

Folyó-hullámtér konnektivitás értékelése kétdimenziós hidrodinamikai modellezés alapján

Füstös Vivien^{1,2}, Erős Tibor^{2,3}, Józsa János^{1,4,5}

1 Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Építőmérnöki Kar, Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszék, Budapest (e-mail: fustos.vivien@emk.bme.hu)

2 Eötvös Loránd Kutatási Hálózat, Balatoni Limnológiai Kutatóintézet, Tihany

3 Víz tudományi és Vízbiztonsági Nemzeti Laboratórium, Eötvös Loránd Kutatási Hálózat, Balatoni Limnológiai Kutatóintézet, Tihany

4 ELKH-BME Vízgazdálkodási Kutatócsoport, Budapest

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

[DOI:10.59258/HK.12331](https://doi.org/10.59258/HK.12331)



Kivonat

A Gemenci-erdő és Béda-Karapancsa területek hullámterei nagy kiterjedésük okán (is) kiemelt természeti értéket képviselnek. A Duna és a mellékágak mederszintjei között az elmúlt időszak süllyedési és feltöltődési folyamatai nyomán egyre nő a különbség, ami beavatkozás nélkül súlyos ökológiai következményeket vetít előre. Egy átfogó morfordinamikai kutatás keretében célul tűztük ki a jelen állapot felmérését, majd erre alapozva javaslatot teszünk egy hosszútávon fenntartható állapotra. A kutatás köztes lépésében ismertettük a hidrodinamikai modellek első eredményeit, példát hozunk a keresztirányú átjárhatóság (laterális konnektivitás) értékelésére. Bemutatjuk az árvízi kockázatkezelésből ismert vízmélység-vízsebesség alapú besorolási rendszert, amely jelen alkalmazásában jól megfeleltethető a szubjektív besoroláson alapuló potamális osztályozás típusainak. A modell a további, részletes terepi felmérések adatain alapulóan finomításra szorul. Azonban a bemutatott módszertan segíthet a jelen állapot értékelésében és fontos információval szolgál jövőbeni hatásvizsgálatok alapozásához, mind hidrodinamikai, mind ökológiai vonatkozásban.

Kulcsszavak

Élőhely-hidraulika, utófeldolgozás, keresztirányú átjárhatóság, mellék- és holtágak, összehasonlítás.

Assessing river-floodplain connectivity based on two-dimensional hydrodynamical modeling

Abstract

The Danube floodplains Gemenc-forest and Béda-Karapancsa in Hungary hold high natural value, (also) due to their great spatial extent. The bed levels of the Danube River and of the side-arms are slowly drawing away from each other, which is caused by their continuous deepening and silting, respectively. Without further measures, this forecasts severe ecological consequences. A running morphodynamic research aims to reveal the current condition and to suggest a long-term maintainable state. Hereby we present the first results of the hydrodynamical simulations and give an example on assessing the lateral connectivity. We apply a classification method used previously in flood hazard assessment, based on water depths and flow velocities. The categories of this method seem to correspond to the potamal classes, which tend to be less-explicitly applicable. Some refinement is still due, regarding the digital terrain model data. However, the methodology presented here can support assessing present conditions and it provides information for the impact analysis of any future intervention, concerning sheer hydrodynamics or ecohydraulics as well.

Keywords

Ecohydraulics, post-processing, lateral connectivity, side arms and oxbow lakes, comparison.

BEVEZETÉS

Az árvízvédelmi töltések megépítésével a folyókról szükségszerűen leválasztották az ártereik egy részét, létrejött a mentett oldal és a hullámtér fogalma. A töltések közé szorított folyók árvízszintjei ezután növekedni kezdtek (VITUKI Hungary-BME 2013), erre halmozódtak az egyre inkább a klímaváltozás hatásaként értelmezett, mind gyakrabban előforduló szélsőséges hidrológiai események (extrem árvizek és aszályok). Mindezek jól rávilágítanak a „teret a folyónak” elv jelentőségére (Láng 2017), amellyel összetett hatás érhető el: a víz szétterülésével alacsonyabb vízszintekkel vonul le az árvíz, az oldalágakban, morotvákban pedig nagyobb felületen mehet végbe a beszívargás, vízvisszatartás, amely az aszály súlyosságát enyhítheti. A fentiek miatt is kiemelt fontosságú az olyan területek fenntartása és védelme, ahol ez a tér adott, mert a jelenlegi hullámtér jórészt megegyezik a történelmi ártérrel (vö. „pocsolyatérkép”): mint amilyen a Gemenci-erdő és Béda-Karapancsa a Duna mentén.

A hasonló, mellékágakkal, holtágakkal átszótt hullámterek nemcsak a vízháztartásban, hanem ökológiai értelemben is hangsúlyos szereppel bírnak. A folyók főmedrével célszerűen rendszerben kezelendők, a két elem kölcsönös egymásra utaltsága miatt: a folyami vizes élőhelyek változatosságát növeli a kapcsolódó hullámtéri vízi környezet (Lasne és társai 2007), a hullámtéri biológiai sokféleség fennmaradásához pedig szükséges a folyókból származó időszakos elöntés (Junk és társai 1989, Schöll és társai 2009). Ez a rendszerszemlélet a folyók síkvidéki szakaszán kialakuló vizes élőhelyek potamális osztályozásában is megjelenik (1. táblázat), ahol a tipizálás alapja a főmederrel való összeköttetés létrejöttének gyakorisága (Ward és Stanford 1995, Potyó és Guti 2011, Farkas-Iványi és Trájer 2015, Freshwaterecology adatbázis). Ugyanakkor az idézett forrásokból is kitűnik, hogy a definíciók nem teljesen egységesek, értelmezésükben teret adnak kismértékű szubjektivitásnak. A jövőben szükségessé válhat akár ezek robusztusabb újraértelmezése és egy új osztályozási rendszer bevezetése.

1. táblázat. Folyókához kötődő vízi élőhelyek főbb típusai és definícióik (Potyó és Guti 2011)
Table 1. Main categories and definitions of river-floodplain habitat types (Potyó and Guti 2011)

Típus neve	Meghatározás
Eupotamon (A, B)	A folyó főága (A) és az állandó kapcsolátú mellékágak (B)
Parapotamon (A, B)	A főággal alvízi kapcsolátú mellékág, felvízen kavicsos-homokos üledékkel (A) vagy fás növényzettel fedett üledékkel (B) elzárva
Plesiopotamon	A főág közelében lévő holtág, időszakos vízáramlással
Paleopotamon	Távolabbi holtág, ritka a főággal való kapcsolat

A folyó és hullámterre közti vízforgalom numerikus modellezésének fejlődése követte a számítógépek kapacitásának növekedését. Míg korábban e feladatok tankönyvi példái voltak az egydimenziós-kétdimenziós (1D-2D) összekapcsolt modellezés alkalmazásának (Bakonyi és társai 1999, Krámer és társai 1999, Morales-Hernández és társai 2013), mostanság emellett már leginkább 2D-s (Maaß és Schüttrumpf 2019, Chen és társai 2020, Timbadiya és Krishnamraju 2023) és olykor 3D-s számításokkal írják le az elöntési folyamatokat, akár több ezer km²-es modellezési tartományon (Li és társai 2018). Ezt a ma már szélesebb körben elérhető, pontosabb alapadatok is lehetővé, egyúttal értelmessé teszik, mint pl. a távérzékelés útján rögzített nagyfelbontású (LiDAR) domborzati adatok (Teng és társai 2015). A legtöbbször diszkrét pontokban, esetleg keresztmetszvények, függvények mentén végrehajtott terepi felmérésekhez képest egy 2-3D hidrodinamikai modellezéssel előállított eredményező előnye a nevében szereplő mezőszerű folytonosság, ami nagyban hozzájárul a számított jellemzők szerinti minősítéshez, kategorizáláshoz (Liang és társai 2020). (Ugyan a többsugaras [multi-beam] pásztázó eszközök használatával a fent említett előny egyre fogy, alkalmazásuk azonban hajózhatóságot kíván, így leggyakrabban nem alkalmas a hullámtéri kisebb, sekélyebb víztestek vizsgálatára (Baranya és társai 2016)). Egy jól felépített hidrodinamikai modellel egyaránt elvégezhető a jelen állapot leírása, illetve bármilyen beavatkozás hatásvizsgálata (Guida és társai 2015).

A hidrodinamikai modellezés kiegészíthető a hordalék-dinamikai folyamatok leírásával is, ez pedig elemi szükségletű a folyó-hullámtér komplex kölcsönhatásrendszer fenntartási kérdéseiben. A nagyobb árhullámok levonulása során a hullámtéren kiüledhet a hordalék, ezzel emelkedik a mellékágak, holtágak meder- és küszöbszintje. Amennyiben ezzel együtt a főmeder is mélyül, az a vízszintek csökkenésén keresztül tovább fokozza a szintkülönbséget. Mindezek eredményeképpen csökken a keresztirányú átjárhatóság (laterális hidrológiai konnektivitás (Amoros és Roux 1988, Kondolf és társai 2006, Magyarország vízgépjűtő-gazdálkodási tervének második felülvizsgálata 2021)), ami hosszútávon jelentős, kedvezőtlen ökológiai következményekkel járhat (Ward és Stanford 1995). Folyamatorientált tervezéssel az efféle jelenségek az azokat előidéző folyamatok célszerű megváltoztatásával, tartósan és fenntarthatóan fordíthatók vissza (Kondolf és társai 2006, Beechie és társai 2010). Ehhez szükséges a hor-

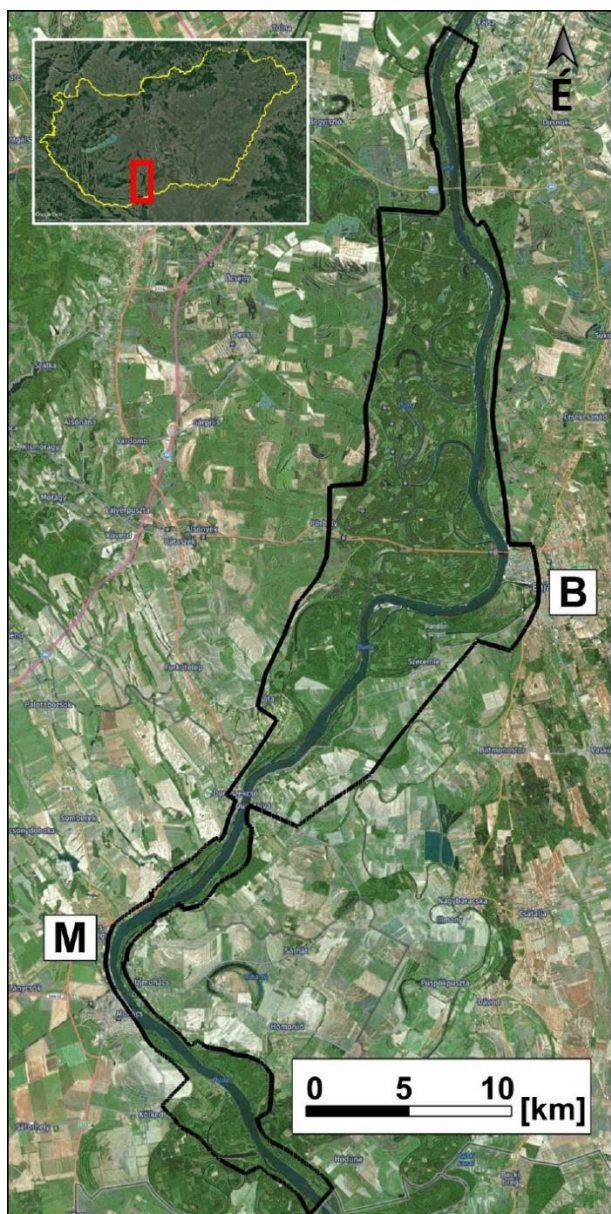
dalékvándorlás megismerése, vizsgálata, annak a tervezésbe történő integrálása (Maaß és Schüttrumpf 2019, Gilbert és Wilcox 2020).

Az alábbiakban a Duna és hullámterre magyarországi alsó szakaszának (Gemenci-erdő és Béda-Karapancsa) vízborítottságát vizsgáljuk különböző vízjárási állapotokban, 2D hidrodinamikai modellezésre alapozva. Példákat hozunk a laterális hidrológiai konnektivitás számszerűsítésére, a hullámtér víztestjeinek osztályozására, valamint különböző, a modelleredményből származtatott változók térképi megjelenítésére. A bemutatott munka egy köztes lépésként, tesztalkalmazásként értelmezendő, amellyel átfogó célunkat készítjük elő. A kutatás folytatásaként egy összetett, hidro- és morfológiai modellt fogunk építeni a vizsgált területre, amelynek eredményei alapján javaslatot tehetünk egy önfenntartó állapotra, az ökológiai és társadalmi igényeket egyaránt figyelembe véve.

ANYAG ÉS MÓDSZER

A vizsgált terület

A Duna magyar szakaszának déli részén, az 1 507-es és 1 433 (déli országhatár) folyamkilométer-szelvények között (ADUVIZIG hajóút-kitűzési terv 2022) mintegy 75 km hosszú, árvízvédelmi töltésekkel határolt, nagyjából 220 km² területen (Google Earth) végeztük a vizsgálatainkat; az elhelyezkedést szemlélteti az 1. ábra. (A fekete körvonallal határolt tartomány a modellszámítási rácsháló határait mutatja, ami nagyobb kiterjedésű, mint a 220 km²-es folyami és hullámtéri terület.) A folyó közepes vízhozama Bajánál 2 435 m³/s-ra adódik, átlagos mélysége ebben az esetben 5-6 m (Goda és társai 2007). A szakasz főbb betáplálása a Sió-csatorna, amelynek átlagos vízhozama azonban a vízügyi adatok alapján a Duna közepes vízhozamának 1%-a alatt marad. A Duna magyar szakaszára jellemző medersüllyedés itt is észlelhető (Kalocsa és Zsuffa 1997, Habersack és társai 2016), a mértéke a Dombori és Mohács közötti kisvízszintek alakulása nyomán mérések szerint nagyjából 1 m volt 1966 és 2004 között (Goda és társai 2007). Ez a tendencia ezután is fennállt (Nagy és Kiss 2016), amely alapján a folyamat feltehetőleg nem állt meg 2004-ben. Ezt az is alátámasztja, hogy a harmadik Vízgyűjtő-gazdálkodási Terv még mindig problémaként jelöli meg a jelenséget (Magyarország vízgépjűtő-gazdálkodási tervének második felülvizsgálata 2021). Mindezzel összhangban a területet már korábban is célozták vízpótlási, keresztirányú átjárhatóságot javító beavatkozásokkal (Zsuffa 1993, Tamás és társai 2010).



1. ábra. A vizsgált terület elhelyezkedése
 Megjegyzés: Fekete körvonal jelöli a modelltartományt, a „B” és „M” betűk rendre Baja és Mohács városát jelölik

Figure 1. Location of the study site

Note: The model domain is outlined with a thick black line, letters 'B' and 'M' indicate cities Baja and Mohács, respectively

A hidrodinamikai modellezés

A Dunai Hajóútfejlesztési Program keretében a folyó teljes magyar hosszán végeztek 2D hidrodinamikai modellezést, az ehhez készített számítási rácsháló és az alkalmazott digitális terepmodell a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszékén (továbbiakban: Tanszék) elérhető volt (UTIBER-VIZITERV-BME 2021). Az előkészületek és az első modellfuttatások egy BSc-s diplomamunka keretében történtek (Molnár 2021). A be- és kifolyási peremeken kívül oldalsó hozzáfolyást nem adtunk meg; a Sió-csatorna dunai árvizek esetén elzárásra kerül, egyéb esetben pedig vízszállítása a Dunához képest elhanyagolható. A modellkalibráció és -validáció a hajóútfejlesztési munkában, vala-

mint az ott hivatkozott nagyvízi mederkezelési tervezésben megtörtént, kis- és nagyvízi, tehát a két szélső állapotról, a referenciapontokon nagyságrendileg cm-es illesztéssel. Jelen alkalmazáshoz átvettük az ott meghatározott területhasználati osztályokat és a hozzájuk rendelt Strickler-Manning-érdességeket. A felső, dombori perem vízhozam-, az alsó, országhatári perem pedig vízszint-típusú peremfeltételekkel láttuk el, és időben nem változó (permanens) szimulációkat futtattunk.

A folyók vízszállítását meghatározó megannyi természetes tényező miatt egy Duna-méretű folyamat a valóságban inkább az időben változó (tranzien) állapot – vízszint, vízhozam – jellemez. Különösen igaz ez ebben a vizsgált esetben, már csak azért is, mivel nincs hatótávolságon belül olyan mesterséges szabályozás, amely pl. szükség esetén állandó vízszintet tudna tartani a Dunán. Természetes körülmények között egyrészt a vízszint nem egyértelmű függvénye a vízhozamnak: attól függően, hogy a folyó árad vagy apad, még egy magányos árhullám esetén is ugyanazon vízhozamhoz két vízszint tartozhat (árvízi hurokgörbe, hiszterézis). A helyzet összetettebb, ha több árhullám követi egymást és halmozódik részben egymásra (többszörös hurokgörbe); a fordított hurokgörbét pedig csak extrém példaként említjük itt (pl. a Tiszán a Maros betorkollása fölött, a Maroson érkező árhullám hatására). A vízszintek alakulása késettetetten követi a vízhozamok változását, így az árhullámok vízszintjeiből származó elöntés nem szükségszerűen vetül hidrodinamikailag ki minden olyan területen, ahol a domborzat (mederszintek) és a vízszintek alapján ezt várnánk. Fontos tehát leszögezni, hogy a permanens modellezés különösen gyors lefolyású árhullámoknál jelentős egyszerűsítés, a fenti dinamikus hatásokat nem tudjuk leképezni általa. Minél elnyújtottabb viszont az árhullám, modellünkkel annál jobb becslést kapunk. Mindezek alapján a kutatás e köztes, még mindig tesztjellegű fázisában az időben állandósult leírást választottuk. Egyéb, ezt támogató megfontolás volt, hogy az imént kifejtett okból pl. a modellbeli terepszintek (mellékágak, holtmedrek küszöbszintjei) helyességét nem lehet ellenőrizni, ha az árhullám nem tart olyan hosszú ideig, hogy a hatása elérhessen a kérdéses területre.

Javítások

A témában készített diplomamunka eredményei rávilágítottak a számítási rácsháló bizonyos hiányosságaira a hullámtéri területeken. A megelőző feladat (hajóútfejlesztés) igénye szerint a hullámtéren durvább felbontást alkalmaztak, mint a főmedernél. Az ebből eredő pontatlanságok a főbb mellék- és holtágak medreinél mindenképp korrekcióra szorultak, amelyet a digitális terepmodell pontjainak szintbeli javításával, illetve rácshálógeometria igazításával végeztünk el. Két terepi bejárás keretében (2021.07.24. – Gemenci-erdő déli része és 2022.03.18. – Bajától délre fekvő területek, Béda-Karapanca) megkíséreltük a helyes terepszintek rögzítését valós idejű kinematikus (RTK) GPS-es mérésekkel, ezt azonban akadályozta a sűrű növényzet, amely még a márciusi, lomb nélküli állapotában is árnyékolta a vevőegységet a műholdak elől. A pontok szintjének javításához így korábbi (1990-es évek) felméréseket és a diplomamunkában megfogalmazott ajánlásokat vettük alapul (Kalocsa és Tamás 2002, Molnár 2021).



2. ábra. A bajai vízmérce napi vízhozamidősora 1930 és 2016 között
Figure 2. Daily flow discharges at Baja gauge station between 1930 and 2016

Peremfeltételek

A konnektivitás minősítésének egy módja az átjárhatóság időtartam szerinti számszerűsítése (Shao és társai 2019), amelyhez meg kell tenni a modellt meghajtó vízhozamok ugyanilyen jellemzését. Egy korábbi adatigénylést követően rendelkezésünkre állt a bajai vízmérce 1930-2016 közötti napi vízhozamidősora (2. ábra). Kijelölve egy, a jelenhez közeli, trendmentes időszakot, azon elvégeztük a vízhozamok gyakorisági és tartóssági elemzését és előállítottunk 10, adott tartósságú vízhozamértéket a modell felső peremére (Molnár 2021). A nagyvízi tartomány sűrűbben reprezentált a hullámtér és a mellékágak előntése végett. Oldalsó hozzáfolyás híján a meghatározott vízhozamokat a teljes modellezett szakaszon állandónak tekintettük, és a kilépési peremnél ezekhez adtunk meg geodéziai szintet, az országhatár szelvényébe eső Q-Z (vízhozam-vízszint) görbe néhány pontjának ismeretében (UTIBER-VIZITERV-BME 2021). A számított peremfeltételek listáját és a hozzájuk rendelt tartósságot a 2. táblázat listázza. Annak érdekében, hogy a mellékágak, holtágak víztesteit is a modellbe foglalhassuk, a tartományt előbb a legnagyobb vízhozammal „feltöltve”, az egyes futtatásokat egymás után, a vízszintet szisztematikusan süllyesztve végeztük el. Ily módon a hullámtéri medrek küszöbszintje határozhatta meg a vízszállítás kezdetét, végét, illetve a már nem összekapcsolt víztestek is benne maradhattak a kisebb vízhozamú futtatásokban állóvízekként. Ezek az állóvizek a lefűződés után állandó vízszintet tartottak, amely egyszerűsítés a valósághoz képest (a beszivárgás és párolgás részben vagy akár teljes mértékben felszámolhatja a víztesteket). A modellezéshez alkalmazott szoftver képes

az említett jelenségek szimulációjára, így megfelelő adatok (peremfeltételek) birtokában a kutatás következő lépésében ezt is figyelembe tudjuk venni. A futtatásokhoz szükséges kezdeti feltételeket (vízmélységek és áramlási sebesség) a megelőző szimulációk konvergált eredményei alapján határoztuk meg.

2. táblázat. A modellt meghajtó felső és alsó peremfeltételek: adott meghaladási tartósságú vízhozamok és kilépési vízszintek (Molnár 2021 alapján)

Table 2. Flow discharges with their calculated durations exceeding and water levels applied on the upper and lower boundaries of the model domain (based on Molnár 2021)

Tartósság [%]	Q _{be} [m ³ /s] (Dombori)	Z _{ki} [mBf] (országhatár)
0,5	6 500	85,93
1	5 700	85,16
2	5 000	84,48
5	4 250	83,76
10	3 650	83,17
20	3 050	82,58
30	2 650	82,18
50	2 150	81,66
70	1 750	81,11
90	1 400	80,42

Az alkalmazott szoftverek

Az AquaVEO Surface-water Modeling System (SMS) szoftvert használtuk az átvett rácsháló igazítására. A végleges háló közel 785 000 háromszöggel (3-3 000 m² területűek), illetve közel 400 000 rácscsomóponttal rendelkezik. A szoftver nem ingyenes, a licenst a Tanszék biztosította.

A modellezéshez az Amerikai Mérnökhadtest által fejlesztett Adaptive Hydraulics Modeling System (AdH) szoftvert (*Berger és társai 2010*), közelebről annak a 2D modulját használtuk, amely ingyenesen elérhető (*McAlpin és társai 2013, Chen és társai 2015*), és alkalmazásában már korábbi saját tapasztalatunk is van (*Füstös és társai 2019, 2021*). A program mélységátlagolt megközelítéssel dolgozik, a sekélyvízi egyenleteket oldja meg a rácsponton, és a vízmélységet, illetve a mélységátlagolt áramlási sebesség két ortogonális komponensét számítja ki. Előnye, hogy mind időlépését, mind a kezelt rácshálót illetően adaptív: amennyiben egy számítási lépésben nem jut megoldásra, negyedére csökkenti az időlépést, illetve a problémás cellákat darabolva köztes rácspontokat hoz létre. Hátánya a permanens állapotot elérni kívánó futtatások szempontjából, hogy előre megadott időtartamot szimulál, és nem a permanens állapot beálltáig fut, így megeshet, hogy a teljes konvergencia elérése a modell többszöri újraindítását igényli. A számításigény egy ekkora méretű modell-tartományon nagy; az mpiexec publikus programkódot használtuk a futtatás párhuzamosítására a használt szervergép processzorain (*Gabriel és társai 2004*).

Az AdH által létrehozott eredményfájl utófeldolgozását (post-processing) a Tecplot adatmegjelenítő szoftverrel végeztük. Az AdH eredményfájljai egy tanszéki fejlesztésű konverter programmal alakíthatóak a megfelelő fájlformátumra. Itt a számított állapotváltozók koordinátához kötve, mezőszerűen ábrázolhatóak, illetve ezekből megadott műveletekkel új paraméterek is létrehozhatóak. A program képeket is képes kezelni, így a megjelenített mezők georeferált műholdképre illeszthetőek, segítve az eredmények értelmezését. A szoftver licenzét a Tanszék biztosította.

EREDMÉNYEK ÉS ÉRTÉKELÉS

Egy-egy szimuláció a modellezett vízjárás állapotól függően valós időben 1-5 nap alatt konvergált. Ugyan a terület kiterjedése és a cellaszám nagy, ez az időigény nem ideális, különösen azt figyelembe véve, hogy egyelőre csak hidrodinamikai futtatásokat végeztünk, hordaléktranszport nélkül. A kutatás következő lépésében meg kell vizsgálni az optimalizálás lehetőségét.

A futtatások eredményeként elérve a permanens állapotot, az utófeldolgozás során a 10 különböző vízhozamú szimuláció konvergált változóival végeztünk műveleteket. Az általunk is alkalmazott hidrodinamikai modellezés jelen korban már inkább jelent mérnöki eszközt, mint tudományos eredményt; ennek szellemében a nyers eredmények ismertetése (úgy, mint vízmélység, mélységátlagolt áramlási sebesség) helyett ebben a közleményben a származtatott mezők bemutatására helyezük a hangsúlyt.

Laterális hidrológiai konnektivitás

Az egyes vízhozamokhoz meghatározott százalékos meghaladási tartósságokat időegységű tartóssági értékekre alakítottuk át egy évre viszonyítva (pl. 0,5% – 1,85 nap; 90% – 328,5 nap). A vízborítás felhasználásával így térképen ábrázolható, hogy az egyes mellék- és holtágaknak, il-

letve további hullámtéri területeknek évente mekkora időtartamban van közvetlen összeköttetésük a Duna főágával (*Ijjas és társai 2010, Rättich és társai 2020, Tena és társai 2020*). A 3. ábráról leolvasható, hogy a Rezéti-Holt-Duna, a Vén-Duna, a Sugovica, a Kádár-Duna alsó vége és a Szabadság-szigeti oldalág az év több mint felében összeköttetésben áll a főággal (az időtartományok határait a vizsgált tartósságokhoz igazítva jelöltük ki). A területi kimutatás szerint (a könnyebb értelmezés végett megfordítva az időtartamokat) az év kb. 11 hónapjában a vizsgált kb. 220 km² terület legfeljebb 20%-án (30,61 + 5,95 + 6,80 km²) alakul ki összefüggő vízborítás, amely 20%-ban a Duna medrének felülete is beleértendő. Tovább lépve eggyel, az év kb. 355 napjában legfeljebb a főág, mellékágak és azok szűk környezete (világoskék, sötétkék, zöld és sárga színezetű területek összessége: 50,25 km²) lesz egymással összeköttetésben. A vizsgált vízhozamtartományon a 220 km² egésze soha nem került víz alá. A maximum ennek mintegy 75%-a, ezen a kb. 164 km²-en kevesebb mint 2 napra alakul ki összefüggő vízfelület. Az adott időbeli tartóssággal előtöltött területek összegzését, az ezekből készült kimutatást használták már beavatkozások hatásvizsgálatában (*Ijjas és társai 2010*), mely számunkra is jó indikátor lehet a kutatás következő fázisában.

A hidrológiai konnektivitás értékeléséhez az egyes vízjárás állapotokban modellezett vízborításból átmenetileg kitakartuk a főággal már nem összekapcsolt vízfelületeket, illetve az időtartamoknak megfelelően összevontan ábrázolunk bizonyos vízhozamú futtatási eredményeket. A 3. ábrán látható mezők, illetve ezek területi kimutatása tehát nem a teljes vízborítást tükrözi egy-egy vízjárás állapotban, hanem csak a főággal összefüggő vízfelületeket.

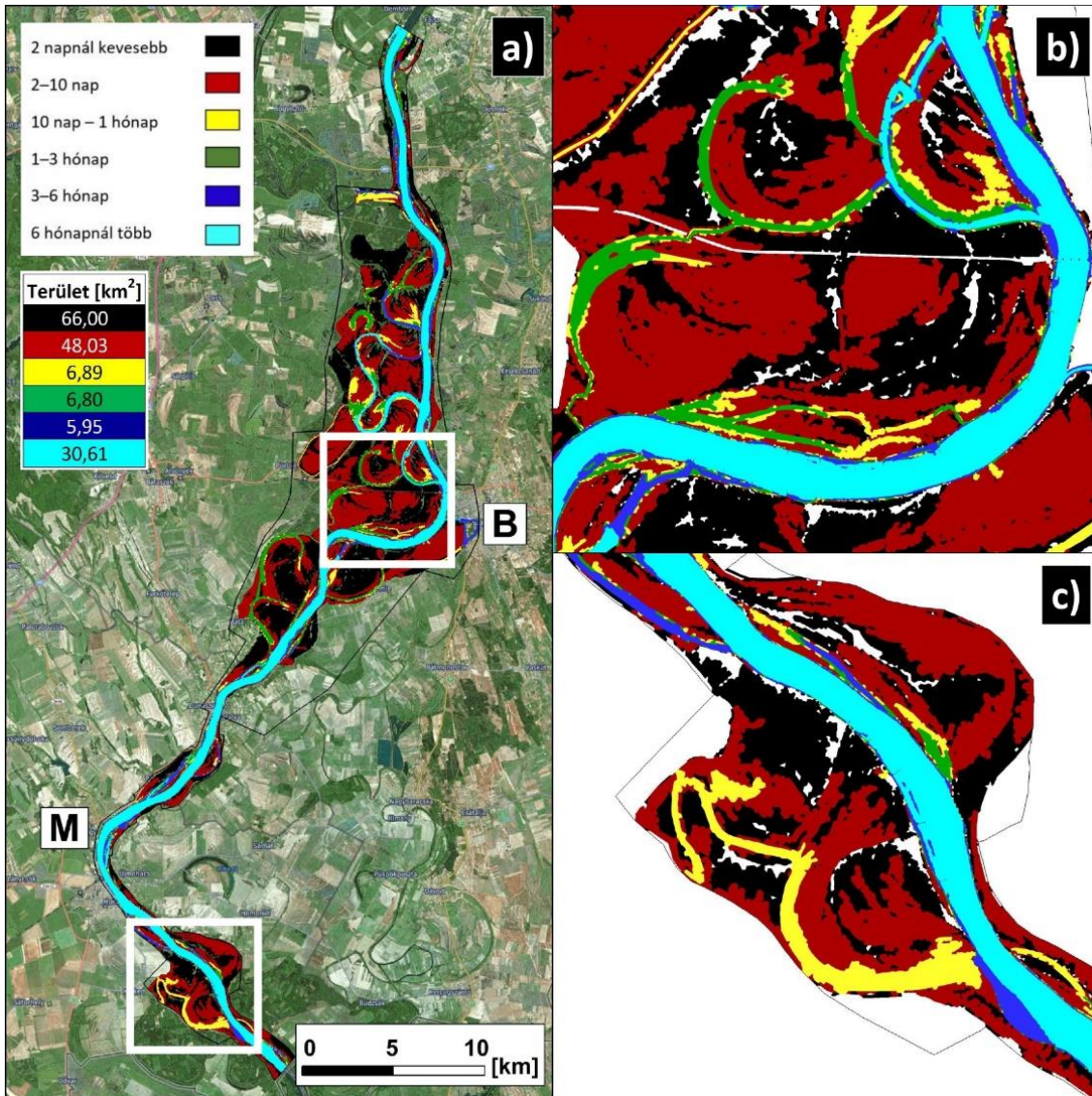
Vízmélység-vízsebesség kategóriák

Hasonlóan bizonyos árvízi kockázati térképek módszertanához (*VIZITERV Environ 2021*), a vízmélység és áramlási sebesség értékei alapján egy 3x3-as mátrixot hoztunk létre, ahol a két változó bizonyos értéktartományait kombinálva 9, egymással komplementer kategóriába soroltuk a modellezett terület minden számítási pontját (*3. táblázat*). A kategóriák értékhatárait a főág és mellékágak, valamint a hullámtéri környezet reprezentatív elkülönítését szem előtt tartva jelöltük ki. E két hidrodinamikai paraméter a halfajok élőhelypreferenciáin keresztül ökológiai jelentőséggel is bír, amelyet többféle térléptéken kimutattak már (*U.S. Fish and Wildlife Service 1985, Harka és Sallai 2004, Hauer és társai 2008*). A kategorizálás térképi megjelenítésében egy-egy terület mozaikosságából az élőhely nagyobb térléptékű változatosságára is lehet következtetni, amely újabb eredményeink szerint inkább meghatározza a halközösségek térbeli szerveződését, mint a lokális hatások (*Szalóky és társai 2021, Füstös és társai 2022*).

Ehhez az értékeléshez a laterális konnektivitás elemzésével ellentétben figyelembe vettük a vízszintsüllyesztés során elkülönülő víztesteket is, hiszen egy főmedertől távolabbi, lefűződött holtág is vízi életter. (Visszaulálként

megjegyezzük, hogy a víztestekben a lefűződéskor érvényes vízszint maradt a modellben, mert a párolgás és elszivárgás hatásait egyelőre nem vettük figyelembe.) Hüllámtéri környezetben a vízmélységen és vízsebességen túl a konnektivitási viszonyok (Pringle 2003, Carrara és

társai 2012), illetve a hidrológiai folyamatok változása (Inskip 1982) is jellemzik az adott víztest fő élőhelyi jellemvonásait, ezek ebben az értékelési rendszerben a víztest vízjárási állapotok közötti kategóriaváltásban jelenhetnek meg.



3. ábra. a) Különböző kiterjedésű összefüggő vízborítás kialakulásának időbeli tartósságai egy évre vetítve a kétdimenziós hidrodinamikai modellezés alapján; valamint ugyanezen vízfelületek szinkódolt területi kimutatása

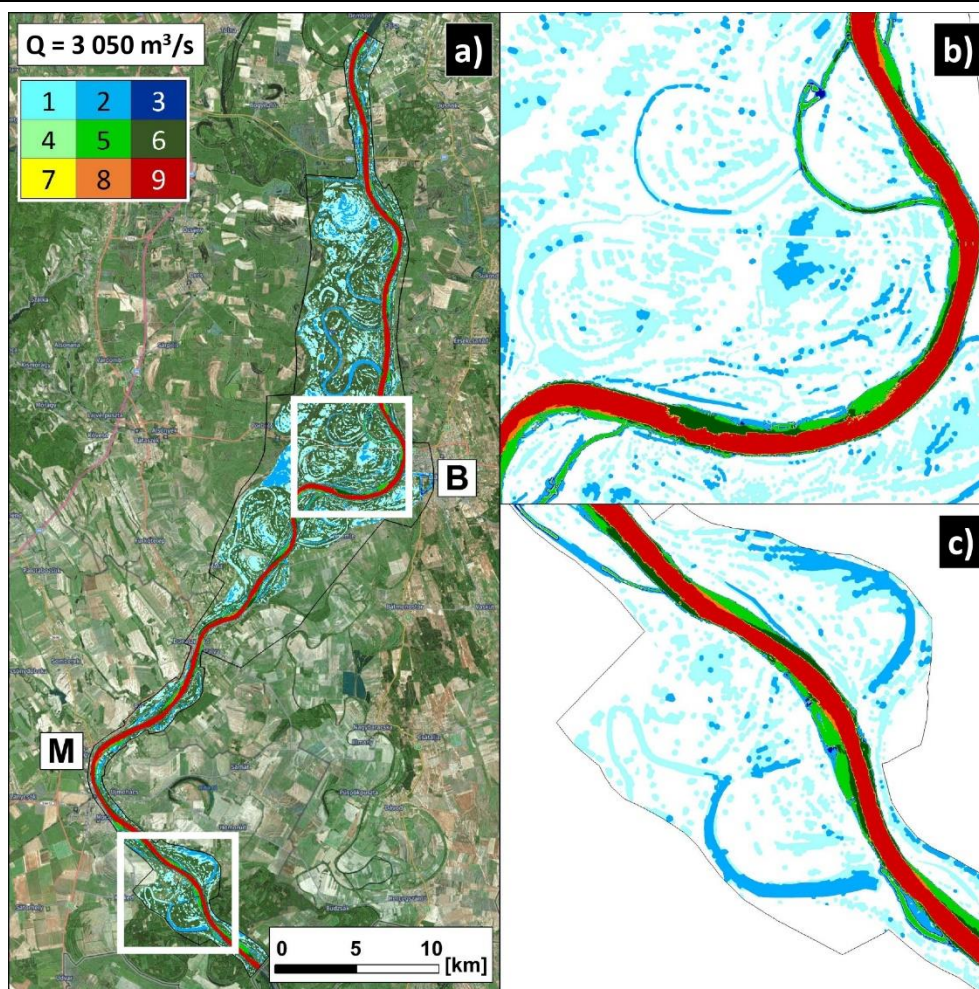
Megejegyzés: B: Baja, M: Mohács. Jobbra nagyobb felbontásban kiemelve b) Baja környéke és c) Béda-Karapancsa

Figure 3. a) Annual durations of connected water coverages based on the two-dimensional hydrodynamical simulations, and the areas of these water coverages displayed in the same color

Note: B: Baja, M: Mohács towns. b) The vicinity of Baja and c) Béda-Karapancsa are displayed in higher resolution on the right

3. táblázat. A számított vízmélység (h) és mélységátlagolt áramlási sebesség (v) értékei alapján meghatározott kategóriák
Table 3. Categories determined by the values of the computed water depths (h) and depth-averaged flow velocities (v)

Vízsebesség-vízmélység (h-v) kategóriák			
	$h < 1 \text{ m}$	$1 \text{ m} \leq h < 5 \text{ m}$	$5 \text{ m} \leq h$
$v < 0,1 \text{ m/s}$	1	2	3
$0,1 \text{ m/s} \leq v < 1 \text{ m/s}$	4	5	6
$1 \text{ m/s} \leq v$	7	8	9



4. ábra. a) A vízmélység-vízsebesség kategóriák területi eloszlása a $Q = 3\,050\text{ m}^3/\text{s}$ vízhozammal meghajtott szimuláció eredményein
Megjegyzés: B: Baja, M: Mohács. Jobbra nagyobb felbontásban kiemelve b) Baja környéke és c) Béda-Karapanca.

Figure 4. a) Spatial distribution of the depth-velocity categories by the $3\,050\text{ m}^3/\text{s}$ flow regime simulation

Note: B: Baja, M: Mohács. b) The vicinity of Baja and c) Béda-Karapanca are displayed in higher resolution on the right.

A 4. ábrán bemutatjuk a 3. táblázat szerinti kategóriák helyszínrajzi eloszlását a $3\,050\text{ m}^3/\text{s}$ vízhozammal futtatott modelleredményen. Az 1-3 kategóriák az igen alacsony vízsebesség miatt megközelítőleg az állóvizeket foglalják magukban. Ez az alcsoport túlnyomórészt a hullámtérre esik, ezen belül a mélység szerint az 1-2 kategóriák között differenciáltak a víztestek. A 3-as kategória elenyésző mértékben van jelen (a 4. ábráról nem leolvasható, csak a kategóriák területösszegzéséből tűnik ki – 5. ábra) a főág és néhány mellékág legkülső, nagyon vékony partmenti sávjában, ahol a modellezett körülmények egyeznek a kritériummal.

A főágot a 7-9 alcsoport jellemzi, ahol a 9-es egyértelműen domináns, a 4. ábra b) és c) ábrarészein szépen kirajkolja a fő áramlási teret, a 8-as pedig még éppen észrevehető néhány helyen a főág partmenti sávjában. A 7-es kategóriához nem tartozik terület, ilyen körülmények nem alakultak ki ebben a vízjárési állapotban (egyikben sem – 5. ábra).

A főág fő áramlási sávon kívül eső részei, illetve a közelebbi mellékágak a 4-6 alcsoportba tartoznak. A 4-es kategória a 3-ashoz hasonlóan kevésbé észlelhető a 4. ábrán, annál azonban némileg nagyobb területet foglal magában. Az 5-6-os kategóriák a vízmélység szerint a közelebbi

mellékágakban és a főmeder partmenti sávjában (5), valamint a főmeder mélyebb, kisebb sodrású területein (6) vannak jelen.

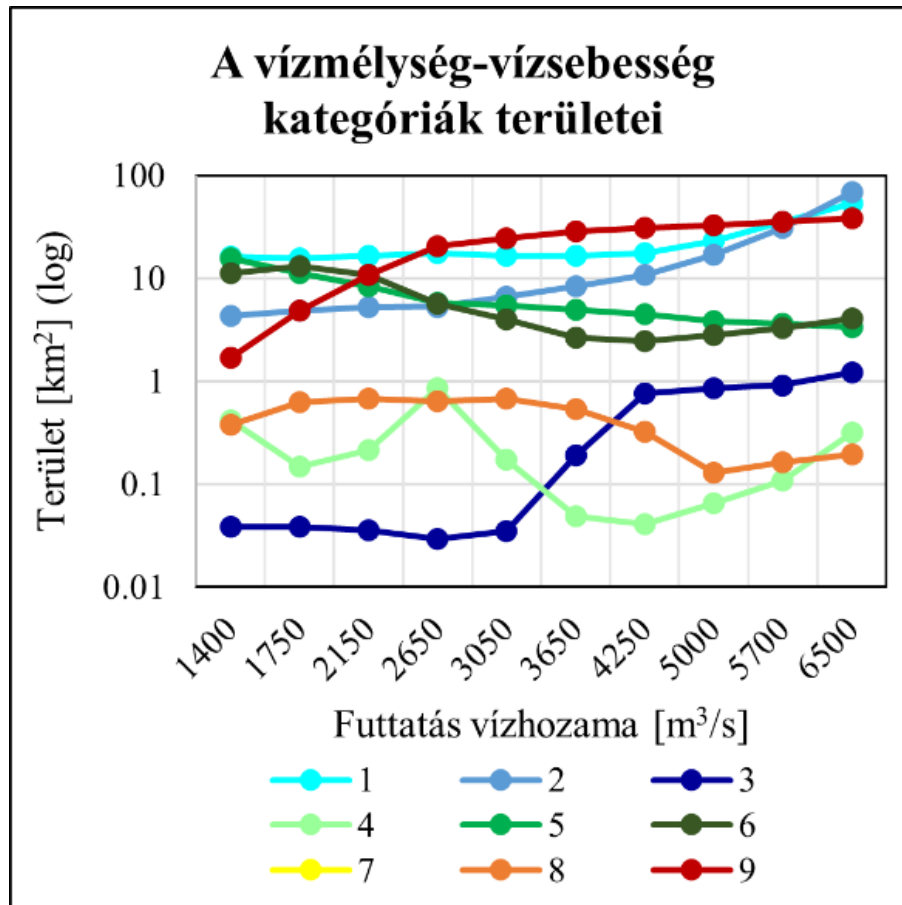
Az egyes kategóriák által lefedett terület számítható, ezek változása nyomon követhető az egyes vízjárési állapotok között az 5. ábrán. A kategóriákat a 3. táblázat és a 4. ábra színezésével egyezően ábrázoltuk, a terület tengelye a könnyebb elkülöníthetőség miatt logaritmikus. Az előző jellemzéssel összhangban, ezen ábra alapján 3 nagyobb klaszter különíthető el:

- Bármelyik vízjárési állapotban az 1-, 2-, 5-, 6- és 9-es kategóriák a legmeghatározóbbak (a helyszínrajzi ábrán is ezek észrevehetőek leginkább). A kisebbtől a nagyobb vízhozamú futtatások felé haladva megnövekszik a 9-es és csökken az 5-6-os kategóriák kiterjedése, ez közelítőleg a főágbeli körülmények változását képezi le. Az 1-2 kategóriák területe előbb lassabb, majd gyorsuló ütemben növekszik, ami pedig a hullámtéri vízborítás változásával mutat parallel vonásokat. Ezen öt kategória mögött a Duna-méretű folyamokat túlnyomórészt leíró áramlások

- vízmozgás (Froude-szám < 1) sejlík fel, a két alapváltozó viszonylag kiegyenlített és egyforma irányban változik a vizsgált körülmények között.
- A 3-, 4- és 8-as kategóriák jellemzően átmenetet képeznek, az előző klaszter kategóriáit övezik, területük törtrésze azoknak. Többnyire szűk sávokban, apró foltokban jelennek meg a térképen, bár megjegyezzük, hogy még nagyobb vízhozamok modellezése esetén a 3-as kategória területe várhatóan tovább nőtt

volna a hullámtéren, ennek a folyamatnak az eleje látszik is az ábrán.

- A 7-es kategóriába eső területek az összes futtatásból hiányoznak. Az ide tartozó kis vízmélység, nagy áramlási sebesség megadott körülmények között már rohanó vízmozgást képez (pl. töltésmeghágás). A Duna hazai szakaszán ennél békéesebb viszonyok uralkodnak, másrészt az egyensúlyi állapot beálltáig futtatott permanens szimulációk sem segítették elő a kategória megjelenését.



5. ábra. Az egyes vízmélység-vízsebesség kategóriák által lefedett területek alakulása a modellezett vízjárési állapotokban

Megjegyzés: A kis területű kategóriák jobb láttatásáért a függőleges tengely logaritmikus

Figure 5. Areas covered by the different depth-velocity categories throughout the modeled flow regimes.

Note: The logarithmic y axis

Összevetés a potamális osztályokkal

A potamális osztályozás egyik szubjektív vonása, hogy a kategóriák definíciójában a főággal való összeköttetés (vagy annak hiánya) általánosan megfogalmazott, jellemzően nincs vízjárési állapothoz kötve. A területtel foglalkozó diplomamunkában (Molnár 2021) a korábbi modellfuttatás alapján készült egy besorolás a nagyobb víztestekre, amellyel a 4. táblázatban összevetjük a jelen vízmélység-vízsebesség kategorizálás eredményeit. A víztestek kategóriája a 4. ábráról leolvasható; ahol több is jellemzi az adott vízfelületet, ott a nagyobb kiterjedésű kategória került a 4. táblázatba.

Két kivételtől (Cserta-Duna, Mocskos-Duna) eltekintve a többi víztestnél a potamális osztályhoz rendelhető egy-egy adott vízmélység-vízsebesség kategória. A parapotamon-A és -B osztályok ugyan mindkét esetben a 2-es kategóriának feleltek meg, ezek azonban definíció szerint csak a felvízi elzárás típusa szerint különböznek, ami nem indokol különbséget a medergeometriában, ezáltal közvetetten a vízmélységben és az áramlási sebességben sem. Ezzel szemben az eupotamon-A és -B osztályok (főág és folyamatos átfolyású mellékágak) esetében már logikus a külön kategóriák szerinti eltérés (1. táblázat).

4. táblázat. A vizsgált terület főbb víztestei potamális osztályainak összevetése a vízmélység-vízsebesség kategóriákkal a $Q = 3\,050\text{ m}^3/\text{s}$ vízhozamú futtatás esetén (Molnár 2021 alapján kiegészítve)

Table 4. A comparison of the potamal classes and the depth-velocity categories determined for the area's main water bodies drawn by the $Q = 3\,050\text{ m}^3/\text{s}$ simulation (based on Molnár 2021 with additions)

Víztest	Potamális osztály ($Q = 3\,050\text{ m}^3/\text{s}$)	h-v kategória ($Q = 3\,050\text{ m}^3/\text{s}$)
Duna főág	eupotamon-A	9
Grébec-Duna	parapotamon-B	2
Decsi-Nagy-Holt-Duna	plesiopotamon	1
Decsi-Kis-Holt-Duna	plesiopotamon	1
Rezéti-Holt-Duna	parapotamon-A	2
Vén-Duna	eupotamon-B	5
Cserta-Duna	plesiopotamon	2
Káposztás	plesiopotamon	1
Nyéki-Holt-Duna	plesiopotamon	1
Bátai-holtág	plesiopotamon	1
Sugovica	parapotamon-A	2
Szeremlei-Sugovica	plesiopotamon	1
Kádár-Duna	eupotamon-B	5
Bezerédi-Duna	parapotamon-B	2
Cigány-zátony	parapotamon-B	2
Mocskos-Duna	plesiopotamon	2
Külső-Béda	plesiopotamon	1

E besorolás robusztusságát gyengíti, hogy a vízjárás állapotok között megváltozott körülmények időnként kategóriaváltást okozhatnak egy-egy víztest esetében. A változásnak viszont vannak rendszerszintű sajátosságai, az 5. táblázatban két jellemző tendencia látszik: 1) változatlan sebességtartomány mellett nő a vízmélység, tehát a 3. táblázat mátrixának ugyanazon sorában maradunk; 2) mind a sebes-

ség, mind a vízmélység kategóriát vált, tehát a mátrix eggyel lentebbi sorába lépünk. Egy kivétellel (Cigány-zátony) az előbbi csoportba a parapotamon-A, -B és plesiopotamon osztályokat, utóbbi csoportba pedig az eupotamon-A és -B osztályokat sorolhatjuk. Meg kell vizsgálni annak lehetőségét, hogy mindezek alapján a kategóriaváltások körültekintő tervezéssel belefoglalhatóak-e a tizipálásba.

5. táblázat. Példák a vízmélység-vízsebesség kategóriák vízjárás állapotok közötti megváltozására
Table 5. Examples on the change of the depth-velocity category between different flow regimes

Víztest	h-v kategóriák három különböző futtatásban		
	1 400 m^3/s	3 050 m^3/s	5 700 m^3/s
Duna főág	5	9	9
Grébec-Duna	1	2	2
Decsi-Nagy-Holt-Duna	1	1	2
Rezéti-Holt-Duna	2	2	3
Vén-Duna	2	5	6
Cserta-Duna	2	2	2
Nyéki-Holt-Duna	1	1	2
Kádár-Duna	1	5	6
Cigány-zátony	1	2	5
Külső-Béda	1	1	2

E kezdeti jó egyezések alapján ez a kategorizálás segíthet a víztestek jellegének változását több állapotváltozó mentén, számszerűsíthetően nyomon követni. Ezen felül a már említett ökológiai vonatkozás okán átgondolt előkészítés után akár a víztestek mint élőhelyek jellemzésére is alkalmazható. Ezzel lehetőség nyílna egyetlen aggregált, vegyes (hidrodinamikai és ökológiai) értelmezésű indikátort használni a hosszútávú vizsgálatokban.

ÖSSZEFOGLALÁS

A fenntarthatóság jegyében egyre többet hallunk a természetalapú megoldásokról (NBS, nature based solutions) (Albert és társai 2021) és a folyamatorientált tervezésről (Beechie és társai 2010). Ezek keretében tüztük ki hosszútávú célunkat: a Duna alsó-magyarországi szakaszán húzódó hullámtér (Gemenci-erdő és Béda-Karapancsa) hosszú idejű (nem-permanens) morfordinamikai szimulációkra alapozott komplex vizsgálatát, javaslatként egy ember és természet közötti kompromisszumos, önfenntartó állapotra (Erős és Bányai 2020). A hosszútáv jelen pontján visszapillantva a fentiekben bemutatott terület 2D hidrodinamikai modellezésének első eredményeit, ezen belül is a nyers eredményekből származtatható egyéb paramétereket. Célunk volt egy olyan eszköztár összeállítása, amely a hordaléktranszporttal kibővített modellezés során a hatásvizsgálat részeként hasznosítható.

Bemutattuk az eddig árvízi kockázatelemzésben alkalmazott vízmélység-vízsebesség alapú kategorizálás vonatkozó alkalmazását. Amellett, hogy ez a mutató szemléletesen elkülönítette a folyó-hullámtér rendszer különböző típusú víztesteit, jó egyezést mutatott a létező, ám viszonylag szubjektív potamális osztályozással. Megfontolva ezen felül a vízmélység és vízsebesség több kutatásban kimutatott élőhely szerepét, mind hidrodinamikai, mind élőhely-hidraulikai megközelítésben jó lehetőséget látunk ebben a tipizálásban. Bármely beavatkozás hatásvizsgálatában egyszerűen előállítható a két alapváltozó, akár igen nagy területen, mezőszerte is. Az elválasztó értékhatárok kijelölése a vizsgált tartomány vízmélységeinek és vízsebességeinek ismeretében megtehető úgy, hogy a létrehozott kategóriák megfelelően jellemezzék a terület víztesteit.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A közleményben bemutatott kutatás az Innovációs és Technológiai Minisztérium Kooperatív Doktori Program Doktori Hallgatói Ösztöndíj Programjának a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alapból finanszírozott szakmai támogatásával, valamint a Széchenyi Terv Plusz program keretében az RRF-2.3.1-21-2022-00008 számú projekt támogatásával valósult meg. Köszönjük a BME Vízépítési és Vizgazdálkodási Tanszéknek az átadott számítási rácsalót, illetve az SMS és Tecplot szoftverekhez biztosított licenst. Köszönjük Tamás Enikő Annának, Kutassy Emesének és Mórocz Attilának a digitális terepmódel pontosságához nyújtott segítségüket, valamint köszönjük a kézirat bírálóinak észrevételeit, javaslatait.

IRODALOMJEGYZÉK

Albert, C., Brillinger, M., Guerrero, P., Gottwald, S., Henze, J., Schmidt, S., Ott, E., Schröter, B. (2021). Planning nature-based solutions: Principles, steps, and insights.

Ambio, 50. pp. 1446-1461.
<https://doi.org/10.1007/s13280-020-01365-1>

ADUVIZIG (Alsó-Duna-völgyi Vízügyi Igazgatóság) 2022. évi dunai hajóút-kitűzési terve (2022).
<https://tinyurl.com/hajout> (Megtekintés: 2023. január 18.)

Amoros, C., Roux, A.L. (1988). Interaction between water bodies within the floodplains of large rivers: function and development of connectivity. *Münstersche Geographische Arbeiten*, 29. pp. 125-130.

Bakonyi P., Krámer T., Józsa J. (1999). Ártéri öblözetek töltésszakadást követő elöntési folyamatainak modellezése: I. A folyó és a szakadási szelvény modellje. *Hidrológiai Közlöny* 79(4). pp. 227-233.

Baranya S., Muste, M., Abraham, D., Pratt, T.C. (2016). Acoustic Mapping Velocimetry (AMV) for in-situ bedload transport estimation. In: *River Flow*. CRC Press, pp. 1-7. ISBN 978-1-138-02913-2
<https://doi.org/10.1201/9781135644479-247>

Beechie, T.J., Sear, D.A., Olden, J.D., Pess, G.R., Buffington, J.M., Moir, H., Roni, P., Pollock, M.M. (2010). Process-based Principles for Restoring River Ecosystems. *BioScience*, 60(3). pp. 209-222.
<https://doi.org/10.1525/bio.2010.60.3.7>

Berger, R.C., Tate, J. N., Brown, G. L., Savant, G. (2010). *Adaptive Hydraulics – Users’ Manual*. U.S. Army Engineer Research and Development Center (ERDC) Coastal and Hydraulics Laboratory.

Carrara, F., Altermatt, F., Rodriguez-Iturbe, I., Rinaldo, A. (2012). Dendritic connectivity controls biodiversity patterns in experimental metacommunities. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 109(15). pp. 5761-5766.
<https://doi.org/10.1073/pnas.11196511109>

Chen, X., Chen, L., Zhao, J., Yu, Z. (2015). Modeling the hydrodynamic interactions between the main channel and the floodplain at McCarran Ranch in the lower Truckee River, Nevada. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 15. pp. 2161-2172.
<https://doi.org/10.5194/nhess-15-2161-2015>

Chen, X., Chen, L., Stone, M. C., Acharya, K. (2020). Assessing connectivity between the river channel and floodplains during high flows using hydrodynamic modeling and particle tracking analysis. *Journal of Hydrology* 583: 124609.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124609>

Erős T., Bányai Zs. (2020). Sparing and sharing land for maintaining the multifunctionality of large floodplain rivers. *Science of the Total Environment*, 728: 138441.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138441>

Farkas-Iványi K., Trájer A. (2015). The Influence of the River Regulations on the Aquatic Habitats in River Danube, at the Bodak Branch-System, Hungary and Slovakia. *Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences*, 10(3). pp. 235-245.

Freshwater Ecology adatbázis. <https://tinyurl.com/fweology> (Megtekintés: 2023. január 17.)

- Füstös V., Baranya S., Fleit G., Erős T., Szalóky Z., Tóth B., Józsa J. (2019). A felső-magyarországi Duna élőhelyszempontú hidrodinamikai vizsgálata. *Pisces Hungarici*, 13. pp. 81-90.
- Füstös V., Erős T., Józsa J. (2021). 2D vs. 3D Numerical Approaches for Fish Habitat Evaluation of a Large River-Is 2D Modeling Sufficient? *Periodica Polytechnica – Civil Engineering*, 65(4). pp. 1114-1125. <https://doi.org/10.3311/PPci.17788>
- Füstös V., Sály P., Szalóky Z., Tóth B., Vitál Z., Specziár A., Fleit G., Baranya S., Józsa J., Erős T. (2022). Effects of a nuclear power plant warmwater outflow on environmental conditions and fish assemblages in a very large river (the Danube, Hungary). *Ecohydrology*, e2512. <https://doi.org/10.1002/eco.2512>
- Gabriel, E., Fagg, G.E., Bosilca, G., Angskun, T., Dongarra, J.J., Squyres, J.M., Sahay, V., Kambadur, P., Barrett, B., Lumsdaine, A., Castain, R.H., Daniel, D. J., Graham, R.L., Woodall, T.S. (2004). Open MPI: Goals, Concept, and Design of a Next Generation MPI Implementation. In: *Proceedings, 11th European PVM/MPI Users' Group Meeting, Budapest, Hungary, September 2004*. https://doi.org/10.1007/978-3-540-30218-6_19
- Gilbert, J. T., Wilcox, A. C. (2020). Sediment routing and floodplain exchange (SeRFE): A spatially explicit model of sediment balance and connectivity through river networks. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 12: e2020MS002048. <https://doi.org/10.1029/2020MS002048>
- Goda L., Kalocsa B., Tamás E.A. (2007). River bed erosion on the Hungarian section of the Danube. *Journal of Environmental Science for Sustainable Society*, 1. pp. 47-54. <https://doi.org/10.3107/jesss.1.47>
- Guida, R.J., Swanson, T.L., Remo, J.W.F., Kiss T. (2015). Strategic floodplain reconnection for the Lower Tisza River, Hungary: Opportunities for flood-height reduction and floodplain-wetland reconnection. *Journal of Hydrology*, 521. pp. 274-285. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.11.080>
- Habersack, H., Hein, T., Stanica, A., Liska, I., Mair, R., Jäger, E., Hauer, C., Bradley, C. (2016). Challenges of river basin management: Current status of, and prospects for, the River Danube from a river engineering perspective. *Science of the Total Environment*, 543. pp. 828-845.
- Harka Á., Sallai Z. (2004). Magyarország halfaunája. Szarvas, Nimfea Természetvédelmi Egyesület.
- Hauer, C., Mandlbürger, G., Habersack, H. (2008). Hydraulically related hydro-morphological units: description based on a new conceptual Mesohabitat Evaluation Model (MEM) using LiDAR data as geometric input. *River Research and Applications*, 25. pp. 29-47. <https://doi.org/10.1002/rra.1083>
- Ijjas I., Kern K., Kovács Gy. (szerk.) (2010). Feasibility Study: The Rehabilitation of the Szigetköz Reach of the Danube. – Report, Ministry of Environment and Water, Budapest, pp. 184-189.
- Inskip P.D. (1982). Habitat suitability index models: northern pike. U.S. Department of the Interior, Fish and Wildlife Service, FWS/OBS-82/10.17.
- Junk, W.J., Bayley, P. B., Sparks, R.E. (1989). The Flood Pulse Concept in River-Floodplain Systems. In: Dodge, D. P. (ed.) *Proceedings of the International Large River Symposium (LARS)*. Canadian Special Publication of Fisheries and Aquatic Sciences 106. pp. 110-127.
- Kalocsa B., Zsuffa I. (1997). A Duna magyar szakaszának vízállásváltozásai. *Hidrológiai Közöny*, 77(4). pp. 183-192.
- Kalocsa B., Tamás E. A. (2002). A Duna-Dráva Nemzeti Park természetvédelmi kezelési terv tervezetének vizes fejezete.
- Kondolf, G.M., Boulton, A.J., O'Daniel, S., Poole, G. C., Rahel, F.J., Stanley, E.H., Wohl, E., Bång, A., Carlstrom, J., Cristoni, C., Huber, H., Koljonen, S., Louhi, P., Nakamura, K. (2006). Process-based ecological river restoration: visualizing three-dimensional connectivity and dynamic vectors to recover lost linkages. *Ecology and Society*, 11(2). p. 5. <https://doi.org/10.5751/ES-01747-110205>
- Krámer T., Józsa J., Bakonyi P. (1999). Ártéri öblözetek töltésszakadást követő elöntési folyamatainak modellezése: II. Az ártéri modell. *Hidrológiai Közöny* 79(4). pp. 234-239.
- Láng I. (2017). Teret a folyóknak! A nagyvízi mederkezelés szerepe a hazai árvízvédelemben. *Biztosítás és Kockázat*, IV(2). pp. 42-59. <https://doi.org/10.18530/BK.2017.2.42>
- Lasne, E., Lek, S., Laffaille, P. (2007). Patterns in fish assemblages in the Loire floodplain: The role of hydrological connectivity and implications for conservation. *Biological Conservation*, 139. pp. 258-268. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2007.07.002>
- Li, Y., Zhang, Q., Rui, Y., Yao, J., Tan, Z. (2018). 3D hydrodynamic investigation of thermal regime in a large river-lake-floodplain system (Poyang Lake, China). *Journal of Hydrology*, 567. pp. 86-101. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.10.007>
- Liang, D., Lu, J., Chen, X., Liu, C., Lin, J. (2020). An investigation of the hydrological influence on the distribution and transition of wetland cover in a complex lake-floodplain system using time-series remote sensing and hydrodynamic simulation. *Journal of Hydrology*, 587: 125038. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125038>
- Maaß, A.L., Schüttrumpf, H. (2019). Reactivation of Floodplains in River Restorations: Long-Term Implications on the Mobility of Floodplain Sediment Deposits. *Water Resources Research*, 55. pp. 8178-8196. <https://doi.org/10.1029/2019WR024983>
- Magyarország vízgyűjtő-gazdálkodási tervének második felülvizsgálata (2021). <https://vizeink.hu/vgt/> (Megtekintés: 2023. január 25.)
- McAlpin, T.O., Sharp, J.A., Scott, S.H., Savant, G. (2013). Habitat Restoration and Flood Control Protection in the Kissimmee River. *Wetlands*, 33. pp. 551-560. <https://doi.org/10.1007/s13157-013-0412-2>
- Molnár S. (2021). A magyarországi alsó-Duna élőhely szempontú helyreállításának modellvizsgálata. BSc diplomamunka. Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Építőmérnöki Kar, Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszék. p. 86.

Morales-Hernández, M., García-Navarro, P., Burguete, J., Brufau, P. (2013). A conservative strategy to couple 1D and 2D models for shallow water flow simulation. *Computers & Fluids*, 81. pp. 26-44. <https://doi.org/10.1016/j.compfluid.2013.04.001>

Nagy J., Kiss T. (2016). Hydrological and morphological changes of the Lower Danube near Mohács, Hungary. *Journal of Environmental Geography*, 9(1-2). pp. 1-6. <https://doi.org/10.1515/jengeo-2016-0001>

Potyó I., Gutí G. (2011). Folyami élőhelyek várható változásainak elemzése 1D hidrológiai modell segítségével. *Halászatfejlesztés*, 33. pp. 69-76.

Pringle, C. (2003). What is hydrologic connectivity and why is it ecologically important? *Hydrological Processes*, 17. pp. 2685-2689. <https://doi.org/10.1002/hyp.5145>

Rättich, M., Martinis, S., Wieland, M. (2020). Automatic Flood Duration Estimation Based on Multi-Sensor Satellite Data. *Remote Sensing* 12(4). p. 643. <https://doi.org/10.3390/rs12040643>

Schöll K., Kiss A., Dinka M., Ágoston-Szabó E., Schmidt A., Fehér G., Berczik Á. (2009). A gemenci hullámtér víztereinek hidrobiológiai különbségei (Duna-Dráva Nemzeti Park). MHT XXVII. Országos Vándorgyűlés, 2009. július 1-3. Baja.

Shao X., Fang, Y., Jawitz, J.W., Yan, J., Cui, B. (2019). River network connectivity and fish diversity. *Science of the Total Environment*, 689. pp. 21-30. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.06.340>

Szalóky Z., Füstös V., Tóth B., Erős T. (2021) Environmental drivers of benthic fish assemblages and fish-habitat associations in offshore areas of a very large river. *River Research and Applications*, 37(5). pp. 712-721. <https://doi.org/10.1002/rra.3793>

Támás E.A., Buzetky Gy., Eichhardt G., Kalocsa B., Sziebert J., Szilávik L., Tornyai G., Varga A., Virágh L., Zellei L. (2010). Ártéri vizes élőhely-rendszerek rekonst-

rukciós tervezésének tapasztalatai Gemenc és Béda-Karapancsa példáján. MHT XXVIII. Országos Vándorgyűlés, 2010. július 7-9. Sopron.

Tena, A., Piégay, H., Seignemartin, G., Barra, A., Berger, J.F., Mourier, B., Winiarski, T. (2020). Cumulative effects of channel correction and regulation on floodplain terrestrialisation patterns and connectivity. *Geomorphology*, 354. 107034. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2020.107034>

Teng, J., Vaze, J., Dutta, D., Marvanek, S. (2015). Rapid Inundation Modelling in Large Floodplains Using LiDAR DEM. *Water Resources Management*, 29. pp. 2619-2636. <https://doi.org/10.1007/s11269-015-0960-8>

Timbadiya, P.V., Krishnamraju, K.M. (2023). A 2D hydrodynamic model for river flood prediction in a coastal floodplain. *Natural Hazards*, 115. pp. 1143-1165. <https://doi.org/10.1007/s11069-022-05587-2>

U.S. Fish and Wildlife Service (1985). Habitat suitability models and instream flow suitability curves: pink salmon. *Biological report*, 10.109.

UTIBER KFT. – VIZITERV CONSULT KFT. – BME Konzorcium (2021). Dunai Hajóút Fejlesztési Program. II. szakasz (Szob – déli országhatár). Stratégiai Környezeti Vizsgálat, Környezeti Értékelés.

VITUKI Hungary – BME Konzorcium (2013). A Duna mértékadó árvízszintjeinek felülvizsgálata. Kutatási jelentés.

VIZITERV Environ Kft. (2021). Az előzetes árvízi kockázatbecslés, veszély- és kockázati térképek, a kockázatkezelési tervek első felülvizsgálata. Alsó-Duna tervezési terület összefoglalója.

Ward, J.V., Stanford, J.A. (1995). Ecological Connectivity in Alluvial River Ecosystems and its Disruption by Flow Regulation. *Regulated Rivers: Research & Management*, 11. pp. 105-119. <https://doi.org/10.1002/rrr.3450110109>

Zsuffa I. (1993). A gemenci erdő revitalizációjának vízimérnöki munkái. *Hidrológiai Közlemények*, 73(1). pp. 53-56.

A SZERZŐK



FÜSTÖS VIVIEN okleveles infrastruktúra-építőmérnök, jelenleg PhD tanulmányait folytatja a Vásárhelyi Pál Építőmérnöki és Földtudományi Doktori Iskolában. Kutatási témája a folyami élőhelyek hidromorfológiai vizsgálata mikro- és mezoléptékben. 2017 óta a Magyar Hidrológiai Társaság tagja.



ERŐS TIBOR biológus, 2005-ben szerzett PhD fokozatot az Eötvös Loránd Tudományegyetemen. Jelenleg az ELKH Balatoni Limnológiai Kutatóintézet igazgatója. Kutatási területe: haleygütések szerveződése édesvizekben, biológiai sokféleség és a környezeti tényezők kapcsolata édesvizekben, mintavétel reprezentativitása, monitorozó rendszerek fejlesztése, természetvédelmi területek kijelölése édesvizek természeti értékei alapján. 1999 óta a Magyar Hidrológiai Társaság tagja.



JÓZSA JÁNOS okleveles építőmérnök, professzor, a BME rektor emeritusa, az MTA rendes tagja, az MTA Műszaki Tudományok Osztályának elnöke. Kutatási területe a sekély felszíni vizek hidrodinamikája: határfelületi folyamatok, szél keltette tavi víz- és üledékmozgás mérése és numerikus modellezése, hullámtérs víznyelések áramlási, elkeveredési és hordalékvándorlási folyamatainak mérése és modellezése, ártéri elöntések modellezése. A Hidrológiai Közlemények szerkesztőbizottságának tagja.