



Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem – Építőmérnöki Kar

Élőhely szempontú folyószabályozás megalapozása korszerű hidromorfológiai adatelemzéssel

Országos Tudományos Diákköri Konferencia
2015



Készítette:	Fleit Gábor	BME Építőmérnök BSc hallgató
Konzulensek:	Dr. Baranya Sándor	adjunktus, BME Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszék
	Dr. Józsa János	tanszékvezető egyetemi tanár, BME Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszék
	Dr. Fleit Ernő	docens, Eötvös József Főiskola
	Török Gergely Tihamér	doktorandusz, BME Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszék



Tartalomjegyzék

Tartalmi kivonat.....	3
1. Bevezetés, témaválasztás indoklás.....	3
2. Irodalmi áttekintés.....	6
2.1. Hazai példa áramlási szempontú élőhely jellemzésre.....	6
2.2. Kitekintés – Joint Danube Survey 3.....	8
2.3. Külföldi példák hidraulikai alapú élőhely jellemzési módszerekre	10
2.4. Korszerű helyszíni áramlási és morfológiai felmérések, adatelemzési módszerek.....	13
2.4.1. Az ADCP működési elve	13
2.4.2. Az ADCP használata, funkciói.....	13
3. A vizsgált Duna-szakasz ismertetése vízföldrajzi és halfauna szempontok alapján	15
3.1. Vízföldrajz és hajózhatósági problémák	15
3.2. A halfauna.....	17
4. Mérések és adatfeldolgozási módszerek ismertetése	18
4.1. A mérések bemutatása	18
4.2. Adatfeldolgozási módszerek.....	23
4.2.1. Az ADCP-vel rögzített nyers adatok feldolgozása	23
4.2.2. Fenéksúszató feszültség becslése	25
4.2.3. A mederanyag minták feldolgozása	27
5. Eredményezők bemutatása.....	28
5.1. Medergeometria	28
5.1.1. Digitális medermodell	28
5.2.2. A mederalak megváltozása.....	30
5.1.3. Mederfenék mozgási sebesség becslése	34
5.2. Áramlási sebesség mezők	36
5.2.1. Mélységátlagolt sebességek.....	37
5.2.2. Háromdimenziós sebességeloszlások	38
5.2.3. Sebességvektorok mezői	40
5.3. Fenéksúszató feszültség mezők	42
5.4. Mederanyag	46
6. Az élőhely-modellezés bemutatása	49
6.1. A Hauer-féle élőhely jellemzés.....	49
6.2. Egy süllőfaj, a Sander vitreus élőhely-megfelelőségi vizsgálata	53
7. Összefoglalás	56
8. Következtetések	59



Tartalmi kivonat

Az elmúlt évtizedekben komoly változásokon mentek át a vízépitési létesítményekkel szemben támasztott elvárások, legfőképp a természetes vízi élőhelyek figyelembe vétele vált szükségessé, elvárttá. A klasszikus folyószabályozási művek hosszú ideig figyelmen kívül hagyták ezeket a szempontokat, így azok gyakran negatív hatással voltak az ott korábban kialakult természetes ökoszisztémára. Külföldi példák azt mutatják, hogy ilyen jellegű emberi beavatkozással érintett szakaszok revitalizációja tudományosan megalapozott módszerekkel lehetséges, azonban ezen eljárások komplex vízmérnöki, ökológiai és természetvédelmi szemléletet igényelnek.

Dolgozatom célja az ilyen jellegű, revitalizációhoz kapcsolódó tervezési feladatok egyik fontos eszközének, az élőhely modelleknek megismerése, továbbá egészen az adatgyűjtéstől kezdve, kísérlet tétele egy ilyen modell felépítésére egy konkrét hazai területre. A vizsgált Duna szakasz az 1672-1676 fkm között helyezkedik el, Sződliget térségében. Első lépésben a térségben végrehajtott terepi méréseket ismertetem az alkalmazott mérési eszközökkel. Itt elsősorban az ADCP műszer működési elvével és használatával foglalkozom, majd később a mérés során kapott nyersadatok feldolgozási módszerei kerülnek bemutatásra. Következőként a mérési adatok alapján elkészített digitális terepmodell és a szakaszra jellemző hidrodinamikai és hidromorfológiai jellemzőket (sebesség, fenékcúsztató sebesség, mederanyag) tartalmazó mezők kerülnek prezentálásra és értelmezésre a tanulságok levonásával párhuzamosan. A három különböző vizsgált vízállapotnak köszönhetően, az elkészített mezők összehasonlítása is lehetséges volt, melyek tovább bővítették a térség áramlási jellegével kapcsolatos ismereteinket. A dolgozat következő külföldi vizsgálatokra épülő élőhely modelleket vizsgálók meg, azok alkalmazhatóságának feltételeivel együtt. Ezt követően, a mérési adatok alapján kísérletet teszek a térség élőhely-alkalmassági paraméterekkel való leírására, egy konkrét süllőfajra nézve. A befejezésben a kapott eredmények kiértékelésével foglalkozom, és továbbfejlesztési irányokat fogalmazok meg.

1. Bevezetés, témaválasztás indoklás

Munkám fő célja egy itthon még gyermekcipőben járó tudományág, az öko-hidraulika megismerése és alkalmazására való kísérlet tétele, egy hazai Duna szakaszon.

Az elmúlt évtizedekben sokat változtak a vízépitési létesítményekkel, mesterséges beavatkozásokkal szemben támasztott elvárások, legfőképp a természetes vízi élőhelyek figyelembe vétele, megóvása vált szükségessé, sőt, kötelezővé. A hagyományos



folyószabályozási módszerek hosszú ideig figyelmen kívül hagyták az utóbb említett szempontokat és csupán minimális, látszólagos hatásvizsgálatok készültek, már ha egyáltalán készült ilyen jellegű tanulmány egy-egy beavatkozás során.

Napjainkban azonban egyre nagyobb szerepet kap ezen élőhelyek védelme (pl. EU Vízköri Keretirányelv), sőt a Duna Stratégia elindulásával a Duna még hangsúlyosabban kerül környezeti szempontú vizsgálatok alá. Természetvédelmi aspektusból tipikus problémának tekinthetők a hagyományos folyószabályozással érintett folyószakaszok, mivel ezekben az esetekben a mellékágak vagy sarkantyúk közötti területek feliszapolódása káros hatással lehet az ott korábban kialakult természetes ökoszisztémára. Külföldi példák azt mutatják, hogy ilyen jellegű emberi beavatkozásokkal érintett folyószakaszok revitalizációja tudományosan megalapozott módszerekkel elvégezhető, azonban ezen eljárások komplex vízmérnöki, ökológiai és természetvédelmi szemléletet igényelnek.

Az ilyen irányú vizsgálatok szükséges eszközei az úgynevezett élőhely modellek, melyek elsősorban a halak viselkedésére alapozva képesek megmutatni, hogy a vizsgált terület mennyire kedvez az adott fajoknak. Az élőhely modellezés alapvető elemei – többek között – a helyszíni medermorfológiai és áramlástani mérések és a számítógépes áramlásmodellezés. Jelen tanulmány az élőhely vizsgálatokat megalapozó korszerű helyszíni áramlásmérési eljárásokat és az azokból előállítható hidromorfológiai jellemzők becslési eljárását vizsgálja. Az előállított mezőkből próbálkozást tesztes általános élőhely jellemzésre, valamint szemléltetésként egy konkrét halfaj élőhely megfeleléségi vizsgálatára is.

A vizsgálatra kijelölt szakasz a Duna 1672–1676 fkm szelvényei között helyezkedik el (**1. ábra**), Sződliget térségében, ahol a Duna-Ipoly Nemzeti Park a meglévő folyószabályozási művek (két sarkantyúpár) természetvédelmi célú átalakítását tervezi. A cél egy olyan hosszútávon fenntartható állapot elérése, amely a térségre jellemző halfajok számára kedvező áramlási és medermorfológiai viszonyokat teremt. A vizsgálat két pillérre épül, egyfelől a jelenlegi állapotok feltárását, jellemzését és értékelését célzó helyszíni mérésekre, másfelől numerikus háromdimenziós áramlási és morfordinamikai szimulációkra. Hosszabb távú kutatási témában mindkét vizsgálati eljárás szerepel, de jelen dolgozat keretében a logikailag első, helyszíni mérésekre épülő hidromorfológiai elemzésre szorítkozom.

A dolgozat első részében néhány olyan releváns, élőhely vizsgálatokkal kapcsolatos tanulmányt ismertetek, melyek a dolgozat későbbi részében aztán alkalmazásra kerülnek, valamint rövid



áttekintést adok a helyszíni feltárások alapját adó akusztikus mérőműszerről. Bemutatom a vizsgálattal érintett Duna-szakaszt, kitérve mind a vízmérnöki, mind az élőhely jellemzésre. A dolgozat fő részeként ismertetem a korszerű vizsgálati és adatelemzési eljárásokat, majd az elvégzett mérések adatai alapján két- és háromdimenziós mezőkön keresztül mutatom be az általunk vizsgált legfontosabb abiotikus élőhely jellemzők eloszlásait. Abiotikus tényezőnek a környezet fizikai, kémiai feltételeit nevezzük. Ezek lehetnek éghajlati, hidrológiai, illetve vízi környezetben hidraulikai paraméterek is. Jelen tanulmányban áramlási valamint hidro- és medermorfológiai paraméterekkel foglalkozom, mint abiotikus leírók. A kapott hidrodinamikai és morfológiai mezők felhasználásával pedig kísérletet teszek egy élőhely modell felállítására a Duna-szakaszra. A dolgozat végén a kutatásom során szerzett tanulságokat és következtetéseket vonom le, majd jövőbeli mérésmethodikai fejlesztési javaslatokat teszek.



1. ábra – A vizsgálati terület áttekintő térképe (Google Föld)



2. Irodalmi áttekintés

2.1. Hazai példa áramlási szempontú élőhely jellemzésre

A Duna hosszának 2847 kilométeréből 417 km esik hazánk területére. A halfauna természetes sokféleségének megőrzésének, sőt javításának érdekében feltétlenül szükséges, hogy részletes ismeretekkel rendelkezünk a halegyüttesek összetételéről és dinamikájáról a Duna magyarországi szakaszán, főleg, ha figyelembe vesszük a hazai és nemzetközi szintű természetvédelmi kötelezettségeket. A halállomány térbeli és időbeli monitorozása önmagában nem elegendő a halfajok populációinak megőrzéséhez. Ehhez ugyanis szükséges részletes ismeretek szerzése arról, hogy az egyes fajok milyen környezeti viszonyok között, milyen mennyiségben fordulnak elő. Erre tett kísérletet egy hazai kutatókból álló csapat (Erős *et al.*, 2008)

A csoport részletes mintavétellel tanulmányozta a halállomány összetételét és az egyes fajok élőhely használatát a Duna litorális zónájában, a Gönyű és Göd (1786-1665 fkm) közötti szakaszon. Összesen 71 db, egyenként 500 méter hosszúságú szakaszt vizsgáltak 2007 nyarának éjjelein. Ilyen jellegű mintavételeknél rendkívül fontos az éjszakai munka, ugyanis a halak döntő többsége éjszaka aktív, továbbá számos, nappal a mederben tartózkodó halfaj éjszaka a partközelségbe húzódik, illetve az sem elhanyagolható, hogy sötétben a halak kevésbé észlelik a mintavételt végzőket, így „zavartalanabb” minta vehető. A halászatot egyenáramú aggregátoros halászgéppel végezték a parttól kb. 1–15 méteres távolságban. Az ilyen rendszerű halászgépeknek azonban korlátai vannak, maximum 1–1,5 méteres vízmélységnél alkalmazhatók megfelelően. Léteznek azonban olyan tudományos célú halászeszközök, melyek a mélyebb zónák felderítésére is alkalmasak (pl. húzóháló, fenékhorg) azonban ezeket csak nagyobb léptékű (és költségvetésű) kutatásoknál használják.

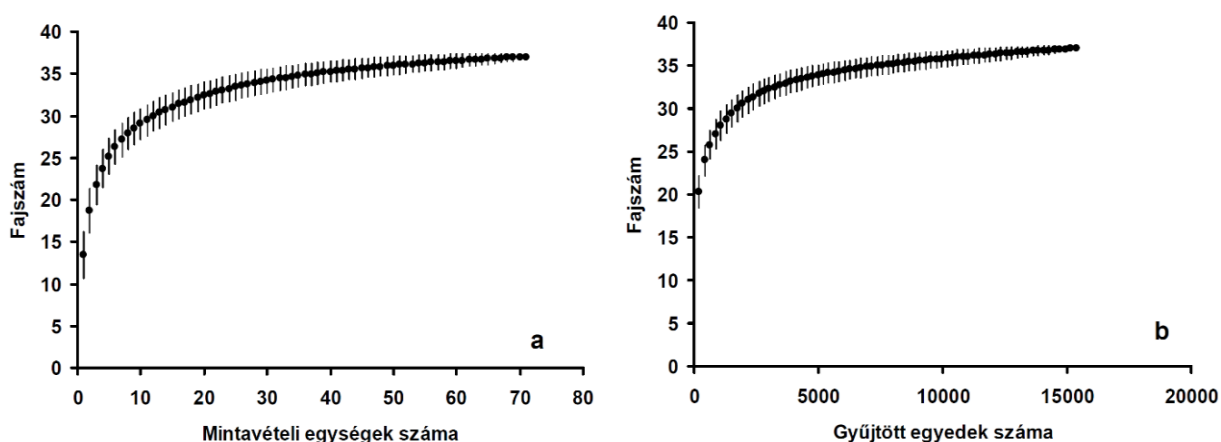
Az abiotikus tényezőkkel való élőhely leírás terepi, áramlástan és medermorfológiai mérések alapján történt. A mesohabitat (10^0 – 10^3 m) léptékű élőhely leíráshoz minden 500 méteres szakaszon a következő változokról gyűjtöttek információt: átlagos parttávolság, átlagos vízmélység, átlagos áramlási sebesség, az aljzat összetétele (iszapos-homok, homok, kavics, kő, szikla százalékos megoszlása), makrovegetáció százalékos borítása illetve nagyobb fa, illetve uszadék darabszáma a halászott szakasz 1 m széles sávjában.

Három fő élőhely típust különítettek el. Az első a lassú folyású, vagy állóvíz, iszapos, homokos élőhely, mely elsősorban a sarkantyúk mögött kialakuló „holtvizes” területeken, továbbá a



mellékágakban alakulnak ki. A második, egy rendkívül sebes áramlású, 100%-ig kavicsborítású élőhely, mely tipikusan szigetek csúcsainál és kisebb-nagyobb kiszögellések felvizi oldalán található. Az utolsó pedig a mesterséges élőhelyek, melyeket 100%-os kavicsborítás és változatos áramlási viszonyok jellemeznek.

36 halfaj, összesen több mint 15 ezer példányát gyűjtötték be a felmérések során. Egyetlen mintavételi szakaszon (500 m) átlagosan 13 halfajt lehetett befogni. Ez a szám meredeken növekedett a mintavételi egységek számának növekedésével. Tíz mintavételi szakasz használatát követően új fajok kimutatása már csak további jelentős mintavételi terület növekedésével volt elérhető. Hasonló tendenciát mutat a fajok számának változása, a begyűjtött egyedek számának növekedése hatására (2. ábra).



2. ábra - Fajszám növekedése, a) a mintavételi egységek b) a gyűjtött egyedek számának növelése hatására /Erős et al., 2008/

A szerzők konstatálták, hogy a legutóbbi ilyen jellegű mérésükhöz (2004) képest nem történt jelentősebb változás a Duna ezen szakaszának litorális zónájában, továbbá külön sikernek könyvelték el, hogy rendkívül ritka fajokat is sikerült kimutatniuk a mintavételek során, amit az éjszakai halászatnak tudtak be.

Meg kell jegyeznünk, hogy a feltárások nélkülözték az abban az időben már elérhető részletes áramlásmérési eljárásokat és hasonlóképpen nem történt mélyreható hordalékelemzés sem, amik véleményünk szerint minőségi előrelépést jelenthetnek hasonló vizsgálatoknál.

Fontosnak tartom továbbá megjegyezni, hogy vízmérnöki oldalról is történtek már korábbi próbálkozások kezdeti élőhelyhidraulikai vizsgálatokra (Krámer et al. 2006).



2.2. Kitekintés – Joint Danube Survey 3

2013 augusztusának végén lehetőségem volt csatlakozni egy teljes napra az ún. Nemzetközi Duna Expedícióhoz (www.danubesurvey.org), azzal a fő céllal, hogy megismerjem, milyen módszereket alkalmaznak egy ilyen nagyságrendű méréssorozatban a halállomány felmérésre illetve ezzel egyidejű medermorfológiai és áramlástanai adatok gyűjtésére.

Idén harmadik alkalommal került megszervezésre a Nemzetközi Duna Expedíció, melynek során a Duna mintegy 2400 kilométeres szakaszán (Regensburg–Duna-delta) végighajózott a kutatócsoport, hogy 68 előre kijelölt helyen különféle mintákat vegyenek.

A Duna egy közismerten nemzetközi folyó, több Európai Unió országon folyik keresztül. Az EU Víz Keretirányelvének értelmében minden tagországnak kötelező vizsgálnia a felszíni vizeit, így a Duna ökológiai állapotával kapcsolatban is mindig a legfrissebb információkra van szükség. Az expedíció hat évente kerül megszervezésre, mivel az egyes tagországoknak ilyen időintervallumonként kell új vízgyűjtő-gazdálkodási tervet készíteniük, melyek elsősorban a vízminőség javítását célozzák meg.



3. ábra – Az Argus kutatóhajó fedélzete /Készítette: Fleit András/

A mérési módszereket és eszközöket illetően, a számtalan mikro-, makrobiológiai és biokémiai minta mellett meglepő, hogy elenyésző számban történnek csak adatgyűjtések a medermorfológiát, áramlási viszonyokat illetően, de ami talán még meglepőbb, a halfaunát



illetően is. Utóbbi célra, a korábban említetthez (Erős *et al.*, 2008) hasonló géppel fogják a halakat a mérési állomásokon (de nem mindegyiknél!), a Duna jobb és bal parti sávjában egyaránt, továbbá itt a meder mélyebb zónáit is fel tudják mérni, húzóháló segítségével. Utóbbi méréstípust 500 méteres szakaszokon végzik, egyenletes sebességgel haladva a kutatóhajóval (**3. ábra**), 8 másodperces periódusokat alkalmazva. Ez azt jelenti, hogy 8 másodpercig áram alatt tartják a hálót, majd a következő 8 másodpercre lekapcsolják. Eközben GPS méri a megtett távolságot, és amint eléri az 500 métert, leállnak és kiemelik a hálót.

Ahogy a kutatás tudományos vezetőjétől, Dr. Csányi Bélától megtudtam, ezeket a méréseket minden esetben nappal végzik. Ez pusztán biztonsági megfontolások miatt van így, és ő személy szerint ezt nagy hibának tartja, főleg ha figyelembe vesszük a korábban taglalt idevágó cikkben (Erős *et al.*, 2008) említett hátrányokat a kedvezőtlen napszakválasztást illetően.

Kíváncsi voltam, hogy egy ilyen nagyságrendű kutatás hidromorfológus csapata milyen eszközöket és technikákat alkalmaz, mennyire hasonló ez az általunk végzett, később bemutatásra kerülő mérésekhez. A helyi konzultáció során kiderült, hogy alapvetően nincs jelentős különbség az ő módszereik, és a mieink közt, noha a mérések térbeli kiterjedése és az adatfeldolgozás módszere számottevően eltér. Egy-egy mérési pontban, ahol lehorgonyoznak a kutatóhajók, egy kisebb motorcsónakkal vízre szállnak és a mérési pont al- és felvízén is végeznek néhány keresztaszvénnyel felmérést az ADCP műszer segítségével (az eszköz a dolgozatban később ismertetésre kerül). Ennek fő célja a sebességviszonyok megismerése és a meder alakjának szelvény menti feltérképezése, illetve ennek a két paraméternek ismeretében járulékos információként a vízhozamokat is jegyzik, de ennél tovább nem mennek. Ez azonban a halászati mérésekhez hasonlóan csak a nagyobb állomásoknál zajlik.

A kezdeményezést jónak tartjuk, de alapvető problémának tekintjük, hogy nagyon alacsony számú mintaterület kerül vizsgálat alá, és azok is elsősorban vonalszerű keresztaszvénnyel tartoznak, nem pedig szakaszok mezőszzerű jellemzését hajtják végre. A célirányos, korszerű vízmérnöki mérési módszerekkel már folyószakaszok részletes, kifejezetten mezőszzerű hidromorfológiai adatfeltárását tudjuk végrehajtani, ahogy az egy, a BME Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszékének vezetésével végrehajtott országos projektben bemutatásra és alkalmazásra került (BME VIT, 2009).



2.3. Külföldi példák hidraulikai alapú élőhely jellemzési módszerekre

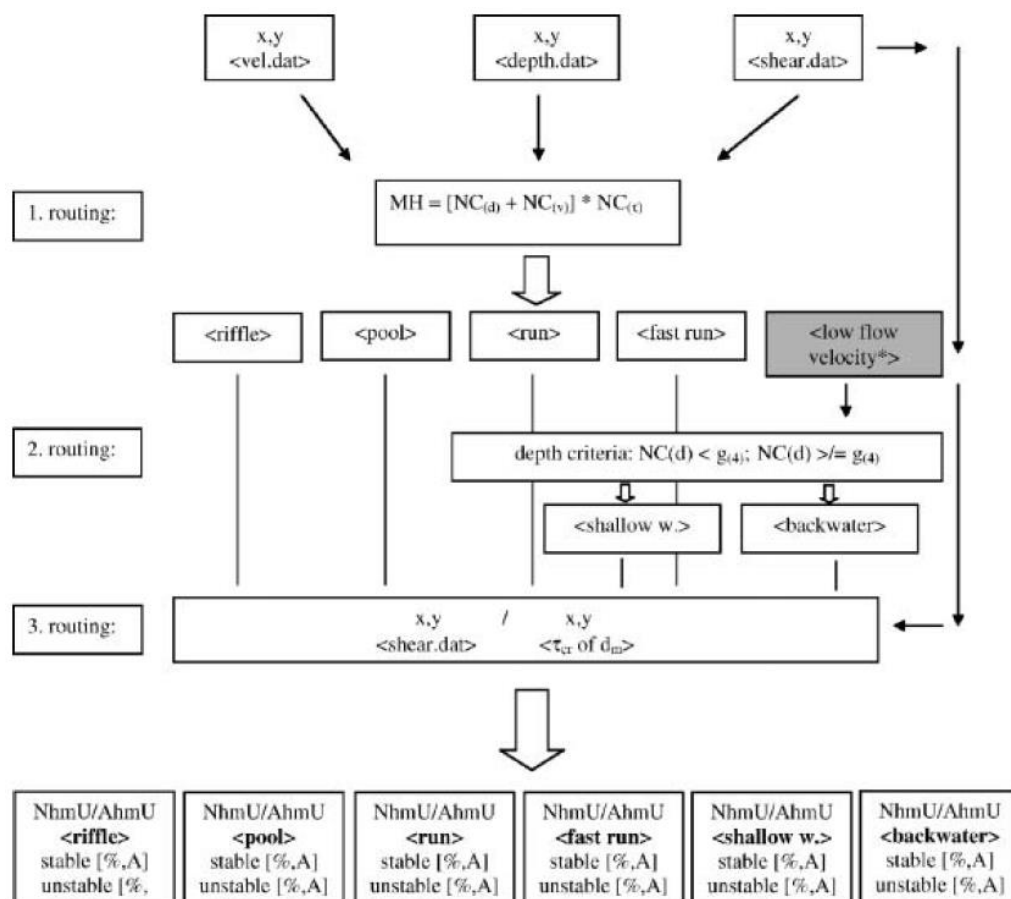
A természetvédelmi szempontú folyómeder rendezés országunkban még nem számít elterjedt dolognak, legalábbis nem a vízmérnöki szempontú megközelítést illetően. Így nem meglepő, hogy rendkívül szerény a magyar nyelvű, ill. magyar szerzőktől eredő tanulmányok száma a témában. Számos külföldi kutatóintézetben ezzel szemben már hosszabb ideje folytatnak hidraulikai alapú élőhely vizsgálatokat, így a nemzetközi irodalomban már fellelhetők a témával foglalkozó tudományos jelentések.

Nem kell messzire menni, Ausztriában már intenzíven foglalkoznak a téma kutatásával. Ez szükségzerű is, hiszen szomszédainknál nagyságrendileg több folyószabályozási műtárgy épül/épült a Dunába, így hosszú távon elkerülhetetlen ilyen jellegű kutatások folytatása, ha meg akarnak felelni saját maguk, de főleg az EU által támasztott természetvédelmi követelményeknek.

Szemléltetésként kiemelem azt az osztrák kutatócsoportot (Hauer *et al.*, 2008), amely megfogalmazott egy élőhely modellezési eljárást a hazájukban található Kamp folyóra, és azt sikeresen igazolni tudták kis- és nagyvízi ($3,6\text{--}89\text{ m}^3\text{s}^{-1}$) állapotokra is. Ez a modell hat mesohabitat kategóriát különböztet meg, melyeket egy több lépéses struktogram alapján, három bemeneti adatból (mélységátlagolt áramlási sebesség, vízmélység, fenékcúszató feszültség) különít el egyértelműen (**4. ábra**). Ehhez természetesen szükséges egy teljes digitális terepmodell továbbá több, a hidrodinamikai jellemzőket tartalmazó mező is a vizsgált területre, hogy egy adott pont élőhely-jellemzése elvégezhető legyen a bemeneti paraméterek lokális értékei alapján. Ezek meghatározásához a kutatók egy rendkívül részletes lézershennelési technikát (LiDAR) alkalmaztak, a hidrodinamikai paraméterek pedig – az általam bemutatott eljárással ellentétben – egy numerikus modell eredményeiből származtak. Az osztrák tanulmány egyik jelentős eredménye az, hogy számottevő változásokat véltek felfedezni a mesohabitatok területi eloszlásában a kis- és nagyvízi helyzetek között. Ez többek közt annak tudható be, hogy egy – a Dunához képest – kis folyón végezték a vizsgálataikat, a Kamp ugyanis mindössze 153 km hosszú (és melleleg a Duna egyik mellékfolyója). Kérdéses, hogy a felállított élőhely modell mennyire általánosítható, vagy terjeszthető ki eltérő hidrodinamikai és morfológiai paraméterekkel jellemezhető folyókra. A kérdés megválaszolásában egyelőre nem vagyunk kompetensek, de szinte biztosan kijelenthető, hogy a legmegbízhatóbb élőhely jellemzés az adott folyószakaszra elvégzett biológiai vizsgálatokra kell, hogy épüljön. Már itt



megjegyezzük, hogy a dolgozat második felében ismertetett élőhely-modell felállítása egyelőre még nem lehetett hely-specifikus, inkább hipotetikus, merthogy elsősorban a módszertant hivatott bemutatni, egyúttal felhívva a figyelmet a hazai, ökológiai szemléletű vizsgálatok szükségességére.

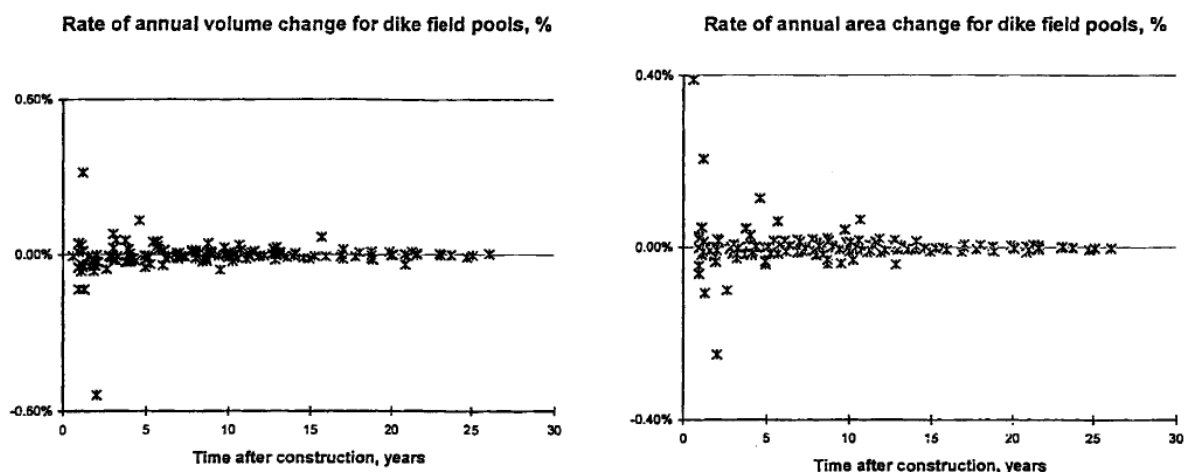


4. ábra – Az élőhely modell struktogramja /Hauer et al. 2008/

A szakirodalmi szemelvényezésből természetesen nem maradhatnak ki a tengerentúli publikációk sem. Egy ilyen témába vágó, 1995-ös tanulmány (Shields, 1995) hasonló, ám nagyságrendileg nagyobb, így – jelen esetben – kedvezőbb folyóval, a Mississippivel foglalkozik. A munka a folyón épített sarkantyúk által határolt medencéket helyezi a középpontba, mely jelen tanulmány szempontjából szerencsés, mivel a vizsgált Duna szakaszt minden tekintetben erősen befolyásol két pár az említett szabályozási műből. Rendkívül nagy volumenű kutatásról van szó, ugyanis összesen 26 sarkantyú-csoportot vizsgáltak az amerikai kutatók éveken keresztül, hasznos eredményekkel. A műtárgyak környezete és azok geomorfológiai tulajdonságai alapján 4-4 kategóriát definiáltak, így összesen 16 élőhely-kategóriát tudtak a továbbiakban elkülöníteni. Kutatásaik főként a sarkantyú-medencék területi



és térfogati változásaira irányultak, ahol azt vizsgálták, hogy az építéstől számított hány éven belül állítható, hogy a lényegi medermorfológiai változások végbementek, azaz hány évnek kell eltelnie, hogy a területi és térfogati változások százalékban kifejezett értéke zérus legyen (5. ábra).



5. ábra – A térfogati és területi változások százalékos mértéke, az idő függvényében /Shields, 1995/

További irodalomkutatás során felleltünk egy szintén amerikai tanulmányt (Aadland és Kuitunen, 2006), amely Minnesota-i folyók élőhely vizsgálatával foglalkozik. Több mint tíz folyóra terjesztették ki a kutatást, aminek köszönhetően jelentős számú hal-élőhely leírása történhetett meg. Munkájuk során nagyszámú halászgépes mintavételt hajtottak végre, melyek alkalmával a kifogott egyedek fajtát azonosították, majd – néhány méretük rögzítése után – vissza is engedték őket a vizekbe. A méretek levételének köszönhetően, lehetőségük nyílt az egyes egyedek életkorának becslésére is, így nemcsak az adott fajokat, de a különböző életciklusban lévő egyedeket is külön-külön tudták osztályozni. A halászatok helyein, mélység- és áramlási sebesség méréseket végeztek, majd mederanyag-mintákat is gyűjtöttek. Ezek alapján kellő sűrűségű adat állt rendelkezésükre, hogy megkísérelhessenek korrelációt keresni az egyes abiotikus változók és a halak élőhely-választási szokásai között. Erre több nemlineáris regressziós eljárást is alkalmaztak, melyek segítségével az egyes fajok különböző életciklusaira jellemző élőhely-megfelelőségi indexeket (suitability index – SI) definiáltak, 0-tól 1-ig terjedő skálán. Összesen több mint 100 formula készült, melyek külön az áramlási sebesség és külön a vízmélység alapján határozzák meg adott halakra vetített élőhely-megfelelőséget. A mederanyagot szemeloszlási görbéik alapján kategorizálták (iszap, homok, kavics, durva kavics stb.), majd ezen kategóriák mindegyikéhez konstans SI értékeket rendeltek az összes élőhely-



jellemzésben. Mivel ebben a tanulmányban közvetlen kapcsolatot állítottak fel számos halfaj esetében a hidrodinamikai- és morfológiai paraméterek és az élőhely megfeleltetés között, dolgozatomban az itt kidolgozott módszer alkalmazására is próbálkozást teszek a vizsgálatra kiválasztott Duna szakaszon.

2.4. Korszerű helyszíni áramlási és morfológiai felmérések, adatelemzési módszerek

Terepi mérések és azok elemzési módszereiben jóval bőségesebb a magyar szakirodalom, így igyekeztem főként a hazai kutatók publikációit tanulmányozni. A BME Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszékén hosszú ideje folyó kutatásokban foglalkoznak háromdimenziós áramlásmodellezéssel, melyhez a szükséges digitális terepmodelleket valamint áramlástan és egyéb morfológiai paramétereket korszerű helyszíni mérések eredményeiből állítják elő (pl. Baranya és Józsa, 2006; Baranya *et al.*, 2008; Baranya és Józsa, 2009; Baranya, 2010; Sági, 2013). A helyszíni hidromorfológiai feltárás egyik alapvető eszköze az akusztikus Doppler elven működő áramlásmérő műszer (ADCP), aminek rövid ismertetését a következő pontban végzem el.

2.4.1. Az ADCP működési elve

Az Akusztikus Doppler Elvű Sebességmérő (ADCP), a tanszéken folyó kutatások helyszíni méréseinél széles körben alkalmazott műszer, jelen munka elvégzéséhez is nélkülözhetetlen volt. Ahogy a nevéből is kiderül, az eszköz a Doppler-elvet használja ki a méréseihez, mely a következő: ha egy hangforrás (akár eredeti, akár visszaverő jellegű) a vevőhöz képest mozog, akkor a vevő által fogadott hang frekvenciája eltolódik a kibocsátott hang frekvenciájához képest. A Doppler-elvű sebességmérő a víz sebességének meghatározását indirekt módon végzi. A készülék hangsugarat bocsát ki a vízben, amely a folyadékban való terjedés közben szétszóródik az útjába kerülő, de a vízzel együtt mozgó részecskékről (apró organizmusok, lebegtetett hordalék, buborékok), ám a hangimpulzusok egy része a kibocsátás felé visszaverődik. Mivel elég sűrűn találhatók ilyen visszaverő részecskék a vízben, ezért szinte állandóan van beérkező jel, így folyamatos a mintavétel. Ezeket a jeleket veszi a műszer a kibocsátott hangsugár tengelyében, és vizsgálja, hogy történt-e változás a hang frekvenciájában.

2.4.2. Az ADCP használata, funkciói

Lehetőség van GPS jellevőt is kapcsolni az ADCP-hez, így minden méréshez abszolút koordináták is rendelkezhetők, ami nem csak azért hasznos, mert így pontosan el tudjuk helyezni a méréseket egy georeferált térképen is, de ismertté válik a pálya is, amit a műszerrel



megtettünk, melynek fontos szerepe van az adatfeldolgozásnál. További fontos tulajdonsága a műszernek, hogy van egy beépített mederfenék követő (Bottom Tracking – BT) funkciója is, mely a meder geometriája alapján képes relatív elmozdulásokat érzékelni és számítani. Ez a funkció a mérőcsónak pozíciójának meghatározására szolgál abban az esetben, ha nem áll rendelkezésre GPS. Fontos megemlíteni, hogy intenzív medermozgás esetén a BT mód hibával terheli a sebességmérést, ilyen esetekben ezért nem alkalmazható (pl. árvízi mérés) sebességmérésre.

Mivel az akusztikus jel terjedési sebessége rendkívül nagy, így gyakorlatilag egy pillanat alatt elkészül egy-egy függély menti sebességeloszlás felvétele. A megbízható sebességadatok előállításához a műszer több egymás utáni pillanatfelvétel átlagolásából szolgáltatja a sebességeloszlást a mélységfelosztás során előre meghatározott cellákra, beállítástól függően 0,5-2 Hz mintavételi frekvenciával. Ezen pillanatnyi függély felvételek tér-idő átlagolásának eredményeként az ADCP a szelvényt függőleges sávokra osztja, melyek szélessége a megadott átlagolási intervallum alatt a mérőcsónak által megtett út.

Ahogy azt korábban említettem, ezeket a méréseket gyakran az áramlások térbeliségének feltárására, továbbá háromdimenziós áramlási modellek ellenőrzéséhez használják, melyhez – sok egyéb mellett – szükséges háromdimenziós sebességvektorok mérése. Ilyen mérésekre is alkalmas az ADCP, azonban kizárólag azok az eszközök, melyek több (legalább 3), nem egy síkba eső jelkibocsátóval rendelkeznek, mivel csak így lehetséges térbeli vektoradatok gyűjtése.

Az ADCP legáltalánosabb felhasználási területe a vízhozam-mérés, köszönhetően a gyors és egyszerű keresztaszelvény terület és sebesség mérésnek. Azonban számos más, áramlási és medermorfológiai paraméter is kinyerhető a műszerből, az anyagelkeveredés mértékét adó diszperziós együtthatók becslésétől kezdve, egészen a fenékcúsztató sebesség értékéig. Ezek egy térbeli áramlási modell esetében fontos paraméterek lehetnek, továbbá az ilyen és ehhez hasonló abiotikus tényezőknek fontos szerepük van az áramlási szempontú élőhely leírásban is.

Alapvetően kétféle mérési eljárást különböztetünk meg a hajóról végzett ADCP mérések között: mozgó- és fix hajós méréseket. Mozgóhajós mérés alkalmazandó keresztaszelvény felmérésekkor, továbbá egy-egy részletesebben feltérképezendő területen is gyakran végzünk pásztázó méréseket, a minél pontosabb és sűrűbb adatfelhők előállítása érdekében. A pontbeli méréseket általában egy-egy áramlástan vagy morfológiai jellemző időátlagolt



sebességviszonyokhoz kapcsolódó kimérésekor alkalmazzuk, két-három percen keresztül történő, rögzített helyű, időben folyamatos mérés mellett. A cél ilyenkor, hogy pl. a függélymenti sebességprofilhoz a turbulens sebességpulzálást kiátlagolva egy stabil, a helyi egyensúlyi viszonyokat visszaadó sebességértékeket kapjuk az egyes mélységekben. Hazai kutatások folytak ebben a témában is (Baranya *et al.*, 2008; Baranya 2010) és a dolgozatomban is szerepe lesz ennek, az adatfeldolgozási módszerek ismertetésénél.

3. A vizsgált Duna-szakasz ismertetése vízföldrajzi és halfauna szempontok alapján

3.1. Vízföldrajz és hajózhatósági problémák

A kutatási terület a Duna 1672-1676 folyamkilométerei között helyezkedik el. Ez Sződliget térsége, a folyam itt a Szentendrei-sziget bal partját mossa, teljes vízhozamának közel kétharmadával. Ennek következménye, hogy a vízi teher- és személyszállítás szinte egésze ebben az ágba zajlik, azonban a Duna sok hazai területéhez hasonlóan, itt is problémák jelentkeztek a hajózási úttal kapcsolatban (VITUKI, 2007). A térségben helyezkedik el a Sződligeti szűkület (1675,6-1674,8 fkm), amely jelenlegi állapotában 500 m hosszú 90 m széles, orvosolandó probléma a folyami közlekedés szempontjából. A szűkület térségében a meder szabályozott, a hajóút áthelyezésére lehetőség nincs.

Ismeretes, hogy a Duna magyarországi szakasza számos helyen nem tesz eleget a folyamra vonatkozó hajózhatósági követelményeknek, így vízjárástól függően, az év harmadában, a hajók csak merülési korlátozásokkal közlekedhetnek. Ennek következménye, hogy a Duna áruforgalma a potenciális kapacitásának mindössze 10-15%-át teszi ki jelenleg. Ennek javítása érdekében készült egy megalapozó tanulmány is (VITUKI, 2007), melynek célja a megfelelő víziút kialakítására javaslat kidolgozása oly módon, hogy azzal az érintett természeti értékek ne sérüljenek, valamint, hogy egyéb hasznosítási módokra is lehetőség nyíljon.

Ez a tanulmány a Sződligeti szűkületre a meder kotrását javasolta az ENSZ-EGB alapján meghatározott kisvízszint idején is biztosítható, 25+2 dm-es merülési mélység és a 180 m-es hajóút szélesség elérése érdekében. A becsült kotrási mennyiség 4000-5000 m³-re adódott, ez azonban a későbbi, 2010-es engedélyezési terv pontosított számításai alapján 2500 m³-re redukálódott (6. ábra).



6. ábra – A Sződligeti szűkület és a tervezett beavatkozás (rózsaszínnel)

Egy ilyen kotrás azonban az esetek túlnyomó részében jelentős környezeti kockázatokat hordoz magával. Itt elsősorban a főág ökológiai állapotának romlása merül fel a kotrási munkák közvetlen hatására, azonban a beavatkozások által generált hajózási forgalom növekedése is veszélyeztetheti a természetvédelmi szempontból megkülönböztetett (Natura 2000) vízi ökoszisztéma jó ökológiai állapotát. Fontos továbbá megjegyezni, hogy jelen esetben a beavatkozás nemcsak az állat- és növényvilágra, de az emberekre is negatív hatással lehet. A Sződligeti szűkület ugyanis elvékonyodott kavicssterasszal rendelkezik, továbbá a beavatkozás több vízbázis (Surány, Vác-Dél) hidrogeológiai védőövezetére esik, így a kotrás ezen kutak vízhozamának csökkenését okozhatja.

A fent említett problémákat figyelembe véve kijelenthető, hogy a térségben a hajózási feltételek javításával összefüggő az ökológiai rehabilitáció végrehajtása (erdősülési folyamat visszaszorítása), a parti szűrészű vízkészletek, vízbázisok védelme, valamint a rekreáció és a turizmus legcélszerűbb fejlesztése. Ezekkel a beavatkozásokkal az érintett Duna szakasz ökológiai teljesítőképessége növelhető, azaz ellensúlyozhatók a szűkületrendezés negatív hatásai.



3.2. A halfauna

Szórványosak az ismereteink nagy folyóink mélységi régiójának halállomány-összetételéről. A Duna hajózhatóságának javítása program részfeladata egy olyan mintavételi eljárás fejlesztése, mely alkalmas a dunai hajóutat érintő mederszabályozási munkálatok hal-együttesekre gyakorolt hatásának becslésére. Ehhez a korábban ismertetett (Erős *et al.*, 2008) mintavételezési módszereken túl szükség van egy olyan mintavételezési eljárásra is, amely nincs korlátozva a litorális zónára (max. 1,0–1,5 m vízmélység), hanem a mélyebb régiók vizsgálatára is alkalmas. Egy ilyen módszer fejlesztésére tett kísérletet egy hazai kutatócsoport (Szalóky *et al.*, 2011). A mederben tartózkodó halak mintavételére egy elektromos húzóhálót fejlesztettek ki, mellyel több hazai szakaszon, köztük jelen tanulmány kutatási területéhez rendkívül közel fekvő térségben, Gödön is végeztek méréseket. A mérési eredményeket összevetve a litorális zóna monitorozásával nyert eredményekkel kijelentették, hogy a kifejlesztett módszerrel kiegészítő információk nyerhetők a természetvédelmi szempontból megkülönböztetett halfajok előfordulási és mennyiségi viszonyairól.

A gödi mérési eredményeket ismertetem az **1. táblázatban**, azzal a fontos megjegyzéssel, hogy a hal-együttesek térbeli helyzete nem elhanyagolható módon függ az időtől, értek itt órás, napszakos és évszakos léptékeket is. Előbbiekre egyszerű példa a halak korábban említett viselkedése, miszerint nappal a fajok jelentős része a meder mélyebb zónáiban tartózkodik, és csak éjjel jelennek meg a litorális zónában. A különböző évszakokban vagy akár hónapokban végzett mintavételek halfajtól és területtől függően befolyásolhatják a mért egyedek előfordulási és mennyiségi viszonyait. Ezen okokból kifolyólag az ilyen jellegű eredményeket fenntartásokkal célszerű kezelni.



Faj /magyar/	Faj /latin/	Fogott
Karikakeszeg	<i>Abramis bjoerkna</i>	5
Bagolykeszeg	<i>Abramis sapa</i>	3
Szélhajtó küsz	<i>Alburnus alburnus</i>	1
Paduc	<i>Chondrostoma nasus</i>	2
Halványfoltú küllő	<i>Gobio albipinnatus</i>	43
Selymes durbincs	<i>Gymnocephalus schraetser</i>	15
Fejes domolykó	<i>Leuciscus cephalus</i>	1
Folyami géb	<i>Neogobius fluviatilis</i>	2
Csupasztorkú géb	<i>Neogobius gymnotrachelus</i>	18
Kessler-géb	<i>Neogobius kessleri</i>	18
Feketeszájú géb	<i>Neogobius melanostomus</i>	107
Bodorka	<i>Rutilus rutilus</i>	2
Fogassüllő	<i>Sander lucioperca</i>	2
Kőszüllő	<i>Sander volgensis</i>	1
Szilvaorrú keszeg	<i>Vimba vimba</i>	5
Német bucó	<i>Zingel streber</i>	291
Magyar bucó	<i>Zingel zingel</i>	8

1. táblázat – Göd térségében végzett elektromos kecsés mintavételek eredményei /Szalóky et al. 2011/

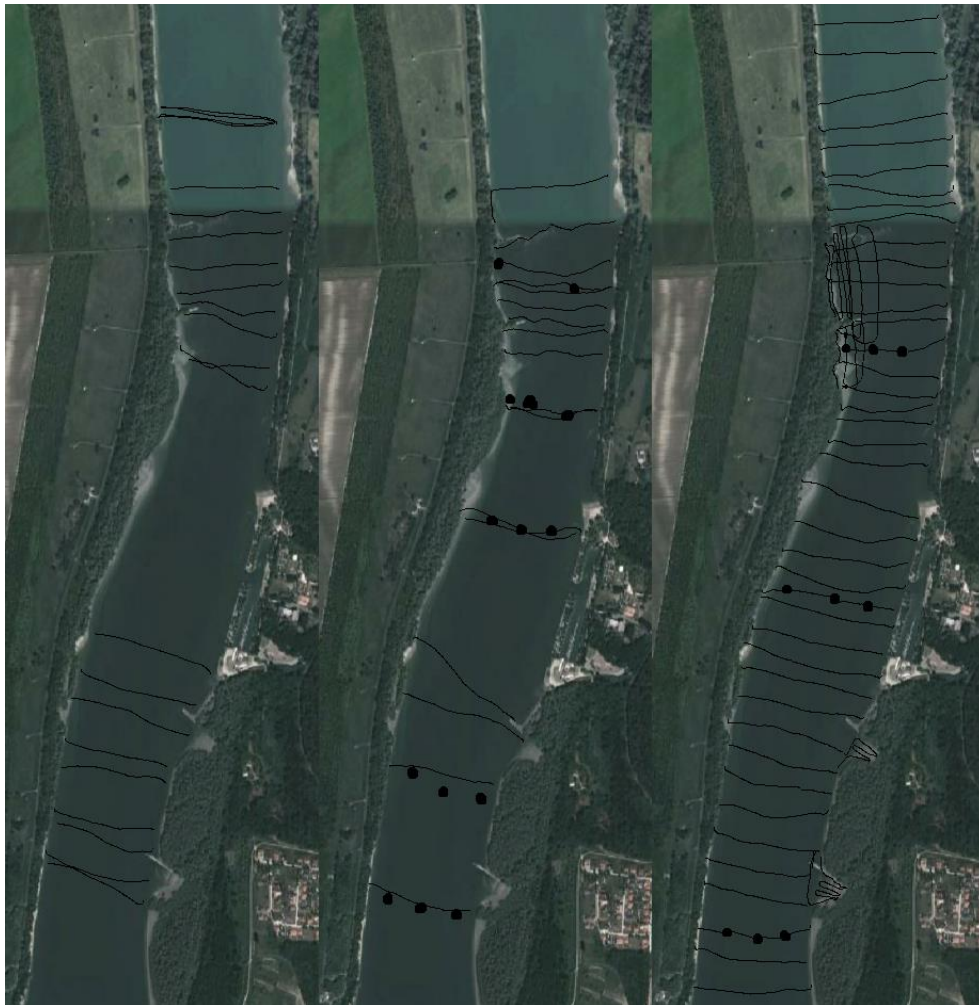
4. Mérések és adatfeldolgozási módszerek ismertetése

4.1. A mérések bemutatása

A kutatási területen három alkalommal végzett helyszíni méréseket a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszéke: 2013. június 10-én, árvíz idején; egy kis- és középvíz közötti állapotban (a továbbiakban, mint kisvízi mérés fogok rá hivatkozni a könnyebb megkülönböztetés érdekében), 2013. június 24-én; továbbá középvízi állapotban, 2013. szeptember 30-án (az egyes mérési időszakokra jellemző vízhozamokat lásd a **2. Táblázatban**). Utóbbi két alkalommal személyesen is részt vettem a mérésekben, így lehetőségem volt a gyakorlatban is megismerni a mérőműszereket és az adatgyűjtési módszereket, és nem utolsósorban gyakorolni a terepi mérések végrehajtását.

Mérés ideje	Vízhozam, Q , m^3s^{-1}
2013. június 10.	6 200
2013. július 24.	1 340
2013. szeptember 30.	1 630

2. táblázat – a helyszíni mérések során rögzített vízhozam értékek



7. ábra – Az ADCP mérések helyei és útvonalai kis-, közép- és nagyvízi állapotban

Mindhárom alkalommal ADCP-vel történtek az áramlási és morfológiai mérések (7.ábra). A júniusi mérés során nagyszámú keresztszelvény-felmérést végeztek a lehető legsűrűbb mélység és sebességvektor adatfelhő elérése érdekében, továbbá minden sarkantyú közvetlen környezetében történtek pásztázós mérések, ezzel elősegítve a sarkantyúk közelében kialakuló komplex áramlási viszonyok feltárását és megértését. Ezen kívül kilenc pontban állóhajós méréseket is végeztek, további áramlástan paraméterek kinyerése céljából.

A júliusi mérés alkalmával szűkebb körű áramlási mérések mellett geodéziai felmérésre is sort kerítettünk, ugyanis a digitális terepmodell elkészítéséhez szükség volt a sarkantyúk néhány jellemző pontjának vízszintes koordinátaira és koronájuk magassági adataira. Erre a numerikus áramlás- és hordaléktranszport-modell jövőben történő fejlesztése érdekében van szükség, ugyanis fontos információként kezelendő az a vízszint, amely felett a folyam meghágja a sarkantyúkat, mivel ilyenkor jelentősen átalakul az áramlás jellege a műtárgyak környezetében.

A szeptemberi mérés alkalmával, középvízi állapotban, mederanyag mintavételekre is sort kerítettünk, ún. harangos mintavevő alkalmazásával.



8. és 9. ábra – ADCP-hez kapcsolt GPS jelnevő és az adatfeldolgozó számítógép /Saját fénykép/; Négy fejes ADCP műszer /Saját fénykép/



10. ábra – Sarkantyú koronaszint mérése RTK GPS-szel /Készítette: Baranya Sándor/

Az áramlási mérések a következőképp zajlanak: adott az ADCP műszer, egy RTK (Real Time Kinematic) GPS jelnevő és egy hordozható számítógép **(8-9. ábra)**. A GPS fixen rögzítve van az ADCP-hez, ügyelve arra, hogy minél nagyobb pontossággal a műszer feletti függőlegesben legyen, így biztosítva a lehető legpontosabb koordinátákat az ADCP mérésekhez. Az ADCP fixen rögzítve van a hajóhoz és úgy van beállítva, hogy a mérőfej kb. 20-30 centiméterre helyezkedjen el a vízfelszín alatt. Erre azért van szükség, hogy a műszer minden körülmények között a víz alatt maradhasson, ellenkező esetben fals eredményeket kaphatunk. Mindazonáltal,



túl nagy merülési mélység sem alkalmazandó, hiszen a műszer a kibocsátó fejek felett nem képes méréseket végezni. Ez igaz a mederfenékre is, továbbá a műszer feje alatt, egy keskenyebb, ún. vak zónára is. Az, hogy az előbb felsorolt zónákban nem képes közvetlen méréseket végezni a műszer, azonban nem jelenti azt, hogy oda üres foltokat kap a felhasználó, a mért eredmények helyett. Az ADCP, illetve az adatfeldolgozó szoftver ezekre a területekre extrapolációval állít elő eredményeket, melyek az esetek jelentős részében elfogadhatónak tekinthetők, alkalmasak további munkára.

Hasonlóan, extrapolációval kaphatók értékek azokra a tipikusan part menti területekre, ahol a víz már nem kellően mély a motorcsónakos megközelítéshez. Ilyen esetekben meg kell adni a szoftvernek a parttól való távolságot, ami az aktuális mélység ismeretében egy derékszögű háromszöggel közelíti a mederfenéket, majd végzi el az extrapolációt.

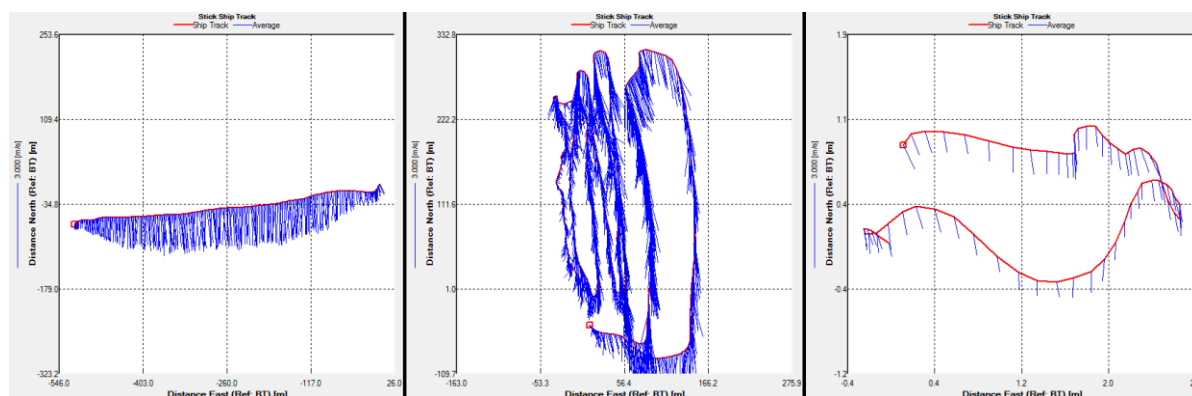
A számítógépnek a mérések során szinkronizáló adatrögzítő szerepe van, ez menti folyamatosan a mért adatokat az ADCP-ből és a GPS-ből egyaránt, továbbá a mérést irányító szoftver (WinRiver I) ezek egymáshoz rendelését is elvégzi.

A keresztshelvénymérések végrehajtása során a műszer és a szoftver megfelelő beállítását követően parttól partig haladunk a hajóval (**11. ábra**), igyekezve minél stabilabban tartani a megfelelően megválasztott sebességet (kb. 1 m/s). Túl nagy átkelési sebesség esetén nagyobb lesz a hibás mérési cellák száma, illetve üresen maradhat egy-egy teljes függély is. Mindig a lehető legpontosabb, mért adatok használatára törekszünk, ilyenkor kisebb az esélye, hogy egy helytelen bemeneti adat félrevezet minket.

Hasonló módon zajlik a pásztázós mérések végrehajtása is. Ilyenkor nem szabályos parttól partig tartó vonal mentén haladunk az ADCP-vel, hanem egy-egy áramlástanilag összetettebb, komplexebb zónában végzünk méréseket (**11. ábra**), egészen addig, amíg megfelelő mennyiségű és minőségű adatot nem sikerül begyűjteni a zóna lehető legvalóságosabb leírására. Jelen tanulmány készítésénél tipikusan ilyen területekként kezeltük a sarkantyúk közvetlen környezeteit, továbbá az egyoldali sarkantyúpárok között – sarkantyú koronaszintnél alacsonyabb vízszintek esetén – kialakuló kvázi-állóvízes illetve visszaáramlásos területeket, mivel az itt kialakuló összetett jelenségek viselkedésének ismerete mind áramlástan, mind élőhely jellemzési szempontból kardinális.



A harmadik típusú Doppler-elvű műszerrel végzett mérés a fix hajós mérés. Ilyen méréseknél az a célunk, hogy a folyó egy adott jellemző pontjában meghatározzuk egy-egy áramlási vagy morfológiai paraméter értékének hosszabb idő alatt átlagolt sebességviszonyokhoz kapcsolódó értékét. Ilyenkor általában 2-3 percen keresztül igyekszünk a választott pont kis környezetén belül maradni a hajó megfelelő horgonyzásával vagy kormányzásával (ennek sikere nagyban függ az áramlási viszonyoktól, valamint a szél nagyságától és irányától) és folyamatosan rögzítjük a mért adatokat, a korábbiakhoz hasonlóan. A keresztmetszelmérésekkel ellentétben, ilyenkor egy-egy aktuális függélyre, a mérési idő alatt akár 100 függély-pillanatfelvételt is kaphatunk, majd az rögzített sebességeloszlás-idősorok átlagolásával leírhatjuk az oda érvényes azon sebességprofilt, amelyre aztán elméletileg levezetett analitikus profilok is illeszthetővé válnak. Jelen tanulmányban, a fix hajós mérési adatokat pl. a fenékcúszató feszültségek ilyen profilillesztésen keresztüli meghatározásánál, továbbá a másodlagos áramlási struktúrák kimutatására használtam fel, de szerepe volt a mederanyag-bebecslési eljárásnál is.



11. ábra – A hajó által megtett út WinRiver II-ben, különböző mérési módszereknél, rendre: keresztmetszvény, pásztázás és fix hajós mérés (a léptékek nem azonosak!)

A geodéziai felmérés során ugyanazt az RTK GPS vevőt használtuk, amit az ADCP-vel együtt is, itt azonban saját mérőrúdjaera erősítve. Ezen mérések során előfordult, hogy a néhány centiméteres pontosság elérése érdekében egy-egy alkalommal akár több percig is eltartott egyetlen pont bemérése, ugyanis a sarkantyúkat sűrűn benőtt fák borítják, melyek árnyékoló hatása jelentős.

A középvízi (2013. szeptemberi) mérés során mederanyag mintavételek is történtek. Ezeket hagyományos módszerrel, ún. harangos mintavevővel végeztük, 15 előre kijelölt pontban. Minden esetben először egy fix hajós ADCP mérést végeztünk 3 percen keresztül, majd elvégeztük a mintavételt a következőképpen: beengedtük a mintavevőt a vízbe, megvártuk,



hogy lesüllyedjen a meder aljára, majd elindítottunk egy mozgó hajós ADCP mérést, a mintavételek koordinátáinak rögzítése végett. Ezt követően a harangra ráengedtünk 30-40 m hosszú kötelet és felvízi irányba vontattuk 50-100 m hosszán. Végül kiemeltük a mintavevőt és minden mintavétel tartalmát külön-külön zsákba gyűjtöttünk, melyeket megjelöltünk az ADCP mérések sorszáma alapján.

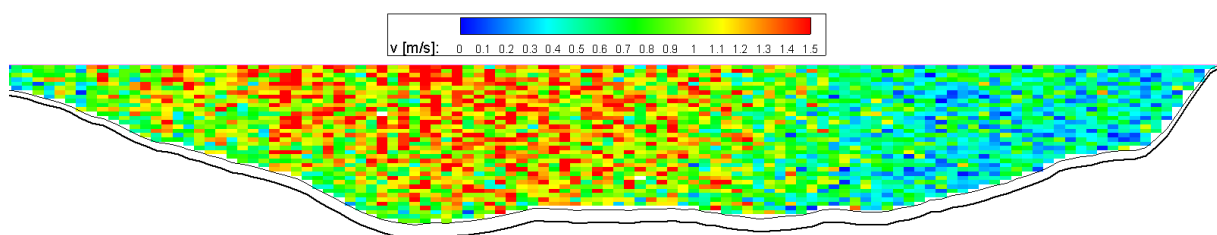
4.2. Adatfeldolgozási módszerek

Munkám egyik legnagyobb volumenű része a mért adatok feldolgozása volt, mivel jelenleg sem gördülékenyre kidolgozott módszertan, sem minden szempontból megfelelő feldolgozó program nincs a piacon ilyen jellegű munkára. A nyers mérési adatfájlokból a végső mezőket több lépésben, különböző szoftverek alkalmazásával állítottam elő, a tanszékünkön korábban kidolgozott metodikák alapján (Baranya, 2009)

4.2.1. Az ADCP-vel rögzített nyers adatok feldolgozása

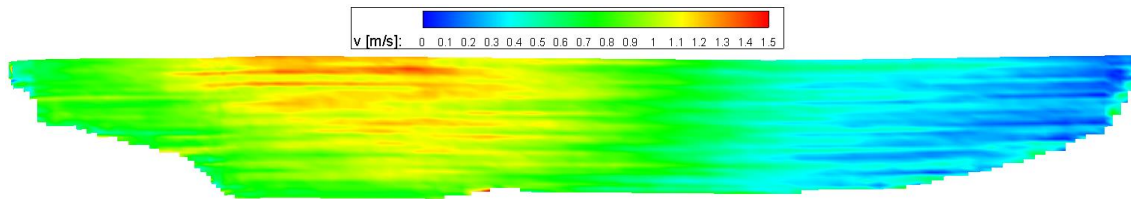
Az ADCP mérések feldolgozásának első lépése a műszer által bináris kódban írt adatokat tartalmazó fájlok átkonvertálása szöveges formátumba. Erre a célra alkalmasnak bizonyult a műszerhez gyárilag adott WinRiver II nevű szoftver. A program nem csupán a fájlok átalakítását végzi, de előzetes információkat ad a felhasználónak a mérési eredményekről. Megjeleníti többek között az egyes cellákra jellemző pillanatnyi sebességek nagyságát, a hajó által megtett pályát, a pálya menti mélység alapján átlagolt sebességek nagyságát és irányát (vagyis vektorát), valamint számszerű adatokat is biztosít (pl.: mérés időtartama és hossza, mérések alapján számított vízhozam, hajósebesség stb.). Ez az egyes mérési fájlok kategorizálása miatt bizonyult praktikusnak. A cellák megjelenítése azért volt hasznosra, mert segítségükkel könnyen ki lehetett így szűrni – az egyébként elkerülhetetlen – hibás méréseket. Ezek tipikusan a nem megfelelő hajósebesség-választással indokolhatóak, ilyenkor sok üres cellát és/vagy függélyt tartalmazó szelvények voltak, de előfordultak olyan esetek is, ahol más technikai okok miatt (programhiba, műszerhiba) születtek értelmezhetetlen adatsorok. A jó mérések kategorizálásában leginkább a hajó pályáját szemléltető ablak (**11. ábra**) volt segítségemre, mivel így lehetett a legkönnyebben megkülönböztetni egymástól a fix és mozgó hajós méréseket. Erre azért volt szükség, mert ezek a későbbiekben nem ugyanazon a módon lettek feldolgozva, mivel más-más célokra használtam fel őket. Meg kell továbbá említenem, hogy az RTK GPS által mért koordinátákat a WinRiver WGS-84 rendszerben rögzíti, így azok transzformációja szükséges az Egységes Országos Vetületbe (EOV) a georeferálás miatt. Ezt a számítást az EHT 2007 nevű, magyar fejlesztésű célszoftverrel végeztem el.

A mérések megjelenítésére, illetve további számítások elvégzéséhez az esetek döntő többségében a Tecplot nevű szoftvert alkalmaztam. Ez sajnos nem kompatibilis a WinRiver II által gyártott szöveges fájlokra, így egy, a tanszéken fejlesztett program segítségével (ADPConverter) nyílt lehetőségem a Tecplot nyújtotta széleskörű funkciók használatára. Pusztán a nyers mérések azonban csak korlátozott számú feladatra alkalmazhatók közvetlen megjelenítéssel, ugyanis ezek az adatok az áramlás turbulens jellegéből adódó pulzálás miatt „zajosak” (12. ábra).



12. ábra – ADCP mérési szelvény nyers sebességnagyság adatai a mérési cellák felbontásában

Belátható, hogy a későbbi számítások elvégzéséhez, valamint az élőhely jellemzéshez szükséges mezők elkészítéséhez a fent látható, nem egy időben mért, helyileg pillanatszerű adatok szolgáltatja zajos sebességeloszlás nem megfelelő, ugyanis rá nem, csak kiátlagolással simított eloszlásukra rendelkezünk elméleti közelítő függvényekkel. Ezen okból kifolyólag nem közvetlenül a nyers mérési eredményekből dolgoztam, hanem elvégeztem a sebességadatok alkalmas simítását. Ezt a lépést a vízszintes rétegekben végrehajtott mozgó ablakos átlagolással hajtottam végre. A sebességadatok simításával – mozgóhajós mérés esetén – tulajdonképpen egy tér-idő átlagolást hajtunk végre (13. ábra), ami alapján a mezők elméletileg jobban megfoghatóak lesznek, és a későbbiekben elvégzett paraméter becslési eljárások során jól hasznosítható eredményeket kapunk. A 13. ábrán látható sebességeloszlás emellett vizuálisan is sokkal könnyebben értelmezhetővé teszi a mérési adatokat. Így aztán persze az is látható, hogy az egyes rétegekben külön végrehajtott vízszintes simítás sokszor sávos mintázatot eredményez, így célszerűen tűnik az adatok bizonyos mértékű simítása a függőleges mentén is. A feldolgozó program ilyen irányú fejlesztése jelenleg zajlik.



13. ábra – A 12. ábrán bemutatott keresztmetszvény rétegenként mozgó ablakos átlagolással simított sebességeloszlása

4.2.2. Fenékcúsztató feszültség becslése

A mederfenék közeli élőhelyek jellemzésénél fontos szerepet játszik a meder felszínén kialakuló súrlódóerő leírása, amit felületegységre fajlagosan a fenékcúsztató feszültség értékével tudunk megadni. Ennek közvetlen mérésére nagy folyókra még nincs kiforrt módszer, mindazonáltal fontos megjegyezni, hogy Ausztriában már folynak olyan kutatások, melyek célja egy ilyen közvetlen mérésre alkalmas eszköz kifejlesztése. Jelenleg azonban a legjobb közelítés az ún. turbulens fal-törvény alkalmazásával lehetséges, mely egy elméleti logaritmikus függvénnel a következőképpen írja le egy függvényben a sebesség eloszlását (Elder, 1959):

$$U(z) = \frac{u_*}{\kappa} \ln \frac{z}{z_0} \quad [3]$$

ahol:

- U az áramlási sebesség
- u_* a fenékcúsztató sebesség
- κ Von Kármán konstans (≈ 0.4)
- z a mederfenéktől való távolság
- z_0 hidrodinamikai érdesség magasság

A mozgóhajós mérések simított sebességeloszlásánál, valamint a pontbeli méréseknél, a függvények mentén mérési cellánként, számos ismert z mélységben adott az ott uralkodó U sebesség nagysága. Ezekre az értékpárookra lehetőségünk van regresszióval, a legkisebb négyzetek elve alapján illeszteni egy, a mérthez a lehető legjobban illeszkedő elméleti logaritmikus sebességprofilt (**15. ábra**), melynek egyik paramétere a fenékcúsztató sebesség, ami kifejezhető a [3] egyenletből:

$$u_* = U \cdot \kappa \cdot \left(\ln \frac{z}{z_0} \right)^{-1} \quad [4]$$

A fenékcúsztató sebesség ismeretében már számítható a fenékcúsztató feszültség értéke, a következők alapján:



$$\tau_b = \rho \cdot u_*^2 \quad [5]$$

ahol:

- τ_b - a fenékcúsztató feszültség
- ρ - a víz sűrűsége

Fontos megjegyezni, hogy a fent vázolt elméleti leírás csak idealizált esetre igaz (kifejlett, turbulens áramlás időátlagolt sebességeloszlása, közel egyenletes mederérdesség, enyhén változó meder stb.), míg a valóságban sokszor jóval összetettebb áramlási és mederviszonyok uralkodnak, ahol a fenti leírás csak egy első, bár nagyságrendileg általában iránymutató közelítés. A fix hajós mérések által kapott értékek éppen a fizikailag és ezáltal elméletileg jól megfogható időátlagolás miatt megbízhatóbbnak tekinthetők a mozgó hajós mérések eredményeinél, ugyanis utóbbi esetében az adatok simítása térbeli átlagolást is jelent, ami a mozgóátlag ablakméret növekedésével egy térben aggregált eredményt ad, aminek reprezentativitása fokozottan kérdéses lehet. Készültek korábban tanulmányok (pl. Baranya *et al.*, 2008) a megfelelő mozgóátlag-ablakméret kimutatására, ahol dunai példákon keresztül vizsgálták az ablakméret megválasztásának hatását a származtatott paraméterek eloszlásaira.



4.2.3. A mederanyag minták feldolgozása

Ahogy azt korábban említettem, mederanyag mintavételeket a középvízi mérés során (2013. szeptember) végeztünk. Harangos mintavevőt használtunk összesen 14 darab minta kiemelésére. Az így nyert mederanyagot külön-külön vízhatlan zsákokba helyeztük, majd a mérési pont helyének egyértelmű beazonosíthatósága érdekében megjelöltük annak az ADCP mérésnek a sorszámaival, mely a mintavétel alatt futott.

A minták kiértékelését, a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Építőanyagok és Mérnökgeológia Tanszékének laboratóriumában végeztük. Az összes zsák tartalmát kiürítettük megfelelő kerámiaedényekbe, valamint közönséges tepsikbe, a méréseket és a kiértékelést megelőző szárításhoz. 105°C-on égettük a mintákat a labor kemencéjében tömegállandóságig, kb. 20 órán keresztül. Ezt követően, a laboratórium biztosított számomra egy szitasort, melynek segítségével az összes mintát végigszitálhattam. A szitasor gépi rázású volt, ezért limitált volt a szíták számának egy időben történő használata, így gondosan kellett megállapítani az alkalmazandó szítaméreteket, ugyanis – szemcseátmérő tekintetében – rendkívül eltérő összetételű mederanyag-mintákat gyűjtöttünk. A laborban végzett mérések alapján Excelben elkészítettem a minták szemeloszlási görbéit szemi-logaritmikus koordináta-rendszerben, majd azok segítségével meghatároztam a jellemző d_{50} és d_{90} értékeket, továbbá rögzítettem minden mérés GPS koordinátáit is.



14. ábra – Mederanyag minta laboratóriumi vizsgálata szitasorral /Saját fénykép/



5. Eredménymezők bemutatása

A nagy mennyiségű mérési adat feldolgozása után, az adatelemzés egy köztes lépéseként nagy térbeli sűrűségű, szórt pontok álltak rendelkezésemre, melyeket a következő lépésben háromszög-elemekből felépülő rácshálókra interpoláltam, így előállítva a különböző paraméterekhez tartozó mezőszerű eloszlásokat. Ezek a mezők elsősorban az élőhely modellezésnél, valamint a lokális áramlási jelenségek megértésénél voltak hasznomra, de fontos bemeneti és ellenőrző adatokat jelentenek majd egy későbbi numerikus áramlási és hordaléktranszport-modell felállításánál is.

5.1. Medergeometria

5.1.1. Digitális medermodell

A folyami élőhely jellemzése során az egyik legfontosabb jellemző a folyómeder morfológiája. A folyó alakjának összetettsége, a helyi morfológiai sajátosságok (lokális kimélyülések, zátonyok, mesterséges elemek, stb.) meghatározó szerepet játszanak az élővilágban, mert sokszor az áramlási és/vagy morfológiai szempontból jól elkülöníthető zónák kedveznek egy-egy állat vagy növényfajnak, és eredményezik ottani bő előfordulásukat. A meder alakjának ismerete elengedhetetlen az ilyen jellegű vizsgálatoknál, így első lépésben ezzel a kérdéskörrel foglalkoztam.

A vizsgálati szakaszon az ún. digitális medermodell elkészítéséhez a nagyvízi mérések eredményeit használtam fel, mivel itt került sor a legtöbb keresztzelvénymérésre, és a magas vízszinteknek köszönhetően ennél a mérésnél lehetett szélességi értelemben a legnagyobb területet lefedni. A körülbelül 4 km-es szakaszon 69 ilyen felmérés történt, így a kellő sűrűségű, ADCP-vel mért mélységadatok birtokában el lehetett készíteni a medermodellt. Ezt először egy háromszög rácshálóra való lineáris interpolációval kíséreltem meg az SMS nevű szoftverrel (SMS, 2011), ez azonban a part menti területeken nem elfogadható mértékű hibákat eredményezett (az interpolált mélységadatok hullámos, „sátortetős” mintázatot mutattak), így ezt a megoldást elvetettük. Létezik azonban egy strukturált, négyszög rácshálóra alkalmas technika, mely figyelembe veszi, hogy a szórt pontok keresztzelvények menti felmérésekből származnak. A módszer egy görbevonalú négyszög rácsháló adott pontjának magassági értékét a hozzá, a folyó tengelyével párhuzamos rácsvonal mentén legközelebb eső alvízi és felvízi szelvény pontjai alapján határozza meg lineáris interpolációval, a pontok távolságával fordított arányban súlyozva. Ez a módszer eredményesebb volt, az így kapott mélységmező sokkal realisztikusabb képet mutatott, így ez alapján készítettem el a medertérképet. Az ADCP-vel

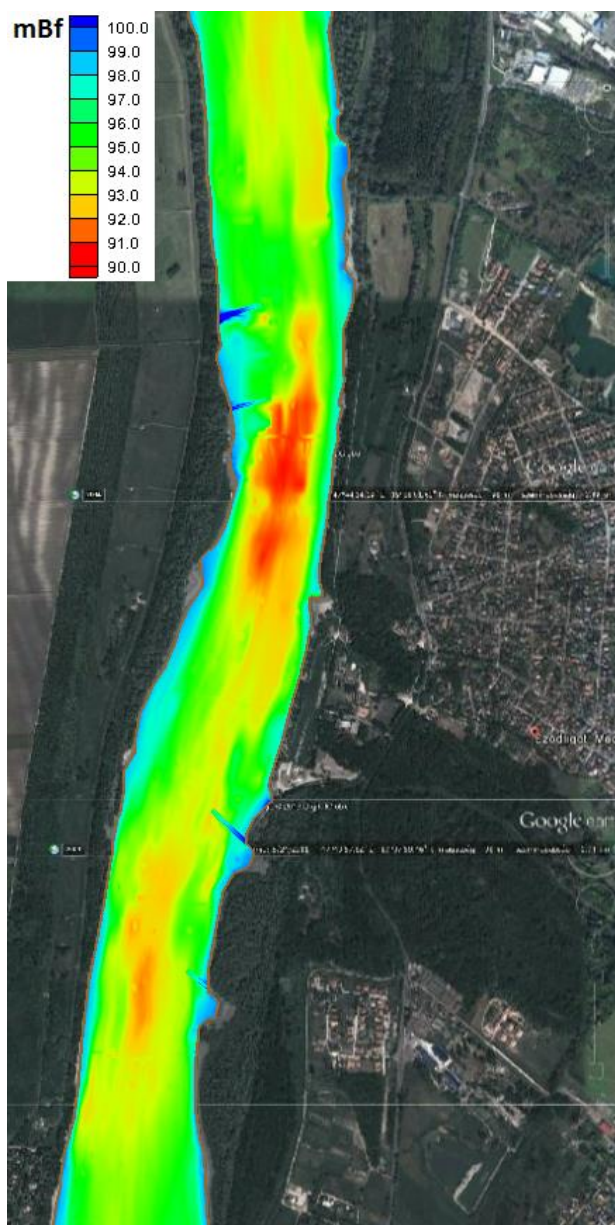


mért mélységadatokon kívül a GPS-szel mért eredményeket is felhasználtam, ugyanis ezek alapján tudtam meghatározni a négy sarkantyú síkbeli koordinátáit, valamint a balti alapszinthez viszonyított magassági helyzetüket. Mivel a kisvízi állapot idején sem teljesen egyértelmű, hogy a mederben pontosan hol ér véget egy-egy ilyen műtárgy, azaz meddig nyúlnak be keresztirányban, ezért egy hajózási térkép segítségével határoztam meg azok végpontjait, azzal a feltételezéssel élve, hogy az ilyen jellegű térképek mindig kellően pontos felmérések alapján készülnek. Miután elkészítettem a Duna-szakasz mélységtérképét, a Közép-Duna Völgyi Vízügyi Igazgatóságtól kapott vízmérce adatokat felhasználva, egy egyszerű kivonással meghatároztam, a meder felszínének balti feletti magasságait. Itt természetesen figyelembe vettem, hogy a Duna vízszintje egy 4 km-es szakaszon sem tekinthető állandónak, így több vízmérce adatai alapján meghatároztam a szakaszra jellemző átlagos esést, és ennek ismeretében korrigáltam a magasságokat.

Az így kapott medergeometriát mutatja be a **15. ábra**. A magasabb területeket késsel jelöli az ábra, ami alapján a felvízi, jobb parti sarkantyúpár jól kivehető, és hasonlóan az alvízi bal parti sarkantyúk is, utóbbiak alacsonyabb koronaszinttel. A művek orránál megjelenő piros (alacsonyabban elhelyezkedő) foltok jelzik a helyi kimélyüléseket, az ún. kopolyákat. A medermodell világosan jelzi a legmélyebb vonulat helyét, ami a sodorvonal pozícióját jelzi, de ez a kapcsolat messze nem evidens, mert a különböző vízjárás-állapotokban jelentős eltérés alakulhat ki a legnagyobb sebességű zónák térbeli elhelyezkedésében, ahogy azt később illusztrálok is. A hajózási szempontból problémás szakaszt a felső, jobb parti sarkantyúpár felvízi oldalán megjelenő zöld foltok jelzik, ahol a környezetéhez képest magasabb mederszintek kisvízkor a szükségesnél kisebb vízmélységeket eredményeznek. A jelzett területen a zöld – vagyis magasabb – foltok a folyó középvonalában jelennek meg, ami tipikusan a rossz gázló kialakulását jelzi. Ezzel szemben a sarkantyúpár közvetlen alvízi oldalán a piros foltok nagy mélységű területet mutatnak, ami a folyó helyszínrajzi alakjából következtethetően vélhetően a szűkület okozta helyi áramlási sebességnövekedés eredménye, de ezt a későbbiekben a hidrodinamikai jellemzők kapcsán még tárgyalom. A jobb parti folyószabályozási művek közötti területeken megjelenő kék foltok a zóna feltöltődését igazolják, ugyanez az alvízi sarkantyúpár területén kevésbé jelentős. Összességében elmondható, hogy a vizsgálati szakasz medermorfológiai szempontból igen összetett képet mutat, ami kedvezhet az élőhely diverzitásának, jóllehet a természetes vízjárási állapotoknak



köszönhetően folyamatos változásban van. Az utóbbi kijelentést a különböző időben elvégzett mederfelmérések támasztják alá, amit a dolgozat következő pontjában vizsgállok.



15. ábra – A Sződligeti Duna-szakasz medertérképe

5.2.2. A mederalak megváltozása

Az élőhely jellemzése során a meder alakjának állandósága vagy időbeli változása szintén nem elhanyagolható. Beavatkozások tervezésénél tisztában kell lennünk azzal, hogy az adott területen mennyire stabil a meder vagy mennyire van kitéve egy árhullám mederátrendező hatásának. Intenzív morfológiai változások esetén egy hosszú távon fenntartható műszaki megoldás elérése nehezebb feladat, mint egy teljesen állandósult, jól definiálható mederalakkal rendelkező folyómeder esetében. „Szerencsés” időszakban végeztük a vizsgálatokat, mert



lehetőségünk adódott a 2013. évi, minden eddigi vízhozamot meghaladó árhullám tetőzést követő mederátrendező hatásának számszerűsítésére az árvíz levonulása után elvégzett mérések alapján.

Az előzőekhez hasonló módszerrel kis- és középvízi mérésekre is elvégeztem ezeket a számításokat. Ezeknél az állapotoknál azonban nem készült olyan sűrű, az egész területre kiterjedő felmérés, mint júniusban, így csak kisebb zónákra sikerült a **15. ábrához** hasonló mezőket gyártanom. Ez mindenesetre elegendő volt arra, hogy megvizsgáljam, történtek-e jelentős mederváltozások a júniusi nagy árvíz hatására.

Erre első lépésként elkészítettem egy különbség térképet, melyben a júniusi és a júliusi mérésekből létrehozott medergeometria mezők magassági értékeit algebrailag kivontam egymásból. Az így előállított mező szemlélteti a két állapot között végbement medermorfológiai változások mértékét, azonban a mezők megbízhatósága kétséges volt, tekintve, hogy interpolált mezőkből hoztuk őket létre. Ezek helytállóságának bizonyítása (vagy éppen cáfolása) végett, megvizsgáltam al- és felvízi szakaszon is két-két szelvényt (vagyis a nyers mérési adatokat hasonlítottam össze), egyet a sarkantyúk felvívén, egyet pedig a sarkantyúk között. A vizsgálat a következőképp zajlott: kiválasztottam két-két szelvényt, majd ezek nyers ADCP-vel mért mélységadatai alapján ábrázoltam a mederfenék pontjait, az aktuális vízszint és a mért mélységek különbségeként (balti alapszint felett), szelvényenként azonos koordináta rendszerben (**16-17. ábrák**).

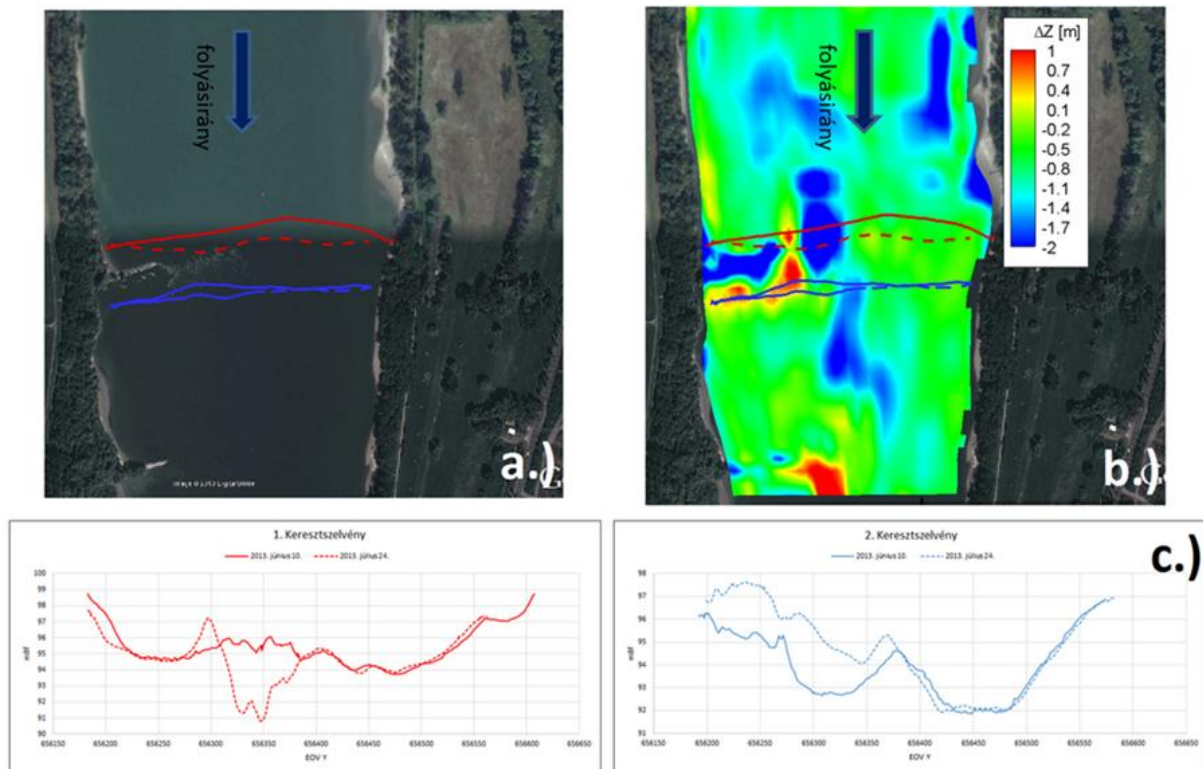
Az összehasonlítás alapján kijelenthetővé vált, hogy a felvízi szakaszon a sarkantyú orrának környezetében ment végbe jelentős mélyülés, valamint, hogy ugyancsak a felvízi részen, a sarkantyúk között nagy mennyiségű hordalékot rakott le a júniusi árvíz. Ezek pontos értékei mindazonáltal bizonytalanok, de jelzés értékűnek tekinthetők mind a keresztshelvények alakjai, mind a különbségmező eredményei. Az eredmények tehát azt jelzik, hogy igen intenzív mederváltozás alakulhat ki egy árhullám alatt, bár fontos szem előtt tartanunk a jelen helyzetben levonult extrém nagyságát az árhullámnak.

A mederváltozás mértéke (több méteres kimélyülések és feltöltődések) mindazonáltal a jelenség pontosabb megértésére készíti a kutatót. Egy, az itt említett esettel párhuzamba hozható vizsgálatot végzett Török Gergely diplomamunkájában (Török, 2012), mely alátámaszthatja az itt kapott eredményeket. A hivatkozott tanulmányban a szerző numerikus modellvizsgálatokkal igazolta, hogy amennyiben egy sarkantyú környezetében a meder hosszú

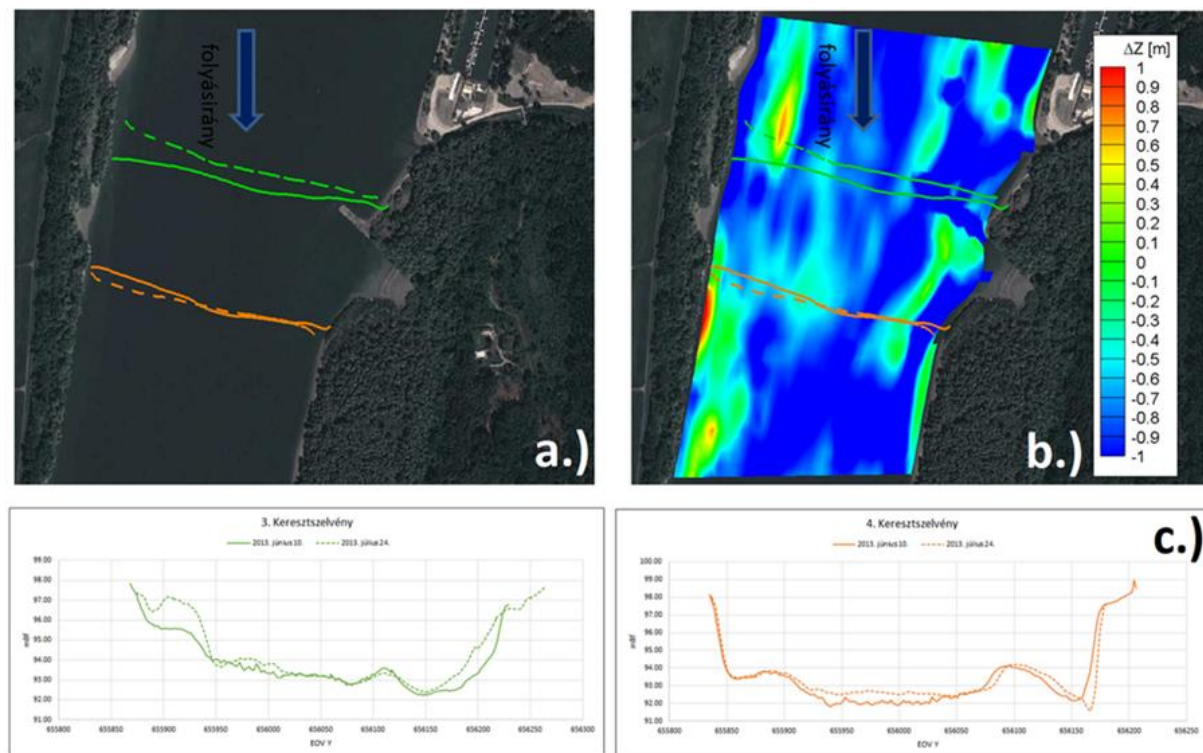


idő alatt bepáncélozódott, mi az a kritikus vízhozam, melynek hatására ez a mederpáncél felszakadhat, valamint, hogy egy ilyen árhullám hatására a sarkantyúk csúcsának környezetében rövid idő alatt jelentős, akár méteres nagyságrendű mélyülések is kialakulhatnak, továbbá az említett mű által áramlástanilag árnyékolt alvízi területen hasonló, méteres nagyságrendű hordalék lerakódás is bekövetkezhet. A valóságban végbemenő morfordinamikai folyamatok ennél összetettebbek, de a leegyszerűsített vizsgálatok hozzájárulhatnak a folyamatok alapjainak megértéséhez. Ahhoz azonban, hogy a mederpáncélozódás megjelenését itt alátámaszthassuk, mederanyag mintavételek szükségesek, célszerűen zavartalan minták, amit pl. fagyasztásos mederanyag mintavételi technikával kaphatunk. Jelen vizsgálat keretében zavart mintákat vettünk, de fontos megemlíteni, hogy az iszaptól a kavicsig a teljes szemcseméret-tartomány előfordult, így tehát szerepe lehet a későbbiekben a mederpáncélozódási folyamatok részletesebb vizsgálatának.

A mederváltozási eredmények bemutatására szolgálnak a **16. és 17. ábrák**. Előbbi a felvízi, utóbbi az alvízi sarkantyúk környezetét szemlélteti. Az ábrák három részből állnak össze: az *a.*) rész szemlélteti a vizsgált területet műholdas fényképpel, valamint a mérési szelvényeket (folytonos vonal – árvízi mérés; szaggatott vonal – kisvízi mérés), a *b.*) képen a számított különbségmező látható, valamint itt is a mérési szelvények, a *c.*) részben pedig a vizsgált keresztaszelvények geometriáját mutatom be, az árvízi és az árvizet követő kisvízi mérések alapján. (Jelzem, hogy mivel az alvízi területen sokkal kisebb mederváltozások tapasztalhatók a keresztaszelvények alapján, valamint a térkép alapján is, így ott kisebb intervallumú skálázást alkalmaztam a különbség-mező megjelenítésénél.)



16. ábra – Felvízi mederváltozások

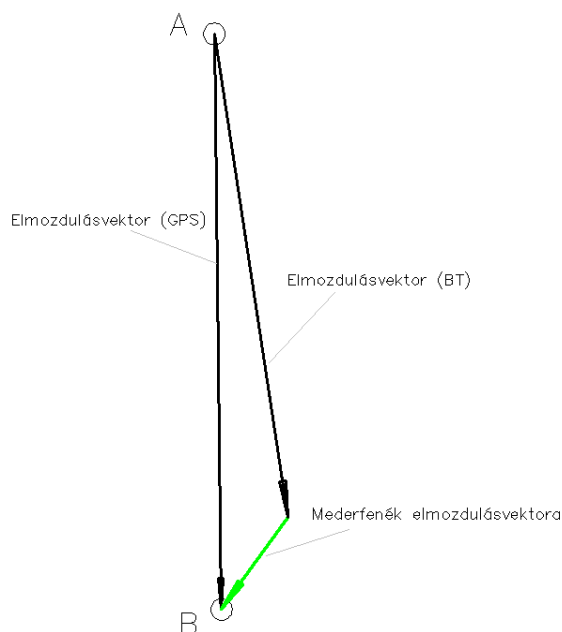


17. ábra – Alvízi mederváltozások



5.1.3. Mederfenék mozgási sebesség becslése

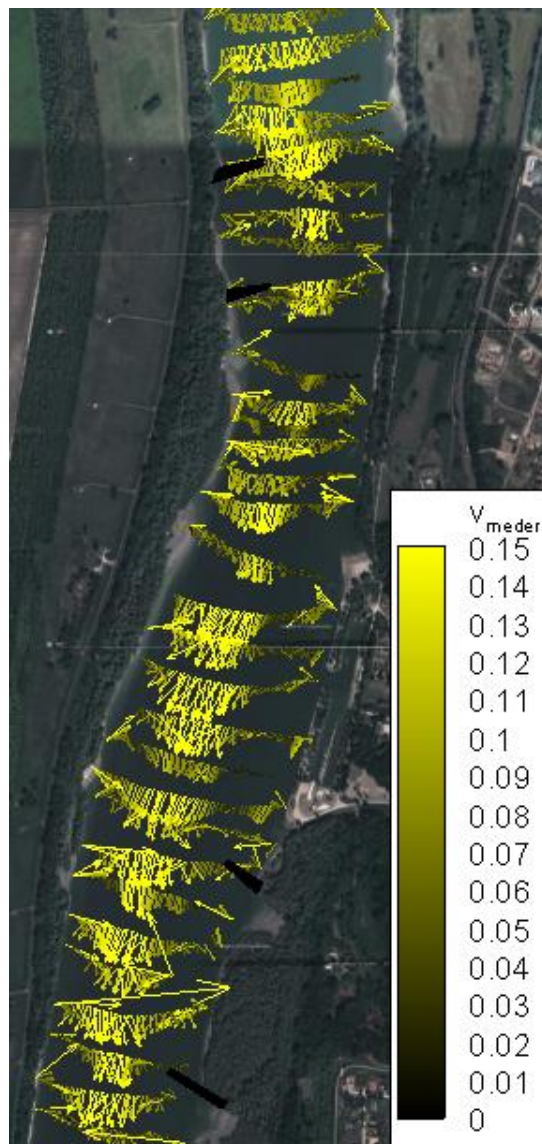
Az árhullám hatására bekövetkező mederalak-változási folyamatok jobban megértéséhez hozzájárulhat a meder felszíni rétegére jellemző mozgási sebességnek, vagy másképp kifejezve a görgetett hordaléktranszport intenzitásának ismerete, annak térbeli eloszlása. Vizsgálatomban kísérletet tettünk ennek a mederfelszín-mozgási sebességnek a becslésre, amihez az ADCP mederfenék-követő (Bottom Tracking) funkciója volt segítségünkre. Az itt alkalmazott eljárást elsőként egy kanadai folyóra mutatták be (Rennie *et al.*, 2002). A funkció lényegét már korábban, a 2.4.2-es fejezetben megemlítettem, és egy kikötést is tettem alkalmazására, miszerint csak akkor használható pontos áramlási sebesség mérésre, amennyiben intenzív mederfenék-mozgás nincs. Éppen ez a kitétel – illetve ennek oka – volt az, ami segítségével elvégezhattük ezt a mostani számítást, ugyanis mozgó meder esetén, fix hajóról mérve, a funkció azt fogja eredményül adni, mintha az áramlással szemben haladnánk, mozgó hajó esetén ez pedig, mint többlet-sebesség jelentkezik. Ha azonban GPS segítségével ismerjük a pontos helyünket vagy mozgás közben a pályánkat, akkor a két pálya adott pontjainak különbségeiből meghatározhatók a mederfenék mozgásának elmozdulásai (**18. ábra**). Az elmozdulás vektorok meghatározásánál azzal a feltevéssel éltünk, hogy a GPS-szel mért koordinátáink minden esetben pontosan az ADCP-vel mért pontokéival egyezik, így ezeket használtuk referenciapontokként. Ez a feltevés megfelelő relatív pontosságú közelítés nagyvízi állapotra, így a módszert ott jól tudtuk alkalmazni, de kis- és középvízi esetekben a medermozgások többnyire hasonló nagyságrendbe esnek a mérési pontatlansággal, így ott a számítások bizonytalanná válnak.



18. ábra – A mederfenék elmozdulás számításának sematikus ábrája

Ezután a kapott elmozdulás-vektorokat leosztottuk az egyes pontok mérései közt eltelt idővel (ez az ADCP mérési frekvenciájának reciproka), és megkaptuk a mederfenék felszíni rétegének mozgási sebességvektorait. Ha a számítást a nyers mérési adatok alapján az összes pontra elvégeztük, az eredmény túl „zajosnak” bizonyult, ezért – több próbát követően – csak minden 20. függélyre aggregált értéket állítottunk elő.

A **19. ábrán** a mederfelszín mozgási sebességvektorok eloszlását mutatom be, ahol a színezés a sebesség nagyságát jelöli (sárga: intenzív medermozgás; fekete: fix meder). A vektormező magyarázatot adhat a felvízi sarkantyúpárnál tapasztalt jelentős kimélyülésekre és a kimosott mederanyag szinte azonnali lerakódására. Valóban, a felvízi mű orránál lokálisan intenzív medervándorlás tapasztalható, ami folyásirányban haladva aztán hirtelen mérséklődik is. Hasonló nagyságrendű sebességértékeket tapasztalhatunk az alvízi műveknél is, ahol – a mederfelmérések alapján – nem tapasztaltunk ilyen jellegű kimélyülést. Rögtön hozzá kell tenni, hogy az áramlás-medervándorlás kölcsönhatás leírásánál természetesen szerepe van a meder anyagának, mint potenciális forrásnak, és a határfelületen kialakuló csúsztatófeszültségnek, amit a későbbiekben vizsgálok.



19. ábra – A meder felszíni rétegének mozgási sebességei árvíz idején (a fekete téglalapok a sarkantyúk helyét jelölik)

5.2. Áramlási sebesség mezők

A folyami élőhelyek abiotikus paraméterekkel való jellemzésénél a mederalakhoz hasonlóan meghatározó szerepe van a víz áramlási sebességének. Külföldi kutatások (pl. az irodalmi áttekintésben ismertettek) egyértelműen alátámasztják, hogy a halak általában jól definiálható vízsebességű zónákat kedvelnek. Ez persze halfajokként, sőt életkortól függően is eltérő, de célirányos halviselkedési vizsgálatokkal meghatározható, vagy legalábbis intervallumokra osztható.

Jelen vizsgálatban a mélységtérképek készítésével analóg módon, sebességmezők elkészítésére is lehetőségünk van. Köszönhetően az ADCP-vel mért, nagy térbeli felbontású, 3 dimenziós

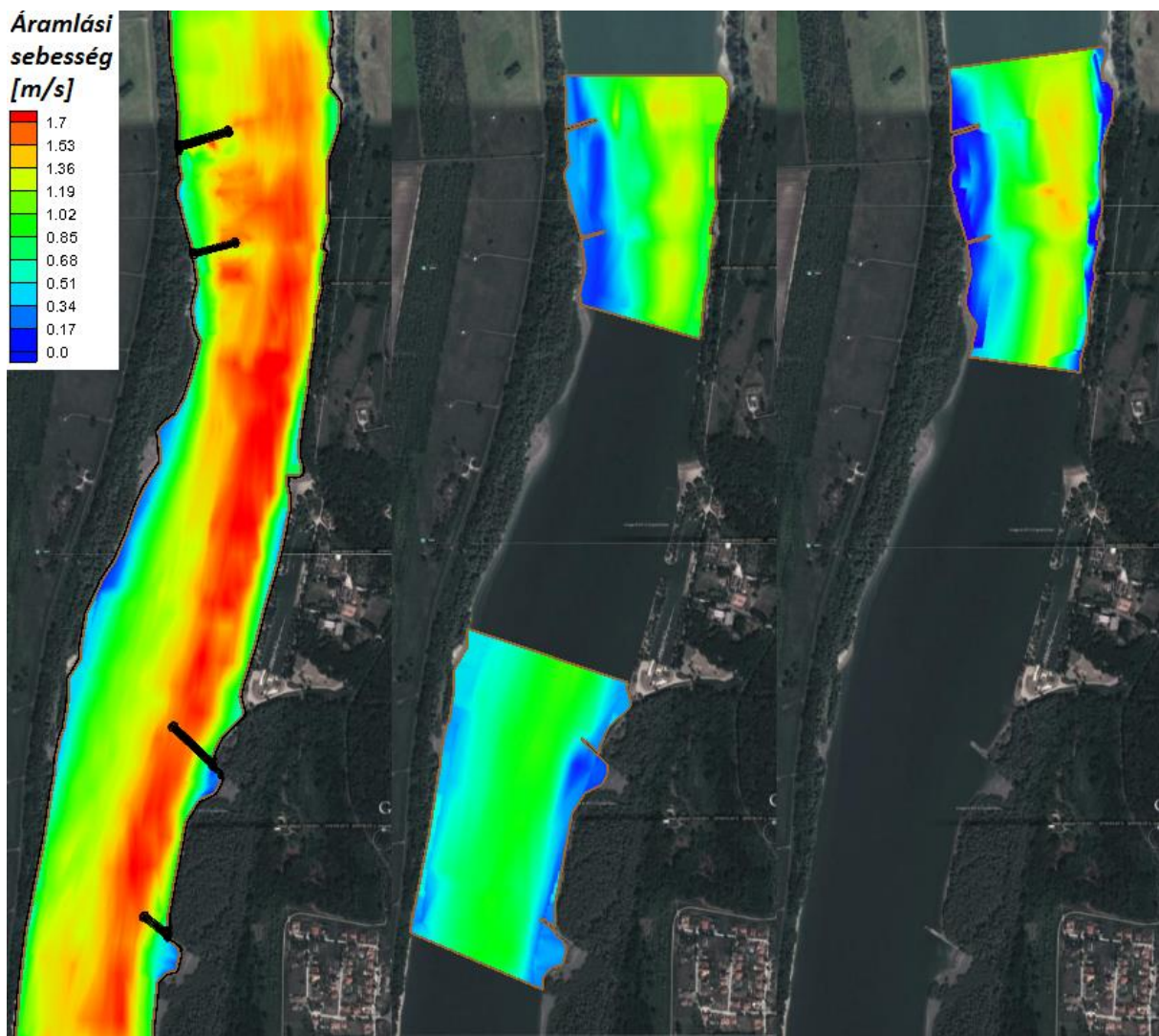


szelvénybeli sebességeknek, rendkívül színes, részletes képet kapunk a területre jellemző áramlásról, így azt több szempont szerint is görcső alá vettem.

5.2.1. Mélységátlagolt sebességek

Elsőként a mélységátlagolt sebességek vizsgálatával foglalkozom, mert a legtöbb élőhely-modell a szerény rendelkezésre álló adatmennyiség miatt ezt a jellemzőt veszi alapul. A mélységátlagolt sebességek előállításához a simított szelvénybeli sebességeket használtam. A számítási eljárás a következő: vesszük egy adott szelvényben az egyes függvényeket, majd az azokat alkotó cellákban tárolt sebességek számtani átlagát képezzük. Az így kapott, sebességértékeket hordozó pontfelhőre pl. a már hivatkozott SMS segítségével már illeszthető egy háromszög rácsháló, melynek segítségével lineáris interpolációt alkalmazva elkészíthető a mélységátlagolt sebességmező. Ekképpen egy vízszintes síkbeli sebességmezőre aggregáljuk a kezdetben térbeli sebességeloszlásunkat, valamint a vektoriális irányokat is levetkőztük, következésképp egy olyan mezőt kapunk eredményként, melyben minden síkbeli EOV koordinátához egy skalár (sebességnagyság) van rendelve. A számítást a medergeometriához hasonlóan kis és középvízi állapotokra is elvégeztem, valamint a nagyvízi állapotnál feketével jelöltem a sarkantyúk helyét, mivel itt a víz a koronaszintjük felett volt méterekkel, így oda is számítva lett a sebességmező, szemben a kis- és középvízi állapotokkal (**20. ábra**).

Az eredménymezők bizonyos feltételezéseket alátámasztanak, egyúttal néhány sajátos viselkedésre is rámutatnak. Az északi területen jól látszódik a sodorvonal eltolódása a bal part felé, mely a sarkantyúknak tudható be, valamint az is feltűnő, hogy a vizsgált szakasz déli részén elhelyezkedő művek áramlásra gyakorolt hatása jóval mérsékeltebb. A nagyvízi viszonyokat szemléltető ábra alapján továbbá beigazolódik az is, hogy amennyiben a folyam meghágja a sarkantyúkat, jelentősen megváltozik az áramlás jellege, az addig nagy sebességektől védettnek tekinthető, műtárgyak közötti limányos területen is intenzív áramlás alakul ki, mely – az árvíz idejére – jelentősen átalakíthatja az élőhely típusok területi eloszlását a térségben. Az áramlási sebességek eloszlása igen heterogén, de a kisebb vizes állapotoknál lesz ennek elsősorban jelentősége, mert árvízkor az összetett kép ellenére látható, hogy 1 m/s alatti sebesség szinte sehol nem jellemző, vagyis gyakorlatilag mindenhol nagy sebességek uralkodtak.

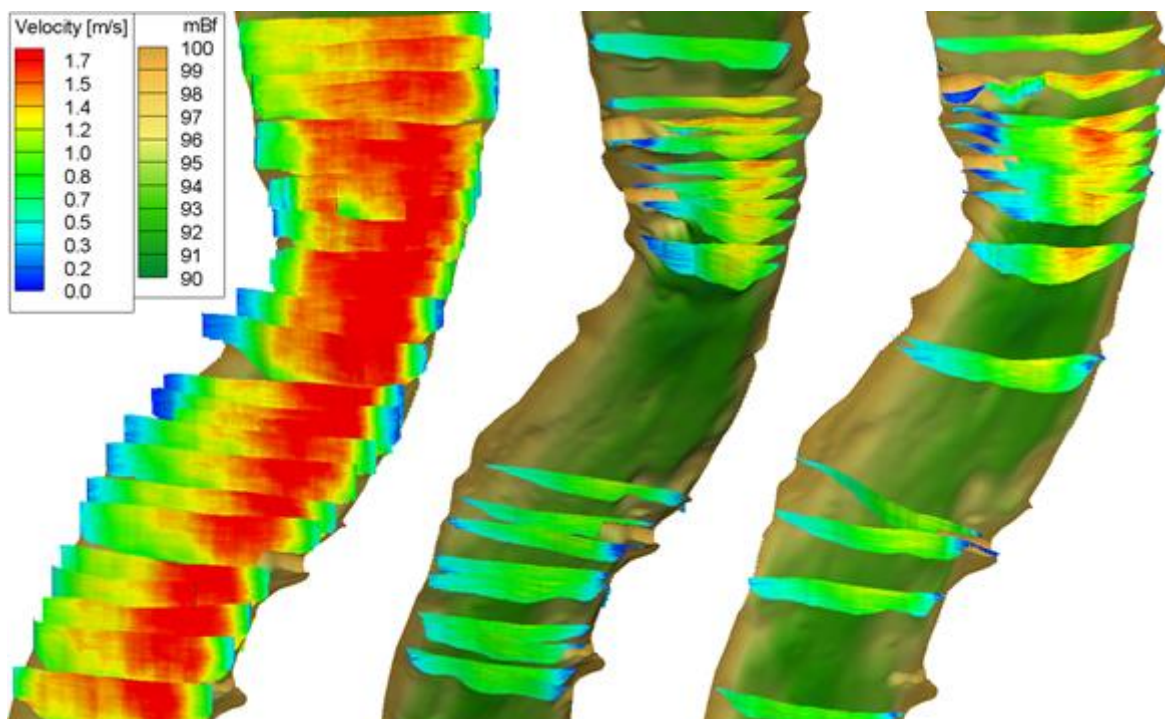


20. ábra – Nagy-, kis- és középvízi mélységátlagolt sebességmezők

5.2.2. Háromdimenziós sebességeloszlások

Az előző fejezetben szemléltetett ábráknak ugyan sok mondanivalójuk van, és jól illeszthetők a későbbiekben alkalmazott élőhely-modellezéshez, azonban az áramlás térbeliségéről, mélység szerinti megoszlásáról nem adnak információt. Ehhez a 3D megjelenítés lehetőségéhez kell fordulni, melynek előállításához újfent a mozgóablakos átlagolással simított szelvénybeli sebességeloszlások alkalmazandók. Mivel háromdimenziós megjelenítésre készülünk, célszerű a legyártott medergeometria mezőt is 3D-ben ábrázolni, ezzel is elősegítve az eredménymezők könnyebb megértését. Mivel csak a júniusi mérések alapján állt rendelkezésemre az egész területet lefedő digitális terepmodell, így az egyszerűség kedvéért, az összes megjelenített állapotot ebben a medermodellben ábrázolom, nem feledkezve meg arról, hogy már a júliusi

mérés idejére is jelentős morfológiai változások mentek végbe. A megjelenítésnél a nagyvízi állapotban mért szelvények számát redukáltam a jobb átláthatóság érdekében.



21. ábra – Háromdimenziós sebességeloszlások nagy-, kis- és középvízi állapotra

A **21. ábrán** egyrészt a 2D mélységátlagolt sebességmezőknél tárgyalt sebesség-eloszlási jelenségeket figyelhetünk meg, de azokat megerősítve és térbeliségében szemléltetve. A sodorvonal bal part felé tolódása itt is látványos, valamint a művek orránál kialakuló szelvénybeli sebességek is, mint a jobb parti szabályozási művek valószínűsíthető következményei. A bal parti sarkantyúk környezetében lévő szelvények is a **20. ábrán** láthatókhöz hasonlókat mutatnak, itt azonban középvízi helyzetre is vannak értékeink, szemben a 2D megjelenítéssel, ahol a rendelkezésre álló adatokból nem lehetett reprezentatív mezőket készíteni. A kisvízi állapotnál továbbra is úgy fest, nincs jelentős hatása a sarkantyúknak az áramlásra, hiszen a sarkantyúk sávját (már) nem járja be lényegi áramlás, így viszonylag szimmetrikusak a keresztaszelvények, azonban a középvízi mérési eredményeknél már szembetűnő az efféle szabályozási művek közelében jellemző keresztaszelvényi sebességeloszlás. Ezek alapján kijelenthető, hogy az alvízi sarkantyúk áramlásra gyakorolt hatása csak bizonyos vízhozam felett érvényesül jelentősen. Érdekes megfigyelni még az árvíz során a felvízi sarkantyúpár környezetében a két jól elkülöníthető nagy sebességű zónát. A sebességeloszlás jól illusztrálja a medermorfológia és hidrodinamika kölcsönhatását, mert a



sarkantyúk felvízi oldalán a középvezetékben egy rossz gázló alakult ki, ami egy szigethez hasonlóan két irányba tereli az áramlást.

Mindezek mellett megfigyelhető a kis- és középvízi állapotok ábráin az északi sarkantyúpár között kialakuló limányos terület is, feltűnően kisebbek ott az áramlási sebességek, mint bárhol máshol továbbá a 3D-s megjelenítésnek köszönhetően az is látható, hogy ebben a zónában rendkívül kicsik a vízmélységek is. Ezek alapján már élünk a gyanúval, hogy ez egy különös fontosságú zóna lesz élőhely szempontból, továbbá a méréseken tapasztaltak alapján sejtjük, hogy akár visszaáramlás is kialakulhat ezen a területen. Utóbbit azonban ezzel a skaláris megjelenítéssel nem igazolhatjuk.

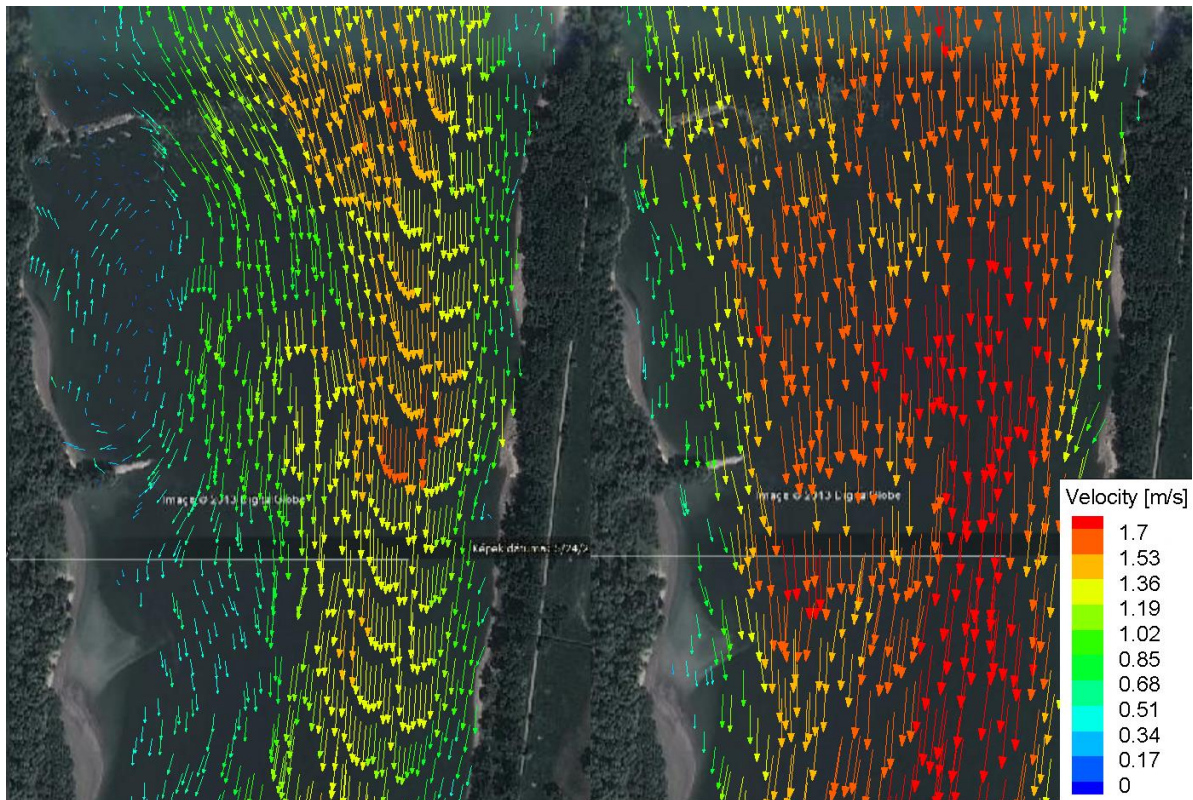
5.2.3. Sebességvektorok mezői

Az ADCP lehetővé teszi a sebességek térbeli vektor-mivoltának mérését is, így lehetőség van azok ábrázolására, értelmezésére is. Két különböző megjelenítési módot mutatok be a következőkben, melyek más-más módon járulnak hozzá a térségben uralkodó áramlási viszonyok megértéséhez. A sebességvektorok térbeli megjelenítése nehezen átlátható és értelmezhető eredményeket ad, így a kétdimenziós mezők megjelenítésére szorítkozom.

Elsőként a vízfelszínhez közeli vízrétegre jellemző sebességadatokat mutatom be. Az ADCP-vel mért és tárolt adatoknak megvan az az előnyük, hogy indexelve vannak a mélységi zónák szerint, így közvetlen lehetőség van adott rétegeket külön-külön is ábrázolni. A keresztmetszeti és a pásztázós mérésekből ily módon kiszűrt vektorokat ráinterpoláltam a mélységátlagolt sebességeknél már alkalmazott háromszög rácshálóra, majd a lényeg megtartása mellett némiképp megritkítottam őket a szellősebb áttekinthetőség érdekében. A **22. ábra** a vizsgált szakasz felvízi részén elhelyezkedő sarkantyúk környezetében kapott vektormezőket ábrázolja.

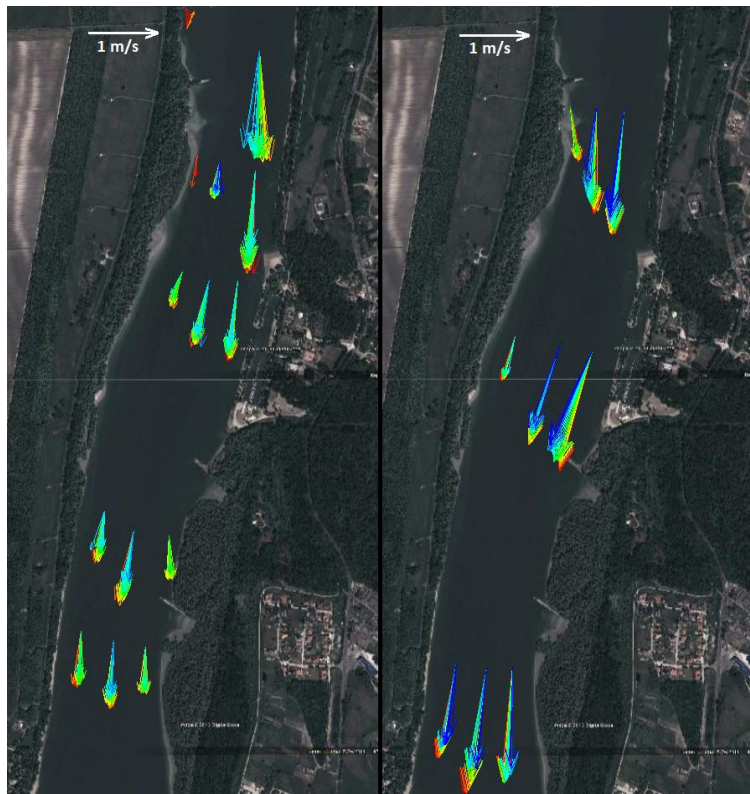
A vektoros megjelenítés alátámasztja a mérés során tapasztaltakat, hogy a kérdéses területen visszaáramlás alakul ki a sarkantyúk hatására, egészen addig, amíg a víz meg nem hágja a művet (nagyvíz), ilyenkor az áramlás elveszti a sarkantyúk kölcsönözte karakterét, homogénizálódni látszik, legalábbis az áramlás irányát tekintve, és szinte az egész területen közel párhuzamos sebességvektorok figyelhetők meg. Feltűnő továbbá középvíz esetén a sarkantyúk terelő hatása, közvetlenül a műtárgyak fölött. Jól látható, 20-30°-os szögben eltér a vektorok iránya a felvíziekéhez képest, illetve a sodorvonalban lévőktől. Ebből következik, hogy a folyónak a sodorvonal környezetének kell elszállítani az ekképpen haránt ideáramló

víztömegeket is, vagyis jóval magasabb fajlagos vízhozamok alakulnak itt ki, ami vagy szelvénynövekedéssel (mélyülés), vagy a sebesség növekedésével, esetleg kettőjük kombinációjával lehetséges.



22. ábra – A legfelső rétegekben kialakuló sebességek vektoros megjelenítése közép- és nagyvízi állapotra

Hogy az áramlás térbelisége még egyértelműbben kimutatható legyen, az egyes mélységi zónák sebességvektorainak megjelenítését elvégeztem a fix hajós mérésekre (23. ábra). Átlagoltam az egyes függélyekben mért kb. 60-70 pillanatszerű eloszlást, így megkapva az adott helyet leginkább jellemző sebességvektorokat. Ezeket csak a közép- és nagyvízi mérésekre végezhettem el, ugyanis a kisvízi állapotra nem rendelkezünk ilyen jellegű mérésekkel.



23. ábra – Fix hajós mérések időátlagolt sebességvektorai közép- és nagyvízi állapotokra (színezés a mélység szerint: piros – vízfelszín; kék – mederfenék). A térképek az alvízi sarkantyúk környezetét mutatják, mert a rögzített pontú méréseket itt végeztük.

A fenti ábrán megjelenő vektorok alátámasztják a kis görbületű ívek hatását az áramlásra, és a vártak megfelelő értelmű csavaráramlási struktúrát jeleznek. A nagyvízi állapotban a jelenség még markánsabban jelentkezik, sőt a legalsó szelvényben már ellenkező értelmű szekundér struktúra alakul ki, a folyó helyszínrajzi vonalvezetésének megfelelően. Az áramlás impulzusa tehát hatással van a térbeliség erősségére.

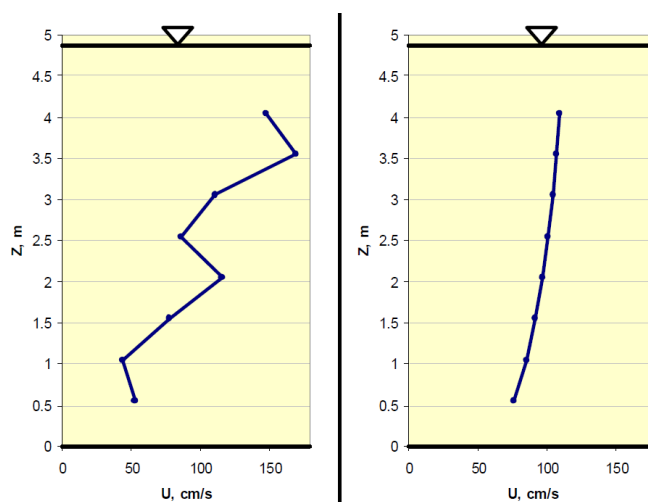
5.3. Fenékcúsztató feszültség mezők

Az élőhely-modellezés egyik fontos adata a fenékcúsztató feszültség (Shields és Rigby, 2005), amely a mederfenék és a víztest határfelületén jelentkező csúsztató erő fajlagos értékét fejezi ki. A mederfenék közeli áramlásnak például a halak ívásánál van értelemszerűen kiemelt szerepe, de a kifejlett egyedek élőhelyleírásánál is releváns paraméter. A 4.2.2. fejezetben részleteztem a fenékcúsztató feszültség meghatározását a turbulens fal-törvény alapján, a következőkben pedig bemutatom az ekképpen elkészített mezőket, mindenekelőtt azonban ezek elkészítésének nehézségeire térek ki.

A paraméterbecslés végrehajtása nehezebb, mint amilyennek a módszer leírásnál tűnik, valamint azt is tapasztaltuk, hogy egy plauzibilis mező létrehozása kompromisszumokat is



követel. A becslési eljárás nehézségei elsősorban a mozgóhajós mérések feldolgozásánál jelentkeznek. A fix hajós mérések kellően hosszú mérési időtartam mellett (itt 3 perc), kellően stabil, a turbulens fluktuációktól mentes, a **24. ábra** jobb oldali eloszlásához hasonló eredményt adnak (Baranya *et al.*, 2008). A mozgóhajós mérések eredményeire azonban a fent említett fluktuáció miatt rendkívül kényes feladat lehet a logaritmikus sebességprofil illesztése. Ezt több dolog is okozhatja. Ahogy korábbi fejezetekben az említve lett, gyakran keletkeznek üres mérési cellák egy-egy függvényben. Ez abból a szempontból előnytelen, hogy ilyen esetben kevesebb pont áll rendelkezésünkre, melyekre a függvényillesztést elvégezhetjük, így annak helyessége is bizonytalanabbá válhat. Ez a hiba azonban jelentős mértékben csökkenthető helyesen megválasztott mérőhajó-sebességgel. A második ok gyakoribb, noha nagyon lassú átkeléssel ez is kiküszöbölhető lenne: az áramlás turbulens jellegéből adódóan az egyes rétegekben pillanatszerűen mért sebességek (a **28. ábra** bal oldalán látható eloszláshoz hasonlóan), jelentősen szórnak az átlagértékeik körül, így azokra a logaritmikus függvényt követő eloszlás már elméletileg nem igaz, így illesztése már többnyire nem eredményez fizikailag reális eredményt.



24. ábra – Pillanatnyi (bal) és több perces átlagsebességek (jobb) /BME VIT 2009/

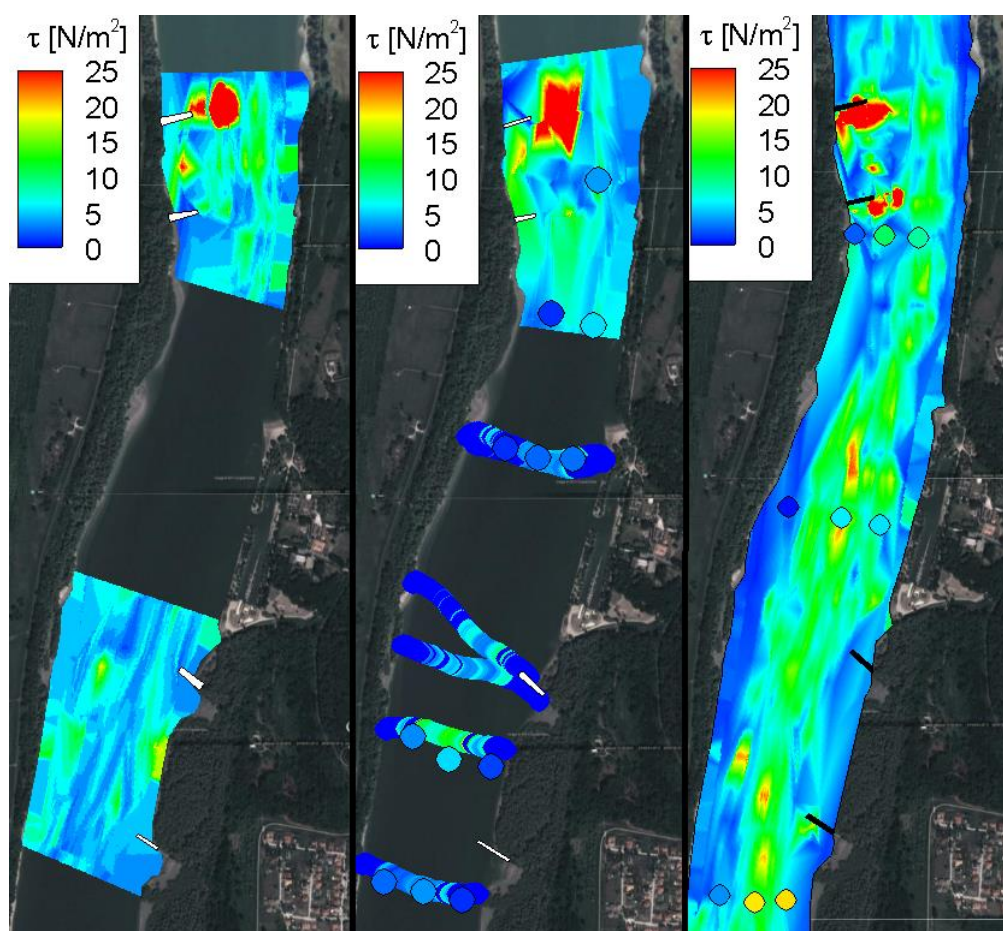
A nagyvízi mérések feldolgozása során $n=21$ -es mozgó ablakkal simítottam az adatsort, a függvényillesztésnél pedig csak azokat a származtatott feszültség adatokat vettem figyelembe, amelyeknél a függvényillesztés jósága $R^2=0,8$ -nél magasabb korrelációs együtthatóval volt jellemezhető. Az így számított sebességprofilokból kellően nagyszámú u^* értéket kaptam, így



a háromszögelést és a lineáris interpolációval végzett mezőgyártást SMS-sel, a korábbiak mezők előállításához hasonlóan elvégezhettem.

Első körben a kis- és középvízi eseteknél is ugyanígy jártam el, azonban ezek a számítások alig 100 db értelmezhető szórt pontot adtak, szemben a nagyvízi eset sokezeres pontfelhőjével. Amennyiben ugyanis a nem eléggé reprezentatív alapadat-készletre a függvényillesztés sikertelen, vagy nem megfelelő, a számításban előfordulhat zérussal való osztás, mely matematikailag értelmezhetetlen, így nem hoz eredményt, de mínusz, vagy akár komplex számok is adódhatnak u^* -ra. Az ilyen eredményeket nem lehet felhasználni mezők előállításához, így a feldolgozás során használt paraméterek finomítására – illetve éppen durvítására – volt szükség. Elsőként a mozgó ablak méretének növelését/csökkentését kíséreltük meg, ez azonban szinte semmi javulást a becsült adatok számában nem eredményezett. Mivel azonban ezek a mezők elengedhetetlenek az abiotikus paraméterekkel történő élőhely leíráshoz, próbálkozást tettünk a határértékként megadott korrelációs együttható csökkentésére ($R^2=0,8$ -ról $R^2=0,2$ -re) valamint a mozgóablak méretét $n=31$ -ben határoztuk meg. A változtatás eredményeként nagyságrendileg növekedett a fizikailag értelmes eredmények darabszáma, mindazonáltal a kapott eredményeket fenntartásokkal kellett kezelni a gyenge sebességprofil-illeszkedések miatt.

Az így kapott elfogadható sűrűségű pontfelhőkre ezután újra elvégeztem a háromszög rácsháló illesztést, valamint a lineáris interpolációval a mezőszámítást, majd a fenékcúsztató feszültség számítását az **5. egyenlet** alapján, melyek eredményeit a **25. ábrán** szemléltetem, a fix hajós mérésekből számított τ értékekkel együtt. Utóbbiakat fekete körvonalú, a mezővel egyező skála szerint kitöltött korongokkal ábrázoltam. Ezeken felül a szeptemberi méréskor végeztünk fix hajós méréseket olyan szelvényekben, ahol keresztshelvénymérések is történtek, hogy vizsgáljuk, közelíthető-e kellő pontossággal a fenékcúsztató feszültség pusztán a mozgó hajós mérésekből. Ezek is ábrázolva lettek. Korábbiakhoz hasonlóan a nagyvízi ábrán a sarkantyúkat feketével ábrázoltam, a jobb értelmezhetőség céljából.



25. ábra – Fenékcúsztató feszültségek kis-, közép- és nagyvízi állapotokra

A becslési eljárásban rejlő közelítések (nem a mért sebességadatokat, hanem az illesztett függvényt használjuk) ellenére mindhárom vízjárési állapotra igen realisztikus eloszlásokat kaptunk. A kis- és középvízi állapotok esetén jól látható mindkettőnél a jobb parti sarkantyúpár felvízi eleménél az egész mezőből kimagasló csúsztatófeszültség érték, mely sok más jelenséghez hasonlóan, az ott található sarkantyú eredménye. A lokálisan megugró feszültségértékek jól magyarázzák a művek orránál kialakuló kimélyülést. A középvízi méréshez kapcsolódó mezők esetében érdemes megfigyelni a rögzített hajós és mozgóhajós mérésekből származtatott értékek közötti hasonlóságot. Előbbieket egyfajta referenciaértéknek tekintve, elfogadhatónak tekintjük a mozgóhajós adatokból kapott feszültség értékeket.

Az árvízi mérésekből származtatott mező hasonló nagyságrendű értékeket eredményez, de térbeli eloszlása eltér a másik két állapottól. A felvízi művek környezetében, azok tengelyével párhuzamosan az alvízi oldalukon jelennek meg a legmagasabb értékek, a méréskor is tapasztalható rendkívül intenzív átbukás helyén. Ezen a mezőn is megjelenik a hajózó útban kialakult gázló hatása, ami kettéosztja az erős áramlású zónákat a felvízi sarkantyúknál, majd



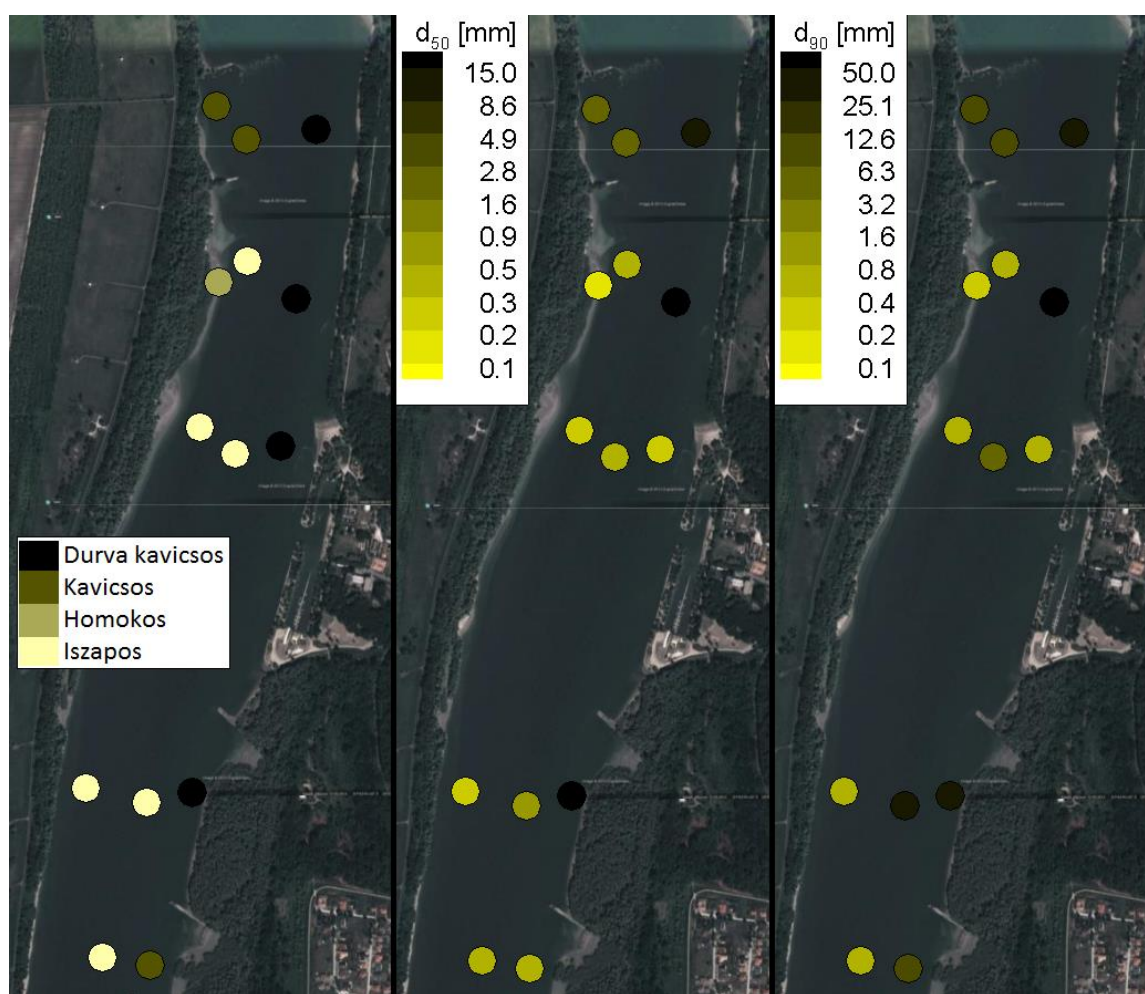
alvízi irányba haladva kirajzolódik a sodorvonal mentén magas, de a műveknél kialakulthoz képest alacsonyabb feszültségértékek zónája.

A bemutatott eredménymezők nagyon jól illusztrálják a mérési és adatbecslési eljárásban rejlő lehetőséget, és azok közvetlen felhasználását az élőhely jellemzésre. Világosan megmutatkozik az eltérő vízjárási állapotok eredményezte különbség a mintázatokban, jelezve az élőhely-viszonyok szoros függését a hidrológiai, és ezen keresztül a hidraulikai viszonyoktól, ami a későbbiekben bemutatásra kerülő élőhely-mezőkön is kirajzolódik majd.

5.4. Mederanyag

Ahogy az az irodalmi áttekintésnél már ismertetésre került, a mederfenék szemösszetétele nem hagyható figyelmen kívül a folyami élőhely jellemzése során. Az egyes halfajok az áramlási viszonyok mellett egészen eltérő mederfenék-típusokat preferálnak. A mederanyag fizikai jellemzőinek figyelembe vétele különösen fontossá válik olyan folyószakaszokon, ahol vegyes szemcseméret jellemzi a medret, ami a Duna magyarországi szakaszának jelentős részén igaz.

A középvízi mérés során vett mederanyag-minták több módon is osztályozva lettek a szítalásokat követően. Elsőként a szemeloszlási görbék értékelései alapján, a következő négy csoportba soroltuk a mintákat: iszap, homok, kavics, durva kavics. A második osztályozás az ilyen jellegű mintáknál gyakran alkalmazott átlagos szemátmérő (d_{50}) alapján történt, ez egy adott minta szemcseátmérőjének mediánját jelenti, vagyis azt az elméleti szitaméretet, amin az anyag egyik fele átesne, másik fele fennmaradna. Ezt a megrajzolt diagramokról történő leolvasással kaphatjuk. Végül az összes mintához meghatároztuk az azt jellemző d_{90} -es értéket, azaz azt a szemcseátmérőt, aminél az anyag teljes tömegének 90%-ban kisebbek szemcsék találhatók. Ez az érték közvetlen kapcsolatban van az ún. Nikuradze-féle érdességmagasság értékével, ami a numerikus modellek felállításának egyik fontos paramétere. A kapott pontbeli jellemzőket a **26. ábra** szemlélteti.



26. ábra – Mederanyag jellemzők (d_{50} és d_{90} logaritmikus skálája nem azonos!)

Az ábrák meglepő eredményeket mutatnak, amit látunk, egyáltalán nem triviális. Előzetes feltételezés szerint a sodorvonalban tipikusan kavicsos illetve durvakavicsos anyag várt, a sarkantyúk közötti limányban pedig iszap. Ezzel szemben az északi sarkantyúk közötti területen, kavicsos anyagot találtunk, illetve a sodorvonalban is több helyen iszapos a mederanyag, ami meglepő eredmény. A kapott eredményeket azzal magyarázzuk, hogy a júniusi árvíz rendkívül nagy vízhozamainak és medereróziós hatásának következményeként intenzív mederátrendeződés ment végbe. A folyómeder morfológiai megváltozása (lásd 5.5.2. fejezet) jelzi, hogy a mederanyag összetétele térben és időben is átmenetileg kibillen az ott korábban kialakult egyensúlyi helyzetéből. Az árvíz levonulta után a folyómeder igyekszik visszatérni az egyensúlyi helyzetébe, azonban kis- és középvízi állapotban az elragadó erők nagysága – melyek ezt a munkát végzik – jóval mérsékeltebb, így a „visszarendeződés” folyamata évekig is eltarthat. Jelen esetben két hónappal az árvíz után történtek a mintavételek, így feltételezhető, hogy egy köztes állapothoz tartozó pillanatképet kaptunk a meder



szemösszetételéről. Ezt a feltételezést alátámasztja a sarkantyúk közti zónában talált kavicsos anyag. Ezen a területen a mederalak megváltozási térkép (**16. ábra**) kismértékű mederszint csökkenést jelez, amit a hosszú idő alatt kiüledett finom hordalék felkeveredésének és kimosódásának eredményeképpen alakulhatott ki. Ismert, hogy ezekben a sarkantyúk közötti limányos területeken, a Duna magyarországi szakaszán, tipikusan feliszapolódás folyik, gyakran egészen addig, amíg teljesen fel nem töltődnek ezek a területek, és kisebb szigetek alakulnak ki (**27. ábra**).



27. ábra – Sarkantyúk közötti feltöltődések a Solt és Kalocsa közötti Duna-szakaszon /Készítette: Keve Gábor/

Élőhely-jellemzési célokra a középvízi állapotban vett mederanyag-minták nem kellően egyértelműek és reprezentatívak, így azok alapján mezők gyártása nem kellően megalapozott. A későbbiekben alkalmazni kívánt élőhelyleírásban (Aadland és Kuitunen, 2006) azonban a mederanyag fontos szerepet kap, így egy újszerű eljárással próbálkozást tettünk a mederanyagra jellemző szemcseméret területi eloszlásának becslésére az ADCP méréseket felhasználva, Shields (2010) tanulmánya alapján.

A módszer alapelve, hogy az ADCP által kibocsátott és visszavert hangjelek erőssége eltérő és ez összefüggésben van a közegben lévő hordalék szemcseátmérőjével, szemcsealakjával. Az alapelveket már többször alkalmazták hazánkban is, de csak lebegtetett hordalék töménység becslésére (Baranya és Józsa, 2010). Amennyiben rendelkezésünkre áll kellő számú olyan pont, ahol történt mederanyag-mintavétel valamint ADCP mérés is, úgy elméletileg lehetőségünk van a visszavert hangjelek intenzitása és a mederanyagra jellemző szemcseméret (pl. d_{90} , d_{50}) közötti korreláció vizsgálatára. A paraméterek kapcsolatát egy nem lineáris függvénnyel közelítjük, melyet a legkisebb négyzetek elve alapján illesztünk a pontpárookra.



Mivel csak középvízi állapotra voltak harangos mintavevővel vett mederanyag-mintáink, így a becslési módszert a kalibrálás miatt csak erre az állapotra volt lehetőségünk elvégezni. Kigyűjtöttük a mederanyag-mintavételek helyén elvégzett ADCP mérésekből a mederről visszavert jelerősség (RB – Relative Backscatter) adatokat, majd felállítottuk a mérési pontokra jellemző d_{90} - RB közötti kapcsolatot leíró függvényt. Az értékpárok alapján kapott pontokra egy exponenciális függvényt illesztettünk, ami alacsony korrelációs együtthatót eredményezett, vagyis erős kapcsolatot a két paraméter között nem lehetett kimutatni. Mivel a mérések nem célirányosan mederanyag jellemzésre történtek, ez nem meglepő eredmény, jelen dolgozatban azonban az eljárásban rejlő lehetőséget kívánom mindössze bemutatni.

Arra a területre, ahova a szórt pontok sűrűsége lehetővé tette a mező készítését, három harangos mintavevős mérési eredményünk esett, így a mederanyaggal kapcsolatban felmerült kérdések még jelentős további vizsgálatok tárgyát kell, hogy képezzék. Mindazonáltal, a mért és számított eredmények látható egyezést mutattak, így kijelenthető, hogy a módszer alkalmazásában van potenciál a technika kisebb-nagyobb mértékű finomítása után, és annak későbbi – célzott mérésekkel történő – használata indokolt.

6. Az élőhely-modellezés bemutatása

A következőben a korábban bemutatott mezők felhasználásával a vizsgálatra kiválasztott Duna-szakasz élőhely-osztályozását mutatom be kettő, a nemzetközi irodalomban található eljárást alapul véve. A dolgozat **5. fejezetében** bemutatott elemzéseket nem tudom maradéktalanul figyelembe venni az élőhely-modellek felállításánál, mert az alkalmazott módszerek nem veszik figyelembe az áramlási és morfordinamikai viszonyoknak a fentiekben bemutatott, jól érzékelhető összetettségét. A fő cél a korábban bemutatott mezőkkel az volt, hogy rámutassunk a helyszíni mérések sokrétű alkalmazhatóságára és a jövőbeli élőhely vizsgálatoknak megfelelő hidromorfológiai alapot teremtsünk.

6.1. A Hauer-féle élőhely jellemzés

Az egyik, dolgozatomban alkalmazott élőhely-modellezési eljárás egy osztrák tanulmányra alapul (Hauer *et al.*, 2008). Erről a munkáról már korábban említést tettem a **2.3. fejezetben**, itt azonban a teljes metódust ismertetni fogom. Az eljárást alkalmazták már hazai Duna-szakaszra mások is (pl. Baranya és Józsa, 2009), és én is ez alapján készítettem el az élőhely-jellemzést.



A mesohabitat kategóriák osztályozása három bemeneti adat alapján történik, melyek a következők: mélységátlagolt sebesség, vízmélység és fenékcúsztató feszültség. Látható, hogy a szükséges adatokból gyártott mezők kivétel nélkül rendelkezésünkre állnak mindhárom vízjárási állapotra (**5. fejezet**). Ezek az abiotikus tényezők, különböző intervallumokba való tartozásuk alapján más-más numerikus kódot (NC) kapnak, a **3. táblázatban** megfogalmazottak alapján.

Sebesség		Vízmélység		Fenékcúsztató feszültség	
v [ms^{-1}]	$\text{NC}_{(v)}$	d [m]	$\text{NC}_{(d)}$	τ [Nm^{-2}]	$\text{NC}_{(\tau)}$
0.00 - 0.10	1	0.00 - 0.40	5	0.00 - 2.00	0
0.10 - 0.25	2	0.40 - 0.80	4	2.00 - 20	1
0.25 - 0.40	3	0.80 - 1.20	3	> 20	2
0.40 - 0.75	4	1.20 - 1.50	2		
> 0.75	5	> 1.50	1		

3. táblázat – Az input paraméterek kalibrált számszerű osztályozása

Az így meghatározott numerikus kódok (NC) ismeretében képezhető egy élőhely index (MH), a következő formulába való behelyettesítéssel:

$$MH = [\text{NC}_{(d)} + \text{NC}_{(v)}] * \text{NC}_{(\tau)} \quad [6]$$

A képlet eredményeként kapott mesohabitat index (MH) segítségével már elvégezhető az élőhely típusokba sorolás. A módszer hat különböző mesohabitat kategóriát különböztet meg, melyek a következők: medence (pool), áramló szakasz (run), gyors áramlású szakasz (fast run), gázló (riffle), sekély víz (shallow water) valamint beduzzasztott víz (backwater). Az egyes MH értékekhez tartozó élőhely típusokat, a **4. táblázat** ismerteti.

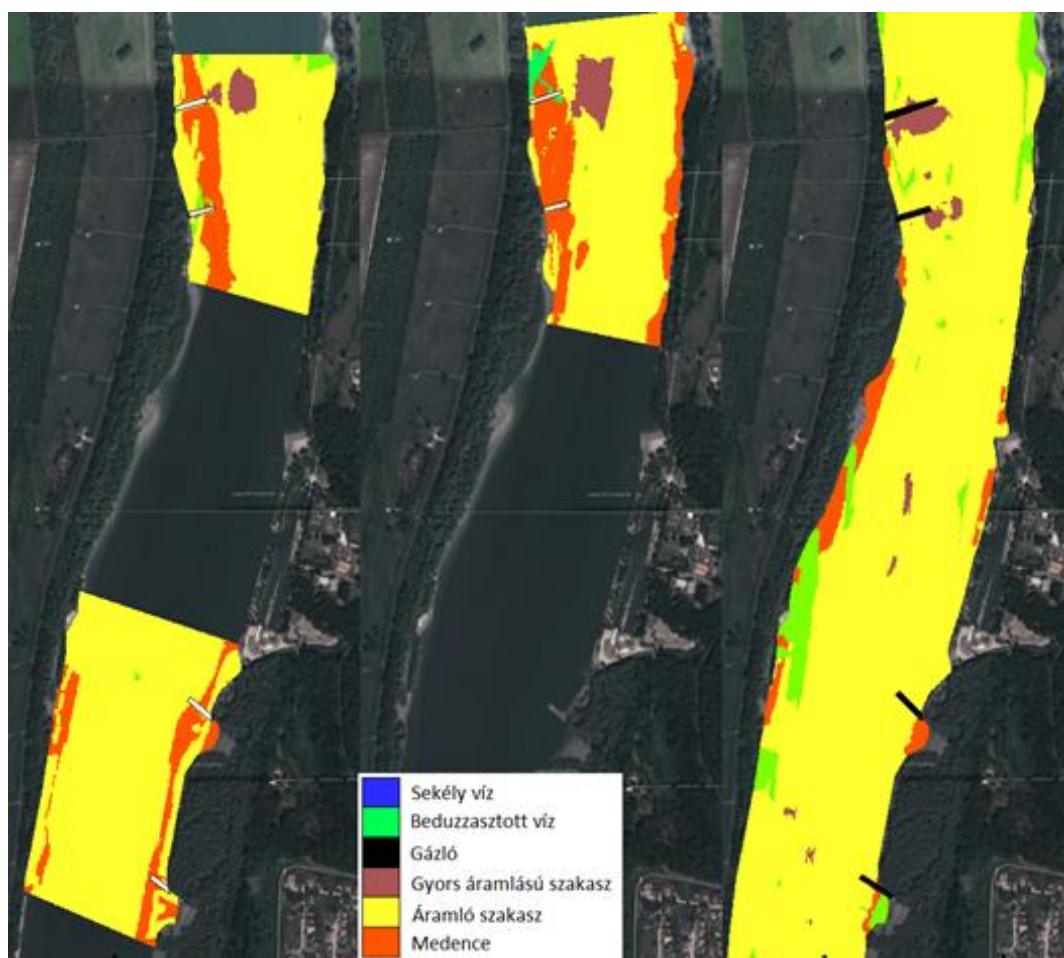
MH	Élőhely típus
2 - 4	medence
5 - 9	áramló szakasz
10 - 18	gyors áramlású szakasz
20	gázló
0	Vízmélység < 0.40 - sekély víz Vízmélység > 0.40 - beduzzasztott víz

4. táblázat – Élőhely-jellemzés a mesohabitat indexek (MH) alapján

Az élőhely-modellezés gyakorlati végrehajtásának első lépéseként az összes állapotra (kis-, közép- és nagyvíz) létrehoztam egy-egy háromszög-rácshálót, melyre ráinterpoláltam a három, kategorizáláshoz szükséges paramétert (mélységátlagolt sebesség, vízmélység, fenékcúsztató feszültség) tartalmazó mezőt. Erre azért volt szükség, mert ezek a mezők nem teljesen egységes



módon lettek létrehozva, többek között a sarkantyúk digitális terepmodellben való speciális kialakítása miatt. Ennek köszönhetően, különböző rácshálók készültek melyben nem egyeztek a rácspontok koordinátái, így a változók egymáshoz rendelése és műveletek végrehajtása nem volt lehetséges. Az újonnan létrehozott mező minden rácspontjában 5 változó szerepelt (EOV-Y, EOV-X, és fenti fizikai jellemzők), melyeket a rácsháló létrehozását követően importáltam Tecplotból egy Excel táblázatba. A táblázatkezelőben a **6. egyenlet**, valamint megfelelő 'if' függvények alkalmazásával minden rácsponthoz, – a koordinátái megtartása mellett – előállítottam egy *MH* értéket. Ezek, illetve $MH=0$ esetén a mélységadatok függvényében már egyértelműen jellemezni lehetett az összes rácspontot élőhely szempontból, így következő lépésben a grafikus megjelenítést végeztem el (**28. ábra**). Kis- és középvízi állapotokban a sarkantyúk által lefedett területet fehérrel jelöltem. Mivel nagyvízi állapotban is fontosnak tartottam jelölni a művek helyzetét, így azok feketével lettek kiemelve, jelölve, hogy ebben az esetben a víz szintje alatt vannak, mindazonáltal a jelölés nem összetévesztendő a jelmagyarázatban szereplő fekete színezésnek megfelelő gázlóval.

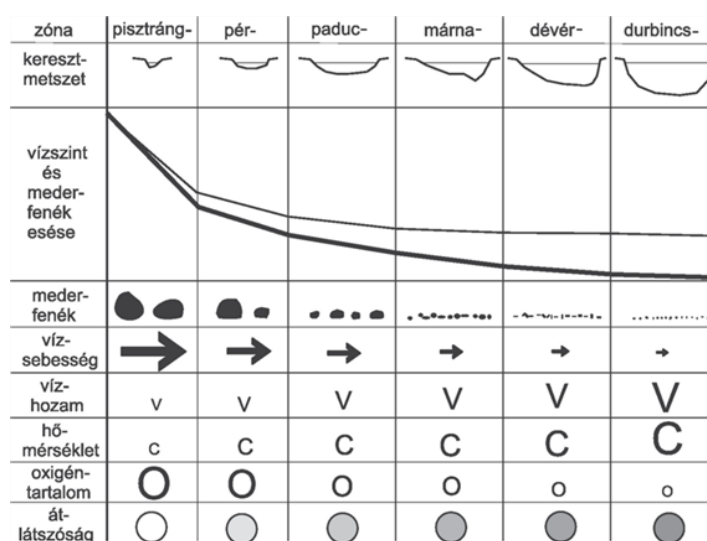


28. ábra – Élőhely-modellezési eredmények kis-, közép- és nagyvízi állapotokra



A kapott mezők a vártnak megfelelően több élőhely kategóriát eredményeztek, jóllehet, az összes állapotban dominál az „áramló” élőhely típus, azonban egy Duna-kaliberű folyónál ez nem meglepő. Ahogy a korábbiakban már leírtam, az alkalmazott módszert kisebb vízfolyásra fejlesztették ki, amely sokkal változatosabb élőhely-eloszlást eredményezett. Mindazonáltal a vizsgált szakasz litorális zónáiban, valamint a felvízi sarkantyúk közötti zónában jelentős területet fednek le a medence-típusú élőhelyek, melyeket tipikusan lassú áramlás jellemez. Nagyszerűen kirajzolódik továbbá a már többször megjelent nagy sebességű zóna a sarkantyúk orránál, mely itt a „gyors áramlású” kategóriába esik és magas áramlási sebességek, valamint nagy fenékcusztató feszültségek jellemzik. Végezetül felhívnom a figyelmet a nagyvízi állapotban területileg jelentősen megcsappanó élőhely-kategóriákra, melyek minden bizonnyal a sarkantyúk meghágásának, valamint az ettől egyáltalán nem független, korábban belátott, áramlási jelleg leegyszerűsödésének tudható be.

Következő lépésként a területre jellemző halfajok élőhely-kategóriákkal való összekapcsolását céloztuk meg, de az irodalomkutatás során nem találtunk olyan tanulmányt, mely ezt a kapcsolatot tárgyalja. Általánosságban elmondható, hogy az ilyen jellegű kutatások hazánkban gyermekcipőben járnak, melynek következménye az is, hogy egy-egy vízmérnöki beavatkozás során nehezen alakul ki érdemi párbeszéd a mérnökök és a biológusok között. Megfelelő kutatások nélkül ugyanis a halak viselkedésével és élőhely-választásával kapcsolatosan csak hozzávetőleges, mérnöki szempontból sokszor nehezen megfogható adatokkal tudnak szolgálni a témával foglalkozó kutatások, melyek ilyenformán mérsékeltlen vagy egyáltalán nem alkalmasak mérnöki tervezésre (példaként lásd a „számoktól mentes” 29. ábrát).



29. ábra – Különböző halfajok által preferált élőhely jellemzők /Harka – Sallai 2004/



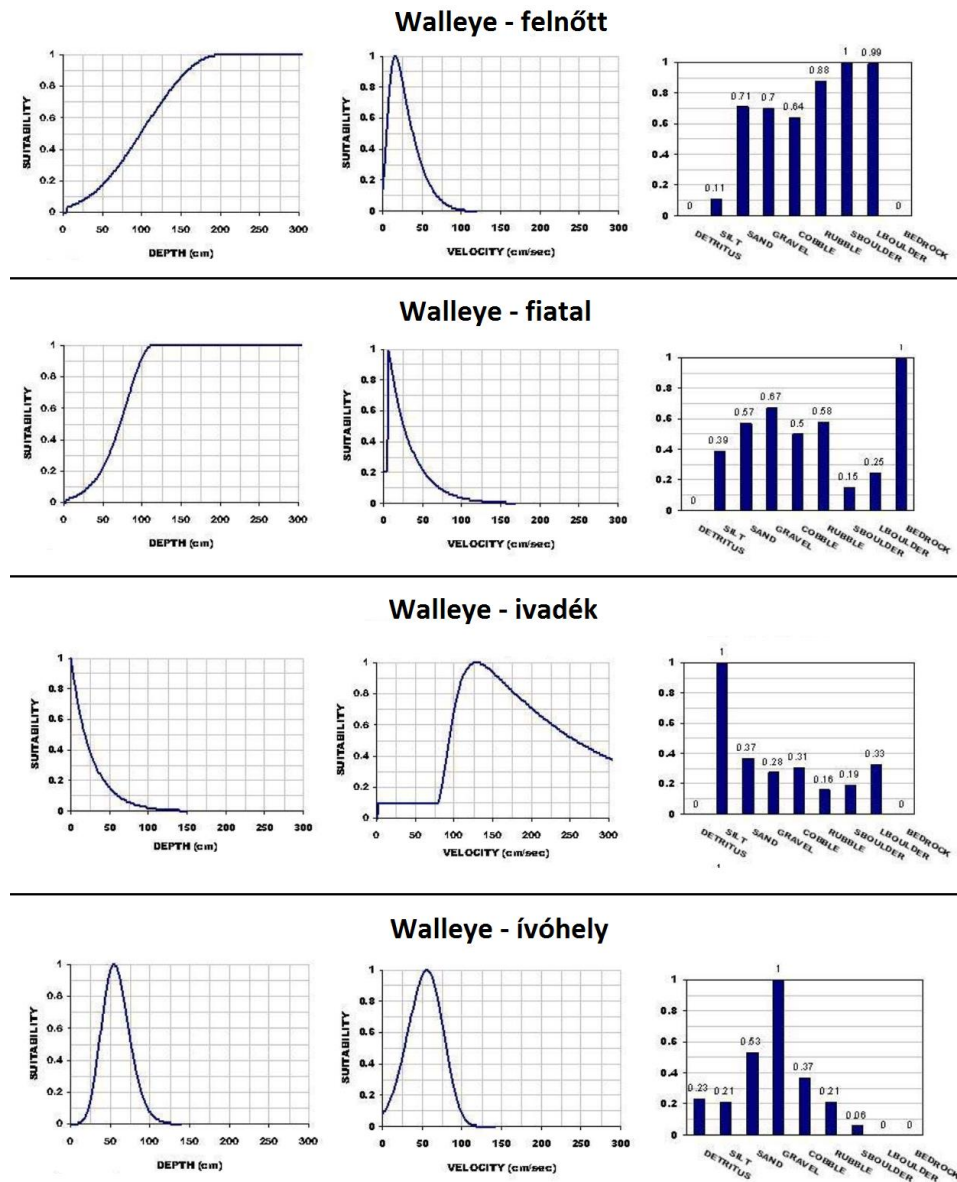
6.2. Egy süllőfaj, a *Sander vitreus* élőhely-megfelelőségi vizsgálata

Az előző fejezetben ismertetett eljárás konkrét halfajokra való alkalmazásának irodalmi hiányosságai miatt más módszert kerestünk, hogy egy minta-alkalmazás keretében megvizsgáljuk egy konkrét halfaj élőhely megfelelését a Sződligeti Duna-szakaszon, a három vízjárási állapotra. Ez a már korábban ismertetett amerikai tanulmány alapján történt (Aadland és Kuitunen, 2006), mely Minnesota-i folyókon végzett mérések alapján definiált nagyszámú halfajra élőhely-megfelelőségi indexeket, a vízmélység, az áramlási sebesség, valamint a mederanyag függvényében. Jelen tanulmányban a *Sander vitreus* (Walleye) (30. ábra) nevű halfajra megadott paraméterek alapján végeztem el a Sződligeti Duna jellemzését. Természetesen a legcélszerűbb választás egy olyan halfaj lett volna, mely a vizsgált területen is jelen van, de sajnálatos módon, ilyen faj leírására nem került sor az amerikai tanulmányban. A *Sander vitreus* azonban egy süllőfaj, így élünk azzal a feltevessel, hogy hasonló szokásokkal bír ez a faj, mint a térségben kecés mintavevővel fogott másik két süllőfaj, a *Sander lucioperca* (Fogassüllő) valamint a *Sander volgensis* (Kőszüllő). További indok volt a fajválasztásnál, hogy a Walleye esetében 4 különböző esetet is sikeresen leírtak (felnőtt; fiatal; ivadék (az elmúlt egy évben született); ívóhely) így színesebben, több szempontból is megvizsgálhatjuk az említett süllőfaj élőhely-választási szokásait.



30. ábra – *Sander vitreus* (Walleye)

A 31. ábrán látható – sebességre és vízmélységre vonatkozó – összefüggések képletek formájában is kidolgozásra kerültek, így azokat célirányosan fel tudtam használni a munkához, a Hauer-féle élőhely modellezéshez hasonló eszközökkel. Az ott legyártott rácspontok sebesség- és mélységadatai alapján, újfent MS Excel segítségével kiszámítottam az összes állapotra (kis-, közép- és nagyvíz) az egyes életciklusokra jellemző élőhely-megfelelőségi indexeket (*SI*) a Walleye esetére.



31. ábra – Élőhely-megfelelőségi indexek függvényei a vízmélységre és sebességre, valamint a mederanyagra
/Aadland és Kuitunen 2006/

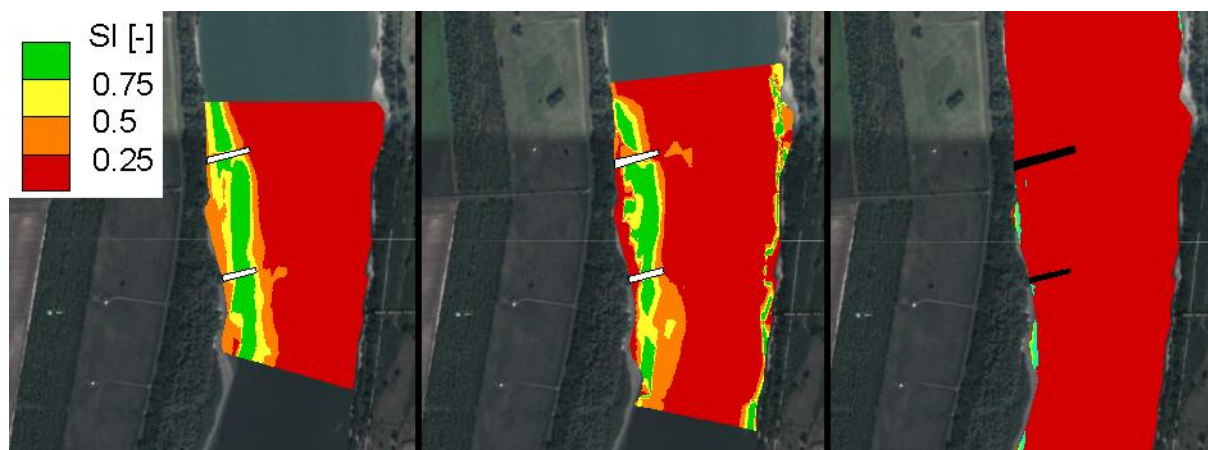
A képletek alkalmazása azonban nem minden esetben volt elsősre célravezető. Ahogy a **31. ábrán** is látható, a mélységre vonatkozó görbék minden esetben 3 méteres maximális értékig állnak rendelkezésre, és valószínűleg a regressziós paraméterek is ez alapján lettek meghatározva. Ennek következtében több formula alkalmazásánál is előfordult, hogy amennyiben a vízmélység meghaladta a három métert (márpedig a Duna esetében, ez a part menti sávokat leszámítva szinte mindenhol megtörtént), a kapott értékek vagy indokolatlan értékeket adtak, vagy matematikailag értelmetlen eredményt kaptam. Ennek kiküszöbölésére, újfent az 'if' függvényre támaszkodva, lekorlátoztam a képletek alkalmazását azokra a D és V

intervallumokra, ahol az érték nem aszimptotikusan tart egyhez, vagy zérushoz. Így például a fiatal egyedeknél csak $D < 150$ cm-ig alkalmaztam a magadott formulát, minden más esetben 1.0 értéket adtam élőhely-megfelelőségi indexként.

A **31. ábra** a mederanyag szempontjából is megfogalmaz élőhely-megfelelőségi indexeket (ugyancsak grafikonos formában), méghozzá konkrét mederanyag típusokhoz (iszap, homok, kavics, stb.). Ennek alkalmazására is próbálkoztam, a középvízi állapotban ADCP mérésekből számított mederanyag mező felhasználásával. Az általunk használt metódus csak az anyagot jellemző d_{90} értékek meghatározására volt alkalmas, folytonos szemeloszlási görbék létrehozása nem állt módunkban. Ezért azzal a feltevéssel fogom elvégezni a vizsgálatokat, hogy a d_{90} érték megfelel az adott területre jellemző, a mederanyag definícióhoz használható szemátmérőjének.

Az egyes élőhely-ciklusokhoz tartozó sebesség és vízmélység megfelelési indexek szorzatait is képeztem, ezekkel összetettebb megfelelési mezőket gyártva a süllő számára. A középvízi állapotban, ezt a metszetképzést a mederanyag megfelelési indexekkel is bővítettem.

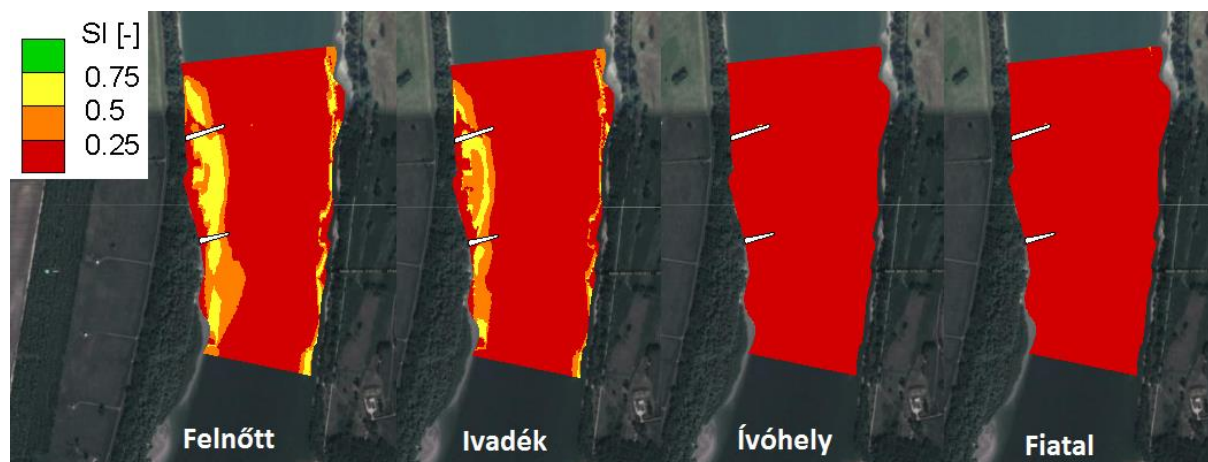
Az így kapott, rácsponthoz rendelt indexek alapján, háromszögeléssel új mezőket gyártottam, melyek közül a vízmélységet és az áramlási sebességet egyaránt figyelembe vevő mezőket a felvízi sarkantyúk területére a **32. ábrán** szemléltetek, a többit a dolgozat **1. számú melléklete** tartalmazza.



32. ábra – A felnőtt *Sander vitreus* összetett ($V \cdot D$) élőhely-megfelelőségi index mezője, kis-, közép és nagyvízi állapotra

A bemutatott mező ugyan sokkal specifikusabb, mint a Hauer-féle eljárásból kapott, azonban mindkét módszer világosan elkülöníti a jobb parton lévő sarkantyúk közötti területeket,

valamint a litorális zónákat. A **33. ábrán** bemutatott megfelelőségi indexek eloszlása azt jelzi, hogy a kiválasztott halfaj számára ezek a leginkább preferált területek (kis- és középvízi állapot esetén).



33. ábra – *A Sander vitreus* összetett (V+D-mederanyag) élőhely-megfelelőségi indexmezője a középvízi állapotra

A mederanyag jellemzők figyelembe vétele módosíthatja a szimplán vízmélység és áramlási sebesség alapján megalkotott kategóriákat, a kiválasztott halfaj esetén bizonyos mértékben lerontja azt (**33. ábra**). A mezők azt is jól tükrözik, hogy a különböző korú halak eltérő zónákat preferálnak.

A dolgozat mellékletében a kiválasztott halfaj más életkori szakaszaira, illetve a leíró paraméterek együttes és különválasztott figyelembe vételével is bemutatom az élőhely-megfelelőségi mezőket. Elmondható, hogy mind a hidrológiai viszonyoktól, mind a hal korától függően jelentősen eltérő eloszlásokat kapunk, így egyértelműen szükséges az itt alkalmazott komplex tér- és időbeli változásokat is figyelembe vevő paraméterbecslés.

Az itt bemutatott két eljárás alapján kapott mintázatok hasonlósága azt jelzi, hogy a Hauer-féle módszerben van még lehetőség, annak további finomítása a továbbiakban lehetséges. Ahhoz azonban, hogy ezt a módszert a későbbiekben alkalmazni tudjuk, szükségünk lesz olyan kutatási eredményekre, melyek az így meghatározott élőhely-típusokat konkrét – célszerűen magyarországi – halfajokkal kapcsolatba tudják hozni.

7. Összefoglalás

Dolgozatomban egy terepi áramlási és morfológiai mérésekre épülő adatelemzési eljárást hajtottam végre a Duna Sződliget környéki szakaszára, majd egy konkrét halfaj élőhely megfelelőségi vizsgálatát mutattam be. Munkám jelentős részét mindazonáltal a mért abiotikus



adatok feldolgozása és értékelő elemzése tette ki, melyek elengedhetetlenek ilyen jellegű vizsgálatokhoz.

A kutatási feladatot egészen az adatgyűjtési módszerek vizsgálatánál kezdtem. A térségben történt három mérési kampányból kettőben személyesen is közreműködtem, így lehetőségem volt a gyakorlatban is megismerni a mérési eljárásokat (ADCP, GPS-es geodéziai felmérés, harangos mintavevővel történő mederanyag mintavétel).

A mérési adatok feldolgozásával folytattam a feladatot, melyhez különböző célszoftvereket használtam fel. Külön programmal történt a nyers ADCP fájlok átkonvertálása más programok által is érthető formátumokba, valamint a későbbi vizsgálatokhoz szükséges – a Duna erős turbulens jellegéből adódó – zajos mérési profilok simítása is itt történt mozgó ablakos átlagolással. Az így kapott, értékekkel ellátott pontok és szelvények már alkalmas voltak az átfogó áramlástani és morfológiai vizsgálatok elvégzéséhez.

Ezt követően, a részletes térbeli adatok alapján, azok alkalmas interpolációs eljárásokkal való háromszög rácshálóra vetítésével létrehoztam a következő paraméterek helyszínrajzi eloszlásait:

- medergeometria
- mederváltozás
- mederfelszín-vándorlási sebesség
- mélységátlagolt áramlási sebességek
- 3D áramlási sebességek (vektorosan is)
- fenékcúsztató-feszültség
- mederanyag

A digitális medermodell elkészítésével kezdtem a munkát, ahol a sarkantyúk leképzését külön végre kellett hajtani. Ez, és a többi mező is elkészült kis-, közép- és nagyvízi állapotra is, így azok összevetését is el lehetett végezni. A medermodellek összehasonlításából kimutattam, hogy a 2013. júniusában levonult rendkívüli árvíz hatására a legészakabbi sarkantyúnál jelentős (2-3 méteres) kimélyülések történtek, valamint a művek közti limányban is elmosta az árvíz az ott felhalmozódott finom hordalékot. Ezt alátámasztottuk a nyers mérési adatokkal, igazolva, hogy nem az alkalmazott interpolációs eljárás hibás alkalmazása eredményezte a nagymértékű mederváltozást. Bemutattam továbbá egy a mederfenék mozgási sebességét leíró számítást is, az előzőekhez hasonló céllal, ami szintén alátámasztotta a mederváltozás jellegét.



Ezekután több szemszögből is megvizsgáltam az áramlási sebességek térbeli eloszlását a mintaterületen, két- és háromdimenziós megjelenítések alkalmazásával; valamint több féle sebességvektoros megjelenítés elkészítése is elősegítette a térségben kialakuló, rendkívül komplex áramlási viszonyok megértését. Rámutattam továbbá arra is, hogy a művek körüli erősen összetett áramlási struktúrák térbelisége mérséklődik a nagyvizek hatására, amikor is a folyó meghágja a folyószabályozási műveket.

A turbulens-fal törvény alapján, bizonyos közelítésekkel kiszámoltam a fenékcúsztató feszültségek területi eloszlásait, kiegészítve a fix hajós mérésekből kapott értékekkel, melyek kielégítő eredményeket adtak, így a későbbiekben ezeket fel tudtuk használni az élőhely-jellemzésnél is. A fenéksúrlódást kifejező mezők szintén szignifikáns eltérést mutattak a kis- és árvízi szituációra, ami a mérések megbízhatóságát és szükségességét jelzi.

A mederanyag-minták feldolgozása gépi szitasorral történt, laboratóriumi körülmények közt. Ezek numerikus feldolgozása után képet kaptunk a térségben a – mérés kori állapotra jellemző – mederanyag eloszlásról. Az eredmények azt mutatták, hogy a rendkívüli árvíz után mintegy két hónappal egy morfológiai szempontból köztes állapotot feltárást hajtottuk végre, amikor is, a folyómeder egy lassú folyamat során igyekszik visszatérni egyensúlyi állapotába. A harangos mintavevővel történő mérések feldolgozását követően próbálkoztunk egy újszerű mederanyag jellemzési módszerrel, mely az ADCP által mért, a mederről visszaérkező akusztikus jelek, valamint a mederanyag közötti kapcsolaton alapul. A mért középvízi állapotra meghatároztuk a kapcsolatot leíró függvényt, így erre az állapotra képesek voltunk becslést adni a mederanyagot jellemző d_{90} értékre. Az eljárásban jelentős potenciált látok, a módszer fejlesztését és a későbbi alkalmazásokat célszerűnek találom.

Végezetül, a kiterjedt hidraulikai paramétereket tartalmazó mezők birtokában kísérletet tettünk egy abiotikus tényezőkkel történő élőhely-jellemzésre, egy osztrák és egy amerikai tanulmányra alapozva. Az első eljárás az áramlási sebesség–vízmélység–fenékcúsztató feszültség paraméterhármásra épül, még a második az áramlási sebesség–vízmélység–mederanyag paramétereket veszi alapul. Az első eljárás alkalmazásánál abba az akadályba ütköztünk, hogy az előállított élőhely-kategóriákat nem tudtuk kapcsolatba konkrét halfajokkal. A második módszer részletes terepi felmérések és adatelemzések segítségével, több tíz halfaj különböző életciklusaira határozott meg élőhely megfeleléségi indexeket. A mért adatokra illesztett regressziós egyenesek alapján tapasztalati formulákkal írták le az ún. megfeleléségi



indexeket, melyek segítségével egy konkrét süllőfaj, a Sander vitreus élőhely-választási szokásait vizsgáltam a Sződligeti Duna-szakaszra. A középvízi állapotra elkészített mederanyag-mező segítségével további finomítását végeztem el a jellemzésnek.

8. Következtetések

A modell magyarországi Dunára való alkalmazása alátámasztja az abiotikus paraméterekkel való élőhelyleírás megvalósíthatóságát, és felhívja a figyelmet a nemzetközi irodalomban már fellelhető halviselkedési vizsgálatok égető szükségességére hazai viszonyokra.

A félreértés elkerülése végett fontos aláhúzni, hogy a folyami élőhelyek hidromorfológiai alapokon nyugvó értékelése csak egy, de fontos elem a számos jellemzés közül. Az áramlási és morfológiai leírók mellett általában további számos fizikai, kémiai, biológiai és egyéb paraméterek határozzák meg a különböző halfajok által preferált zónákat. Mindezek térbeli és időbeli megváltozásai még komplexebbé teszik az értékelést, tehát a feladat rendkívül nagy és összetett, és számos diszciplína összekapcsolását igényli.

A bemutatott eredmények azt igazolják, hogy hazai szinten a hidromorfológiai adatelemzéseken nyugvó abiotikus állapotértékelés a kapcsolódó tudományterületekhez képest előrehaladott szinten van, a kutatási eredmények nemzetközi szinten is megállják a helyüket. A dolgozatban bemutatott eljárások közül több még kutatási fázisban van (pl. medermozgás becslése, mederanyag becslése stb.), azok további tesztelése és fejlesztése még sok feladatot ad a témával foglalkozó kutatóknak.

A bemutatott mérési eredmények önmagukban is rendkívül sok információt hordoznak, de alapvetően hozzájárulnak a vizsgálatok kiterjesztését célzó számítógépes modellezési feladatok minél megbízhatóbb végrehajtásához, ugyanis az itt bemutatott eredmények kivétel nélkül támogatják a numerikus modellek paraméterezését és ellenőrzését. A numerikus modellezés segítségével pedig olyan szituációk elemzését tudjuk végrehajtani, amelyekre nem állnak vagy nem tudnak rendelkezésre állni mérési adatok. Ezek lehetnek múltbeli, pl. emberi beavatkozások előtti időszakokra vonatkozó vizsgálatok (amit bizonyos esetekben az EU Vízkormányozási Keretirányelve mint referencia állapotot ír elő), de mint a jelen feladatban is, jövőbeli beavatkozások hatásvizsgálatait célzó tanulmányok.



Irodalomjegyzék

1. Aadland, L. P., Kuitunen, A. (2006) Habitat suitability criteria for stream fishes and mussels of Minnesota. Minnesota Department of Natural Resources, Division of Fish and Wildlife, Fisheries Management Section [and] Division of Ecological Services.
2. Baranya S. (2009) Three-dimensional analysis of river hydrodynamics and morphology. Doktori értekezés, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Budapest.
3. Baranya S., Józsa J. (2010) ADCP alkalmazása lebegtetett hordalék koncentráció becslésére. *HIDROLÓGIAI KÖZLÖNY* 3: pp. 17-22.
4. Baranya, S., Józsa, J., Kéri, B. (2008) – Methodological analysis of fixed and moving boat ADCP measurements on three Hungarian river reaches. *Proceedings of the International Conference on Fluvial Hydraulics*. Izmir, Törökország, 2008, pp. 2375-2382.
5. Baranya, S., Józsa, J. (2006) Flow analysis in river Danube by field measurement and 3D CFD turbulence modelling. *Periodica Polytechnica—Civil Engineering*, 2006, 50:(1) pp. 57-68.
6. Baranya, S., Józsa, J. (2009) ADCP data analysis to explore hydromorphologic and dispersion conditions in the Hungarian Danube. *7th Symposium on Ecohydraulics*, Concepción, Chile, 2009, pp. 110.
7. BME VIT – Hidroinformatika HEFOP egyetemi elektronikus jegyzet. BME Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszék, Budapest, www.vit.bme.hu
8. BME VIT – Hidromorfológia HEFOP egyetemi elektronikus jegyzet. BME Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszék, Budapest, www.vit.bme.hu
9. BME VIT (2009) – A magyarországi felszíni vizek hidromorfológiai monitoringjának intézményfejlesztése „2006/018/176-02-02” számú Átmeneti Támogatás projekt, Projekt zárójelentés.
10. Erős, T., Balázs, T., Sevcsik, A. (2008) A halállomány összetétele és a halfajok élőhely használata a Duna litorális zónájában (1786-1665 fkm) – monitorozás és természetvédelmi javaslatok, *Halászat*, 2008, 101:(3), pp. 114-123.
11. Harka, Á., Sallai, Z. (2004) Magyarország Halfaunája. kiadó: Nimfea Természetvédelmi Egyesület, 2004, ISBN: 9789638647535
12. Hauer, C., Mandlbürger, G., Habersack, H. (2008) Hydraulically related hydromorphological units: description based on a new conceptual mesohabitat evaluation model (MEM) using lidar data as geometric input. *River Research and Applications*, 2008, 25:(1), pp. 29-47.
13. Országos Környezetvédelmi Tanács (2009) Az Országos Környezetvédelmi Tanács „A Duna hajózhatóságának javítása” tárgyú projektet megalapozó tanulmánnyal kapcsolatos Állásfoglalása.
14. Rennie, C., Millar, R., and Church, M. (2002) Measurement of Bed Load Velocity using an Acoustic Doppler Current Profiler. *J. Hydraul. Eng.*, 128(5), 473–483.
15. Sági, R. (2013) A Tisza Mindszent alatti szakaszának hidromorfológiai elemzése. *HIDROLÓGIAI KÖZLÖNY* 93: (2) 41-49 (2013)
16. Shields, F. D., Rigby, J. R. (2005) River Habitat Quality from River Velocities Measured Using Acoustic Doppler Current Profiler. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2005, 136:(5), pp. 336-342.
17. Shields, F. D. (2010) Aquatic Habitat Bottom Classification Using ADCP. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2010, 136:(5), pp. 336–342.
18. Shields, F. D. (1995) Fate of Lower Mississippi River habitats associated with river training dikes. *Aquatic Conservation - Marine and freshwater Ecosystems*, 1995, 5:(2), pp. 97-108.
19. Surface-Water Modeling System, Version 11.0, Reference Manual & Tutorials, Aquaveo, LLC, Provo, Utah, 2011.
20. Szalóky Z., György Á. I., Csányi B., Tóth B., Sevcsik A., Szekeres J., Erős T. (2011) Elektromos keccével végzett vizsgálatok első eredményei a Duna monitorozásában. *Pisces Hungarici* 2011, 5: pp. 37-42.
21. T. Krámer, J. Józsa, S. Baranya: ECONTACT - Research of the Hydroecological Activity of River Habitats - 2- and 3D Numerical Modelling. Final Report, Austro-Hungarian Interreg-Phare Project, 2006.
22. TÉR-TEAM Mérnök Kft. (2010) – Sződligeti szűkület vízjogi létesítési engedélyezési terv, „Tanulmányok a Duna hajózhatóságának javításáról” 18. számú EU TEN-T támogatású projekt, Konzorcium vezető: VITUKI Kft.
23. Török, G. T. (2012) Vegyes szemösszetételű folyómedrek numerikus vizsgálata. Diplomamunka, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Budapest.
- VITUKI (2007) A Duna hajózhatóságának javítása tárgyú projektet megalapozó tanulmány. Jelentés. VITUKI, Budapest.