot.

A zavarosság kalibrálására két különböző eljárást alkalmaztak. Az első egy k_s korrekciós együtthatóval számol minden olyan időlépésben, amikor vízminták is rendelkezésre álltak. $k_s = C_c/C_s$, ahol C_c a zavarosságmérőhöz közeli pontban vett vízmintákat, míg C_s a zavarosságmérő adatait jelöli. Ezen időlépések között k_s -t lineáris interpolációval határozták meg minden egyes zavarosságmérés időpillanatára. A második eljárás egy egyszerű lineáris regressziót alkalmaz a zavarosság adatok és a kalibrációs vízminták között a szenzorközeli lebegtetett hordaléktöménység becslésére.

A lebegtetett hordalék szelvénymenti eloszlásának feltárására az ISO 4363 (2002)-ben leírt módszer alapján több függély több mélységében mérték lebegtetett hordaléktöménységet és áramlási sebességet. A mintavételek US P-61-A1 lebegtetett hordalék mintavevővel történtek, sebességmérésre pedig ADCP-t, ADV-t és áramlásmérőt (current meter) alkalmaztak. A hordaléktöménységet az ADCP visszavert jelerősségéből az ún. hang egyenlet (sonar equation, Urick, 1983) alapján határozták meg. TDK munkámban én is ezt a módszert alkalmaztam a szelvénymenti hordaléktöménység számításához, ezért az eljárást az **6.3. fejezetben** mutatom be részletesen.

Végül egy keresztmetszeti tényezővel állították fel a kapcsolatot a szelvény átlagos lebegtetett hordaléktöménysége és a partközeli pont lebegtetett hordaléktöménysége között. Illetve a vízhozam és a lebegtetett hordalék töménység szorzatának adott időintervallumon (pl. év, hónap, vihar esemény) vett integráljával számították a hordalékhozamot az alábbi összefüggés alapján:

$$L = \int_{t_1}^{t_2} C(t) \cdot Q(t) dt$$

Ahol $C(t)$ – lebegtetett hordaléktöménység időbeli változása, $Q(t)$ – vízhozam időbeli változása, t_1 és t_2 – a vizsgált időszak kezdete és vége.

Kutatás irányult az ADCP műszer alkalmasságának és alkalmazási korlátainak megismerésére a folyók lebegtetett hordaléktartalmának meghatározására irányulóan (Baranya és Józsa, 2010). Az alkalmazott eljárás az ADCP által rögzített jelerősség és a lebegtetett hordaléktöménység kapcsolatán alapszik. Vízminták töménységadatait felhasználva kalibrációs eljáráson keresztül határozták meg a fenti kapcsolatot leíró összefüggés szabad paramétereit.

Elméletük szerint az ADCP által kibocsátott és visszavert jelerősség adatok és a víz, valamint a hordalék egyes jellemzőinek (vízhőmérséklet, hordaléktöménység, szemcseméret, szemalak, stb.) ismeretében a vízoszlopon átáramló hordalék töménysége származtatható.

Az ADCP műszerek a víz áramlási sebességének kimutatásához a visszavert jel frekvenciaváltozását használják fel. Emellett a hordaléktöménység meghatározása a kibocsátott és visszavert jelerősségét figyelembevételével lehetséges. A hordaléktöménység és a relatív visszavert jel erőssége közötti összefüggés:

$$SSC = 10^{(A+B \cdot RB)}$$

ahol SSC a lebegtetett hordalék töménysége (Suspended Solid Concentration), RB a relatív visszavert jelerősség (Relative Backscatter), A és B konstansok.

Az A és B függvényparamétereket kalibrálás útján határozták meg. Ehhez a vízmintavételekből vagy OBS mérésekből nyert hordaléktöményégeket és az ADCP adatokból származtatott RB értékeket egymáshoz rendelték, majd függvénnyel közelítették.

Az állóhajós mérésekből nyert regressziós paraméterekkel a mozgóhajós mérések jelerősség adatainak konverzióját is elvégezték. Ez alapján pedig becsülték a keresztmetszvény menti hordaléktöménységet és a sebességadatokat ismeretében a hordalékhozamot is.

Vizsgálataik alapján a módszer alkalmazásának korlátja, hogy a jelerősség hordaléktöménységgé történő alakítása függ magától a műszertől, valamint mérési körülményektől is. Így megállapították, hogy elengedhetetlen a lebegtetett hordalék töménységének meghatározására irányuló mérések során az azokkal párhuzamosan elvégzett vízminta-vételezés.

Németh (2012) TDK munkájában más módszerek mellett szintén a Baranya és Józsa (2009) által bemutatott ADCP alapú hordaléktöménység-becslési módszert alkalmazta szelvény menti hordaléktöménység meghatározására. Mivel az ADCP méréssel kapott visszavert jelerősség értékekből kalibráció útján lehet csak hordaléktöménységet származtatni, az ADCP mérés önmagában nem elegendő. Más, hordaléktöménység meghatározására alkalmas eszközzel együttesen kell alkalmazni. Ők erre a célra a Lisst-100 elnevezésű lézeres elven működő lebegtetett hordalékmérő eszközt választották. Megállapították, hogy a Lisst-100 igen alkalmas erre a feladatra, mivel nagyszámú mérési eredményeinek köszönhetően, megbízhatóbb alapadatokat szolgáltat, mint a hagyományos módszerek. Függéyenként jelentős számú ismert töménységű pontot tudtak az ADCP azonos pontjaihoz rendelni, ami megkönnyítette a kalibráció során a függvényillesztést és a kalibrációs paraméterek nagyobb pontosságú meghatározását.

Megjegyezném, hogy munkám során szintén előnyös lett volna a Lisst-100 alkalmazása, azonban ahogy Németh (2012) is említi, egyes eredmények rámutattak arra, hogy a műszer laboratóriumi körülmények közötti további tesztelése és esetleges újrakalibrálása, emellett pedig a műszerbeállítások pontosítása szükséges a további mérésekhez. Ezért úgy döntöttünk, hogy munkám során a kevesebb adatot szolgáltató, de egyelőre megbízhatóbban működő gyorsminta-vevőt alkalmazunk.

4 Felhasznált eszközök bemutatása

Munkám során a következő eszközöket alkalmaztuk:

1. Gyorsmintavevő (Szombathelyi típusú)
2. ADCP (Accoustic Doppler Current Profiler) és
3. Zavarosságmérő műszer (Turbidity Sensor 3612B)

Ezek fizikai kialakítását és működési elvét a következőkben mutatom be.

4.1 Gyorsmintavevő (Szombathelyi típusú):

Ezt a műszert a **2. fejezetben** bemutatott mérési módszerek között nem említettük külön, de gyakorlatilag az izokinetikus mintavevők közé sorolható. Helyszíni méréseink során a vízmintavételek eszközeül alkalmaztuk mind a parton lévő adott pontbeli, mind pedig a folyó keresztmetszetének több függőleges mentén hajóról vett minták gyűjtésekor. A mintavevő (**6. ábra**) áramvonalas kialakításának köszönhetően (timonyainak segítségével az áramlással párhuzamosan tarthatjuk a vízben), a mintavevő beömlési nyílása a vízáramlásra merőlegesen fog elhelyezkedni, valamint a hordalékos víz a Duna adott pontbeli sebességével azonos sebességgel áramlik át a mintavevőn, biztosítva ezáltal a minél megbízhatóbb eredményeket. A víz mindaddig zavartalanul áramolhat a mintavevő hengeres belső térfogatán át, míg azt gömbcsapok segítségével le nem zárjuk. Vízmintánkat ezután zavartalanul kiemelhetjük, majd a csapok nyitásával palackokba tölthetjük. Alkalmanként 0,2 liter térfogatú hordalékos vízmintákat vehetünk, melyek hordaléktöménységjellemzőit a továbbiakban elvégzett laboratóriumi mérések eredményeként kaphatunk meg. Kérdéses volt, hogy a vízminta kis térfogata mennyire reprezentatív, de megfelelőségét a későbbiekben igazoljuk.



6. ábra A vízminták gyűjtésére alkalmazott mintavevő.

4.2 ADCP (Accoustic Doppler Current Profiler):

A pontbeli mérések mellett teljes szelvényre kiterjedő méréseket is végeztünk. Ennek eszköze a Magyarországon mára már elterjedten alkalmazott ADCP volt, igaz, a gyakorlatban csupán a folyó vízhozamának meghatározására használják. Munkánk során az ADCP méréseket a mintavevővel vett pontbeli lebegtetett hordaléktöménységek teljes keresztstelvényre való kiterjesztésénél alkalmaztuk, illetve a szelvényen átáramló hordalékmennyiséget határoztuk meg segítségével.

Az akusztikus doppler elvű áramlási szelvényfelmérő műszerek alaprendeltetésüknek megfelelően a víz sebességének, hozamának és mederalakjának gyors, részletes és megbízható felmérésére alkalmasak. Ezen túl az utóbbi időben a lebegtetett hordaléktöménység mérésére való alkalmazásuk is kezd elterjedni, amely a vízben szállított hordalékszemcsékről visszavert jel erősségét veszi alapul. Az akusztikus alapú hordaléktöménység-meghatározással az elmúlt években már több külföldi és hazai tanulmány is foglalkozott, mint pl. Baranya és Józsa (2010) Dunai méréseket bemutató cikke, vagy Guerrero *et al.* (2011) cikke, mely a Parana folyón végrehajtott méréseket mutatja be.

Az ADCP-nél az akusztikus jelkibocsátó és a jelvevő is egy mérőfejben található. A műszer működése során a jeladó által kibocsátott akusztikus jel egy ismert, szűk frekvenciájú hangnyaláb, amely tengelye mentén halad a vízben, rövid hangimpulzusok formájában. A mérőfejtől távolodva a vízben való keresztülhaladás közben a hang a jelenlévő lebegtetett hordalékról szóródik és egy része frekvenciaváltozás mellett visszaverődik. A mérőfej jelvevője a jelkibocsátástól kezdve folyamatosan érzékeli a különböző távolságokból visszaérkező jelet. A jelvevő megállapítja a visszaverődött hang frekvenciájában bekövetkezett változást, mely a mérőfejben lévő jelkibocsátó és jelvevő esetén a következőre módosul:

$$f_{\text{visszavert}} = 2 * (v_{\text{víz}} / c_{\text{hang}}) * f_{\text{kibocsátott}}$$

ahol: $f_{\text{visszavert}}$ - a visszavert hang frekvenciája

$v_{\text{víz}}$ - a készülék és a részecskék (vagyis a víz) közötti relatív sebesség

c_{hang} - a hang terjedési sebessége az adott közegben

$f_{\text{kibocsátott}}$ - a kibocsátott hang frekvenciája.

A jelkibocsátás és visszaérkezés között eltelt időből valamint a hang terjedési sebességéből (vízben ~1500 m/s) számítható az áramló víz sebessége, illetve a visszaverődés helyének mérőfejtől való távolsága, így függvény mentén különböző mélységekben ismertté válik a sebesség. A legtöbb ADCP műszer – ahogy az általunk alkalmazott is – 4 hangnyalábot bocsát ki, ezzel biztosítva a sebességprofil térbeli megismerését.

A frekvenciamegváltozás tehát az áramlási sebességgel kapcsolható össze, de a műszer egyfajta másodlagos felhasználásánál a visszaverődött jel erősségét elemezzük. Ez a jellemző, ugyanis

közvetlen kapcsolatban áll a vízoszlopban utazó szilárd szemcsék mennyiségével, vagyis a hordalék töménységével. Meg kell jegyezni, hogy a visszavert hang erősségét a hordaléktöménységen kívül a szemcse alakja, mérete, a vízhőmérséklet, a sótartalom és a műszer frekvenciája is befolyásolja (Urlick, 1948; Wall *et al.*, 2006). Mindemellett figyelembe vesszük azt is, hogy Bogárdi János korai kutatási eredményei alapján (Bogárdi, 1971) a hang terjedési sebessége vízben csak kis mértékben függ a víz hőmérsékletétől, a víz sótartalmától, valamint a vízréteg vastagságától, ráadásul a felsorolt paraméterek hazánkban előforduló tartományaiban gyakorlatilag állandónak tekinthetők.

A mérés kivitelezését tekintve beszélhetünk állóhajós és mozgóhajós ADCP mérésekről. Állóhajós mérés esetén a mérőcsónak bizonyos időtartamig egy helyben marad, és ebben az egy adott függélyben végez sebességmérést. Ekkor a függélymenti sebességeloszlás pillanatnyi értékeit és azok átlagolásával a függélyátlagolt sebességet kapjuk meg. Mozdóhajós mérésnél a pillanatnyi függélyfelvételek átlagolásával az ADCP a szelvényt függőleges sávokra osztja, melyek szélessége a megadott átlagolási időintervallum alatt a csónak által megtett út. A sávokat pedig cellákra bontja a megadott rétegvastagság szerint. Az így kialakult rácshálókiosztás mentén a szelvényen átáramló vízhozam meghatározható.

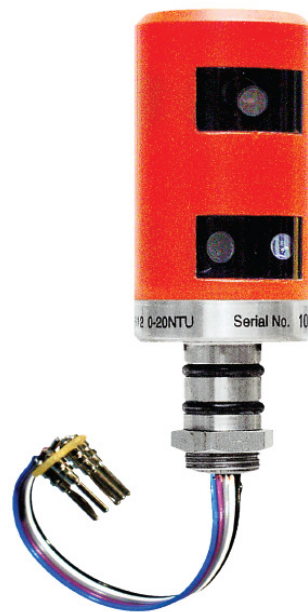
A csónak pályáját az ADCP, GPS-szel való összekötése révén pontosan rögzíti. Olyan vízfolyásokon, ahol a meder mozgása nem számottevő, az ADCP a fenékkövető funkciója segítségével (Bottom tracking) meg tudja határozni saját elmozdulását a mederfenékhez képest, vagyis érzékeli a saját relatív pályáját GPS nélkül is.

4.3 Zavarosságmérő műszer (Turbidity Sensor 3612B)

A zavarosságmérésre alkalmazott eszköz (Turbidity Sensor 3612B) az Aanderaa cég által gyártott RCM-9 mérőműszer egyik szenzora (**7. ábra**), mely a vizek zavarosságát méri a kibocsátott infravörös fény részecskéken való szóródását alapul véve ([www.aanderaa.com / Data & Specifications Sheets / Turbidity Sensor 3612](http://www.aanderaa.com/Data%20&%20Specifications%20Sheets/Turbidity%20Sensor%203612)). Külföldi tanulmányokban az ilyen zavarosságmérő műszerre az OBS mozaikszóval hivatkoznak, ami az Optical Backscatter Sensor rövidítése. A továbbiakban én is ezt a jelölést használom.

Az alkalmazott műszer egy négy tagból álló szenzorcsalád egyik tagja. A 3612-es 0-20, a 3612A jelű 0-100, a 3612B 0-500, a 3612S jelű szenzor pedig minden NTU tartományban képes adatokat rögzíteni. A tanszék a 3612B típusú szenzorral rendelkezik, amely vizsgálatainkhoz elegendően széles tartományban képes zavarosságot rögzíteni. Az NTU a Nephelometric Turbidity Unit rövidítése, mely egy szabványos amerikai zavarosság mértékegység. 1 NTU értéknek 1 mg/L szilíciumdioxid felel meg. A műszer kalibrációja laboratóriumi mérőeszközökkel történik. Egy műszerhez rendelt negyedfokú polinom adja meg a kapcsolatot a műszer által rögzített jelek és az NTU adatok között.

Az OBS hengeres feje és az Aanderaa adatrögzítő egysége egy kábelen keresztül csatlakoznak. A fejen két fénykibocsátó dióda, LED és egy fotodióda helyezkedik el. A kibocsátott sugarak 15°-os szöget zárnak be és a mintavételi pontban találkoznak. A mérés ideje alatt az infravörös fényt kibocsátó dióda fél másodpercre kapcsol be és fénysugarat küld a vízbe. Ha a körülötte lévő víz tiszta és áttetsző, a fénynek nem lesz miről visszaverődnie (a fotodióda nem fogja észlelni ezt a fényt). Másfelől, ha a víz zavaros, a kibocsátott fény a vízben lévő részecskékről visszaverődik, és a fotodiódák észlelik ezt. A részecskékről visszavert fény a műszer érzékelőjében áramot generál, amelyből származó jelet rögzíti a műszer. Ez a jel arányos a visszavert fény mennyiségével, amiből a zavarosság meghatározható. A gyártók garantálják, hogy a jelerősség független a körülötte lévő fény intenzitásától, tehát a külső fényviszonyok (napsütés vagy borult idő) nem befolyásolják a mérést.



7. ábra RCM-9 mérőműszer és a Turbidity Sensor 3612B.

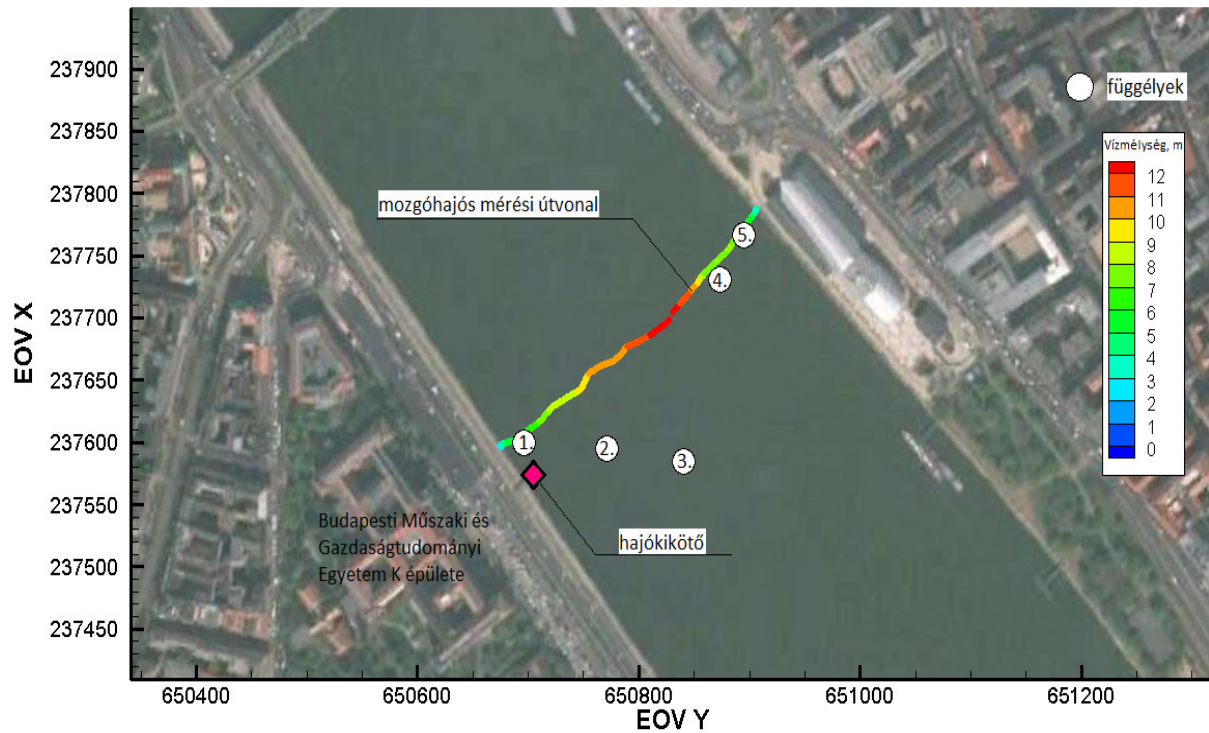
5 Mérési hely bemutatása, mérések menetének ismertetése

5.1 Mérési hely bemutatása

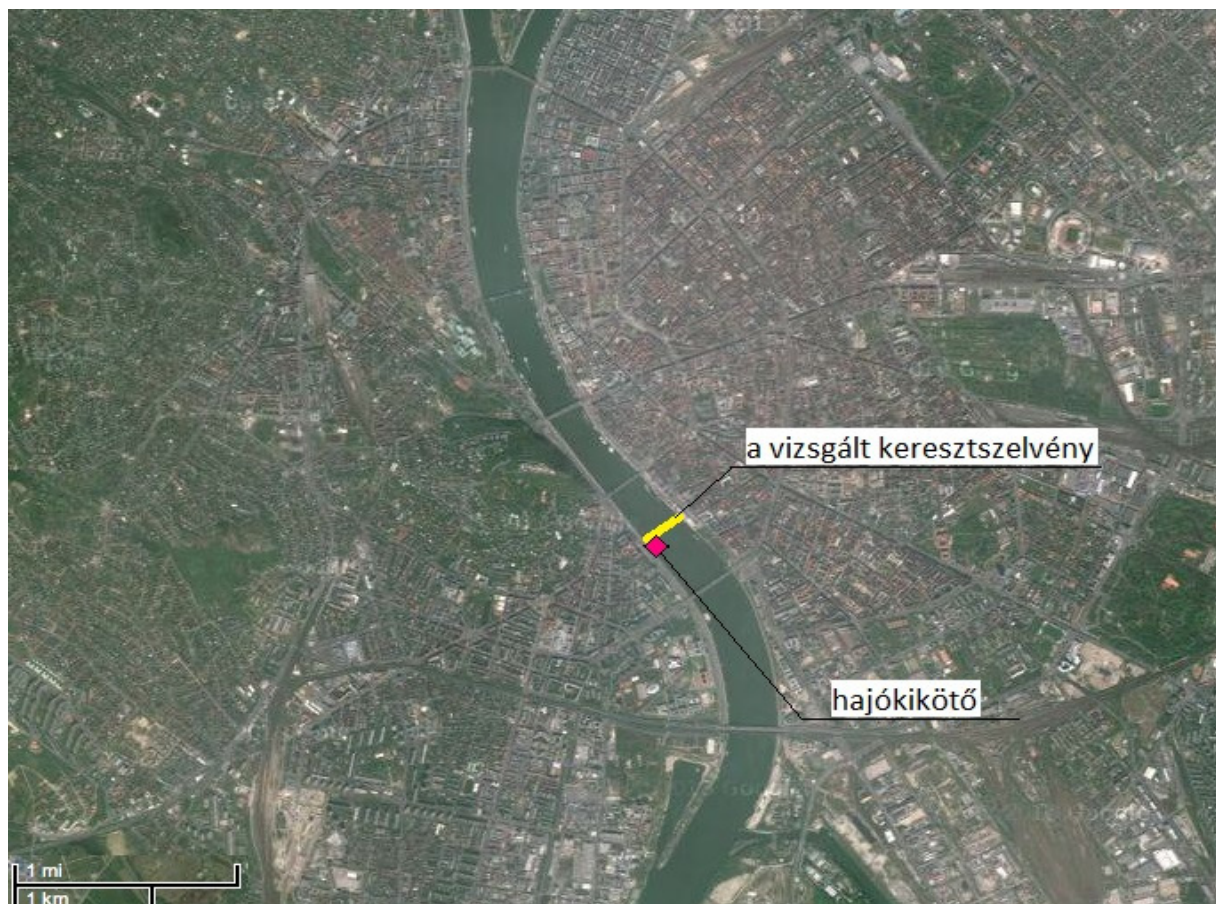
Méréseinket a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem K épülete előtt lévő hajókikötőről végeztük a Dunán, melyhez a szükséges engedélyeket magkaptuk mind az érintett hatóságtól (Közép-Duna-Völgyi Vízügyi Igazgatóság) mind a kikötő tulajdonosától. Helyválasztásunknak főként gyakorlati okai voltak, ugyanis a folyamatos mérések melletti sűrű mintavételeket tekintve a kikötő, közelsége révén kézenfekvő választásnak tűnt. Nem utolsó szempontként szerepelt az egyetemről való ráláthatóság, hiszen az OBS mérőműszer, a köztes adatletöltéseket megszakítva folyamatosan rögzítve volt a mérési helyszínen. Szemmel tarthatóságából fakadóan az esetleges ember általi károkozás veszélye csökkenthető volt. Fontos szempont volt továbbá, hogy a keresztshelvények menti csónakos felmérések is könnyen kivitelezhetőek voltak a Lágymányosi-öbölből történő vízreszállással.

Folyamatos zavarosság-mérésünk és vízmintavételeink helye tehát a K épület előtti hajókikötő volt. Az expedíciószerű (a vizsgálataim során két alkalommal végrehajtott) állóhajós és mozgóhajós méréseket a hajókikötő által kijelölt keresztshelvény bizonyos függélyeiben és a teljes shelvény mentén végeztünk, ahogy azt a következőkben részletesen bemutatok majd. A vizsgálatra kijelölt keresztshelvényt a **8. ábra** mutatja be, amin a hajókikötőt, a mozgóhajós mérések shelvényét és rögzített pontú mérések helyét is jelöltem.

Bár a **8. ábra** alapján úgy tűnik, hogy a vizsgált folyószakasz egyenesnek tekinthető, a nagyobb méretarányú helyszínrajz alapján látható, hogy ez csak a shelvény legszűkebb környezetére igaz, egyébként pedig egy jobbra kanyarodó folyóív kezdetéhez közeli, illetve egy balra kanyarodó ív utáni shelvényről, vagyis egy inflexiós szakaszcól beszélünk (**9. ábra**), aminek még szerepe lesz a mérési eredmények értékelésénél.



8. ábra A vizgálatra kijelölt Duna-szakasz.



9. ábra A mérési helyszín távolabbról nézve, a Duna helyszínrajzi vonalvezetésének bemutatására.

5.2 Mérések menetének ismertetése

Ahogy a **8. ábrán** látható, több helyen végeztünk méréseket: egy partközeli pontban, a keresztaszelvény mentén 5 függélyben, továbbá a szelvény mentén. A mérés alapját a BME előtti hajókikötőre telepített OBS műszer képezte, ami több héten keresztül folyamatosan detektálta és tárolta a műszer előtti pontra jellemző zavarosságadatokat. Ahhoz, hogy a zavarosságadatokból a mérési pontra jellemző lebegtetett hordaléktöménység adatokat tudjunk előállítani, kalibrációra volt szükség, amit az OBS előtti pontban vett vízminták laborelemzésével kapott töménység értékeivel végeztünk el. Az OBS adatai alapján így egy nagy időfelbontású hordaléktöménység-adatsort tudunk generálni, ami azonban továbbra is „csak” egy pontbeli adatsor volt. Ahhoz, hogy az OBS helyén mért hordaléktöménység adatokat össze tudjuk kapcsolni a teljes keresztaszelvényen átáramló hordalék mennyiségével két kiegészítő, szelvény menti mérést hajtottunk végre, amelyek során függélyek mentén vettünk pontbeli vízmintákat, ugyanezekben a függélyekben ADCP mérést hajtottunk végre, majd szelvény menti mozgóhajós ADCP mérést is végeztünk. A mérési eljárásokat egy táblázatba foglaltam össze (**1. táblázat**), amelyben az *SSC* a hordaléktöménységet, a *v* az áramlási sebességet, az *RB* az ADCP visszavert jelerősségét, a *Q* pedig a vízhozamot jelenti.

	Eszköz	Mért jellemző	Gyakoriság	Mélység
Partközeli mérés	gyorsmintavevő	<i>SSC</i> (mg/l)	átl. 24 óra	1,5 m
	OBS	zavarosság (NTU)	10 perc	1,5 m
Függélymenti mérés	gyorsmintavevő	<i>SSC</i> (mg/l)	2 alkalommal	5 mélységben
	ADCP (állóhajós)	<i>v</i> (m/s), <i>RB</i>	2 alkalommal	teljes függélyben
Szelvénymenti mérés	ADCP (mozgóhajós)	<i>v</i> (m/s), <i>RB</i> , <i>Q</i> (m ³ /s)	2 alkalommal	teljes függélyben

1. táblázat A vizsgálatok során alkalmazott mérési módszerek legfontosabb jellemzői.

5.2.1 Partközeli mérés

Gyorsmintavevő használatával a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem K épülete előtti hajókikötőről kisvíz idején lehetőségeinkhez mérten igyekeztünk napi egyszeri alkalommal három vízmintát venni az állandóra kitelepített OBS mérőfejnél, hogy kalibrálási adatokra tegyünk szert (**10. ábra**). A három minta töménységét átlagoltuk, a kiugró értékeket elhagyva és ezt tekintettük az adott időpontra érvényes pontbeli töménységnek. A vízminták laboratóriumi feldolgozását személyesen végeztem el, de hogy annak megbízhatóságáról meggyőződünk, néhány vízmintát az FTV Zrt. talajmechanikai laboratóriumába is elküldtük elemzésre, majd az eredményeket összehasonlítottam. A két elemzési eljárással kapott összetartozó hordaléktöménység értékeket a későbbiekben mutatom be. A vizsgálataim első időszakában a Dunában permanens kisvízi állapotok uralkodtak, majd 2013. szeptemberében egy közepes nagyságú árhullám vonult le, amikor is megkétszereztük a mintavételi

gyakoriságot, és már napi két alkalommal is vettünk vízmintákat a délelőtti majd az esti órákban, hogy a gyorsan változó hordalékjellemzőket minél pontosabban rögzítsük.



10. ábra Vízmintavétel a hajókikötőről az RCM-9 telepítési helyénél

A legelső mintavétel során a gyorsmintavevő mellett összehasonlításképpen bevetettünk egy jóval nagyobb víztérfogatot gyűjtő, közelítőleg 5 liter űrtartalmú dugós vízmintavevőt (**11. ábra**). Célunk annak vizsgálata volt, hogy a megvett vízminta mennyiségének van-e hatása a kapott hordaléktöménységre, ugyanis félő volt, hogy a gyorsmintavevő által kiemelt 0,2 liter térfogat nem lesz megfelelően reprezentatív a mérési pontra. Laboreredményeink kimutatták, hogy nincs jelentős eltérés a két eszköz egyidejű alkalmazásakor kapott töménységi adatok között. Ezért ezután a jóval időtakarékosabb és praktikusabba gyorsmintavevőt használtuk vízmintáink kinyerésére.



11. ábra Dugós vízmintavevő

A mintavételek mellett, ahogy az 1. táblázat is mutatja, az OBS segítségével hosszúidejű, folyamatos zavarosság-mérést végeztünk a hajókikötőről. A műszer a vízfelszínhez viszonyítva állandó 1,5 méteres mélységben helyezkedik el, mert az úszóműhöz rögzítve, azzal együtt mozog. Telepítésének során a műszert egy fémkeretben helyeztük a vízbe, amit egy lánc segítségével rögzítettünk a kikötő egy pontjára. A műszer hosszúidejű rögzítésénél akadtak problémák, ugyanis jelentős mennyiségű uszadék halad át a kikötő alatt, különösen a számunkra érdekes nempermanens viszonyok esetén, és a műszert tartó lánc annak nagy részét fel is fogta. Ilyenkor előfordult, hogy a műszerre akadt uszadék miatt kiugró NTU értékeket kaptunk, illetve azzal is számolnunk kellett, hogy a műszer ilyen esetekben nem a vízfelszíntől 1,5 méterre állt a vízben, hanem néhol alig volt fél méteres vízborítás felette.

A fentiekkel szembeesülve a műszert rögzítő láncot kicseréltük egy vastagabb, rozsdamentes változatra megelőzve azt, hogy idő előtt elszakadjon a megnövekedett igénybevételek miatt. Az addig használt láncot uszadék fogóként hasznosítva a kikötő oldalához rögzítettük egy nehezéssel ellátva. Ez a megoldás megfelelőnek mutatkozott, mert a nagyobb fák, és egy ideig szinte a teljes uszadékot visszatartotta. Az árhullám levonulása után azonban elkerülhetlenné vált a kikötő alatti rész csónakkal történő tisztítása. Igyekezeteink ellenére az OBS adatrögzítése során jól láthatóak voltak azok az időtartományok, amelyeknél a műszer mérését befolyásolta a sűrű uszadékréteg. Az ilyenformán hibás mérési adatok kiszűrése azonban kivitelezhető volt, hiszen ezek a téves adatok elszórta, kimagasló lokális maximumokként szemmel is jól érzékelhetőek voltak a kirajzolt grafikonokon.

5.2.2 Függélymenti mérés

5.2.2.1 Vízmintavételek

A hajókikötőről rendszeresen ismételt mintavételeken kívül két expedíciószerű szelvénymerést végeztünk egy középvízi állapotban (2013.09.16-án) kb. 2050 m³/s-os vízhozam mellett és egy közepes méretű árhullám tetőzésének környékén (2013.09.20-án), kb. 3500 m³/s-os vízhozamnál. Ennél a két alkalomnál a Duna teljes keresztshelvényét vizsgáltuk, többek között a gyorsmintavevővel végrehajtott pontbeli vízmintavételekkel. A szelvényben kijelöltünk 5 függélyt (**8. ábra**), melyek mentén az adott függélynél a vízmélységhez arányosan 5 különböző mélységben vettünk vízmintákat. A függélyben jellemző vízmélységet az ADCP mérés szolgáltatta, mivel a mederfenék éles határt képez, ahonnan az akusztikus jel legnagyobb része visszaverődik. Ezzel a módszerrel összesen 25-25 db mintára tettünk szert az egyes behajózásokkor. A mérési pontokban egy vízmintát vettünk, azonban itt meg kell jegyeznünk, hogy ezt a számot legalább háromra kellene növelni, mert a tapasztalatok azt mutatták, hogy az adatok szórása miatt egy pontbeli mintából nem mindig vonhatunk le jól megalapozott következtetéseket. Az ok, amiért ez mégis elmaradt abban áll, hogy még a gyorsmintavevővel is igen időigényes a minták vétele (leengedés a kívánt mélységig, majd felhúzás), illetve a laboratóriumi elemzésük is munka- és időigényes folyamat. A hajós mintavételeknél további problémaként kellett számolni az árhullám levonulásának ideje alatti megnövekedett vízsebességgel. A gyorsmintavevőt ugyanis viszonylag könnyebb tömegéből adódóan a sodorvonal környéki függélyekben elragadta az áramlás, közel függőleges leeresztésük nem volt megoldható és így nem sikerült leengedni őket a megfelelő mélységig. Az árhullám tetőzésénél végrehajtott mérés alkalmával csak körülbelül a vízfelszíntől számított 2,5 méterig lehetett vele megbízhatóan mintát venni. Felmerült olyan megoldási lehetőség is, hogy csörlővel ellátott hajóval a mintavevőre ólombombát akasztva, kiküszöbölhető annak nagyobb mélységekre való leeresztése, ám ezt el kellett vetnünk, ugyanis az eszköz kialakítását tekintve a vízminta palackokba ürítése így nem lett volna egyszerűen kivitelezhető. Ennél sokkal alkalmasabb megoldásnak látszik a szivattyús eljárás, amely során egy ólombombára erősített tömlő másik végét a csónakban tartva, és azt egy nem túl nagy teljesítményű szivattyúhoz csatlakoztatva viszonylag gyorsan vízmintákat nyerhetnénk a kívánt mélységekből. A módszer bizonytalansága adódhat abból, hogy a pontos mintavétel céljából a szivattyúzás sebességének meg kell egyeznie az adott pontban a víz sebességével. Terveink között szerepel ennek a módszernek az összevetése kisvíz idején a gyorsmintavevő alkalmazásával. Egy ilyen vizsgálattal megtudhatnánk, hogy az aránylag pontos mintavevőhöz képest tudunk-e elfogadható eredményeket produkálni a szivattyús mintavétel folyamán, és így bevethető lenne egy nagyobb árhullám levonulásának alkalmával. Erre azonban e dolgozat keretében már nem volt lehetőség a mintavételek és a vízminták elemzésének korlátozottsága, időigénye miatt.

5.2.2.2 Állóhajós ADCP mérések

A szelvénymérések alkalmával a vízmintavételekre kijelölt 5 db függélyben (**8. ábra**) állóhajós méréseket is végeztünk. Erre azért volt szükség, hogy az ADCP által rögzített hangjel erősség értékeket egy kalibrálási eljárás során hordaléktöménység adatokká tudjuk átalakítani. A kalibrációhoz a függéyek diszkrét pontjaiban vett vízminták adatait használtuk.

5.2.3 Mozgóhajós ADCP mérések

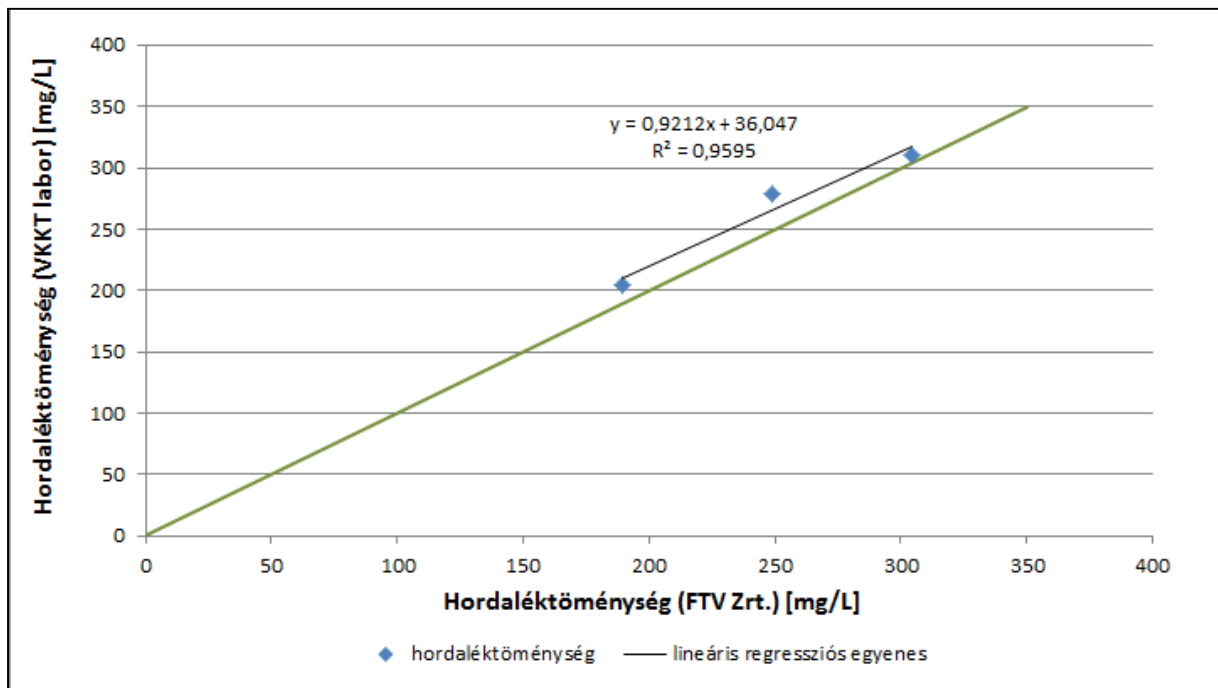
A szelvénymérések alkalmával végeztünk mozgóhajós ADCP méréseket is, melyek helyét szintén bemutattam a **8. ábrán**. Ezek során megkaptuk az adott szelvénymenti nyers sebességeloszlás adatokat, amit a későbbiekben a hordalékhozam számítására használtunk fel. Emellett, a szelvénymenti jelerősség adatokból a rögzített pontú mérések alapján elvégzett kalibráció felhasználásával a hordaléktöménység kereszt-szelvény menti eloszlását is elő tudtuk állítani.

A mérés során nehézségként kellett számolnunk a Duna hajóforgalmával. Hiszen minél lassabb sebességgel kellett keresztülhajóznunk a hajózási útvonalon az időátlagolt ADCP mérések pontossága érdekében.

6 Mérési eredmények ismertetése

6.1 Pontbeli vízminták elemzése

A vízminták elemzését döntő többségében saját kezűleg végeztem el a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Vízi Közmű- és Környezetmérnöki Tanszékének akkreditált laboratóriumában, illetve 10 darab minta elemzését elvégeztettük egy külső céggel is, az FTV Zrt.-vel. Ennek azért éreztük szükségességét, hogy biztosak lehessünk abban, hogy laboratóriumi méréseink elég hiteles adatokat szolgáltatnak vizsgálatainkhoz. Az eredmény megnyugtató volt, a kiértékelések közötti eltérés egyik esetben sem haladta meg a 10,4%-ot (**12. ábra**). (Megj.: a grafikon három értékpárt jelöl mindössze, mert a 10 minta összességében három időponthoz tartozott, csak időpontonként 3-4 mintát vettünk és az azokból kapott átlagokat látjuk itt.) A későbbiekben egy összefoglaló ábrán (**19. ábra**) ismét bemutatjuk majd a FTV Zrt. által kiértékelt hordaléktöménységeket a mért és számított töménységekkel összehasonlítva. Ott is látható lesz, hogy a két elemzéssel kapott értékek nem térnek el egymástól jelentősen.



12. ábra Mérési eredmények összevetése (FTV Zrt. – VKKT labor).

A VKKT laborban végzett mintaelemzések menete a következő volt:

1. A kemencében 105 °C-on 24 órán át szárítottam az üres tégelyeket.
2. Analitikai mérleggel lemértem a tégelyek tömegét grammban kifejezve tízezrelékes pontossággal.
3. Minden vízmintát kiporcióztam a tégelyekbe 40 milliliterenként (**13. ábra**).
4. A vízmintákat kemencébe helyeztem és 24 órán át 105 °C-on tömegállandóságig szárítottam.

5. Kihűlés után a tégelyek tömegét újra lemértem a szárítás után visszamaradt szárazanyag-tartalommal együtt (**14. ábra**).
6. A két lemért tömegértéket egymásból kivonva megkapjuk, hogy 40 ml mintában hány g szárazanyag található, majd ezt átszámítva mg/L-es értékre eljutunk a lebegtetett hordaléktöménység értékekhez (SSC = suspended solid concentration).



13. ábra VKKT labor, vízminták előkészítése szárításra.

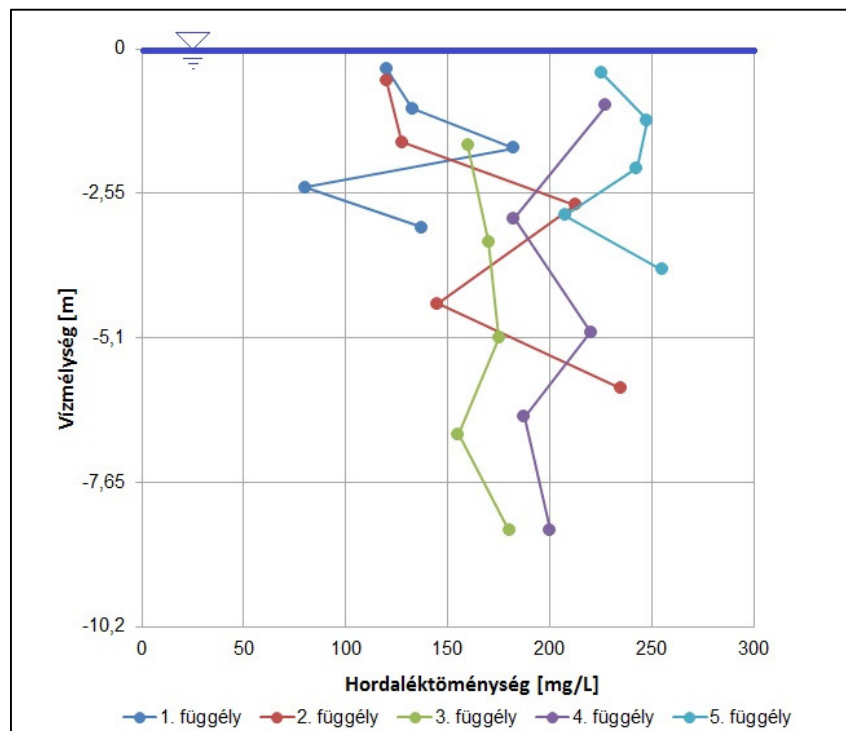


14. ábra VKKT labor, szárítás utáni tömegmérés.

Egy szárítás alkalmával 30 mintát tudtam elemezni. A két szelvénymérés függélymenti mintavételéből összesen 25-25 vízminta adódott, a part menti pontbeli mintavételekből pedig összesen 108 darab. A

szárítás menetének esetleges gyorsítása reményében megvizsgáltam, hogy egy újabb mintaelemzés kezdetén a tégely üres tömegének lemérése előtti szárítási lépés kihagyható-e. Azt tapasztaltam, hogy az előzőleg megmért üres tégelytömegektől esetenként 0,0030 grammos tömegeltérések is jelentkeznek egy újabb szárítás során, mely töménységben 70 mg/L-es eltérést is eredményezhet, amely vizsgálataink során korántsem elhanyagolható. Tehát nem tehetjük meg, hogy végig azonos üres tégelytömegekkel számolunk.

A laboratóriumi eredmények kiértékeléseképpen a 2x25 db minta töménységadatait összevetettem az egyes függélyek mentén (15. ábra).



15. ábra A vízminták alapján kapott függélyek menti hordaléktöménység eloszlások a középvízi mérésnél (2013. szeptember 16-i mérési eredmények).

A kisvízi szelvénymérés függélymenti adatait bemutató ábrán látható, hogy a hordaléktöménység értékek nem igazolják az elméleti eloszlást, miszerint a mederfenék felé növekszik az értékük, hanem inkább zaklatott képet mutatnak. A legmélyebbről vett vízmintáknál mindazonáltal valamivel magasabb töménység értékeket látunk, egyetlen függély kivételével. Ez magyarázható a hordalék származási helye szerinti felosztásából kiindulva. Miszerint beszélhetünk kimosott, valamint fenékanyag-hordalékról. A kimosott hordalék a szállított hordalékanyag az a része, amely a fenékanyagnál finomabb szemcsékből tevődik össze. Vízyűjtőterületről, partokról származik, és többnyire ez teszi ki a folyó lebegtetett hordalékmenységét. A fenékanyag-hordalék viszont a szállított hordalékanyag az a része, amely a fenékanyaggal azonos szemnagyságokból tevődik

össze. Mederből és vízgyűjtőterületről is származhat. Tehát a mederfenék közeli kiugró értékek jelenthetik a fenékanyag-hordalék felkeveredését is.

A profilokon az is látható, hogy a bal part közelében lévő függélyeknél (4. és 5. függély) általában magasabb értékeket kaptunk, mint a jobb partot jellemzőknél. A jelenség magyarázatára most nem vállalkozunk, mert ahhoz túl kevés adat áll rendelkezésre, mindenestre a későbbiekben fontosnak tartjuk célirányos mérések végrehajtását, ami alátámasztaná az itt látottakat. A hordaléktöménység szelvény menti változékonysága kapcsolatban áll az áramlási viszonyok térbeli alakulásával és a folyó morfológiai viszonyaival, így a magyarázat ebben lesz keresendő.

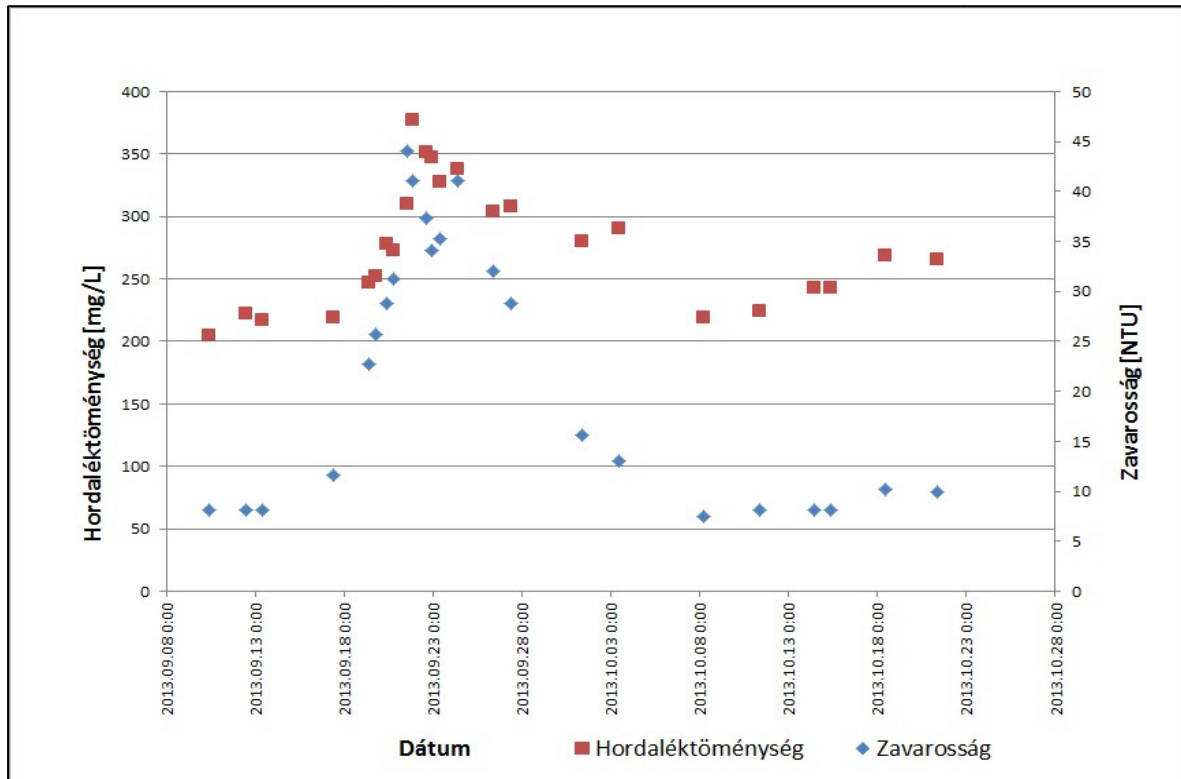
A teljes szelvényre kiterjedő mintázások alkalmával az árhullám tetőzésénél (2013. 09. 20-án) végrehajtott mérések során a folyó közepénél felvett függélyeknél a fentebb említett mintavételi problémák miatt töménységadataink csak a vízfelszíntől számítva 2-2,5 méteres mélységig szolgáltatnak reprezentatív értékeket. A kapcsolódó adatok megjelenítését mellőzve elmondható, hogy nagyobb vízhozam mellett magasabb töménység értékek jelentkeznek, a növekedés mértéke kb. 50%, de a dolgozatban bemutatott módszer pontosabb kidolgozásához a jövőben nagyobb árhullámok levonulását is végig kell kísérni, hogy szélesebb töménység intervallumot fedjünk le a vizsgálattal.

6.2 Zavarosság- és vízmintákból kapott hordaléktöménység idősorok összevetése

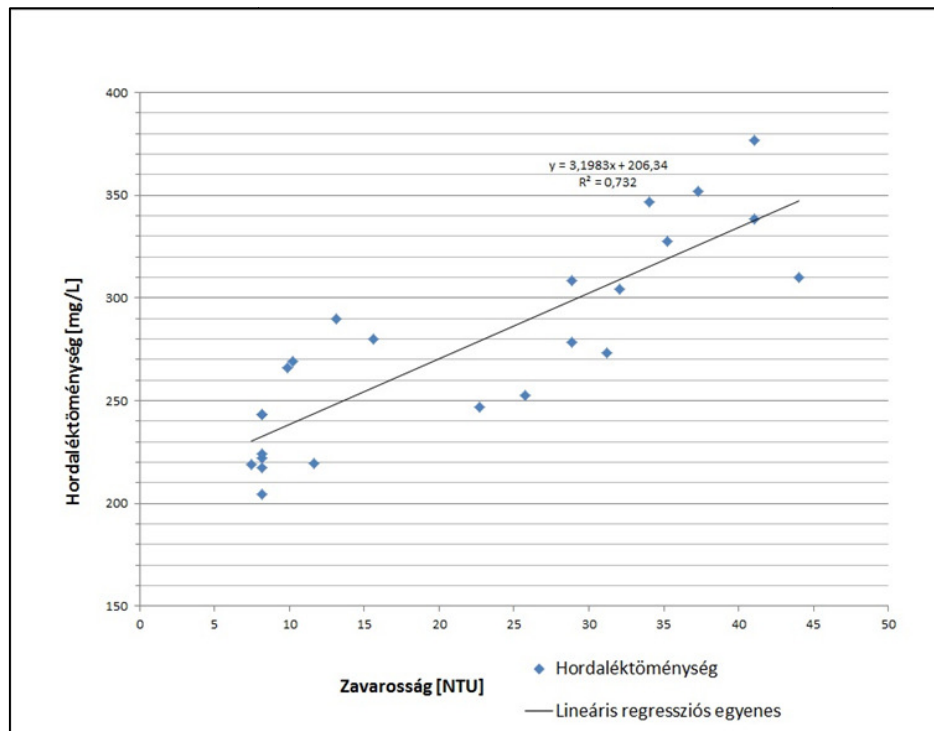
A BME előtti hajókikötőre telepített OBS mérőműszer a szeptember 10-étől október 30-áig terjedő időszakban végzett folyamatos zavarosságmérést. Ezen időszak alatt a műszer előtti pontból összesen 24 darab diszkrét időpontra jellemző hordaléktöménység értéket állítottam elő a gyorsmintavevővel vett vízminták laboratóriumi elemzésével. Első lépésben ezeket a töménységadatokat összevettem az ugyanezekben az időpillanatokban rögzített zavarosságadatokkal (**16. ábra**). A két idősor közötti kapcsolat egyértelműen megmutatkozik. Mindkét adatsor világosan jelzi a kb. 2013. szeptember 13-án érkező árhullám hatását, ahonnan mintegy 7 nap alatt éri el maximumát mindkét paraméter, majd a következő napokban egy átmeneti csökkenés és újabb emelkedés alakul ki. Szeptember 25. környékén az adatok folyamatosan csökkennek és október 8. körül érik el a lokális minimumot. Az ezt követő időszakban csekély növekedés tapasztalható.

A zavarosság és a lebegtetett hordalék töménysége közötti kapcsolatot befolyásolja a hordalékszemcse mérete, alakja és szemösszetétele is, a vízzel utazó szerves anyagok, vagy a buborékok, így a zavarosság értékeket kalibrálni kellett a szenzor közelében vett vízmintákkal. Gippel (1995) tanulmánya alapján ez a kapcsolat közel lineáris, ha a részecskék mérete és összetétele nem változik a koncentrációval. Mivel a részecskeméret és a szemeloszlás vizsgálata nem képezte TDK munkám tárgyát, így pontosabb ismeretek nélkül, a fentebbi esetet feltételezve lineáris függvényt

illettettem az adatpárookra. A regressziós egyenes 0,73-as korrelációs együtthatót eredményezett (17. ábra), amit jelen vizsgálat keretében elfogadhatónak tekinthetünk.

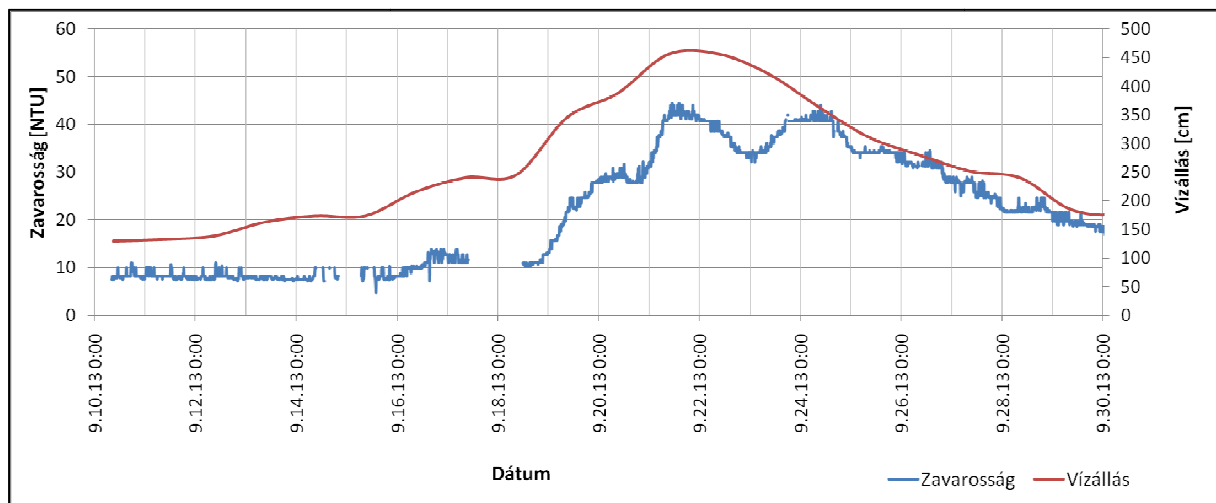


16. ábra OBS-szel mért zavarosság és vízmintákból előállított hordaléktöménység idősorok.



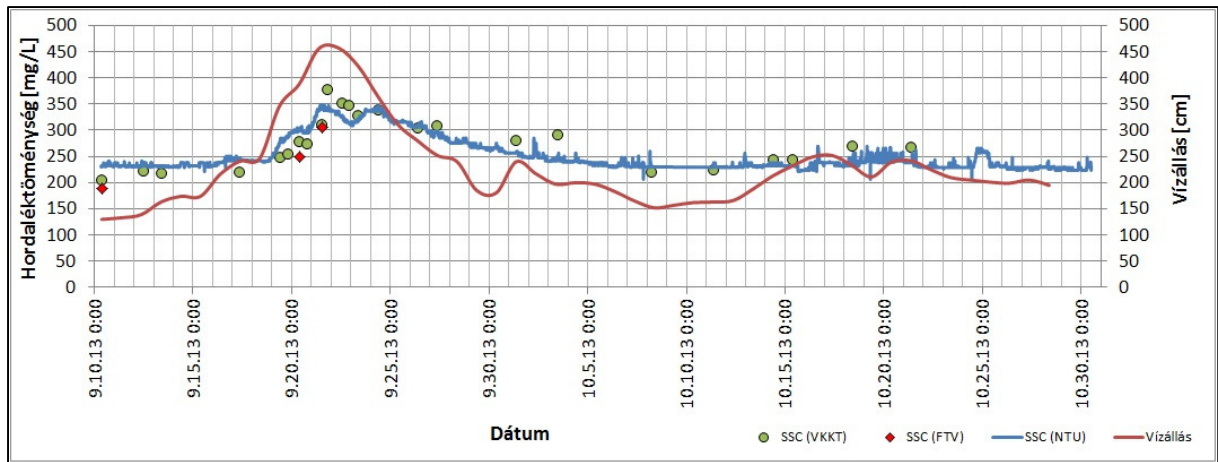
17. ábra Az OBS által adott zavarosságadatok és a mérőfejnél vett vízminták alapján kapott töménység értékek kapcsolata.

Az OBS-szel rögzített zavarosságadatokat a vízállás idősorral együtt is ábrázoltam. Az érkező árhullám következtében megnövekedett lebegtetett hordalék mennyiség a zavarosság adatokban is megjelenik, jól látható, hogy a zavarosság idősor alakja jól követi a vízállás idősort (**18. ábra**). Azt is megfigyelhetjük, hogy várakozásainkkal ellentétben a zavarosság csúcs nem az árhullámcsúcs előtt érkezett, hanem közel azonos időben. További vizsgálatot igényel a tetőzés környékén tapasztalható hullám a zavarosság idősorban, amit pl. a tetöző vízhozam, mint egy kritikus állapot hatására a mederanyagból felkeveredő hordalék érkezése okozhat. Ennek vizsgálata is további elemzéseket igényel, de vegyük észre, hogy az ilyen jellegű kérdések felmerülése azért lehetséges, mert a múltbeli adatokhoz képest nagyságrendekkel nagyobb mennyiségű adat áll most rendelkezésre. A részletesebb adatok sokkal finomabb léptékű folyamatokba adhatnak betekintést, de értelmezésükhöz további adatsorokra van szükségünk.



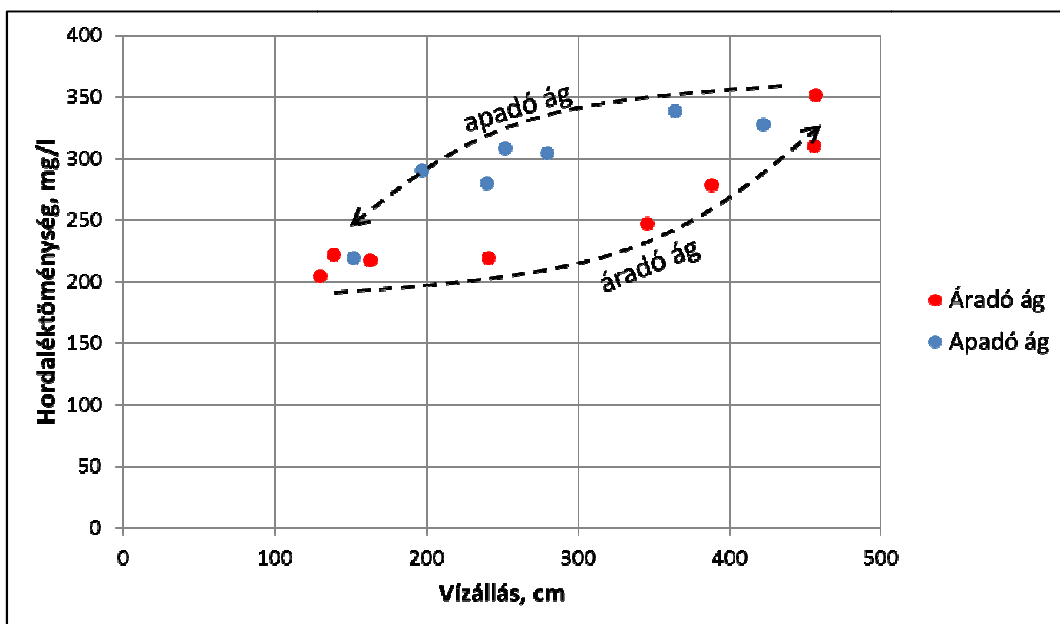
18. ábra Zavarosság idősor a levonuló árhullám vízállásadataival összevetve.

A regressziós egyenes egyenletének segítségével a szeptember 10-étől október 30-áig rögzített NTU értékeket átszámítottam hordaléktöménységekké. Ezeket az SSC értékeket, a mérési időszak alatt a Duna budapesti vízmércéjén rögzített vízállásadatokat, valamint a vízmintákból kapott VKKT laborban és az FTV Zrt. laborában elemzett töménységeket ábrázoltam az idő függvényében (**19. ábra**). Éppen a zavarosságértékek regresszión keresztüli „simítása” okozza azt, hogy a kék vonal, vagyis a zavarosságból átszámított töménység-értékek nem mutatnak olyan időbeli ingadozást, mint a diszkrét minták. Az árhullám hatása a töménység időbeli változására mindazonáltal jól megmutatkozik, vagyis az OBS ilyen célra való alkalmazása az itt bemutatott eredmények alapján mindenképpen bizakodásra ad okot.



19. ábra Vízállás idősor és a különböző módszerekkel kapott lebegtetett hordaléktöménység adatsorai (magyarázatot lásd a szövegben).

Az eljárás további finomításánál felmerülhet az árhullám áradó és apadó ágának szétválasztása és a hidrológiai adatok hordalékadatokkal való összekapcsolásánál a két jól szeparálható időszak külön kezelése. Megvizsgáltuk azt is, hogy ha a vízminták alapján kapott töménységadatokat közvetlenül kapcsoljuk a vízállás adatokhoz, kimutatható-e az eltérő viselkedés a két nevezett időszakra. Az alábbi ábra (20. ábra) alátámasztja azt a feltételezést, hogy a kapcsolat a két jellemző között (vízállás-töménység) szoros, nemlineáris és eltérő az árhullám áradó és apadó ága között. Az eltérés jellege meglepő, mert az ábra szerint ugyanahhoz a vízálláshoz apadó ágban magasabb hordaléktöménység tartozik, mint az áradó ágban. Mivel a bemutatott jelenség korántsem kézenfekvő, itt is szükségesnek mutatkozik az adatgyűjtés folytatása és elemzése.



20. ábra Vízállás és a vízminták alapján előállított hordaléktöménység kapcsolata.

6.3 ADCP adatok felhasználása a szelvény menti hordaléktöménység bemutatására

Az ADCP alapú lebegtetett hordaléktöménység mérési eljárásának lényege, hogy mérés során rögzített visszaverődő relatív hangjelerősség alapján a mérési cellákban számíthatóvá válik a lebegtetett hordalék töménysége, ha ismerjük a visszavert jelerősség és hordaléktöménység közötti kapcsolatot. Ezt az összefüggést egy kalibráció útján tudjuk felállítani, amennyiben rendelkezésre állnak az ADCP méréssel párhuzamosan végrehajlott vízmintavételek. A kapcsolatot leíró függvény a következőképpen néz ki (értelmezését lásd a **3. fejezetben**):

$$SSC=10^{(A+B*RB)}$$

A kalibráció mérési körülmény függő, így egy általánosítható összefüggést nem lehet felállítani.

Ahogy az **5.2 fejezetben** bemutatam két jól elkülöníthető hidrológiai állapot mellett ($Q_1 = 2050 \text{ m}^3/\text{s}$ és $Q_2 = 3500 \text{ m}^3/\text{s}$) a folyó keresztshelvényében mozgóhajós, illetve több függély mentén állóhajós méréseket végeztünk a vízmintavételekkel párhuzamosan. A mérés során nagy idő (~ 1,76 s), és térbeli (~ 25 cm függőleges értelmű) felbontású adatokat kaptunk a pillanatnyi sebességviszonyokról. Emellett a szelvény menti hordaléktöménység eloszlásról is képet kaphatunk a következőkben ismertetett módszerrel.

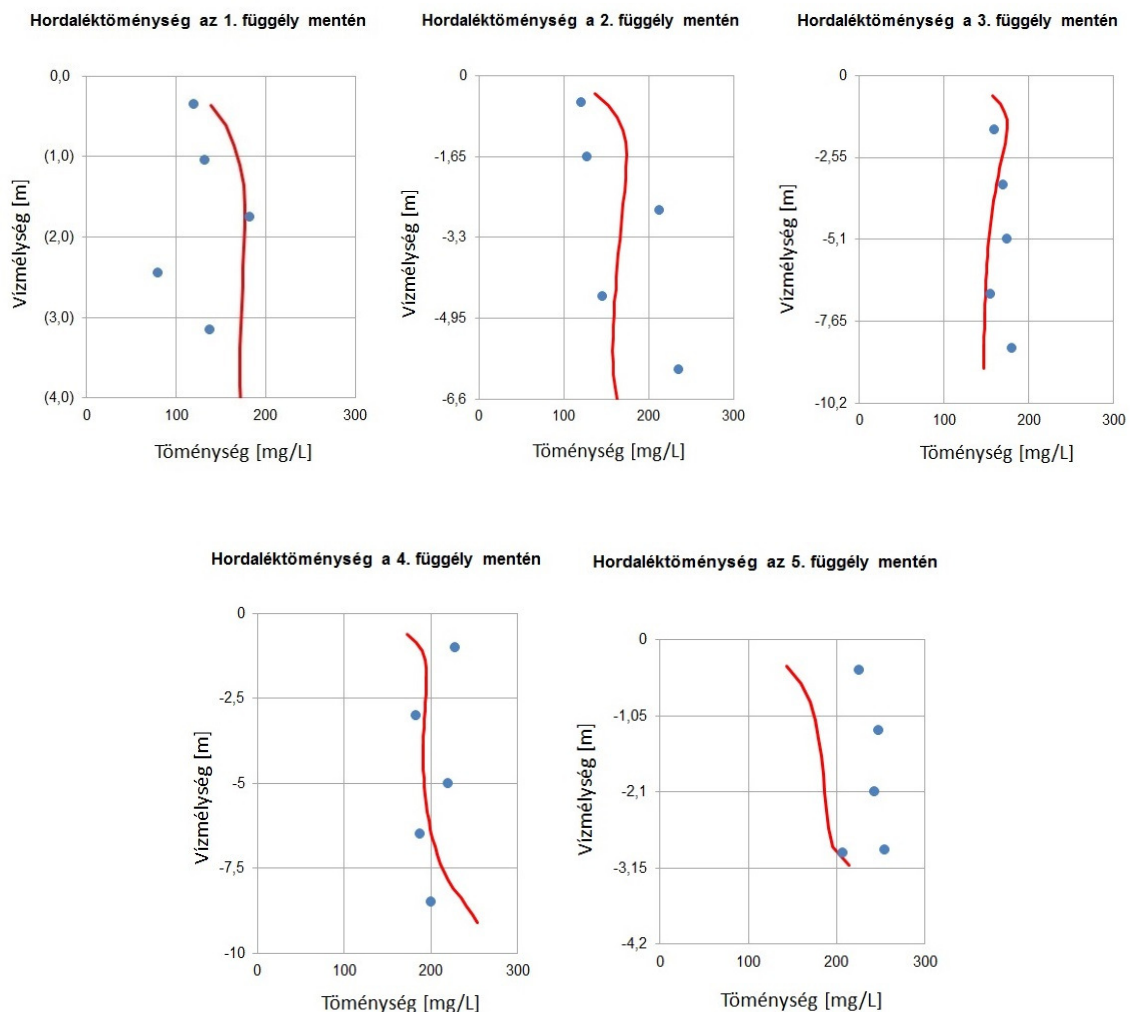
Az ADCP visszavert jelerőssége alapján állítottam elő a hordaléktöménység adatokat. A rendelkezésre álló adatok alapján a következőképpen végeztem el a kalibrációt:

1. Exportáltam az ADCP adatmegjelenítő programból (Winriver II) a visszavert jelerősség (Echo Intensity, EI) értékeket a fix állóhajós mérésekhez.
2. Ezt követően az öt darab mérési függélyre előállítottam az időátlagolt mélység menti EI profilokat.
3. A hordalék mintavételi mélységeknél kigyűjtöttem az EI értékeket. Mivel a mintavétel csak függélyenként 5 pontban történt, és az adott pontoknál általában nem volt adat, így interpoláltam a két szomszédos pontból. Így előállt 25 értékpár az 5 függély 5 mélységében rögzített EI -ből és a mért hordaléktöménységekből (SSC).
4. Az EI adatokból a Baranya és Józsa (2009) cikkében ismertetett módszerrel RB (Relative Backscatter) értékeket állítottam elő. A cikkben bemutatott összefüggés felállítható volt az RB és az SSC értékek között, aminek alapján a pontokra illesztett függvény paraméterei szolgáltatották a kalibrációs paramétereket.
5. A kalibrációs paraméterek ismeretében az eredeti mért EI profilokból számíthatóvá váltak az ADCP alapú SSC értékek.
6. A kapott kalibrációs paraméterek segítségével a mozgóhajós mérés minden egyes mérési cellájára előállítottam a cellára jellemző töménységértéket, vagyis a fix hajós mérés alapján kalibráltam és kiterjesztettem azt a mozgóhajós mérésekre.

A fenti lépéseket mindkét mérésre elvégeztem, külön-külön kalibrálva a leíró összefüggést.

Mivel a mintázott töménységintervallum meglehetősen szűk tartományt fedett le mindkét mérés során, a kalibráció bizonyos mértékű bizonytalansággal terhelt. Ez gyakori problémát jelent hasonló számításoknál, ezért általánosságként elmondható, hogy egy adott mérésnél lehetőség szerint hordalékban szegényebb és gazdagabb részeket egyaránt fel kell mérni. Tehát esetünkben segíthetett volna az, ha további méréseket végzünk pl. a Lágymányosi-öbölben vagy a Ráckevei Dunán, ahol vélhetően jóval alacsonyabb töménység értékeket kaptunk volna, és a fenti összefüggés felállításánál egy sokkal szélesebb töménységtartományt fedünk le.

Az első mérési kampány során az ADCP jelerősségek alapján kapott töménységeloszlásokat mutatja be piros vonalakkal az öt rögzített pontú mérésre az alábbi ábra (21. ábra). Figyelembe kell venni, hogy az ADCP adatoknál kb. 5 percre vonatkozó időátlagolt jelerősség-profilokból indulunk ki, így azok függőleges menti eloszlása, hasonlóan egy időátlagolt sebességeloszláshoz, stabil eloszlást mutat szemben a kék pontokkal jelölt vízmintákból kapott értékekkel, amelyek felfoghatók pillanatnyi adatokként is.



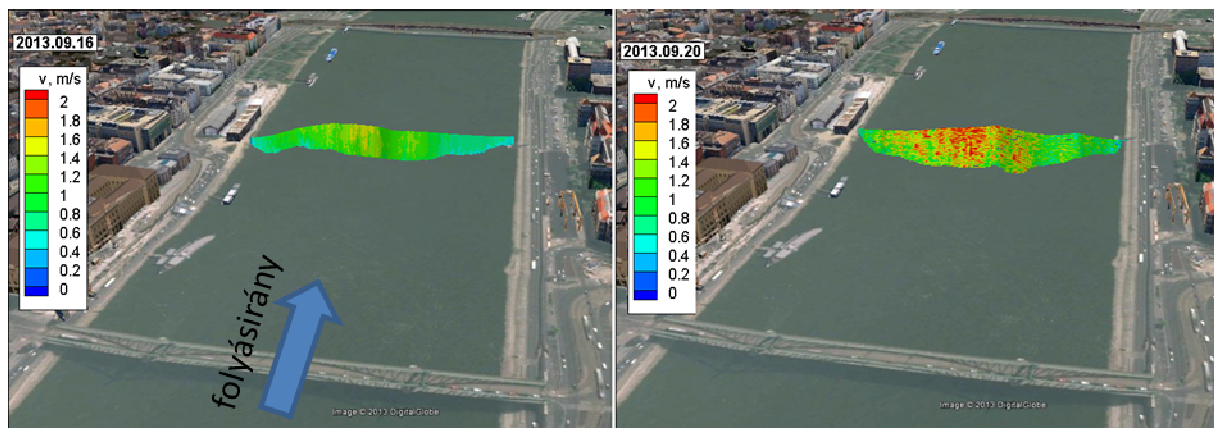
21. ábra A középvízi mérés során kapott pontbeli töménységadatok (kék pontok) és a rögzített hajós ADCP mérésből származtatott töménység profilok (piros vonal).

A rögzített pontú ADCP adatok ilyen jellegű feldolgozásával elértük azt, hogy a nyers, a műszer által rögzített jelerősség-adatokból hordaléktöménység-értékek becslését végezhetjük el. Következő lépésként a fent kapott összefüggést felhasználva a becslési eljárást a mozgóhajós méréseknél rögzített jelerősség adatokra is kiterjeszthetjük, ezzel egy nagyon részletes térbeli eloszlást kapva a lebegtetett hordaléktöménységre.

6.4 ADCP mérésből származtatott keresztaszvénýek menti hordalékadatok

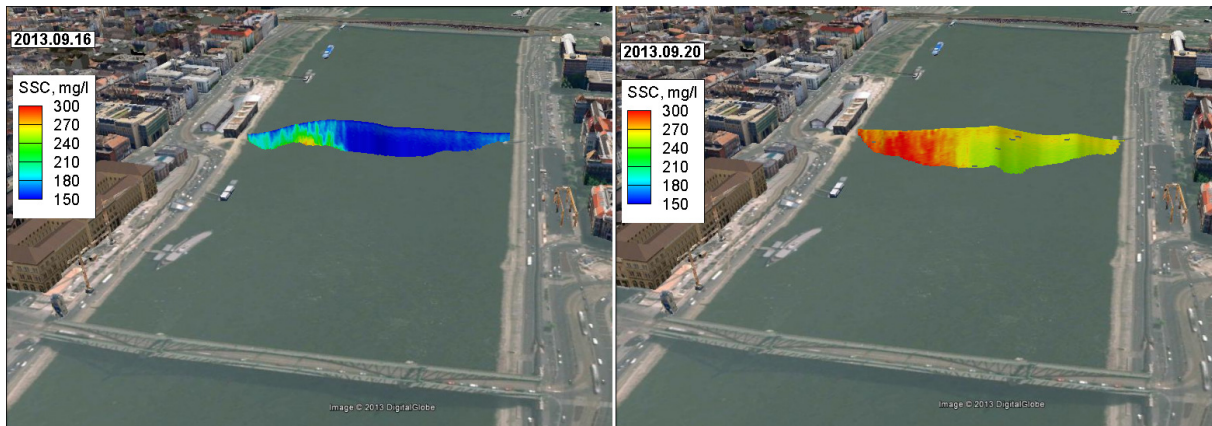
Felhasználva tehát az előbbiekben bemutatott összefüggést, a teljes keresztaszvénýre ki tudtuk terjeszteni az ADCP alapú hordaléktöménýség becslési eljárást. Az alábbi ábrák bal oldalán mindig a szeptember 16-i középvízi, jobb oldalon pedig a szeptember 20-i, árhullám tetözéséhez tartozó eloszlásokat láthatjuk (**22-24. ábra**).

Első lépésben a szelvény menti sebességeloszlásokat szemléltettem (**22. ábra**) a két ábrán ugyanazzal a skálával színezve. A vártak megfelelően nagyobb értékeket kaptunk az árhullám tetözésekor, és szemmel láthatóan a sodorvonal is jobban kirajzolódik ezen az ábrán. Felfedezhetjük, hogy kissé kitolódik a bal part felé, mely jelenség magában hordozhatja a folyó bal oldalán kapott kiemelkedő töménýségértékek magyarázatát. A sodorvonal balra tartása magyarázható a Duna folyási irányával, amely, mint az a **9. ábrán** is jól látható, jobbra kanyarodik, az érintett szakaszhoz közel.



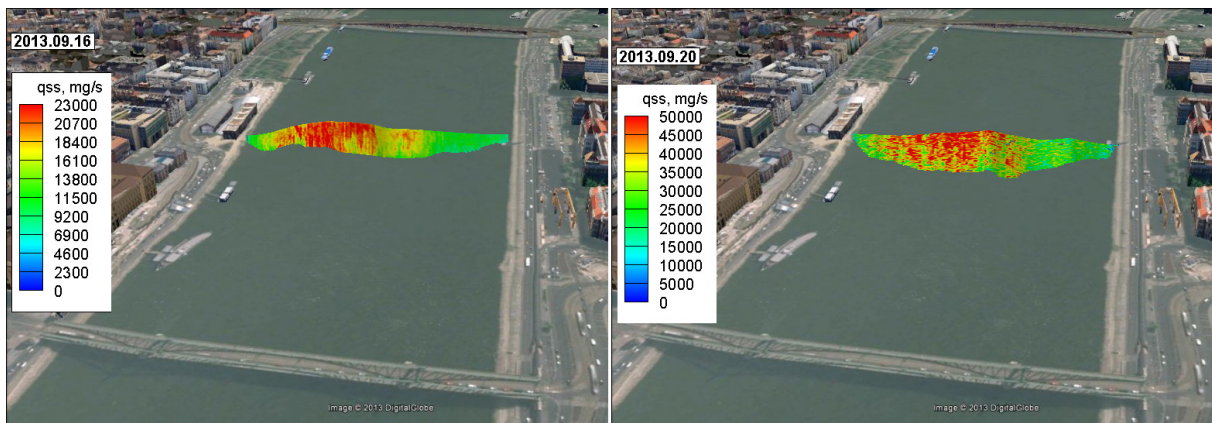
22. ábra A Duna ADCP-vel felmért szelvényében kialakuló sebességeloszlások 09.16-án és 09.20-án.

A következő ábra a hordaléktöménýségek szelvény menti eloszlását mutatja (**23. ábra**). Itt sem meglepő, különösen a vízminták adatait ismerve, hogy a tetözéskor kapott töménýség értékek magasabbak a középvízi állapoténál. Jól megmutatkozik, hogy a folyó bal partjához közelebb eső részen magasabb töménýségértékeket jelez az ADCP, és ezen belül is kiemelkedőek a fenékközeli értékek. Ez a jelenség egyfelől alátámasztja a vízminták elemzésekor kapott eredményeket, egyúttal sokkal részletesebb képet mutat róla.



23. ábra A Duna ADCP-vel felmért szelvényében kialakuló hordaléktöménység-eloszlások 09.16-án és 09.20-án.

A harmadik lépésben a mérési cellákhoz tartozó áramlási sebesség és az előzőekben bemutatott töménységadatokat szorzataként előállítottuk a cellákra jellemző fajlagos hordalékhozam szelvény menti eloszlását (24. ábra). Hasonló mintázatot kapunk, mint az előző két paraméternél, ami hangsúlyossá teszi a hordaléktranszport erős térbeliségét.



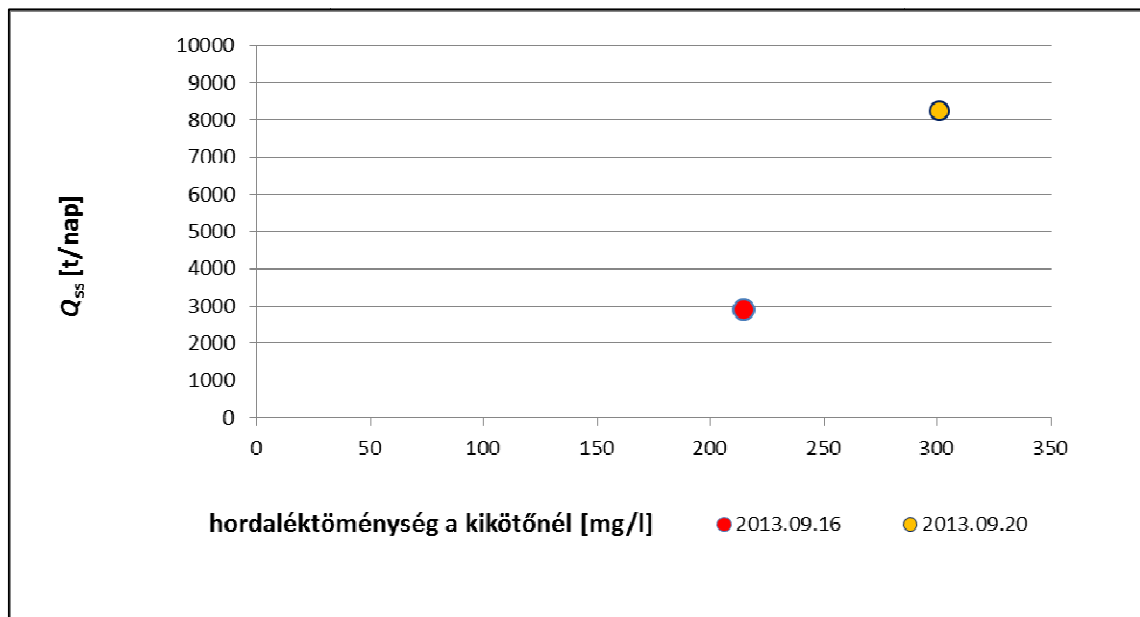
24. ábra A Duna vizsgált szelvényében kialakuló hordalékhozam-eloszlások 09.16-án és 09.20-án

6.5 Hordalékhozam becslése az előzőek alapján, kérdéses pontok, szűk keresztmetszetek áttekintése

Mivel hosszabb távon a kutatás célja az, hogy a part közelében telepített zavarosságmérő adataiból származtassuk a szelvényen átáramló hordalékhozamot, a dolgozat következő lépésében ennek a kapcsolatnak a felállítására tettem próbát úgy, hogy a két keresztshelvény menti felmérésből kiszámítottam a mérés idejére jellemző lebegtetett hordalékhozamot, majd a zavarosságmérő idősorából kigyűjtöttem az ADCP mérés idején rögzített értékeket.

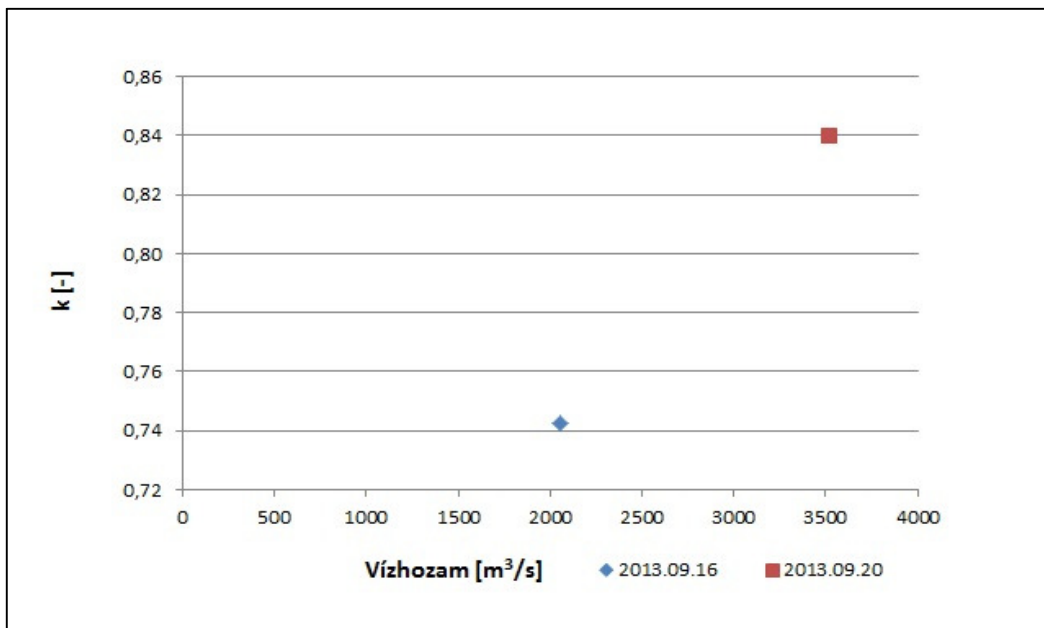
A lebegtetett hordalékhozam számítását az előző pontban bemutatott szelvény menti fajlagos hordalékhozam-eloszlásból (25. ábra) állítottam elő, a diszkrét értékek szelvény mentén való integrálásával. A mérés idejéhez tartozó hordaléktöménység-értéket pedig az OBS által mért zavarosság töménységre való átszámításával kaptam meg. Mivel a teljes keresztshelvényre kiterjedő

részletes adatgyűjtés mindössze két alkalommal történt, a kapcsolat leírását a kutatás jelenlegi állásánál két ponttal tudjuk leírni.



25. ábra Teljes szelvénybeli hordalékhozam és parti hordaléktöménység kapcsolata.

A két pont alapján nem lehet egyértelműen meghatározni a parti hordaléktöménység-értékek és az ezzel párhuzamosan jellemző hordalékhozamok közötti összefüggést, azonban vizsgálatunkkal ennek lehetséges módszerét szemléltetni tudjuk. További helyszíni mérésekkel, különös tekintettel a nagyvízi állapotokra, az összefüggést pontosítani tudjuk és annak különböző paramétereiktől való függése (pl. árhullám áradó vs. apadó ág) is kimutathatóvá válik. Sőt, más tanulmányban kimutatták (Haimann *et al.*, 2013), hogy célszerű felállítani egy kapcsolatot a kereszt-szelvény menti átlagtöménység és a part közeli töménység között, hogy a hordalékhozam becslést még pontosabban lehessen végrehajtani. Ha a két paraméter között egy arányossági tényezőt definiálunk, akkor annak a vízhozamtól való függése is kimutatható, értelemszerűen ehhez is további mérések szükségesek. Az általunk elvégzett két mérés esetén a part menti töménység rendre magasabbra adódott, mint a szelvényátlagolt érték, az arányossági tényező a középvízi mérésnél 0,74-re, az árhullám tetőzésénél pedig 0,84-re adódott (26. ábra). Ez az arányosság tehát függ a vízhozamtól. Az arányossági tényezőre vonatkozó összefüggés felállításával végeredményben elérhető lesz a zavarosság idősorok és a vízhozam (vagy vízállás) ismeretében a teljes hordalékhozam becslése.



26. ábra A szelvényátlagolt és a part menti hordaléktöménység közötti arányossági tényező és a vízhozam összefüggése.

7 Összefoglalás

Dolgozatomban egy korszerű mérési alapokon nyugvó lebegtetett hordalékhozam mérési módszer kidolgozását kezdtem meg. Első lépésben ismertettem a hordalékmozgással kapcsolatos legfontosabb fogalmakat, kitértem a különböző mérési eljárásokra, majd néhány hazai és külföldi tanulmányon keresztül bemutattam a legkorszerűbb lebegtetett hordalékbecslési eljárásokat.

A dolgozat fő részében megindokoltam, hogy miért döntöttünk az eljárás kidolgozására kiválasztott mérési helyszín (a BME előtti hajókikötő) mellett, majd ismertettem a mérési módszereket és azok menetét. Ennek legfontosabb elemei a következők voltak:

1. Optikai zavarosságmérő (OBS) telepítése a kikötőre és folyamatos, nagy időfelbontású (10 perc) adatgyűjtés.
2. Napi 1-2 vízminta gyűjtése az OBS mérőfejénél, hogy a műszer által mért zavarosság adatokat lebegtetett hordaléktöménység-adatokká számíthassuk át.
3. Vízminták laboratóriumi feldolgozása és értékelése, emellett összehasonlító laborvizsgálat a mérések hitelesítése miatt.
4. Zavarosság-lebegtetett hordaléktöménység kapcsolat felállítása.
5. Vízállás-part közeli lebegtetett hordaléktöménység kapcsolat felállítása.
6. Két alkalommal, eltérő vízjárási állapotokban (egy középvízi és egy közepes méretű árhullám tetőzésénél) végrehajtott szelvény menti felmérés, 5 függélyben, függélyenként 5 mélységből vett vízminta gyűjtésével, rögzített pontú ADCP mérésekkel és mozgóhajós ADCP mérésekkel.
7. A függélyekben vett vízminták felhasználásával a rögzített pontú ADCP mérések visszavert hangjelerősség adataiból függélyek menti hordaléktöménység-eloszlás becslése, majd a kapott összefüggés felhasználásával a mozgóhajós mérésekből kereszt-szelvény menti hordaléktöménység-eloszlások előállítása.
8. Part közeli hordaléktöménység és a teljes szelvényen átáramló lebegtetett hordalékhozam közötti kapcsolat felállítása.

8 Következtetések

A vizsgálatok során kapott eredmények több szempontból is bizakodásra adnak okot. A zavarosság idősor realiztikus képet festett az árhullám során jellemző lebegtetett hordaléktöménység időbeli alakulásáról. Az optikai zavarosságmérő kalibrációja megbízhatónak tűnik, de hangsúlyoznunk kell a víz zavarosságának és a hordaléktöménység kapcsolatának mérési állapottól való függését. Ez a kapcsolat nem írható le egyetlen, reprezentatív összefüggéssel, mert a lebegtetett hordaléktöménység mellett más paraméterek is befolyásolják azt (hordalékszemcse mérete, szerves anyag tartalom, buborékok, stb.). Fontosnak tartjuk tehát a lehető leggyakoribb kalibrációt, ami a dolgozatban bemutatottak alapján mindössze néhány vízmintavételt és elemzést jelent.

A hordaléktöménység-adatok keresztshelvényre történő kiterjesztése az ADCP műszer használatával már számos kutatási és valós mérnöki feladatnál alkalmazásra került, az eljárás tehát egyre megbízhatóbb alapokon áll. A dolgozat készítése során mi elhanyagoltuk a visszavert jelerősség szemcsemérettől való függését, de a későbbiekben ezt szükségesnek tartjuk vizsgálat alá venni. Aktuális kutatások folynak a több frekvenciás ADCP alapú hordaléktöménység-becslés témájában, amely ezt a jelenséget is figyelembe tudja venni és ketté tudja választani a jelerősség töménységtől és szemcsemérettől való függését.

A dolgozatban bemutatott part menti hordaléktöménység és szelvényen átáramló hordalékhozam kapcsolatát leíró két pont értelemszerűen nem elégséges a kapcsolat leírására, különösen az előzőekben leírtak figyelembevételével. Tervezzük emiatt a kutatás folytatását és további célirányos mérések és mintavételek végrehajtását, amik az eljárás megbízhatóbbá tételéhez járulnak hozzá. Néhány gyakorlati kérdésre is megoldást kell még találni, mint például a műszer állandósított elhelyezése, az uszadékok távoltartása, a csónakról történő mintavételek korszerűsítése, stb.

Hisszük azt, hogy a dolgozatban bemutatott hordalékmérési módszert további mérésekkel pontosítva és finomítva egy olyan eljárást dolgozunk ki, ami a hazai vízügyi ágazat hordalékmonitoring rendszerében minőségi előrelépést eredményezhet, amennyiben a fejlesztésre hajlandóság mutatkozik. A szükséges mérési eszközök (elsősorban az OBS) költsége relatíve alacsony, töredéke például a vízügy által használt sebességmérő műszerek árának. Egy jövőbeli, az itt bemutatott módszert alkalmazó monitoring hálózat kiépítésénél első lépésben a korábban rendszeres hordalékmérésre kijelölt szelvényeket javasolnánk, mert ezeken a helyeken már rendelkezésre állnak „történelmi” hordalékadatok, amelyek a statisztikák (pl. hordalékhozam-vízhozam összefüggés) felállításánál fontos szerepet kaphatnak. Bízunk abban, hogy a jelen munkával elindult kutatásra a szakma nyitott lesz és a Vízügyi Igazgatóságokkal karöltve tudjuk a jövőben a hazai folyóink hordalékviszonyainak feltárását elvégezni.

Köszönetnyilvánítás

Köszönetemet szeretném kifejezni elsősorban konzulenseim felé. Nagyon hálás vagyok Kiss Melinda témavezetéséért, feladataim koordinálásáért, a mintavételek során állandó segítségéért, továbbá a labori mintaelemzésekkel kapcsolatos további segítségéért. Szintén hálával tartozom Dr. Baranya Sándor felé, aki elindította TDK dolgozatomat, és aki végig irányvonalat mutatott vizsgálataink során külföldön való tartózkodása alatt is. Nagyon köszönöm továbbá Török Gergely Tihamérnek a behajózások során végzett ADCP méréseknél, továbbá a mintavételeknél való segítségéért, hasznos ötleteiért.

Köszönöm szépen Musa Ildikónak, hogy vizsgálataim során igénybe vehettem a Vízi Közmű és Környezetmérnöki Tanszék akkreditált laboratóriumát. Köszönöm a mintaelemzések során nyújtott segítségét, tanácsait.

Köszönöm szépen a Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszéknek, hogy anyagi támogatásukkal lehetővé tették az FTV Zrt.-től rendelt vízmintaelemzéseket, továbbá, hogy a mérésekhez szükséges eszközöket rendelkezésünkre bocsátották.

Köszönöm szépen Pozsgai István segítségét is, aki a műszeres méréseinknél mindig segítségünkre volt, továbbá hasznos javaslataival sokszor előlendítette mintavételeinket. Továbbá köszönettel tartozom Tóth Károlynak, aki szintén sokszor segítségünkre volt, illetve Rehák Andrásnak is.

Köszönöm szépen a segítséget Vízépítő Körös barátainak, akik egy-egy alkalommal segítettek az árhullám idején való napi kétszeri vízmintavételeknél.

Köszönettel tartozom továbbá az Aqua Construct Zrt. felé, ahol az esetleges TDK mérések miatti késéseimet tolerálták.

Végül hálásan köszönöm Frenyó Péter támogatását, segítségét, aki dolgozatom írásának technikai hátterét biztosította.

Hivatkozások

1. Baranya S., Józsa J. (2010): ADCP alkalmazása lebegtetett hordalék koncentráció becslésére. *Hidrológiai Közlöny* 3: pp. 17-22.
2. Bogárdi J., (1971): Vízfolyások hordalékszállítás. Akadémia Kiadó, Budapest
3. Gippel, C. J. (1995): Potential of turbidity monitoring for measuring the transport of suspended solids in streams. *Hydrol. Process.*, 9: 83–97. doi: 10.1002/hyp.3360090108
4. Guerrero, M., Szupiany, R. N., Amsler, M. (2011): Comparison of acoustic backscattering techniques for suspended sediments investigation. *Flow Measurement and Instrumentation*. vol. 22, no. 5, pp. 392-401, 2011.
5. Haimann, M., Leidermann, M., Lalk, P., Habersack, H. (2013): Development and evaluation of an integrative suspended sediment transport monitoring and analysis concept. *International Journal of Sediment Research*. In Press.
6. Józsa J., Baranya S. (2010): Hidromorfológia MSc. HEFOP jegyzet. BME. Budapest
7. Németh D. (2012): Folyami hordalékmérési eljárások vizsgálata. Tudományos Diákköri Konferencia, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Budapest
8. Urick, R.J. (1948): The Absorption of Sound in Suspensions of Irregular Particles. *Journal of the Acoustical Society of America* 20: (3) 283.
9. Urick, R.J. (1983): Principles of Underwater Sound. McGraw Hill, New York, p. 384.
10. Wall, G. R., Nystrom, E. A., Litten, S (2006): Use of an ADCP to compute suspended-sediment discharge in the tidal Hudson River, New York. US Geological Survey Scientific Investigations Report., Tech rep., US Geological Survey.