

Hazai hordalékmonitoring fejlesztések eredményei a SEDDON II projektben

Dömötör Szilveszter¹, Pomázi Flóra², Dr. Baranya Sándor²

¹Észak-dunántúli Vízügyi Igazgatóság

²Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Építőmérnöki Kar,
Vízépítési és vízgazdálkodási Tanszék

Kivonat

A cikkben az Interreg V-A Ausztria-Magyarország Határon Átnyúló Együtműködési Program keretében megvalósított SEDDON II (A Duna hordalékvizsgálata II) projekt első eredményeit mutatjuk be. A mérésmetodikai fejlesztések részeként hordalékmonitoring állomásokat létesítettünk üzemeltetünk a Duna gönyűi és a Rába győri szelvényében, továbbá kiterjedt méréssorozatokot hajtottunk végre mind a folyó lebegtetett hordaléktartalmának, mind a görgetett hordalékmozgásnak a feltárására. Vizsgálatainkat egy korábbi projekt (SEDDON I) eredményeire építettük, és részben az ott bemutatott mérési módszereket alkalmaztuk. A nagyszámú mérési kampány lehetővé tette, hogy eddig nem látott megbízhatóságú hordalékhozam összefüggéseket dolgozzunk ki a dunai teszterületen, melyek segítségével a hordalékvándorlás időbeli alakulása tárható fel, sőt az osztrák és magyar mintaterületeken végzett mérések alapján összehasonlító adatelemzésre is lehetőség nyílik.

Kulcsszavak

SEDDON II, hordalékmonitoring, lebegtetett hordalék, zavarosság, görgetett hordalék, H-ADCP, hordalékjárás

BEVEZETÉS

A folyókban vándorló lebegtetett és görgetett hordaléknak közvetlen hatása van az élőhelyekre, az árvízlevezetésre, a hajózásra és az ivóvíz-kitermelésre. A hatás iránya és mértéke a szállított hordalék mennyiségétől és összetételétől függ.

A hordalék mennyiségének méréssel történő meghatározása jelentős múltra tekint vissza mind hazánkban, mind más Duna-menti országokban. A gyűjtött adatok azonban jelenleg csak korlátozottan alkalmasak az említett hatások becslésére, illetve a szükséges beavatkozások megtervezésére. A korlátozott felhasználhatóságnak műszaki okai vannak: kevés szelvényben, alacsony gyakorisággal folynak a mintavételek, országoként eltérőek és gyakran korszerűtlenek a mintavevő eszközök, nem szabványosítottak a laboreljárások.

Tekintve, hogy a folyó és az általa szállított hordalék vándorlása országhatároktól független, az említett problémák megoldásához határon átnyúló együttműködésre is szükség van.

Az együttműködés első lépéseként jött létre a SEDDON projekt, mely a bécsi BOKU egyetem, mint vezető partner koordinálásával több partner – köztük az ÉDUVIZIG – együttműködésében valósult meg 2013-2014 között. A projekt célja a Duna felső- és középszakasza (kavics és homokmeder, nagyésű és kisesű szakaszok) jellegű részein összehasonlító elemzések végrehajtása, továbbá egy közös szemlélet megalkotása volt a mérési és modellezési módszerekre.

A SEDDON II (A Duna hordalékvizsgálata II) projektet azzal a céllal indították a korábbi projektpartnerek, hogy az első ütemben megalapozott vizsgálatokat és az ott javasolt fejlesztéseket a gyakorlatban is megvalósítsák.

A 2016 és 2022 között megvalósított projekt résztvevői az alábbi feladatokat teljesítették:

1. Universität für Bodenkultur (BOKU), Bécs: vízepítési laboratórium megvalósítása Bécsben
2. Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem (BME), Budapest: terepi mérések, laborfejlesztés, modellezés és elemzések
3. Észak-dunántúli Vízügyi Igazgatóság (ÉDUVIZIG), Győr: hordalékmonitoring állomások kivitelezése, terepi mérések
4. BOKU Wasserbaulabor G.m.b.H., Bécs: vízepítési laboratórium kivitelezése

HORDALÉKMONITORING ÁLLOMÁSOK MEGVALÓSÍTÁSA

A hordalékmonitoring állomások helyének megválasztásánál számos környezeti és üzemeltetési műszaki feltételt kellett figyelembe vennünk. A környezeti feltételek közül kiemelendő a műszerek elhelyezésére alkalmas szelvényalak, a mérést akadályozó folyamatszabályozási műtárgyak (sarkantyú, vezetómű) hiánya, valamint a tehergépjárművel történő megközelítés lehetősége. Az üzemeltetés műszaki feltételeiként a hálózati áramellátás, illetve az internet-alapú (GPRS) adatkommunikáció rendelkezésre állását határoztuk meg. A felsorolt követelményeknek a Duna, Gönyű (1790,61 fkm.), illetve a Rába, Győr (0,400 fkm.) szelvények megfelelőnek bizonyultak.

Az új alépítményeket mindkét helyszínen a meglévő – 140 évnél is hosszabb idejű vízállás-adatsorral rendelkező – vízmércék szerkezetébe integrált módon terveztük meg.

A műszerek védelmét a rézsűben, a vízmérce-lépcső alatt elhelyezett, korróziómentes acél anyagból készített műszercsatorna biztosítja (1. fénykép). A lépcső kb. 30 kg tömegű szegmensei kézi erővel mozgathatók, így az alépítményből az iszap eltávolítása bűvár igénybevétele nélkül végezhető.



1. fénykép: A műszercsatorna beépítése

A műszercsatornában egy csőinpáron mozgatható a vízhozam mérésére szolgáló horizontális ADCP (Horizontal Acoustic Doppler Current Profiler, H-ADCP) mérőfej (2. fénykép). Szintén a műszercsatornában telepítettük az optikai elven működő zavarosságmérő eszközt (optical backscatter sensor, OBS), ami a zavarosság mellett közvetlenül szolgáltatja a lebegtetett hordalék-koncentráció (mg/l) adatokat is. A vízállás- és víz hőmérséklet adatok gyűjtésének primer eszközeként 3-3 db nyomástávadót építettünk be.



2. fénykép: A H-ADCP eszköz mozgatása a műszercsatornában. Előtérben a rudazatra erősített OBS látható.

A H-ADCP controller egységén telepített AquaVision ViSea PDT-H szoftver segítségével egyúttal a lebegtetett hordalék koncentrációját, szelvény-menti eloszlását és hozamát is meghatározzuk. Az optikai zavarosságmérő eszközt adatait a szoftver folyamatos kontroll adatként használja fel.

Az ÉDUVIZIG vízrajzi távmérő infrastruktúrájának felhasználásával az állomásokon gyűjtött valamennyi adatot egy központi adatbázisba továbbítjuk, majd azokat a www.teledan.eu honlapunkon is közzé tesszük.

Az állomásokon telepített H-ADCP és OBS eszközöket mobil ADCP-vízhozammérésekkel és többpontos lebegtetett hordalék-mintavételekkel kalibráljuk.

A HORDALÉK-MINTAVÉTELEK MINTATERÜLETE

A vizsgált Duna-szakasz (1. ábra) morfológiai szempontból átmeneti szakasznak minősül: esése 37 cm/km-ről 6 cm/km-re csökken (DanubeSediment, 2020), és kiszélesedik. Az átlagos vízhozam 2000 m³/s körül mozog, míg a 100 éves visszatérési idejű árhullám kb. 10 000 m³/s. A gönyői mérőszelvényben az átlagos vízmélység 5-6 m, az átlagos szelvény szélesség 400 m. Az átlagos lebegtetett hordalékhozam 40 kg/s (azaz kb. 1.3 Mt/év), az átlagos hordaléktöménység 20 mg/l (DanubeSediment, 2019). A gönyői vízmérce szelvényétől 4 km-rel feljebb a hordalékban gazdag Mosoni-Duna torkollik a Dunába, melynek jobb parthoz simuló hordalékcsovája hosszú kilométereken keresztül nem

keveredik el teljesen a Duna vizével (2. ábra). Míg a Mosoni-Duna vízhozama ritkán haladja meg a Dunában mért vízhozam 10%-át, addig a hordaléktöménysége akár hatszorosa is lehet a Dunában mértnek – noha a lebegtetett hordalékhozamok aránya már csak 1:5 (Pomázi - Baranya, 2022). Mivel a hordalékmonitoring állomás szintén a jobb parton helyezkedik el, a hordalékcsova igen jelentősen befolyásolhatja az állomás által szolgáltatott adatokat (Pomázi - Baranya, 2022).



2. ábra: A gönyői mintaterület műholdfelvétele

LEBEGTETETT HORDALÉK-MINTAVÉTELEK ÉS ELEMZÉSEK

A mintavételek módszere

A méréseink során a mérési szelvényben 5 függélyben, függélyenként 5-5 db, az ún. ötpontos módszernek (BMFLUW, 2017) megfelelően megválasztott pontban:

- izokinetikus mintavevővel vízmintát vettünk,
- ezzel egyidejűleg a LISST-ABS műszerrel kalibrálatlan hordaléktöménységet mértünk,
- az ADCP műszerrel függély-menti sebességmérést végeztünk.

Az ötpontos módszer esetén mintavételi pontok vízfelszíntől való távolsága a vízmélység (H) ismeretében a következőképpen számítható:

$$0.05H, 0.2H, 0.6H, 0.8H, 0.95H.$$

A függély-menti méréseket kiegészítve, a mozgóhajós mérések alkalmával az ADCP mellett a LISST-ABS hordalékelemző műszert is működtettük (4. fénykép), annak érdekében, hogy az akusztikus eszközök kalibrálását követően a szelvény-menti hordalékhozam eloszlásról is képet kapjunk.

Alkalmazott műszerek és működési elveik

US P61-A1 izokinetikus hordalék-mintavevő

Az izokinetikus mintavevő eszköz jellemzője, hogy a mintavevőbe áramló víz sebessége megegyezik az vízfolyásnak a mintavételi pontban mérhető áramlási sebességével, így a vett minta hordalék-koncentrációja a vízfolyásával azonos lesz. Az általunk használt műszer (3. fénykép) áramvonalas kialakítású, hátsó részén az iránytartásra szolgáló timonyokkal. Az

eszköz belsejében található az 1 liter űrtartalmú mintavevő tartály, melybe a fejrészen található nyíláson keresztül áramlik be a víz. A nyíláson keresztül az áramlást egy elektromos szeleppel lehet engedni, illetve zárni. A szelep vezérlése a mérőcsónakból történik egy speciálisan kialakított csörlőrendszer segítségével. Hátránya az elektromos rendszer érzékenysége, valamint az egyedi amerikai szabvány szerint készült mintavételi tartályok beszerzésének nehézsége. (Pomázi - Baranya, 2020)



3. fénykép: US-P61-A1 típ. izokinetikus mintavevő

LISST-Portable|XR hordalékelemző műszer

A LISST-Portable|XR (4. fénykép) a lézervény szóródási jelenségén alapuló hordalékelemző műszer. A műszer ismert intenzitású és hullámhosszú lézervényt bocsát keresztül a behelyezett vízmintán, majd a szóródott lézervényt gyűjtőlencse segítségével az érzékelő gyűrűkre fókuszálja. A koncentrikusan elhelyezett 44 db detektorgyűrűn érzékelt fény mennyiségéből képes a szemeloszlást meghatározni, valamint a kibocsátott, illetve érzékelt fényintenzitás különbségéből megbecsüli a mintában lévő szilárd szemcséken elnyelődött fény mennyiségét. A két érték arányából térfogatkoncentrációt számít $[\mu\text{l/l}]$, melyet az operátor által becsült hordalékszemcse fajsúlyának segítségével számít át lebegtetett hordalék-koncentráció értéké $[\text{mg/l}]$. Vizsgálati tartománya a hordalék anyagától függ, finom hordalék esetén (amely jelen kisvízes mérés esetén is várható) 10-200 mg/l. A hagyományos (szűrőpapíros vagy evaporációs) módszerekkel szemben precízebb és gyorsabb elemzést tesz lehetővé, és terepen is használható. (Pomázi - Baranya, 2020)



4. fénykép: LISST-Portable |Xr

Mobil ADCP vízhozammérő eszköz

A projektben az áramlásmérésekre alkalmazott mérőműszer, az ún. ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler, 5. fénykép) a Doppler-elvet használja ki az áramlási sebességek indirekt méréséhez. A Doppler-elvnek megfelelően a mérőfejhez közeledő lebegőanyag-részecskékről visszaverődő jel frekvenciája megnő, a távolodó részecskék esetében pedig csökken. A frekvencia torzulása és a részecske sebessége között kapcsolat állapítható meg, melynek függvényében a részecske három vetületi sebességkomponense számítható. Ahhoz, hogy az eszköz háromdimenziós sebességeloszlásokat tudjon mérni, minimum három (a gyakorlatban általában három vagy négy) jelvevőre, illetve jelkibocsátóra van szüksége. A jeladók és a jelvevők szerkezetileg azonos helyen találhatóak, ezek az műszer „szemei”. A mérések pozicionálása és georeferálása érdekében az ADCP-t egy, a műszer tengelyében elhelyezett RTK GPS vevővel együtt szokás alkalmazni. (Pomázi - Baranya, 2020)



5. fénykép: Stonex RTK GPS (bal) és a WorkHorse Rio Grande 1200 kHz típusú ADCP (jobb)

Méréseink során a Teledyne WorkHorse Rio Grande 1200 kHz típusú ADCP műszert alkalmaztuk mind a keresztshelvény menti mozgójajós, mind a függélyekben végrehajtott rögzített pontú mérésekre. Előbbieket a vízhozam, utóbbiakat a függély menti sebességprofilok előállítása (s így a hordalékhozam meghatározása) érdekében végeztük.

LISST-ABS akusztikus hordalékelemző műszer

A LISST-ABS akusztikus eszköz (6. fénykép) az általa kibocsátott magas frekvenciájú (rövid hullámhosszú) hanghullámok visszaverődését használja a lebegtetett hordalékszémcsék mennyiségének detektálásához. Előnye, hogy nem csak pontbeli, hanem profilmenti méréseket is lehet vele végezni. A hordaléktöménységre a visszaverődés erősségéből lehet következtetni. A terepen a hozzá tartozó szoftverrel kalibrálva a mért értékeket, valós időben észlelhető a töménység. (Pomázi - Baranya, 2020)



6. fénykép: A SEDDON II projekt keretében beszerzett LISST-ABS műszer

VELP kézi zavarosságmérő műszer

A VELP TB1 hordozható kézi zavarosságmérővel (7. fénykép) a vízminta zavarosságát lehet a terepen meghatározni. Az eszköz 850 nm hullámhosszú lézerefényt bocsát a mintába, amit a lebegő részecskék szétszórnak. Először 90°-ban törik meg a fény, majd egy kúpos tükörről 360°-ban visszaverődik a mintába, és csak ez után jut a fény az érzékelőbe. Minél zavarosabb a minta, annál több fény szóródik, amit a fotocella érzékel. A műszer Nefelometriás Zavarossági Egység (NTU, Nephelometric Turbidity Units) mértékegységben adja meg az eredményeket, így annak érdekében, hogy megkapjuk a hordaléktöménységet, kalibrálni szükséges. Méréstartomány 0 és 1000 NTU között van. A készülék pontossága $\pm 2\%$ a 0 és 500 NTU közötti tartományban, illetve $\pm 3\%$ 501 és 1000 NTU között. (Pomázi - Baranya, 2020)



7. fénykép: VLP kézi zavarosságmérő

Pozitív nyomású szűrőberendezés

A pozitív nyomású vízszűrő az atmoszferikus nyomás többszörösén (max. 8 bar) üzemelő nyomószűrő. A rozsdamentes acélból készült eszköz szűrőháza 1.25 liter térfogatú. Működtetéséhez kompresszor által termelt sűrített levegő szükséges. A szűréshez 47 mm átmérőjű, 0.45 μm pórusméretű cellulóz acetát membránszűrőt helyezünk a szűrőegység házában lévő porózus korong tetejére, majd "O" -gyűrűvel tömítjük, s acélbilinccsel zárjuk. Az előzőleg mérőhenger segítségével ml pontossággal meghatározott térfogatú mintát a szűrőtartály tetején található nyíláson keresztül kell betölteni (jellemzően tölcser segítségével). (Pomázi - Baranya, 2020)

A vízminták laboratóriumi elemzése

A vízminták laboratóriumi elemzését a terepi mérést követően minél hamarabb igyekeztünk elvégezni. Az elemzésig gondoskodtunk a minták megfelelő körülmények közötti (napfénytől védett, hűvös helyen történő) tárolásáról.

A laboratóriumi elemzés során a homogenizált (megfelelően felrázott) mintákból:

- a kézi zavarosságmérővel 10 ml,
- a LISST-Portable|XR eszközzel 117 ml,
- a szűrőpapíros módszerrel pedig - a teljes minta térfogata és a hordaléktöménység függvényében - jellemzően 200-250 ml térfogatot elemzünk.

A kézi zavarosságmérő hitelesített, foltmentesre tisztított üvegcséjébe töltött mintát a gyorsabban ülepedő szemcsék miatt felrázva, minél gyorsabban kell a műszerbe helyezni. A mérés nem tart tovább 1 percnél. Az eredményeket NTU-ban kapjuk.

A LISST-Portable|XR műszerbe buborékmentesen betöltött vízminta elemzése is automatikus, körülbelül 3-5 percet vesz igénybe. A műszer a hordaléktöménységen kívül szemösszetételi információkkal is szolgál.

A legidőigényesebb laboratóriumi elemzési módszer a szűrőpapíros módszer, összességében egy több órás folyamat. Az 0.45 µm pórusméretű, 47 mm átmérőjű szűrőpapírokat először 105 °C-on min. 2 óra alatt tömegállandóságig kell szárítani, majd az ún. szűrés előtti tömegüket (m_e) ± 0.1 mg pontosságú analitikai mérleggel lemérni. Az ismert térfogatú (V) minta szűrése a pozitív nyomású szűrőberendezéssel történik. Az átszűrt mintát tartalmazó szűrőpapírokat 3-4 órán keresztül újfent 105 °C-on kell tömegállandóságig szárítani, majd az ún. szűrés utáni tömegüket (m_u) lemérni. A hordaléktöménység (SSC) az alábbi összefüggés alapján egyszerűen számítható:

$$SSC = \frac{m_u - m_e}{V} \left[\frac{\text{mg}}{\text{l}} \right]$$

A terepi mérések eredményeinek utófeldolgozása

Áramlásmérések

A függély-menti ADCP mérési adatokból egyszerűen előállítható a logaritmikus sebességprofil, minden egyes függélyben. Ehhez az egyes mélységekben mért értékek időátlagolását kell elvégezni.

LISST-ABS

A terepi mérés során a LISST-ABS eszköz kezelő szoftvere szövegfájlban rögzíti a mért értékeket. Mivel az eszköz folytonosan mér, a függély menti profilozás esetén a pontbeli izokinetikus mintavétel időpontjához tartozó értékeket utófeldolgozás során kell kiolvasni. Mivel a mintavétel az áramlási sebesség függvényében meghatározott ideig történt, a LISST-ABS értékeket is ugyanarra a 30-60 másodperces tartományra nézve átlagoltuk.

A szelvény menti LISST-ABS profil előállításához szükséges parttól mért távolságok a mozgóhajós ADCP fájlból kiolvashatók.

Az ADCP visszavert jelerősségének kalibrálása

A lebegtetett hordalék koncentráció (SSC, suspended sediment concentration) ADCP adatokból történő előállítása során az alábbi összefüggést alkalmaztuk (Baranya - Józsa, 2013):

$$SSC = 10^{A+B \cdot (Kc (Ei-Er)+2 (10 \cdot \log (R)+\alpha \cdot R))}$$

ahol:

A, B konstansok a mért SSC értékeket felhasználva; legkisebb négyzetek

módszerével kerülnek meghatározásra [-],

- Kc a műszerre jellemző konverziós tényező; becsült [-],
- EI a műszer által mért visszhang impulzusokban kifejezve [counts],
- Er a műszerre jellemző alapzaj; célirányos méréssel meghatározható [counts],
- R a műszerfej és a mért cella közötti távolság [m],
- α a víz általi elnyelődést és a hordalék általi csillapítást leíró abszorpciós együttható [dB/m].

Az eljárás során először a függély menti ADCP mérésekből kiolvasott visszhang és a mért SSC értékeket felhasználva kalibráltuk az ADCP adatokat, majd a meghatározott paraméterekkel előállítottuk a teljes szelvénymenti SSC profilt.

Hordalékmérési eljárások tesztelése

A BME-VVT eszközparkja jelentősen bővült a SEDDON II projekt keretén belül, így a lebegtetett hordalékmérések egyik céljaként a lebegtetett hordalékvándorlás közvetett és közvetlen mérési módszereinek tesztelése is lehetővé vált. A cél egy egyszerű, gyors és megbízható lebegtetett hordalékmérési gyakorlat kidolgozása volt annak érdekében, hogy a monitoring állomáson rögzített eszközök kalibrálása, ellenőrzése minél egyszerűbben, gördülékenyebben legyen elvégezhető.

Az összehasonlító elemzésben a következő módszereket, ill. eszközöket (ld. fent) alkalmaztuk:

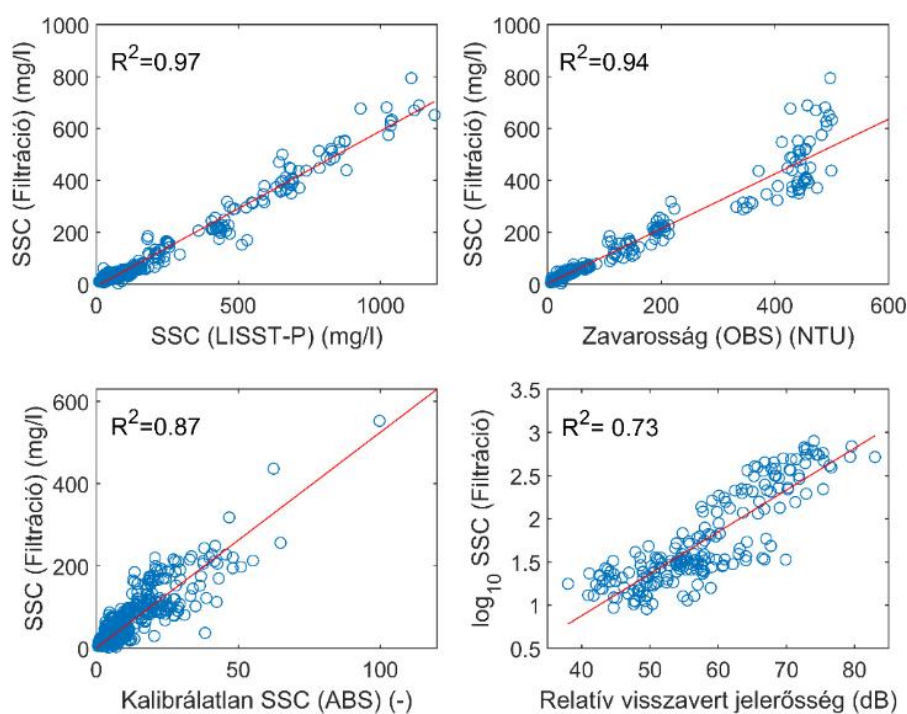
- Direkt módszer:
 - szűrőpapíros eljárás (pozitív nyomású szűrőberendezéssel)
- Indirekt módszerek:
 - optikai elven működő zavarosságmérő eszközök:
 - lézervény szóródásán alapuló műszerek (LISST-Portable |XR)
 - infravörös fény visszaverődésén alapuló eszközök (kézi zavarosságmérő)
 - akusztikus eszközök: magas frekvenciájú hanghullám visszaverődése alapján (LISST-ABS)
 - ADCP (visszavert jelerősség kalibrálása)

Méréseinkkel széles vízhozam- és hordaléktöménység tartományt tudtunk lefedni. Így az egyes módszerek közti kapcsolat erőssége jellemzően kellően erős ahhoz, hogy kalibrálni tudjuk az indirekt eszközöket, s ki tudjuk váltani az időigényes és sokszor körülményes hagyományos (szűrőpapíros) elemzést. Természetesen ellenőrző mérések továbbra is szükség lesz, mivel a kalibrációt időnként frissíteni kell.

Az 1. táblázat a legfontosabb, gyakorlati szempontú tapasztalatainkat foglalja össze, a 2. ábra pedig az egyes in/direkt lebegtetett hordalékmérési eljárások között felállított kalibrációs összefüggésekre mutat példát.

Eszköz/módszer	Időigény	Terepi alkalmazhatóság	Eredmény	Automatizált?	Hibázási lehetőség	Érzékenység	Utófeldolgozási igény	Kalibrációs igény	Kezelés	Mit mér?	Bonus
Szűrőpapíros	több óra	nem	diszkrét	nem	sok	nagy töménység	nincs	nincs	körülmenyes	hordalék mennyisége	referenciának tekinthető
LISST-P	3-5 perc	igen	diszkrét	nem	közepes	hőmérséklet, nagy töménység	nincs	van	könnyű	hordalék-töménység, szemeloszlás	szemeloszlásról is képet kaphatunk
Kézi zav.mérő	1 perc	igen	diszkrét	nem	közepes	szín, foltos kémcső	nincs	van	könnyű	zavarosság	kompakt, kis vízminta is elég
LISST-ABS	valós idejű	igen	folytonos	igen	kevés	nincs	kicsi	van	könnyű	hordalék-töménység	függély- és szelvény menti profilozásra is alk.
ADCP RB	30 perc	igen	folytonos	igen	kevés	nincs	nagy	van	könnyű	visszavert jelerősség	mindig alkalmazzuk

1. táblázat: A hordalékmérési módszerek összehasonlítása



2. ábra: Az egyes in/direkt lebegtetett hordalékmérési eljárások között felállított kalibrációs összefüggések

GÖRGETETT HORDALÉK-MINTAVÉTELEK

Mintavételi eljárás

A görgetett hordalék-mintavételeket szintén Gönyűn, a vízmérce szelvényében (1790,61 fkm.) végezte a mérőcsoport, összesen 32 alkalommal. Mivel a sarkantyúk közötti területen jellemzően igen alacsony vízmélységek állnak rendelkezésre, így a mérések helyét attól beljebb, 5 pontban határozták meg, melyek kiosztása az alábbi képen (3. ábra) látható.



3. ábra: A görgetett hordalékmérések mintavételi pontjai a szelvényben

A mintavétel során a mérőhajó a kijelölt pont felett lehorgonyoz, majd emelődaruval a fedélzetről a mederfenékre ereszt egy BfG típusú görgetett hordalékfogó eszközt (8. fénykép). Az eszköz a mederfenékre érve felfekszik arra, majd az áramlásra merőleges szájával csapdázza és begyűjti a görgetett hordalékot. A mintavevő tartálya szűrőlemezzel (lyukbősség 1 vagy 2 mm, cserélhető) van lezárva, annak érdekében, hogy a víz átáramolhasson rajta, de a nagy szemátmérőjű hordalék a tartályban maradjon. A mintavételi idő (900s) lejártá után a daru a fedélzetre emeli a mintavevőt, a személyzet pedig zsákba üríti a gyűjtött mintát, és ellátja a mérési pont nevének és időtartamának feliratával. Végül a hajó felvonja a horgonyt és átáll a következő mérési pontra.



8. fénykép: A mérések során használt BfG-típusú görgetett hordalékfogó eszköz

Miközben a hordalékfogó a fenéken tartózkodik, a hajóról állóhajós (függély-ment) mobil ADCP sebességmérést is végeznek, annak érdekében, hogy az adott pontban uralkodó áramlási viszonyokról képet kapjunk.

Újszerű megoldásként a mintavevőre nagy teljesítményű búvárlámpákkal kiegészített víz alatti kamerát is szereltek, mely a mintavevő szájára, illetve a közvetlenül előtte lévő területre irányul. A mintavételezés során a kamera képét (9. fénykép) a hajóról figyelték, annak megállapítására, hogy a mintavevő valóban felült-e a mederfenékre, hossz-tengelye párhuzamos-e az áramlási iránnyal, van-e hordalékmozgás, illetve pontosan mikor kezdődött a hordalékgyűjtés (mintázási időhossz pontosítása).



9. fénykép: Víz alatti kamera felvétele a görgetett hordalék beáramlásáról a mintavevő száján

A laboratóriumi elemzés és eredményei

A terepen gyűjtött mintákat laboratóriumba szállítottuk. Itt szárítókemencébe kerültek, ahol 105°C-on tömegállandóságig szárítottuk azokat.

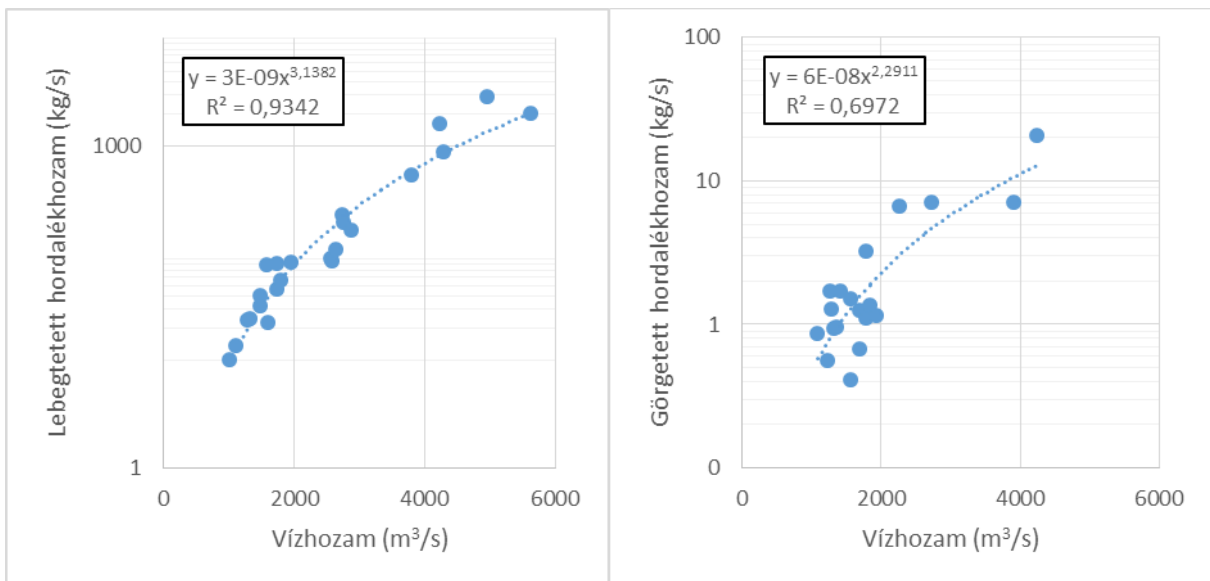
A minták ezután egyesével rázó szitasorba helyeztük, ahol a rázás hatására a hordalékszemcsék méret szerint csoportosulnak a különböző lyukbőségű szinteken. Az alkalmazott szita a következő szintekkel rendelkezett: 40 – 31.5 – 16 – 8 – 4 – 2 – 1 – 0.5 – 0.25 – 0.125 – 0.063 mm. 4-5 perces rázás után a különböző szinteken fennmaradt hordalék tömegét lemértük, majd pedig kiszámoltuk az áthullott tömegszázalékokat az egyes szitákra vonatkoztatva.

EREDMÉNYEK

Hordalékhozam összefüggések

A projektben végzett hordalékmérések alapján vízhozam-hordalékhozam kapcsolatok (4. ábra) váltak felállíthatóvá, melyek lehetőséget adtak a későbbiek során a hordalékvándorlás időbeli alakulásának feltárására is. A Duna esetében a lefedett víz- és hordalékhozam tartomány kellően szélesre adódott, ami nagymértékben hozzájárult egy megbízható kapcsolatok felállításához. A felállított kapcsolatok erőssége jellemzően jó (a kapcsolat erősségét jellemző mutató (R^2) értéke nagyobb, mint 0,80). A Rába győri állomására jellemző kapcsolat felállítása már csak az alvízi befolyásoltság miatt is kiegyenlítettebb vízjárási állapotok mellett történt.

A pontokra illesztett görbék alapján látható, hogy a vízhozam növekedésével a hordalékhozamok növekedése várható. Ugyanakkor a hordalékhozamok növekedésének mértéke csökken a vízhozam emelkedésével, vagyis az illesztett görbék fokozatos ellapulása figyelhető meg. A görgetett hordalékra vonatkozó ponthalmaz arra is felhívja a figyelmet, hogy nagyvízes időszakból hiányosak az ismereteink, ami nagyban megnehezíti a hordalékhozam alapú vizsgálatok megbízhatóságát. Az adathiány elsősorban annak köszönhető, hogy nagyvízi körülmények között a görgetett hordalékmérés kivitelezése óriási kihívást jelent.

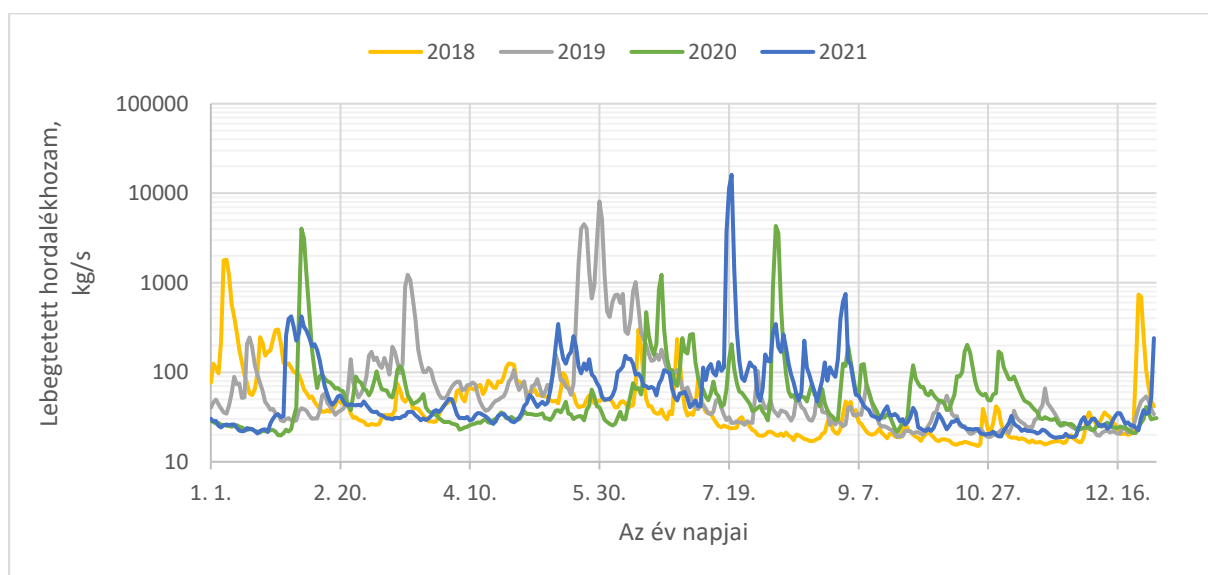


4. ábra: A Duna gönyői vízmérce szelvényében felállított lebegtetett (bal) és görgetett (jobb) hordalékhozam-görbék

A lebegtetett hordalékjárás elemzése

A hozamgörbék alapján előállítottuk a napi, havi, illetve éves lebegtetett hordalékhozamokat 2018 és 2021 között. A hordalékjárás időbeli alakulását illetően látható (5. ábra és

2. táblázat), hogy jellemzően a téli időszak végén, illetve a nyári időszakban érkezett a legtöbb lebegtetett hordalék – az év további részében a hordalékhozam egy alacsonyabb, közel állandó küszöbérték körül mozog. 2019-ben és 2021-ben valamivel több hordalék (átlagosan 178 és 158 kg/s) érkezett, mint 2018-ban és 2020-ban (67 és 112 kg/s átlagosan). Az éves maximum 2018-ban 1.8 t/s; 2019-ben 8.1 t/s; 2020-ban 4.3 t/s, míg 2021-ben 16.0 t/s volt. Összevetve az éves idősorokat, elmondható, hogy a 2021. júliusi árvíz során kiemelkedően nagy mennyiségű lebegtetett hordalék haladt át a vizsgált szelvényen. Ezzel szemben 2019 és 2020 során kiegyenlítettebb volt a lebegtetett hordalékjárás - ugyan eltérő tartományokban, de kisebb változatosságot mutatnak az idősorok. A 2018-as évben a téli időszakon kívül meglehetősen homogénen alakult a lebegtetett hordalékszállítás éves eloszlása.

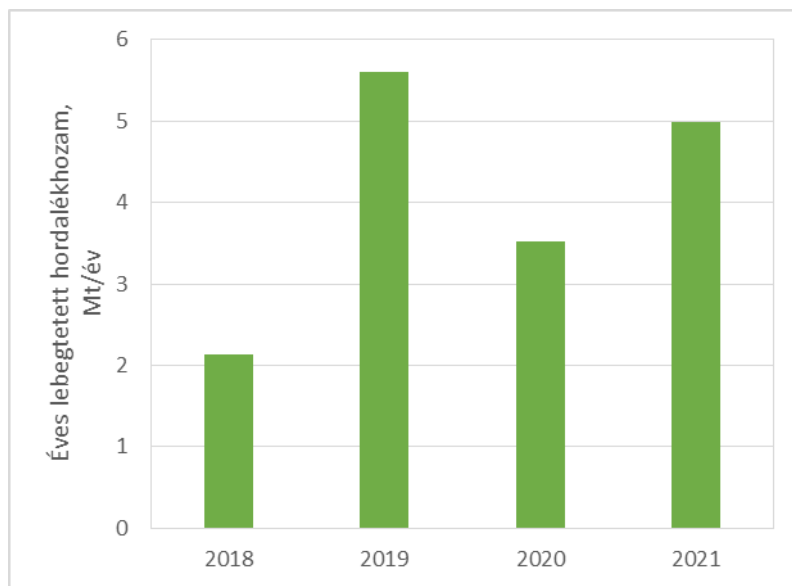


5. ábra: A napi lebegtetett hordalékhozamok alakulása a Duna gönyői vízmérce szelvényében 2018-2021 között

Lebegtetett hordalék szállítás, Mt/hónap				
Hónap	2018	2019	2020	2021
Január	0.85	0.18	0.06	0.12
Február	0.13	0.11	0.94	0.35
Március	0.10	0.63	0.16	0.09
Április	0.19	0.16	0.07	0.09
Május	0.15	2.60	0.10	0.29
Június	0.17	1.40	0.43	0.22
Július	0.10	0.11	0.25	3.03
Augusztus	0.05	0.10	0.93	0.33
Szeptember	0.07	0.08	0.17	0.26
Október	0.05	0.08	0.20	0.06
November	0.05	0.08	0.13	0.06
December	0.23	0.07	0.07	0.10

2. táblázat: Havi lebegtetett hordalékhozamok 2018-2021 között (kék: alacsony; piros: magas hozamok)

Összegezve a napi lebegtetett hordalékhozamokat, az éves teljes lebegtetett hordalékhozamok (6. ábra) a következőképp alakultak: 2018-ban 2.13 Mt/év; 2019-ben 5.60 Mt/év; 2020-ban 3.53 Mt/év; 2021-ben pedig 4.99 Mt/év lebegtetett hordalék vándorolt át a Duna gönyői vízmérce-szelvényében. A szárazabb 2018-as évben hosszabb kisvizes időszakok fordultak elő, melyek során arányaiban kevesebb lebegtetett hordalék érkezett. A további évek összességében hasonló képet mutatnak az év végén.

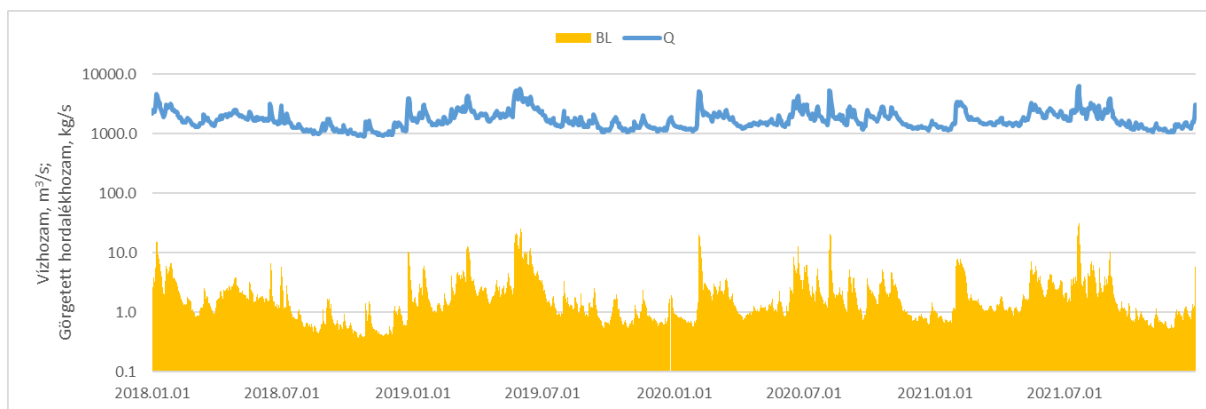


6. ábra: Az éves lebegtetett hordalékhozamok alakulása a Duna gönyői vízmérce szelvényében 2018-2021 között)

A görgetett hordalékjárás elemzése

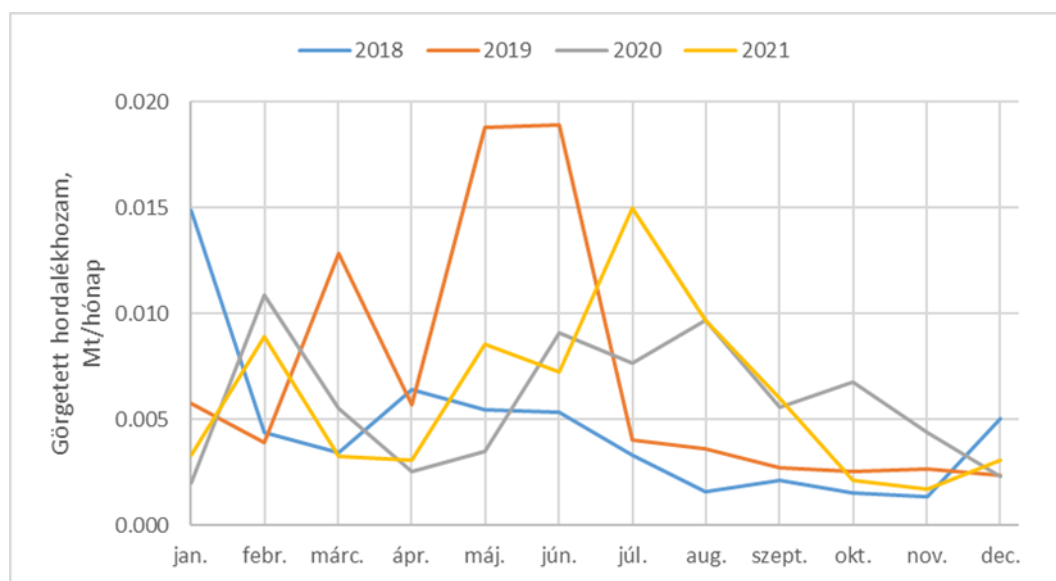
A görgetett hordalék-szállítás időbeli változása

A 7. ábrán a 2018-2021 közötti időszakban mért napi vízhozamidősről látható kék színnel, míg a sárga színezés a görgetett hordalékhozam-idősről mutatja. A napi hordalékhozam-idősről a napi vízhozamidősről függvényében, az illesztett vízhozam-görgetett hordalékhozam egyenlete segítségével számítottuk. Az ábra alapján belátható, hogy árhullámok érkezésével a hordalékhozam értéke akár egy nagyságrenddel is megnőhet az átlagos nagyságrendhez (10^0) képest.



7. ábra Vízhozam- (kék) és számított görgetett hordalékhozam-idősorok (sárga) a gönyői vízmérce szelvényében 2018-2021 között

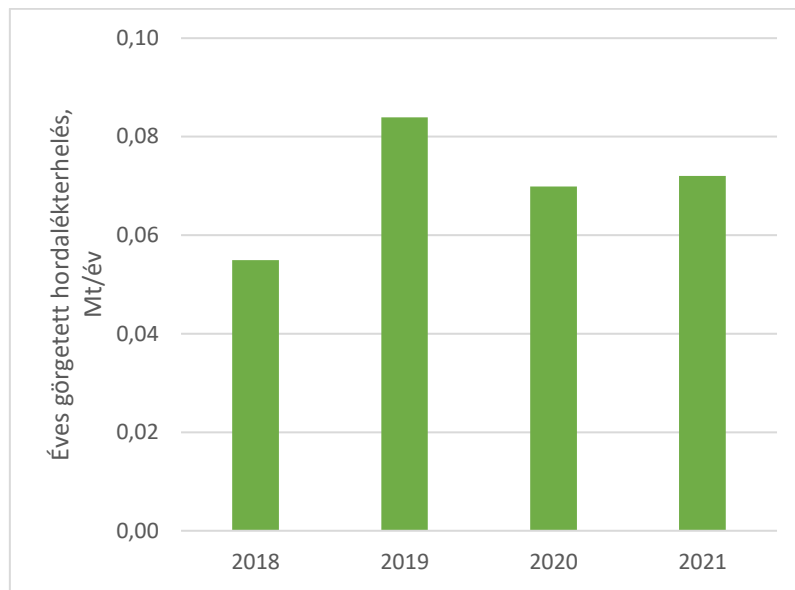
A 8. ábra a 2018-2021 évekre számított havi átlagos hordalékhozam-idősorokat mutatja. Az ábrák alapján látható, hogy akár egymást követő hónapok között is jelentős, akár nagyságrendbeli különbség is mutatkozhat, feltehetően a vízjárási állapot függvényében. Éves viszonylatban az a trend rajzolódik ki, hogy a minimum értékek az év végi hónapokra esnek.



8. ábra A havi átlagos görgetett hordalékhozam alakulása a gönyői vízmérce szelvényében 2018-2021 között

A számított napi hordalékhozam értékek átlagolásával becsülhető az éves átlagos hordalékterhelés, amit a 2018-2021 közötti időszak éveire vonatkozóan a 9. ábra mutat be. Feltehetően az egyes években jelentkező jelentősebb árhullámok száma határozza meg az átlagos éves terheléstől való eltérést. Az ábráról leolvasható, hogy a vizsgált időszakban 2019-ben történt a legnagyobb hordalékmozgás. Összevetve a lebegtetett hordalékhozamokkal (6. ábra), elmondható, hogy a vizsgált területen a görgetett hordalékterhelés a teljes hordalékterhelés mindössze 2%-át teszi ki, amely összhangban van a szakaszjellegre jellemző irodalmi értékekkel is. A legnagyobb arányt 2019-ben érte el (2.5

%), amikor az elnyúló kisvizes időszakokban lebegtetett hordalékban szegény víz érkezett fentről.



9. ábra Az éves görgetett hordalékterhelés alakulása a gönyői vízmérce szelvényében 2018-2021 között

KÖVETKEZTETÉSEK

A SEDDON II projekt keretében jelentős lépéseket tettünk a Duna hordalékjárásának pontosabb megismerése felé. A projekt magyar mintaterületén új, a korábbi, hagyományos hordalékmérési módszerekhez képes pontosabb és megbízhatóbb eljárásokat dolgoztunk ki, teszteltünk és építettük be a gyakorlatba. Ahhoz, hogy a legjobb mérési eljárásokat alkalmazzuk, nagyszámú helyszíni mintavételezést végeztünk és vizsgáltuk a fizikai vízmintavevő, akusztikus, lézeres és optikai lebegtetett hordalékmérési módszereket, majd összehasonlító elemzést hajtottunk végre azokon. A módszerek kiértékelése során bemutattuk azok előnyeit-hátrányait és javaslatot tettünk a gyakorlati alkalmazásukra. Kiterjedt méréssorozatot hajtottunk végre a folyó görgetett hordalékvándorlási viszonyainak feltárására is, amit egy új, kamerával felszerelt mintavevővel végeztünk. A magyar oldalon egy szintén újonnan fejlesztett, nagy pontosságú mederfelmérésre épülő módszerrel egészítettük ki a méréseinket.

A Duna magyar szakaszán hosszú ideje nem álltak rendelkezésre olyan hordalékhozam összefüggések, amelyeket a SEDDON II projektben felállítottunk. Mind a lebegtetett, mind a görgetett hordalékvándorlásra vízhozam-hordalékhozam függvényeket állítottunk elő, amelyek részletes mérésekre épülnek és a vízhozam tartomány kis- és középvízi tartományát jól lefedik, de fontos megjegyezni, hogy a nagyvízi vízjárási állapotok egyelőre alul reprezentáltak. Az elmúlt évekre (2018-2021) vonatkozó hordalékvándorlás számszerűsítésénél ez nem okozott problémát, mivel rendkívüli nagyvízi állapotok nem fordultak elő. A hordalékhozam összefüggések segítségével számszerű kimutatást végeztünk a jelzett időszakokra és bemutattuk a hordalékvándorlást napi, havi és éves bontásban is.

A projekt keretében üzembe állított hordalékmonitoring állomások a magyarországi Duna-szakaszon egészen újszerű mennyiségi és minőségi információt szolgáltatnak a folyó lebegtetett hordalékjárásáról, ami új elemként jelenik meg a teljes Dunát lefedő hordalékmonitoring hálózatban. A nagyléptékű hordalékmérleg kidolgozása az új állomásoknak köszönhetően sokkal pontosabbá válik, melynek révén például az osztrák és szlovák duzzasztott folyószakaszok, a Szigetköz, vagy éppen a Rába szerepét a dunai hordalékvándorlásban is pontosabban fogjuk ismerni és értékelni. Az új állomások által szolgáltatott adatok a jövőben hozzájárulnak folyórestaurációs és mellékág-revitalizációs tevékenységek megalapozásához, és támogatják a meglévő folyószabályozási művek (pl. Mosoni-Duna torkolati műtárgy) hordalékfolytonosság szempontú üzemeltetését is.

Irodalomjegyzék

Baranya S., Józsa J. (2010) ADCP alkalmazása lebegtetett hordalék-koncentráció becslésére. Hidrógiai Közlöny 90 (3) 17-22.

BMFLUW (2017) Schwebstoffe im Fließgewässer – Leitfaden zur Erfassung des Schwebstofftransports. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, 2. Auflage, Vienna, Austria. https://info.bmlrt.gv.at/dam/jcr:479ff2f0-b143-4560-a9a9-36c464c25125/Leitfaden_Schwebstoffmessung_2te-Auflage.pdf. (Utoljára megtekintve: 2023. 05. 03.)

DanubeSediment (2019) Analysis of Sediment Data Collected along the Danube. Approved project report. <http://www.interreg-danube.eu/approved-projects/danubesediment/outputs>. (Utoljára megtekintve: 2023. 05. 03.)

DanubeSediment (2020) Long-term Morphological Development of the Danube in Relation to the Sediment Balance. Approved project report. <http://www.interreg-danube.eu/approved-projects/danubesediment/outputs>. (Utoljára megtekintve: 2023. 05. 03.)

Pomázi F., Baranya S. (2020) Nagy folyók lebegtetett hordalékvándorlásának új vizsgálati módszerei 2. – Közvetlen és közvetett lebegtetett hordalékmérési eljárások összehasonlító vizsgálata. Hidrológiai Közlöny 100 (3) 64-73.

Pomázi, F., Baranya, S. (2022) Acoustic based assessment of cross-sectional concentration inhomogeneity at a suspended sediment monitoring station in a large river. Acta Geophysica, 70 (5) 2361-2377.