

Az Alsó-Dráva antropogén és természetes hatásokra bekövetkezett függőleges mederváltozásainak vizsgálata

Pomázi Flóra^{*,**}, Baranya Sándor^{*,**}, Ermilov Alexander Anatol^{*,**}, Török Gergely Tihamér^{**,***}, Horváth Gábor^{****}, Pál Irina^{****}

* Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Építőmérnöki Kar, Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszék (E-mail: pomazi.flora@emk.bme.hu)

** Víz tudományi és Vízbiztonsági Nemzeti Laboratórium, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Építőmérnöki Kar, Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszék

*** ELKH-BME Vízgazdálkodási Kutatócsoport, Eötvös Loránd Kutatási Hálózat, 1111 Budapest, Műegyetem rkp. 3.

**** Dél-dunántúli Vízügyi Igazgatóság, 7623 Pécs, Köztársaság tér 7.

DOI:10.59258/HK.10988



Kivonat

A Duna-vízgyűjtő magyarországi részének felülvizsgált, 2015. évi vízgyűjtő-gazdálkodási terve („VGT2”) alapján legtöbb folyónkon medermélyülés figyelhető meg, amely magával vonja a vízszintek süllyedését. A legjelentősebb medermélyülés a Dráva folyón tapasztalható (kb. 3–4 cm/év), amit a természetes mederváltozási folyamatok mellett különféle intenzív emberi beavatkozások (hagyományos folyószabályozási beavatkozások, vízlépcsők létesítése, intenzív folyami kotrás) váltottak ki. A folyó különböző hatásokra adott válaszait azonban meglehetősen nehéz elkülöníteni. Vizsgálataink során a morfológiai, illetve a kisvízszintekben bekövetkezett változások elemzésén keresztül tettünk becslést az egyes hatások arányára, felhasználva a rendelkezésre álló folyószabályozási, kotrási és hordalékmérési adatokat, valamint korábbi mederfelmérések eredményeit is. A 18. századi folyószabályozási beavatkozások előtt az Alsó-Dráva medre természetesnek volt mondható. Az azóta domináló antropogén hatások alapján három időszakot különíthetünk el a vizsgálataink során. Az első időszakban (a 18. sz. végétől 1974-ig) csak folyószabályozási beavatkozásokat végeztek a folyószakaszon, azonban hatásukra jelentős medermélyülés következett be (átlagosan 1,3 méter kb. 120 év alatt). A második időszakban (1975-től 2002/2011-ig) három horvát vízerőmű létesült a közvetlen felvízi szakaszon, valamint ezzel egyidejűleg jelentős folyami kavics-, illetve homokkitermelés ment végbe a vizsgált szakaszon. A vízlépcsők hatása a legközelebbi, őrtilosi szelvényben mutatkozott meg a legintenzívebben (a medersüllyedés elérte akár a 7,7 cm/év intenzitást is), míg folyami kotrást a teljes szakaszon végeztek, átlagosan 0,80 cm/év medermélyülést okozva. A harmadik időszakban (2003/2012 óta), vagyis a fő kiváltó okok megszűnése óta – az utóbbi évtized kisvízszintjei, valamint a mederfelmérések alapján – az Alsó-Dráva medrében szignifikáns függőleges irányú változások már nem igazolhatók. Fontos megjegyezni azonban, hogy ez a kotrási tevékenység megszűnése óta eltelt 10–20 éves időszak a trendelemzés szempontjából nem feltétlenül tekinthető reprezentatívnak.

Kulcsszavak

Alsó-Dráva, egyensúlyi állapot, medersüllyedés, trendelemzés.

Analysis of the vertical changes of the Lower Drava River morphology due to natural and anthropogenic impacts

Abstract

Based on the revised River Basin Management Plan („VGT2”) of the Hungarian part of the Danube River Basin, significant bed erosion can be observed in most Hungarian rivers. The incision has been the most intensive in case of the Drava River (approx. 3–4 cm/year), caused by natural and anthropogenic (river regulation interventions, dams and hydropower plants, sand and gravel mining). However, the effects of individual factors tend to overlap, making it difficult to distinguish the hydromorphological response of the river to them. An additional difficulty in identifying the impacts of bed incision is that little information is available to investigate the various factors. In the present study, the value of the incision was estimated based on the analysis of the available hydrological (water level time series), morphological (sediment data, bed surveys, river regulations) and dredging data. Before the 18th century, human interventions were not significant, and the morphology of the river was natural. Taking anthropogenic interventions as the triggering effect, the incision process of the Lower Drava riverbed can be divided into three periods. In the first period (from the end of the 18th century to 1974), only river regulation interventions took place, but their impact was significant (1,3 m deepening in ca. 120 years). In the second period (from 1975 to 2002/2011), three Croatian HPPs were built, and simultaneously, intensive sand and gravel extraction took place in the Lower Drava River. The effects of the HPPs was most intensive in the nearest station at Órtilos (the rate of incision exceeded 7,7 cm/year), while sand and gravel mining along the full reach caused ca. 0,80 cm/year incision. In the third period (from 2003/2012 to the present), based on the analysis of low water levels and bed surveys, it can be concluded that a new state of equilibrium appears to be formed almost at the entire section of the Lower Drava River after the cessation of anthropogenic effects. It is important to note that the 10–20-year period since the end of dredging is not necessarily considered representative for trend analysis.

Keywords

Lower Drava River, equilibrium state, incision, trend analysis.

BEVEZETÉS

A folyók morfológiai változásai bekövetkezhetnek természetes vagy mesterséges hatások következtében, amelyek az esés, vagy a víz- és hordalékhozam módosításán keresztül hatnak a meder morfológiájára. Schumm (1977) alapján medersüllyedés következik be, ha i) változatlan

vízjárás mellett csökken a hordalékhozam, ii) változatlan hordalékhozam mellett nő a vízhozam, iii) növekvő vízhozam mellett csökken a hordalékhozam – vagyis valamilyen módon a medersüllyedést megelőző állapothoz képest hordalékseggényé válik a víz. A folyók egyensúlyuk megzavarásakor természetes módon törekednek egy új

egyensúlyi állapot elérésére, melynek legegyszerűbb módja saját medrük esésének, illetve alakjának változtatása (Galay 1983, Surian és Rinaldi 2003, Nyiri és Török 2022). Lane (1955) általános összefüggése (1) alapján kvalitatív módon becsülhető egy folyó morfológiai változása. Egyensúlyi állapotban a hordalékhozam (Q_S), a mederanyag szemcsemérete (d), a vízhozam (Q_W), az esés (S) mint négy, egymástól független hidromorfológiai változó között felírható arányosság:

$$Q_S d \propto Q_W S \quad (1)$$

Amennyiben a vízhozamban, illetve a hordalékhozamban bekövetkező változás hatására megindul a medererozió folyamata (megjegyzés: a szövegben a medermélyülés, medersüllyedés és bevágódás fogalmakat, mint szinonimák használjuk), az új egyensúlyi állapot a mederanyag durvulásával, illetve a folyó alakjának változásával alakulhat ki.

A medersüllyedés okai

A medersüllyedés okai között egyaránt szerepelnek antropogén és természetes hatások is, melyek lehetnek közvetlenek és közvetettek is (Kiss 2014). Ezek a hatások azonban általában egymásra halmozódnak, így igen nehéz elkülöníteni a rájuk adott válaszokat (Galay 1983, Rumsby és Macklin 1994, Liébault és társai 2005). A közvetett természetes hatások (pl. klímaváltozás, tektonikai mozgások a vízgyűjtőn) leginkább a vízgyűjtő területet érintik és a lefolyás módosítása révén megváltoztatják a víz- és hordalékhozamot (Kondolf és társai 2002), amelyre a folyó morfológiai válasszal reagál. A közvetlen természetes hatások (pl. tektonikai mozgások a folyó hossz-szelvénye mentén, oldalirányú vándorlás) a mederesést és a meder morfológiáját alakítják (Galay 1983). A természetes hatásokra a folyó válasza jóval lassabb, mint az antropogén hatások esetében (Kiss 2014).

Az antropogén hatások lehetnek közvetlen, azonnali és közvetett, elhúzó hatásúak is. A lokális, közvetlen hatások közé tartoznak a folyószabályozási beavatkozások (pl. kanyarulat-átvágások és sarkantyúk), a folyami kotrás (folyószabályozási célú mederkotrás, illetve ipari homok- és kavicskitermelés), valamint a vízlépcsők építése. A folyószabályozási művek jellemzően a mederesés növelésén, illetve a meder szűkítésén keresztül okozzák a meder süllyedését, míg a kotrás és a vízlépcsők létesítése esetében a hordaléktranszportban keletkező hiány pótlására következik be a meder eroziója. Az antropogén hatások közé sorolt területhasználat azonban szintén egy nagyobb területet, teljes vízgyűjtőt érintő, közvetlen hatású, amely a lefolyási viszonyok módosításán keresztül hat a folyó mechanizmusaira (Gregory 2006). Ezekre a közvetlen hatásokra a folyó válasza is elhúzó jellegű.

Medersüllyedési folyamatok a hazai folyókon

Legtöbb folyókon medermélyülés figyelhető meg (pl. Duna (SOLVEX-BME 2014a-d); Tisza (Fiala és társai 2006); Maros (Kiss és Nagy 2012)). A Kárpát-medence tektonikai mozgásainak következtében az Alföld és a Kis-Alföld folyamatosan süllyed, magával vonva a síksági folyók medrének süllyedését is. A kiemelkedő területeken (pl. Dunántúli-középhegység) a teraszképződés mellett

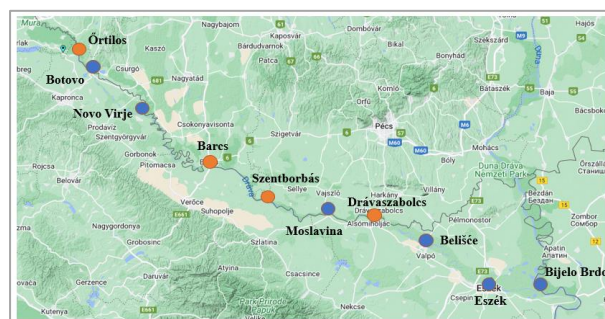
szintén a folyók bevágódása jellemző. Az emberi beavatkozások tovább növelték a medermélyülési folyamatok intenzitását. A jelentős folyószabályozási beavatkozások hatására megnövekedett a folyók munkavégző képessége, a vízlépcsők (hazai és határon túli, felvízi) azonban nagymértékben csökkentették az egyes folyókon felülről érkező hordalék mennyiségét. A Duna és a Tisza süllyedése hosszú távon a mellékfolyóik fokozódó mélyülését is magával vonja (az erózióbázis süllyedése miatt), a Dunán és a Dráván pedig a mederkotrás is nagymértékben hozzájárult a medersüllyedéshez.

A Duna-vízgyűjtő magyarországi részének felülvizsgált, 2015. évi vízgyűjtő-gazdálkodási terve („VGT2”) alapján a következő víztesteken jelentős a medermélyülés: a Dráva teljes magyar szakasza (kb. 3-4 cm/év), a Duna Szob fölötti, illetve Dunaföldvár alatti szakasza (kb. 1 cm/év), a Maros keleti és torkolati szakasza, a Mosoni-Duna alsó, torkolati szakasza, a Rába torkolati szakasza, a Sebes-Körös felső szakasza és a Tisza Kiskörétől a Hármas-Körösig tartó része. A medermélyülés összesen kb. 670 km hazai folyószakaszt érint (OVF 2015).

MÓDSZERTAN

A vizsgált terület

Tanulmányunkban a Dráva Órtilostól a torkolatig tartó (236-0 fkm), alsó szakaszán bekövetkezett vertikális mederváltozásokat vizsgáltuk a rendelkezésre álló kisvízszint-idősorok trendelemzésén, valamint medertérképek összehasonlításán keresztül. Az 1. ábrán látható a vizsgált terület átnézeti térképe, jelölve azon vízmerce állomásokat, melyek idősorait fel tudtuk használni a trendelemzés során.



1. ábra. A vizsgált terület átnézeti térképe (narancs színnel jelölve a magyar, kékekkel a horvát vízmerce szelvényeket)
Figure 1. Case study area (Hungarian gauge stations marked by orange, Croatians marked by blue)

Morfológiai mérések

A Dráva magyar szakaszán 1969-től folytatnak rendszeres hordalékméréseket a folyó barcsi (154,10 fkm) és dravasabolcsi (77,70 fkm) szelvényeiben, noha 1983-1988 között szüneteltek a mérések. A Dráva hordalékvándorlásának monitoringja 1989-ben folytatódott – ekkor új állomásként megjelent Vízvár (187,59 fkm), ahol 7-10 éves rendszerességgel végeznek mintázást, 2016-ban pedig Botovot (226,80 fkm) is bekapcsolták a monitoring rendszerbe. A hazai gyakorlatban a lebegtetett hordalékméréseket szivattyús eljárással, a görgetett hordalékméréseket pedig a szemösszetételtől függően az ún. Károlyi-féle vagy a Helley-Smith féle mintavevővel végzik. A rendszeres hordalékmérések alapján hordalékhozam ösz-

szeffüggéseket állítottak fel a folyó fenti szelvényeire (VITUKI 2003, EJF 2012). Ezeket a kapcsolatokat a Dél-dunántúli Vízügyi Igazgatóság (DDVIZIG) által azóta végzett hordalékmérések, valamint a 2019-ben végzett saját hordalékméréseink eredményeit felhasználva frissítettük. A hordalékadatok alapján vizsgáltuk a Dráva éves hordalékszállításának hosszú idejű alakulását, illetve becslést tettünk a vertikális mederváltozás mértékére is.

Lebegtetett hordalékmérés

A lebegtetett hordalékmérések alkalmával a mintavétel szivattyús mintavevővel, az ún. többpontos módszer alapján megválasztott mintavételi pontokban történt (a kereszt-szelvény menti megoszlás minél pontosabb leképezése érdekében) (ME-10-231-20:2009). A nedvesített szelvény szélességét 5 részre kell osztani, a mérésre kijelölt függőleges szakaszok középpontjában kell kijelölni. A mérések során 5 függvényben, függvényenként 3-3 pontban történt mintavétel. A többpontos módszer alkalmazásához a rögzített hajós (függvény menti) méréseket a vízmélység (H) meghatározásával kell kezdeni. A vízmélység ismeretében a mintavételi pontok vízfelszíntől való távolsága az alábbiak alapján számítható: 0,2H; 0,6H; 0,8H. A szelvény menti hordalékhozam számításához ismerni kell a függvény menti sebességprofil, ezért a lebegtetett hordalékmérés minden esetben függvény menti áramlásméréssel egészül ki.

A szivattyús mintavevők általában egy elsüllyeszthető hordozóegységből (bemeneti nyílással, vízsebességmérővel és mélységmérővel ellátva), egy a hajóra szerelt szivattyúból és egy, az előbbi két részt összekötő flexibilis tömlőből állnak. A szívócsövet 25 kg-os szabvány mérőszállal lehet a kívánt mélységbe juttatni. A szivattyús mintavevő pontbeli (diszkrét) mintavételezésre alkalmas. A mintavétel szokásos eszközei a következők: a mérőcsónakon elhelyezett szivattyú, a szivattyúhoz csatlakozó tömlő, a szívócső és a súly, ami biztosítja a szívócső helyzetének egyszerű meghatározását. A mintavételt olyan szivattyú fordulatszám, illetve hozam mellett kell végezni, hogy a mintavevő csónakon belépő víz sebessége a folyó becsült, pontbeli áramlási sebességétől ne térjen el jelentős mértékben. Az áramlás és a hordalékszállítás időben lüktető jellegéből adódó ingadozások kiegyenlítése érdekében, illetve azért, hogy a minták laboratóriumi elemzéséhez szükséges térfogat is rendelkezésre álljon, viszonylag hosszú idejű a mintavétel, a mintavételi térfogat 5 liter egy mérési pontban.

A hordaléktöménység meghatározása a hagyományos filtrációs (vagy szűrőpapíros) módszerrel történt. Az elemzés során a mérőhenger segítségével, ml pontossággal meghatározott térfogatú mintát egy ismert tömegű, 0,45 µm pórusméretű membránszűrőn szűrtük keresztül. A szűrés után a szűrőpapírt a lebegtetett hordalékkal együtt 105 °C-on tömegállandóságig szárítottuk, majd újból lemértük a tömegét. Az átszűrt hordalékos vízminta térfogatának, valamint a szűrőpapír szűrés előtti és utáni tömegének ismeretében számítható a hordaléktöménység. A szelvény menti lebegtetett hordalékhozam a többpontos mintavételi módszerrel (BMFLUW 2017) vett minták szűrőpapíros elemzéséből kapott hordaléktöménység és a

mintavételi pontokban vett áramlási sebesség alapján becsülhető. Az összetartozó áramlási sebesség és hordaléktöménység szorzata a pont környezetére jellemző fajlagos hordalékhozamot adja [g/(s·m²)]. A szorzat teljes szelvényre vett integrálásával (2) a teljes hordalékhozam számítható (kg/s). Mivel a fajlagos hordalékhozam értékek diszkrét pontokban ismertek, az integrálási művelet háromszögek, téglalapok és trapézok területeinek összegzésékként számítható.

$$Q_s = \int_W \int_a^h SSC(z)v(z)dzdw \quad (2)$$

ahol: W a mederszélesség; h a vízmélység; a az ún. referenciaszint (jellemzően a vízmélység 10%-a); SSC a lebegtetett hordaléktöménység; z a mintavételi pont mederfenéktől vett távolsága; v az áramlási sebesség.

Görgetett hordalékmérés

Mivel a görgetett hordalék mennyisége térben és időben nagymértékben változhat, mérése nagy kihívás elé állítja a mérnököket és jelenleg is kutatások témáját képezi. A gyakorlatban nincs olyan hordalék mintavételi módszer, aminek segítségével általánosan, nagy pontossággal meghatározható lenne a hordalék tömegárama. A mérési bizonytalanságot tovább növelik a mederfenékre helyezett műszerek körül megváltozott áramlási viszonyok, a műszer mederfenékre való felfekvése, a műszer rögzítése stb. A mintavevők részei általában: nehéz keret (a műszer mérülését és mederfenékre való felfekvést biztosítandó), szárnyak (a mintavevő áramlási iránnyal szemben való elhelyezését segítő), a mintavevő belépő nyílása és hordalékgyűjtő zsák. Az eszköz a vizsgált folyóra jellemző hordalék szemmagyságtól és hozamától függően különböző belépő nyílásmérettel rendelkezik, továbbá a hordalékgyűjtő zsák szöveteinek sűrűsége is változtatható. A Dráván végzett görgetett hordalékmérések során a mintavevőkön Rákóczi és Szekeres (2003) nyomán víz alatti kamerákat is rögzítenek a DDVIZIG munkatársai, amellyel pontosabb mérés végezhető. A kavicsmedrű szakaszon (Barcs fölött) a Károlyi-féle, a finom kavics-homokmedrű szakaszon (Barcs alatt) a Helley-Smith mintavevőt alkalmaztuk. A mintavételek helyei megegyeztek a lebegtetett hordalékmérés függőveivel.

A mintavételezés után a görgetett hordalék minták a laboratóriumba kerültek elszállításra. Kicsomagolás után a mintákat a szárítókamencében 105 °C-on kiszárítottuk. Ezután a minták a szitarázógépbe kerültek, majd az egyes frakciók tömegének meghatározása után a minták szemeloszlás görbéit is előállítottuk. A görgetett hordalékhozam egy adott szelvényen egységnyi idő alatt átáramló görgetett hordalék mennyiségét fejezi ki, amit a minták tömegének meghatározásával lehet becsülni. Ehhez első lépésben a mintavételi pontok függőveire kell meghatározni a fajlagos hordalékhozamot, a minták tömegének és a mintavételi idő hányadosaként. Ezután a szelvény teljes hordalékhozamának grafikus megjelenítése már megtehető: a szelvény adott függőveire számított fajlagos hozamokat kell ábrázolni. A pontokat összekötve kapjuk a szelvény menti fajlagos görgetett hordalékhozam eloszlását. A teljes hordalékhozam a görbe szelvény menti integrálásával,

azaz a görbe alatti terület számításával becsülhető (kg/s). Az egyes minták tömegét el kell osztani a mintavételi idővel. Az így kapott értékeket tovább kell osztani az alkalmazott mintavevő szájának szélességével, hogy megkapjuk a fajlagos görgetett hordalékhozamokat (kg/s·m). Ezt minden függvényben meg kell tenni. A szelvény menti hordalékhozam a fenti fajlagos értékeket összekötő görbe integrálásával, vagyis a görbe alatti terület számításával becsülhető. A part menti pontokban feltételezhető, hogy nincs görgetett hordalékszállítás, így ott a profil zérusba köthető.

Mederfelmérések

A morfológiai változások pontosabb feltárására felhasználtuk az 1971-es Dráva Atlaszt (VITUKI 1971), illetve a 2006-os és 2018-as mederfelmérések eredményeit is. A 2019. évi mérési kampányaink során a domborzati adatbázist további domborzati mérésekkel egészítettük ki a hordalékmérési szelvényekben, melyek során a vízhozammérésre alkalmazott ADCP (akusztikus Doppler-elvű áramlásmérő) műszerből nyertük ki a meder adatokat. A digitális térképállományok összehasonlítása alapján a szignifikáns (a mérési felbontásnál nagyobb mértékű) vertikális mederváltozások helyszíneit igyekeztünk beazonosítani.

A keresztshelvények alakjának vizsgálatával két célunk volt. Egyfelől igazolni akartuk, hogy a korábbiakban, a kisvízszintek alakulásából a medermélyülésre levonható következtetések helytállóak, vagyis azok a tendenciák, amiket ismertetünk a vízszint elemzés alapján, a mederalak mélyülésében tetten érhetőek, legalábbis azokban az „időpillanatokban”, amikre a felmérések vonatkoznak. A másik célunk az volt, hogy olyan szakaszokon, ahol hosszú idejű vízszint idősorok nem állnak rendelkezésre, mert pl. egyszerűen nincsenek az adott szakaszon vízrajzi állomások, valamilyen, legalább kvalitatív jellemzést adhassunk a mederváltozásra.

Az Alsó-Dráva kisvízszintjeinek trendelemzése

A Dráva alsó, Őrtilostól torkolatig tartó szakaszán összesen 14 vízmérce található (1. táblázat), melyek közül 10 állomás vízállás-idősorát használtuk fel az elemzéshez. Az éves kisvízszint-idősorok előállítására a DDVIZIG állomásokra a napi adatsorok, a Horvát Hidrometeorológiai Szolgálat (DHMZ) állomásokra pedig a 2020-ig archivált éves adatsorok (napi átlag) alapján történt.

1. táblázat. Az Alsó-Dráva menti vízmércék adatai (szürkével a fel nem használt idősorok)
Table 1. List of water gauges along the Lower Drava River (gauges in grey were excluded from the analysis)

Vízmérce	Helye (fkm)	Nullpont (mBf)	Idősor	Üzemeltető
Őrtilos	235,90	125,94	1957-	DDVIZIG
Botovo	226,80	120,88	1926-2020	DHMZ
Novo Virje	200,60	108,19	1977-2020	DHMZ
Vízvár-He-resznye	187,59	101,195	2012-	DDVIZIG
Barcs	154,10	98,14	1901-	DDVIZIG
Terezino Polje	152,30	100,00	1925-2020	DHMZ
Szentborbás	133,10	94,74	1934-	DDVIZIG
Vrbovka	127,00	92,54	1997-2019	DHMZ
Moslavina	98,40	90,27	1968-2019	DHMZ
Donji Miholjac	80,50	87,90	1993-2020	DHMZ
Drávaszabolcs	77,70	86,76	1959-	DDVIZIG
Belišće	53,80	83,32	1962-2020	DHMZ
Eszék	18,96	80,81	1900-1912; 1920-2020	DHMZ
Bijelo Brdo	1,00	77,65	1964-1990; 2001-2013	DHMZ

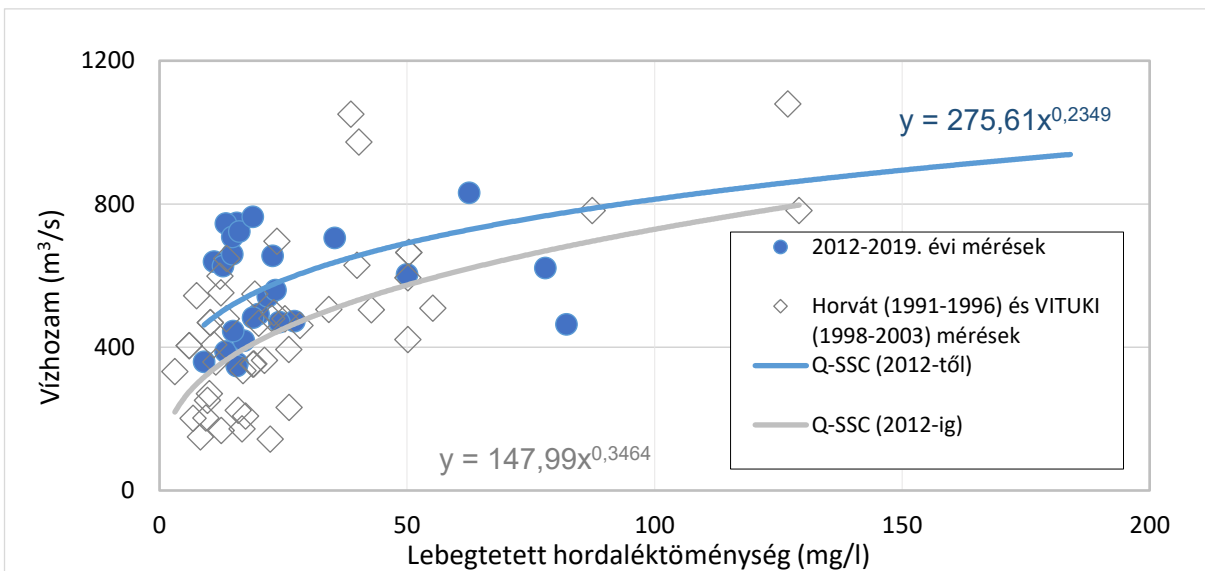
EREDMÉNYEK

A hordalékvándorlás alakulása

Lebegtetett hordalékvándorlás

A DDVIZIG átadta a 2012-2018 közötti időszakban végzett mérésekből kapott összetartozó vízhozam-hordaléktöménység adatait, amelyeket a 2019-ben kapott eredményekkel egészítettünk ki. Az így előállt, 2012-től figyelembe vett időszakra új kapcsolatokat tudunk felállítani a fenti két paraméter között Botovo, Barcs és

Drávaszabolcs állomásokra. A Dráva botovoi szelvényében a friss adatok a kapcsolati görbe balra való eltolódását (2. ábra) jelzik, ami azt jelenti, hogy adott vízhozamhoz a 2012 előtti időszakhoz (EJF 2012) képest általában kisebb hordaléktöménység tartozik. A legnagyobb eltérés a kis-középvizes tartományon (200-450 m³/s) jelentkezik, nagyvíznél már a görbék közelebb esnek egymáshoz, jöllehet, kevés nagyvízi mérési eredmény áll rendelkezésünkre.



2. ábra. A vízhozam (Q) és lebegtetett hordaléktöménység (SSC) között felállított kapcsolati görbe eltolódása Botovonál
Figure 2. Shift of the regression curve between flow discharge (Q) and suspended sediment concentration (SSC) at Botovo

A Dráva éves lebegtetett hordalékhozama jelenleg 0,5-2,5 Mt/év között ingadozik (BME 2019). A vizsgált szakaszon a lebegtetett hordalékhozam mennyiségére nagy hatással vannak a horvát vízlépcsők (különösen a Donja Dubrava-i), ahol a tározótérben a hordalék egy jelentős része kiülepedik (VITUKI 2003). A lebegtetett hordalékszállításban bekövetkezett változások külön kiemelkednek az éves hordalékhozam-összegző görbéen (Bonacci és Oskoruš 2010), ahol erőteljes esésváltozások észlelhetők az egyes erőművek üzembe helyezése után (pl. a Donja Dubrava-i vízlépcső üzembe helyezése után 2003-ig átlagosan 100 000 t/év-vel csökkent a lebegtetett hordalékszállítás; VITUKI 2003). Közvetlenül az egyes erőművek működésének megkezdése után a hordalékhozam fokozatosan csökken, majd fokozatosan nő (Bonacci és Oskoruš 2010). Miután a folyó kialakítja az új egyensúlyi állapotát, erodálja a medrét és a partokat és a hordalékhozam egyensúlya is bekövetkezik, ami az enyhe, vagy a változások előttivel közel azonos esésekből sejtethető. Ezzel összhangban a botovoi szelvényben ugyanakkora vízhozamok mellett a lebegtetett hordalékhozam csökkenése figyelhető meg, míg a távolabbi mérőszelvényekben (Barcs, Drávaszabolcs) ezzel szemben alig változott a két paraméter között korábban felállított összefüggés (EJF 2012), ami a hordalékvándorlás szempontjából egy dinamikus egyensúlyi állapotra utal.

Görgetett hordalékvándorlás

A görgetett hordalék adatokat illetően szintén a korábban felállított kapcsolatokkal (EJF 2012) vetettük össze. A botovoi, bélavári és drávaszabolcsi szelvények esetében az tapasztalható, hogy a 2019-es évi hozamok továbbra is jól követik a korábban felállított kapcsolatot. A barcsi szelvény esetében viszont a 400 m³/s vízhozam feletti tartományban az ezredforduló után megnőtt a görgetett hordalék mennyisége, így korrekcióra szorult a korábbi összefüggés.

A vízlépcsők hatására a felülről érkező, nagyrészt kavicsos anyagú görgetett hordalék gyakorlatilag teljes egészében csapdázódik a tározóterekben, miáltal az alvízre

egy nagy energiájú, hordalékszegény víz jut tovább. A hordalékszállító kapacitásban keletkezett deficit pótlására a folyó a gát alatt saját medrét, illetve partjait kezdi kimosni, bevágódási folyamatot indítva el, amely mindaddig tart, amíg az új egyensúlyi folyamat be nem áll (pl. mederpáncélozódás útján). A horvát vízlépcsők görgetett hordalékszállításra kifejtett hatása az Órtilos-Botovo térségben a legerőteljesebb. A folyó megnövekedett energiataralmának következtében a vízerőművek alatt a korábbinál nagyobb frakciók is megindulnak a mederfenéken. A kimosódott hordalék a vízlépcsőtől távolabb, fokozatosan rakódik le – egyes tanulmányok (EJF 2012) szerint a barcsi szakaszon. A kimosódott hordalék helyén keletkezett mederpáncélt Botovonál kb. 20 mm szemátmérőjű kavics alkotja, amelynek felszakításához egy legalább 700 m³/s nagyságú árhullám szükséges (VITUKI 2003).

Kisvízszintek változása

A kisvízi vízszintek alakulásának vizsgálata az antropogén hatásoknak megfelelően több időszakra bontva történt: a horvát vízlépcsők (Varaždin, Čakovec és Donja Dubrava) megépítését megelőző, 1975 előtti I. időszakban csak folyószabályozási beavatkozásokat végeztek; a II. időszakban már a vízlépcsők és a folyami mederkozás hatásai az elsődlegesek; míg az utóbbi 10-20 évre már az antropogén hatások alig mutathatók ki (III. időszak).

A vízszint-idősorok (4-6. ábra) alapján kijelenthető, hogy a 20. század eleje óta folyamatosan csökkentek a kisvízi vízszintek, kb. 0,40-3,40 cm/év (átlagosan 1,80 cm/év) ütemben. A Barcs fölötti, természetesebb állapotú szakaszon csak néhány folyószabályozási beavatkozást (főként az érett- és túlfellett kanyarulatok átmetszését) végeztek, így az 1975 előtti időszakban csak enyhe, átlagosan 0,50 cm/év csökkenés következett be. A horvát vízlépcsők (kiváltképp a Donja Dubrava-i) hatása azonban 1975-től jelentősen megnyilvánult a kisvízi vízszintekben – 1975 és 2000 között 20-200 cm-rel (átlagosan 84 cm-rel) szálltak alá a kisvízszintek. Órtilosnál (4. ábra) a Donja Dubrava-i erőmű üzembe helyezését követően 1989 és

2000 között közel 140 cm-rel csökkent a kisvízszint. A botovói és a Novo Virje-i idősorokban (4. ábra) felismerhető a kanyarulat-átvágások hatására 1980-ban, illetve 1982-ben bekövetkezett vízszintcsökkenés is. A rendelkezésre álló kotrási adatok ismeretében 1982 és 2011 között nagymértékű, ipari célú kavicskotrás gyorsította tovább a medermélyülést, és így a vízszintek csökkenésének folyamatát.

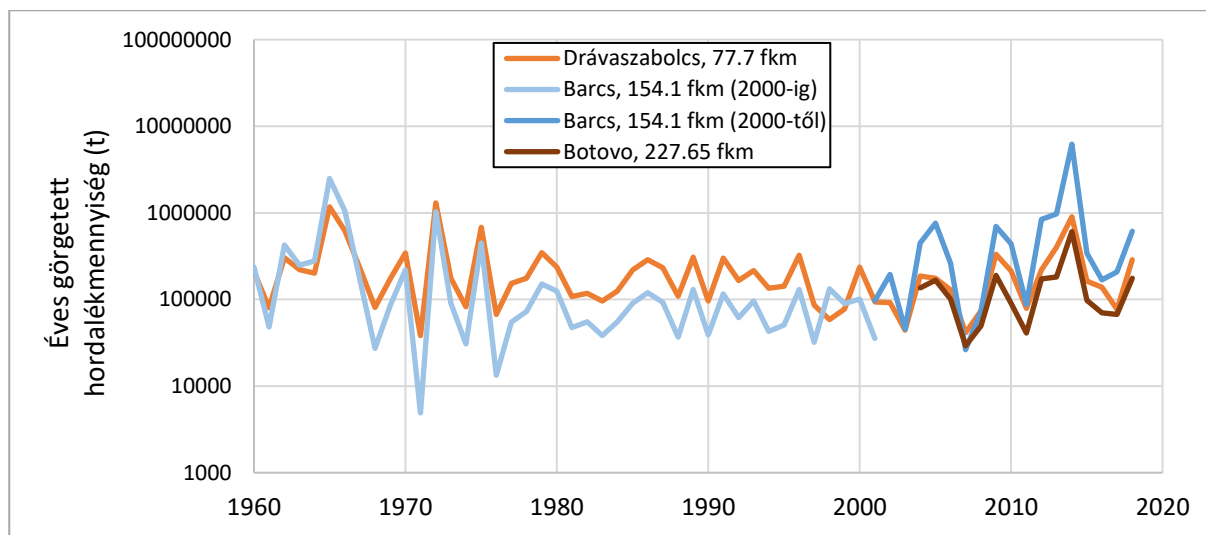
A Barcs alatti, intenzíven szabályozott szakaszon 1975 előtt gyorsabb ütemben (átlagosan 2,08 cm/év) csökkentek a vízszintek (5. ábra) például a barcsi vízmércén 1901-től rögzített kisvízi vízállások alakulása látható. Ezen az alsó szakaszon még az 1980-as években is több folyószabályozási beavatkozást végeztek, amely Barcs és Drávaszabolcs között időközben jelentős homokkotrási tevékenységgel is kiegészült, tovább erősítve a vízszintek csökkenését (a szakaszon átlagosan 2,17 cm/év). 1975 és 2002 között az antropogén tényezők együttes hatására mintegy 40-120 cm-rel (átlagosan 83 cm) csökkentek a kisvízi vízszintek. Drávaszabolcs alatt, a torkolati szakaszon már nagymértékben megmutatkozik a Duna hatása, a vízszintek dinamikus alakulását döntően befolyásolja (6. ábra).

A kisvízi vízszintek alakulása alapján elmondható, hogy – a 2014-es nedves év kiugró értékétől eltekintve – a vízszintek állandósulni látszanak, mely arra enged következtetni, hogy a kotrások megszűnése óta ki tudott alakulni egy új egyensúlyi állapot. Azonban fontos megjegyezni, hogy rövid idejű adatsorokról (utóbbi 10-20 év) van szó, amelyek nem feltétlenül tekinthetők reprezentatívnak és mindenképpen arra hívják fel a figyelmet, hogy folyamatos, további vizsgálatok szükségesek annak igazolására, hogy a Dráva medre közelít egy új egyensúlyi állapothoz.

A medermélyülésnek kitett szelvények beazonosítása

Órtilos környezetében ugyan lokálisan, de egészen 2018-ig megfigyelhető a meder jelentős mélyülése (7. ábra; 151 és 149 VO szelvények). Ezen a szakaszon a Mura-torkolat dinamikus alakulása számottevően kihat a Dráva alakjára, továbbá ez a szelvény helyezkedik el legközelebb az utolsó horvát vízlépcsőhöz, így annak hatása is itt érződik a legintenzívebben. A mederszintek változása ezen a szakaszon az egyes mérési időszakok között néhol méteres nagyságrendű, de ez összhangban van a korábban bemutatott kisvízszint változás értékekkel.

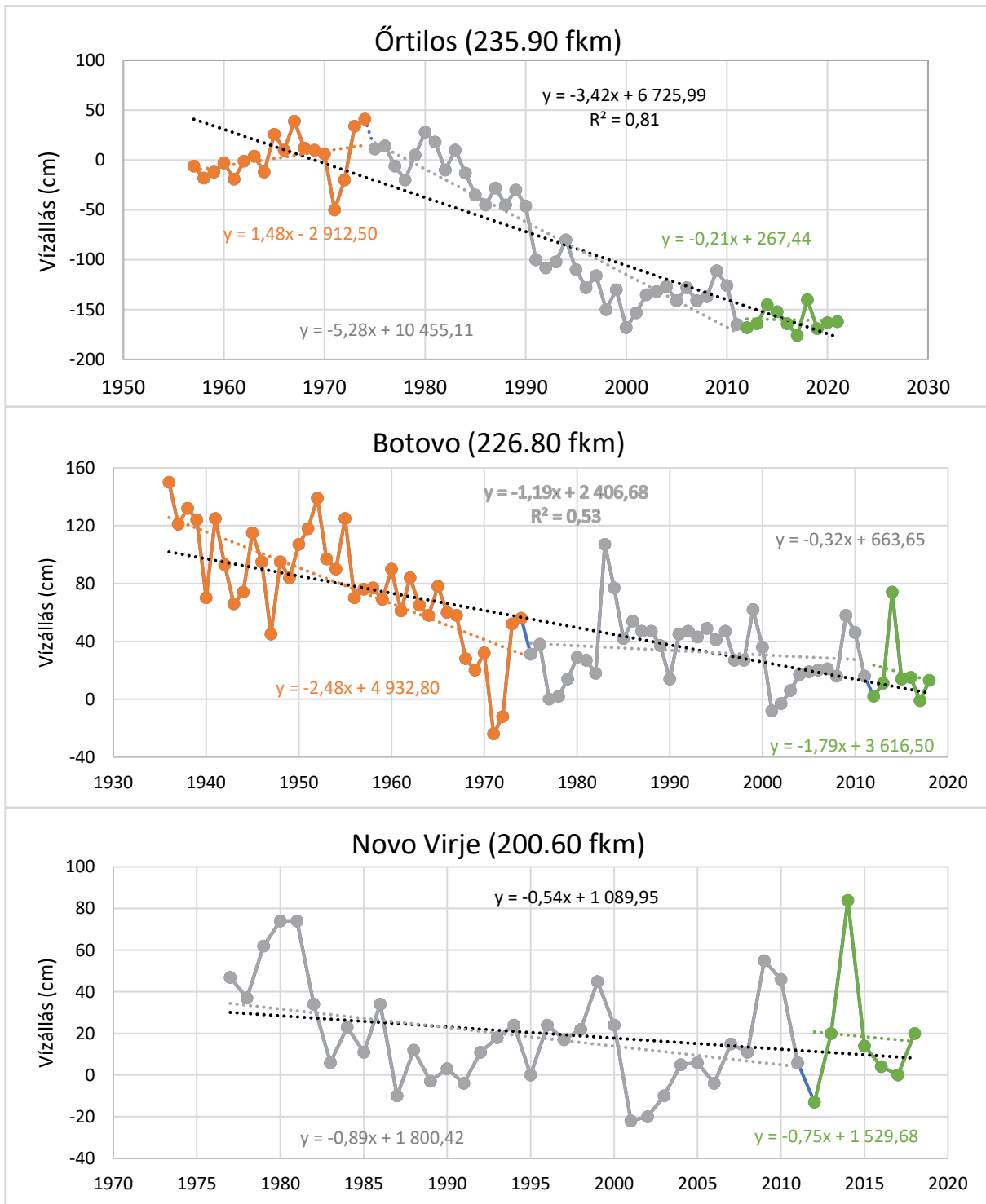
Alvízi irányban Barcsig egészen hasonló viselkedést mutat a keresztiselvény változása: 1971-2006 között egy-egy kivétellel rendre méteres nagyságrendű mélyülés, majd 2006-2018 között stabil mederalak inkább lokális, akár szelvényen belüli átrendeződéssel (8. ábra; 118 és 112 VO szelvények). Barcs környezetében (8. ábra; 109 és 102 VO szelvények) ezzel szemben az elmúlt 15 éves időszakban is további medermélyülés jelentkezett, ami a vízszint adatsorokon már nem látható egyértelműen. Ez a jelenség arra enged következtetni, hogy a korábbi mederkotrások eredményeként kialakuló és bizonyos ideig fennmaradó medereróziós folyamatok mentek végbe, ami a kotrási területek hordalékcspadázó hatásával magyarázható. Drávaszabolcs felé haladva a keresztiselvények dinamikus változó jelleget mutatnak. Mint a Dráva teljes vizsgált szakaszán, itt is szembetűnő az 1971 óta bekövetkezett méteres nagyságrendű medermélyülés, viszont a rákövetkező vizsgált időszakban, 2006-2018 között már sokkal inkább a lokális átrendeződés figyelhető meg és szemben a Szentborbás környezetében tapasztalt stabil mederalakkal, itt a meder keresztirányú mozgása mutatható ki (8. ábra; 86 és 81 VO szelvények).



3. ábra. Az éves görgetett hordalékmenyiség alakulása Barcsnál 1960-2000 között (világoskék) és 2000 után (sötétkék), illetve Drávaszabolcsnál (narancs) 1960-2018, illetve Botovonál (barna) 2004-2018 között

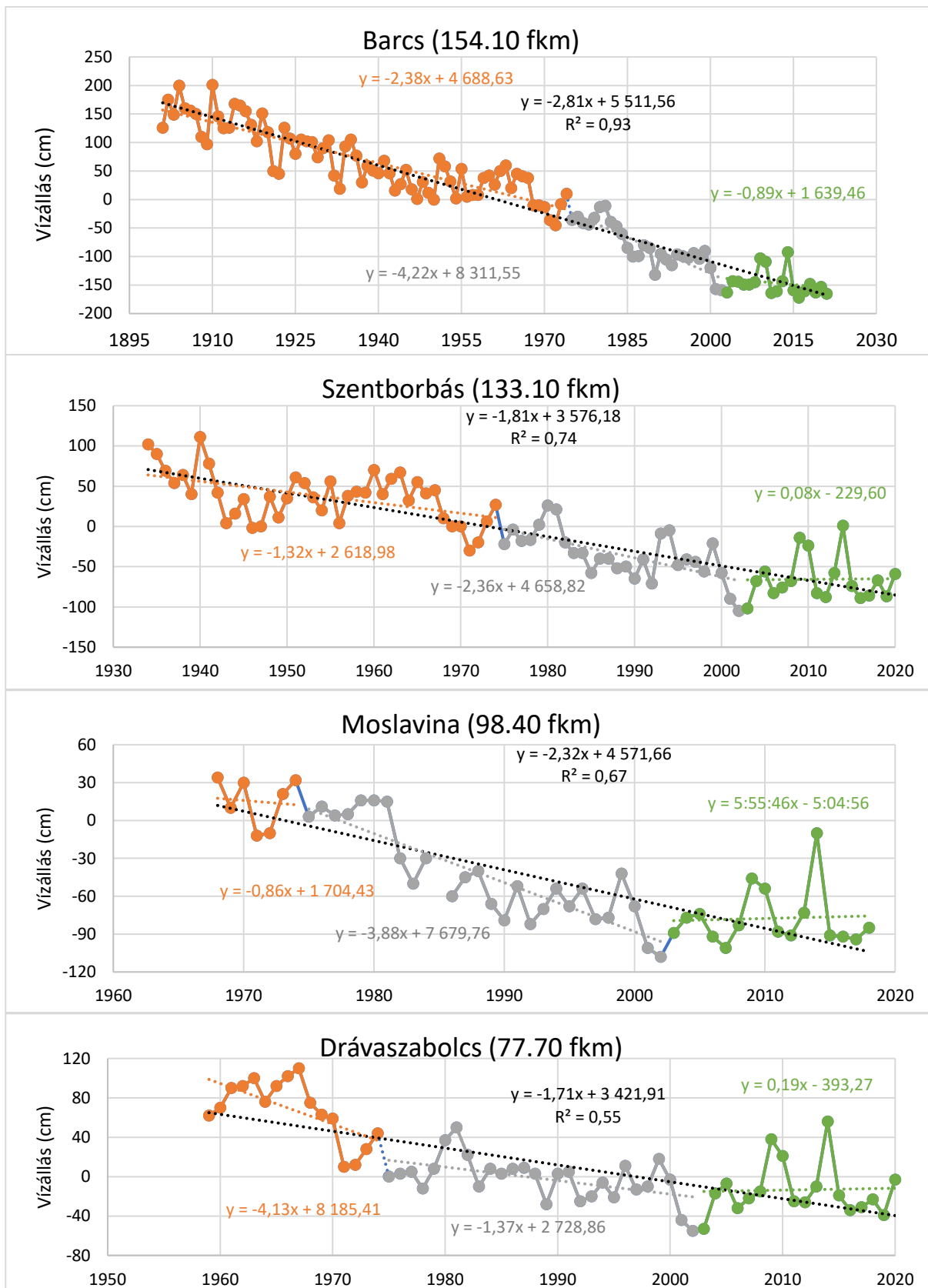
(Megjegyzés: az 1960-2000 között alkalmazásban lévő vízhozam-görgetett hordalékhozam összefüggés 2000-ben frissítésre került)
Figure 3. Annual bedload transport at Barcs in 1960-2000 (light blue) and since 2000 (dark blue) and Drávaszabolcs (orange) in 1960-2018, and at Botovo (brown) in 2004-2018

(Note: the bedload curve used in 1960-2000 was updated in 2000)



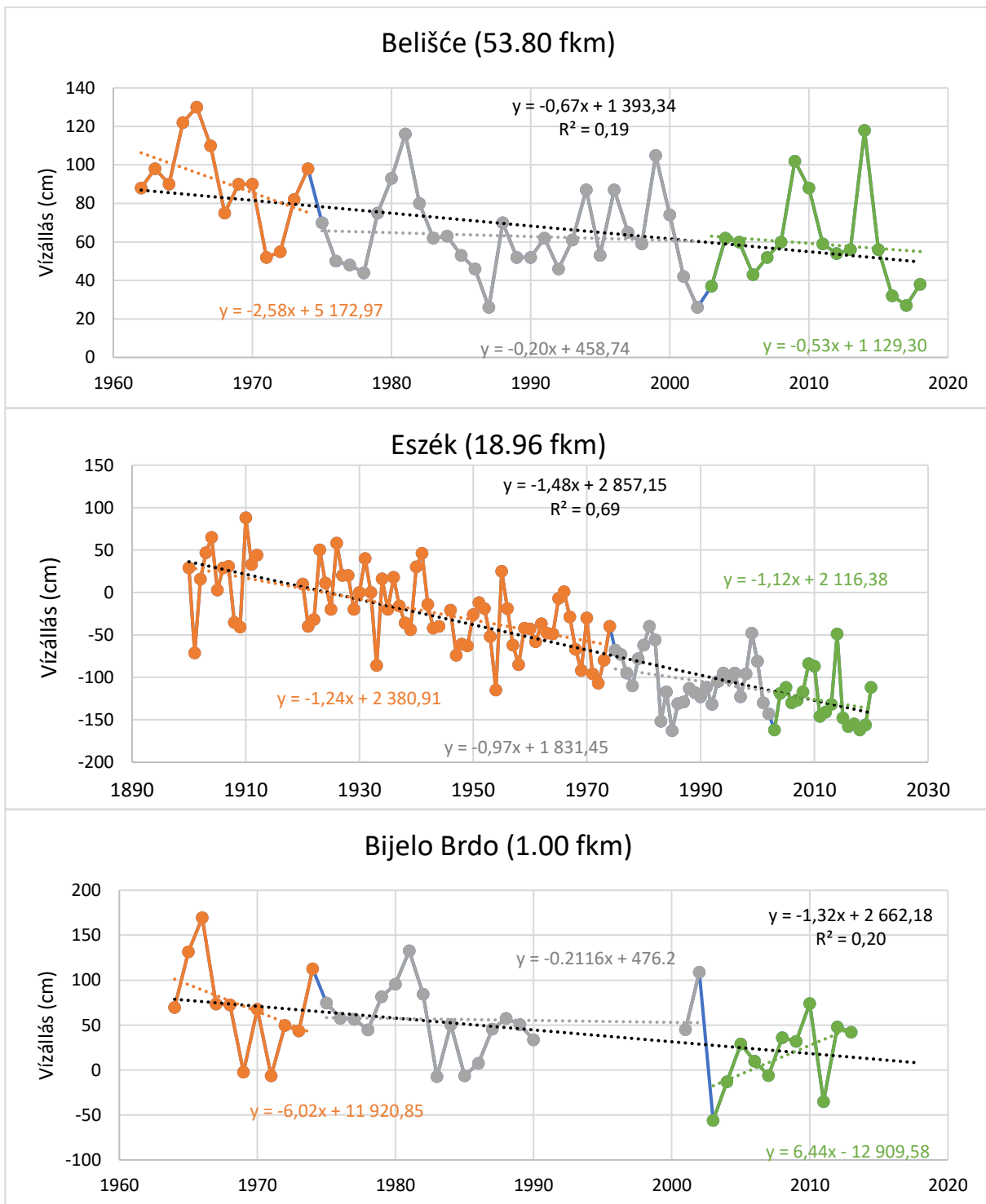
4. ábra. A Barcs fölötti állomások kisvízszintjeinek alakulása. A színek magyarázata: narancs: csak folyószabályozási beavatkozások (1975 előtt), szürke: vízlépcsők és mederkotrás is (1975-2011), zöld: a kotrási tevékenység megszűnése óta (2012-től napjainkig); fekete: teljes időszak

Figure 4. Low water levels at gauging stations above Barcs. Notation: orange: only river regulation interventions (I. period, before 1975), grey: hydropower plants and dredging in addition (II. period, 1975-2011), green: since the end of dredging activities (III. period, since 2012), black: the whole period



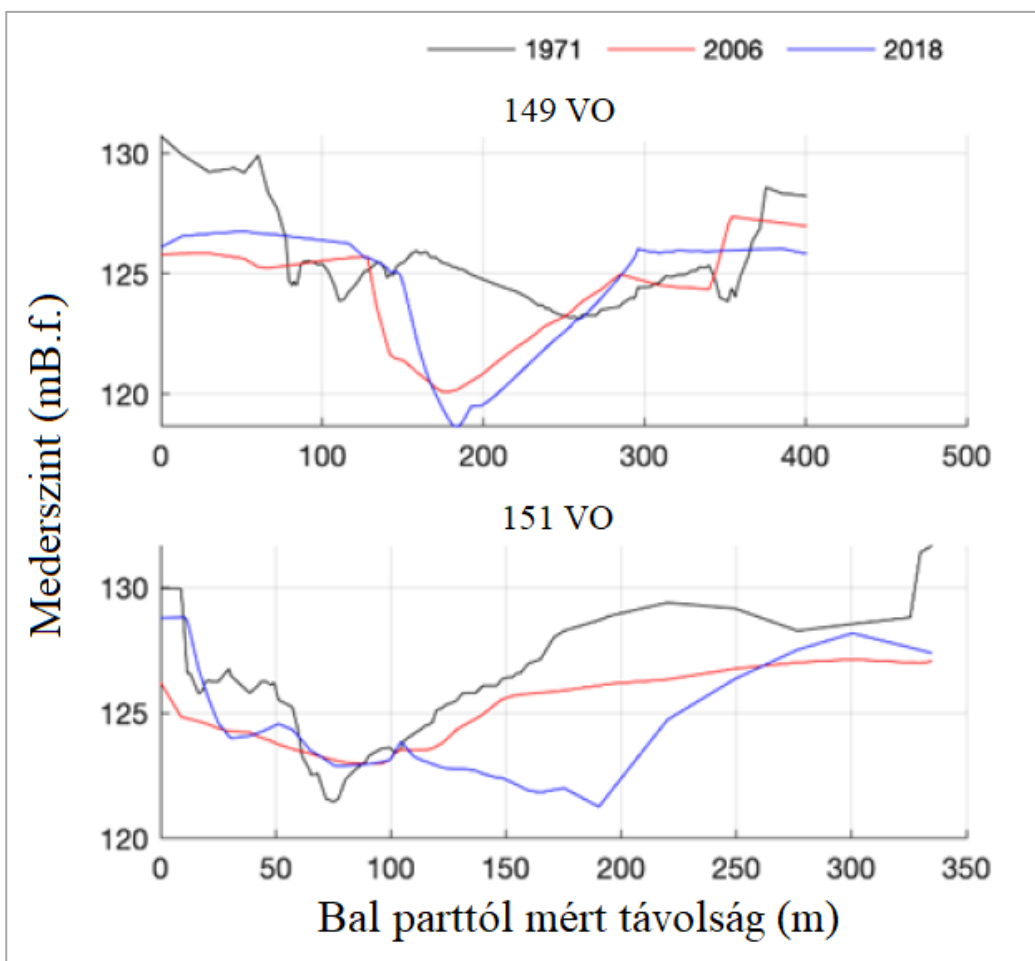
5. ábra. A Barcs és Drávaszabolcs közötti állomások kisvízszintjeinek alakulása. A színek magyarázata: narancs: csak folyószabályozási beavatkozások (1975 előtt), szürke: vízlépcsők és mederkotrás is (1975-2002), zöld: a kotrási tevékenység megszűnése óta (2003-tól napjainkig); fekete: teljes időszak

Figure 5. Low water levels at gauging stations between Barcs and Drávaszabolcs. Notation: orange: only river regulation interventions (I. period, before 1975), grey: HPPs and dredging in addition (II. period, 1975-2002), green: since the end of dredging activities (III. period, since 2003), black: the whole period

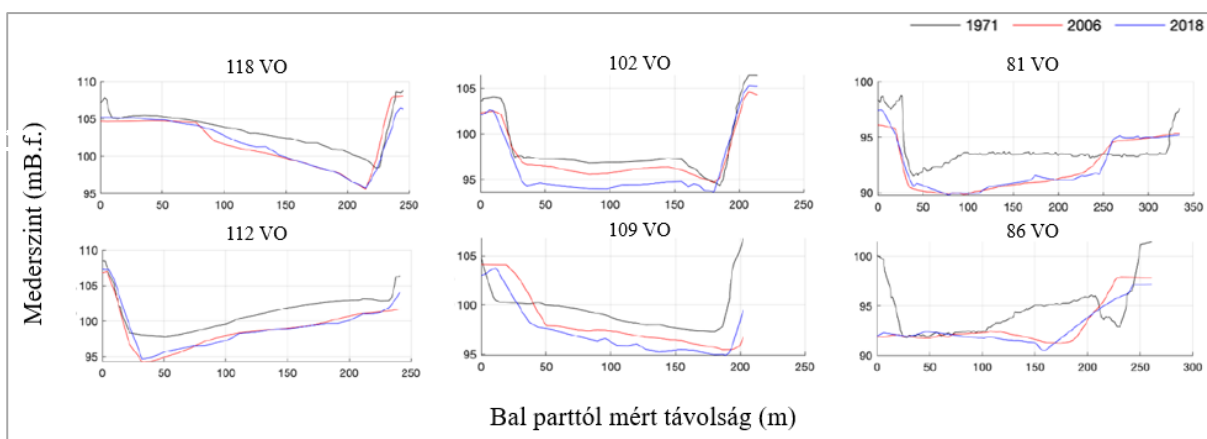


6. ábra. A Drávaszabolcs alatti állomások kisvízszintjeinek alakulása. A színek magyarázata: narancs: csak folyószabályozási beavatkozások (1975 előtt), szürke: vízlépcsők és mederkotrás is (1975-2002), zöld: a kotrási tevékenység megszűnése óta (2003-tól napjainkig); fekete: teljes időszak

Figure 6. Low water levels at gauging stations below Drávaszabolcs. Notation: orange: only river regulation interventions (I. period, before 1975), grey: HPPs and dredging in addition (II. period, 1975-2002), green: since the end of dredging activities (III. period, since 2003), black: the whole period



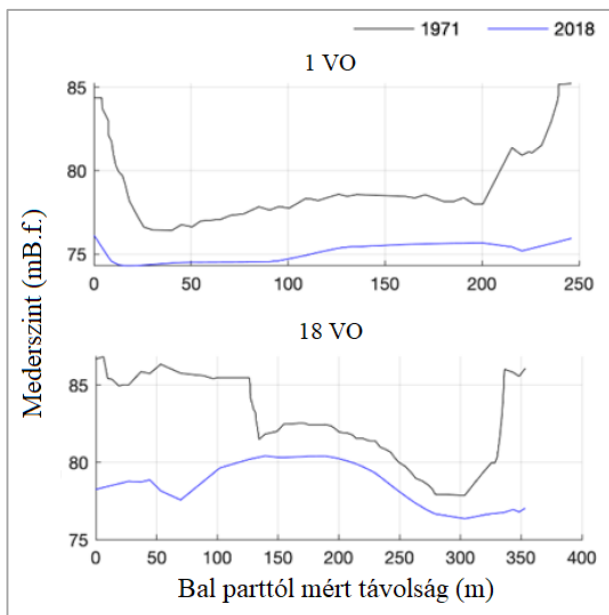
7. ábra. Keresztszelvények jellemző alakulása az őrtilos szakaszon az 1971-es (fekete), 2006-os (piros) és 2018-as (kék) medertérképek alapján
 Figure 7. Evolution of bed geometry in characteristic cross sections in the area of Órtilos based on topographical surveys from 1971 (black), 2006 (red) and 2018 (blue)



8. ábra. Keresztszelvények jellemző alakulása a Barcs környéki szakaszon az 1971-es (fekete), 2006-os (piros) és 2018-as (kék) medertérképek alapján
 Figure 8. Evolution of bed geometry in characteristic cross sections in the area of Barcs based on topographical surveys from 1971 (black), 2006 (red) and 2018 (blue)

A Drávaszabolcs és Duna-torkolat közötti szakaszon már nem állt rendelkezésre a 2006-os mederdomborzati térkép, ezért ezen a szakaszon csak két felmérési időszak alapján lehetett előállítani a keresztszelvény alak grafikonokat (9. ábra; 18 és 1 VO szelvények). A jelzett időszakban a

teljes alsó szakaszon méteres nagyságrendű medermélyülés figyelhető meg. A 2018. évi felmérés csak a főmederre terjedt ki, ezért a partvonalak alakulása nem vehető össze a korábbi adatokkal, de számos szelvény esetében jól láthatóan a mélyülés mellett oldalirányba is elmozdult a meder.



9. ábra. Keresztszelvények jellemző alakulása a Drávaszabolcs alatti szakaszon az 1971-es (fekete) és 2018-as (kék) medertérképek alapján

Figure 9. Evolution of bed geometry in characteristic cross sections below Drávaszabolcs based on topographical surveys from 1971 (black) and 2018 (blue)

A MEDERSÜLLYEDÉS LEHETSÉGES OKAINAK VIZSGÁLATA

Jelen tanulmányban a medersüllyedés értékének becslése a rendelkezésre álló hidrológiai adatok elemzése, valamint az ismert kotrási adatok alapján történt. A barsci és északi vízszintek alapján elmondható, hogy már jóval előbb megindult a medersüllyedési folyamat a Dráván (Bonacci és Oskoruš 2010), azonban a legtöbb vízmércét csak a 20. század második felében telepítették, így csak onnantól vizsgálható részletesebben a medersüllyedési folyamat. A kotrási tevékenység elemzésében szintén bizonytalanság rejlik, hiszen kevés adat ismert a kotrások pontos helyszínéről, az illegális kotrási tevékenység pedig (értelemszerűen) egyáltalán nincs dokumentálva. A mederváltozásokat közvetlenül a mederfelmérések, medertérképek alapján lehetne meghatározni, azonban ilyen jellegű monitoring nem folyik a Dráván. Az eseti mederfelmérésekből előállított medertérképek összeegyeztetése komplex feladat, s már a legcsekélyebb transzformálási hibák is jelentősen torzíthatják az eredményeket.

A Dráva intenzív medersüllyedése többféle hatás (természetes és antropogén) következménye, melyek egymásra tevődnek, egyéni hatásuk nehezen különíthető el, mértékük nehezen becsülhető. A medersüllyedést kiváltó hatások feltárásában további nehézséget okoz, hogy kevés információ áll rendelkezésre a különböző tényezők vizsgálatához. Fontos kérdés az is, hogy az egyes tényezőkre milyen hosszú a folyó által adott válasz reakcióideje – a természeti hatásokra a folyó válaszába például jóval lassabb, mint az antropogén hatások esetében.

Természetes hatások

Klimaváltozás

A Dráva vízgyűjtőjének felső, alpesi része felelős a vízhozam kétharmadért, így a felső vízgyűjtőn bekövetkező változások hatásait is figyelembe kell venni (Lóczy 2019). Az alpesi régiókban a klímaváltozás direkt hatásai közé sorolható a nyári aszályos időszak növekvő gyakorisága, a növekvő árvízveszély, a csökkenő lejtőstabilitás stb. Lóczy (2019) alapján a klímaváltozás egyelőre nem sorolható a Dráva jelentős medermélyülését kiváltó tényezők közé, azonban a jövőben jelentős változások következhetnek be az éghajlatban, aminek feltehetőleg már kimutatható hidromorfológiai hatásai is lehetnek, leginkább a vízjárás megváltozására gyakorolt hatásában.

Tektonikus mozgások

A Dráva Mura és Duna-torkolat közötti szakasza mélyszerkezeti árokban halad, amelyben több kisebb részmedence alakult ki a pleisztocén végén, illetve a holocén időszakban (Lovász 1967). A tektonikai mozgások következtében a Dráva-völgy a kora miocén (a Pannon-medence kialakulása) óta folyamatosan süllyed (Burián és társai 2019). Ezek a tektonikai mozgások alakították ki a Dráva hosszszelvényében az egymástól jelentősen különböző esésű szakaszokat, melyek közül az utolsó markáns eséslépcsőt (Zaláta és Donji Miholjac között) egy igen fiatal süllyedés okozta. Barcs alatt a Dráva a Duna torkolatában lévő hatalmas süllyedékbe ér, ahol az alsószakasz jellegnek megfelelően kiegyenlített mechanizmusú, s természetes állapotban a feltöltődés jellemzi (Lovász 1967). A tektonikus süllyedés mértéke mindössze 1-2 mm/év (Joó 1992), vagyis egy nagyságrenddel kisebb a medersüllyedés mértékénél, ezáltal nem tekinthető az intenzív medersüllyedés kiváltó okának.

Folyómeder oldalirányú mozgása

A Dráva-torkolat vándorlásában a tektonikai mozgások mellett a folyó oldalirányú mozgása (kanyargózása) is szerepet játszott. Ez újfent csak közvetett módon okozhat medersüllyedést. A Duna aktívan és jelentősen befolyásolja a torkolati szakasz mederváltozásait, így a Duna – mint erózióbázis – medersüllyedése a Dráván is bevágódási folyamatot indít meg.

Erózióbázis megsüllyedése

A Dráva Drávaszabolcs alatti, torkolati szakaszának folyamatait jelentősen befolyásolja a Duna, miáltal a Duna (mint erózióbázis) mederváltozásai aktívan kihatnak a Dráva medrére is. A Duna érintett szakaszára a dinamikus mederváltozás a jellemző. Magyarország területére fentről hordalékszegény víz érkezik a vízlépcsők miatt, ami medereróziót okoz. A medermélyülési folyamatokat a magyar szakaszon végzett intenzív kotrási tevékenység tovább erősítette. Ezzel szemben az eséseszkkenés következtében természetes feltöltődés jellemző a szakaszra (DanubeSediment 2019). A Duna magyar-horvát határtól a Vaskapuig tartó szakaszára mindent egybevetve tehát csak enyhe erózió jellemző az utóbbi évszázadban. A Dráva 1,00 fkm-énél (Bijelo Brdo) mért vízállások alapján – noha az idősor helyenként hiányos – szintén dinamikus mederváltozások, hosszabb távon (1964-2013) pedig medersüllyedés (1,32 cm/év) figyelhető meg.

Antropogén hatások

Területhasználat

A Dráva vízgyűjtőjének alsó részén már évszázadok óta alapvetően mezőgazdálkodással foglalkoznak, nem változott túl jelentősen a beépítettség aránya sem (*Lieb és Sulzer 2019*). A Dráva menti Natura 2000-es élőhelyek védelmére nagy hangsúlyt fektet a Duna-Dráva Nemzeti Park Igazgatóság, az így megőrzött parti növényborítottság aktívan gátolja az eróziót, lassítja a lefolyást. Így – noha a felszíni lefolyás, illetve a talajvesztés alakulásáról nincs információ – a területhasználat változásai feltehetően nem eredményeznek jelentős mederváltozásokat a Dráván.

Folyószabályozás

Közel 250 éve, természetes állapotában a Dráva alsó szakaszán (Órtilostól a torkolatig) meanderezve, medrét dinamikusán építve és pusztítva haladt (*Mantuánó 1974, Bognar 2008, Schwarz 2019*). A 18. század végétől az elsődlegesen a hajózási útvonal javítására irányuló folyószabályozási beavatkozások (kanyarulat-átvágások, mellékágak elzárása, keresztgátak, partbiztosítások építése) hatására kb. 40%-kal csökkent a folyó hossza, jelentősen egyszerűsödött a medre (csökkent a kanyargóssága, egyszerűsödött a formakincse), s intenzív bevágódási folyamat indult meg a vizsgált szakasz teljes hosszán (*Petric és társai 2019*). A kisvízi vízszintekben bekövetkezett változások elemzése alapján az 1975 előtti időszakban (amikor is feltehetőleg csak a folyószabályozási beavatkozások hatásai érvényesültek) a Barcs fölötti szakaszon átlagosan 0,50 cm/év, a Barcs alatti szakaszon 2,08 cm/év medersüllyedés következett be. A vízlépcsők üzembe helyezése és a kotrási tevékenység megkezdése után azonban már nehezen különíthetők el az egyes tényezők hatásai. A folyószabályozások hatásai jellemzően lokális jellegűek, a folyó válaszdása a beavatkozást követően azonnal, de időben és térben röviden jelentkezik, az új egyensúlyi állapot hamar (néhány éven belül) kialakul. A Dráva medrében korábban folyamatos szabályozási munkálatok folytak, amik így időben elnyúló medermélyülő hatást okoztak. Mivel 1990 óta nem történt jelentős folyószabályozási beavatkozás (*Petric és társai 2019*), az elmúlt évtizedekben feltételezhetően már nem okoz jelentős medermélyülést a folyószabályozás.

Folyami kotrás

A Dráva medréről kitermelt homok- és kavics térfogatának (*VITUKI 2003*) elemzése alapján 1982-től 2011-ig (a kotrási tevékenység megszüntetéséig) becsülhető a pusztán a kotrási tevékenységből származtatható medersüllyedés. A számítások alapján Barcs fölött 1,25 cm/év, Barcs alatt 0,57 cm/év medersüllyedést eredményezett a kavics-, illetve homokkotrás. A kotrás hatására azonban a hordalék háztartásban is deficit keletkezett, amely tovább erősítette a medersüllyedési folyamatokat. A kotrási térfogatok alapján becsült medersüllyedés és az egyes szelvényekben mért görgetett hordalék mennyiségének alakulása alapján becsült mederváltozás összegzése után (a (3) egyenlet alapján) a Barcs fölötti szakaszon 1,53 cm/év, a Barcs alatti szakaszon 0,94 cm/év ütemű medersüllyedés következett be 1982 és 2011 (Barcs fölött), illetve 1982 és

2002 (Barcs alatt) között. Fontos megjegyezni, hogy csak 1993-tól ismertek részletesebben a kotrási adatok (pl. kotrási helyszínek), valamint az illegálisan kitermelt térfogatokról egyáltalán nem áll rendelkezésre adat. A hordalékmérési adatokban szintén jelentkezhetnek bizonytalanságok.

$$i_{\text{kotrás}} = \frac{\sum V_{\text{kotrás}} - (Q_{\text{BL,alvíz}} - Q_{\text{BL,felvíz}})}{W \cdot L} \quad (3)$$

ahol: $i_{\text{kotrás}}$ a kotrásból származó medersüllyedés mértéke a vizsgált szakaszon; $V_{\text{kotrás}}$ az éves kitermelt kotrási térfogat a vizsgált szakasz hosszára vetítve; Q_{BL} éves görgetett hordalékhozam a vizsgált szakasz felvízi, illetve alvízi szelvényében; t a vizsgált időszak hossza; W a mederszélesség; L a vizsgált szakasz hossza.

Vízlépcsők

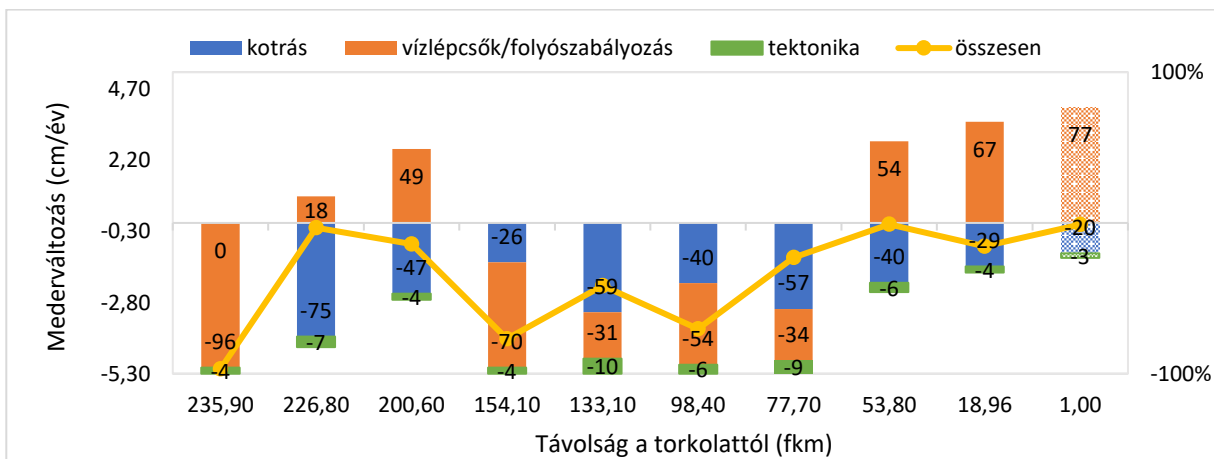
A vizsgált szakasz hidromorfológiájára a legelső horvát vízlépcső (Donja Dubrava-i) van a legjelentősebb hatással (*Burián és társai 2019*). A vízlépcsők alatt a létesítést követően hirtelen intenzív bevágódás indul meg, amely az első néhány évben a legdinamikusabb, majd a bevágódás hatására fokozatosan csökkenő mederesés a folyó energiájának csökkenését és a hordalékszállítás mérséklődését vonja maga után, s egy új egyensúlyi állapot áll be. A vízlépcsők hatásából eredő medersüllyedés mértékének becslése szintén a kisvízszintek elemzése alapján történt. A horvát vízlépcsőkhöz legközelebb az őrtiloszi vízmérce található, így hatásuk elsődlegesen itt elemezhető. Itt 1975 és 2000 között összesen 209 cm (7,74 cm/év) medersüllyedés következett be a vízlépcsők üzembe helyezésének hatására. A botovoi és Novo Virje-i szelvényekben a vízlépcsők esetleges hatása mellett párhuzamosan már a kanyarulat-átvágások és a kotrás is szerepet játszott. A kisvízszintek csökkenésének üteméből levonva a mederkotrásokból eredeztethető medersüllyedést, az 1975-2011 között bekövetkezett mederváltozásra Botovonál 0,21 cm/év, Novo Virjénél 1,45 cm/év feltöltődés adódik. Barcsnál és Drávaszabolcsnál a vízlépcsők és a kotrási tevékenység hatása már nem különíthető el egyértelműen. Az előzőekhez hasonlóan becsülve Barcsnál 2,66 cm/év, Drávaszabolcsnál 0,71 cm/év medersüllyedés adódik. A múlt évtized állandósulni látszó vízszintjei alapján elmondható, hogy a vízlépcsők hatására napjainkban már nem mélyül tovább a Dráva medre. Ennek magyarázata abban keresendő, hogy a vízlépcsők létesítése után megindult hirtelen, gyors vertikális változások egy idő után mérséklődtek, s az új, dinamikus egyensúlyi állapot kialakítása érdekében a folyó partjainak pusztításával igyekszik kompenzálni az esésében bekövetkezett változást. Fontos megemlíteni, hogy a vízlépcsők üzemeltetésének mederalakra kifejtett hatása csak egy, a számos hatásmechanizmus mellett. A folyamatos, akár napi, dinamikus vízszintingadozások az áramlási sebességre, a mederfenéknél fellépő csúsztatófeszültségre és a vízhőmérsékletre is kihatnak, és ezen keresztül csökkenti a minőségét és kiterjedését a folyómenti élőhelyeknek, ami a biodiverzitás csökkenését vonja maga után, továbbá a halak és más élőlények reprodukcióját és túlélését is csökkenthetik (*Greimel és társai 2018*).

A hatások összegzése

A medersüllyedés egyes antropogén, illetve természetes tényezőinek áttekintése alapján kijelenthető, hogy a Dráva medersüllyedésének legfontosabb kiváltó okainak a mederkotrás, a horvát vízlépcsők és a folyószabályozási beavatkozások tekinthetők. A torkolati szakaszon a Duna (mint erózióbázis) meder- és vízszintváltozási folyamatai jelentősen kihatnak a Dráva medrére. A Dráva-völgy folyamatos tektonikai süllyedéséből adódó bevágódás egy nagyságrenddel kisebb a kimutatott medermélyülésnél, míg a klímaváltozás (és a vele szorosan összefüggő területhasználat) hatásai várhatóan csak később jelentkezhetnek. A folyómeder oldalirányú mozgása csak akkor okozhat medermélyülést, ha az valamilyen módon (pl. folyószabályozási művekkel) gátolva van, minekutána a horizontális mozgás helyett szükségszerűen vertikális mederváltozások következnek be.

A kisvízszintek változása, a kotrási és hordalékadatok, valamint a tektonikai süllyedés alapján az 1975 és 2002/2011 (azaz a kotrási tevékenység megszűnéséig) közötti időszakban becsülhető az egyes tényezők hatásának

aránya is (10. ábra). A becslések alapján a teljes szakaszon a medermélyülés 39%-a ered a kotrási tevékenységből, 55%-ban az egyéb antropogén hatások (vízlépcsők, folyószabályozás vagy torkolati visszahatás), míg 6%-ban a tektonikai mozgások tehetők felelőssé. A felső szakaszon az őrtilos szelvényben feltehetőleg csak a vízlépcsők hatásai jelentkeznek, míg Botovo és Barcs között átlagosan 61%-ban a kotrási tevékenység, 33%-ban a vízlépcsők és a folyószabályozások okozhatták a medermélyülést. A Barcs-Drávaszabolcs szakaszon a homok kitermeléséből és a vízlépcsők/folyószabályozási beavatkozásokból eredő medersüllyedés aránya közel azonos arányú (46% kotrás, 47% vízlépcsők/folyószabályozás). Drávaszabolcs alatt már fokozatosan csökken a kotrásból feltételezhető (megjegyzés: a Drávaszabolcs alatti szakaszon végzett kotrásokról nincs adat) medermélyülés aránya (átlagosan 29%). A Dráva-völgy tektonikai süllyedése a teljes medersüllyedés 5%-át teszi ki. A vízlépcsők hatása itt már nem érződhet, így a fennmaradó 66% főként a folyószabályozások hatásából, valamint a Duna befolyásából tevődik össze.



10. ábra. A mederváltozás mértéke (sárgával), illetve a kotrás és a vízlépcsők (valamint egyéb hatások) okozta medersüllyedés százalékos aránya a II. időszakban (1975 és 2011 (235,90-154,10 fkm; felső szakasz), illetve 1975 és 2002 (154,10-0,00 fkm; alsó szakasz) között)

(Megjegyzés: a torkolati állomás külön jelölése az adatok hiányosságára utal; adathiányos évek: 1991-2000)

Figure 10. Vertical bed changes along the Lower Drava in the second period (i.e., 1975-2011 above Barcs and 1975-2002 below Barcs) (yellow) and the distribution (%) of the different factors. (Note: the different marking in case of the station by the confluence indicates that the time series is incomplete.)

Miután az 1990-es évek óta nem végeztek jelentősebb folyószabályozási beavatkozásokat, a kotrási tevékenységet 2011-ben beszüntették, s a legutoljára üzembe helyezett Donja Dubrava-i vízlépcső által okozott változásokra is megszűnt már a Dráva válaszája, a Dráva medrének stabilizálódása várható. Az, hogy a kisvízszintek elemzése alapján a III., antropogén hatások nélküli időszakban az Őrtilos-Drávaszabolcs szakaszon már csak 0,19 cm/év volt a medersüllyedés, alátámasztja ezt a feltevést, hiszen ez a Joó (1992) által a Dráva-völgy területére meghatározott 1-2 mm/év tektonikai süllyedés értékével egyenlő.

KITEKINTÉS

A Dráva alakváltozási folyamatainak értékelését jól támogatná egy évente végrehajtott teljes főmedri domborzati felmérés, amiből például különbségtérképeket lehetne előállítani. A különbségtérképek alapján megfelelő módon

beazonosíthatók tendenciózus mélyüléssel vagy hordaléklerakódással jellemezhető mederszakaszok és jól felhasználhatók a hordalékmérleg felállításához is. Utóbbihoz előállíthatók a mederváltozási térfogatok a folyó hossza mentén, ami már összekapcsolható a görgetett hordalék-vándorlási adatokkal ahhoz, hogy teljes képet kapjunk a folyó hordalékkegyensúlyáról. A lebetegtetett hordalékjárás hossz mentén is időben is dinamikusan változó jellemzőinek mérésére egy olyan monitoring rendszer kiépítését javasoljuk, amely, ha a folyónak ugyan csak pár pontjában is, de folyamatosan (pl. 15 percnként) detektálja a hordaléktöménységet, majd a nagy időbeli felbontású adatsort felhasználva tudjuk kiterjeszteni a becslést a folyó egyes keresztelvényeire (Haimann és társai 2014, Danube Sediment 2019, Pomázi és társai 2020). A görgetett hordalék mérésének fejlesztésére hosszú ideje, folyamatosan jelentős erőfeszítéseket tesznek a témát gondozó kutatók. A hordalékmozgás jellegéből, a műszerek alkalmazhatósági

korlátai, vagy éppen a mérési körülmények miatt általában véve nagy bizonytalansággal terhelték a mérések. A Drávan jelenleg alkalmazott fizikai mintavételi eljárások, a megfelelő hordalékfogók alkalmazása, a víz alatti kamera bevetése jó alapot nyújt hosszabb idejű hordalékelemzéseknek, de javasoljuk azok kiegészítését egyéb, közvetett mérési módszerekkel (pl. a mederfenéken mozgó dűnék elmozdulása alapján, lásd *Muste és társai 2016*), továbbá hangsúlyozzuk, hogy medermorfológiai szempontból kiemelt szerepet játszanak a nagyvizes időszakok, így amennyire lehet, a méréseket ezekre szükséges csoportosítani. A hordalékmozgás és az ahhoz kapcsolódó medermorfológiai folyamatok pontosabb megértését, azok előrejelzését a folyó medrében tervezett beavatkozások esetén nagyban támogathatják a mérések mellett a szimulációs modellek alkalmazása is. Több hazai folyószakaszra már sikeresen hajtottunk végre olyan morfordinamikai modellezéseket, amelyek igazolták, hogy részletes 3D modellek összekapcsolt áramlási és hordalékvándorlási modulokkal valóban alkalmasak rövidebb folyószakaszon a hidromorfológiai hatásvizsgálatokra (*Baranya 2009, Török és társai 2020*). Nagyobb tér- és időléptékben való vizsgálatokra pedig 1D morfordinamikai modell alkalmazása lehet indokolt (*Nyiri és Török 2022, Nyiri 2021*).

Noha a Dráva medersüllyedési folyamata megállni látszik, az elmúlt kb. 120 évben az antropogén beavatkozások eredményeként a természetes állapothoz képest jelentős változások következtek be. A meder átlagosan 1,20 m-rel süllyedt, s az eredetileg igen gazdag formakincs is elszegényedett. A mederszint süllyedése magával vonta a talajvízszintek csökkenését is, amely problémát okoz a környező területek vízellátásában (pl. a mezőgazdasági öntözésben vagy a természetvédelmi szempontból is jelentős Cún-Szaporca-holtágrendszer feltöltésében kisvízkor). Éppen ezért szükséges feltárni a természetes állapothoz való visszatérés, s a medersüllyedés hatására bekövetkezett káros változások visszafordításának lehetőségét.

ÖSSZEFOGLALÁS

A Dráva intenzív medersüllyedése a 19. században, a folyószabályozások hatására kezdődött meg, amelyet a 2011-ig tartó jelentős kotrási tevékenység, valamint a felső szakaszon épített vízlépcsők tovább erősítettek. A különböző vizsgálatok (közvetett és közvetlen) alapján a Dráva magyarországi szakaszán 1970 óta átlagosan 1-4 cm/év ütemben süllyedt a meder, vagyis az elmúlt 50 évben 0,5-2 m medermélyülés következhetett be. A Barcs fölötti szakaszon intenzívebb a süllyedés (2,00-3,15 cm/év), míg a Barcs alatti szakaszon Drávaszabolcsig jóval mérsékeltebb (0,50-1,08 cm/év), az Eszék alatti, torkolati szakaszon pedig – feltehetőleg a Duna befolyása miatt – kismértékben megnövekszik (0,86-2,19 cm/év). A tektonikus mozgásokból adódó süllyedés mértéke egy nagyságrenddel kisebb a kimutatott medersüllyedés mértékénél (1-2 mm/év). Amikor egy folyó dinamikája külső hatásokra megváltozik, a folyó természetes módon törekszik egy új egyensúlyi állapot elérésére. Vizsgálataink alapján az antropogén hatások mérséklődése óta az Alsó-Dráva medrében szignifikáns függőleges irányú változások már nem valószínűsíthetők.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A cikkben bemutatott kutatás a LIFE17NAT/HU/000577, „*Bölcs vízgazdálkodás a Dráva mentén az ártéri erdők megőrzése érdekében*” (Wise water management for the conservation of alluvial forest habitats along River Drava) projekt és a Széchenyi Terv Plusz program keretében az RRF-2.3.1-21-2022-00008 számú projekt támogatásával valósult meg. A tanulmány kapcsolódik a negyedik szerző Bolyai János Kutatási Ösztöndíjához, valamint a PD 135037 számú NKFIH - OTKA projektjéhez.

IRODALOMJEGYZÉK

- Baranya, S.* (2009). Three-dimensional analysis of river hydrodynamics and morphology. Doktori értekezés. Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem. doi:10.15170/mm.2019.53.02.03
- BME* (2019) Dráva hordalékmérés és morfológiai értékelés. Magyar nyelvű projektjelentés.
- BMFLUW* (2017). Schwebstoffe im Fließgewässer – Leitfaden zur Erfassung des Schwebstofftransports. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, 2. Auflage, Vienna, Austria.
- Bognar, A.* (2008). Geomorfološka obilježja korita rijeke Drave i njenog poloja u širem području naselja Križnica. Hrvatski geografski glasnik. 70(2). pp. 49-71. doi:10.21861/hgg.2007.69.01.02
- Bonacci, O., Oskoruš, D.* (2010). The changes in the Lower Drava River water level, discharge and suspended sediment regime. Environ. Earth Sci., 59. pp. 1661-1670. doi:10.1007/s12665-009-0148-8
- Burián, A., Horváth, G., Márk, L.* (2019). Channel Incision Along the Lower Drava. In: Lóczy (Ed.) The Drava River, Springer Geography, Chapter 10. pp. 139-156. doi:10.1007/978-3-319-92816-6_10
- DanubeSediment* (2019). Handbook on Good Practices in Sediment Monitoring. Projekt jelentés. Budapest. (Utóljára megtekintve: 2022.07.26.)
- EJF* (2012). A Dráva morfológiai monitoringja – Hordalékvizsgálat. Projekt jelentés. Baja.
- Fiala K., Sipos Gy., Kiss T.* (2006). Szabályozások hatására bekövetkező morfológiai változások a Tisza és a Maros alsó szakaszán. In: Kiss A., Mezösi G., Sümegi Z. (szerk): Táj, környezet és társadalom. pp. 203-213. doi:10.14232/phd.1084
- Galay, V.J.* (1983). Causes of River Bed Degradation. Water Resour. Res., 19(5). pp. 1057-1090. doi:10.1029/wr019i005p01057
- Gregory, K.J.* (2006). The human role in changing river channels. Geomorphology, 79(3-4). pp. 172-191. doi:10.1016/j.geomorph.2006.06.018
- Greimel, F., Schülting, L., Graf, W., Bondar-Kunze, E., Auer, S., Zeiringer, B., Hauer, C.* (2018). Hydropeaking Impacts and Mitigation. In: Schmutz S., Sendzimir J. (eds) Riverine Ecosystem Management. Aquatic Ecology Series, vol 8. Springer, Cham. doi:10.1007/978-3-319-73250-3_5

- Haimann, M., Liedermann, M., Lalk, P., Habersack, H. (2014). An integrated suspended sediment transport monitoring and analysis concept. *Int. J. Sed. Res.*, 29. pp. 135-148. doi:10.1016/s1001-6279(14)60030-5
- Joó I. (1992). Recent vertical surface movements in the Carpathian Basin. *Tectonophysics*, 202(2-4). pp. 129-134. doi:10.1016/0040-1951(92)90091-j
- Kiss T. (2014). Fluviális folyamatok antropogén hatásra megváltozó dinamikája: egyensúly és érzékenység vizsgálata folyóvízi környezetben. PhD értekezés. Szegedi Tudományegyetem, Szeged.
- Kiss T., Nagy Z. (2012). A Maros medrének aktív bevágódása és ennek morfológiai következményei az ártéren. *Hidrológiai Közlöny*, 92(2), pp. 19-23.
- Kondolf, G.M., Piégay, H., Landon, N. (2002). Channel response to increased and decreased bedload supply from land use change: contrasts between two catchments. *Geomorphology*, 45(1-2). pp. 35-51. doi:10.1016/s0169-555x(01)00188-x
- Lane, E.W. (1955). The importance of fluvial morphology in hydraulic engineering. *Proc. Am. Soc. Civ. Eng.*, 81(7). pp. 1-17.
- Lieb, G.K., Sulzer, W. (2019). Land Use in the Drava Basin: Past and Present. In: Lóczy (Ed.) *The Drava River*, Springer Geography, Chapter 3. pp. 27-44. doi:10.1007/978-3-319-92816-6_3
- Liébault, F., Gomez, B., Page, M., Marden, M., Peacock, D., Richard, D., Trotter, C.M. (2005). Land-use change, sediment production and channel response in upland regions. *River Res. Applic.*, 21. pp. 739-756. doi:10.1002/rra.880
- Lóczy, D. (2019). Climate and Climate Change in the Drava-Mura Catchment In: Lóczy (Ed.) *The Drava River*, Springer Geography, Chapter 4. pp. 45-60. doi:10.1007/978-3-319-92816-6_4
- Lovász Gy. (1967). A szerkezeti viszonyok hatása a Dráva és a Muravölgy esésgörbéjére, illetve a nagyobb mellékfolyók mechanizmusára. *Hidr. Tájékoztató*, 7(2). pp. 42-47.
- Mantuánó J. (1974). A Dráva vízjárásának vizsgálata. *Vízügyi Közlemények*, 56(3). pp. 368-401.
- ME-10-231-20:2009: Felszíni vizek lebegtetett hordalékának mérése szivattyús mintavételezéssel, Környezetvédelmi és Vízügyi Minisztérium.
- Muste, M., Baranya, S., Tsubaki, R., Kim, D., Ho, H., Tsai, H., Law, D. (2016). Acoustic mapping velocimetry. *Water Resources Research*, 52(5). pp. 4132-4150. doi:10.1002/2015wr018354
- Nyiri E., Török G.T. (2022). Folyók dinamikusan egyensúlyi állapotát becsülő eljárás kidolgozása és alkalmazása a magyarországi Felső-Dunára. *Hidrológiai Közlöny*, 102(3). pp. 20-32.
- Nyiri E. (2021). Folyómedrek egyensúlyi állapotának nagy tér-idő léptékű vizsgálata 1D modellezéssel. TDK dolgozat. Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Budapest. doi:10.15170/mm.2019.53.02.03
- OVF (2015). A Duna-vízgyűjtő magyarországi része – Vízügyi-gazdálkodási Terv – 2015.
- Petrić, H., Tamás, E.A., Lóczy, D. (2019). Flood History and River Regulation. In: Lóczy (Ed.) *The Drava River*, Springer Geography, Chapter 8. pp. 105-124. doi:10.1007/978-3-319-92816-6_8
- Pomázi F., Baranya S., Török G.T. (2020). Nagy folyók lebegtetett hordalék-vándorlásának új vizsgálati módszerei 1. A továbbfejlesztett hordalékmonitoring módszertan bemutatása. *Hidrológiai Közlöny*, 100(3). pp. 64-73.
- Rákóczi L., Szekeres J. (2003). A görgetett hordalék mintavétel felülvizsgálata víz alatti video segítségével. *Hidrológiai Közlöny*, 83(3). pp. 151-166.
- Rumsby, B.T., Macklin, M.G. (1994). Channel and floodplain response to recent abrupt climate change: the Tyne basin, Northern England. *Earth Surf. Proc. Landf.*, 19(6). pp. 499-515. doi:10.1002/esp.3290190603
- Schumm, S.A. (1977). *The Fluvial System*. John Wiley & Sons, New York. p. 338.
- Schwarz, U. (2019). Hydromorphology of the Lower Drava. In: Lóczy (Ed.) *The Drava River*, Springer Geography, Chapter 5. pp. 61-78. doi:10.1007/978-3-319-92816-6_5
- SOLVEX-BME Konzorcium (2014a). Duna Nagyvízi Mederkezelési Terv (01.NMT.01 Duna államhatár 1850,20 fkm – Ásványráró – Győrzámoly 1809,76 fkm) (Utoljára megtekintve: 2022.05.01.)
- SOLVEX-BME Konzorcium (2014b). Duna Nagyvízi Mederkezelési Terv (01.NMT.02 Duna 1809,76-1786,00 fkm) (Utoljára megtekintve: 2022.07.26.)
- SOLVEX-BME Konzorcium (2014c). Duna Nagyvízi Mederkezelési Terv (01.NMT.03 Duna 1786,00-1729,35 fkm) (Utoljára megtekintve: 2022.07.26.)
- SOLVEX-BME Konzorcium (2014d). Duna Nagyvízi Mederkezelési Terv (01.NMT.04 Duna 1729,35-1699,50 fkm) (Utoljára megtekintve: 2022.07.26.)
- Surian, N., Rinaldi, M. (2003). Morphological response to river engineering and management in alluvial channels in Italy. *Geomorphology*, 50(4). pp. 307-326. doi:10.1016/s0169-555x(02)00219-2
- Török, G.T., Józsa, J., Baranya, S. (2020). A Novel Sediment Transport Calculation Method-Based 3D CFD Model Investigation of a Critical Danube Reach. *Polish Journal of Environmental Studies*, 29(4). pp. 2889-2899. doi:10.15244/pjoes/111877
- VITUKI (1971). *Vízrajzi Atlasz sorozat. 8. Dráva. 3. kötet. Vízgazdálkodási Tudományos Kutató Intézet Budapest.* p. 224.
- VITUKI (2003). A Dráva hordalékjárásának vizsgálata a legfrissebb adatok figyelembevételével. Projekt jelentés. Budapest.
- DHMZ hidrológiai archívum: <https://hidro.dhz.hr/>

A SZERZŐK

POMÁZI FLÓRA építőmérnök BSc oklevelét 2016-ban, majd Infrastruktúra-építőmérnök MSc diplomáját 2018-ban szerezte a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetemen. Jelenleg az egyetem Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszékének doktorandusza. Doktori kutatásának témája a folyami lebetegtetett hordaléktranszport. A Magyar Hidrológiai Társaságnak 2013 óta tagja.



BARANYA SÁNDOR építőmérnöki oklevelét a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetemen szerezte 2003-ban, PhD fokozatát ugyanitt 2010-ben. Jelenleg a BME Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszékének egyetemi docense. Kutatási területe folyók medermorfológiai, áramlástan és hordalékvándorlási vizsgálata terepi eljárásokkal és számítógépes modellezéssel. A Magyar Hidrológiai Társaságnak 2003 óta tagja.



ERMILOV ALEXANDER ANATOL okleveles építőmérnök, doktorandusz a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszékén. Doktori kutatásának témája a folyami áramlás és a mederfenék kölcsönhatásának vizsgálata. 2015-ben TDK II. helyezést kapott a „*Balaton szélkeltette vízcseré folyamatának numerikus modell alapú vizsgálata*” című dolgozattal, majd ezen értekezéssel I. helyezést ért el a Magyar Hidrológiai Társaság Lászlóffy Woldemár diplomamunka pályázatán. MSc diplomamunkáját a Norwegian University of Science and Technology-n védte meg 2017-ben.



TÖRÖK GERGELY TIHAMÉR építőmérnöki oklevelét 2012-ben, PhD fokozatát 2018-ban szerezte meg a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetemen. Jelenleg az MTA-BME Vízgazdálkodási Kutatócsoport tudományos munkatársa. Kutatási területe a vegyes szemösszetételű folyómedrek morfordinamikai folyamatainak vizsgálata. A Magyar Hidrológiai Társaságnak 2010 óta tagja.



HORVÁTH GÁBOR vízgazdálkodási mérnök, vízrajzi szakmérnök, 1984 óta a Dél-dunántúli Vízügyi Igazgatóság dolgozója. 1988-tól dolgozik a vízrajz szakterületén, 1994-től csoportvezetőként, 2003-tól osztályvezető-helyettesként, majd 2014-től osztályvezetőként. Feladatköre az igazgatósági vízrajzi monitoring irányítása, fejlesztése. Az igazgatósági vízrajzi távmérőhálózat alapítója, több nemzetközi projekt menedzselésének irányítója. A Magyar-Horvát Duna és Dráva Vízyűjtő Albizottság hidrológus szakcsoport magyar delegációjának vezetője. A Magyar Hidrológiai Társaságnak 2007 óta tagja.



PÁL IRINA meteorológus mérnök, 1992 óta a Dél-dunántúli Vízügyi Igazgatóság dolgozója. A Vízrajzi és Adattári Osztályon kiemelt műszaki referensként dolgozik. Főbb tevékenységei és feladatkörei a hidrometeorológiai hálózat működtetése, adatok gyűjtése, feldolgozása, értékelése, hidrológiai statisztikák készítése, adatszolgáltatás. Számítalan hazai és nemzetközi projekt részvevője. Közreműködött több szakmai program fejlesztésében és tesztelésében. Emellett a Magyar-Horvát Duna és Dráva Vízyűjtő Albizottság hidrológus szakcsoportjának tagja. A Magyar Hidrológiai Társaságnak 2019 óta tagja.



Fotó: MTI/Sóki Tamás