



Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszék

# KAVICSOS ÉS VEGYES SZEMÖSSZETÉTELŰ FOLYÓK GÖRGETETT HORDALÉKHOZAMÁNAK BECSLÉSE DOPPLER ELVŰ ELJÁRÁSSAL

*TUDOMÁNYOS DIÁKKÖRI KONFERENCIA*

*2014*

Készítette: **Szombati Dóra Csilla**      Infrastruktúra-építőmérnök BSc. hallgató

Konzulensek:

Dr. Baranya Sándor                      egyetemi docens, BME Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszék

Török Gergely Tihamér                doktorandusz, BME Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszék

## TARTALOM

1	Bevezetés .....	2
2	Görgetett hordalékmozgás .....	3
3	Görgetett hordalékmérési módszerek .....	4
3.1	Görgetett hordalék mintavevők típusai.....	5
3.1.1	Kézi, hordozható mintavevők .....	5
3.1.2	Kézi vezérlésű, hordozható mintavevők kalibrálása/hitelesítése .....	7
3.1.3	Árkos- és vályús mintavevők.....	8
3.2	Indirekt eljárások.....	9
4	ADCP alapú görgetett hordalékmérés.....	12
5	Esettanulmány bemutatása.....	16
6	Érzékenységvizsgálat.....	19
7	Eredmények.....	24
8	Összefoglalás. Következtetések .....	29
9	Irodalomjegyzék .....	31
10	Függelék.....	32

# 1 BEVEZETÉS

Folyók görgetett hordalékhozamának meghatározása napjainkban is kihívás elé állítja a vízmérnököket, geográfusokat. A hordalékmozgás mérése – különösen nagy folyók esetében – idő- és költségigényes, mert a hordalékfogó eszközök mozgatása komoly apparátust igényel. Kis mérőhajókról a vizsgálat nem kivitelezhető, hagyományosan ezért hidakról vagy nagyobb hajóról végzik a mintázást. A hordalékmérést további bizonytalansággal terheli, hogy a szemcsék mozgásának jellege térben és időben is változékony, így nagyszámú mérés szükséges ahhoz, hogy reprezentatív adatokat kapjunk. Ahogy a dolgozatban később ismertetem számos görgetett hordalékmérési módszert fejlesztettek különböző méretű- és mederanyagú folyókra, de általánosan elfogadható „jó” módszer egyelőre nem ismeretes. A közvetlen hordalék mintavételek mellett az utóbbi időkben egyre szélesebb körben végeznek vizsgálatokat követett vagy indirekt mérési eljárásokkal, amelyek általában valamilyen hangvisszaverődés- vagy optikai alapon működnek, de ezek a módszerek legtöbbje kutatási fázisban van.

Folyók hordalékhozamának meghatározása több szempontból is lényeges feladat. A görgetett hordalékmozgás követlen hatással van a mederváltozásra, így pl. a hajózóút változásaival közvetlenül kapcsolatban áll, de fontos vizsgálati terület pl. az élőhely szempontú medermorfológia, ahol hasonlóan lényeges a hordalékvándorlás ismerete. A folyóban mozgó hordalék mennyiségét tapasztalati összefüggésekkel is becsülhetjük, ezek a képletek elsősorban hidraulikai adatokra és hordalék szemösszetételi adatokra épülnek. Jóllehet, az empirikus és félempirikus összefüggések alkalmazását nagyon körültekintően kell megtenni, mert azok könnyen eredményezhetnek egymáshoz képest nagyságrendi eltéréseket. A tapasztalati összefüggések és a hordalékmérési eljárások mellett még a számítógépes szimulációk jöhetnek számításba folyók hordalékszállításának meghatározására, de éppen a hordalékvándorlási jelenségek komplexitása miatt elkerülhetetlen azok terepi adatokkal való ellenőrzése.

Mindezek alapján a jelen kutatás témájául egy még kutatási fázisban lévő hordalékmérési módszer vizsgálatát tűztem ki célul, amely hozzájárulhat a folyók görgetett hordalékhozamának pontosabb és méréstechnológiai szempontból egyszerűbb végrehajtásához. A vizsgálat alapjául az akusztikus Doppler elven működő sebességmérő műszer (ADCP) szolgál, amelynek – ahogy az a későbbiekben ismertetésre kerül – a mederletapogató (Bottom Tracking) funkcióját használjuk a medermozgás meghatározására.

A dolgozatban nemzetközi irodalom alapján áttekintem a különböző görgetett hordalékmérési módszereket, ismertetem az általam alkalmazott hordalékhozam becslési módszert, érzékenységvizsgálatot végzek valós mérési adatokat (a Dráva folyón elvégzett mérésekből)

felhasználva a becslési módszerre, végül összefoglalom az eredményeket és javaslatot teszek az ADCP alapú görgetett hordalékhozam mérési eljárás alkalmazhatóságára.

## 2 GÖRGETETT HORDALÉKMOZGÁS

A hordalékmozgással kapcsolatos jelenlegi ismereteket jól foglalja össze az Amerikai Építőmérnöki Kamara Sedimentation Engineering (ASCE, 2008) című kézikönyve, ezért a kötetben leírtak alapján mutatom be a kapcsolódó legfontosabb fogalmakat.

A vízfolyásokban található hordalékot mozgásjellegük alapján alapvetően két fő csoportba soroljuk: lebegtetett és a görgetett hordalék. A lebegtetett hordalék oldott, illetve szilárd formában, a teljes függély mentén elkeveredve szállítódik. Ezzel szemben, a mederfenék felszínén utazó nagyobb méretű szemcsék alkotják a görgetett hordalékot. A görgetett hordalék legfőbb jellemzői, hogy a részecskék a mederfenéken gördülnek, csúsznak és ugrálnak, nem távolodnak el túlzottan a medertől. Ezzel szemben a lebegtetett hordaléknál döntően a folyó turbulenciája határozza meg annak mozgását, sőt, annak vándorlását a hullámozgás is befolyásolja.

Mind a görgetett, mind a lebegtetett hordalék esetén a mozgások kiváltója a gravitáció folyadékra gyakorolt hatása. A két mozgástípust általában kezelhetjük külön, mert a töménységeloszlásuk jól elválasztható. A szilárd szemcsék formájában mozgó hordalék nagymértékű méretkülönbségeket mutatnak a folyókban, jellemző szemátmérőjük alapján a következő osztályokba sorolhatjuk őket: iszap, homok, kavics, kövek, sziklák. Ezek a kőtípusok anyagukat tekintve általában kvarc, földpát, mészkő, gránit, bazalt és egyéb kevésbé ismert típusok pl.: magnetit.

A hordalék körforgása az erózióval kezdődik. Az erózió kiváltói a víz, a szél, a gleccserek valamint a növényi és az állati tevékenységek. A folyami hordalékok jól mutatják, hogy milyen a víz erodáló hatása. A természetes vagy geológiai erózió lassan következik be évszázadokon vagy évmilliókon keresztül, míg az emberi tevékenységekből eredő erózió sokkal gyorsabb. Mindkét erózió szerepe nagyon fontos amikor a hordalék vándorlását vizsgáljuk. A hordaléktranszport folyamata már a földfelszínen elkezdődik az esőcseppek által okozott erózióval. Az erek, vízmosások, patakok és folyók egyfajta vezetékként viselkednek a hordaléktranszport során. Minél nagyobb a kirakódás vagy a sebesség a vízfolyásban, annál nagyobb annak hordalékszállító kapacitása. Az hordaléktranszport folyamat legutolsó része a lerakódás, amikor a folyó lelassul és már nincs elég energiája a hordalék szállítására, így lerakja azt.

A görgetett hordalékmozgás vizsgálatának két nemzetközi szinten kiemelkedő kutatója Brigadier Ralph Alger Bagnold és Hans Albert Einstein. Munkásságuk alapvető szerepet játszott a

hordalékvizsgálatok fő irányvonalainak. Bagnold úgy definiálta a görgetett hordalékmozgást, hogy a meder és a részecskék közti folyamatos kapcsolat erősen befolyásolt a gravitációtól, míg a lebegtetett hordalékmozgásnál a részecskék vízhez képesti túlsúlyát a turbulens örvények által létrehozott felfelé ható impulzusok okozzák. Ezzel szemben Einstein szerint a hordalék részecskéi egy vékony rétegen mozognak a meder felett, ami körülbelül két részecske átmérőjének felel meg és a mederfenék viszonyai olyanok, hogy a turbulencia olyan kicsi, hogy az nem hat konkrétan a részecskékre. Elmélete szerint a legnagyobb távolság amit egy részecske egy "ugrással" meg tud tenni az körülbelül 100 részecskeátmérő, de ez természetesen függ a lefolyástól, a szállítási aránytól és a meder összeállításától.

Einstein szerint az ugráló részecskék lebegtetett hordaléknak minősülnek, ha az ugrás magassága és hossza nagyobb, mint néhány szemcseátmérő, míg Bagnold szerint az ugrálás a görgetett hordalékmozgások legfőbb folyamata.

### 3 GÖRGETETT HORDALÉKMÉRÉSI MÓDSZEREK

Folyók görgetett hordalékhozamának ismerete sok szempontból fontos. A hordalékok mozgása a folyón lefelé feltölti a tározókat és csatornákat, ami akadályozhatja a vízi közlekedést, növeli az árvízi kockázatot, ronthatja a vízminőséget és csökkentheti a vízi élővilágot. A helyi erózió és kimosódás instabillá teszi a csatornák partját.

A hordalékmozgás mértéke jelentősen változhat térben és időben annak ellenére, hogy az áramlási viszonyok változatlanok. Ez adja a nehézségét egy olyan általánosan alkalmazható mintavevő előállításának, amely egyenlő hatékonysággal mintázza a változó hordalékhozamot és elegendő mintát gyűjt a folyó adott keresztmetszetében, hogy abból a folyó hordalékhozama megfelelően becsülhető legyen különböző, egymástól egészen eltérő hidrológiai állapotokban.

A görgetett hordalékhozam meghatározására több eljárás merülhet fel: pl. közvetlen vagy közvetett terepi mérések, tapasztalati összefüggések használata, számítógépes szimulációk, jóllehet egyik technika sem megfelelő széleskörű használatra. A közvetlen mérést például a mintavevő elhelyezésének nehézségei befolyásolják ráadásul, hogy képesek legyünk megbecsülni a kapcsolatot a kivett minta alapján kapott hordalékhozam és a valós hordalékhozam között kalibrálásra van szükség. A mintavevők hitelesítése szenved attól a problémától, hogy össze kell hasonlítanunk a mintavevő által gyűjtött mintát, azzal a zavartalan görgetett hordalékmozgással, ami akkor jött volna létre, ha nem rakjuk be a mintavevőt. A görgetett hordalékmozgás extrém változékonyságának köszönhetően ez a mai napig egy nagyon nehéz feladat.

### 3.1 GÖRGETETT HORDALÉK MINTAVEVŐK TÍPUSAI

Az elmúlt mintegy 100 évben kutatók a görgetett hordalék mintavevők sok típusát fejlesztették ki figyelembe véve az műszer elhelyezésének sokféleségét és nehézségét. Ezek a mintavevők három típusba csoportosíthatóak: az árkos- vagy vályús mintavevők, a kézi, hordozható mintavevők és az indirekt eljárások. Talán a legpontosabb ezek közül az árkos- vagy vályús mintavevők, bár az elhelyezésük és fenntartásuk nehézsége és magas költsége megakadályozza az alkalmazásukat sok esetben. A hordozható mintavevőknek megvan az az előnye, hogy alacsony a felállítási költsége, de személyesen kell felügyelni a minták gyűjtését. A mintavevők használatakörülményes és általában nagy mennyiségű mintára van szükség ahhoz, hogy jól jellemezhessek a hordalékmozgások időbeli és térbeli változékonyságát. Emellett, egyelőre még nincs általánosan elfogadott kalibrálási módszer a hordozható mintavevőkre. Azok a mintavevők amelyek indirekt technikát alkalmaznak a legígéretesebbek, de széleskörű alkalmazásuk még nem megoldott, számos technika jelenleg is kutatási stádiumban van.

#### 3.1.1 KÉZI, HORDOZHATÓ MINTAVEVŐK

Kézi, hordozható görgetett hordalék mintavevőket számos országban fejlesztettek ki és használták a hordalékhozam meghatározására általában 1-300 mm-ig terjedő szemcse nagyságokra. Ezen mintavevők osztályozhatóak a felépítésük és a működésük alapelve alapján. A legfontosabbak a kosaras, tálcás és nyomáskülönbségen alapuló mintavevők. A kosaras és tálcás mintavevők többlet ellenállást okoznak a mintavevőn átáramló víznek, így abban alacsonyabb lesz az víz sebessége, mint azon kívül. Ennek következtében csökken a mederfenéken a csúsztatófeszültség és így a hordalékmozgás mértéke is a mintavevő környezetében. Ezvégeredményben ahhoz vezet, hogy néhány részecske lerakódik a mintavevő bejáratánál, amelyek eltérítik a többit.

Ahhoz, hogy egy mintavevő jól működjön azon körülmények közt kell alkalmazni amire tervezték. Annak ellenére, hogy néhány mintavevőt hitelesítettek még nincs széleskörű megegyezés arról a módszertanról amit a kalibráláshoz használunk.

Tipikus problémák a nyomáskülönbségen alapuló mintavevők működésénél:

1. A hordalék részecskék a mederből felkeverednek és csapdába esnek amikor a műszert elhelyezzük a mederfenéken (túlgyűjtés)
2. Egy rés alakulhat ki a meder és a mintavevő szája közt, ez kialakulhat kezdetben vagy később is köszönhetően a hullámvásznak és az eróciónak (alulgyűjtés)
3. A nyílást eltorlaszolja homok, iszap, kavics és természetes anyagok, amelyek csökkentik a gyűjtési határfokot (alulgyűjtés)

4. A műszer elsodródhat a folyón és végigszánthatja a feneket úgy viselkedve, mint egy merőkanál (túlgyűjtés)

Ezeket a lehetséges problémákat számos kutató vizsgálta. A hibák kiküszöbölését célirányos tervezési és próbamérési eljárásokkal igyekeztek elérni. Különböző műszaki megoldásokkal úgy, mint pl. rugalmas aljú mintavevők, irányító uszonyok, nagyobb gyűjtőzsákok, fenék szenzorok és víz alatti kamerák alkalmazása tette lehetővé ezen problémák megoldását. (ASCE, 2008)

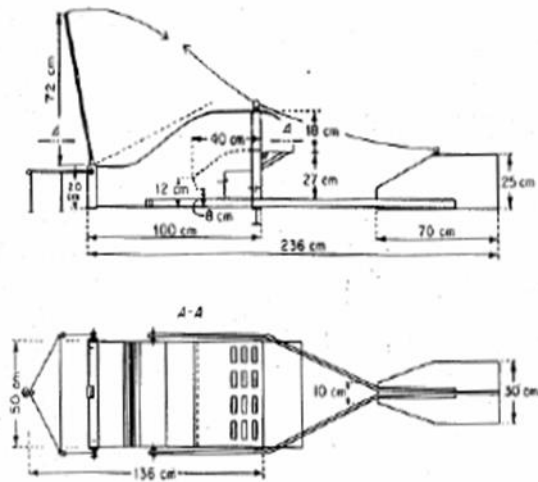
A gyakorlatban legszélesebb körben alkalmazott hordalékfogó eszköz a Helley-Smith mintavevő (**1. ábra**), ennek 152 mm-es szájnyílása és 250 µm hálósűrűsége van. Ezeket az eszközöket egy hídról vagy nagyobb mérőhajóról engedik le daruval és csörlővel. A mérés általában három mintavételből áll a nagyobb hibák kiszűrése miatt, és általában a folyó egy keresztmetszelve mentén számos függőlegesen hajtják azt végre. A mintavételek időigénye több órás. (Habersack és társai 2010)



**1. ÁBRA A KAVICS (BAL - „KIS” KÁROLYI-FÉLE) ÉS HOMOK FRAKCIÓJÚ (JOBBA - HELLEY-SMITH) MEDERSZAKASZOKON HASZNÁLT GÖRGETETT HORDALÉK MINTAVEVŐK**

Ugyanezen az elven alapuló magyar fejlesztésű mintavevő a Károlyi-féle görgetett hordalék mintavevő (**1. ábra**), melyet Károlyi Zoltán fejlesztett ki. Ez elsősorban a durvább hordalék (kavicsmeder) esetén alkalmazható jól. A mintavevőket a mederfenékre eresztve adott ideig ott tartják, majd a kiemelt minta tömegét alapul véve határozható meg a görgetett hordalék hozama. Az eszköz viszonylag nagyméretű, acéllemezről készült, felső felén ívesen kialakított láda, súlya: 35 kg. Elején egy téglalap keresztmetszetű nyílás került kialakításra, valamint a mintavevő rendelkezik egy a készüléket áramlási irányban tartó vezetősárral, uszonnal is. A mintavevő láda hátfala fele részben lenyíló ajtóval rendelkezik, így a víz egy terelőlemez felett szabadon áramlik a készüléken keresztül elősegítve a hordalék ládába jutását. A láda alsó része zárt, a bekerült hordalék itt halmozódik fel. Az eszközben összegyűlt minta erős műanyag zsákba került betöltésre. Ezekben a zsákokon szerepelt a mérési

szelvény neve, az adott függély száma, parttól való távolsága és mélysége, a megvett minta fajtája és a mintavétel időpontja. Az eszköz igény szerint felszerelhető egy víz alatti kamerával, ami nagyban megnöveli a mintavevés biztonságát, de ez csak tisztább vizű vízfolyásoknál alkalmazható jól. A kamera segítségével figyelemmel kísérhető a mintavevő leeresztésének folyamata, valamint a mederfenékre történő leérkezése. Továbbá figyelemmel követhető a hordalékmozgás a mintavevő nyílásánál, és pontosítható az az időtartam, ami alatt a görgetett hordalék ténylegesen bejutott a műszerbe. (Kulcsár, 2013)



2. ÁBRA A KAVICSMEDRŰ FOLYÓSZAKASZOKON HASZNÁLT KÁROLYI - FÉLE GÖRGETETT HORDALÉK MINTAVEVŐ

### 3.1.2 KÉZI VEZÉRLÉSŰ, HORDOZHATÓ MINTAVEVŐK KALIBRÁLÁSA/HITELESÍTÉSE

Hogy növeljük a hordozható mintavevők gyűjtési hatásfokát a nyomáskülönbségen alapuló mintavevők beömlő nyílásait úgy tervezték, hogy növeljék a víz átfolyását a mintavevőn. Ezért a z ún. hidraulikus hatásfokot úgy vették fel, hogy 100% vagy annál nagyobb legyen. Míg a hidraulikai hatásfokot könnyen, addig a hordalékgyűjtés hatásfokát sokkal nehezebben laboratóriumi körülmények között mérni.

Hacsak egy mintavevő nem működik tökéletesen és gyűjt zavartalan mintát, akkor egy hitelesítési együtthatóval korrigálni kell a mintázott arányt az eredeti arányhoz képest.

$$q_b = \alpha \cdot c_z$$



ahol,  $q_b$  = az aktuális görgetett hordalékhozam,  $c_\xi$  = mintavételből kapott hozam,  $\alpha$  = hitelesítési együttható.

Ez meglehetősen megnehezíti a görgetett hordalék mintavevők kalibrálását. Egy javasolt lehetőség erre a problémára, ha összehasonlítjuk avalós és a mintázott görgetett hordalékhozamokat, amelyek ugyanabban a valószínűségben fordulnak elő. Ezt az eljárást Hubbell és a többiek "valószínűségi párosításnak" nevezték és ezzel definiálták sok hordozható mintavevőre az összetett hitelesítési görbesereget. Sok tanulmány demonstrálta, hogy aránylag csekély különbséggel a mintavevő tervezésében nagy különbségeket érhetünk el a gyűjtött minta méretében. A Helley-Smith mintavevő eredeti verziójánál egy tanulmányban kimutatták, hogy bizonyos feltételek mellett közel 100%-os hatékonysággal működött, míg más feltételeknél túlmintázott.

### 3.1.3 ÁRKOS- ÉS VÁLYÚS MINTAVEVŐK

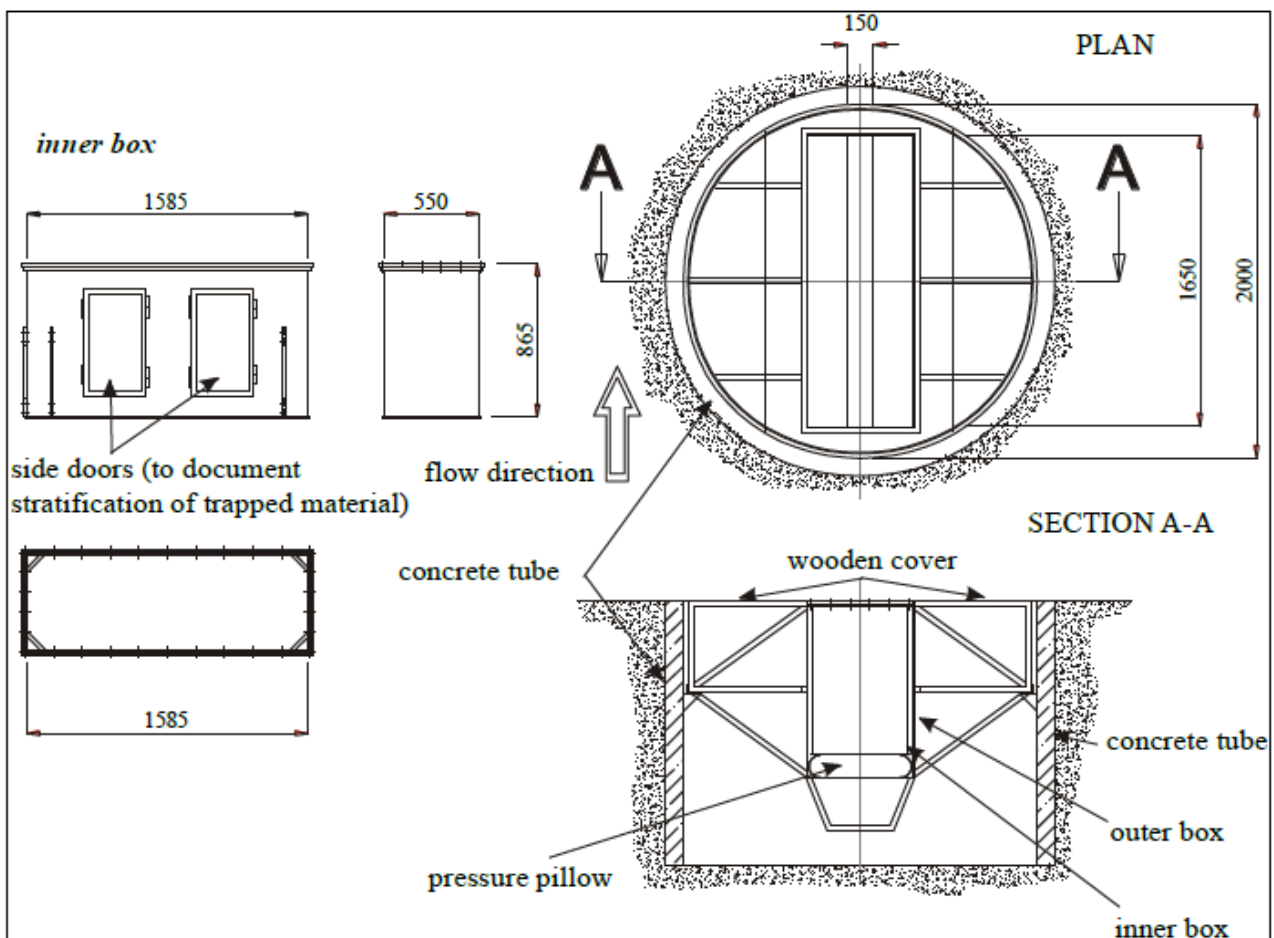
Az egyik legpontosabb módja a görgetett hordalék mintázásának a gondosan tervezett és felállított árkos- és vályús mintavevők. Ezek a mintavevők a csatorna medrébe vannak beásva úgy, hogy a tetejük szintben van a mederfenékekkel. Az árkos- és vályús mintavevők kivitelezése széles körben változik az egyszerű gyűjtőtől az összetett mérő és rögzítő műszerekig. Az alaptípusok kis gyűjtőkből állnak, amik megfogják és megtartanak minden görgetett hordalékot, ami odasodródik a mintavevőhöz. A homok medrű csatornáknál kutatásokkal kimutatták, hogy azon, amelyek a nyílásszélessége 100-200 szemcseátmérőig terjed, összegyűjtik a görgetett hordalék közel 100%-át. Egy lehetséges probléma az árkos mintavevőkkel, hogy ha keskenyebb a szélesség, mint a csatorna szélessége akkor kialakul egy oldalsó bejárat is a csapdába.

A legtöbb árkos mintavevőt úgy tervezték, hogy azok egy állandó helyre lesznek telepítve. A mintavevők telepítése megköveteli, hogy bejárata legyen a mederfenékbe. A mintavétel után az árkos mintavevőt általában ki kell üríteni manuálisan vagy egy iszapszivattyúval. Az olyan összetettebb mintavevőket, amelyeknek rendszere van arra, hogy folyamatosan eltávolítsa az összegyűjtött mintát, nagyobb folyókra találták ki, így telepítési költségük és fenntartásuk jelentős. Einstein és Hubbell kitaláltak egy félig hordozható árkos mintavevőt a homok medrű folyókhoz, ami automatikusan kikotor egy helyet a mederben a magának. A hordalékcsapda felállítása után egy tolozár kinyílik és egy szivattyú folyamatosan eltünteti a hordalékot ami összegyűlik az árokban. Az összegyűjtött hordalék egy mérőtartályba kerül, majd vissza a folyóba. (ASCE, 2008)

A kosaras mintavevők lehetővé teszik a görgetett hordalékok kirakódásának mérésénél nagyobb térbeli eloszlásban, az időbeli korlátozás azonban kizárja a görgetett hordalék pulzálásának rögzítését. 1993 elején a Dráván kifejlesztettek és kiviteleztek egy rés mintavevőt, amely hasonló egy tömegmérős rés

mintavevő rendszerhez. Elméleti megfigyelések és gyakorlati határfeltételek eredményeire támaszkodva létrehoztak egy 2 fázisú rendszert:

Elhelyeztek a folyóban egy fix betoncsatornát, amelynek 2m-es átmérője és 1,5 m-es mélysége van úgy, hogy a csatorna felső rész egy szintben legyen a mederrel. Ebből a betoncsatornából két acéldoboz (egyik a másiktól) szedhető ki és illeszhető vissza. Az acéldoboznak van egy változtatható résnyílása. A két doboz közé egy nyomólapot, egy nyomásmérőt és egy adatnaplót helyeztek. A nyílás szélessége 150 mm, a nyílás hosszúsága 1585 mm. (Habersack és társai 2010)



3. ÁBRA AZ EREDETI GÖRGETETT HORDALÉKCSAPDÁS MINTAVEVŐ A DRÁVÁN

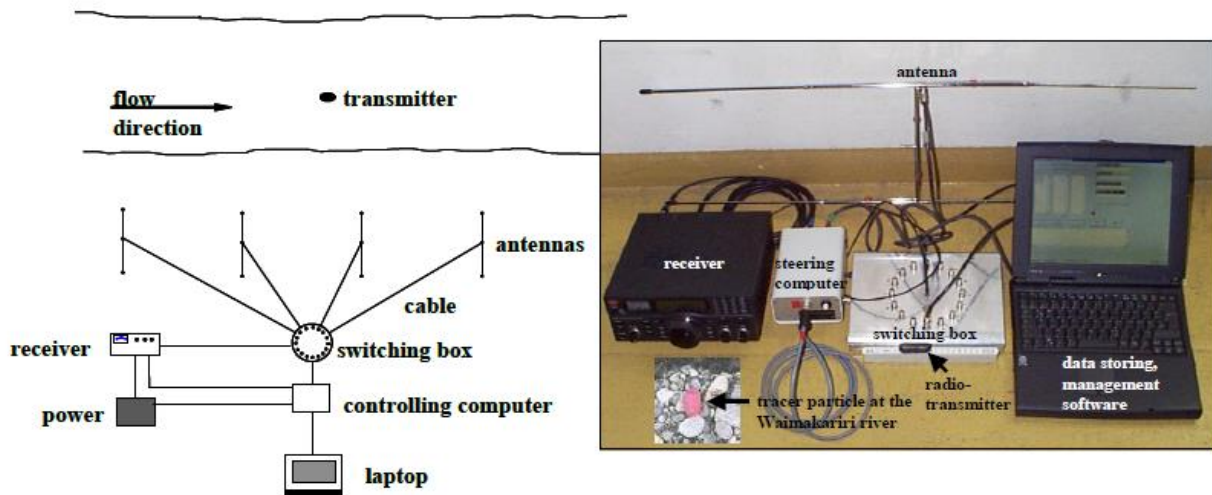
### 3.2 INDIREKT ELJÁRÁSOK

Számos módszer fejlesztettek/van fejlesztés alatt hordalékhozam mérésre, amelyek nem közvetlen mintavételre épülnek, hanem követett módon szolgáltatnak információt a hordalékmozgásról, ezek az indirekt eljárások. Ilyen módszer pl. a medermozgás nyomon követése, akusztikus technikák, rádiós nyomkövetés stb.. Bár ezek az eljárások különböző mértékben ígéretesek a fejlesztett mintavevőkre

nézve, egyik sem terjedt el olyan mértékben, hogy alapvető technika legyen hordalékmérésre a folyókban. Olyan okok miatt, mint a tiszta víz szükségessége, mederalak ismerete, mágneses mederanyag alkalmazása vagy a hordalék által generált hangok kalibrálása jelenleg mind korlátozzák ezeknek a technikáknak az elterjedését. A következőkben néhány indirekt mérési technikát mutatok be. (ASCE, 2008)

**Nyomkövetők:** a nyomkövetők használatának nagy múltja van, ami az idővel egyre jobban fejlődött. Einstein laboratóriumi körülmények között festett részecskéket használt, hogy megfigyelhesse a mederanyag áramlási útját. Később előtérbe kerültek a radioaktív nyomjelzők. Továbbá fluoreszkáló és mágneses nyomjelzők segítették a teljes transzport arány és temetési mélységet megmérni. A természetben az alakváltozás és a nyugalmi periódusok közvetlen mérése az 1980-as években vált lehetővé egy nagy frekvenciájú rádiós-táv mérő berendezéssel, amely úgy lett kialakítva, hogy kövesse a részecskék útját a nagy kavics ágyú Waimakariri folyóban. A rádiós nyomkövetők használatáról ezeket a következtetéseket vonták le:

- A kavics szemcsék nyomon követése megerősítheti a görgetett hordalék transzportjának feltételezett viselkedését még nagy fonatos folyók esetén is.
- A lerakódás összefüggésben lehet a nyomáskülönbségekkel.
- Az egyes szemcsék áramlási pályái felkutathatóak.
- A morfordinamikai folyamatok megértéséhez nagyban hozzájárulnak



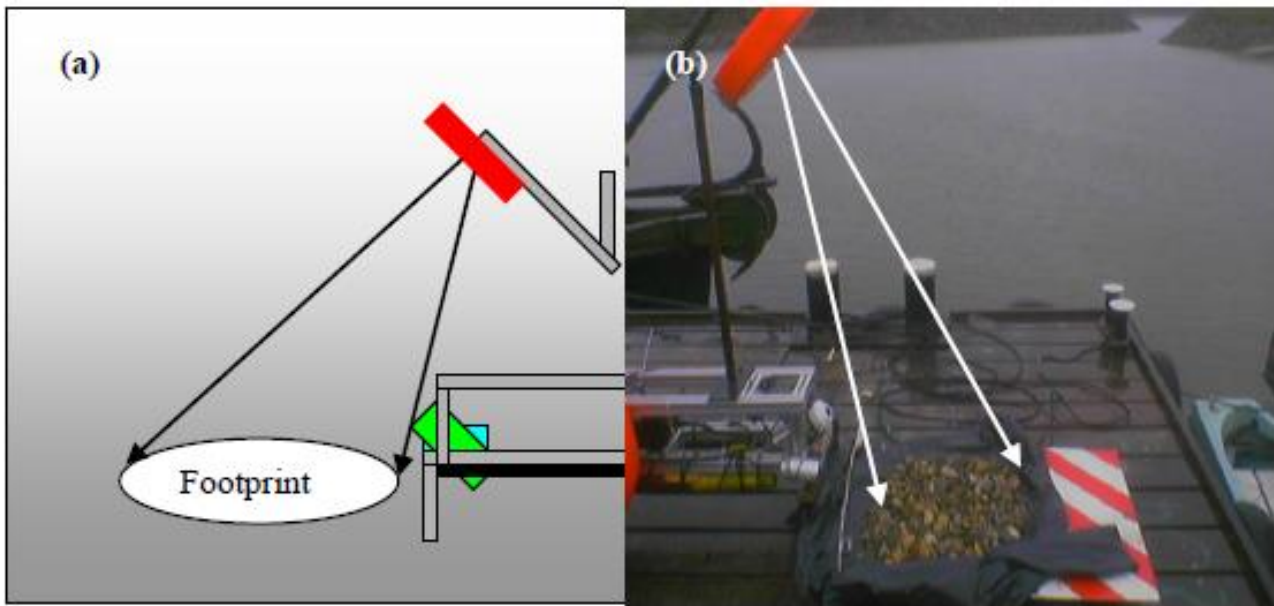
**4. ÁBRA RÁDIÓS NYOMKÖVETŐ RENDSZER**

Az ábrán láthatóak a rendszer elemei, ami egy jeladó, antennák, kábelek, egyösszekapcsoló doboz, jelvevő, vezérlő számítógép, jegyzőkönyv és az energiaellátás elemei. Az elemmel működtetett

rádiós jeladókat természetes vagy mesterségeskavics részecskékbe helyezik. A rádiójelek antennákon, kábeleken és az összekapcsoló dobozon keresztül érik el a jellevőt.

Geofónok: A geofónok folyamatos, automatikus méréseket tesznek lehetővé akár nagy áradások esetén is. 2002-ben épült egy állomás Lienzben a Dráva felső részén, 2006 elején további két telep épült Ausztria déli részén. Az egyik Lienzben az Isel folyón, a másik pedig Dellachban a Dráván. 2010-ben három mérőállomás rendszere tette lehetővé a transzport folyamatok részletes megfigyelését. A geofón rendszer 2006 júliusa óta működik. A mérési eszközök ma már teljesen felszereltek.

Szonárok: Hogy megvizsgálják, hogy a szonár használható-e a görgetett hordalék mérésére kavicsos mederben egy ADMODUS nevű szonár rendszert alkalmaztak. Ez sok eszközből állt, amelyek egy állványhoz voltak csatlakoztatva. Ez a típus lehetővé teszi számunkra, hogy ugyanabból a helyzetből egyszerre több paramétert mérhessünk, melyek befolyásolják a görgetett hordalék transzportot ilyen a folyási sebesség, a lebegtetett hordalék koncentráció és a nyírófeszültség. Az első ilyen eszköz az AdmodusFlow, ami a mederfenékhez közeli folyási sebességet méri 16 fenékkal párhuzamos kapuval. Az AdmodusSonar számszerűen határozza meg a görgetett hordalék transzportot, úgy hogy összehasonlítja a megismételt felderítéseket. A lebegtetett hordalék koncentrációt egy ultrahangos visszajelző rendszerrel, a kavicsmozgásokat videó kamerával mérik, amíg globális helymeghatározó rendszerrel bemérik az eszközt. Az elhajlásszenzorok és a kapcsolt iránytűk pontos elhelyezést biztosítanak a mederfenéken. A jövőben a felszerelés ki fog egészülni egy a görgetett hordalék gyűjtésére szolgáló kosárral, valamint egy direkt nyírófeszültséget mérő eszközzel. (Habersack és társai 2010)



5. ÁBRA A, AZ ADMODUSSONAR VIZSGÁLT TERÜLETE B, GÖRGETETT HORDALÉK VIZSGÁLATA EGY 210 KHZ-ES KONVERTÁLÓ HASZNÁLATÁVAL

#### 4 ADCP ALAPÚ GÖRGETETT HORDALÉKMÉRÉS

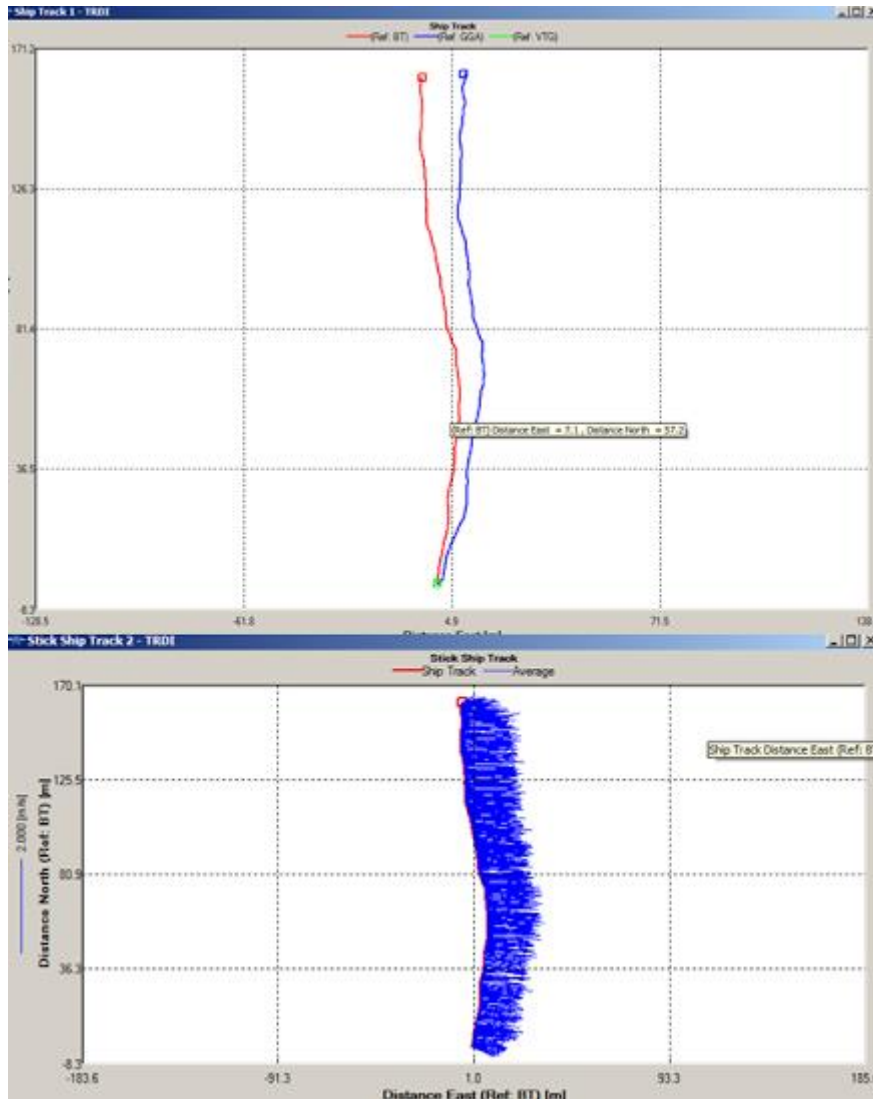
Külön fejezetben foglalkozom az ADCP alapú indirekt görgetett hordalékmérési technikával, mert dolgozatomban ezt a módszert vizsgálom részletesebben. Az ADCP műszer elsődleges alkalmazási területe a vízfolyások vízhozamának mérése. Aműszer az áramlási sebesség három térbeli komponensét méri a folyó függőleiben. A sebesség mérése a műszer vonatkoztatási síkjában történik. Ha a műszer egy mozgó hajóhoz van rögzítve, akkor korrekció szükséges a hajóra, hogy megkapjuk az abszolút vízsebességet. A hajó sebessége meghatározható fenék lekövetés (Bottom Tracking) vagy GPS adatok segítségével. A fenék lekövetés pontosabb eljárás, de mozdulatlan medret igényel a vízsebesség méréséhez. Az ADCP sebességmérő műszer működési elve az ún. *Doppler-hatás*on alapszik. Lényege, hogy a műszer által kibocsátott jel frekvenciája a víztestben utazó lebegő részecskékről visszaverődve, a részecskék sebességének nagyságától és irányától függően megváltozik. Ezért, a műszer által érzékelt, visszavert jel frekvenciatorzulásából az áramlás sebessége számítható (az áramló víz és a benne utazó részecskék sebessége lokálisan megegyezik). Ez a jelenség természetesen a mederfenéknél is megfigyelhető, ahol a mért sebesség a mérőcsónak mederfenékhez képesti sebességét eredményezi. Ha a meder stabil, akkor a frekvencia megváltozás arányos a hajó sebességével. Viszont, ha a meder mozgásban van, akkor a meder lekövetést befolyásolja a hordalékmozgás, így a visszavert hang frekvenciáját a meder mozgása, vagyis a görgetett hordalék mozgása is befolyásolja. Mozgó meder esetén a görgetett hordalék sebessége meghatározható, ha

ismerjük a hajó mindenkori pozícióját a GPS adatokból vagy ha az ADCP-t tökéletesen állandónak feltételezzük (tehát rögzítjük a csónakot).



#### 6. ÁBRA ADCP SEBESSÉGMÉRŐ MŰSZER

A műszerrel tehát egy látszólagos görgetett hordaléksebességet tudunk mérni a csónak elmozdulásának mederletapogatás és GPS alapú adataiból (lásd a következő ábrát).



7. ÁBRA A MÉRŐHAJÓ ÚTVONALA MEDERLETAPOGATÁS VAGY BOTTOM TRAKING (PIROS VONAL) ÉS GPS (KÉK VONAL) ALAPJÁN, AHOL A FOLYÁSIRÁNYT A SEBESSÉGBVISZONYOKKAL SZEMLÉLTETJÜK. A BT ALAPÚ POZÍCIÓK A MÉRŐHAJÓ FELVÍZI IRÁNYBA VALÓ ELMOZDULÁSÁT JELZIK A GPS ÚTVONALHOZ KÉPEST, AMI A MEDERMOZGÁSBÓL ADÓDIK.

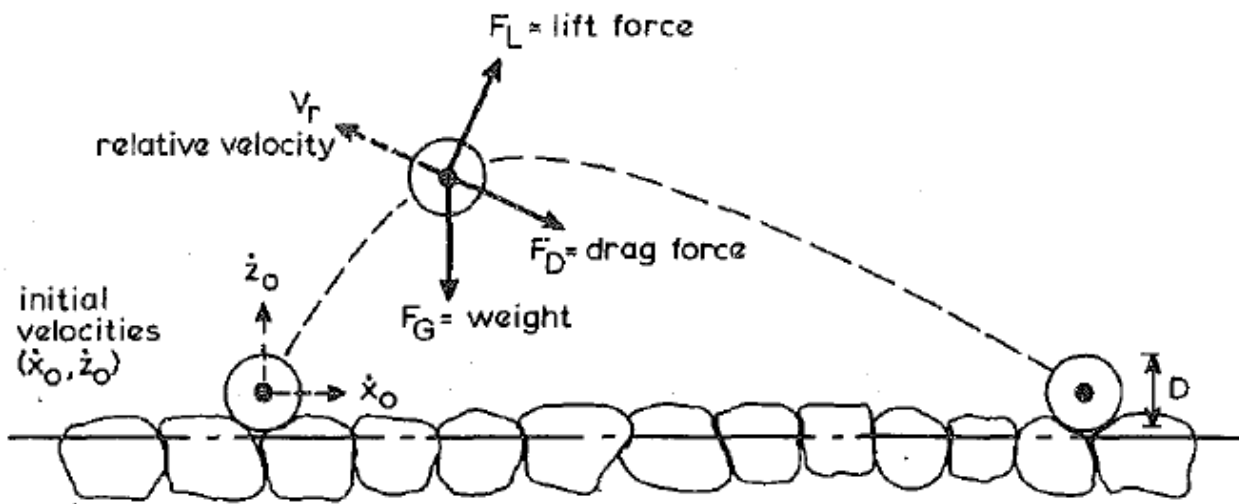
A görgetett hordalékhozam becsléséhez azonban a medervándorlási sebességen túl további adatok szükségesek. Ha feltételezzük, hogy ez a sebesség jól közelíti a hordalék sebességét akkoraz alábbi képlet alkalmazható a görgetett hordalékhozam meghatározására (pl. Simons et al., 1965):

$$g_b = v_p \cdot d_a \cdot (1 - \lambda_a) \cdot \rho_s$$

ahol,  $g_b$ = a görgetett hordalék hozama egységnyi szélességen,  $v_p$ = mért átlagos görgetett hordalék sebesség,  $d_a$ = hordalékmozgás rétegvastagsága,  $\lambda_a$ = porozitás,  $\rho_s$ = a hordalék sűrűsége.

A gyakorlatban sem a rétegvastagság sem a porozitás nem mérhető közvetlenül, de elfogadható határok közt megbecsülhetőek. A görgetett hordalékmozgás rétegvastagságának becslésére pl. Einstein (1950) vagy van Rijn (1984) tanulmánya ad javaslatot. Előbbi egy egyszerű modellel, a mederanyag  $d_{50}$

szemátmérőjének kétszeresével adja még a rétegvastagságot. Van Rijn ezzel szemben a hordalékszemcsék ugrási magasságát adja meg rétegvastagságnak. A hordalékszemcsére felírt mozgási egyenletek numerikus megoldásával határozta meg az ugrási magasságot és a hordalékszemcse sebességét. A kavics részecskékkel történő kísérleteket választották ki, hogy hitelesítsék ezt a matematikai modellt a felhajtóerő, mint szabad paraméter felhasználásával. A numerikus kísérletek eredményeit használták fel, hogy egyszerű összefüggéseket határozzanak meg az ugrási jellemzőkre. (Rennie és társai, 2002)(van Rijn, 1984)



8. ÁBRA VAN RIJN NUMERIKUS KÍSÉRLETEIHEZ ALKALMAZOTT HORDALÉKSZEMCSE MOZGÁSI MODELL ( $F_G$ = ÖNSÚLY,  $F_L$ = FELHAJTÓERŐ,  $F_D$ = ELRAGADÁSI ERŐ,  $V_r$ = SZEMCSE SEBESSÉG)

Az ábrán látható, hogy az erők amelyek egy ugró szemcsére hatnak lefelé irányulnak köszönhetően az önsúlyának és a hidrodinamikai folyadék erőknek, amelyeket egy felhajtó- és egy elragadási erőként jellemezhetünk. Az elragadási erő iránya ellentétes a szemcse relatív sebességének irányával, míg a felhajtóerő a normálirány síkjában hat.

A rétegvastagság számítását az alábbi összefüggés adja meg:

$$\delta_b = D \cdot 0.3 \cdot D_*^{0.7} \cdot T^{0.5}$$

ahol

$$D_* = D_{50} \cdot \left[ \frac{(s - 1) \cdot g}{\nu^2} \right]^{1/3}$$

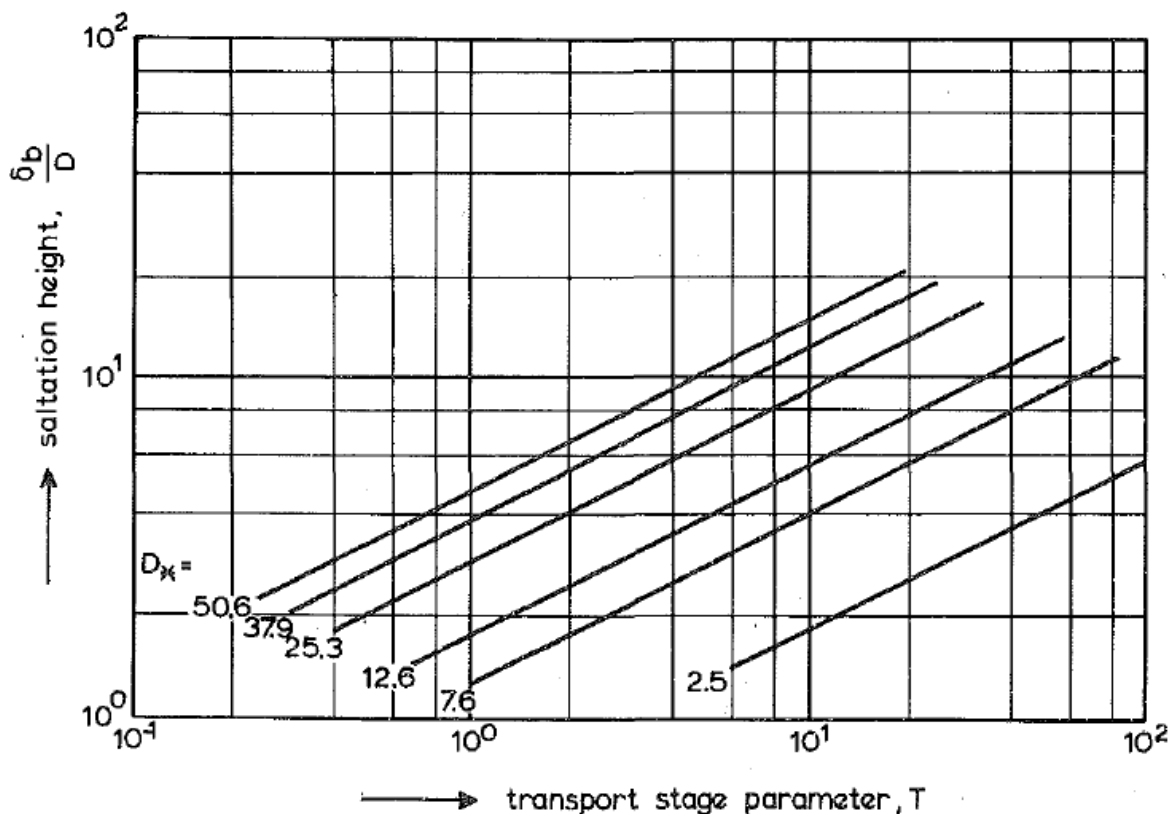
ahol,  $D_{50}$ = részecske méret,  $s$ = fajlagos sűrűség,  $g$ = gravitációs gyorsulás,  $\nu$ = kinematikai viszkozitás



$$T = \frac{(u'_*)^2 - (u_{*,cr})^2}{(u_{*,cr})^2}$$

ahol,  $u'_*$  = fenékcúsztató sebesség,  $u_{*,cr}$  = kritikus fenékcúsztató sebesség.

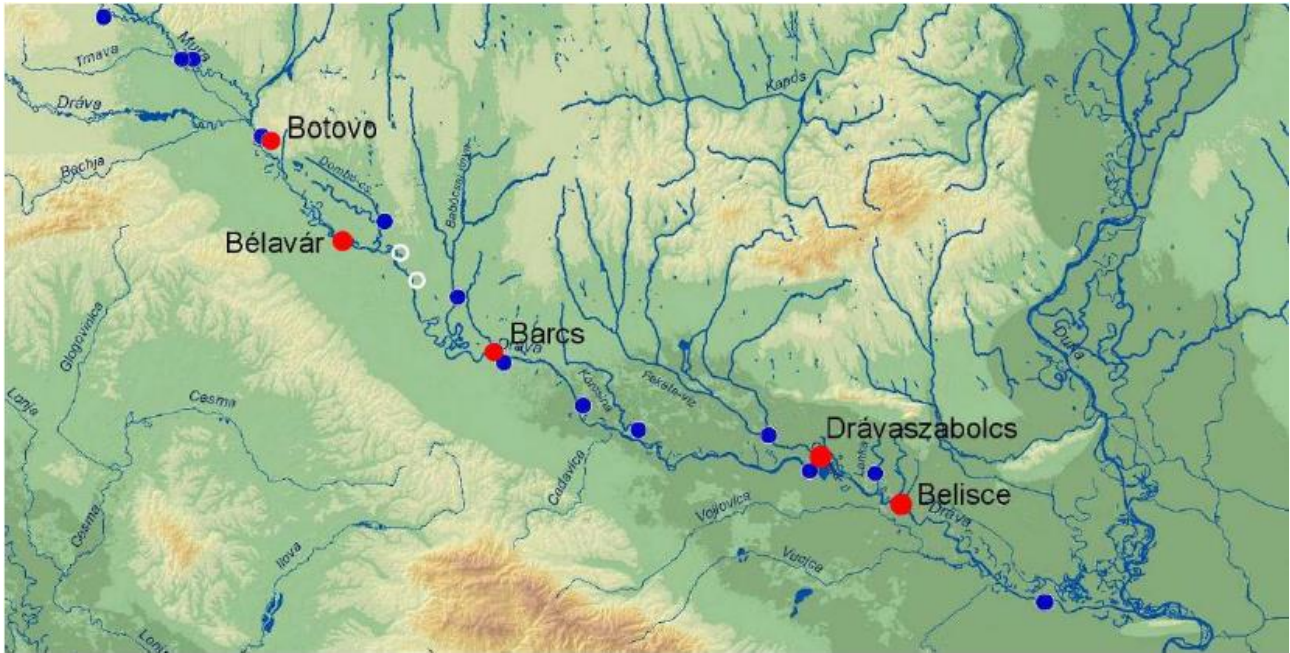
A numerikus kísérletek alapján kapott rétegvastagság adatokat az alábbi görbesereg illusztrálja. (van Rijn, 1984)



9. ÁBRAAZ HORDALÉKMOZGÁSI PARAMÉTERRE ÉS A RÉSZECSCKE PARAMÉTERRE ELKÉSZÜLT GÖRBESEREG

## 5 ESETTANULMÁNY BEMUTATÁSA

Az ADCP alapú görgetett hordalékhozam becslési eljárást egy, a Dráva folyón végrehajtott hordalékmérési projekthez kapcsolódó adatok alapján hajtottam végre. A folyó 250 km hosszú horvát-magyar szakaszán 5 jellemző keresztshelvényben a lebegtetett és görgetett hordalék töménységének, hozamának és szemösszetételének vizsgálata a feladat. A Dráva szóban forgó szakasza és a mérési shelvények az alábbi képen láthatóak. A mérések helye: Botovo (277,65 fmk), Bélavár (198,5 fmk), Barcs (154,1 fmk), Drávaszabolcs (78 fmk) és Belisce (54 fmk) térsége.



#### 10. ÁBRA A MÉRÉSSOROZATNÁL HASZNÁLT FOLYÓSZAKASZ ÉS A MÉRÉSI SZELVÉNYEK A DRÁVÁN

A munka helyszíni mintavételekkel és vízhozam-mérésekkel kezdődött, majd a folyóból vett hordalék- és mederanyag-minták laboratóriumi feldolgozásával folytatódott. A mintavételezést a DDVIZIG, Pécs, végezte.

A projekt során alkalmazott műszerek közül az egyik a Helley-Smith-féle görgetett hordalék mintavevő. Ez az eszköz a vizsgált folyóra jellemző hordalék szemnagyságától és hozamától függően különböző belépő nyílásméretekkel rendelkezik, továbbá a hordalékgyűjtő zsák szövetének sűrűsége is változtatható. A Dráván elvégzett mérések során a Helley-Smith mintavevőnek két típusát alkalmazták. A 8055-ös típus a kisebb sebességű folyókon, a finomabb homokfrakciók mérésére alkalmas.

A másik a Károlyi-féle görgetett hordalék mintavevő, amely fel volt szerelve egy víz alatti kamerával, mert az megnöveli a mintavétel megbízhatóságát, ugyanis figyelemmel követhető a hordalékmozgás a mintavevő nyílásánál és pontosítható az az időtartam, ami alatt a görgetett hordalék valóban bejutott a műszerbe.

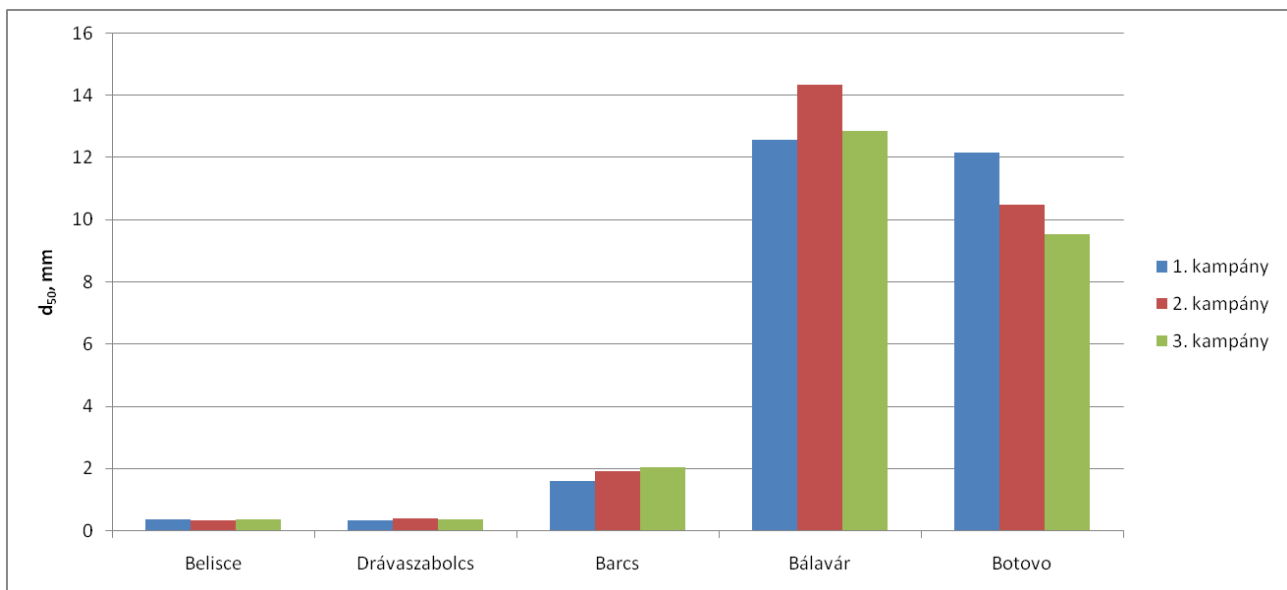
A harmadik pedig a River Ray 600 kHz-es ADCP vízsebességmérő és trimarán test volt. Ennek a műszernek a hagyományos áramlásmérő műszerekkel szembeni nagy előnye a mérés gyorsasága és a részletgazdagabb áramlásmérési feltárást lehetővé tevő működése, melyek a hidromorfológiai felmérések terén keletkező lényeges információ többletet, a mérések végrehajtása során pedig jelentős költséghatékonyságot eredményeznek.

Egyéb műszerek: A víz alatti kamerák a mérés pontosságát javítják. Mivel a víztestbe hatoló napfény 4-5 méter mélyen még viszonylag tiszta folyóvíz esetén sem mindig elegendő használható felvételek

készítéséhez, szükséges a mintavevő előterét megvilágító fényforrásról is gondoskodni. A napjainkban forgalomba kerülő víz alatti kamerák már rendelkeznek saját fényforrással is, ezek közül a tapasztalatok szerint a LED-es megvilágításúak a legjobban használhatóak.

A minták laborálását és kiértékelését az Eötvös József Főiskola Műszaki és Közgazdaságtudományi Kar Vízépítési és Vízgazdálkodási Intézete végezte el. Az eredményeket a jelen tanulmányban foglaltuk össze. A tanulmány a mérési és mintavételezési módszereket is dokumentálja. Az ehhez szükséges információkat a DDVIZIG biztosította.

Megemlítenéd, hogy amíg a folyásirány szerinti felső 4 mérési szelvényhez rendelkezésre állnak vízállás-vízhozam kapcsolatok és vízhozam-hordalékhozam összefüggések, addig a legalsó és a mérésekbe csak 2012- évben bevont Belisce mérőszelvényben a horvát partner eddig csupán vízállás adatgyűjtést végzett. Így az erre a szelvényre a 2012-ben végzett hordalék- és mederanyag mintavételekből számított adatok egyelőre tájékoztató jellegűek, de alapjául szolgálhatnak a jövőbeli hordalékszállítást monitorozó tevékenységnek.



11. ÁBRA A HÁROM MÉRÉSI KAMPÁNYHOZ TARTOZÓ JELLEMZŐ SZEMCSEÁTMÉRŐK SZELVÉNYENKÉNT

A diagram vízszintes tengelyén a mérési szelvények helyezkednek el a torkolattól a forrás felé, a függőleges tengelyen pedig az adott részre jellemző mederanyag szemcseátmérője. A három szín a három mintavételi kampányt jelöli a kék az első (2012.05.08-2012.05.11), a piros a második (2012.06.14-2012.06.16), a zöld pedig a harmadik (2012.08.28-2012.08.31). A diagramon jól látszik, hogy a torkolathoz közeli Belisce és Drávaszabolcs mérési szelvényében homokos meder található, a középső részen Barcsnál kavicsos homok, míg a Dráva eredéséhez közeli Bálavárnál és Botovonál pedig már kavicsmedrű a Dráva. Mivel vizsgálataimban a kavicsos és vegyes szemösszetételű

medrekkel foglalkozom, csak a három felvízi mérési szelvény adataival fogok foglalkozni. (Dr. Szlávik Lajos és társai, 2012)

## 6 ÉRZÉKENYSÉGVIZSGÁLAT

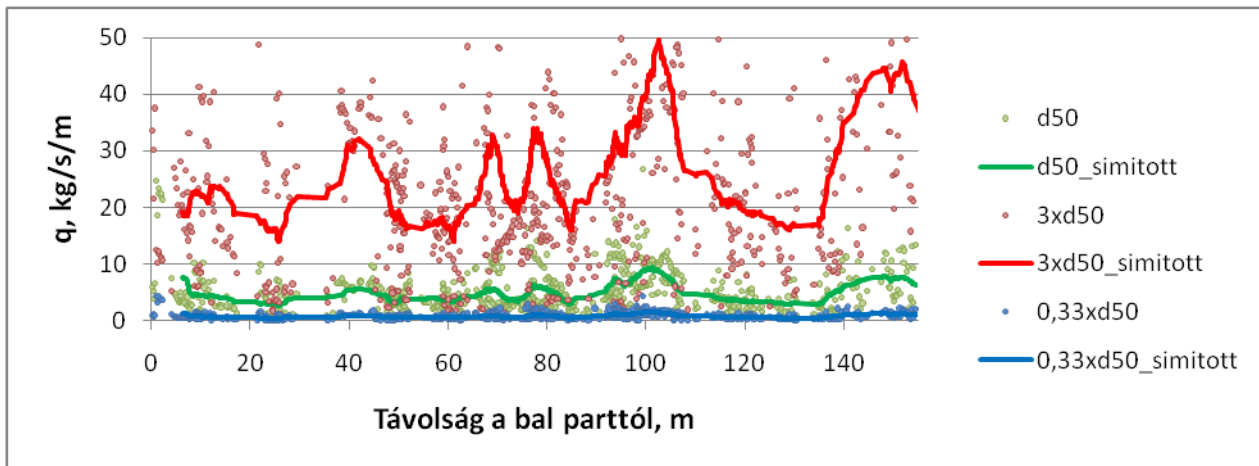
Az ADCP alapú hordalékhozam becslést egy, a Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszéken fejlesztett szoftver segítségével állítottam elő, amely a korábbiakban leírtak alapján a medermozgási sebesség és a hordalékmozgási rétegvastagság függvényében adja meg a fajlagos (tehát egységnyi szélességre vonatkozó) görgetett hordalékhozam keresztshelvény menti eloszlását. Mivel a becslési eljárás számos paramétertől függ a számított eredményeket érzékenységvizsgálatnak vettem alá a következő paraméterekre:

- jellemző szemátmérő ( $d_{50}$ )
- a medersebesség számításához használt ablakméret (hány darab egymás melletti függélmérés adatai alapján határozzuk meg a meder elmozdulását)
- a mederanyag porozitása ( $\lambda$ )
- az ADCP által mért vízmélység
- a medercsúsztató sebesség ( $u^*$ )

A következő diagramokon a bal parttól való távolság függvényében ábrázoltam a számított fajlagos görgetett hordalékhozam értékeket. Az ADCP adatokat a Dráva Barcsi szelvényében végrehajtott mérésekből vettem. A számított szelvény menti fajlagos hordalékhozam adatok meglehetősen nagy szórást mutattak, ezért célszerűnek tartottam mozgóátlag alkalmazásával könnyebben értelmezhetővé tenni az eloszlásokat.

Első lépésben a mederanyag jellemző szemátmérőjére végeztem el a vizsgálatot. Ez a paraméter a hordalékmozgás rétegvastagságának becslésénél jelenik meg (van Rijn szerint), ahogy azt a korábbiakban tárgyaltam. Az érzékenységvizsgálathoz először lecsökkentettem az eredeti (a terepi adatgyűjtés során kapott) jellemző szemátmérőt a harmadára (kék vonal), majd az eredeti átmérő háromszorosára való módosítást is megvizsgáltam (piros vonal). A keresztshelvény menti eloszlásokon túl kiszámítottam a teljes szelvény mentén átáramló hordalékhozam mennyiségét is. Ehhez a pontbeli fajlagos hordalékhozam adatok szelvény menti integrálását hajtottam végre. Az így kapott hordalékhozam értékeket jelenítettem meg a diagramok alatti táblázatokban. Ezen értékek alapján és a diagramon is jól látszik, hogy amikor a szemátmérőt a harmadára csökkentjük akkor a hordalékhozam kb. a nyolcadára csökken, amikor pedig a háromszorosára növeljük kb. ötszörösét eredményezi a módszer. Kijelenthető tehát, hogy amennyiben a van Rijn féle képletet használjuk a

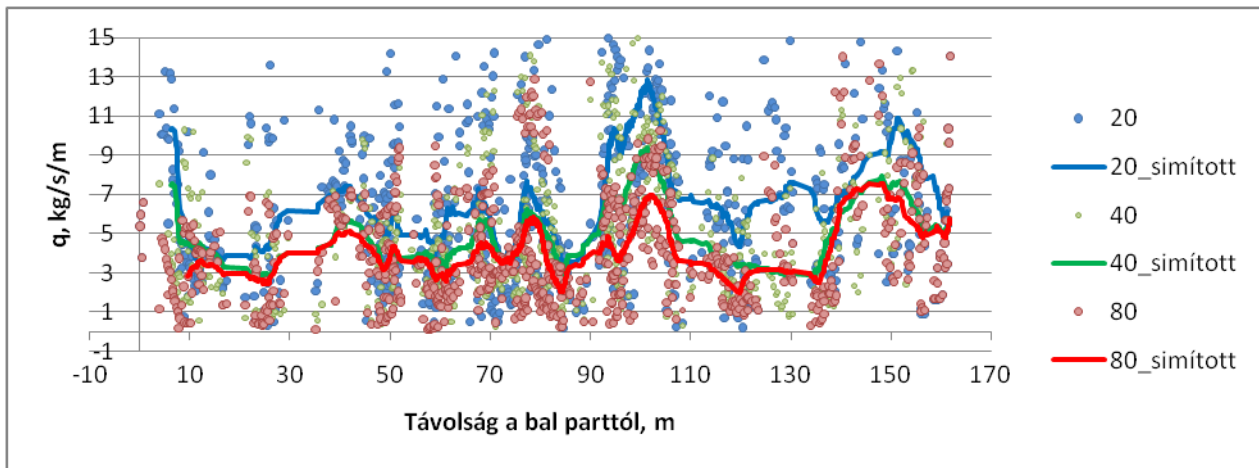
hordalékmozgás rétegvastagságának meghatározására, fontos szerepet játszik a szemcseméret pontos meghatározása.



12. ÁBRA A JELLEMZŐ SZEMÁTMÉRŐRE VÉGZETT ÉRZÉKENYSÉGVIZSGÁLAT DIAGRAMJA

$d_{50}/3$	125 kg/s
$d_{50}$	810 kg/s
$d_{50}*3$	3950 kg/s

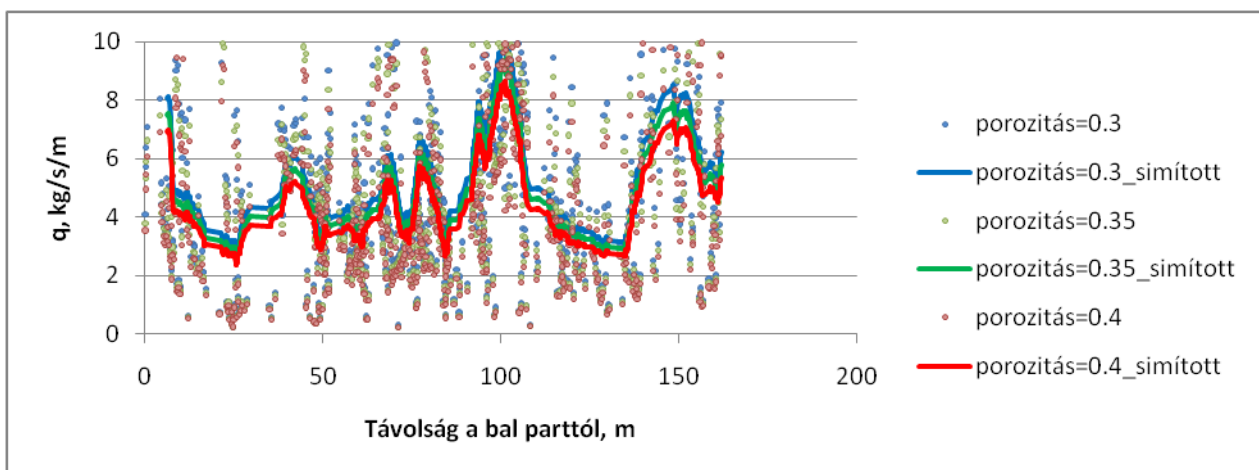
A medermozgási sebesség számításához használt ablakmérettel azt adjuk meg, hogy hány darab egymás melletti ADCP adat alapján becsüljük meg a meder elmozdulását. Mivel a műszer sűrűn (pl. 2 Hz frekvencián) végzi a mérést, rengeteg pontról van szó és arra voltam kíváncsi, ennek változtatása kihat-e a végeredményre. Elmondható, hogy ha nem alkalmazunk ilyen jellegű simítást, akkor a kapott értékek nagy szórást fognak mutatni, ami pl. abból adódik, hogy a csónak elmozdulásának mérésére használt GPS jelen esetben több deciméteres bizonytalanságot tartalmazott. Minél több függélyt veszünk egybe, ez a fajta hiba annál inkább kiszűrődik, másfelől viszont ha túl sok adatot veszünk egybe, elveszítjük a szelvény menti eloszlás térbeli változékonyságát. A vizsgálatokat tehát az ablakméret megváltoztatásával végeztem, az eredetileg használt 40 adatot először 20 (kék vonal), majd 80 adatra változtattam (piros vonal). Figyelembe véve a mérőcsónak átlagos haladási sebességét, 0,5 m/s, és a 2Hz-es mintavételi frekvenciát, 40 adat 10 méteres térbeli simításnak felel meg. A diagramon és a számított értékekből jól látszik, hogy 40 és 80 között kisebb különbség van, mint 20 és 40 között, ami várható is, mert minél több adatot veszünk egybe, annál stabilabb átlagértékeket kell kapnunk. Egy ésszerűen megválasztott ablakmérettel tehát nem hordoz magában nagy bizonytalanságot.



13. ÁBRA AZ ABLAKMÉRETHEZ VÉGZETT ÉRZÉKENYSÉGVIZSGÁLAT DIAGRAMJA

20	1130 kg/s
40	810 kg/s
80	715 kg/s

Mivel a mederanyag porozitását nem tudjuk közvetlenül mérni, érdemesnek tartottam erre a paraméterre is érzékenységvizsgálatot végezni. Irodalmi adatok alapján tudjuk, hogy 30-40% körüli értéket lehet erre felvenni, így az eredetileg használt 0,35 mellett, ezt változtattam 0,3-ra (kék vonal) és 0,4-re (piros vonal). Ahogy az előző fejezetünkben láttuk a hordalékhozam becsülő képletben az  $(1-\lambda)$  szerepel, így értelemes volt, hogy csak konstans eltérés lesz a kapott értékek között. Nem számottevően érzékeny erre a paraméterre.

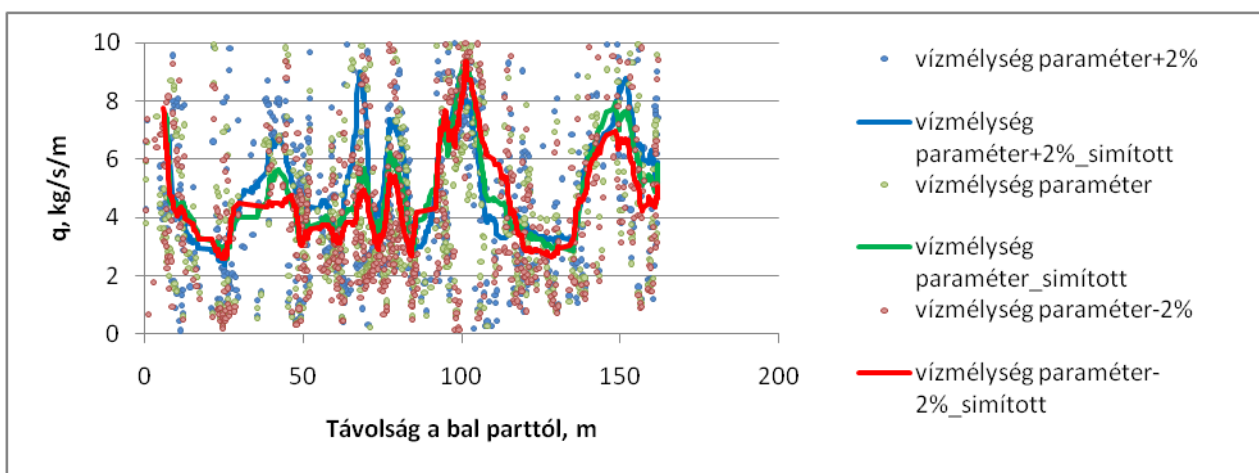


14. ÁBRA A POROZÍTÁSRA VÉGZETT ÉRZÉKENYSÉGVIZSGÁLAT DIAGRAMJA

0,3	870 kg/s
-----	----------

0,35	810 kg/s
0,4	750 kg/s

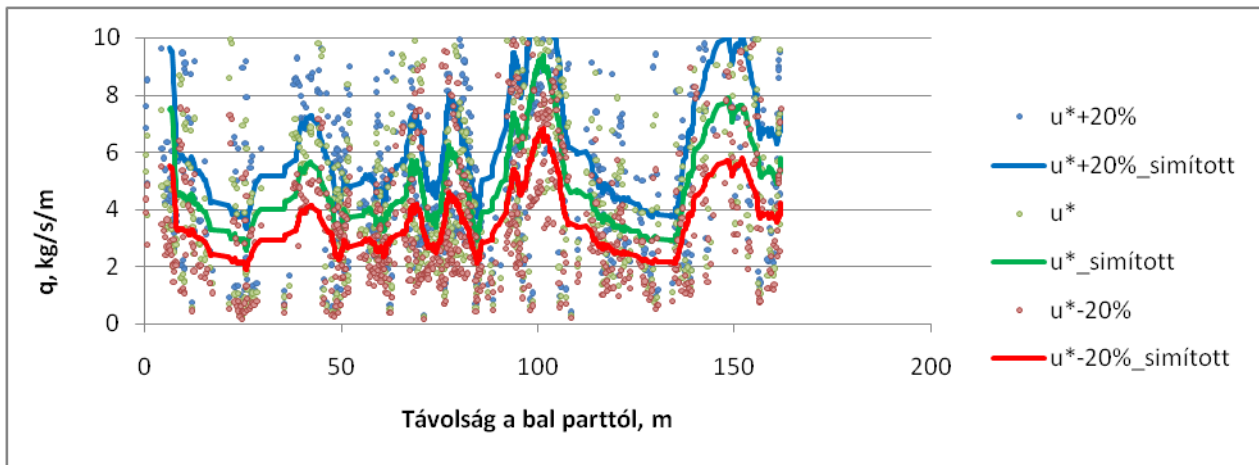
Az eredmények kiértékelésénél szerepet játszik az is, hogy az ADCP-vel mért vízmélység értékei mennyire megbízhatók. Maga a mért vízmélység közvetlenül nem jelenik meg a becslési eljárásban, de pl. a hordalékmozgás rétegvastagságának van Rijn féle becslésénél a fenék-csúsztatósebesség meghatározásánál jelen van. Ismert, hogy az ADCP alapú vízmélység mérés valamekkora mértékű bizonytalansággal terhelt, hiszen eleve a műszer 4 feje által mért mélységek átlagából adja meg a mélységet. Célszerűnek láttam a mért adatok 2%-os eltérésének hatását vizsgálni. A diagramon és a teljes szelvényre számított hordalékhozam adatokon látszik, hogy nem tér el számottevően a három érték, tehát a vízmélység mérés bizonytalanságára nem érzékeny az eljárás.



15. ÁBRA A VÍZMÉLYSÉGRE VÉGZETT ÉRZÉKENYSÉGVIZSGÁLAT DIAGRAMJA

mélység+2%	865 kg/s
mélység	810 kg/s
mélység-2%	745 kg/s

Az előbbieket alapján tehát a fenék-csúsztatósebességtől is függ a hordalékmozgási rétegvastagság értéke, és mivel ezt a paramétert az ADCP által mért sebességeloszlás alapján becsüljük meg, természetesen bizonytalansággal terhelt. A 20%-os eltérést tartottam realiztikus hibának, ezért ebben a tartományban változtattam a paraméter értékét. A diagramon és a táblázaton látszik, hogy a csúsztatósebesség csökkentésével a végeredmény nagyobb mértékű változást mutat, mint a paraméter 20%-os módosítása. Magasabb  $u^*$  értékeknél az eltérés kisebb. Ez alapján felhívnom a figyelmet arra, hogy amennyiben a van Rijn féle becslési eljárást alkalmazzuk a rétegvastagság becslésre, vizsgálandó a csúsztatósebesség becslésének bizonytalansága.

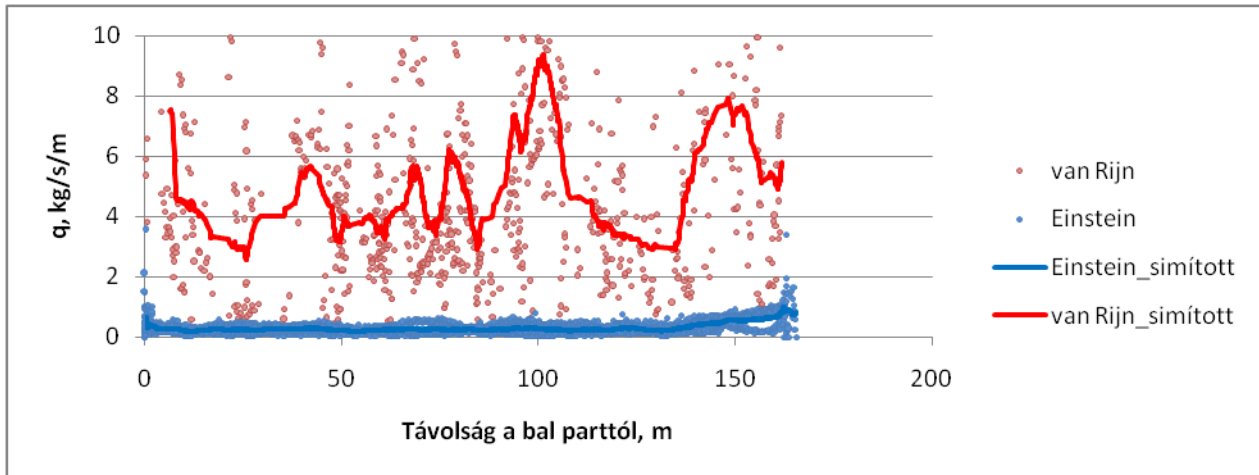


16. ÁBRA A MEDERCÚSZTATÓ SEBESSÉGRE VÉGZETT ÉRZÉKENYSÉGVIZSGÁLAT DIAGRAMJA

$u_*+20\%$	1030 kg/s
$u_*$	810 kg/s
$u_*-20\%$	580 kg/s

Végül megvizsgáltam azt is, hogy mennyire érzékeny a becslési módszer a hordalékmozgás rétegvastagságának számítási módjára. Az előzőekben tehát van Rijn képletét alkalmaztam erre, itt pedig Einstein által javasolt – jelentősen egyszerűbb –  $2xd_{50}$  képletet használtam (ahol  $d_{50}$  a mederanyag átlagos szemátmérője). Nagy eltérés tapasztalható a két görbe között, és a teljes szelvényre kapott hordalékhozam közel egy tízes nagyságrenddel alacsonyabbra adódott. A következő fejezetben a mért hordalékadatokkal való összevetés során rámutatok arra, hogy melyik módszer helytállóbb.





17. ÁBRA EINSTEIN ÉS VAN RIJN MÓDSZERÉNEK ÖSSZEHASONLÍTÁSÁT MUTATÓ DIAGRAM

Einstein	49 kg/s
van Rijn	810 kg/s

## 7 EREDMÉNYEK

Az eredmények értékelésénél a következőképpen jártam el. Minden egyes mérési kampányra a három vizsgálati szelvényre legyártottam a szelvény menti fajlagos hordalékhozam eloszlásokat az ADCP alapú becslési eljárással, ahol a hordalékmozgási rétegvastagságot mindkét fentebb említett módszerrel (van Rijn és Einstein féle) közelítettem. Ábrázoltam minden szelvényre a kapott eloszlásokat, és kiegészítettem őket a mintavétel során kapott hordalékhozam adatokkal is. Minden szelvényre kiszámítottam a teljes szelvényen átáramló görgetett hordalékhozam adatokat is, amiket a grafikonok felett táblázatos formában közlök. Ebben a fejezetben az első mérési kampány adatait ismertetem, a második és harmadik mérésre az eredményeket a dolgozat Függelékében mutatom be.

A terepi mérések során jellemző vízhozam adatait a három vizsgálati szelvényre tartalmazza az alábbi táblázat (a vízhozamok  $\text{m}^3/\text{s}$ -ban értendők).

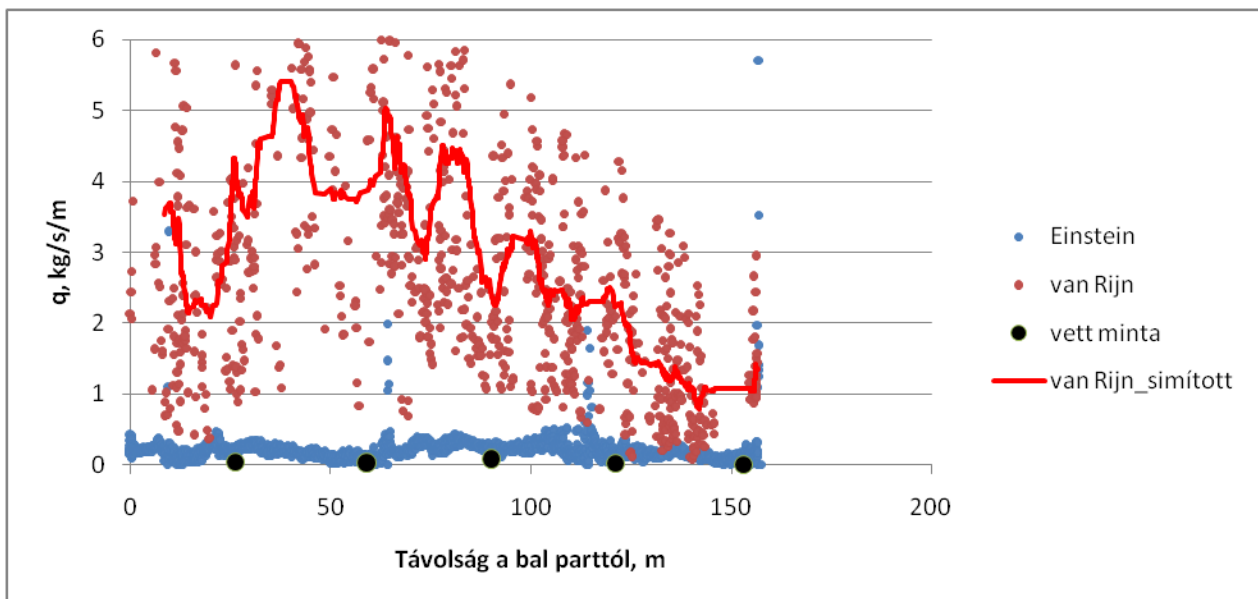
	Barcs	Bélavár	Botovo
1. kampány	476.9	491	493
2. kampány	561	699.9	706.2
3. kampány	432.5	375.6	355.8

Látható, hogy a tervezett módszerrel szemben (különböző vízjárási állapotokban végrehajtott mérések) hasonló vízhozamok jelentkeztek a méréskor, ami az ADCP alapú becslési módszer tesztelésére nem szerencsés, mert célszerű lett volna minél nagyobb vízhozam tartományt lefedni.

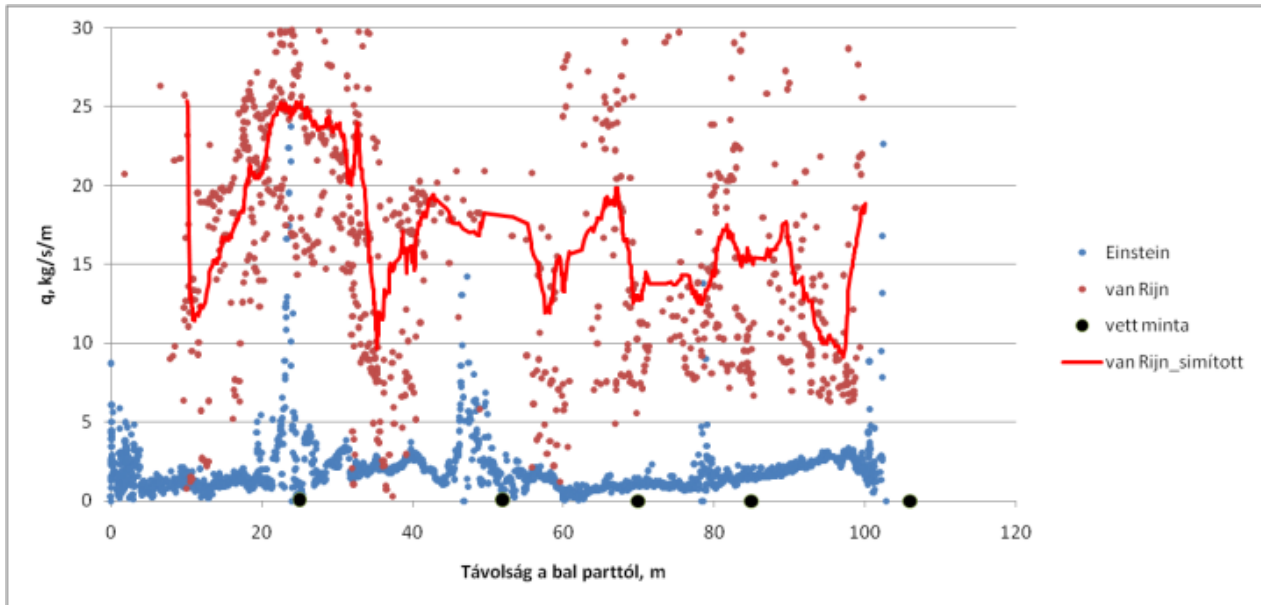
### Első mérési kampány eredményei

Ahogy a paraméter érzékenységvizsgálatnál bemutattam a hordalékmozgás rétegvastagságának becslése nagyságrendileg eltérő eredményeket jelez, így nem meglepő, hogy az Einstein szerinti ajánlás alapján minden mérés esetén ugyanez a viselkedés mutatható meg. A táblázatokból látható, hogy a mintavételek szintén jelentősen alacsonyabb hordalékhozam értékeket szolgáltatnak, az eltérés itt már a két nagyságrendet is elérheti. A vízhozamok az első mérés során az egyes állomások között alig tértek el. A mintázott hordalék mennyisége szintén hasonló nagyságrendben mozog, ezzel szemben az ADCP alapú becslés felvízi irányba haladva (Barcstól Botovo felé) egyértelműen egyre magasabb értékeket jelez. Ennek oka a mederanyag jellemző szemcseméretében keresendő, amivel arányos a hordalékhozam is.

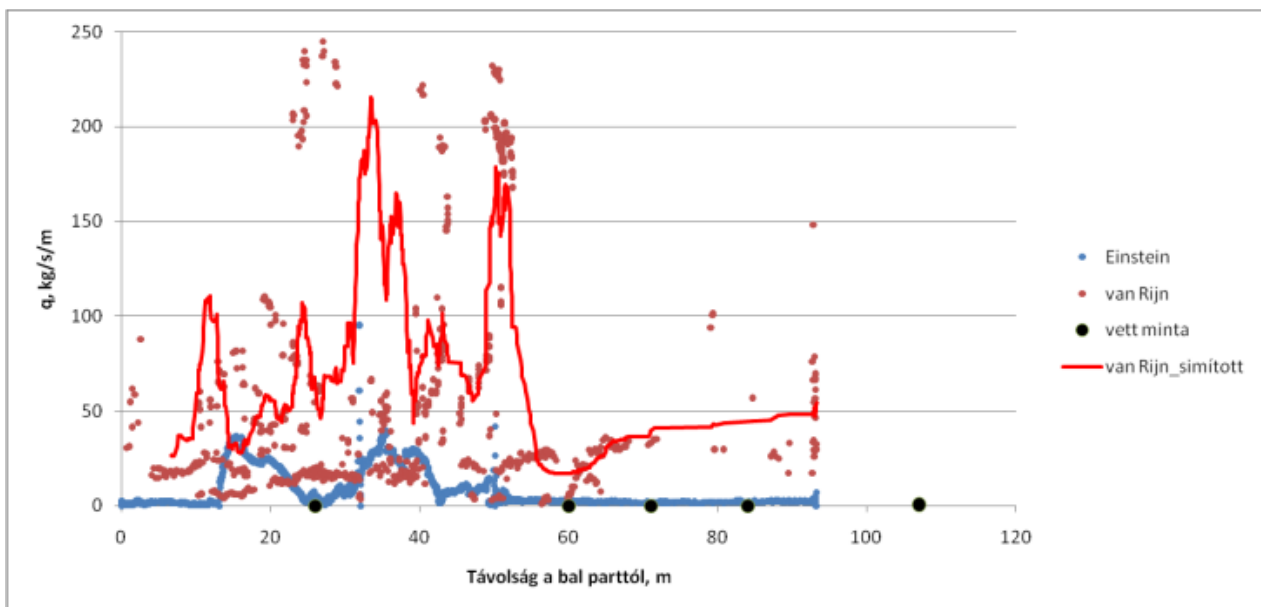
	1. kampány		
	Barcs	Bélavár	Botovo
Einstein	34 kg/s	210 kg/s	720 kg/s
van Rijn	425 kg/s	2800 kg/s	5590 kg/s
vett minta	5,7 kg/s	0,5 kg/s	3,9 kg/s



18. ÁBRA BARCS, 1. KAMPÁNY

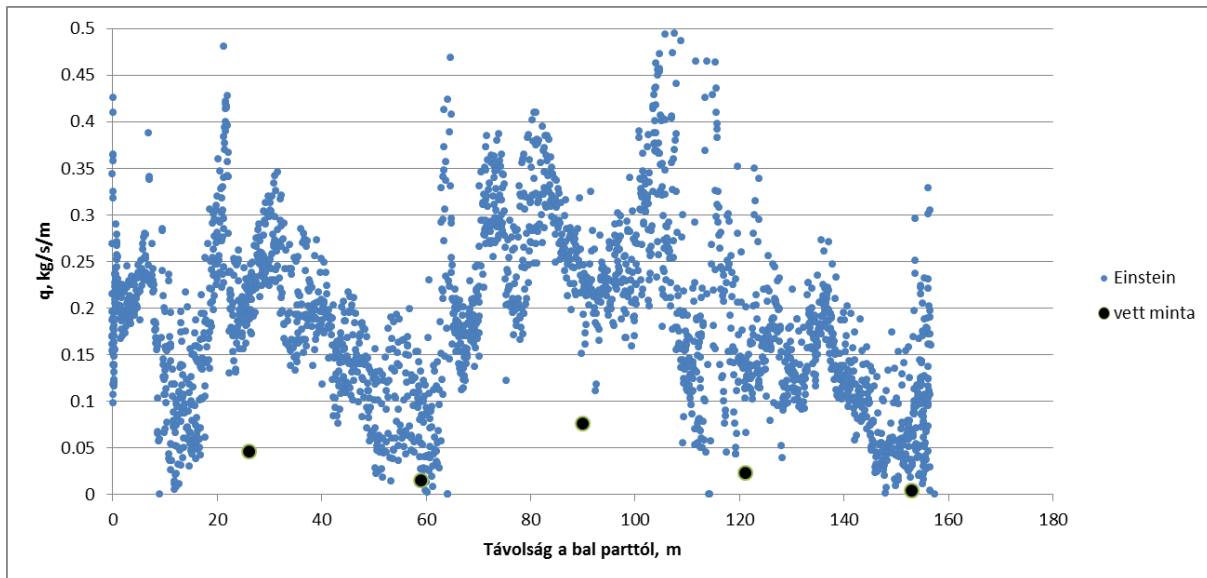


19. ÁBRA BÉLAVÁR, 1. KAMPÁNY



20. ÁBRA BOTOVO, 1. KAMPÁNY

Mivel jelentős eltérés mutatkozik a becsült és mintázott fajlagos hordalékhozam adatok között, célszerűnek tartottam leválasztani az Einstein javaslata alapján számolt és a közvetlenül mért adatsorokat, hogy a függőleges tengelybeosztás átállításával jobban értelmezhetővé váljanak. Az alábbi ábra a Barcsi szelvényre mutatja be a kapott adatokat.



**21. ÁBRA A DRÁVA BARCSI SZELVÉNYÉBEN MÉRT ÉS BECSÜLT FAJLAGOS HORDALÉKHOZAM ELOSZLÁS, A HORDALÉKMOZGÁSI RÉTEGVASTAGSÁGOT EINSTEIN ALAPJÁN BECSÜLVE**

Az ADCP alapú eloszlás az Einstein féle becsléssel is magasabb értékeket jelez, de sokkal közelebb van a mért adatokhoz. Itt fontos megjegyeznünk, hogy a mintázott adatokból számított hordalékhozamot összehasonlítási alapnak tekintjük, de nem tekinthetjük referencia adatoknak, mert az a méréstechnológia is jelentős bizonytalansággal terhelt. A szelvény menti eloszlás alakja mindazonáltal hasonló jelleget mutat, így – legalábbis ebben az esetben – kvalitatív egyezéstről beszélhetünk. A direkt módon vett mintából kapott eredmények sokkal reprezentatívabbak lehetnének, ha több vett mintánk lenne, vagyis ha több függélyből, több mérési adatunk volna. Emellett a mérésben jobban megbízhatnánk, ha tudnánk, hogy a mintavevő gyűjtési határfoka egy környékén van.

Jobb képet kapnánk ezeken módszereknek a pontosságáról és megbízhatóságáról, ha lenne más módszert is alkalmaznánk összehasonlításként. Ilyen lehet pl. a hordalékszemszék rádiós nyomkövetése, amikor az adott folyóra jellemző szemcséhez hasonló sűrűségű és méretű mesterséges vagy természetes hordalékot indítunk útra, amely el van látva egy rádiós nyomkövetővel, ezzel nyomon követhetnénk az útját és a mozgását, vagyis a mozgási sebessége lenne feltárható.

Hasonló kísérleteket végzett Dr. Rákóczi László a lumineszcens nyomkövetési módszerrel, aki különböző homokfrakciókat, különböző színűre festett és azokat engedte bele a Drávába egy adott szelvényben, majd mintavevésekkel követték figyelemmel a megfestett szemcsék terjedését.

**22. ÁBRA RÁKÓCZI LÁSZLÓ KÍSÉRLETE**

Fontos még megemlítenünk a mederpáncélozódásból jelenségét, ami nagyban befolyásolhatja kavics és homokos-kavics medrű folyókban a görgetett hordalékmozgás jellegét. A mederpáncélozódás jelensége, egy szelektív eróziós folyamat, mivel a kisebb részecskék kimosódnak a nagyobbak közül és így egy stabil felület jön ki. Ez a mederpáncél addig nem mozdul, míg nem érkezik egy olyan árhullám, amely felszakítja. Ha ez bekövetkezik akkor a hordalékhozamban egy drasztikus változás jön létre.

## 8 ÖSSZEFOGLALÁS. KÖVETKEZTETÉSEK

A TDK kutatásban az akusztikus Doppler elvű sebességmérő műszer (ADCP) adatait használtam fel görgetett hordalékhozam becslésre. A vizsgálat előtt áttekintettem a különböző hordalékmérési módszereket és ismertettem az ADCP alapú becslési eljárás alapjait. Bemutattam, hogy az adatelemzést a Dráva hordalékméréseivel kapcsolom össze, mert itt álltak rendelkezésre hazai szinten görgetett hordalékminták kavicsos és homokos-kavicsos mederanyagra.

Az ADCP alapú eljárással a folyó három mintavételi szelvényére három mérési kampányhoz kapcsolódó adatok alapján előállítottam a keresztshelvény menti fajlagos hordalékhozam eloszlásokat. Mivel a hordalékhozam becslési módszer számos olyan paramétert tartalmaz, aminek értékei valamilyen mértékű bizonytalansággal terheltek (pl. helyi fenék-csúsztatósebesség, vízmélység, mederanyag szemösszetétel stb.), elvégeztem egy paraméter érzékenységvizsgálatot, aminek során azt kaptam, hogy elsősorban a hordalékmozgási rétegvastagság számítására érzékeny az eljárás. Amennyiben ennek a paraméternek a meghatározására az Einstein által javasolt egyszerű megközelítést alkalmazzuk, miszerint a vastagság a jellemző szemátmérő kétszeresével adható meg, a kapott hordalékhozam adatok jelentősen közelebb kerülnek a mérési adatokhoz. Ezzel szemben, vVan Rijn módszerével a kapott hordalékhozam adatok legalább egy tízes nagyságrenddel magasabb értékeket eredményeztek. Fontosnak tartom felhívni a figyelmet arra, hogy a hordalékfogóval vett mintákból kapott hordalékhozam adatokat fenntartásokkal kell kezelnünk. Ennek okait a mintavételi eljárás ismertetésénél tárgyaltam, rámutatva arra, hogy milyen bizonytalanságok és hibaforrások terhelhetik az adatokat. A Dráva esetén elvégzett szelvényenkénti 5 minta megvétele véleményem szerint nem ad elegendően reprezentatív eredményeket. Javaslom a függvényenkénti háromszori mintavételezést a durva hibák kiszűrésére és a szelvény mentén több minta megvételét. Ennek értelemszerűen magasabb idő- és költségigénye lesz, de mindenképpen a mérés pontosítását vonja maga után.

Egy jövőbeli hordalékmérési fejlesztési irány lehet kavicsmedrű folyóknál a rádiós nyomkövetés alkalmazása. Itt lényegében a különböző méretű szemcsék haladási sebességet lehetne detektálni, ami alapján becslést tehetnénk az átlagos hordalékmozgási sebességre az alábbi súlyozott átlag képzéssel:

$$v_p = \sum_i v_{pi} \cdot f_{mi}$$

ahol  $f_{mi}$  az adott szemcseméret részaránya a teljes mintából.

Ez alapján egy egyszerű közelítéssel megadható a görgetett hordalékhozam, amennyiben ismert az egyes frakciók tömege ( $m_i$ ).

$$g_b = \sum_i g_{bi} = \sum_i v_{pi} \cdot m_i$$

A tömeg számítását egy egyszerű modellel is közelíthetjük, ha a szemcséket gömb alakúnak feltételezzük, amelyek egymás mellett elhelyezkedve teljesen kitöltik a teret:

$$g_b = \frac{4}{3} \cdot \rho_s \cdot \sum_i v_{pi} \cdot f_{mi} \cdot r_i$$

Ez a képlet egyszerűsíthető, ha csak egy szemcseátmérő van. (Rennie és társai, 2002)

$$g_b = \frac{4}{3} \cdot \rho_s \cdot r \cdot v_p$$

Mivel bármelyik hordalékmérési eljárást választjuk az természetes módon bizonytalansággal lesz terhelt egy további fejlesztési irány lehet a különböző (akár direkt akár indirekt) módszerek együttes alkalmazása. A módszerek további tesztelésére a Duna felső-magyarországi szakaszát javaslom, mert a Drávához hasonlóan rendelkezésre állnak a múltban végrehajtott hordalékmérések és számos szempontból (pl. hajózás, ökológia) szükséges a hordalékvándorlás minél pontosabb feltárása.

## 9 IRODALOMJEGYZÉK

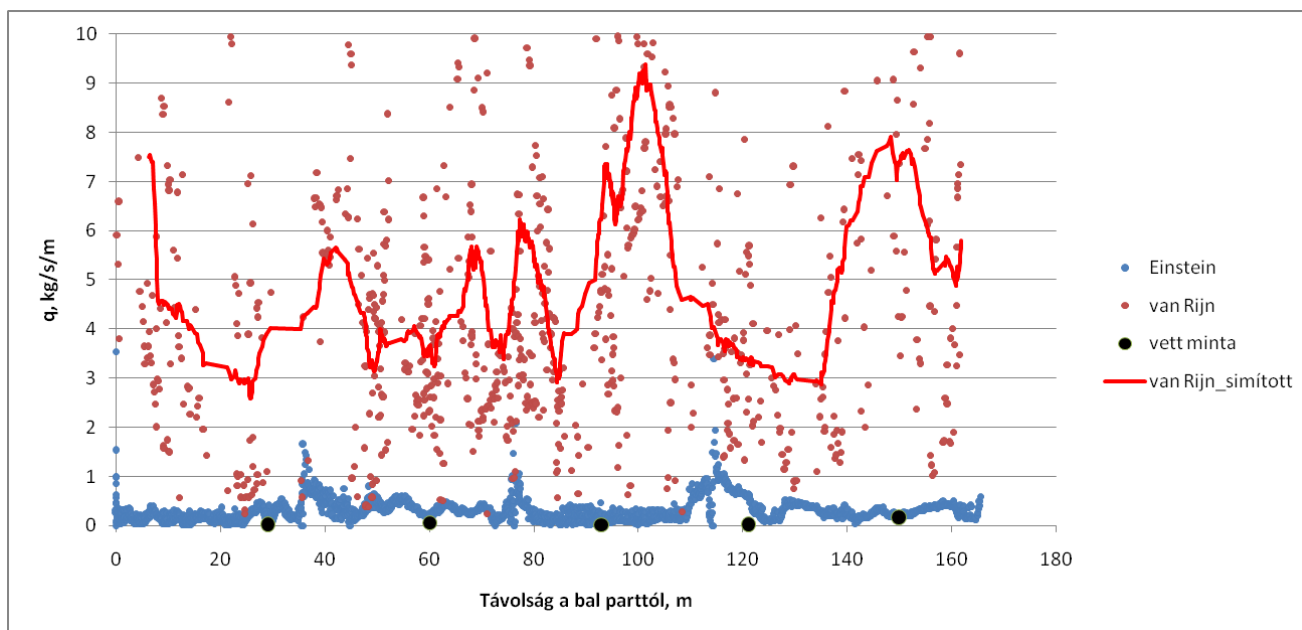
1. American Society of Civil Engineers (ASCE), 2008. "SedimentationEngineering"
2. Diplas, P., Kuhnle, R., Glysson, D., Edwards, T., "SedimentTransportMeasurements"
3. Eötvös József Főiskola Műszaki és Közgazdaságtudományi Kar Vízépítési és Vízgazdálkodási Intézet, 2012. "A Dráva morfológiai monitoringja - Hordalékvizsgálat Tanulmány" EJF MKK, Baja
4. Garcia, M. H., "SedimentTransport and Morphodynamics"
5. Habersack, H., Seitz, H., Liedemann, M., 2010. "IntegratedAutomatic Bedload Transport Monitoring" Published online in 2010 as part of U.S. GeologicalSurveyScientificInvestigationsReport 2010-5091 BOKU- University of NaturalResources and Applied Life Science, Vienna, Austria
6. Kulcsár, L., 2013. "Dráva Morfológiai Monitoring - hordalékmérések"
7. van Rijn, L. C., 1984. "SedimentTransport, Part I: BedLoadTransport" Journal of HydraulicEngineering 1984.110:1431-1456
8. Rennie, C. D., Millar, R. G., Church, M. A., 2002. "Measurement of BedLoadVelocityusing an Acoustic Doppler CurrentProfiler" Journal of HydraulicEngineering2002.128:5-473
9. Simons, D. B., Richardson, E. V., and Nordin, C. F., Jr. 1965. "Bedload equations for ripples and dunes." U.S. Geol. Surv. Prof. Pap., 462-H.
10. Török, G. T., 2011. "Vegyes szemösszetételű folyómeder morfodinamikájának numerikus vizsgálata" Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Építőmérnöki Kar 2011. évi Tudományos Diákköri Konferencia



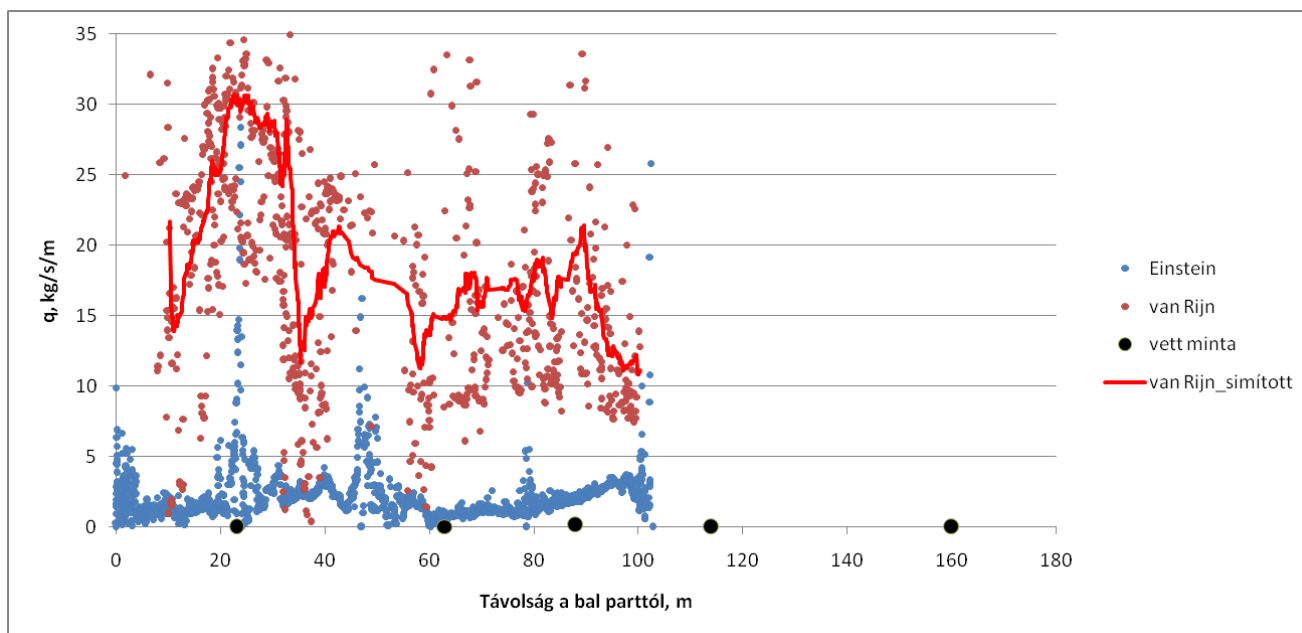
## 10 FÜGGELÉK

2. mérési kampány

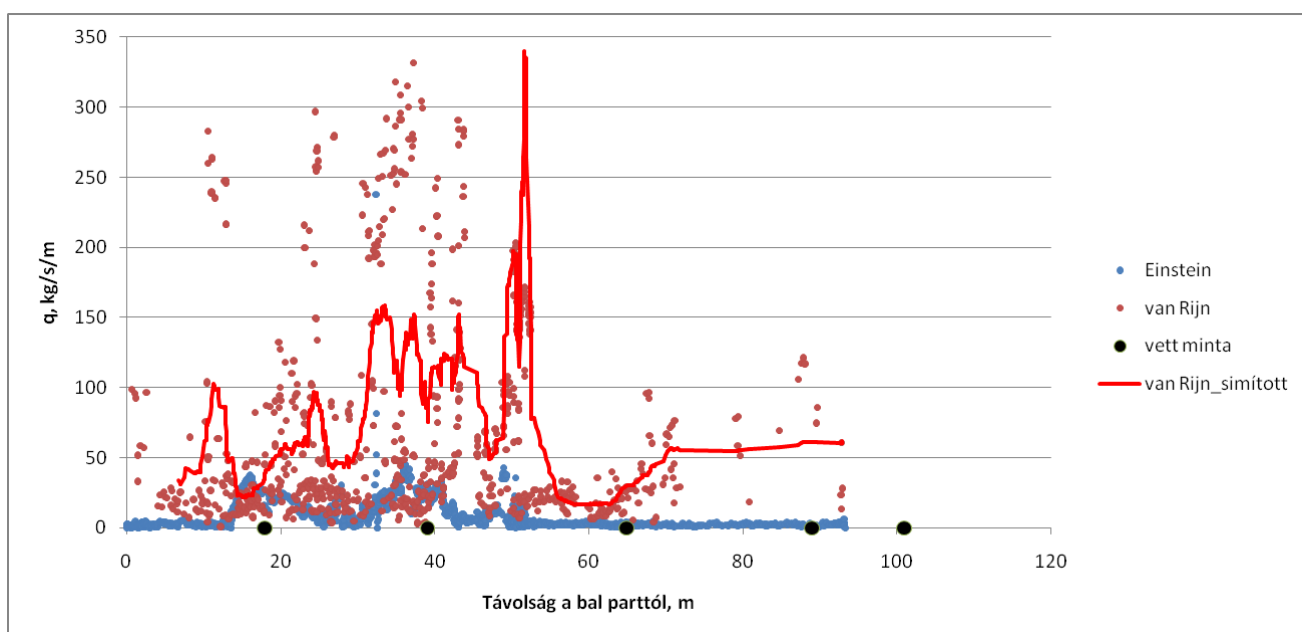
2. kampány			
	Barcs	Bélavár	Botovo
Einstein	50 kg/s	240 kg/s	760 kg/s
van Rijn	810 kg/s	2140 kg/s	5880 kg/s
vett minta	9,3 kg/s	5,6 kg/s	1,8 kg/s



23. ÁBRA BARCS, 2. KAMPÁNY



24. ÁBRA BÉLAVÁR, 2. KAMPÁNY

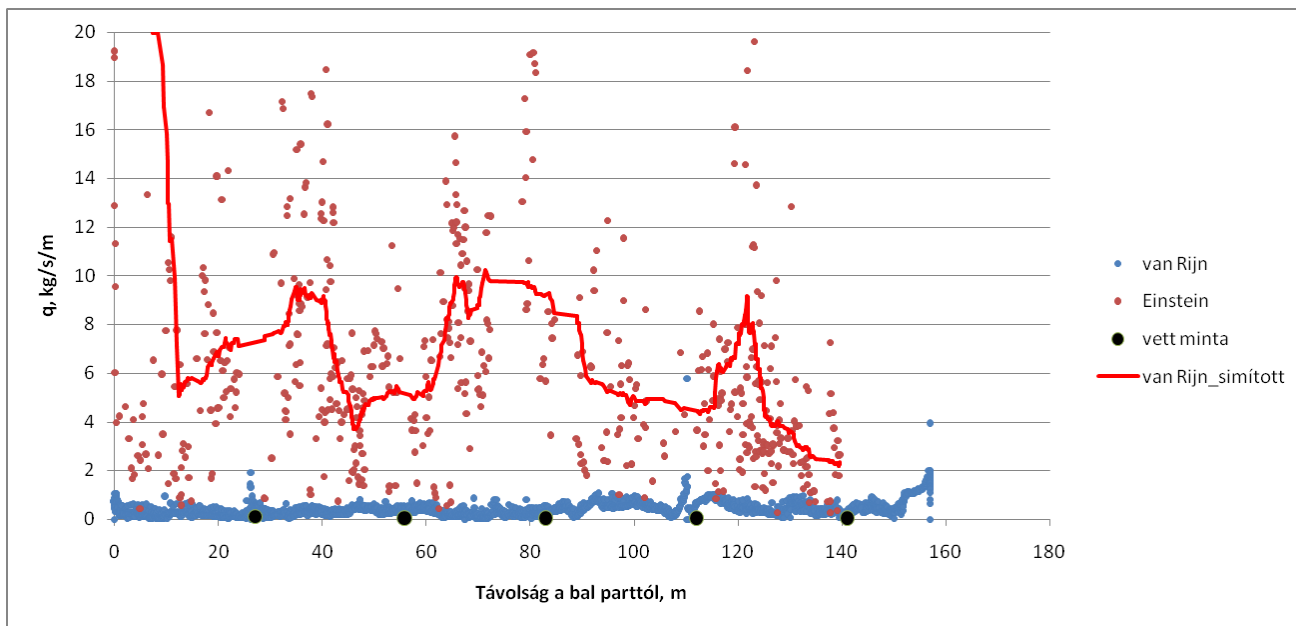


25. ÁBRA BOTOVO, 2. KAMPÁNY

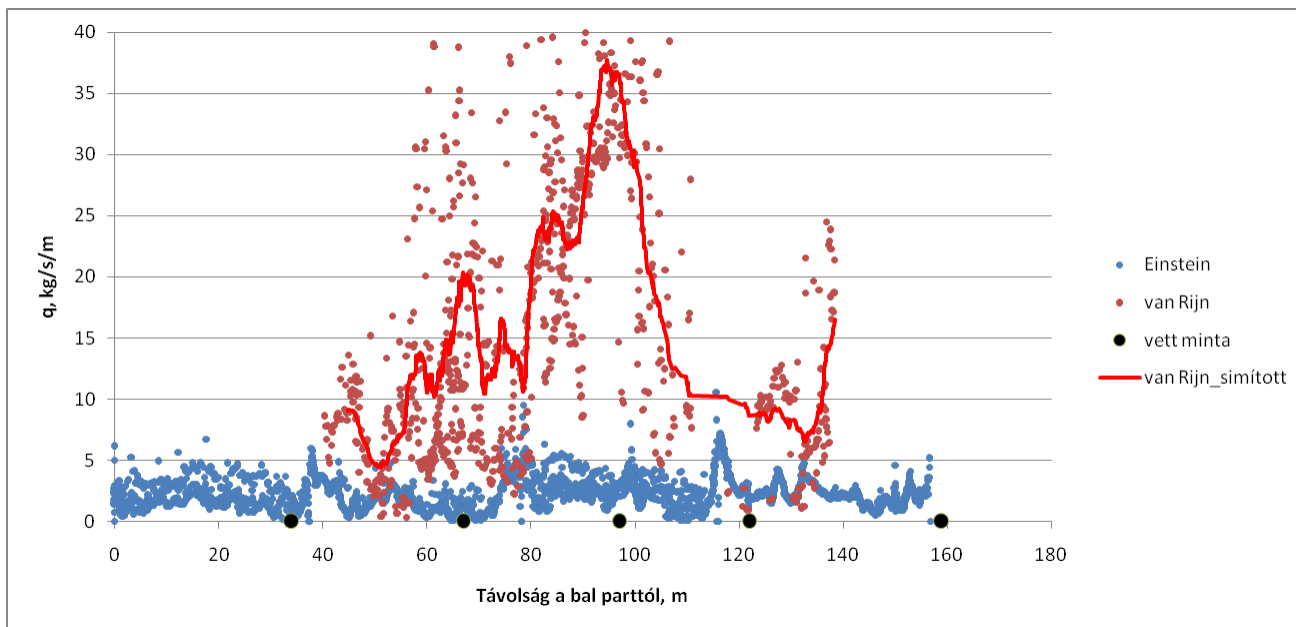
**3. mérési kampány**

	3. kampány		
	Barcs	Bélavár	Botovo
Einstein	62 kg/s	350 kg/s	130 kg/s
van Rijn	1080 kg/s	1400 kg/s	1160 kg/s

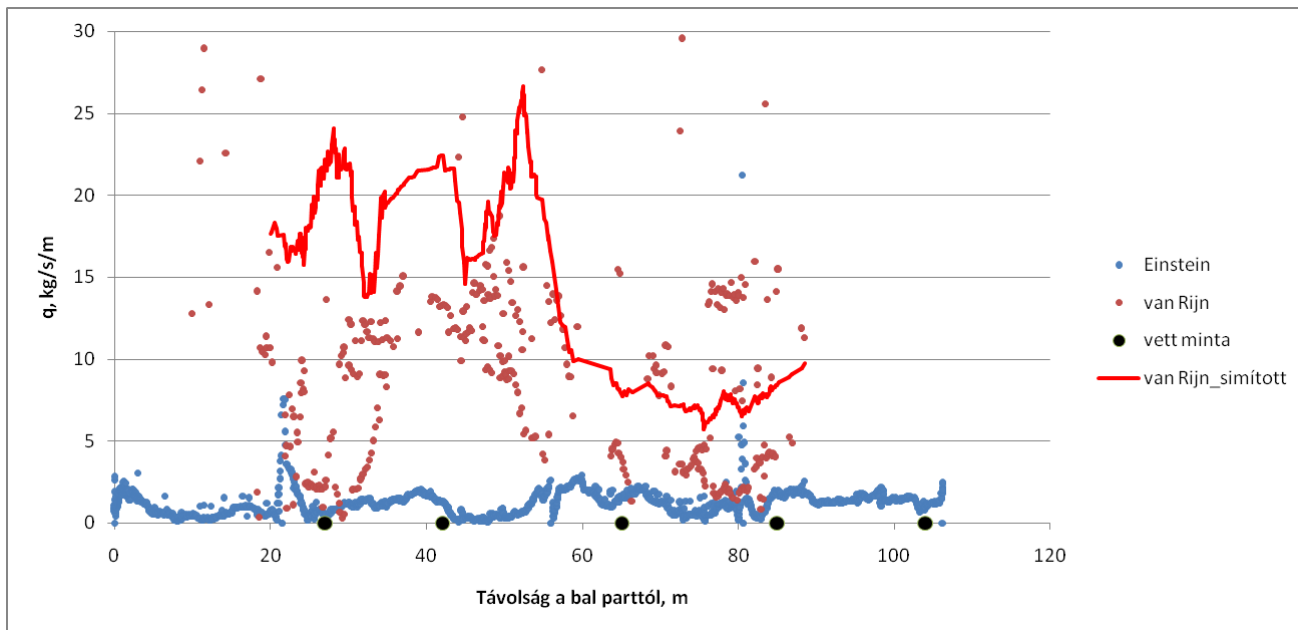
vett minta	6,6 kg/s	0,01 kg/s	0,14 kg/s
------------	----------	-----------	-----------



26. ÁBRA BARCS, 3. KAMPÁNY



27. ÁBRA BÉLAVÁR, 3. KAMPÁNY



28. ÁBRA BOTOVO, 3. KAMPÁNY