



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszék

Tudományos Diákköri Konferencia 2012

FOLYAMI HORDALÉKMÉRÉSI ELJÁRÁSOK VIZSGÁLATA



Készítette: **Németh Dániel**, infrastruktúra-építőmérnök BSc. hallgató

Konzulens: **Dr. Baranya Sándor**, tudományos munkatárs, BME Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszék

Budapest, 2012. november

Köszönetnyilvánítás

Köszönetemet fejezem ki

Dr. Baranya Sándornak, aki konzulensemként végig irányította és segítette munkámat.

Tóth Károly, technikusnak, aki nagyban hozzájárult a mérések elvégzéséhez,

Pozsgai István, technikusnak, aki szintén nagyban hozzájárult a mérések elvégzéséhez és segítségemre volt a mérés során felmerülő egyéb feladatok megoldásában, továbbá

Dr. Józsa János tanszékvezető egyetemi tanárnak, aki biztosította a mérés létrejöttének körülményeit, valamint a

Dél-dunántúli Vízügyi Igazgatóság munkatársainak, akik segítségünkre voltak a mérések során és szállást biztosítottak azok idejére.

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés	3
2. A mérési módszerek ismertetése	5
2.1. Harangos mintavevő.....	5
2.2. Szivattyús lebegtetett hordalékmérés.....	5
2.3. Helley-Smith féle görgetett hordalékmérés	6
2.4. Akusztikus Doppler elven működő (ADCP) mérés.....	7
2.5. Lézeres elven működő lebegtetett hordalékmérő (LISST)	8
2.5.1. <i>A műszer működésének ismertetése</i>	8
2.5.2. <i>A műszer használata</i>	9
3. A vizsgálati helyszínek ismertetése	12
4. A mérések elemzése	13
4.1. A lézeres hordalékmérő eredményeinek más módszerekkel történő összevetése	13
4.1.1. <i>A Lisst és a szivattyús hordalékmérés koncentrációinak elemzése</i>	13
4.1.2. <i>Elméleti töménységprofil számítása és összehasonlítása a mérési adatokkal</i>	18
4.1.3. <i>A hagyományos és lézeres elvű módszerrel meghatározott szemeloszlási görbék összehasonlító elemzése</i>	22
4.2. A Lisst mérési eredményeinek elemzése	25
4.2.1. <i>A szemeloszlási görbe és sűrűségfüggvény vízhozamtól függő változása</i>	25
4.2.2. <i>A szemcseméret sűrűségfüggvényének keresztmetszeti menti változása</i>	28
4.2.3. <i>A sűrűségfüggvény és a szemeloszlási görbe változása a mélység függvényében</i>	30
5. ADCP mérésből származtatott töménység adatok	36
6. Összefoglaló értékelés	41
Irodalomjegyzék	43

1. Bevezetés

A folyók rendkívül fontos részét képezik életünknek. Viszonyunk változó, hol baráti, hol pedig küzdünk egymással, ám végső soron be kell látnunk, hogy ez a kapcsolat mindkét fél általi kompromisszummal tartható kordában. A mi feladatunk, hogy megismerjük a természet e formáját és a lehetséges határok között úgy alakítsuk, hogy a lehető legjobban szolgálja céljainkat. Számos tulajdonsága közül, most a folyók hordalék vándorlásával kívánok foglalkozni. Az emberek hajlamosak egy állandó, változatlan természeti elemként tekinteni a folyókra, holott folyamatos változáson mennek keresztül. Ezeknek zöme a külső szemlélő számára láthatatlan, ilyen például a hordalék vízben való mozgása is, mely a víz, romboló és építő munkája közti transzportfolyamatot takarja. Hatalmas erejét jól példázzák a mély folyóvölgyek (1. kép) és az innen lebontott, majd felaprózott anyagból álló mélyen fekvő területek, mint a mi Alföldünk is.



1. kép: Víz által mélyített folyóvölgy

Ilyen jelentős felszínalakításhoz viszont rendkívül sok időre van szükség. Jelen dolgozat a rövidtávon lejátszódó hordalékmozgások vizsgálatát taglalja.

A folyó által szállított hordaléknak két típusa van, görgetett illetve lebegtetett. A görgetett hordalék a mederrel párhuzamosan, az áramlási viszonyoktól függően gördülve, csúszva, vagy ugrálva, de mindig a mederfenék közvetlen közelében haladó szilárd anyag. A lebegtetett esetében a szemcse nagysága akkora, hogy a turbulens áramlás legyőzi a

hordalékra ható nehézségi erőt, így a vízzel történő együttmozgásra kényszeríti azt. Ez a hordaléktípus a teljes vízoszlopban átkeveredve szállítódik, bár a függőleges mentén a fizikai tulajdonságai változhatnak, ahogy azt a dolgozatban a későbbiekben be is mutatom. A hordalék vándorlási folyamatok megismerése azért fontos, hogy tisztában lehessünk folyóink természetes morfordinamikai (mederfejlődési) viszonyaival, valamint mérnöki szempontból lényeges tudnunk, hogy a különböző emberi beavatkozások (pl. duzzasztók, folyószabályozási művek, hidak, hajózási célú beavatkozások stb.) milyen hatást gyakorolnak a folyómederre. A vizsgálat tárgyát képező Dráva folyón ugyan nem jelentős a hajózás, ám több vízlépcső is található a felsőbb szakaszokon, melyek hatásaival tisztában kell lennünk.

2012 nyara során három mérési kampányt hajtottak végre, melyek a Dráva hordalékmozgásának vizsgálatát tűzték ki célul. Az adatgyűjtés összesen négy szelvényre terjedt ki a folyó mentén, többek között Barcs és Drávaszabolcs települések mellett. Dolgozatomban csak e két mérési szelvény adatainak elemzésével foglalkozom, két mérési kampány eredményeit összefoglalva. Mivel személyesen csak a második méréssorozatban tudtam részt venni – ám a két mérés menetrendje és módszerei közt nem volt eltérés – így engedjék meg, hogy a továbbiakban személyes tapasztalatként említsem a történeteket. A munkát a Dél-dunántúli Vízügyi Igazgatóság, és a BME Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszék munkatársainak segítségével végeztük. A két intézmény mérőhajói egymáshoz voltak rögzítve a mérés során, hogy a kapott adatok később összehasonlíthatóak legyenek a megegyező helyű és egyidejű vizsgálatoknak köszönhetően. Az említett két mérési keresztzelvényen belül 5 függély lett kiválasztva a részletes hordalék mintavételekre. A vízügy dolgozói szivattyús lebegtetett hordalék mintavételt, görgetett hordalékmérést (Károlyi és Helley-Smith-féle mintavevőkkel, lásd később), valamint akusztikus Doppler elvű sebességméréseket (ADCP) és harangos mederanyag mintavételt végeztek. Mi, a BME mérőcsapata, egy lézeres elven működő LISST nevű műszert használtunk, mellyel a vizsgálatokra kijelölt függélyekben 9-10 különböző mélységben végeztünk lebegtetett hordalékmérést.

Mivel hazai szinten ez az egyik legelső alkalmazása a lézeres elvű lebegtetett hordalékmérésnek, több cél is kitűzésre került a dolgozatban. Egyik célom tapasztalatszerzés a LISST műszerrel kapcsolatban, valamint hosszú távú alkalmazásának elősegítése helyes működésének igazolásával, továbbá néhány elméleti elgondolás megerősítése. A másik, hogy az ADCP mérések adatainak egy újszerű feldolgozási módszerével bemutassam az eszköz

lebegtetett hordalék töménység becslésre való alkalmazhatóságát. A korszerű hordalékmérési módszerek fejlesztése, tesztelése és igazolása mind a fent megfogalmazott célokat szolgálja, de fontosnak tartom megemlíteni, hogy hasonlóan lényeges feladat az egyre részletesebb számításokat végrehajtani képes numerikus morfodinamikai modellek terepi adatokkal való ellátása, azok bearányosítása és eredményei helyességének igazolása.

2. A mérési módszerek ismertetése

2.1. Harangos mintavevő

Ezzel az egyszerű eszközzel a mederből vehetünk mintát. Tulajdonképpen egy elnyújtott vödörről van szó (2. kép), melyet a meder alján végighúzva telemerünk. Fontos megjegyezni, hogy csak zavart minta vételére alkalmas, így a rétegzettséget nem tudjuk vizsgálni, viszont a szemösszetételről elég pontos információkat kaphatunk.



2. kép: Harangos mintavevő

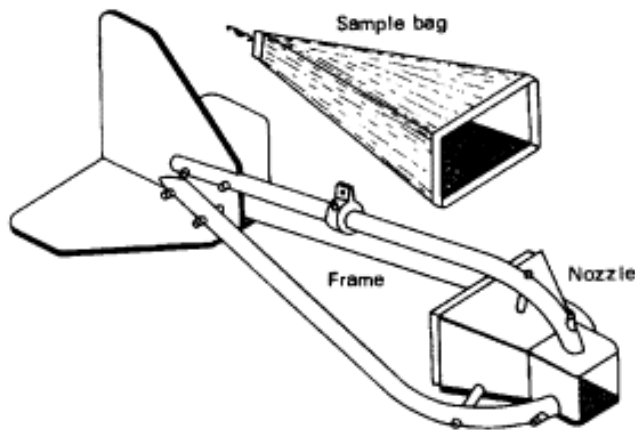
2.2. Szivattyús lebegtetett hordalékmérés

A műszer három részből áll. Egy, a mérőcsónakon elhelyezett szivattyúból, a lehető legkisebb közegellenállás miatt egy kis átmérőjű mintavételi tömlőből, valamint egy víz alatti egységből (3. kép), mely áramlási sebességet és mélységet mér, továbbá súlyként szolgál. Működésének elve, hogy a folyószelvény vizsgálati függőleiben meghatározott mélységekből mintavétel történik. A minták megközelítőleg 10 literesek, relatíve nagy térfogatúak, a lehető legkisebb

pontatlanság végett. A szívócsőben áramló víz sebességét a folyóéhoz hasonlóan kell megválasztani. A módszer hátránya, hogy adatokat (töménység, szemösszetétel) csak később, a nagyszámú minta laboratóriumi kiértékelése után kaphatunk. Az eredményeket viszont nem terheli a közvetett mérési eljárások bizonytalansága.

2.3. Helley-Smith féle görgetett hordalékmérés

Görgetett hordalék mérésére még nem rendelkezünk teljesen megbízható eljárással, mivel ezt a fajta hordaléktranszport jelenséget térben és időben nagy eltérések jellemzik, valamint maga a



1. ábra: Helley-Smith féle hordalékmérő felépítése

Eközben a hordalék a bevezetőnyíláson át a zsákba áramlik. A szivattyús mérésnél említett előny és hátrány ebben az esetben is igaz. A mi mérésünknel az alapkoncepció ki volt egészítve egy kamerával, mely folyamatosan mutatta a műszer nyílását, így kiküszöbölhető volt az esetleges eltömődések okozta mérési pontatlanság. Ezt az eljárást először Rákóczi László alkalmazta sikerrel a görgetett hordalék mérés pontosítása céljából. A görgetett hordalék térfogatárama (q_b [m^3/sm]) a következő képlettel határozható meg:

$$q_b = \frac{G}{b \cdot T \cdot \rho_s}$$

ahol, G a görgetett hordalékminta száraz tömege [kg], b a mintavevő nyílásának szélessége [m], T a mintavételi idő hossza [s], ρ_s pedig a hordalék sűrűsége [kg/m^3].



3. kép: A szivattyús hordalékmérő víz alatti egysége

vizsgálat eszköze is befolyásolhatja az eredményeket a körülötte lévő áramlási viszonyokra gyakorolt hatásával. Alkalmazásához rendkívüli erőforrásokra van szükség nagy helyigénye és súlya miatt. Egy fémvázból és egy cserélhető mintatároló zsákból áll (1. ábra), melynek típusa a vizsgált folyó hordalékméreteinek függvényében választható meg. Mérésnél daruval engedik le a mederfenékre és meghatározott ideig lent hagyják.

2.4. Akusztikus Doppler elven működő (ADCP) mérés

A műszer (4. kép) a Doppler-eltolódás elvét használja, miszerint a jeladó mozgása a vevőhöz képest a jel megváltozását eredményezi, ami a mi esetünkben a következőt jelenti. A jeladó, vagyis az ADCP meghatározott frekvenciájú hangot bocsájt ki, ami vízben haladva ütközik a közegével együtt mozgó részecskékkel, majd ezekről szerteágazóan visszaverődve a műszerhez is visszaér, ám frekvenciája megváltozik a hordalék részecske (tehát a víz) sebességének függvényében. Ismeretes a hang vízben történő terjedésének sebessége (~1500 m/s), melynek segítségével az adott részecske helyzetét is meg lehet határozni. A mérés során nagy idő (~ 2 Hz), és térbeli (~ 10 cm függőleges értelmű) felbontású adatokat kapunk a pillanatnyi sebességviszonyokról. Részletesebb leírást Baranya és Sokoray (2004) közölnek a műszerről.

Alaprendeltetésén, vagyis a sebesség, vízhozam és mederalak vizsgálatán túl, további funkcióval is rendelkezik. Ahogy azt Baranya és Józsa (2009) cikke ismerteti, az eszköz alkalmazható lehet lebegtetett hordalék mérésére a vízben utazó hordalékszemszéről



4. kép: 4 fejes ADCP

visszavert jel erősségének elemzésével. Egyelőre bizonytalanak tekinthető a módszer, mivel a visszhang erősségét számos tényező is befolyásolja a hordalék-koncentráción kívül. Ilyenek a szemcse alakja, mérete, víz hőmérséklet, sótartalom és a műszer frekvenciája is. Ezek hatásának figyelmen kívül hagyására ADCP méréssel párhuzamos hordalékmérés szükséges, hogy a két eljárás között fel lehessen állítani egy kapcsolatot, vagy másképp fogalmazva, hogy kalibrálni tudjuk a becslési eljárást.

2.5. Lézeres elven működő lebegtetett hordalékmérő (LISST)

2.5.1. A műszer működésének ismertetése

A műszer neve Laser In-Situ Scattering and Transmissometry kifejezésből adódik (Agrawal és Pottsmith, 2000), ami tulajdonképpen a műszer működési elvét fejezi ki tömören, vagyis a lézer jel szóródásának és átvitelének helyszíni mérését, amiből a hordalékjellemzőkre következtethetünk.

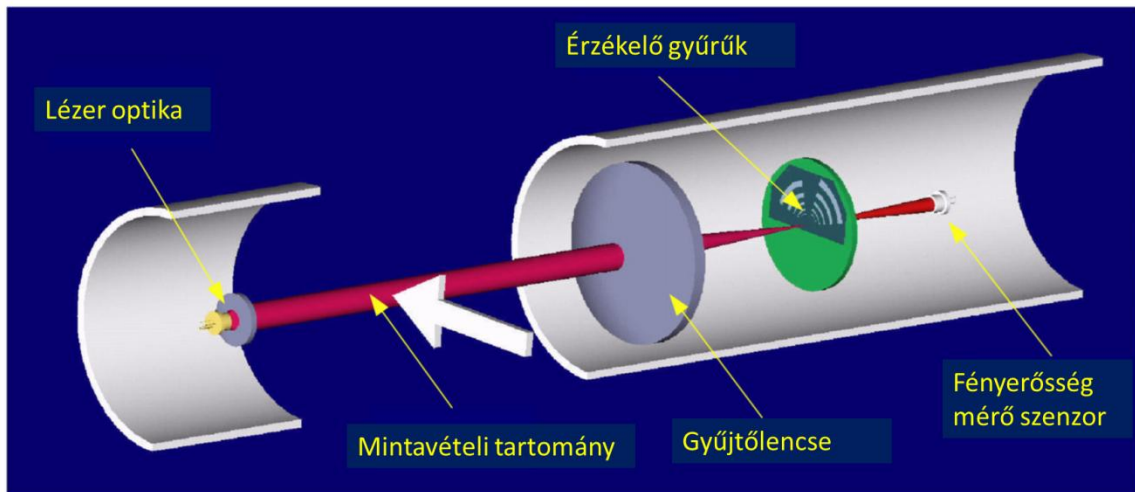


5. kép: A lézeres elven működő LISST-100 műszer.

A LISST-100 eszköz (5. kép) tehát a lézerfény elhajlásából következtet a hordalékminta szemeloszlására. A hordalékszemcsék 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.

A műszer a következő elemekből épül fel (2. ábra):

- a lézerfényt létrehozó optika
- prizmák a lézerfény irányításához
- érzékelő gyűrűk
- jelerősítők és jelfeldolgozók
- adattároló egység
- elemek



2. ábra: A LISST-100 műszer elemei és a lézer útja a mérés során.

A mérésekhez a LISST-100 eszköz B típusát alkalmaztuk, melynek segítségével 32 szemcseméret tartományba sorolhatjuk a mintázott hordalékot 1,25 és 250 μm között. A mérés során az egyes szemcseméret tartományokra a töménységet, térfogatarányban szolgáltatja az eljárás.

2.5.2. A műszer használata

Mivel a mintavételi zóna közvetlenül a műszerfejnél helyezkedik el, meg kellett oldani a mérési pontokba való leeresztés lehetőségét. A 6. képen látható módon, bilincsek segítségével egy kötelet rögzítettünk a műszer falához, amit egy csigán keresztül egy csörlőhöz csatlakoztattunk. A műszerhez egy 25 kg-os súlyt is rögzítettünk, elkerülendő azt, hogy az áramlás okozta műszer felületén ébredő erő elsodorja a mérőcsőnek alól a műszert. Bár egyelőre nem egyértelmű, hogy a műszer pozíciója mennyire befolyásolja az eredményeket és, hogy melyik az ideális elhelyezés, a súlyon rögzített timony segítségével áramlási irányba állítottuk az eszközt. A csörlő használatával megoldható volt az előre kijelölt mélységekbe való leeresztés és rögzítés.



6. kép: A mérőhajó a felszerelt műszerrel

A műszert egy számítógéphez kapcsolva tudjuk az adatokat realtime üzemmódban gyűjteni, vagyis a mért jellemzők azonnal láthatóvá válnak a számítógép kijelzőjén (7. kép). A hordalékmérő eszköz és a számítógép áramellátását tápkábeleken keresztül külső akkumulátorokról oldottuk meg. Két 12V-os akkumulátor alkalmazásával több tíz óra üzemidő érhető el, vagyis az áramellátás biztosítása nem jelent akadályt a mérések során.



7. kép: A mérőműszerhez kapcsolt adatgyűjtő számítógép

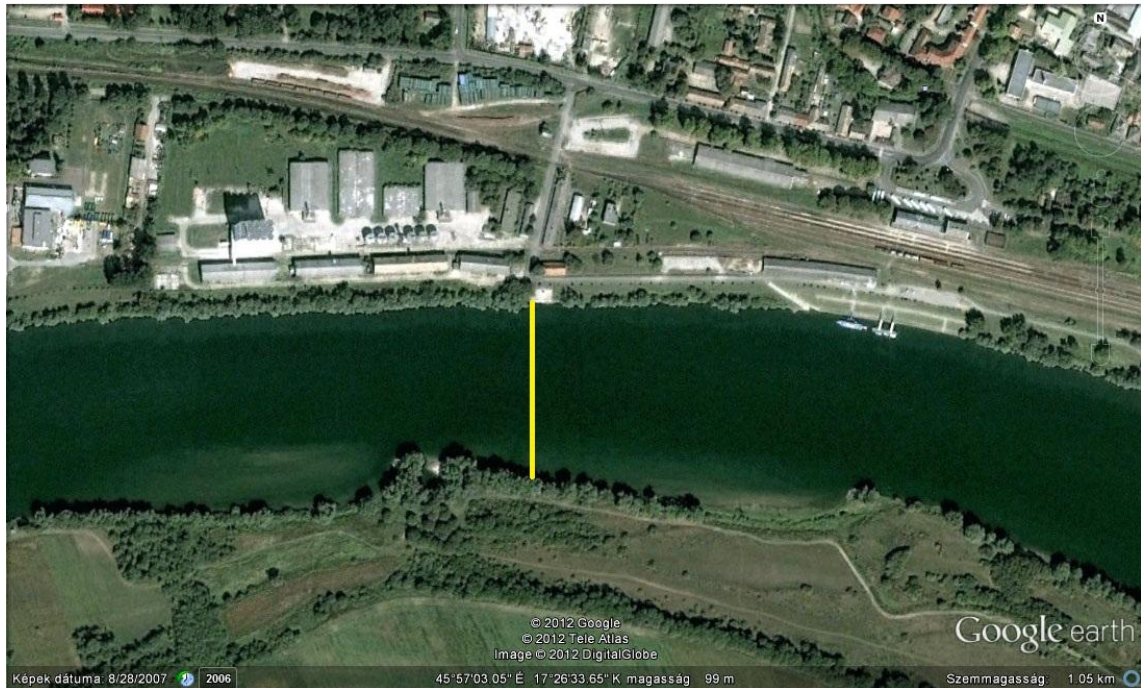
A műszer mérési frekvenciája 1,5 Hz, vagyis két másodpercenként három mintavétel történik. A mérés során szerzett tapasztalataink szerint egy mérési pontra kb. egy perc hosszú mintázást érdemes végrehajtani, hogy egy stabil, reprezentatívnek tekinthető adatot kapjunk a hordalék töménységére. Ennek oka, hogy az adatok bizonyos mértékű szórást mutatnak mind a műszer mérési eljárásából, mind a hordalékmozgás jellegéből adódóan. A mért, pillanatnyi adatok időbeli átlagolásával azonban ez a szórás kiszűrhető.



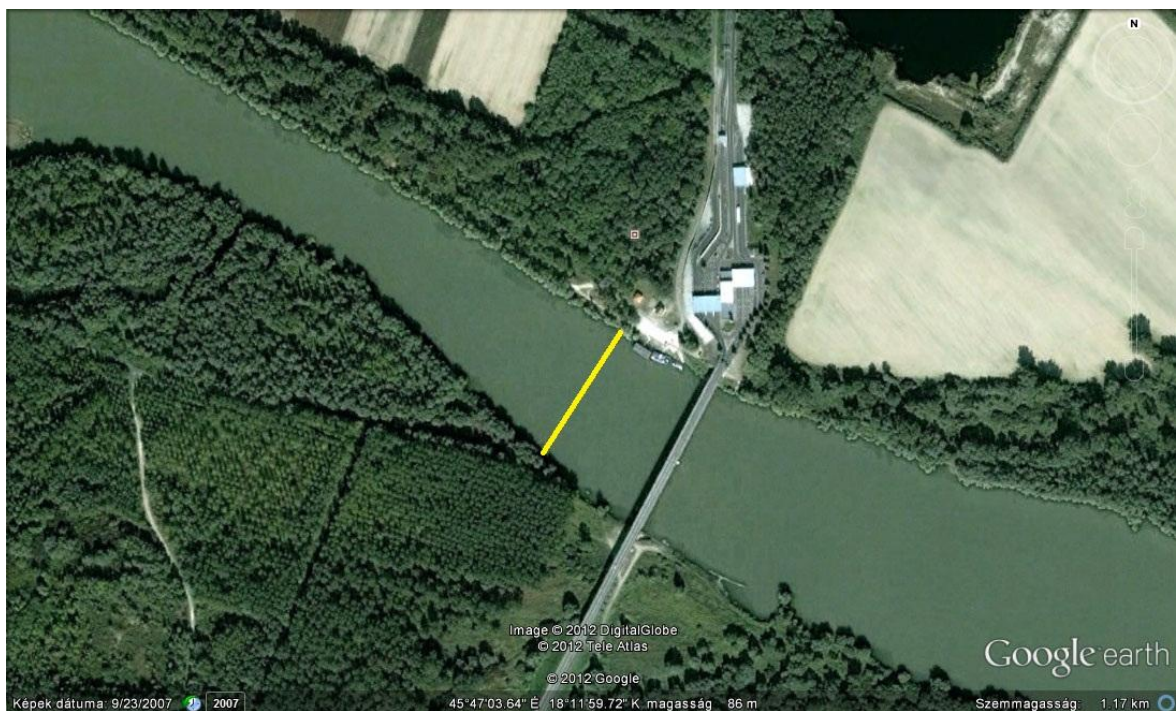
8. kép: A Lisst működés közben

3. A vizsgálati helyszínek ismertetése

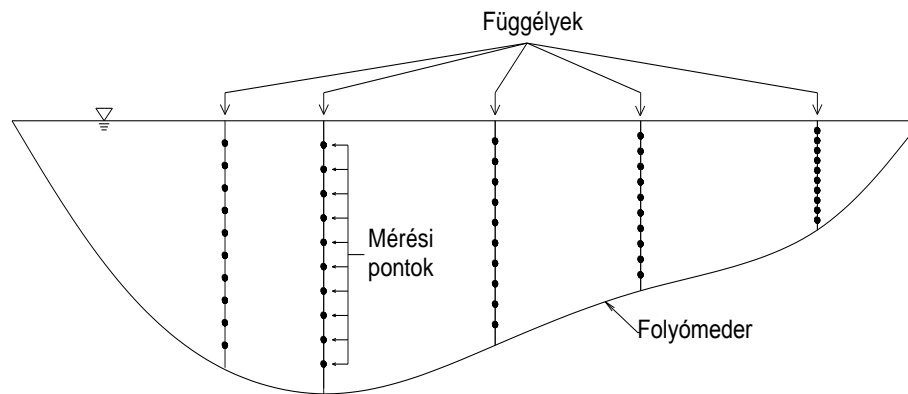
Méréseinket Barcs mellett kezdtük (3. ábra). A vizsgált szelvényt a 8. ábra mutatja. A második helyszín Drávaszabolcs közelében volt (4. ábra). Öt függély, és mindegyikben további tíz mélység került kijelölésre vizsgálat céljából, így 1-1 mérési szelvényt 50 pontjával tudunk jellemezni (5. ábra).



3. ábra: Mérési szelvény Barcsnál



4. ábra: Mérési szelvény Drávaszabolcsnál



5. ábra: Mérési pontok vázlata a Barcsi szelvénynél

4. A mérések elemzése

4.1. A lézeres hordalékmérő eredményeinek más módszerekkel történő összevetése

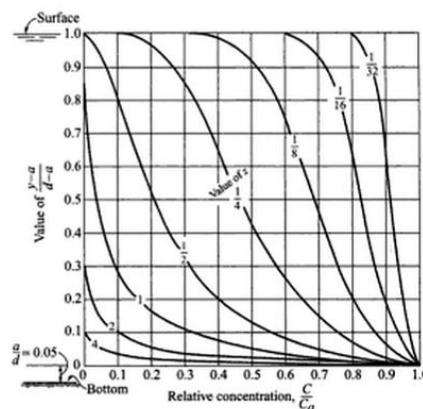
4.1.1. A Lisst és a szivattyús hordalékmérés koncentrációinak elemzése

Ahogy azt már korábban is említettem, a Lisst-el kapcsolatban nem rendelkezünk semmilyen tapasztalattal, így más mérési módszerekkel összehasonlítva tudunk csak következtetéseket levonni. Ebben az esetben a szivattyús hordalékmérés lesz a kontrollvizsgálat.

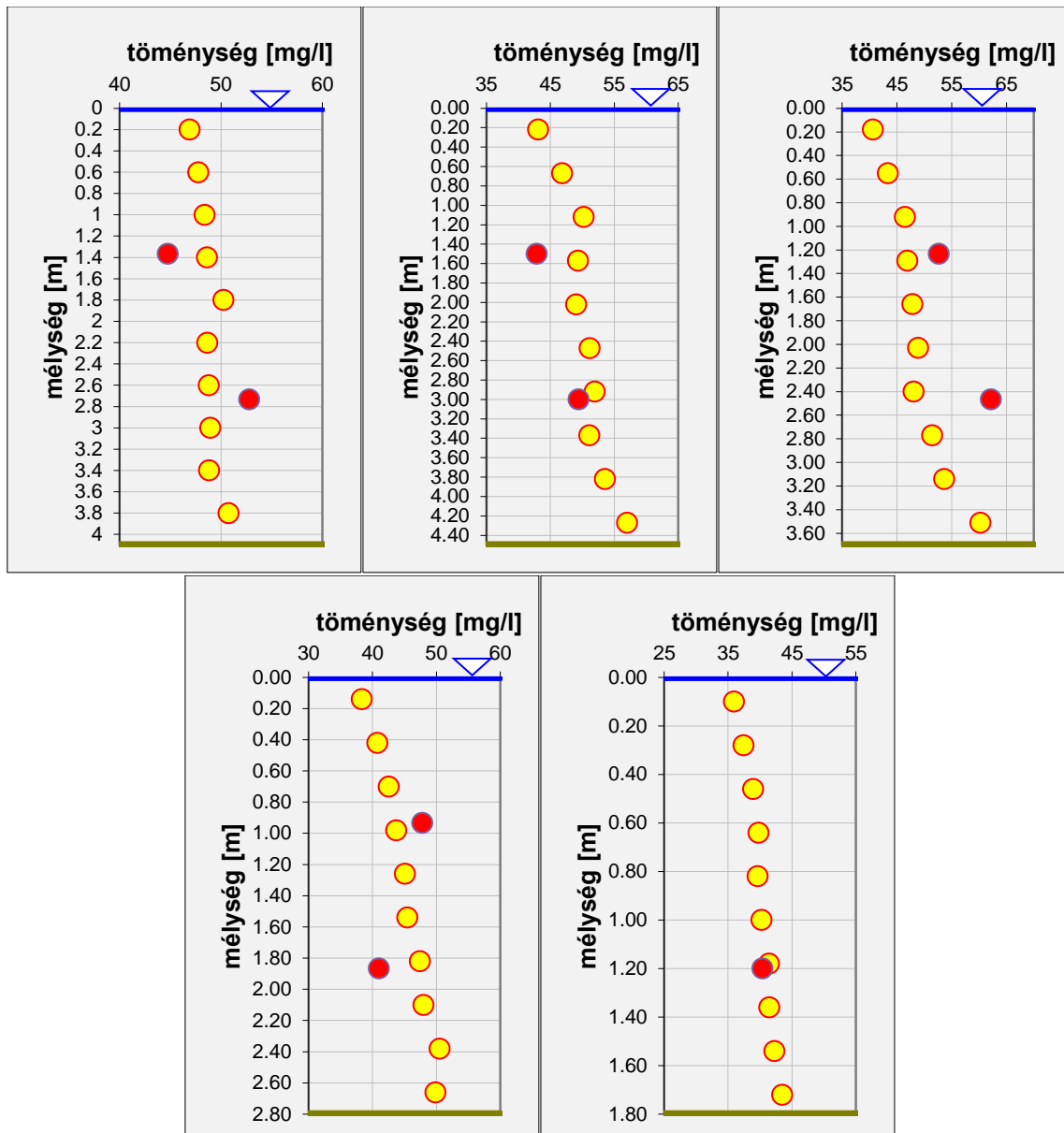
Sajnálatos módon, függélyenként csak két mérési adat áll rendelkezésemre a szivattyús mintavételből, ebből kifolyólag bizonytalan az összehasonlítás, mivel a módszer rövidebb idejű mintavételezést alkalmaz, mint az általunk végrehajtott lézeres elvű eljárás. Ezt a rövidebb mérési időszakot viszont befolyásolhatja egy magasabb vagy éppen alacsonyabb koncentrációval érkező hordalékhullám. Ennek orvoslása nehezen kivitelezhető a mintavételi térfogat növelésével (és így hosszabb mérési időtartammal), mert rendkívül nagy mennyiségű mintát kellene kezelni, ha pontosabb, vagy reprezentatívabb töménységadatokat szeretnénk. Ez a hibaforrás a Lisst műszernél kisebb mértékben áll fenn, mert az adatgyűjtés mérési pontonként mintegy egy perc hosszan történik, és a fent említett mérési frekvenciát alapul véve így 60-100 töménység adat áll rendelkezésre. Az így kapott töménység idősor alapján egy időátlagot képezve, pontosabb eredményt kapunk.

A fent leírtak szerint a műszer térfogatarányban ($V/V\%$) szolgáltatja a töménység adatokat, amiket be kell szoroznunk a hordalék testsűrűségével, hogy a töménységet M/L^3 dimenzióban kapjuk meg (M : tömeg, L : hosszúság). A hordalékszemcsék sűrűségét $2,65 \text{ g/cm}^3$ -el vettük figyelembe, mivel anyaga általában kvarc.

A mellékelt grafikonok a korábbiakban ismertett mérések eredményeit szemléltetik. Balról jobbra haladva látható egy mérési szelvényben vizsgált öt függőlegesen kapott töménység eredmények sora. Elsőként a barcsi szelvény 2012. évi júniusi mérésének (1. mérési kampány) adatait közlöm. A sárga pontok jelölik a Lisst műszer által mért adatokat, míg a pirosak a szivattyús mérés alapján, az utólagos laborfeldolgozással kapott töménység adatokat ábrázolják. A lézeres mérésből előállított függőleges menti töménység eloszlások alátámasztják azt az analitikusan levezetett koncentráció eloszlást, amit Hunter Rouse amerikai kutató vizsgálataiból ismerünk (Vanoni, 1984). Az általa levezetett függvény, különböző szemcseméretűek esetén mutatja be a relatív hordaléktöménység függvény menti eloszlását, amit a következő pontban ismertetek majd részletesebben. A profilokon (6. ábra) azt látjuk, hogy amennyiben a szállított hordalék döntően durva szemcsékből áll, akkor kevesebb a lebegtetett hordalék, így a vízoszlop felsőbb tartományaiban kisebb a koncentráció, a fenéknél viszont hirtelen megugrik. Ez az eset látható az ábra bal oldali részén, míg a jobb oldalon az inkább finom frakciókat tartalmazó, iszapos-homokos szemcsékkel jellemezhető profil látszik. Ebben az esetben, ahol a szemcsék kis méretük miatt a vízoszlop teljes magasságában jelen vannak, a koncentráció a függőleges mentén nagyjából kiegyenlített. Az itt bemutatott hordalékprofilok (7. ábra), alakjuk alapján, egy homokos hordalékú folyó tulajdonságait jelzik. A töménység értékek ugyanis meglehetősen egyenletesen alakulnak a mélység mentén és kismértékű növekmény jelentkezik a mederfenéknél, de összességében a 20%-ot nem haladja meg az értékek változása.



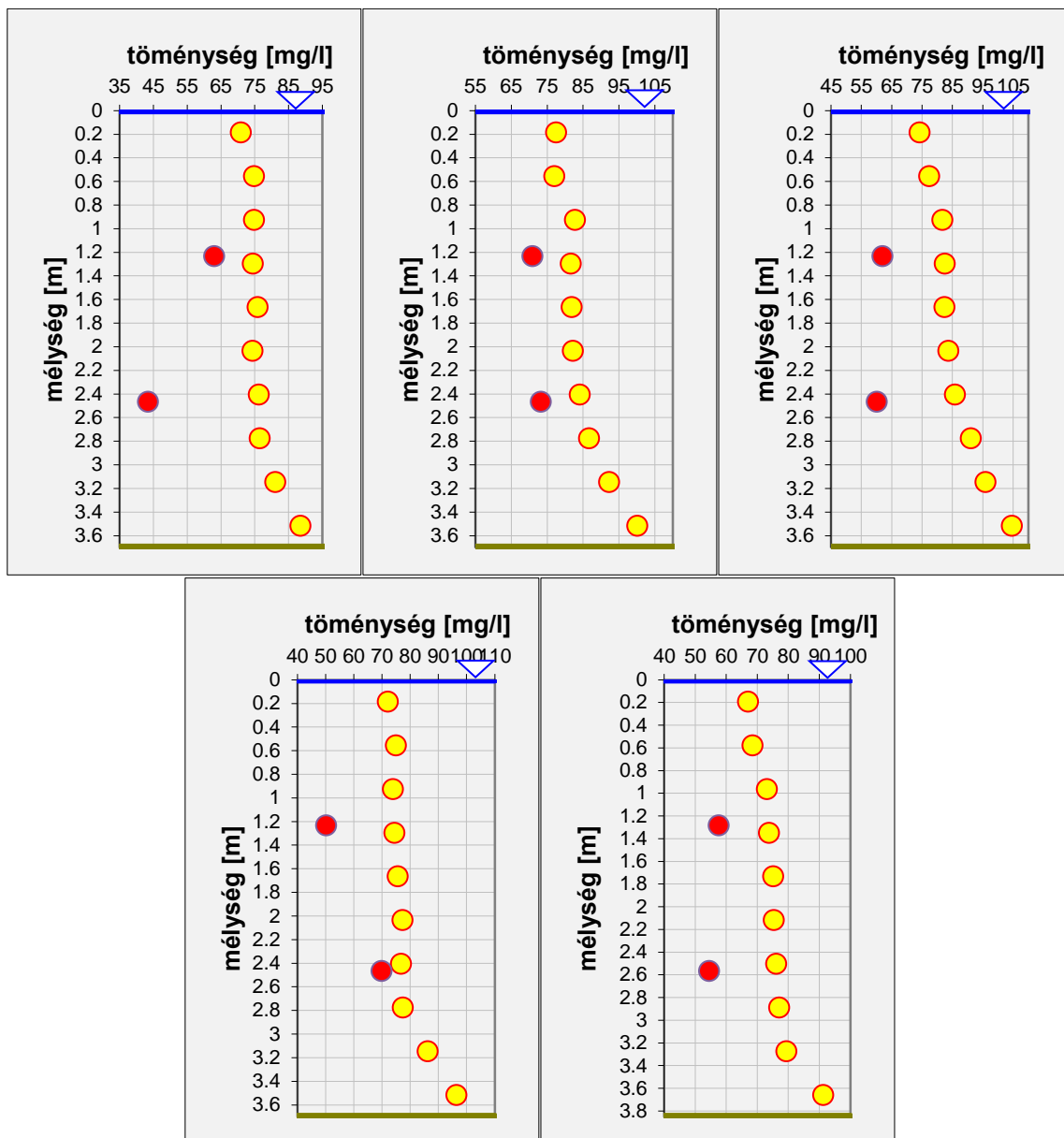
6. ábra: Koncentráció-profilok alakulása hordaléktól függően



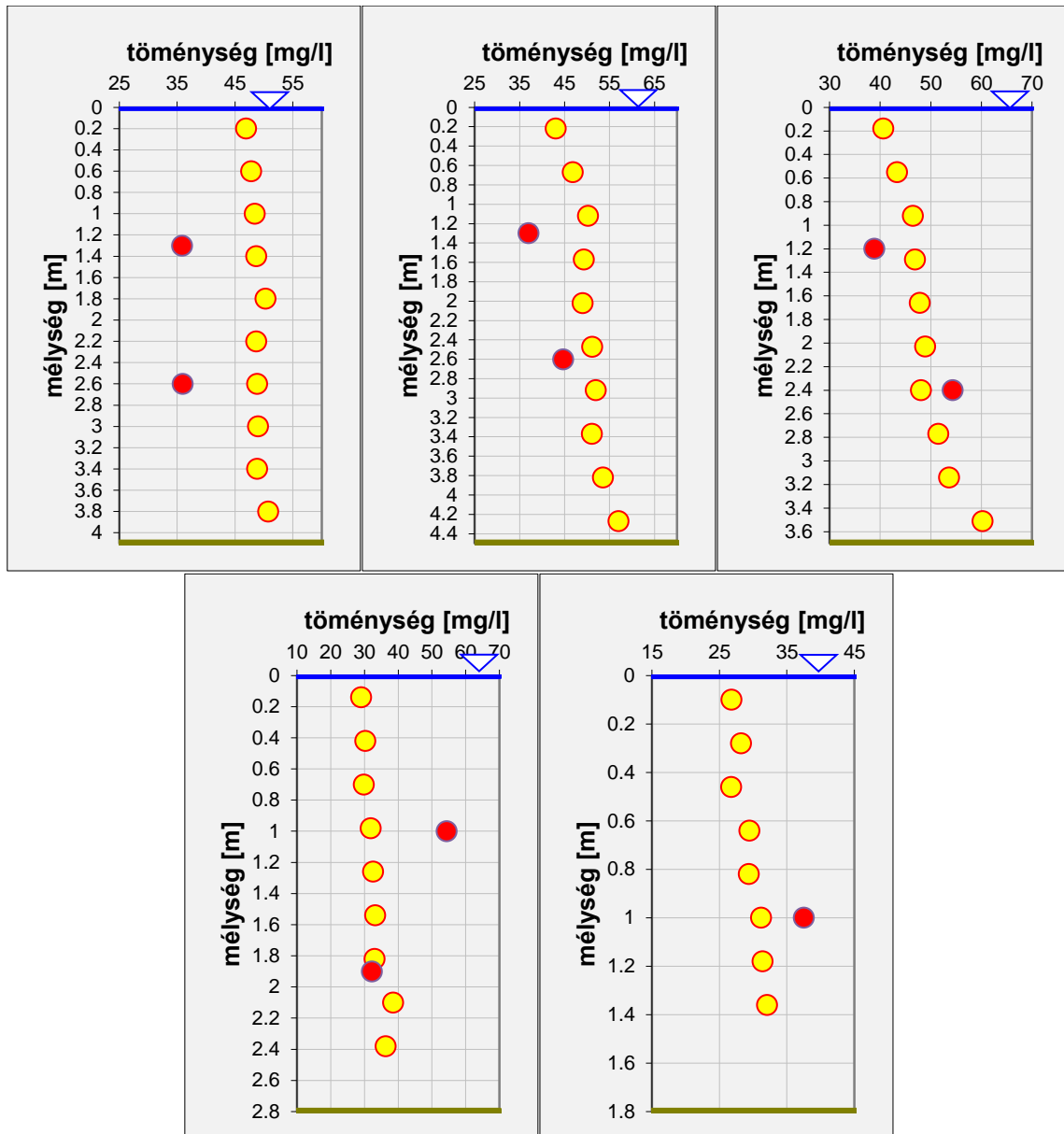
7. ábra: A Lisst és szivattyús hordalékmérés töménységeinek függvényenkénti alakulása (2012. június, Barcs)

A júniusi, második szelvénybeli mérés (Drávaszabolcs) szelvényének grafikonjait vizsgálva azt tapasztaljuk, hogy az eltérés a szivattyúval vett, és Lisst-tel mért adatok között már nagyobb, mint a barcsi szelvényénél (8. ábra), utóbbi értékei rendre nagyobbak. Az augusztusi mérések során kapott eredmények is hasonló viselkedést mutatnak (9. és 10. ábra), vagyis Barcsnál mind pozitív, mind negatív irányban tapasztalható eltérés (az átlagértékek jól illeszkednek), míg Drávaszabolcsnál folyamatosan magasabb értékeket mutat a lézeres eljárás. A barcsi eredményeket tekintve az eltérés adódhat a már említett szivattyús mérési módszer bizonytalanságából, de a drávaszabolcsi adatok rámutatnak arra, hogy a Lisst műszer

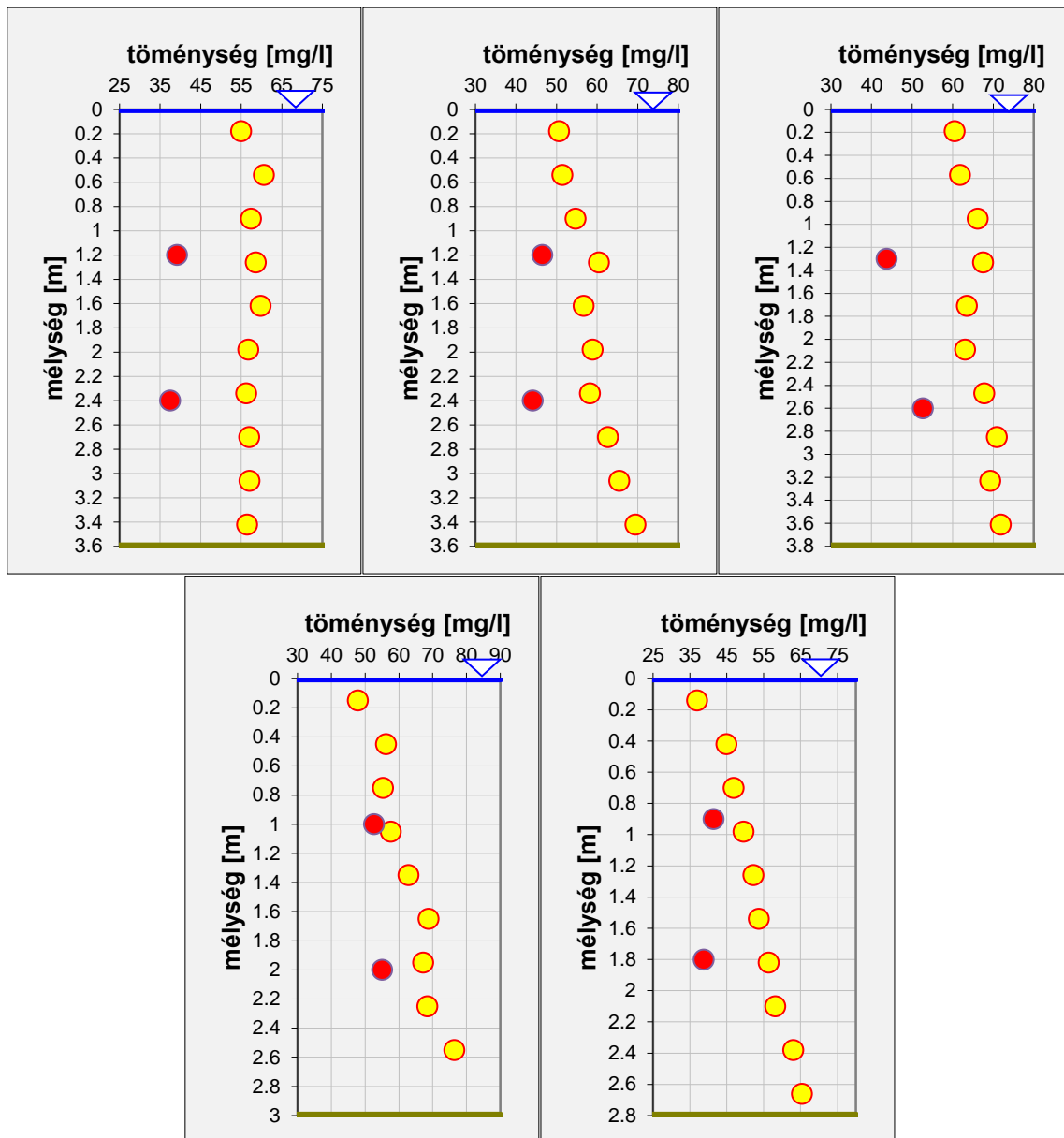
laboratóriumi körülmények közötti ellenőrzése és kalibrációja szükséges, mert az eltérés magyarázata még további vizsgálatokat igényel.



8. ábra: A Lisst és szivattyús hordalékmérés töménységeinek függélyenkénti alakulása (2012. június, Drávaszabolcs)



9. ábra: A Lisst és szivattyús hordalékmérés töménységeinek függvényenkénti alakulása (2012. augusztus, Barcs)



10. ábra: A Lisst és szivattyús hordalékmérés töménységeinek függvénykénti alakulása (2012. augusztus, Drávaszabolcs)

4.1.2. Elméleti töménységprofil számítása és összehasonlítása a mérési adatokkal

Az elméleti hordaléktöménység-profil megalkotásának és elemzésének célja, hogy megvizsgáljuk annak lehetőségét, tudunk-e rövidíteni a mintavételi idő hosszán a jövőbeli méréseknél. A korábbiakban hivatkozott elméleti, Hunter-Rouse hordaléktöménység profil ugyanis lehetővé teszi, hogy egy mederfenék közeli, ismert hordalék-töménységű pontra alapozva, és a folyó által szállított hordalék fizikai jellemzőinek függvényében, a teljes vízoszlopra kiszámítsuk a töménység eloszlást. Ha be tudnánk mutatni, hogy az így kapott

profil megegyezik a Lisst adataiból előállítottal, akkor a későbbiekben elegendő lenne csupán egy, a mederfenék közelére jellemző pont koncentrációját mérni, majd az analitikus profil alapján kiterjeszteni azt a teljes mélységre, ezzel felgyorsítva az adatszerzést, hiszen a pl. itt vizsgált 10 függély menti pont helyett elegendő lenne csupán egyetlen pontban mérést végezni. Szem előtt tartva azt, hogy pontonként mintegy egy percig végeztük a mérést, majd a pontok között át kellett állni a műszerrel, legalább a tizedére rövidítené ez az egyszerűsítés a mérési idő hosszát. Ez egyúttal azt is jelenthetné, hogy ugyanannyi idő alatt jelentősen több függélyben tudnánk hordalékmintázást végrehajtani.

A számításhoz tehát Hunter-Rouse képletét használom, amivel megkapható a mederfenéktől való távolságtól, a hordalék fizikai jellemzőitől és az ún. referencia töménységtől függő, függély menti töménység eloszlás:

$$\frac{c(z)}{c_a} = \left(\frac{h-z}{z} \frac{a}{h-a} \right)^{Z_R}$$

Ahol:

c_a - a mederfenéktől a távolságra lévő pont koncentrációja (referencia töménység) [mg/l]

h - a mérési függély teljes mélysége [m]

z - a kívánt pont mederfenéktől számított távolsága [m]

a - az ismert töménységgel rendelkező (mederfenék közeli) pont medertől való távolsága [m]

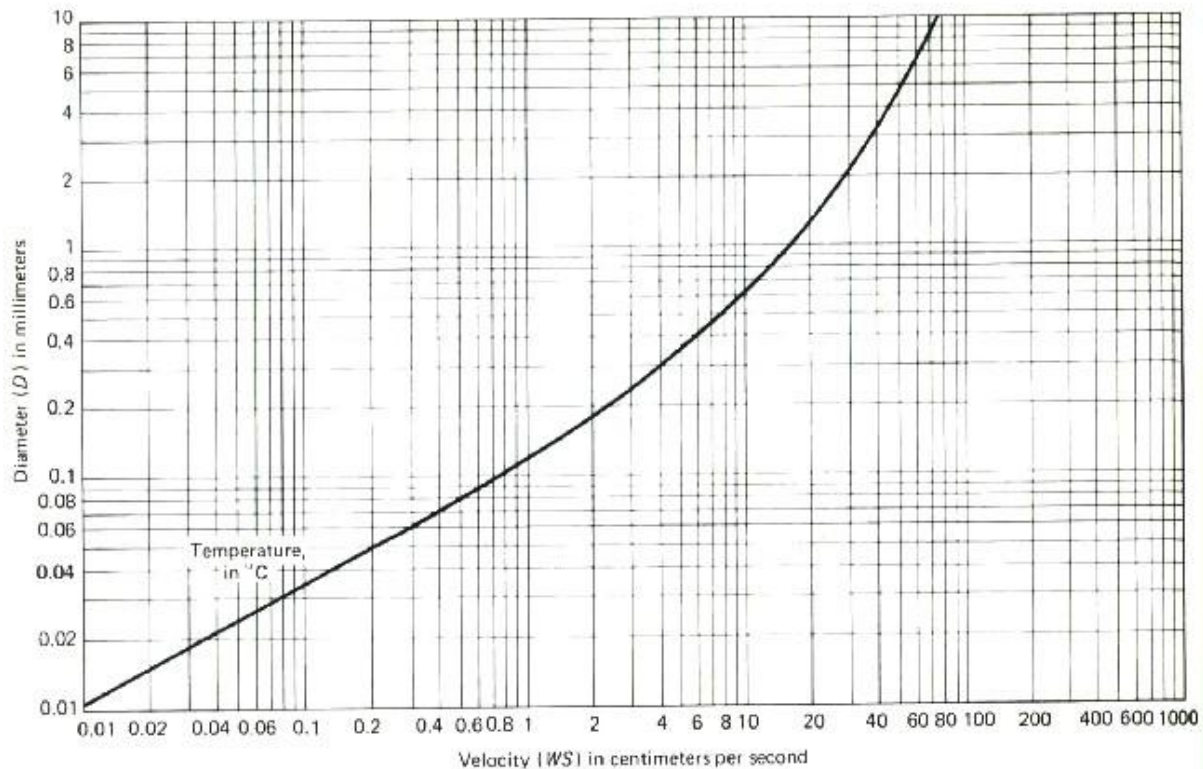
Z_R - Rouse-féle szám, ami a mérési szelvényre jellemző hordalék fizikai paramétereit írja le, az alábbi képlettel kapható meg:

$$Z_R = \frac{w_{\ddot{u}}}{u_* \kappa}$$

Ahol: $w_{\ddot{u}}$ a szemcse ülepedési sebessége [m/s], a 11. ábrán látható grafikonról kapható meg (ez nem más, mint a Stokes-törvény grafikonos megjelenítése, lásd pl. Batchelor (1967) a D_{50} , vagyis az átlagos szemcsemérethez tartozó érték leolvasásával, u_* a fenécsúsztató sebesség, ami a mérési függélyre jellemző fenék-csúsztatófeszültség alapján adható meg

($u_* = \sqrt{\frac{\tau}{\rho}}$, ahol τ a fenék-csúsztatófeszültség [kN/m²], ρ pedig a víz sűrűsége [kg/m³]).

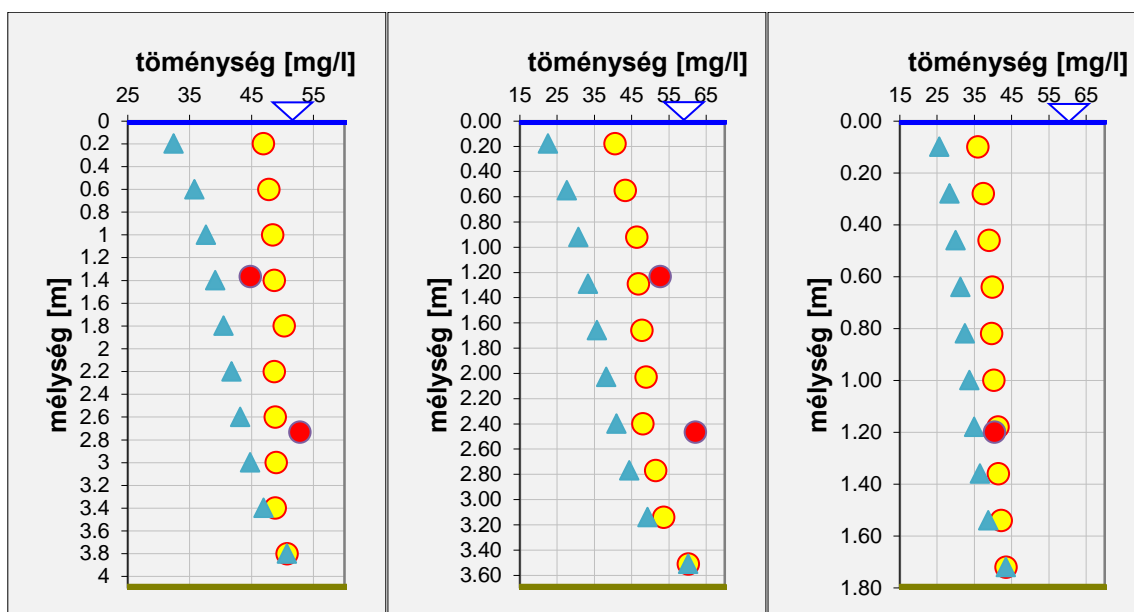
Ennek értékét az ADCP sebességmérések alapján határoztam meg az ún. turbulens fal-törvény alkalmazásával, amire 0,06 m/s-os értékkel vettem figyelembe (a becslési módszer részletiről ír pl. Baranya et al., 2008). A Rouse-féle szám meghatározásában κ az ún. Kármán-féle állandó, melynek értéke 0,41.



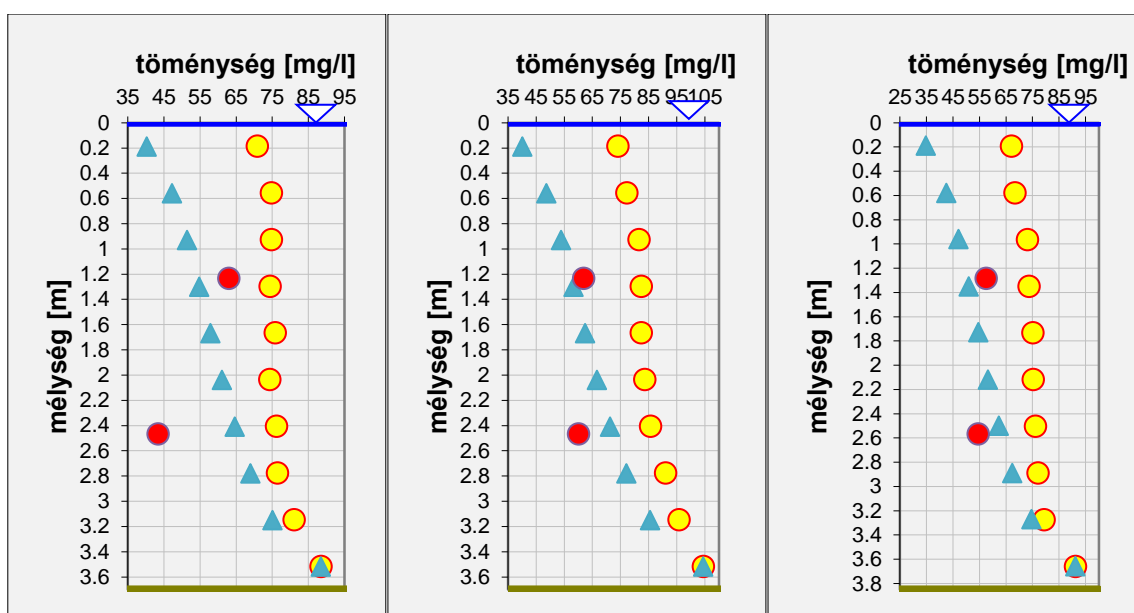
11. ábra: $w_{\bar{u}}$ meghatározásához szükséges grafikon

A következőkben tehát úgy jártam el, hogy csak a mederfenékhez legközelebbi mért töménység értéket használtam fel (itt c_a , referencia töménység), majd kiszámítottam az elméleti profilokat Hunter-Rouse képletével, amelyek a következő grafikonokon láthatók, kék háromszögekkel jelölve (12, 13 és 14. ábrák). Itt a mérési szelvényeket három jellemző függélyükkel mutatom be, a két part közelivel, valamint a meder közepén lévővel. A baloldali grafikon mutatja a bal partot, a jobboldali a jobb partot a középső pedig a meder közepét. Már első ránézésre látszik, hogy a kívánt cél nem érhető el a jelentős eltérések következtében. Megemlítendő azonban, hogy nemcsak a lézeres elvű mérés mutat eltérést, hanem a szivattyús eredmények is jelentősen különböznek a 2012. júniusi, drávaszabolcsi mérési szelvény kivételével (13. ábra). Ez jelezheti azt is, hogy a számítás során valamelyik paraméter tévesen lett megadva, így az egyes értékek változtatásával ellenőriztem, hogy mely paraméterekre érzékeny ez a becslési módszer. Ennek eredményeként a legbizonytalanabb tényezőnek az u_*

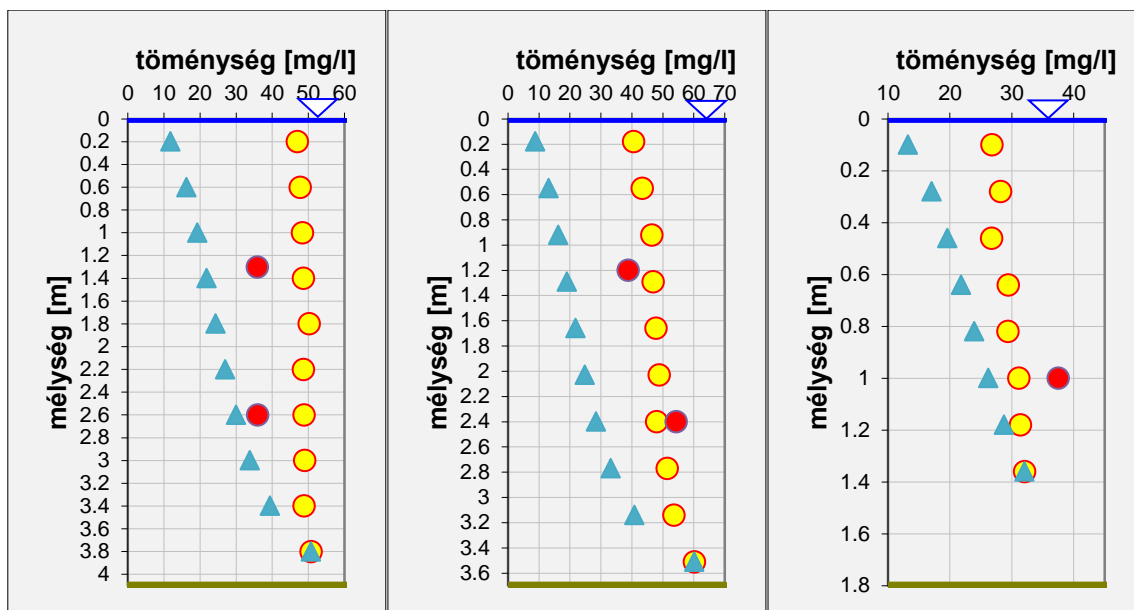
adódott. Amennyiben az alkalmazott 0,06 m/s-os érték helyett 0,16 m/s-al számolunk, az eloszlások majdhogynem tökéletes egyezést mutatnak (15. ábra). Ez az eredmény rámutat tehát a fenék-csúsztató sebesség becslési módszerének megbízhatóságára, ami esetleg alternatív módszerekkel ellenőrizhető, de csak igen körülményesen, pl. mederfenék közeli nagy időfelbontású sebességméréssel, amiből az áramlás turbulencia tartalmát tudnánk meghatározni, amiből a csúsztatófeszültség már származtatható.



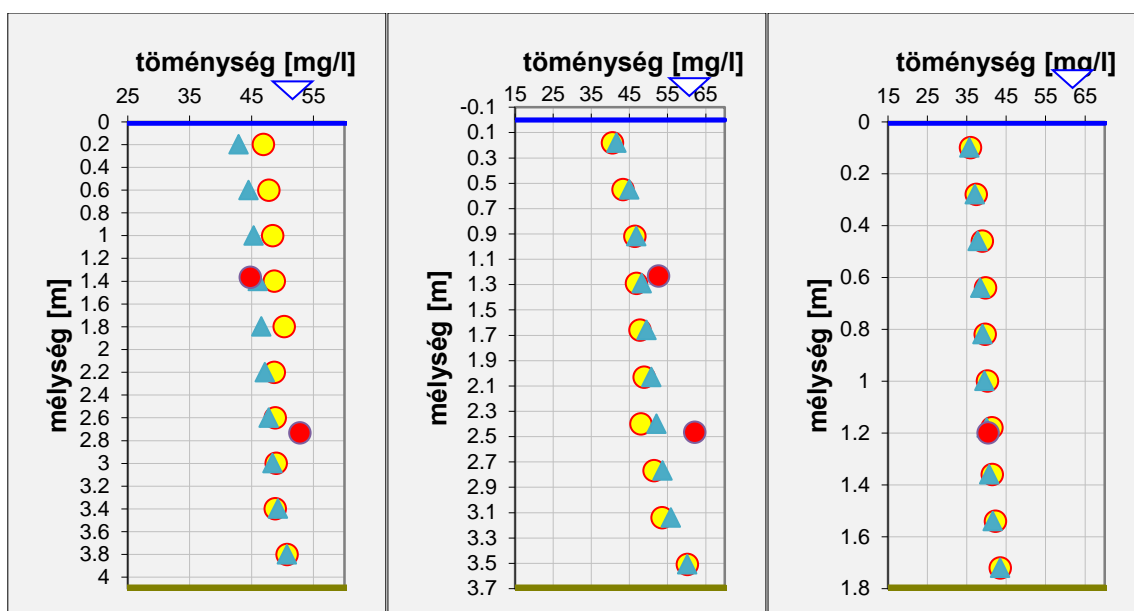
12. ábra: Az elméleti profil illesztése a mérési töménységekre (2012. június, Barcs)



13. ábra: Az elméleti profil illesztése a mérési töménységekre (2012. június, Drávaszabolcs)



14. ábra: Az elméleti profil illesztése a mérési töménységekre (2012. augusztus, Barcs)

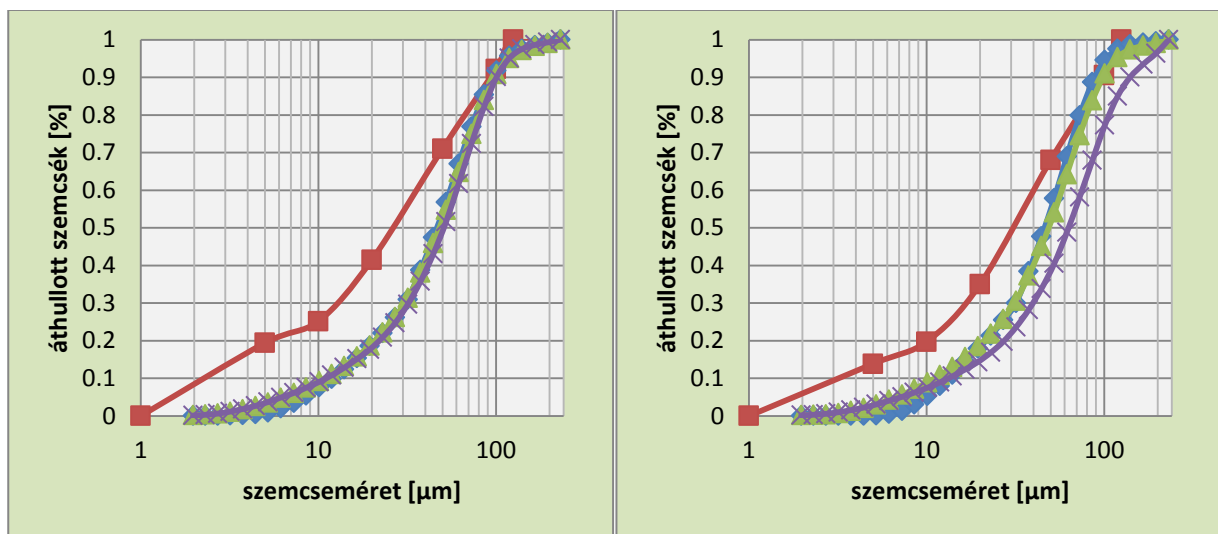


15. ábra: Az elméleti profilok illeszkedése 0,16 m/s használata esetén

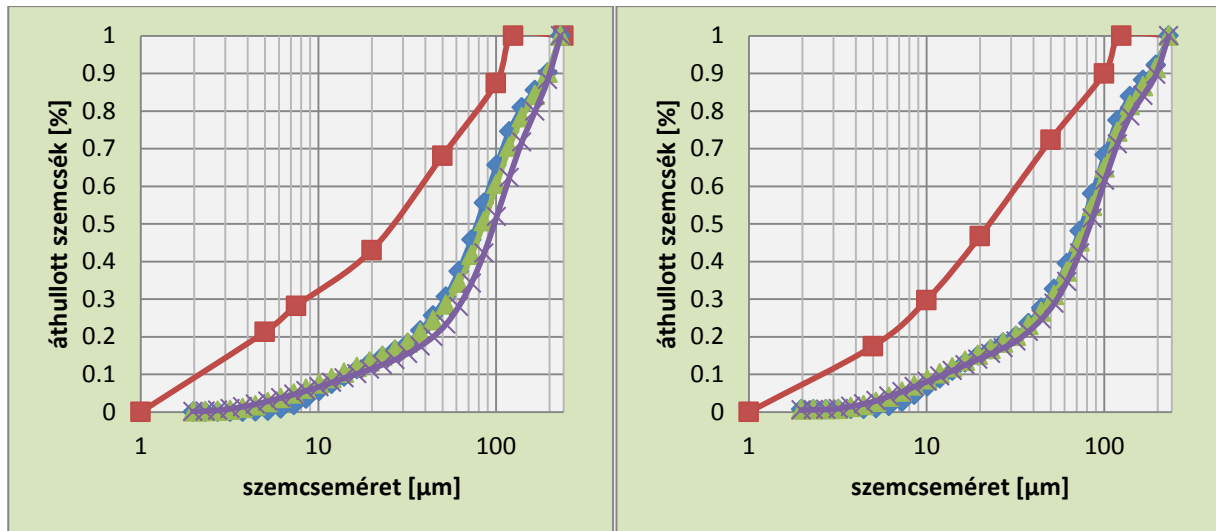
4.1.3. A hagyományos és lézeres elvű módszerrel meghatározott szemeloszlási görbék összehasonlító elemzése

A következőkben a szivattyús mintavételből a hagyományos ülepítési eljárással meghatározott (lásd pl. Sági, 2010) és a lézeres mérés alapján közvetlenül megkapott mintavételi pontok szemösszetételi görbéinek elemzését tárgyalom. A grafikonok az első (júniusi) és második (augusztusi) barcsi mérés, bal part mentén illetve mederközépen felvett függéyleit mutatják (16. és 17. ábra). Feltüntettem a Lisst-el mért adatokból származó

szemeloszlási görbék függvénykénti és függvények menti változásait is, melyeket kék (vízfelszínhez közeli), zöld (vízoszlop közepén) és lila (mederfenék közeli) színek jelölnek, valamint a Dél-dunántúli Vízügyi Igazgatóság által szolgáltatott szemeloszlási görbék (függélyátlagolt érték a két mérési pont alapján), melyeket piros vonalak szemléltetnek. Kivétel nélkül, a függvények minden pontjában valamivel durvább szemcséket jelez a lézeres mérés, mint az ülepítéssel eljárás. A mi, tehát a lézeres mérésünket egy ismert hiba terheli ugyan, ám ez nincs akkora hatással az eredményekre, hogy ilyen mértékű eltérést okozzon. Az említett hiba a függvények vízfelszínhez közeli tartományában volt megfigyelhető, ahol a műszer a vízbe hatoló napfényt is érzékelte, ami a szemeloszlási görbén a legfinomabb frakciók kiugrását eredményezte. Mivel ezt a szemcseméretet egyébként nem tartalmazta a minta, könnyen ki lehetett szűrni az adatfeldolgozásból azokat a részecsketartományokat, melyek nem a valóságot mutatták. A két szemösszetételi vizsgálati módszer közötti eltérés, a többi összehasonlításhoz hasonlóan, az augusztusi mérési alkalom adataiban valamivel nagyobb eltérést mutat, mint a júniusi mérések esetén.



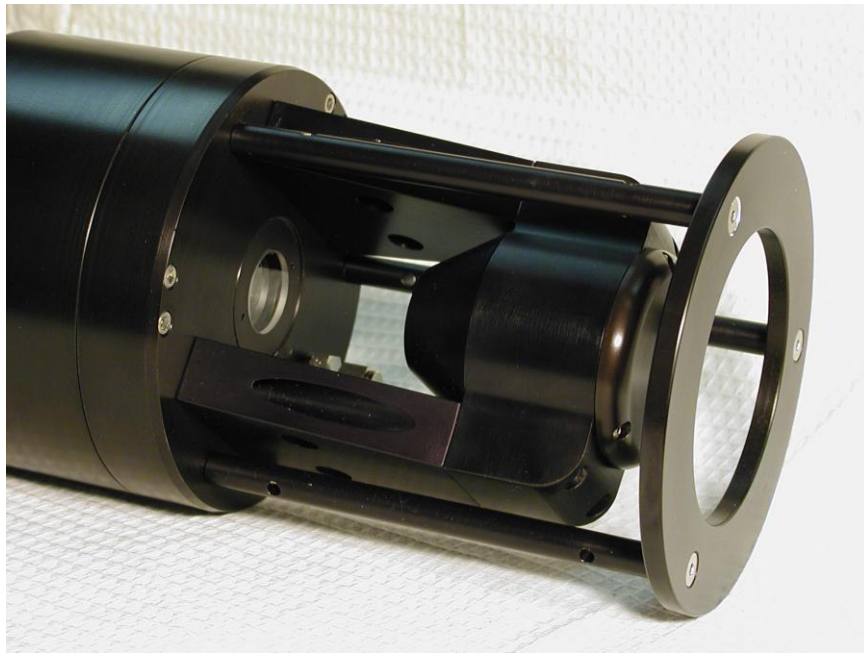
16. ábra: A Liszt és szivattyús hordalékmérés szemeloszlási görbéinek összevetése (2012. június, Barcs)



17. ábra: A Lisst és szivattyús hordalékmérés szemeloszlási görbéinek összevetése (2012. augusztus, Barcs)

A mérési eljárások összehasonlítása során kapott eredmények arra engednek következtetni, hogy jelen állapotában a Lisst műszer által szolgáltatott eredmények megbízhatósága kérdéses. Annak ellenére, hogy esetenként tendenciózus eltérés mutatható ki a hagyományos mintázás és a lézeres eljárás eredményei között, belátható, hogy mind a kapott töménység eloszlások, mind a szemösszetételi görbék alakja meglepően realisztikusnak adódott. Az eredmények rámutatnak arra, hogy a műszer laboratóriumi kalibrációja szükséges, ahol mesterséges körülmények között, tehát ismert hordalék-töménységű vízben meg lehet tudni, hogy mekkora eltéréssel dolgozik a műszer, valamint, hogy ez az eltérés állandó jellegű-e, amit egy műszerre jellemző állandóval ki lehetne küszöbölni a feldolgozás során, vagy változó a hibahatár, melynek esetében esetleg az eszköz javítása szükséges. Érdeemes megjegyezni azt is, hogy ez a típusú mérőeszköz eredetileg nem folyami mérésre lett kifejlesztve, hanem állóvíz jellegű víztestek vizsgálatára. Ez a kialakításából is látszik. A 9. képen látható a műszer azon része, ahol a minta vizsgálata történik. Jól látszik, hogy nem beszélhetünk áramvonalas kialakításról, sőt, a műszerfej kialakítása helyileg befolyásolhatja a hordalék töménység pillanatnyi alakulását az áramlási viszonyok változtatásával.

Az említett hibaforrás egyelőre arra enged következtetni, hogy egy állandó hibával van dolgunk, ami alapján elmondható, hogy a fent bemutatott eloszlások alakulása vélhetően hasonlóan, akár ugyanúgy alakul majd a jövőbeli korrigált mérések során, csak kismértékben megváltozott nagyságokkal. Ezt kihasználva, további adatelemzéseket végzek a lézeres mérőeszköz adataival.



9. kép: Lisst mérőfej

4.2. A Lisst mérési eredményeinek elemzése

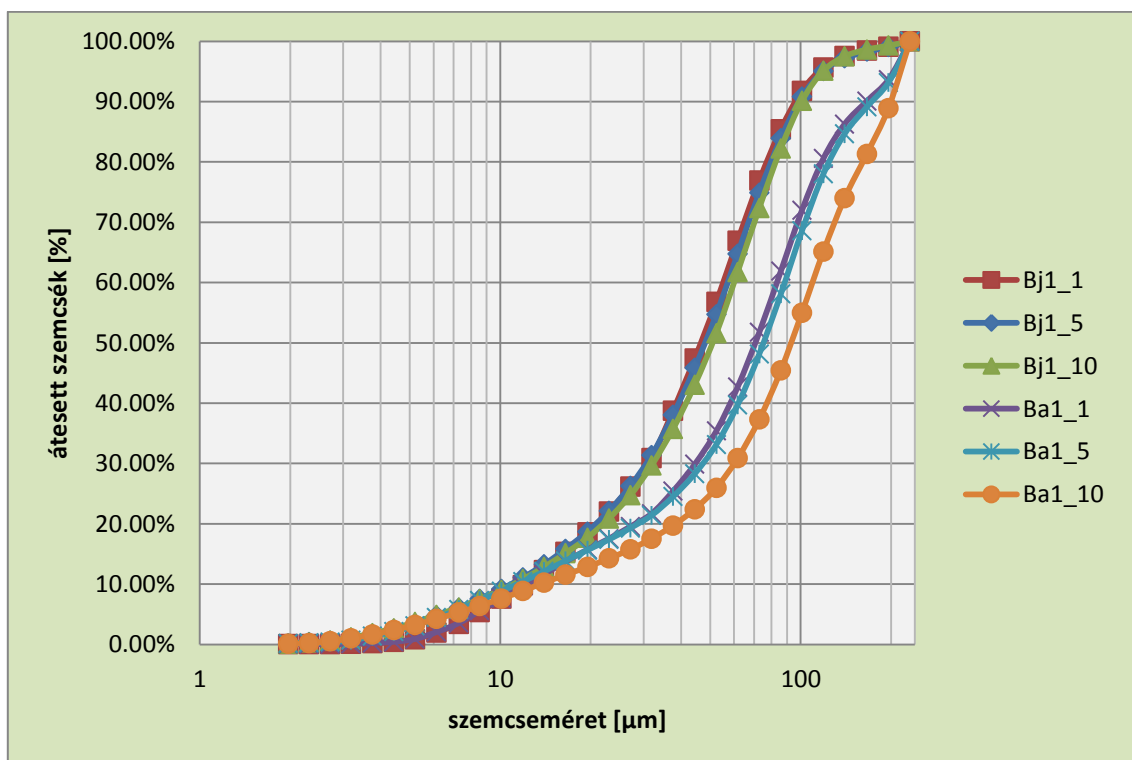
4.2.1. A szemeloszlási görbe és sűrűségfüggvény vízhozamtól függő változása

A folyó által szállított hordalék mennyiségét és fizikai tulajdonságait számos tényező befolyásolja. Ezek közül egyik legmeghatározóbb a folyó vízhozama, ám két ugyanolyan vízhozamnak is lehet különböző a szállított hordalék mennyisége és milyensége, attól függően, hogy az adott vízjárási állapot apadó, áradó vagy permanens jellegűt mutat. A 2012. júniusi méréskor kisebb vízhozam jellemezte a Drávát, egész pontosan Barcsnál $\sim 430 \text{ m}^3/\text{s}$, Drávaszabolcsnál $\sim 390 \text{ m}^3/\text{s}$. Az augusztusi méréskor $\sim 550 \text{ m}^3/\text{s}$ -os apadó árhullám vonult le. Ez sem volt túl nagy vízhozam, ám ahhoz elegendő, hogy a különbség megmutatkozzon az adatokban és remélhetőleg igazolni fogja az elméletet. Megjegyezném, hogy nem az elmélet helyességének bizonyítása a cél, hanem az „ismeretlen” műszerrel kapcsolatos tapasztalatszerzés.

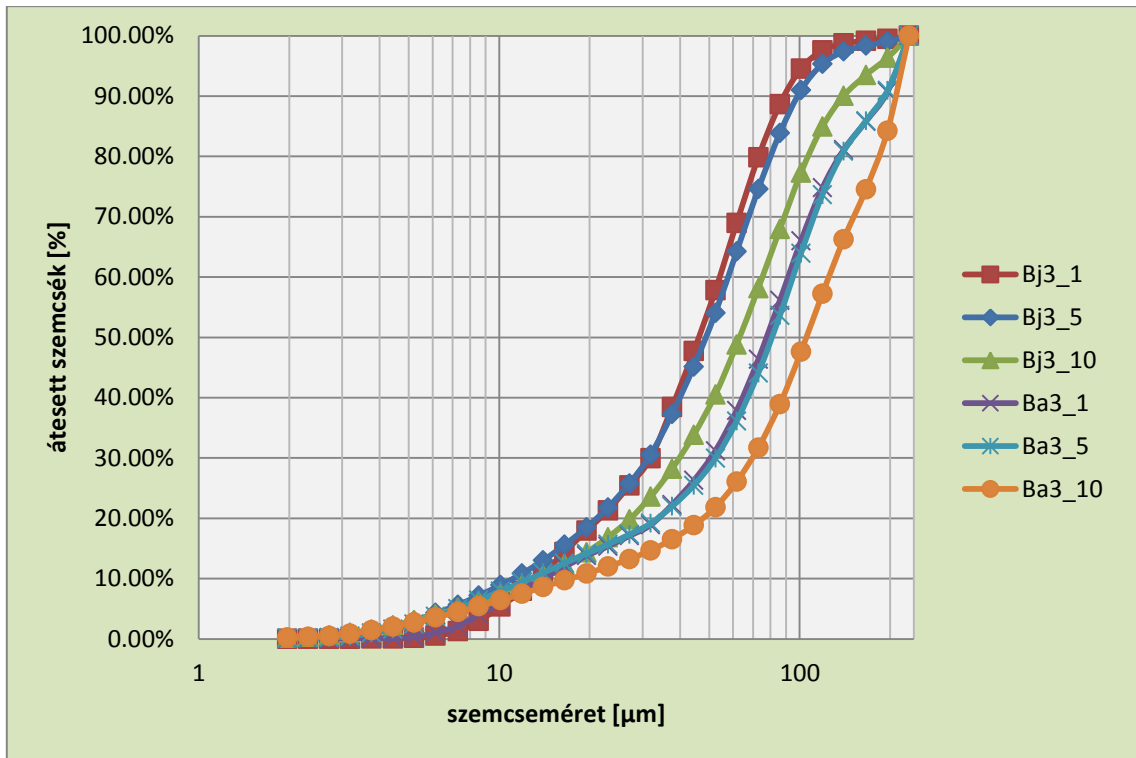
Ebben az esetben is a part közelében, illetve a folyómeder közepén elhelyezkedő pontokkal szeretném szemléltetni a szemösszetételi görbék alakulását. A szemeloszlási görbék jelmagyarázatában „Bj” jelöli a júniusi barcsi mérés eredményeit, míg „Ba” az augusztusit. Az utána következő első szám a függélyre, a második a függély mentén vett mérési pontokra utal (18. és 19. ábra), ahol 1 a vízfelszín közeli, 5 a vízoszlop közepén lévő, 10 pedig a mederfenék közeli eredményeket reprezentálja. Rendkívül szépen kirajzolódik a különbség. A

kisebb vízhozamú időszakban az átlagos szemátmérő nagyjából $50\ \mu\text{m}$, magasabb vízhozam esetén ez az érték felemelkedik $70\text{-}80\ \mu\text{m}$ -re, tehát a vízhozam növekedésével a hordalék szemeloszlása is magasabb érték felé mozdul el, vagyis a mérés ilyen szempontból helyesnek látszik.

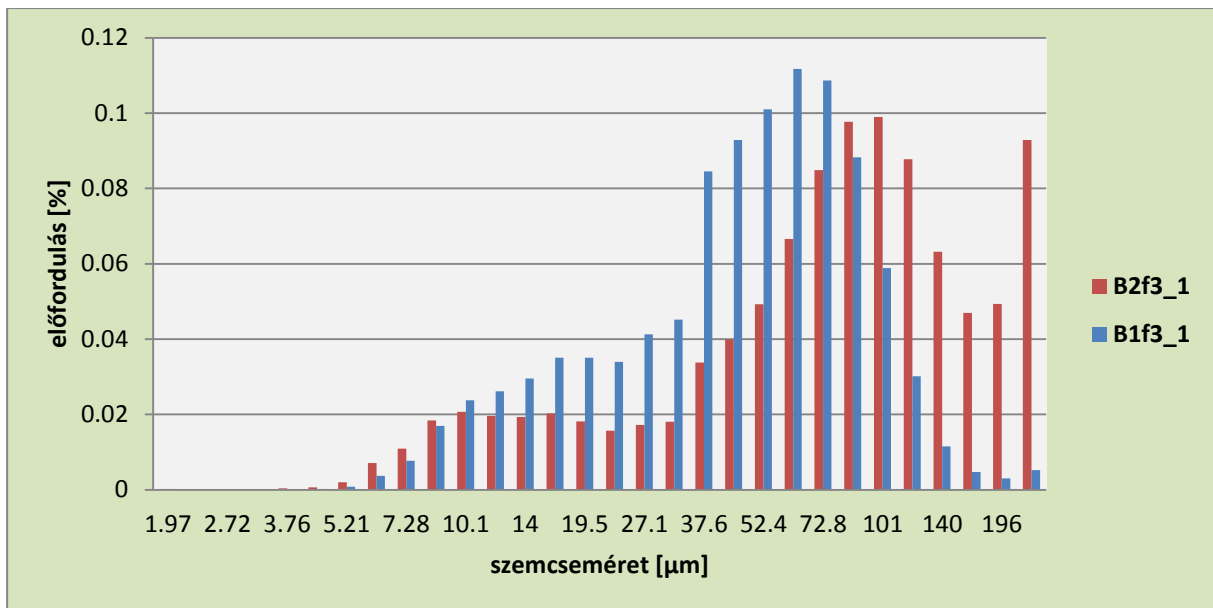
A második vizsgálati elem a szemcseméret sűrűségfüggvénye (20, 21 és 22-es ábra). Erről leolvasható, hogy az egyes szemcseméreti tartományok mekkora előfordulással voltak jelen a vizsgált közegben. Itt az első mérést „B1”, a másodikat „B2” jelöli. A $20\text{-}30\ \mu\text{m}$ -es eltolódás itt is mutatkozik, ha összevetjük a hullámok csúcsait. A kisvízi függvényen a felsőbb tartományok szinte teljes hiánya látszik, vagyis a hordalékszempcsék zöme $0,1\ \text{mm}$ -nél kisebb volt. A másik függvény pedig arról árulkodik, hogy a szemcseméretetek maximális méretét meg sem tudhattuk a műszer mérési tartományának korlátozása miatt. Ha $100\ \text{m}^3/\text{s}$ -os eltérés ilyen mértékű különbséget eredményez, érdemes lenne valódi szélsőértékek esetén is megvizsgálni ezt a jelenséget.



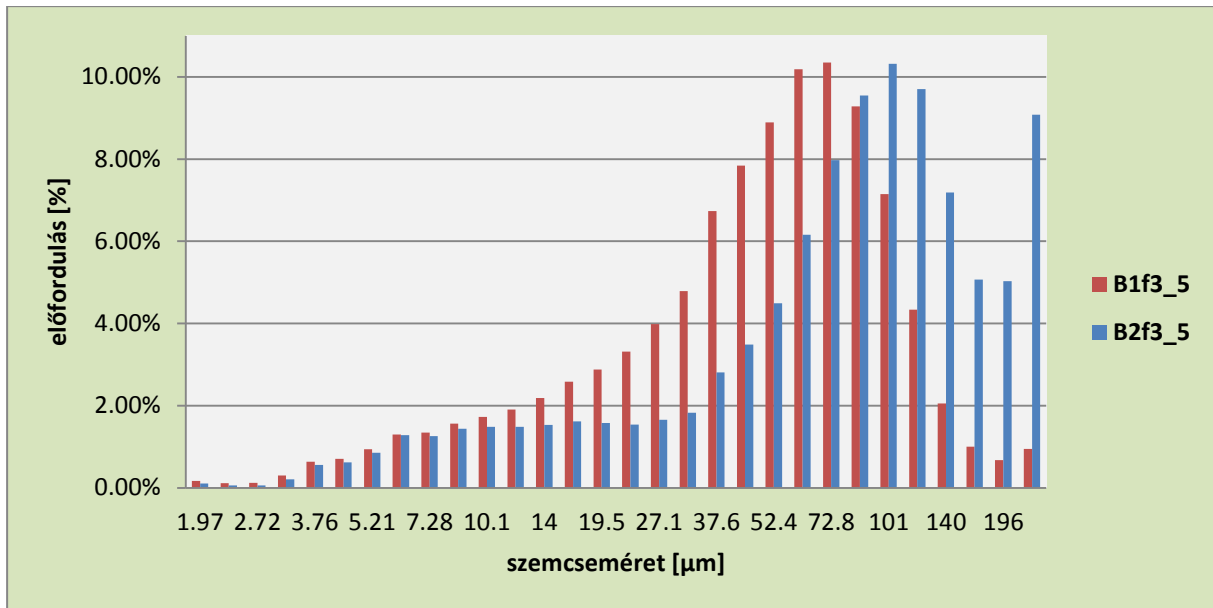
18. ábra: A szemeloszlások vízhozamtól függő alakulása (Barcs, 1. függély)



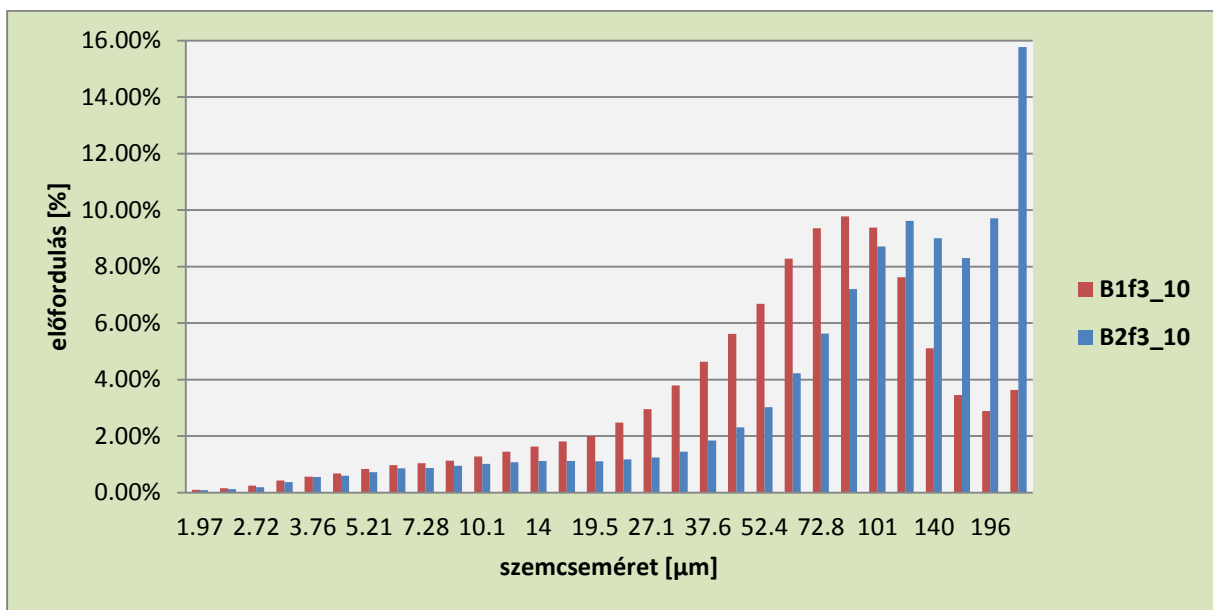
19. ábra: A szemeloszlások vízhozamtól függő alakulása (Barcs, 3. függély)



20. ábra: Sűrűségfüggvények alakulása különböző vízhozamoknál (Barcs, 3. függély vízfelszínhez legközelebbi pontja)



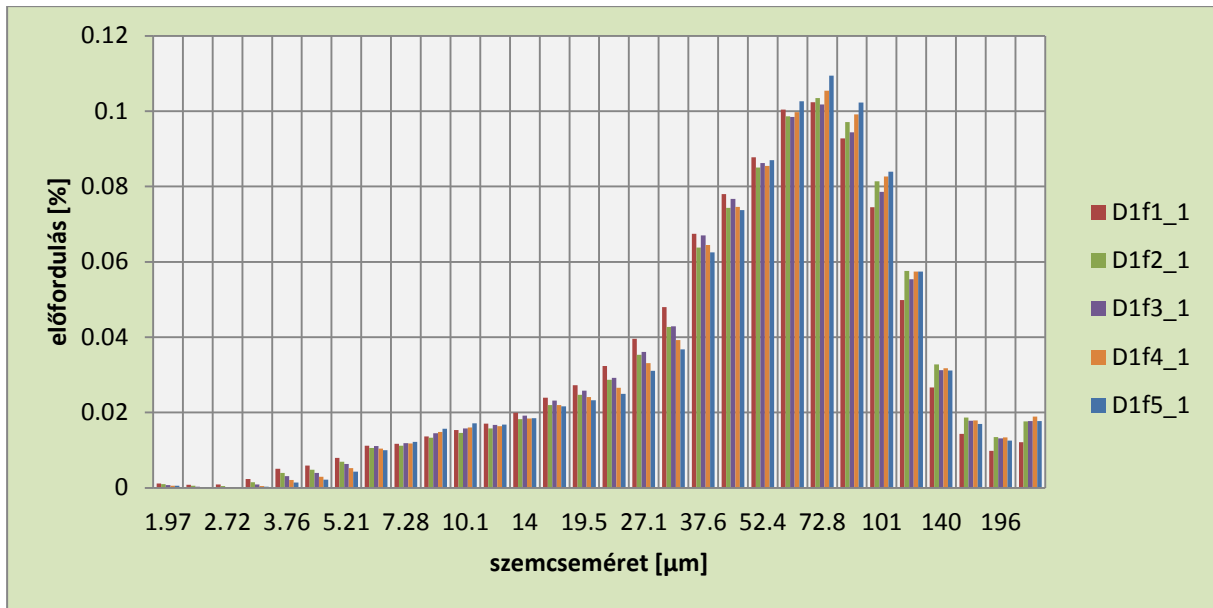
21. ábra: Sűrűségfüggvények alakulása különböző vízhozamoknál (Barcs, 3. függély ötödik pontja)



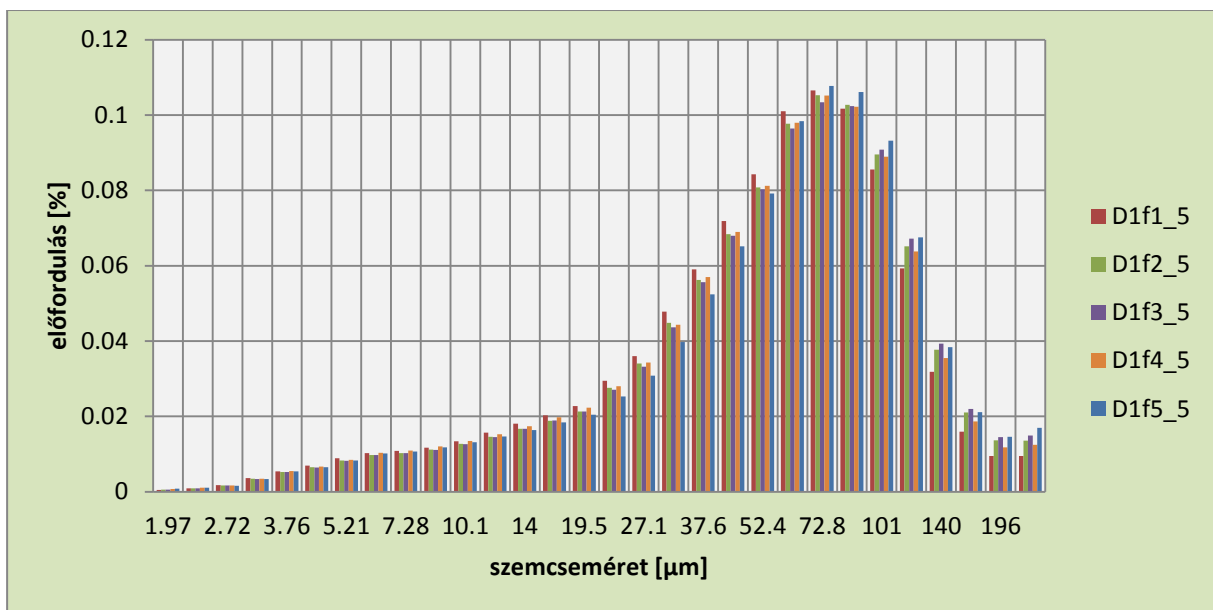
22. ábra: Sűrűségfüggvények alakulása különböző vízhozamoknál (Barcs, 3. függély tizedik pontja)

4.2.2. A szemcseméret sűrűségfüggvényének keresztmetszvény menti változása

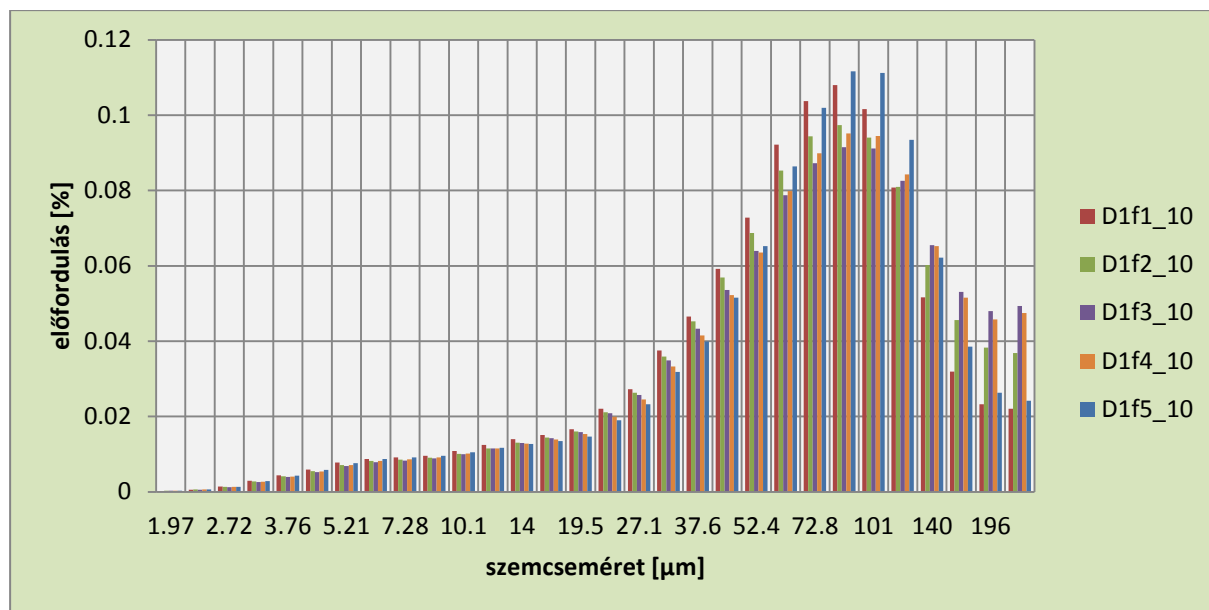
A keresztmetszvény menti változást három jellemző vízmélységben és két vízhozamnál vizsgáltam. Elsőként egy vízfelszínhez közeli, majd a vízmélység felében, végül a meder közelében lévő pontot elemeztem.



23. ábra: A sűrűségfüggvény keresztmetszvény menti alakulása a mért legkisebb mélységben



24. ábra: A sűrűségfüggvény keresztmetszvény menti alakulása az ötödik mérési pontban



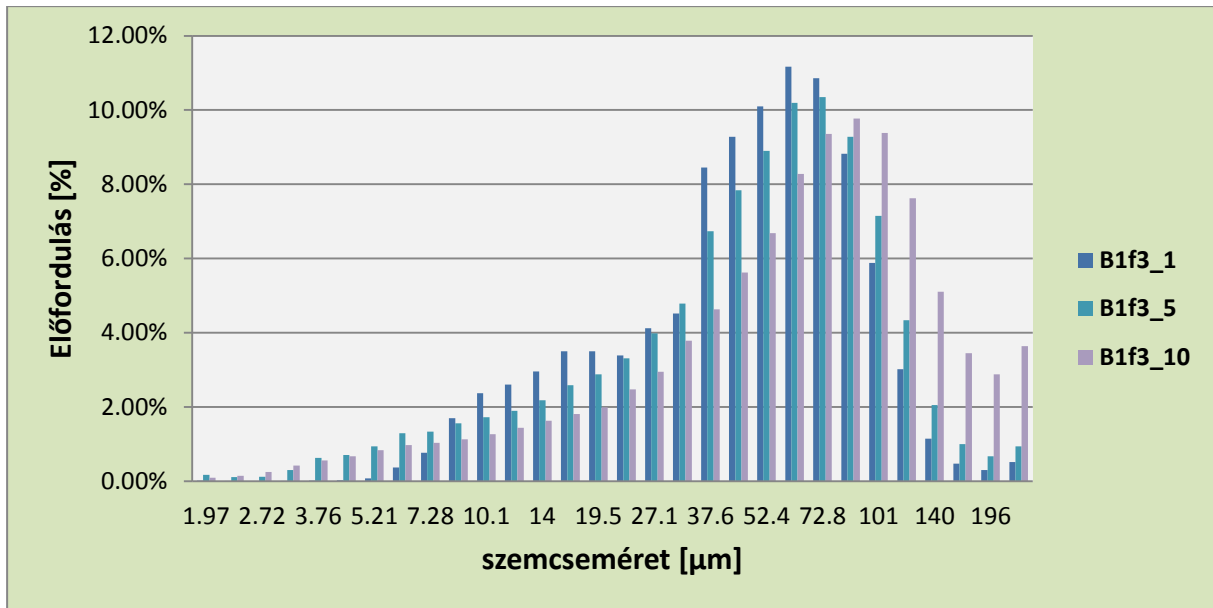
25. ábra: A sűrűségfüggvény keresztmetszvény menti alakulása a mederfenék közelében

Az első két mélységben szinte nem tapasztalható eltérés a sűrűséget illetően, tehát az egyes szemcsék keresztmetszvény menti előfordulása azonos (23. és 24. ábra). A meder közelében lévő pontnál mutatkozik némi különbség, miszerint a nagyobb mérettartományok gyakoribbak a meder közepén (25. ábra), a sodorvonal környezetében. Ez a jelenség az áramlás sebességével van összefüggésben, mivel a nagyobb sebességű közeg magasabb turbulencia tartalma, képes legyőzni a durvább szemcsékre ható gravitációs erőt, vagyis nagyobb a hordalékszállító képesség ebben a zónában.

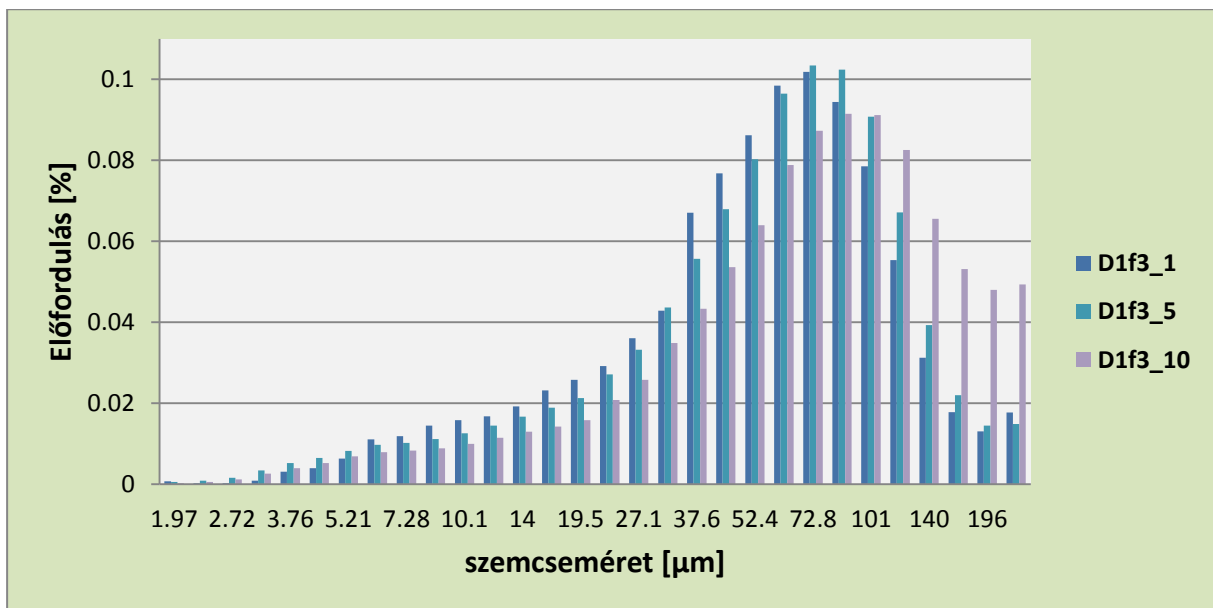
4.2.3. A sűrűségfüggvény és a szemeloszlási görbe változása a mélység függvényében

A tapasztalatok és mérések alapján, a függély mentén, a fenék felé növekvő szemcseméretnek lesznek jellemzőek, ami a sűrűségfüggvényen és így a szemeloszlási görbén keresztül is kimutatható.

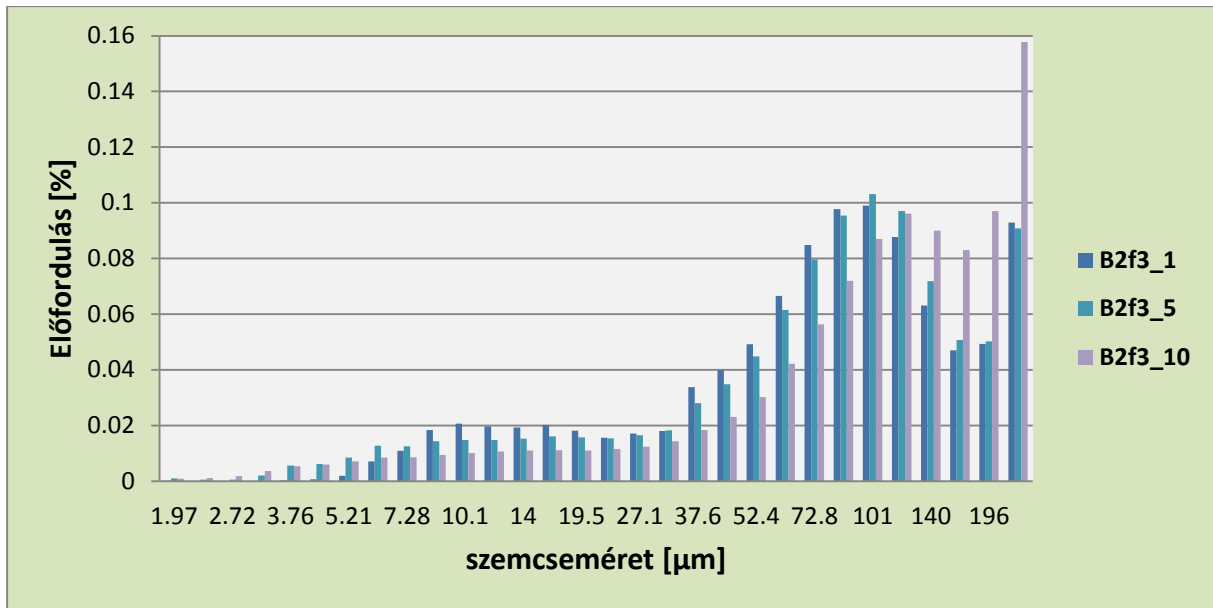
Az adatelemzést itt is elvégeztem mindkét mérési időpontra, és mindkét mérési helyszín jellemző pontjaira, ám ahogy eddig, most is csak azokat az adatokat mutatom be, amelyek legjobban reprezentálják az eredményeket. Ennek tükrében választottam a meder közepére eső függélyt mindkét helyszínen, mindkét időpontjával (26-33. ábra). A jelölések az eddigieknek megfelelőek.



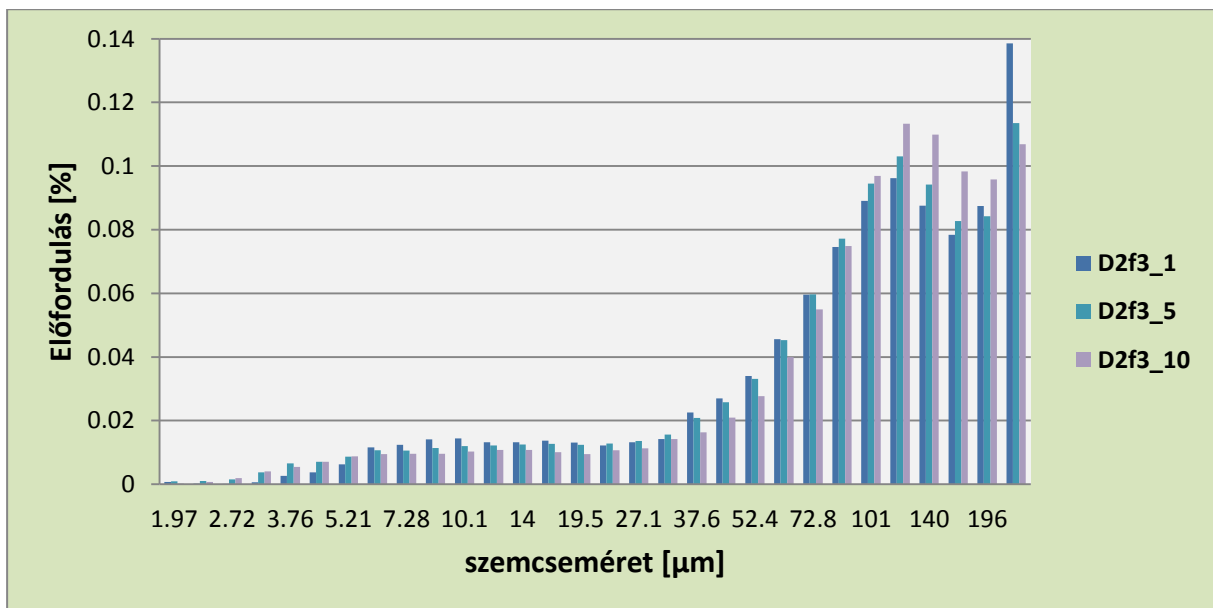
26. ábra: A sűrűségfüggvény mélység szerinti alakulása a júniusi barcsi mérés harmadik függélyében



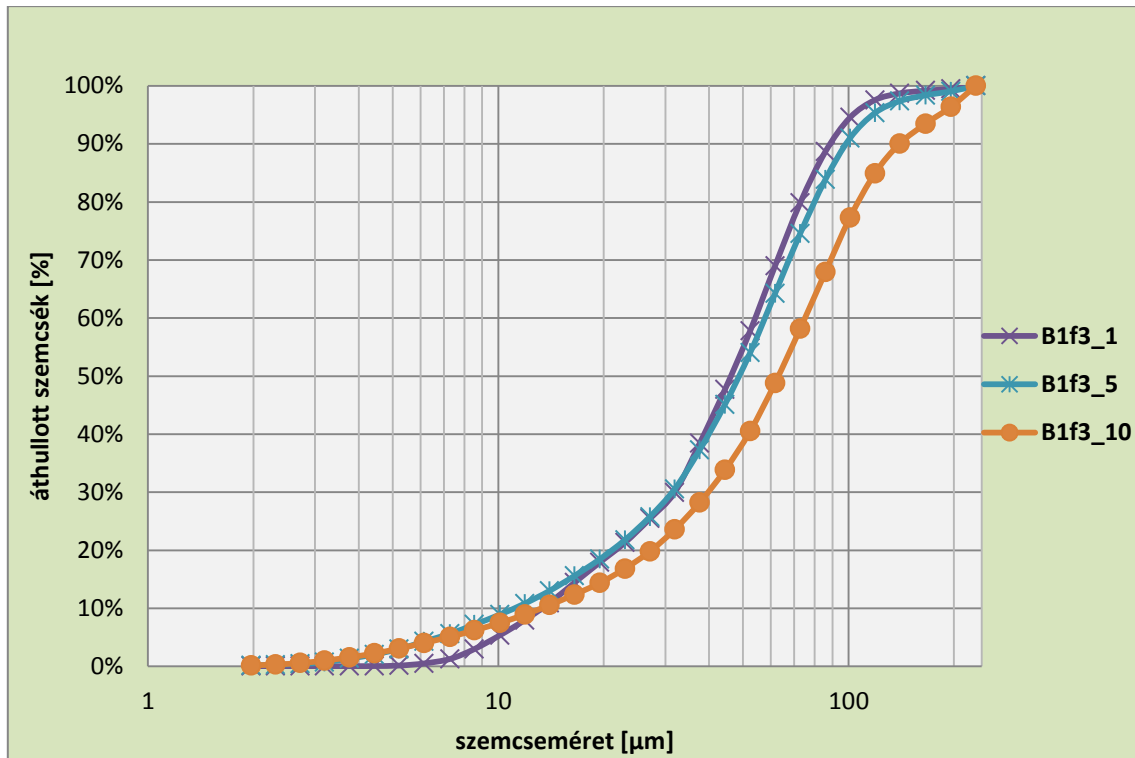
27. ábra: A sűrűségfüggvény mélység szerinti alakulása a júniusi drávaszabolcsi mérés harmadik függélyében



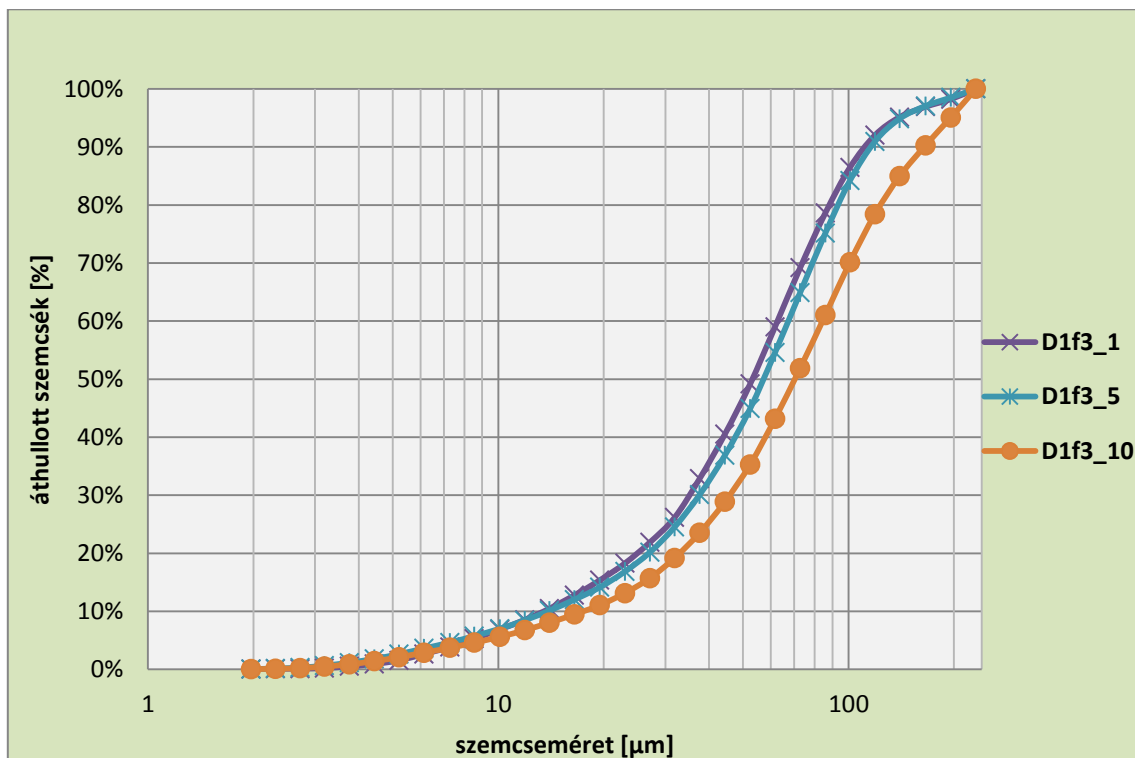
28. ábra: A sűrűségfüggvény mélység szerinti alakulása az augusztusi barcsi mérés harmadik függvényében



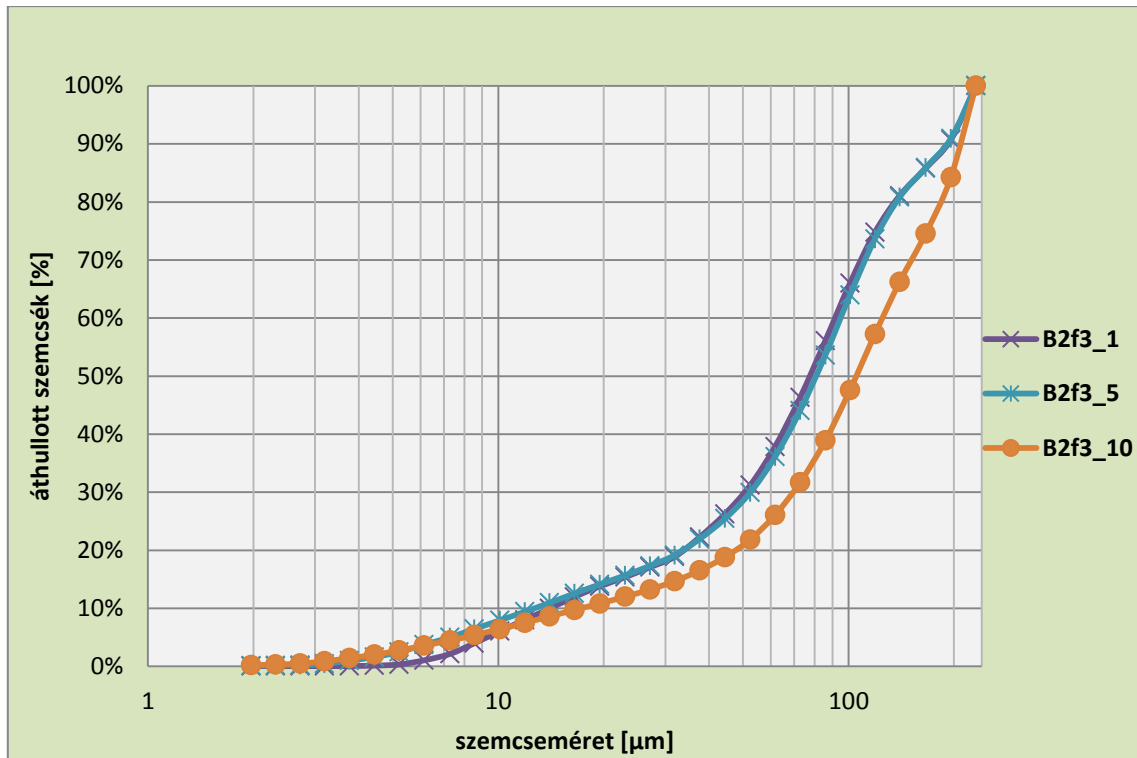
29. ábra: A sűrűségfüggvény mélység szerinti alakulása az augusztusi drávaszabolcsi mérés harmadik függvényében



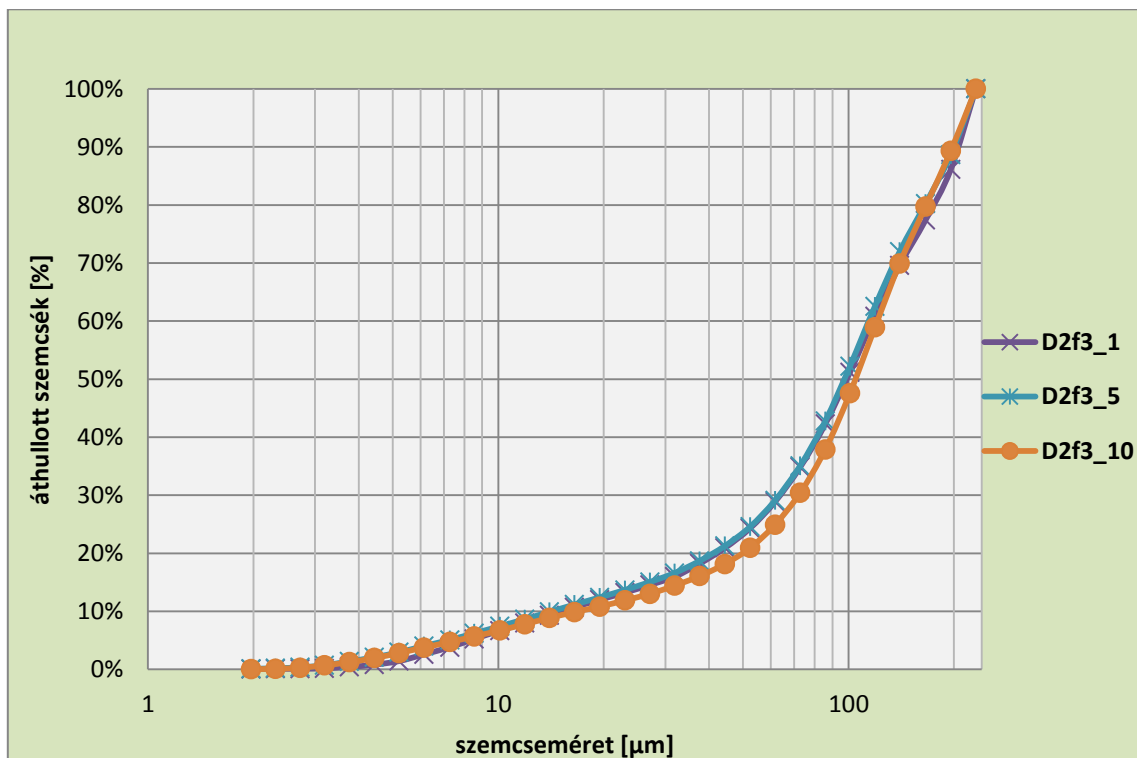
30. ábra: A szemeloszlások mélység szerinti alakulása a júniusi barcsi mérés harmadik függvényében



31. ábra: A szemeloszlások mélység szerinti alakulása a júniusi drávaszabolcsi mérés harmadik függvényében



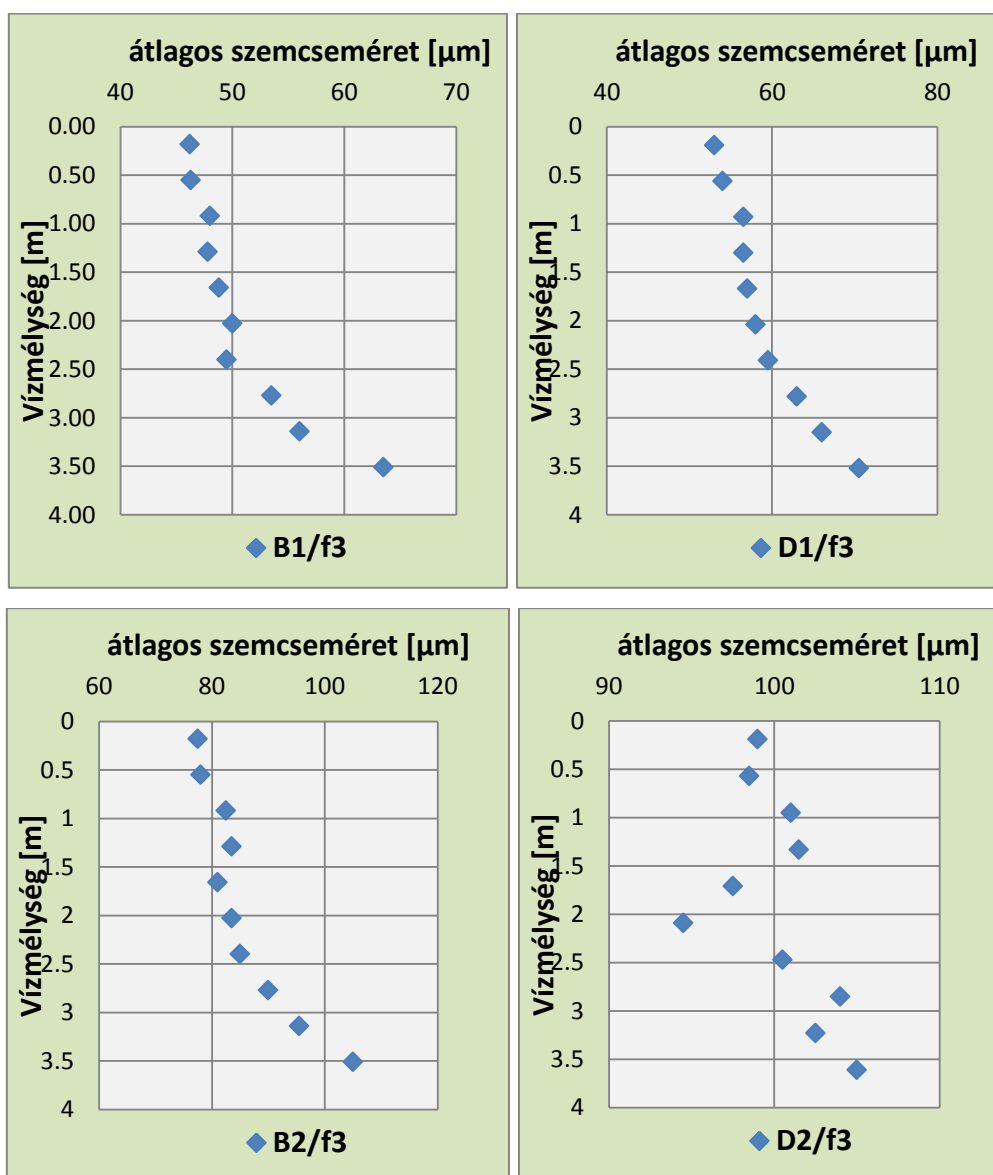
32. ábra: A szemeloszlások mélység szerinti alakulása az augusztusi barcsi mérés harmadik függvényében



33. ábra: A szemeloszlások mélység szerinti alakulása az augusztusi drávaszabolcsi mérés harmadik függvényében

Minden függvény a tapasztalatoknak megfelelően alakult, tehát vízhozamtól és helyszíntől függetlenül a szemcseméret növekedése látszik a fenék felé haladva.

A szemcseméret változásának egy másik, talán könnyebben értelmezhető módja a D_{50} értékek függőleges menti változásának elemzése. Ennek alakulása az előzőekben bemutatott szemeloszlási görbe függvény menti változásának megfelelően alakul, tehát itt is lefelé történő növekedés figyelhető meg (34. ábra), ám néhány pont esetében nagymértékű az eltérés, ami valószínűleg a mért adatok nagyobb szórásából (pl. hordalékban gazdagabb vagy szegényebb „csomagok” érkezése a mérés alatt) adódhat. A szemcseméret változása 20-40% körüli és ránézésre egy hatványfüggvénnyel közelíthető. Későbbi vizsgálatok tárgyát képezheti az eloszlások függvénnyel való leírása és a kapott függvényparaméterek elemzése.



34. ábra: D_{50} értékek a vízmélység függvényében

5. ADCP mérésből származtatott töménység adatok

A lézeres elvű mérés egyik nagy előnye az eddigi módszerekkel szemben a mérési pontok nagy száma, és gyors feldolgozási lehetősége. Kihhasználva ezeket az előnyöket, felvetődik az ADCP általi lebegtetett hordaléktöménység meghatározási eljárás felülvizsgálatának és esetleges finomításának lehetősége (az eljárás részletes leírását mutatja be Baranya és Józsa (2009) cikke). Ennek lényege, hogy az ADCP a hagyományos sebességmérés mellett egy, a későbbi adatfeldolgozás során egyelőre kevésbé felhasznált információval is szolgál, mégpedig a visszavert hangjel erősségével (35. ábra). A hang vízben való terjedésének fizikáját régóta kutatják és ismert, hogy a vízben utazó szilárd szemcsékről, vagyis a hordalékról, visszaverődő jel erőssége közvetlen kapcsolatban áll a hordalék töménységével. Az alapösszefüggés, melyre az egész becslési eljárás épül, a következő:

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

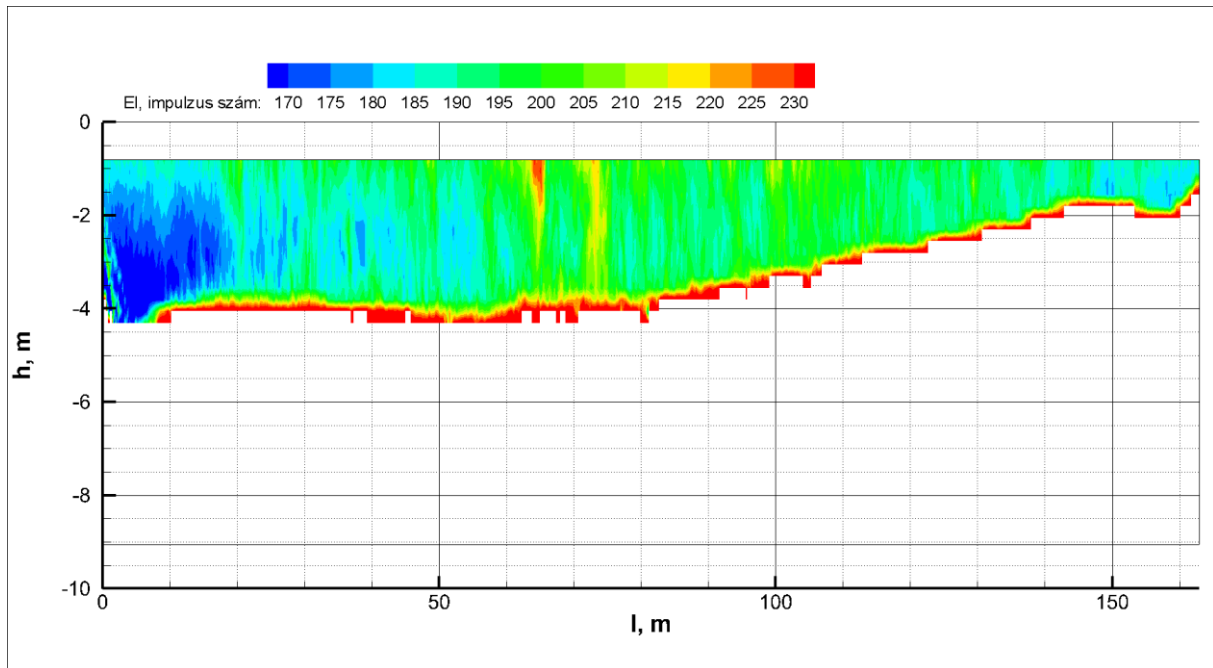
Ahol:

SSC – a lebegtetett hordalék töménysége[mg/l]

A és B – függvény állandók

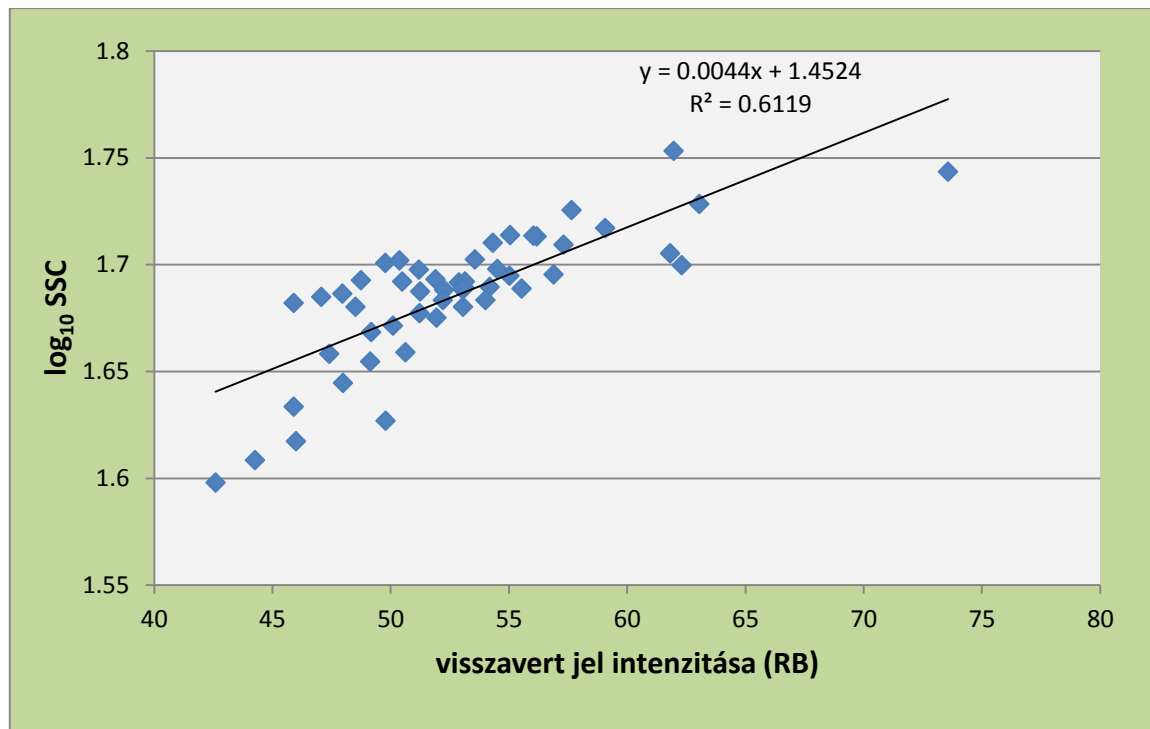
RB – relatív visszavert jelerősség [dB]

Az eljárás lényege tehát, hogy ismert (az ADCP mérésből származtatott) relatív hangjel erősség alapján a mérési cellákban számíthatóvá válik a lebegtetett hordalék töménysége, amennyiben a kapcsolatot leíró függvényparaméterek, A és B , ismertek. Látható, hogy ha rendelkezésre állnak az ADCP méréssel párhuzamosan végrehajtott hordalék mintavételek (mint pl. a lézeres elvű mérés), akkor a mért hordaléktöménység és az ADCP adatokból számított RB értékek által szolgáltatott értékpárok lehetőséget adnak egy függvényillesztéssel A és B meghatározására, vagyis a módszer kalibrálására. A fenti összefüggéssel ezután az ADCP adatok önmagukban átszámíthatók hordaléktöménységre.



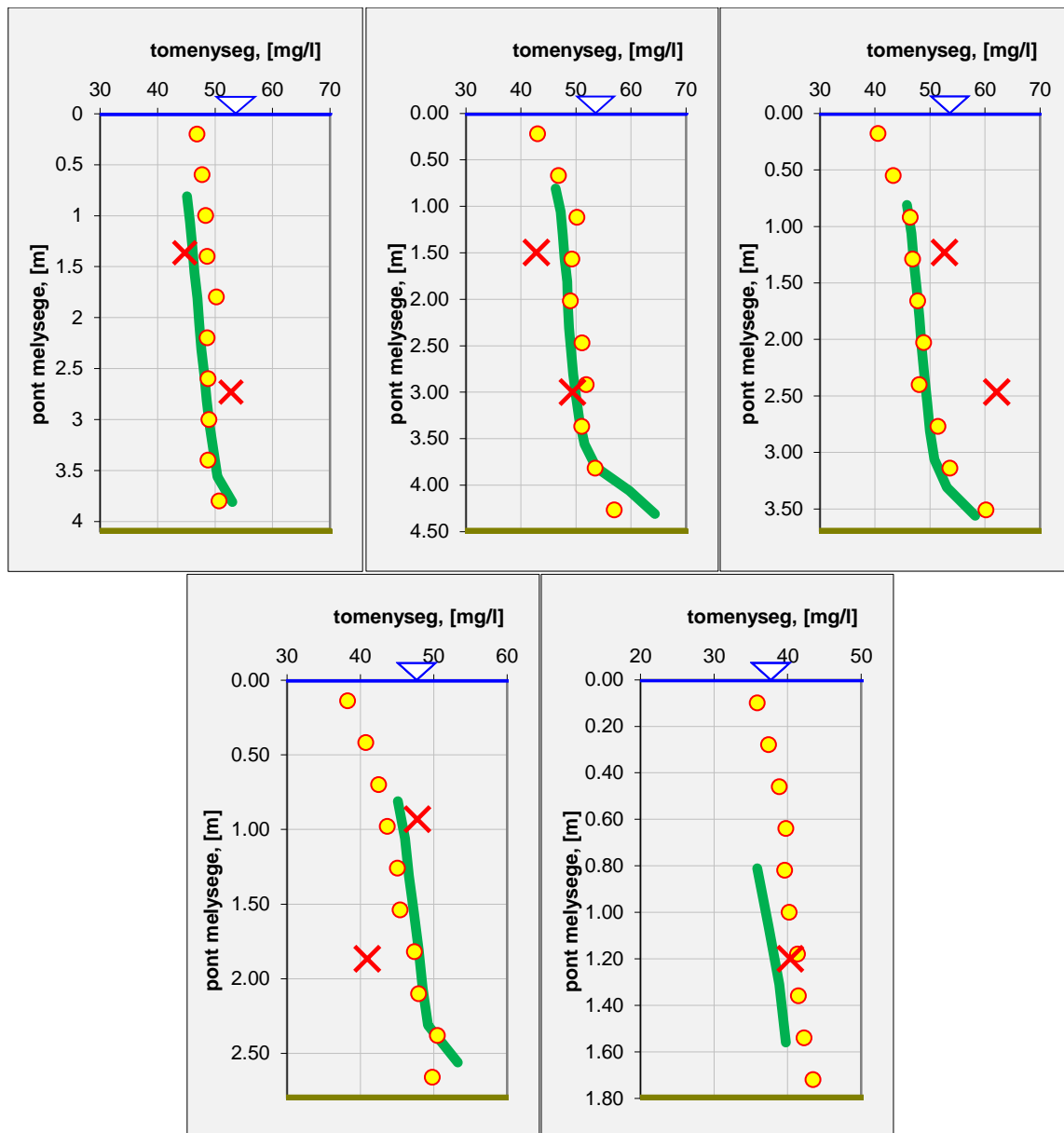
35. ábra: Az ADCP által mért visszavert jel erőssége (itt még a nyers formátumban, impulzus számban megadva) a keresztmetszvény mentén

Első lépésben tehát meg szeretnénk határozni A és B állandók értékét, melyeket számos tényező befolyásol. Fontosnak tartom megemlíteni azt, hogy a becslési eljárás, mérési körülmény függő, így egy kalibrálás során nem tudunk egy általánosítható összefüggést felállítani. Mivel rendelkezésre állnak ismert töménységű pontok (a Lisst mérésekből) és ugyanezeknek a függvényeknek a közvetlen környezetére kinyerhetők a visszavert jelerősség adatok az ADCP mérésből, a kérdéses függvényparaméterek meghatározhatóvá válnak egy több lépésből álló procedúra során. Első lépésben kinyertük az ADCP mérésekből a hordalék mintavételi függvények körüli 10 m-es környezetben mért visszavert hangjel intenzitás adatokat és minden mélységben átlagoltam azokat. A korábban hivatkozott cikkben leírt lépéseket végrehajtva előállítottam az azonos pontokhoz tartozó visszavert hangjel erősség és Lisst által mért töménységek adatokat, ami alapján elkészíthető egy grafikon. Az Excel program trendvonal opcióját felhasználva (ami nem más, mint a legkisebb négyzetek elve alapján illesztett egyenes) megkaphatjuk A és B értékeit (36. ábra). A grafikonon a töménységek 10-es alapú logaritmusra képezi a függőleges tengelyt, míg a visszavert jelerősség adatok a vízszintest. A kapott pontokra egyenest illesztünk, melynek függőleges tengellyel való metszete adja B értékét, meredeksége pedig szolgáltatja A -t.



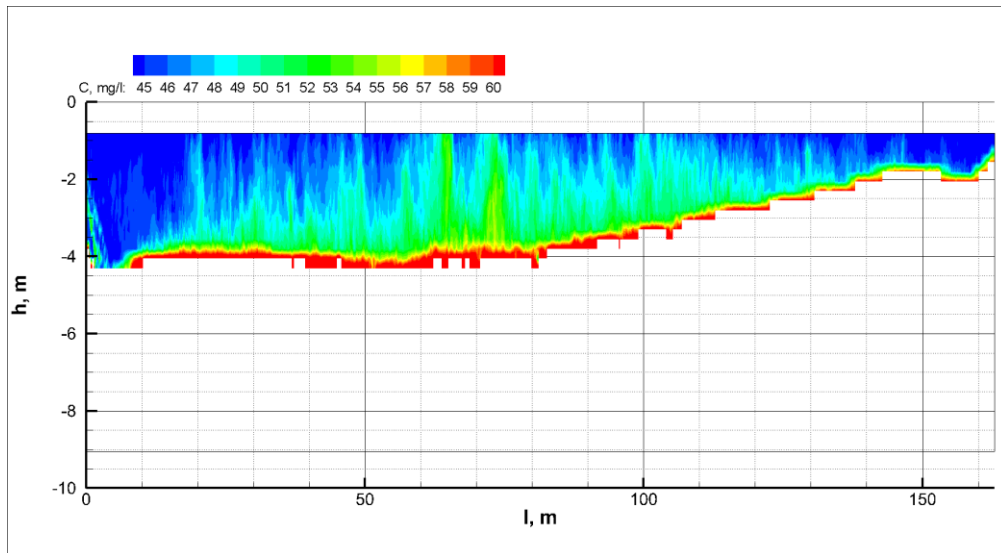
36. ábra: Töménység és intenzitás adatpárok

A nagyszámú mérésnek köszönhetően meglehetősen sok adatpárral rendelkezünk, így vélhetően pontosabb eredményt kapunk, mint a hagyományos hordalék mintavételi módszerek esetében, ahol függvényként két töménység, tehát mindössze két adatpár volt. Az állandók ismeretében az ADCP mérésekből kinyert jelerősség adatok átszámíthatók töménységre, így pl. egyszerűen előállíthatók a hordalékmérési függvényekben az ADCP adatok alapján becsült töménységeloszlások (37. ábra).



37. ábra: A kalibrált A és B függvényállandókkal kapott töménységprofilok mérésekkel való összehasonlítása (zöld vonal: ADCP adatok alapján tett becslés)

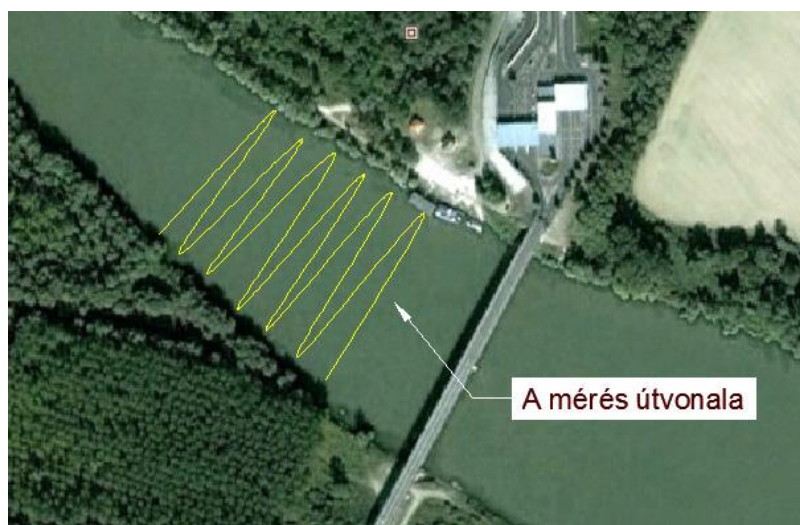
Látható, hogy egyedül a jobb part közelében lévő függély esetében mutatkozik némi eltérés, ám ez is 5-10% körüli különbséget jelent, ami a vizsgálat jelen stádiumában elfogadható. Az így ellenőrzött becslési eljárás kiterjeszhető a teljes mérési keresztmetszelyre, az összes ADCP által mért adat átszámításával, aminek köszönhetően a teljes keresztmetszet menti töménységeloszlás megkapható (38. ábra).



38. ábra: Töménységeloszlás a keresztmetszet mentén

A vörössel jelölt területek szépen mutatják, hogy a meder közelében a legnagyobb a koncentráció, felfelé haladva pedig egyre csökken.

Amennyiben a mérések a 39. ábra alapján történének, nemcsak keresztmetszvény menti eloszlást kaphatnánk, hanem gyakorlatilag egy folyószakaszra jellemző térbeli töménységeloszlást. A módszer nagyszerűsége tehát abban rejlik, hogy a részletes, de sajnos csak pontbeli lézeres hordalékadatok felhasználásával, és az ADCP adatok célirányos feldolgozásával egy hosszabb szakaszra kiterjedő ADCP mérés igen nagy részletességű információval szolgálhat a mérés idején jellemző hordalék töménység eloszlásokról. Javasolt tehát a két mérési módszer mindenkori párhuzamos használata, noha a lézeres elvű mérések adatai még további vizsgálatokat igényelnek.



39. ábra: A térbeli töménységeloszláshoz szükséges mérés útvonala

6. Összefoglaló értékelés

A kitűzött célok közül elsőként a Lisst, lézeres elven működő lebegtetett hordalékmérő eszköz által szolgáltatott eredmények helyességét vizsgáltam egy azzal megegyező helyen és egy időben végrehajtott hagyományos szivattyús hordalékmérés adatainak összehasonlító elemzésével. Itt vizsgáltam a két módszerrel kapott függőleges menti töménység eloszlásokat, valamint a szemeloszlási görbék alakulását is. Az eredmények azt mutatják, hogy bizonyos mértékű eltérések mutatkoztak a mért adatok között, ám ezek alapján konkrét következtetéseket levonása még elhamarkodott lenne, mert mindkét eljárás további vizsgálatokat igényel. Tudjuk azt, hogy valamekkora mértékű bizonytalanság terheli a szivattyús mérési eljárást is, hiszen több esetben is ellentmondásos adatokat szolgáltatott. Ennek egyik oka a mintavételi idő rövidege lehet, ami könnyen okozhat torz eredményt mind a töménységben, mind a szemeloszlásban. További bizonytalanságokat rejt magában az ülepítéssel való szemcseméret meghatározás is. A Lisst műszer esetében bemutatásra került, hogy mérőfej geometriai kialakítása, a mérési tapasztalat hiánya és a műszerbeállítások megfelelősége igényel további vizsgálatokat, finomításokat.

A vizsgálataim kiterjedtek arra is, hogy ha a meder közelében lévő ismert töménység alapján elméleti úton állítom elő a töménység függőleges menti eloszlását, vajon mekkora mértékű hibával terheli a hordalékmérési eljárást. Ezzel ugyanis arra kívántam rámutatni, hogy a teljes függvényben történő mérés helyett esetleg elegendő lenne egyetlen pontban ismerni a hordalék töménységet a meder közelében. Ebben az esetben az elfogadható „hibahatárnál” nagyobb eltérés mutatkozott, így a mérések leegyszerűsítése ezzel a módszerrel nem oldható meg.

Következő lépésben a lézeres mérésből kapott adatokat önmagukban vizsgálva elemeztem, hogy a tipikus viselkedést mutatják-e az adatok úgy, mint a szemcseméret változása kereszt- és függőleges irányban, továbbá annak vízhozamtól való függése. A várakozásoknak megfelelő tendenciákat tapasztaltam mindegyik vizsgálat során. Ez arra enged következtetni, hogy ha a Lisst eredmények bizonyos mértékben el is térnek a másik mérési eljárással kapott adatoktól, a hiba nem véletlenszerű, így akár a műszerbeállítások finomításával (pl. gyári konstansok) korrigálni lehetne.

Az dolgozat utolsó pontjában szemléltetett, az ADCP alapú hordaléktöménység becslési módszer rendkívüli módon megnövelné a térbeli adatok mennyiségét, ám az eljárás hátránya, hogy az ADCP önmagában nem alkalmas a mérésre. A méréshez szükségünk van kiegészítő, megbízható adatokra, melynek eredményeivel kalibrálni tudjuk a becslési eljárást leíró függvény paramétereit. Jelen állás szerint erre a célra legalkalmasabbnak a Lisst látszik, mivel nagyszámú mérési eredményeinek köszönhetően, megbízhatóbb alapadatokat szolgáltat, mint a hagyományos módszerek.

Végső következtetésként elmondható, hogy a bemutatott eredmények alapján szükségesnek tűnik a lézeres mérőműszer részletes laboratóriumi vizsgálata, mielőtt további terepi mérésre kerülne sor.

Irodalomjegyzék

1. Agrawal, Y.C. and Pottsmith, H.C., 2000. Instruments for Particle Size and Settling Velocity Observations in Sediment Transport. *Marine Geology*, 168(1-4): 89-114.
2. Baranya Sándor és Sokoray Varga Béla, 2002: Felszíni vizek térbeli sebességviszonyainak feltárása akusztikus doppler elvő mérési módszerrel: első alkalmazása a Duna szigetközi szakaszán (TDK dolgozat, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszék, Budapest, 2002).
3. Baranya, S.; Józsa, J.; Kéri B. (2008): „Methodological analysis of fixed and moving boat ADCP measurements on three Hungarian river reaches”, Fourth International Conference on Fluvial Hydraulics, River Flow 2008, Cesme, Turkey.
4. Baranya Sándor, Józsa János (2009): ADCP alkalmazása lebegtetett hordalék koncentráció becslésére. BME. Budapest
5. Batchelor, G.K. (1967). *An Introduction to Fluid Dynamics*. Cambridge University Press. ISBN 0-521-66396-2.
6. Józsa János, Baranya Sándor (2010): Hidromorfológia MSc. Oktatási jegyzet. BME. Budapest
7. Józsa János, Baranya Sándor (2010): Hidromorfológia MSc. c. tantárgy előadás- és gyakorlati diái. BME. Budapest
8. Rákóczi László (2005): Dr. Károlyi Zoltán élő hagyatéka. A Károlyi-féle görgetett-hordalék mintavevő - régen és most, *Hidrológiai Közlemények*, 85. évf. 4. sz. / 2005
9. Sági Rajmund (2010) A magyarországi Tisza egy reprezentatív szakaszának hidromorfológiai jellemzése. Tudományos Diákköri Konferencia. Budapest. BME
10. Tamás Enikő Anna (2010): A lebegtetett hordalékszállítás mérésének fejlesztési lehetőségei a Duna és a Tisza magyarországi szakaszán – előzetes eredmények
11. Vanoni, V. A. (1984). “Fifty years of sedimentation.” *J. Hydraul. Eng.*, 110(8), 1022–1057.