



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

**Akusztikus mérések vizsgálata folyami görgetett
hordalékvándorlás megfigyelésére**

Tudományos Diákköri Konferencia 2021

Készítette:

Holchammer Kitti

Konzulensek:

Dr. Baranya Sándor

Dr. Török Gergely Tihamér

2021

Tartalomjegyzék

1.	BEVEZETÉS, KORÁBBI KUTATÁSOK	3
1.1.	A GÖRGETETT HORDALÉKRÓL.....	4
1.2.	A GÖRGETETT HORDALÉKMÉRÉS MÓDSZEREI	5
1.3.	FIZIKAI MINTAVÉTELEZÉSI ELJÁRÁSOK	6
1.4.	INDIREKT VAGY KÖZVETETT MÉRÉSI MÓDSZEREK.....	8
2.	VIZSGÁLATI MÓDSZEREK.....	11
2.1.	ESETTANULMÁNY HELYSZÍNE.....	11
2.2.	MÉRÉSI MÓDSZEREK.....	11
2.3.	ADATELEMZÉSI MÓDSZEREK	13
3.	EREDMÉNYEK ÉS ÉRTÉKELÉS	15
3.1.	ADCP BT-GPS ELTÉRÉS ALAPJÁN VIRTUÁLIS HORDALÉKVÁNDORLÁSI SEBESSÉGEK SZÁMÍTÁSA	15
3.2.	FIZIKAI GÖRGETETT HORDALÉKMINTÁZÁS VIZSGÁLATA VIDEÓK ALAPJÁN.....	16
3.3.	MÉRT HORDALÉKVÁNDORLÁS ÉS ADCP ALAPÚ VIRTUÁLIS SEBESSÉGEK KAPCSOLATÁNAK VIZSGÁLATA	20
4.	KÖVETKEZTETÉSEK, JAVASLATTÉTEL.....	25
	IRODALOMJEGYZÉK	26
	FÜGGELÉK	27

1. BEVEZETÉS, KORÁBBI KUTATÁSOK

A folyómedrekben mozgó görgetett hordalék jelentős szerepet játszik a mederalak változásában, ezért a hordalékvándorlás folyó hossza menti és időbeli változásának számszerű feltárása egy releváns mérnöki kérdés. A hagyományosnak tekinthető, fizikai hordalékcsapdázás ún. nyomáskülönbség elvén működő mintavevőkkel már hosszú időre (több évtized) tekint vissza, így alkalmazási korlátai jól ismertek. Használatuk idő és költségigényes, a mérési eredmények bizonytalansága jelentős, ráadásul árvízi viszonyok között alig bevethetők. A TDK dolgozatot befogadó tanszék évek óta foglalkozik olyan alternatív, közvetett mérési eljárások fejlesztésével, amelyek kiegészíthetik, esetleg ki is válthatják a hagyományos hordalékmintavételi módszereket úgy, hogy a mérések költségkímélőbbek és biztonságosabbak, továbbá megbízhatóbb eredményeket szolgáltatnak.

Ebben a kutatásban egy akusztikus áramlásmérő berendezést (acoustic Doppler current profiler – aDcp) alkalmazunk abból a célból, hogy a mederfelszín elmozdulása alapján állítsunk fel kapcsolatot a meder közelében mozgó hordalék mennyiségével. A SEDDON II elnevezésű, a tanszék partnerségével futó nemzetközi projekt lehetőséget ad arra, hogy nagyszámú, széles vízhozamtartományt lefedő áramlási mérési kampányok nyersadatait elemezzem, sőt hazai szinten egyedülálló intenzitású közvetlen hordalékmintázás eredményeivel tudom azokat összekapcsolni.

A dolgozatban tehát egy közvetett, akusztikus elven működő mérési eljárás eredményeiből származtatott paramétereket kapcsolom össze közvetlen hordalékmérési eljárások eredményeivel, értékelem azokat és javaslatot teszek az aDcp alapú görgetett hordalékmérés alkalmazhatóságára, feltárt korlátaira és a további vizsgálati irányokra. A vizsgálatra azért van rendkívül nagy szükség, mert a hagyományos, fizikai mintavételezésen alapuló hordalékmérés korlátai miatt az ismereteink szintén korlátosak, folyóinkra alig áll rendelkezésre elérhető hordalékvándorlás adat. A hazai Dunán például egy szelvényben mérnek rendszeresen görgetett hordalékmennyiséget (Medvei-híd a Felső-Dunán), ráadásul az ott alkalmazott eljárás nagyon kevésbé megbízható. Ha igazolható lenne, hogy egy könnyen és olcsón kivitelezhető mérési eljárással (mint az aDcp) megbízható számszerű információt tudunk előállítani a görgetett hordalékvándorlásra, jelentősen meg tudnánk növelni az adatok mennyiségét, ráadásul múltbeli

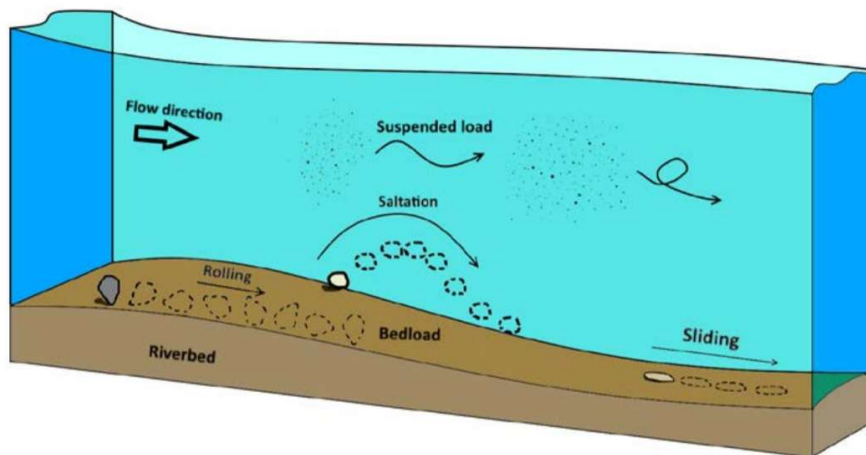
akusztikus mérésekből akár visszaszámolhatók lennének a hordalékhozam adatok, tehát nemcsak a jövőre nézve növelhetnénk az adatmennyiséget.

1.1. A GÖRGETETT HORDALÉKRÓL

A vízfolyások különböző szerves és szervetlen szilárd anyagokat szállítanak a vízben, ezeket összefoglalóan hordaléknak nevezzük, keletkezése az erózióra vezethető vissza. Ennél fogva származhat a meder alapkőzetéből, vagy a vízgyűjtőterületről. Mivel az eróziót a természeti jelenségek idézik elő (szél, csapadék...stb.), a folyómederben megtalálható hordalékok mennyisége és összetétele nagyon változatos. A hordalék megoszlása a folyószakasz hossza mentén is változó. A nagyobb sebességű szakaszokon a folyó nagy energiája miatt nagyobb szemcseátmérőjű hordalékokat is képes magával ragadni, míg a lassabb folyású szakaszokon, kisebb szemcséket mozgat meg, és inkább a hordalék lerakása a jellemzőbb.

A vízfolyások a kezdeti szakasz és a torkolat közötti gravitációs potenciálkülönbség miatt a helyzeti energiájuk mozgásivá alakul, így egy szállító közegként mozgásba hozza a mederben megtalálható hordalékokat. A hordalékvándorlás miatti problémák leginkább az ülepedésben rejlenek. Legyen itt szó az árvizek után a településeken maradó hordalékról, vagy a folyómederben kialakított hordalékkúpokra, zátonyokra, amik többek között a hajóforgalmat akadályozhatják.

A vízfolyásokban a 0,002 mm-nél nagyobb szemcsenagyságú szilárd anyagokat tekintjük hordaléknak. Két fő csoportba sorolhatjuk őket a mozgásuk szerint. A lebegtetett hordalék a mederfenékkal nem érintkezve, a vízben lebegve, a vízsebességgel azonos tempóban mozog. Ezzel szemben a görgett hordalék a fenéken gördülve, csúszva, esetleg ugrálva, lüktetésszerűen mozog (Bogárdi, 1971). Mozgásának iránya általában a mederrel párhuzamos, mennyisége nagyon változatos a vízfolyás tulajdonságaitól függően (1. ábra). Ebben a dolgozattal tehát az utóbbival foglalkozom.



1. ábra Lebegtetett hordalék (suspended load) és görgetett hordalék (bedload) vízfolyásokban (DanubeSediment, 2019).

1.2. A GÖRGETETT HORDALÉKMÉRÉS MÓDSZEREI

A folyók görgetett hordaléknak mérése több szempontból is fontos. Az intenzív hordalék vándorlás bizonyos szakaszokon mélyíti a medret, míg máshol feltölti. Ezzel növelheti az árvízi kockázatot, akadályozhatja a hajózást vagy rontja a vízminőséget.

A Magyarországi hordalékmérés az 1800-as évek második feléig nyúlik vissza, de ez idő tájt a lebegtetett hordalék mérésre koncentráltak a mérnökök. A görgetett hordalék mérés kezdete mind nemzetközi mind hazai viszonylatban későbbre tehető. A mérők először nagyon kezdetlegesek voltak és az idő és a tudomány előrehaladtával fejlődtek lépésről lépésre.

A különböző hordalékmérési módszerekkel szemben az alábbi elvárásaink lehetnek:

- A mederanyag és a hordalék elkülöníthető legyen
- megfelelő képet adjon a hordalék mennyiségéről és a mederfenéken uralkodó viszonyokról
- a kivett minta arányos legyen a hordalékhozammal
- a változó hordalékmennyiség és hidrológiai viszonyok mellett is használható legyen

A közvetlen mérések hátránya a műszerek elhelyezésének és használatának bonyolultsága, illetve a mérés és a valóság közötti eltérések miatt nagy számú adatból kalibrációt kell végezni, ami nem csak folyónként hanem annak szakaszaiként is külön-külön el kell végezni.

A hordalékmérőket két típusba lehet sorolni:

- fizikai mintavételezési eljárások
- indirekt, vagy közvetett eljárások

1.3. FIZIKAI MINTAVÉTELEZÉSI ELJÁRÁSOK

A fizikai mintavételi eljárások mindegyike direkt módszert jelent, vagyis a hordalék valamilyen formában csapdázásra kerül és ezen minta alapján lehet következtetni a hordalék összetételére és mennyiségére.

Árkos vagy vályús mintavevők

A közvetlen mérési módszerek közül az egyik legpontosabb, de legköltségesebb eljárás. Magyarországon nemigazán terjedt el, 1993 elején a Dráván fejlesztettek ki egy tömegmérős rés mintavevőt. A működésének lényege, hogy egy árkot létesítenek a mederbe, ebbe helyezik a mintavevőt úgy, hogy a teteje szintbe legyen a mederfenékkal. A mérés végeztével manuálisan vagy szivattyúval lehet kiüríteni. Lehet egyszerű vagy mérő és adatrögzítő funkcióval kiegészíteni. Hátránya, hogy kisebb vízfolyásokon lehet csak jól alkalmazni, de ott is elég magas költségek mellett.

Doboz vagy kosár alapú mintavevők

A legelterjedtebb mintavevő eszközök, 1-300 mm szemcseméretnél alkalmazható. Merevfalú acélszerkezetek, a víz áramlás mossa bele a hordalékot. Hátrányuk, hogy ellenállást okoznak, ezáltal csökken a víz sebessége, ezáltal a mederfenéken jelentkező csúsztatófeszültség. Előfordulhat, hogy néhány szemcse a műszer bejáratánál leülepszik, eltéríti a többi.

Ezen probléma kiküszöbölésére fejlesztették ki a nyomáskülönbségen alapuló mintavevőket. Ilyen műszer a Károlyi féle mintavevő, ami Magyarországon a legelterjedtebb (2. ábra). Teljesen merevfalú, egy fém fogószekrénybe csapdáznak. A szélessége állandó, függőlegesen bővül a keresztmetszete. Ez a méretváltozás nyomáskülönbséget okoz a belépő és a kilépő oldalon, így egy szívó hatást eredményez és ezzel megszünteti a sebességcsökkenést.



2. ábra A kavics (bal – „kis” Károlyi-féle) és homok frakciójú (Jobb – Helley-Smith) mederszakaszokon használt görgetett hordalék mintavevők (Szombati, 2014).

A mintavevőket csörlő vagy daru segítségével leengedik a mederfenékre. A műszer nehézsége, hogy a nagy műszert nehéz mozgatni, illetve az összeszerelése és körülményes, mert több, kisebb elemet kell egyben tartani. A műszer áramlásérzékeny, nehéz irányban tartani a víz alatt. Ennek kiküszöbölése érdekében uszonyokkal szerelték fel őket. (Csiti, 2018) A mérési idő letelte után, kiemelik a műszert és gyűjtőbe került minta alapján következtettek a hordalékviszonyokra, az alábbi képlet segítségével:

$$q_d = \frac{\Delta m}{\Delta t} \frac{1}{s}$$

Ahol a

- q_d az egy méter szélességre vonatkozó fajlagos hordalékhozam [$\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$]
- Δm a csapdázott minta tömege [kg]
- Δt a mérés időtartama [s]
- s a mintavevő befolyási paraméter szélessége [m]

A mérés során leggyakrabban az alábbi hibák, szoktak fellépni:

- Mozgatás során (lehelyezés, kiemelés) belekap a mederbe – túlgyűjtés
- A mederfenék egyenlőtlensége miatt nem simul rendesen a műszer így a hordalék egy része el tud szökni alatta (alulgyűjtés)

- Nyílás eltömődése
- Turbulencia miatt a pillanatnyi sebességvektorok megváltoznak, és a kavics nem a gyűjtő felé mozdul
- Szélsőséges áramlási viszonyok között elsodródhat a műszer

A dolgozat 2. fejezetében bemutatom, hogy jelen vizsgálathoz is egy nyomáskülönbség elvén működő csapdázót alkalmaznak a SEDDON II projektben, az ún. BfG-típusú mintavevőt.

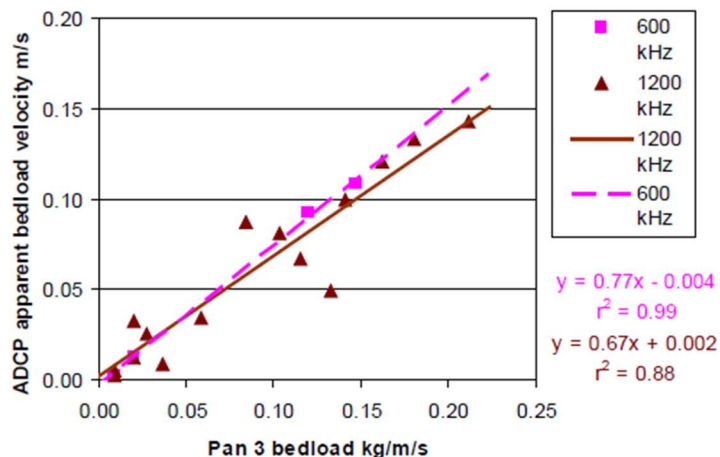
1.4. INDIREKT VAGY KÖZVETETT MÉRÉSI MÓDSZEREK

Az indirekt mérési módszerek lényege, hogy a mérőműszer nem érintkezik közvetlen módon a hordalékkal. A vízfolyásról alapinformációkra van szükség, például mederalak. A mérés során a vízfolyás valamilyen fizikai tulajdonságát mérik majd empirikus összefüggésekkel következtetnek a hordalékhozamra. Két nagy csoportra oszthatóak: optikai és akusztikus műszerek. A vizsgálatoknak elengedhetetlen része a megfelelő kalibráció. (Csiti, 2018) A második, tehát az akusztikus csoportba tartozik az ADCP műszer, amivel a dolgozatom foglalkozik. Az elmúlt években néhány külföldi kutatóintézet és a befogadó tanszék is foglalkozott az ADCP alapú hordalékmérés lehetőségeivel.

Az ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) áramlási és morfológiai folyamatok indirekt mérését teszi lehetővé. Elsődleges alkalmazási területei a vízhozammérés, és a mederdomborzat mérés.

Ramooz és Rennie (2010) a különböző frekvenciájú ADCP műszerrel végzett vizsgálatot laboratóriumi körülmények között, ahol egy kísérleti üvegcsatornában vándorló hordalék mozgását detektálták, és a hordalékhozamot közvetlenül is mérték, a csatorna végi csapdázással. Az ADCP alapú hordalékmérés lényege, hogy a műszer a vízoszlopbeli áramlási sebességek mérése mellett képes a mederfenék folyamatos letapogatására, továbbá a műszer mederfenékhez képesti elmozdulásának mérésére (az ún. Bottom Tracking, BT módszerrel). A feltételezések szerint a mederfelszín elmozdulása (amit a továbbiakban *látszólagos medervándorlási sebességnek* hívunk) a mérés közben a mederfelszínen vándorló hordalék mozgásával kapcsolható össze, ami pedig a görgetett hordalék mozgását fejezi ki. Vizsgálataikban erős kapcsolatot tudtak felállítani a vándorló hordalék mennyisége és a látszólagos medervándorlási sebesség között (3. ábra), és azt is kimutatták, hogy az alacsonyabb

frekvenciájú műszerek kevésbé érzékenyek a kisebb részecskékre így kisebb a jelcsillapításuk, így befolyásolhatja a mért sebességeket.



3. ábra Látszólagos medervándorlási sebesség és mért görgetett hordalékvándorlás eltérő frekvenciájú műszerek esetén.

A kezdeti kísérleti teszteredmények tehát igazolták, hogy a BT becslést ad a görgetett hordalék mozgásra, különösen a homokos medreknél voltak ígéretesek az eredmények, a kavicsos mederre kevésbé.

Egy 2017-es kutatásban a Paraná folyón Brazíliában vizsgálták az ADCP-t görgetett hordalék előrejelzésére (Latosinski et al., 2017). A kísérletek eredményeit Van Rijn fél empirikus modellel vetették össze. Ehhez a modellhez képest az ADCP-BT módszerrel kapott hibák 150-25% között voltak, ami azt mutatja, hogy megbízható eredményeket adhat. További következtetés, hogy a mederfenék összetételének ismerete javíthatja a mért értékeket.

2018-as Németországi kutatásban (Conevski et al., 2018) az ADCP által mért értékek szűrésével foglalkoztak, amivel csökkenthető a modell bizonytalansága, vagy elősegíthetik a fizikai minták minőségi igazolását. A szűrést az alábbi képlet alapján végezték:

$$\begin{cases} v_{afi} = NaN \text{ if } v_{ai} < 0 \\ v_{afi} = NaN \text{ if } v_{ai} > \bar{v}_{ai} + 3 \frac{1}{N_{raw} - 1} \sum_i (v_{ai} - \bar{v}_{ai})^2 \end{cases}$$

Ahol a

- v_a a nyers látszólagos sebesség,
- v_{af} a szűrt látszólagos sebesség,
- i az ADCP minta számát jelenti
- N_{raw} pedig a nyers adatok teljes számát.

Ezután a szűrt értékek alapján végezték átlagolást. Figyelmet kell fordítani a réteg porozitásának és vastagságának jó becslésre, a használt frekvenciára és az előre meghatározott hidraulikai paraméterek meghatározására, mert ezek befolyásolják leginkább az eredményeket.

A fentiekből látható tehát, hogy több külföldi tanulmány is foglalkozott az akusztikus elvű hordalékméréssel, bár folyami körülmények között, kavicsmederben csak kevesen, sőt, jó minőségű, ellenőrző adat, ami fizikai hordalékmintázásból származik, jellemzően nem áll rendelkezésre. A következőkben bemutatom, hogy jelen vizsgálat újszerűsége abban áll, hogy az akusztikus elvű hordalékmérés igazolásához nagyszámú direkt hordalékmintavételezés eredményeit használom fel, amelyeknél a hordalékmintavevőre rögzített kamerát alkalmaztunk. A kamerafelvételek alapján vizsgálható a mintavételezés megbízhatósága, vagyis az ADCP alapú eljáráshoz felhasznált összehasonlító adatok részletes minőségellenőrzésen mennek át, aminek során a hibás és/vagy nem megbízható adatokat ki tudjuk szűrni.

2. VIZSGÁLATI MÓDSZEREK

2.1. ESETTANULMÁNY HELYSZÍNE

A felhasznált méréseket a Duna magyarországi felső szakaszán, Gönyű település határában, az 1790,61 fkm-ben elhelyezett vízmérce szelvényében végezték az ÉDUVÍZIG munkatársai. A Mosoni-Duna 4 fkm-el felette torkollik a Dunába. Erre a szakaszra, a lelassult sebességek miatt jellemző a dűnék, zátonyok kialakulása, amik kisebb vízállásnál komolyabb akadályt tudnak okozni főleg hajósoknak. A vizsgált folyószakasz közelítőleg Ny – K irányítottaságú. A mérési keresztshelvény közelében sarkantyúk vannak kialakítva, a bal parton (4. ábra).

Összesen 19 mérési nap adatai álltak a rendelkezésemre.



4. ábra Helyszínrajz (forrás: Google Earth)

2.2. MÉRÉSI MÓDSZEREK

A dolgozatban 2 műszerrel, egyidőben végzett mérések eredményeit hasonlítom össze.

Az ADCP mérést az Észak-dunántúli Vízügyi Igazgatóság (ÉDUVIZIG) kitűzőhajójáról végzik, egy ponton lehorgonyzott állapotban a kijelölt függőlyekben. Mintavételi függőlyek 20 m, 60 m, 100 m, 140 m, 180 m távolságra vannak a jobb partéltól mérve. Időtartama jellemzően 15 perc, de ez módosulhat: alacsony hordalékmennyiségnél hosszabb időre, jelentős hordalékmennyiségnél viszont 5 perces mintavételi időt alkalmaznak (ezt általában 3-szor ismételve) a hordalékfogó túltelítettségének elkerülése végett. A második vagy harmadik függőlyben háromszor végzik el a mérést, mert itt a legjelentősebb a hordalékmozgás. A mintavételek között a műszert kiemelik, kiürítik és újra visszahelyezik. A kivett mintákat

összegyűjtik és pontosan felcímkézett zsákokban kerülnek a laborba. A felirat tartalmazza a mérés helyét (függély megnevezését) és időtartamát. A hordalékfogó mérőműszerre kamerát helyeznek, amivel a teljes mérést rögzítik. Az alábbi képen (5. ábra) látható oldalnézetben a BfG (German Institute of Hydrology – Német Hidrológiai Intézet által kifejlesztett műszer,) típusú hordalékfogó műszer és a kamera.



5. ábra BfG görgetett hordalékmintavevő műszer

Ezzel párhuzamosan, a hajóhoz rögzített csónakból végzik az ADCP műszeres állóhajós sebességmérést. Így a két mérés ideje megegyezik, helyileg pár méter távolságra.

Az alábbi táblázat összefoglalja a mérési napokat, vízhozamokat és egyéb a méréssel kapcsolatos fontos információkat.

dátum	Vízhozam [m ³ /s]	Megjegyzések
2019.04.12	2565	
2019.05.30	4233	A kamera a magas vízhozam miatti hordaléktöménység következtében az alkalmazott dupla fénytjeljesítmény (3.600 lm) mellett sem közvetít értékelhető képet.
2019.07.26		nincs kamera felvétel
2019.08.30	1276	nincs kamera felvétel
2019.09.27	1093	nincs kamera felvétel
2019.11.15	1424	nincs kamera felvétel
2019.11.29	1233	nincs kamera felvétel
2020.02.21	2095	
2020.03.27	1574	nincs kamera felvétel
2020.07.17	1798	
2020.09.18	1569	A 3. mérés után a leeresztő csörlő drótkötele elszakadt, a mérést nem tudták folytatni.
2020.11.13	1692	
2020.11.20	1358	
2020.11.27	1242	
2021.03.12	1434	
2021.03.26	1449	
2021.05.13	2400	
2021.05.27	2643	
2021.06.24	2412	

1. táblázat Információ a mérési napokról

2.3. ADATELEMZÉSI MÓDSZEREK

Az ADCP az akusztikus mérőműszerek csoportjába tartozik. A vízoszlop egyes rétegeire jellemző háromdimenziós sebességeket a Doppler hatás alapján méri. A hajó elmozdulását egy precíziós GPS segítségével szokták meghatározni. Egy másik lehetőséget az ADCP műszer mederletapogatás, azaz a Bottom Tracking (BT) funkciója biztosítja. A BT a motorcsónak elmozdulását becsüli a fixnek feltételezett mederfenékhez képest. Egy stabil medres, állóhajós mérésnél ez a funkció is mozdulatlan hajópozíciót adna. Viszont, mozgó meder esetén, a hordalékmozgás befolyásolja ezt az értéket: a hajó elmozdulására a hordalékmozgással megegyező nagyságú, de ellentétes irányú vektort számít. A GPS által ismerjük a meder mindenkor pontos pozícióját. A BT-vel becsült és a GPS-szel számolt elmozdulások különbsége a látszólagos medervándorlási sebességet adja (Conevski et al., 2018). A

dolgozatomban az ilyen módon meghatározható, ADCP alapú görgetett hordalékmozgás alkalmazhatóságát vizsgáltam. Referenciaképp a BfG típusú hordalékfogóval vett görgetett hordalékhozam értékeket vettem.

A vizsgálataim során nagy hangsúlyt fektettem a mintavételezést terhelő mérési hibák feltárására és kiküszöbölésére. Ennek érdekében végignéztem a hordalékcsapdázás során készített videófelveteleket. Legnagyobb hibák a berendezés mozgatása közben történtek. Azt tapasztaltam, hogy a mintavevő rossz lehelyezése/felemelése során a műszer „belemarkol” a mederbe, így a görgetett hordalékot alkotó szemcséken túl mederanyag is kerül a hordalékfogóba. Ezek a hibák torzítják az eredményeket, ugyanis a valósánál nagyobb hordalékmennyiséget eredményeznek. Sajnos több esetben nem készült videófelvétel, vagy az nem rögzítette a teljes mérési időtartamot. Így mivel ezeknél a hiba nem zárható ki teljes mértékben, nem használható mérésnek tekintettem.

3. EREDMÉNYEK ÉS ÉRTÉKELÉS

3.1. ADCP BT-GPS ELTÉRÉS ALAPJÁN VIRTUÁLIS HORDALÉKVÁNDORLÁSI SEBESSÉGEK SZÁMÍTÁSA

Az ADCP méréshez használt WinRiver II elnevezésű program segítségével kinyertem a mérőműszer valós (GPS alapú) és a BT által rögzített elmozdulás adatait, amit ezután táblázatos és grafikus formában is feldolgoztam. Az elemzést a következőképpen végeztem: A mérési eredmények közül kinyerhető a GPS és a BT kelet és észak irányú elmozdulásai minden mérési pillanatban. A kezdeti állapotot tekintettem az origónak, majd az utoljára mért időpillanatban lévő elmozdulást viszonyítottam hozzá, így kaptam egy elmozdulásvektort, ami tehát a mérőműszer mederfenékhez képesti elmozdulását fejezi ki.

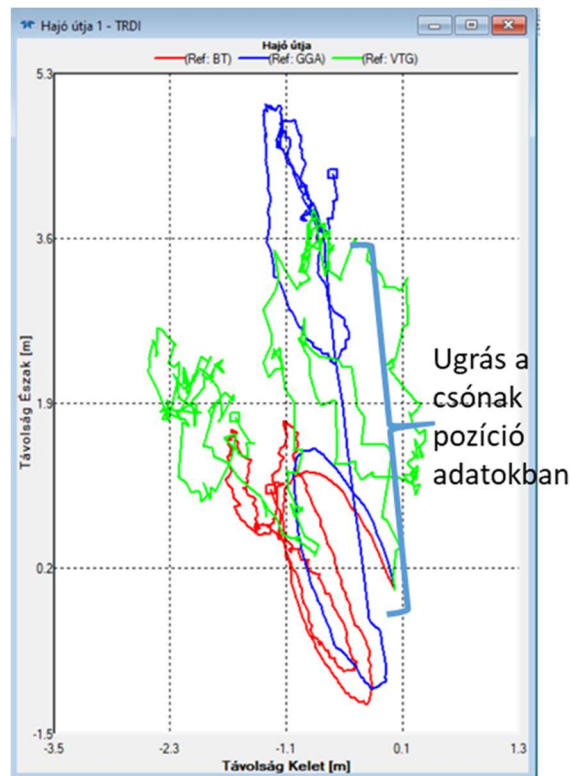
$$\Delta X = GPS\ East - BT\ East$$

$$\Delta Y = GPS\ North - BT\ North$$

$$\Delta L = \sqrt{\Delta X^2 + \Delta Y^2}$$

Ahol a ΔX a Kelet-Nyugat irányú elmozdulás, a ΔY pedig az észak-dél irányú. A kapott ΔL értéket elosztottam a mérés időtartamával (másodpercben), így kaptam a látszólagos medervándorlási sebesség vektorát. Ezt az elemzést minden mérési kampány minden mérési függélyére elvégeztem, így összesen mintegy 120 függélyre állítottam elő a látszólagos medervándorlás adatot.

A feldolgozás során világossá vált, hogy számos ADCP mérés hibával terhelt, mert valószerűtlen elmozdulásvektorokat kaptam. Ennek oka elsősorban a GPS pozícióadatok hibából adódtak, amiket szerencsére könnyen ki lehetett szűri. Több esetben például jelentős keresztirányú elmozdulást mutatott az adat, mintha a görgetett hordalék a fő áramlási irányra merőlegesen vándorolna. Több esetben felvízi irányú hordalékvándorlás látszott, ami szintén kizárható. Az alábbi ábrák néhány ilyen hibás mérést szemléltetnek. Az alábbi (6. ábra) például az látható, hogy a mérés során van egy ugrás a kék pozíció adatokban, ami a GPS adatokat jelenti, vagyis látszólag a mérőcsónak az egyik pillanatban hirtelen elmozdult. Mivel a csónak rögzítve volt, ez hibás GPS adatot jelent, és kiszűrhető.



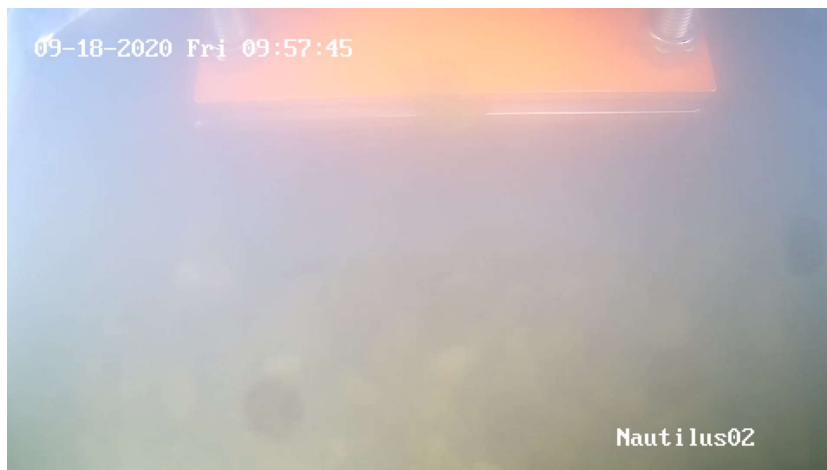
6. ábra Hibás pozíció mérés szemléltetése (a kék vonal a GPS szerint pozíciót mutatja, ahol egy pillanatnyi, valószerűtlen ugrás látható, hibával terhelve a mérést)

3.2. FIZIKAI GÖRGETETT HORDALÉKMINTÁZÁS VIZSGÁLATA VIDEÓK ALAPJÁN

Az elkészült kamerafelvételeket több kategória alapján osztályoztam. Sok esetben problémát okozott a felvétel nem megfelelő minősége. Ennek oka lehetett a víz zavarossága, a rossz fókusz, vagy a nem megfelelő időben elindított/leállított felvétel. Jó, gyenge és rossz kategóriákba soroltam őket ezek alapján.

- rossz: A videón nem kivehetőek a körvonalak és a mozgások, így meghatározhatatlan a mérés minősége.
- gyenge: Nagy odafigyeléssel, lassítással kiszűrhetőek a mozgások.
- jó: Minden megfelelő.

Mindegyik minőségi osztályra mutat be példákat az alábbi (7., 8., 9. ábra)



7. ábra Rossz minőségű videófelvétel



8. ábra Gyenge minőségű videófelvétel



9. ábra Jó minőségű videófelvétel

A másik osztályozási szempont a mérési hibák voltak. Ezt három időintervallumban vizsgáltam meg. A lehelyezés és kivétel közbeni mozgatsnál nagy esély van arra, hogy a meder anyagába belemarkol, így ezek fontos pillanatok voltak. Illetve a köztes időt egyben tekintettem. Itt négy kategóriát határoztam meg:

- Nem látszik – nincs rajta a videón (kései elindítás, korai kikapcsolás)
- Belekap – ez a mozgás következtében egy nagy darab kimarkolása a mederből (10. ábra).
- Jó – megfelelő mérés.
- Meghatározhatatlan - a videó minősége miatt nem kivehető.



10. ábra Lehelyezéskor a mérőműszer belemarkol "belekap" a meder anyagába

Ezek figyelembevételével értékeltem a méréseket összeségében. Jó meghatározást kaptam, ha használható, megfelelő mérés. Kamera hiba, ha a minőség miatt nem jelenthető ki egyértelműen, hogy megfelelő-e a mérés. A mérési hiba pedig, ha belemarkol a mederbe vagy rossz a lehelyezés iránya.

Az összefoglaló értékelést az alábbi táblázat szemlélteti, a részletes értékelést a függelékben található. A továbbiakban már csak azokat a méréseket használom fel, amik „jó” minősítést kaptak, ezek száma 21 volt.

2019.04.12		2020.11.13		2021.05.13	
F1.1	kamera hiba	F1	kamera hiba	F1	kamera hiba
F1.2	kamera hiba	F2	jó	F2	kamera hiba
F2	kamera hiba	F3.1	jó	F3.1	jó
F3.1	mérés hiba	F3.2	jó	F3.2	mérés hiba
F3.2.1	kamera hiba	F3.3	mérés hiba	F3.3	mérés hiba
F3.2.2.1	kamera hiba	F4	kamera hiba	F4	mérés hiba
F3.2.2.2	kamera hiba	F5	jó	F5	jó
F3.2.3.	kamera hiba	2020.11.20		2021.05.27	
F3.3.1.	mérés hiba	F1	jó	F1	jó
F3.3.2.	mérés hiba	F2	jó	F2	jó
F3.3.3	mérés hiba	F3.1	jó	F3.1	jó
F4	mérés hiba	F3.2	jó	F3.2	mérés hiba
F5	kamera hiba	F3.3	mérés hiba	F3.3	mérés hiba
2020.02.21		F4	mérés hiba	F4	mérés hiba
F1	jó	F5	mérés hiba	F5	mérés hiba
F2.1	rossz	2020.11.27		2021.06.24	
F2.2	jó	F1	kamera hiba	F1	kamera hiba
2020.07.17		F2	mérés hiba	F2	mérés hiba
F1	kamera hiba	F3.1	jó	F3.1	mérés hiba
F2	mérés hiba	F3.2	mérés hiba	F3.2	mérés hiba
F3.1	kamera hiba	F3.3	jó	F3.3	mérés hiba
F3.2	kamera hiba	F4	mérés hiba	F3.4	kamera hiba
F3.3	mérés hiba	F5	jó	F3.5	kamera hiba
F4	jó	2021.03.12		F3.6	mérés hiba
F5	jó	F1	mérés hiba	F3.7	kamera hiba
2020.09.18		F2	kamera hiba	F3.8	kamera hiba
	kamera hiba	2021.03.26		F3.9	kamera hiba
F5	kamera hiba	F1	kamera hiba	F4	kamera hiba
F4	kamera hiba	F2	mérés hiba	F5	kamera hiba
?	kamera hiba	F3.1	mérés hiba		
?	kamera hiba	F3.2	mérés hiba		
		F3.3	mérés hiba		
		F4	mérés hiba		
		F5	jó		

2. táblázat Videós értékelés eredményei

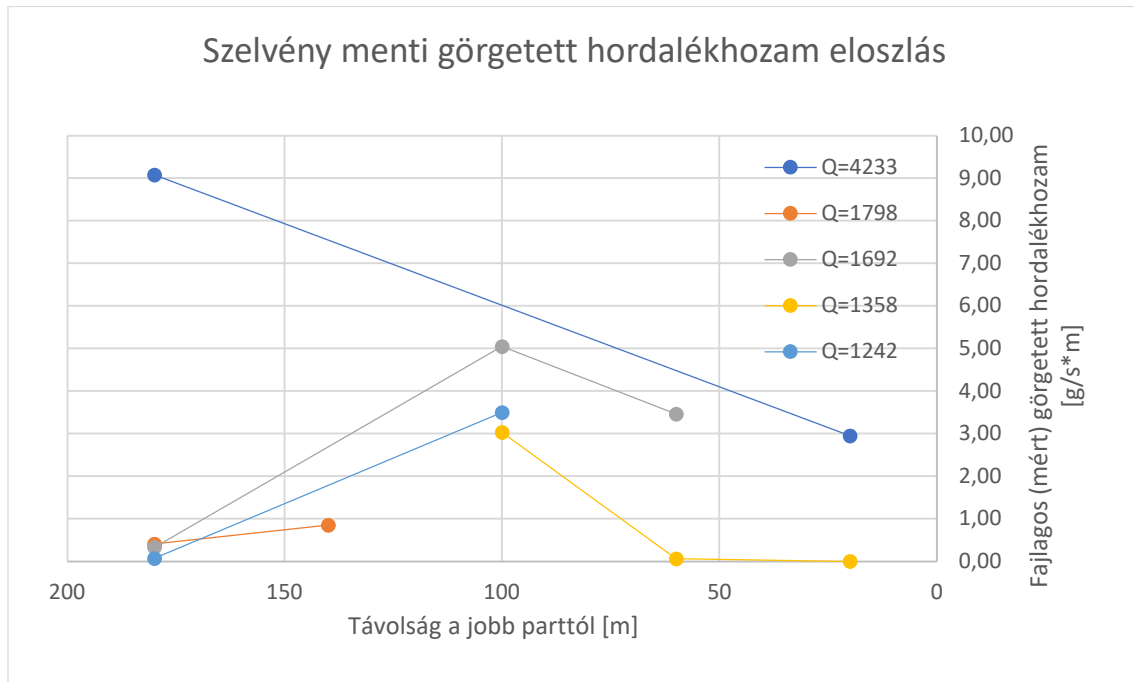
3.3. MÉRT HORDALÉKVÁNDORLÁS ÉS ADCP ALAPÚ VIRTUÁLIS SEBESSÉGEK KAPCSOLATÁNAK VIZSGÁLATA

Azon méréseket, amik a videós ellenőrzés alapján megfeleltek, próbáltam kapcsolatot keresni az ADCP által mért látszólagos medervándorlási sebességek és a hordalékvándorlási értékek között. A csapázással kinyert hordalék elemzését a Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszék laboratóriumában végezték el, és az eredményeket táblázatos formában kaptam meg. Innen számomra a fajlagos hordalékhozam (tehát a mintavétel helyén jellemző egységnyi szélességre vonatkozó hozam) és a d_{50} -es (tehát átlagos) szemcseméretetek voltak. Az ADCP mérés alapján a hordalékhozam (q_{bl}) számítását pedig az alábbi összefüggéssel becsültem meg:

$$q_{bl} = v * d_{50} * (1 - \lambda) * \alpha * \rho_{hordalék}$$

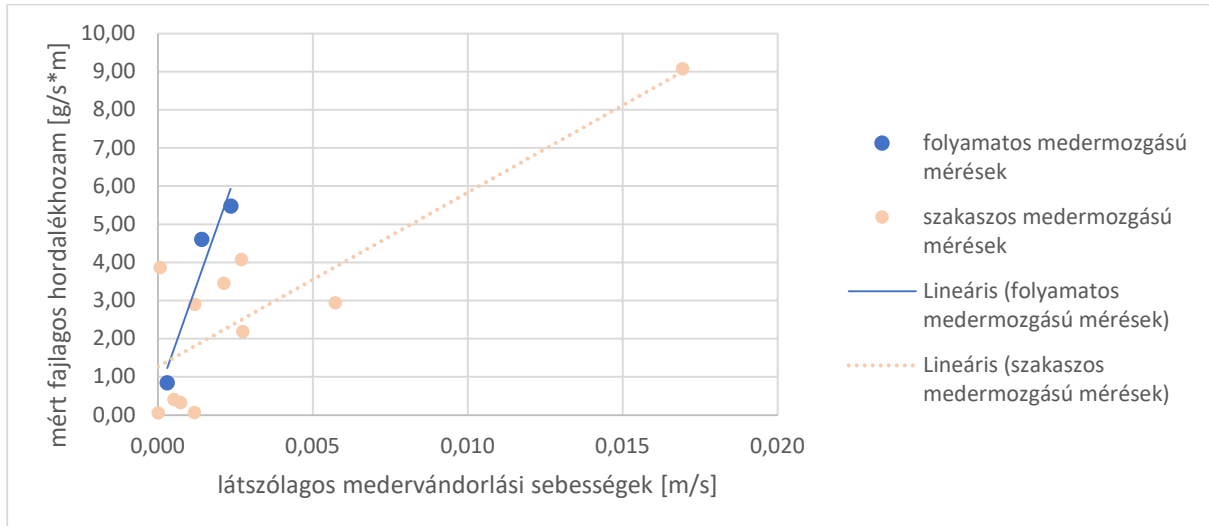
Ahol v a látszólagos medervándorlási sebesség, d_{50} a hordalékszemcseméret nagysága, $\lambda=0,3$ a porozitás, α egy kalibrálandó paraméter (amit első próbálkozónaként 0,2-nek vettem fel, más tanulmányok alapján) és $\rho_{hordalék}=2650 \text{ kg/m}^3$ a hordalék testsűrűsége.

Elsőként a videó alapú szűrés után megmaradt hordalékminták alapján vizsgáltam meg a szállított görgetett hordalékhozam keresztmetszvény menti alakulását (11. ábra). Az adatok meglehetősen hiányosak, de az megfigyelhető, hogy több esetben a középső függélynél alakul ki a legnagyobb hordalékvándorlás, a partok felé pedig csökken. Kivétel ez alól a legnagyobb vízhozamhoz tartozó mérés eredménye, ahol a bal part környékén látszik a legnagyobb érték, jóllehet a köztes függvényekben sajnos nem áll rendelkezésre adat.

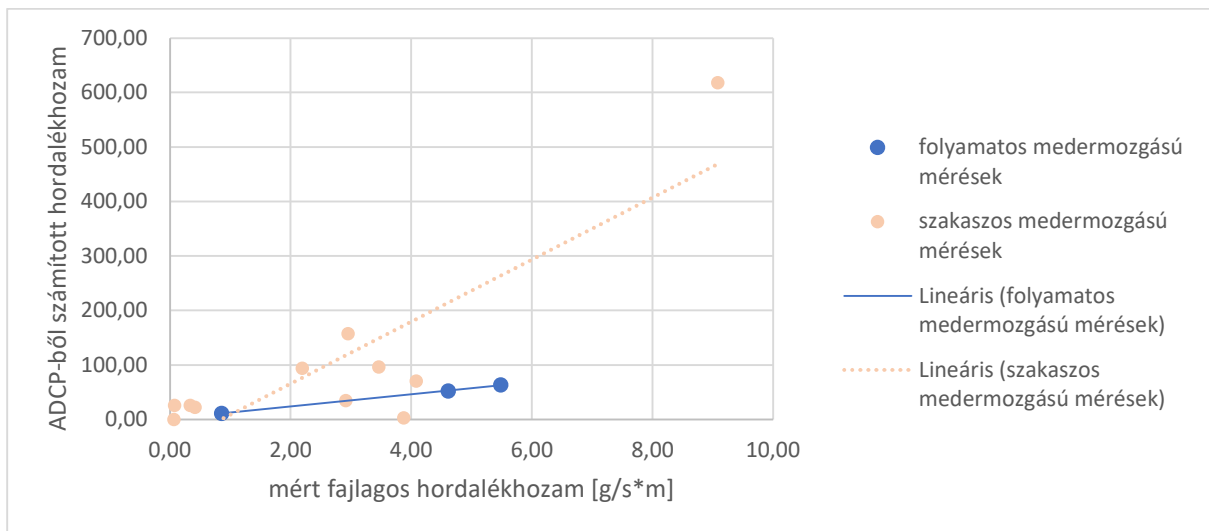


11. ábra Szelvény menti görgetett hordalékhozam eloszlás (a jelmagyarázatban feltüntetett számok a méréskor jellemző vízhozamokat mutatják, m^3/s -ban).

A következő lépésben minden mért hordalékhozam adatra kigyűjtöttem az ADCP alapú látszólagos medervándorlási sebesség adatokat és ábrázoltam a mért hozammal összekapcsolva. A pontok nagy szórást mutattak, ezért egy következő lépésben legyűjtöttem azokat, amelyeknél a videók alapján folyamatos hordalékvándorlás tapasztalható. A legtöbb mérésnél azt tapasztaltam, hogy a hordalék mozgása esetleges, szakaszos nem pedig lefelszerű. Ezeknél a méréseknél messze nem egyértelmű, hogy az ADCP mederletapogatása pontosan mit mutat. Ha csak az így leválasztott adatokat vizsgáltam, akkor már egyértelműen látható a kapcsolat az adatok között. Ezeket az alábbi diagramok szemléltetik (12. és 13. ábra). A feldolgozott adatokat összefoglalóan a 3. táblázat tartalmazza.

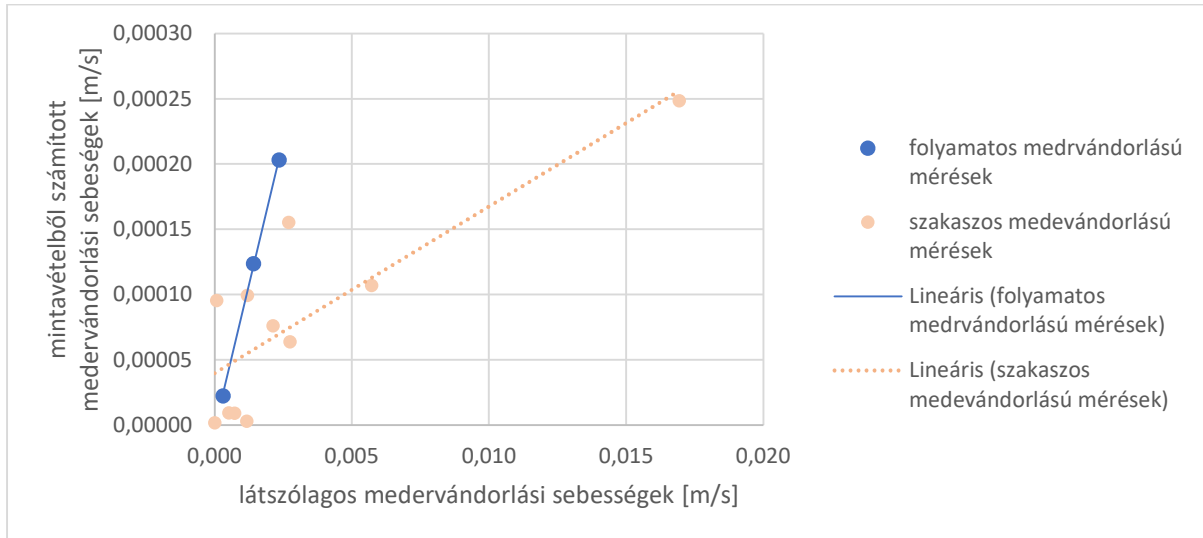


12. ábra A látszólagos medervándorlási sebességek és a mért fajlagos hordalékhozam vizsgálata folyamatos és impulzusszerű medermozgásnál



13. ábra A mért fajlagos hordalékhozam és az ADCP-ből számított hordalékhozam kapcsolatának vizsgálata folyamatos és impulzusszerű medermozgásnál

Az eredmények tehát felvetik a kérdést, hogy az ADCP mederletapogatása során becsült hordaléksebesség fizikailag milyen tartalommal bír. A kérdés vizsgálata érdekében a látszólagos medervándorlási sebességek függvényében megjelenítettem a mért fajlagos hordalékhozamokból visszszámított hordalék sebességeket. A számítás során d_{50} , λ , α és ρ változók értékei megegyeztek az ADCP alapú hordalékhozam számítása során felvett értékeivel.



14. ábra A látszólagos medervándorlási sebességek és a mintavételből számított medervándorlási sebességek

Az ábra alapján (14.ábra) az látható, hogy az ADCP alapján becsült látszólagos medervándorlási sebességek közel egy nagyságrenddel nagyobbak, mint a mért adatokból származtatott sebességeknél. Ebből arra következtethetünk, hogy az ADCP nem a mérések során csapdázott görgetett hordalék rétegének átlagos sebességét becsüli. Ez az ADCP adatokból származtatott hordalék sebesség értelmezéséhez további vizsgálatok szükségesek.

		Q [m ³ /s]	ΔX -kelet	ΔY -észak	ΔL [m]	T [s]	V [m/s]	Hordalék mozgás jellege	fajlagos Hordalékhozam [g/s ² m]	d50 [mm]	ADCP-ből számított hord. Hozam
19.05.30	F1	4233	1,709	-0,247	1,727	302	0,006	nincs video	2,95	7,43	157,61
	F5		5,168	0,674	5,212	308	0,017	nincs video	9,08	9,84	617,76
20.02.21	F1	2095	0,242	-0,219	0,327	304	0,001	szakaszos			
	F2		1,648	-0,990	1,922	305	0,006	szakaszos			
20.07.17	F4	1798	0,094	0,300	0,314	313	0,000	folyamatos	0,85	10,18	11,28
	F5		0,158	-0,022	0,159	311	0,001	szakaszos	0,41	11,62	22,10
20.11.13	F2	1692	-0,321	0,561	0,647	305	0,002	szakaszos	3,46	12,24	96,26
	F3.1		0,375	-0,607	0,714	304	0,002	folyamatos	5,48	7,27	63,31
	F3.2		0,282	-0,320	0,426	303	0,001	folyamatos	4,61	10,04	52,40
	F5		0,062	0,211	0,220	303	0,001	szakaszos	0,33	9,53	25,67
20.11.20	F1	1358	0,230	2,333	2,345	315	0,001	szakaszos			
	F2		-0,723	2,259	2,372	306	0,000	szakaszos	0,06	8,68	0,00
	F3.1		-0,815	-0,186	0,836	306	0,003	szakaszos	2,19	9,24	93,78
	F3.2		0,020	0,090	0,092	308	0,000	szakaszos	3,87	10,92	2,68
20.11.27	F3.1	1242	-0,115	-0,815	0,823	306	0,003	szakaszos	4,08	7,08	70,67
	F3.3		-0,093	-0,349	0,361	305	0,001	szakaszos	2,91	7,88	34,63
	F5		0,040	-0,355	0,357	305	0,001	szakaszos	0,07	5,92	25,73
21.03.26	F5	1449	-0,131	-0,214	0,251	305	0,001	szakaszos			
21.05.13	F3.1	2400	1,920	-8,376	8,593	264	0,033	szakaszos			
	F5		11,490	3,232	11,935	358	0,033	szakaszos			
21.05.27	F1	2643	0,556	0,801	0,975	305	0,003	szakaszos			

3. táblázat A mérési adatok összefoglaló táblázata

4. KÖVETKEZTETÉSEK, JAVASLATTÉTEL

A dolgozatban az ADCP műszer alkalmazásával becsülhető hordalékmozgás sebesség és a fajlagos hordalékhozam közötti kapcsolatot próbáltam feltárni.

Már az ADCP mérés vizsgálatánál találkozunk hibás adatokkal, mert önmagában a pozíció meghatározás tartalmaz hibát, pl.: GPS esetén megszűnhet a jel. Így már ezeket önmagában nem tudjuk felhasználni a kutatás során. Szerencsére ezek a hibákat könnyen ki lehet szűrni, mert a hirtelen nagy elmozdulások utalnak az ilyen hibás pontokra. Így a korrekció elvégezhető.

A fizikai hordalékmintázás a mérési eljárásból kifolyólag tartalmaz hibákat (nem fekszik a mederre, belemarkol a mederanyagba...stb.) Ezeket a mérés közben készült videók alapján lehet ellenőrizni és az ilyen módon hibás adatokat ki lehet szűrni.

A hordalékmozgás sokszor szakaszos volt, amit a videófelvételek alapján állapítottam meg. A kutatás ezen fázisában még nem tudjuk, hogy az ADCP mérésben ez hol és milyen formában jelenik meg. Ezért azt az utat választottuk, hogy leszűrtük azokat a méréseket, ahol a hordalék mozgása egyenletes volt. Ahogy korábbi kutatások is megmutatták (labormérések, homokos meder vizsgálatok során), belátható, hogy van kapcsolat a görgetett hordalék hozam és a mederfenék elmozdulások között.

Mindezek alapján javaslom, hogy a hordalékcsapdázás során felmerülő hibákat, a videó felvétel alapján a helyszínen kövessék figyelemmel és ismételjék meg a mérést hiba esetén. Megfontolandó továbbá, hogy minden szelvényben többször végezzék el a vizsgálatot, hogy minél reálisabb eredményeket kapjunk.

Továbbá célszerű lenne vizsgálni a hordalékmozgás folytonossá válásának feltételeit. Feltételezésem szerint morfodinamikai paraméterek alapján jellemezhető az a határállapot, ami elválasztja egymástól a szakaszos és folytonos hordalékmozgást. Ez célirányos terepi mérések könnyebb megtervezhetőségét alapozná meg.

IRODALOMJEGYZÉK

DanubeSediment (2019). Sediment Monitoring in the Danube River. Szakértői jelentés. BME, 2019.

Bogárdi János: Vízfolyások hordalékszállítása (Akadémiai Kiadó, Budapest, 1971)

Csiti Bence: Folyami görgetett hordalékmérési módszerek terepi és számítógépes vizsgálata. Tudományos Diákköri Dolgozat. BME. 2018.

Szombati Dóra Csilla: Kavicsos és vegyes szemösszetételű folyók görgetett hordalékhozamának becslése doppler elvű eljárással. Tudományos Diákköri Dolgozat. BME. 2014.

Conevski, S., Rüther, N., Winterscheid, A., Gurrero, M.: Evaluation of an acoustic Doppler technique for bed-load transport measurements in sand-bed Rivers. River Flow Conference 2018.

Ramooz, R; Rennie, C.D.: Laboratory Measurement of Bedload with an ADCP (2010). Published online in 2010 as part of U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2010-5091.

Latosinski, F. G., Szupiany, R. N., Guerrero, M., Amsler, M. L. and C. Vionnet, "The ADCP's bottom track capability for bedload prediction: Evidence on method reliability from sandy river applications," Flow Measurement and Instrumentation, vol. 54, no. June 2016, pp. 124-135, 2017

FÜGGELÉK

Kamera értékelés1. A videós értékelés részletei:

	leérkezés	közben	felemelés	videó minősége	ÖSSZEFOGLA LÓ
2019.04.12. F1.1	jó	jó	nem látszik	jó	kamera hiba
2019.04.12. F1.2	nem látszik	jó	jó	jó	kamera hiba
2019.04.12. F2	nem látszik	jó	nem látszik	jó	kamera hiba
2019.04.12. F3.1	belekap	jó	jó	jó, gyenge	mérés hiba
2019.04.12. F3.2.1	nem látszik	jó	jó	jó	kamera hiba
2019.04.12. F3.2.2.1	nem látszik	jó	nem látszik	jó	kamera hiba
2019.04.12. F3.2.2.2	nem látszik	jó	jó	jó	kamera hiba
2019.04.12. F3.2.3.	nem látszik	jó	jó	jó	kamera hiba
2019.04.12. F3.3.1.	belekap	belekap	jó	jó	mérés hiba
2019.04.12. F3.3.2.	belekap	jó	jó	jó	mérés hiba
2019.04.12. F3.3.3	nagyon belekap	belekap	jó	jó	mérés hiba
2019.04.12. F4	nem látszik	belekap	jó	jó	mérés hiba
2019.04.12. F5	nem látszik	jó	jó	jó, gyenge	kamera hiba
2020.02.21 F1	jó	jó	jó	gyenge	jó
2020.02.21 F2.2	jó	jó	jó	jó	jó
2020.07.17. F1	nem látszik	meghatározhatatlan	meghatározhatatlan	gyenge, rossz	kamera hiba
2020.07.17. F2	jó	4:14 belekap	jó	jó	mérés hiba
2020.07.17. F3.1	jó	rossz szög	nem látszik	jó	kamera hiba
2020.07.17. F3.2	nem látszik	rossz szög, belekap	nem jó	jó	kamera hiba
2020.07.17. F3.3	belekap	7:40 belekap	belekap	jó	mérés hiba
2020.07.17. F4	jó	jó	jó	jó	jó
2020.07.17. F5	jó	jó	jó	jó	jó
2020.09.18?	meghatározhatatlan	meghatározhatatlan	meghatározhatatlan	rossz	kamera hiba
2020.09.18 F5	jó?	jó	meghatározhatatlan	rossz	kamera hiba
2020.09.18 F4	jó?	meghatározhatatlan	meghatározhatatlan	rossz	kamera hiba
2020.09.18?	kicsit belekap?	meghatározhatatlan	meghatározhatatlan	rossz	kamera hiba
2020.09.18?	meghatározhatatlan	meghatározhatatlan	meghatározhatatlan	rossz	kamera hiba

2020.11.13. F1	jó	jó	nem látszik	jó	kamera hiba
2020.11.13. F2	kicsit belekap	jó	jó	jó	jó
2020.11.13. F3.1	jó	jó	jó	jó	jó
2020.11.13. F3.2	jó	jó	jó	jó	jó
2020.11.13. F3.3	jó	1 perc kis belekapás	jó	jó	mérés hiba
2020.11.13. F4	nem látszik	jó	jó	jó	kamera hiba
2020.11.13. F5	jó	jó	jó	jó	jó
2020.11.20. F1	jó	jó	jó	jó	jó
2020.11.20. F2	jó	jó	jó	jó	jó
2020.11.20. F3.1	jó	jó	jó	jó	jó
2020.11.20. F3.2	jó	jó	jó	jó	jó
2020.11.20. F3.3	enyhén belekap	jó	jó	jó	mérés hiba
2020.11.20. F4	enyhén belekap	belekap	jó	jó	mérés hiba
2020.11.20. F5	jó	belekap	jó	jó	mérés hiba
2020.11.27. F1	nem látszik	jó	jó	jó	kamera hiba
2020.11.27. F2	enyhén belekap	belekap	jó	jó	mérés hiba
2020.11.27. F3.1	jó	jó	jó	jó	jó
2020.11.27. F3.2	enyhén belekap	jó	jó	jó	mérés hiba
2020.11.27. F3.3	jó	jó	jó	jó	jó
2020.11.27. F4	belekap	jó	jó	jó	mérés hiba
2020.11.27. F5	jó	jó	jó	jó	jó
2021.03.12 F1	jó	belekap	nem látszik	jó	mérés hiba
2021.03.12 F2	nem látszik	jó	jó	jó	kamera hiba
2021.03.26. F1	jó	belekap	meghatározhatatlan	jó	kamera hiba
2021.03.26. F2	belekap	jó	jó	jó	mérés hiba
2021.03.26. F3.1	belekap	jó	jó	jó	mérés hiba
2021.03.26. F3.2	belekap	jó	jó	jó	mérés hiba
2021.03.26. F3.3	belekap	jó	jó	jó	mérés hiba
2021.03.26. F4	belekap	jó	jó	jó	mérés hiba
2021.03.26. F5	jó	jó	jó	jó	jó
2021.05.13. F1	jó	jó	nem látszik	gyenge	kamera hiba
2021.05.13. F2	nem látszik	jó	jó	gyenge	kamera hiba
2021.05.13. F3.1	jó	jó	jó	gyenge	jó
2021.05.13. F3.2	belekap	mozgatás, belekap	jó	jó	mérés hiba
2021.05.13. F3.3	belekap	mozgatás, belekap	jó	gyenge	mérés hiba
2021.05.13. F4	nem látszik	mozgatás, belekap	jó	gyenge	mérés hiba
2021.05.13. F5	jó	jó	jó	gyenge	jó
2021.05.27 F1	jó	mozgatás,	jó	jó	jó
2021.05.27 F2	jó	jó	jó	jó	jó
2021.05.27 F3.1	jó	jó	jó	jó	jó
2021.05.27 F3.2	belekap	jó	jó	jó	mérés hiba

2021.05.27 F3.3	belekap	jó	jó	jó	mérés hiba
2021.05.27 F4	belekap	mozgatás, belekap	jó	jó	mérés hiba
2021.05.27 F5	belekap	jó	jó	jó	mérés hiba
2021.06.24. F1	meghatározhatatlan	meghatározhatatlan	meghatározhatatlan	rossz	kamera hiba
2021.06.24. F2	meghatározhatatlan	mozgatás	meghatározhatatlan	rossz	mérés hiba
2021.06.24. F3.1	belakap	belekap	jó	rossz	mérés hiba
2021.06.24. F3.2	belakap	mozgatás, belekap	jó	gyenge	mérés hiba
2021.06.24. F3.3	belakap	mozgatás, belekap	jó	gyenge	mérés hiba
2021.06.24. F3.4	nem látszik	nem látszik	belakap	gyenge	kamera hiba
2021.06.24. F3.5	nem látszik	nem látszik	nem látszik	meghatározhatatlan	kamera hiba
2021.06.24. F3.6	belekap	meghatározhatatlan	meghatározhatatlan	rossz	mérés hiba
2021.06.24. F3.7	meghatározhatatlan	meghatározhatatlan	meghatározhatatlan	rossz	kamera hiba
2021.06.24. F3.8	meghatározhatatlan	jó	jó	rossz	kamera hiba
2021.06.24. F3.9	meghatározhatatlan	meghatározhatatlan	meghatározhatatlan	rossz	kamera hiba
2021.06.24. F4	meghatározhatatlan	meghatározhatatlan	meghatározhatatlan	rossz	kamera hiba
2021.06.24. F5	jó?	meghatározhatatlan	meghatározhatatlan	rossz	kamera hiba