

## Komplex folyami lebegtetett hordalékszállítási folyamatok szimuláció alapú vizsgálat a revitalizációs célú beavatkozások támogatására

Pomázi Flóra<sup>1,2</sup>, Baranya Sándor<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Építőmérnöki Kar, Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszék, 1111 Budapest, Műgyetem rkp. 3. (e-mail: pomazi.flora@emk.bme.hu, baranya.sandor@emk.bme.hu)

<sup>2</sup> Víz tudományi és Vízbiztonsági Nemzeti Laboratórium, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Építőmérnöki Kar, Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszék, Budapest

DOI: 10.59258/hk.15075



### Kivonat

A tanulmányban egy 3D numerikus modellt építettünk fel, igazoltunk és alkalmaztunk a Duna felső-magyarországi szakaszának lebegtetett hordalékszállításának szimulálására. A mintaterület igen összetett, mivel folyószabályozási művek, illetve a Mosoni-Duna felől a Rábán levonuló nagyvíz esetén érkező hordalékcsova terjedése is befolyásolja a lebegtetett hordalékvándorlás térbeli alakulását. A bemutatott modellezési megközelítéshez részletes terepi adatokat használtunk fel a modell igazolásához. Ennek során a modell paramétereit, illetve a peremfeltételeket úgy választottuk meg, hogy a mért és a modellezett eredmények között optimális egyezőséget kapjunk a víz- és hordalékjárási körülmények kellően széles tartományán. A modell képes volt reprodukálni a lebegtetett hordalékszállítás jelentős térbeli inhomogenitását. Ezen kívül egy esettanulmány példáján keresztül bemutattuk, hogy a modell milyen lehetőségeket rejt magában folyami revitalizációs beavatkozások támogatására, mint például a mellékágak helyreállítása. Az Erebe-szigeteki mellékágrendszer példáján keresztül különböző változatok hatását vizsgáltuk a mellékágban végbemenő hordaléklerakódási folyamatok szempontjából. Bemutattuk, hogy a kiülepedő hordalék mennyiség csapdázásával optimalizálni lehet a fenntartó kotrási tevékenységeket.

### Kulcsszavak

Lebegtetett hordalék, 3D numerikus modell, komplexitás, hordalékcsova, revitalizáció.

## Simulation-based assessment of complex suspended sediment transport processes to support revitalisation measures

### Abstract

A three-dimensional numerical model was built and applied to simulate the suspended sediment transport of the Upper-Hungarian reach of the Danube River. The study area is rather complex – the spatial distribution of the suspended sediment transport is influenced by river training works, and the sediment plume of the high flow of the Raba River, inflowing from the Mosoni-Duna. The presented modelling approach uses detailed field data to calibrate and validate the model for fluvial hydrodynamics and suspended sediment transport. This involved adjusting model parameters and boundary conditions to achieve optimal agreement between the simulation results and the reference data over a reasonably wide range of flow rates and suspended sediment concentrations. The model was able to reproduce the strong spatial inhomogeneity of suspended sediment transport. Furthermore, a case study was conducted to demonstrate the potential of the model to support river revitalisation measures, such as the recovery of side arms. Through the example of the Erebe islands side-arm system, scenarios were simulated to estimate the sedimentation of the side arm due to different measures. By concentrating the deposited material in a sediment trap, maintenance dredging activities could be optimised.

### Keywords

Suspended sediment, 3D numerical model, complexity, sediment plume, revitalisation.

### BEVEZETÉS

A folyami lebegtetett hordalékszállítás alapvető szerepet játszik a különböző morfológiai folyamatokban, a folyami élőhelyek minőségében és a folyógazdálkodással kapcsolatos számos társadalmi tevékenységben. A lebegtetett hordalék szemcsék a víz áramlásával együtt szállítódnak, a finom részecskék (azaz a 63 µm-nél kisebb átmérőjűek) a gravitáció és a turbulencia ellentétesen ható erői miatt lebegésben maradnak (van Rijn 1984a). A folyó hordalék szállító kapacitása határozza meg a hordalék szállítás egyensúlyát a folyó mentén. Az eróziós, valamint a feltöltődési folyamatok egymással váltakozva, aktívan alakítják magát a folyómedret (Schumm 1977).

A természetes folyókban ez a két folyamat általában egyensúlyban van. Folyószabályozások hatására azonban

ez az egyensúly felborulhat, és az erózió, valamint a lerakódás jelentős problémákat okozhat (Mossa 1996). Világszerte komoly aggodalomra ad okot a folyómedrek folyamatos átalakulása (Nienhuis és társai 2016), ami folyórendszerek eróziójából származó feltöltődés miatt a torkolatok degradációjához vezethet. Emellett a hagyományos vízépítési művek, pl. sarkantyúk (Henning és Hentschel 2013) is súlyosbíthatják a meder lokális kimosódását. A tározókban felhalmozódott kiülepedett hordalék csökkenti a tározókapacitást (Schleiss és társai 2016), ami vízhiányhoz, vagy csökkentett árvízviisszatartó képességhez vezethet, a tározók elsődleges rendeltetésétől függően. A többelhordalék árvízi események során a hullámtereken rakódik le, növelve az árvízi kockázatokat (Nones 2019). Kiseb léptékben, a parti szűrős víz bázisokat illetően a hordalék felhalmozódása eltömítheti a folyómeder pórúseit,

csökkentve a szűrési kapacitást és a hatékonyságot, potenciálisan veszélyeztetve ezáltal a biztonságos ivóvízellátást (Gillefalk és társai 2018). Egy további összetett lebegtetett hordalékvándorlási jelenség a lebegtetett hordalék keveredése folyók összefolyásánál (Lane és társai 2008). Ezeknek az összetett folyamatoknak és a lebegtetett hordalékvándorlással kapcsolatos kérdéseknek a megértése és számszerűsítése azonban, akár mérések, fizikai kísérletek vagy numerikus modellezés révén, jelentős kihívást jelent.

A lebegtetett hordalékvándorlás terepi mérésekkel történő értékelésénél fontos figyelembe venni, hogy az egy rendkívül dinamikus jelenség, amelyet gyors tér- és időbeli változások jellemeznek. A terepi mérések pontosságának és reprezentativitásának biztosítása érdekében a mintavételt olyan felbontással kell végezni, amely megfelelően megragadja ezeket a változásokat (Mead és társai 2012). A lebegtetett hordalékvándorlás expedíciós mérései hagyományosan egyidejű mintavételt és áramlásmérést foglalnak magukban a kulcsfontosságú paraméterek esetében, mint például a lebegtetett hordaléktöménység és a lebegtetett hordalékhozam. A legtöbb mintavető azonban – akár közvetlen, akár közvetett – egyetlen diszkrét pontban mintáz, ami korlátozza a szükséges tér- és időbeli felbontás biztosítását (Downing 2006, Gray és Gartner 2009). Ezzel szemben az akusztikus elméletet (Thorne és társai 1991, Gray és Gartner 2009, Moate és Thorne 2012) alkalmazó megközelítések (Baranya és Józsa 2010, Agrawal és Hanes 2015) lehetőséget nyújtanak a lebegtetett hordalékvándorlás térben kiterjesztett térképezésére. Ezen előnye ellenére az akusztikus térképezésnek megvannak a maga korlátai, többek között a detektálható szemcseméretet illetően (Guerrero és társai 2011, 2016).

A numerikus eszközök ígéretes alternatívát jelentenek a lebegtetett hordalékszállításra vonatkozó ismeretek megszerzéséhez. Ezek az eszközök támogathatják a vízmérnöki intézkedések tervezését a lebegtetett hordalékszálítással kapcsolatos problémák megoldására. A megfelelő hidromorfológiai modell kiválasztása a konkrét értékelendő morfológiai változásoktól függ, mivel a változások különböző tér- és időbeli léptékekben játszódnak le. Az 1D modellezés hasznosnak bizonyul nagy térbeli léptékű, például vízgyűjtő-méretű, hosszú időszakokra kiterjedő értékelések esetében (Zhang és társai 2014). Ez a megközelítés azonban nem alkalmas például keresztmetszeti változások, vagy diszkrét események leírására. Ezzel szemben a 2D mélységátlagolt modellek kiválóan alkalmasak például lokális sebességváltozások, szennyezőanyag-terjedés vagy hullámtéri feliszapolódás szimulációjára (Guan és Liang 2017). A 3D megközelítés pedig elengedhetetlen, ha olyan összetett folyamatokkal foglalkozunk, mint a másodlagos áramlás, a turbulencia, a kisléptékű szerkezeti kölcsönhatások vagy a kimosódás (Török és társai 2017).

A 3D modellek tipikus alkalmazási példái széles skálát fednek le, mint például a kotrási tevékenységek során keletkezett hordalékcsovák követése (Haimann és társai 2018), az összetett hidrodinamikai jelenségek elemzése (Baranya és társai 2013), a morfordinamikai változások tanulmányozása (Olsen 2003, 2021, Olsen és Hillebrand 2018), vagy a torkolati hordalékcirkuláció (pl., mivel ezek

határozzák meg a morfordinamikai változásokat. Emellett a 3D modellezés elengedhetetlen a szerkezetek körüli áramlási és hordalékvándorlási vizsgálatokhoz, mint például sarkantyúk és hídpillérek esetében (Baranya és társai 2014). A folyószabályozási művek áramlási és hordalékszálítási folyamatokra gyakorolt hatásainak numerikus vizsgálata segít a tervezésük optimalizálásában és a káros hatások minimalizálásában. Bár a 3D modellezés pontosabb, mint az 1D és a 2D modellezés, számításgénye azonban lényegesen nagyobb azokénál.

A fent említett tanulmányok többsége, amelyek 3D-s számítási modelleket használnak a lebegtetett hordalékszállítás térben változó jellegének reprodukálására, nem rendelkeznek a transzportmodell átfogó igazolásával. Tanulmányunk fő célja egy 3D-s numerikus modell igazolása a Duna egy olyan magyarországi szakaszán, ahol jelentős térbeli változékonyság jellemzi a lebegtetett hordalék eloszlását. A vizsgált terület a Duna felső-magyarországi szakaszán található, amelyet összetett medermorfológia és lebegtetett hordalékszállítás jellemez. A vizsgált terület magában foglalja az Erebe-szigetek mellékágrendszerét, amely fontos élőhelyeket biztosít a növény- és állatvilág számára. A Dunában az elmúlt évszázadban végzett folyószabályozási beavatkozások miatt a mellékágrendszer jelentős feliszapolódásnak van kitéve, ami az ökológiai viszonyok romlásához vezet, mely tudományosan megalapozott helyreállítási intézkedéseket tesz szükségessé. A lebegtetett hordalékviszonyok javításában döntő szerepet játszó lebegtetett hordaléktöménység térbeli eloszlásának sikeres előrejelzése alapvető előfeltétele az ökológiai vizsgálatoknak (Trithart és társai 2019). A lebegtetett hordalékszállítás környezeti hatását is figyelembe kell venni minden folyószabályozási vagy revitalizációs intézkedésnél (Trithart és társai 2019) a hosszú távú ökológiai stabilitás és az ökoszisztéma-szolgáltatások javítása érdekében. A modellezési esettanulmányhoz szükséges lebegtetett hordalékszálítási peremfeltételek biztosítása érdekében felállítottuk a hordalékhozam-görbéket mind a Duna, mind pedig a Mosoni-Duna vizsgált szelvényében. Itt megjegyezzük, hogy a közleményben bemutatott modellvizsgálat alátámasztó mérései a SEDDON II projekt keretében (Baranya és társai 2022), még a Mosoni-Duna torkolati műtárgyának megépülte előtt történtek, vagyis a torkolat áthelyezésével megváltozott áramlási, illetve elkeveredési folyamatok vizsgálatát nem foglalja magában a tanulmány. A bemutatott esettanulmány azonban alkalmas arra, hogy alátámasszuk és szemléltessük, hogy az alkalmazott modellel megfelelően leképezhetőek a térben összetett áramlási és lebegtetett hordalékvándorlási folyamatok.

## MÓDSZERTAN

### Mintaterület

A vizsgált terület (1. ábra) a Duna felső-magyarországi szakaszán található. A hidromorfológiai szempontból átmeneti szakaszon a folyómeder kiszélesedik, mederlejtése 37 cm/km-ről fokozatosan 6 cm/km-re csökken (Danube-Sediment 2020). A folyómeder átlagos szelvénytélessége körülbelül 400 m, az átlagos vízmélység 5-6 m. Az átlagos éves középvízhozam kb. 2 200 m<sup>3</sup>/s, a 100 éves visszatés-

rési idejű árvíz pedig elérheti a 10 000 m<sup>3</sup>/s értéket. A legközelebbi lebegtetett hordalék monitoring állomásról (Vámoszabadi; 1805,60 fkm) származó adatok alapján az átlagos lebegtetett hordaléktöménység 20 mg/l, ami 40 kg/s átlagos lebegtetett hordalékhozamnak felel meg (ez mintegy 1,3 Mt éves hordalékterhelést jelent). A Mosoni-Duna a Duna egy szabályozott mellékága, amelynek éves átlagos vízhozama kb. 50 m<sup>3</sup>/s, ám a vízhozamát a Duna áradásakor a Duna visszaduzzasztó hatása jelentősen befolyásolhatja. A Mosoni-Duna átlagos szélessége 60 m, átlagos vízmélysége 4 m. A vizsgált terület közepén, Gönyűnél (1790,61 fkm) található az a vízrajzi monitoring állomás, amelynek szelvényében történt az adatgyűjtés (vízállás rögzítése, expedíciós vízhozam- és lebegtetett hordalékmérés).

A monitoring állomástól alig 1 km-re alvízi irányban a meder jelentősen kiszélesedik, a Duna több mint 100 m szélessé válik. A főmeder hajózhatóságának biztosítása és fenntartása érdekében korábban kiterjedt folyószabályozási munkálatokat hajtottak végre. Az Erebe-mellékágrendszer (I. ábra) ezen a kiszélesedő szakaszon belül található az 1789,48 és 1785,31 fkm között. A mellékágrendszeren belüli szigetek és mellékágak szinte teljesen védve vannak a főági hatásoktól a megfelelő hajózási feltételeket biztosító vezetőműveknek köszönhetően. A mellékág bejáratát egy fenékküszöb zárja el úgy, hogy középvízi vízjárás alatt jelenleg semmiféle kapcsolata nincsen a mellékágnak a Dunával, azaz nincs biztosítva a vízutánpótlása. Ennek ellenére a mellékág jelentősen kitett a Mosoni-Duna hordalékcsóvjá hatásainak.

A mellékágrendszerben kialakuló alacsony áramlási sebességek, valamint az áradások során szállított nagy mennyiségű hordalék és szerves anyag miatt a feliszapolódás kifejezetten jelentős. A feliszapolódást tovább fokozza a növényzet és az erdők fejlődése. Bár ezek az erdős területek ökológiai szempontból értékesek és fokozottan védettek, ám a közelmúltban aggasztóan csökkent a biodiverzitás és a mellékág formakincsének egyszerűsödése következett be. Ennek ismeretében sürgősen szükség van a mellékágrendszer revitalizációjára, a feliszapolódott réteg kotrására és a mellékágrendszer folyamatos vízutánpótlásának megoldására.

### Terepi adatgyűjtés

Ebben a tanulmányban egy 3D numerikus hordaléktranszport-modellt adaptáltunk átfogó, terepi lebegtetett hordalékmérésből származó adatok és a lebegtetett hordaléktöménység térbeli változékonyságának értékelése alapján. A terepi adatgyűjtést a SEDDON II elnevezésű Interreg V-A Ausztria-Magyarország Együttműködési Programban megvalósított projektben hajtottuk végre. A lebegtetett hordaléktranszport 3D-s eloszlásának leírása érdekében a mintaterületen 1-1 szelvényben (I. ábra) a projekt keretében 2018-2022 között eseti jelleggel vízmintákat gyűjtöttünk egy US P-61-A1 izokinetikus mintavevővel. A mintavételi pontok helyét a többpontos módszer (Haimann és társai 2014) alapján határoztuk meg, amely előírja a függőleges számát és helyzetét a szelvényben belül (itt: öt, egyenlő távolságban megválasztott függőleges a főmederben), illetve megadja az egyes mintavételi pontok helyzetét a függőlegeseken belül (azaz a mért vízmélység 5, 20, 60, 80 és 95%-ánál). A módszert magyar nyelven Pomázi és társai (2020) ismertette. Ez a megközelítés lehetővé tette a lebegtetett hordalékvándorlás szisztematikus feltérképezését a monitoring szelvényben. Ezzel párhuzamosan áramlásméréseket végeztünk egy 1200 kHz ADCP (akusz-

tikus Doppler elvű áramlásmérő) műszerrel a függőleg menti sebességprofilok előállítására céljából. Emellett mozgójármű ADCP méréseket is végeztünk a vízhozam meghatározására. A vízhozam és a lebegtetett hordalék adatok a modell legfontosabb bemeneti adataiként szolgáltak.

A vízminták lebegtetett hordaléktöménységét laboratóriumban határoztuk meg a hagyományos szűrőpapíros módszerrel (Pomázi és társai 2020). A hordaléktöménységen kívül a lebegtetett hordalék szemösszetételét is meghatároztuk a Sequoia Scientific által gyártott LISST-Portable XR lézerdiffrakciós műszerrel (Pomázi és Baranya 2020). A szelvény menti teljes lebegtetett hordalékhozamot a Haimann és társai (2014) alapján Pomázi és társai (2020) által magyar nyelven ismertett módszertan segítségével számítottuk. A kg/s-ban számszerűsített lebegtetett hordalékhozam a hordaléktöménység és az áramlási sebesség szorzatának a teljes keresztmetszeti területen történő integrálásának az eredménye.

### Numerikus modellezés

#### Az alkalmazott modell

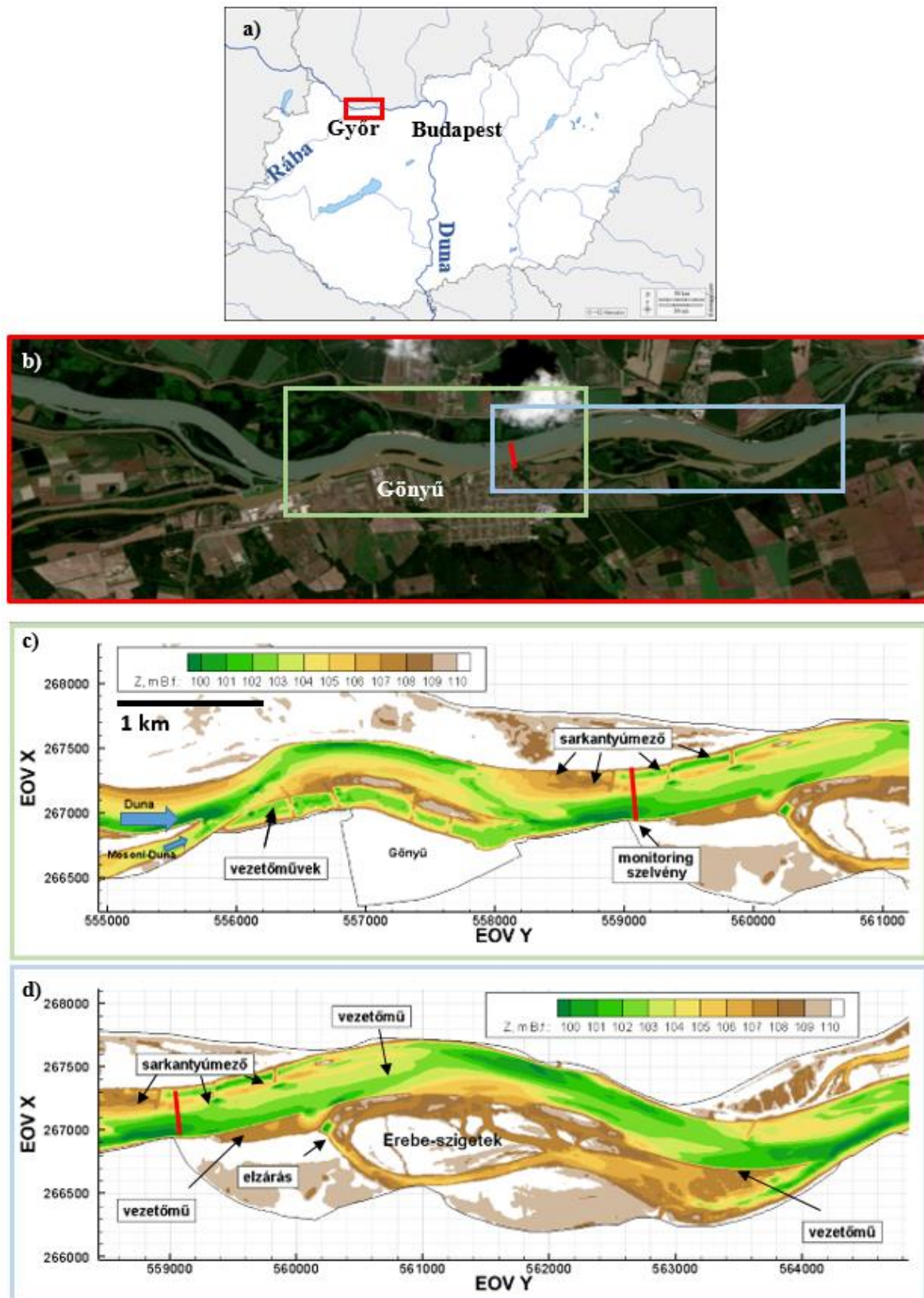
A hidrodinamikai és hordaléktranszport-folyamatok modellezése a SSIIM (Sediment Simulation in Intakes with Multiblock Option; Olsen 2009) modellel történt. Korábbi tanulmányokban a modellt már sikeresen adaptálták különböző tér- és időbeli felbontásokban, Olsen (2003, 2021) meanderező és fonatos medrek fejlődését vizsgálta; Havn és társai (2013) feliszapolódási szimulációkat végeztek egy vízerőművi tározó esetében, Baranya és társai (2013) két folyó összefolyásánál elemezték a turbulens viszonyokat, Török és társai (2017) a folyómeder helyi kimosódását, illetve páncélozódását modellezték, Olsen és Hillebrand (2018) pedig hosszú távú kotrási szimulációt végzett egy tározó esetében.

A modell a véges térfogat módszerrel oldja meg a Reynolds-átlagolt Navier-Stokes (Reynolds Averaged Navier-Stokes – RANS) egyenleteket. A turbulens jelenségek figyelembevételéhez a modell a k-ε modellt használja, amely kiszámítja a turbulenciaszinteket a modelltartományon belül. A modell a lebegtetett hordalék vándorlását a lebegtetett hordaléktöménységre felírt advekciós-diffúziós egyenlettel (I. egyenlet) írja le:

$$v_s C + D_z \frac{\partial C}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

ahol:  $v_s$  az ülepedési sebesség,  $C$  a lebegtetett hordaléktöménység,  $D_z$  a függőleges irányú diffúziós együttható,  $z$  a vizsgált pont vertikális helyzete.

A modell több, különböző szemcseméretű és ülepedési sebességű hordalékfrakciót képes egyszerre szimulálni. A modelltartomány diszkrétizálása vízszintesen strukturált rácshálóval történik, az átlagos cellaméret 15 x 6 méter (hossz- és keresztirányban). Függőleges irányban a helyi vízmélységtől függően változó számú, maximum 21 réteget alkalmaztunk az áramlási és a lebegtetett hordalékvándorlási jellemzők vertikális változásainak leírása érdekében. A medererdesség a folyómeder jellemző szemcsemérete alapján került meghatározásra. Ehhez a van Rijn (1984a) alapján  $3d_{90}$ -ben meghatározott, úgynevezett érdességi magasságot használtuk, ahol  $d_{90}$  az a szemcseméret, amelynél a hordalékminta 90%-a finomabb. A mederfenék közeli úgynevezett egyensúlyi hordaléktöménység területileg és áramlási viszonyoktól függő értékeit van Rijn (1984b) lebegtetett hordalékvándorlásra kifejlesztett modelljével adtuk meg.



1. ábra. A vizsgált Duna-szakasz több nézete: a) a vizsgált szakasz földrajzi elhelyezkedése; b) műholdfelvétel (Sentinel-2) a vizsgált szakasról (piros: mintaterület, kék és zöld keret: vizsgált szakaszok); c) folyószabályozási művek a vizsgált terület felső szakaszán (zöld keret a műholdfelvételen); d) folyószabályozási művek a vizsgált mellékágrendszer közvetlen környezetében (kék keret a műholdfelvételen)

Figure 1. Multiple views of the study reach at the Danube River: a) geographic location of the study reach in Hungary; b) satellite image (Sentinel-2) of the study reach (red: monitoring cross section, blue and green boxes: studied sections); c) training works along the upper section of the study reach (green box in the satellite image); d) training works around the studied side arm system of the study reach (blue box in the satellite image).



A modellvizsgálatokat különböző víz- és hordalékjárási forgatókönyv esetére végeztük el *Pomázi és Baranya (2022)* munkájának eredményei alapján:

i) az első változatban a Duna középvízhozama ( $Q_{D1} = 1\,953\text{ m}^3/\text{s}$ ) és a Mosoni-Duna (Rába) nagyvize találkozik;

ii) a második és harmadik változatban a Duna nagyvize ( $Q_{D2} = 4\,302\text{ m}^3/\text{s}$ , illetve  $Q_{D3} = 5\,621\text{ m}^3/\text{s}$ ) mellett a mellékfolyó hatása elhanyagolható.

A lebegtetett hordalék szemösszetétele *Pomázi és Baranya (2022)* tanulmánya eredményei alapján került meghatározásra. A tanulmányban meglehetősen homogén szemösszetételt mutattak ki a vizsgált területen, ezért a lebegtetett hordalékot két különböző méretosztályba soroltuk, ahogyan az az 1. táblázatban látható. Az első méret-

osztály a lebegtetett hordalék jellemző frakciójának felel meg, amely főként  $20\ \mu\text{m}$  medián átmérőjű iszapszemcsékből áll. A második méretosztály a durvább frakciót képviseli, amely finom homokszemcsékből épül fel ( $d = 63\ \mu\text{m}$ ). Az egyes méretosztályokba tartozó hordalékcszemcsék ülepedési sebességének számítása a *Ferguson és Church (2004)* által javasolt explicit egyenlet szerint történt, az egyes méretosztályok medián átmérőjét véve a számítás alapjául. Ez az univerzális egyenlet minden szemátmérőre érvényes a kvarc-sűrűségű szemcsék esetében, beleértve a homokfrakció átmeneti mérettartományát is. Ez a paraméterezési módszer lehetővé tette a lebegtetett hordalék ülepedésének reális leírását a modellben. *Pomázi és Baranya (2022)* megállapításai alapján a homokfrakció aránya 10% középvízi, és 15% nagyvízi körülmények között.

1. táblázat. A lebegtetett hordalék szemcseméret-osztályai (átlagos szemátmérő, ülepedési sebesség és előfordulási valószínűség)

Table 1. Size classes of suspended sediment (median particle sizes, settling velocities and probabilities in the particle size distribution, respectively)

Osztály	Átlagos szemátmérő	Ülepedési sebesség	Előfordulás
1	$6,3 \cdot 10^{-4}\text{ m}$	$9,78 \cdot 10^{-2}\text{ m/s}$	10-15%
2	$2 \cdot 10^{-5}\text{ m}$	$1,20 \cdot 10^{-3}\text{ m/s}$	85-90%

Modellvizsgálataink során nem végeztünk hagyományos értelemben vett kalibrációt, azaz a különféle modellparaméterek beárnyosítását. A hidrodinamikai modell szabad paramétereit, a mederérdességet, helyszíni mederanyag-mintavételezés alapján határoztuk meg. A transzportmodellben a vizsgált jelenségek – csóvaterjedés, illetve kiülepedés – leírására legmegfelelőbbnek bizonyuló advekcíós-diffúziós egyenletben két szabad paraméter van: a diffúziós együttható ( $D_z$ ) esetén az irodalmi értéket használtuk, míg az ülepedési sebesség ( $v_s$ ) a vizsgált szemösszetételi tartományon nem bizonyult érzékenynek. Ennek megfelelően a továbbiakban a modell igazolása történt meg.

### Revitalizációs modellváltozatok

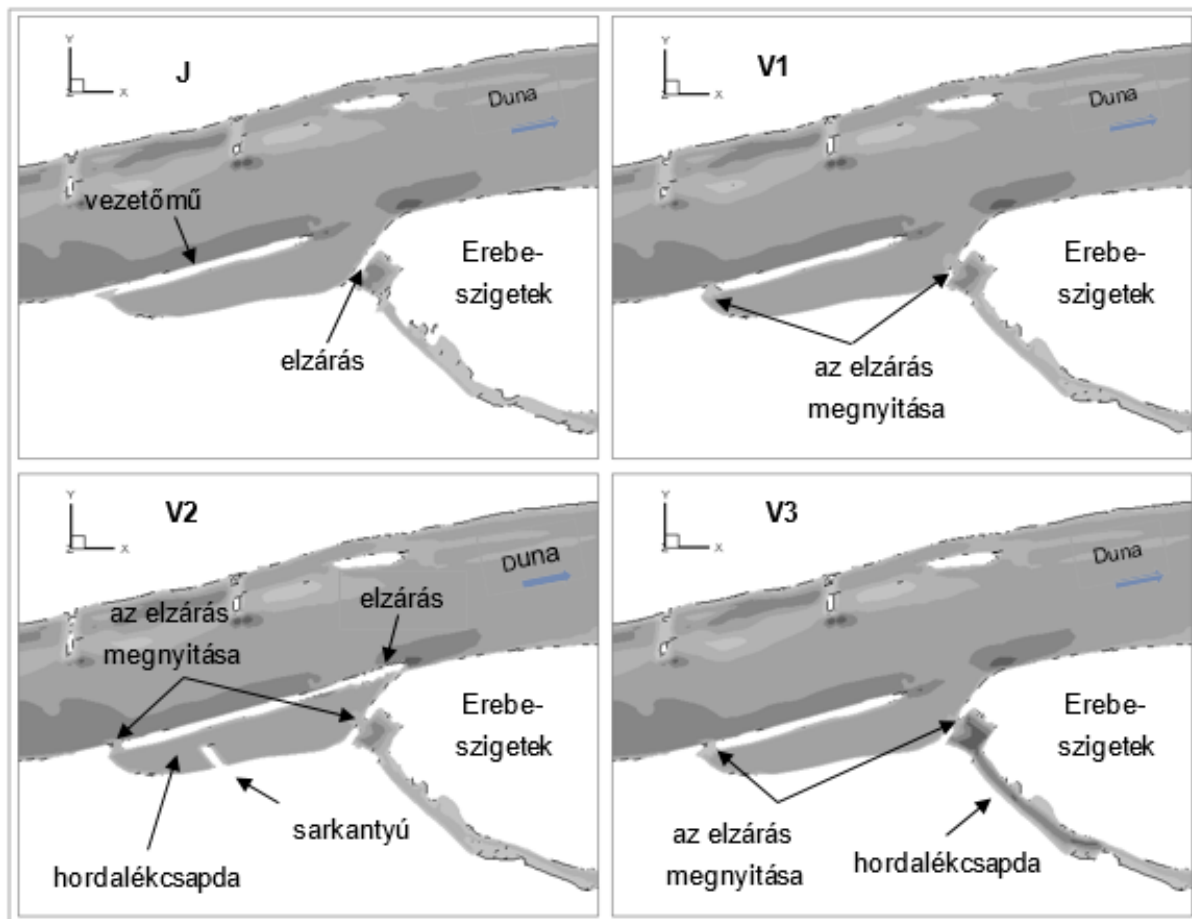
Az igazolt modellel mellékág-revitalizációs beavatkozások hatásait is vizsgáltuk. Három különböző vizsgálati esetet (2. ábra, V1-V3) modelleztünk:

V1) a mellékág elzárásának részleges megnyitása – annak érdekében, hogy a vízutánpótlás a jelenleginél alacsonyabb vízállások idején is biztosítva legyen – egyidejűleg a vezetómű átvágásával, meghosszabbítva ezáltal a mellékágba jutó víz (és hordalék) útját;

V2) az előző változatot kiegészítve a vezetómű túlloldali lezárásával, valamint egy kisebb sarkantyú beépítésével a vezetómű mögötti medencébe, így alakítva ki egy hordalékcsapdát egy könnyen hozzáférhető helyen;

V3) az első változatot kiegészítve a folyómeder 5 m-es mélyítésével úgy, hogy a mederszintje megegyezzen az elzáró fenékküszöb mögötti hordalékcsapda fenékszintjével a mellékág első 500 m-es szakaszán.

A beavatkozások hatásait abban az esetben vizsgáltuk, amikor a Dunában átlagos a vízhozam ( $Q_D = 1\,801\text{ m}^3/\text{s}$ ), de azt jelentősen befolyásolja a hordalékban gazdag mellékfolyó nagyvízhozama ( $Q_M = 152\text{ m}^3/\text{s}$ ).



2. ábra. A modellezett beavatkozások áttekintő ábrája

(J: jelen állapot; V1: az elzárás megnyitása; V2: az elzárás megnyitása és hordalékcsapda kialakítása a mellékág előtti medencében; V3: az elzárás megnyitása és hordalékcsapda kialakítása a mellékágban)

Figure 2. Schematic view of the modelled measures

(J: current state; V1: inlet opening; V2: inlet opening with sediment trap before the side arm; V3: inlet opening with sediment trap in the side arm)

A tanulmányban bemutatásra kerülő modellváltozatok áttekintését a 2. táblázat tartalmazza.

2. táblázat. A modellváltozatok áttekintő táblázata (SSC: lebegtetett hordaléktöménység)  
Table 2. Summary table of the modelled scenarios (SSC: suspended sediment concentration)

Vízállási állapot	Duna		Mosoni-Duna		Bemenő adatok forrása	Célok
	Q <sub>D</sub> , m <sup>3</sup> /s	SSC, mg/l	Q <sub>t</sub> , m <sup>3</sup> /s	SSC, mg/l		
1	1 801	42	152	395	terepi mérések	igazolás
2	4 195	273	107	225		
3	5 531	609	90	269		
<b>Változatoknál alkalmazott vízállási állapot</b>						
<b>Változat jele</b>						
J, V1, V2, V3	1 801	42	152	395	Q: statisztika, SSC: hordalék-hozam-görbék	beavatkozások hatásvizsgálata

## EREDMÉNYEK

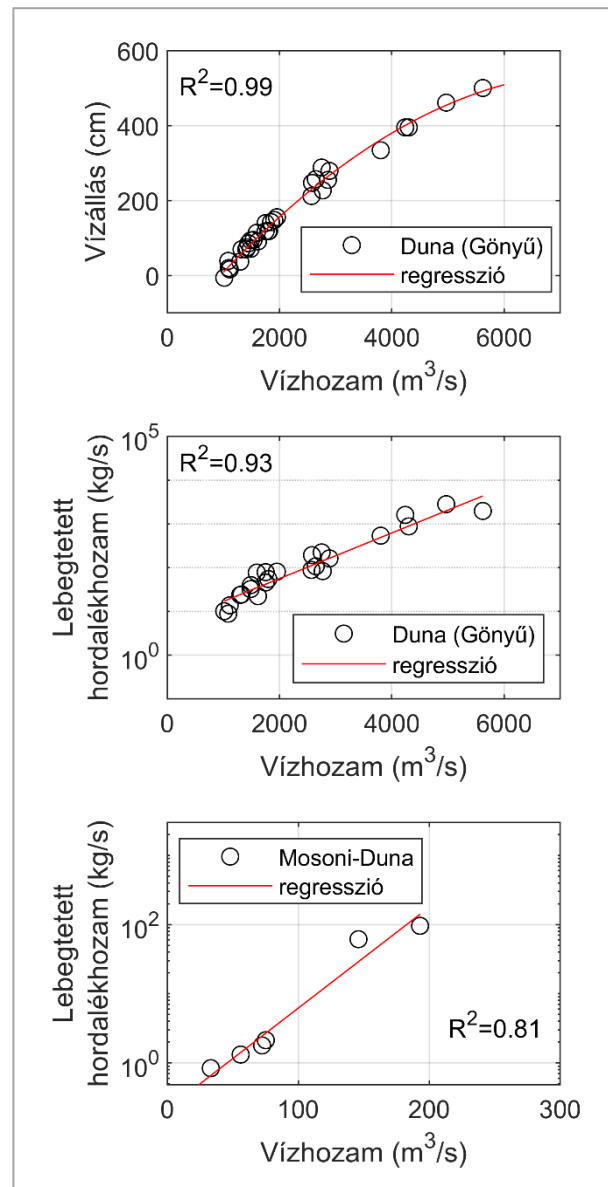
### Víz- és hordalékhozam-görbék

A SEDDON II projekt keretében (Baranya és társai 2022) 2018 és 2022 között végzett számos expedíciós terepi mérési kampány lehetővé tette a hidromorfológiai paraméterek közötti összefüggések (hozamgörbék) (3. ábra) meghatározását mind a gönyüi vízrajzi állomás szelvényében, mind a Mosoni-Duna egy álta-

lunk megválasztott szelvényében. Míg a Duna esetében az illesztett regresszió nagyon erős ( $R^2 > 0,80$ ), addig a Mosoni-Dunán végzett jóval kevesebb számú mérés nagyobb bizonytalanságot eredményezett. A hozamgörbék kiemelkedő jelentőséggel bírnak a különféle hidromorfológiai tanulmányok készítése során és alapvető eszközként szolgálnak például a hatásvizsgálatok, illetve modellezési tanulmányok elvégzésekor.

A felállított hozamgörbék segítségével a modell bemeneti adatai, mint például a vízhozam, a vízszint és a lebeg-

tett hordalékhozam (vagy -töménység) könnyen meghatározhatóak bármely, szimulációt igénylő feladathoz.



3. ábra. A vízállás és a vízhozam (fent), illetve a vízhozam és a lebegtetett hordalékhozam (középen) között a Duna 1790,61 fkm szelvényében felállított kapcsolat; és a vízhozam és a lebegtetett hordalékhozam között a Mosoni-Duna 0,30 fkm szelvényében felállított kapcsolat (lent)

Figure 3. Rating curves of water stage-flow discharge (top) and flow discharge-suspended sediment load (middle) in the studied cross section of the Danube River (1790,60 rkm); flow discharge-suspended sediment load rating curve for the tributary (0,30 rkm) (bottom)

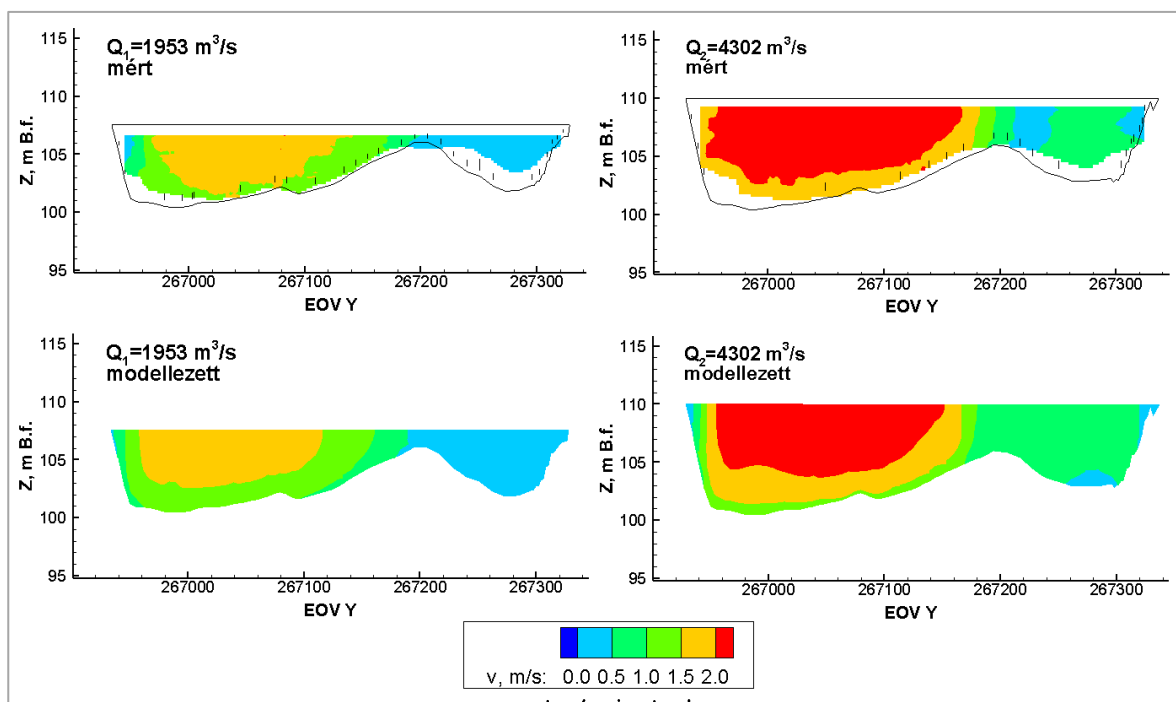
További mérési eredmény, hogy még a korlátozott számú diszkrét (pontbeli) mintavételezéssel is lehetséges volt a lebegtetett hordalékvándorlás szelvény menti változékonyságának detektálása, amelyet Pomázi és Baranya (2022) már bemutatott, mozgóhajós akusztikus hordaléktérképezések alapján. A szelvény mentén végzett ADCP mérések kalibrálása útján előállított hordaléktöménység-mezők jelentős szelvény menti inhomogenitást mutatnak, amelyet a Duna és a hordalékban gazdag Mosoni-Duna vízhozamának úgynevezett relatív különbsége határoz meg (Pomázi és Baranya 2022).

#### A 3D hidromorfológiai modell igazolása

A hidrodinamikai modellt részletes ADCP mérésekkel igazoltuk. Összességében eltérő hidrológiai állapotokra jó egyezést mutat a mért és a modellezett áramlási sebességek közötti összehasonlítás, ami a modell pontosságát jelzi. A 4. ábra a mért és a szimulált áramlási sebességek összevetését mutatja a vízrajzi állomás szelvényében. A modell sikeresen reprodukálja az áramlási sebességek térben változó jellegét, amelyet a bal part mentén lévő sarkantyúmező okoz. Az átlagos vízhozam alatt (azaz < 2 200 m<sup>3</sup>/s-os vízhozamnál) (4. ábra, balra) a mo-

dell jól reprodukálja a sarkantyú mögötti területre jellemző alacsony áramlási sebességeket. Másrészt, amikor a vízszint meghaladja a középvízszintet, a víz átbukik a sarkantyún, aminek

eredményeképpen már a sarkantyú mögötti zóna is aktívan részt vesz a vízszállításban. A modell jól visszaadja ezt a dinamikus folyamatot, amint azt a 4. ábra (jobbra) mutatja.



4. ábra. A mért és modellezett áramlási sebességek összehasonlítása

Megjegyzés: az ADCP mérésben rejlő limitációk hangsúlyozása érdekében a szelvény széle a fekete körvonallal, míg az ADCP által nem mért terület üres

Figure 4. Comparison of measured and modelled flow velocities

Note: to highlight the limitations in the ADCP measurements, the edge of the cross section is marked by a continuous black line, while the unmeasured area is blanked

A hordaléktranszport-modell igazolási folyamata során összehasonlítottuk a terepi, fizikai mintavételből kapott pontszerű lebegtetett hordaléktöménységeket a szimuláció által kapott értékekkel (5. ábra, balra). Ezt az összehasonlítást a mért lebegtetett hordaléktöménység reprezentatíván széles tartományán tettük meg. Az igazolás elsődleges célja az volt, hogy felmérje a modell pontosságát és megbízhatóságát a lebegtetett hordalékszállítás térbeli változékonyságának reprodukálásában. Az első változatban a Duna középvízhozama és a Mosoni-Duna (Rába) nagyvize találkozik – ekkor a mellékfolyó hordaléksóvája még a monitoring szelvényben is szembevető (5. ábra, jobbra lent). A második változatban a Duna nagyvize mellett a mellékfolyó hatása elhanyagolható – a legmagasabb lebegtetett hordaléktöménység a szelvény közepén jelentkezik (5. ábra, jobbra középen és fent). A mért és modellezett értékek közötti eltérésről elmondható, hogy nagyságrendje megegyezik a mérési módszertanban rejlő bizonytalanságokéval (Pomázi és Baranya 2020).

Az egyes változatokhoz tartozó bizonytalanságok, illetve a lebegtetett hordalékvándorlás térbeli mintázatának összetettsége ellenére a modell jó egyezést mutatott a mért adatokkal. Az eredmények alapján megállapítható, hogy az alkalmazott modellezési megközelítés valóban alkalmas a lebegtetett hordalékvándorlási folyamatok szimulálására.

#### A revitalizációs beavatkozások hatása a mellékág feliszapolódására

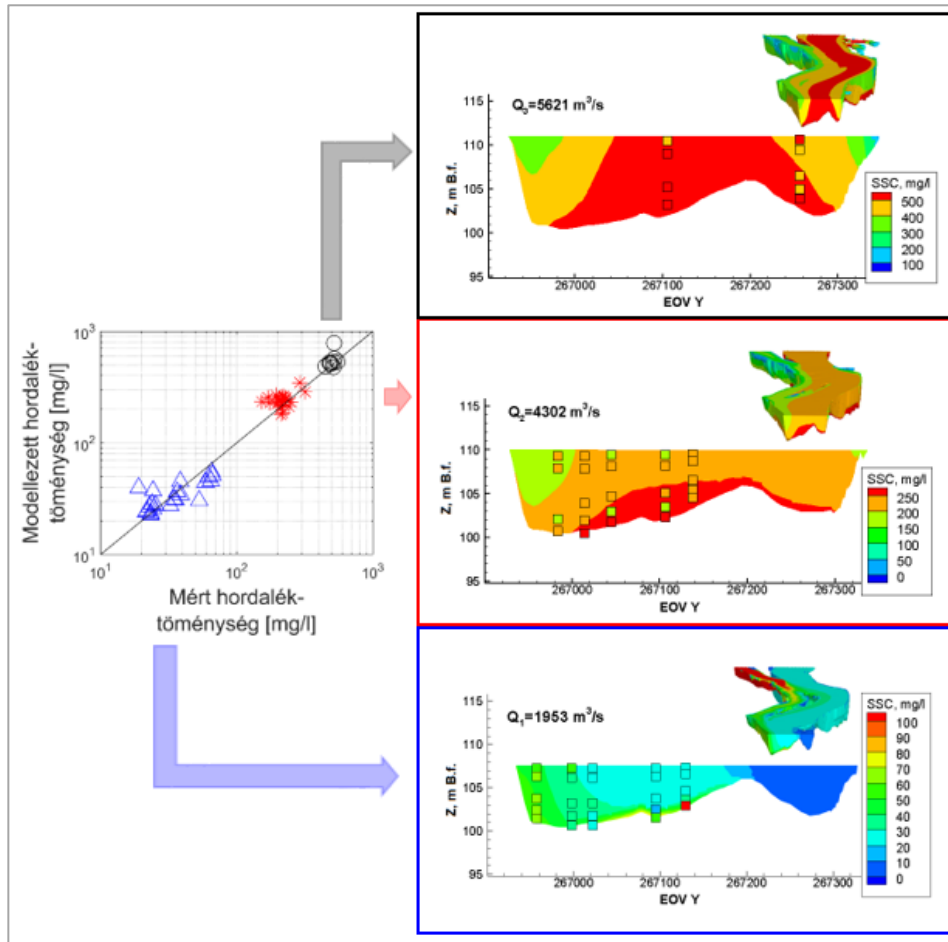
A Duna vizével nem keveredő hordaléksóva útját a meder hidromorfológiája határozza meg, ami azt jelenti, hogy

a külső ívekben a jobb part felé tolódik, míg belső ívekben a szelvényen belül tágul (1c. ábra). Amikor a hordaléksóva eléri a mellékágrendszer, még mindig jelentős hordaléktöménységgel rendelkezik. A jelenlegi (referencia) állapotban (6. ábra, J) a hordaléksóva egy kis része befolyik a vezetőmű mögötti medencébe és mivel nem jut be a mellékágba, ez a zavaros víz a medencében örvénylik, majd végül kiülekszik belőle a hordalék (7. ábra, J). A mellékág alvízi vége nyitott, így ki van téve a Duna visszaáramlásának és a visszaduzzasztó hatásoknak is. Mivel a jelen állapotban lényegében nincs vízmozgás a mellékágban, az alvízi végen nagy mennyiségű lebegtetett hordalék rakódik le a hordaléksóvából. Az elzárás első változat szerinti megnyitása esetén (6. ábra, V1) 25 m<sup>3</sup>/s vízhozam lép be a mellékágba. Ugyanakkor 20 mg/l lebegtetett hordalék is bejut a mellékágba. Bár a hordaléksóvából származó hordalék egy részét késleltetni lehet a vezetőmű átvágásával, a mellékág potenciális feliszapolódása várható (7. ábra, V1), ami rendszeres kotrást tesz szükségessé. A második beavatkozás (6. ábra, V2) esetén ugyanakkora bejutó vízhozam biztosított, ám a hordaléksóva útjának meghosszabbításával. A vezetőmű mögötti medencében kialakított sarkantyú nemcsak a hordaléksóva útját tereli el, hanem hatékonyan csapdázza is a hordaléket (7. ábra, V2). Ebben a változatban a mellékágba bejutó lebegtetett hordalékterhelés csupán egyötöde az előzőnek. A mellékágba bejutó, kis mennyiségű lebegtetett hordalék aztán lényegében azonnal le is rakódik. A harmadik változatban (6. ábra,



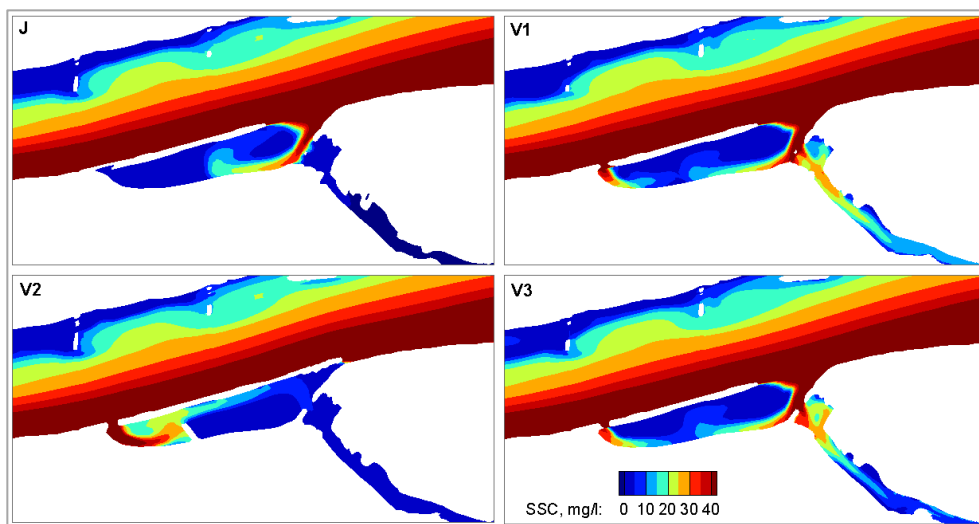
V3) a mellékágba bejutó vízhozam megegyezik a korábbiakkal, a mellékágba bejutó hordaléktöménység pedig 20 mg/l, mint az első változatban. A lebegtetett hordalék

nagy része azonban a mellékág első 500 m-én kimélyített szakaszán le is rakódik (7. ábra, V3), ezáltal a hordaléklerakódás egy kisebb területen koncentrálódik.

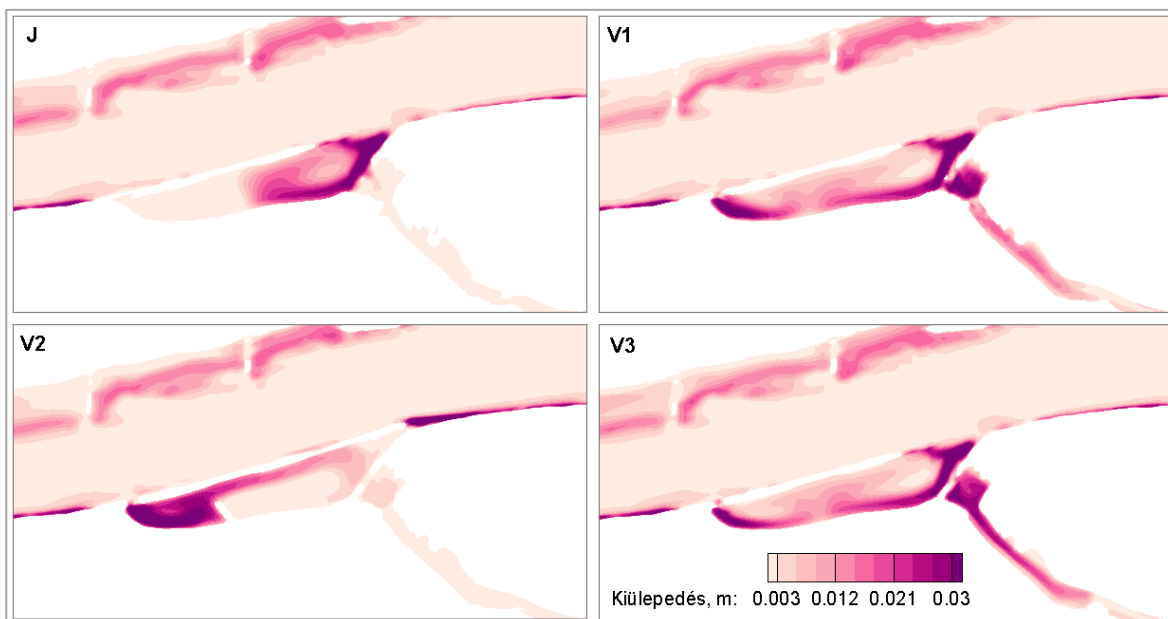


5. ábra. A mért és modellezett lebegtetett hordaléktöménység összehasonlítása (a három változat eredménye különböző színnel) (bal); és a diszkrét mérésekből származott lebegtetett hordaléktöménység összehasonlítása a modellezett lebegtetett hordaléktöménység-mezővel (lent: dunai középvíz a mellékfolyó jelentős hozzájárulásával; fent és középen: dunai nagyvíz a mellékfolyó elhanyagolható hozzájárulásával) (jobb)

Figure 5. Comparison of measured and modelled concentrations (with different colours for the three model scenarios) (left); and comparison of measured (discrete points) and modelled (contour plot) distribution of concentration (bottom: normal water regime with significant tributary inflow; top and middle: high flow regime with negligible tributary inflow) with miniature top views (right)



6. ábra. A lebegtetett hordaléktöménység eloszlása az egyes változatokban (J: jelen állapot; V1-V3: vizsgált beavatkozások)  
Figure 6. Comparison of the SSC distribution in each modelled scenario (J: current state; V1-V3: investigated measures)

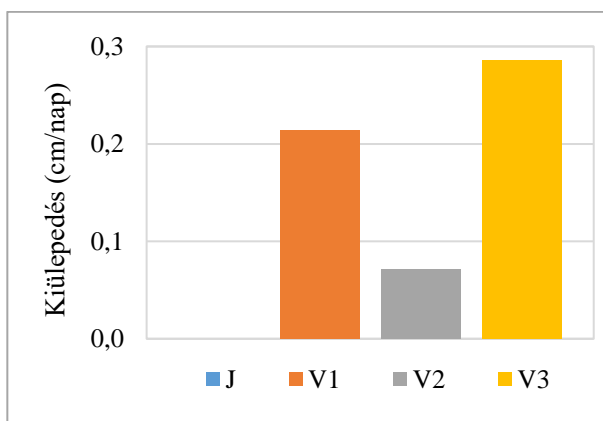


7. ábra. A kiülepedett hordalék eloszlása az egyes modellváltozatokban (J: jelen állapot; V1-V3: vizsgált beavatkozások)  
 Figure 7. Comparison of the deposited sediment in each modelled scenario (J: current state; V1-V3: investigated measures)

A 3. táblázat tartalmazza a változatok összehasonlító táblázatához meghatározott változókat. Az egyes változatok során kiülepedő hordalékmennyiség alakulását a 8. ábra szemlélteti.

3. táblázat. Az eredmények összefoglaló táblázata (J: jelen állapot; V1-V3: vizsgált beavatkozások)  
 Table 3. Summary table of results (J: current state; V1-V3: investigated measures)

Paraméter	Modellváltozat			
	J	V1	V2	V3
Átlagos áramlási sebesség a mellékágban (m/s)	0	0,25	0,25	0,25
A mellékágba jutó hordaléktöménység (mg/l)	0	20	4	20
Átlagos hordaléktöménység a mellékág első 500 m-én (mg/l)	0	17	4	10
Hordaléktöménység a mellékág Duna által befolyásolt végén (mg/l)	35	10	5	10
Átlagosan kiülepedett hordalék a mellékágban (cm/nap)	0	0,21	0,07	0,29
Átlagosan kiülepedett hordalék a mellékág első 500 m-én (cm/nap)	0	2,14	0,71	4,29
Átlagosan kiülepedett hordalék a mellékág végén (cm/nap)	0,29	0,14	0,14	0,14



8. ábra. A hordalék kiülepedésének átlagos intenzitása az egyes változatokban (J: jelen állapot; V1-V3: vizsgált beavatkozások)  
 Figure 8. The average intensity of sediment deposition in the modelled scenarios (J: current state; V1-V3: investigated measures)

## DISZKUSSZIÓ

### A 3D modellezés adatigénye

A háromdimenziós morfodinamikai modellek megfelelő igazolása jelentős kihívást jelent a szükséges terepi adatok (pl. medergeometria, vízállás, vízhozam, lebegtetett hordalékhozam) miatt. Az ilyen terepi adatok rendelkezésre állása gyakran igen bizonytalan. A hordaléktranszport-modellek igazolása jellemzően alkalmi helyszíni mérésekből vagy folyamatos, de pontszerű monitoringból származó adatok összehasonlításával történik. A korlátozott tér- és időbeli felbontás azonban akadályozza a modellek megfelelő igazolását. A hordaléktranszport-modellek eredményeit leggyakrabban a lebegtetett hordaléktöménység profiljával (*Zhang és társai 2021*), idősorokkal (*Xie és társai 2019*), szelvény menti eloszlásokkal (*Haimann és társai 2018*) vagy morfológiai változásokkal (*Olsen és Hillebrand 2018*) hasonlítják össze, de akár műholdfelvételek is felhasználhatók a lebegtetett hordaléktranszport értékelésére (*Tu és társai 2019*).

### Térbeli inhomogenitás

Hordalékcsóvák elkeveredésének vizsgálata során kihívást jelent a jelenség tér- és időbeli változékonysága, amit igen nehéz felmérni pusztán terepi mérésekkel. Számos rövid idejű tanulmány tett kísérletet ilyen esetek modellezésére. *Haimann és társai (2018)* például folyami kotrások optimalizálását vizsgálták a Duna egy szakaszán kis- és középvízes áramlási viszonyok mellett, *Trithart és társai (2019)* pedig a Duna egyik mellékfolyóján (Inn) lévő tározóból leeresztett hordalék terjedését vizsgálták közép- és nagyvíz esetén, illetve egy csapadékesemény során. Mindkét tanulmány néhány terepi mérésre korlátozódott, és míg *Haimann és társai (2018)* szelvény és hossz menti akusztikus hordaléktérképezést végeztek a hordalékcsóva terjedésének követésére, addig *Trithart és társai (2019)* az ADCP visszavert jelerősségét kalibrálva, négy függőlegesen határozták meg a hordaléktöménység-profilokat a modell igazolásához. Ezzel szemben jelen tanulmány egy több évre kiterjedő ADCP mérésorozatból előállított hordaléktöménység-mezők elemzésén (*Pomázi és Baranya 2022*) alapul. A modell igazolásához célirányosan olyan méréseket választottunk ki, amelyek megfeleltethetők az előzőleg beazonosított mintázatoknak.

Amint azt *Pomázi és Baranya (2022)* mérései is mutatják, a vizsgált területen jelentős tér- és időbeli változékonyság tapasztalható a lebegtetett hordalékszállításban. A szerzők a szelvény menti eloszlás két különböző mintázatot azonosították a Duna és a Mosoni-Duna vízhozamának relatív különbsége alapján. Azonban a vizsgált területen a terepi mérések korlátai miatt kihívást jelent a jelenség elemzése, ugyanis ez az inhomogén térbeli eloszlás nem írható le megfelelően csak korlátozott számú pontban történő közvetlen mintavétellel. Még az olyan közvetett megközelítések is, mint az ADCP visszavert jelerősség kalibrálása, további vizsgálatokat igényelnek, mielőtt eredményeiket kvantitatív elemzésekre lehetne használni (*Pomázi és Baranya 2022*). Az ebben a tanulmányban bemutatott modellezési megközelítés azonban sikeresnek bizonyult a lebegtetett hordalékvándorlás inhomogén térbeli eloszlásának leképezésében. A beazonosított mintázatok

*és Baranya 2022*) alapján optimalizálható volt a korlátozott számú terepi mérésekből álló validációs adatkészlet. Ennek eredményeként néhány, de jelentősen széles hordaléktöménység-tartományt lefedő diszkrét mintavételezés elegendő volt a modell sikeres igazolásához. Bemutattuk, hogy a statisztikailag szignifikáns események modellezésével az alkalmazott megközelítés jelentősen hozzájárulhat a lebegtetett hordaléktranszport inhomogén tér- és időbeli változékonyságának hatásainak megismerésében.

*Zhang és társai (2021)* szintén egy pillanatképet mutattak be a lebegtetett hordaléktöménység inhomogén térbeli eloszlásáról a kínai Három-Szurdok-tározóban. A modellezett és mért profilok összehasonlítása közvetlenül a gát felvízi oldalán vertikális rétegződésre utalt, ám a felső és alsó rétegben akár 100%-os eltérés is tapasztalható volt a hordaléktöménységben. Tanulmányunkban, mely egy hordalékban gazdag mellékfolyó hatását vizsgálja, hasonló különbség figyelhető meg horizontálisan is. Míg *Zhang és társai (2021)* nem vette figyelembe például a gát különböző működésének hatását, addig a három kiválasztott hidrológiai forgatókönyv modellezésével jelen tanulmány képes volt széleskörűen bemutatni a vizsgált területen uralkodó térbeli mintázatokat.

Reprezentatív szimulációs eredmények és a hozzájuk tartozó műholdfelvételek vizuális összehasonlítása (*9. ábra*) továbbá azt sugallja, hogy a lebegtetett hordaléktöménység műholdképek alapján történő becslése, azaz a vízfelszín spektrális visszaverődése alapján (*Dethier és társai 2020*) hasznos lehet például a modell eredményeinek térben kiterjesztett igazolásában. A nagy mennyiségű hordalék miatt a Mosoni-Duna a Dunához képest rendkívül zavaros, és könnyen megkülönböztethető – akár például a Mekong-deltában szállított iszap (*Tu és társai 2019*).

### Revitalizációs beavatkozások támogatása

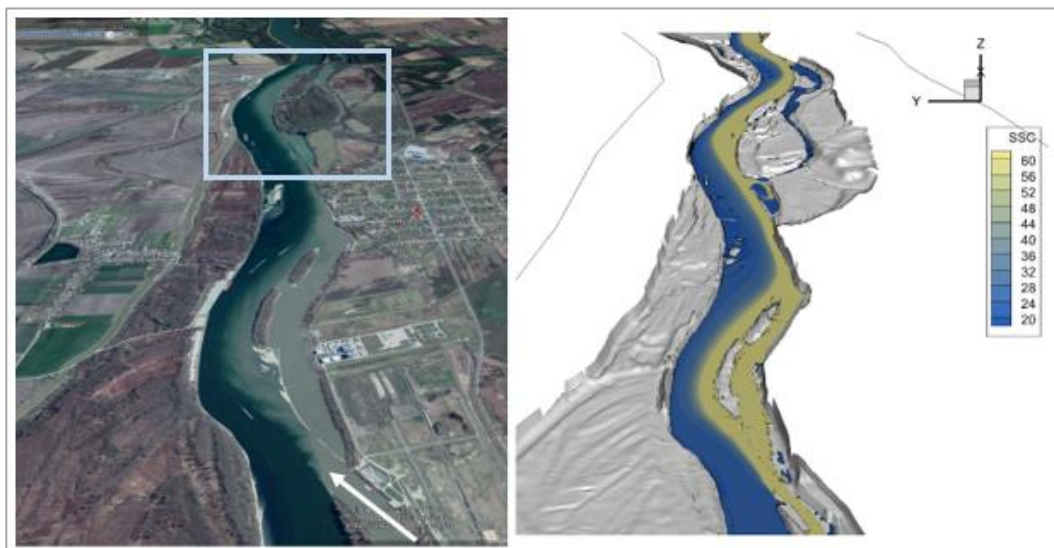
Számos folyami revitalizációs beavatkozásokat támogató numerikus modelltanulmánnyal találkozhatunk a szakirodalomban. Például *Glas és társai (2018)* a sarkantyú-kialakítás optimalizálását végezték el az osztrák Duna-szakaszon; *Binder és társai (2022)* természetalapú megoldásokat vizsgáltak szintén a Dunán, a hajózás biztosítása érdekében. *Glas és társai (2018)* tanulmánya a különböző sarkantyú-kialakítások lehetséges hatásait szimulálta kis-, közepes- és nagyvízi körülmények mellett. A hajózási útvonalban egy hónap alatt akár 0,20 m erózió is ki tudott alakulni. *Binder és társai (2022)* a folyó ökológiai funkciójának és a vízi élőhelyek fenntarthatóságának növelése érdekében mesterségesen kialakított kavicsszigeteket vizsgált. Az 1 hónapos szimuláció végén kb. 0,05 m erózió keletkezett a főmederben a telepített kavicsszigettel párhuzamosan, amely aztán a kavicssziget után lerakódott. Mindkét vizsgálat jelentősen hozzájárult a folyószabályozási intézkedések optimalizálásához. Az itt bemutatott esettanulmány hozzájárulása gyakorlatiasabb jellegű.

Esettanulmányunkban egy tipikus mellékág-revitalizációs beavatkozást mutattunk be, nevezetesen azt, hogy mi történik, ha a mellékág jelenlegi elzárását részlegesen megnyitják annak érdekében, hogy az ökológiailag szükséges vízutánpótlás az eddigieknél hosszabb időszakban bizto-

sítva legyen a mellékágban. Bemutattuk, hogy a jelenlegi állapotban a mellékágrendszernek középvíz alatt nincs kapcsolata a főággal, miáltal a mellékágrendszerben pangó víz alakul ki. A felállított hozamgörbék alapján tetszőleges vízjárási állapot szimulálható, itt most egy egyszerű, permanens állapotra vonatkozó esettel illusztráltuk, hogy hogyan támogathatja egy ilyen modellvizsgálat a beavatkozások tervezését. Mindhárom vizsgált revitalizációs beavatkozás megoldaná ezt a problémát, azonban egyúttal potenciális feliszapolódásnak téve ki ezzel a mellékágot. A modell eredményei alapján becsülhető, hogy mekkora mennyiségű hordaléktól mentesíthető a mellékág egy hordalécsapdával. A Mosoni-Duna kéthetes árhullámát véve például a Duna középvizes időszakában, az elzárás megnyitásával kb. 1 200 m<sup>3</sup> finom hordalék ülepszik ki a mellékág 3,75 km hossza mentén. A hordaléklerakódás eloszlása azonban optimalizálható, ha a kiülepedés egy jelentős részét a mellékág első 500 méterén, vagy akár még a mellékágba való bejutás előtt csapdázzuk. Mindkét megoldás kedvező, könnyen hozzáférhető helyet biztosítana a kotrási munkálatokhoz. A csapdázott hordalék becsült mennyiségének ismerete lehetővé tenné a költséges kotrási tevékenységek optimalizálását. Összehasonlításképpen, egy 1 hónapos szimuláció eredménye maximum 1,30 m lerakódást eredményezne a hordalécsapdában (Glas és társai 2018, Binder és társai 2022).

A különböző beavatkozások modellezésének egy további fontos szempontja a vízi élőhelyekre gyakorolt lehetséges hatásuk vizsgálata (Habersack és társai 2014, Tritthart és társai 2019, Fleit és társai 2020). Bár az Erebe-szigetek jelentős ökológiai értékkel bír, a témában való jártasság hiányában ezt a szempontot nem tudtuk figyelembe venni ebben a tanulmányban.

Ahogy a bevezetésben már említettük, az időközben megépült Mosoni-Duna torkolati műtárgy hatásainak vizsgálata sem képezhetette tárgyát a tanulmánynak, mivel alátámasztó méréseink még a megépülés előtti időszakban történtek. Azonban a modell alkalmas a műtárgy által megváltozott helyzet vizsgálatára is és tervezzük a hatásvizsgálat folytatását ezekre a helyzetekre is kiterjesztve.



9. ábra. A vizsgált terület madártávlatból – a Mosoni-Duna felől érkező hordalécsóva jelentősen befolyásolja a torkolattól 5 fkm-re található mellékágrendszert (téglalappal jelölve). (bal: Google Earth Engine műholdfelvétel; jobb: modelleredmény)

Figure 9. Perspective view of the study area – the sediment plume from the Mosoni-Duna strongly influences the side-arm (squared area) system 5 km downstream of the confluence (left: Google Earth Engine satellite image; right: simulation result)

## ÖSSZEFOGLALÁS

Dolgozatunkban bemutattuk, hogy egy, a Reynolds-Átlagolt Navier-Stokes egyenletekre épülő 3D hidrodinamikai számítógépes modell összekapcsolva a lebegtetett hordalékvándorlást leíró transzportmodellel alkalmas a hatékony eszköze a hidrodinamikai és a lebegtetett hordalékszálítási folyamatok numerikus leképezésére összetett geometriájú folyószakaszokon. A modelligazolást részletes, eltérő hidrológiai állapotokban végrehajtott áramlási sebesség és lebegtetett hordaléktöménység mérések alapján végeztük el. Ezáltal jó egyezést érthettünk el a szimulációs eredmények és a referenciaadatok között a vízhozam és a lebegtetett hordaléktöménység meglehetősen széles tartományában. Bár tapasztalható volt némi eltérés a mért és modellezett értékek között, ezek a különbségek a fizikai mintavételi, illetve a laboratóriumi elemzési módszerekben rejlő bizonytalanságok nagyságrendjébe esik. A modell sokoldalúsága és robusztussága lehetővé teszi, hogy

kellően pontosan modellezzük az áramlás és a hordalékdinamika közötti összetett kölcsönhatásokat, értékes betekintést nyújtva az összetett folyórendszerek viselkedésébe. Bemutattuk, hogy a modell képes reprodukálni a lebegtetett hordaléktöménység eloszlásának jelentős térbeli változékonyságát a vizsgált területen. Egy esettanulmányon keresztül bemutattuk a modellben rejlő lehetőségeket a folyó helyreállítási intézkedések támogatására. A modell alkalmazhatósága részletes előrejelzésre lehetővé teszi a döntéshozók számára, hogy megalapozott stratégiákat dolgozzanak ki a folyók helyreállítása, illetve szabályozása érdekében, amelynek célja például az ökológiai stabilitás biztosítása és az ökoszisztéma-szolgáltatások javítása.

## KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A közleményben bemutatott kutatás a SEDDON II-Interreg AT-HU projekt, valamint a Széchenyi Terv Plusz program keretében az RRF-2.3.1-21-2022-00008 számú projekt támogatásával valósult meg.

## IRODALOMJEGYZÉK

- Agrawal, Y.C., Hanes, D.M. (2015). The implications of laser-diffraction measurements of sediment size distributions in a river to the potential use of acoustic backscatter for sediment measurements. *Water Resources Research*, 51. pp. 8854-8867. <https://doi.org/10.1002/2015WR017268>
- Baranya S., Józsa J. (2010). ADCP alkalmazása lebegtetett hordalék-koncentráció becslésére. *Hidrológiai. Közlemény*, 90(3). pp. 17-22.
- Baranya S., Olsen, N.R.B., Józsa J. (2013). Flow analysis of a river confluence with field measurements and RANS model with nested grid approach. *River Research Applications*, 31. pp. 28-41. <https://doi.org/10.1002/rra.2718>
- Baranya S., Olsen, N.R.B., Stoesser, T., Sturm, T.W. (2014). A nested grid based computational fluid dynamics model to predict bridge pier scour. *Water Management*. 167(5). pp. 259-268. <https://doi.org/10.1680/wama.12.00104>
- Baranya S., Pomázi F., Dömötör Sz., Pessenlehner, S., Haimann, M., Gmeiner, P., Liedermann, M., Habersack, H. (2022). SEDDON II - T2.3.3 Field measurements: Summary report. Angol nyelvű projektjelentés.
- Binder, J., Glas, M., Hauer, C., Liedermann, M., Habersack, H., Tritthart, M. (2022). Kiesinseln an der Donau – naturbasierte Lösungen zum Erhalt der Wasserstraße. *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft*, 75. pp. 54-61. <https://doi.org/10.1007/s00506-022-00918-w>
- DanubeSediment (2020). Long-term Morphological Development of the Danube in Relation to the Sediment Balance. Angol nyelvű projektjelentés. <https://tinyurl.com/3vfhw4b4> (Letöltés dátuma: 2023.10.25.)
- Dethier, E.N., Renshaw, C.E., Magilligan, F.J. (2020). Toward Improved Accuracy of Remote Sensing Approaches for Quantifying Suspended Sediment: Implications for Suspended-Sediment Monitoring. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 125(7). <https://doi.org/10.1029/2019JF005033>
- Downing, J. (2006). Twenty-five years with OBS sensors: The good, the bad, and the ugly. *Continental Shelf Research*, 26. pp. 2299-2318. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2006.07.018>
- Ferguson, R.I., Church, M.A. (2004). A Simple Universal Equation for Grain Settling Velocity. *Journal of Sedimentary Research*, 74(6). pp. 933-937. <https://doi.org/10.1306/051204740933>
- Fleit G., Hauer, C., Baranya S. (2020). A numerical modeling-based predictive methodology for the assessment of the impacts of ship waves on YOY fish. *River Research Applications*, 37. pp. 373-386. <https://doi.org/10.1002/rra.3764>
- Gillefalk, M., Massmann, G., Nützmann, G., Hilt, S. (2018). Potential Impacts of Induced Bank Filtration on Surface Water Quality: A Conceptual Framework for Future Research. *Water*, 10, 1240. <https://doi.org/10.3390/w10091240>
- Glas, M., Tritthart, M., Liedermann, M., Pessenlehner, S., Habersack, H. (2018). Numerical groyne layout optimisation for restoration projects in large rivers: An adaptive approach towards a desired morphodynamic equilibrium. In A. Paquier & N. Riviere (Eds.), *Proceedings of the 9th International Conference on Fluvial Hydraulics, River Flow 2018*, Lyon-Villeurbanne; France, 5–8 SEP 2018 (Vol. 40, Issue 02002). EDP Sciences. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20184002002>
- Gray, J.R., Gartner, J.W. (2009). Technological advances in suspended-sediment surrogate monitoring. *Water Resources Research*, 45. <https://doi.org/10.1029/2008WR007063>
- Guan, M., Liang, Q. (2017). A two-dimensional hydro-morphological model for river hydraulics and morphology with vegetation. *Environmental Modelling & Software*, 88. pp. 10-21. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2016.11.008>
- Guerrero, M., Szupiany, R.N., Amsler, M.L. (2011). Comparison of acoustic backscattering techniques for suspended sediments investigations. *Flow Measurement Instrumentation*, 22. pp. 392-401. <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2011.06.003>
- Guerrero, M., Rüther, N., Szupiany, R., Haun, S., Baranya S., Latosinski, F. (2016). The acoustic properties of suspended sediment in large rivers: consequences on ADCP methods applicability. *Water*, 8,13. <https://doi.org/10.3390/w8010013>
- Habersack, H., Tritthart, M., Liedermann, M., Hauer, C. (2014). Efficiency and uncertainties in micro- and mesoscale habitat modelling in large rivers. *Hydrobiologia*, 729. pp. 33-48. <https://doi.org/10.1007/s10750-012-1429-x>
- Haimann, M., Liedermann, M., Lalk, P., Habersack, H. (2014). An integrated suspended sediment transport monitoring and analysis concept. *International Journal of Sediment Research*, 29. pp. 135-148. [https://doi.org/10.1016/S1001-6279\(14\)60030-5](https://doi.org/10.1016/S1001-6279(14)60030-5)
- Haimann, M., Hauer, C., Tritthart, M., Prenner, D., Leitner, P., Moog, O., Habersack, H. (2018). Monitoring and modelling concept for ecological optimized harbour dredging and fine sediment disposal in large rivers. *Hydrobiologia*, 814. pp. 89-107. <https://doi.org/10.1007/s10750-016-2935-z>
- Haun, S., Kjærås, H., Løvfall, S., Olsen, N.R.B. (2013). Three-dimensional measurements and numerical modelling of suspended sediments in a hydropower reservoir. *Journal of Hydrology*, 479. pp. 180-188. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.11.060>
- Henning, M., Hentschel, B. (2013). Sedimentation and flow patterns induced by regular and modified groynes on the River Elbe, Germany. *Ecology* 6(4). pp. 598-610. <https://doi.org/10.1002/eco.1398>
- Lane, S.N., Parsons, D.R., Best, J.L., Orfeo, O., Kostaschuk, R.A., Hardy, R.J. (2008). Causes of rapid mixing at a junction of two large rivers: Río Paraná and Río Paraguay, Argentina. *Journal of Geophysical Research*, 113. <https://doi.org/10.1029/2006JF000745>
- Mead, A.A., Demas, C.R., Ebersole, B.A., Kleiss, B.A., Little, C.D., Meselhe, E.A., Powell, N.J., Pratt, T.C., Vosburg, B.M. (2012). A water and sediment budget for the



lower Mississippi-Atchafalaya River in flood years 2008-2010: implications for sediment discharge to the oceans and coastal restoration in Louisiana. *Journal of Hydrology*, 432. pp. 84-97.

<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.02.020>

Moate, B.D., Thorne, P.D. (2012). Interpreting acoustic backscatter from suspended sediments of different and mixed mineralogical composition. *Continental Shelf Research*, 46. pp. 67-82.

<https://doi.org/10.1016/j.csr.2011.10.007>

Moreira, D., Simionato, C.G. (2019). Modeling the Suspended Sediment Transport in a Very Wide, Shallow, and Microtidal Estuary, the Río de la Plata, Argentina. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 11. pp. 3284-3304. <https://doi.org/10.1029/2018MS001605>

Mossa, J. (1996). Sediment dynamics in the lowermost Mississippi River. *Engineering Geology*, 45(1-4). pp. 457-479. [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(96\)00026-9](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(96)00026-9)

Nienhuis, J.H., Ashton, A.D., Nardin, W., Fagherazzi, S., Giosan, L. (2016). Alongshore sediment bypassing as a control on river mouth morphodynamics. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface* 121(4). pp. 664-683. <https://doi.org/10.1002/2015JF003780>

Nones, M. (2019). Dealing with sediment transport in flood risk management. *Acta Geophysica*, 67. pp. 677-685. <https://doi.org/10.1007/s11600-019-00273-7>

Olsen, N.R.B. (2003). Three-Dimensional CFD Modeling of Self-Forming Meandering Channel. *Journal of Hydraulic Engineering*, 129(5). pp. 366-372. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2003\)129:5\(366\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2003)129:5(366))

Olsen, N.R.B. (2009). A Three-Dimensional Numerical Model for Simulation of Sediment Movements in Water Intakes with Moving Option. Angol nyelvű felhasználói kézikönyv. The Norwegian University of Science and Technology.

Olsen, N.R.B. (2021). 3D numerical modelling of braided channel formation. *Geomorphology*, 375(15). <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2020.107528>

Olsen, N.R.B., Hillebrand, G. (2018). Long-time 3D CFD modeling of sedimentation with dredging in a hydro-power reservoir. *Journal of Soils and Sediments*, 18. pp. 3031-3040. <https://doi.org/10.1007/s11368-018-1989-0>

Pomázi F., Baranya S. (2020). Nagy folyók lebegtetett hordalékvándorlásának új vizsgálati módszerei 2. – Közvetlen és közvetett lebegtetett hordalékmérési eljárások összehasonlító vizsgálata. *Hidrológiai Közöny*, 100(3). pp. 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. pp. 2361-2377. <https://doi.org/10.1007/s11600-022-00805-8>

Pomázi F., Baranya S., Török G.T. (2020). Nagy folyók lebegtetett hordalékvándorlásának új vizsgálati módszerei

1. – A továbbfejlesztett hordalékmonitoring módszertan bemutatása. *Hidrológiai Közöny*, 100(2). pp. 37-47.

Schleiss, A.J., Franca, M.J., Juez, C., De Cesare, G. (2016). Reservoir sedimentation. *Journal of Hydraulic Research*, 54(6). pp. 595-614.

<https://doi.org/10.1080/00221686.2016.1225320>

Schumm, S.A. (1977). *The Fluvial System*. John Wiley & Sons, New York.

Thorne, P.D., Vincent, C.E., Hardcastle, P.J., Rehman, S., Pearson, N. (1991). Measuring suspended sediment concentrations using acoustic backscatter devices. *Marine Geology*, 98. pp. 7-16. [https://doi.org/10.1016/0025-3227\(91\)90031-X](https://doi.org/10.1016/0025-3227(91)90031-X)

Török G.T., Baranya S., Rütther, N. (2017). 3D CFD Modeling of Local Scouring, Bed Armoring and Sediment Deposition. *Water*, 9. pp. 56-72.

<https://doi.org/10.3390/w9010056>

Tritthart, M., Haimann, M., Habersack, H., Hauer, C. (2019). Spatio-temporal variability of suspended sediments in rivers and ecological implications of reservoir flushing operations. *River Research Applications*, 35. pp. 918-931.

<https://doi.org/10.1002/rra.3492>

Tu, L.X., Thanh, V.Q., Reynolds, J., Van, S.P., Anh, D.T., Dang, T.D., Roelvink, D. (2019). Sediment transport and morphodynamical modeling on the estuaries and coastal zone of the Vietnamese Mekong Delta. *Continental Shelf Research*, 186. pp. 64-76.

<https://doi.org/10.1016/j.csr.2019.07.015>

van Rijn, L.C. (1984a). Sediment Transport, Part I: Bed Load Transport. *Journal of Hydraulic Engineering*, 110(10). pp. 1431-1456.

[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1984\)110:10\(1431\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1984)110:10(1431))

van Rijn, L.C. (1984b). Sediment Transport, Part II: Suspended Load Transport. *Journal of Hydraulic Engineering*, 110(10). pp. 1613-1641. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1984\)110:11\(1613\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1984)110:11(1613))

Xie, Q., Yang, J., Lundström, T.S. (2019). Field Studies and 3D Modelling of Morphodynamics in a Meandering River Reach Dominated by Tides and Suspended Load. *Fluids*, 4. pp. 15-33.

<https://doi.org/10.3390/fluids4010015>

Zhang, B., Wu, B., Ren, S., Zhang, R., Zhang, W., Ren, J., Chen, Y. (2021). Large-scale 3D numerical modelling of flood propagation and sediment transport and operational strategy in the Three Gorges Reservoir, China. *Journal of Hydro-environment Research*, 36. pp. 33-49. <https://doi.org/10.1016/j.jher.2021.03.003>

Zhang, W., Jia, Q., Chen, X. (2014). Numerical Simulation of Flow and Suspended Sediment Transport in the Distributary Channel Networks. *Journal of Applied Mathematics*, 2014, 948731.

<https://doi.org/10.1155/2014/948731>

**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 tudományos segédmunkatársa. Doktori kutatásának témája a folyami lebegtetett 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 tanszékvezetője, egyetemi docense. Kutatási területe: folyók medermorfológiai, áramlástan és hordalékvándorlási vizsgálata terepi eljárásokkal és számítógépes modellezéssel. A Magyar Hidrológiai Társaságnak 2003 óta tagja.



*Hordaléklerakódás madártávlatból a Duna felső-magyarországi szakaszán  
(a drónfelvételt készítette: Baranya Sándor)*