



Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszék

Rövidebb folyószakasz lebegtetett hordalékvándorlási dinamikájának térbeli elemzése különböző vízjárási állapotokban

TDK dolgozat

2020

Készítette: Decmann-Éles Dorottya

Konzulensek: Dr. Baranya Sándor (BME-VVT)

Pomázi Flóra (BME-VVT)

Dr. Török Gergely Tihamér (MTA-BME Vízgazdálkodási
Kutatócsoport)

Tartalmi kivonat

A lebegtetett hordalékvándorlás egy dinamikus folyamat. Mivel térben és időben is nagyon érzékeny és változatos jelenség, ezért vizsgálatánál, fontos, hogy megfelelő felbontásban lehessen vizsgálni. A hordalékvándorlás monitoringjának fejlesztése során a közelmúltban egyre inkább a korszerű, könnyen és gyorsan alkalmazható indirekt (akusztikus és optikai elven működő) hordalékmérési eljárások kerültek előtérbe. A dolgozatban bemutatásra kerül, hogy az eredetileg vízhozam- és áramlásmérésre alkalmazott terepi műszer, az ADCP (*Acoustic Doppler Current Profiler*) által mért ún. visszavert jelerősség kalibrálásával jelentős mértékben támogatható a lebegtetett hordalékvándorlás dinamikájának feltárása. Az eljárás egyik nagy előnye, hogy a terepi mérésekből a lebegtetett hordaléktöménység eloszlását mezőszerűen térképezni lehet, amely nagyban növeli a térbeli felbontást.

A dolgozatban esettanulmányként egy rövidebb Duna-szakasz (1606,5-1604,0 fkm) lebegtetett hordalékvándorlási dinamikájának térbeli elemzése került bemutatásra különböző vízjárási állapotokban. Az ADCP visszavert jelerősség kalibrálása fizikai mintavételezésből származó vízminták alapján történt. A kalibrált ADCP adatokból előállított hordaléktöménység-eloszlásokon keresztül bemutatható volt, hogy a leghordalékosabb zónák nem feltétlenül követik a legnagyobb sebességű részeit a folyónak, hanem a mintaterületen inkább a bal part mentén jelennek meg rendre a magasabb értékek, jóllehet a sebességeloszlás inkább egyenletesnek mondható.

Igyekeztem az eloszlás területi változékonyságát a sebességadatokból származtatott hordalékelragadó erő paraméteren keresztül vizsgálni, majd a lebegtetett hordalék szemösszetételi eredményeit is figyelembe vettem, de kielégítő választ nem találtam. A nagy részletességű mederdomborzati térkép alapján azonban azt a feltételezést fogalmaztam meg, hogy a szakaszon található mederformák okozta hidraulikai ellenállás és a mederanyag szemösszetétele vélhetően együttesen felel a lokális hordalékvándorlás bemutatott viselkedéséért.

1. Bevezetés

Napjainkban mind környezetvédelmi, mind vízépítési szempontból növekszik az igény a felszíni vízfolyásokban szállított szilárd anyag viselkedésének pontosabb megértésére, s az egyes vízfolyások esetén szállított hordalék mennyiségének minél pontosabb becslésére. Hazánkban és a Duna által érintett országokban jelenleg nincs egységesen kiépített hordalékmonitoring-rendszer (DanubeSediment 2019), pedig a hordalékvándorlás mérése kiemelten fontos egy folyam esetében. Az elmúlt időszakban hazai támogatású és Európai Unió forrásból is több projekt indult a hordalékviszonyok felderítésére. Regionális szinten is előtérbe kerültek ezek a kérdések, medermorfológiai vizsgálatok, hajózás, szennyezőanyagok szállítása és sok egyéb téma tekintetében. A hordalékháztartás feltérképezése és medermorfológiai elemzések céljából laboratóriumi és terepi mérések folytak a Duna két szakaszán (Tiszta Ivóvíz 2019), amelyek adatait dolgozatomban feldolgozom és értékelem.

Korábbi kutatásaim (Éles 2019) célja az egyes hordalékelemzési eljárások összehasonlító vizsgálata, valamint a kapott eredmények és tapasztalatok dokumentálása volt. Alapszakos diplomamunkámban a hazai vízügyi gyakorlatban is alkalmazott, illetve elérhető hordalékmérési eljárásokat vizsgáltam. A lebegtetett hordalékmérési eljárások két fő csoportba sorolhatók: közvetlen (direkt) és közvetett (indirekt) módszerek. Vizsgálataim során elsődleges célom az egyes módszerek alkalmazási lehetőségeinek és korlátainak feltérképezése volt. Eredményeim alapján bemutattam, hogy az indirekt módszerek megbízható, idő- és költséghatékony alternatívái lehetnek a hagyományos eljárásoknak.

A szakdolgozatom készítése során a *Tiszta Ivóvíz* projekt keretein belül vett vízmintákat elemeztem a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszék laboratóriumában. A projekt fő célja, hogy interdiszciplináris kutatásokat folytatva a parti szűrésű ivóvízellátást potenciálisan veszélyeztető, újonnan felfedezett kockázatok – és ezen kockázatok befolyásoló tényezők (hidrológiai és meteorológiai) – hatásait jellemezze. A projekt keretében a vizsgálatok során a budapesti ivóvízellátásért felelős északi és déli vízbázis mintaterületein a Dunától egészen a fogyasztói csapig vizsgálják a szennyezők útját. A Fővárosi Vízművek alacsony nyomású gravitációs kútvízgyűjtő hálózata és a nyomás alatti elosztó hálózat, más-más matematikai alapokon fekvő hálózathidraulikai modelleket használ, az ezek közötti kapcsolat jelenleg nem áll rendelkezésre. E kettő közötti kapcsolat megteremtésére lenne szükség. A kutatási projekt eredményeként

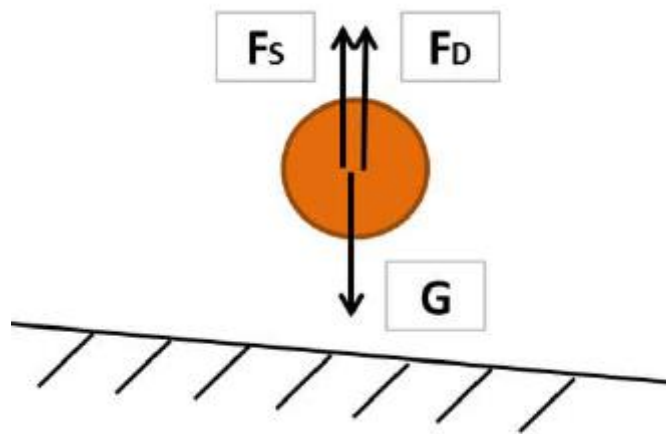
létrejövő összekapcsoló modell egyedülálló eszköz lenne a jövőbeli klímaadaptációs taktika kidolgozásánál. Az összekapcsoló modell a különböző klímaszenáriókat, hidrológiai állapotokat, valamint az ivóvízminőséget foglalná magába (Tiszta Ivóvíz 2018). A projekt keretén belül 12 hónapon keresztül rendszeres mintavételezés történik, ami 2019 elején indult meg. A sződligeti, illetve ráckevei mintaterületen a diplomafélévem alatt 10 mintavételezés történt, melyek során közel 450 mintát vettünk és elemeztünk.

Jelen dolgozatomban az előbb bemutatott kutatási munkámat folytatom egy további, részletes térbeli felbontású hordalékinformációkat ígérő módszer vizsgálatával. Az akusztikus elven működő, eredetileg áramlásmérésre kifejlesztett ADCP (*Acoustic Doppler Current Profiler*) műszer által mért visszavert jelerősség kalibrálásával előállítható a szelvény menti lebegtetett hordaléktöménység eloszlása, mellyel jelentősen támogatható a komplex, dinamikus hordalékvándorlási folyamatok feltérképezése és megértése. További előnye, hogy ezzel a mérési eljárással nagyvízes időszakokban is könnyebben lehet mérni a hordalékhozamot, amely időszakok felelnek jellemzően a nagyobb hordalékterhelésekért. Esettanulmányként a ráckevei Duna-szakasz hordalékvándorlása kerül elemzésre az ADCP mérések alapján becsült hordaléktöménység és sebesség adatok alapján, különböző vízjárási állapotokban.

2. Folyami lebegtetett hordalékvándorlás

Folyami hordaléknak nevezünk minden olyan szilárd anyagot, ami a vízfolyásokban a vízzel együtt mozog. A hordalék anyaga lehet ásványi és szerves. A szerves hordalék általában hulladékokból származik, aminek nagyobb jelentősége van a nagyvárosok környékén, hiszen a csatornahálózaton keresztül juthat be a folyó vizébe. Ezen szerves anyagok mozgása rendszertelen és előfordulásuk alkalmoszerű, ezért a hordalékvizsgálatokkor nem vesszük őket figyelembe (Bogárdi 1970). A folyami hordalékvándorlásnak két jól elkülöníthető fajtája van, a görgetett és a lebegtetett hordalékmozgás. A szerves hordalékok keletkezése kőzetek mállására vezethető vissza. A durva görgetett hordalék főleg kőzetek kisebb darabjaiból áll (kavicsok); míg a finom szemű, lebegtetett hordalékban megjelennek az ásványi anyagok kristályai is (Bogárdi 1970; Szombati 2016). A természetes hordalék különböző összetevőkből áll, ilyen a már az előzőekben is említett ásványi anyagok és apró kőzetdarabok a forrásanyag elaprózódásából származva, az agyag ásványok, a csapadék, valamint a szervesanyagok (UNESCO 1983).

A 0,002 mm-nél nagyobb szemnagyságú anyagot tekintjük hordaléknak a mérnöki gyakorlatban. A Brown-féle mozgást végző apró szemcséjű anyagokat (melyek 0,002 mm-nél kisebbek) és a vízben oldott anyagokat már nem nevezhetjük hordaléknak. A hordalékszemcsék alakja lehet éles vagy gömbölyű, egészen gömbszerű, de akár teljesen lapos, illetve már lekopott éllel is rendelkezhet attól függően mekkora utat tett meg a folyóban. A lebegtetett hordalék mozgása nagyon összetett. A lebegtetett hordalék a gravitációs erő hatására folyamatosan ülepedni szeretne, amiből az következik, hogy a nehézségi erő hatásával ellentétesen működő erők ellensúlyozzák, ezzel fenntartva a tartós lebegést, valamint a leülepedett részecskéket újabb lebegésbe kerülő részecskék pótolják. A lebegtetett hordalék mozgására vonatkozó valamennyi elméletet, természetes vízfolyásokban, permanens állandó állapotra kell értelmezni (Bogárdi 1970). Egy lebegtetett hordalékszemcsére három erő hat függőlegesen (1. ábra): gravitációs erő (G), hidrosztatikus (F_s) és hidrodinamikus (F_D) felhajtóerők.



1. ábra: Egy lebegtetett hordalékszemcsére ható erők (Baranya és társai 2017)

Ha ezek az erők kiegyenlítik egymást (eredőjük zérus), akkor a hordalékszemcsé se nem akar ülepedni, se nem emelkedik folyamatosan, tehát tökéletesen lebeg. Mivel a gravitációs erőt és a felhajtó erőt mélység függvényében gyakorlatilag konstansnak feltételezhetjük, így belátható, hogy a lebegtetett hordalékszemcsék mozgásáért a hidrodinamikus felhajtóerő felel. A hidrodinamikus felhajtóerő az áramló vízrétegek között létrejövő turbulens örvények hatására keletkezik. Ezen turbulens áramlatok energiája a folyók sebességével van összefüggésben, ezért elmondható, hogy egy folyó minél sebesebben folyik, annál több és nagyobb szemcseméretű hordalékot képes szállítani és lebegésben tartani. Mivel a hordalékszemcséket vízszintes erő a sebességen kívül nem éri, a részecske áramlási sebessége megegyezik a víz sebességével és irányával (Baranya és társai 2017).

A folyami lebegtetett hordalék a vízgyűjtő területen, illetve a mederben egyaránt keletkezhet. A vízgyűjtőn végbemenő eróziós folyamatokat a vízgyűjtő domborzati, kőzet-, illetve talajfizikai tulajdonságai jelentősen befolyásolják. A kemény kőzetek nehezen, míg a puhák könnyebben erodálódnak, ezek mellett pedig az antropogén behatások és a növényzet is befolyásolja a kőzetek aprózódását. Az áramlás mozgási energiájának, eróziós potenciáljának, hordalékszállító képességének, a meder és a partok anyagának függvényében a folyó lebegtetett hordaléka saját medrében is keletkezhet (Baranya és társai 2017). A Duna vizsgált szakaszán felkeveredés és kiülepedés dinamikus váltakozása tartja fent a morfodinamikai egyensúlyt.

2.1. A lebegtetett hordalék tulajdonságai

Aktuális vizsgálati eredmények (DanubeSediment 2019) azt mutatják, hogy a jelenlegi magyar (és a Duna által érintett országok többségének) hordalékmonitoring-rendszer fejlesztésre szorul. A lebegtetett hordalék mozgásának viselkedését közvetlenül nem lehet leírni, így direkt módon, pontbeli vízminták elemzésének eredményeit terjesztjük ki először egy szelvényre, majd egy szakaszra, végül a folyó teljes hosszára. Fontos, hogy az egységesen alkalmazott hordalékvizsgálati módszerek úgy legyenek kialakítva, hogy az mindenki számára egyértelműen alkalmazható legyen, és egy egységes rendszer alakuljon ki a mérési eljárásokra (DanubeSediment 2019, Pomázi és társai 2020).

A hordalékviszonyok minél pontosabb, részletesebb feltérképezése érdekében a lebegtetett hordalék alábbi paramétereit szükséges meghatározni (Haimann és társai 2014, Baranya és társai 2017):

- koncentráció (hordaléktöménység) (mg/l, g/m³),
- hordalékhozam (kg/s, t/év),
- szemösszetételi jellemzők (szemösszetételi görbe, karakterisztikus szemátmérők (pl. D₅₀ közepes szemátmérő), az egyes frakciók aránya stb.),
- idő- és térbeli változékonyság.

A vízmintában lévő lebegőanyag koncentrációját a szárazanyag, tehát a szilárd részecskék tömegének és a minta teljes térfogatának a hányadosa adja:

$$SSC = \frac{m_s}{V}$$

ahol: SSC a minta lebegtetett hordalék-koncentrációja,

m_s a mintában található szilárd részecskék tömege,

V a vízminta térfogata.

A lebegőanyag fajlagos hordalékhozama azt mutatja meg, hogy a folyó egy adott pontján egységnyi idő alatt mennyi szárazanyag halad át. A következőképpen határozzuk meg értékét:

$$q_s = v \cdot SSC$$

ahol: q_s a fajlagos hordalék mennyisége (g/sm^2),

v az áramlási sebesség (m/s),

Ha a teljes szelvényen átáramló hordalék hozamát akarjuk meghatározni, akkor a fajlagos hordalékhozamot a szelvény területe mentén (először a függély, majd a szelvény szélessége mentén) integrálni kell:

$$Q_s = \int \int q_s \cdot dh \cdot dB$$

ahol: Q_s a szelvény menti teljes lebegtetett hordalékhozam (kg/s),

h a függély mélysége (m),

B a szelvény szélessége (m).

Mivel a hordalékhozam nem csak térben, de időben is változik, a hordalékhozamot időben is lehet integrálni, s meg lehet határozni például az éves hordalékhozamot (Baranya és társai 2017).

2.2. Lebegtetett hordalékmérési eljárások

Korábbi diplomamunkámban (Éles 2019) a különféle direkt és indirekt lebegtetett hordalékmérési eljárásokat részletesen bemutattam, s vizsgáltam alkalmazási lehetőségeiket, illetve kísérletet tettem a bennük rejlő bizonytalanságok feltárására, számszerűsítésére is. Ebben a fejezetben röviden áttekintem az egyes módszereket, valamint korábbi munkám eredményeit.

A lebegtetett hordalékmérési eljárásokat két fő csoportba lehet osztani: a direkt (közvetlen) és az indirekt (közvetett) mérési módszerekre. A hazai vízügyi ágazatban jelenleg is alkalmazott hagyományos módszerek (szűrőpapíros és evaporációs módszer) közvetlen eljárások, melyek

során a vízmintákban található szilárd részecskéket valamilyen fizikai módszer segítségével (szűréssel vagy párologtatással) először kinyerik a vízből, majd a szilárd anyag tömegének és a vízminta térfogatának ismeretében meghatározzák a hordaléktöménységet. Az indirekt eljárásokat működési elvük alapján további két nagy csoportba soroljuk: akusztikus és optikai elven működő eszközök. Mindkét fajtának vannak terepi és laboratóriumi változatai is, s míg a terepi eljárások jellemzően in-situ módszerek, addig a laboratóriumi eljárások a direkt eljárásokhoz hasonlóan vízminta megvételét igénylik.

A mintavételezés során ügyelni kell arra, hogy zavartalan minta kerüljön a mintavevőbe. A terepi mérések során a mintavétel az US P61-A1 izokinetikus mintavevővel, a mintavételi pontok kiválasztása pedig az ún. többpontos mérési eljárás alapján történt. A műszer izokinetikus kialakítása biztosítja, hogy a beáramló víz sebessége megegyezzen a folyó áramlási sebességével, amely magával vonja a folyóvíz és a megvett vízminta hordaléktöménységének egyezését is. A többpontos méréssel az biztosítható, hogy az egyes függvényekből vett minták hordaléktöménységének átlaga már önmagában mélységátlagolt legyen, s így ne kelljen a mélység mentén integrálni. A mintavételi pontok vízfelszíntől vett távolsága a teljes vízmélység (H) ismeretében határozható meg, például az 5-pontos mérés esetén 0,05H, 0,20H, 0,60H, 0,80H és 0,95H mélységekben történik mintavétel. (Baranya et al, 2017)

2.2.1. A hagyományos szűrőpapíros eljárás

Az általam elsősorban vizsgált és bemutatásra került közvetlen hordalékmérési módszer a szűrőpapíros eljárás. Az eljárás során egy pozitív nyomású (az atmoszférikus nyomás többszörösét) vízsűrő berendezést használva engedjük át a szűrendő vízmintát egy, a lebegtetett hordalék szemösszetételének megfelelő pórusméretű szűrőpapíron, melynek következtében a vízben levő lebegtetett hordalék fennmarad a szűrőpapíron (Éles 2019). Ebből az következik, hogy ez a legbiztonságosabban alkalmazható eljárás a lebegtetett hordalék mérésére, hiszen ilyenkor elméletileg nincs lehetőség szárazanyag-vesztésre. A különféle lebegtetett hordalékmérési eljárások összehasonlító vizsgálata során így az ezen eljárásból kapott eredményeket vettem referenciának, hiszen ez az eljárás megbízhatónak tekinthető (Éles 2019). A szűrőpapíros eljárás közepesen időigényes - míg maga a szűrés egy percet vesz igénybe, az eszközök tisztántartása, a membránszűrők tényleges tömegének lemérése, a szárított minták mérésének elvégzése viszonylag hosszadalmas folyamat. Az eljárás egyes lépéseinek során azonban sorra halmozódhat az emberi hiba lehetősége is.

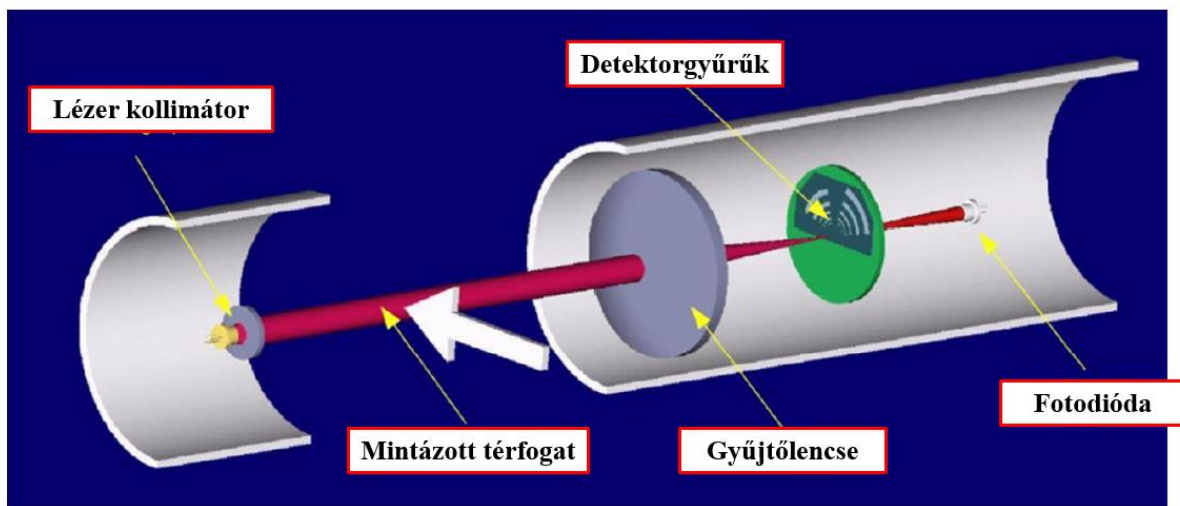
2.2.2. Indirekt eljárások

A közvetett (indirekt) hordalékmérési eljárások során a vizsgált víz keresett paramétereit a műszer által kibocsátott és a folyóvízi közegből visszaérkezett jel erősségében bekövetkezett változások elemzése alapján becsüljük. Az indirekt eljárások két fő csoportja az akusztikus elven működő eszközök és az optikai elven működő eszközök. Az akusztikus eszközök hang-, míg az optikai eszközök fényhullámokat bocsátanak a vízmintába, s a hang- illetve fényterjedés törvényszerűségeinek ismeretében meghatározható a hordaléktöménység, s egyes műszerek még a szemösszetételről is információval szolgálhatnak. Az ilyen elven működő eljárásoknál mindenképpen kalibrációt kell alkalmazni, a közvetlen módon vett mintákból kinyert adatokat referenciaértéknek véve (Csiti 2016). Alkalmazásukat tekintve fontos kutatási eredmény (Agrawal 2016), hogy a 30 μm -nél kisebb szemcséket az optikai, míg a 30 μm -nél nagyobb szemcséket az akusztikus eszközök képezik le megbízhatóbban. További jelentős alkalmazásbeli különbség, hogy az optikai eszközök igen érzékenyek az algásodásra, míg az akusztikus eszközöket ez a hatás kevésbé érinti. Közelmúltbeli kutatások (Éles 2019, Pomázi és Baranya 2020a, Pomázi és Baranya 2020b) alapján azonban elmondható, hogy a körültekintően kalibrált indirekt eszközök megbízhatóan alkalmazhatók lebegtetett hordalékmérésre.

Optikai módszerek

Az optikai elven működő eszközök a fénytörés jelenségének törvényszerűségeit felhasználva működnek (Downing 2006, Agrawal és társai 2008). Amennyiben a fényhullám másfajta optikai sűrűségű közeg határára érkezik, az új közeg határán a fény szóródik vagy visszaverődik (Downing 2006). Az optikai eszközök a vízmintán áthaladó fénysugarak és a közegben levő hordalékszemcsék kölcsönhatását elemzik, a fénysugár jellemzőinek változása alapján tesznek becslést a vízminta hordaléktöménységére (Csiti 2016). Az optikai eszközöket csoportosíthatjuk az általuk kibocsátott fény típusa alapján: vannak lézerdiffrakciós (lézerfény szóródásán alapuló), s vannak az infravörös fény szóródásán alapuló eszközök, valamint mindkét típus lehet in-situ vagy laboratóriumi elemzésre alkalmas változata (Gray és Gartner 2009). Szakdolgozatomban a LISST-Portable|XR lézerdiffrakciós műszert, illetve a VELP TB1 kézi zavarosságmérőt teszteltem laboratóriumi elemzéseim során. A két eszköz rövid ismertetése alább olvasható.

A LISST Portable|XR lézerdiffrakciós műszer laboratóriumi elemzés célját szolgálja, ám hordozható, s megfelelő körülmények mellett terepen is használható (Sequoia 2015). A lézerfény kis hajlásszögű szóródását elemzi, működési elve (ld. 2. ábra) a következő: a lézerfény áthalad a meghatározott mennyiségű lebegtetett hordalékos vízmintán (jelen esetben 117 ml), majd a lézer eléri a gyűjtőlencsét, ami továbbítja a szóródott fényt a koncentrikusan elhelyezett detektorgyűrűkre. A detektált fény szóróterülete határozza meg a mintában levő szemcseméreteket, tehát az egyes detektorgyűrűkre különböző mennyiségű fény jut. Innen megfelelő módszerrel visszaszámolható a tömegkoncentráció. Az eszköz különleges abból a szempontból, hogy különböző szemcseméreteket tud detektálni, s az egyes szemcseméret-tartományokhoz tartozó előfordulási gyakoriság alapján meghatározza a szemeloszlást, illetve egyéb szemösszetételi információkat (pl. karakterisztikus szemátmérők) is szolgáltat. (Sequoia 2017)



2. ábra: A LISST-Portable|XR működési elvének ábrája (Sequoia 2017 alapján)

Érdeemes megjegyezni, hogy nem csak laboratóriumi kereteken belül lehet alkalmazni, de a terepi méréseket illetően korlátai vannak (Pomázi és Baranya 2020b). Az eszköz beállításait körültekintően kell megválasztani, a műszer által alkalmazott optikai modellek az általános lézerdiffrakciós szemcseméret-analízis alapelvein és az ISO 13320-1 Standard szabványon alapszanak. (Sequoia 2015)

A Velp TB1 kézi zavarosságmérővel a vízminták zavarossága határozható meg. A műszer Nefelometriás Zavarossági Egység (NTU, *Nephelometric Turbidity Units*) mértékegységben mutatja ki a mért eredményeket, ezért mindenképpen kalibrálni szükséges. A zavarosságmérő működési elve az, hogy infravörös fényt (850 nm) bocsát a mintába, amit a lebegő részecskék szétszórnak. Először 90°-ban törik meg a fény, majd egy kúpos tükörről 360°-ban visszaverődik

a mintába és csak ez után jut a fény az érzékelőbe. Minél zavarosabb a minta, annál több fény szóródik, amit a fotocella érzékel. Méréstartomány 0 és 1000 NTU között van, pontossága $\pm 2\%$ a 0 és 500 NTU közötti tartományon, $\pm 3\%$ pedig 501 és 1000 NTU között (VELP).

Az eszköz kis helyen elfér, vízálló, kopásálló és könnyű, ezen tulajdonságai lehetővé teszik, hogy akár helyszíni mérések során is használni lehessen. A kezelése könnyen átlátható, gyorsan eredményt ad (Éles 2019). A lebegtetett hordalék és a vízminta színe igen jelentős a szóródó fény észlelésében. Egy színes folyadék elnyeli a fényenergia bizonyos részét a látható spektrumban és megváltoztatja mind a sugárzó, mind a szóródó fényt, amivel megakadályozza, hogy a szóródó fény egy része eljusson az érzékelőbe (Sadar 1998). A vízminta színén túl további bizonytalanságokat eredményez az elemezhető vízminta kis térfogata (10 ml), valamint az a tény, hogy nem tudja figyelembe venni az inhomogén szemösszetételt (Éles 2019, Pomázi és Baranya 2020a-b).

Akusztikus módszerek

Az akusztikus műszerek működési elve (akusztikus elmélet; pl. Thorne és társai 1991, Gartner 2004) igen hasonló az optikai műszerekéhez. Az eszközök az általuk kibocsátott magas frekvenciájú (rövid hullámhosszú) hanghullámok visszaverődésének mérésével alkalmasak az apró méretű lebegtetett hordalékszempcsék észlelésére. Az akusztikus műszerek a hanghullám visszaverődésének erősségéből a mért közeg koncentrációjára, a hullám visszaverődésének idejéből pedig a szempce és a detektor közötti távolságra tud következtetni (Baranya et al, 2017). Korábbi munkám (Éles 2019) során a LISST-ABS akusztikus műszer tesztelésére volt lehetőségem.

A LISST-ABS műszer kialakításának köszönhetően in-situ használható, így már a terepen azonnali, pontbeli eredményeket kaphatunk. A műszert minden esetben kalibrálni szükséges. A pontbeli méréseket folyamatosan tudja elvégezni, majd az eredmények vonalként megjeleníthetők, aminek segítségével a profilmenti adatokat könnyen lehet ábrázolni (Baranya és társai 2017). További előnye, hogy nagy koncentráció esetén is biztonságosan használható (Agrawal 2016, Csiti 2017), valamint az a tulajdonsága sem hanyagolható el, hogy kvázi-folyamatos, mozgóhajós mezőszerű (és térbeli) mérésre alkalmas lehet (Baranya és társai 2017).

A közelmúltban mind előtérbe kerültek az eredetileg áramlásmérésre kifejlesztett ADCP műszer méréseiből kinyerhető, a lebegtetett hordalékviszonyokra jellemző többletinformációk

kinyerésére irányuló törekvések (pl. Guerrero és társai 2011, Agrawal és Hanes 2015, Guerrero et al. 2016). Az ADCP által mért visszavert jelerősség szoros kapcsolatban áll a lebegtetett hordaléktöménységgel – minél nagyobb a hordaléktöménység, annál több szemcséről tud visszaverődni a műszer által kibocsátott hangjel, annál erősebb a visszavert jelerősség. A visszavert jelerősség kalibrálása (ld. 3.2. fejezet) az ún. szonár-egyenlet (Gartner 2004) alapján történik. Egy mozgóhajós méréssel a teljes szelvény menti hordaléktöménység-eloszlást fel lehet térképezni, mely a többi módszer térbeli felbontásához képest jelentősen részletesebb képet ad. Mivel a hazai vízügyi gyakorlatban is rendszeresen alkalmazzák áramlásmérésre, a kalibrálásával, majd pedig az így kapott mérési eredmények feldolgozásával hasznos ismereteket lehetne szerezni hazai vízfolyásaink hordalékviszonyairól, s lehetővé válna komplex jelenségek (pl. elkeveredés) vizsgálata is.

3. Kutatási módszertan

Dolgozatomban az ADCP visszavert jelerősség kalibrálását végzem el egy dunai mintaterületre, majd az esettanulmányon keresztül elemzem egy rövidebb folyószakasz lebegtetett hordalékvándorlásának térbeli dinamikáját különböző vízjárási állapotokban.

3.1. Az ADCP műszer bemutatása

Az ADCP egy olyan akusztikus műszer, amely gyorsan és egyszerűen méri az áramlási jellemzőket (áramlási sebesség, vízhozam). A hagyományos ADCP vertikális kialakítású, terepi mérés során úgy kell rögzíteni a mérőhajóra, hogy a víz teljesen ellepje a műszert. Folytonos mérésre alkalmas - miközben a hajó megfelelő sebességgel végigmegy a szelvényen, rögzíti a diszkrét pontokra becsült sebesség és vízmélység adatokat. Az eszköz működése közben folyamatos GPS adatrögzítés is történik a későbbi adatfeldolgozás érdekében. (Baranya et al, 2017)

A Doppler-elven működő mérőeszközök többnyire a víz mozgását méri úgy, hogy a hang akusztikus tulajdonságait felhasználva fix frekvenciát sugároznak a vízbe. Az eszköz méri a fázis- vagy a frekvenciaváltozását a hangnak, ami a vízben lebegtetett anyagról (szerves vagy szervetlen) visszaverődött és a visszhangokat a kibocsátott hang irányával megegyező sebességekkel alakítja. Ezután az ADCP ezeket a sebességeket északi/déli, keleti/nyugati és függőleges sebességkomponensekké alakítja. A sebességprofilok úgynevezett hatótávolság-

korlátozás által vannak meghatározva (tehát a visszavert jel szegmensekre van bontva), így a sebességek előre meghatározott intervallumokban vannak mérve az akusztikus út mentén (amit mélységi celláknak vagy tartományoknak nevezünk). A víz sebességét akár 5 cm-es felbontásban is lehet mérni az ADCP szélessávú verziójával, hogyha bizonyos nagyfelbontású modellt használunk (Gartner 2004).

Az ADCP eszköz, mindamelllett, hogy bevett mérőműszere a folyami vízhozam és sebességmérésnek, kalibrálás útján alkalmassá tehető a lebegtetett hordaléktöménység-eloszlás mezőszerű térképezésére, ami alapján a szelvény menti hordalékhozam is meghatározható (Gartner 2004, Guerrero et al. 2016).

3.2. Az ADCP visszavert jelerősség kalibrálása

A vízben utazó hordalék, a vízhőmérséklet, a hordalék töménysége és szemcsemérete mind meghatározó tényezők az akusztikus jel vízben történő terjedésének. Az ADCP műszer a víz áramlási sebességének meghatározásához a műszerbe visszatérő hang frekvenciájának a megváltozását használja, míg a hordaléktöménység méréshez a kibocsátott és visszaverődött jel erősségét elemezzük (Baranya és Józsa 2010). Az ADCP visszavert jelerősség kalibrálásának egyes lépéseit Baranya és Józsa (2010) alapján mutatom be. Az egyes, műszerre jellemző állandók mértékét az általunk alkalmazott, 1200 kHz-en üzemelő ADCP műszerre vonatkozóan közlöm.

A lebegtetett hordalék koncentrációja és a relatív visszavert jelerősség közötti kapcsolat az ún. szonár-egyenlettel (Gartner 2004) írható le:

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

ahol: SSC_{ADCP} visszavert jelerősségből számított lebegtetett hordaléktöménység (mg/l),
 A, B konstansok (az $RB - \log SSC_{mért}$ kapcsolat alapján, a legkisebb négyzetek módszerével meghatározva),
 RB relatív visszavert jelerősség (dB),
 $SSC_{mért}$ hordalékmérésből ismert hordaléktöménység (mg/l).

A relatív visszavert jelerősség számításához a visszhang erősségéhez hozzá kell adni az átviteli veszteség dupláját (ld. oda-vissza):

$$RB = RL + 2 \cdot TL$$

ahol: RL visszhang erősség (dB),

TL átviteli veszteség (dB).

ADCP műszerek esetén a visszhang erősségét a következőképp állíthatjuk elő:

$$RL = K_c(E - E_r)$$

ahol: K_c az ADCP műszerre jellemző konverziós tényező; $K_c=0,44$,

E a műszer által mért visszhang (az ADCP mérésből meghatározott visszhang erősség (EI) profiljáról leolvasva (impulzus),

E_r referenciaszint; a műszerre jellemző alapzaj (mérésből meghatározható (impulzus); $E_r=50$ impulzus.

Az átviteli veszteségek alapvetően két tényezőtől állnak: hangszóródás és hangelnyelődés. A műszerfej és a mért cella közt a hang elnyelődik a víz által, s csillapítódik a hordalékszemescsék által. Képlettel kifejezve:

$$TL = 10 \cdot \log(R) + \alpha \cdot R$$

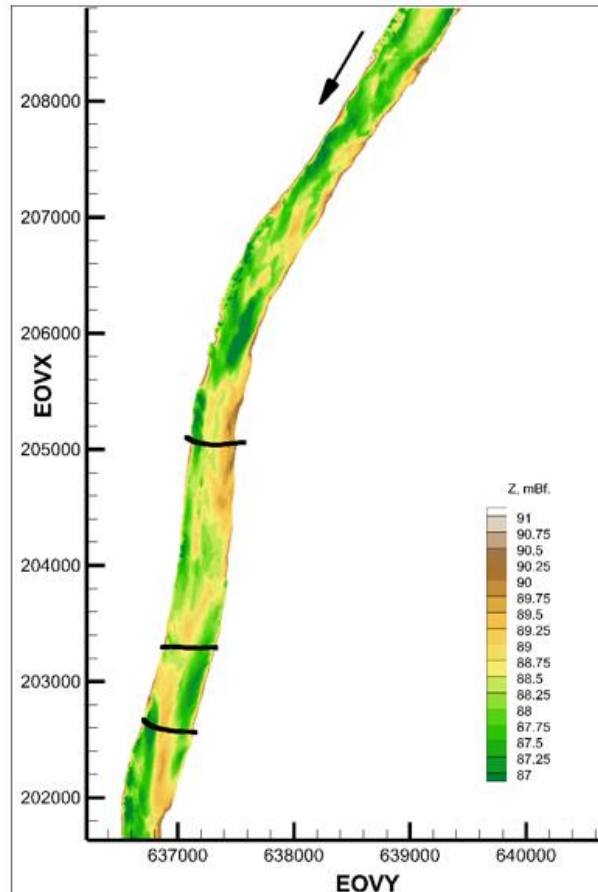
ahol: R a műszerfej és a mért cella közötti távolság (m), $R = \frac{z}{\cos(\frac{\pi}{9})}$, ahol z a mintavételi pont mélysége (m),

α a víz általi elnyelődést (α_w) és a hordalék általi csillapítást (α_s) leíró abszorpciós együttható ($\alpha = \alpha_w + \alpha_s$) (dB/m).

3.3. A mintaterület bemutatása

A vizsgálataim alapjául szolgáló ráckevei Duna-szakasz a Duna magyarországi szakaszának középső részén, az 1606,5-1604,0 fkm szelvények között található. Ezen a szakaszon a meder kiszélesedik és a lejtés 40 cm/km-ről 10 cm/km-re csökken. A folyószakasz átlagos éves vízhozama 2000 m³/s, míg a 100 éves vízhozam eléri a 10 000 m³/s-ot is. A vizsgált

szakasz átlagos vízmélysége 5 m, átlagos szélessége pedig 350 m. Az egyensúlyhoz közeli hordalékviszonyok és az a tény, hogy nem torkollik jelentősebb mellékfolyó a Dunába, a lebegtetett hordalék mennyisége nagyjából állandó ezen a szakaszon. Az átlagos lebegtetett hordalékhozam 40 kg/s, vagyis évente nagyjából 1,3 millió tonna lebegtetett hordalék vonul át. Az átlagos lebegtetett hordalékkoncentráció 30 mg/l körül van (Pomázi és Baranya 2020).



3. ábra: A ráckevei mintaterület medertérképe (fekete vonalakkal jelölve a három mérési szelvényt)

3.4. Adatgyűjtés

A tanulmányom elkészítése során felhasznált mérési adatok a *Tiszta Ivóvíz* megnevezésű projekt keretein belül, kéthetente végzett terepi és laboratóriumi mérésekből származnak. A terepi mérések során a mintavétel izokinetikus mintavevővel történt, s párhuzamos LISST-ABS és ADCP mérésekkel egészültek ki. A laboratóriumi elemzések során a hagyományos szűrőpapíros módszer mellett a fent bemutatott (ld. 2.2. fejezet) optikai eszközöket, a LISST-Portable|XR és a VELP TB1 zavarosságmérő eszközöket használtam, azonban azok eredményei jelen dolgozatban már nem kerülnek bemutatásra.

Jelen dolgozatomban a korábbi munkámat a nyers ADCP fájlok feldolgozásával és a visszavert jelerősség kalibrálásával folytatom. Ahhoz, hogy az ADCP által mért visszavert jelet hordalékmérésre is fel lehessen használni, kalibrálni kell a kapott értékeket olyan adatokkal, amelyek kellően pontos és biztos értékeket tartalmaznak. A kalibrációt a szűrőpapíros módszerrel kapott hordaléktöménység-értékek alapján végeztem el, mivel ez a direkt módszer kellően megbízható eredményeket szolgáltat (ld. 2.2.1. fejezet).

A kalibrációhoz összesen 25 mérés közel 400 vízmintájának elemzéséből ismert hordaléktöménységet használtam fel, mellyel széles vízhozam- és hordaléktöménység-tartományt (kb. 1000-4600 m³/s és 10-200 mg/l) lehetett lefedni.

3.5. Az eredmények megjelenítése

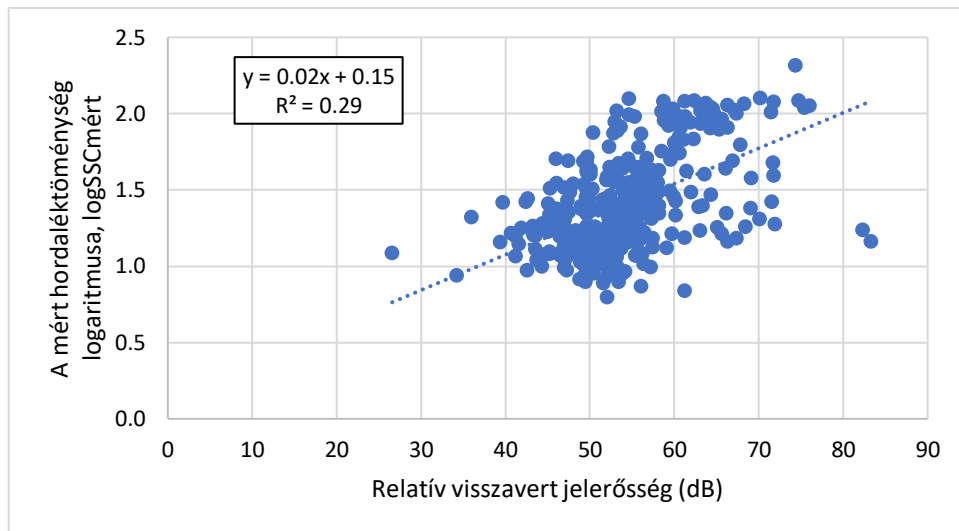
A hordaléktöménység és áramlási sebességek eloszlását térben a *Tecplot 360 EX 2016 R1* szoftver segítségével jelenítettem meg. A program az áramlások numerikus modellezése során kiválóan alkalmas megjelenítő eszköz, ami képes kezelni nagy adathalmazokat és segít vizualizálni azokat.

A hordaléktöménység-eloszlások előállításához a nyers ADCP fájlokat egy, a konzulensem, Baranya Sándor által írt programmal dolgoztam fel. A program releváns bemenő paramétereinek között a következők szerepelnek: vízszint, az ADCP műszerre jellemző K_c és E_r értékek, az α_w és α_s együtthatók, valamint az A és B kalibrációs együtthatók (ld. 3.2. fejezet).

4. Az eredmények bemutatása

4.1. A mintaterületre felállított kalibrációs összefüggés

A 3.2. fejezetben bemutatott kalibrációs eljárás alapján elvégeztem az ADCP mérések feldolgozását és kalibrálását. A relatív visszavert jelerősség és a mért hordaléktöménység logaritmusai között felállított kapcsolat az alábbi ábrán (4. ábra) látható. A kapcsolat erőssége gyenge ($R^2=0,29 < 0,40$), s a szórás jól láthatóan nagy.



4. ábra: A relatív visszavert jelerősség és a mért hordaléktöménység logaritmusára felállított kalibrációs összefüggés

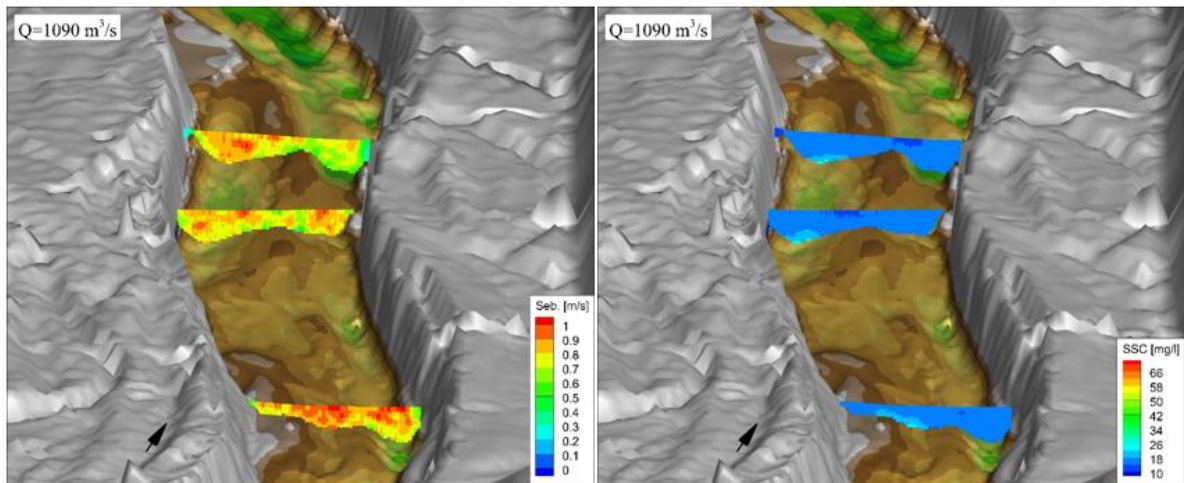
Az adatok szórásának oka feltehetőleg a komplex kalibrációs eljárásban keresendő – a továbbiakban érzékenységvizsgálatra lenne szükség. Érdeemes lenne megvizsgálni például az egyes vízjárási állapotok hatásait, az eredmények például azt sugallják, hogy 50 mg/l hordaléktöménység fölött egy újabb összefüggést kellene felállítani.

4.2. Szelvény menti hordaléktöménység-eloszlások vizsgálata különböző vízjárási állapotokban

Munkám során elsősorban azt vizsgáltam, hogy a különböző kis-, közép- és nagyvizes időszakokban hogyan alakul a hordaléktöménység-eloszlás egy-egy szelvény mentén. Ritka az ilyen lehetőség, amikor egy adott területet egy éven keresztül, kétheti rendszerességgel lehet vizsgálni, miáltal rendkívül sok adat állhat rendelkezésünkre. Habár a kétheti terepi mérések nem mindig követték az árhullámok eseményeit, ettől függetlenül a ráckevei szakaszon kellően széles vízhozam-tartományt (1090-4600 m³/s) fednek le méréseink.

A hordaléktöménység mellett fontos egyidejűleg megjeleníteni az áramlási sebességeloszlásokat is, hiszen így sokkal összetettebb elemzést tudunk végezni, jobban lehet szemléltetni és megérteni az áramlási folyamatokat. Mindhárom vízjárási tartományból egy-egy mérést kiválasztva mutatom be az áramlások alakulását a három mérési szelvényben. A kereszt-szelvények minden mérési kampánynál ugyanott helyezkedtek el. A lebegtetett hordaléktöménység skáláját egységesen választottam meg mindhárom állapotban, hogy egyértelműbb legyen az értelmezés, s könnyebben el lehessen végezni az összehasonlítást.

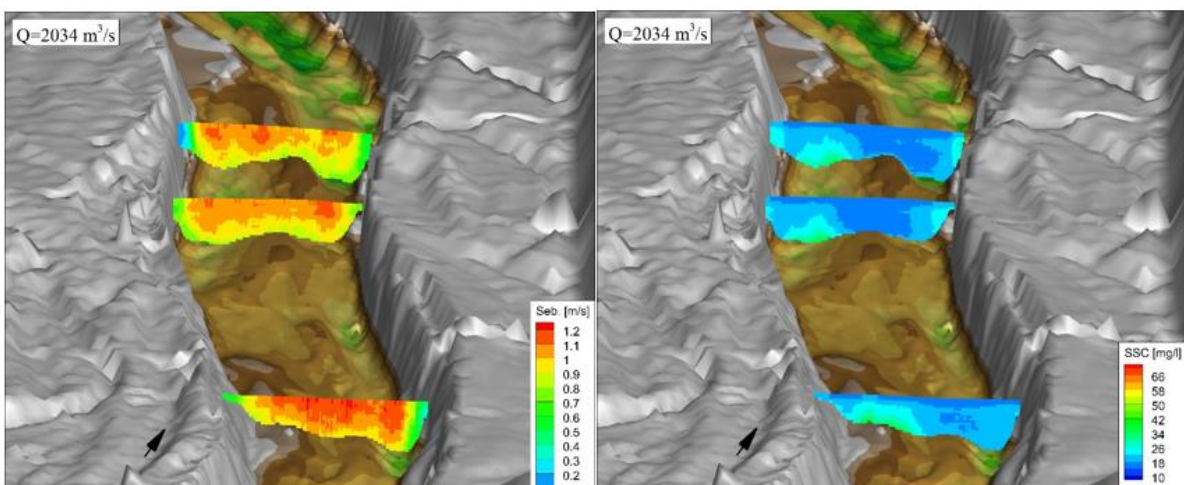
Először a kisvízi ábrákat (5. ábra) mutatom be:



5. ábra: A sebesség- (balra) és hordaléktöménység-eloszlások (jobbra) alakulása kisvízes időszakban

A bemutatott mérés egy őszi kisvízi állapotot mutat meg, a vízhozam $1090 \text{ m}^3/\text{s}$, az átlagos hordaléktöménység 15 mg/l körül alakult. Ennél a vízhozamnál nem mutat nagy diverzitást a hordaléktöménység szelvény menti eloszlása. Mindegyik szelvényben jól látható a meder kettéosztottsága, így az áramlási sebességek is két maximumterületet mutatnak. A hordaléktöménységek értékei nem mutatják ugyanezt a kettős eloszlást, csupán a balparti nagyobb sebességértékekhez tartozik nagyobb lebegtetett hordaléktöbblet, itt a mederfenék közelében felkeveredés is tapasztalható.

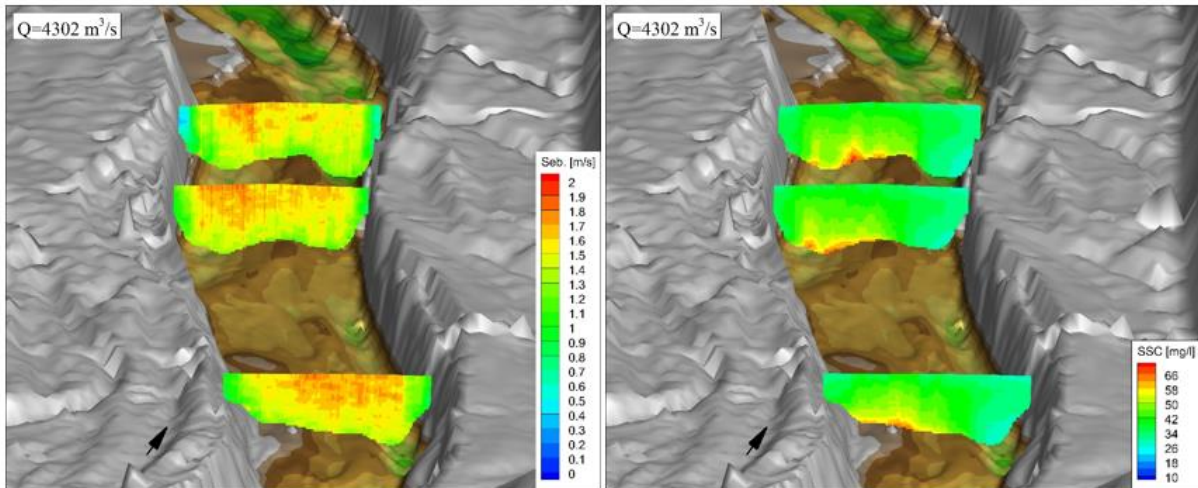
A középvízi állapotban a sebesség- és hordalékviszonyok a következőképpen (6. ábra) alakultak:



6. ábra: A sebesség- (balra) és hordaléktöménység-eloszlások (jobbra) alakulása középvízes időszakban

Itt egy tavaszi középvízes állapotot jelenítettem meg, mely során $2034 \text{ m}^3/\text{s}$ volt a vízhozam, az átlagos hordaléktöménység pedig 22 mg/l . Látható, hogy a vízhozam növekedésével együtt a sebességek és a hordaléktöménység is növekedett. Megfigyelhető a töménységmezőn, hogy a bal part közeli részeken nagyobb arányú volt a változás, mint a jobb parti részeken.

Végül a nagyvízi állapotra a következő eloszlások (7. ábra) adódtak:



7. ábra: A sebesség- (balra) és hordaléktöménység-eloszlások (jobbra) alakulása nagyvízes időszakban

Általánosan elmondható, hogy a folyók nagyvízes állapotban lényegesen több hordalékot tudnak szállítani, hisz ilyenkor nagyobb sebességek és nagyobb vízhozamok alakulnak ki. Ebben az esetben a $4302 \text{ m}^3/\text{s}$ volt a vízhozam, a lebegtetett hordalék átlagos értéke 40 mg/l . Az átlag töménységérték nem árul el sokat a keresztmetszvény hordalékmozgásáról. Az ábrázolt hordalékprofilból is jól látható, hogy 23 és 70 mg/l közötti értékeket vesz fel a töménység, ami háromszoros eltérés szelvényen belül. A domborzati modell segítségével azt is vizsgálni lehet a mederdomborzat hogyan, illetve befolyásolja-e a hordaléktöménység-profil alakulását. Ebben az esetben az alsó szelvényen jól kivehető gázló a meder közepén kettéosztja a keresztmetszetet. A sebességek ezt követve két helyen is maximumot mutatnak (sőt, ez a középső szelvényen jobban megfigyelhető). Ebből a tanultak alapján feltételezhető lenne, hogy a nagyobb sebességeknek köszönhetően a lebegtetett hordalék mértéke és a felkeveredés megnövekszik. Ez azonban csak a balparti részen figyelhető meg, a jobbpartnál nem alakulnak ki nagyobb töménységű zónák a nagyobb sebességek hatására. Ezt az eredmény a térbeli megjelenítés nélkül nem lehetett volna egyértelműen kijelenteni.

Összességében elmondható, hogy ha a kisvízi és a nagyvízi állapotot akarom összehasonlítani, akkor négyszeres vízhozamnál, a hordaléktöménységek 2,5-3-szoros értékeket vesznek fel. Továbbá az összes eredmény azt mutatja, hogy balparti hordaléktöménység-többlet a jellemző, ami a domborzatnak köszönhető. Balparthoz közel bár nem olyan mély a meder, mint jobbpárnál, mégis szélesebb a meder ezen oldala, ezért a nagyobb hordaléktöménység zónák inkább itt tudnak kialakulni.

4.3. Hordalékelragadó erő alakulása a mederfenék közelében

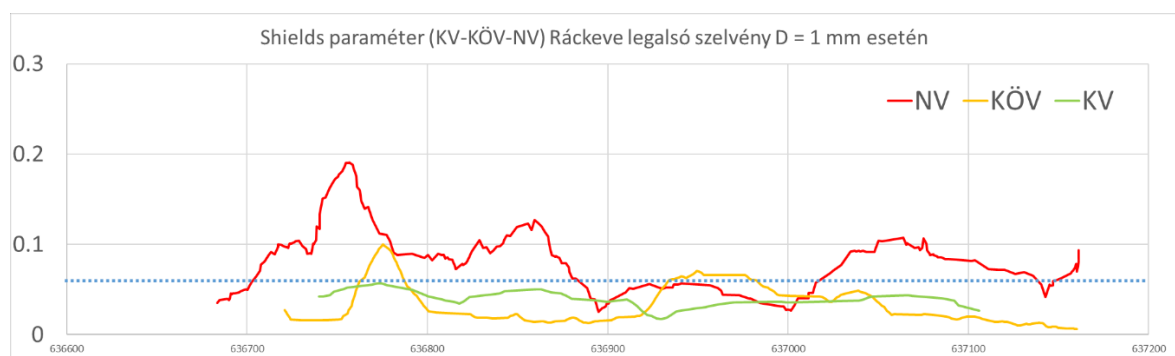
Az előző pontban bemutatott három eltérő vízjárási állapotra kapott hordaléktöménység eloszlás mezők mind alátámasztják, hogy a vizsgált szakaszon a magasabb töménységű zónák a folyó bal oldala mentén jelennek meg. A térbeli változékonyság szerepet játszhat a vízbázis hordalékviszonyoknak való kitettségében, különös tekintettel arra, hogy a magasabb hordaléktöménységű területek éppen a vízbázis oldalán jelennek meg. Mivel a szelvényekben mért lebegtetett hordalék forrása alapvetően két hely lehet, érdemes ezen keresztül részletesebben megvizsgálni, hogy mi okozhatja a területi heterogenitást. Az egyik forrás a felvíz felől érkező hordalékmennyiség, a másik pedig a mederfenéknél kialakuló felkeveredés lehet. A felvíz felől érkező hordalék az áramlásra jellemző turbulencia viszonyok alapján keveredik el kereszt- és hosszirányban, amitől alapvetően egyenletes eloszlást várnánk. A folyó sodorvonalában a vízoszlopon belüli turbulenciatartalom magasabb, mint a partok közelében, így a hordalékszállító képesség is, és emiatt várhatóan a hordaléktöménység is. Ezzel szemben a fenti eloszlások az egyenletes sebességeloszlás ellenére aszimmetrikus töménységeloszlást jeleznek, tehát inkább a mederfenékről való felkeveredés játszhat fontosabb szerepet.

A mederfenékről való felkeveredés vizsgálatára alkalmas lehet az ott fellépő súrlódási erők számszerűsítése, az ún. fenék-csúsztatófeszültség vagy másnéven hordalékelragadó erő paraméteren keresztül. Korábbi vizsgálatokban (pl. Baranya 2010) bemutatták, hogy az ADCP mérések során rögzített pillanatnyi sebességprofilok megfelelő simítása után, a sebességadatokból becslés tehető a fenék-csúsztatófeszültség mérési útvonal (jelen esetben kereszt-szelvény) menti változására is. Ezt az eljárást alkalmazva megvizsgáltam, hogy a folyásirányban legalsó mérési kereszt-szelvényben a fent vizsgált három eltérő hidrológiai állapotra hogyan alakul a feszültség (τ) profil, sőt az értékeket átszámítottam az ún. dimenziómentes csúsztatófeszültségre, vagy másnéven Shields paraméterre (τ^*) is, az alábbi összefüggéssel:

$$\tau_* = \frac{\tau}{g(\rho_s - \rho)D}$$

- ahol: g a nehézségi gyorsulás ($9,81 \text{ m/s}^2$),
 ρ_s a hordalék testsűrűsége (2650 kg/m^3),
 ρ a víz testsűrűsége (1000 kg/m^3),
 D pedig a hordalékszemcse átmérője.

A Shields paraméter eloszlásának bemutatása azért alkalmasabb, mint a fenékcsúsztatófeszültségé, mert előbbinél a felkeveredés határértékét jobban meg lehet határozni korábbi vizsgálatok alapján. Shields (1936) vizsgálataiban $\tau_* = 0,06$ kritikus értéket javasolt, amit meghaladva a mederanyag felkeveredése várható. Jelen vizsgálatban a mederfenéken lévő durva homok frakciók lehetséges felkeveredését néztem meg, mivel a szakaszon durva homok előfordulhat, de az vélhetően csak nagyvízi állapotban tud felkeveredni, szemben a közepes homok és annál finomabb frakciókkal, amik kisebb vízjárási állapotban is jelen lehetnek a szemösszetételi adatok szerint (lásd a következő pontban). A grafikon alapján látható, hogy mind a szelvény mentén, mind a vízjárási állapotoktól függően kimutatható a paraméter változása. Nagyvízi állapotban a folyó középvonalának környezetében található gázló területen a legkisebb a hordalékkelragadó erő, a két part felé haladva pedig megnövekszik 2-3-szorosára. A bal oldalon magasabb értékek jelentkeznek, lokálisan majdnem eléri a 0,2-t is. Középvízi állapotban a legmagasabb értékek a bal oldalon és a középvonalnál találhatók, míg kisvíznél meglehetősen homogén az eloszlás.



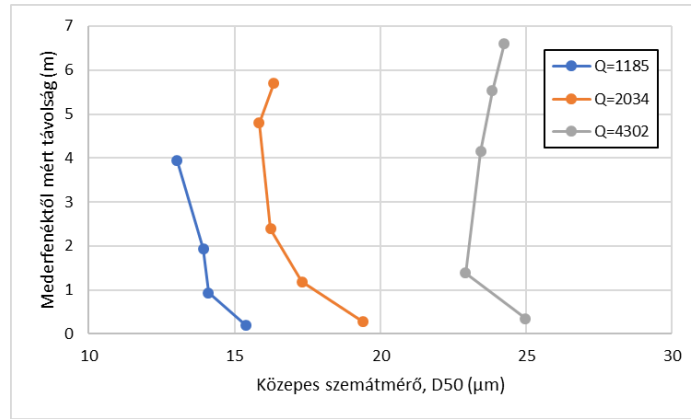
8. ábra: ADCP sebességadatokból származtatott Shields paraméter szelvény menti eloszlása a három vízjárási állapotban (a kék pontvonal a kritikus Shields-paramétert jelölik)

A rendre magasabb bal oldalon kialakuló fenék közeli hordaléktöménység értékeket nem indokolják teljes mértékben a fenti eloszlások, mert azok szerint akár közepen (lásd KÖV melletti eloszlás), akár a jobb oldalon (lásd NV) is eredményezhetnének nagyobb töménység értékeket. A heterogén eloszlás magyarázatára egy további vizsgálati eszköz lehet a lebegtetett hordalékminták szemösszetételi adatainak elemzése, amit a következő pontban érintek.

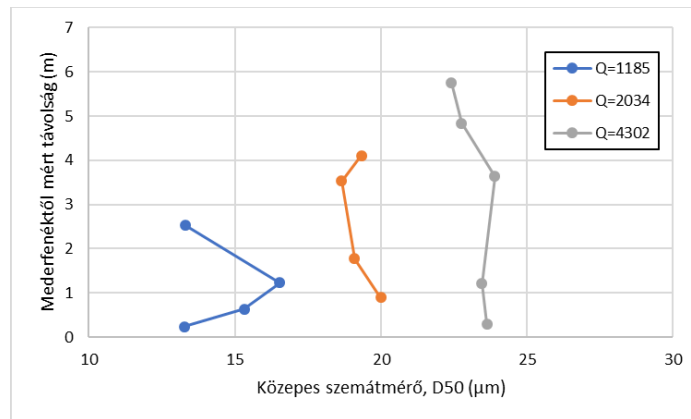
4.4. A lebegtetett hordalék szemösszetételének alakulása

Folyók lebegtetett hordalékszallító ereje elsősorban az áramlás turbulenciatartalmától függ. Nagyobb vízhozam általában magasabb áramlási sebességekkel és erősebb turbulenciával jellemezhető és nemcsak nagyobb hordaléktöménység jellemzi ilyenkor a rendszert, hanem az áramlás nagyobb hordalékszemcséket képes elszállítani, ami, ha a vízmintákat szemösszetételi elemzésnek is alávetjük, vizsgálható. A kapcsolódó projektben a korábban bemutatott, lézeres elvű eljárással szemcseméret eloszlásokat is meghatároztak, így lehetőségem volt megvizsgálni azok vízjárásól és helytől függő változásait is.

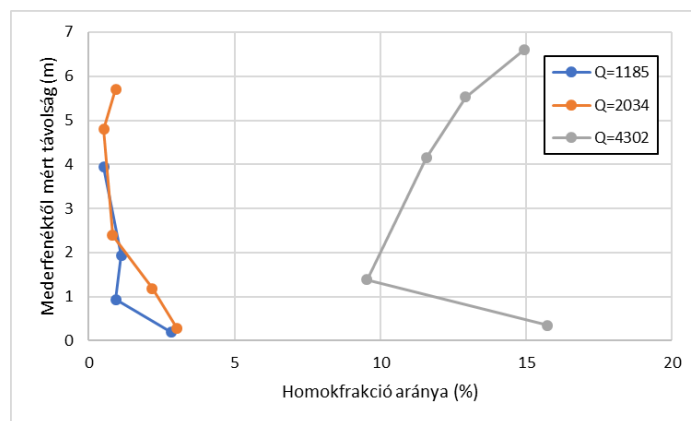
Példaként két függélyből mutatom be az átlagos lebegtetett hordalék szemátmérő adatokat, amelyek jól illusztrálják a szemösszetétel vízjárástól függő változásait. Az áramlási irányban legfelső és legalsó szelvényekben mért egy-egy függélyre mutatja be a következő két ábra (9. ábra és 10. ábra) ennek a paraméternek a függélyek menti változását. Az átlagos szemátmérők 10-30 μm tartományban mozognak és egyértelműen látszik, hogy magasabb vízhozamok mellett a Duna durvább frakciókat képes szállítani. Az első függélynél a mélység menti változás is tetten érhető, miszerint a mederfenékhez közeledve durvul a szemösszetétel, bár a második példánál már egy jobban átkeveredett, homogén eloszlás jelentkezik. 2-3-szoros eltérések figyelhetők meg a vízjárási állapotok között, sőt szemben a kis- és középvízi állapotokkal, nagyvíznél a homok frakciók aránya is 0-5%-ról 10-15%-ra növekszik meg, vagyis az iszap mellett a homokszemcsék is megjelennek a lebegtetett hordalékban, ami pedig az alsó két ábrán (11. ábra és 12. ábra) bemutatott grafikonokon figyelhetők meg.



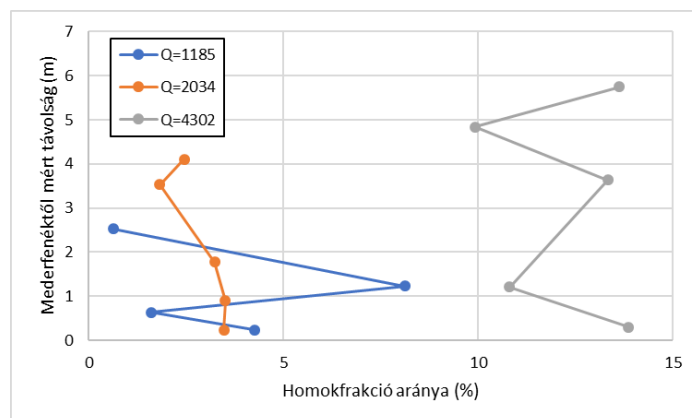
9. ábra: A közepes szemátmérő alakulása a ráckevei felső szelvény sodorvonalai függélye mentén különböző vízjárási állapotokban



10. ábra: A közepes szemátmérő alakulása a ráckevei alsó szelvény jobb parti függélye mentén különböző vízjárási állapotokban

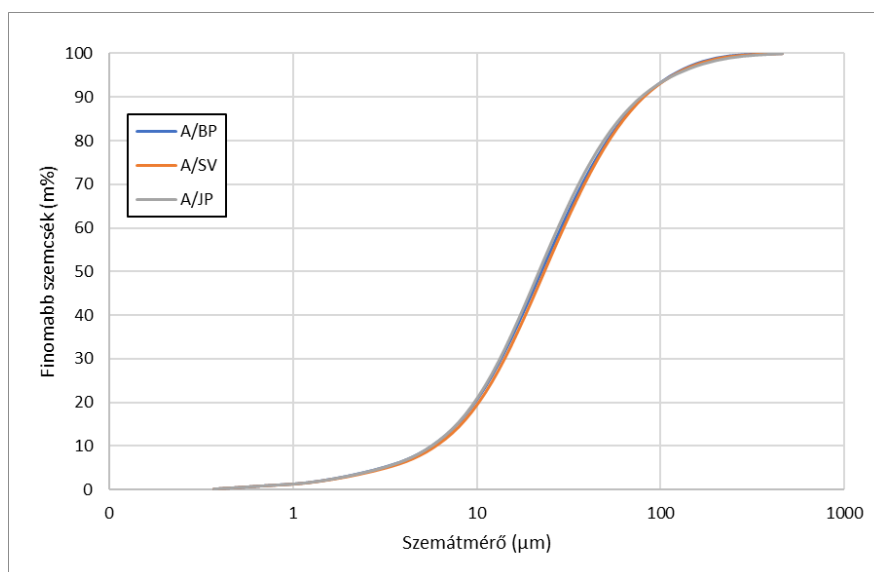


11. ábra: A homokfrakció arányának alakulása a ráckevei felső szelvény sodorvonalai függélye mentén különböző vízjárási állapotokban



12. ábra: A homokfrakció arányának alakulása a ráckevei alsó szelvény jobb parti függélye mentén különböző vízjárási állapotokban

A homok frakciók megjelenése arra enged következtetni, hogy ezek a frakciók már inkább a mederfenékből keverednek fel, és nincsenek állandóan jelen a folyóban, csak amikor a hordalékelragadó eléri azt a határállapotot, amikor a durvább szemcsék felkeveredésben tudnak maradni. Érdekesnek tartottam megvizsgálni azt is, hogy pl. a legalsó mérési szelvényben, a korábban bemutatott nagyvízi állapotnál kapott szelvény mentén változó hordaléktöménység mellett a szemösszetételben is van-e a szelvény mentén változás. A következő grafikon (13. ábra) a mederfenék közeli mintavételi pontokra ábrázolja a bal parti (BP), a sodorvonali (SV) és a jobb parti (JP) függélyekben kapott szemcseméret eloszlásokat. Világosan látszik, hogy valójában nincsen eltérés a szemösszetételben a három függélyben, amiből tehát nem vonható le következtetés a heterogén töménységeloszlásra vonatkozóan.



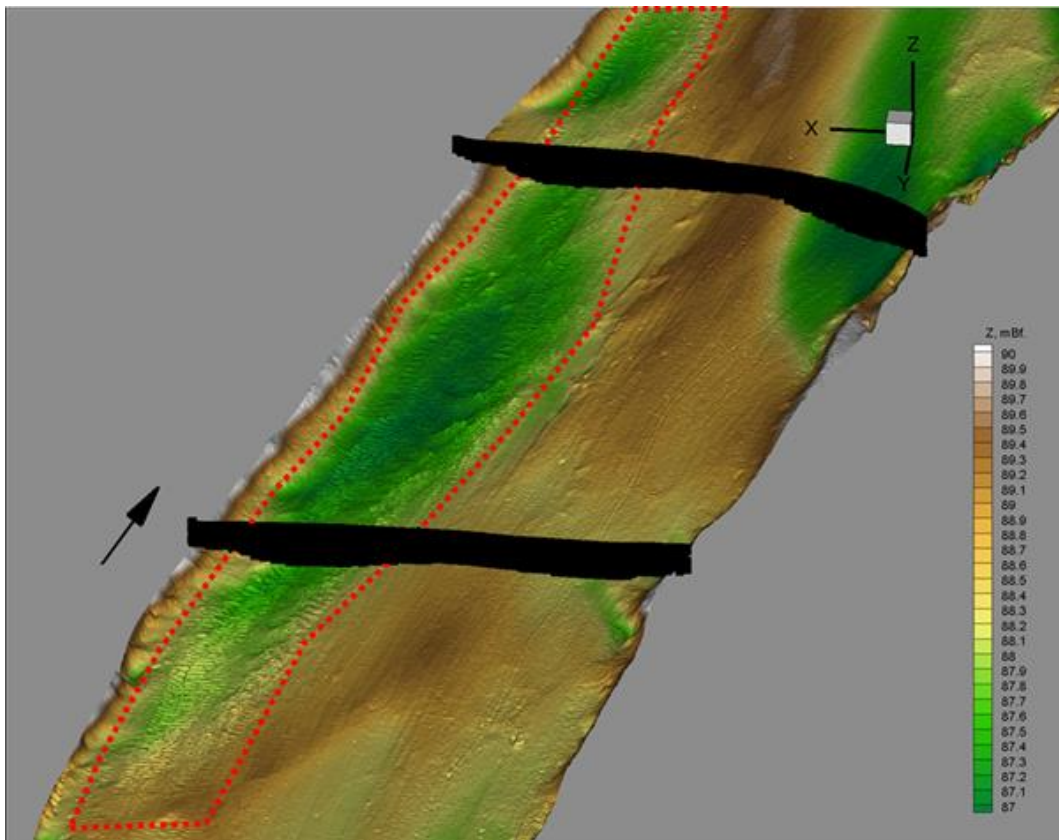
13. ábra: Szemeloszlási görbék nagyvízi állapotban a legalsó mérési keresztzelvény három függélyének mederfenék közeli pontjaiban

A szemösszetételi vizsgálatok tehát alátámasztják, hogy nagyobb vízhozamok mellett az áramlás egyre durvább szemcsék transzportjára képes, de a szemösszetételi adatok területi változásai nem magyarázzák a hordaléktöménységek eloszlásában tapasztalt egyenlőtlenségeket. Fontos szem előtt tartani, hogy a fent bemutatott szemcseméret eloszlások előállításához alkalmazott lézeres elemzési eljárásban a legnagyobb vizsgálható szemcseméret 0,5 mm, vagyis a durva homok frakciók mérésére már nem képes, azok a frakciók görbéken keresztül nem vizsgálhatók emiatt. További elemzések szükségesek arra vonatkozóan, hogy a területi egyenlőtlenséget mi okozhatja. A következő pontban a mederanyag szemösszetételével kapcsolatos kérdéskört érintem, ami magyarázatot adhat a jelenségre.

4.5. Mederanyag szerepe a lebegtetett hordalékvándorlásban

Ha abból indulunk ki, hogy a nagyobb hordaléktöménység értékekhez a durvább frakciók jelenléte járul hozzá, a mederfenékből felkeveredett hordalék lehet egy lehetséges magyarázat, amit a lézeres eljárás nem tud kimutatni, de a mederanyag összetételének vizsgálata segíthet. A kutatáshoz kapcsolódó projektben kiterjedt mederanyag mintavételi kampányokat egyelőre nem hajtottak végre, ezért alátámasztó adatokkal nem rendelkezünk. Ahhoz, hogy a mederfenék anyagi összetételének szerepét mégis valamilyen formán vizsgálhassuk, egy nagyfelbontású digitális domborzati modellt vizsgálunk meg, amelyet az ún. *multibeam* mederfelmérési eljárás alapján készítettek, és ennek megfelelően kb. 10 cm-es vízszintes felbontású és cm-es függőleges felbontású a térkép. Az alábbi képen (15. ábra) a vizsgált szakasz alsó részén, a két alvízi mérési szelvény környezetében jellemző mederdomborzati viszonyok láthatók. A domborzati modellen jól kirajzolódik a folyómeder közepén elhelyezkedő gázlós terület, zölddel pedig a bal part menti mélyebb sáv, majd a jobb part menti mélyebb területek is megfigyelhetők. Érdeemes megfigyelni továbbá a piros pontvonallal jelölt részterületen belül a mederfenéken kialakuló mederformákat is. A mederformák valójában a mederfelszínen kialakuló hullámok, dűnék vagy fodrok formájában jelennek meg, amik geometriájukból adódóan egyfajta makroérdességként is felfoghatók a fő áramlásra nézve. A mederformák által reprezentált sávokban megnő a hidrodinamikai ellenállás és magasabb fenékcsúsztatófeszültség értékek alakulnak ki, ezt láthattuk a korábbi elemzésen is. Ahogy viszont ott is említettük a magasabb hordalékelragadó csak egy szükséges feltétel, de nem elégséges, mert hordalékforrásnak is jelen kell lennie. A mederformák területén valószínűleg más a mederanyag szemösszetétele, mint a gázlós vagy a jobb parti zónákban, de ezt majd célirányos medermintázásokkal lehet igazolni. A kutatás jelen fázisában az a hipotézisem, hogy a

mederformákra jellemző eltérő szemösszetétel és a formák által megemelkedett hordalékelragadó erő felelhet a folyó bal oldala mentén kimért magasabb hordaléktöménység értékekért.



14. ábra: Nagyfelbontású domborzati modell a két alsó mintavételi szelvény környezetében (a fekete pontok az ADCP mérési pontjait jelölik)

5. Összefoglalás, következtetések

A kutatás keretében a Duna Ráckeve környéki szakaszán, a *Tiszta Ivóvíz* elnevezésű projekt keretében végrehajtott áramlási és hordalékvándorlási mérési kampányok adatait elemeztem azzal a céllal, hogy az akusztikus mérési eljárás által szolgáltatott részletes kereszt-szelvény menti hordaléktöménység adatok alapján következtetéseket vonjak le a lebegtetett hordalékvándorlás helyi sajátosságaira vonatkozóan. A dolgozatban kitértem az itt alkalmazott mérési eljárásokra, bemutattam a mintaterületet és az akusztikus mérés kalibrációs módját, majd célirányosan kiválasztott kereszt-szelvény menti adatokat vizsgáltam. A hordaléktöménység eloszlásain keresztül bemutatható volt, hogy a leghordalékosabb zónák nem feltétlenül követik a legnagyobb sebességű részeit a folyónak, hanem a mintaterületen inkább a bal part mentén jelennek meg rendre a magasabb értékek, jóllehet a sebességeloszlás

inkább egyenletesnek mondható. Igyekeztem az eloszlás területi változékonyságát a sebességadatokból származtatott hordalékelragadó erő paraméteren keresztül vizsgálni, majd a lebegtetett hordalék szemösszetételi eredményeit is figyelembe vettem, de kielégítő választ nem találtam. A nagy részletességű mederdomborzati térkép alapján azonban azt a feltételezést fogalmaztam meg, hogy a szakaszon található mederformák okozta hidraulikai ellenállás és a mederanyag szemösszetétele vélhetően együttesen felel a lokális hordalékvándorlás bemutatott viselkedéséért.

Ahhoz, hogy a hipotézist alá tudjam támasztani, további vizsgálatok szükségesek. Fontosnak tartom először is az ADCP alapú hordalékbecslési eljárás kalibrálásának felülvizsgálatát, mert jelen kutatásban azzal, hogy az összes mérési kampány adatát együttesen vettem figyelembe, a kalibrálás pontosságán rontottam. Ezzel szemben a jövőben mindenképpen vizsgálandó, hogy minden egyes mérési kampányra külön-külön végezzük el a visszavert jelerősség kalibrálását. Kiegészítő terepi adatgyűjtés során fontos feltárni a mederfelszín szemösszetételi adatait is, célszerűen fizikai medermintázás alapján olyan módon, hogy a domborzati modell és a kapott hordaléktöménység adatok alapján jól elkülöníthető részterületeken legyenek azok végrehajtva. Nem utolsósorban ahhoz, hogy a különböző vízjárási állapotok mellett a teljes vizsgálati területre részletes elemzést tudjunk elvégezni, szükséges egy olyan szimulációs eszköz bevetése, amely képes az itt említett hatások modellezésére, vagyis a 3D sebességeloszlások, a turbulenciajellemzők, a változó mederérdesség és a lebegtetett hordaléktranszport folyamatai mind leírhatók.

A dolgozatban bemutatott elemzések és az előző bekezdésben javasolt jövőbeli vizsgálatok együttesen egy olyan eszköztárat jelentenek a folyami hidromorfológia tudományterületén, amivel ehhez hasonló, folyószakasz léptékű adat- és folyamatelemzések hajthatók végre. Ennek egyik kifutási területe a kapcsolódó projektbeli vízbázisok hatásvizsgálata lehet, de értelemszerűen ennél szélesebb körű gyakorlati hasznosulás várható. Folyószakasz léptékű hordalékelemzések segíthetik pl. revitalizációs beavatkozások tervezését, ahol a helyi hordalékvándorlási viszonyok fontos szerepet játszhatnak pl. az élőhelyek alakulásában. Hajózási vagy műtárgyépítési célú beavatkozások során is hasonló részletességű terepi feltárások lennének szükségesek, hogy a beavatkozások jövőbeli hatását minél pontosabban tudjuk jól paraméterezett és igazolt szimulációs eszközökkel előre jelezni.

Irodalomjegyzék

Agrawal, Y.C.; Hanes, D.M. (2015) *The implications of laser-diffraction measurements of sediment size distributions in a river to the potential use of acoustic backscatter for sediment measurements*. Water Resour. Res., 51,8854–8867. DOI: 10.1002/2015WR017268

Agrawal, Y.C.; Slade, W.; Pottsmith, H.C.; Dana, D. Technologies and experience with monitoring sediments for protecting turbines from abrasion. IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci. 2016, 49, 122005. DOI: 10.1088/1755-1315/49/12/122005

Agrawal, Y.C.; Whitmire, A.; Mikkelsen, O.A.; Pottsmith, H.C. (2008) *Light scattering by random shaped particles and consequences on measuring suspended sediments by laser diffraction*. J. Geophys. Res., 113. DOI: 10.1029/2007JC004403

Baranya S. (2010) *Three-dimensional analysis of river hydrodynamics and morphology*. PhD Thesis. Budapest University of Technology and Economics Budapest, Hungary.

Baranya S.; Csiti B.; Fleit G.; Kutai R.D.; Lükő G.; Rütther, N.; Szabó-Mészáros M.; Timár G.; Tóth T.; Török G.T. (2017) *Hidromorfológiai mérések. Folyami hidromorfológiai mérőgyakorlat vízmérnök és geofizikus MSc hallgatók számára*. Egyetemi jegyzet, Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszék, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Budapest.

Baranya S.; Józsa J. (2010) *ADCP alkalmazása lebegtetett hordalék-koncentráció becslésére*. Hidr. Közl., 90(3), 17-22.

Bogárdi J. (1970) *Vízfolyások hordalékszállítására*. Akadémiai Kiadó, Budapest.

Csiti B. (2016) *Investigation of direct and indirect suspended sediment measuring methods*. TDK dolgozat. Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszék, Budapest.

DanubeSediment (2019) *Sediment Monitoring in the Danube River*. Angol nyelvű projektjelentés. Hozzáférés: www.interreg-danube.eu/danubesediment (Letöltve: 2020.09.28.)

Downing, J. (2006) *Twenty-five years with OBS sensors: The good, the bad, and the ugly*. Cont. Shelf Res., 26,2299–2318. DOI: 10.1016/j.csr.2006.07.018

Éles D. (2019) *Lebegtetett hordalékmérési eljárások összehasonlító elemzése*. BSc diplomamunka, Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszék, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem.

Gartner, J.W. (2004) *Estimating suspended solids concentrations from backscatter intensity measured by acoustic Doppler current profiler in San Francisco Bay, California*. Mar. Geol., 211, 169–187. DOI: 10.1016/j.margeo.2004.07.001

Gray, J.R.; Gartner, J.W. (2009) *Technological advances in suspended-sediment surrogate monitoring*. Water Resour. Res., 45. DOI: 10.1029/2008WR007063

Guerrero, M.; Szupiany, R.N.; Amsler, M.L. (2011) *Comparison of acoustic backscattering techniques for suspended sediments investigations*. Flow Meas. Instrum., 22, 392–401. DOI: 10.1016/j.flowmeasinst.2011.06.003

Guerrero, M.; Rüther, N.; Szupiany, R.; Haun, S.; Baranya, S.; Latosinski, F. (2016) *The acoustic properties of suspended sediment in large rivers: Consequences on ADCP methods applicability*. Water, 8, 13. DOI: 10.3390/w8010013

Haimann, M., Gmeiner, P., Liedermann, M., Aigner, J., Kreisler, A., Riegler, A., Blamauer, B., Baranya, S., Török, G.T., Ficsor, J., Józsa, J., Mohácsiné Simon, G., Hengl, M., Habersack, H. (2014). *Hordalékvizsgáló kézikönyv*. SEDDON projekt.

Kutai R. (2014) *Pontbeli zavarosság mérésén alapuló hordalékhozam becslő eljárás implementálása a Dunára*. TDK dolgozat. Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszék, Budapest.

Pomázi F.; Baranya S. (2020b) *Nagy folyók lebegtetett hordalékvándorlásának új vizsgálati módszerei 2. - Közvetlen és közvetett lebegtetett hordalékmérési eljárások összehasonlító vizsgálata*. Hidr. Közl., 100(3), 64-73.

Pomázi F.; Baranya S.; Török G.T. (2020) *Nagy folyók lebegtetett hordalékvándorlásának új vizsgálati módszerei 1. – A továbbfejlesztett hordalékmonitoring módszertan bemutatása*. Hidr. Közl., 100(2), 37-47.

Pomázi, F.; Baranya, S. (2020a) *Comparative Assessment of Fluvial Suspended Sediment Concentration Analysis Methods*. Water 12(3), 873. DOI: 10.3390/w12030873

Sadar, M. T. (1998) *Suspended particles removal by slow sand filtration*. Water Sci. Techn. 21(7), 45-67. DOI:

Sequoia Inc. (2015) *LISST-Portable/XR Manual Version 1.3*. Hozzáférés: http://www.sequoiasci.com/wp-content/uploads/2015/06/LISST-PortableXR-Manual-Version-1_3.pdf (Letöltve: 2020. szeptember 28.)

Sequoia Inc. (2017) *Laser Diffraction Principles*. Gyártói leírás. Hozzáférés: <http://www.sequoiasci.com/article/laser-diffraction-principles/> (Megtekintve: 2020. október 1.)

Shields, A. (1936). *Application of similarity principles and turbulence research to bed-load movement*. Hydrodynamics Laboratory Publ. No. 167, W. P. Ott, and J. C. van Uchelen, trans., U.S. Dept. of Agr., Soil Conservation Service Cooperative Laboratory, California Institute of Technology, Pasadena, CA.

Szombati D. (2016) *A Duna magyarországi szakaszának lebegtetett hordalékvizsgálata*. TDK dolgozat. Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszék, Budapest.

Thorne, P.D.; Vincent, C.E.; Hardcastle, P.J.; Rehman, S.; Pearson, N. (1991) *Measuring suspended sediment concentrations using acoustic backscatter devices*. Mar. Geol., 98, 7–16. DOI: 10.1016/0025-3227(91)90031-X

Tiszta Ivóvíz projekt (2018) *A projekt szakmai bemutatása* (projektvezető: Dr. Engloner Attila)

UNESCO (1983) *Study of the relationship between water quality and sediment transport*. In Technical Papers in Hydrology, ISBN 92-3-102109-5.

VELP *TB1 Portable Turbidimeter Leaflet*. Hozzáférés: https://www.velp.com/euro-net/content/image/thumb/VELP_TB1_Turbidimeter_Leaflet.pdf (Letöltve: 2020. szeptember 28.).