

Földtudományi Doktori Iskola

A Dráva és a Mura magyar–horvát szakaszának hidromorfológiai
értékelése

Ficsor Johanna

Témavezetők

Dr. Czigány Szabolcs
egyetemi docens

Dr. Pirkhoffer Ervin
egyetemi docens

Pécsi Tudományegyetem
Természettudományi Kar

Pécs, 2023

Tartalomjegyzék

1	Absztrakt	8
2	Bevezetés.....	9
3	Szakirodalmi előzmények	12
3.1	Kutatási terület bemutatása.....	12
3.1.1	Dráva folyó bemutatása.....	13
3.1.2	A Mura folyó rövid bemutatása.....	20
3.1.3	A Dráva és a Mura hordalékviszonyainak rövid bemutatása	21
3.2	Alluviális folyószakaszok morfológiai jellemzői	26
3.3	Folyók hordalékháztartása	30
3.4	Hordalékmérési eljárások fejlődése, kihívásai	33
3.5	Hidrodinamikai modellezés alkalmazása a hordalékszállítás vizsgálatánál.....	37
4	Célkitűzések	41
5	Kutatási módszerek	43
5.1	Hordalékszállítás elemzése 1D hidrodinamikai modellezéssel	43
5.1.1	Az 1D hidrodinamikai modellezés alá vont mintaterület bemutatása.....	44
5.1.2	Az 1D hidrodinamikai modellezés mellékfeltételeinek meghatározása.....	45
5.2	Meanderfejlettségek lehatárolása, kanyarulati statisztika meghatározása.....	46
5.3	Mérési kampány.....	49
5.3.1	Áramlásmérés	50
5.3.2	Hordalékmérés.....	50
5.3.3	Laboratóriumi mérések.....	52
5.3.4	Térinformatikai adatfeldolgozás.....	53
5.3.5	A keresztszelvény-átlagolt fenékcsúszató feszültség számítása.....	53
6	Eredmények.....	54

6.1	Morfológiai modellezés a Mura folyó alsó szakaszára.....	54
6.1.1	Az 1D hidrodinamikai modell kalibrálása és igazolása	55
6.1.2	Az 1D hordaléktranszport modellezés eredményeinek bemutatása	57
6.2	Meander-fejlettségek lehatárolása, kanyarulati statisztika meghatározása.....	61
6.2.1	A Dráva Őrtilos – Drávaszabolcs közötti szakaszának vizsgálata	61
6.2.2	Meanderfejlettségek és kanyarulati statisztika vizsgálat a Murán	65
6.3	Mederanyag összetétel jellemzése	68
6.4	Áramlásmérések	73
6.5	A mért áramlási sebességek eloszlásának vizsgálata.....	77
6.6	A hordalékmozgás határállapotának vizsgálata elméleti módszerrel és a mérési eredmények felhasználásával	80
6.6.1	A keresztszelvény-átlagolt fenékcsúsztató feszültség számítása.....	80
6.6.2	A becsült és a számított nyírási sebesség összehasonlítása	82
6.7	Barcs feletti eséstörés helyének pontosítása	84
7	Az eredmények összefoglalása.....	87
8	A kutatás további irányai	93
9	Köszönetnyilvánítás	96
10	Irodalomjegyzék.....	97

Függelék

Ábrajegyzék

1. ábra Dráva vízgyűjtő területe (forrás: OVF, 2022)	13
2. ábra Dráva vízgyűjtőterület megoszlása az országok között (saját szerkesztés).....	15
3. ábra Dráva, Órtilos jellemző vízállások 1958 és 2011 között, megjelölve a horvát erőművek építési évét.....	16
4. ábra Órtilos reggeli észlelt vízállás idősor 1967 – 2020 (saját feldolgozás, forrás: DDVIZIG) a horvátországi erőművek létesítése alapján időben tagolva	18
5. ábra Dráva-Mura torkolat (Forrás: 2013 MADOP)	20
6. ábra A Mura vízgyűjtőterületének domborzata és a magyar rész-vízgyűjtő (Forrás: Engi, Zs. et al., 2016a).....	20
7. ábra Vízhozam és görgetett hordalékhozam közötti összefüggés a Mura, Letenye Vízirajzi állomásra (Forrás: Szekeres, 2003, idézi Rákóczi et al., 2012).....	22
8. ábra Vízhozam és görgetett hordalékhozam mérések és összefüggés a Dráva, Drávaszabolcs szelvényben (forrás: Rákóczi et al., 2012)	22
9. ábra Lebegtetett hordalék koncentráció és a vízhozam összefüggése Mura, Letenye; 2004-2011 között (Forrás: Rákóczi et al., 2012)	23
10. ábra A Dráva és a Mura lebegtetett hordalékszállítása (Forrás: Rákóczi et al., 2012).....	24
11. ábra A Dráva és a Mura görgetett hordalékszállítása (Forrás: Rákóczi et al., 2012).....	25
12. ábra Folyóvizek felszínalakító tevékenysége (Mozaik Education, 2023).....	26
13. ábra Alluviális folyószakaszok mintázatainak osztályozása (Schumm, 1985, idézi András, 2015).....	28
14. ábra Helley-Smith-féle görgetett hordalék mintavevő	35
15. ábra Van Veen-féle mintavevő kanál	35
16. ábra ADCP műszer	36
17. ábra A Mura folyó helyszínrajza (Forrás: 06. NMT. 03.5.1. Áttekintő helyszínrajz)	44
18. ábra Az 1D hidrodinamikai modell hossz-szelvénye	45
19. ábra Dráva terepmodell részlet (Halmai et al., 2018).....	46
20. ábra A meanderek jellemző mérőszámai (Forrás: Borsy et al., 1992).....	47
21. ábra Folyókanyarok fejlettségi jellemzői (Forrás: Laczay, 1982, idézi Hamvas, 1994).....	48
22. ábra Terepi mérések és mintavételek helye	49

23. ábra Hordalék mintavevő egység,	51
24. ábra OTT MF Pro vízsebességmérő eszköz	52
25. ábra A 2009 évi árhullám vízállás értékei Letenye és Murakeresztúr állomásokon (forrás:NYUDUVIZIG).....	55
26. ábra A 2009 évi árhullám vízhozam idősora	56
27. ábra Modellezett (fekete) és mért (kék) idősoroka a Mura, Letenye vízmérce szelvényben; a.: vízállás, b.: vízhozam	56
28. ábra A mederfenék változás a v2, v3, v6 és v7 szimulációk alatt	59
29. ábra Folyó tengelyvonalának eltérése a 2013-14 és a 2019-es felmérések.....	62
30. ábra Álkanyarok megjelenése az egyenes folyószakaszokon	63
31. ábra Érett kanyarulatok az a: 114 – 117 fkm és a b: 170-178 fkm között (saját szerkesztés)65	
32. ábra Mura folyó 10-19 km szakasz történelmi térképei (Forrás: Engi & Ficsor, 2020).....	66
33. ábra Jellemző mederanyag-összetétel a Dráva különböző szakaszain (saját szerkesztés)....	68
34. ábra A mintázott mederanyag szemeloszlási görbéi.....	69
35. ábra Mederanyag összetétel hossz-menti változása a Dráva vizsgált szakaszán (saját szerkesztés, publikálva: Pirkhoffer et al., 2021).....	70
36. ábra Adott szemcse-frakció aránya a mederanyagban a Dráva Órtilos – Zákány (236 – 227 fkm) közötti szakaszán (saját szerkesztés)	72
37. ábra Mozgóhajós mérés mérési eredménye (saját eredmény).....	73
38. ábra Mélység menti sebesség grafikon a 29. mérési helyen (155 fkm szelvényben).....	75
39. ábra Terepi mintavétel Eredmény-hossz-szelvénye	78
40. ábra Függély középsebesség és mederközeli sebesség alakulása az ADCP mérések alapján79	
41. ábra Számított Shields-paraméter a Reynolds szám függvényében (saját eredmények)	83
42. ábra A vizsgált folyószakasz mederfenékvonala	84
43. ábra Mederanyag-összetétel változása a Dráva 236–75 fkm szakaszán,	85
44. ábra Jellemző paraméterek hossz-szelvények a Dráva 236–75 fkm szakaszán	86
45. ábra Ökoszisztéma-szolgáltatások vízfolyás formálta tájak vonatkozásában (Podschum et al., 2018).....	94

Táblázatjegyzék

1. táblázat A Dráva esésviszonyainak alakulása a forrástól a torkolat felé haladva (forrás: Andrási, 2015).....	14
2. táblázat A Dráván létesült erőművek.....	17
3. táblázat Magyarországi Dráva szakasz főbb hidrológiai paraméterei (forrás: Andrási, 2015) 17	
4. táblázat Árhullám statisztika a barcsi vízmércére vonatkozóan (forrás: Andrási, 2015)	19
5. táblázat Modellezéshez felhasznált vízrajzi állomások adatai	45
6. táblázat A modellezési változatok adatai.....	58
7. táblázat A szimulációk során kimutatott legnagyobb eltérések értékei a mederfenék geometria változás során	59
8. táblázat Különböző szakaszjellegek előfordulása a teljes magyar – horvát vizsgálat folyószakaszon	63
9. táblázat A Dráva 155–236 fkm közötti szakaszának kanyarulati statisztika vizsgálata	64
10. táblázat A Dráva 70–155 fkm közötti szakaszának kanyarulati statisztika vizsgálata	64
11. táblázat Mura- Tótszerdahelyi szakasz 10-19 km kanyarulatainak besorolása.....	67
12. táblázat A hét kialakított fenékhordalék-textúrcsoport kódszámai és elnevezései.....	69
13. táblázat Dráva kanyarátvágások hidromorfológiai jellemzői.....	72
14. Táblázat A vízhozammérések összefoglaló táblázata.....	74
15. Táblázat A számított és becsült nyírési sebességek, Reynolds- és Shields-számok összehasonlítása.....	82

Használt rövidítések, betűszavak jegyzéke:

ADCP: Acoustic Doppler Current Profiler

MADOP: Magyarország Digitális Ortofotó Programja

NMT: Nagyvízi Mederkezelési Terv

VITUKI: Vízügyi Tudományos Kutató Intézet

VKI: Víz Keret Irányelv

VTT: Vásárhely Terv Továbbfejlesztése

VGT: Vízyűjtőgazdálkodási Terv

VO szelvények: Főbb folyók partján egymástól 2-3 km-re kijelölt nyilvántartási szelvények. Végpontjain a mederfelvételek célját szolgáló vízszintes és függőleges értelmű geodéziai alappontokat, ú.n. VO köveket helyeztek el. A V.O. kövek hálózatát az 1890-es években, folyóink térképezése alkalmával az egykori Vízrajzi Osztály (V.O.) helyezte el

1 ABSZTRAKT

Kulcsszavak: Dráva, hordalékmozgás, medermorfológia, modellezés, monitoring, Mura

A disszertációban bemutatott kutatásom célja a Dráva és a Mura közös magyar-horvát szakaszának morfológiai vizsgálata volt. Az éghajlatváltozás, a folyókon megjelent antropogén hatások, a geopolitikai változások, a változó igények a folyószakasz vízgazdálkodására is hatással vannak. A vizsgálat egy hiánypótló megalapozó tanulmány lett, ami előkészíti az ökoszisztéma szolgáltatások értékelése mellett a későbbi vízgazdálkodást segítő vizsgálatokat.

A vizsgált Dráva szakasz középszakasz jellegű, meanderező vízfolyás, melyen Barcs felett egy markáns eséstörés van. Ennek következtében a szakasz két jellegzetesen eltérő részre osztható, egy felső meredekebb, intenzívebb áramlású, jellemzően kavics medrű, és egy lassabb folyású, kisebb esésű főként homokmedrű alsó részre. A vizsgált alsó szakasz jelentősen szabályozott, árvédelmi töltésekkel szegélyezett, csekély medermozgással. A felső szakasz viszont csak kis mértékben szabályozott, természetközeli állapotban van, ahol jelentős medervándorlás is megfigyelhető. Egy 2018-ban készített részletes terepmodell alapján meghatároztam a folyó jelenlegi tengely- és sodorvonalát, és ennek alapján elvégeztem a klasszikus kanyarulat-fejlettségi vizsgálatot.

Végrehajtottunk egy részletes terepi felmérést, ami lehetővé tette a Dráva vizsgált szakaszán a morfológiai állapot teljes körű feltérképezését, összevetve a kapott eredményeket a térinformatikai kiértékeléssel, valamint korábbi kutatások eredményeivel.

A Mura érintett szakaszán numerikus hordaléktranszport modellezéssel a nagyvízi folyamatok vizsgáltára került sor, valamint ehhez kapcsolódóan egy kiválasztott rövidebb szakasz hosszútávú kanyarulatfejlődését is elemeztem.

A bemutatott kutatásom alapján feltárhatók azok jellemzők és folyamatok, amelyek megalapozzák a folyószakaszok várható változásait.

2 BEVEZETÉS

Mai világunkban egyre nagyobb szerepet kap a természeti értékeink megőrzése, fenntartható használata. Ez érthető, hiszen egyre jobban látszik a természeti erőforrások intenzív használatának, a civilizáció sokszor indokolatlanul is nagy igényének káros következménye a természeti környezet változásában. A folyók – mint az egyik legdinamikusabban változó élettér – folyamatainak ismerete nagyon fontos a velük való gazdálkodás helyes módja, és annak megtervezése szempontjából.

A folyók dinamikus változása nemcsak a vízjárásban nyilvánul meg, hanem a morfológiai változásokban is. Ezek a medrek áthelyeződését, a keresztmetszvények folytonos átalakulását jelentik. Ezek a folyamatok alapvetően a szállított szilárd anyag jellemzőivel, a folyó hordalék-háztartásával köthetők össze. Ezért nagyon fontos a folyók hordalék-háztartásának ismerete, a hordalékszállításban lejátszódó folyamatok nyomon követése.

Több éve foglalkozom hazai folyók (Duna, Dráva, Mura) hordalék szállításának vizsgálatával. Disszertációmban a hangsúlyt a Dráva és a Mura mederanyag és görgetthordalék-háztartásának kutatására helyeztem. Kutatási területem a Dráva és a Mura közös magyar-horvát szakasza.

Magyarország és Horvátország között a természeti adottságok által meghatározott határ a Dráva (180 km), a Mura (48 km) folyók és a Kerka vízfolyás Lendva torkolat és a Murába torkollás közötti szakaszának (1,8 km) árterületén halad keresztül. A folyók által meghatározott határ nagyobb részén (a teljes hossz 64 %-a) átfedésben van az államhatárral (Čelan, 2014). A területen levő két folyó tengelye ugyan nagy mértékben megegyezik az országhatárral, de természetes meanderképző adottsága miatt a nem partbiztosított helyeken elvándorol. A Dráva és a Mura is határfolyó jellegéből adódóan különleges helyzetben van, hiszen a vele kapcsolatos vízgazdálkodási feladatok két ország gondozásában vannak. A közlekedési és nyelvi akadályok, továbbá a magyar–horvát határtérség negatív demográfiai tendenciái, az elnéptelenedés és az alacsony mobilitás jelentős változásokat igényelnek a térség gazdasági fejlődése érdekében. Jelenleg növekvő, de még mindig szerény érdeklődés mutatkozik az intézményi és gazdasági kapcsolatok kialakítása iránt Magyarország és Horvátország között (Bali & Kőkuti, 2008), ami szintén elősegítené a pozitív változásokat. Ezeket a törekvéseket megalapozzák azok a vízgazdálkodási intézkedések, melyek előnyei hozzájárulnak más ágazatok, például a

vidékfejlesztés, a turizmus fejlődéséhez is (Balatonyi et al., 2022). 2012-ben sor került egy olyan vizsgálatra a magyarországi folyók körében, amely során elkészítették a természeti adottságok vizitúrázásra – mint az egyik fejlesztési lehetőségre – gyakorolt hatásainak összesítő értékelését (Donka & Gila, 2013). Az értékelés alapján a Dráva a 10 pontból, 6,36 pontot ért el (Donka, 2012). Ennek alapján a folyószakasznak vannak olyan adottságai, melyek javításra szorulnak a vízi turizmus fejlesztése érdekében. Ezek a jellemzők a sebesség és az áramlási viszonyok.

A térség gazdasági és demográfiai körülményei a folyógazdálkodást részben nehezítik, az ökológiai értékek megőrzése tekintetében viszont pozitív hatást is jelentenek. A rendszerváltás előtti időszakban a térség el volt zárva a lakosság elől, így a folyóhoz kapcsolódó vízhasználatok sem jelentősek. A vízgazdálkodási beavatkozások gyakorlatilag az árvízvédelemre korlátozódtak. Ebből adódóan mindkét folyó nagyon természetes jelleget mutat, számos ökológiai értékkel, védett növény- és állatfajjal. A Dráva és a Mura menti terület az élővilág és a folyó változatos morfológiájának köszönhetően 2021-ben hivatalosan is elnyerte a Mura-Dráva-Duna Bioszféra Rezervátum címet.

A Víz Keretirányelv (VKI) felhívja a figyelmet arra, hogy a felszíni vizek ökológiai állapotát jelentősen befolyásolja a víztestek morfológiai állapota, illetve az abban bekövetkező változások. Az állapotértékelésnél figyelembe kell venni, hogy a mederforma és a sebességviszonyok változatossága biztosítja-e a referenciaállapotnak megfelelő diverzitást, illetve a vízhozam és ehhez kapcsolódóan a vízszintingadozás lehetővé teszi-e a különböző magasságban elhelyezkedő növénytársulások megfelelő vízellátását (Az európai parlament és a tanács 2000/60/EK irányelve, 2000). Ennek következtében az állapotértékelés egyik fontos eleme a morfológiai viszonyok nyomon követése: a folyó mélységének és szélességének változékonysága, a mederágy mérete, szerkezete és anyaga, a parti sáv szerkezete.

A morfológiai változásokban a vízjárásnak is nagy szerepe van. A Dráva vízgyűjtő alsó szakaszára az éghajlatváltozás várhatóan jelentős hatást fog gyakorolni az éves középhőmérséklet jelentős emelkedése; a csapadékösszegek csökkenése; a felhőzet nyári növekedése, és téli csökkenése miatt (Gashi et al., 2023). A múltbéli morfológiai változások, a jelenlegi morfológiai állapot és a várható hidrológiai változások ismerete együttesen alapozzák meg a fenntartható vízgazdálkodást.

Korábban a morfológiai változások elemzése, a hordalékháztartás vizsgálata egyes kiválasztott szelvényekre korlátozódott. A vizsgált területen is 5-6 olyan vízrajzi állomás van, ahol hosszú időre visszatekintve morfológiai vizsgálatok (mederalak változás, hordalékmérés) rendelkezésre állnak.

A korszerű mérés technikai eszközök azonban lehetővé teszik, hogy új alapokra helyezzük a morfológiai vizsgálatokat, kiegészítve, bővítve az alap-információkat. A kutatásom során a Dráva közös magyar-horvát szakaszára – Őrtilos és Drávaszabolcs között – egy ilyen megalapozó vizsgálatot végeztem el, melynek során részletes mederanyag felvételezésre került sor. Ez a részletes mintavételezést tartalmazó monitoring program lehetővé tette a folyószakaszra vonatkozó korábbi kutatások igazolását, pontosítását. Ez a hiánypótló kutatás további részletes morfológiai vizsgálatokat, területfejlesztési, tájgazdálkodási koncepciókat alapozhat meg, valamint felhasználható a folyószakasz ökoszisztéma-szolgáltatásainak vizsgálatában is.

A disszertációm másik fő témája a Mura folyó magyar-horvát szakaszának (a magyar-horvát-szlovén hármashatártól a torkolatig) morfológiai vizsgálata. A Mura hordalékháztartása jelentős befolyással van a Dráva vizsgált szakaszára is, hiszen a Murán érkezik a folyószakasz hordalékhozamának jelentős része, különösen a folyó felvizi szakaszán létesült erőművek üzembe helyezése óta. Ebből fakadóan a Drávára készített állapotfelmérés mellett a Murára végzett kutatás eredményei is elősegítik a Dráva jövőbeli táj- és vízgazdálkodásának megalapozását.

A Murára végzett kutatásom alapja egy 1 dimenziós hidrodinamikai és hordalékszállítási modellezés, melynek segítségével vizsgáltam a folyószakasz morfológiai változásait (feliszapolódás, kimélyülés) a jellemző árhullámok levonulása esetén. E mellett sor került morfometriai paraméterek elemzésére, valamint a folyószakasz kanyarulatfejlődésének vizsgálatára is.

3 SZAKIRODALMI ELŐZMÉNYEK

3.1 Kutatási terület bemutatása

A Dráva Magyarország negyedik legjelentősebb folyója, mely az ország déli határán húzódik. A múlt század történelmi – politikai helyzete miatt a térség hosszú időn keresztül szinte érintetlen marad, hiszen a rendszerváltás előtt az országhatár menti területekre tilos volt a bejárás. Így a vízgazdálkodási beavatkozások is csak a feltétlenül szükséges árvízvédelmi feladatokra korlátozódtak. Ugyan történtek folyószabályozási beavatkozások a területen, a horvát-magyar közös kezelésben lévő folyószakasz jelenleg is közel természetes állapotú jelleget mutat. Sok olyan geomorfológiai jelenség figyelhető meg (magaspartok, alacsony partok, kavics- és homokzátonyok), amelyek a szabályozott folyókra nem jellemzőek. Emiatt a kutatásaim mintaterülete, a 161 km hosszú, közös magyar-horvát Dráva-szakasz, ami a Mura torkolat (236+000 fkm) és Drávaszabolcs (74+000 fkm) között helyezkedik el, jelenleg is kiemelkedő ökológiai értékekkel bír és kiaknázatlan turisztikai potenciállal rendelkezik.

A folyó mentén dinamikusan változó ökoszisztéma alakult ki, mely védett, fokozottan védett és európai jelentőségű fajok százainak ad biztonságos élőhelyet. Ezen okból a Dráva folyó és környezete természetvédelmi jelentősége igen meghatározó, a területet nemzeti parkká nyilvánították 1996-ban, Duna-Dráva Nemzeti Park néven. A folyó mentén számos védett növény- és állatfaj honos. A hullámtéri területekkel együtt a Dráva mentén a szukcesszió minden állomása fellelhető (Duna-Dráva Nemzeti Park Igazgatóság, 2020). Számos veszélyeztetett növény- és állatfaj található itt, köztük a drávai tegzes (*Platyphylax frauenfeldi*) egyetlen populációja (Uherkovich & Nógrádi, 1997), ami a folyó kiemelkedő vízminőségét is jelzi. A drávai tegzes mellett más makro-gerinctelenek (más rovar lárvák, unionid kagylók, vízi csigák, rákok és mások) is megtalálják élőhelyüket és erőforrásaikat a durva, vegyes szemösszetételű mederben.

A Dráva mentén az ökoturizmus is jelentős, mivel a terület táji és természeti kincsekben igen gazdag. A rendszerváltás előtti években a folyó és környezete - határfolyó jellege miatt - tiltott határsáv volt. Az elmúlt időszakban azonban már évente közel 2000 ember túrázik a folyón Órtilos és Drávaszabolcs között (Závoczky, 2005). A turizmus fejlődésében még kiaknázatlan potenciálok is vannak.

3.1.1 Dráva folyó bemutatása

A Dráva a Duna egyik fő jobb oldali mellékfolyója. Forrása Olaszországban, a Tiroli-Alpokban, az osztrák határtól mintegy 10 km-re, Toblach és San Candido települések között található. A folyó nyugatról kelet felé haladva gyűjti össze a Déli-Alpok vizét és mintegy 735 km múlva Eszék alatt torkollik a Dunába. Útja közben több országon is áthalad, Olaszország, Ausztria, Szlovénia, Magyarország és Horvátország területét is érinti. A forrásvidék 1193 m Balti tengerszint feletti magasságban (továbbiakban: mB.f.), a torkolat 83 mB.f. magasságban helyezkedik el (Mantuáno, 1974). A Dráva legnagyobb mellékfolyója a Mura. További jelentősebb mellékfolyói az Isel, Möll, Lieser, Gail, Gurk, Lavant, és a Feketevíz.



1. ábra Dráva vízgyűjtő területe (forrás: OVF, 2022)

A teljes vízgyűjtő terület (1. ábra) nagysága 43238 km², ami nyugatról hegységekkel határolt, kelet felől viszont nyitott. A Dráva völgye a vízgyűjtő terület jellege szempontjából két részre osztható, az Alpi területre és a Kárpát-medencei területre, az Alpok előterére. Ez az esésviszonyok szempontjából is fontos, mivel a nagy esésű (210–50 cm/km) szakaszon jelentős eróziós munkát, míg a kis esésű (40–5 cm/km) síkvidéki szakaszon építő jellegű munkát végez a folyó (Andrási, 2015). A kutatási terület éppen e két, jelentősen eltérő jellegű szakasz határterületére esik. Andrási

feldolgozása alapján a jelentős esésváltozás az Örtilos feletti szakaszon jelentkezik, ami a vizsgálataink felső keresztmetszvénye, majd a következő, Bélavárig tartó szakaszon további jelentős csökkenést láthatunk (1. táblázat). A vizsgált szakaszon lévő eséstörések alapvető oka az, hogy a Dráva a Mura torkolat alatt egy olyan mélyszerkezeti árokban halad, amelyben több részmedence is van, melyek kialakulása a holocén korra vezethető vissza (Lovász, 2013).

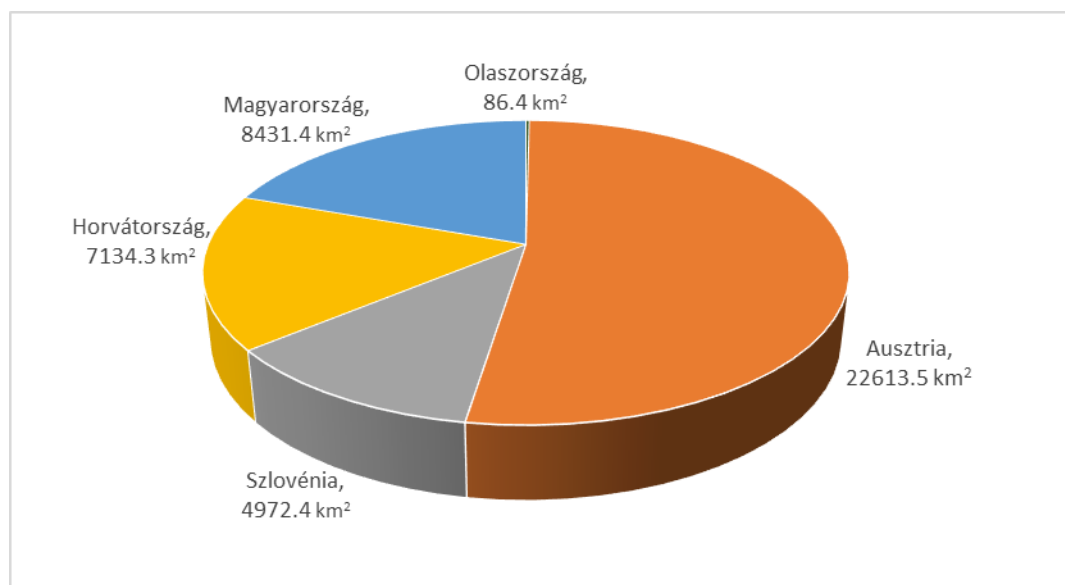
A kutatásom kiterjed arra, hogy ezeket az értékeket a legfrissebb mederfelmérés alapján pontosítsam a közös magyar-horvát szakaszra vonatkozóan.

1. táblázat A Dráva esésviszonyainak alakulása a forrástól a torkolat felé haladva (forrás: Andrási, 2015)

Szakasz	fkm	Esés (cm/km)
Lienz – Sachsenburg	670 – 596	200 – 210
Sachsenburg – Villach	596 – 541-	130 – 140
Villach – Ormozs	541 – 315	120 – 130
Ormozs – Örtilos	315 – 235	80 – 85
Örtilos – Bélavár	235 – 190	30 – 35
Bélavár – Révfalu	190 – 120	25 – 30
Révfalu – Eszék	120 – 19	13 – 15
Eszék – torkolat	19 – 0	5 – 6

Az egész Dráva-Mura vízrendszer jellemzően nyugat-kelet lefolyási irányú, vízgyűjtője aszimmetrikus, a folyótól északra fekvő terület nagyobb, mint a déli (György & Burián, 2005). Az aszimmetrikus, jellemzően keskeny, hosszú vízgyűjtő területének több mint fele (52,3 %-a), 22613 km² Ausztriában fekszik. A magyarországi vízgyűjtő terület nagysága 8431 km² (19,5 %). Szlovénia részesedése 11,5 %, közel 5000 km²-es területtel, Horvátországé pedig 16,5 %, több mint 7100 km². Az olaszországi vízgyűjtőterület igen elenyésző, mindössze 0,2% (2. ábra). A magassági viszonyokat tekintve a vízgyűjtő terület nagy része 500–1000 m közötti magasságban helyezkedik el és a hosszan elnyúló terület éghajlatát többféle – mediterrán, óceáni, valamint kontinentális – klímahatás is befolyásolja. A területre lehulló csapadék nagy része eső és hó formájában jelenik meg és nagy az évszakos eltérés is, ami befolyásolhatja a lefolyási

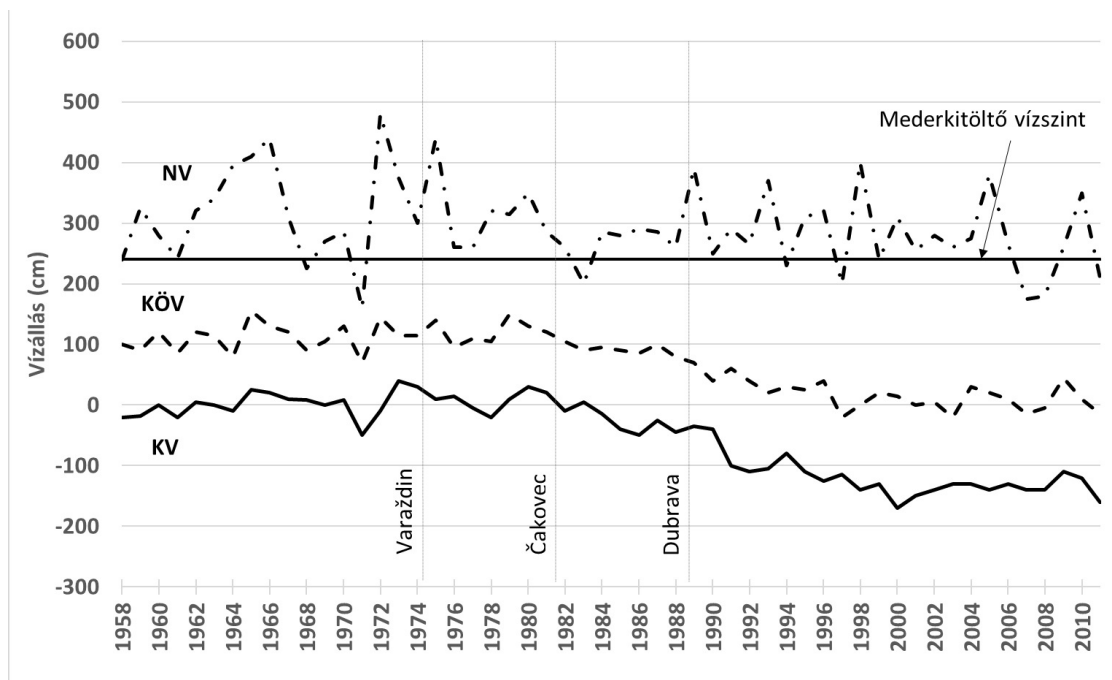
viszonyokat. A vízgyűjtő területen lehulló éves átlagos csapadék mennyisége 990 mm. A vízgyűjtő terület közel feléről a csapadék a Murán keresztül jut a Drávába Órtilosnál, a 236 fkm szelvényben.



2. ábra Dráva vízgyűjtőterület megoszlása az országok között (saját szerkesztés)

A folyó Mura torkolat alatti szakaszának szabályozása 1784–1885 között, több, mint 60 túlfejlett kanyarulat átvágást jelentett, mellyel mintegy 40%-os rövidülést értek el (György & Burián, 2005). A későbbi szabályozási munkák jellemzően végleges jellegű kő- és rőzseművekkel történő szabályozások voltak. A folyó szabályozási munkáit ma, az országos elvnek megfelelően, a folyógazdálkodás keretén belül végzik, amely egy tágabb és összetettebb gondolkodást igényel. Ennek megfelelően a szabályozáshoz kapcsolódó beavatkozások is komplex módon történnek. A Dráva Barcs alatti medre szabályozott, azonban a Barcs feletti szakasz – egy-két lokális beavatkozástól eltekintve – szabályozatlan, kanyargós, zátonyos, természetes állapotú. Itt a meder folyamatosan változik, rendeződik. A Barcs alatti szakaszon a közös magyar–horvát szabályozás eredményeként a folyó mentén mindkét oldalon árvízvédelmi töltések határolják a hullámteret. A horvát oldalon az árvédelmi művek védelme a medervándorlások ellen rendszeres beavatkozásokat igényel. Emellett a medersüllyedés folyamata is egyértelműen kimutatható annak következményeivel együtt. A folyó Bélavár alatti szakasza (70,2–198,6 fkm között) jelenleg hajóútként szerepel a kétoldali (magyar-horvát) egyezményekben (OVF, 2022).

A folyómeder morfológiai változásainak elemzésekor elengedhetetlen a vízállás és a jellemző vízhozamok vizsgálata. A 3. ábra mutatja a Dráva Magyarországra belépő szelvényében (Őrtilos) a vízjárás alakulását az utóbbi fél évszázadban.



3. ábra Dráva, Őrtilos jellemző vízállások 1958 és 2011 között, megjelölve a horvát erőművek építési évét

Egy folyó vízállásában hosszú távon bekövetkező változásokból több fontos dologgal kapcsolatban is vonhatunk le következtetéseket, ilyen például a természeti vagy emberi hatások bekövetkezésének ideje és mértéke. A Dráván az emberi tevékenységek egyértelműen meghatározóan befolyásolják a folyó vízjárását. Jelenleg 22 vízerőmű működik a folyón, 11 db Ausztriában, 8 db Szlovéniában és 3 db Horvátországban (2. táblázat) Egy további erőmű van tervezve a kutatási területemre is, de napjainkban ennek elkészítése nincs napirenden.

A hosszú idejű idősorok elemzéséből az látható, hogy 1918 előtt csak a természeti folyamatok befolyásolták a vízállást és – a vízjárás természetesen szélsőségein kívül – jelentősebb csökkenő vagy növekvő tendenciák nem tapasztalhatók. 1918 után, miután emberi tényezők hatása is megjelent a vízjárásban (az első drávai vízerőmű 1918-ban épült Szlovéniában, Fala településnél) általánosságban elmondható, hogy mind a kis-, mind a közép- és nagyvizek is csökkenő

tendenciát mutatnak. A kis- és középvizekben az 1982-es čakovec-i (Horvátország) erőmű megépülése után állt be jelentős csökkenés (3. ábra).

2. táblázat A Dráván létesült erőművek

Ország	Név	fkm	Ország	Név	fkm
Ausztria	Strassen-Amlach	715+700	Szlovénia	Dravograd	451+400
	Paternoin	601+200		Vuzenica	439+500
	Kellerberg	590+900		Vuhred	426+300
	Villach	580+800		Ozbalt	413+700
	Rosegg-St Jakob	554+400		Fala	405+100
	Feistritz- Ludmannsdorf	539+400		Mariborski otok	389+500
	Ferlach-Maria rain	530+400		Zlatoličje	383+600
	Annabrücke	515+400		Formin	353+000
	Edling	491+000	Horvátország	Varazsd	302+000
	Schwabeck	474+600		Čakovec	278+000
	Lavamüd	468+500		Dubrava	254+000

A nagyvizek csökkenését leginkább az mutatja jól, hogy az árvizek gyakorisága jelentősen csökkent, az utóbbi ~30 évben csupán három alkalommal haladta meg a vízállás a mederkitöltő vízszintet (Andrási, 2015). A rekord árvíz 1965-ben a szlovén szakaszon volt, míg magyar szakaszon 1972-ben volt a legmagasabb a vízállás, amikor is Őrtilosnál 476 cm, Baracson 618 cm, Drávaszabolcson 596 cm tetőző értéket észleltek (3. táblázat).

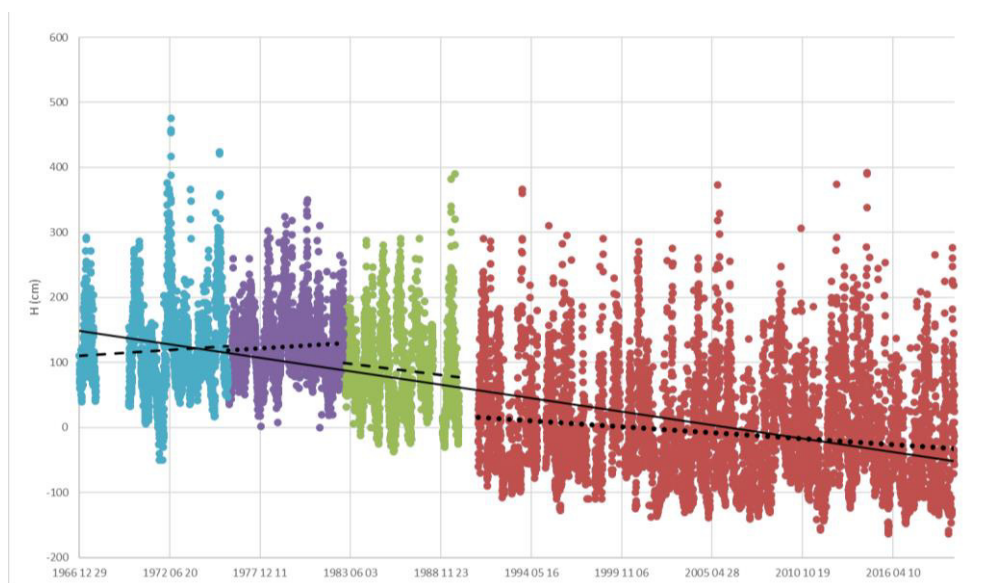
3. táblázat Magyarországi Dráva szakasz főbb hidrológiai paramétereit (forrás: Andrási, 2015)

Vízmérce	LKV (cm) és (észlelés éve)	LNV (cm) és (észlelés éve)	KÖQ (m ³ /s)	NQ (m ³ /s)	Közepes vízsebesség (m/s)
Őrtilos	-168 (2000)	476 (1972)	488	-	2,2 – 1,8
Barcs	-163 (2003)	618 (1972)	518	1433	1,5 – 0,8
Drávaszabolcs	-59 (2002)	596 (1972)	531	1365	1,2 – 0,8

A 3. táblázat azt is megmutatja, hogy a legkisebb vízállás hogyan alakult a folyószakaszon. Jól látható, hogy míg a legnagyobb árvíz több mint 50 évvel ezelőtt vonult le, a legkisebb vizek az utóbbi 25 évben alakultak ki. Ezek az eredmények összhangban vannak a hosszú idejű adatsorok elemzésével és a klímakutatások eredményeivel, miszerint a jövőben tartósan kisvizes állapotokra lehet számítani.

Az őrtilosi vízmérce adatait vizsgálva látható legjobban a vízerőművek hatása is, mivel ez helyezkedik el legközelebb a horvátországi erőművekhez (4. ábra).

A Dubrava-i vízerőmű a 254 fkm-nél 1989-ben épült meg. A műtárgy közelsége miatt az őrtilosi vízmércén regisztrált reggeli adatok idősorán nagyon jól látszik, hogy az erőmű üzemelésének vízjárásra gyakorolt hatása igen jelentős (4. ábrán piros adatsor). A vízmérce szelvényben a teljes vízjáték az erőmű létesítése előtt 3 m körül alakult, az erőmű üzembe helyezését követően viszont megnövekedett, eléri a közel 5 m-t, az átlagos vízállás értéke azonban csökkenő tendenciát mutat. Ezen vízjárás-jellemzők változása mellett megjelent egy nagyobb probléma, a vízjárás napon belüli intenzív változása. Az erőmű üzemeltetésének következtében Órtilosnál nem ritka a napi 80-120 cm vízszint ingadozás sem (Domány & Burián, 2018). Barcs alatt már csak kisebb mértékben érzékelhető ez a hatás, de a vízjárás ingadozásán kívül kihatással van a terület élővilágára, mivel megváltoztatja a folyó természetes vízjárását. A ilyen mértékű napi ingadozás nem természetes, így az élővilág számára nehezen tolerálható.



4. ábra Órtilos reggeli észlelt vízállás idősor 1967 – 2020 (saját feldolgozás, forrás: DDVIZIG) a horvátországi erőművek létesítése alapján időben tagolva

Vízhozam tekintetében a Dráva nyugodt, kiegyenlített vízjárású folyó, vízhozama 125–3000 m³/s között változik, melynek átlagos értéke a torkolatnál 653 m³/s. A magyarországi szakaszon a többéves közepes vízhozama 550 m³/s, a legnagyobb árvízi vízhozamát 1972-ben mérték Barcsnál, 3190 m³/s értékkel. Vízjátéka itt 781 cm, a maximális vízállás 618 cm (bekövetkezés: 1972. július 19.), a minimális pedig -163 cm (2003. szeptember 28-án).

A korábbi tapasztalatok szerint az év folyamán a Dráván három árvizes időszak jellemző. A nyári csapadékmaximumok és a téli hóolvadás mellett a mediterrán hatásnak köszönhetően ősszel is van egy nagyvizes időszak. A kisvizes időszakok nyár és tél végén jellemzőek.

Az elmúlt időszak vízjárásának elemzésével jól látszik, hogy a folyó vizsgált szakaszán ritkulnak az árvizek (4. táblázat). Ez részben a felső szakaszon létesített vízerőművek kiegyenlítő hatásának is tulajdonítható, de alapvetően az időjárási viszonyoknak tudható be.

4. táblázat Árhullám statisztika a barcsi vízmércére vonatkozóan (forrás: András, 2015)

	1901 – 1917	1918 – 1941	1942 – 1967	1968 – 1989	1999 – 2014
Árvizes napok száma (db)	349	157	120	23	7
Árvizes napok száma (nap/év)	20,5	6,5	7,5	1,0	0,3
Árhullámok száma (db)	66	48	25	5	3
Átlagos visszatérési idő (év)	0,4	0,7	1,5	6,3	8,0

Az utóbbi évek árvíz-mentes időszaka a csapadékszegény meteorológiai állapotok következménye. A jövőben várható ennek a tendenciának a tartóssá válása, esetlegesen fokozódása, az éghajlatváltozás becsült változásának következtében. Az éghajlatváltozás hatására várhatóan átalakulnak a vízfolyások vízjárási viszonyai. A csapadékesemények átrendeződése következtében számolni kell az aszályos időszakok számának és tartósságának növekedésével. Az alapvetően kisvizes időszakokban egy-egy hirtelen lehulló, nagy csapadék következtében megnő az árvízi kockázat, illetve a lefolyástalan területek belvízi veszélyeztetettsége is emelkedhet (OVF, 2022).

3.1.2 A Mura folyó rövid bemutatása

A Mura folyó Ausztriában ered a Radstadt Tauern déli térségében, 1900 mAf-i magasságban. Hivatalos hossza 454 km a magyar szakirodalom szerint, de a nyilvántartásokban jelenleg már más érték szerepel a torkolati szakasz átrendeződése miatt: a folyó Drávába torkolló szakasza több ágra szakadt, majd a keskeny földnyelvet átszabva, természetes úton új torkolatot alakított ki (5. ábra).



5. ábra Dráva-Mura torkolat (Forrás: 2013 MADOP)

A folyó osztrák szakasza 323 km hosszú, melyet egy közös osztrák-szlovén határszakasz követ 34 km hosszan. Szlovéniába belépve 28 km-en szeli át az országot, majd újra határfolyóként halad tovább 33 km-en keresztül, Szlovénia és Horvátország között. Az utolsó, 48 km-es szakaszon Horvátország és Magyarország közös határfolyója, és Légrád/Őrtilos térségében ömlik a Drávába (6. ábra). A teljes vízgyűjtő terület nagysága 14304 km², amelyből Magyarországhoz 15% tartozik. A Mura forrás és a Dráva-torkolat közötti szintkülönbség 1764 m. Az osztrák vízgyűjtő területet elhagyva a folyó esése lecsökken.



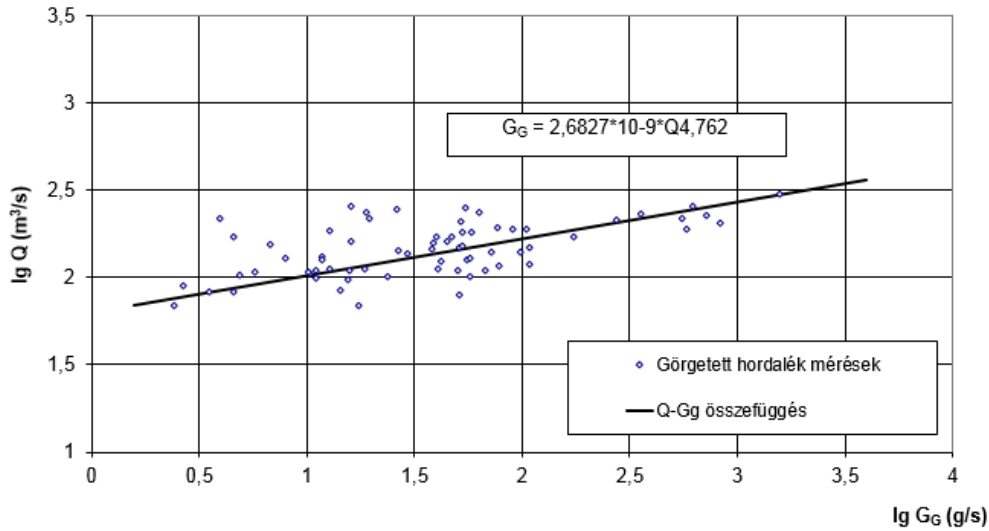
6. ábra A Mura vízgyűjtőterületének domborzata és a magyar rész-vízgyűjtő (Forrás: Engi, Zs. et al., 2016a)

A Mura felső szakaszán a 18. században történt a Hochenburg szabályozás a Graz és Cven közötti folyószakaszon. Ausztriában 26 db ma is működő vízerőmű kiépítésével a folyót gyors lefolyású, csatorna jellegűvé alakították, amelyen megszűnt a természetes hordalékszállítás. Ez a meder morfológiai degradációját és ennek következtében a meder mélyülését okozta. A részletes elemzés szerint a szlovén-osztrák szakaszon a meder mélyülése átlagosan 1,2 m volt, de helyenként elérte a 2,28 m-t is. A középső Mura szakaszon, bele értve a szlovén-horvát határszakaszt is, a radikális mederátvágások után a medermélyülés mindössze 30–40 cm volt, de itt a talajvízszint csökkenése jelentette a nagyobb problémát. A Mura alsó, magyar-horvát határ szakaszán pedig a zátonyképződés megváltozása okozott problémát, mivel a folyamat olyan helyeken kezdődött meg, ahol a korábbi tapasztalatok alapján nem lehetett számítani rá. Az elmúlt 3–4 évtizedben az ártéri területek szállítóképessége kb. 300 m³/s-mal csökkent, aminek egyik oka az ártéri területek feliszapolódása lehet (Engi, Zs. et al., 2016a; Engi, Zs. et al., 2016b; Engi, Zs., & Ficsor, J. 2020).

3.1.3 A Dráva és a Mura hordalékviszonyainak rövid bemutatása

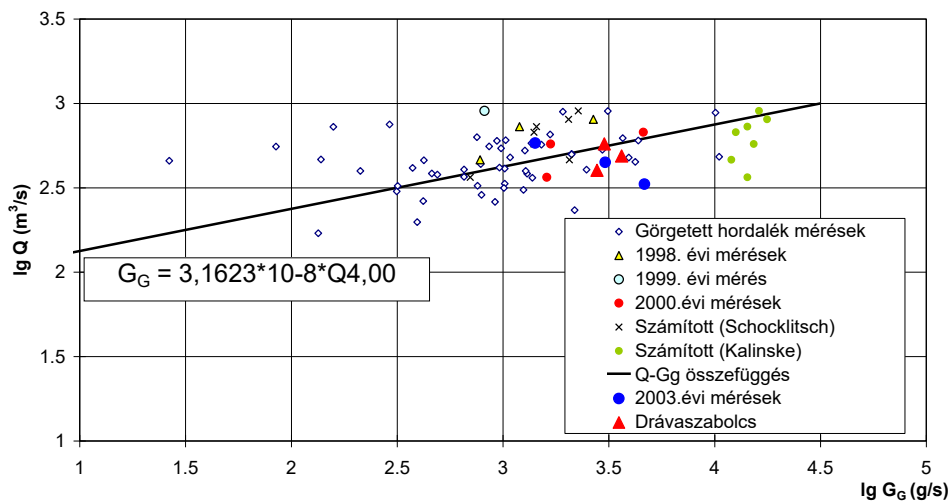
A vizsgálati területen a Mura folyón a Letenye, a Dráván pedig a Botovó, Bélavár, Barcs és Drávaszabolcs vízrajzi állomások szelvényében történik hordalék mintavételezés középvízi vízhozamig. A nagyvízi mérés sajnos – de részben érthető okokból – nem része a vízrajzi monitoringnak.

A Murá görgetett hordalék mérésre csak 1969–1983. között került sor, ennél frissebb adatok nem állnak rendelkezésre. A hordaléktranszport folyamatok elemzésekor így a VITUKI által 2003-ban közzétett grafikus kapcsolatot használjuk (7. ábra). Az ábráról leolvasható, hogy a görgetett hordalékszállítás ritkán lépi túl a 100 g/s értéket, melynek oka a Mura felső szakaszán működő vízerőművek lehetnek. A vízlépcsők – ahogy a Dráván is – a folyó görgetett hordalékát szinte teljes egészében megállítják a duzzasztási határ közelében, távol a duzzasztóműtől. Így az árhullámok még felnyitott táblák esetén is inkább a lerakódott lebegtetett hordalékot mossák ki és szállítják tovább a tározó fenekéről, mint a durva kavicszemeket.



7. ábra Vízhozam és görgetett hordalékhozam közötti összefüggés a Mura, Letenye Vízrajzi állomásra (Forrás: Szekeres, 2003, idézi Rákóczi et al., 2012)

A rendszeres görgetett hordalék mintavételek a Dráván Barcs és Drávaszabolcs vonatkozásában 1969-től, míg Botovónál és Bálavárnál 1998 óta vannak. 1998 előtt a mintavételezésre a Károlyi-féle mintavevőt használták, attól fogva viszont a homokos kavics medrű Barcsnál és a homokmedrű Drávaszabolcsnál a Helley-Smith-féle mintavevőt is alkalmazzák. A drávaszabolcsi mérési szelvényre vonatkozó vízhozam – görgetett hordalékhozam összefüggést mutatja a 8. ábra.



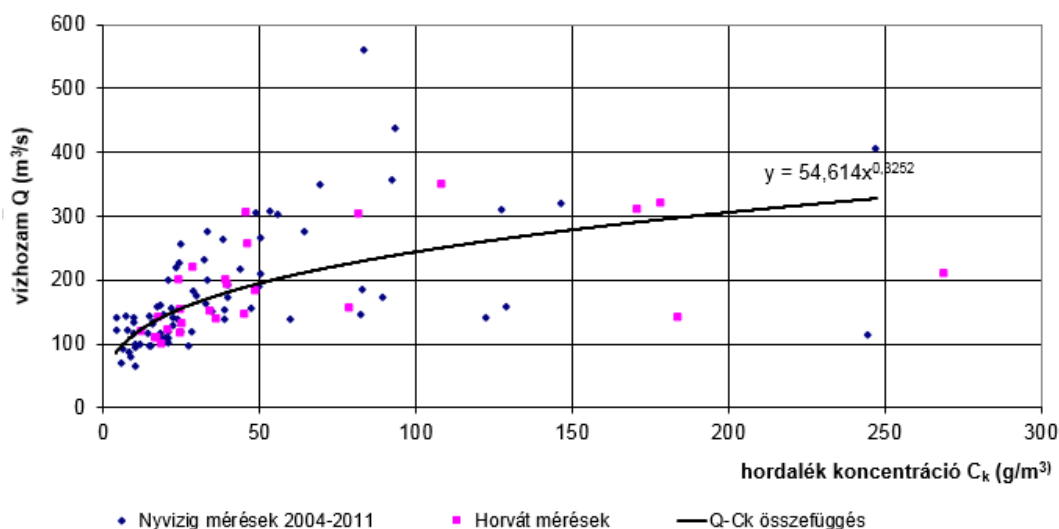
8. ábra Vízhozam és görgetett hordalékhozam mérések és összefüggés a Dráva, Drávaszabolcs szelvényben (forrás: Rákóczi et al., 2012)

A Vízhozam – Hordalékhozam kapcsolat nem túl szoros, a 2000 előtti mérések (az ábrán üres rombuszokkal jelölve) eléggé szórnak. A 2003. és a 2012. évi pontok illeszkedése megfelelőbb.

A különböző időszakokban a mérési technika nem volt teljesen azonos, ez hatással lehet a kapott eredmények szórására is.

Lebegtetett hordalék mérési adatok mindkét folyóra 1960-tól folyamatosan rendelkezésre állnak. A letenyei szelvényben a mérés több függélyben, függélyenként egy pontban mérve. A lebegtetett hordalék mintavételt palackos mintavevővel végzik, a hozzá tartozó vízhozammérések korábban forgószárnyas sebességmérővel, ma már Acoustic Doppler Current Profiler (továbbiakban: ADCP) áramlásmérővel történnek. Az észlelések alapján megállapítható, hogy a lebegtetett hordalék mennyisége a téli, tavaszi és nyári időszakban csökken, míg az őszi időszakban egyértelműen emelkedő tendenciát mutat az érkező hordalék mennyisége.

A 2012. évi Dráva morfológiai monitoringja – Hordalékvizsgálat projekt során vizsgálat alá vonták a Mura 2004–2011 közötti adatait is (Rákóczi et al., 2012), és az alábbi összefüggésre jutottak (9. ábra):

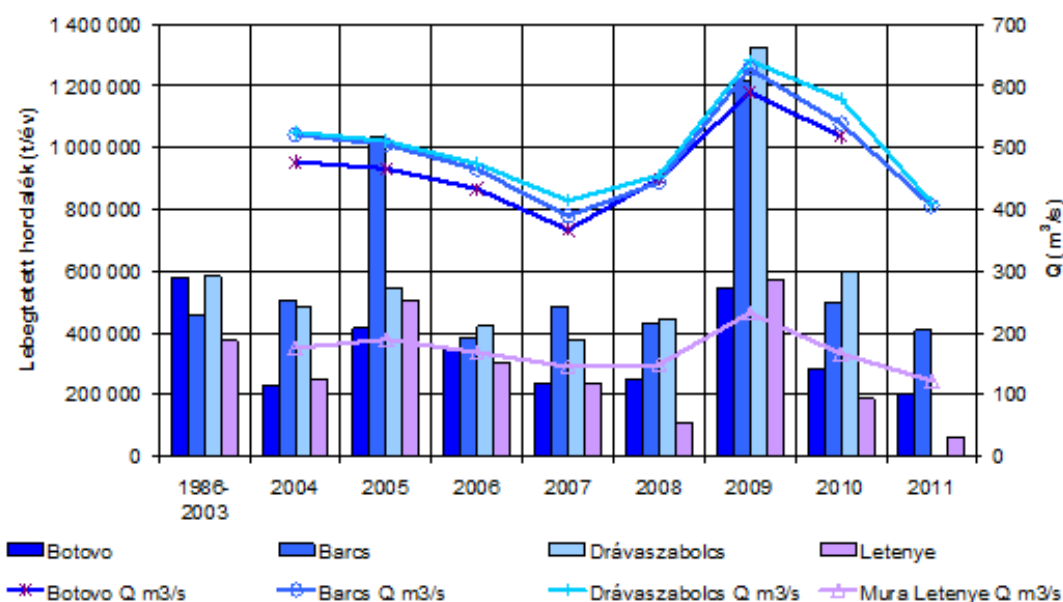


9. ábra Lebegtetett hordalék koncentráció és a vízhozam összefüggése Mura, Letenye; 2004-2011 között (Forrás: Rákóczi et al., 2012)

Az ábrán a magyar hordaléktöménység adatokon kívül a horvát mérési adatok is láthatók. A vízhozam–hordaléktöménység kapcsolat meglehetősen laza. Kisvizek tartományában az eredmények kielégítő mértékben egyeznek, azonban a 300 m³/s feletti vízhozamoknál a magyar, míg a 100–200 m³/s közötti sávban a horvát mérések szórnak nagyon. A rendelkezésre álló adatok alapján nem vizsgálható, de érdemes lenne elemezni az azonos időben mért értékek közötti

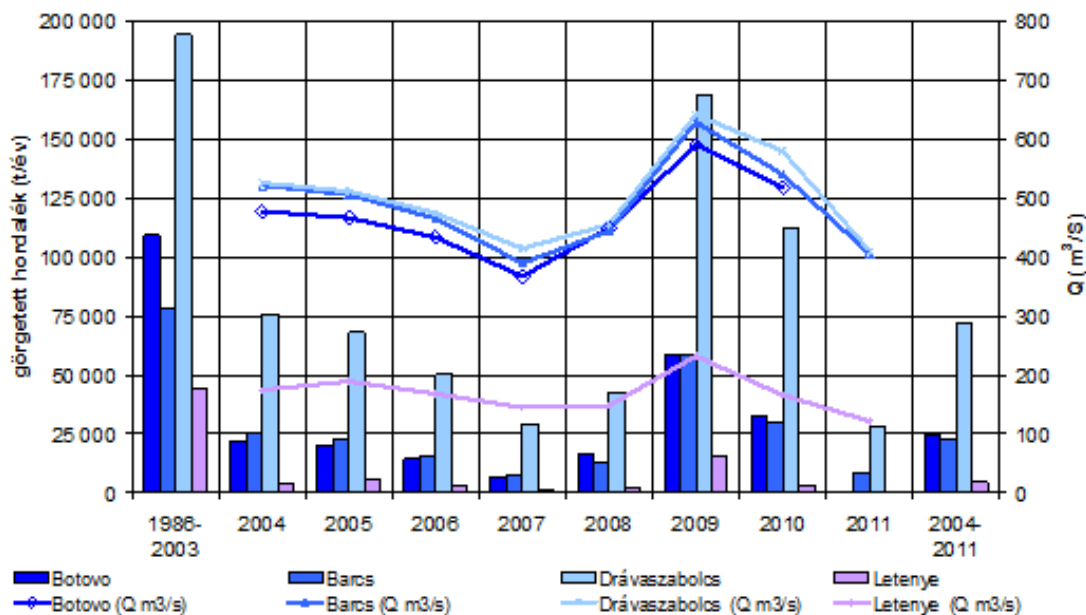
kapcsolatot, és mintavételi körülményeit, ami magyarázatot adhatna az eltérésekre, esetleg lehetővé tenné egy jobb összefüggés kidolgozását.

A vízhozam–hordalékhozam összefüggések alapján a napi középvízhozamokhoz kiszámítható a hordalékhozam, abból pedig a folyó napi hordalékszállítása. A számítási eredmények összegzésével előállíthatók a havi, illetve az éves hordaléktömegek az adott mérési keresztmetszelyre vonatkozóan. A jelzett projektben elkészítették az éves hordalékszállítás idősorát mind a lebegtetett (10. ábra), mind a görgetett (11. ábra) hordalékra vonatkozóan.



10. ábra A Dráva és a Mura lebegtetett hordalékszállítása (Forrás: Rákóczi et al., 2012)

Az adatok elemzése alapján napjainkban a Mura hozzájárulása a Dráva hordalékszállításához csak a lebegtetett hordalék terén számottevő. Az 1986–2003 közötti időszakban 375 000 t/év, 2005-ben és 2009-ben 500 000 t/év-et elérő, illetve meghaladó volt a Letenyén áthaladó lebegtetett hordaléktömeg, ami jelentősen hozzájárult a Dráva 1 millió tonnán felüli éves hordalékszállításához.



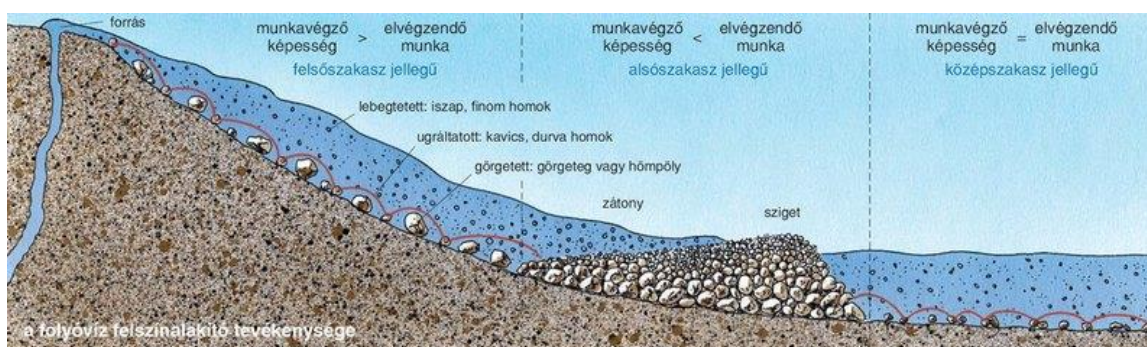
11. ábra A Dráva és a Mura görgtetett hordalékszállítása (Forrás: Rákóczi et al., 2012)

A Drávára vonatkozóan is megállapítható, hogy a görgtetett hordalék mennyisége jelentősen elmarad a lebegtetett hordalék mennyiségétől, ami természetes jelenség. Az éves hordalékhozam változása jól illeszkedik az vízjáráshoz is (kivéve Barcs esetén a 2005. évi lebegtetett hordalékmennyiséget, ami indokolatlanul magas érték). Az is megfigyelhető, hogy a drávaszabolcsi szelvény görgtetett hordalékmennyisége rendre többszöröse a másik két drávai állomásnál számított értékénél. Ennek oka a folyószakasz jellegében keresendő.

3.2 Alluviális folyószakaszok morfológiai jellemzői

Víz Keretirányelv (VKI) felhívja a figyelmet arra, hogy a felszíni vizek ökológiai állapotát jelentősen befolyásolja a víztestek morfológiai állapota, illetve az abban bekövetkező változások. Az állapotértékelésnél figyelembe kell venni, hogy a mederforma és a sebességviszonyok változatossága biztosítja-e a referenciaállapotnak megfelelő diverzitást, illetve a vízhozam és ehhez kapcsolódóan a vízszintingadozás lehetővé teszi-e a különböző magasságban elhelyezkedő növénytársulások megfelelő vízellátását (Az Európai Parlament és a Tanács 2000/60/EK Irányelve, 2000). Ennek következtében az állapotértékelés egyik fontos eleme a morfológiai viszonyok nyomon követése: a folyó mélységének és szélességének változékonysága, a mederágy mérete, szerkezete és anyaga, a parti sáv szerkezete.

Folyóink élő rendszerek, az őket érő hatásokra belső folyamataik és ezen keresztül lefutásuk, alakjuk változásával reagálnak. A folyófejlődést kiváltó okok lehetnek statikusak és dinamikusak, ezen belül pedig lineárisan, illetve ciklikusan változók. Mivel az alaktani változás egy bonyolult folyamat következménye, ezért a megértéshez, tervezéshez nem elég csak a pillanatnyi alaki jellemzők felmérése (topográfiai felmérésen, mederfelvételén keresztül), célszerű a morfológiai változásokat eredményező folyamatok megismerése és azok okainak feltárása is. Ezek a folyamatok tulajdonképpen az áramló víz felszínalakító képességében realizálódnak és a víztömeg energiájának köszönhetőek (12. ábra).



12. ábra Folyóvizek felszínalakító tevékenysége (Mozaik Education, 2023)

Egy folyó munkavégző képessége az adott víztömeg energiájától függ, ami a helyzeti és a mozgási energiából tevődik össze. A mozgási energia mennyisége pedig a mederesés és a víz mennyiségének, áramlási viszonyainak függvényében változik. Egy adott folyószakasz

esésviszonyai mederfelmérési eredményekből kinyerhetők, a víz mennyisége, áramlási viszonyai pedig vízállás-észleléssel, áramlás- és vízhozamméréssel megismerhetők.

Ahogy a 12. ábrán is látható, a folyószakasz-jelleg egyik jó indikátora a hordalék minősége, a hordalékmozgás jellege. Mivel a morfológiai változások egyik fontos folyamata a hordalékháztartással függ össze, ezért célszerű megismerni a vizsgált folyószakaszra jellemző mederanyag és hordalék minőségi és mennyiségi jellemzőit is.

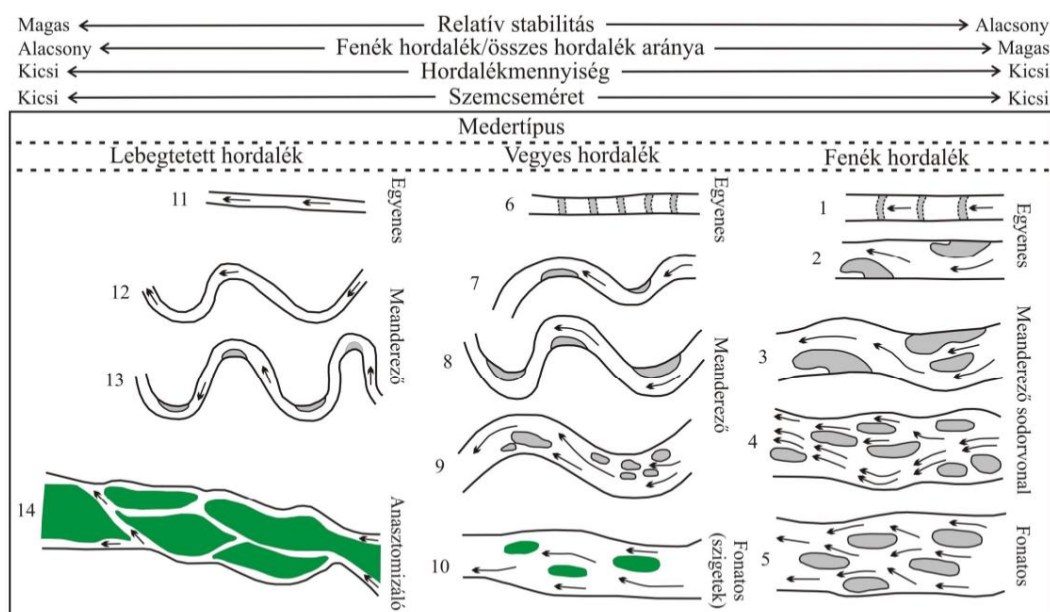
A folyófejlődés, a morfológiai változások ismerete nem lehetséges egy pillanatnyi állapot „látlet” felvételével, nem nélkülözheti az időről időre történő felmérések összehasonlító elemzését sem. Korábban, a távérzékelés fejlődése és elterjedése előtti időkben ezeket a felméréseket előre meghatározott keresztshelvényekben, az úgynevezett nyilvántartási shelvényekben készítették el időről időre, és ezek mentén követték nyomon az adott folyószakasz morfológiai változásait. Ezek a felmérések jelentős idő és anyagi ráfordítást igényeltek.

Ma már az elérhető légifelvételek és műholdképek segítségével lehetőségünk van a folyók helyszínráji lefutásának gyorsabb, egyszerűbb és olcsóbb elemzésére is. A víz alatti morfológiai változások felmérése ma is költséges, de a rendelkezésre álló eszközök gyorsabb és lényegesen részletesebb felmérést tesznek lehetővé a korábbi lehetőségekhez képest. Mindazonáltal a korábbi, csak néhány keresztshelvényre korlátozódó felmérések fontosságát ki kell emelni, hiszen a hosszútávú változások elemzésében és a folyamatok megértésében igen fontos szerepük van.

A folyószakaszok alaki változatosságának jellemzésére több különböző módszer is rendelkezésre áll. A hazai vízépítési gyakorlatban – főként a folyószabályozással összekapcsolódóan – a geomorfológiában is elsőként ismert Cholnoky-féle szakasz-jelleg osztályozást és az ahhoz nagyon hasonló Kádár-féle eróziós állapot szerinti osztályozást használjuk. Ezek az osztályozások alapvetően 3 jellemző szakaszra bontják a vízfolyásokat, felső-, középső-, és alsószakasz jellegű, illetve bevágódó, meanderező és feltöltődő szakaszokat különítenek el (Cholnoky, 1934; Kádár, 1954). Az elkülönítés alapját a folyó munkavégző képessége, illetve energia viszonyai adják, ahogyan az a 12. ábrán is látható. Hosszabb vízfolyások mentén ezek a szakaszok többször, váltakozva fordulnak elő. Ez az osztályozás a maga egyszerűsége miatt is jól alkalmazható a vízépítési gyakorlatban.

Tájgazdálkodási, ökológiai szempontból azonban számos ennél pontosabb, vagy inkább részletgazdagabb osztályozás is jelen van. Ezek jellemzően a medermintázat alapján kategorizálják a folyószakaszokat. Kezdetben ez a metodika is három alap mintázattal dolgozott, az egyenes, a meanderező és a fonatos jelleggel (Leopold & Wolman, 1957). Ezt a felosztást részletezte Schumm (1985), mellyel egy 14 típusból álló rendszert hozott létre (13. ábra). A kutatásom tárgyát képező Dráva magyar-horvát közös szakasza jellemzően meanderező középszakasz jellegű vízfolyás-szakasz.

A medermintázat változása alapvetően belső (autogén) illetve külső (allogén) hatásokra vezethető vissza. Az autogén hatás gyakorlatilag a meder változása, átrendeződése, az allogén hatások között pedig a klímaváltozása, a tektonikus mozgások és az emberi beavatkozások a jelentősek (Bridge, 2003).



13. ábra Alluviális folyószakaszok mintázatainak osztályozása (Schumm, 1985, idézi András, 2015)

A meanderező jelleg esetén is a kanyarulatok mozgását több belső hatás együttesen eredményezi. Alapvetően a vízjárás a meghatározó, hiszen a folyóvíz energiája az, ami a változásokat előidézi. Árvizek idején az áramló víz nagyobb energiája képes a mederanyag áthelyezésére, a homorú partok megbontására. Az, hogy hol milyen mértékű rombolást tud végezni ugyanaz az erőhatás, a mederellenállás egyenlőtlenségével magyarázható. A víz elragadó ereje pedig függ a meder alaki tényezőitől (szélesség, mélység), a hordalék szemcseeloszlásától és a meder esésviszonyaitól is (Bogárdi, 1942; Kiss & Blanka, 2012).

A külső hatások közül a leginkább ismertek az emberi beavatkozások. Természetes, hogy a társadalmi igények a folyók hasznosításával, szabályozásával járnak. A vizsgált folyószakaszon jellemzően az árvízvédelemhez és a hajózáshoz kapcsolódó beavatkozások voltak a múltban. Ezen beavatkozások mértéke – részben a folyó sajátos geopolitikai helyzete miatt – elmarad más folyók ilyen jellegű módosításának mértékétől, így a folyószakasz még ma is elég természetes jelleget mutat.

Egy folyószakaszra morfológiai szempontból azonban nem csak a helyben, hanem a felvízi szakaszon végzett emberi beavatkozások is hatással lehetnek. Ilyen beavatkozások a duzzasztók, vízerőművek, melyek a Dráva felsőbb szakaszain is jelentős számban létesültek, ahogy azt a 3.1.1 fejezetben kifejtettem. Ezek a beavatkozások a természetes vízjárás módosításán és a hordalék-háztartás átalakításán keresztül fejtik ki jellemzően kedvezőtlennek ítélt hatásukat. Az érintett területtől távolabb lévő műtárgyak hatása a vízjárásra jellegbéli változást eredményez, a közeli erőművek üzemeltetésének azonban az egy napon belüli vízállásváltozásokra is hatásuk van, és egy természetidegen, az ökoszisztéma számára kedvezőtlen ingadozást hoznak létre. Ezzel szembesültünk a kutatás során végzett terepi mérés alatt is.

A hordalék-háztartás szempontjából a duzzasztók hatása szintén jelentős, alapvetően változtatják meg a műtárgy alatti szakaszon a hordalékszállítás jellegét, dinamikáját. Erről részletesen a következő fejezet szól.

3.3 Folyók hordalékháztartása

A folyók hordaléktranszportja egy igen összetett jelenség, természetes vizekben lévő szilárd anyagok (finom agyagtól egészen a görgetegig) mozgását, szállítását írja le. Ez a folyamat igen összetett, a szilárd anyag szállítása nem feltétlenül folyamatos, és a hordalék mérete is változik, a torkolat felé egyre kisebb, finomabb szemcsék találhatók, mely aprózódás, esetleg mállás következményeként jönnek létre. A folyamat tulajdonképpen négydimenziós, a szilárd részecskék mozgása minden irányban történik, és az időben is változó. Az áramlási viszonyoktól függően a hordalék szemcsék hol utaznak a víztérben, hol lerakódnak a mederben, hol a meder felszínén gördülve, csúszva haladnak. A különböző állapotok közötti változást elsősorban az áramlás jellemzői és a szemcseméret határozzák meg.

A hordaléktranszportot jellemzően két típusba lehet sorolni, lebegtetett és görgetett hordalékvándorlásra. A lebegtetett hordalékszállítás alapja a turbulens áramlás, ami a teljes víztérbe, a gravitáció ellenében fenntartja a részecskéket, míg a görgetett hordalékszállításnál a viszkózus súrlódás veszi át a főszerepet. A két szállítási mód mechanikája között jelentős különbség van, de ahogy arra korábban is utaltam, ezek nem különülnek el tökéletesen egymástól, van kapcsolat közöttük. Az áramlási feltételek megváltozásával a lebegtetett hordalékszemcsék egy része kiülepedhet, a mederfenéken folytathatja útját, illetve a mederfenék közeli rétegekből a korábban görgetett hordalék bekerülhet a folyadék tér felsőbb rétegeibe és lebegve haladhat tovább. Mivel a hordalék koncentrációja jellemzően kicsi, így a hordalék áramlást a víz áramlásától külön lehet vizsgálni.

A hordalék vándorlás kutatásában a múlt század közepén nemzetközi szinten két kutató emelhető ki: Brigadier Ralph Alger Bagnold és Hans Albert Einstein. Mindkettőjük munkássága jelentősen meghatározta a hordalékvándorlás vizsgálatának irányvonalait, ezen belül a görgetett hordalékét is. Alapvető definíciókat alkottak meg, melyek ma is alapját képezik a kutatásoknak.

Bagnold (1954) a görgetett hordalékmozgás meghatározásánál kiemelte a gravitáció szerepét a meder és a részecskék közti folyamatos kapcsolat kialakításában, és azt állította, hogy a görgetett hordalékmozgás legfontosabb folyamata a hordalékszemcsék ugráló mozgása. A szemcsék ugrálását befolyásolják még a lefolyási viszonyok, a hordalék mennyisége, a meder különböző jellemzői.

Einstein (1950) elmélete szerint a legnagyobb távolság, amit egy részecske egy "ugrással" meg tud tenni az körülbelül 100 részecskeátmérő, de álláspontja szerint az ugráló részecskék – amennyiben az ugrás magassága és hossza nagyobb, mint néhány szemcseátmérő – már lebegtetett hordaléknak tekinthetők, míg a görgetett hordalék jellemzően a mederfenék feletti keskeny rétegben gördülő, csúszó részecskék összessége.

Az Einstein általa definiált keskeny rétegnek a vastagsága megközelítőleg a jellemző részecske átmérőjének kétszerese. Ennek a rétegnek a jellemzője az, hogy a természetes áramlásra jellemző turbulencia már igen csekély, és nem befolyásolja a hordalékszemcsék mozgását. Mivel a réteg vastagságát a hordalék szemcse mérete jellemzi, ez a különböző szemcsék esetén eltérő lehet. Sima meder esetén az érdesség jellemzően a szemcseméretből közvetlenül definiálható. Einstein szerinte a reprezentatív (jellemző) szemcseméret réteg meghatározásában a D65, azaz a szemeloszlási görbe 65%-os értékéhez tartozik.

Természetes vízfolyások esetén azonban a meder keresztmetszvény nem tekinthető egyenletesnek, barázdák, árkok húzódnak benne. Ezeknek a hatása az érdességre nem elhanyagolható. A meder nyírófeszültsége két összetevőből áll: a mederanyagra jellemző meder érdességéből származó, és a mederformák (árkok, barázdák) jellemzőiből adódó nyírásból (amely gyakorlatilag az elő és hátoldal között kialakuló nyomáskülönbségből adódik). A teljes szelvény ellenállása e két részből adódik össze. Ennek alapján felírható két különböző hidraulikus sugár, melynek használatával a fenékcúsztató sebesség is felbontható, és a görgetett hordalék vándorlás mintázatának fejlődésmozgása is vizsgálható.

A hordalékmozgás vizsgálatánál nem lehet elhanyagolni a sebesség fluktuációját sem, ami a természetes áramlásokra jellemző, és ami a hordalékmozgásban megfigyelhető lüktető jelleget is okozza (van Rijn, 1984).

Az idealizált folyó három zónára osztható: eróziós vagy hordalék-képző (meredek, gyorsan erodáló felvív), szállító (amelyen keresztül a hordalék többé-kevésbé azonos mennyiséggel mozog) és lerakódó szakaszra (Schumm, 1977). A folyók az erózió termékeit görgetett vagy lebegtetett hordalék formájában lefelé szállítják a tengerbe, a végső lerakódási helyekre (Kondolf, 1997).

A görgetett hordalék a mederfenéken csúszva, gördülve mozog. Az érintkezés a mederfenékkal állandónak mondható. Előfordul, hogy a fenéken csúszó, gördülő hordalékszem egy-egy nagyobb hordalékszemen vagy más akadályon átugrik, ilyenkor a mederfenékkal való érintkezés rövid időre és távolságra megszakad. A görgetett hordalék mozgásánál az egyik legfontosabb kérdés a görgetve szállított hordalék mennyisége, valamint annak a határállapotnak a meghatározása, amelynél a fenéken nyugvó hordalékszem éppen megindul.

A lebegtetett hordalék a görgetett hordaléknál jóval finomabb szemcséjű, a duzzasztás nélküli folyószakaszokon állandó mozgásban van, és kiüledés nélkül halad tovább. A mennyiségét elsősorban a folyó vízgyűjtőterületéről származó kimosott hordalék határozza meg. Ennek a hordalékfrakciónak a szemátmérője függ az áramlás turbulencia jellemzőitől, az áramlási sebességek nagyságától.

Amennyiben a felülről érkező hordalék mennyisége nem haladja meg a folyó hordalékszállító képességét, a lebegtetett hordalék a meder változtatása, feltöltődése nélkül vonul le. Ezzel szemben a mederfenékre rakódó, vagy onnan kimosódó hordalék megváltoztatja a meder alakját.

A folyórendszerben lezajló áramlási folyamatok jellegzetes morfológiai jellemzőket hoznak létre a meder felső, középső és alsó szakaszán. A nagy lejtésű felső völgyben a függőleges erózió dominál, és egy keskeny, viszonylag sekély V alakú csatorna vágódik a felszínbe. A felső szakasz vízgyűjtőjén és magában a mederben is az erózió következtében keletkező durva hordalék nagy mennyiségben sodródik az alvíz irányába. A középső szakaszon csökken a függőleges erózió, a meder szélesebb és mélyebb, mérsékelt meredekséggel. Itt oldalirányú erózió és lerakódás is uralkodik a mederben. Az átmeneti szakaszon a hordalék viszonyok kiegyensúlyozottabbak, így az eróziós és lerakódási folyamatok dinamikus egyensúlyban vannak. Az alsó szakaszra jellemző a széles és mély, enyhe lejtős folyómeder, ahol az oldalerózió (parterózió, omlás) és a hordaléklerakódás (szigetek, laposok kialakulása) dominál a lecsökkent hordalékszállítási kapacitás hatására. A hordalék összetétele és elrendeződése egyaránt szisztematikusan változik a folyó mentén alvízi irányba. A felső folyóvölgyből szállított durva hordalék a kopás és a szelektív szállítás következtében lefelé haladva fokozatosan finomabbá válnak (Frings, 2004)

Egyensúlyi állapotban lévő természetes folyókban a folyó morfológiája különféle hordalékjellemzőktől függ, mint például a szemcseméret és a hordalék mennyisége. Növekvő

hordalék-utánpótlás, megfelelő szélességgel, medereséssel és szemcsemérettel együtt, pl. fonatos ágrendszer kialakulásához vezet. A túlzott hordalékterhelésű (kavics vagy homok) folyókban, ahol a domináns folyamat az aggradáció, általában zátonyok alakulnak ki. A zátonyoknak különféle formái léteznek, amelyek bizonyos szakasz-típusokra jellemzőek, pl. fonatos és anasztomizáló folyószakaszok. A kanyargós vagy meanderező folyókra jellemzők a mederkanyarulatok belső oldalain kialakuló homokpadok. A hordalékáramlás folytonosságának megszakadása eredményeként a fonatos folyó egyágú folyóvá alakul, amely erodálódni fog. A hordalékellátás hiányát a folyók összeszűkülése és kiegyenesedése követi, ami az aggregációs jellemzők hiányához vezet, ami korlátozza az oldalirányú eróziót és a morfodinamikát.

A lejtős tömegmozgások szintén erőteljes hatásokat fejthetnek ki a mederbeli lefolyás jellegére. Erős csapadéktevékenység hatására például a lejtő, valamint a domboldal megcsúszásából jelentős mennyiségű hordalék jut a mederbe, ami akár a meder elzáródását is okozhatja. Az elzáródás alatti szakaszon a hordalékhiány hatására a folyómeder és a partok erodálódnak, ami a vízfolyás kiszélesedését okozza. A középső szakaszon az elragadó energia csökkenésével homokpadok fejlődnek, ami a partok eróziójához és az árterekre kerülő finom üledékek elvesztéséhez vezet. Az alsó szakaszon a folyóparton felhalmozódott hordalék a part beomlásának hatására a mederbe kerül, és szigeteket/zátonyokat képez, a finom hordalék az ártérben ülepedik ki, a szállított hordalék megmaradt része pedig a tengerbe mosódik.

3.4 Hordalékmérési eljárások fejlődése, kihívásai

A hordalékháztartás vizsgálatára nemzetközi szinten nem találunk egységesen elfogadott irányelveket. Különböző módszertanok vannak a mintavételezés eszközeire, körülményeire és a laboratóriumi feldolgozásra is (Koch & Koch, 2012).

A mederanyag mérési módszerek három csoportra bonthatók: a mederbe telepített mintázó helyek, a hordozható mintavevők és az úgynevezett helyettesítő eljárások (Ryan et al., 2005, idézi Gray et al., 2010). Ezek gyakorlatilag közvetlen (fizikai) és közvetett (indirekt, helyettesítő) eljárásokat takarnak. Az indirekt eljárások gyakorlati elterjedése napjaink kihívása, de használatuk – megfelelő kalibráció mellett – gazdaságosabb és egyszerűbb a hagyományos direkt eljárásokhoz képest.

A hordozható mintavevők esetében az eljárások során közvetlen mintavétel történik, majd azok szemösszetételét laboratóriumi körülmények között kell elemezni, a hordalék hozamát pedig számítással határozzák meg. A mintavétel során a mintavevőt le kell engedni a mederfenékre, megfelelő módon rögzíteni, majd a mintavétel után biztonságosan ki kell emelni (Csiti, 2018). A mintavétel időtartama is különböző lehet, ami szintén nem egységesített, függhet a hordalékmozgás intenzitásától. Különböző típusú folyószakaszokon eltérő eszközöket lehet – és kell is – használni, mivel a mederalkotó és ezáltal a mederfenéken gördülő szilárd hordalék jellemzői igen változatosak az egyes eltérő jellegű folyószakaszokon.

Az egyes mintavevő eszköz-típusok fejlesztése különböző alapelv alapján és különböző jellegű folyószakaszokhoz kapcsolódóan indult el. Alapvetően három típust lehet megkülönböztetni, a doboz vagy kosár elvű, a tálca vagy ék alakú, és az úgynevezett nyomáskülönbségen alapuló mintavevőket.

A doboz vagy kosár jellegű eszközöknél a merev falú, felvízi irányba nyitott térbe az áramló víz belemossa a hordalékot a mintavevőbe. Hazai képviselője a Bogárdi-féle mintavevő berendezés. A típus fő problémája, hogy mivel komoly áramlási ellenállást képez, a felvízi nyílásnál ennek hatására lecsökken az áramlási sebesség, mely azt eredményezi, hogy a szállított hordalék egy része nem jut a mintavevőbe (Hydraulics Laboratory, University of Iowa, 1940).

A tálca vagy ék alakú mintavevők lényege, hogy a felső síkjukon nyílással rendelkező lapos ék alakú eszközök, amelyek alvízi irányba enyhe szöget zárnak be a mederfelszínnel, így az áramlás által az eszközre felhordott hordalék a nyíláson keresztül be tud jutni a csapdázóba (Csiti, 2018).

A nyomáskülönbségen alapuló mintavevők a kosár-mintavevők továbbfejlesztett változatai. Ezek felvízi és az alvízi oldalán is nyitott berendezések, amelyekhez alvízi oldalról egy jellemzően kis lyukátmérővel rendelkező háló kapcsolódik, ami a becsapdázott hordalékot fogja fel. A kialakítás lényege, hogy az alvízi oldal irányába a keresztmetszet bővül, melynek hatására nyomáskülönbség lép fel a belépő és a kilépő oldal között, ami szívóhatást eredményez, és ezzel csökkenti az eszköz áramlásra gyakorolt zavartó hatását. Napjaik legelterjedtebb görgetett hordalék mintavevője, a Helley-Smith-féle mintavevő (14. ábra), de a hazai Károlyi-féle mintavevő is ebbe a csoportba tartozik.



14. ábra Helley-Smith-féle görgetett hordalék mintavevő (forrás <https://www.hoskin.ca/catalog/images/BL-84.jpg>)



15. ábra Van Veen-féle mintavevő kanál (Forrás <https://www.environmental-expert.com/products/eijklkamp-model-043001>)

A direkt mérések hátránya az áramlás megzavarása miatti pontatlanság mellett, a kivitelezés nehézsége. A mintavevők jellemzően nehezek, mozgatásuk és megfelelő használatuk tapasztalatot és relatív nagy humán erőforrást igényel és bizonyos vízjárési körülmények (árvizek idején) között használatuk igen veszélyes is.

A mederanyag mintavétel bizonyos esetekben akár a görgetett mintavevő berendezéssel is történhet, de léteznek célzottan mederanyag-mintavételi eljárások is. A különböző eszközökkel lehet zavart, illetve zavartalan mintát is venni. Az általánosan legelterjedtebb eszköz a mintavevő henger, aminek a száj-kialakítása a mederanyag típusától függően lehet egyszerű kör, de akár csipkézett formájú is. Kis áramlási sebességek esetén gyakran alkalmazzák a Van Veen-féle mintavevő kanalat is (15. ábra). A meder rétegződésének vizsgálatához szükséges a zavartalan mintavétel, aminek a legelterjedtebb, bár költséges megoldása a fagyasztásos mintavételi eljárás.

A mederanyag és görgetett hordalékminták laboratóriumi szemcse-eloszlás mérése során a mintákat szárítószekrényben 105 °C-on tömegállandóságig szárítjuk, majd tömegmérés után szitálással választjuk szét a különböző frakciókat. Abban az esetben, ha a szitálási maradék 10%-nál nagyobb (szilt- és agyagfrakció), ülepitéssel, vagy más módszerekkel, pl. lézeres szemcseeloszlás vagy esetleg hidrométeres eljárással kell a finomfrakció (< 63 µm) szemeloszlását meghatározni (Koch & Koch, 2012).

A mintavételi és feldolgozási eljárások nehézsége és az informatikai fejlődés generálta az indirekt eljárások fejlődését a hordalékáramlás vizsgálatánál is. Görgetett hordalékmozgás esetén alapvetően kétféle eljárás van, amivel az áramlás megzavarása nélkül lehet információt

szerezni a hordalék áramlására vonatkozóan. Az egyik esetben a mederformák időbeni változásának detektálásával történik a hordalék viselkedésének vizsgálata (Willis & Kennedy, 1975), a másik eljárás pedig a virtuális sebesség módszere (Haschenburger & Church, 1998).

Az egyes mederformák időbeni változásának módszere a finom szemcsés és nagy hozamú hordalékáramlás esetén alkalmas megoldás, ahol a görgetett hordalék áramlása során jellegzetes és jól mérhető alakzatok (dűnék, bordák stb.) alakulnak ki a mederfenéken. Ezek mintázata a hordalék mozgása következtében folyamatosan változik, időről időre átalakul, így az egymást követő mederdomborzat felmérések lehetőséget adnak az elmozdulás vizsgálatára, és ebből a hordalékmozgás jellemzőinek meghatározására.

A virtuális sebesség módszerével a durva szemeloszlású hordalék mozgása is megfigyelhető. Az eljárás során a hordalékszemcsék sebességéből különböző, a mederanyagra vonatkozó paraméterek segítségével becsülni lehet a fajlagos hordalékhozam értékét. A módszer lelke gyakorlatilag a hordalék sebességének meghatározása, hiszen ez az a paraméter, ami a vízjárást követve leginkább változik. Erre két alapvetően eltérő lehetőség van, az egyik, amikor egyes részecskék mozgását követjük nyomon, pl. jeladóval ellátott „álkavicsok” használatával, vagy mozgóképelemzéssel. A másik pedig, amikor egy adott keresztmetszelyen áthaladó részecskék sebességét mérjük. Napjainkban, a hullámterjedés elvét (Doppler-hatás) kihasználó mérőeszközök (pl. ADCP (

16. ábra)) elterjedésével ez utóbbi megoldás széles körben elterjedni látszik.



16. ábra ADCP műszer (forrás <https://scientificservices.eu/item/direct-reading-acoustic-doppler-current-profiler/1519>)

3.5 Hidrodinamikai modellezés alkalmazása a hordalékszállítás vizsgálatánál

Napjainkban, a mérnöki gyakorlatban is egyre elterjedtebb a numerikus megoldók alkalmazása a különböző elemzési, tervezési feladatok során. A hidrodinamikai modellek fejlődésével ma már a víz áramlásának vizsgálata mellett a hordalékmozgások is jól vizsgálhatók. Egy, a meghatározott célnak megfelelő részletességgel és pontossággal felépített hidrodinamikai és hordaléktranszport modell megbízható eredményeket tud adni a morfológiai változások becslésére is.

A numerikus hidrodinamikai modellek (és az ezeken alapuló hordaléktranszport modellek) ún. fizikai alapú determinisztikus eljárások. Az analitikusan gyakorlatilag nem megoldható áramlási alapegyenleteket numerikusan oldják meg, adott diszkrét tér- és időlépésben, az adott áramlást meghatározó mellékfeltételek mellett.

A hordaléktranszport modellekkel alapvetően három különböző részletességű modellvizsgálatra van lehetőség, attól függően, hogy a folyamatot leíró alapegyenletek milyen térbeli megközelítést alkalmaznak. Az *1 dimenziós* modellek az áramlási főirány mentén teszik lehetővé a hordaléktranszport hatására kialakuló nagyléptékű változások becslését; lerakódások, kimélyülések jellemző keresztmetszvényeit mutatják meg. Ez az eljárás alapvetően árhullámok hatásának, árvízkarok becslésének, morfológiai változások tendenciájának meghatározására szolgál.

A *2 dimenziós* megoldás felszíni áramlások vizsgálatánál az áramlási paramétereket a vízszintes sík két irányában értelmezzük, a mélység menti változásokat elhanyagolva. Hordaléktranszport folyamatok esetén a síkbeli sebességkomponensek, felszínesítés mellett a hordalék-koncentráció eloszlását is a sík két irányában értelmezzük, és vizsgáljuk. Ezek a modellek hullámtéri területek, vagy öblözetek elöntésének vizsgálatára – feliszapolódások, kopolyák helyének meghatározására – alkalmasak.

A térbeli folyamatok részletes vizsgálatát a *3 dimenziós* modellek teszik lehetővé. Ebben az esetben a számítások a térbeli transzportegyenletek felhasználásával történik. Ezek a modellek adják egy adott jelenség legpontosabb és legrészletesebb leírását, de ezzel párhuzamosan a legnagyobb alapadatigénnyel is rendelkeznek, a modellezés számítási igénye pedig nagyságrendekkel nagyobb az előbbi eljárásoknál. Jellemzően helyi jelenségek, műtárgyak

körüli kimosódás, feliszapolódás; összefolyások, torkolatok részletes morfológiai változásainak vizsgálatára használják.

A Murára történt vizsgálatom célja a folyószakasz hordalékszállításának nagyléptékű elemzése volt, amihez 1 dimenziós (továbbiakban: 1D) modellezést használtam. A következőkben ennek az eljárásnak az alapegyenleteit mutatom be.

Az 1D megoldás esetén a transzportfolyamatok leírása számos egyszerűsítéssel él. Az áramlási paraméterek (változók) vizsgálata csak az áramlás fő irányában történik meg, az áramlási irányra merőleges vízszintes és függőleges irányban a változók homogén eloszlását tételezzük fel. Ez a megoldás térben és időben is nagyléptékű becsléseket tesz lehetővé, átlagos változások, tendenciák meghatározására alkalmas.

A 1D hidrodinamikai modellek alapegyenletei az ún. *Saint-Venant egyenletek*, ami a folytonossági és az impulzus egyenlet alábbi 1D felírásából állnak:

Folytonossági egyenlet, ami megadja az áramló víz, mint összenyomhatatlan folyadék térfogat- és mennyiségváltozása közötti összefüggést:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0$$

ahol: Q a vízhozam, A a nedvesített keresztmetszet (áramlási felület a számítási keresztmetszelen mentén), ∂t a számítási időlépés, ∂x a számítási pontok (keresztmetszelvek) közötti távolság.

Impulzus egyenlet, ami a víztestre ható erők és a mozgási energia egyensúlyát adja meg:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(Q^2/A)}{\partial x} + gA \left(\frac{\partial z}{\partial x} + S_E \right) = 0$$

ahol: g a gravitációs gyorsulás, z a vízmélység, és S_E az energiaveszteség.

Az 1D megközelítésben az áramlás energiaveszteségeit egy paraméterbe, a Manning-féle érdességbe sűrítjük. Ennek felhasználásával az S_E értéke az alábbi egyenlettel írható fel:

$$S_E = Q|Q| \left(\sum_{i=1}^n \frac{1}{K_i^2} \right)$$

ahol: n a nedvesített keresztmetszet (keresztmetszelen) eltérő ellenállású szakaszainak száma, K_i a vízzállítási együttható értéke a keresztmetszelen i -dik szakaszán, értéke:

$$K_i = k_i A_i R_i^{2/3}$$

ahol: k a Manning-féle érdesség együttható; R a hidraulikai sugár.

Az impulzusegyenlet ilyen formában történő felírása esetén feltételezzük, hogy az áramlás meghatározó erőhatások a nehézségi erő, a tehetetlenség és a súrlódás. Ez a feltételezés abban az esetben helytálló, ha az áramlás és a mederalak fokozatosan változó, a mederesés kicsi.

A hordalékmozgás modellezésére a legelterjedtebb eljárás a hidrodinamikai és hordalékfolytonossági folyamatokat leíró egyenletek összekapcsolása. Az 1D hordaléktranszport modellek a fent definiált hidrodinamikai modellekhez kapcsolódnak. A hordalékszállítás mértéke számos tényezőtől függ, melyek részben hidraulikai, részben a hordalékszemcsékre vonatkozó anyagi és alaki jellemzők, de még a víz fizikai tulajdonsági (hőmérséklet, sűrűség) is befolyásolják azt. A modellezés alapját – és ezzel a hidraulikai paramétereket – az áramlásmodell adja, a további tényezőket jellemzően átlagértékekkel, illetve egyszerűsített módon vesszük figyelembe.

A hordaléktranszport modellezések során három féle hordalék típust különböztetünk meg a keletkezésük helye szerint:

- bed material load / görgetett hordalék: a hordaléknak az a része, amely főleg a turbulencia következtében marad mozgásban, annak csökkenésekor kiülekszik és anyaga elsősorban a folyó saját medréből és partjaiból származik.

- suspended load / lebegtetett hordalék: A vízben lebegve, a vízsebességgel közel azonos sebességgel mozgó hordalék. A lebegtetett hordalékmozgás folyamatosabb, mint a görgetett hordalékmozgás, azonban a hordalékot lebegésben tartó erő állandóan változik, ezért a lebegtetve szállított hordalék szemcse összetétele és mennyisége állandó változásnak van kitéve.

- wash load: a lebegtetett hordaléknak a mederanyagnál jóval finomabb szemcséjű része, amely a duzzasztás nélküli folyószakaszokon állandó mozgásban van, és kiüledés nélkül átmegy a vizsgált szakaszon. A mennyiségét elsősorban a folyó vízgyűjtőterületéről származó kimosott hordalék határozza meg. Ennek a hordalékfrakciónak a szemátmérője függ az áramlás turbulencia jellemzőitől, az áramlási sebességek nagyságától.

A numerikus modellben a hordaléktranszport folyamat leírását az Exner-féle folytonossági egyenlet adja (Leliavsky, 1955, idézi Paola & Voller, 2005):

$$(1 - \lambda_p)B \frac{\partial \eta}{\partial t} = \frac{\partial Q_s}{\partial x}$$

ahol: λ_p az aktív réteg porozitása, B a keresztmetszeti szélessége, η a meder mélysége, Q_s a hordalékhozam.

A folytonossági egyenlet szerint a vizsgált mederkeresztmetszvények környezetében a bemenő és a kimenő terhelés kerül összehasonlításra. A keresztmetszeti változása a vizsgált szakaszon a beáramló és kiáramló hordalékhozam különbségével egyenlő. A beáramló hordalék mennyiségét a hordalék utánpótlódásának mértéke határozza meg (görgetett hordalék, lebegtetett hordalék). A kiáramló hordalék mennyisége az a hordaléktömeg, amit a víz a vizsgált szakaszon mozgásba hozni, illetve szállítani képes. A hordalékhozam különbsége arányos a mederváltozással. A hordalék folytonossági egyenlet a hordalékszállító képesség meghatározása segítségével oldható meg. Abban az esetben, ha a hordalékszállító képesség nagyobb, mint a bejövő terhelés (a hordalék utánpótlás mértéke), akkor hordalékhiány jelentkezik, amely a meder eróziójához, kimélyüléséhez vezethet. Ha a hordalék utánpótlódás nagyobb, mint a hordalékszállító képesség, azaz a készlet meghaladja a kapacitást, akkor hordaléktöbblet jelentkezik és az a meder feltöltődését okozza.

4 CÉLKITŰZÉSEK

A disszertációban bemutatott kutatásom célja alapvetően a Dráva magyar-horvát közös szakasz (Őrtilos és Drávaszabolcs között) jelenlegi állapotának feltérképezése, felhasználva a rendelkezésre álló korszerű eszközöket, szemléleteket, hogy ezzel egy, a jövőbeli vízgazdálkodási munkákat megalapozó tanulmány szülessen. A kutatás során felhasználtam és beépítettem a témához kapcsolódó kutatási eredményeimet is, amelyek megalapozták a konkrét kutatás irányát és módját, és jelentős hatással lesznek az elért eredmények további felhasználásában. A vizsgálatok során az alábbi kérdésekre kerestem a választ, illetve célokat tűztem ki:

1. A Drávába betorkolló mellékvízfolyás, a Mura folyó hordalékszállításának és mederváltozásának vizsgálata

A korszerű numerikus megoldások lehetővé teszik a hordaléktranszport folyamatok modellezését. A Dráva magyarországi szakaszára érkező hordalék a Murán keresztül érkezik. A Drávára készített morfológiai kutatás részeként, elkészítettem a Mura hazai szakaszának 1 dimenziós hordaléktranszport vizsgálatát.

2. -Bemutatni a vizsgált folyószakasz kanyarulatfejlettségi állapotát, a közelmúltban lezajlott változások elemzésével, a várható folyamatok előrejelzésével; összehasonlítva a kapott eredményeket hasonló kutatások eredményeivel.

Mivel a hordalékháztartás alapvetően egy folyószakasz morfológiai változásait befolyásolja, fontosnak tartottam megvizsgálni a legfrissebb mederfelmérés alapján a folyószakasz jelenlegi állapotát, elvégezni a jelenlegi morfológiai változások elemzését.

3. Egy részletes mederanyag feltérképezés elkészítése, ami a korábbi vizsgálatokhoz képest jelentősen több információval szolgál a vizsgált Dráva szakasz mederanyag összetételéről.

A vizsgált folyószakasz görgetett hordalék és mederanyag felmérésében hiánypótló terepi felmérést volt lehetőségünk végrehajtani, ami igen részletes eredményeket adott a folyószakasz megismeréséhez.

4. Elemezni a vizsgált folyószakaszon a sebességviszonyok és a mederanyag jellemzőinek összefüggését.

A modern áramlásmérés új lehetőséget kínál fel a görgetett hordalékmozgás határértékének meghatározására, ezt kívántam összevetni a klasszikus összefüggéssel.

5. A friss eredményekkel igazolni – pontosítani a Barcs térségében lévő eséstörés helyét összevetve a hordalék mérés eredményeivel is.

Célom a korábbi kutatások alapján meghatározott eséstörés igazolása a mederanyag összetétel és a legfrissebb mederfelmérés alapján.

5 KUTATÁSI MÓDSZEREK

5.1 Hordalékszállítás elemzése 1D hidrodinamikai modellezéssel

A Drávára végzett kutatást megalapozta a Mura folyó magyar-horvát szakaszának morfológiai vizsgálata. A Mura hordalékháztartása jelentős befolyással van a Dráva vizsgált szakaszára (Szlávik et al., 2012), hiszen a Murán érkezik a folyószakasz hordalékhozamájának jelentős része, különösen a folyó felvízi szakaszán létesült erőművek üzembe helyezése óta. A Murára elkészítettem egy 1 dimenzió hidrodinamikai és hordaléktranszport modellt, melynek segítségével vizsgáltam a folyószakasz morfológiai változásait (feliszapolódás, kimélyülés) a jellemző árhullámok levonulása esetén. E mellett sor került morfometriai paraméterek elemzésére, valamint a folyószakasz kanyarulatfejlődésének vizsgálatára is.

A feliszapolódás folyamatának vizsgálatára egy projekt keretében került sor, ahol 1D és 2D modellvizsgálatokat végeztünk. Az árterület feliszapolódásának modellezési feladataihoz a MIKE 11 GST szoftvert és a MIKE 2D FM szoftver Sand Transport modulját használtuk (Engi, 2016). Az általam végzett feladat a MIKE 11 GST szoftver alkalmazásával a döntéselőkészítés megalapozása volt, az 1D modell nagyobb léptékű eredményei támogatták a 2D modell továbbfejlesztését.

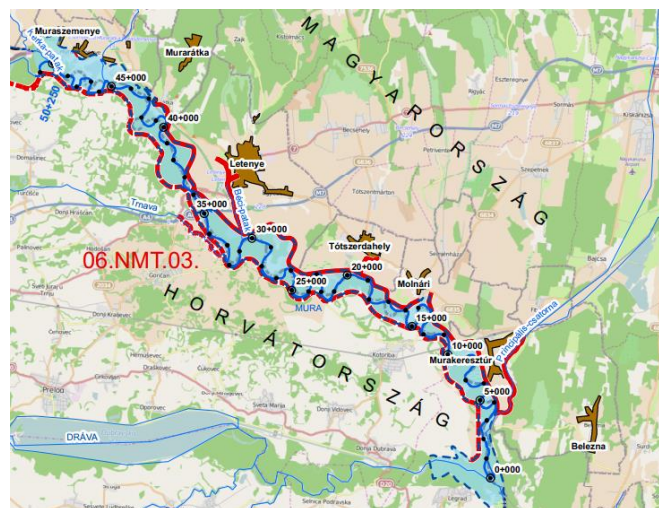
A hordalékkutatás nem rendelkezik egy általános érvényű összefüggéssel, ahogy erre már korábban is utaltam, így a modellező szoftverek is több elméleti összefüggést kínálnak a hordalék-transzport modellezésére. Az általam használt alkalmazás két megközelítést használ (DHI, 2014), a Van Rijn és az Engelund-Hansen egyenleteket. Tökéletesen egyik sem tudta leírni a folyamatokat, a Van Rijn módszer alábecsülte az eróziós és ülepedési folyamat eredményeit, míg az Engelund-Hansen transzport egyenlet realisabb értékeket adott, de egyes helyeken a mederszint előre jelzett eróziója, feliszapolódása irreális volt. Ennek ellenére, a szimulációk eredményei fontos információkat szolgáltatottak a meder morfológiai változásairól.

A projekt során a Murán 2009-ben levonuló árvíz, valamint több elméleti (mesterségesen definiált) árhullám során elemeztük a hordaléktranszport folyamatokat. A jól felépített, kalibrált és igazolt árvízi modellel sokféle vizsgálatot el lehet végezni. A 2D megközelítés már a hullámtéri területek hordaléktranszport folyamatainak vizsgálatát is lehetővé teszi, azonban a modellfuttatások kapacitásigénye megfontolt modellezés-tervezést igényel. A projekt során az én feladatom egy ehhez a részletes vizsgálathoz tartozó döntéselőkészítő vizsgálat volt,

melynek során felépítettem, kalibráltam és igazoltam egy 1D-s hordaléktranszport modellt, mellyel ezt követően több modell-változatot (scenáriót) elemeztem. A kutatási munkához, a modell felépítéséhez, kalibrálásához az adatokat a Nyugat-dunántúli Vízügyi Igazgatóság szolgáltatta.

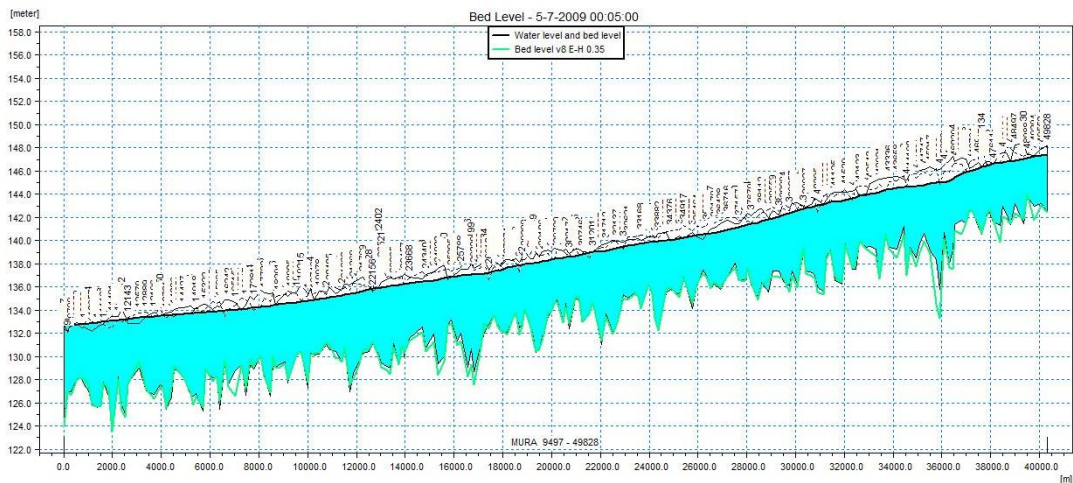
5.1.1 Az 1D hidrodinamikai modellezés alá vont mintaterület bemutatása

A 40 km-es folyószakasz hidrodinamikai és hordaléktranszport modellje a folyó alsó szakaszán, a nagyvízi mederre készült el (17. ábra). A modellterület lehatárolásánál figyelembe kellett vennem, hogy a modellfuttatásokhoz milyen alapadatok és számítógépes kapacitás állnak rendelkezésre, ezért az 1D modell alsó keresztszelvényének a 9+497 km szelvényt határoztam meg. A választott szelvény a Murakeresztúri árvízi készültségi fokozat visszavonó vízmércéje alatt kellően közel van, így a modell alsó peremfeltételéhez valós adatok álltak rendelkezésre. A modellezési terület felső határa a magyar-horvát-szlovén hármashatár térsége, a 49+828 km szelvény.



17. ábra A Mura folyó helyszínrajza (Forrás: 06. NMT. 03.5.1. Áttekintő helyszínrajz)

A számítások a Kerka patak torkolata alatt definiált peremfeltétellel indulnak, így annak vízhozama már figyelembe lett véve a modellben. Az 1D modell geometriájához felhasználtam a 2014. évi Mura Atlaszhoz készült terepi felvételeket. A modellgeometria összesen 217 keresztszelvény beépítésével készült. A szelvények között lévő távolság 200-500 m, a geodéziai felméréshez igazodva a kanyarulatokban sűrűbb, az egyenes szakaszokon ritkább keresztaszelvény kiosztással. A 18. ábra mutatja a modell hossz-szelvényét egy modellezési változat esetén.



18. ábra Az 1D hidrodinamikai modell hossz-szelvénye

5.1.2 Az 1D hidrodinamikai modellezés mellékfeltételeinek meghatározása

A kezdeti és peremfeltételekhez az 1D modell felépítése során a betorkolló vízfolyásokat nem vettem figyelembe, mivel a vizsgálat nagyvízi állapotban ezeknek a mellékvízfolyásoknak a vízhozama elhanyagolható. A modell felső peremfeltétele az érkező vízhozam, az alsó peremfeltétele pedig a kilépő vízszint volt.

A vizsgált folyószakaszon két vízrajzi állomás áll rendelkezésre, a Mura, Letenye és Murakeresztúr állomások (5. táblázat). A folyószakaszra vonatkozóan vízállás észlelés mindkét vízmércén, vízhozam észlelés pedig a letenyei vízmércénél történik.

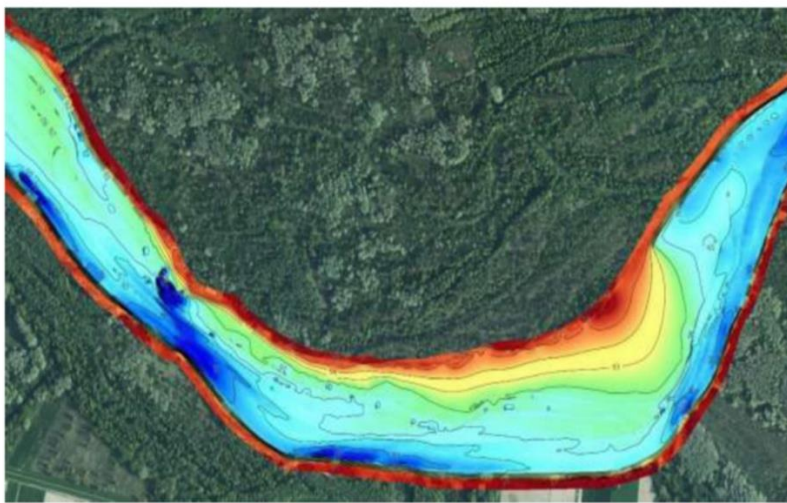
5. táblázat Modellezéshez felhasznált vízrajzi állomások adatai

Vízrajzi állomás	Letenye	Murakeresztúr
Szelvényszám (fkm)	35+600	10+300
EOV X	469132	481014
EOV Y	122254	115098
„0” pont magassága (mBf)	137,86	128,73

Az árhullám-levonulásra vonatkozó árvízvédekezési tapasztalatok alapján a letenyei vízhozamidősről kivetíthető a modellterület peremeire is. A levonulási idő a modell felső peremfeltétele (Muraszemenye) és Letenye között 3 óra, míg Letenye és Murakeresztúr között 6 óra.

5.2 Meanderfejlettségek lehatárolása, kanyarulati statisztika meghatározása

A vizsgált Dráva-szakasz a 161 km kiterjedésű, közös magyar – horvát folyószakasz, ami a Mura torkolat (236+000 fkm) és Drávaszabolcs (74+000 fkm) között helyezkedik el. A szakasz két jellemző részre osztható. A Barcs feletti, folyószabályozással kevésbé érintett szakasz erősen meanderező, közel természetes állapotú, míg az alsó, szabályozott szakaszon számos mederátvágással és árvízi töltéssel szegélyezett a vízfolyás. A szakasz morfológiai állapotának elemzéséhez egy, a magyar-horvát közös Dráva szakaszra 2019-ben készített domborzatmodellt használtam fel, amelynek egy részletét a 19. ábra mutatja be.



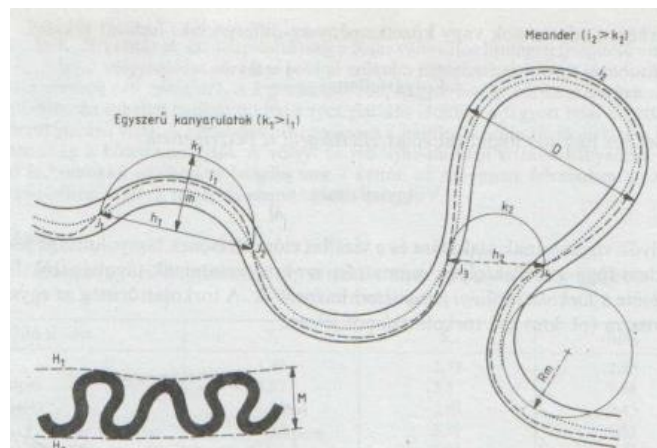
19. ábra Dráva terepmodell részlet (Halmai et al., 2018)

A domborzatmodell két adatsor felhasználásával készült: az elsődleges adatsor a Dráva medrének interferometrikus szonárral történő felméréséből származott, míg a másodlagos, kiegészítő adatsort egy korábbi LiDAR felmérés adta (Halmai et al., 2018), mely a meder jobb és bal partjának 25 méteres környezetét írta le 1–4 pont/m²-es sűrűségben. Az elsődleges adatsor egy Lowrance® StructureScan® 3D hidrológiai felmérésre átalakított, eredetileg rekreációs célú interferometrikus szonárfejjel került rögzítésre, melyhez a geodéziai helyadatokat egy GeoMax® Zenith35™ Pro Rover GSM RTK+ GNSS adta (Halmai et al., 2020). Az interferometrikus szonárok a csónak haladási irányára merőlegesen, 2×70°-os nyílásszögben pásztázzák a medret és erről a térrészről pontszerű, keresztiszelvényezéshez hasonló mélységadatsort adnak vissza, ~0,3 méteres, keresztirányú felbontásban, míg a haladás irányába eső felbontás 0,09 és 0,15 méter közt ingadozik, a haladási sebességtől függően. Mivel a 2×70°-os letapogatási nyílásszög még 4 méteresnek feltételezett vízmélység esetén is csak 22 méteres

pásztaszélességet jelent, ezért a Dráva lefedéséhez általában öt egymás melletti pászta rögzítésére volt szükség. A fenti két adatsorból hidrológiai modellezésre alkalmas, 1×1 méteres felbontású rasztert interpoláltak az ANUDEM domborzat-interpolációs eljárás segítségével (Hutchinson et al., 2011). Így az eredmény a meder, és a medret szegélyező 25 méter szélességű szárazulat szakadásmentes domborzatmodellje lett.

A terepmodell alapján (ArcGIS és QGIS szoftverek segítségével) létrehoztam a meder középvonalát és sodorvonalát a teljes vizsgált folyószakaszra. A klasszikus kanyarulati statisztikai vizsgálatot a folyószakaszok meghatározott középvonala alapján készítettük el a Magyarországon általánosan elfogadott eljárás alapján. Az eljárás szerint az egymást követő inflexiós pontok közötti folyószakaszok klasszifikálása az alapján történik, hogy a folyó tengelyvonalának és a két inflexiós pont összekötésével meghatározott húrnak hossza hogyan aránylik egymáshoz

A kanyarokat fejlettségük alapján csoportosítottam, ami a szakirodalmi mérőszámokkal történt (20. ábra). A változás nyomon követéséhez felhasználtuk a hivatalos folyó tengelyvonalat, ami 2013-2014-es mederfelmérés eredményeiből származnak (DÉDUVIZIG, 2021)



20. ábra A meanderek jellemző mérőszámai (Forrás: Borsy et al., 1992)

A 20. ábrán bemutatott mérőszámokat az alábbiak alapján alkalmazzuk (Borsy et al., 1992):

- középvonal: azon pontok halmaza a mederben, amelyek a két parttól egyforma távolságra vannak;
- ív hossz: a sodorvonal mentén mért távolság a kanyar inflexiós pontjai között, i_1-i_2
- húr: a meander inflexiós pontjait összekötő egyenes, h_1-h_2
- amplitúdó: a húr és a sodorvonal közötti legnagyobb távolság, merőlegesen mérve a húrra, m

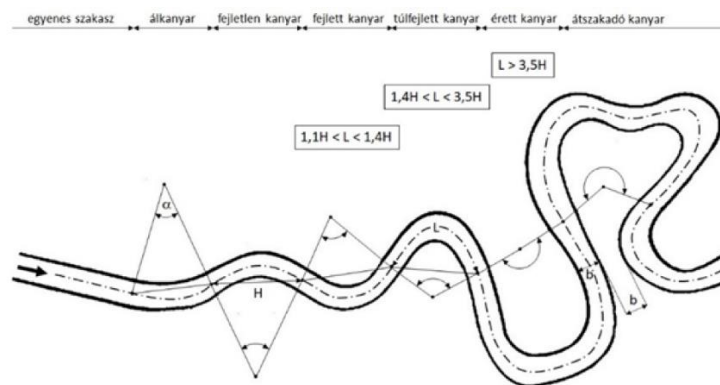
-a meander meder szélessége: 100 m-kénti szelvényezésben a középvonalra merőlegesen felvett metszék értékek átlaga, B

-a kanyarok görbületi sugara: annak a körnek a sugara, amely leginkább ráhelyezhető az inflexiós pontokra és a kanyar tetőpontjára, R_m

-inflexiós pont: a sodorvonal és a középvonal metszéspontja, J_1 - J_4

A kanyarulatok ívhosszának és húr hosszának alapján kiszámítottam a kanyarok fejlettségét (β) és besoroltam azokat a hat alaptípusba (Laczay, 1982), ahogy az a következő ábrán látható (21. ábra):

- álkanyar, ha a két szomszédos inflexiós pont látható egymásból a víztükör felett;
- fejletlen kanyar, ha $\beta < 1,1$;
- fejlett kanyar, ha $\beta = 1,1 - 1,4$ és a kanyarulati szög $< 120^\circ$;
- érett kanyar, ha $\beta = 1,4 - 3,5$;
- túlfejlett kanyar, ha $\beta > 3,5$;
- átszakadó kanyar, ha a szomszédos kanyarulatok ívei a mederszélesség kétszeresénél kisebb távolságban vannak.



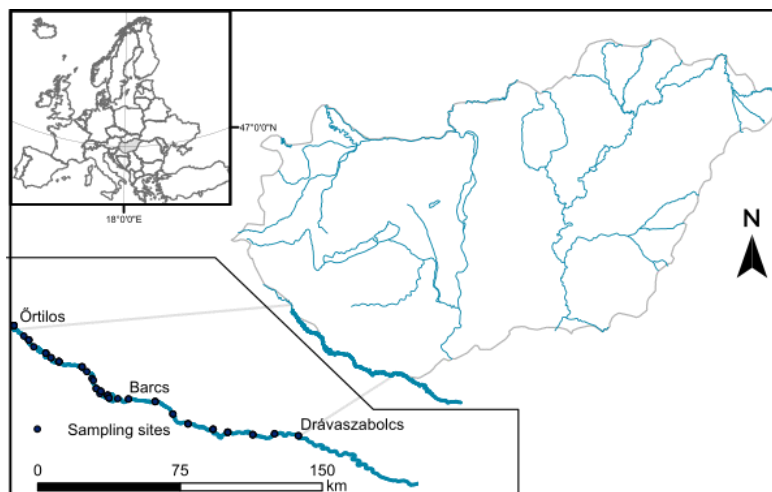
21. ábra Folyókanyarok fejlettségi jellemzői (Forrás: Laczay, 1982, idézi Hamvas, 1994)

Megvizsgáltam a legfrissebb felmérés alapján a folyószakasz esésviszonyait is. A szakirodalom Barcs felett egy markáns eséstörést jelöl (Lovász, 1972; Lóczy, 2019), melynek pontos helyét ez alapján a részletes felmérés alapján igazolni és pontosítani kívántam. A keresztmetszvények jellemző pontjainak felhasználásával előállítottam a folyó hossz-szelvényét, ami lehetővé tette ezt. A kapott eredményt összehasonlítottam a Drávára végzett terepi áramlás- és mederanyagmérés eredményeivel is, keresve ennek a jelentős morfológiai változásnak a hatását a mért eredményekre.

5.3 Mérési kampány

A 2019-ben kezdett kutatásunk során egyedülálló felmérést készítettünk, melynek során a Dráva magyar határvízi szakaszára, mintegy 165 fkm hosszban, áramlásmérésekre és hordalék-mintavételekre került sor (Pirkhoffer et al., 2021). 2019. augusztus 21. és szeptember 6. között végzett méréseink a folyó 236 fkm-től a 75 fkm-ig – Órtilostól Drávaszabolcsig – terjedtek (22. ábra).

A mérési kampány során összesen 30 keresztmetszvényben közel 90 mederanyag mintát vettünk. A folyó ilyen részletes áramlástanai és hordalék-mintavételezésére korábban még nem volt példa. A részletes felmérése lehetővé tette a folyószakasz morfológiai állapotának teljes körű feltérképezését. A vízfolyás ilyen jellegű hiánypótló kutatása és feldolgozása nagyon fontos a jövőre nézve, hiszen mind a természetvédelmi, éghajlatváltozási, ökoszisztéma-szolgáltatási, valamint a vízgazdálkodási és a tájgazdálkodási távlati célok szükségessé teszik a folyó lehetséges változásainak ismeretét.



22. ábra Terepi mérések és mintavételek helye

Figyelembe véve, hogy az éghajlatkutatások jellemzően szélsőségesebb vízjárást jeleznek előre – alapvetően a vízjárás kisvízi állapot felé való eltolódásával, valamint hevesebb és magasabb vízsinttel tetőző árvizekkel – a terepi méréseinket kisvízi állapotban végeztük el, feltételezve, hogy ezek az eredmények jobban illeszkednek a folyó jövőbeni általános állapotához.

A méréseket egy katamarán szerkezetű, 2 m széles és 6 m hosszú, alacsony merülésű alumíniumból készült csónakkal végeztük. A hajó két hajótestét egy kiálló keresztgerenda keret kötötte össze. Ez a kialakítás lehetővé tette a hajó gördülésének minimalizálását. Az alacsony merülés és a hátrafelé lekerekített hajótest miatt biztonságosan tudtuk megközelíteni a

folyópartokat. A hajó meghajtását egy 50 LE-s Yamaha csónakmotor (Yamaha Corporation, Hamamatsu, Shizuoka, Japán) biztosította, amelyet a keresztgerenda közepére szereltek.

A mintázás a csónak orrának közepére szerelt csörlős darura erősített mintavevő egységgel történt. A csónak bal oldalára helyeztük el az ADCP és a GeoMax Zenith35 Pro készüléket egymástól 50 cm-es távolságra. A helymeghatározást végző GPS készülék a vízfelszíntől 200 cm-re helyezkedett el.

Az áramlásmérést és hordalék mintavételezést megalapozták az 5.2 fejezetben bemutatott részletes szonár elvű, nagy felbontású mederfelmérés is (Halmai et al., 2020), és az 5.1 fejezetben ismertetett modellvizsgálat tapasztalatai. A terepi méréshez kapcsolódóan alkalmazott módszereket az alábbi alfejezetekben mutatom be.

5.3.1 Áramlásmérés

Az átlagosan 5 km-es szelvénytávolságban végzett áramlás- és vízhozammérést az akusztikus doppler elven működő, Teledynmarine-RD Instruments által gyártott Rio Grande 1200 kHz Broadband ADCP áramlásmérővel végeztük. A mérések során a berendezést GeoMax Zenith 35 Pro nagy pontosságú RTK GPS vevővel integráltuk, így a kapott eredmények a mederfenékhez képest meghatározott relatív koordináta-rendszer mellett a globális koordináta-rendszerben is helyükre kerültek.

Az alkalmazott ADCP műszer paraméterei a következők voltak: Mért sebességtartomány ± 5 m/s, maximum ± 20 m/s, a vízsebességhez viszonyított pontosság: $\pm 0.25\%$, abszolút értelemben legfeljebb ± 2 mm/s. Sebesség felbontása: 1 mm/s. Alkalmazott mélységi cellák száma: jellemzően 25, maximum 200 (automatikusan kiválasztva); cellaméret minimum 10 cm (automatikusan kiválasztva); mintavételi sűrűség jellemzően 1–2 Hz. Az általunk végzett méréssorozat során a vízmélység jellemzően 2,5 m és 4,5 m között volt. Ebben a tartományban a cellaméret 25 cm volt. A felszín közeli és a meder közeli ún. vak zóna (melyben a műszer nem méri az áramlási paramétereket) szintén automatikusan definiálódik, vastagsága a mérésünk során 80 cm körül adódott.

5.3.2 Hordalékmérés

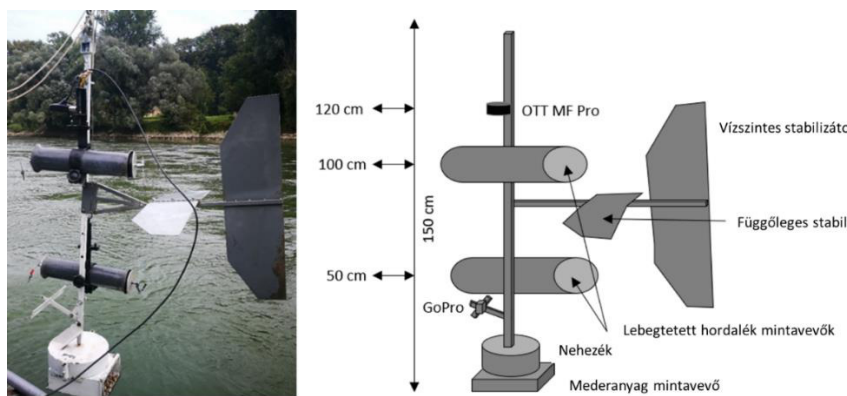
A hordalék mintavétel a csónak orrának közepére szerelt csörlős darura erősített mintavevő egységgel történt (23. ábra). A mintavételezés alatt a mérési hely megtartása tökéletesen nem volt biztosítható, így az egy függélyhez tartozó méréseink jellemzően egy legfeljebb 8 méter

sugarú körben valósultak meg. A mérési pontosság szoros összefüggésben volt a vízsebeséggel és a hajó áramláskorrekciós képességével.

A hordalék mintavételek mérési szelvényeit, a folyószakaszok morfológiai változásait is figyelembe véve, jellemzően 10 km távolságban választottuk, de a Barcs feletti kevésbé szabályozott szakaszon, az intenzívebb morfológiai folyamatok miatt sűrűbb keresztaszelvény kiosztást használtunk. Azokon a helyeken, ahol hirtelen változás volt megfigyelhető, a mintavétel sűrűsége akár 1,5 km-re is lecsökkent. Jellemzően keresztaszelvényenként 3–5 függélyben történt mintavétel, egy a sodorvonalban és kettő a partokhoz közel. A mérési szelvényekben a mintavételi helyek (függélyek) kiválasztása a keresztaszelvényben előzőleg elvégzett ADCP vízhozammérés és szelvényfelvétel alapján történt, a mozgóhajós áramlásmérés eredményeit, a szelvény alakját és áramlási tereit figyelembe véve.

A mérési koordináták meghatározása RTK GPS-vel történt 1–2 centiméteres pontossággal. A készüléket a csónak bal oldalára egy függélyben helyeztük el az ADCP mérőeszközzel.

A hordalékminta-vevő egység egy saját gyártmányú, a Dráva hordalékviszonyaihoz illeszkedő egyedi mérőeszköz volt, amely alkalmas egy merüléssel az adott függélyben mederanyag vagy görgetett hordalék, valamint lebegtetett hordalék mintavételre, két köztes mélységen (23. ábra)



23. ábra Hordalék mintavevő egység, az OTT sebességmérővel a két lebegtetett hordalék mintavevő hengerrel, valamint mederanyag- illetve görgetett mintavevő szerkezettel (mintagyűjtő zsák nélkül és vízalatti kamera nélkül) (saját szerkesztés)

A mintavevő alján, a 30 kg-os ellensúly alá egy levehető textil gyűjtőzsákkal felszerelt görgetett-hordalék vevő helyezkedik el, melynek szájnílása 26×15 cm, a textil zsák űrtartalma pedig kb. 12 l volt. A mérőeszköz kialakításánál figyelembe vettük a korábbi ismert Dráva méréseknél használt Helley-Smith mintavevők felépítését (Szlávik et al., 2012). Az ellensúly feletti konzolon kaptak helyet a görgetett-hordalék-mintavevő száját megfigyelő GoPro kamera és a

hozzá szükséges megvilágító LED-lámpatestek. A kamera felvételei alapján lehetőségünk volt a fenékhordalék textúrájának, valamint mozgásának in situ meghatározására is. A kamerakonzol felett, az iránylapátok alatt és felett, egymástól 150 cm távolságra helyezkedtek el a lebegtetthordalék-mintavevő hengerek. A lebegtetthordalék mintázásra használt mintavevők működési elve követte a van Dorm hordalék-mintavevő berendezését, méretében azonban eltér attól. A mintavevő további eleme volt egy OTT MF Pro (OTT HydroMet GmbH, Kempten, Németország) pontbeli vízsebesség mérő műszer (24. ábra). A műszer segítségével határoztuk meg a függélyben a mérési pontokhoz tartozó mélységet, valamint a kijelzett sebességértékek alapján a lebegtetthordalék mintavevő zárásának alkalmas idejét, melyet az észlelt vízsebesség állandósulása után hajtottunk végre. Ez utóbbira azért volt szükség, hogy a mintavétel egy relatív nyugalmi helyzetben történjen, a mintavételt ne zavarják meg a mérőeszköz mozgatásából származó helyi áramlási eltérések.



24. ábra OTT MF Pro vízsebességmérő eszköz (forrás: <https://www.deltafix.dk/produkt/ott-mf-pro/>)

A mintavételi eljárás alatt függélyenként mederanyag és lebegtetthordalék mintavételre volt lehetőségünk, mivel a görgetthordalék mintavétel adott áramlási viszonyok mellett nem adott értékelhető eredményeket. A függély mélységétől függően a lebegtetthordalék vételére 2–7 pontban került sor, de a jellemző mérési pontszám 5 volt. Kutatásomhoz a mederanyag-mintákat dolgoztam fel, a lebegtetett hordalék adatok elemzése túlmutat a disszertáció témakörén.

5.3.3 Laboratóriumi mérések

A Pécsi Tudományegyetem (PTE TTK) Talajtani Laboratóriumába szállított mederanyag mintákat súlyállandóságig szárítottuk 105°C-on. A szemeloszlás meghatározása előtt a

mintákból eltávolítottuk a nagyobb méretű szerves anyagmaradványokat, mint pl. a kagylókat, folyami rák tetemeket, növényi részeket.

A fenékhordalék minták 250 mikrométer feletti frakcióját FRITSCH (FRITSCH GmbH, Idar-Oberstein, Németország) szitator és rázó gép (FRITSCH Analysette 3 Pro) segítségével száraz szitáltuk 16, 8, 4, 2,8, 2, 1, 0,5 és 0,25 mm-es lyukbőségű és 20 cm átmérőjű analitikai szitákon 2 percig. A finomfrakciót a barcsi szelvény (155 fkm) görgetett hordalék mintáin Szentágothai János Kutatóközpontjának Geoanalitikai Laboratóriumában található Malvern 3000 (Malvern Inc., Malvern, Anglia, Egyesült Királyság) típusú lézerdiffrakciós műszerrel határoztuk meg, mivel a korábbi mérések alapján ebben iszapfrakció volt jelen. Ehhez a Hydro LV nedves diszpergáló egységet használtuk. Ezekon az üledékmintákon semmilyen savas kezelést nem végeztünk. A mintaelőkészítésnél 3 gramm mintát egy 50 ml térfogatú főzőpohárba helyeztünk, majd desztillált vízzel felengedtünk. A szilt és agyagszemcsék diszpergálásra kerültek. A méréseket háromszor futtattuk végig, melyhez a műszer egy negyedik átlagot számolt. A hordalék paramétereiket az így nyert átlagértékkel számoltuk.

5.3.4 Térinformatikai adatfeldolgozás

A mért textúra és szemeloszlás adatokból térinformatikai eszközökkel is vizsgáltam a térbeli eloszlását. ArcGIS 10.4.1.-es szoftver segítségével eloszlástérképeket készítettem. A pontbeli adatokból Thiessen-polygonok segítségével interpoláltam az eredményeket melyeket aztán tematikus térképek formájában jelenítettem meg.

5.3.5 A keresztshelvény-átlagolt fenékcúsztató feszültség számítása

A görgetetthordalék mozgásának vizsgálata során az egyik fontos kérdés a mederanyag mozgásba lendülésének kérdése. A Shields-számot (megindulási paramétert) gyakran használják a mederanyag elmozdulásának jellemzésére. Ennek számítása tapasztalati képlettel történik. Felhasználva az áramlásmérés során gyűjtött paramétereket, ezt a küszöbértéket két különböző módszerrel határoztuk meg. Az első módszernél, a továbbiakban „becsült Shields-szám”, a mérési kampány során végzett ADCP-méréseket használtam fel, míg a második módszer („számított Shields-szám”) az elméleti összefüggés szerint a vizsgált keresztshelvény előtti és utáni szakaszok általános hidraulikus paraméterein alapult.

6 EREDMÉNYEK

6.1 Morfológiai modellezés a Mura folyó alsó szakaszára

A morfológiai változások tekintetében fontos szerepet kapnak a folyószakaszon levonuló árhullámok, melyek során a megnövekedett elragadó erő képes markáns változásokat előidézni a mederben és a hullámtéri területeken. Az elmúlt időszakban, a kutatás ideje alatt nem érkezett a Dráván olyan árhullám, ami lehetővé tette volna a jelenség terepi megfigyelését és mérését, és ezzel összefüggésben ennek további kutatása is a jövő feladata lesz. Ebben a fejezetben szeretném azonban bemutatni azt a hordaléktranszport vizsgálatot, ami mintegy előtanulmánya volt a Drávára tervezett hordaléktranszport modellezésnek. 2016-ban lehetőségem volt részt venni egy, a Mura alsó szakaszára készült kutatásban. Az ott elért eredmények kapcsolódnak a drávai kutatásomhoz és meg is alapozták azt, a terepi mérések tervezésével kapcsolatban.

A Mura a Dráva legjelentősebb mellékfolyója és a Dráva Örtilos és Barcs közötti szakaszának görgetetthordalék-háztartását jellemzően a Murán érkező hordalék határozza meg, ahogy erről a 3.1.3 fejezetben már volt szó. Ennek két oka is van, az egyik az, hogy a Dráva legnagyobb mellékfolyójaként a vízgyűjtő jelentős részéről származó hordalékot a Mura szállítja (Szlávik et al., 2012), a másik pedig, hogy a Dráva Mura torkolat feletti szakaszán a vizsgált folyószakasztól alig 20 km-re van a legalsó vízerőmű, amely a Dráva felsőbb szakaszáról származó görgetett hordalékot és a lebegtetett hordalék egy jelentős részét is felfogják, így abból az irányból már nincs utánpótlás. Ezen okok miatt a Dráva vizsgált szakaszán a hordalékháztartás vizsgálatához szervesen kapcsolódik a Mura alsó szakaszán kialakuló hordalékszállítási jellemzők ismerete is. Ezek az ismeretek segítenek megérteni az érkező hordalék- és a hordalékmozgás jellemzőit is.

A bemutatott modellvizsgálat során nyert tapasztalatok a Drávára végzett mérési kampányt is megalapozták, hiszen lehetőséget adtak arra, hogy a monitoring során figyelembe vegyük a numerikus modellezés keltette adatigényt is.

A magyar–horvát Mura szakasz 40 km hosszú részére készített hidrodinamikai és hordaléktranszport modellezés az volt, hogy vizsgáltuk, hogy az árhullámok idején az érkező hordalék milyen mértékben ülepedik ki a hullámtéren, illetve, hogy a jellemző hordalékmozgás milyen hosszútávú morfológiai változásokat okoz. A vizsgálatot az indokolta, hogy a Mura alsó szakaszán az utóbbi években az árhullámok sokkal magasabb vízállás mellett vonulnak le

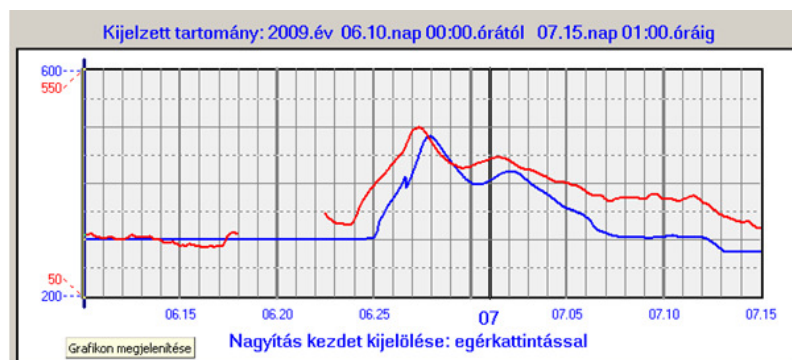
ugyanazon vízhozam érték mellett, a becslések szerint kb. 300 m³/s-mal csökkent a hullámtér levezető kapacitása (Engi et al., 2016a; Engi et al., 2016b; Engi, 2016). A megfelelő árvízvédelmi beavatkozások tervezéséhez elengedhetetlen, hogy ismerjük az ártér jelenlegi fejlődési viszonyait, esetleges feliszapolódásának mértékét és sebességét, mivel egész más jellegű beavatkozást kell tervezni abban az esetben, ha a folyó hordalékszállítási egyensúlya borult fel.

Egy hordaléktranszport modullal kibővített árvízi hidrodinamikai modellel lehetőség van az árvizek utáni feliszapolódásokat vagy kimosódásokat, a meander-vándorlásokat és átszakadásokat, tervezett műtárgyak hatásait vizsgálni. A teljes körű vizsgálat 1D és 2D modellekkel történtek. Mivel a 2D hordaléktranszport modellezés számítási ideje jelentős, 1D hordaléktranszport modell segítségével döntéselőkészítő vizsgálatot végeztem, melynek célja az volt, hogy előzetesen kiszűrjem az irreális eltéréseket adó változatokat és optimalizáljam a részletes, 2D modellezést igénylő vizsgálatokra érdemes változatok számát (Engi & Ficsor, 2020).

6.1.1 Az 1D hidrodinamikai modell kalibrálása és igazolása

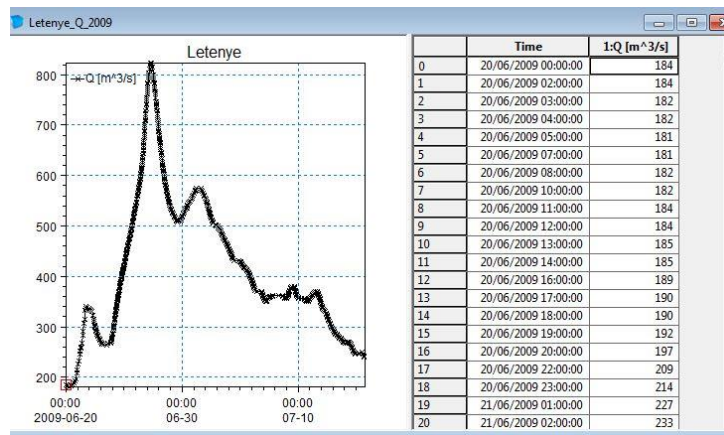
Az 1D modellezésnél a számítási keresztmetszelyekben egy átlagos vízszint értéket határozunk meg, a keresztáramlások nem vizsgálhatók. Minden, az áramlással szemben fellépő ellenállás, a mederérdesség paraméterben jelenik meg, ahogy erről a 3.5 fejezetben már volt szó. A modellezés során az érdességi tényezőt a keresztmetszelyek mentén két értékkel határoztam meg, egyik a főmederre, a másik pedig a hullámtéri területekre vonatkozott. A meder érdessége a kalibrálást követően 20 – 30 m^{1/3}/s között, a hullámtéré pedig 20 m^{1/3}/s értéknek adódott.

A modell kalibrálásához a 2009. évi árhullámot használtam fel, melynek vízállás idősorait a 25. ábra szemlélteti:



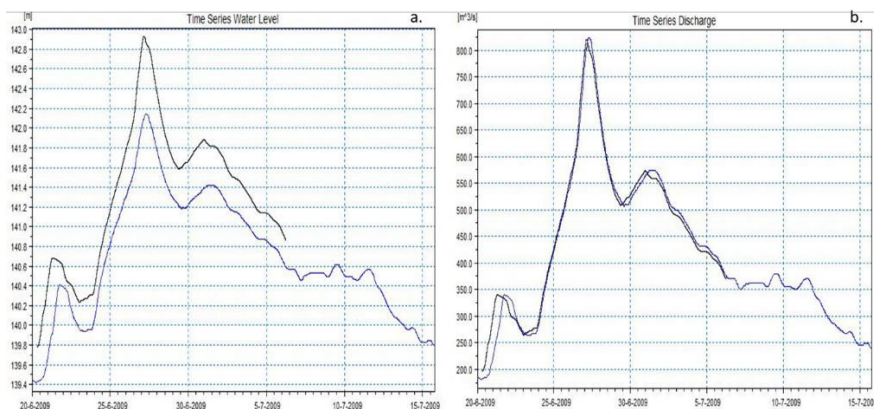
25. ábra A 2009 évi árhullám vízállás értékei Letenye és Murakeresztúr állomásokon (forrás: NYUDUVIZIG)

Az árhullám 2009.06.23 - 07.05. között vonult le. Az éves nagyvízi statisztikai vizsgálat alapján a 423 cm letenyei tetőzés H20% körüli értéknek felelt meg, tehát átlagosan 5 évenként előforduló tetőző vízállást észleltek. A 828 m³/s letenyei tetőző vízhozam (26. ábra) Q30% körüli jellemző értéknek felelt meg, tehát az árhullám során átlagosan 3,5 évenként visszatérő tetőző vízhozam vonult le. Ugyan a 2009. évi árvíz nem érte el a Q1%-os tetőző értéket (1650 m³/s), ennek ellenére magasabb vízállásokkal vonult le kisebb vízhozam érték mellett. Ez a jelenség felhívta a figyelmet az ártéri vízszállítóképesség jelentős csökkenésére.



26. ábra A 2009 évi árhullám vízhozam időszora

Sajnos az árvíz során vízszint rögzítés nem történt, így a modellezéshez csak a vízmércéken észlelt vízállásokat tudtam ellenőrző adatként felhasználni. Összehasonlítottam a mért és számított vízállás (27. ábra, a rész), illetve vízhozam (27. ábra, b rész) értékeket a Letenye vízmércén. Minthogy a keresztshelvényeknél éltem a bal és jobb part megjelölésének lehetőségével, ezzel korlátokat szabtam, így csak az alakhelyességet vizsgáltam a vízállás esetén.



27. ábra Modellezett (fekete) és mért (kék) idősoroka a Mura, Letenye vízmérce szelvényben; a.: vízállás, b.: vízhozam

A MIKE11 program kínál még egy ellenőrzési lehetőséget a levonuló árhullám tömegének levonulására. Ez alapján az árhullám mért és számított tömege közötti eltérés 1% alatti.

A modell igazolását a 2005-ben levonult árhullámra végeztem el. Ez az árhullám, az éves nagyvízi statisztikai vizsgálat alapján H2% körüli tetőző vízállás értéknek felelt meg, az 509 cm letenyei maximálás vízállással, tehát átlagosan 50 évenként előforduló árhullám volt. Az 1175 m³/s tetőző vízhozam a Q7,5% jellemző érték körül volt, tehát átlagosan 13 évenként előforduló árhullámnak felel meg.

A vízhozamok megfelelően jó egyezést mutattak, a vízállásoknál pedig szintén az alakhelyességre törekedtem. Az ily módon előkészített, kalibrált és igazolt hidrodinamikai modellel végeztem el a hordalékszállítás vizsgálatát.

6.1.2 Az 1D hordaléktranszport modellezés eredményeinek bemutatása

Ahogy arról már korábban is szó volt, az 1D modellezés célja az volt, hogy megismerjük több változatra a mederfenék változás jellegét és mértékét, ezzel is elősegítve a 2D hordalékszálítási modellezés során vizsgálandó szemeloszlás és empirikus modell kiválasztását.

A hordaléktranszport vizsgálatokhoz a kalibrált hidrodinamikai modell határ- és peremfeltételeit, valamint a modellparamétereket ki kellett egészítenem az alábbiakkal, melyeket a NYUDUVIZIG, mint a vízfolyás kezelőjétől kapott információk alapján határoztam meg:

- Hordalék után pótlódás mértéke;
- Jellemző szemcseátmérő: a szemeloszlási görbe középértéke (d_{50});
- A hordaléktranszport szempontjából aktív és passzív réteg jellemzői;
- Relatív sűrűség (értéke: 2,65);
- Porozitás (értéke: 0.35);
- Alkalmazott hordaléktranszport egyenlet;

A felső és alsó peremfeltételhez egyenlő utánpótlódó hordalékhozamot feltételeztem, ami annyit jelent, hogy a szállított hordalék mennyisége a modell felső és alsó peremfeltételeiből számítható. Az aktív réteget 0,1 m-re, a passzív réteget pedig 5 m-re vettem fel, és mindkét rétegben meghatároztam a szemeloszlás-frakciók százalékos arányát.

A jellemző szemcse átmérő és az alkalmazott transzportegyenlet a vizsgálat változatok függvényében változó volt. A szoftver által felajánlott összefüggések közül a Engelund-Hansen és a Van Rijn egyenleteket használtam, mivel a szakirodalmi kutatásaim alapján ezek a leginkább elfogadott és a hasonló vízfolyásokon alkalmazott elméleti összefüggések. A két egyenlet között az alapvető különbség az, hogy az Engelund-Hansen egyenlet a lebegtetett és görgetett hordalékot egyben, míg a Van Rijn összefüggés külön számítja.

A modell vizsgálatok előkészítése során először 16 modell-változatot határoztam meg, majd az előzetes futtatások után a vizsgálat körét 8 realiztikus kombinációra szűkítettem. A vizsgált változatok esetén kétféle jellemző szemcseméret (d_{50}); homogén, illetve összetett szemeloszlás; valamint kétféle transzportegyenlet kombinációit definiáltam (6. táblázat). Az osztályozott szemeloszlás esetén három különböző szemcseméretet használtam, a következő arányban: 0,5mm 15%, 2mm 65%, 10mm 20%. A változatok létrehozásánál a transzportfolyamat leírását is figyelembe vettem, így voltak változatok, ahol a Van Rijn, és voltak, ahol a Engelund-Hansen egyenleteket használtam.

6. táblázat A modellezési változatok adatai

Futtatási változat	Jellemző szemátmérő (d_{50})		Szemösszetétel		Transzportegyenlet	
	2 mm	6 mm	homogén	összetett	Engelund-Hansen	Van Rijn
v2	+		+		+	
v3		+	+		+	
v6	+		+			+
v7		+	+			+
v10	+			+	+	
v11		+		+	+	
v14	+			+		+
v15		+		+		+

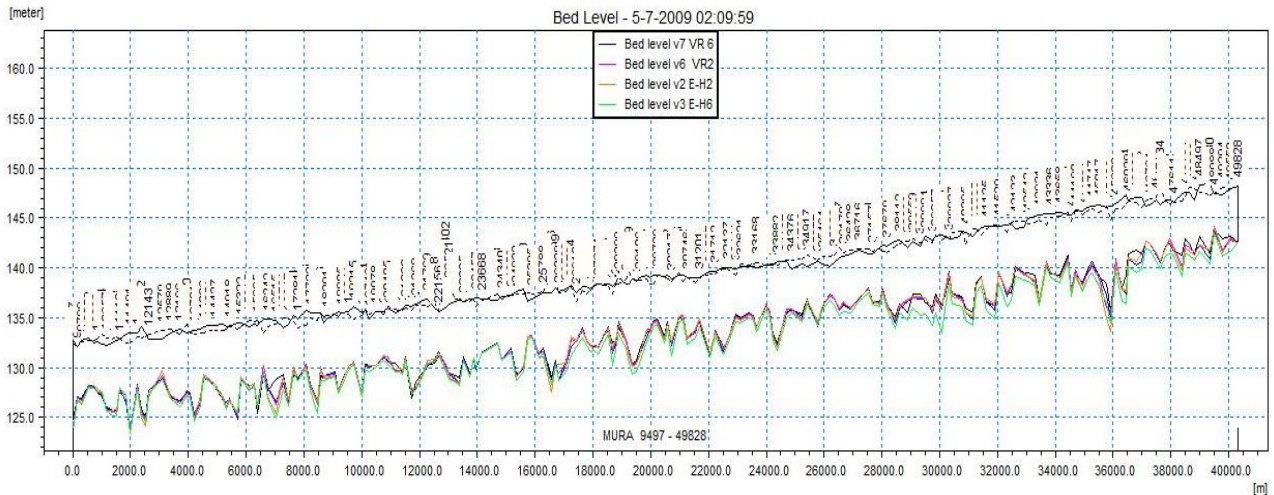
Az egyes futtatási változatoknál a hordaléktranszportra vonatkozó számítási eredményeket az árhullám apadó ágának egy jellemző pontjára vizsgáltam, és ehhez tartozó mederváltozásokat hasonlítottam össze a kiinduló állapottal.

A szimulációk eredményeit a mederfenék geometria-változás értékeinek eltérése alapján értékeltem (7. táblázat). A táblázatban az adott változatra a teljes vizsgált folyószakaszon számított legkisebb: Min (m) és legnagyobb: Max(m) mederváltozás értékét lehet látni.

7. táblázat A szimulációk során kimutatott legnagyobb eltérések értékei a mederfenék geometria változás során

Változat	v2	v3	v6	v7	v10	v11	v14	v15
Min (m)	0.075	0.048	0.029	0	0.075	0.075	0.009	0.009
Max (m)	3.334	3.836	2.468	2.212	3.843	3.843	2.214	2.214

Az értékelések azt mutatták, hogy a v10, és v11, valamint a v14 és v15 szimulációk eredményeinek értékei azonosak, a modell nem mutatott érzékenységet a jellemző szemátmérőre. Ezért ennek a négy változatnak a részletes vizsgálatát nem tartottam indokoltnak. A 28. ábra a négy, 2D modellezésre javasolt változat, a v2, v3, v6 és v7 szimulációk eredményeit mutatja be. A további részletes eredményeket az 1. Függelék tartalmazza.



28. ábra A mederfenék változás a v2, v3, v6 és v7 szimulációk alatt 2009.07.05.napján 2 óra 09 perckor

Az alkalmazott transzport egyenletek tekintetében azt tapasztaltam, hogy a Van Rijn transzport leírás az Engelund-Hansen eljáráshoz képest kb. 1,5 m-rel kisebb változást eredményez. Ezért a helyszínt ismerő szakemberek segítségével átnéztük a helyszíni szemlék jegyzőkönyveit, a régi archív feljegyzéseket, és ily módon ellenőriztük hogy a kapott eredmények realiztikusak-e. Mivel a feljegyzések alapján nem lehet egyértelműen kiemelni egyik elméleti összefüggést sem, így ennek a kérdésnek az eldöntése a 2D modellezésre maradt, részletes eredmények tükrében.

A 2D modellezés során több árhullám levonulása esetén kialakult feliszapolódási folyamat került vizsgálatra a főmederre és a hullámtéri területekre kiterjedően (Engi, 2016). A

vizsgálatok alapján a Mura hullámterére jellemzően 1,17 cm/év feliszapolódási sebességet határoztunk meg.

A kapott eredményt összehasonlítottam a más kutatások eredményeivel: A Tisza menti ártéren végzett feliszapolódás vizsgálat előtérbe került az országos Vásárhelyi Terv Továbbfejlesztése kapcsán (VTT). A hosszútávú vizsgálat a 19. századi szabályozási munkák után évektől követi nyomon a feliszapolódás mértékét, a mederszintnek a VO szelvényekben történt rendszeres mérések alapján. A vizsgálatok azt mutatják, hogy a Közép- és Alsó Tiszán az 1838–1957. évek közötti időszakban a feltöltődés 0,6–1,3 cm/év volt (Károlyi, 1960). Szlávik (2001) szerint 1976–1983 közötti időszakban a hullámterén átlagosan 1 cm/év volt az emelkedés, míg a nehézfém markerek segítségével történt kutatás 0,9–1 cm/év értéket mutatott erre az időszakra (Szabó & Posta, 2008). Az 1889–2005 időszakban több szelvény vizsgálata alapján 0,29–0,75 cm/év feltöltődést diagnosztizáltak a folyó hullámterén (Sándor & Kiss, 2006). A Maros mentén a hullámterén 0,2–0,6 cm/év, a holtágakban pedig 1,3–2,4 cm/év a feliszapolódás sebessége (Oroszi, 2009).

Az eredményekből az látható, hogy a modellezett feliszapolódás értéke a Murára kicsit magasabb, mint a bemutatott Tisza és Maros folyóknál tapasztalt érték. Figyelembe véve azonban a folyók eltérő hullámterei jellegét és a kicsit különböző hidrológiai és morfológiai viszonyokat, úgy gondolom, hogy a Mura hullámterének feliszapolódása nem tér el szignifikánsan a magyarországi többi folyó hullámterei folyamataitól.

A vizsgálataink azt mutatták, hogy Mura alsó szakaszának feltöltődése egy lassú folyamat, az árvízi hozam magasabb vízállás mellett történő levonulását a feliszapolódás helyett inkább az ártér növényzettel való benőttsege okozza. Ennek következtében véleményem szerint a 3.1.3 fejezetben bemutatott eredmények a Mura által szállított hordalék mennyiségére vonatkozóan (10. ábra) napjainkban is elfogadható becslést jelentenek a Drávába érkező hordalékmennyiséggel összefüggésben.

Korábban már utaltam arra, hogy a folyószakaszon korábban nem voltak ezt a folyamatot célzó mérések, ezért is kellett ezt a folyamatot modellezéssel becsülni. A modellezett 1,17 cm/év feliszapolódás a Drávába érkező hordalékmennyiség szempontjából nem jelentéktelen mennyiség, így a Dráva hordalékháztartásának jövőbeni vizsgálata miatt nagyon fontos lenne olyan méréseket végezni, amellyel ez a mennyiség pontosítható lehetne.

6.2 Meander-fejlettségek lehatárolása, kanyarulati statisztika meghatározása

6.2.1 A Dráva Órtilos – Drávaszabolcs közötti szakaszának vizsgálata

Az 5.2 fejezetben bemutatott terepmodell alapján (ArcGIS és QGIS szoftverek segítségével) létrehoztuk a meder középvonalát és sodorvonalát is a teljes vizsgált folyószakaszra, a 70–236 fkm szelvények között. A Dél-Dunántúli Vízügyi Igazgatóságtól beszerzett, 2013–2014-es adatokból származó hivatalos középvonal és az általunk generált új jellemző vonalak felhasználásával megvizsgáltuk, hogy a 2013–2018 közötti időszakban milyen változások figyelhetők meg a folyó lefutásában. Az érvényben lévő és az új felmérés szerinti középvonal eltérései megmutatták azokat a szakaszokat, ahol a két mérés ideje közötti időszakban jelentős medervándorlás volt. Az értékeléshez az elérhető GoogleEarth légifelvételeket is felhasználtuk.

A vizsgálat során meghatározott új középvonal alapján elvégeztük a klasszikus mederfejlettségi vizsgálatot a folyószakaszra, melynek során a folyókanyarulatok fejlettségi szintjeit határoztuk meg, a Magyarországon általánosan elfogadott eljárás (Laczay, 1982) alapján. Az eljárás szerint az egymást követő inflexiós pontok közötti folyószakaszok klasszifikálása az alapján történik, hogy a folyó tengelyvonalának (mint ívhossz) és a két inflexiós pont összekötésével meghatározott húrnak a hossza hogyan aránylik egymáshoz.

A morfológiai változások vizsgálatát többféle módon is meg lehet közelíteni. A medervándorlás megfogható a partvonalak változásának detektálásával (Kiss & Andrási, 2019) vagy a folyó középvonalának, sodorvonalának elmozdulásával. Az előbbi inkább ökológiai, utóbbi pedig inkább mérnöki megközelítés. A folyószakasz morfológiai értékeléséhez én ez utóbbit használtam. Megvizsgáltam az érvényben lévő hivatalos középvonal és a 2018-as mederfelmérés alapján szerkesztett középvízi meder tengelyének viszonyát.

A Barcs alatti folyószakaszon a két vonal tulajdonképpen egymáson fut, ami nem is meglepő, hiszen ezen a szakaszon (70–155 fkm között) gyakorlatilag teljes mértékben szabályozott a vízfolyás, sarkantyúk, vezetőművek, partbiztosítás váltják egymást (DÉDUVIZIG, 2021). A Barcs feletti folyószakaszon azonban vannak jelenleg is aktívan mozgó mederszakaszok (29. ábra).



29. ábra Folyó tengelyvonalának eltérése a 2013-14 (folytonos vonal) és a 2019-es felmérések (szaggatott vonal) alapján, a: 184 – 188 fkm, b: 209 – 219 fkm, c: 233 – 234 fkm, (saját szerkesztés)

Az első markáns eltérés Heresznye térségében a 184–188 fkm közötti szakaszon van (29. ábra, a rész), ahol két egymást követő kanyarulatban bal majd jobb oldal irányába fejlődnek a kanyarulatok. A következő jól látható eltérés a 209–219 fkm szakaszok közötti térségben jelentkezik (29. ábra, b rész), ahol a 214 – 215 fkm között a folyás irány szerinti jobb majd bal parti sarkantyú sorok erősen korlátozzák a mederfejlődést, aminek hatása mind a felvízi mind az alvízi irányban kb. 5 km-es szakaszon érzékelhető. A 233–236 fkm közötti szakaszon is megfigyelhető a középvonal balra történő eltolódása (29. ábra, c rész). Ezen a szakaszon egy éles bal kanyart vesz a középvízi meder, és a mederfelmérés alapján jól látható a sodorvonal dinamikája, ami vélhetően kanyarulati tetőpont térségben a jobb parton vélelmezett partbiztosítás miatt alakult ki, amire a műholdfelvétéléből lehet következtetni. Itt jól látható a jobb parton, ahogy a víz megbontotta a partot, íves partvonalat kialakítva, melyekből folyásirányban haladva három is látható. Az első két esetben a növényzet már megtelepedett a part vonalában, míg a harmadik, vélhetően a legfiatalabb képződmény, még „csupasz”. A Google felvételen a víz fodrozódásából az is látható, hogy ennél a partszakasznál erős áramlás alakul ki. Ezt igazolja a mederfelmérés is, ahol ezen a szakaszon a mederben kimélyülés figyelhető meg.

A kanyarulati statisztika-vizsgálat eredményeiből az látható, hogy a folyószakaszon zömmel álkanyarok, valamint fejlett és fejletlen kanyarok vannak (8. táblázat). Figyelembe véve, hogy a sodorvonalat a keresztmetszvények mentén a legmélyebb ponton vettük fel és szigorúan véve a szabályt, miszerint az egyes kanyarulatok eljéjét és végét az egymást követő inflexiós pontok

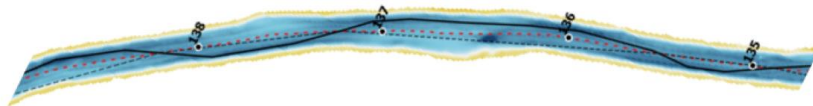
határozzák meg (Hamvas, 1994), érett, illetve átszakadó kanyarulatok a folyószakaszon nincsen.

8. táblázat Különböző szakaszjellegek előfordulása a teljes magyar – horvát vizsgálat folyószakaszon

Szakaszjelleg	egyenes	álkanyar	fejletlen	fejlett	túlfejlett
Előfordulás (db)	15	26	34	27	5
Összes hossz (m)	12 887	28 511	50 033	56 381	16 578
Előfordulás (teljes hossz %-a)	7,84	17,34	30,44	34,30	10,08
Minimális hossz (m)	207	360	899	469	2399
Maximális hossz (m)	1859	3509	2481	4063	4316
Átlagos hossz (m)	859	1097	1472	2088	3316
Átlagos L/H (-)	1,004	1,014	1,050	1,195	2,049

A folyó tengelyének és sodorvonalának metszéspontjai a teljes magyar–horvát folyószakaszt 107 szakaszra osztották. A legtöbb szakasz fejletlen kanyar jellegűt mutat (34), az álkanyarok (26) és a fejlett kanyarok (27) száma közel megegyező. Egyenes szakaszból 15 van, míg a teljes szakaszon mindössze 5 túlfejlett kanyarulatot lehetett beazonosítani.

Ha a kanyarulatok gyakoriságát az ívhosszak alapján vizsgáljuk, akkor eltolódnak az arányok. A teljes folyószakasz közel 35%-a fejlett kanyarulat, és 30 %-a pedig fejletlen kanyar. Legkisebb a valódi egyenes szakaszok aránya, azaz azon szakaszoké, ahol a közép vonal és a sodorvonal gyakorlatilag egybe esik. Jelentős azonban azon szakaszok hossza is (több, mint 17 %), ahol álkanyarok figyelhetők meg, azaz, a látszatra egyenes folyószakaszokon a mederfenék domborzata alapján már kimutatható a sodorvonal szinuszos kifejlődése (30. ábra).



30. ábra Álkanyarok megjelenése az egyenes folyószakaszokon

Figyelembe véve, hogy a vizsgált folyószakasz két jellegében eltérő szakaszra bontható (felső, közel természetes és alsó, szabályozott szakaszok), a statisztikai jellemzőket meghatároztam e két szakaszra külön-külön is. A 9. táblázatban foglaltam össze a felső (236 – 155 fkm között) szakasz eredményeit, a

10. táblázatban pedig az alsószakaszt (155–70 fkm).

9. táblázat A Dráva 155–236 fkm közötti szakaszának kanyarulati statisztika vizsgálata

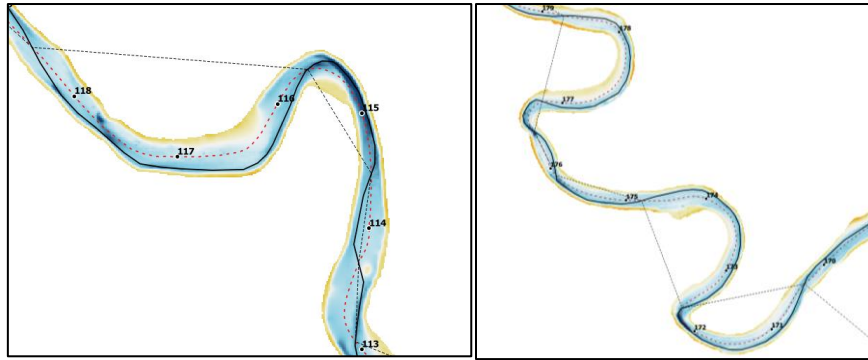
Szakaszjelleg	egyenes	álkanyar	fejletlen	fejlett	túlfejlett
Előfordulás (db)	7	15	14	15	5
Összes hossz (m)	5 391	13 982	16 425	26 887	16 578
Előfordulás (teljes hossz %-a)	6,80	17,64	20,72	33,92	20,92
Minimális hossz (m)	207	360	899	469	2399
Maximális hossz (m)	1650	1423	1760	3148	4316
Átlagos hossz (m)	770	932	1173	1792	3316
Átlagos L/H (-)	1,005	1,013	1,047	1,197	2,049

10. táblázat A Dráva 70–155 fkm közötti szakaszának kanyarulati statisztika vizsgálata

Szakaszjelleg	egyenes	álkanyar	fejletlen	fejlett
Előfordulás (db)	8	11	20	12
Összes hossz (m)	7 496	14 529	33 607	29 494
Előfordulás (teljes hossz %-a)	8,81	17,07	39,48	34,65
Minimális hossz (m)	463	716	1116	1147
Maximális hossz (m)	1859	3509	2481	4063
Átlagos hossz (m)	937	1321	1680	2458
Átlagos L/H (-)	1,003	1,015	1,053	1,191

A kapott eredmények jól igazolják és mutatják a szabályozás hatását. túlfejlett kanyarulat csak a felső szakaszon van, és amíg itt a leggyakoribb típus a fejlett kanyar, addig az alsó szakaszon a fejletlen kanyarulatok száma és hossza is a legnagyobb. Az egyes típusok hosszának vizsgálata azt mutatja, hogy az alsó szakaszon jellemzően nagyobb egységes folyószakaszok vannak, minden jellemző érték (minimális, maximális és átlagos hossz is) az alsó szakaszon nagyobb, mint a közel természetes felső szakaszon.

A legmarkánsabb kanyarulatok a 175–179 fkm közötti szakaszon figyelhetők meg. A 114–116 fkm közötti (31. ábra, a rész), illetve a 170–178 fkm közötti (31. ábra, b rész) kanyarulatok esetében megkérdőjelezhető a fenti lehatárolás megközelítésének a helyessége, mert ezen a két helyszínen a folyószakasz lefutása érett kanyarulatok kialakulását mutatja. Ezekben az érett kanyarulatokban azonban megfigyelhető az, hogy a sodorvonal nem a homorú part mentén húzódik a teljes szakaszon, hanem az összetett ív legkisebb kanyarulati sugárral jellemző részén a fő áramlási tengely „átcsapódik” a domború part felé.



31. ábra Érett kanyarulatok az a: 114 – 117 fkm és a b: 170-178 fkm között (saját szerkesztés)

A terepmodell alapján, a folyószakaszon túlnyomó részben úgynevezett „rossz gázlók” vannak, ahol a szomszédos kanyarulatok medencéi túlnyúlnak az inflexión, és a partok mellett egymásnak kitérve haladnak. Az inflexiók szelvény környezetében így egy gerinc képződik, ami a sodorvonal hirtelen irányváltását okozza (Hamvas, 1994).

6.2.2 Meanderfejlettségek és kanyarulati statisztika vizsgálat a Murán

Az 5.1 fejezetben már említett projekt során, 2016-ban, a Mura folyó 48 km hosszú magyar–horvát határt alkotó/metsző szakaszára elkészült egy részletes morfológiai kutatás, amely azonos elvek alapján azonosította térképsorozatokkal az 1785-ös, 1860-as, 1880-as, 1920-as, 1976-os, 2002-es és 2014-es állapotokat és számította ki a folyószakasz morфомetriai paramétereit (Engi et al., 2016a; Engi, 2016).

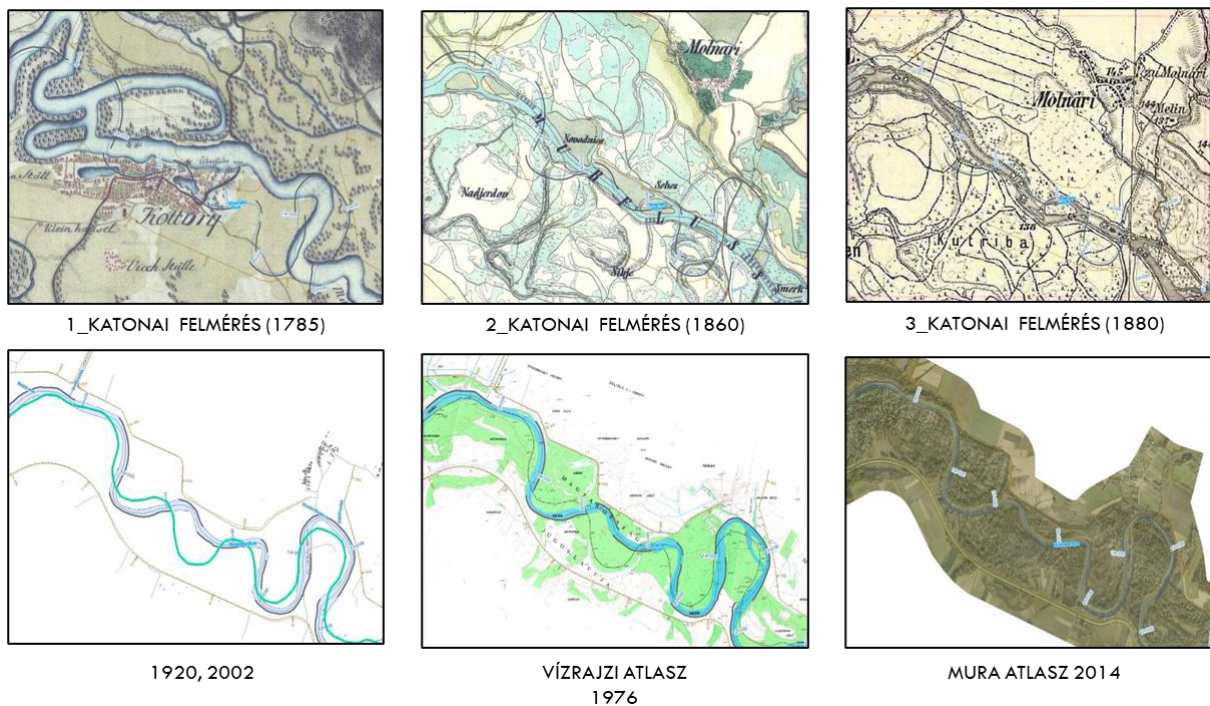
A vizsgált időszakokra meghatározott középvonalak elemzése során az alábbiakat figyelték meg:

- az 1785 évi felmérésen (1. katonai felmérés) a ma 49,5 km hosszú folyószakasz még 53,8 km hosszú volt;
- az 1785 és 1860 évek között (2. katonai felmérés) ez a hossz 37,5 km-re csökkent, mert az eltelt 75 év alatt 19 kanyar szakadt át vagy fűződött le;
- az 1860–1920 közötti időszakban ugyan voltak lokális szabályozási beavatkozások, a korábban megrövidült meder középvonalának hossza mégis 43,1 km-re nőtt;
- az I. világháború után a Mura magyar oldalán megkezdődtek az összehangolt szabályozási munkák és a töltésépítések, így az addigi nyílt ártér helyett a nagyvízi meder egy leszűkített hullámtérré vált, ezzel összefüggésben az 1920–1976 évek között ismét mederhossz növekedés történt 49,5 km-re, azonban ez a fejlődés 38 kisebb kanyarral valósult meg.

A kanyarok fejlettségének elemzése során az alábbiakat állapították meg (Engi, 2016):

- a szabályozások előtt 71 beazonosított kanyarulatból 36 túlfejlett és 2 érett kanyar volt;
- 1920-ig a meanderek száma a szabályozási munkák miatt először csökkent, majd azt követően újra növekedni kezdett. A túlfejlett kanyarok száma is erőteljesen megnövekedett, valószínűleg a fejletlen kanyarok egy része átalakult fejletté, ezért a fejletlen kanyarok száma csökkent. A kanyarulatok számának növekedését az is okozta, hogy az összetett kanyarokon kialakult másodlagos kanyarok tovább fejlődtek, így önálló kanyarulatokká váltak;
- 1976-ra a kanyarok száma jelentősen megnőtt, 100 darabot azonosítottak. A szabályozási munkák hatására a nagy kanyarok eltűntek, a mederelfajulás intenzitása csökkent és jellemző lett az ál és fejletlen kanyarulatok megjelenése. Nőtt a fejlett kanyarok száma, de csökkent a túlfejletteké. A térképeken átvágásra és lefűződésre utaló nyomok fedezhetők fel, amik bizonyítják detektált jelenséget.

A 6.2.1 fejezetben bemutatott vizsgálatomban kiemelt szakasz, a Dráva 170 – 178 fkm közötti kanyarulatai hasonló morfológiai jellegűek, mint a Mura 10-19 fkm közötti (Tótszerdahely-Molnári környék) kanyarokkal teli szakasza (32. ábra).



32. ábra Mura folyó 10-19 km szakasz történelmi térképei (Forrás: Engi & Ficsor, 2020)

Erre a szakaszra is meghatároztam a fejlettségi állapotokat a hivatkozott projektben vizsgált történelmi időszakra, a Dráva esetén használt elvek (Laczay, 1982; Hamvas, 1994) alapján történt. A kanyarulatok ívhosszának, és húr hosszának alapján elvégeztem a besorolást a hat alaptípusba (11. táblázat). Az ál- és fejletlen kanyarokat egy sorban ábrázoltam, átszakadó fejlettségi fokozatú kanyarulatot pedig nem tudtam azonosítani a vizsgálat szakaszon.

11. táblázat Mura- Tótszerdahelyi szakasz 10-19 km kanyarolatainak besorolása

Kanyarulat típusok száma	1. katonai felmérés	2. katonai felmérés	3. katonai felmérés	1920. ország-határ	Vízrajzi Atlasz (1976)	2002	Vízrajzi Atlasz (2014)
ál- és fejletlen kanyarulat	4	7	5	4	10	19	10
fejlett kanyarulat	5	1	0	1	6	4	6
túlfejlett kanyarulat	5	0	0	7	2	0	3
érett kanyarulat	0	0	0	0	0	0	0

A Tótszerdahelyi szakaszra megállapítható, hogy a XIX. században végrehajtott szabályozások hatására csökkent a kanyarok száma, majd a folyószabályozási beavatkozások hatásának beállta után a természetes medervándorlás újra megindult, melynek hatása 1920-ra már érzékelhető volt. 1920. és 2002. között, majd 2014-ben újra kevesebb kanyarulatot tudtam beazonosítani. Az XVIII. század végén a fejletlen, fejlett és túlfejlett kanyarok azonos arányban voltak jelen. 1860-ra a szabályozások során a régi kanyarokat átvágták vagy azok lefűződtek. Ebben az időszakban a területen kevés a fejlett kanyar, túlfejlett kanyart pedig nem azonosítottam. Az 1880-as évek alatt csak fejletlen kanyar van a területen. 1920-ra a területen csökkent a fejletlen kanyarok száma és megjelennek fejlett kanyarok is, valamint ugrásszerűen megnőtt a túlfejlett kanyarok száma. 1976-ra a túlfejlett kanyarok száma lecsökkent, megjelent azonban nagyszámú fejletlen és fejlett kanyar, ami arra utal, hogy a túlfejlett kanyarokon kialakult másodlagos kanyarok önálló kanyarokká váltak, közülük átvágások egyenes szakaszai ékelődtek be, melyek fejlődésnek indultak. 2002-re a fejletlen kanyarok száma nagymértékben nőtt. A fejlett kanyarok száma lecsökkent, és nem azonosítottam túlfejlett kanyart, valószínűleg az összetett kanyarokat (omega kanyar) azonosítottam önálló paraméterű kanyarokként. 2014-re a kanyarok száma újra csökkent. Ezen belül csökkent az álkanyarok és fejletlen kanyarok száma, emelkedett azonban a fejlett- és a túlfejlett kanyaroké (Engi & Ficsor, 2020).

6.3 Mederanyag összetétel jellemzése

A terepi mérések eredményei azt mutatták, hogy a Dráva teljes mederanyag mintavétel némileg hasonló hosszirányú mintázatot követ, mint más hasonló, erősen kanyargós folyók esetén (Habersack et al., 2001). Általában a folyómeder nagy változékonyságot jelzett az mederanyag textúrájában (2. Függelék). Tamás (2019) szerint a mederanyag jellemzőit tekintve a vizsgált szakasz két fő részre oszlik. Körülbelül 175 fkm-től felfelé durva és közepes kavics uralja a folyómedert. A 170 fkm környezetében a mederfenék esésében egy hirtelen csökkenés figyelhető meg. E töréspont alatt a vett mintákban először finom kavics, majd durva homok uralkodott (33. ábra).

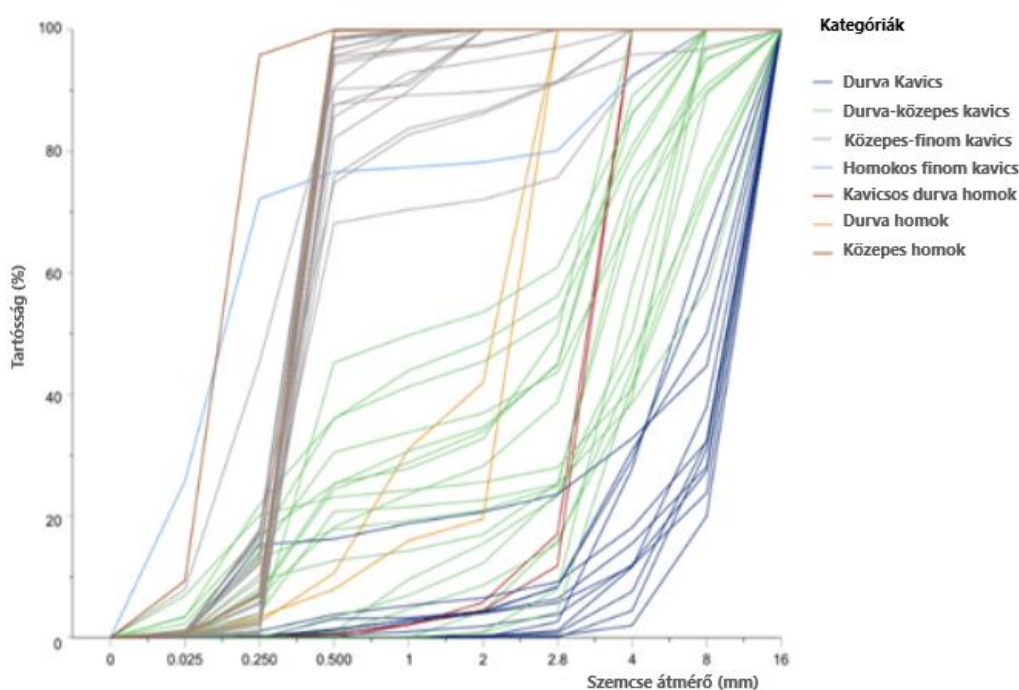


33. ábra Jellemző mederanyag-összetétel a Dráva különböző szakaszain (saját szerkesztés)

A mederanyag a korábbi eredményekkel részben összhangban változott a méréseink alapján is a vizsgált hossz-szelvényben. Általánosan elmondható, hogy a szemcseméretetek a legfelső mintavételi helytől (Mura torkolat) a legalsó mérőhelyig (75 fkm) csökkentek. A szemcsefrakciók a felső szakaszon található durva kavicstól a Barcs alatt domináns durva és közepes homok textúráig találhatóak a mintaterületen. A gyűjtött fenékhordalék mintákat hét textúra kategóriákba soroltuk be (12. táblázat, 34. ábra).

12. táblázat A hét kialakított fenékhordalék-textúrcsoport kódszámai és elnevezései.

Kódszám	Textúrcsoport megnevezése
1	durva kavics
2	durva-közepes kavics
3	közepes-finom kavics
4	homokos finomkavics
5	kavicsos durva homok
6	durva homok
7	közepes homok

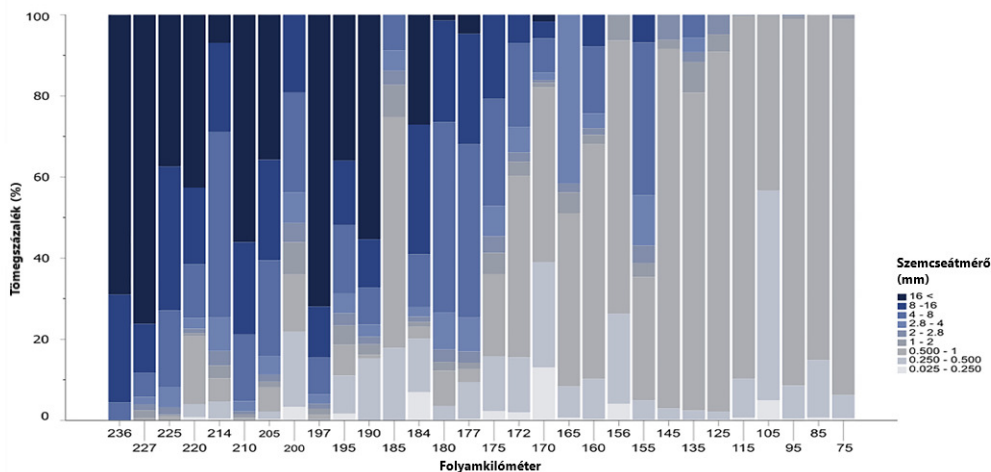


34. ábra A mintázott mederanyag szemeloszlási görbéi

A vizsgált folyószakasz felső részén, a Mura torkolat alatt (Örtilosnál) a durva kavics ($d > 16$ mm, 69 %) az uralkodó mederanyag (35. ábra), amelyet a Mura folyó szállít a Keleti-Alpokból, mivel a Mura medre túlnyomórészt kavicsos, míg a Drávát, a felvízi szakaszon megépült gátak miatt, a Mura-torkolat felett finomabb szemcsés hordalék uralja. A mederanyag hosszszelvényből az is látszik, hogy a vett minták alapján az örtiloszi keresztelvénynél (236 fkm) a 2 mm-nél kisebb átmérőjű részecskék szinte teljesen hiányoznak a mederanyagból. Lefelé haladva a folyón a 225 fkm-re a $d > 16$ mm-es frakció 39 %-ra csökkent, míg a 8 mm-nél nagyobb részecskék a teljes minta több mint 70 %-át tették ki. A 185 fkm-nél valószínűleg a

finom kavicsos páncélzat volt a felelős a homokfrakció bőségéért (durva homokkal kevert finom kavics). (Ahol a legdurvább frakció nem haladta meg az 1 %-ot, ott nem történt páncélozás.) A finom textúra egyértelmű dominanciáját a 145 fkm-től lefelé figyelhetjük meg.

A részletes terepi mérési kampány, amit elvégeztünk, igazolta és kiegészítette a korábban a vizsgált folyószakaszra készített mederanyag-elemzéseket és támpontot adtak a hordalékstruktúrák hidromorfológiai magyarázatához is. A részletes felmérés is kimutatta a szemeloszlásban megfigyelhető hirtelen változást a 175 és 170 fkm-ek között, de e mellett több lokális szemeloszlási eltérést is megmutatkozott az alvízi szakaszon (35. ábra). Meg kell jegyezni, hogy a közepes kavics Barcs alatt 6 és 11 kilométerre (160 és 155 fkm) újra megjelent. Mindazonáltal hangsúlyoznunk kell, hogy a mintákat keresztshelvényenként 3-5 függőben, a keresztshelvény geometria és az áramlási paraméterek figyelembevételével úgy vettük, hogy az eredményeink a vizsgált keresztmetszetekben a valószínűsíthető mederanyag szélső értékeit jelezzék, azaz a partokhoz közel (gyenge áramlás) és a sodorvonalban (legerősebb áramlás). Az eredmények így igazolják azt is, amire Tamás (2019) egyértelműen rámutatott, hogy a mederanyag mintázat változékonysága a folyómeder szakaszos páncélozódásának és a kanyarulatok áramlási eloszlásának tulajdonítható. Ez lehet az oka az ábrán látható nem monoton szemcse-finomodásnak.



35. ábra Mederanyag összetétel hossz-menti változása a Dráva vizsgált szakaszán (saját szerkesztés, publikálva: Pirkhoffer et al., 2021)

Ami az időbeli változásokat illeti, eredményeink alátámasztották a mederanyag térbeli eloszlására vonatkozó korábbi megállapításokat a texturális tulajdonságok tekintetében, amelyet (Tamás, 2019) tett közzé, aki 2003 és 2012 között Bélavárnál (198,5 fkm) és Barcsnál

(154 fkm) d_{60} átmérő növekedését állapította meg, de Botovónál (227,5 fkm) ennek enyhe csökkenését mutatta ki, míg Drávaszabolcsnál (78 fkm) a mintavétel két időpontja között nem tudott szignifikáns változást kimutatni.

A mi méréseink összességében átlagosan kicsit finomabb d_{60} mm-es átlagot mutattak, mint a korábbi adatok. A középérték 2003-ban és 2012-ben 0,5 mm volt, míg a mi mérésünk 0,39 mm-es átlagos d_{60} -as értéket mutatott. Részletezve: a Botovo keresztmetszvényben eredményeink 5,4 és 11,8 mm-es d_{60} átmérőt mutattak 8,1 mm-es átlaggal, ami lényegesen alacsonyabb, mint a 2003-as (13 mm) és 2012-es (12,5 mm) értékek. Az átlagos d_{60} szemcse átmérő Bélavárnál 6,74 mm (min.: 2,2 mm, max.: 11,6 mm) volt, szemben a 2003-as és 2012-es 7,8 és 11,9 mm-rel. Barcsnál (155 fkm) az átlagos d_{60} átmérő 2,87 mm volt, a minimum és maximum pedig 0,33 és 3,04 mm. Ez magasabb, mint a 2003-as és a 2012-es 1,0 illetve 2,5 mm-es érték, de alacsonyabb, mint a 154 fkm-nél mért értékek. A Drávaszabolcs-adatok esetében jó egyezést találtunk.

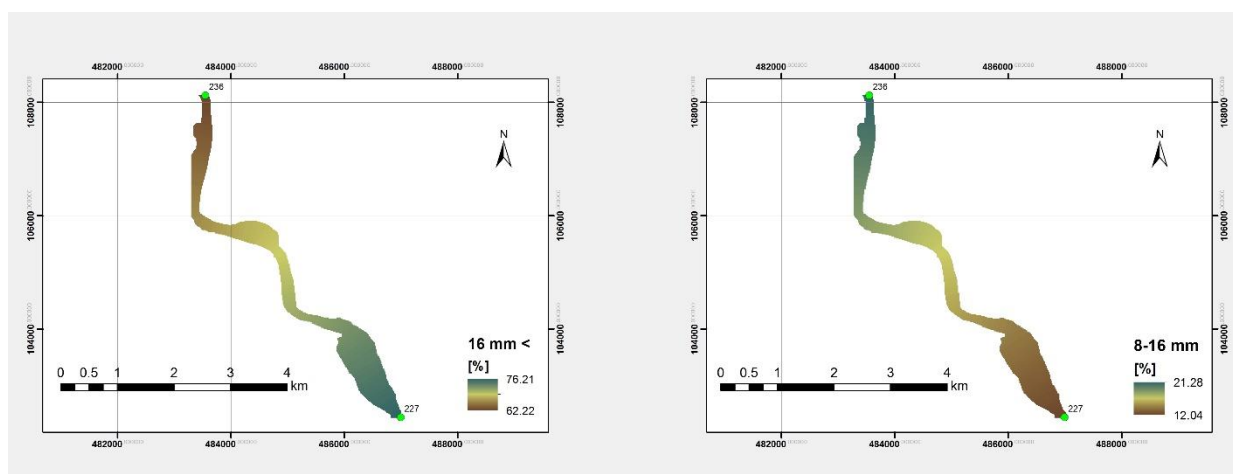
A teljes szakaszt elemezve elmondható, hogy a 190 fkm feletti szakaszon jellemzően durva kavics uralkodott, míg a 190 és 172 fkm között a durva és közepes kavics keveréke volt jellemző. A 170 fkm körül finom kavics és homok uralta a medret. Barcstól lefelé a kavicsfrakció szinte teljesen eltűnt, és minden megfigyelt keresztmetszetben durva homok uralkodott. A morfológiai szempontból átmeneti folyószakasz-jelleg miatt a homokfrakció azonban szinte a teljes vizsgált szakaszon jelen volt, a felső, jellemzően kavicsos szakaszon is. A mederanyag heterogenitása különösen a kanyarulatokban érvényesült, ahol a homok rendszeresen megjelent a domború partokon.

A 170 fkm alatt a kavics mederanyag (páncélozás) megjelenése a folyószabályozás során végrehajtott kanyarulatátvágásokban a megnövekedett gradiensekkel függ össze. A 20. századi kanyarátvágások hatása a folyómeder esésére és áramlási sebességére még mindig észrevehető, de egyre csökkenő mértékben. (Az utolsó ilyen beavatkozás ezen a szakaszon 1991-ben történt.) A 170–75 fkm szakaszon 1920 után összesen nyolc kanyarulatátvágással létrehozott szakasz van, amelyek általában még mindig keskenyebbek az átlagosnál (~ 250 m), azaz a beavatkozás hatására reagáló lokális mederfejlődési folyamat még nem zárult le. Ezen szakaszok közül négy esetében a mederanyagot jellemzően durva szemcsék alkotnak, aminek a jelenléte páncélozódást igazol (13. táblázat).

13. táblázat Dráva kanyarátvágások hidromorfológiai jellemzői

átvágás (fkm)	mederesés (m/m)	meder szélesség (m)	páncél- ozódás	max. méret- osztály (mm)	d ₅₀
160–158	0,00024	255	+	8–16	0,423
157–155	0,00113	243	+	8–16	2,793
151–148	0,00053	240	+	2,8–4	1,075
146–144	0,00132	210	–	2–2,8	0,392
139–133	0,00038	212	+	4–8	0,411
109–108	0,00257	155	–	1–2	0,350
86–85	0,00257	213	–	1–2	0,357
77–75	0,00094	284	–	1–2	0,370

A pontszerű mérési adatokból a 5.3.4 fejezetben ismertett térinformatikai eljárással tematikus térképeket készítettem. A térképek az egyes szemcse-frakciók megjelenését hivatottak plasztikusan bemutatni a vizsgálat folyószakaszon, illetve a jobb láthatóság érdekében azok bizonyos szakaszain (36. ábra).

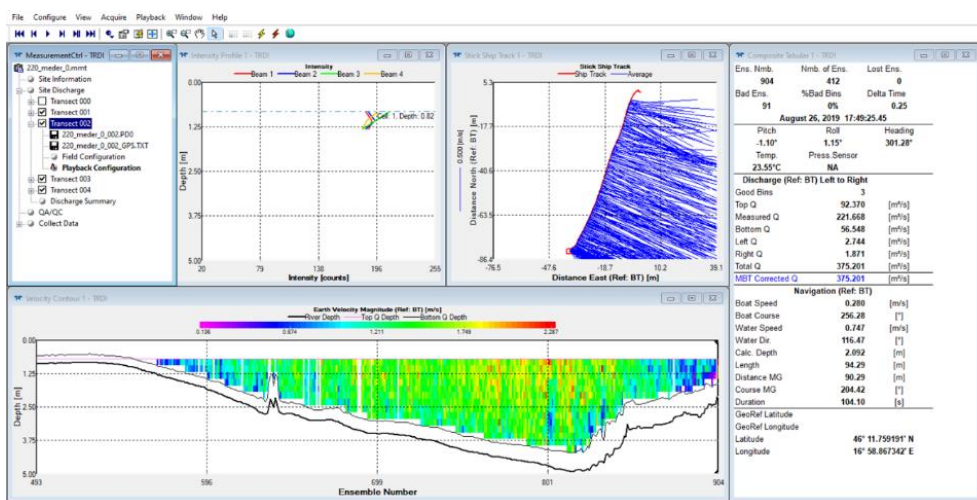


36. ábra Adott szemcse-frakció aránya a mederanyagban a Dráva Órtilos – Zákány (236 – 227 fkm) közötti szakaszán (saját szerkesztés)

6.4 Áramlásmérések

A hordalék háztartás vizsgálata és az ehhez kapcsolódó mintavétel elképzelhetetlen az egyidejű áramlásmérés, vízhozammeghatározás nélkül. A korszerű, jellemzően a hullámterjedést kihasználó mérőeszközök robbanásszerű fejlődése előtt, hagyományosan forgószárnyas sebességméréssel történt a vízhozam meghatározása, és a hordalék és mederanyag mintavétel az áramlásméréssel megegyező függvényben, de időben attól eltolódva történt. Egy-egy szelvény felmérése nagyobb vízfolyásokon akár egésznapos folyamat is lehetett (Keve et al., 2022). Az ADCP áramlásmérő elterjedésével az áramlás és vízhozammérés jelentősen leegyszerűsödött és gyorsabbá vált és lehetőség nyílt arra is, hogy a függély menti áramlásmérés és hordalék mintavétel gyakorlatilag azonos időben történjen.

A mérési kampányunk során az elvégzett áramlásméréseket két csoportban osztottuk. Egyrészt az 5 km-enként végrehajtott vízhozam meghatározást szolgáló mérésekre, amit a magyar vízügyi eljárásrend alapján mozgóhajós méréssel végeztünk (37. ábra) az áramlási keresztaszelvények mentén (ME-10-231-16:2009, 2009).



37. ábra Mozgóhajós mérés mérési eredménye (saját eredmény)

Szelvényenként négy áthaladással határoztuk meg a keresztaszelvény vízhozamát, majd az eredményeket átlagoltuk és az átlaghoz legközelebb eső valós mérési eredményt fogadtuk el mérési eredményként. Az összesen 37 mérés összefoglaló táblázatából (14. Táblázat) látható, hogy a mérések kisvízes időszakban történtek. A vízjárás alapvetően kiegyenlített volt, jellemzően 300–350 m³/s közötti tartományban, egy nap kivételével (aug. 30.), amikor az érkező vízhozam 200–220 m³/s közé esett. A napon belüli eltérés a mért vízhozam értékek

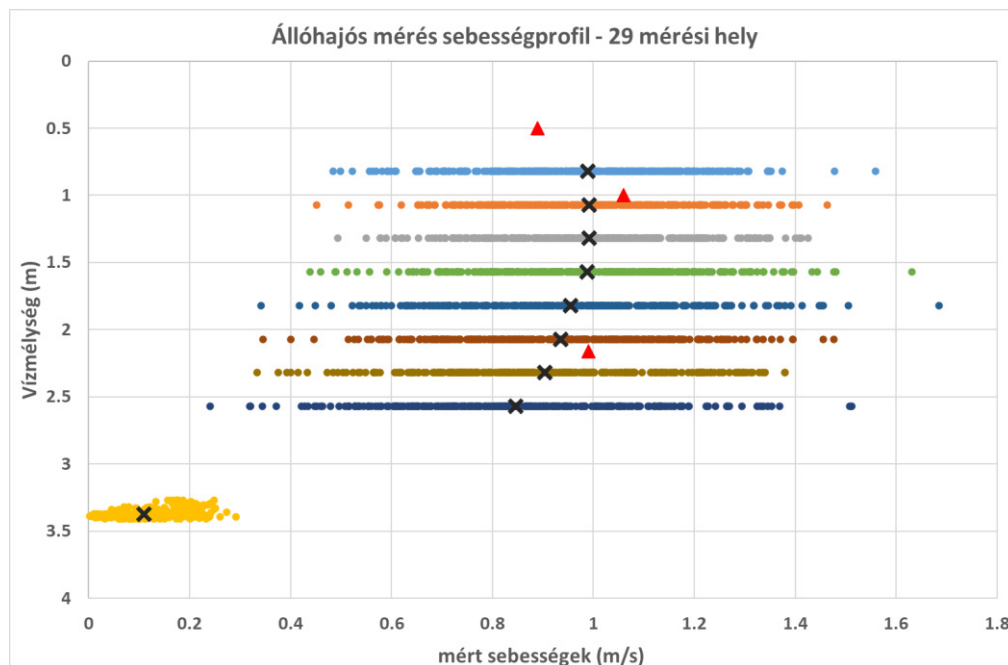
között 5–31% között alakult. Az eltérés több esetben a napon belüli ingadozásból származott, ami egyértelműen a felvízi erőmű üzemeltetésének a hatását mutatja.

14. Táblázat A vízhozammérések összefoglaló táblázata

Szelvényszám (fkm)	Dátum	Mért vízhozam (m ³ /s)	Középsebesség (m/s)	Vízszint (GPS) (m)	Max. vízmélység (m)
	8/26/2019	274	1.040	170.27	3.85
237	8/26/2019	281	1.060	170.19	3.85
	9/23/2019	208	0.369	169.85	3.31
230	8/26/2019	328	0.997	168.14	3.87
225	8/26/2019	334	1.380	165.70	4.43
220	8/26/2019	375	1.260	164.61	4.93
	8/26/2019	351	1.210	160.55	3.36
214	8/28/2019	314	1.120	160.40	3.25
210	8/28/2019	356	1.420	158.80	3.38
205	8/28/2019	377	1.410	156.47	4.11
205	8/28/2019	395	1.260	156.65	3.21
200	8/28/2019	387	1.560	156.60	5.17
195	8/30/2019	225	1.090	151.41	4.96
190	8/30/2019	227	0.905	150.06	2.96
185	8/30/2019	199	0.850	147.83	4.56
180	8/30/2019	198	0.621	146.03	5.69
175	8/30/2019	210	0.816	144.95	4.06
170	8/30/2019	215	0.554	144.02	3.74
165	8/30/2019	229	0.574	143.42	7.81
160	8/30/2019	221	0.616	142.65	4.76
155	9/2/2019	335	0.817	142.33	4.30
150	9/2/2019	343	0.759	141.67	3.69
145	9/2/2019	342	0.659	140.84	6.19
140	9/2/2019	327	0.754	140.20	5.68
135	9/2/2019	336	0.745	139.50	4.26
130	9/2/2019	327	0.724	139.10	3.49
125	6/2/2019	328	0.745	143.55	5.19
120	9/6/2019	326	0.848	137.64	5.15
115	9/6/2019	322	0.635	136.90	8.52
110	9/6/2019	302	0.845	135.96	5.46
105	9/6/2019	313	0.795	135.37	2.87
100	9/6/2019	326	0.758	134.86	4.08
95	9/6/2019	302	0.705	133.95	4.74
90	9/6/2019	307	0.743	133.29	4.85
85	9/6/2019	298	0.757	132.50	6.18
80	9/6/2019	306	0.733	131.90	4.74
75	9/6/2019	313	0.866	131.25	4.72

A másik mérési eljárás, amit használtunk, a hordalék mintavételekhez kapcsolódott, a mintavétel ideje alatt ún. állóhajós méréseket végeztünk, több perces mérési időtartammal. A hordalékmintavételekkel egyidőben történő állóhajós sebességmérések célja az volt, hogy meghatározzuk az adott mérési hely sebességviszonyait.

A mintavételezés alatt az ADCP műszerrel folyamatos áramlásmérést végeztünk, majd az eredményekből leválasztottam a mérés időpontja környezetében mért értékeket. Az így kapott több száz adatot tartalmazó adatbázisból képeztem a mélység menti sebességek grafikonját, feltüntetve rajta a mért értékek átlagértékét is, fekete x jelzéssel (38. ábra).



38. ábra Mélység menti sebesség grafikon a 29. mérési helyen (155 fkm szelvényben) mérési eredmények átlagértékével (x) és az OTT sebességmérővel (piros háromszög) mért értékekkel (saját eredmény)

A mérés során egy OTT típusú áramlásmérővel is észleltük a pillanatnyi sebesség értékét a mintavétel időpontjában, ezeket szintén bemutatom a sebesség-profil ábrákon, piros háromszög jelzéssel. Látható, hogy az egy irányban mérést végző OTT műszer által mért sebesség értéke eltér a tér minden irányában mérést végző ADCP műszer átlagértékétől. Az ADCP mérési eredményeket az OTT áramlásmérővel észlelt eredményeket összehasonlítva azt tapasztalhatjuk, hogy a két fajta eljárás között a mérések alapján nem lehet egyértelmű kapcsolatot felállítani. Kevés kivétellel az OTT mérések értékei beleestek az ADCP mérések

tartományaiiba, de az átlagértékhez képesti szórásuk igen eltérő és az eltérés iránya sem azonos minden esetben. Jellemzően az OTT műszer kisebb sebességeket észlelt, mint az ADCP.

A két eljárás közötti jelentős különbség az, hogy míg az OTT áramlásmérő egy áramlási irányban észlel, melyet a mérőműszer iránya határoz meg, addig az ADCP térbeli érzékelést végez, így a két érték nagy valószínűséggel nem csak nagyságában tér el, hanem irányában is. Az okok feltárása és egy jó összefüggés felállítása érdekes és fontos kutatási téma lehet.

Az ADCP adatokból szelvényenként előállítottam az áramlási mező diagramjait, mind a vízhozam-mérések mind pedig a hordalékméréshez kapcsolódó pontszerű áramlásmérésekből (3. Függelék). A hordalékmérésekhez kötődő állóhajós mérésekből a hordalékmérési ponthoz rendelve, a helymeghatározás adatsorából átlagolással meghatároztam a függély helyét, az áramlásmérési adatokól pedig a függély mentén a pontbeli sebességek átlagos értékét és azok jellemző áramlási irányát.

A mozgóhajós mérések esetén a hordalékmérések helyének meghatározásával azonos elvek mentén kiválasztottam a szelvény mentén, szélességtől függően, 3–5 függélyt, melyekben az előbbi eljáráshoz hasonlóan, de a függély 10 méteres körzetéből vett adatokkal határoztam meg a pontbeli sebességjellemzőket.

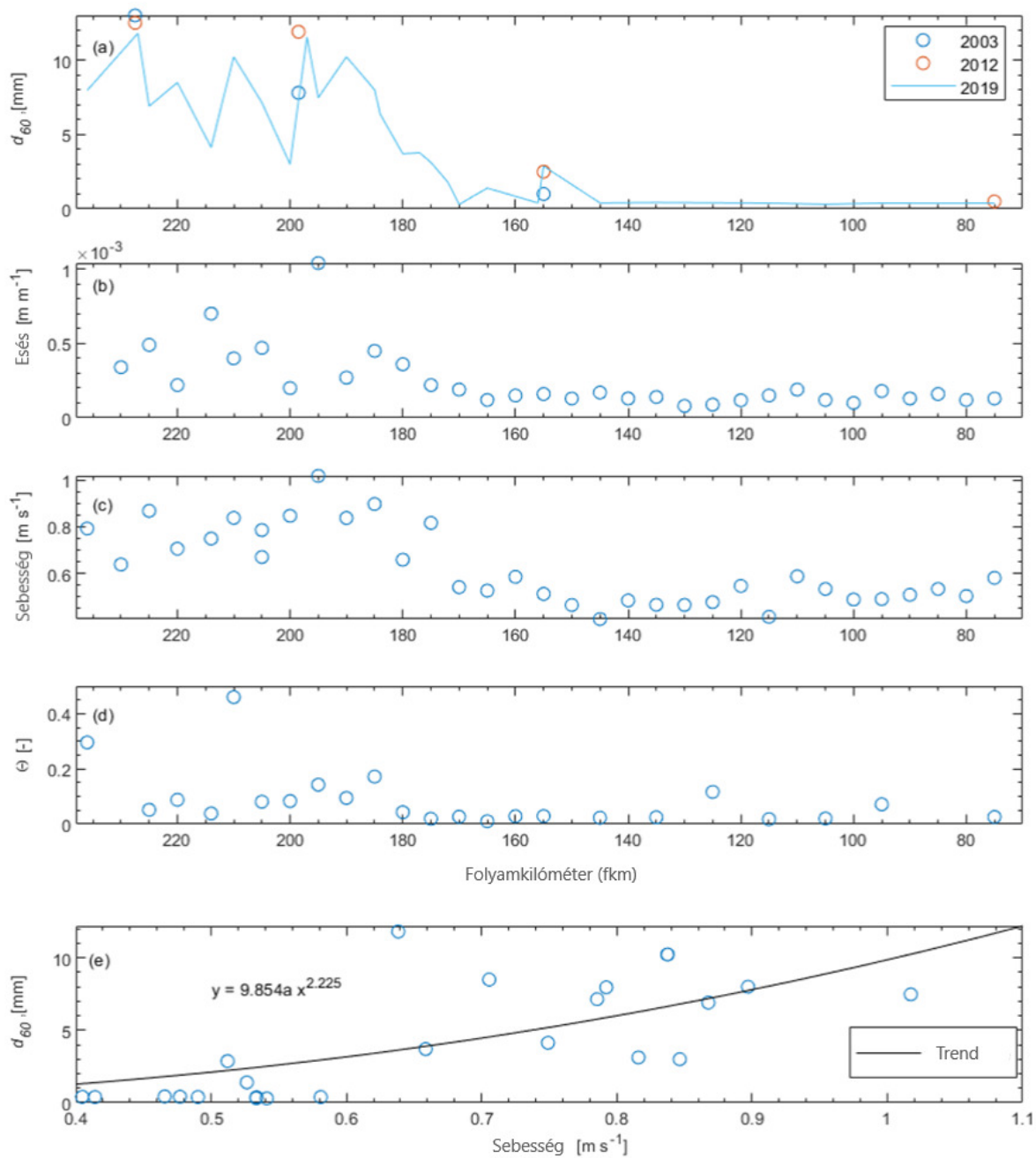
6.5 A mért áramlási sebességek eloszlásának vizsgálata

Az ADCP által mért áramlási sebességek jelentős változást mutattak a folyó mentén. A mintavételek során az átlagos sebességek tartománya jellemzően az 0,5–1,4 m/s között volt, de a kisebb vízhozamtartományban történt mérések esetén az átlagsebesség nem érte el az 1 m/s-ot.

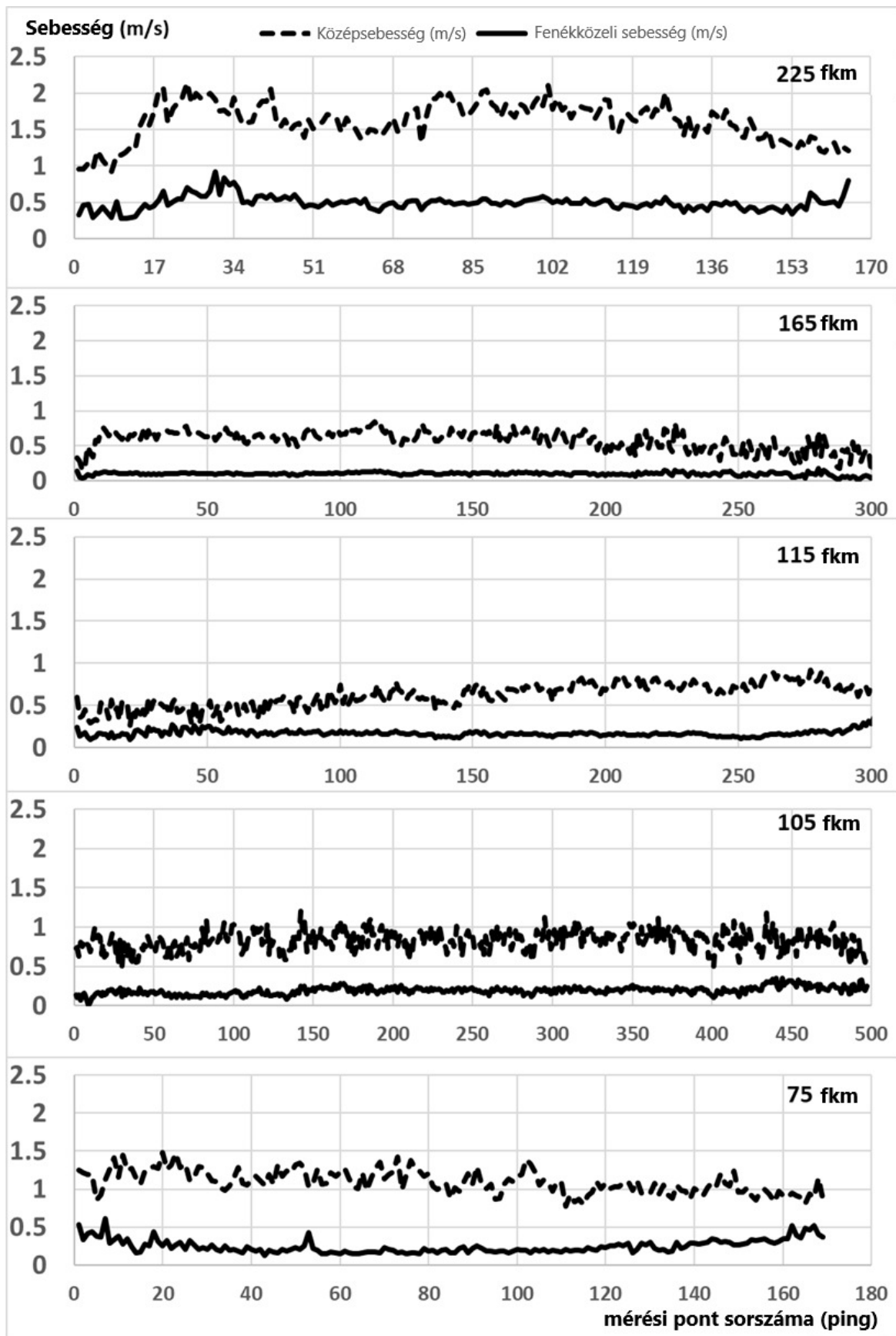
A mérésekből megállapítható, hogy a sebességek szórása elég nagy, az egyes pillanatnyi értékek akár 60%-al is eltérhetnek az átlagértéktől. A sebességmaximumok a függély mentén minden esetben nagyságrendileg az 1 m mélységben alakultak ki. A mederfenék közeli sebesség jellemzően 0,1 – 0,2 m/s között alakult, de egy-két esetben ennél nagyobb, 0,25 m/s körüli értéket is kaptunk eredményül.

A legnagyobb sebesség a 195 fkm-ben volt megfigyelhető, átlagosan 1,01 m/s értékkel, míg a legalacsonyabbat 145 fkm-nél mértük 0,40 m/s értékkel (39. ábra, c rész). Az áramlási sebesség hirtelen csökkenése figyelhető meg a 175 és 170 fkm között. Ennek a hirtelen esésnek a helye nem esik teljesen egybe a felszínesítés helyével, ami inkább a 195–180 fkm körül helyezkedik el (39. ábra, b rész).

A nyírási sebességek heterogénebb képet mutattak, azonban a lokális maximum 200 és 185 fkm között figyelhető meg, amelyet hirtelen csökkenés követ 180 fkm-nél. A 125-ös és 95-ös fkm-nél két további nyírósebesség-maximumot találtunk, amelyek komplex áramlási dinamikát jeleznek ezeken a szakaszokon (39. ábra, d rész). A vizsgált keresztmetszelvevények átlagos áramlási sebessége és a vett minták jellemző szemátmérője (d_{60}) közötti összefüggés hatványfüggvénnyel írható le és egy közepesen erős korrelációt ($r^2 = 0,6943$) mutat (39. ábra, e rész). A mederközeli sebesség (u_0) értéke jellemzően az átlagos sebesség 20–30%-a volt és általában kisebb, mint 0,5 m/s. A mért mélység menti sebesség-eloszlás elég zajos volt és az átlagostól való eltérés nagyobb volt, mint az u_0 értéke, amely jól mutatja az áramlás erősen turbulens jellegét (40. ábra).



39. ábra Terepi mintavétel Eredmény-hossz-szelvénye, különböző mért és számított paraméterekre vonatkozóan: a: mért d_{60} szemátmérő a 2003 és 2012 mérési eredményekkel összehasonlítva; b: vízfelszín esése; c: átlagsebesség; d: Shields-paraméter; e: d_{60} szemátmérő az áramlási sebesség függvényében a 236 és 75 fkm közötti szakaszra vonatkozóan



40. ábra Függély középssebesség és mederközeli sebesség alakulása az ADCP mérések alapján

6.6 A hordalékmozgás határállapotának vizsgálata elméleti módszerrel és a mérési eredmények felhasználásával

6.6.1 A keresztszelvény-átlagolt fenékcúsztató feszültség számítása

A Shields-számot (megindulási paramétert) gyakran használják a mederanyag elmozdulásának jellemzésére. Ez az érték tulajdonképpen azt mutatja meg, hogy adott szemátmérőjű hordalék milyen áramlási paraméterek mellett indul meg, azaz kerül mozgásba. Klasszikusan ezt az értéket egy mederszakasz általános hidraulikai jellemzői alapján határozzák meg. Az ADCP áramlásmérés azonban lehetővé teszi a nyírófeszültség becslését a mért áramlási paraméterek alapján (Jamieson et al., 2011). A vizsgálata célja az volt, hogy összehasonlítsam a két különböző eljárással számított értéket. Ezért a Shield-számot mindkét módszerrel meghatároztam. Az első módszer, a továbbiakban „becsült Shields-szám”, az ADCP-méréseket alkalmazta a megfigyelési kampány során, míg a második módszer („számított Shields-szám”) a vizsgálat keresztszelvény előtti és utáni szakaszok általános hidraulikus paraméterein (esés és áramlási mélység) alapult.

Shields paraméter becslése

A görgetett hordalék áramlást szabályozó mederközeli sebesség értékét az ADCP áramlásmérő által mért áramlási sebesség extrapolálásával becsültem meg, melyhez felhasználtam a mérőeszköz adatainak megjelenítéshez és feldolgozásához használt WinRiverII szoftver adta lehetőségeket (Teledyne RD Instruments, 2018). A szoftver a fenékcúsztató feszültség meghatározásához az áramlási ellenálláson alapuló teljesítmény képletet (Power Curve Fit) alkalmazza (Chen, 1991). A WinRiverII szoftver ezt a képletet kombinálja a nyílt vízfelszínű csatornákra adaptált Manning-egyenlettel (Simpson & Oltmann, 1990).

$$\frac{u}{u^*} = 9.5 \left(\frac{z}{z_0} \right)^b, \quad (1)$$

ahol u az áramlási sebesség z magasságban a mederfenék felett, u^* a nyírósebesség, z_0 a meder alsó érdesség-magassága és b egy állandó, amelynek értéke: 1/6.

Az u_0 kiszámításához a z_0 megfelelő mélységét a mederanyag részecskeméret-eloszlása alapján határoztam meg. Az u paraméter (áramlási sebesség) a következő képlettel számítható ki:

$$u = a' z^b, \quad (2)$$

ahol $a' = (9,5 u^* / z_0)^b$

A Nikuradse érdességi magasságból (k_s) z_0 kiszámítható bármely tetszőleges k magasságra a mederfenék felett:

$$k_s = \left(\frac{26}{k}\right)^6 = 30z_0 \quad (3)$$

Van Rijn-feltételezésből (van Rijn, 1984):

$$k_s = 3d_{90} \quad (4)$$

A (3) és (4) összefüggésekből a z_0 az alábbi képlettel számítható:

$$z_0 = \frac{d_{90}}{10} \quad (5)$$

A nyírási sebességet (u^*) az (1) átalakításával az alábbi módon írhatjuk fel:

$$u^* = \frac{u_0}{9,5\left(\frac{z}{z_0}\right)^b} \quad (6)$$

Az átlagos nyírási sebességet a teljes keresztmetszvényre érvényesnek feltételezzük. A Reynolds-számott a következő képlettel számítják ki:

$$Re = \frac{u^*d}{\nu} \quad (7)$$

Shields paraméter számítása

A görgetett hordalék mozgása akkor indul meg, ha a Shields paraméter (θ) nagyobb egy küszöbértéknél:

$$\theta = \frac{\tau}{(\rho_s - \rho)gd}, \quad (8)$$

ahol τ a nyírófeszültség, g a gravitáció miatti gyorsulás, d a részecskeátmérő, ρ_s a részecskesűrűség, ρ a víz sűrűsége.

Bár ez a számítás eredetileg homogén szemeloszlású mederanyagra vonatkozik, figyelembe vettem azon elméletet, miszerint a vegyes szemeloszlás esetén a közepes szemátmérővel jellemezhető a mederanyag (Wan Mohtar et al., 2016). Ezért a minták d_{50} értékét használtam fel a számításaim során.

A nyírási feszültséget a következő képlettel számíthatjuk:

$$\tau = \rho u^{*2} \quad (9)$$

Az u^* nyírási sebességet a következőképpen számítottam ki:

$$u^* = \sqrt{ghS_f}, \quad (10)$$

ahol h az átlagos vízmélység és S_f a vízfelszín esése.

A fentiekből a Shields szám a következőképpen írható fel:

$$\theta = \frac{\rho u^{*2}}{(\rho_s - \rho)gd} = \frac{\rho h S_f}{(\rho_s - \rho)d} \quad (11)$$

Ezt a becslést Sharma et al. (2019) elmélete alapján állítottuk fel. Az algoritmus a (6) illetve (10) egyenletet használja az u^* nyírási sebesség kiszámításához, az (11) egyenletet pedig a Shields-szám kiszámításához. Az átlagos vízmélységet és a vízfelszín esését terepi mérések alapján állapítottam meg. Mivel a mérési kampányt nem egymást követő napokon hajtottuk végre, az S_f értékét nem lehetett minden egyes szelvényre kellő biztonsággal megállapítani. Így ehhez a vizsgálathoz szűkítettem a minták számát, és a vizsgálatokat csak a 225, 165, 115, 105 és 75 fkm szelvényekre végeztem el.

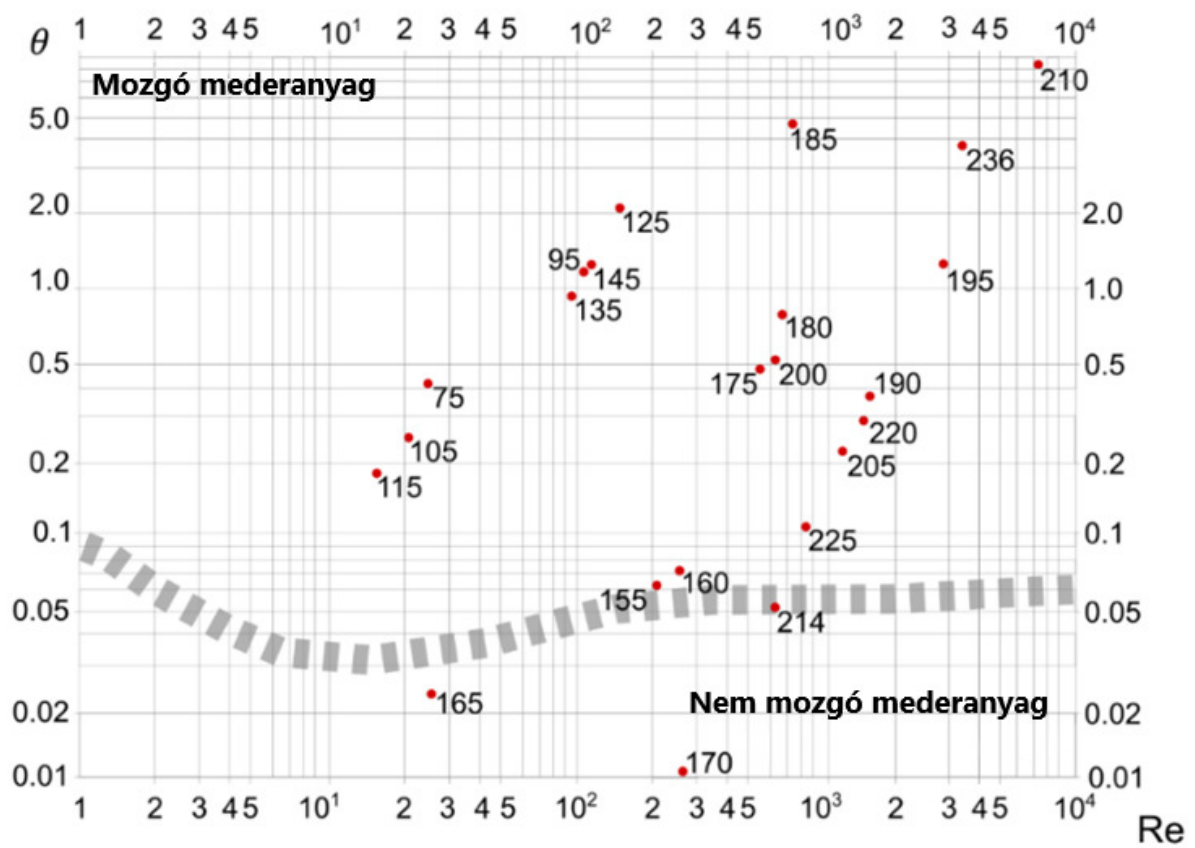
6.6.2 A becsült és a számított nyírási sebesség összehasonlítása

Jelentős különbségeket figyelhetünk meg a becsült és számított nyírási sebességek és Shields-számok között. A becsült értékek átlagosan magasabbak, mint a számított értékek, azok 2,5-szeresei, szélsőséges esetekben 4–6-szorosa (15. Táblázat).

15. Táblázat A számított és becsült nyírási sebességek, Reynolds- és Shields-számok összehasonlítása

Kereszt-szelvény (fkm)	Számított			Becsült		
	u^*	Re	θ	u^*	Re	θ
225	0,0519	186,15	0,0461	0,1211	434,27	0,2507
165	0,0104	3,76	0,0184	0,0686	24,76	0,7969
115	0,0178	6,35	0,0548	0,0810	28,81	1,1289
105	0,0204	7,06	0,0733	0,0529	18,33	0,4943
75	0,0259	9,52	0,1115	0,0714	26,28	0,8488

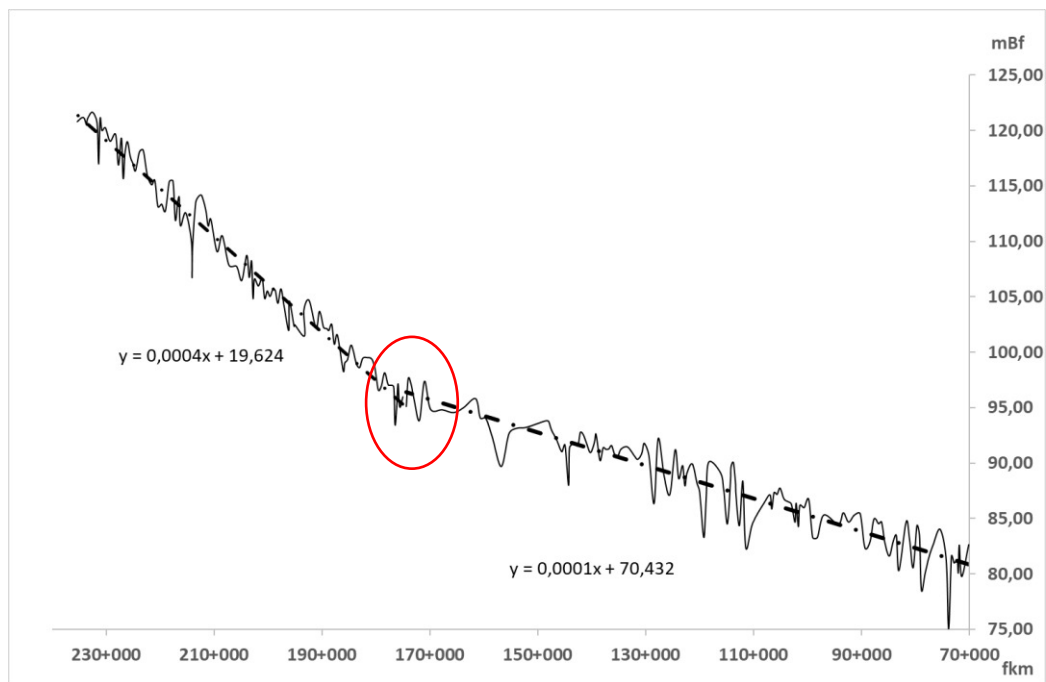
A Shields-paraméter szinte minden keresztmetszetben magasabb volt, mint a görgetett hordalék megindulásához tartozó küszöb érték (41. ábra). Az eredményeim alapján a hordaléklerakódás jellemzően a 165 és 170 fkm között érvényesült, a 214 fkm-nél a kapott eredmény a küszöbértékkel megegyező volt. A 160-as és 155-ös fkm-ek környékén a hordalék csekély mértékű megindulását jelzik az eredmények, ahol a Shields-paraméter alig haladta meg a küszöbértéket. A többi szelvényben kapott eredmények a mederanyag mozgására utalnak.



41. ábra Számított Shields-paraméter a Reynolds szám függvényében (saját eredmények)

6.7 Barcs feletti eséstörés helyének pontosítása

Az 5.2 fejezetben bemutatott terepmodell térinformatikai feldolgozása arra is lehetőséget adott, hogy meghatározzam a vizsgálat Dráva szakasz mederfenék hossz-szelvényét. Mind a középvonal, mind a sodorvonal mentén vizsgáltam az esésviszonyokat, a kanyarulati statisztikai vizsgálathoz meghatározott jellemző szelvények (inflexiós és tetőponti szelvények) tengely menti és sodorvonal menti (legmélyebb) mederpontjai alapján. A két hossz-szelvény jellegében azonos lefutást mutat, de a középvonal mentén felvett átlagosan közel két méterrel magasabban helyezkedik el. Az inflexiós szelvények átlagos eltérése 1,0 m, a tetőponti szelvényeké pedig 2,8 m. A 42. ábra mutatja a sodorvonal mentén felvett értékekből meghatározott hossz-szelvényt.



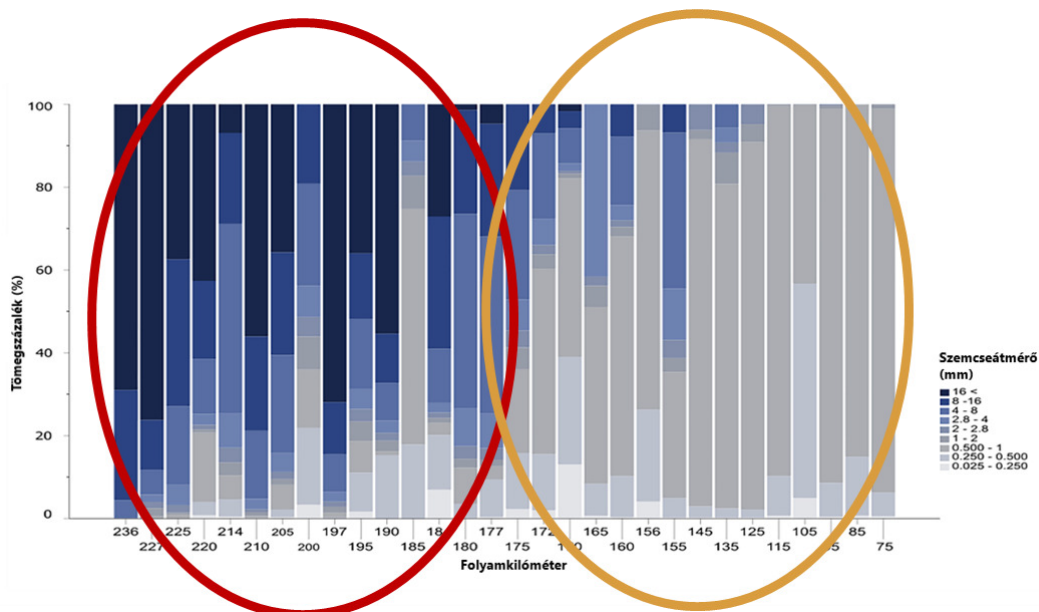
42. ábra A vizsgált folyószakasz mederfenékvonala

A részletes fenékvonal alapján pontosítható annak a jelentős eséstörésnek a helye, amit korábbi tanulmányok is jeleztek. Elemzésem alapján ez a markáns változás a 170-175 fkm szelvények közötti szakaszon definiálható. Az eséstörés felett a folyószakasz esése 0,4 ezrelék körül, míg ez alatt 0,1 ezrelék körül alakul. A relatíve nagyobb energiájú folyó itt az eséstörés következtében elveszti energiáját, ezzel lecsökken a hordalékszállítási kapacitása, és lerakja hordalékát. A teljes egészében alluviális folyószakaszon belül ez az eséstörés egy lokális változást okoz.

Ennek a jelentős változásnak a hatása megmutatkozik a folyó lefutásában, az áramlásban és a hordalék minőségi, mennyiségi és áramlási jellemzőiben is.

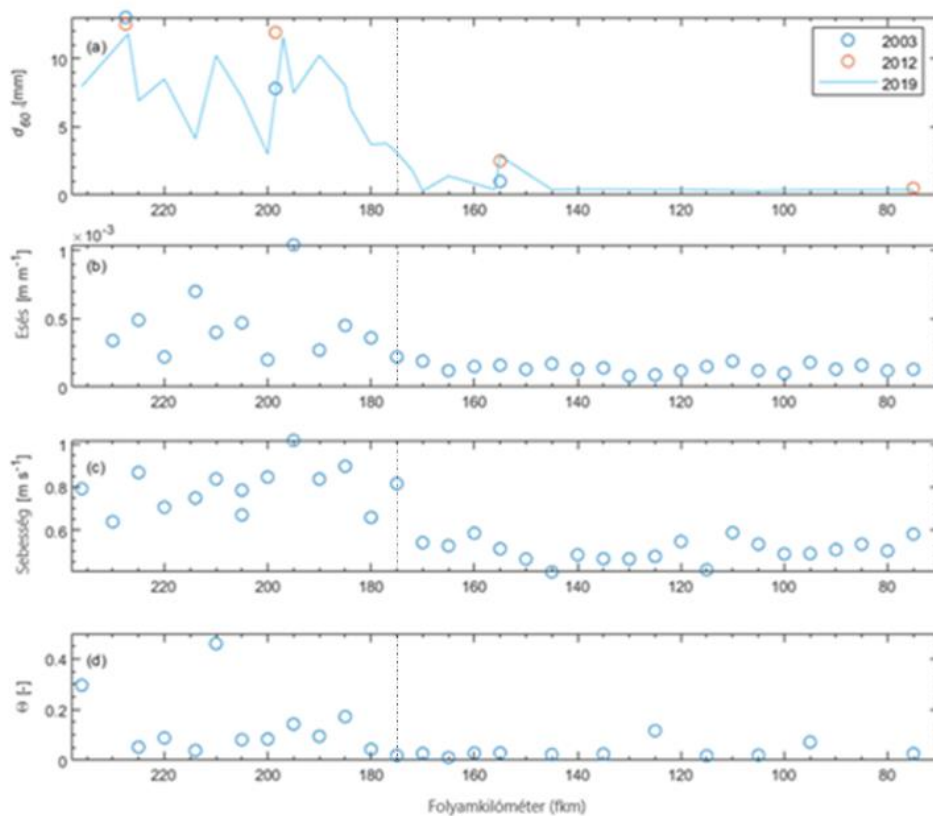
- A főmeder helyszínrajzi vonalvezetésében ezen a szakaszon egy jól kivehető, markáns kanyargósság figyelhető meg, amire már korábban, a kanyarulati statisztikai vizsgálat kapcsán utaltam (6.2.1 fejezet).

- A mederanyag elemzés eredményeit a mederfelmérésből származó mederfenékvonallal összevetve azt állapítottam meg, hogy a mederanyag szemösszetétele jól mutatja a mederesés változását. A jelentős szemcseméret csökkenés az eséstörés alatt mutatkozik, hiszen a hirtelen eséscsökkenés hatására a nehezebb szemcsék lerakodnak és nem gördülnek tovább alvízi irányába. Ezt követően már a finomabb szemcseméret jellemzi a medret (43. ábra), a felső szakaszon kavicsos, az alsó szakaszon pedig homokmeder a jellemző.



43. ábra Mederanyag-összetétel változása a Dráva 236–75 fkm szakaszán,

- Hasonlóan érzékelhető az eséstörés hatása a jellemző szemcse átmérő, az átlagsebesség és a mederanyag mozgásba lendülését jellemző Shields paraméter értékeiben is (44. ábra). Mindegyik paraméter esetén a hossz-szelvényen jól látható az adatsor jellegében történő változás, ami a 175 fkm környezetére tehető: a paraméterek értéke és a mért értékek szórása is csökken, minden esetben.



44. ábra Jellemző paraméterek hossz-szelvények a Dráva 236–75 fkm szakaszán

A 3.1.3 fejezetben, a 11. ábra korábbi kutatási eredményeket mutat be, ahol szintén tetten érhető az eséstörés hatása a görgetett hordalék mennyiségére vonatkozóan. Az eséstörés alatti drávaszabolcsi görgetett hordalék mennyisége rendre többszöröse a felső szakaszon lévő Botovó és az eséstöréshez közel lévő Barcs mérőhelyeknél számolt mennyiségnek.

7 AZ EREDMÉNYEK ÖSSZEFOGLALÁSA

A disszertációban bemutatott kutatásom célja a Dráva morfológiai állapotértékelése volt: a folyó jelenlegi állapotának feltérképezése felhasználva a rendelkezésre álló korszerű eszközöket, szemléleteket, hogy ezzel egy, a jövőbeli vízgazdálkodási munkákat megalapozó tanulmány szülessen. Az éghajlatváltozás miatt a jövőben várhatóan növekedni fog a középvíz alatti vízjárású időszakok száma és hossza. Vizsgálataim egyik célja az volt, hogy segítse az erre való felkészülést ennek a vízjárási állapotnak a megismerésével. Kisvízi körülmények között még a folyómeder esésének kisebb különbségei is befolyásolhatják a kavicslerakódást és a meder páncélozódását. Ez a tendencia várhatóan befolyással lesz a görgetetthordalék-háztartásra is, ezért is fontos a jelenlegi állapot részletes feltárása.

A Dráva vizsgált magyar–horvát szakaszának hordalékháztartását jelentősen befolyásolja a vízgyűjtőről érkező hordalékmennyiség és az abban bekövetkező változások, különösen a vizsgált szakasz felett betorkoló mellékfolyó, a Mura hordalékháztartása. A disszertációm részét képezi az erre a folyóra végzett kutatásom is, ami a tartalmi kapcsolódás mellett a Drávára végzett kutatásom megalapozását is szolgálta. Az alábbiakban mutatom be a kutatásom célkitűzéseit a hozzájuk kapcsolódó tézisekkel és azok igazolásával:

1. A Drávába betorkolló mellékvízfolyás, a Mura folyó hordalékszállításának és mederváltozásának vizsgálata – 1. Tézis: *A Mura hullámterének feliszapolódása nem tér el a hazai jellemző értékektől*

A Mura meanderező szakaszain a folyószabályozási munkák a túlfejlett kanyarok átmetszését jelentették, amelynek következményeként jelentős esésnövekedések álltak elő a folyó ezen szakaszain. Az ennek következtében felszabaduló energia a hordalékszallító képesség növekedését okozta. Mivel a felső szakasról nem érkezett a megnövekedett hordalékszallító képességnek megfelelő mennyiségű hordalék, a többlet energia a meder erózióját okozta, melynek következtében a folyó felső szakaszain egyre mélyebben berágódó meder jelentkezett.

Az alsó, vizsgált szakaszon jelentősebb medermélyülés nem volt tapasztalható (ezt igazolják a szakágazatnál használt, a vízhozam mérések alapján készített Q-H görbék is), de az antropogén hatások miatt a hullámtéren mégis lecsökkent vízszállító képesség volt tapasztalható. A folyók

hullámterének lassú feltöltődése, ami az árvízkor oda kijutó finom hordalék kiülepedésével magyarázható, általánosan ismert jelenség hazánk vízfolyásainál.

A feliszapolódás folyamatának vizsgálatára egy projekt keretében 1D és 2D hidrodinamikai modellvizsgálatokat végeztünk (6.1. fejezet). A vizsgálatok során a Murán 2009-ben levonuló árvíz, valamint több elméleti (mesterségesen definiált) árhullám során elemeztük a hordaléktranszport folyamatokat. A jól felépített, kalibrált és igazolt árvízi modellel sokféle vizsgálatot el lehet végezni, a 2D megközelítés már a hullámtéri területek hordaléktranszport folyamatainak vizsgálatát is lehetővé teszi, azonban a modellfuttatások kapacitásigénye megfontolt modellezés-tervezést igényel. A projekt során az én feladatom egy ehhez a részletes vizsgálathoz tartozó döntéselőkészítő vizsgálat volt, melynek során felépítettem, kalibráltam és igazoltam egy 1D-s hordaléktranszport modellt, mellyel ezt követően több modell-változat (scenárió) elemzésére volt lehetőség. Mint azt a 6.1 fejezetben bemutattam, 8 eltérő paraméterekkel rendelkező változatot vizsgáltam, melyekből négy változat esetén volt értelme 2D vizsgálatot is végezni. A 2D modellezés eredményeit és összehasonlítottam néhány, a magyar szakirodalomban találtam hullámtéri feliszapolódási értékkel. *Ezek alapján a Mura hullámterének feliszapolódása nem emelkedik ki a magyarországi többi folyó hullámterén mért értékekhez viszonyítva.*

2. A folyószakaszok kanyarulatfejlettségi állapotának bemutatása, a közelmúltban lezajlott változások elemzésével, a várható folyamatok előrejelzésével.

Egy 2018-ban készített részletes terepmodell alapján meghatároztam a folyó akkori tengely és sodorvonalát, és ennek alapján elvégeztem a klasszikus kanyarulat-fejlettségi vizsgálatot (6.2. fejezet). Az elemzés alapján feltárhatók azok a folyamatok, amik a továbbiakban várható mederváltozásokat fogják okozni. Ezek ismerete segíti a jövőbeni folyógazdálkodás tervezését is.

A teljes magyar-horvát szakasz tekintetében a teljes hossz több, mint harmada fejlett kanyarulat, és közel egy harmada fejletlen kanyar. A valódi egyenes szakasz fordul elő legkisebb arányban, de az álkanyarok mennyisége nem kevés. Az emberi beavatkozásokat figyelembe véve a kapott eredmények jól igazolják és mutatják a szabályozás hatását. Túlfejlett kanyarulat csak a felső szakaszon található, és amíg itt a leggyakoribb típus a fejlett kanyar, addig az alsó szakaszon a

fejlettlen kanyarulatok száma és hossza is a legnagyobb. Az egyes típusok hosszának vizsgálata azt mutatja, hogy az alsó szakaszon jellemzően nagyobb egységes folyószakaszok vannak; minden jellemző érték (minimális, maximális és átlagos hossz is) az alsó szakaszon nagyobb, mint a közel természetes felső szakaszon.

A Dráva érvényben lévő hivatalos és a mederfelmérés alapján szerkesztett középvonalaának vizsgálata jól szemlélteti az elmúlt időszak morfológiai változásait. A szabályozott és a közel természetes állapotú folyószakaszok mederváltozásának különböző dinamikáját már ebben a nem túl hosszú vizsgált időszakban is nyomon lehet követni. A vizsgálatom kimutatta a kevésbé szabályozott felsőbb szakasz markáns, szinte szemmel látható medervándorlását, ami alapján definiálhatók azok a hullámtéri, folyóparti területek, ahol a jövőben erózióra kell számítani. Az alsó, szabályozott szakasz relatív stabil állapotban van.

A Mura egy jellemző szakaszának folyófejlődését is megvizsgáltam a XVIII. századtól napjainkig. A rendelkezésre álló felmérések lehetőséget adnak arra, hogy a folyószabályozási munkák hosszú távú hatását is vizsgáljuk: kimutatva ezzel a dinamikus morfológiai változásokat.

3. Egy részletes mederanyag feltérképezés elkészítése, ami a korábbi vizsgálatokhoz képest jelentősen több információval szolgál a vizsgált Dráva szakasz mederanyag összetételéről. – 2. Tézis: *A Barcs alatti szabályozási munkák okozta páncélozódás folyamata lezajlott.*

A folyószakasz görgetthordalék és mederanyag felmérésében hiánypótló terepi felmérést volt lehetőségünk végrehajtani, ami igen részletes eredményeket adott a folyószakasz megismeréséhez. A mérési kampány során összesen 30 keresztshelvényben közel 90 mederanyag mintát vettünk. A mintavételezést minden esetben vízhozam- és áramlásmérés kísérte, mind a mintázott keresztshelvényben, mind az egyes mintavételi függélyekben. A folyó ilyen részletes áramlástanai és hordalék-mintavételezésére korábban még nem volt példa. A részletes felmérés lehetővé tette a folyószakasz morfológiai állapotának teljes körű feltérképezését (6.3. fejezet). Elkészítettem a vett mederanyagminták szemeloszlás vizsgálatát, valamint ennek alapján a vizsgált szakasz hordalék hossz-shelvényét is. Korábbi kutatási eredmények felhasználásával megvizsgáltam, hogy a kapott szemösszetétel változott-e az

elmúlt időszakban. A mi méréseink összességében kicsit finomabb mederanyagot jeleztek, mint a korábbi vizsgálatok. Barcstól lefelé a korábbi eredményektől eltérően a kavicsfrakció szinte teljesen eltűnt (csak lokálisan volt jelen) és minden megfigyelt keresztmetszetben durva homok uralkodott. *Ugyan a szabályozási munkák során végzett mederátvágásokban a beavatkozás következtében megváltozott esésviszonyok páncélozódást idéztek elő, ez a folyamat a folyószakasz energetikai átrendeződése után azonban lelassult, megállt, amit a mederben észlelt homok frakció dominanciája is jelez.*

4. A folyószakaszra vonatkozó sebességviszonyok és mederanyag-jellemzők összefüggésének elemzése. – 3. Tézis: Mérési eredményekből származtatott Shields paraméter összhangban van az elméleti számítások eredményeivel

Az ADCP által mért áramlási sebességek jelentős változást mutattak a folyó mentén (6.4. fejezet). A mintavételek során az átlagos sebességek tartománya jellemzően a 0,5 – 1,4 m/s között volt, de a kisebb vízhozamtartományban történt mérések esetén az átlagsebesség nem érte el az 1 m/s-ot.

A mederfenék közeli sebesség jellemzően 0,1 – 0,2 m/s között alakult, de egy-két esetben ennél nagyobb, 0,25 m/s körüli értéket is kaptam eredményül.

Az áramlási sebesség hirtelen csökkenése figyelhető meg a 175 és 170 fkm között, a mederesés változásának zónájában (6.5. fejezet). A nyírási sebességek heterogénebb képet mutattak. A vizsgált keresztmetszelvevények átlagos áramlási sebessége és a vett minták jellemző szemátmérője (d_{60}) közötti összefüggés hatványfüggvénnyel írható le és egy közepesen erős korrelációt mutat. A mért mélység menti sebesség-eloszlás elég zajos volt, ami jól mutatja az áramlás erősen turbulens jellegét.

A modern áramlásmérés új lehetőséget kínál fel a görgetett hordalékmozgás határértékének (Shield szám) meghatározására (6.6. fejezet). Klasszikusan ezt az értéket egy mederszakasz általános hidraulikai jellemzői alapján határozzák meg. Az ADCP áramlásmérés azonban lehetővé teszi a nyírófeszültség becslését a mért áramlási paraméterek alapján. A mérési eredmények felhasználása új lehetőségeket nyithat meg a hordaléktranszport elemzésében, ezért megvizsgáltam, hogy a klasszikus és a lehetséges új számítási mód eredményei hogyan

alakulnak. *Az eredmények jelentős eltérést mutattak a két számítási módszer között. Az összefüggés pontosítása további méréseket és összehasonlító vizsgálatokat igényel.*

5. A Barcs térségében lévő eséstörés helyének a friss eredményekkel való igazolása, pontosítása, összevetve a hordalék-szemeloszlás változásával is. – 4. Tézis: A folyómeder eséstörése kimutatható az áramlási- és hordaléktranszport paraméterekben is.

A friss mederfelmérés alapján a középvonal mentén vizsgáltam a folyószakasz esésviszonyait is (6.7. fejezet). A jellemző szelvények (inflexiós és kanyarulati tetőponti szelvények) legmélyebb mederpontjainak összekötésével meghatároztam a folyószakasz mederfenék vonalát.

Az így kapott fenékvonal igazolta a korábbi vizsgálatok szerinti eséstörés helyét, ami napjainkban a 175 fkm környezetében található. Ez a teljes egészében alluviális folyószakaszon belüli lokális változás a felső szakasz 0,4 ezrelék körül lejtését 0,1 ezrelék körül értékre csökkenti. A terepmodell részletes elemzésével az is látható, hogy az alsó szakaszon végzett folyószabályozás ugyan korlátozza a meder laterális elmozdulását, de a mederfenék ezeken a szakaszokon vertikálisan nagyobb változatosságot mutat, mint a beavatkozásokkal nem érintett szakaszokon.

A mederfenék hossz-szelvényt összevetve a mederanyag hossz-szelvénnel, kimutatható az összhang: a felső, meredekebb szakaszon és az eséstörés közvetlen környezetében a kavics, míg az eséstörés alatti folyószakaszon a homok a jellemző mederanyag.

Az eséstörés helye további áramlási és hordalékháztartási paraméterek hossz-menti alakulásában is kimutatható: a főmeder helyszínrajzi vonalvezetésében ezen a szakaszon egy jól kivehető, markáns kanyargósság figyelhető meg; hasonlóan érzékelhető az eséstörés hatása a jellemző szemcse átmérő, az átlagsebesség és a mederanyag mozgásba lendülését jellemző Shields paraméter értékeiben is.

Országosan jellemző jelenség, hogy a korábbi évtizedekben a hordalékmonitoring nem volt annyira előtérben, mint manapság. A kutatási tapasztalataim is azt igazolták, hogy a rendelkezésre álló adatbázis a görgetett hordalékra vonatkozóan a Mura és a Dráva tekintetében is szegényes. A fenntartható és természetközeli vízgazdálkodás igényeit figyelembe véve fontos lenne egy, a korábbi gyakorlattól eltérő monitoring programot kidolgozni, ami rugalmasabban alkalmazkodna a vízjárás-változásokhoz, és gyakoribb és részletesebb méréseket irányozna elő. Az indirekt mérési eljárások rohamos fejlődése lehetővé teheti a monitoring rendszer fejlesztésének célzott és gazdaságos fejlesztését. A monitoring fejlesztésével a Dráva és a Mura is bekapcsolható lenne a DanubeSediment projektben végrehajtott állapotértékelésbe, fejlesztési eljárásba (Haberseck et al., 2019a), és ezen keresztül a Nemzetközi Duna Védelmi Bizottság (ICPDR) Duna vízgyűjtő állapotértékelésébe is (ISPDR, 2021)

A Murán fontosnak tartom a lebegtetett hordalék észlelés mellett a görgetett hordalék és mederanyag méréseket is felvenni a monitoring programba.

A vízügyi ágazat a 2019-ben lezárult FAIRWay Danube projekt (<https://www.fairwaydanube.eu/>) keretében beszerzett egy multi-beam szondával felszerelt hajót, ami lehetőséget biztosíthat a Dráván újabb részletes mederfelmérések végrehajtására, ami a HUMARK projekt-ben meghatározott célkitűzések (<https://www.ovf.hu/hu/nemzetkozi-futo-projektek/hunmark-projekt-2015-2020>) Drávára történő kiterjesztése mellett, a morfológiai változások további nyomon követését is segítenék.

Ígéretes kutatási lehetőséget rejtene a Dráva Barcs feletti eséstörés környezetének rendszeres morfológiai monitoringja is. Ezen a természetközeli folyószakaszon történő rendszeres és részletes mederfelmérések, hordalék és mederanyag mintavételek a folyószakasz változásának megismerése mellett, mintaterülete is lehetne a közel természetes vízfolyásokra vonatkozó morfológiai kutatásoknak.

8 A KUTATÁS TOVÁBBI IRÁNYAI

A disszertációban bemutatott kutatásom célja a Dráva és a Mura közös magyar–horvát szakaszának morfológiai vizsgálata volt. Az éghajlatváltozás, a folyókon megjelent antropogén hatások, a geopolitikai változások, a változó igények a folyószakasz vízgazdálkodására is hatással vannak. A vizsgálat egy hiánypótló megalapozó tanulmány lett, ami előkészít az ökoszisztéma szolgáltatások értékelése mellett későbbi vízgazdálkodást segítő vizsgálatokat.

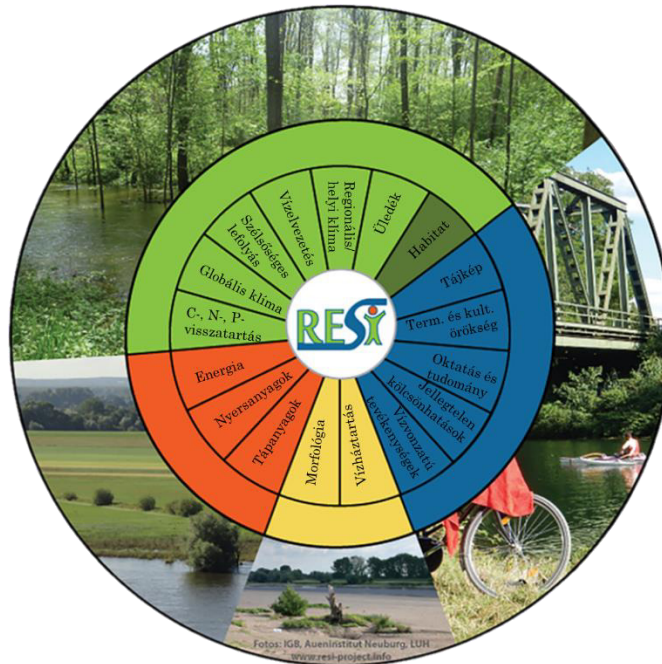
A 6. fejezetben bemutatott eredmények a Drávára a jelenlegi morfológiai státusz mellett a jövőben jellemzően várható kisvizes állapot áramlási viszonyait jellemezték. A morfológia változások tekintetében azonban fontos szerepet kapnak a folyószakaszon levonuló árhullámok, melyek során a megnövekedett elragadó erő képes markáns változásokat előidézni a mederben, amit a Murára bemutatott vizsgálat is igazol. Az elmúlt időszakban, a kutatás ideje alatt nem érkezett Dráván olyan árhullám, ami lehetővé tette volna a jelenség terepi megfigyelését és mérését. A Murára elvégzett komplex morfológiai vizsgálat eredményeinek és tapasztalatainak felhasználásával fontosnak tartom a morfodinamikai modell-vizsgálatot a Dráva teljes magyar–horvát szakaszára elvégezni. Az éghajlatváltozással kapcsolatos prognózisok ugyan jellemzően kisvízi állapotokat jeleznek előre, de emellett nagyobb intenzitású és volumenű árhullámokat is. Az árhullámok mederalakító ereje igen jelentős, és ha azonosítjuk a folyóhálózat morфомetriai paramétereinek változásait, következtetéseket vonhatunk le a jövőbeni árvízi veszélyekre. A Murára végzett projektben bemutatott kutatási módszerek szintézisével megfelelő beavatkozások prognosztizálhatók az árvízveszély csökkentésére a Dráva hullámtéri területen is.

Elméleti kérdések vonatkozásában érdemesnek tartom a különböző sebességmérő eszközök összehasonlító elemzését. A terepi mérés során az ADCP-vel történő részletes áramlásmérés mellett a hordalák mintavétel során használtunk egy OTT típusú áramlásmérőt is, ami terepi körülmények között jól alkalmazható a pillanatnyi áramlási állapot nyomon követésére adott pontban. Az ADCP mérési eredmények és az OTT áramlásmérővel észlelt eredmények eltértek egymástól és összehasonlítva őket azt tapasztalhatjuk, hogy a két fajta eljárás között a mérések alapján nem lehet egyértelmű kapcsolatot felállítani. A két eljárás közötti jelentős különbség az, hogy míg az OTT áramlásmérő egy áramlási irányban észlel, melyet a mérőműszer iránya határoz meg, addig az ADCP térbeli érzékelést végez, így a két érték nagy valószínűséggel nem

csak nagyságában tér el, hanem irányában is. Az okok feltárása és egy jó összefüggés felállítása érdekes és fontos kutatási téma, amit további együttes mérések adataival kiegészítve érdemes kutatni.

Az 1970-es években született, és a '90-es években elterjedt ökoszisztéma-szolgáltatások fogalomköre 2000 után vált a szakmai körökben általánossá, miután az Európai Unió természetvédelmi politikai dokumentumaiban is egyre gyakoribbá vált (Kovács et al., 2011). A koncepció jelentősége abban van, hogy igyekszik a természeti értékeknek a társadalmi hasznosításhoz, hasznosságához kapcsolódóan értéket adni, mellyel kézzelfoghatóbbá tehetjük az ökológiai értékeink védelmének fontosságát, és védelmüket társadalmi (gazdasági) vonatkozásban is tudományos alapokra tudjuk helyezni. Hazánkban is több olyan szakmapolitikai stratégia született az utóbbi időben, ahol megjelenik az igény az ökoszisztéma szolgáltatások feltérképezésére, felmérésére.

A hazai vízfolyások és hullámterek ökoszisztéma-szolgáltatásainak felméréshez a Víz tudományi és Vízbiztonsági Nemzeti Labor projekt (RRF-2.3.1-21-2022-00008) egy pilot program keretében dolgozza ki a kutatási módszertant. A tervezett eljárás egy német mintán alapul, ahol a vízfolyások és hullámterek ökoszisztéma-szolgáltatásait négy nagy csoportba sorolható 17 elkülöníthető ökoszisztéma-szolgáltatásra osztják (45. ábra).



45. ábra Ökoszisztéma-szolgáltatások vízfolyás formálta tájak vonatkozásában (Podschum et al., 2018)

Az ökoszisztéma-szolgáltatások között a morfológia külön szolgáltatásként is megjelenik (Podschum et al., 2018). Amellett, hogy a morfológia az egyik alap szolgáltatás, a folyó életében bekövetkező alaki változások (mederelfajulások, feltöltődések, kimélyülések stb.) közvetlen vagy közvetett módon a többi szolgáltatáselemre is erős hatást gyakorolnak. Így tehát belátható, hogy a morfológiai folyamatok, jelenségek ismerete kiemelten fontos folyóink fenntartható használatában, a jövőre vonatkozó várható természetes változások előrejelzésében és a mesterséges beavatkozási lehetőségek tervezésében.

A hordalékháztartás változásai viszonylag gyors hatást gyakorolhatnak a meder morfológiájára, különösen árvizek idején, és ennek következtében a kapcsolódó ökoszisztémákra és az ökoszisztéma-szolgáltatásokra is. Az ökológiai változások általában gyorsabban reagálnak, mint a morfológiai folyamatok, így az ökoszisztéma rövid távú javulása nem feltétlenül jelzi a közép- és hosszútávú sikereket pl. a folyó helyreállítása vagy a hordalékkezelési tervek megváltoztatása vonatkozásában. A hordalékháztartás felmérések nagyon fontosak a folyó geomorfológiai állapotának diagnosztizálásához és a helyreállítási tevékenységek lehetséges sikerének felméréséhez (Haberseck et al., 2019b), a hordalékkezelési stratégiák megtervezéséhez és a megváltozott hordalékkezelésből adódó változások előrejelzéséhez vagy a jövőbeli hatások értékeléséhez.

További potenciál rejlik a morfológiai változások és a mederanyag-összetétel részletesebb összefüggéseinek vizsgálatában is, ami nem csak morfológiai, de az élőhely feltárását, megőrzését, azaz az ökoszisztéma-szolgáltatások tervezését is megalapozhatja. A Dráva vizsgált szakaszára vonatkozó kutatásom alapja lehet a jövőben a folyószakaszra történő ökoszisztéma-kutatásnak, a jelenlegi állapot definiálásában és a várható folyamatok előrejelzésében is.

9 KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Köszönetemet szeretném kifejezni kutatótársamnak, *Gradwohl-Valkay Alexandrának*, akivel közösen végeztük a terepi felmérését és az azzal kapcsolatos feldolgozásokat. A hordalék minták laboratóriumi elemzésében *Balogh Richárd* volt segítségemre.

Az eredményeim elérésében elvülhetetlen érdeme van konzulenseimnek, *Pirkhoffer Ervinnek* és *Czigány Szabolcsnak*, akik nélkül nem lett volna lehetőségem eljutni eddig a pontig. Hálával tartozom a képzés során kapott támogatásért *Geresdi István* professzor úrnak, aki több alkalommal is bizalmat szavazott nekem a képzés során.

Köszönöm barátaim és családom biztatását és segítségét, kiemelve *Engi Zsuzsannát*, aki mind baráti mind szakmai támogatását adta és *Gajzerné Demkó Erikát*, aki biztatásaival és nyelvi lektorálásával is segítette munkámat.

A kutatásomat leginkább talán *Édesanyám* viselte szíven, aki amíg tehetette mindvégig kitartóan biztatott, és mellettem állt. A disszertációt Ő már nem veheti kezébe, de engem mindig az Ő gondoskodó szeretetére fog emlékeztetni.

Fil. 4:13

10 IRODALOMJEGYZÉK

- Andrási, G. (2015). *A Dráva horvát-magyar szakaszán a vízjárás és a mederdinamika vizsgálata* [Doktori értekezés, Szegedi Tudományegyetem]
- Andrási, G., & Kiss, T. (2013). Szigetek változásai a Dráva Mura és Duna közötti szakaszán. *Hidrológiai Közlöny*, 93(1), 35–40
- Az Európai Parlament és a Tanács 2000/60/EK Irányelve*
- Bagnold, R. A. (1954). Experiments on a gravity-free dispersion of large solid spheres in a Newtonian fluid under shear. *Proceedings of the Royal Society of London (A)*, 225, 49
- Balatonyi L., Lengyel B., & Berger Á. (2022). Nature-based solutions as water management measures in Hungary. *Modern Geográfia*, 17(1), 73–85.
<https://doi.org/10.15170/MG.2022.17.01.05>
- Bali, L., & Kőkuti, T. (2008). Einige Aspekte Der Untersuchung, der die Kroatisch–Ungarischen Grenze übersteigenden Zusammenarbeit. *Modern Geográfia*, 3(3), 19–34
- Bogárdi, J. (1942). Hordalékmozgás a folyószabályozásban. *Vízügyi Közlemények*, 24(3–4), 207–265
- Borsy, Z., Jakucs, L., Kerényi, A., Mezősi, G., Papp, S., Szabó, J., Székely, A., & Zámbó, L. (1992). *Általános természetföldrajz*. Művelődési Minisztérium
- Bridge, J. (2003). *Rivers and Floodplains: Forms, Processes, and Sedimentary Record*. Wiley-Blackwell
- Čelan, T. J. (2014). A Historical Geographical Analysis of the Development of the Croatian–Hungarian Border. *Modern Geográfia*, 9(4), 75–92
- Chen, C. L. (1991). Unified Theory on Power Laws for Flow Resistance. *Journal of Hydraulic Engineering*, 371–389
- Cholnoky, J. (1934). A folyók szakaszjellegének összefüggése a szabályozással és öntözéssel. *Vízügyi közlemények*, 16(1), 5–25

Csiti, B. (2018). *Folyami görgetett hordalékmérési módszerek terepi és számítógépes vizsgálata*, [TDK dolgozat, BME Vízügyi és Vízgazdálkodási Tanszék]

DÉDUVIZIG (2021). *Folyószabályozási engedélyezési tervek*

Domány, A., & Burián, A. (2018). Lehet-e még a Dráva természetes vízjárású?. In Szilávik, L., Hamar, B.; & Kaszás, G. (szerk.). *A Magyar Hidrológiai Társaság által rendezett XXXVI. Országos Vándorgyűlés dolgozatai*, (pp. 1–15)
http://www.hidrologia.hu/vandorgyules/36/word/0901_domany_andras.pdf

Donka, A. (2012). A vízitúrázás célterületeinek természeti szempontú értékelése. *Természetföldrajzi Közlemények a Pécsi Tudományegyetem Földrajzi Intézetéből*, 1(2), 3-40

Donka, A., & Gila, Cs. (2013). Kísérlet az Élővíz-csatorna víziturisztikai értékelésére. *Modern Geográfia*, 8(4), 9–32. <https://moderngeografia.eu/hu/kiserlet-az-eloviz-csatorna-viziturisztikai-ertekelesere/>

ADuna-Dráva Nemzeti Park Igazgatóság (2020). https://www.ddnp.hu/termeszetvedelem/vedett_termeszeti_teruletek/nemzeti_park_-_drava_menti_teruletek

Einstein, H. A. (1950). The Bed-Load Function for Sediment Transportation in Open Channel flows. *Technical Bulletin*, 1026,

Engelund, F., & Fredsee, J. (1976). A Sediment Transport Model for Straight Alluvial Channels. *Nordic Hydrology*, 7, 293-306

Engi, Z., & Ficsor, J. (2020). Hydraulic modeling - Simulation of the silting up process of the inundation area. In *Round Table with International Participation SEDIMENT IN WATER SYSTEMS - CURRENT STATE AND TRENDS*

Engi, Z., Tóth, G., & Braun, M. (2016b). A Mura folyó hullámterének feliszapolódás vizsgálata II. rész. *Hidrológiai Közlöny*, 96(2), 52-66

Engi, Z., Tóth, G., Somogyi, K., Lanter, T., Hercsel, R., & Bozzay, F. (2016a). A Mura folyó kanyarulatvándorlásainak elemzése és hullámterének feliszapolódás vizsgálata 2 D modellezéssel. *Hidrológiai Közlöny*, 96(1), 33-48

Engi, Z., Tóth, G., Steinman, F., & Braun, M. (2012). Historical morphological reconstruction of the Mura River (SW of the Carpathian Basin) by using GIS methods. *Zeitschrift Für Geomorphologie*, 56(2), 063-077

Engi, Zs. (2016). *Hidravlično modeliranje poplavne nevarnosti na izlivnih odsekih vodotokov, oprto na procese zamuljevanja. = Flood hazard modelling on river outfall stretches, based on silting up processes.* [Doktori értekezés, Univerza v Ljubljani]

FAIRWay Danube <https://www.fairwaydanube.eu/>

Frings, R. (2004). *Downstream fining – a literature review*, Departement Fysische Geografie Universiteit Utrecht

Gashi, N., Czigány, Sz., Pirkhoffer, E., & Kiss, K. (2023). Modelling the Impact of Climate Change on the Flow Regime and Channel Planform Evolution of the Lower Drava River. *Modern Geográfia*, 18(2), 47–76

GoogleEarth <https://earth.google.com/web/>

Gray, J. R., Gartner, J. W., Barton, J. S., Gaskin, J. , Pittman, S. A., & Rennie, C. D. (2010). Surrogate technologies for monitoring bed-load transport in rivers. In Poletto, C & Charlesworth, S. (szerk.), *Sedimentology of Aqueous Systems*. Wiley

György, B., & Burián, A. (2005). Történeti áttekintés a Dráva vízépítési munkáiról. *Hidrológiai Tájékoztató*, 32-34

Habersack, H., Aigner, J., Haimann, M., Klösch, M., Liedermann, M., Hauer, C., & Piégay, H. (2019b). The Sediment Balance of Alpine Rivers - Dynamics of Erosion and Sedimentation. In Muhar, S., Muhar, A., Egger, G., & Siegrist, D. *Rivers of the Alps - Diversity in Nature and Culture*, (pp. 74-85). Haupt Verlag

Habersack, H., Baranya, S., Holubova, K., Vartolomei, F., Skiba, H., Babic-Mladenovic, M., Cibilic, A., Schwarz, U., Krapesch, M., Gmeiner, Ph., & Haimann, M. (2019a). *Danube Sediment Management Guidance*. Output 6.1 of the Interreg Danube Transnational Project DanubeSediment co-funded by the European Commission, Vienna.

- Habersack, H., Nachtnebel, H. P., & Laronne, J. (2001). The continuous measurement of bedload discharge in a large alpine gravel bed river. *Journal of Hydraulic Research*, 39(2), 125-133
- Halmai, Á., Balatonyi, L., Valkay, A. I., Czigány, S., Liptay, Z. Á., & Pirkhoffer, E. (2018). Új megközelítésű mederfelmérés technikák alkalmazása kisvízfolyásokon. *Védelem Tudomány*, 3(4), 159-181
- Halmai, Á., Gradwohl-Valkay, A., Czigány, S., Ficsor, J., Liptay, Z., Kiss, K., Lóczy, D., & Pirkhoffer, E. (2020). Applicability of a Recreational-Grade Interferometric Sonar for the Bathymetric Survey and Monitoring of the Drava River. *International Journal of Geo-Information*, 9, 149
- Hamvas, F. (1994). *Vízépítés*, Műegyetemi Kiadó
- Haschenburger, J., & Church, M. (1998). Bed material transport estimated from virtual velocity of sediment. *Earth Surface Processes Landforms*, 23, 791-808
- Hutchinson, M. F., Xu, T., & Stein, J. A. (2011). Recent Progress in the ANUDEM Elevation Gridding Procedure. *Geomorphometry*, 19-22
- Hydraulics Laboratory, University of Iowa (1940). *Equipment used for sampling bed-load and bed material, Report No. 2.*,
- ISPDR. (2021). *Scientific Report: A Shared Analysis of the Danube River*.
- Jamieson, E. C., Rennie, C. D., Jacobson, R. B., & Townsend, R. D. (2011). Evaluation of ADCP Apparent Bed Load Velocity in a Large Sand-Bed River: Moving versus Stationary Boat Conditions. *Journal of Hydraulic Engineering*, 137, 1064-1071
- Kádár, L. (1954). Az eróziós folyamatok dialektikája. *Közlemények a Debreceni Kossuth Lajos Tudományegyetem Földrajzi Intézetéből*, 18, 1–20
- Károlyi, Z. (1960). A Tisza medervéltozásai, különös tekintettel az árvízvédelemre. *VITUKI Tanulmányok és Kutatási Eredmények sorozat*, 8, 102

- Keve, G., Fekete, Á., Sziebert, J., Koch, D., Tamás, E. A., Varga, Gy., Majer, F. K., Krikovszky, S., Ficsor, J., & Logó, B. (2022). Hazai és európai vízhozammérési eljárás összehasonlító elemzése. *Hidrológiai Közlöny*, 102(1), 32-42
- Kiss, T., & Andrási, G. (2019). Evolution of the Drava Floodplain in Hungary in the Last 100 Years. In Lóczy, D., *The Drava River Environmental Problems and Solutions*, (pp. 157-175). Springer Geography
- Kiss, T., & Blanka, V. (2012). River channel response to climate- and human induced hydrological changes: Case study on the meandering Hernád River, Hungary. *Geomorphology*, 175-176, 115-125
- Koch, D., & Koch, G. (2012). *A hordalék-elemzés módszerei, tapasztalatai és fejlesztési lehetőségei*, Tudományos képzés műhelyeinek támogatása az Eötvös József Főiskolán TÁMOP-4.2.2.B-10/1-2010-0032
- Kondolf, G. (1997). Hungry Water: Effects of Dams and Gravel Mining on River Channels. *Environmental Management*, 21(4), 533-551
- Kovács, E., Kelemen, E., & Pataki, G. (2011). Ökoszisztéma szolgáltatások a tudományterületek és a szakpolitika metszéspontjában. *Természetvédelmi Közlemények*, 17, 1–11
- Kozák, M. (1997). *Vízfolyások rendezése és hasznosítása*, Műegyetemi Kiadó
- Laczay, I. (1982). A folyószabályozás tervezésének morfológiai alapjai. *Vízügyi Közlemények*, 64(2), 235–255
- Leliavsky, S. (1955). *An Introduction to Fluvial Hydraulics*. (pp. 245). Constable.
- Leopold, L., & Wolman, M. (1957). River Channel patterns: braided, meandering, and straight. *US Geological Survey Professional Paper*, 282-B,
- Lóczy, D. (szerk.) (2019). *The Drava River*, Springer Geography
- Lovász, G. (2013). A jelenkori tektonika hatása a Duna, a Tisza és a Dráva hidrológiai folyamataira. *Földrajzi közlemények*, 137(3), 248-256

Lovász, Gy. (1972). *A Dráva-Mura vízrendszer vízjárási és lefolyási viszonyai*, Akadémiai Kiadó

Mantuáno, J. (1974). A Dráva vízjárása. *Vízügyi Közlemények*, 56(3), 368-401

ME-10-231-16:2009. *A felszíni vizek mennyiségi mérésének követelményei*

Miall, A. D. (2010). *The Geology of Fluvial Deposits: Sedimentary Facies, Basin Analysis, and Petroleum Geology*, Springer-Verlag

Miall, A. D. (2014). *Fluvial Depositional Systems*, Springer International

MIKE by DHI (2014). *User Guide*

Mozaik Education (2023).

https://www.mozaweb.hu/lexikon.php?cmd=getlist&let=IMAGE&order_type=international&pg=301&open_extra_id=123094

Oroszi, V. (2009). *Hullámtér-fejlődés vizsgálata a Maros magyarországi szakaszán* [Doktori értekezés, Szegedi Tudományegyetem]

OVF (2022). *Dráva Részvízgyűjtő Vízigazdálkodási terve - 2021. Magyarország Vízgyűjtő-gazdálkodási Tervénet második felülvizsgálata*

Paola, C., & Voller, V. R. (2005). A generalized Exner equation for sediment mass balance. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface* 110(F4)
<https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2004JF000274>

Pirkhoffer, E., Halmai, Á., Ficsor, J., Gradwohl-Valkay, A., Lóczy, D., Nagy, Á., Liptay, Z. Á., & Czigány, Sz. (2021). Bedload entrainment dynamics in a partially channelized river with mixed bedload: A case study of the Drava River, Hungary. *River Research and Application*, 37(5), 699–711

Podschum, S., Albert, C., Costea, G., Damm, C., Dehnhardt, A., & Fischer, C. (2018). *RESI - Felhasználói Kézikönyv*, LeibnizHydroökológiai és Belvízi Halászati Intézet

Rákóczi, L., Szlávik, L., Sziebert, J., Tamás, E. A., Süveggyártó, A. M., & Koch, G. (2012) *Sediment analysis study under the project of Dráva morphological monitoring* Reference: HU/HR/1001/1.1.2/0009

- Ryan, S. E., Bunte, K., & Potyondy, J. P. (2005). Bedload - transport measurements: data needs, uncertainty, and new technologies. *US Geological Survey Circular, 1276*, 16 – 28
- Sándor, A., & Kiss, T. (2006). A hullámtéri üledék-felhalmozódás mértékének vizsgálata a Közép- és Alsó-Tiszán. *Hidrológiai Közlöny, 86(2)*, 58-62
- Schumm, S. (1977). *The fluvial system*, Wiley
- Schumm, S. (1985). Patterns of Alluvial Rivers. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 13*, 5–27
- Sharma, A., Herrera-Granados, O., & Kumar, B. (2019). Bedload transport and temporal variation of non-uniform sediment in a seepage-affected alluvialchannel. *Hydrological Sciences Journal, 64(8)*, 1001-1012
- Simpson, M., & Oltmann, R. (1990). An Acoustic Doppler Discharge-Measurement System. *HY Div/ASCE, Hydraulic Engineering Proceedings 1990 National Conference*, 903
- Szabó, Sz., & Posta, J. (2008). A földtani kéreg nehézfém tartalma és a feltöltődés sebessége a tiszai hullámtéren. *Tanulmányok a geológia tárgyköréből dr. Kozák Miklós tiszteletére*, 85-90
- Szekeres, J., (2003). *A Dráva hordalékjárásának vizsgálata a legfrissebb adatok figyelembevételével*. VITUKI Összefoglaló jelentés
- Szlávik, L. (2001). A Tisza völgy Árvízvédelme és fejlesztése. *I. Magyar Földrajzi Konferencia, Szeged* (pp. 1-52)
- Szlávik, L., Sziebert, J., & Tamás, E. A. (2012). A DRÁVA MORFOLÓGIAI MONITORINGJA – Hordalékvizsgálat Sediment analysis study under the project of ‘Dráva morphological monitoring REFERENCE
- Tamás, E. A. (2019). Sediment Transport of the Drava River. In Lóczy, D. (szerk.), *The Drava River Environmental Problems and Solutions*, (pp. 91-103). Springer Geography
- Teledyne RD Instruments (2018). *Win River User's Guide*
- Tóth, G., Engi, Z., Majdán, J., & Fábrián, S. (2013). Historijsko-morfološka rekonstrukcija inundacije rijeke Mure. *Ekonomski i ekohistorija, 9(9)*, 28-34

Uherkovich, Á., & Nógrádi, S. (1997). *Platyphylax frauenfeldi* Brauer, 1857 (Trichoptera, Limnephilidae) in Hungary. *Braueria*, 24, 13-24

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

Wan Mohtar, W. H. M., Junaidi, Sharil, S., & Mukhlisin, M. (2016). Representative sediment sizes in predicting the bed-material load for nonuniform sediments. *International Journal of Sediment Research*, 31, 79-86

Willis, J., & Kennedy, J. (1975). *Sediment discharge of alluvial streams calculated from bedform statistics Report No. 202*, University of Iowa

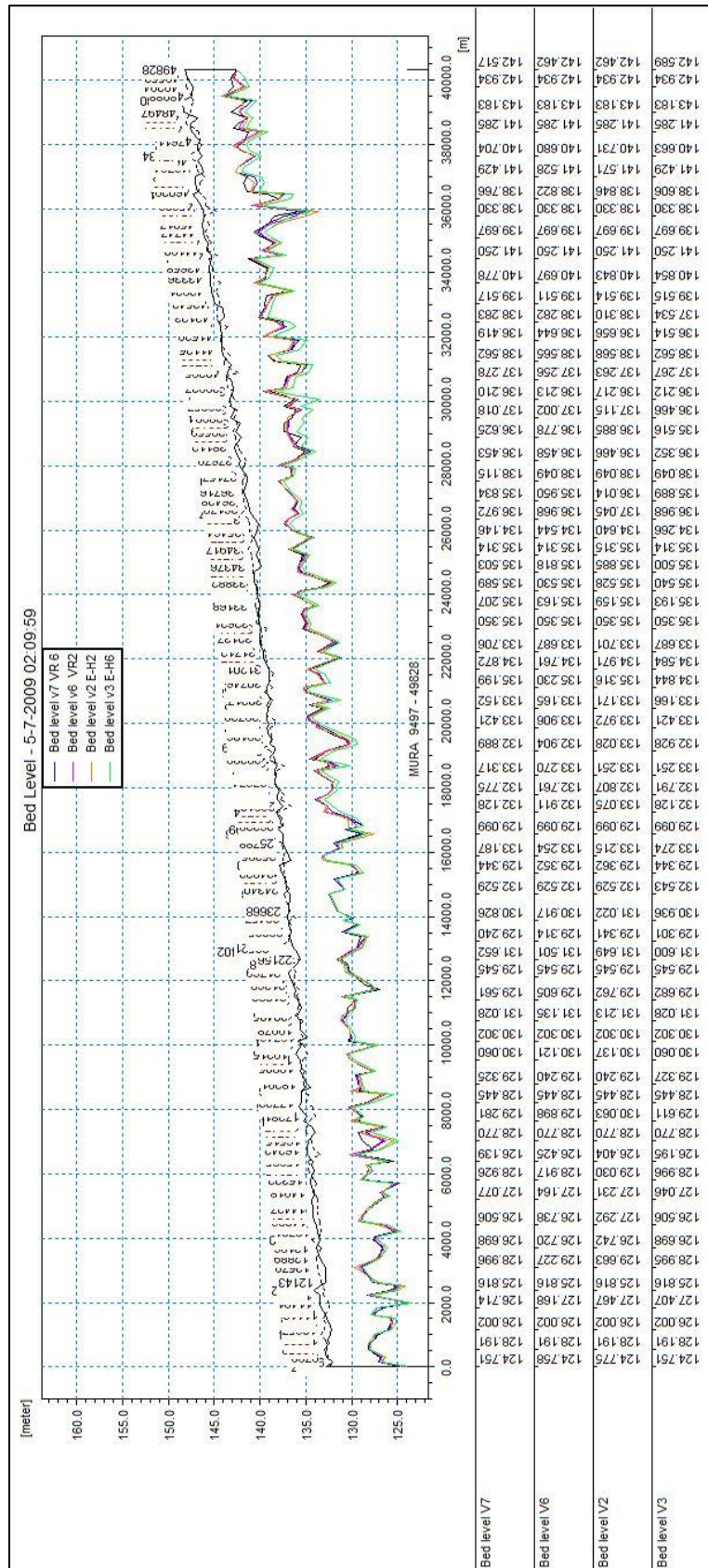
Závoczky, S. (2005). Vízlépcső vagy nemzeti park. *Hidrológiai tájékoztató*, 35-36

Függelék 1

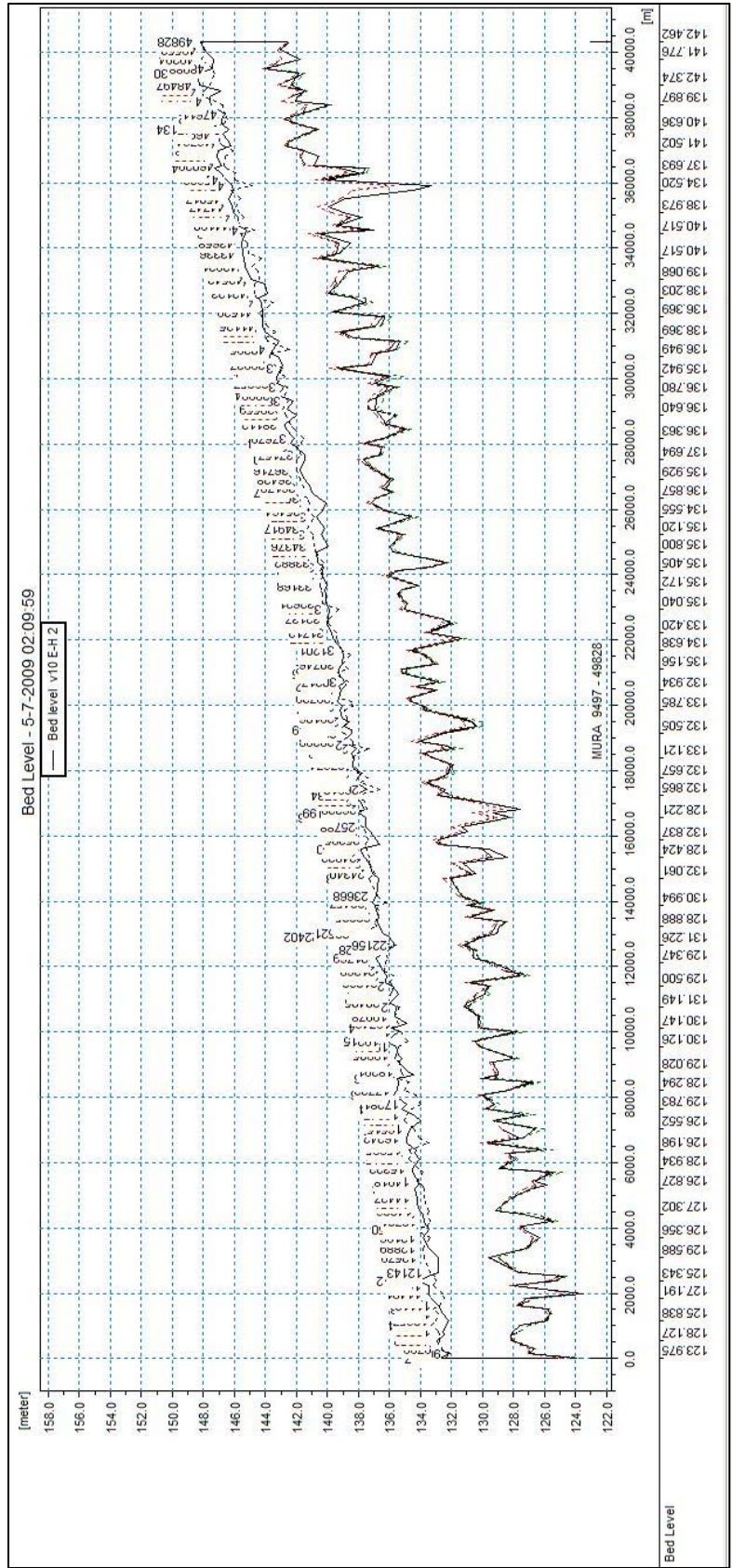
1D hidrodinamikai modellezés eredményei a Mura folyó

9+497 - 49+828 km szelvények között

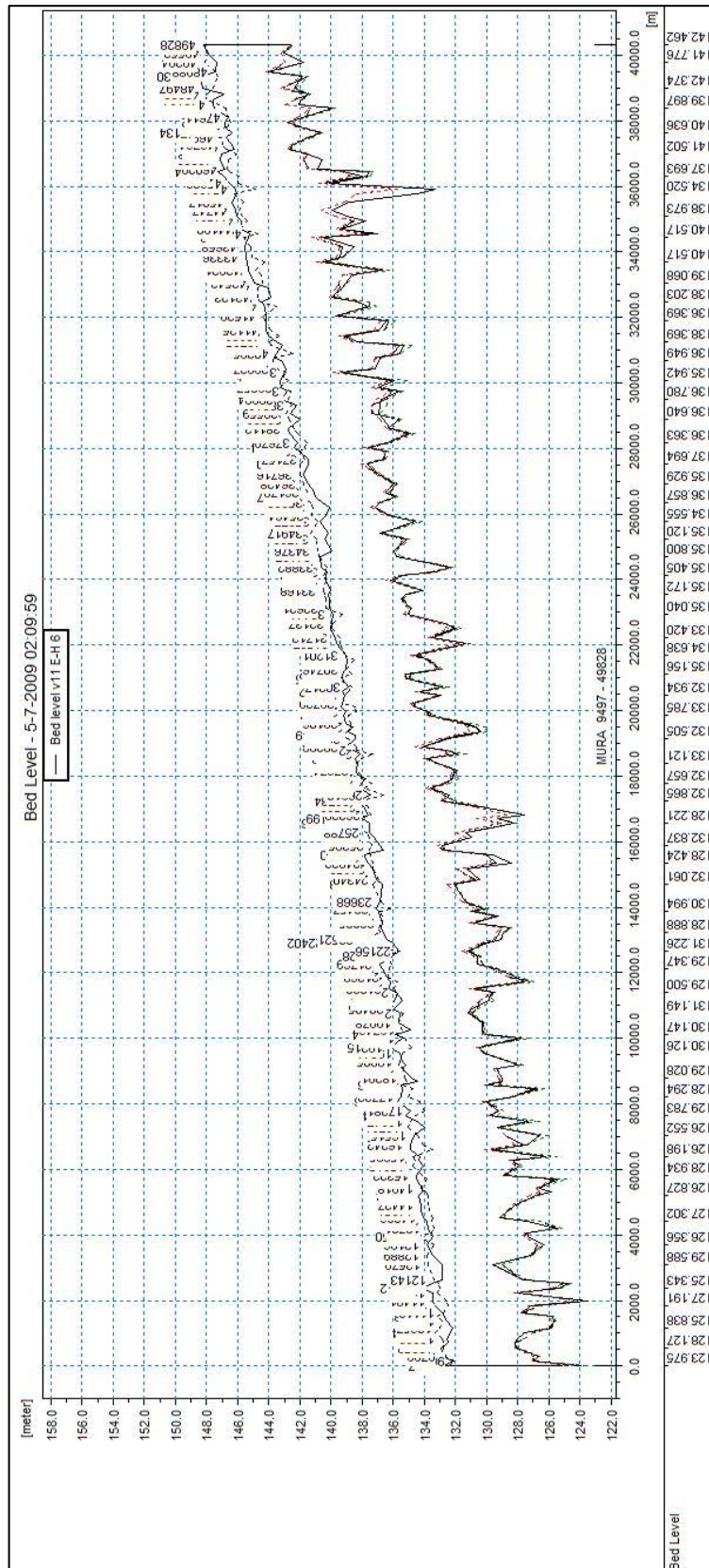
Mederváltozás hossz-szelvénye a v2, v3, v6, és v7 változatokra



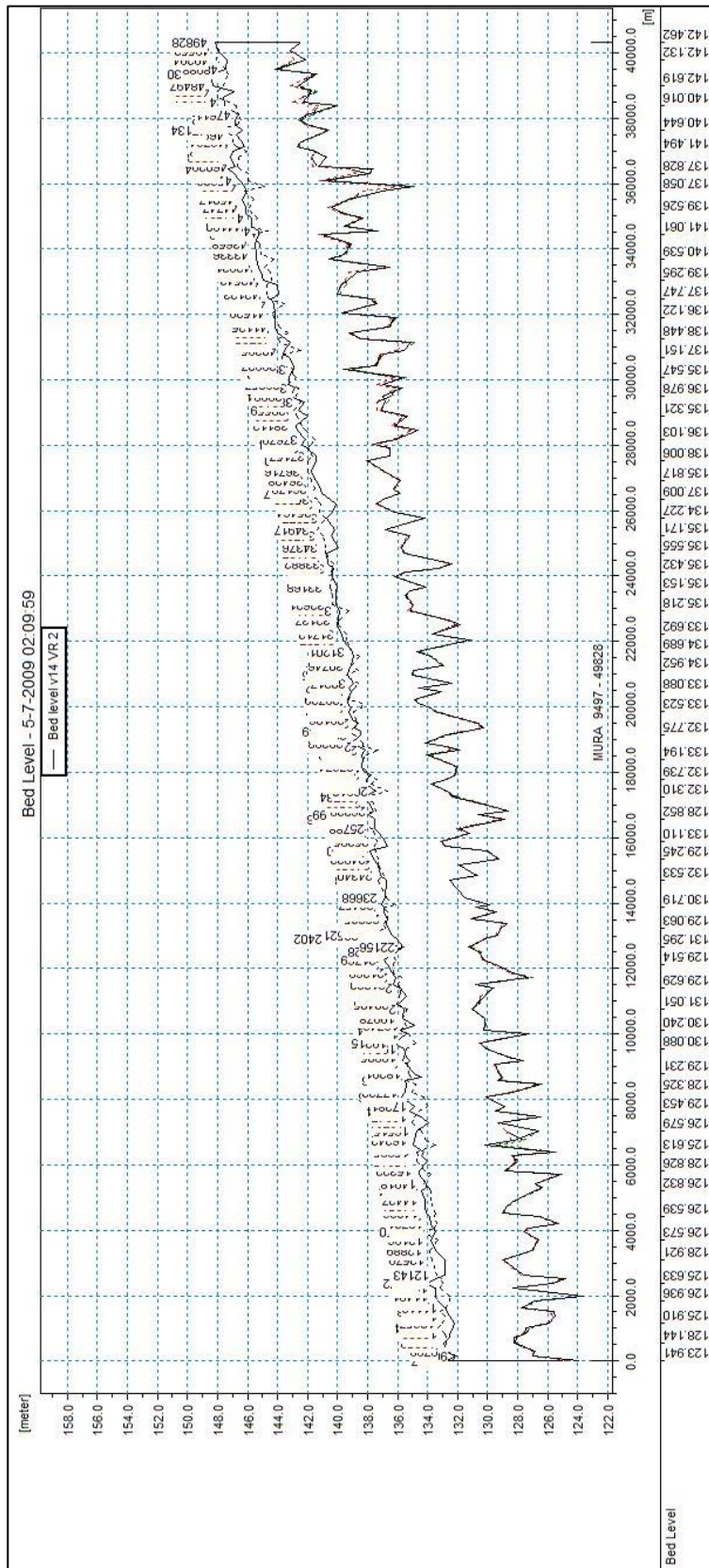
Mederváltozás hossz-szelvénye a v10 változatra



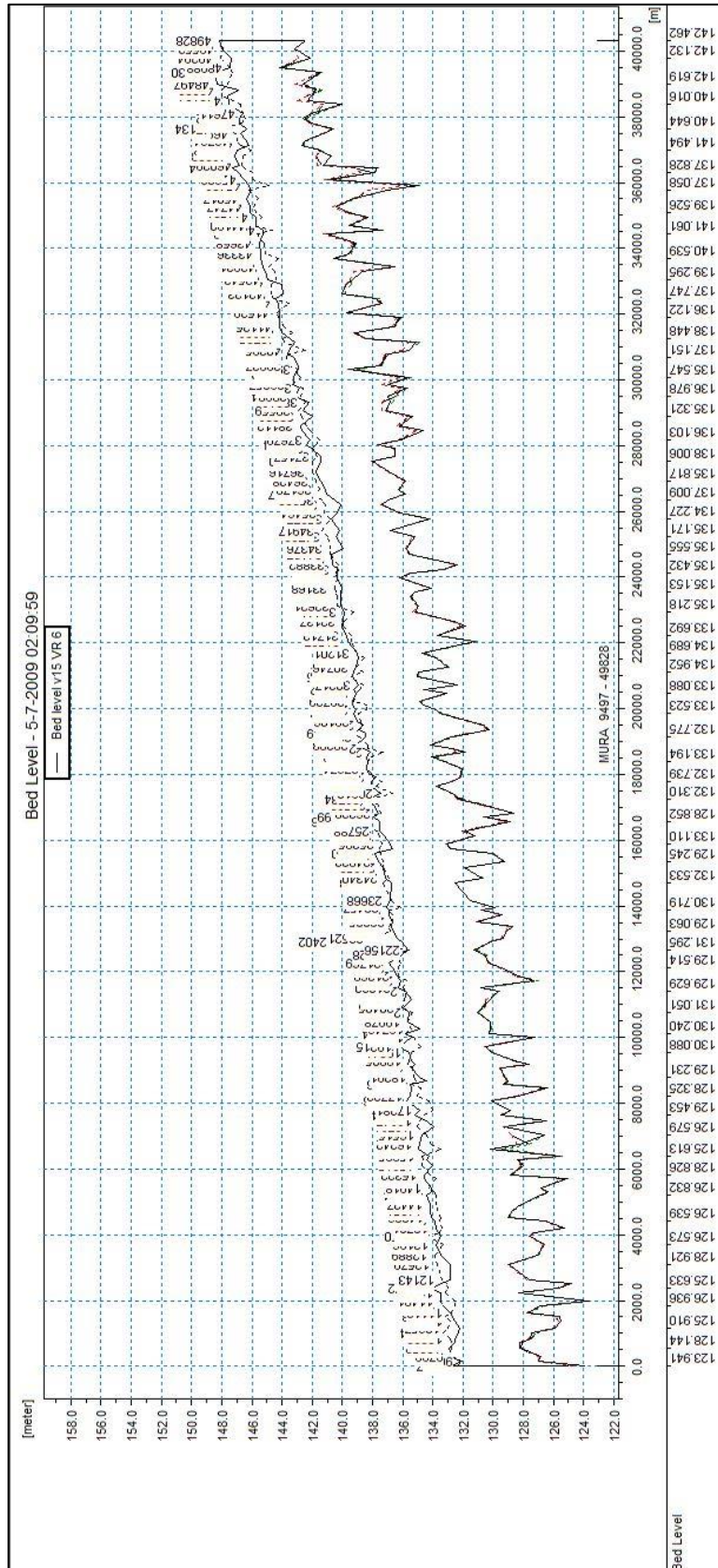
Mederváltozás hossz-szelvénye a v11 változatra



Mederváltozás hossz-szelvénye a v14 változatra



Mederváltozás hossz-szelvénye a v15 változatra



Függelék 2

Lézerdiffrakciós mérések eredményei görgetett hordalék mintákon

A 156. fkm bal parton gyűjtött fenékhordalék-minta szemeloszlási adatai

156 b		
	Típus:	egymódusú, közepesen-jól osztályozott
	Szöveti csoport:	homok
	Üledék:	közepesen-jól osztályozott, közepes homok
	átlag	356,0
	osztályozottság	125,3
Aritmetikus ($\square m$)	ferdeség	0,607
	lapultság	2,857
	átlag	333,8
	osztályozottság	1,430
Geometrikus ($\square m$)	ferdeség	-0,148
	lapultság	2,488
	átlag	1,583
	osztályozottság	0,516
Logaritmikus (\square)	ferdeség	0,148
	lapultság	2,488
FOLK és	átlag	335,1
WARD módszer	osztályozottság	1,445
($\square m$)	ferdeség	-0,035
	lapultság	0,930
FOLK és	átlag	1,577
WARD módszer	osztályozottság	0,531
(\square)	ferdeség	0,035
	lapultság	0,930
FOLK és	átlag:	közepes homok
WARD módszer	osztályozottság:	közepesen-jól osztályozott
(leírás)	ferdeség:	szimmetrikus
	lapultság:	mezokurtikus
	módusz 1 (mm):	331,0
	módusz 1 (f):	1,598
	D ₁₀ ($\square m$):	206,1
	D ₅₀ ($\square m$):	337,1

D ₉₀ (□m):	535,4
(D ₉₀ / D ₁₀) (□m):	2,598
(D ₉₀ - D ₁₀) (□m):	329,3
(D ₇₅ / D ₂₅) (□m):	1,684
(D ₇₅ - D ₂₅) (□m):	176,7
D ₁₀ (□):	0,901
D ₅₀ (□):	1,569
D ₉₀ (□):	2,279
(D ₉₀ / D ₁₀) (□):	2,528
(D ₉₀ - D ₁₀) (□):	1,377
(D ₇₅ / D ₂₅) (□):	1,626
(D ₇₅ - D ₂₅) (□):	0,752
% kavics:	0,0%
% homok:	100,0%
% iszap:	0,0%
% nagyon durva kavics:	0,0%
% durva kavics:	0,0%
% közepes kavics:	0,0%
% finom kavics:	0,0%
% nagyon finom kavics:	0,0%
% nagyon durva homok:	0,0%
% durva homok:	14,2%
% közepes homok:	63,6%
% finom homok:	22,1%
% nagyon finom homok:	0,1%
% nagyon durva szilt:	0,0%
% durva szilt:	0,0%
% közepes szilt:	0,0%
% finom szilt:	0,0%
% nagyon finom szilt:	0,0%
% agyag:	0,0%

A 156. fkm szelvényben gyűjtött 08_23/1-es fenékhordalék-minta szemeloszlási adatai

08_23 minta1		
	Típus:	egymódusú, jól osztályozott
	Szöveti csoport:	homok
	Üledék:	jól osztályozott közepes homok
	átlag	420,9
	osztályozottság	113,9
Aritmetikus (\square m)	ferdeség	0,451
	lapultság	2,667
	átlag	404,8
	osztályozottság	1,315
Geometrikus (\square m)	ferdeség	-0,140
	lapultság	2,516
	átlag	1,305
	osztályozottság	0,395
Logaritmus (\square)	ferdeség	0,140
	lapultság	2,516
FOLK és	átlag	406,5
WARD módszer	osztályozottság	1,328
(\square m)	ferdeség	-0,026
	lapultság	0,946
FOLK és	átlag	1,299

WARD módszer	osztályozottság	0,410
(□)	ferdeség	0,026
	lapultság	0,946
<hr/>		
FOLK és	átlag:	közepes homok
WARD módszer	osztályozottság:	jól osztályozott
(leírás)	ferdeség:	szimmetrikus
	lapultság:	mezokurtikus
	módusz 1 (mm):	427,0
	módusz 1 (f):	1,231
	D ₁₀ (□m):	279,5
	D ₅₀ (□m):	407,6
	D ₉₀ (□m):	580,4
	(D ₉₀ / D ₁₀) (□m):	2,076
	(D ₉₀ - D ₁₀) (□m):	300,9
	(D ₇₅ / D ₂₅) (□m):	1,489
	(D ₇₅ - D ₂₅) (□m):	163,0
	D ₁₀ (□):	0,785
	D ₅₀ (□):	1,295
	D ₉₀ (□):	1,839
	(D ₉₀ / D ₁₀) (□):	2,343
	(D ₉₀ - D ₁₀) (□):	1,054
	(D ₇₅ / D ₂₅) (□):	1,568

(D ₇₅ - D ₂₅) (□):	0,575
% kavics:	0,0%
% homok:	100,0%
% iszap:	0,0%
% nagyon durva kavics:	0,0%
% durva kavics:	0,0%
% közepes kavics:	0,0%
% finom kavics:	0,0%
% nagyon finom kavics:	0,0%
% nagyon durva homok:	0,0%
% durva homok:	24,0%
% közepes homok:	71,4%
% finom homok:	4,6%
% nagyon finom homok:	0,0%
% nagyon durva szilt:	0,0%
% durva szilt:	0,0%
% közepes szilt:	0,0%
% finom szilt:	0,0%
% nagyon finom szilt:	0,0%
% agyag:	0,0%

minta 30/1		
	Típus:	egymódusú, jól osztályozott
	Szöveti csoport:	homok
	Üledék:	jól osztályozott közepes homok
	átlag	369,1
	osztályozottság	110,1
Aritmetikus (\square m)	ferdeség	0,536
	lapultság	2,781
	átlag	352,3
	osztályozottság	1,351
Geometrikus (\square m)	ferdeség	-0,112
	lapultság	2,498
	átlag	1,505
	osztályozottság	0,434
Logaritmus (\square)	ferdeség	0,112
	lapultság	2,498
FOLK és	átlag	353,1
WARD módszer	osztályozottság	1,364
(\square m)	ferdeség	-0,020
	lapultság	0,933
FOLK és	átlag	1,502

WARD módszer	osztályozottság	0,448
(□)	ferdeség	0,020
	lapultság	0,933
<hr/>		
FOLK és	átlag:	közepes homok
WARD módszer	osztályozottság:	jól osztályozott
(leírás)	ferdeség:	szimmetrikus
	lapultság:	mezokurtikus
	módusz 1 (mm):	376,0
	módusz 1 (f):	1,414
	D ₁₀ (□m):	235,8
	D ₅₀ (□m):	354,2
	D ₉₀ (□m):	524,8
	(D ₉₀ / D ₁₀) (□m):	2,226
	(D ₉₀ - D ₁₀) (□m):	289,1
	(D ₇₅ / D ₂₅) (□m):	1,549
	(D ₇₅ - D ₂₅) (□m):	155,7
	D ₁₀ (□):	0,930
	D ₅₀ (□):	1,497
	D ₉₀ (□):	2,085
	(D ₉₀ / D ₁₀) (□):	2,241
	(D ₉₀ - D ₁₀) (□):	1,154
	(D ₇₅ / D ₂₅) (□):	1,532

(D ₇₅ - D ₂₅) (□):	0,631
% kavics:	0,0%
% homok:	100,0%
% iszap:	0,0%
% nagyon durva kavics:	0,0%
% durva kavics:	0,0%
% közepes kavics:	0,0%
% finom kavics:	0,0%
% nagyon finom kavics:	0,0%
% nagyon durva homok:	0,0%
% durva homok:	13,5%
% közepes homok:	72,4%
% finom homok:	14,1%
% nagyon finom homok:	0,0%
% nagyon durva szilt:	0,0%
% durva szilt:	0,0%
% közepes szilt:	0,0%
% finom szilt:	0,0%
% nagyon finom szilt:	0,0%
% agyag:	0,0%

A 31/1-es minta (155. fkm) szemcse-eloszlásnak adatai

minta 31/1		
	Típus:	egymódusú, jól osztályozott
	Szöveti csoport:	homok
	Üledék:	jól osztályozott közepes homok
	átlag	369,1
	osztályozottság	110,1
Aritmetikus (\square m)	ferdeség	0,536
	lapultság	2,781
	átlag	352,3
	osztályozottság	1,351
Geometrikus (\square m)	ferdeség	-0,112
	lapultság	2,498
	átlag	1,505
	osztályozottság	0,434
Logaritmus (\square)	ferdeség	0,112
	lapultság	2,498
FOLK és	átlag	353,1
WARD módszer	osztályozottság	1,364
(\square m)	ferdeség	-0,020
	lapultság	0,933
FOLK és	átlag	1,502

WARD módszer	osztályozottság	0,448
(□)	ferdeség	0,020
	lapultság	0,933
<hr/>		
FOLK és	átlag:	közepes homok
WARD módszer	osztályozottság:	jól osztályozott
(leírás)	ferdeség:	szimmetrikus
	lapultság:	mezokurtikus
	módusz 1 (mm):	376,0
	módusz 1 (f):	1,414
	D ₁₀ (□m):	235,8
	D ₅₀ (□m):	354,2
	D ₉₀ (□m):	524,8
	(D ₉₀ / D ₁₀) (□m):	2,226
	(D ₉₀ - D ₁₀) (□m):	289,1
	(D ₇₅ / D ₂₅) (□m):	1,549
	(D ₇₅ - D ₂₅) (□m):	155,7
	D ₁₀ (□):	0,930
	D ₅₀ (□):	1,497
	D ₉₀ (□):	2,085
	(D ₉₀ / D ₁₀) (□):	2,241
	(D ₉₀ - D ₁₀) (□):	1,154
	(D ₇₅ / D ₂₅) (□):	1,532

(D ₇₅ - D ₂₅) (□):	0,631
% kavics:	0,0%
% homok:	100,0%
% iszap:	0,0%
% nagyon durva kavics:	0,0%
% durva kavics:	0,0%
% közepes kavics:	0,0%
% finom kavics:	0,0%
% nagyon finom kavics:	0,0%
% nagyon durva homok:	0,0%
% durva homok:	13,5%
% közepes homok:	72,4%
% finom homok:	14,1%
% nagyon finom homok:	0,0%
% nagyon durva szilt:	0,0%
% durva szilt:	0,0%
% közepes szilt:	0,0%
% finom szilt:	0,0%
% nagyon finom szilt:	0,0%
% agyag:	0,0%

A 170. fkm-nél gyűjtött 170/1-es számú fenékhorlálék minta finomfrakciójának (1 mm-nél kisebb szemcsék) szemcseeloszlási adatai

170/1		
	Típus:	bimodális, rosszul osztályozott
	Szöveti csoport:	iszapos homok
	Üledék:	nagyon durva sziltes finom homok
	átlag	130,7
	osztályozottság	78,94
<hr/>		
Aritmetikus (\square m)	ferdeség	0,665
	lapultság	3,135
	átlag	100,1
	osztályozottság	2,386
<hr/>		
Geometrikus (\square m)	ferdeség	-1,552
	lapultság	6,075
	átlag	3,320
	osztályozottság	1,255
<hr/>		
Logaritmikus (\square)	ferdeség	1,552
	lapultság	6,075
<hr/>		
FOLK és	átlag	109,5
WARD módszer	osztályozottság	2,183
(\square m)	ferdeség	-0,297
	lapultság	1,313
<hr/>		
FOLK és	átlag	3,191

WARD módszer	osztályozottság	1,126
(□)	ferdeség	0,297
	lapultság	1,313
<hr/>		
FOLK és	átlag:	nagyon finom homok
WARD módszer	osztályozottság:	rosszul osztályozott
(leírás)	ferdeség:	finoman ferde
	lapultság:	leptokurtikus
	módusz 1 (mm):	153,5
	módusz 2 (mm):	104,6
	módusz 1 (f):	2,706
	módusz 2 (f):	3,260
	D ₁₀ (□m):	33,58
	D ₅₀ (□m):	119,5
	D ₉₀ (□m):	239,9
	(D ₉₀ / D ₁₀) (□m):	7,146
	(D ₉₀ - D ₁₀) (□m):	206,4
	(D ₇₅ / D ₂₅) (□m):	2,446
	(D ₇₅ - D ₂₅) (□m):	105,2
	D ₁₀ (□):	2,059
	D ₅₀ (□):	3,065
	D ₉₀ (□):	4,896
	(D ₉₀ / D ₁₀) (□):	2,378

(D ₉₀ - D ₁₀) (□):	2,837
(D ₇₅ / D ₂₅) (□):	1,518
(D ₇₅ - D ₂₅) (□):	1,290
% kavics:	0,0%
% homok:	79,8%
% iszap:	20,2%
% nagyon durva kavics:	0,0%
% durva kavics:	0,0%
% közepes kavics:	0,0%
% finom kavics:	0,0%
% nagyon finom kavics:	0,0%
% nagyon durva homok:	0,0%
% durva homok:	0,0%
% közepes homok:	8,6%
% finom homok:	38,8%
% nagyon finom homok:	32,5%
% nagyon durva szilt:	10,8%
% durva szilt:	4,4%
% közepes szilt:	2,6%
% finom szilt:	1,5%
% nagyon finom szilt:	0,8%
% agyag:	0,0%

A 184. fkm-nél gyűjtött 184/1-es számú fenékhordalék minta finomfrakciójának (1 mm-nél kisebb szemcsék) szemcseeloszlási adatai

184/1		
	Típus:	bimodális, közepesen osztályozott
	Szöveti csoport:	iszapos homok
	Üledék:	nagyon durva sziltes finom homok
	átlag	130,1
	osztályozottság	71,60
Aritmetikus (\square m)	ferdeség	0,600
	lapultság	3,107
	átlag	104,9
	osztályozottság	2,165
Geometrikus (\square m)	ferdeség	-1,692
	lapultság	7,157
	átlag	3,253
	osztályozottság	1,114
Logaritmikus (\square)	ferdeség	1,692
	lapultság	7,157
FOLK és	átlag	114,1
WARD módszer	osztályozottság	1,972
(\square m)	ferdeség	-0,254
	lapultság	1,300
FOLK és	átlag	3,132

WARD módszer	osztályozottság	0,980
(□)	ferdeség	0,254
	lapultság	1,300
FOLK és	átlag:	nagyon finom homok
WARD módszer	osztályozottság:	közepesen osztályozott
(leírás)	ferdeség:	finoman ferde
	lapultság:	leptokurtikus
	módusz 1 (mm):	135,5
	módusz 2 (mm):	104,6
	módusz 1 (f):	2,886
	módusz 2 (f):	3,260
	D ₁₀ (□m):	44,22
	D ₅₀ (□m):	120,4
	D ₉₀ (□m):	229,7
	(D ₉₀ / D ₁₀) (□m):	5,195
	(D ₉₀ - D ₁₀) (□m):	185,5
	(D ₇₅ / D ₂₅) (□m):	2,201
	(D ₇₅ - D ₂₅) (□m):	94,41
	D ₁₀ (□):	2,122
	D ₅₀ (□):	3,054
	D ₉₀ (□):	4,499
	(D ₉₀ / D ₁₀) (□):	2,120

(D ₉₀ - D ₁₀) (□):	2,377
(D ₇₅ / D ₂₅) (□):	1,450
(D ₇₅ - D ₂₅) (□):	1,138
% kavics:	0,0%
% homok:	83,3%
% iszap:	16,7%
% nagyon durva kavics:	0,0%
% durva kavics:	0,0%
% közepes kavics:	0,0%
% finom kavics:	0,0%
% nagyon finom kavics:	0,0%
% nagyon durva homok:	0,0%
% durva homok:	0,0%
% közepes homok:	6,8%
% finom homok:	40,7%
% nagyon finom homok:	35,7%
% nagyon durva szilt:	9,7%
% durva szilt:	3,4%
% közepes szilt:	2,0%
% finom szilt:	1,0%
% nagyon finom szilt:	0,5%
% agyag:	0,0%

A 220. fkm-nél gyűjtött 220/1-es számú fenékhordalék minta finomfrakciójának (1 mm-nél kisebb szemcsék) szemcseeloszlási görbéje

220/1		
	Típus:	bimodális, rosszul osztályozott
	Szöveti csoport:	iszapos homok
	Üledék:	nagyon durva sziltes finom homok
	átlag	140,2
	osztályozottság	79,62
Aritmetikus (\square m)	ferdeség	0,614
	lapultság	3,005
	átlag	112,3
	osztályozottság	2,165
Geometrikus (\square m)	ferdeség	-1,500
	lapultság	6,390
	átlag	3,155
	osztályozottság	1,114
Logaritmikus (\square)	ferdeség	1,500
	lapultság	6,390
FOLK és	átlag	120,3
WARD módszer	osztályozottság	2,000
(\square m)	ferdeség	-0,257
	lapultság	1,177
FOLK és	átlag	3,055

(D₇₅ - D₂₅) (□): 1,226

% kavics: 0,0%

% homok: 83,2%

% iszap: 16,8%

% nagyon durva kavics: 0,0%

% durva kavics: 0,0%

% közepes kavics: 0,0%

% finom kavics: 0,0%

% nagyon finom kavics: 0,0%

% nagyon durva homok: 0,0%

% durva homok: 0,0%

% közepes homok: 10,3%

% finom homok: 42,1%

% nagyon finom homok: 30,9%

% nagyon durva szilt: 10,3%

% durva szilt: 3,7%

% közepes szilt: 1,5%

% finom szilt: 0,9%

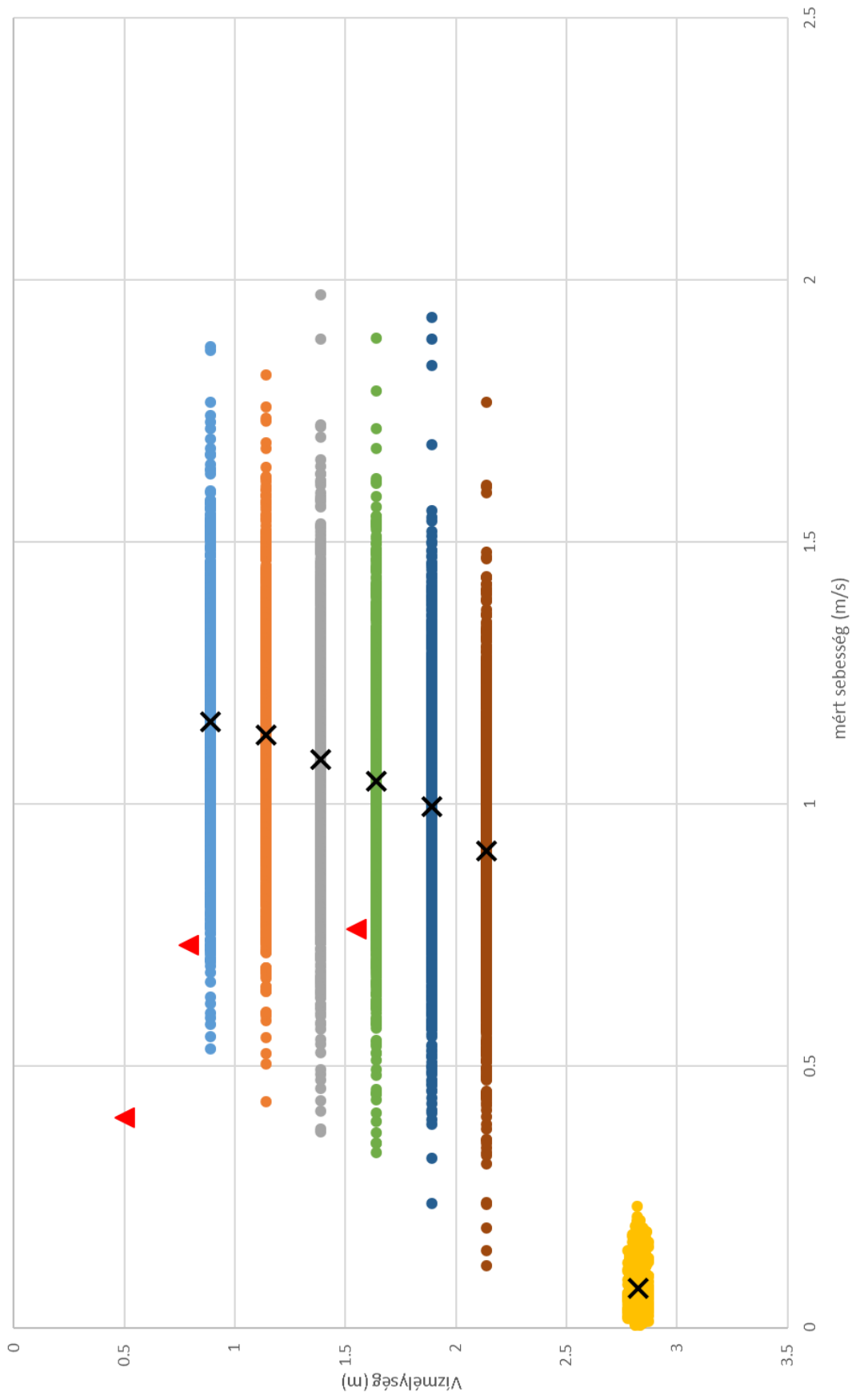
% nagyon finom szilt: 0,4%

% agyag: 0,0%

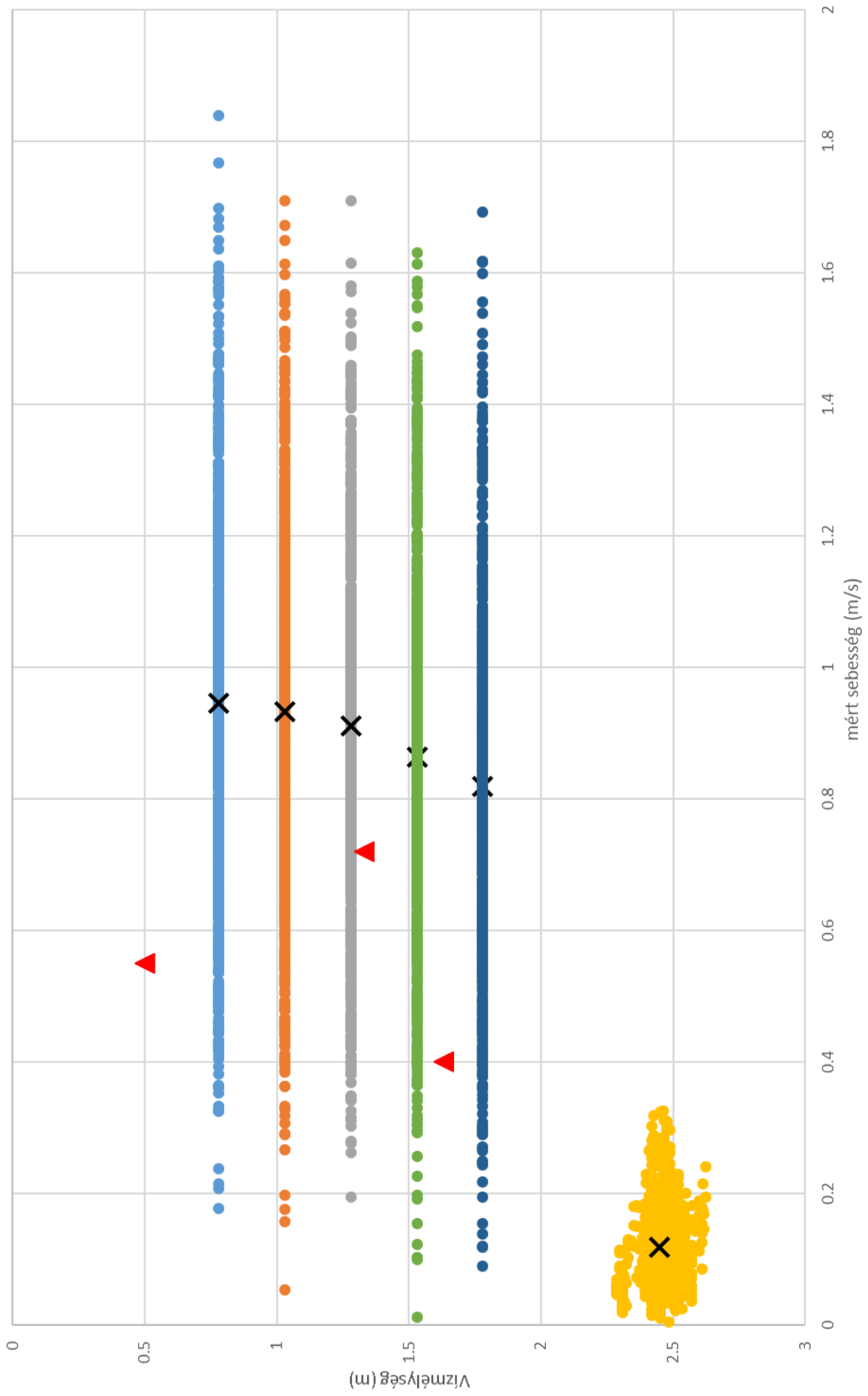
Függelék 3

Mért sebesség-profilok a hordalék mintavételi függélyekben

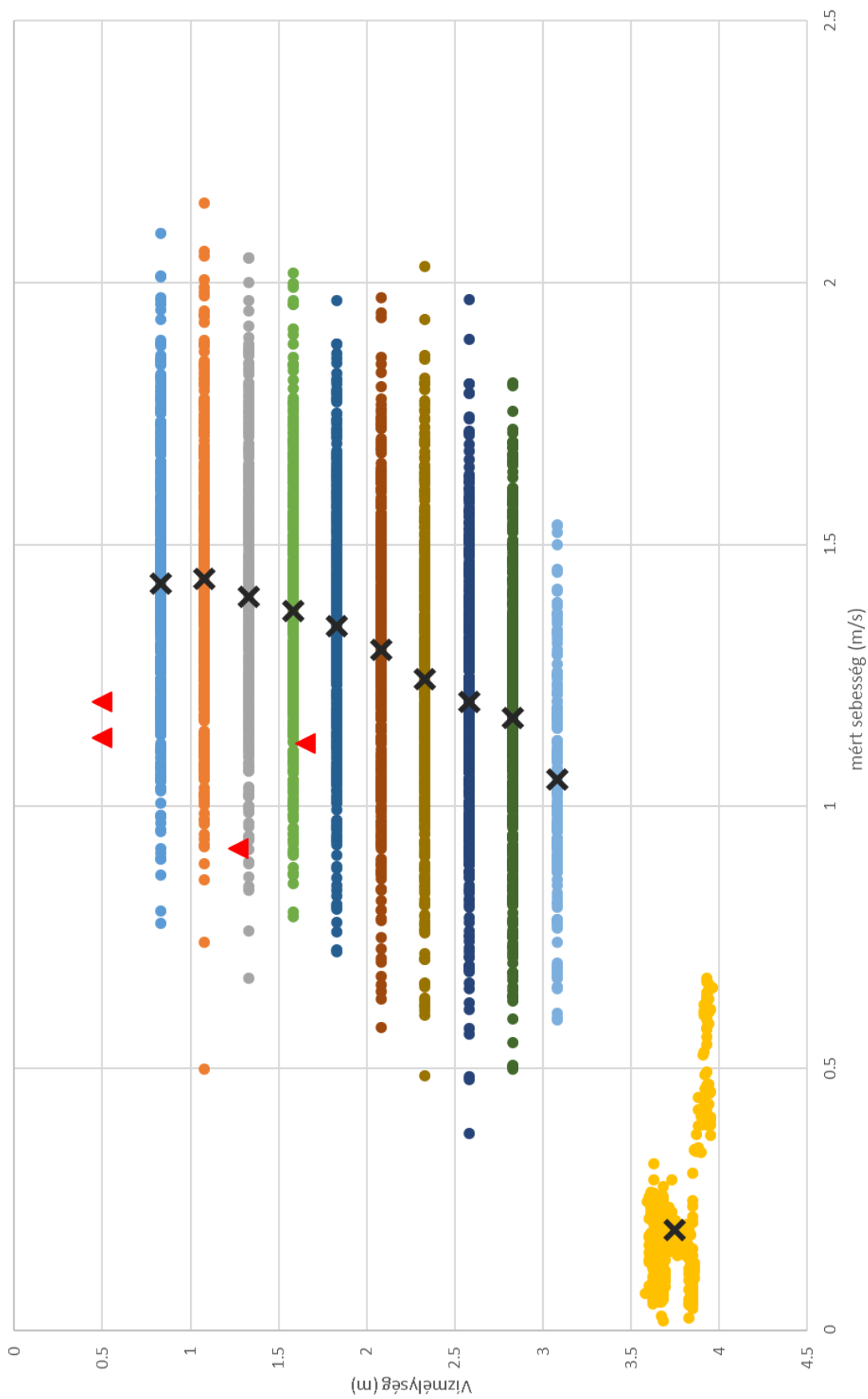
Állóhajós mérés sebességprofil - 1 mérési hely



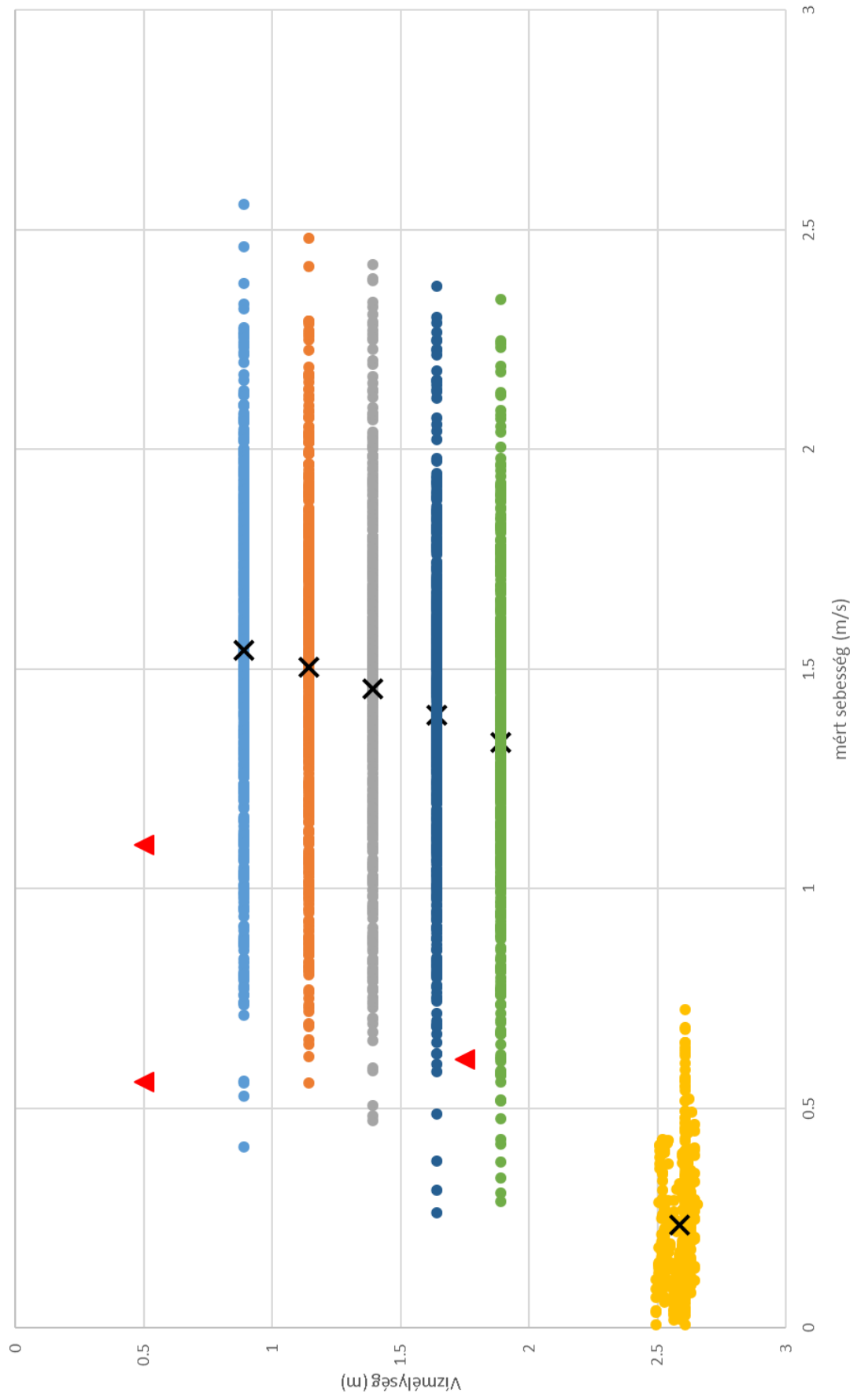
Állóhajós mérés sebességprofil - 2 mérési hely



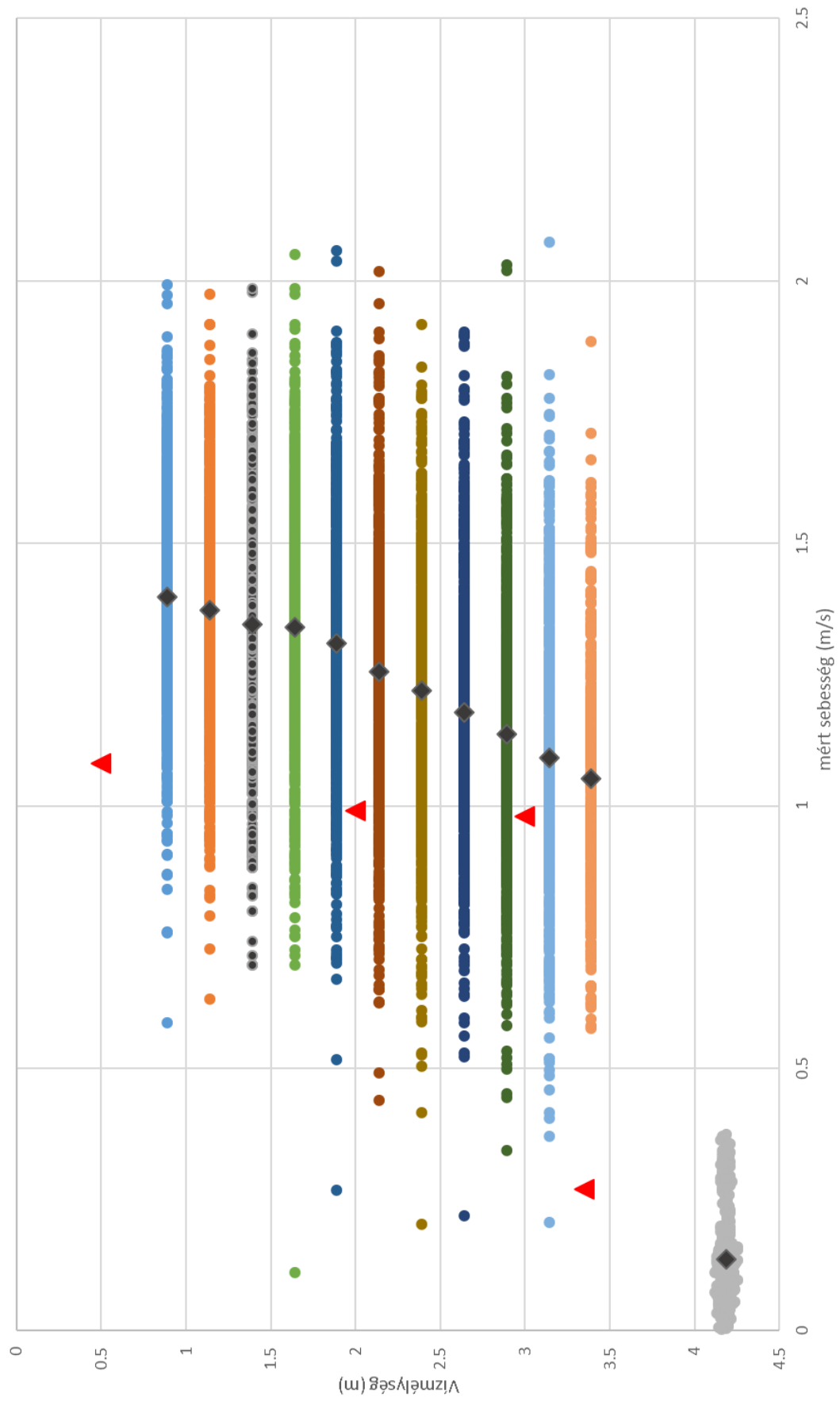
Állóhajós mérés sebességprofil - 3 mérési hely



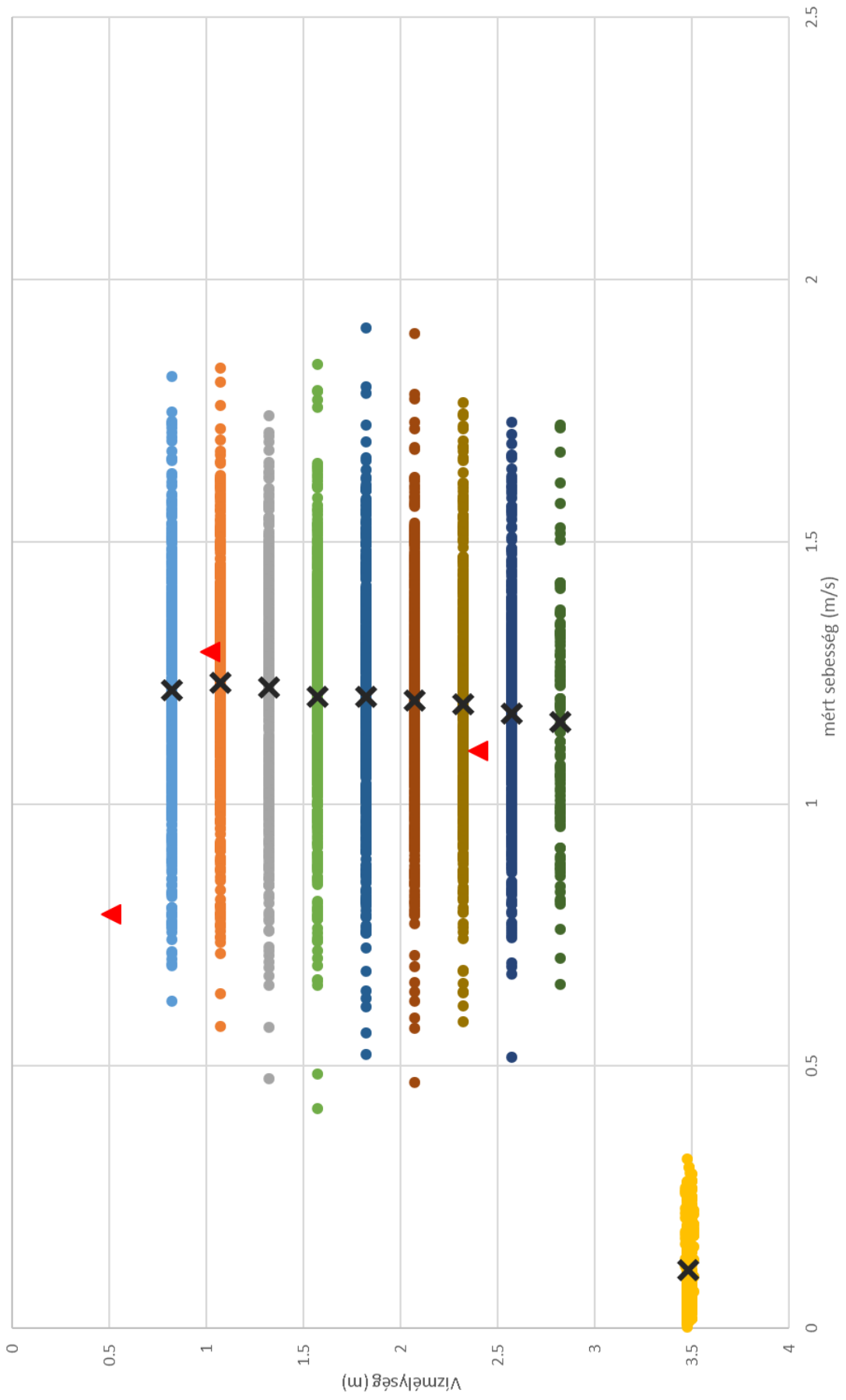
Állóhajós mérés sebességprofil - 4 mérési hely



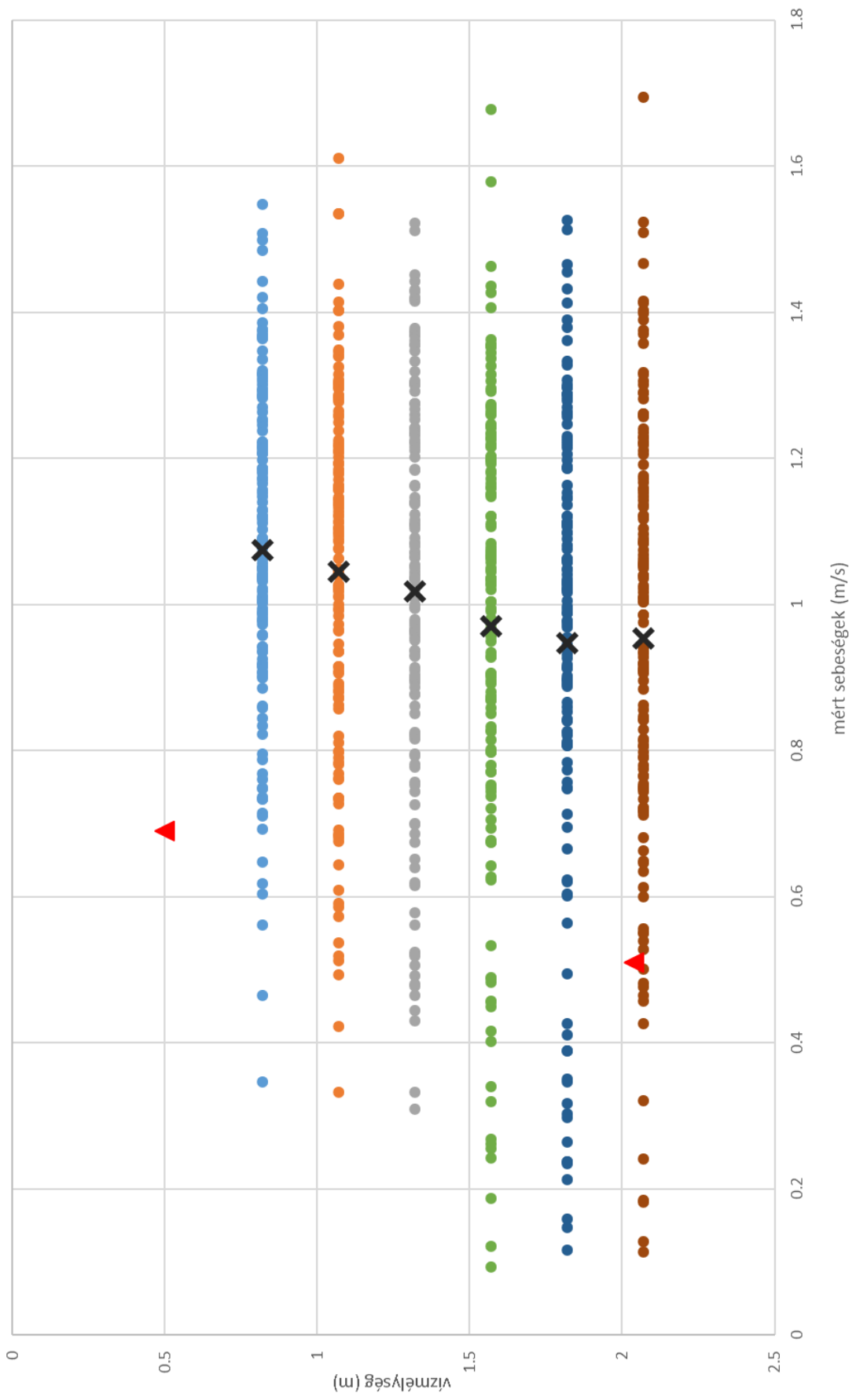
Állóhajós mérés sebességprofil - 5 mérési hely



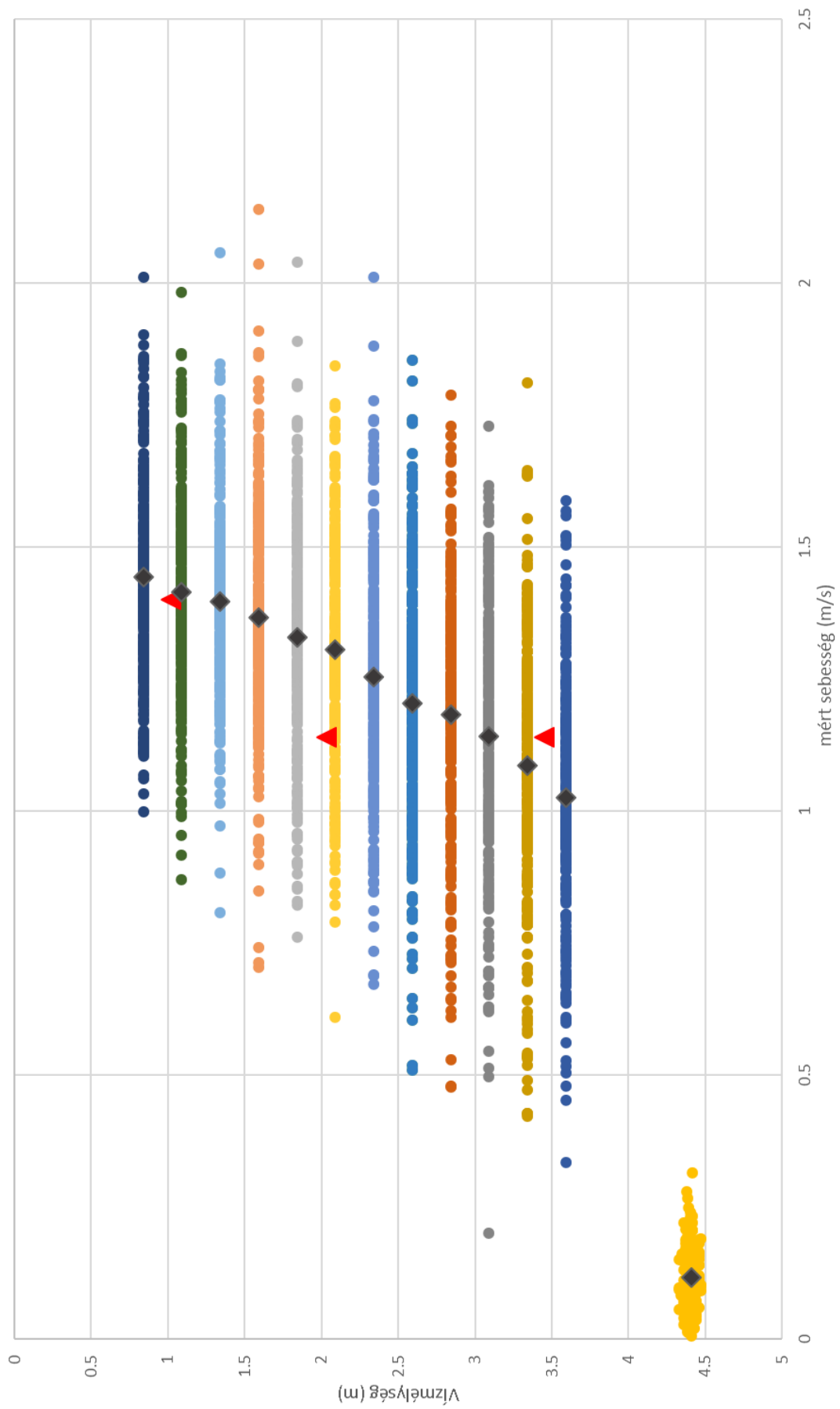
Állóhajós mérés sebességprofil - 30 mérési hely



Állóhajós mérés sebességprofil - 31 mérési hely



Állóhajós mérés sebességprofil - 52 mérési hely



Állóhajós mérés sebességprofil - 53 mérési hely

