



BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM

Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszék

A Duna magyarországi szakaszának lebegtetett hordalékvizsgálata

Tudományos Diákköri Konferencia

2016

Készítette:

Szombati Dóra Csilla

MSc. hallgató

Konzulens:

Dr. Baranya Sándor

egyetemi docens, BME Vízépítési és
Vízgazdálkodási Tanszék

Tartalom

Kivonat	3
Abstract.....	4
1.Bevezetés	5
2. Felhasznált adatok és módszerek	8
3. Adatelemzés	13
4. Összefoglalás, következtetések	23
Irodalomjegyzék.....	25

Kivonat

A Duna hordalékjárása közvetlenül kihat a folyó élővilágára, hajózási viszonyaira, az ivóvíz kitermelési lehetőségekre, rekreációs tevékenységekre és más egyéb vízgazdálkodási kérdésekre. A hordalékvándorlás térbeli és időbeli változásának ismerete emiatt különösen fontos, hazai szinten mégis nagyon hiányosak az ismereteink. A folyami hordalék két jól elkülöníthető fajtája, a görgetett- és lebegtetett hordalékmozgás közül jelen dolgozat az utóbbival foglalkozik. A dolgozat célja, hogy az elérhető hordalékadatok alapján bemutassa a Duna magyarországi szakaszára a hordalékvándorlás és áramlási viszonyok közötti kapcsolatát, és elemezze a hordalékadatok hosszirányú és helyi, időbeli változásait. A vizsgálat elsősorban öt Dunai szelvény adataira épül (Nagymaros, Budapest, Dunaujváros, Dombori, Mohács), de a Felső-magyarországi szakaszra végzett korábbi vizsgálatok eredményeit is ismertetem. Az elemzések során kitérek a vízhozam-hordalékhozam kapcsolatok leírására, a hordaléktöménység és a hordalékhozam hosszirányú és időbeli változásaira és kísérletet teszek az árhullámok okozta hordalékterhelés számszerű értékelésére. Az eredmények hozzájárulnak a Duna lebegtetett hordalékjárásának pontosabb megértéséhez, a Duna magyarországi szakaszán a hordalék felkeveredéséhez és kiülepedéséhez kapcsolódó problémák feltárásához és a közeljövőben elkészítendő Duna-medence szintű hordalék-gazdálkodási stratégia kidolgozásához.

Abstract

Title: Analysis of the suspended sediment transport in the Hungarian Danube

The sediment transport of the Danube has a direct effect on the ecosystem of the river, the inland navigation, the drinking water supply, the recreation and other activities of water management. Due to these things it is especially important to understand the spatial and temporal changes of the sediment transport, but in Hungary we have a big deficiency in our knowledge. There are two kinds of sediment in the rivers, which can be separated well to bed load and suspended sediment, in my study I am writing about the second one. The goal of this essay is to show the connection between the sediment transport and the flow conditions of the river and to analyze the linear, local and temporal changes of the available sediment data on the Hungarian Danube. In the first place the essay builds on five sections of the Danube (Nagymaros, Budapest, Dunaújváros, Dombori, Mohács), but I am introducing the results of previous studies about the upper-Hungarian section of the Danube. During the analysis I am describing the connections between the discharge and the sediment concentrations, the spatial and temporal changes of the sediment concentration and the sediment load and I make an attempt to rate numerically the sediment load caused by flood waves. The results will help to understand the suspended sediment transport more specified, to reveal the problems caused by the sediment resuspension and settlement on the Hungarian Danube and to develop the sediment management strategy in the Danube basin in the near future.

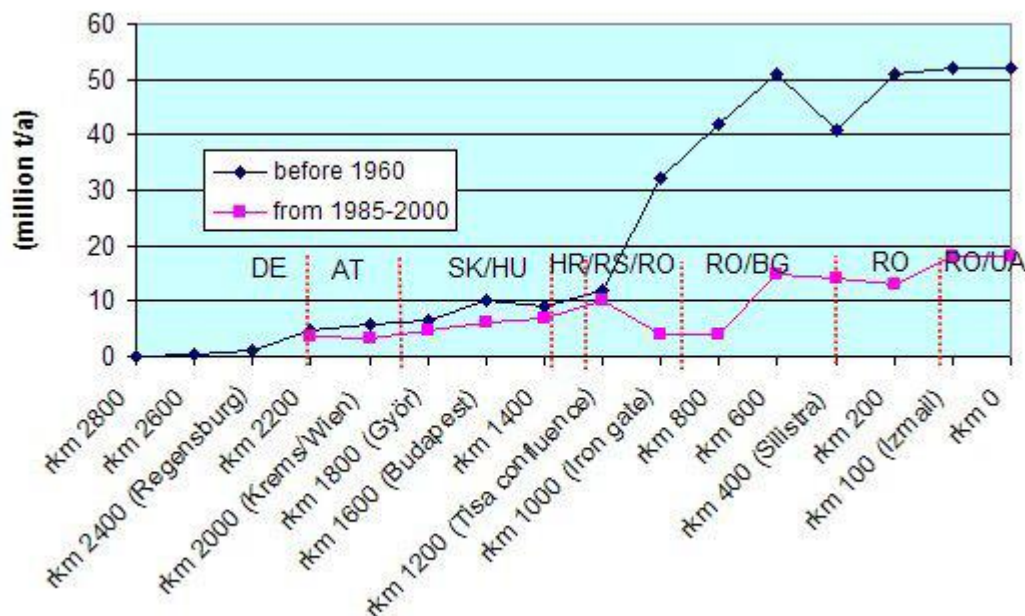
1.Bevezetés

Dolgozatomban a Duna magyarországi szakaszának lebegtetett hordalék viszonyaival fogok foglalkozni. Ehhez rendelkezésemre áll több korábbi tanulmány, valamint a Közép-Dunavölgyi és az Alsó-Duna-völgyi Vízügyi Igazgatóságok (továbbiakban: KDVVIZIG és ADUVIZIG) is rendelkezésemre bocsátottak hordalék mérési adatokat.

A hordalékszállítás jelentős szerepet tölt be a folyók és vízgyűjtőjük morfológiájában. A hordalék vízben való mozgását számos tényező befolyásolja, ami a transzportfolyamatok komplexitását eredményezi. A hordalékszállítás két alapvető formája a görgetett- és a lebegtetett hordalék. Görgetett hordalék esetén a mederfenék közelében guruló, csúszó vagy ugráló szemcsékről beszélünk, míg lebegtetett hordalék esetén a pulzáló áramlás, vagyis a turbulencia tartja fent a szemcséket a teljes vízoszlopban. A hordalékmozgást kiváltó erő mindkét esetben a vízre ható nehézségi erő, ami a hordalékszemesére alakú ellenállás formájában jelenik meg. Mivel a hordalék töménysége relatíve alacsony az áramló vízben a két fázis általában külön kezelhető a vizsgálatok folyamán.

A Dunán a lebegtetett hordalék átlagos töménysége, részben a mellékfolyók hatására, erősen ingadozik. Bár Magyarországon a Felső-Dunán a görgetett hordalék a fontosabb mederalakító, mennyiségét tekintve mégis lényegesen alatta marad a lebegtetett hordaléknak. A torkolathoz évi átlagosan 80 millió tonna/év lebegtetett hordalék érkezik (Tamás, 1999).

A Duna alsó szakaszán, a Vaskapunál a vízlépcsők megépülése után a korábbi lebegtetett hordalék mennyiségének csak a 30%-át éri el a mostani lebegtetett hordalék mennyisége. A deltánál a természetes hordalékmennyiség csak 34%-a maradt meg (1. ábra). A Vaskapu hordaléktartó hatékonysága árvíznél 66%, száraz időszakban pedig 85%, átlagban olyan 80%. (Schwarz, 2008)

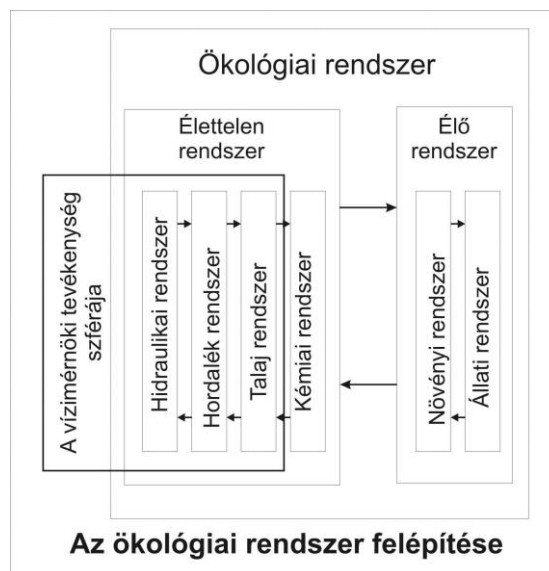


1. ábra: Lebegtetett hordalék transzport a Dunán /forrás: Schwarz, 2008/

A vízfolyás és a lebegtetett hordalék közötti kölcsönhatás sok problémát is okozhat és számos, a folyógazdálkodással kapcsolatos területet érinthet:

- Tározókban a lerakódott hordalék csökkenti a tározási kapacitást
- Kikötőkben költséges kotrási munkákra lehet szükség
- Folyókban a hajóút fenntartásánál okozhat problémát a lerakódott hordalék.
- Folyószabályozás során a holt- és mellékágakban is költséges munkálatokra lehet szükség a feliszapolódás miatt. (Tamás Enikő, 1999)
- A nagy mennyiségű lebegtetett hordalékot szállító árhullámok a hullámtéri lassabb lefolyás miatt annak feliszapolódásához vezetnek, és közvetett módon az árvíz kockázatot növelik
- Homokmedrű szakaszokon a finom mederanyag könnyen válik lebegtetett hordalékká, így a meder alakja is nagyobb változásokon mehet át.

A már említett problémákon kívül fontos megemlíteni a folyókba vezetett szennyező anyagok és a hordalékok kapcsolatát. A bevezetett ipari szennyeződések, főleg a nehézfémek elektrosztatikusan kapcsolódnak a finomabb lebegtetett hordalékhoz, azokkal együtt utaznak és rakódnak le. Az oldott szennyezők egyébként a nagyobb frakciókon is meg tudnak tapadni. Ezek fényében a kitermelt mederanyagot vizsgálni kellene és minőségi valamint mennyiségi határértékeknek megfeleltetni a parti sávba kerülése előtt. Ehhez szükséges a hordalék-gazdálkodás meghonosítása a folyami vízgazdálkodásban (2. ábra). (http://www.jno.hu/hu/duna101020/rakoczi_laszlo.pdf)



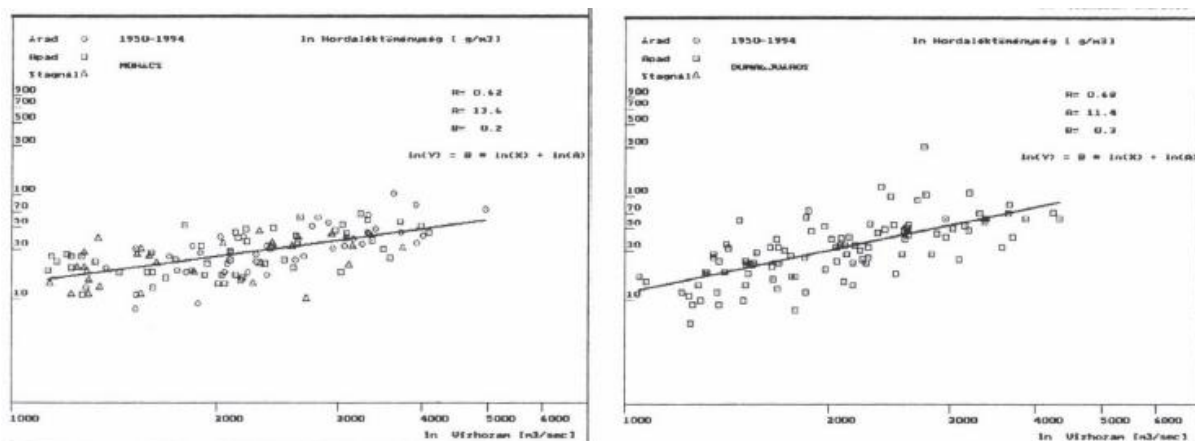
2. ábra: A folyami hordalékkal kapcsolatos kérdések illeszkedése a vízi ökológiai rendszerbe /forrás: http://www.jno.hu/hu/duna101020/rakoczi_laszlo.pdf

A Duna magyarországi szakaszának lebegtetett hordalékszállításával foglalkoztak már tanulmányok, köztük Tamás Enikő dolgozata is (Tamás, 1999). Vizsgálatához az ADUVIZIG által végzett mérések hordalékmintáit használta. Ezekről a mérésekről azt kell tudni, hogy évente 5-ször vesznek mintát a mérőállomásokon kb. ugyanazon időszakban. A mérést

palackos mintavevővel végzik, amely 6 darab 2 literes palackot tartalmaz. A forgószárnyas sebességmérés függvényei közül minden páratlan számúban vesznek hordalékmintát, ez összesen 5 pontban 2-2 liter minta. A vett mintát a mérőhajó fedélzetén 10 literes edényekbe összeöntik, ülepítik, majd minden függélyből 1-1 liter minta kerül feldolgozásra.

Eredményeit és következtetésit négy mérőállomás (Dunaújváros, Fajsz, Baja, Mohács) adatai alapján, az 1950-1994 közötti időszakra vontak le. Az általa számítógépre vitt és feldolgozott négy adatsor hordaléktöménységeit grafikonosan nem az addigi gyakorlat alapján a vízállás függvényében ábrázolta, hanem vízhozam és középsebesség alapján. Ezt a döntését azzal indokolta, hogy a mélyülő főmeder miatt az azonos vízhozamok egyre kisebb vízállásokkal vonulnak le.

Az adatsorok matematikai statisztikai elemzését egyöntetűség-vizsgálattal kezdte. A Kolmogorov- Szmirnov f két-mintás próba módszer alapján a négy adatsor egyike sem tekinthető egyöntetűnek. Következően valószínűségi eloszlástípus-vizsgálatot hajtott végre lognormál eloszlást feltételezve. Ennek eredménye az lett, hogy a bajai és mohácsi adatsor követi a feltételezett lognormál eloszlást, míg a dunaújvárosi és a fajszai adatsor illeszkedése nem egyértelmű.



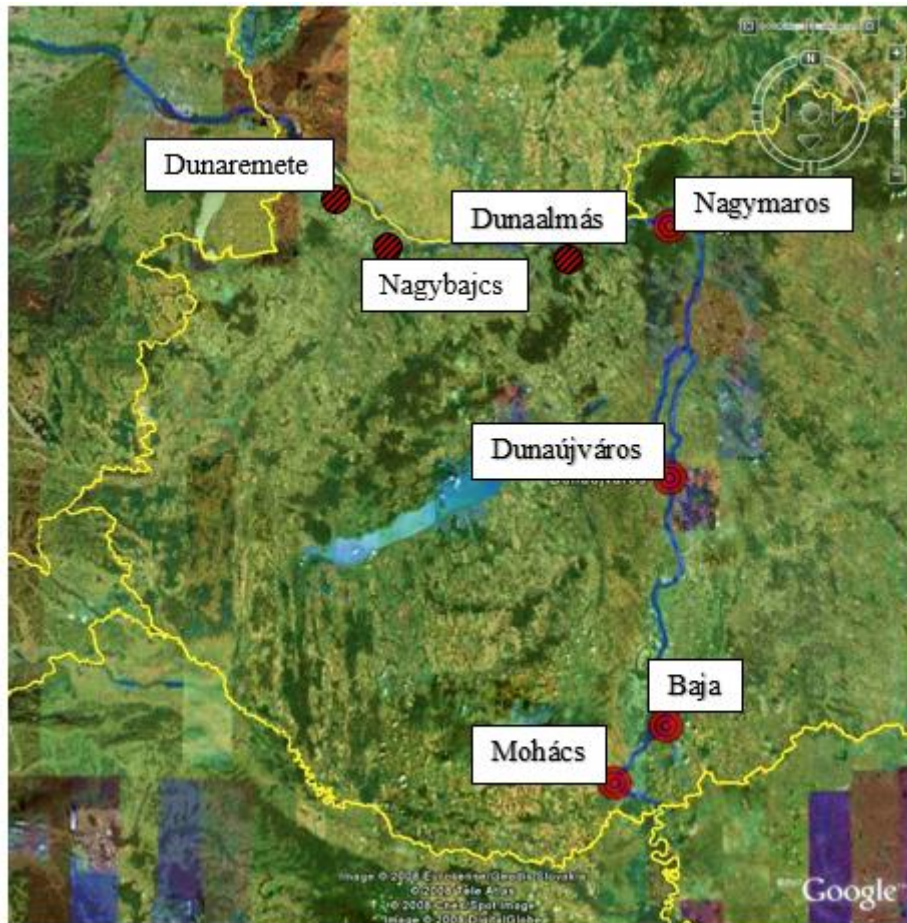
3. ábra: Részlet Dunaújváros és Mohács vízhozam-lebegtetett hordaléktöménység adatsoraiból /forrás: Tamás, 1999/

Elemzései alapján azt állapította meg, hogy a rendelkezésre álló adatsorok statisztikailag értékelhető eredményt nem adhatnak. Általánosan elfogadott tény, hogy a hordalékszállítás jelensége nem írható le két-dimenzióban, így ha csak vízhozam vagy középsebesség függvényében vizsgálunk hordaléktöménységet, akkor egyszerűsített, pontatlan eredményt kapunk. A végeredményt befolyásolta az is, hogy az általa vizsgált 47 évben két féle palackos és egy szivattyús mintavevőt alkalmaztak, valamint hogy az adatok feldolgozása is több módon történt, pedig a mintavételi módszerek önmagukban is pontatlanok tudnak lenni. Megjegyezte, hogy az évenkénti 5 mintavétel a Duna esetében nagyon kevés és hogy ez az öt alkalom is naptár szerint van beütemezve, nem vízjárás alapján. A szakaszra általános érvényű összefüggést nem tudott felállítani, csak annyit tudott kijelenteni, hogy nagy vízhozamoknál nagy valószínűséggel nagyobb, kis vízhozamoknál nagy valószínűséggel kisebb a lebegtetett hordalék töménysége.

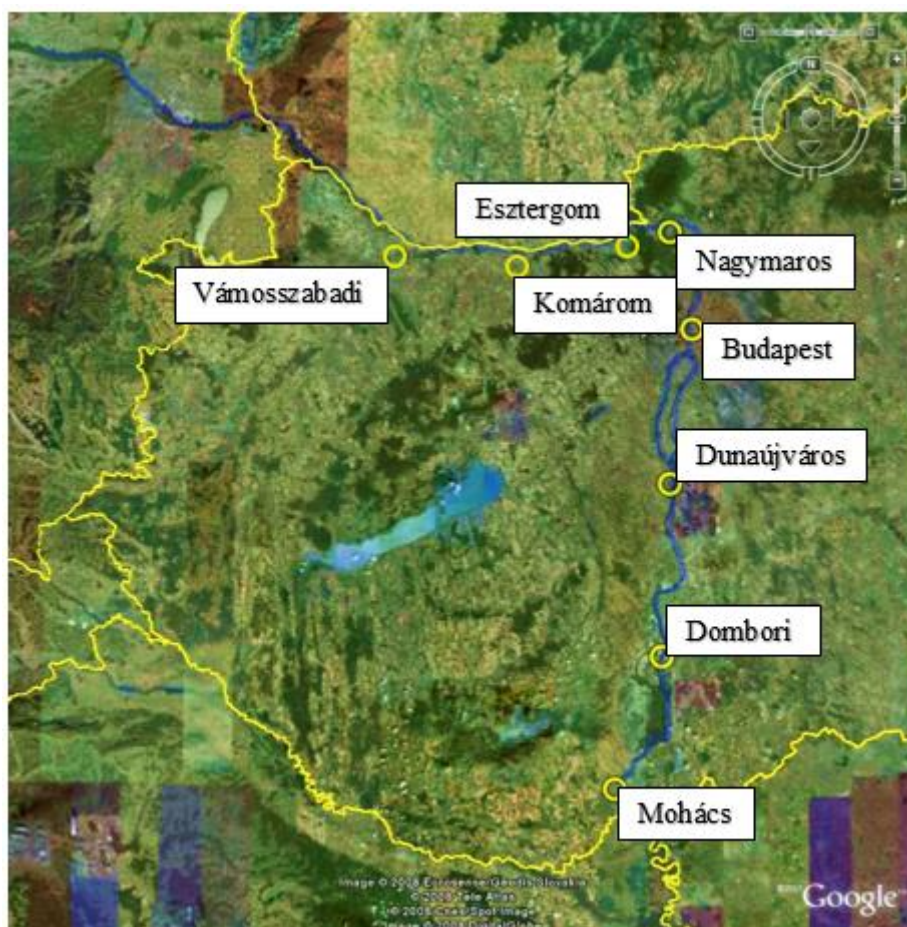
2. Felhasznált adatok és módszerek

Magyarországon rendszeresen csak a lebegtetett hordalékból vesznek mintát, ezáltal csak ezekre az adatokra végeznek vizsgálatokat. Három Vízügyi Igazgatóság felelős a magyarországi Duna szakaszért, melynek központjai Győr, Budapest és Baja, ahol ezek a hordalékadatok elérhetők. A budapesti és bajai igazgatóságok digitalizálva tárolják az adataikat, míg a győri igazgatóságon az adatok jelentős része még papír alapon van nyilvántartva. Ez alól a Vámosszabadi állomás kivétel, ugyanis itt 1987-2005 közötti időszakban a közös Magyar-Szlovák Duna szakaszt érintő szabályozási munkák monitoringja miatt biztosított volt az adatgyűjtés és a kiértékelés forrásigénye. A 2006-2015 közötti időszakot Ficsor Johanna dolgozta fel (Ficsor, 2015).

Magyarországon a hordalék monitoring a 19. század végén kezdődött, de ezek csak szétszórt mérések voltak. A folyamatos mintavételezés a 20. század elején az 1950-es évek végéig fejlődött ki. Manapság, hogy megnövekedett az érdeklődés vízi útvonalak fejlesztésére, néhány sokkal részletesebb, de csak alkalmi felmérések készültek. Ezek tartalmazznak már görgetett hordalék mintavételeket és részletes mederanyag vizsgálatokat is, de csak nagyon rövid (néhány kilométeres) szakaszokon, ahol hajózási akadályok találhatóak. A 4. ábrán láthatók az 1965-ös éve előtti mintavételi pontok (összesen 4). Itt mind görgetett, mind lebegtetett hordalék mintákat is vettek. Az 5. ábrán a jelenlegi monitoring hálózat látható, most már 5 mintavételi helyszín található, viszont már csak lebegtetett hordalék mintákat vesznek. (SEDIBAL, 2008)



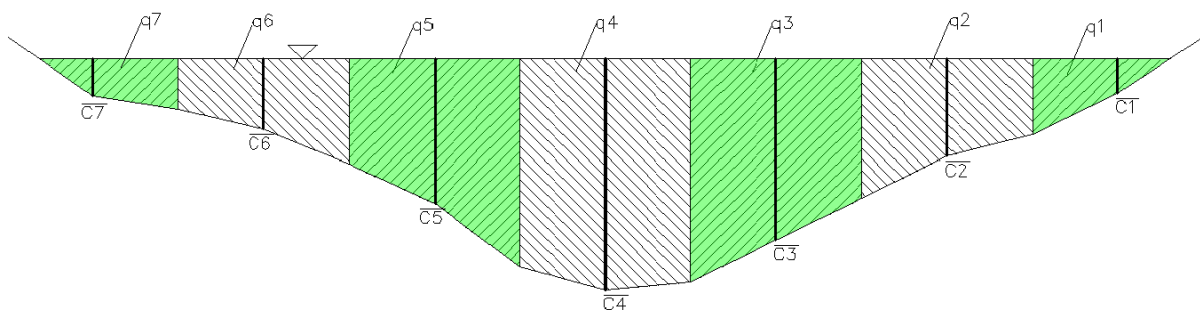
4. ábra: 1965 előtti mintavételi pontok /forrás: SEDIBAL, 2008/



5. ábra: Jelenlegi mintavételi pontok /forrás: SEDIBAL, 2008/

Korábban Tamás Enikő cikke alapján már kaptunk információkat az ADUVIZIG mérési módszeréről: Évente 5-ször vesznek mintát a mérőállomásokon kb. ugyanazon időszakban. A mérést palackos mintavevővel végzik, amely 6 darab 2 literes palackot tartalmaz. A forgószárnyas sebességmérés függélyei közül minden páratlan számúban vesznek hordalékmintát, ez összesen 5 pontban 2-2 liter minta. A vett mintát a mérőhajó fedélzetén 10 literes edényekbe összeöntik, ülepítik, majd minden függélyből 1-1 liter minta kerül feldolgozásra.

A következőkben ismertetném a KDVVIZIG mérési módszerét is: Forgószárnyas sebességmérővel 13 függélyben végeztek sebesség mérést a vízhozamhoz és minden páratlan függélyben lebegtetett hordalékmintát is vettek. Ez 7 darab mintát jelent függélyenként, melyet a súlyra szerelt 10 literes palackos mintavevővel vettek. Ezeket a mintákat szelvényenként összeöntötték, egy napig ülepítették, majd a legalsó 1 litert elemezték. Az elemzés töménység- és szemösszetéti vizsgálatot jelent. A végén kaptam minden mérési időpontra, minden szelvényre egy vízhozammal súlyozott átlagos töménységet (\bar{C}_k), egy lebegtetett hordalékhozamot (G_s) és egy átlagos szemátmérőt (d_{50}). Évente nekik is 5 mérésük szokott lenni, melyet előre le kell adni, így vízjárástól függetlenek.



6. ábra: Függélyek

$$\bar{C}_k = \frac{G_s}{\sum q_i}$$

ahol

$$G_s = \sum_{i=1}^7 (q_i \cdot \bar{C}_i)$$

Mikor 2004-ben a KDVVIZIG átállt az ADCP műszerrel végzett vízhozam mérésre, a hordalék mintavételek függélyszáma lecsökkent, ezért ezek az értékek már nem biztos, hogy teljesen relevánsak.

Az 1. táblázatban a kapott adatokról látható egy összefoglalás. Ahogy már korábban említettem évente 5 mérést végeznek mindkét Vízügyi Igazgatóságon, de ez mégis inkább egy átlagérték, mert van, hogy kevesebbszer tudnak kimenni, vagy a vett minta nem elemezhető, esetleg sikerül egy-egy árhullám alatt többször kimenni és mintát venni.

1. táblázat: Kapott adatok bemutatása

Vízügyi Igazgatóság	Város	Vizsgált időszak	Évenkénti mérések átlagos száma	Adatmennyiség [db]
KDVVIZIG	Nagymaros	1951-2007	5	1026
	Budapest	1969-2007	5	588
ADUVIZIG	Dombori	1968-2015	5	642
	Dunaújváros	1950-2015	5	882
	Mohács	1949-2015	5	717

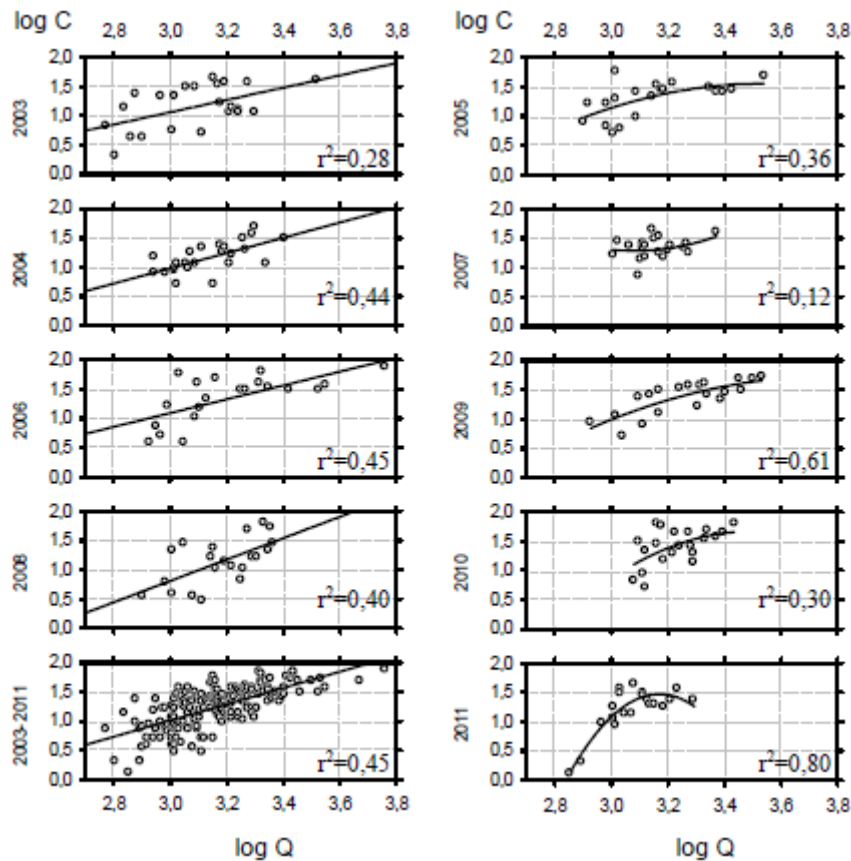
Ez utóbbira ritkábban került sor, mert ha ki is hajóznak, akkor is inkább csak vízhozamot mérnek, hordalékmintát nem vesznek. Ezért lenne fontos egy általános összefüggés felállítása a vízhozam és a hordaléktöménység között, ehhez viszont sokkal több mért adatra lenne szükség, főleg árvizes időszakokban.

Ilyen összefüggést állított fel Tóth Bence lebegőanyag és vízhozam között 2015-ben. Doktori értekezésében anyagforgalmi szempontból elemezte a Duna, az Ipoly és két patak lebegő- és mederanyagát. Azért, hogy egyenleteket állíthasson fel, lebegőanyag felméréseket végzett a gödi Duna-szakaszon 2003 és 2011 között. Az vizsgált időszak minden egyes évre és a teljes 9 évre mért adatokra illesztett görbék adatait a 2. táblázatban láthatóak. Minden évre és a teljes időszakra meghatározta az első és a másodfokú regressziós egyenletet, majd a korrekciós faktorok alkalmazása után kiválasztotta, amelyiknél a Nash-Sutcliffe mutató a legnagyobb.

2. táblázat: A Duna által hordott éves lebegőanyag-szállítás görbék adatai Gödnél /forrás: Tóth Bence, 2015/

Vizsgált év	$\log C = a \cdot \log Q + b$		$\log C = a \cdot (\log Q)^2 + b \cdot \log Q + c$			NS
	a	b	a	b	c	
2003	1,0509	-2,0919				0,24
2004	1,3043	-2,9325				0,56
2005			-1,4408	10,194	-16,473	0,46
2006	1,1815	-2,4518				0,58
2007			2,9687	-18,305	29,504	0,24
2008	1,8295	-4,6784				0,65
2009			-1,2131	9,0378	-15,148	0,59
2010			-3,222	22,549	-37,78	0,37
2011			-13,474	85,414	-133,89	0,71
2003–2011	1,4146	-3,2353				0,41

Megállapította, hogy a vizsgált kilenc évben a lebegőanyag-koncentráció a vízhozamtól való függésében eltéréseket mutatott. Négy esetben (2005, 2009-2011) a görbe konkáv alakot vett fel, a többi évben viszont konvex görbe adódott, ezekben az években a regressziós koefficiens (a, b, c) értékek nem nagyon tértek el egymástól (7. ábra).



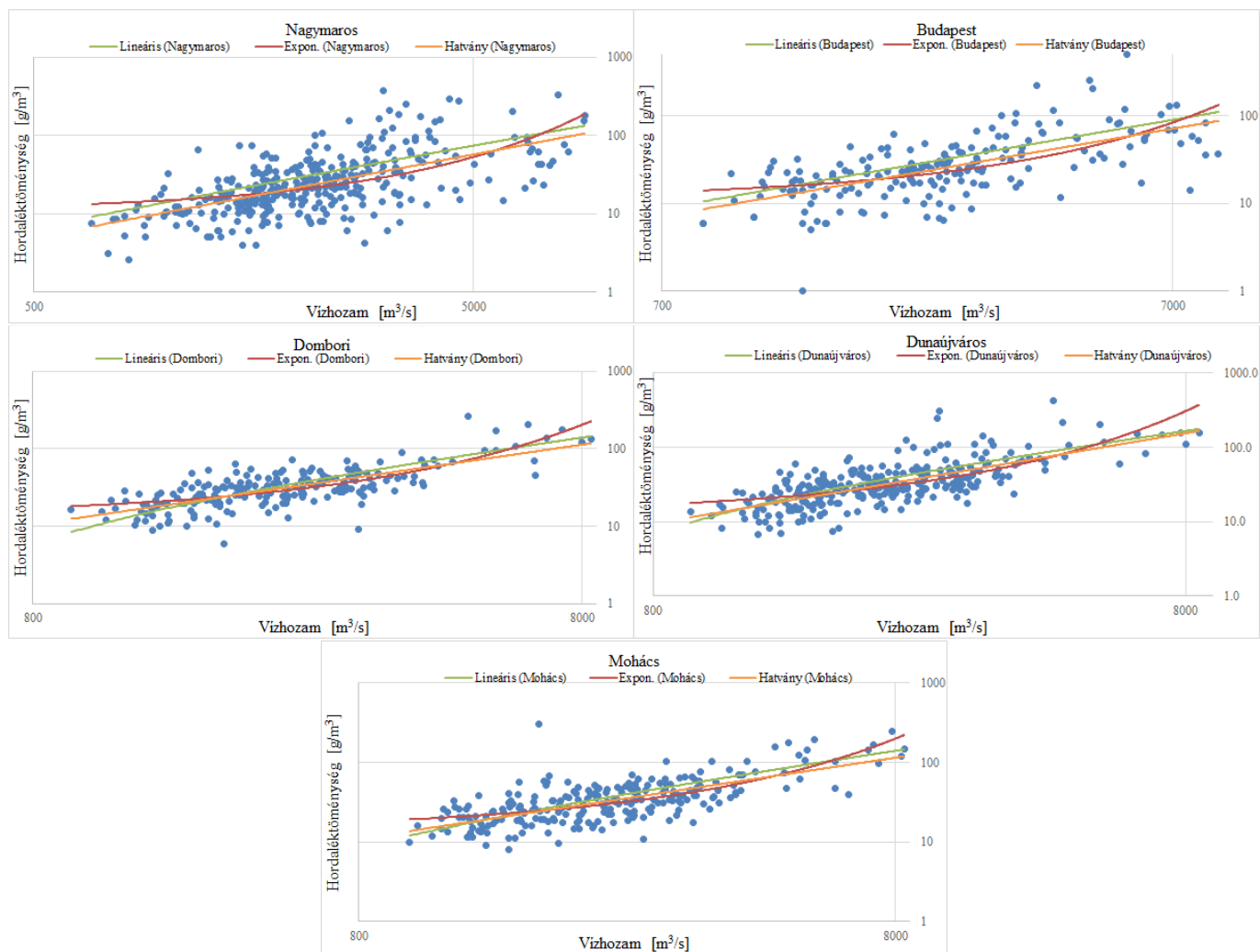
7. ábra: A kalibráló pontokra illesztett lebegőanyag szállítási görbéi (SRC) /forrás: Tóth Bence, 2015/

Mielőtt kitérnék a Vízügyi Igazgatóságoktól kapott adatok konkrét elemzésére, megjegyezném, hogy a hosszúidejű adatsorok elemzése azért fontos, mert térbeli és időbeli trendek felállítását teszik lehetővé, melyek segítik megérteni a folyóink működését és változásainak okát.

Hasonló vizsgálatokat már több nagy folyóra végeztek. Az Egyesült Államokbeli Mississippire például több tanulmány is készült, ugyanis a lebegtetett hordalék transzport egy a Missourin megépült gát miatt nagyon lecsökkent. 60 év adatainak elemzése alapján a gátnak csak 100-150 millió tonnát kellett volna visszatartania, de a mérések azt mutatták, hogy 400 millió tonnáról 145 millió tonnára csökkent a lebegtetett hordalékhozam, ez több mint 200 millió tonna (Meade and Moody, 2009). Tehát nemcsak a gát felelős a változásért, hanem az egyéb folyószabályozási munkák is. Ugyanis nem csak az elmúlt 60, 34 év adatainak hosszú távú elemzésénél, de a tanulmányban vizsgált utolsó periódusban (1998-2009) is tart még a hordalékhozam csökkenése. (Heimann et al., 2011). Máshol viszont a nagy hordalékhozam okoz problémákat. Szudán vízellátó rendszerével, a Nílussal is ez a helyzet, a nagy hordalékmenyiség gondot okoz az öntözésnél és a vízerőművekben is károkat okoz. Az erről szóló tanulmányban az árhullámok és a hordalékhozam kapcsolatát vizsgálták. Arra jutottak, hogy a teljes árvizes időszakban az árvízi hurokgörbe az óramutató járásával megegyező irányba halad, viszont rövidebb időszakokra óramutatóval ellentétes irányú görbék jöttek ki (Koll et al., 2014). A teljesség igénye nélkül ismertettem a két nagy folyóhoz kapcsolódó tanulmányt abból a célból, hogy érzékeltessem a téma relevanciáját és a vizsgálat szükségességét a Dunára. A dolgozat értelemszerűen nem tud kiterjedni a teljes Duna ilyen jellegű vizsgálatára, de a hazai szakaszra vonatkozó vizsgálatok hozzájárulnak majd a közeljövőben tervezett, teljes folyó léptékű adatelemzésekhez.

3. Adatelemzés

Továbbiakban csak és kizárólag a Vízügyi Igazgatóságoktól kapott adatok vizsgálatával fogok foglalkozni, ugyanis saját méréseket nem végeztem. Ennek egyik fő oka, hogy az Igazgatóságokon rendelkezésre állnak hosszú idejű adatsorok, melyeket még nem elemeztek. Így egyben megkapva 40-50 év adatait soknak tűnhet, de az évente átlagosan ötször vett minta nagyon kevés. Először hordaléktöménység-vízhozam kapcsolatot próbáltam felállítani az 5 mintavételi pontra (Nagymaros, Budapest, Dombori, Dunaújváros, Mohács). Az összes mért töménység és vízhozam adatpárt felvettem egy-egy logaritmikus grafikonra, majd lineáris, exponenciális és hatvány trendvonalakat illesztettem rájuk (8. ábra). A legjobban a lineáris trendvonalak illeszkedtek a pontokra, az ezekhez tartozó egyenleteket a 3. táblázat foglalja össze.

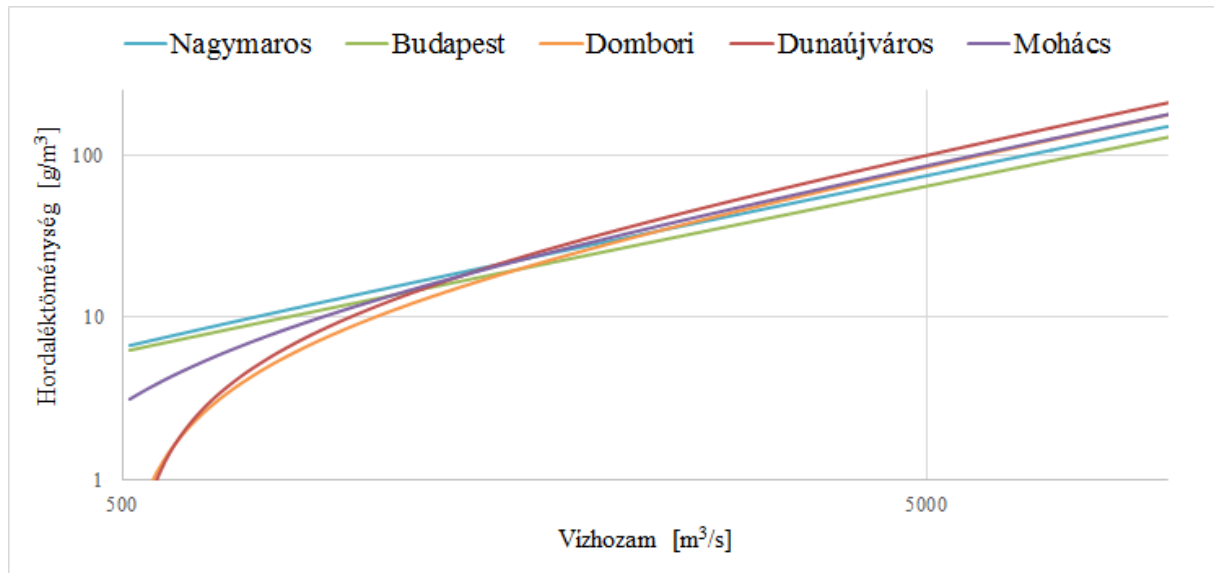


8. ábra: Hordaléktöménység-vizhozam összefüggések grafikonon

3. táblázat: Hordaléktöménység-vizhozam trendvonalak egyenletei

	Egyenlet	R ²
Nagymaros	$C = 0.0151 \cdot Q - 1.0014$	0.2250
Budapest	$C = 0.0129 \cdot Q - 0.3165$	0.2124
Dombori	$C = 0.0186 \cdot Q - 9.1457$	0.5648
Dunaújváros	$C = 0.0221 \cdot Q - 11.185$	0.3485
Mohács	$C = 0.0184 \cdot Q - 6.2608$	0.4406

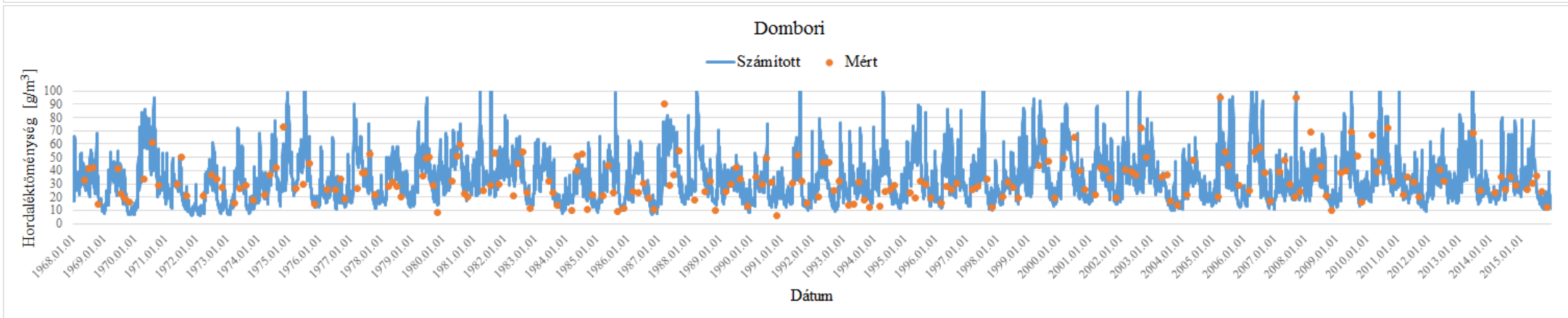
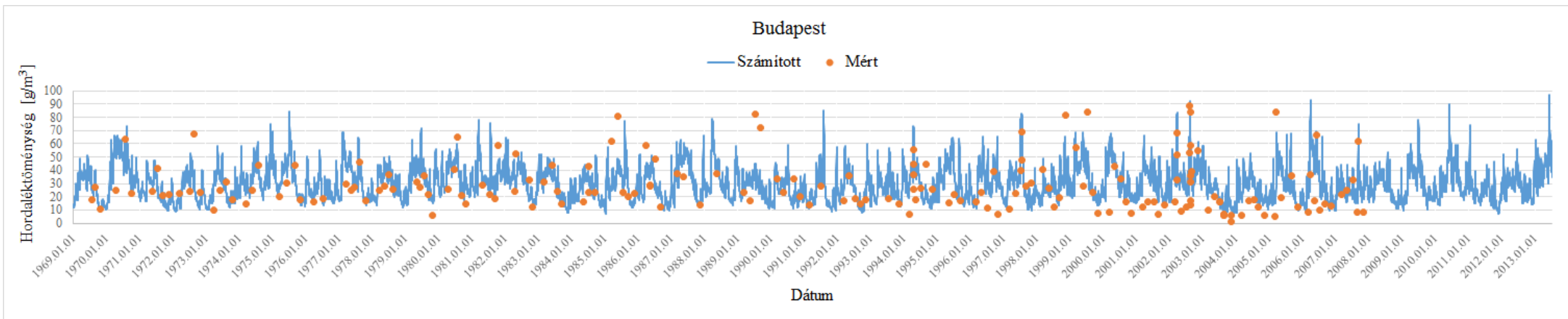
Az egyenletek ilyen fokú illeszkedése elfogadható, a mérések bizonytalanságára való tekintettel. Az illesztett függvényeket a mérési pontok nélkül mutatja be a 9. ábra. Megfigyelhető, hogy a Dunára jellemző vízhozam tartományban (~800-10000 m³/s) a görbék szinte egybeesnek, vagyis a folyó mentén nincs jelentős eltérés a vízhozam-hordaléktöménység kapcsolatban. Ez nem meglepő, ugyanis egyrészt, a vizsgált szakasz szabadfolyású, tehát nincsenek lokális feliszapolódást okozó gátak, másrészt nincs jelentős hozzáfolyás sem, így a lebegtetett hordaléktöménység hosszirányban nem is tud kiugróan változni.



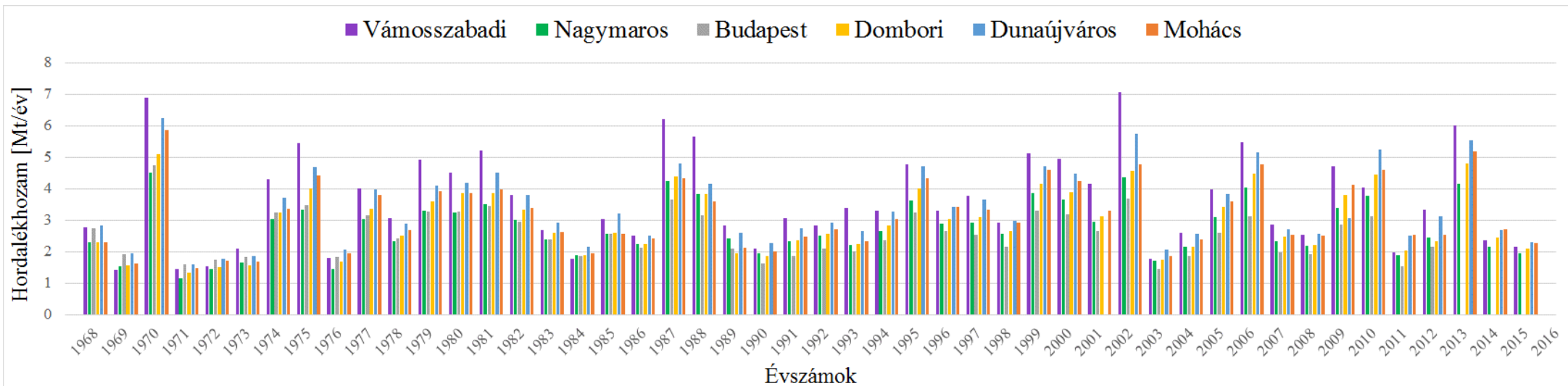
9. ábra: Hordaléktöménység-vízhozam egyenletek

A hordalékjárás időbeli vizsgálatához éves hordalékhozam értékeket állítottam elő. Mivel a rendelkezésre álló adatok száma alacsony volt (évi kb. öt adat) a következő módon jártam el: a fenti Q-c összefüggésekbe behelyettesítve a Vízügyi Igazgatóságtól kapott napi vízhozam adatokat, hosszú távú, napi hordaléktöménység értékeket állítottam elő. Ezeket a számolt értékeket első lépésben összevettem a mérésekből származó hordaléktöménységekkel (10. ábra). Néhány kiugró értéket nem tüntettem fel a könnyebb összehasonlíthatóság érdekében, de összességében kijelenthető, hogy a két adatsor közötti egyezés megfelelő a hordalékhozam becsléshez. Anélkül, hogy jelen lépésnél számszerű becslést tennék a becslés bizonytalanságára a napi vízhozam adatokból kapott hordaléktöménységekkel számolunk tovább.

A vízhozamokat és a hozzájuk tartozó számolt hordaléktöménységeket összeszorozva napi hordalékhozamokat kaptam. Éves hordalékhozamot ezeknek a napi értékeknek az összegzésével tudtam számolni, melyet a könnyebb értehetőség miatt átváltottam millió tonna/év-be. Ezt a becslést az 1968 és 2015 közötti időszakra végeztem el mind az öt mintavételi szelvényre, valamint az ÉDUVÍZIG területén található Vámoszabadira. Ennek az állomásnak a vízhozam adatsorát az illetékes Vízügyi Igazgatóság bocsátotta rendelkezésemre, a vízhozam-hordaléktöménység közötti összefüggés egyenletét pedig Ficsor (2015) szakdolgozata alapján vettem fel. A kapott értékek a 11. ábrán láthatóak grafikonosan.



10. ábra: Számolt és mért értékek összehasonlítása Budapestnél és Domborinál



11. ábra: Éves hordalékhozamok 1968 és 2015 között

A grafikonok alapján trendszerű időbeli vagy térbeli változás nem mutatható ki, viszont megfigyelhetünk érdekességeket: Annak ellenére, hogy alvízi irányba tudvalevőleg finomodik a folyó mederanyaga, nem látszik, hogy ezzel együtt megnövekedett lebegtetett hordalékmennyiséget szállítana a folyó, sőt Dunaújvárosnál kiemelkedően nagyobb érték látható, mint Mohácsnál. Ez a Nagymaros és Budapest közötti folyószakaszon is megfigyelhető. Ennek oka a 9. ábrán látható. Az egyenletek melyekből az éves hordalékhozamokat számoltam nagyvízi tartományban máshogy viselkednek, mint kis- és középvíznél. Ennél szembeűnőbb, hogy Vámoszabadinál pár évben nagyon kiugró érték mutatkozik. Ennek pedig az lehet oka, hogy a hivatkozott tanulmányban felállított Q-c összefüggésben csak az 1987 és az 1996 közötti évek értékeire lett felvéve az egyenes, amely csak rövid intervalluma a vizsgált időszaknak. Az alábbi táblázat egy áttekinthetőbb összefoglalása a grafikonon szereplő értékeknek (4. táblázat).

4. táblázat: Az éves hordalékhozamok összefoglalása

	Vámoszabadi	Nagymaros	Budapest	Dombori	Dunaújváros	Mohács
	[Mt/év]					
Átlag	3.59	2.75	2.57	2.94	3.39	3.14
Maximum	7.07	4.50	4.75	5.10	6.24	5.86
Minimum	1.42	1.17	1.44	1.33	1.59	1.48

A táblázat alapján látszik, hogy a felállított összefüggésekkel számolt éves átlagos hordalékhozamok 2.5-3 millió tonna/év körül mozognak. Vámoszabadinál viszont majdnem 4 millió tonna/év ez az érték. A minimális értékek ezeknek az éves átlagoknak nagyjából a fele. A maximális értékek kicsit több mint másfélszer akkorák az átlag- és négyszer nagyobbak a minimális értékeknél, kivéve Vámoszabadinál, ahol majdnem hatszor annyi a maximális érték, mint a minimum. Ha a grafikonon bejelölnénk az átlag értékeket, látható lenne, hogy az esetek nagyobb részében kevesebb hordalék érkezik.

Korábban már említettem, hogy Ulrich Schwarz a Duna teljes hosszára végzett lebegtetett hordalék vizsgálatokat. Az általa használt adatokat, melyeket a grafikonjáról (1. ábra) olvastam le, összehasonlítottam az általam számolt értékekkel. A grafikon alapján, Budapesten 1960 előtt évente átlagosan 10 Mt, 1985 és 2000 között pedig 6 Mt volt a hordalékhozam, ehhez képest ebben a vizsgálatban átlagosan 3.8 Mt és 2.5 Mt hordalékhozam jött ki. Látszik, hogy az értékpárok nagyságukban eltérnek egymástól, de arányaikban egyeznek. Ennek okát a mérési pontatlanságok és az ezekből felállított egyenletek bizonytalansága adhatja.

Itt fontosnak tartok megemlíteni egy módszert a lebegtetett hordalékhozam, a hagyományos mérési eljárásoknál pontosabb meghatározására. Ennek lényege, hogy a folyó zavarosságát folyamatosan rögzítik egy part közeli pontban, majd ebből határozható meg ugyanerre a pontra a part menti hordaléktöménység, a part menti töménységből pedig a szelvény menti töménység (természetesen kiegészítő mérések segítségével). Ebből a hordaléktöménységből pedig számszerűsíthetővé válik a hordalékhozam. Ezzel foglalkozott tanulmányában Haimann et al. (2014), ahol az ausztriai Hainburgnál található közúti hídnál végeztek zavarosságméréseket, majd hat különböző interpolációs eljárással számoltak hordalékhozamokat 2008-ra és 2009-re (5. táblázat).

5. táblázat: Lebegtetett hordalékhozam számítása Hainburgnál 6 féle interpolálási módszerrel /forrás: Haimann et al., 2014/

Year	M1	M2	M3	M4	M5	M6
	[Mt]	[Mt]	[Mt]	[Mt]	[Mt]	[Mt]
Sample number: n=50 (calibration samples)						
2008	1.94	1.91	2.29	2.26	2.28	1.78
2009	7.88	6.06	14.92	11.48	11.82	5.85

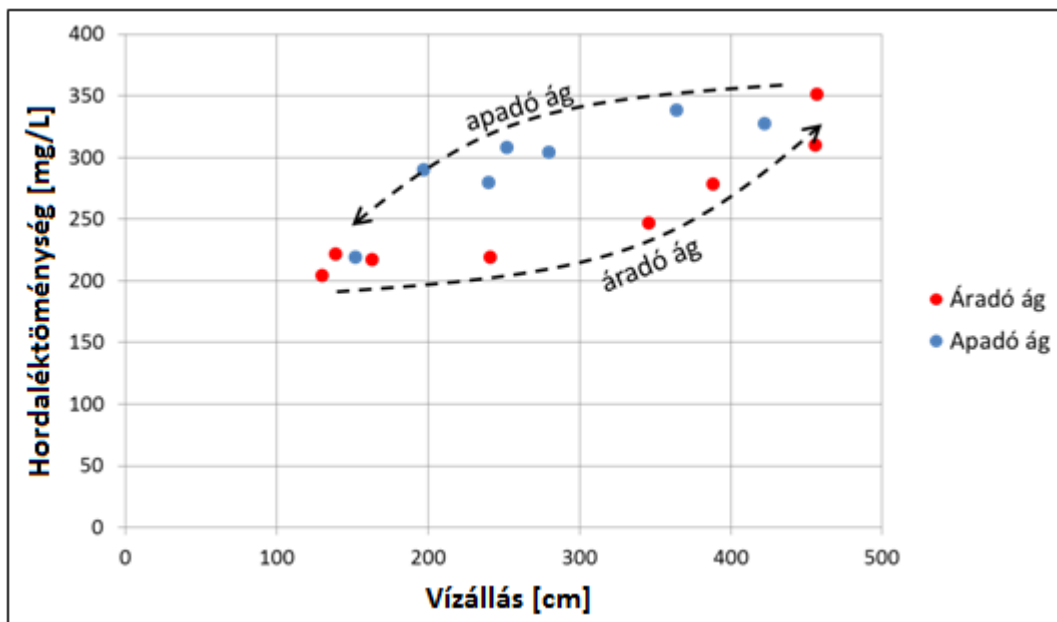
Erre a két évre az alábbiakban kigyűjtöttem a fenti összefüggésekkel számolt éves átlagos hordalékhozamokat, melyet az alábbi táblázatban foglaltam össze (6. táblázat).

6. táblázat: Számolt éves hordalékhozam értékek 2008-ban és 2009-ben

	Vámosszabadi	Nagymaros	Budapest	Dombori	Dunaújváros	Mohács
2008	2.53	2.19	1.91	2.23	2.55	2.52
2009	4.72	3.40	2.85	3.80	3.05	4.14

A 2008-as adatokra megfelelő egyezés látható az értékek között, csak Vámosszabadinál tér el jobban a többitől, de 2009-ben jelentős eltérések mutatkoznak. Az M3-mas módszer például 10 millió tonnával többet ad, mint az általam számolt értékek bármelyike. A legkisebb eltérést egyébként az M6-os módszer adja, ami 1.3 millió tonnával több, mint Vámosszabadinál. Az általam vizsgált hat szelvényből ez található legközelebb Hainburghoz.

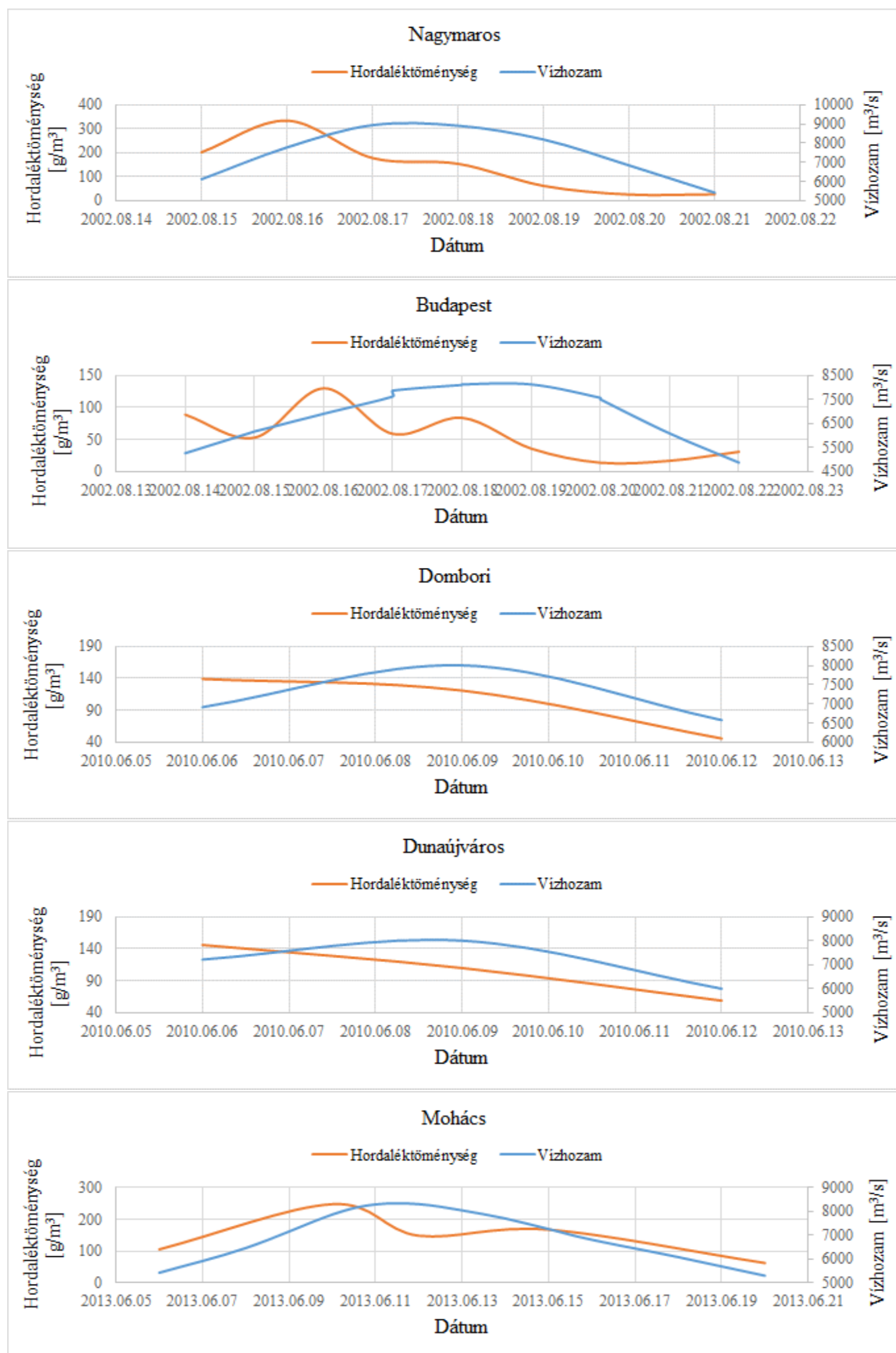
Magyarországon ezzel a módszerrel foglalkozott Nagy Krisztina szintén 2014-ben a BSc diplomamunkájában. Vizsgálataiból egy részt emelnék ki, amikor is egy kisebb árhullámnál vizsgálta a hordaléktöménység és vízállás kapcsolatát (12. ábra).



12. ábra: Vízállás és vízminták alapján felállított hordaléktöménység kapcsolat /forrás: Nagy Krisztina, 2014/

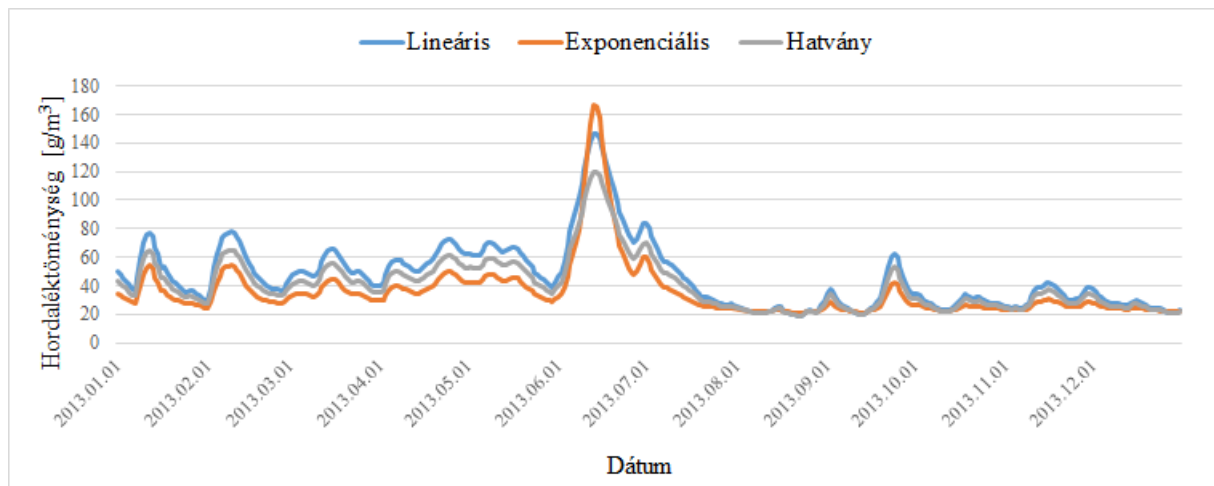
Az ábrán látható, hogy a vízállás és a hordaléktöménység között erős a kapcsolat, amely nem lineáris és eltér áradó és apadó ágon. Érdekes megfigyelni, hogy az eltérés jellege meglepő, hiszen ugyanahhoz a vízálláshoz az apadó ágon nagyobb hordaléktöménység tartozik, mint az áradó ágon, ennek megfejtésére további elemzéseket végeztem, de ez nem kapcsolódik szorosan dolgozatomhoz.

A jelenség vizsgálatára próbálkoztam a Vízügyi Igazgatóságoktól kapott adatok alapján. Nem sok olyan adat található sajnos, amely árhullámok levonulása során vett hordalékadatokat tartalmaznak, de minden mintavételi szelvényre fellelhető volt egy-egy rövid idősor, ahol egymást követő napokon, általában egy árhullám tetőzését közvetlenül megelőzően és követően néhány adat rendelkezésre állt. Bár az adatok nem engedtek messzemenő következtetéseket levonni, így nincs kimutatható kapcsolat az árhullám és hordaléktöménység között sem, de jelzésértékkel bír, hogy a két görbe nem esik egybe, a hordaléktöménység idősor maximuma általában megelőzi a vízhozam tetőzését, vagyis az előző ábrán bemutatott viselkedésnek éppen az ellenkezője figyelhető meg (13. ábra). Kétségtelen, hogy további célirányos vizsgálatok szükségesek ennek az ún. hiszterézis jelenségnek az elemzésére.



13. ábra: A hordaléktöménység és egy levonuló árhullám kapcsolata

A fentiekben bemutattam, hogy a vízhozam-hordaléktöménység összefüggést leíró függvények (lineáris, exponenciális vagy hatványfüggvény) egyenletei eltérően viselkednek nagyvizes időszakban, illetve kis- és középvíznél. Abból a célból, hogy az illesztett függvények közötti eltéréstől eredő bizonytalanságot számszerűsítsem az egyik mérési szelvényre (Mohács) egy kiválasztott évre (2013) meghatároztam az exponenciális és a hatvány trendvonalak egyenleteit is, majd ezekkel az egyenletekkel a napi vízhozam adatokból napi hordaléktöménység és hordalékhozam értékeket számoltam hasonlóan a korábbiakhoz.



14. ábra: Számolt hordaléktöménység-idő összefüggések lineáris, exponenciális és hatvány trendvonalakat feltételezve Mohácsnál 2013-ban

A kapott napi hordaléktöménység értékeket ábrázoltam az idő függvényében (14. ábra). Látható, hogy a hatvány függvénnyel számolt értékek kis eltéréssel, de egész évben alatta vannak a lineáris összefüggés által eredményezett értékeknek. Ezzel szemben az exponenciális trendvonalat feltételezve azt látjuk, hogy középvizes időszakban nagyon, kisvizes időszakban alig marad alul a lineárisal szemben, árvizes időszakban, viszont magasabb értéket ad.

7. táblázat: Összefoglalás a számolt éves hordalékhozam értékekről lineáris, exponenciális és hatvány trendvonalakat feltételezve Mohácsnál 2013-ban

	Lineáris	Exponenciális	Hatvány
	$\sum G_s$ [millió t/év]		
Egyenlet	$C = 0.0184 \cdot Q - 6.2608$	$C = 13.799 \cdot e^{0.0003 \cdot Q}$	$C = 0.0123 \cdot Q^{1.0175}$
Teljes év	5.11	3.98	4.37
Árhullám	1.94	1.69	1.62
Arány	0.38	0.42	0.37

A 7. táblázat alapján egyértelműen látszik, hogy lineáris trendvonalat feltételezve kapjuk a legnagyobb és exponenciális trendvonalat feltételezve kapjuk a legkisebb éves hordalékhozamokat. Az éves hordalékhozamok közötti eltérések mellett arra is kíváncsiak voltunk, hogy egy-egy árhullámnak mekkora szerepe van a teljes évben érkező hordalék mennyiségében, hiszen ez meghatározó lehet az operatív hordalékmérési tevékenységben. Megállapítható volt, hogy exponenciális egyenletet alkalmazva lesz legnagyobb az arány a teljes éves hordalékhozam és csak az árhullámkor levonult hordalékhozam között. Ez 4%-al több mintha lineáris egyenletet használtunk volna, de ami még lényegesebb, hogy lényegében függetlenül az alkalmazott összefüggéstől a 2013-as évben (ami a Dunán rekord hozammal

vonult le) az árvíz alatt szállított hordalék mennyisége a teljes évinek 40%-át tette ki. Ez az eredmény rámutat annak fontosságára, hogy árvízi időszakban is szükséges hordalék mintavételezést végezni különös tekintettel arra, hogy mind az adatok bizonytalansága, mind a Q-c kapcsolat időbeli viselkedése (hurokgörbe hatás) ebben a vízjárási időszakban válik jelentőssé.

4. Összefoglalás, következtetések

A folyók hordalékviszonyai sok kérdést vetnek fel, ugyanis jelentős problémákat tudnak okozni, kezdve a hullámtér és a mellékágak feliszapolódásával egészen a mőtárgyak tönkretételéig. A világban éppen ezért számos tanulmány készül a hordalék transzport folyamatok megértésére.

Ahhoz, hogy ténylegesen megérthessük ezeket a folyamatokat, a hordalékadatok térbeli és időbeli változásainak vizsgálatára van szükség. Térbelire, hogy a folyó hossz menti változásait elemezhesük és időbelire, hogy akár évtizedekre visszamenőleg lássuk a folyamatok miertjét.

A Dunára vonatkozó, ilyen jellegű viselkedések vizsgálatához a Közép-Duna-völgyi és az Alsó-Duna-völgyi Vízügyi Igazgatóságoktól kaptam vízhozam és hordaléktöménység adatokat hosszú időre visszamenőleg összesen öt állomásra (Nagymaros, Budapest, Dombori, Dunaújváros, Mohács), valamint egy közelmúltban készített tanulmányból Városszabadira is rendelkezésemre álltak napi vízhozam adatok. Kapacitás hiányában mindkét Vízügyi Igazgatóságon csak feldolgozzák az adatokat, elemzésükre már nem kerül sor. Emiatt bár sok adatot kaptam kézhez, messzemenő következtetések levonásához még ennél is többre lenne szükség.

Elemzéseimet a vízhozam-hordaléktöménység adatpárok grafikus megjelenítésével és trendvonalak felállításával kezdtem. A lineáris, exponenciális és hatvány trendvonalak közül kiválasztottam a legjobban illeszkedő lineáris egyenest és annak egyenletét, kivéve Városszabadinál, mert ez ott már rendelkezésemre állt. Az általam meghatározott egyeneseket egy ábrán ábrázolva láthatóvá vált, hogy az egyenletek között nincs kapcsolat, ez a szakaszra jellemző szabad lefolyás miatt lehet, viszont az is látható, hogy nagyvízi tartományban az egyenletek helyet cserélnek.

A képletek ellenőrzésére Budapestenél és Domborinál egy grafikonon ábrázoltam a számított és a mért vízhozam-hordaléktöménység adatpárokat, melyek elfogadható egyezést mutattak.

A felállított összefüggéseket alkalmazva napi hordaléktöménység, hordalékhozam valamint éves hordalékhozam értékeket számoltam, majd a 1968 és 2015 közötti időszakra ábrázoltam a kapott éves hordalékhozamokat. Látható volt, hogy alvízi irányba haladva nincs jelentős változékonyság az adatokban, vagyis a mederanyag összetételének finomodása nem vonja maga után a lebegtetett hordalék kimutatható növekedését. A térbeli elemzés mellett az adatok időbeli változását is vizsgáltam, de trendszerű változás nem volt kimutatható.

Megvizsgáltam a rövid időszakra vonatkozó, az árhullámokkal levonuláshoz kapcsolódó nempermanens viselkedést is, amihez egy-egy árhullám vízhozam és töménység idősorát vettem össze. Az adatok kis mennyisége nem engedett túl sok következtetést levonni, de az láthatóvá vált, hogy a hordaléktöménység általában előbb éri el maximumát, mint a vízhozam.

A Q-c adatpárokra illesztett függvények eltérésekből adódó bizonytalanságnak számszerű kimutatására egy, a mohácsi szelvényre kapott 2013-as adatsorra számítást végeztem három különböző függvényt alkalmazva a teljes éves hordalékhozamra. Az adatokat grafikonon ábrázolva látható, hogy míg a hatvány egyenlettel számolt értékek mindig a lineáris értékek alatt vannak, addig az exponenciális értékek csak kis- és középvíznél mozognak alatt, nagyvíznél túllőnek a lineáris értékeken. Továbbá, fontos eredmény volt az árhullámok által

szállított hordalékmennyiségének a teljes évi hordalékhozamhoz való arányának számszerűsítése is, amelyben rámutattam arra, hogy a vizsgált évben az árhullám során szállított hordalék mennyisége 40%-ot jelent a teljes éves hozamban, vagyis a mintegy két hetes árvíz során rendkívül nagy mennyiségű hordalék vándorolt le a Dunán.

A dolgozat eredményei alapján számszerű becslés tehető a Duna hosszú távú lebegtetett hordalékszállítására, egyúttal rámutat az adatokban rejlő bizonytalanságra és a mérési módszerek fejlesztésének szükségességére. Az itt bemutatott eredmények hozzájárulnak egy, a teljes Dunára felállítandó hordalékmérleg vizsgálatához és a magyarországi szakaszra vonatkozó sajátosságok kimutatásához.

Irodalomjegyzék

Tamás E., Baranya S. (2008): SEDIBAL „Sediment Balance for the Danube River”, Interim Report, Baja-Budapest, Hungary.

Tamás E. (1999): A Dunaújváros-Mohács közötti Duna-szakasz lebegtetett hordalék járásának vizsgálata, Hidrológiai Közöny 1999. 79. Évf. 1. sz.

U. Schwarz (2008): Assessment of the balance and management of sediments of the Danube, FLUVIUS, Floodplain Ecology and River Basin Management, Vienna, Austria.

Rákóczi L.: A hordalék helye és szerepe az ökoszisztémában, Előadásanyag, http://www.jno.hu/hu/duna101020/rakoczi_laszlo.pdf

Nagy K. (2014): Operatív folyami lebegtetett hordalékmérés fejlesztése, BSc Diplomamunka, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Budapest.

Ficsor J. (2015): Lebegtetett hordalék vizsgálata a Felső-magyarországi Duna-szakaszon, Szakdolgozat, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Budapest.

Tóth B. (2015): A lebegőanyag és a mederanyag anyagforgalmi szempontú elemzése a Dunában Kismaros és Paks között, valamint az Ipolyban és két borszönyi patakban, Egyetemi doktori (PhD) értekezés, Debreceni Egyetem, Debrecen.

M. Haimann, et al. (2014): An integrated suspended sediment transport monitoring and analysis concept, International Journal of Sediment Research, Vol. 29, 2014, pp. 135-148.

R.H. Meade, J.A. Moody (2009): Causes for the decline of suspended-sediment discharge in the Mississippi River system, 1940-2007, Hydrological Processes 24, 35-49 (2010).

B. Zaid et al. (2014): Analysis of suspended sediment transport data in the River Nile, Conference Paper, Conference: River Flow 2014, Lausanne, Switzerland.

D.C. Heimann et al. (2011): Trends in Suspended-Sediment Loads and Concentrations in the Mississippi River Basin, 1950–2009, National Water-Quality Assessment Program, Scientific Investigations Report 2011–5200, U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey, Reston, Virginia