



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

**Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem**

**Építőmérnöki Kar**

**Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszék**

**Folyók dinamikusan egyensúlyi állapotát  
becslő eljárás kidolgozása és alkalmazása  
a magyarországi Felső-Dunán**

**Tudományos Diákköri Konferencia 2020**

**Készítette: Nyiri Emese**

**Konzulens: Dr. Török Gergely Tihamér**

# Tartalomjegyzék

<b>Absztrakt</b> .....	4
<b>1. Bevezetés</b> .....	5
<b>2. Irodalomkutatás</b> .....	10
2.1 Mederalak.....	11
➤ Szelvények.....	11
➤ Szélesség .....	13
➤ Esés.....	13
2.2 Görgetett hordalék.....	14
➤ Mennyiség .....	14
➤ Idősor.....	16
2.3 Szemcseméret .....	18
➤ Szelvényekhez tartozó szemcseméretetek.....	18
➤ Aprózódás, szelektív lerakódás .....	19
2.4 Vízrajz .....	19
<b>3. Szakirodalmi következtetések</b> .....	20
<b>4. Modellalkotás</b> .....	22
<b>4.1 Alapegyenletek</b> .....	24
➤ Hordalékhozam számítása .....	25
➤ Alapegyenletek kibővítése szabadfolyású állapot esetére .....	26
4.2 Modellparaméterezés .....	28
➤ Szakirodalmi adatok .....	28
➤ Dimenziómentes mederellenállási tényező ( $C_f$ ) .....	28
➤ Periodicitás .....	29
<b>4.3 Modelligazolás</b> .....	30
➤ Dunaremetei számítások.....	30
➤ Nagybajcsi számítások .....	31
➤ Számítások további hordaléktranszport-modellekkel.....	32
➤ Következtetések.....	33
<b>5. Modellvizsgálatok</b> .....	34
<b>5.1 Érzékenységvizsgálat</b> .....	34
<b>5.2 Hordalékviisszatartás hatásának vizsgálata</b> .....	42
<b>5.3 Hordalék- és vízhozam csökkenés hatása Dunaremeténél</b> .....	44
<b>5.4 A szabályozások előtti állapot becslése Nagybajcsnál</b> .....	49
<b>5.5 Kopásvizsgálat</b> .....	51
<b>6. Összefoglalás</b> .....	53

<b>7.</b>	<b>Ábrajegyzék</b> .....	56
<b>8.</b>	<b>Táblázatjegyzék</b> .....	57
<b>9.</b>	<b>Hivatkozások</b> .....	58
<b>10.</b>	<b>Köszönetnyilvánítás</b> .....	60
<b>11.</b>	<b>Függelékek</b> .....	61
<b>11.1</b>	<b>Kavicsra kidolgozott, egyfrakciós hordaléktranszport modellek</b> .....	61
<b>11.2</b>	<b>Vízhozam – Görgetett hordalékhozam összefüggések</b> .....	62

## Absztrakt

A folyók életében folyamatosan megfigyelhetők morfológiai változások, melyek hatására egyes szakaszokon a víz mélyíti a medrét, míg máshol építi. Hosszabb időléptéket vizsgálva azonban az várható, hogy a mederváltozások végül egy ún. dinamikus egyensúlyi állapothoz formálják a medergeometriát. Azt elérve, továbbra is megfigyelhető ellentétes értelmű mederváltozások, de azok mértéke kiegyenlítik egymást, ezért csak átmenetileg várható a dinamikus egyensúlyi állapottól eltérő medergeometria. A mesterséges tevékenységek vagy természetes folyamatok kibillenthetik a vizsgált folyószakaszt dinamikus egyensúlyi állapotából, ha azok jelentősen megváltoztatják az hidrológiai, hordalékháztartási, illetve áramlási jellemzőket. Az új egyensúlyi állapot az emberek számára hol előnyös, máshol pedig kedvezőtlen. Az viszont vitathatatlan, hogy megbízható előrejelzésének környezetvédelmi, élőhelyhidraulikai, társadalmi, turisztikai, gazdasági stb. szempontból is alapvető jelentősége van.

Dolgozatomban a dinamikus egyensúlyi állapot jellemzésének és változásának 0D (prizmatikus medret feltételező) leírhatóságát vizsgálom a magyarországi Felső-Duna példáján keresztül. Ezen a folyószakaszon a 20. század második felétől jelentősen megváltozott a folyószakasz dinamikus egyensúlyi állapota. Kutatásomban nagy hangsúlyt fektetek az említett szakaszra vonatkozó, 20. század során végzett terepi mérési adatok, valamint az abból levont konklúziók feltárására és összefoglalására. A megszerzett adatokat táblázatba foglalom, a változásokat diagramok segítségével bemutatom. Az irodalomkutatás alapján összeállított adatok alapján jellemzem a jelentős változások előtti dinamikus egyensúlyi állapotot, annak morfordinamikai paraméterei segítségével. Ezután, a paraméterek alapján kísérletet teszek egy 0D morfordinamikai modell felépítésére és validálására. Az igazolt modell lehetőséget biztosít a Felső-Duna dinamikus egyensúlyi állapot változásának vizsgálatára, amire a validálási eredmények értékelése alapján kerülhet sor. Legnagyobb hangsúlyt a várható új mederesés és mederszélesség becslésére teszem. A 0D modellt az általa becsült és a szakirodalomban talált, valós változások összevetése alapján tervezem igazolni.

## 1. Bevezetés

Dolgozatomat Magyarország legnagyobb folyójának szabályozási történelmi hátterének átfogó bemutatásával szeretném kezdeni. A folyó nem más, mint a Duna és annak is a magyarországi Felső-Dunai részére összpontosítok. A folyam, mely kettészeli az országunkat, jelentősen hozzájárul országunk felszíni vízbázisához. Élőhelyszempontú, mezőgazdasági, környezetvédelmi, ivóvízellátási és számos egyéb szempontból is kiemelkedő fontossággal bír, továbbá Európa fontos hajózási útvonalának részét is képezi. Éppen aktuális, valamint a jövőben várható morfordinamikai állapota tehát számos tevékenységre hatással van.

A folyók életében folyamatos morfordinamikai változás megy végbe. Medergeometriája bizonyos hatásokra változik, ami lehet mesterséges vagy természetes folyamat. Így van ez a Duna folyóval is, ami megélt már jelentős szabályozásokat, települtek rá vízlépcsők, sarkantyúk és egyéb folyószabályozási műtárgyak és berendezések is. Alapvető kérdés tehát, hogy ezek a beavatkozások vajon milyen hatással vannak a folyó morfordinamikai állapotára? Gondoljunk csak bele: a beavatkozások hatására a folyókban lejátszódó morfológiai folyamatok megváltozhatnak, egy korábbi lehetséges dinamikus egyensúlyi állapot felborulhat. A legfontosabb kérdés már csak az, hogy vajon milyen lesz és mikor áll be az új dinamikus egyensúlyi állapot? Továbbá, ez miként hat az emberi tevékenységekre, valamint az élővilágra?

Ezt a kérdéskört szándékozom vizsgálni a Felső-Duna egy megfelelő szakaszán. Dolgozatomat irodalomkutatással kezdem. A szakirodalmi adatok alapján két olyan szelvényt találtam, ahonnan szükséges minőségű és mennyiségű adat áll rendelkezésre morfordinamikai állapotértékelési vizsgálatokhoz. Ezek a dunaremetei (1825,5 fkm) és a nagybajcsi (1801,0 fkm) szelvények, ahonnan vízrajzi észleléseken túl hordalékháztartási méréseket is végeztek. A múltbéli méréseket és mederfelvételeket szakirodalmi forrásokból vettem át. Nagy segítségemre szolgált „Bogárdi János: Vízfolyások hordalékszállítása” (*Forrás*: Bogárdi, 1955) című könyve, illetve a Vízrajzi évkönyvek (*Forrás*: OVF, 2020).

A Felső-Duna a 19. századi szabályozás előtt jellegzetes fonatos jelleget mutatott (1.ábra), amit ún. kontinentális delta torkolatnak is szokás hívni. A Duna az osztrák szakasról kavicsos hordalékban gazdag vízzel tör át az Alpok utolsó hegyein Dévénynél (Dévényi-kapu). Az Alpokat elhagyva a Kisalföldre érkezve a folyó esése jelentősen lecsökken, ami a durva hordalék lerakódását eredményezi. Évezredek alatt ez a hordalék építette a Kisalföld néhol többszáz méter vastag kavicsos aljzatát. A folyó által lerakott hordalék a medrében zátonyokat és szigeteket épített, és ez idézte elő a folyó medrének több ágra való szakadását. A 19. századi

folyószabályozás ennek a fonatos ágrendszernek vetett véget: a szabályozás célja egy főmeder kialakítása volt, ami javítja a folyó árvízlevezető képességét és egyúttal előnyösebb hajózási feltételeket biztosít (5. ábra). A szabályozásokat 1881-1885 között hajtották végre a Felső-Dunán Vásárhelyi Pál tervei alapján (*Forrás: Ihrig, 1973*).

A főmeder kialakítását a későbbi évtizedekben több utómunkálat követte, amik inkább csak kisebb szabályozásokat jelentettek. A Felső-Dunán több helyen is láthatunk beépített sarkantyúkat és partvédőműveket, amik mind ezen munkálatok eredménye. A sarkantyúk építésének célja a víz áramlásának gyorsítása, melynek következménye a meder mélyülése. A mélyebb folyómeder kedvezőbb feltételeket teremt a víziközlekedés, vagyis a hajózás számára.

1952-ben a magyar kormány határozatot hozott a nagymarosi vízlépcső beruházásnak előkészítéséről. 1977-ben a magyar és a csehszlovák miniszterelnök aláírta a Bős-nagymarosi vízlépcsőrendszer megépítéséről és közös üzemeltetéséről szóló szerződést. 1989-ben tudósok, környezetvédők és a magyar nép ellenállása miatt Magyarország felfüggesztette a nagymarosi munkálatokat, majd azt véglegesen le is állította. A csehszlovák fél a beruházás folytatása mellett döntött, ezért a Dunát Csehszlovák területre terelték. A folyó elterelése jelentős környezeti kárt okozott Szigetközben. A vízlépcsőrendszer terveit hosszan tartó kutatómunka alapján készítették el, melyben figyelembe vették a víziközlekedés igényeit, árvízvédelmi problémák megoldását, a vízenergia hasznosítását és a turizmus várható alakulását is. A meg nem építés államközi perekhez vezetett, kártérítési igényeket kellett kielégíteni és a visszaállítási munkálatok is jelentős terhet róttak az országra. A nagymarosi részen az építkezés leállt és azóta se fejezték be.

A felsorolt beavatkozások jelentős hatással bírtak a Felső-Duna morfológiai folyamataira és minden bizonnyal annak dinamikus egyensúlyi állapotára is. Ismert jelenség például, hogy vízlépcsők alvízére hordalékban szegény víz jut át, ami hatás akár önmagában megváltoztathatja a folyószakasz jellegét (Például a hordalékban szegény folyó esetében nem várható fonatos ágrendszer kialakulása, természetes úton, (*Forrás: Schumm, 1981*). Továbbá, a hordalékháztartás megváltozása hatással lehet a folyó egyensúlyi szélességére, esésére és a meder, valamint a hordalék jellemző méretére. A Bösi-Vízlépcső megépülése után markáns mederváltozások mentek végbe az elterelést követő évtizedekben (*Forrás: Holubová et al., 2004; Holubová et al., 2015; Török és Baranya, 2017*): megváltozott a hordalékháztartás, ami az alvíz egyes szakaszain akár eltérő értelműek is lehetnek. Az üzemvízesatorna közvetlen alvízén jelentős medermélyülést, az alsóbb szakaszokon néhol mederépülést mértek. Míg a Madarász-sziget magasságában (~ 1810 fkm) hordalékhiány lépett fel, addig a közel 20 km-rel

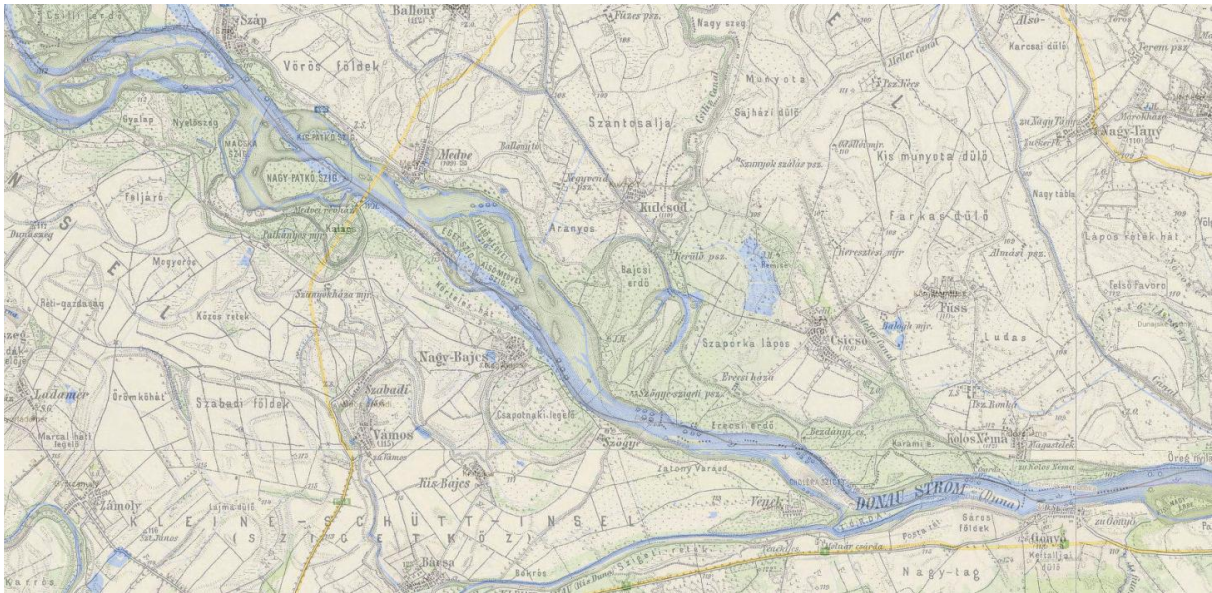
lejjebb lévő szakaszon (Vének térségében, ~ 1795 fkm) kavicspadok épülése okozott problémát. Egyes szakaszokon a meder (mesterséges módon sarkantyúkkal, vagy természetes úton kavicspadok épülése révén) beszűkült, ami a folyómeder berágódását, illetve általában lokális esésnövekedést eredményezett. Nagyléptékben azonban a Felső-Duna szakaszán eséscsökkenés ment végbe, valamint a főmeder berágódása volt megfigyelhető. Az itt felsorolt jelenségek jól példázzák a morfológiai folyamatok összetettségét, hiszen az egyes szelvényekben lejátszódó változások hatással voltak egymásra.

A feltárt problémák hatásai kapcsán alapvető kérdés, hogy vajon milyen dinamikus egyensúlyi állapot kialakulása várható a vizsgált folyószakaszon? Dolgozatomban ezt a kérdéskört vizsgálom múltbéli adatokra támaszkodva. Célom egyrészt egy 0D modell felépítése, paraméterezése és igazolása szakirodalmi adatok alapján. Másfelől, a modell alkalmazásától azt várom, hogy az lehetőséget biztosít alapvető vizsgálatok elvégzésére, a dinamikus egyensúlyi állapotra vonatkozóan. A 0D modell alatt azt értem, hogy a valós medergeometriát téglalap szelvényű, prizmatikus mederrel közelítem, valamint a folyadék és hordalék kapcsán is permanens mozgást feltételezek (Forrás: BME Hidraulika I. jegyzet, 2004).

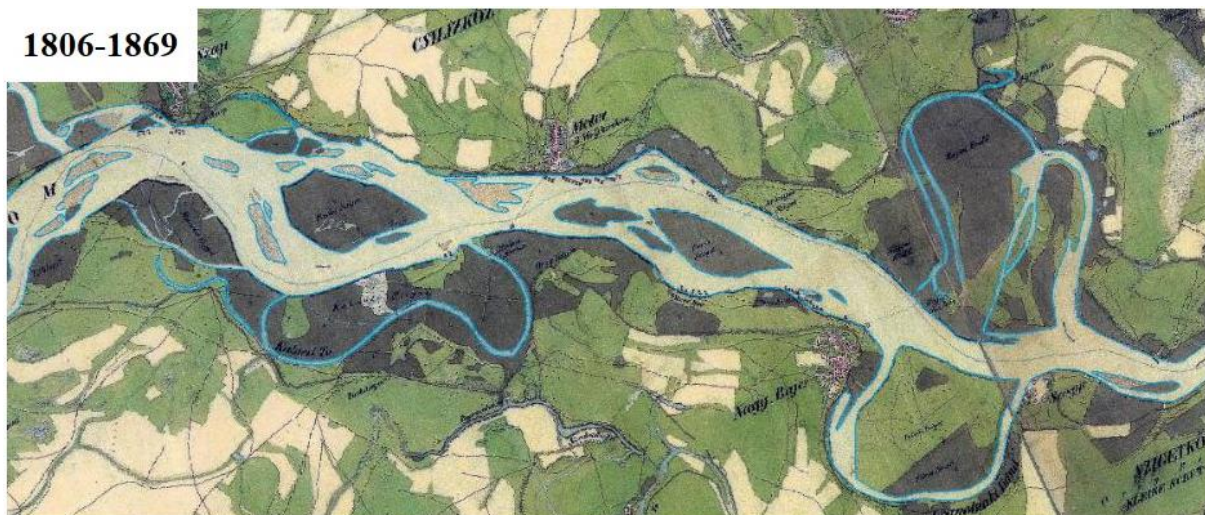


1. ábra: Duna a 19.századi szabályozás előtt (Forrás: Szombati, 2016)

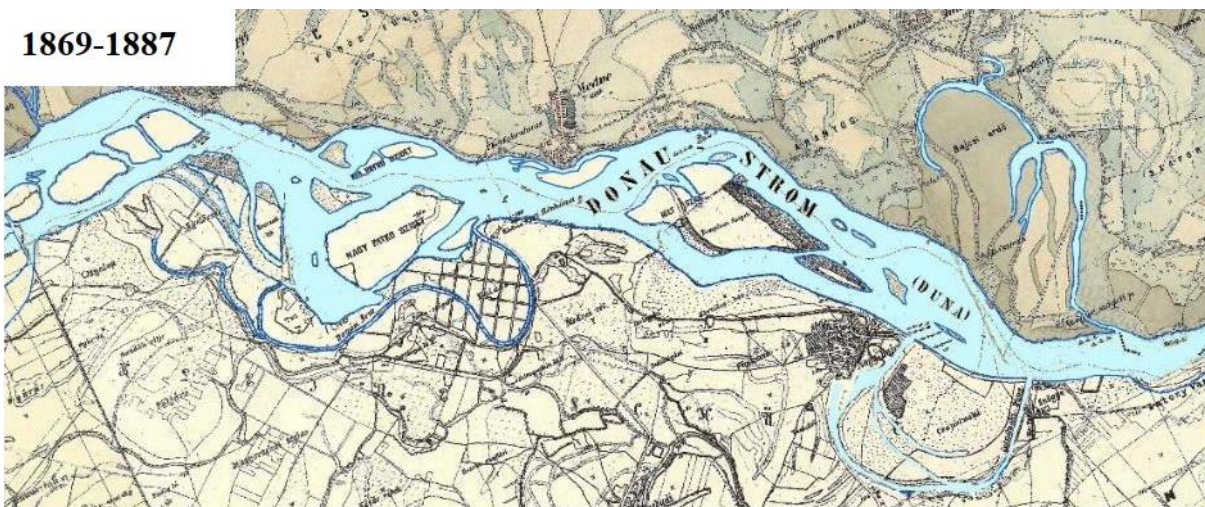




2. ábra: A 19. századi szabályozás után (Forrás: Szombati, 2016)

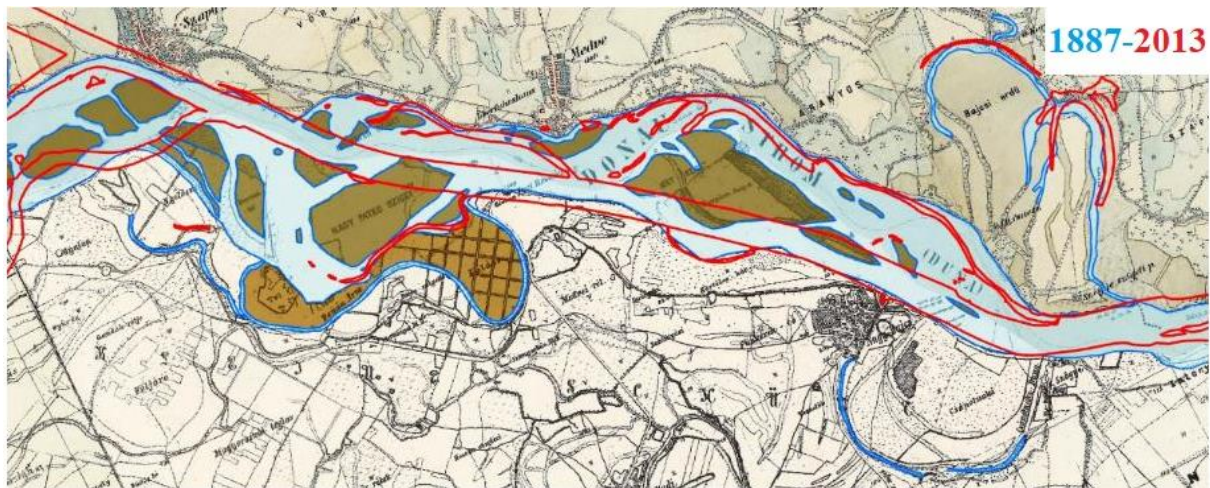


3. ábra: A Duna térképe Szap és Nagy-bajcs közti szakasról a szabályozás előtt (Forrás: DuRe Flood project 2015)



4. ábra: Térkép Szaptól Nagy-bajcsig 1869-1877 (Forrás: DuRe Flood project 2015)





5. ábra: Duna szabályozás előtt/után összehasonlítás (Forrás: DuRe Flood project 2015)



6. ábra: A Duna szabályozás utáni állapota Szap- Nagybajcs 1941 (Forrás: DuRe Flood project 2015)



7. ábra: Ortofotó a Duna jelenlegi állapotáról (2012) (Forrás: DuRe Flood project 2015)

## 2. Irodalomkutatás

A kutatáshoz több szakirodalmat is feldolgoztam, hasznosítottam. Nagy segítségemre szolgált „Bogárdi János- Vízfolyások hordalékszállítása” című könyve (*Forrás*: Bogárdi, 1955) és „Töry Kálmán - A Duna és szabályozása” (*Forrás*: Töry, 1952) című műve. Segítségemre voltak még a Vízirajzi évkönyvek és több angol nyelvű cikket is tudtam forrásként hasznosítani. Mint már említettem, a Felső- Duna szakaszát vizsgálom és azonb elül is kettő szelvényt: Dunaremete (1828,5 fkm) és Nagybajcs (1801,0 fkm). Erre a két szelvényre találtam a legtöbb morfológiai adatot.

Az irodalomkutatásom során a morfológiára vonatkozó történelmi adatokat szerettem volna összegyűjteni. Célom kettős volt: egyrészt, hogy a rendelkezésemre álló adatok alapján megkíséreljek körültekintő megállapításokat tenni, a morfológiai folyamatokra vonatkozóan. Másfelől pedig modellparaméterezéshez és igazoláshoz szükségem volt megbízható adatokra.

Sajnos a 19. századi szabályozások előtti időszakra vonatkozóan érdemi információt nem találtam, ezért elsősorban az azutáni, de még a Bösi-Vízlépcső üzembe helyezése előtti időszakra koncentráltam.

Bogárdi János könyvében, illetve a Vízirajzi Évkönyvekben jelentős mennyiségű görgetetthordalék mérési adatot találtam főleg 1950 és 1970 közötti időszakra vonatkozóan.

Kutatásom főbb részei:

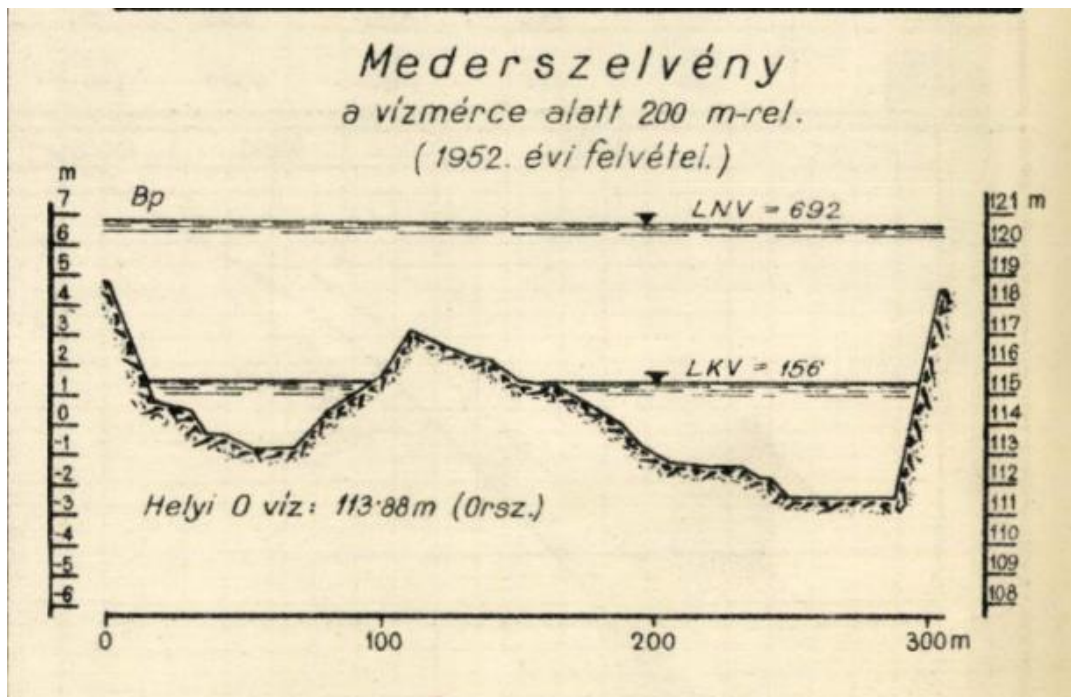
- Mederalak
  - szelvények
  - szélesség
  - esés
- Görgetett hordalékhozam
  - mennyiség
  - idősor
- Szemcseméret
  - szelvények jellemző szemcseméretei
  - aprózódás, szelektív lerakódás
- Vízirajz



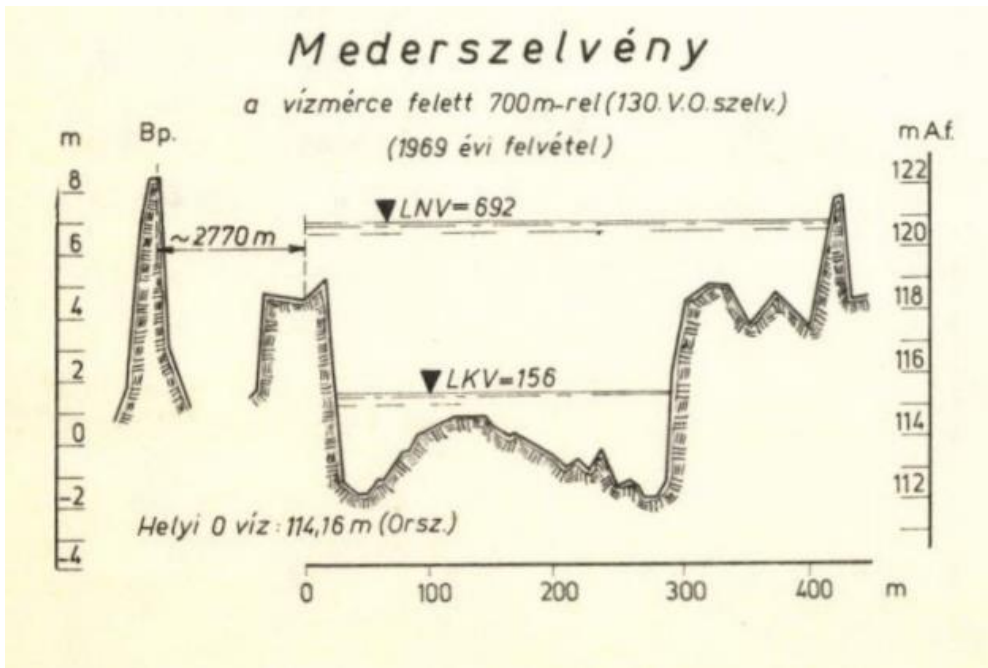
## 2.1 Mederalak

### ➤ Szelvények

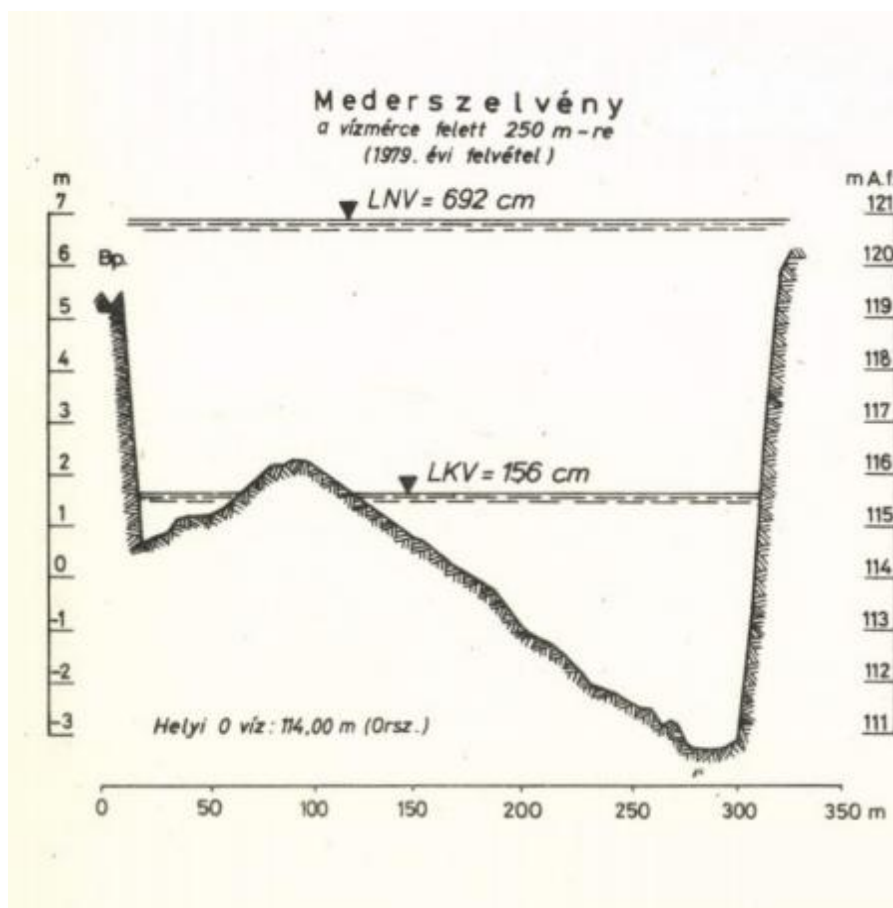
A mederalakra vonatkozó adatokat elsősorban a Vízirajzi Évkönyvek tanulmányozásától vártam. Az Országos Vízügyi Igazgatóság honlapján érhetőek el Vízirajzi Évkönyvek digitalizált változatai (Forrás: OVF, 2020). A legkorábbi Évkönyv 1886-ból származik, de még nagyon csekély morfológiai tartalommal. Az 1886 és 1990 közötti időszakra vonatkozóan összesen 74 évkönyv található meg, amiket tanulmányoztam. A nagybajcsi mederről nem találtam 1990 előtti időszakra vonatkozóan adatot és más szakirodalmakban sem. Dunaremetéről 3 különböző évi felvételt találtam (1952, 1969 és 1979), melyben észlelhető a 17 év és 10 év alatt végbement változások a geometriájában.



8. ábra: Dunaremete 1952-es mederfelvételi ábrája (Forrás: 1959. évi Vízirajzi Évkönyv)



9. ábra: Dunaremete 1969-es mederfelvételi ábrája. (Forrás: 1970. évi Vízirajzi Évkönyv)



10. ábra: Dunaremete 1979-es mederfelvételi ábrája (Forrás: 1980. évi Vízirajzi Évkönyv)



A medergeometriák jelentős változásokat mutatnak a 27 év lefolyására vonatkozóan. Ez az egy vizsgált szelvénye alapján arra lehet következtetni, hogy a meder nem volt dinamikus egyensúlyi állapotban.

➤ Szélesség

A szabályozással a folyó szélessége is változott és a hajózás érdekében is történtek olyan változtatások, melyek hatással voltak a szélesség kialakítására. Az alábbi 19. századi szabályozásra vonatkozó tervezett és megvalósult adatok alapján azt szeretném bemutatni, hogy a folyó morfológiai adottságai határt szabnak bizonyos medergeometriai kialakítási elképzeléseknek.

- Nagybajcsón a Duna 19. századi szabályozásakor 420 m-es szélességet terveztek, de a munkálatok végére nem sikerült ezt elérni. A végül kialakított szelvény szélesség 380 m volt.

- Dunaremetén szintén volt egy tervezett szélesség, ami 400 m volt és ez arra a szakaszra körülbelül 325 m szélesre valósult meg. A tervezett szélességet azért kellett leredukálni, mert a túl széles kialakítás alacsonyabb fajlagos hordalékszállító kapacitása nem volt képes a felvízről érkező hordalék tovaszállítására, ezért annak egy része lerakódott. Természetes körülmények között is megfigyelhető ez a jelenség, ami végső soron gázlós szakasz kialakulásához vezet. A folyószabályozások előtti időszakban az ilyen folyószakaszokat keresték a túlpárt eléréséhez.

A modellezési feladatomhoz a mederkitöltő vízálláshoz tartozó mederszélesség értékét kellett meghatároznom, amit csak Dunaremetére tudtam megtenni. A 27 évre vonatkozóan a mederszélességben nem tapasztaltam érdemi változást, ezért azt nagy megbízhatósággal 300 m-re becsültem. Ezt az adatot a mederszelvényről olvastam le, a mederkitöltő állapotnál.

➤ Esés

A szabályozás előtt Passau-Dévény között 25-45 cm/km és Szap alatt km-enként 15-20 cm-es esés volt tapasztalható. Az ezt követő időszakra a következő összefüggéseket találtam:

„Szap vízszin esésében jellegzetes esés található. Szap felett a vízszin esése 25-35 cm/km rövid szakaszokon előfordulhat 45-50 cm/km is. Szap alatt rövid átmeneti szakaszon 12-15 cm/km tapasztalható, de Gönyűtől lefelé 8-10 cm/km.

Oroszvár-Bős között az átlagos esés 357 mm/km.”

Ezeket az értékeket az adott szelvényre ugyan csak becsülni tudjuk, viszont egészen közelítő adatokat tudunk így is meghatározni.

## 2.2 Görgetett hordalék

### ➤ Mennyiség

Erre az adatra/adatsorra azért is van szükségünk, mert intenzívebb áramlás mellett a folyó a medrét rombolja, vagyis medereróziót okoz. Ezáltal a medergeometriát is alakítja. Ezután a víz kisebb energiával ezeket a szemcséket hordja addig, amíg el nem éri az alsó szakaszt, ahol lerakja a hordalékát. A hordalékhozamot összefüggésbe tudjuk hozni a víz mélységével, a víztükör szélességgel, medereséssel és a szemcseátmérővel is.

Túlságosan visszamenőleg nem tudunk mérési eredményeket felmutatni, mert a hordalékhozam mérése nagyon összetett és körülményes munka. Napjainkban ezt már jóval nagyobb pontossággal tudjuk meghatározni, de régebben csak megközelítő adatokkal tudtak inkább szolgálni (*Forrás: Csiti, 2018*).

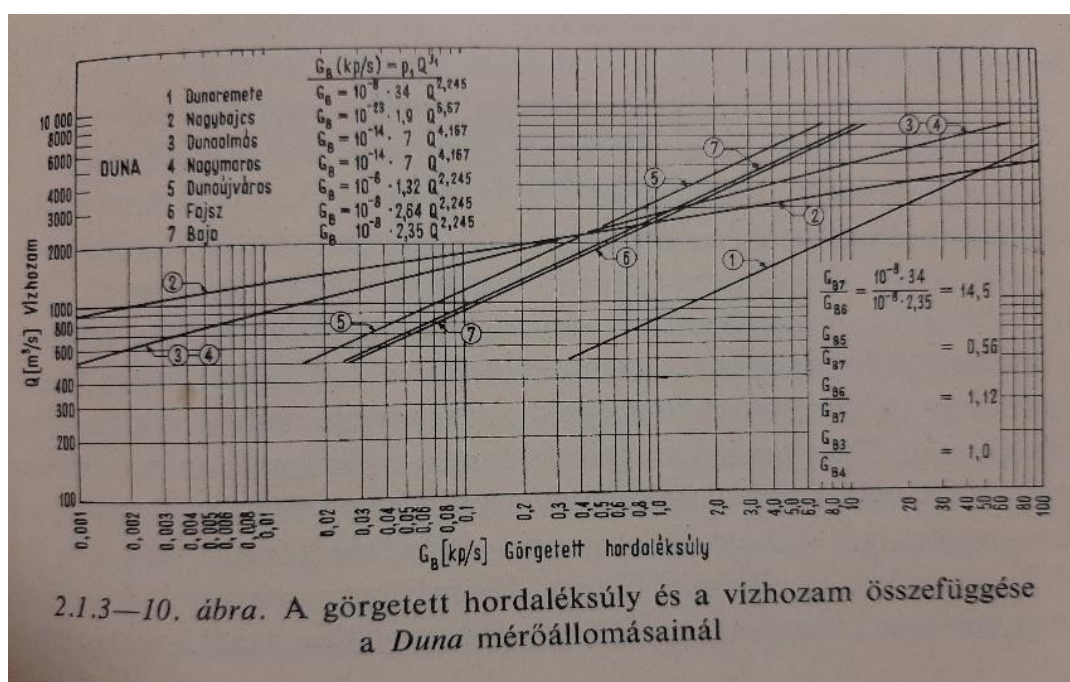
„A Duna és szabályozása” című könyvben megtalálható, hogy a szabályozás előtt az egy egész évre vonatkoztatott görgetett hordaléktömeg, miszerint egy év alatt 1180 000 t görgetett hordalék folyik le a Felső- Dunán. Ez átszámítva átlagosan 37,4 kg/s hordalékot jelent. Az Évkönyvekben megtalálható 1931/40-re, valamint 1966-tól 1976-ig éves átlagos hordalékhozam, a Duna legtöbb állomására vonatkozóan. Kivételt képez Nagybajcs az 1967-1969-es időszakot illetően.

A méréseket illetően fontos megemlíteni, hogy a magyarországi Felső-Dunán végzett görgetett hordalékméréseket az éppen arra a szakaszra jellemző hordalék- és áramlási viszonyokra kifejlesztett görgetett hordalékfogó eszközzel végezték. A mérőműszer Károlyi Zoltánról kapta a nevét, aki az 1940-es évektől rengeteg laboratóriumi és terepi mérést végzett (Károlyi, 1947). Az eredeti, közel 90 kg-os hordalékfogót tapasztalatai alapján folyamatosan fejlesztette. A 12. ábrán látható Bogárdi János könyvében publikált vízhozam-görgetett hordalékhozam jelleggörbék is ezzel a legkorszerűbbnek tekinthető műszerrel mért adatok alapján lettek meghatározva. A Vízrajzi Évkönyvekben publikált éves hordalékmennyiség meghatározását feltehetően ezek segítségével határozták meg. A továbbiakban a Bogárdi János és Károlyi Zoltán fémjelezte mérési és adatfeldolgozási eljárás által meghatározott hordalékmennyiségeket tartom irányadónak, a továbbiakban azokat tekintetem megbízható adatoknak.

A következő képen az 1975. évi Vízrajzi évkönyv egyik táblázatát mutatnám be, ami a leírtakra ad példát:

Sor- szám	Víz- folyás	Az állomás, mérési hely		A rendszeres mérések		Az 1931/40 évekre Az 1975 évre vonatkozó közepes					Az eddigi Az 1975 évi LNV-nek megfelelő			
		helység- neve	távolsága a torko- lattól km	kezdeti év, hó nap	s z á m a		hord.tö- ménység g/m <sup>2</sup>	lebegtetett		görgetett		hord.tö- ménység g/m <sup>2</sup>	lebegtetett	görgetett
					1974 év vé- géig	1975 év- ben		hordalékmenyiség						
								kg/s	1000 g <sup>2</sup> / év	kg/s	1000 g <sup>2</sup> / év			
1	Duna	Dunaremete	1825,3	1952. 9.18	151	-	40 80	76 190	1387 3331	5,9 21,5	103 377	3200 484	14000 4800	60 4400
2	Duna	Nagybajcs	1802,3	1952.10.16	59	-	60 107	180 262	3210 4590	0,7 4,11	12 72	498	3950	2050

11. ábra: 1975.évi Vízirajzi Évkönyv Hordalékhozam táblázata (Forrás: 1975. évi Vízirajzi Évkönyv)



12. ábra: Görgetett hordaléksúly és a Vízhozam összefüggése (Forrás Bogárdi, 1955)

A fenti ábráról leolvasható a dunaremetei (1-es egyenlet) és nagybajcsi (2-es egyenlet) szelvényre felállított vízhozam – görgetett hordalékhozam  $Q - Q_b$  összefüggések, amik a következők:

$$\text{Dunaremete: } Q_b = 10^{-8} 34 Q^{2,245} \text{ [kg/s]} \quad (1)$$

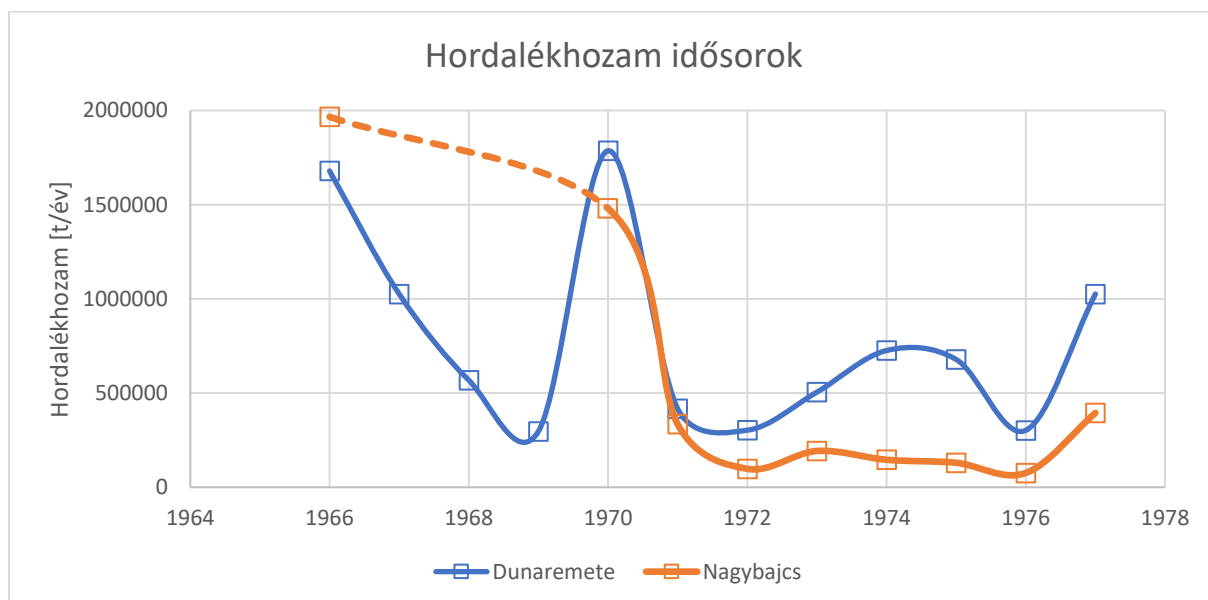
$$\text{Nagybajcs: } Q_b = 10^{-23} 1,9 Q^{6,67} \text{ [kg/s]} \quad (2)$$

➤ Idősor

A hordalékhozam adatokat Nagybjacsra is és Dunaremetére is idősorba állítottam.

1. táblázat: Vízrajzi évkönyvek hordalékhozam adatai (Forrás: 1955-1977. évi Vízrajzi Évkönyvek)

ÉV	Dunaremete		Nagybjacs	
	Hordalékhozam			
	Görgetett		Görgetett	
	kg/s	1000 m3/év	kg/s	1000 m3/év
<b>1931/40 évi</b>	<b>5,9</b>	<b>103</b>	<b>0,7</b>	<b>12</b>
1966. évi	53,2	932	62,3	1091
1967. évi	32,5	569	-	-
1968. évi	18	316	-	-
1969. évi	9,4	164	-	-
1970. évi	56,6	991	46,9	821
1971. évi	13,2	231	10,6	186
1972. évi	9,6	168	3,1	54,2
1973. évi	16	281	6,1	50
1974. évi	23	403	4,62	81
1975. évi	21,5	377	4,11	72
1976. évi	9,57	168	2,4	42
1977. évi	32,5	570,2	12,5	218

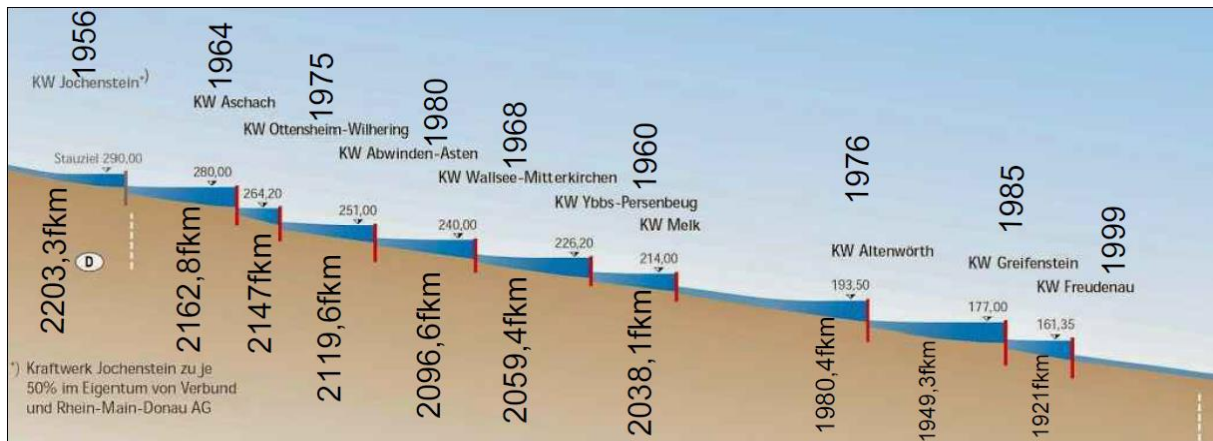


13. ábra: Dunaremete és Nagybjacs éves hordalékhozamai

Főként a Dunaremetei diagramomban látszik hirtelen nagy változás (kiugrás) a hordalékhozam trendjében, 1970-es éveknél (Nagybjacs esetében a megelőző 3 évből nem áll rendelkezésre

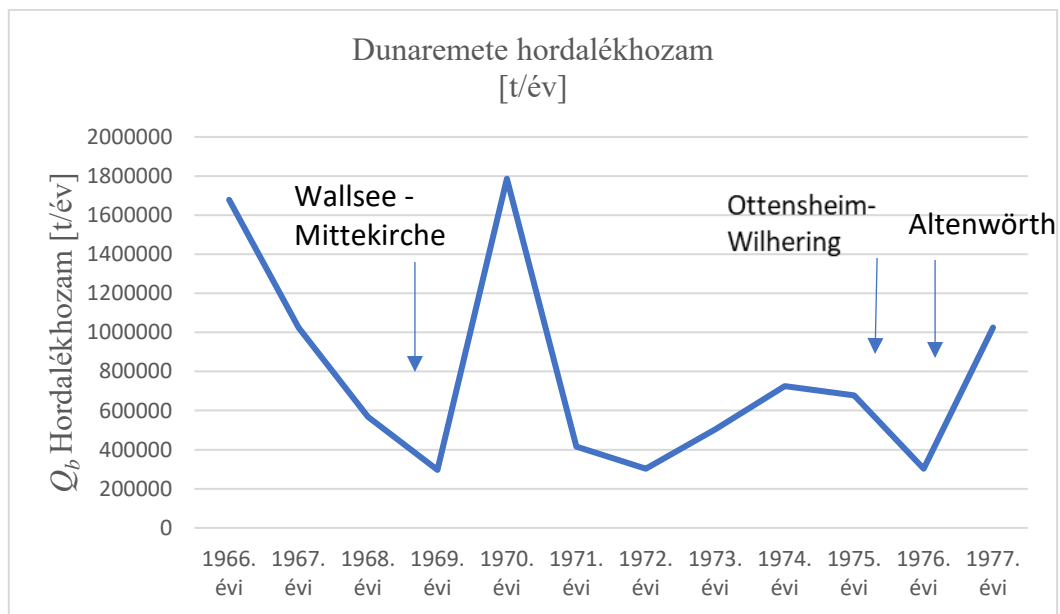


adat). Kérdéseket vet fel, hogy vajon mi az oka ennek a hirtelen nagy változásnak? Mint tudjuk, a vizsgált szakasz felvívén, Ausztriában a Dunán több vízlépcső is található. A 14. ábrán mutatom be a telepítésük évét meg azt is, hogy milyen folyamkilométeren [fkm] helyezkednek el.



14. ábra: Osztrák vízlépcsők telepítései (Forrás: Österreichische Wasserrettung, honlap, 2020)

Azt találtam, hogy a vizsgált időszakra három vízlépcső telepítése esik, amik hatással lehetnek az alvízi, vagyis dunaremetei és nagybajcsi hordalékmenyiségre. Az alábbi ábrán a három vízlépcső telepítési idejét jelöltem a hordalékhozam-idősoron.



15. ábra: Vízlépcsők telepítésének szemléltetése a hordalékhozam diagramon

Az idősor alapján azt látom, hogy a vízlépcsők telepítését követő években nem volt tapasztalható trendszerű csökkenés a hordalékhozamban. Sőt, ennek inkább ellenkezője látható Wallsee-Mitterkirche és Altenwörth esetében. Ez azt sejteti, hogy az idősorban látható hirtelen változások nem a felvízi vízlépcsők telepítése okozta. Azonban az is kérdéses, hogy a

vízlépcsők hordalékviszatarító hatása milyen mértékben és milyen késleltetéssel jelenhet meg a vizsgált alvízi szelvényben. Ez a hatás feltehetően szoros összefüggésben áll a távolságokkal. A bemutatott vízlépcsők a következő távolságra vannak Dunaremetétől:

- Wallsee – Mitterkirche: 231,15 km
- Ottensheim – Wilhering: 318,75 km
- Altenwörth: 152,15 km

A távolságok alapján nem tartom reálisnak, hogy a vízlépcsők hatásával lehetne magyarázni az 1970-es kiugró értéket és az általa megváltoztatott trendet. Azt tudom feltételezni, hogy a hordalékhozamnál ez a kiugró érték mérési hiba eredménye lehet. Az 1970-es évi kiugró értéket figyelmen kívül hagyva azt látom mindkét időszorban, hogy a hordalékhozam az 1970-es évekig jelentős csökkenést mutatnak, majd az ezt követő időszakban lassú növekedő trendet rajzolnak ki. Az 1970-es kiugrás és az utána tapasztalható lassú emelkedésre se tudunk biztos magyarázatot adni.

A számolásomban a kiugró érték okozta bizonytalanság, valamint a trendváltások miatt a vizsgált időszakot a hordalékhozamok átlagával jellemzem. Ez Dunaremeténél 730607 t/év, 4838723 t/év átlagos görgetett hordalékterhelést jelent.

## 2.3 Szemcseméret

### ➤ Szelvényekhez tartozó szemcseméret

Dunaremetéhez átlagos és közepes szemátmérő is fellelhető a *Vízfolyások hordalékszállítás* című könyvben. Ezek a következők:

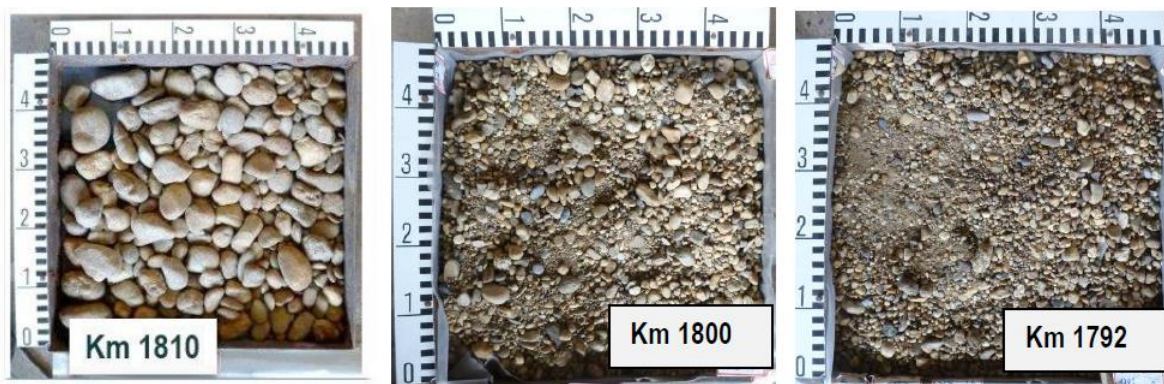
- ❖ Átlagos szemátmérő: 18,29 mm
- ❖ Közepes szemátmérő: 16,10 mm
- ❖ Maximális szemátmérő: 30,3 mm
- ❖ Minimális szemátmérő: 4,15 mm

Hazai viszonylatban általában  $D_{max}=100$  mm-t választunk meg. A Duna legdurvább hordaléknagysága 70-100 mm és az átlagos pedig 10-20 mm.

Nagybajeshoz a könyv táblázatából kiszedett információk a következők:

- ❖ Minimális szemátmérő: 0,20 mm
- ❖ Leggyakoribb szemátmérő: 7,50 mm
- ❖ Maximális szemátmérő: 14,7 mm

Természetesen ezek az értékek mind a görgetett hordalék szemnagyságnak értendők. A következő ábrán szeretném érzékeltetni az egyes szakaszokra jellemző szemcseméretetek közötti különbségeket, 20 km-en belül.



16. ábra: Aprózódás szemléltetése különböző szakaszokon (Forrás: DuRe Flood project 2015)

➤ Aprózódás, szelektív lerakódás

„A Felső- Dunán – méréseink szerint - az 1855fkm-nél (Oroszvár) mozgó hordalék átlagos átmérője 32 mm, amíg az 1806 fkm-nél (Medve) 9 mm volt. Nem valószínű, hogy a szemnagyság ez a nagymérvű csökkenése 49 km-nyi úton egyedül csak a kopás útján következett volna be.” Ezt a felvezetést különféle számítások követték a Vízfolyások hordalékszállítása c. könyvben, több módszert alkalmazva viszont a végső konklúzió a következő:

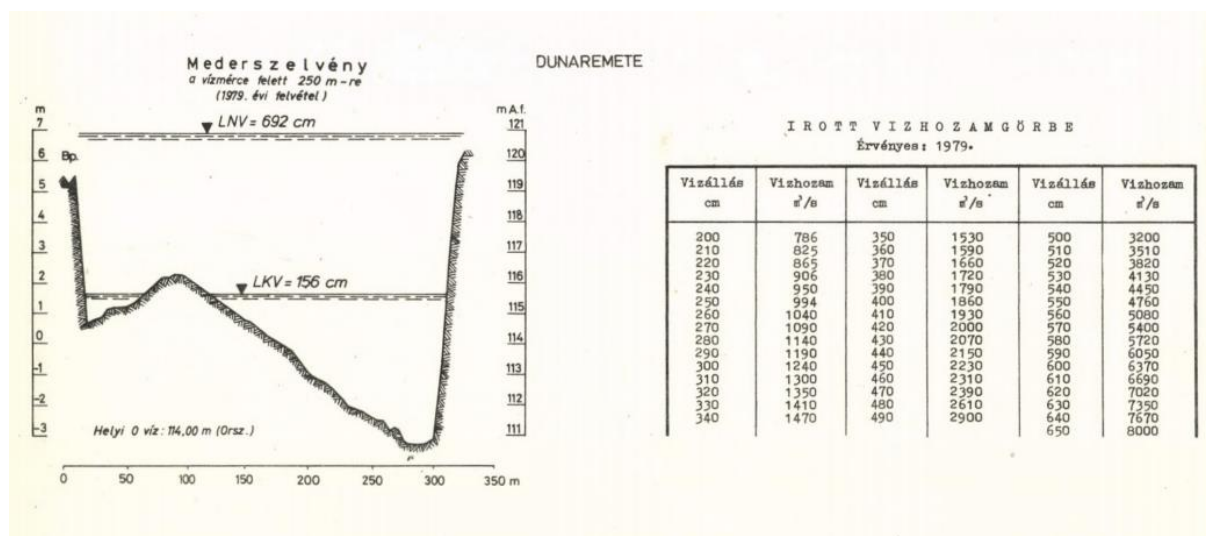
„Mindkét összefüggés tehát azt bizonyítja, hogy közepes keménységű mozgó hordalék 32 mm szemátmérőjének 49 km-es úton 9 mm-re való csökkenése nem lehet csak a kopás következménye.”

„Az újabb vizsgálatoknál elsősorban a kiválasztódási folyamatot zárják ki a kopás fogalmából, de megkülönböztetik a szakaszos kisebbedést (széttöredezést, mállást) is a fokozatos kisebbedéstől, a tulajdonképpeni kopástól és csiszolódástól.”

## 2.4 Vízrajz

A dolgozatomban elsősorban morfológiai paraméterek áttekintésére összpontosítottam. A vizsgálataimhoz azonban szükségem volt hidrológiai adatokra is. Nevezetesen a mederkitöltő állapothoz tartozó vízhozamra. Erre vonatkozóan Dunaremetére találtam az ottani vízmérce  $Q-H$  görbéjének összetartozó adatpárjait, az 1980.évi Vízrajzi Évkönyvből. A mederkitöltő állapotot a mederszelvény alapján 520-530 cm-re becsülöm, amihez megközelítőleg  $4100 \text{ m}^3/\text{s}$ -os mederkitöltő vízhozam tartozik. Ez az érték jól közelíti a 1886 fkm-énél (Bad Deutsch-

Altenburg, felvív), valamint a nagybajcsi szelvényre (alvíz), napjainkban jellemző értékeket (Liedermann et al., 2017 és ÉDUVIZIG, 2014), amik 4000 és 4500 m<sup>3</sup>/s közötti értékek.



17. ábra: Dunaremete 1979-es mederfelvétel és a vízálláshoz tartozó vízhozamai (Forrás: 1980. évi Vízügyi Évkönyv)

### 3. Szakirodalmi következtetések

Amennyiben megnézzük, hogy Nagybajcson mennyi hordalék vonul le egy év alatt és mennyi vonul le Dunaremetén, nem találunk egyezőséget. Ha a dinamikus egyensúly fennállna, akkor ez a két hozam egyező lenne, de itt nagy eltérésekről beszélünk. Ez alapján arra a következtetésre jutunk, hogy a Bogárdi által vizsgált, az 1950 és 1970 közötti időszakban nem áll fenn dinamikus egyensúly és ezt az irodalomkutatásom alá is támasztja. Továbbá, erre utal a hordalékprózódásról talált okfejtés is, aminek konklúziója, hogy a vizsgált szakaszon jelentős a hordaléklerakódás.

A Dunaremete és Nagybajcs közötti szakaszon a szemcsék kopását saját számításokkal is vizsgálok. A vizsgált szakasz 1828,25 fkm-nél (Dunaremete) kezdődik, ahol a hordalék átlagos átmérője 1,829 cm. A vége 1801,0 fkm (Nagybajcs), ahol az átlagos átmérő 0,75 cm. Mint láthatjuk, jelentős különbség van a két érték között. Azt szerettem volna megvizsgálni, hogy valószínű-e, hogy ezen a 27 km-nyi úton csak kopás okozza ezt a jelentős méretcsökkenést. Számolásomban bemutatom, hogy milyen szemcseátmérő csökkenés következne be átlagos kopásintenzitás (kopási együttható) mellett, illetve a valóságos csökkenést milyen kopási intenzitás váltaná ki a valóságban.

A hordalék fajsúlyát 2,60 g/cm<sup>3</sup> veszem fel, a 1,829 cm átmérőjű hordalék kezdeti súlya (G'<sub>0</sub>):

$$G'_0 = \frac{\pi \cdot 1,829^3}{6} \cdot 2,6 = 8,33g \quad (3)$$



A 27 km út utáni koptatással csökkent súly pedig:

$$G'_0 = \frac{\pi \cdot 0,75^3}{6} * 2,60 = 0,57g \quad (4)$$

A Düll-féle kopási törvény szerint (*Forrás*: Bogárdi, 1955):

$$G' = (G'_0{}^{0,45} - 0,45 * k * s)^{1/0,45} \quad (5)$$

Ha a kopási együttható  $k = 0,031$  középértékkel számolunk:

$$G' = (8,33^{0,45} - 0,45 * 0,031 * 27)^{1/0,45} = 5,88g \quad (6)$$

Tehát ez azt mutatja meg, hogy 8,33 g súlyú hordalékszemnek 27 km után még mindig 5,88 g súlyúnak kellene lennie a valóságosan észlelt 0,57 g súllyal szemben. Számolásom szerint az 5,88 g súlyú és  $2,60 \text{ g/cm}^3$  fajsúlyú hordalék átmérője 1,63 cm-nek kellene lennie.

A valóságos súlycsökkenés kopási együtthatója:

$$k = \frac{1}{0,45 * 27} * (8,33^{0,45} - 0,57^{0,45}) = 0,1497 \quad (7)$$

Düll kísérleteinél, mint legnagyobb kopási együttható  $k = 0,044$  értéket észlelte (*Forrás*: Bogárdi, 1955). A kapott értéket emiatt valószínűtlenül nagynak ítélem meg.

Ugyanez a tapasztalat, ha másik összefüggést használunk. Nézzük meg Schoklitsch összefüggését miszerint (*Forrás*: Bogárdi, 1955):

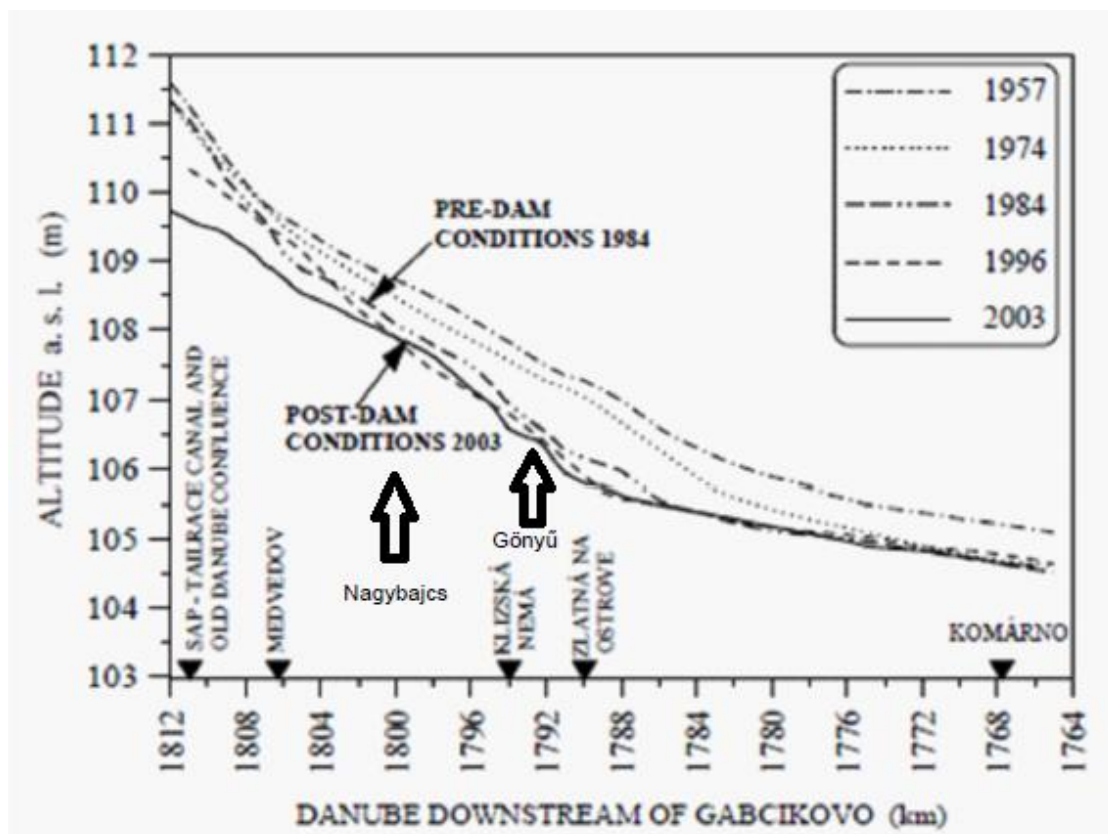
$$G' = G'_0 * e^{-c*s} \quad (8)$$

Ahol a  $c$  a fajlagos kopás és az  $s$  az utat jelenti méterben, és  $e$  a természetes logaritmus alapszáma.

A fajlagos kopás közepes értékét veszem fel, ami  $c = 0,00001$ .

$$G' = 8,33 * e^{-0,00001 * 27000} = 6,26g \quad (9)$$

A kapott érték közelítőleg annyi, mint a Düll-féle törvény alapján. Mindkét összefüggés azt bizonyítja, hogy a közepes keménységű mozgó hordalék 27 km után csak kopás útján nem csökkenhet le 1,829 cm-ről 0,75 cm-re. Mindez arra utal, hogy a tapasztalt méretcsökkenés csak akkor jöhet létre, ha a folyó a hordalékát fokozatosan lerakja. A csökkenés azért jön létre, mert a folyó esése ezen a szakasán hirtelen csökken le. Az alábbi ábrán látható a folyamkilométer függvényében a főmeder szintje, különböző években.



18. ábra: Duna hosszszelvény ábrázolása (Forrás: Holublová et al., 2004)

Az esést illetően az olvasható le, hogy az 40 km alatt jelentősen lecsökken: az osztrák szakaszon akár 40 cm/km-es érték Gönyű alatt már alig éri el a 8 cm/km-et. Ennek szoros következménye, hogy a folyó hordalékszállító kapacitása is gyors csökkenést mutat, ami végső soron hordaléklerakódást eredményez. A nagyobb szemcse mozgathatóságához több energiára van szükség. Éppen ezért, a folyó energiájának csökkenésével először a legnagyobb szemcsék ülepednek ki, majd fokozatosan a kisebbek. Tulajdonképpen ezt a jelenséget nevezzük szelektív lerakódásnak.

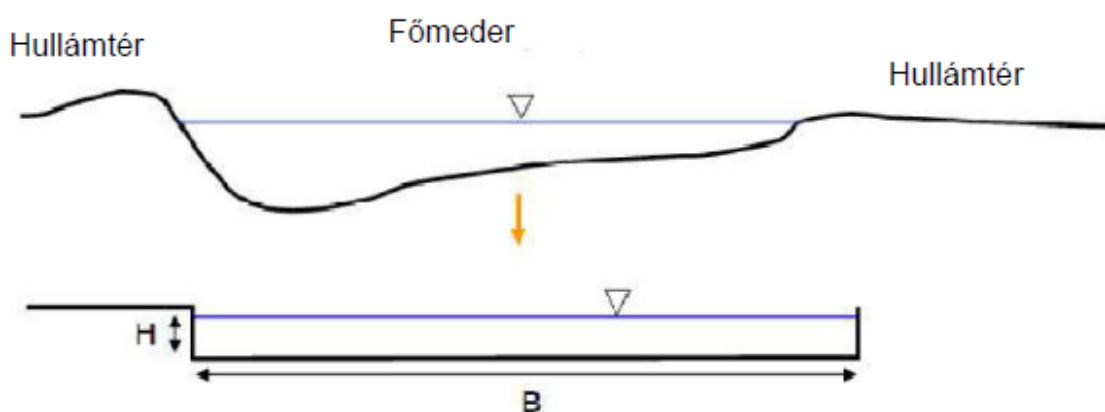
A szakaszok közötti lerakódás azt eredményezi, hogy a meder elkezd tölteni. Ezek következtében dinamikus egyensúlyi állapotról nem beszélhetünk.

#### 4. Modellalkotás

A folyószakasz dinamikus egyensúlyi állapotát egy úgynevezett 0D modell segítségével szándékoztam vizsgálni. A modellépítésnél alkalmazott megközelítést és egyszerűsítéseket Parker online jegyzetei alapján tettem meg (Parker, 2004). A 0D modell nem más, mint hogy a valós medergeometriát egy téglalap alakú szelvényvel közelítem, melyet egy magassággal ( $H$ ) és egy szélesség értékkel ( $B$ ) jellemzek. A folyómeder prizmatikus, valamint

az áramlást permanensnek és egyenletesnek írom le (vagyis a Chézy képlet alkalmazási feltételeit veszem át), ami feltételekből az alábbiak következnek:

- állandó nedvesített szelvényterület ( $A = \text{áll.}$ ),
- egyenletes fenékesés ( $S = \text{áll.}$ ),
- konstans vízhozam ( $Q = \text{áll.}$ ),
- vízfelszín a fenékkal párhuzamos  $\rightarrow$  konstans vízmélység folyásirányban is ( $H = \text{áll.}$ )
- konstans szelvény-középsébség ( $U = \text{áll.}$ )
- konstans mederérdesség ( $Cz = \text{áll.}$ ).

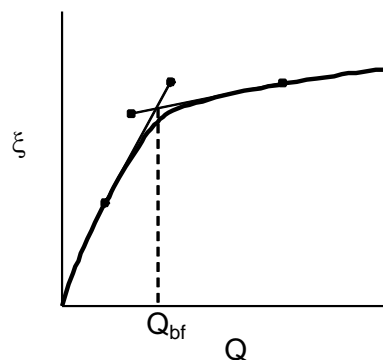


19. ábra: A 0D modell mederfeltételezésének szemléltetése (Forrás: Parker, 2004)

A permanens jelleg a hordalékmozgásra is igaz, vagyis:

- konstans a hordalékhozam ( $Q_b = \text{áll.}$ ),
- állandó a szemcseméret ( $D = \text{áll.}$ ).

Számolásomban további közelítés, hogy a valós, nempermanens áramlás és hordalékmozgás morfordinamikai hatása egy évre vonatkozóan a mederkitöltő állapottal jellemezhető. Az alábbiakban ismertetem, hogy ez a megközelítés milyen megfontolások alapján tehető meg.



20. ábra: Megközelítéshez hasznosított sematikus ábra (Forrás: Parker, 2004)

A 20. sematikus ábrán  $\xi$  jelöli a vízállást a vízhozam függvényében. Általánosságban az tapasztalható, hogy  $\xi$  általában növekszik a  $Q$  növekedésével. Látható, hogy a mederkitöltő állapotig (angolul *bankfull*, rövidítése *bf*) rohamosan nő, viszont mikor kilép a mederből a víz, onnantól egy jelentősen laposabb görbét láthatunk. Ebből az is következtethető, hogy a folyó hordalékszállító kapacitása (energiája) is hasonló jelleget mutat. A görbén látható törés jelöli ki ezt a mederkitöltő állapotot. A mederkitöltő állapot tehát a teljes vízjárási skála (és a nagyobb hordalékmozgású tartomány) egy markáns és szabatosan jellemezhető pontja.

A mederkitöltő állapot geometriai jellemzői a mederkitöltő vízhozam ( $Q_{bf}$ ), vízmélység ( $H_{bf}$ ), mederszélesség ( $B_{bf}$ ) és esés ( $S$ ), de hasonlóképpen morfodinamikai paraméterekkel is jellemezhető, mint pl. a hordalékhozammal ( $Q_b$ ). A mederkitöltő állapot alapú morfodinamikai vizsgálat egy feltétele a hordalékmenyiség éves mérlegének megléte. Vagyis az ún. periodicitás (angolul *intermittency*, rövidítése  $I$ ) helyes felvétele. A periodicitás azt mutatja meg, hogy a mederkitöltő vízhozamnak az év mekkora részében ( $0 \leq I \leq 1$ ) kell jelen lennie ahhoz, hogy az a valós (mért) éves hordalékmenyiséget szállítsa. Az év hátralevő részében ( $1 - I$ ) elhanyagolhatóan kicsi hordalékmozgást feltételezünk. Ezt a feltételt kielégítve azt várhatjuk, hogy a mederkitöltő vízhozam alapú vizsgálattal a dinamikus egyensúlyi állapot közelíthető (Parker, 2004).

## 4.1 Alapegyenletek

Az alapegyenletek összefüggéseit angol tanulmányokra támaszkodva határoztam meg. Azokban az itt bemutatott egyenletek 1D (vagyis folyásirányban változó paraméterezésű) modell alapegyenleteit adják, de azok ki vannak bővítve további egyenletekkel. Hazai vonatkozásban eddig nem talákoztam ezeken az alapegyenleteken alapuló 0D, vagy 1D modellekkel.

Ezúton szeretném bemutatni a számolásom menetét. A vizsgálataimhoz alkalmazandó modell az anyag és energiamegmaradás törvények alapján írható fel (pl. Eke et al., 2014; Naito és Parker, 2019).

- Folyadékra vonatkozó folytonossági egyenlet:

$$Q_w = UHB, \text{ ahol} \quad (10)$$

$Q$  a folyó vízhozama [ $\text{m}^3/\text{s}$ ],  $U$  a szelvény-középsébség [ $\text{m}/\text{s}$ ],  $B$  a szelvény szélessége [ $\text{m}$ ] és  $H$  a vízmélység, vagy medermélység [ $\text{m}$ ].



- Impulzus egyenlet:

$$\left(\frac{\tau_b}{\rho}\right) C_f U^2 = gHS, \text{ ahol} \quad (11)$$

$\tau_b$  a fenék-csúsztatófeszültség [ $\text{N/m}^2$ ],  $\rho$  a víz sűrűsége ( $1000 \text{ kg/m}^3$ ),  $C_f$  a dimenziómentes mederellenállási tényező,  $g$  a nehézségi gyorsulás ( $9,81 \text{ m/s}^2$ ) és  $S$  a meder esése [-].

- Hordalékra vonatkozó folytonossági egyenlet:

$$Q_b = Bq_b(R + 1)t, \text{ ahol} \quad (12)$$

$Q_b$  a hordalékhozam [ $\text{kg/s}$ ],  $q_b$  a fajlagos hordalékhozam [ $\text{kg/sm}$ ],  $R$  a hordalék víz alatti súlya ( $R = \rho_S/\rho - 1 = 1,65$ , ahol  $\rho_S$  a hordalék sűrűsége,  $2650 \text{ kg/m}^3$ ) és  $t$  az eltelt idő [ $\text{s}$ ].

➤ Hordalékhozam számítása

A fajlagos hordalékhozamot az alábbi összefüggéssel számítjuk:

$$q_b = q_b^* \sqrt{RgDD}, \text{ ahol} \quad (13)$$

$q_b^*$  a dimenziómentes fajlagos hordalékhozam. Számítására számos hordaléktranszport modellt publikáltak. A szakirodalomban megtalálható összefüggéseket terepi, illetve laboratóriumi mérések alapján dolgozták ki, vagyis tapasztalati összefüggésekről beszélünk. A legfontosabb különbség közöttük, hogy eltérő szemcseméretre javasolják őket. A modernnek mondott hordaléktranszport modellek ismérve, hogy az ún. dimenziómentes fenék-csúsztatófeszültség ( $\tau_b^*$ ) és kritikus fenék-csúsztatófeszültség ( $\tau_c^*$ ) függvényében becsülik a dimenziómentes hordalékhozamot. Az első ilyen modernnek mondott modell a Meyer-Peter és Müller (MPM) összefüggése (Forrás: Wong és Parker, 2006). A modellt kavics méretű görgetett hordalékra dolgozták ki csatornamérések alapján. A modell kidolgozása mért adatok elemzésén alapul, amiben Wong és Parker hibát talált és megalkották a MPM összefüggésének javításaként is ismerté vált modelljüket. Az összefüggés validációját a 3,21 mm – 28,65 mm-es szemcseméret tartományra végezték el (Wong és Parker, 2006). A modellt az alábbi összefüggés adja:

$$q_b^* = 3,97 * (\tau^* - \tau_c^*) \quad ; \quad \tau_c^* = 0,0495 \quad (14)$$

A szakirodalmi vizsgálatok alapján a rendelkezésre álló, egy frakciót feltételező modellek közül a Wong és Parker modell a legmegbízhatóbb modellként van számon tartva, ezért én is ezt a modellt használtam. Hangsúlyozom azonban, hogy valójában a vizsgált folyószakasz vegyes szemösszetételű, vagyis egy vegyes szemösszetételre kidolgozott összefüggéstől még nagyobb

megbízhatóság és pontosság lenne elvárható. Vegyes szemösszetételű modellalkalmazásra azonban TDK dolgozatomban nem tudtam sort keríteni; az idő szűkössége, valamint a történelmi adatok mederanyagminták tekintetében való hiányos volta miatt.

A dimenziómentes csúsztatófeszültséget az alábbi összefüggéssel számíthatjuk:

$$\tau^* = \frac{\tau_b}{\rho g R D} = \frac{HS}{RD}, \text{ ahol} \quad (15)$$

$\tau^*$  a dimenziómentes csúsztatófeszültség. A (13), (14) és (15) egyenletek alapján az (12) egyenletben szereplő  $q_b$  fajlagos hordalékhozam kifejezhető oly módon, hogy új ismeretlen nem lép fel. A (10), (11) és (12) egyenletek alkotta egyenletek (15)-tel kiegészülve egyenletrendszert alkotnak. A 0D modell alatt ezt az egyenletrendszert értem úgy, hogy a változók mindegyike a mederkitöltő állapotra vonatkozik. Ahhoz, hogy az egyenletrendszer határozott legyen (pontosan egy megoldása legyen) négy ismeretlent kell tartalmaznia. Az adott probléma határozza meg, hogy éppen mik az ismert paraméterek és azok függvényében számíthatók az ismeretlenek. Vizsgálataim kapcsán azonban az elmondható, hogy mivel a mederkitöltő állapotra vonatkozó mederközépsébségre ( $U$ ), vízmélységre ( $H$ ) és jellemzően a dimenziómentes csúsztatófeszültségre ( $\tau^*$ ) vonatkozóan nem állt rendelkezésemre adat, azok mindig az ismeretlenek halmazát alkották és már csak egy további ismeretlent tudtam becsülni (ez jellemzően az  $S$  esés volt).

A modell ugyanilyen módon alkalmazható más hordaléktranszport modellel. Ekkor csak (14)-es egyenlet változik. További, kavicsra kidolgozott ismertebb hordaléktranszport modellek egyenleteit mutatom be a Függelékben.

➤ Alapegyenletek kibővítése szabadfolyású állapot esetére

A (15) egyenlet definiálja a dimenziómentes csúsztatófeszültséget. Ez, a *Modellalkotás* c. fejezet bevezetőjében ismertetett megközelítés esetén:

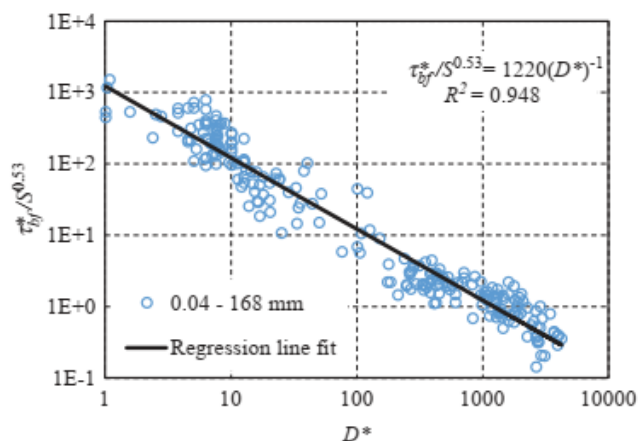
- adott szelvényre jellemző,
- szelvény menti átlagos,
- mederkitöltő állapothoz és
- a dinamikus egyensúlyi állapothoz tartozó dimenziómentes feszültséget jelenti.

Több kutatómunka is foglalkozott már szabadfolyású medrek dinamikus egyensúlyi állapotához tartozó morfodinamikai paraméterek közötti kapcsolat vizsgálatával (*Forrás:*

Garcia, 2008). Li et al 230 folyószakaszt vizsgált, amik a morfordinamikai paraméterek széles skáláját fedik le:

- $0,34 \text{ m}^3/\text{s} < Q_{bf} < 216340 \text{ m}^3/\text{s}$ ,
- $2,3 \text{ m} < B_{bf} < 3400 \text{ m}$ ,
- $0,22 \text{ m} < H_{bf} < 48,1 \text{ m}$ ,
- $0,0000088 < S < 0,52$ ,
- $0,04 \text{ mm} < D < 168 \text{ mm}$ .

Az adatok elemzése alapján megállapították, hogy szabadfolyású medrek esetén erős korreláció tapasztalható a mederkitöltő állapothoz tartozó dimenziómentes csúsztatófeszültség ( $\tau_{bf}^*$ ), dimenziómentes szemcseméret ( $D^* = \frac{(Rg)^{1/3}}{\nu^{2/3}} D$ , ahol  $\nu$  a folyadék kinematikai viszkozitása, értéke  $10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ) és mederesés ( $S$ ) között. Ezt az alábbi ábra szemlélteti.



21. ábra: Szabadfolyású medrek csúsztatófeszültség- szemcseméret diagramja (Forrás: Li et al., 2014)

A vizsgált paraméterek között feltárt összefüggés:

$$\tau_{bf}^* = 1220(D^*)^{-1}S^{0,53}. \quad (16)$$

A már korábban ismertetett egyenletrendszer a (16) egyenlettel kiegészítve öt egyenletre bővül. Ennek következménye, hogy az egyenletrendszerrel becsülhető ismeretlenek száma eggyel bővül, vagyis öt ismeretlent tudunk becsülni vele. Így például a  $B$  mederszélesség sem kell, hogy ismert paraméter legyen, hanem az is számíthatóvá válik a kibővített egyenletrendszerből. Az így felállított, vagyis szabadfolyású folyó szélességének becslésére alkalmas modell publikálására külföldi irodalomban sem találtam példát.

Az összefüggés azonban csak szabadfolyású medrek esetében igaz. A vizsgált Felső-Duna szakasz a 19. század végére szabályozottá vált, partbiztosítást kapott, ezért a szabályozás utáni állapotára az egyenlet nem alkalmazható.

## 4.2 Modellparaméterezés

A modell paraméterezését elsősorban az irodalomkutatásomra támaszkodva végeztem el. Azoknál a paramétereknél, amikre nem találtam valós, mért értéket, különböző becslési eljárásokat alkalmaztam.

### ➤ Szakirodalmi adatok

Először táblázatosan azokat a paramétereket mutatom be, amikre találtam valós adatot a szakirodalomban.

2. táblázat: Összefoglaló táblázat a talált adatokhoz

		Dunaremete	Nagybajcs	Megjegyzés
Mederkitöltő vízhozam, $Q_{bf}$	[m <sup>3</sup> /s]	4100	4100	
Mederszélesség, $B_{bf}$	[m]	300	420 380 250	tervezett megvalósított sarkantyúval szűkített
Mederesés, $S$	[cm/km]	25 - 35	12 - 15 < 12	szabályozás után sarkantyúval szűkített
Éves hordalékhozam, $Q_b$ , éves	[t/év]	730607	483872	
Mederkitöltő hordalékhozam, $Q_b$	[kg/s]	43.9	23.8	(1) és (2) egyenletek
Hordalék szemcseméret, $D$	[mm]	18.0	7.5	

A következő paraméterekre nem találtam pontos adatot az irodalomkutatásom során, ezért azok értékeit különböző becslő eljárásokkal közelítettem.

### ➤ Dimenziómentes mederellenállási tényező ( $C_f$ )

Értékét Parker 1991-ben publikált összefüggése alapján becsültem (Forrás: Parker, 1991). Az összefüggés a következő:

$$C_z = 8,1 \left( \frac{r_b}{k_s} \right)^{1/6}, \text{ ahol} \quad (17)$$



$C_z$  a dimenziómentes Chézy ellenállási tényező,  $r_b$  a hidraulikus sugár és  $k_s$  az érdességmagasság. A dimenziómentes mederellenállási tényező ( $C_f$ ) és a dimenziómentes Chézy ellenállási tényező ( $C_z$ ) között az alábbi egyenlet teremt kapcsolatot:

$$C_z = C_f^{-1/2}. \quad (18)$$

A hidraulikus sugarat ( $r_b$ ) a vízmélységgel ( $H$ ) közelítettem (Forrás: BME Hidraulika I. jegyzet, 2004). Az érdességmagasságot ( $k_s$ ) Parker és Wong javaslata alapján (Forrás: Wong és Parker, 2006) a következőképp számoltam:

$$k_s = 2D_{90}, \text{ ahol} \quad (19)$$

$D_{90}$  az a szemcseméret, aminél a hordalékszemcsék 90%-a kisebb. Értékére pontos adat nem állt rendelkezésemre, de az irodalomkutatásom alapján az átlagos és maximális szemátmérők alapján a  $D_{90} = 2D_{50}$  összefüggéssel közelítettem.

Az alkalmazott összefüggésben változóként szerepel a vízmélység, aminek értékét nem tudtam és az egyenletrendszerben is mint ismeretlen szerepelt. Emiatt a dimenziómentes mederellenállási tényező értékét az egyenletrendszer megoldásával, iterációs számolással oldottam meg, öt tized értékes kerekítéssel.

#### ➤ Periodicitás

Ismétlésképpen, a periodicitás ( $I$ ) azt mutatja meg, hogy a mederkitöltő vízhozamnak az év mekkora részében ( $0 \leq I \leq 1$ ) kell jelen lennie ahhoz, hogy az a valós (mért) éves hordalékmennyiséget szállítsa úgy, hogy az év hátralevő részében ( $1 - I$ ) elhanyagolhatóan kicsi hordalékmozgást feltételezünk.

Értékét a dunaremetei és nagybajcsi szelvényekre külön-külön számoltam. A számítás menetét Dunaremetére részletesen mutatom be.

Dunaremeténél, a mederkitöltő vízhozam ( $Q_{bf} = 4100 \text{ m}^3/\text{s}$ ) függvényében, a szelvényre jellemző vízhozam-görgetett hordalékhozam összefüggéssel (1) a görgetett hordalékhozam számítható, ami 43,9 kg/s-ra adódik. Dunaremete éves görgetett hordalékterhelése 730 607 t/év, amit a mederkitöltő vízhozam 16642 087 s alatt lenne képes megmozgatni. Ez az év 52,7 %-a, vagyis  $I = 0,528$ . Vagyis, az (5) egyenletben szereplő idő értéke az alábbi egyenlettel kapható:

$$t[\text{s}] = t_{\text{év}}[\text{s}]I, \text{ ahol} \quad (20)$$

$t_{\text{év}} = 31557\ 600 \text{ s}$ , így  $t = 16642\ 087 \text{ s}$ .

Azonos megfontolások alapján, a periodicitás értéke Nagybajcsnál  $I = 0,643$ -re adódik.

### 4.3 Modelligazolás

A modelligazolás során azt vizsgálom, hogy a Dunaremete és Nagybajcs szakaszára szakirodalomból rendelkezésemre áll adatok alapján a modell a valós értékeket számítja-e. Az igazolás során a szakirodalmi adatok, illetve az előzőekben bemutatott eljárásokkal paramétereztem a modellt úgy, hogy az ismeretlen paraméterek az  $U$ ,  $H$ ,  $\tau^*$  és  $S$  értékek. A kiértékelést a számított és a szakirodalomban publikált esések összevetésével végeztem el.

A két szakaszt az igazolás során külön-külön vizsgálom Nagybajcson belül több esetet is megvizsgállok, mégpedig a tervezett szélességet, a megvalósult szélességet és a manapság meglévő szélességet, amelyet a Duna elterelése előtt sarkantyúk beépítésével értek el. Először azokat az adatokat ismertetem, amelyeket az irodalomkutatásomban találtam, illetve aszerint határoztam meg. Ezeket az adatokat minden szakaszomra szeretném bemutatni. Miként ismertettem utána mutatom be a számított értékeket, amelyeket az alapegyenleteim alapján számítottam ki.

#### ➤ Dunaremete számítások

3. táblázat: Dunaremete, peremfeltételek

$Q$ [m <sup>3</sup> /s]	4100
$B$ [m]	300
$C_z$ [-]	16,0
$D$ [m]	0,018
$Q_b$ [t/év]	730607

A táblázatomban felsorolt változók fix értékek vagy szakirodalmi kutatásomban talált adatok.

Az *Alapegyenletek* című fejezetben megismert egyenletrendszer végig vezetve az ismert adataimból meghatároztam az ismeretlen paramétereket.

4. táblázat: Dunaremete, számolt értékek

$S$ [-]	0,000291
$U$ [m/s]	2,2
$H$ [m]	6,3
$\tau^*$ [-]	0,06218

A  $Q_b$  megegyezik az évkönyvek adatából számolt átlagos hordalékhozammal t/év mértékegységben.

➤ Nagybajcsi számítások

Itt három esetet vizsgálunk, ugyanazon számolást futtatom végig minden esetben, mint amit már a dunaremetei szakaszon is bemutatam.

❖ 1. eset: Tervezett szélesség

5. táblázat: Nagybajcs, adatok a tervezett szélességgel

$Q$ [m <sup>3</sup> /s]	4100
$B$ [m]	420
$C_z$ [-]	18,2
$D$ [m]	0,0075
$Q_b$ [t/év]	483873

A remeteihez képest a  $B$  szélesség nagyobb, viszont a  $D$  szemcseméret jelentősen kisebb. Az esés itt már csak 13,5 cm/km-re adódik.

Mivel ez a tervezett kialakítás, de nem ez valósult meg, így ezekkel az értékekkel a továbbiakban már nem fogok számolni.

❖ 2. eset: A megvalósult szélesség

6. táblázat: Nagybajcs, adatok a megvalósult szélességgel

$Q$ [m <sup>3</sup> /s]	4100
$B$ [m]	380
$C_z$ [-]	18,5
$D$ [m]	0,0075
$Q_b$ [t/év]	483873

Megfigyelhető, hogy a 40 m-el kisebb szélességű medernek az esése is csökken 0,7 cm/km-el és  $C_z$  értéke viszont magasabb, mint a tervezettnél.

7. táblázat: Számított értékek

$S$ [-]	0,000128
$U$ [m/s]	1,7
$H$ [m]	6,5
$\tau^*$ [-]	0,06682

❖ 3. eset: A sarkantyúzott szélesség

A beépített sarkantyúkkal a mederszélessége is csökkent, mégpedig megközelíthetőleg 250 m-re. Ezt az adatot a Google Maps-en tudtam lemérni (*Forrás: Google Maps, 2020*). Ezt az adatot tekintetem a mostani valós szélességnek, ezért a vizsgálataimban főként ezzel az értékkel fogok számolni.

8. táblázat: Adatok a sarkantyúzott szélességgel

$Q$ [m <sup>3</sup> /s]	4100
$B$ [m]	250
$C_z$ [-]	19,2
$D$ [m]	0,0075
$Q_b$ [t/év]	483873

A modell alapján a következő értékeket számoltam ki:

9. táblázat: Számolt értékek

$S$ [-]	0,0000983
$U$ [m/s]	1,8
$H$ [m]	9,1
$\tau^*$ [-]	0,07240

Jelentősebb változást tapasztalhatunk esést illetően, ami szintén csökkent 9,83 cm/km-re. A  $C_z$  értékében jelentősebb növekedést tapasztalhatunk.

➤ Számítások további hordaléktranszport-modellekkel

A bemutatott értékeken túl szeretném ismertetni a különböző transzportmodellekkel számolt értékeket mindkét szakaszra és egy általános következtetést levonni.

10. táblázat: Dunaremete hordaléktranszport modelledmények

	MPM	Wong & Parker	Ashida	Engelund	Fernandez	Parker
$\tau_c^*$ [-]	0,047	0,0495	0,05	0,05	0,0455	0,03
$q^*$ [-]	0,0149608	0,0056678	0,0053314	0,0211876	0,0122781	0,0089611
$q_b$ [-]	0,0001454	0,0000551	0,0000518	0,0002059	0,0001193	0,0000871
$Q_b$ [t/év]	1928504	730607	687242	2731157	1582689	1155125

11. táblázat: Nagybajcs hordaléktranszport modellek

	MPM	Wong & Parker	Ashida	Engelund	Fernandez	Parker
$\tau_c^*$ [-]	0,047	0,0495	0,05	0,05	0,0455	0,03
$q^*$ [-]	0,0323888	0,0137595	0,0173164	0,0472509	0,0251509	0,0196430
$q_b$ [-]	0,0000846	0,0000360	0,0000453	0,0001235	0,0000657	0,0000513
$Q_b$ [t/év]	1138996	483873	608956	1661643	884467	690773

A modelleket a Függelékben szereplő, főként tapasztalati összefüggésekből készítettem el Nagybajcsra és Dunaremetére. Az vizsgálataimban én a Wong és Parker által felállított modellt használtam (Forrás: Wong és Parker, 2006), illetve az igazolás során is ezzel a modellel számítottam az egyensúlyi állapotot, többek között a mederesést. Az ottani eredményeket felhasználva számítottam hordalékhozamokat, különböző hordaléktranszport modellekkel. Ezzel magyarázható, hogy a Wong és Parker összefüggés adja vissza a tényleg éves hordalékhozam mennyiséget, amit számolni akarunk. Ezekkel a táblázatokkal főként azt szeretném érzékeltetni, hogy egyes modellek között végeredményben akár többszörös különbségek is kaphatók. Az alkalmazott hordaléktranszport modellt tehát körültekintően szükséges megválasztani. Idő hiányában én most nem tudtam mélységeibe menő érzékenységvizsgálatot is elvégezni a különböző modelleket illetően. A választásomat az *Alapegyenletek - Hordalékhozam számítása* fejezetben leírtak alapján tettem meg.

#### ➤ Következtetések

A két szelvény hordalékhozamai között elég nagy eltérés tapasztalható és a szemcsék méretei között is jelentős különbség mondható, de ezt már a *Szakirodalmi következtetések* c. fejezetben ismerttetett számításomban igazoltam; kizárható, hogy szemcseméret csökkenését csak kopás okozza. Az esések értékeiből is lehet a dinamikus egyensúlyi állapot meglétére következtetni. A dunaremetei 29,1 cm/km esésű szakasztól 27 km-re már csak 9,83 cm/km esés tapasztalható. Ezen tényezők különbsége is utal, hogy a dinamikus egyensúly nem áll fent, hanem a két szakasz között lerakódás feltételezhető.

Az esések számítása és értékelése alapján végeztem el a modelligazolást Dunaremeténél a számolt értékem 29,1 cm/km. Az irodalomkutatásomban pedig erre a szakaszra 25-35 cm/km-es esést állapítottak meg. A számított érték épp a megjelölt tartomány közepére esik. A nagybajcsi szelvény esetén az igazolást két eset értékelését tettem meg. A tervezett mederszélességgel itt nem foglalkozom. A megvalósult folyószabályozás során a



mederszélesség 380 m szélesre lett kialakítva, amihez 12,8 cm/km-es esést számoltam. Az szakirodalmi adatok alapján ehhez a mederszélességhez 12 – 15 cm/km-es esés tartozik, amit az általam számított 12,8-as érték nagyon jól közelít. Később, a sarkantyúkkal való szűkítés hatására kialakuló mederesést a modellem 9,8 cm/km-re becsüli. Ez az érték reálisnak értékelhető annak tükrében, hogy ez a szakirodalomban publikált minimális 12 cm/km alá esik. Továbbá, a számított 9,8 cm/km esés ugyancsak jó közelítésnek értékelhető a Gönyű alatti szakaszra mért 8 – 10 cm/km-es mért eséssel való összevetés alapján.

A szabályozás utáni állapotra vonatkozó számított mederesés értékek jól közelítik a mért eséseket. Ezek alapján a modelleket igazoltnak értékelem és alkalmasnak vélem további modellvizsgálatok elvégzésére.

## 5. Modellvizsgálatok

### 5.1 Érzékenységvizsgálat

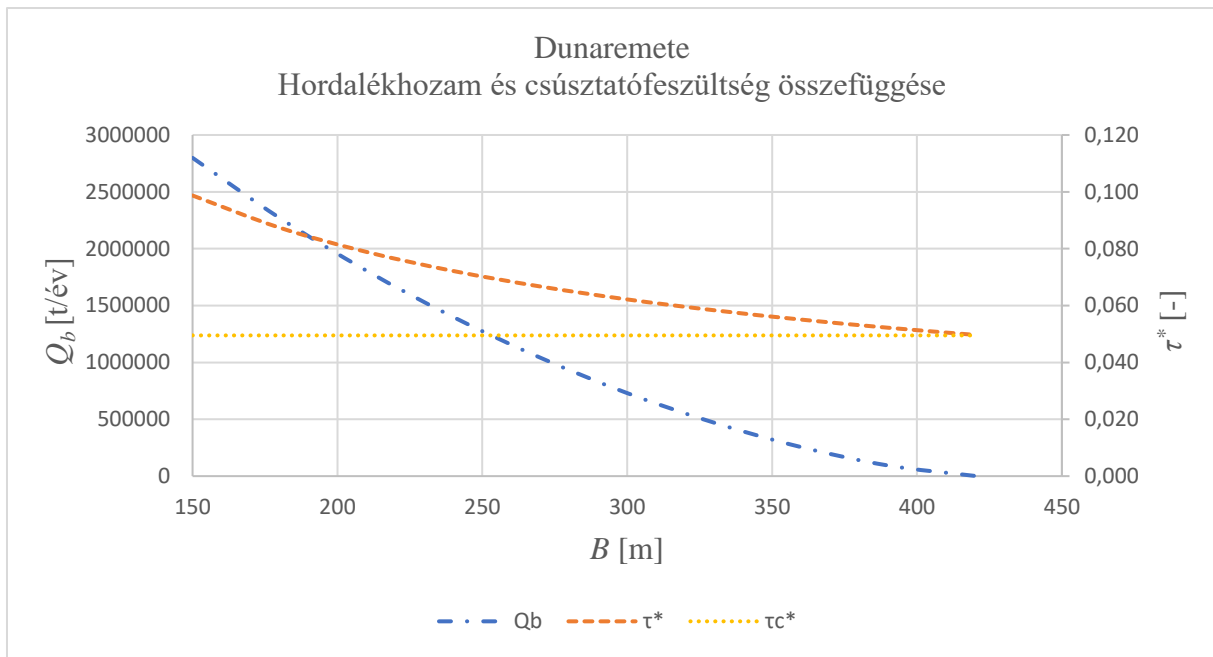
Az első vizsgálatomban a  $B$  szélességet vizsgáltam, hogy azt növelve, illetve csökkentve, milyen hatással van a  $\tau^*$  csúsztató fezsúltségre, illetve a  $H$  vízmélységre és a  $Q_b$  hordalékhozamra. Számításaim során a mederesés értékén nem változtattam. Ezt mindkét szakaszra elvégeztem és az eredményeimet diagramon is szemléltettem.

#### ➤ Dunaremete:

12. táblázat: Érzékenység vizsgálat a szélesség függvényében

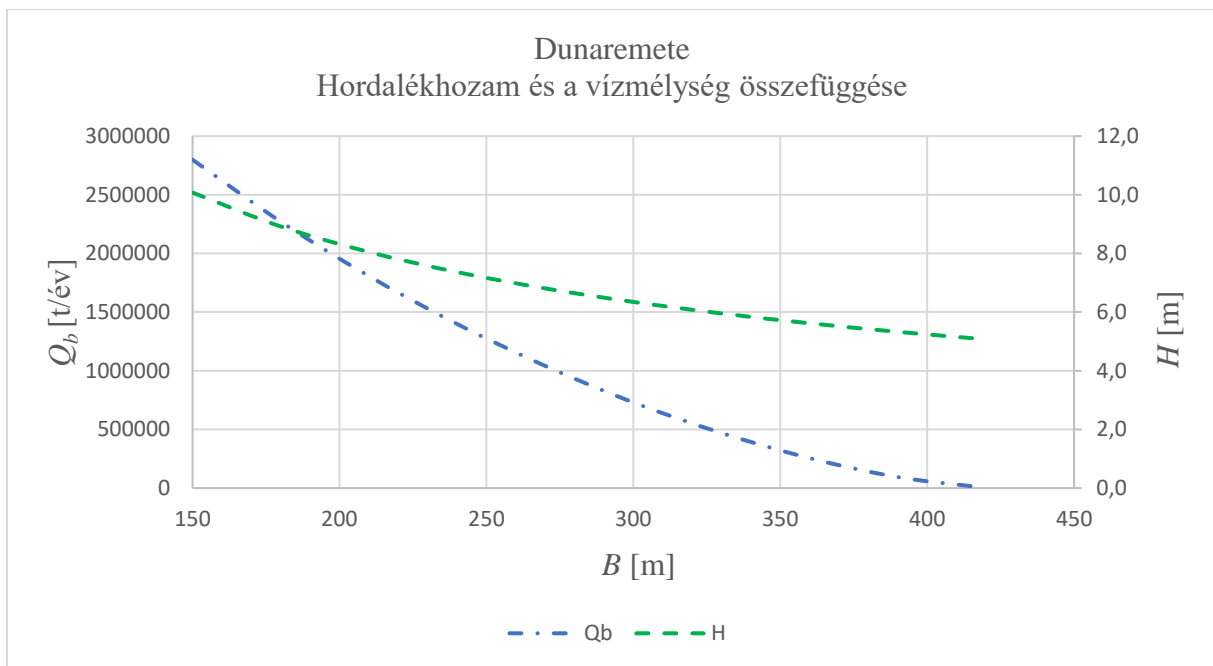
$B$ [m]	$Q_b$ [t/év]	$\tau^*$ [-]	$H$ [m]
150	2798865	0,099	10,1
180	2271138	0,087	8,9
210	1807084	0,079	8,0
240	1398894	0,072	7,4
270	1041584	0,067	6,8
300	730107	0,062	6,3
330	469799	0,058	6,0
360	255342	0,055	5,6
390	93615	0,052	5,3
420	1807	0,050	5,1

A szélességekre a fent látható táblázati értékeket kaptam meg, amin látható, hogy Dunaremeténél a szélesség növelésével csökken a hordalékhozam és a vízmélység is.



22. ábra: Hordalékhozam és a csúsztató feszültség a szélesség függvényében Dunaremete

Az ábrán jelöltem a  $\tau_c^*$  vagyis a dimenziómentes kritikus csúsztatófeszültség értékét is, ami egy fix érték. Az értéke 0,0495 mivel én a Wong és Parker féle összefüggést használtam. A dimenziómentes csúsztatófeszültséggel való összevetése alapján azt látom, hogy még 420 méteres mederszélesség esetén már alig lenne tapasztalható hordalékmozgás a mederkitöltő állapotban.



23. ábra: Hordalékhozam és a mélység kapcsolata a szélesség függvényében Dunaremete

Külön diagrammon ábrázoltam a vízmélység és a hordalékhozam kapcsolatát a mederszélesség függvényében. A vízmélység adatokból könnyedén abszolút vízszinteket lehet számítani. Ilyen

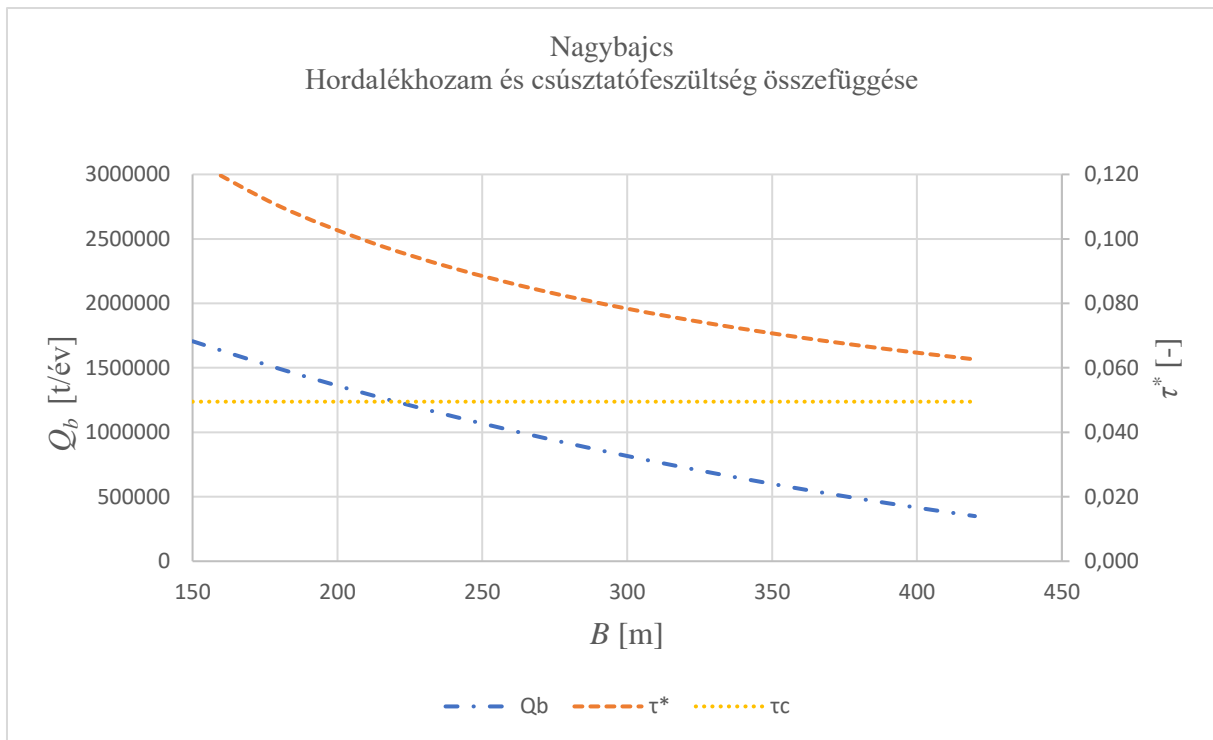
módon adott folyószabályozási kialakítás hatására a várható vízszintváltozás is részbenelőre jelezhető, ami az árvízvédelemben óriási fontossággal bír. Ilyen eljárásnál azonban a mederszint változásának számítása is szükséges, amire a 0D modellem nem alkalmas. A vizsgált mederszélesség-tartományban az látható, hogy a vízmélység akár duplájára is nőhet drasztikus mederszűkítés esetén.

➤ Nagybajcs:

13. táblázat: Érzékenység vizsgálat a szélesség függvényében

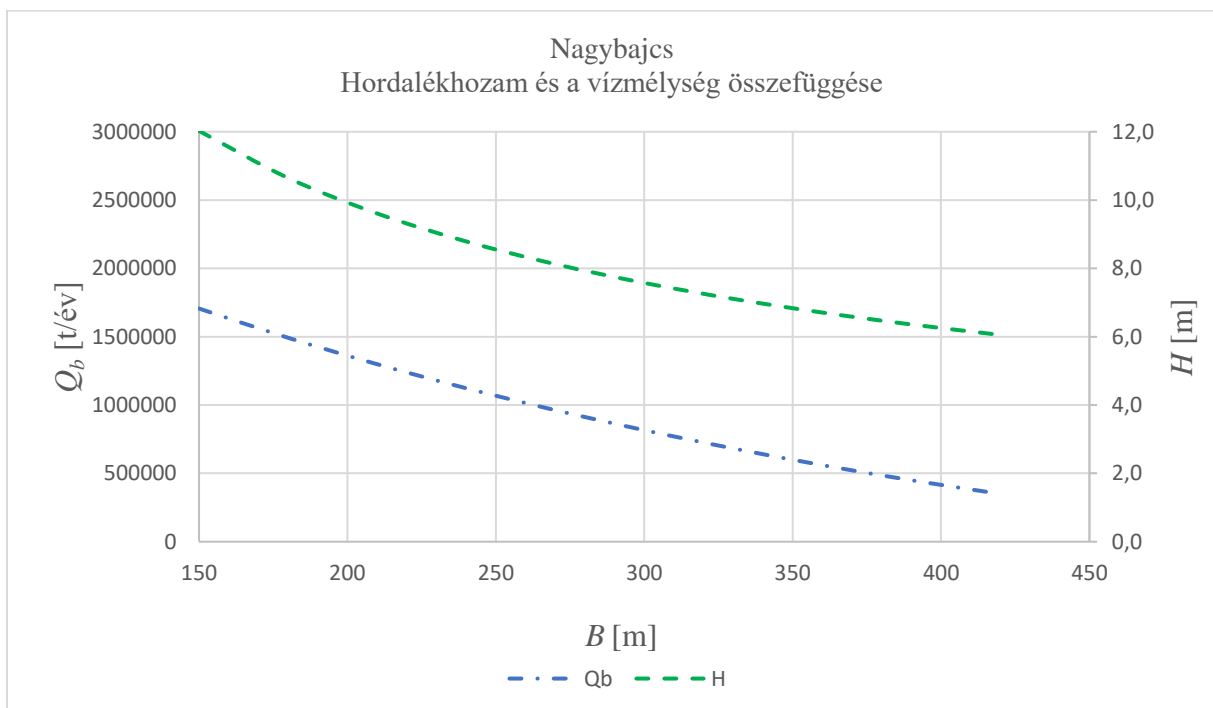
$B$ [m]	$Q_b$ [t/év]	$\tau^*$ [-]	$H$ [m]
150	1706279	0,124	12,0
180	1492324	0,110	10,6
210	1298978	0,099	9,6
240	1123176	0,091	8,8
270	962771	0,084	8,1
300	816209	0,078	7,6
330	682351	0,074	7,1
360	560365	0,069	6,7
390	449667	0,066	6,4
420	349886	0,063	6,1

A nagybajcsi adatokon megfigyelhető, hogy itt is csökkennek az adott tényezők a szélesség növelésével. Dunaremeténél 150 m szélességre sokkal nagyobb hordalékhozam lenne tapasztalható és ez 420 m-es szélességnél drasztikusan le is csökkenne. Ezzel szemben Nagybajcsnál hiába kisebb értékről indul, nem figyelhető meg ilyen nagy léptékű csökkenés. Nagybajcson 420 m-es szélességgel több, mint tízszer több hordalékot szállítana a folyó, mint Dunaremetén, holott a mederesés fele akkora. Nagybajcsnál 420 m-es szélesség esetén a csúsztatófeszültség még jelentősen meghaladja a kritikus értéket. Ezalapján azt feltételeztem, hogy a görgetett hordalék szemcseméret különbség okozza ezt a jelentős viselkedéskülönbséget.



24. ábra: A Hordalékhozam és a csúsztatófeszültség összefüggése a szélesség függvényében Nagybajcs

Természetesen a  $Q_b - H$  diagramot is megcsináltam ezen szakaszhoz. Az ábra alapján azt látom, hogy a vízmélység és ezáltal a vízszint is érzékeny a szelvénytélességre.



25. ábra: A hordalékhozam és a vízmélység kapcsolat a szélesség függvényében Nagybajcs

Ezt követően készítettem egy olyan vizsgálatot is, ahol a szélesség helyett a szemcse méret a befolyásoló tényező.

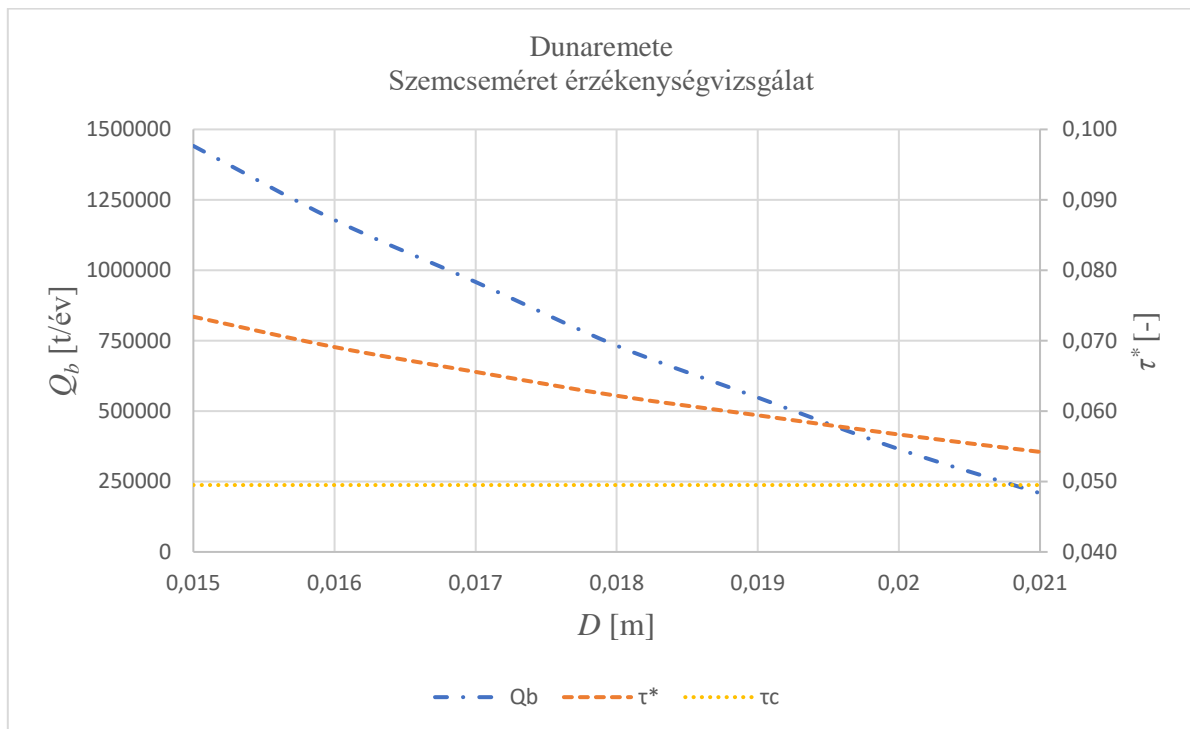
➤ Dunaremete:

Ebben a vizsgálatomban azt néztem, hogy a  $D$  szemcseátmérő pár mm-es változása mekkora hatással van a többi morfordinamikai paraméterre, mint pl.  $Q_b$  hordalékhozamra, vagy a  $\tau^*$  csúsztatófeszültségre.

14. táblázat: Érzékenység vizsgálat a szemmagyság változásával, Dunaremete

$D$ [m]	$Q_b$ [t/év]	$\tau^*$ [-]	$H$ [m]	$\tau_c^*$ [-]
0,015	1441307	0,073	6,2	0,0495
0,016	1178589	0,069	6,3	0,0495
0,017	958426	0,066	6,3	0,0495
0,018	732241	0,062	6,4	0,0495
0,019	548107	0,059	6,4	0,0495
0,02	364839	0,057	6,4	0,0495
0,021	208488	0,054	6,5	0,0495

Látható, hogy szemmagyság változásával a hordalékhozam viszonylag nagy léptékben módosul. A szemmagyság 16 %-os növekedése ( $D = 0,018$  m-t alapul véve) a hordalékhozam közel 70 %-os csökkenését, a 16 %-os szemcsecsökkenés pedig majdnem 100 %-os hordalékhozamtöbbletet eredményez.



26. ábra: Érzékenységvizsgálat a szemmagyságra

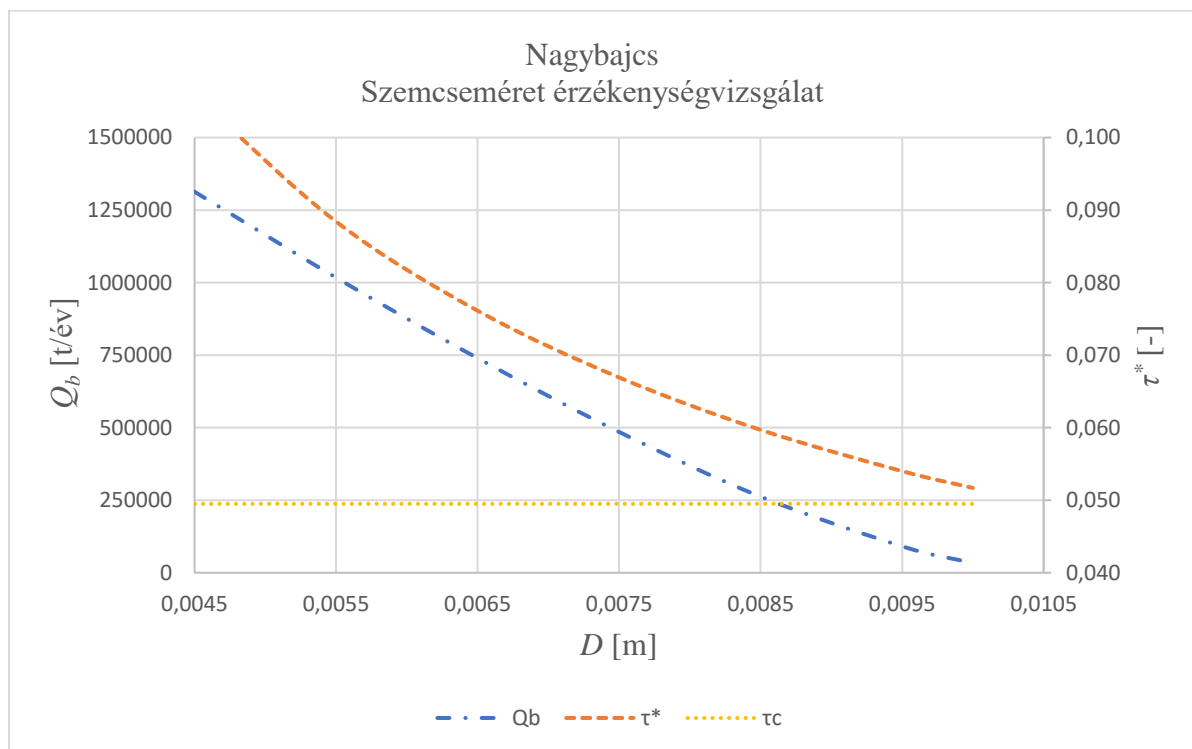


➤ Nagybajcs:

15. táblázat: Érzékenység vizsgálat a szemcseméret függvényében

$D$ [m]	$Q_b$ [t/év]	$\tau^*$ [-]	$H$ [m]	$\tau_c^*$ [-]
0,0045	1313219	0,106	6,1	0,0495
0,0055	1017266	0,088	6,3	0,0495
0,0065	739711	0,076	6,4	0,0495
0,0075	485339	0,067	6,5	0,0495
0,0085	262206	0,060	6,54	0,0495
0,0095	91103	0,054	6,61	0,0495
0,01	33413	0,052	6,66	0,0495

Nagybajcs esetén is hasonló trendet tapasztaltam a szemnagyság és hordalékhozam kapcsolatát illetően. A hordalékhozam csökkenése itt is tisztán látható, de 1cm-es nagyságnál (33 %-os növekedés  $D$ -ben) már a hordalékhozam drasztikus csökkenését eredményezi. Ezzel szemben Dunaremeténél a hordalékhozam 1cm-es átmérőnél több mint 2 millió tonna/év.



27. ábra: Érzékenységvizsgálata szemcseméret nagyságára

Össességében tehát elmondható, hogy a hordalékhozam nagymértékű érzékenységet mutat a szemcseméret változására.

## 5.2 A vizsgált szakasz dinamikus egyensúlyi állapotának becslése

Ebben a fejezetben azt vizsgáltam, hogy milyen morfordinamikai paraméterek esetén állna fenn dinamikus egyensúlyi állapot a Dunaremete és Nagybajcs közötti szakaszon. Abból a feltételezésből indultam ki, dinamikus egyensúlyi állapotban lévő szakaszon belül a hordalékhozam nem változik. Enne fényében azt vizsgáltam, hogy mekkora nagybajcsi és dunaremete esés kell ahhoz, hogy a hordalékhozamuk egyensúlyban legyen, vagyis egyenlők legyenek.

Kettő esetet vizsgáltam. Az első esetben azt feltételeztem, hogy az egyensúlyi állapot eléréséig nem változik a szemcseméret a kiindulási állapothoz képest. Ennek megfelelően a szemcseméretet nem változtattam meg, hanem a szakaszhoz tartozó méretekkel számoltam.

A második esetben azt feltételeztem, hogy az egyensúlyi állapotban a két szelvény szemcsemérete megegyezik. Ezt azért tettem, mert az előző esetben feltételezett szemcseméretbeli különbség dinamikus egyensúlyi állapotnál nem lehetséges, hiszen az aprózódás nem okozhat akkora méretcsökkenést. Továbbá, a szakasz dinamikus egyensúlyi állapotának esése vélhetően a Dunaremeténél mért esésnél kisebb lenne, ami a szelektív lerakódás miatt kisebb szemcseméretet eredményezne Dunaremeténél. Ezek alapján a két szemcseméret átlagát vettem és mindkét szelvényben azt a méretet alkalmaztam és úgy végeztem el a számításaimat.

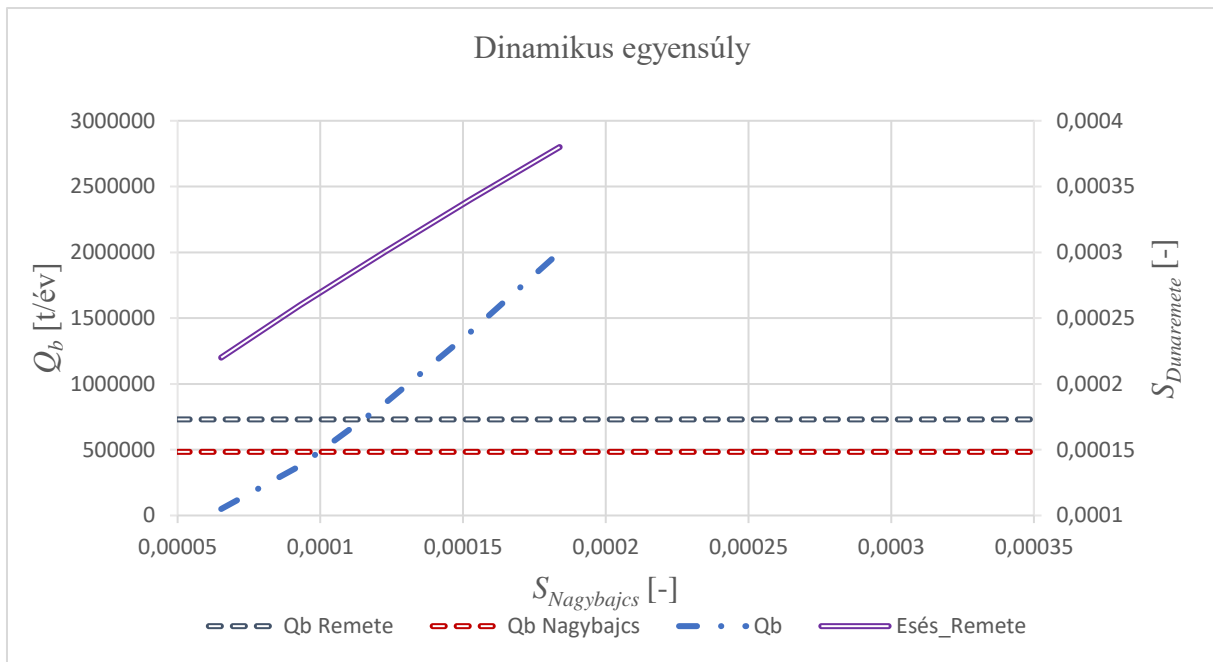
1. eset:

A dunaremete eséseket változtatom és a kiszámolt hordalékhozamához keresem azt a nagybajcsi esést, amely megegyező hordalékhozamot szállítana. Ehhez az EXCEL Cél-érték keresés függvényét használtam, majd az eredményeimet táblázatba foglaltam:

16. táblázat: Esés vizsgálat

Esés Remete	Esés Nagybajcs	$Q_b$ [t/év]
0,00022	0,000065	49418
0,00026	0,000093	379503
0,0003	0,000122	845471
0,00034	0,000153	1394092
0,00038	0,000184	2001346

Ezeket az adatokat diagramon szemléltetem, ahol feltüntettem a tényleges nagybajcsi és dunaremete hordalékhozamokat is.



28. ábra: Dinamikus egyensúlyi vizsgálat

Az eredményekből látható, hogy ha a múltbéli Dunaremeténél mért  $\sim 730\,000$  t/év-es hozamot nézzük, akkor a nagybajcsi szelvénynél az esésnek alig pár,  $< 3$  cm/km-t kéne nőnie a dinamikus egyensúlyi állapot eléréséhez. Ez az eset viszont azt feltételezná, hogy a szelvényekben a szemcseméret az egyensúlyi állapot eléréséig nem változik, ami több okból (pl. aprózódás) sem tűnik reálisnak.

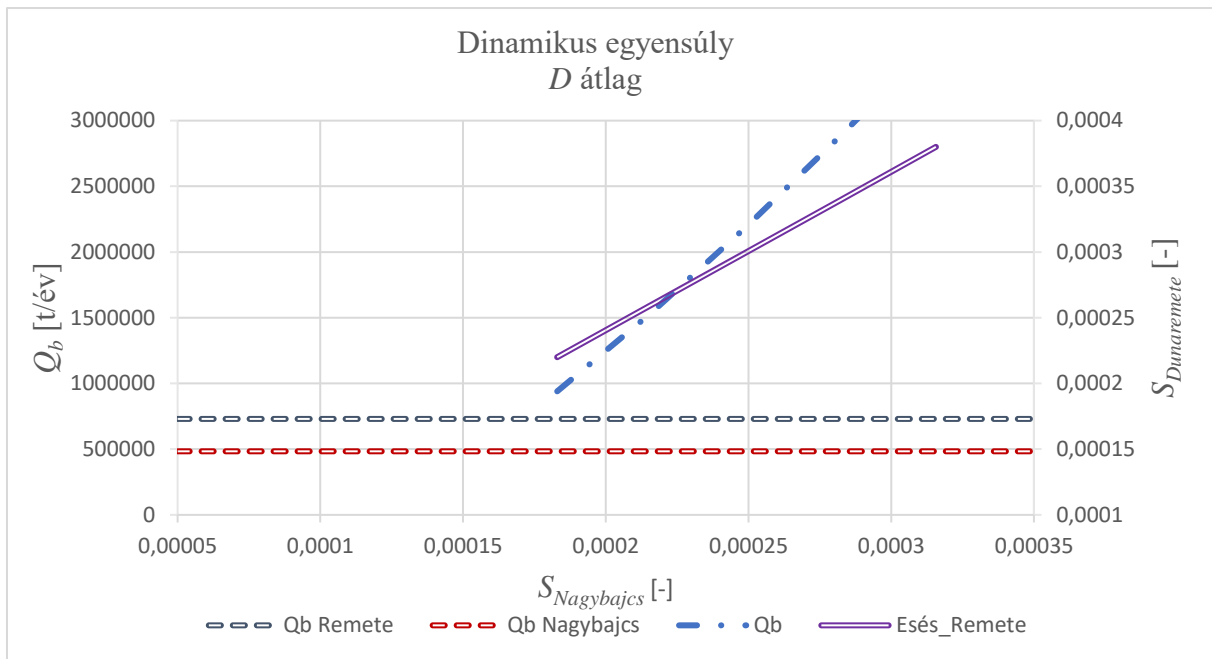
2. eset:

A két szemcse átlagát vettem, amely 0,012575 m és mindkét szakaszon ezt az értéket alkalmaztam. A szemcse méretével a  $C_z$  értéke is változott, amelyet ebben a vizsgálatban állandó értéknek feltételeztem, 17-re vettem. Valójában azonban  $C_z$  értéke függ az eséstől, de a vizsgált eséstartományban értéke nem mutatott jelentős szórást és ezért közelítettem konstans 17 értékkel.

17. táblázat: Esés vizsgálat 2.eset

Esés Remete	Esés Nagybajcs	$Q_b$ [t/év]
0,00022	0,00018	940021
0,00026	0,00022	1540211
0,0003	0,00025	2195017
0,00034	0,00028	2889703
0,00038	0,00032	3615090

A táblázathoz készített diagram a következő:



29. ábra: Dinamikus egyensúlyi vizsgálat 2.eset

Az eredmények alapján azt láthatjuk, hogy a Dunaremeténél mért hordalékhozamot 1,26 cm-es szemcsemérettel nagy eséscsökkenéssel (az eredeti érték közel 70 %-a) lehetne biztosítani Dunaremeténél. Ugyanezt a hozamot megegyező szemcsemérettel Nagybjajcsnál csak az eredeti esés közel duplája tudná csak elszállítani.

Ez a vizsgálat már rámutat az 0D megközelítés korlátjaira. A vizsgált szelvény mentén feltehetően nem elhanyagolható az aprózódás hatása, ami kihat a jellemző szemcseméretre és végső soron az esésváltozásra is. Ilyen jellegű vizsgálathoz már egy 1D leírás szükséges.

Az eredmények alapján azonban az feltételezhető, hogy a vizsgált szakasz dinamikus egyensúlyi állapotánál Dunaremeténél az esés nem csökkenne 20 cm/km alá, valamint Nagybjajcsnál ugyanezen érték fölé.

Ez a vizsgálat példa arra, hogy 0D leírás segítségével milyen módon és pontossággal lehet közelíteni a dinamikus egyensúlyi állapotát az azt még nem elérő szakaszok esetén. A konkrét szakasz esetében azonban ez a kérdés már nem releváns, hiszen a Dunát Dunaremete felett elterelték, ezért a 20. század végére abban a szelvényben jelentősen lecsökkent a hordalék- és vízhozam.

### 5.3 Hordalékviszatarlás hatásának vizsgálata

Ebben a vizsgálatban azt nézem, hogy a hordalékhozam 75-50-30-20-10 % - os csökkenése Nagybjajcsnál vagy Dunaremeténél milyen hatással lenne az esésre és a csúsztatófeszültségre, változatlan szélességet feltételezve. A vizsgálat arra mutat rá, hogy a felvízi

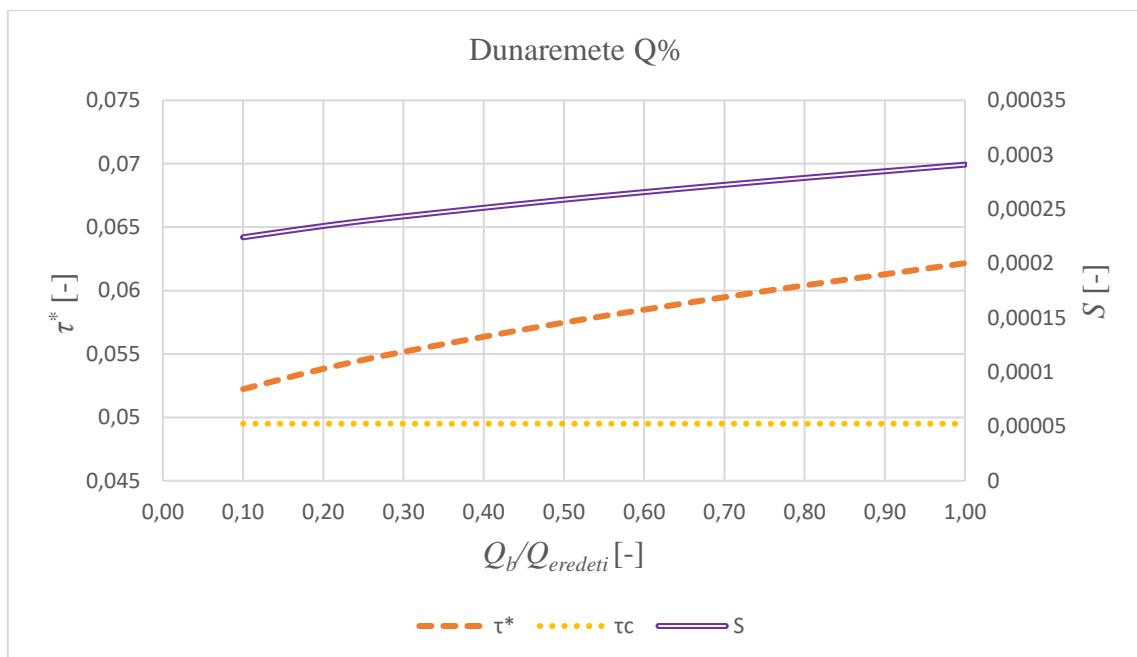
hordalékviszatarítás (pl. egy vízlépcső létesítése) milyen hatással lenne a vizsgált szelvény egyensúlyi állapotára.

➤ Dunaremete

18. táblázat: Hordalékhozam vizsgálat, Dunaremete

$Q_b/Q_b \text{ eredeti} [-]$	$S [-]$	$\tau^* [-]$	$\tau_c^* [-]$
1	0,000291	0,06215	0,0495
0,75	0,000275	0,05995	0,0495
0,5	0,000259	0,05747	0,0495
0,3	0,000243	0,05517	0,0495
0,2	0,000234	0,05383	0,0495
0,1	0,000224	0,05223	0,0495

Ezen a szakaszon nem látható jelentős eséscsökkenés. Szignifikáns változás csak a hordalékhozam drasztikus lecsökkenése esetén következne be; a 100 % és a 10 % közötti 6,7 cm különbség közel 25 %-os eséscsökkenést eredményezne.



30. ábra: Hordalékhozam vizsgálat

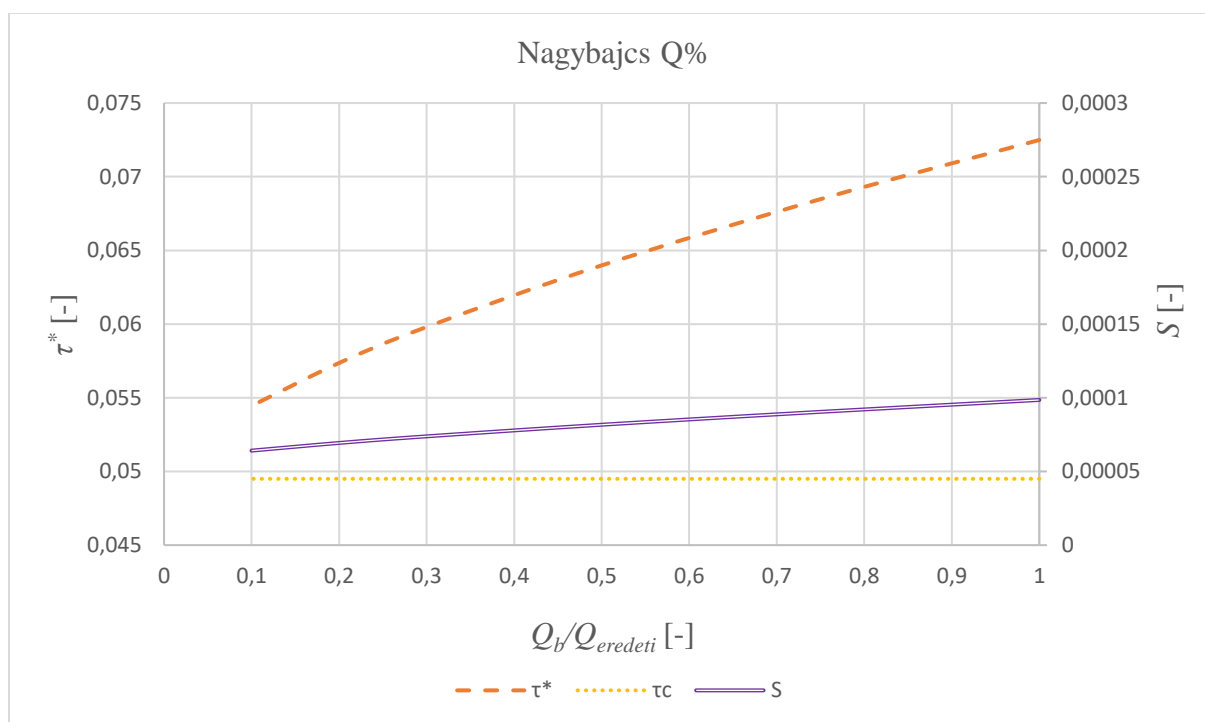


➤ Nagybajcs

19. táblázat: Hordalékhozam vizsgálat, Nagybajcs

$Q_b/Q_{b \text{ eredeti}} [-]$	$S [-]$	$\tau^* [-]$	$\tau_c^* [-]$
1	0,0000985	0,07249	0,0495
0,75	0,0000905	0,06848	0,0495
0,50	0,0000817	0,06398	0,0495
0,30	0,0000738	0,05980	0,0495
0,20	0,0000694	0,05736	0,0495
0,10	0,0000641	0,05445	0,0495

Habár jóval kisebb a nagybajcsi szakaszon az esés, de az esést a kétharmadára csökkenti a hordalékhozam 10 %-ra való csökkenése. Ez hasonló nagyságrendű változás, mint amit Dunaremeténél tapasztaltunk.



31. ábra: Hordalékhozam vizsgálat

#### 5.4 Hordalék- és vízhozam csökkenés hatása Dunaremeténél

Ebben a vizsgálatomban azt nézem, hogy Dunaremetén miként változhatott a meder dinamikus egyensúlyi állapota (szélessége és esése) napjainkra. Ezt a vizsgálatot arra alapoztam, hogy eddigi vizsgálataimat csak 1990 előtti adatok és állapotok alapján végeztem, az évkönyvek alapján. Viszont alapos megfontolások alapján a napjainkban uralkodó állapotot (A Bösi-Vízlépcső üzembe helyezése utáni állapotot, azaz a Duna elterelésének hatását figyelembe véve) is vizsgálhatjuk. Az 1977. évi évkönyvben találtam az utolsó mederfelvételt, illetve

hordalékhozam adatot a szakaszra, de tudom, hogy azóta ez a szelvény szignifikáns változáson esett át. A 2016-os Vízrajzi Évkönyv szerint az évi maximális vízhozama nem haladta meg az  $1480 \text{ m}^3/\text{s}$ -ot, továbbá ugyanezen évkönyvből Doborgaz (1839,5 fkm) és Dunaremete napi vízállás adataiból számolva a vízfelszín esés átlagos értéke  $30 \text{ cm}/\text{km}$  (az esés tehát nem igazán változott). A hordalékhozamot illetően semmilyen mért, vagy becsült adat nem áll rendelkezésemre. De joggal feltételezhetem, hogy mivel a szelvény a Dunakiliti-duzzasztó (1842,3 fkm) alvívén, attól csupán 16,8 km-re található, ezért az görgetett hordalékban szegény. Továbbá, a meder szélessége is látványosan beszűkült. A következő ábrán egy közelítő mérési adatot mutatnék be, amihez segítségemre volt a Google Maps.



32. ábra: Dunaremete szakasz napjainkban (Forrás: Google Maps, 2020)

A képen megfigyelhető, hogy ezen a szakaszon a lemért szélesség csupán már 171 m, míg az 1969-es mederfelvételi jegyzőkönyven 300 m-es víztükörszélességet jegyeztek. A vizsgálatomban a mederkitöltő vízhozamot  $1500 \text{ m}^3/\text{s}$ -nak feltételezem és azt keresem, hogy a hordalékhozam százalékos csökkenése milyen változásokat okoz az esésben, illetve a meder szélességében.

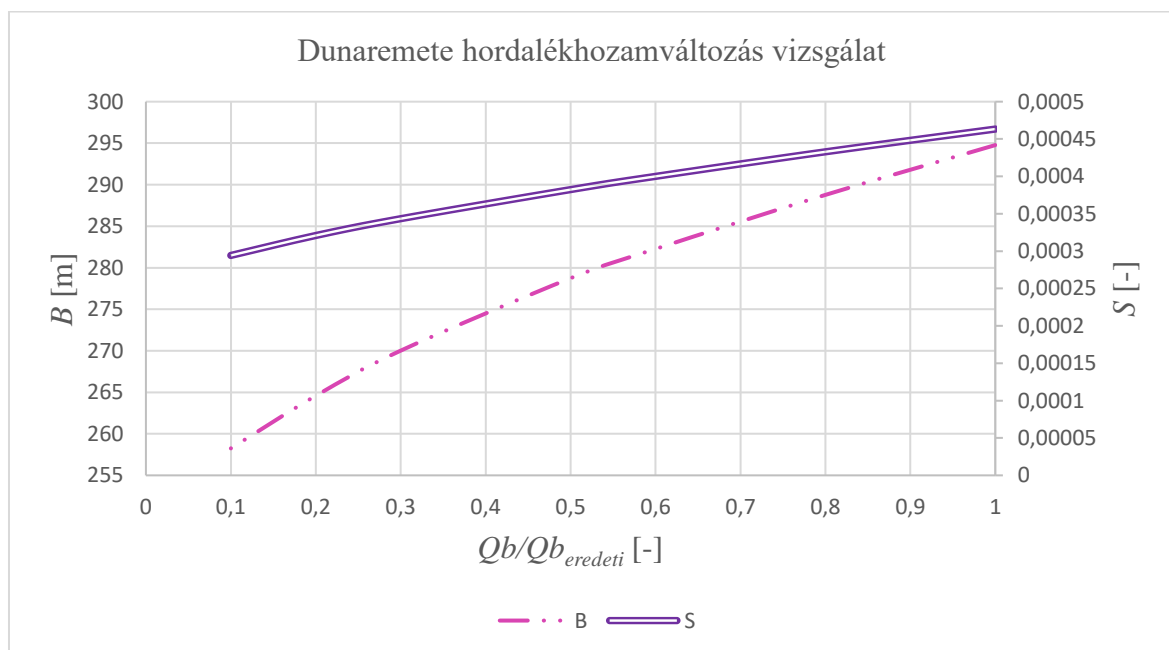
Az eredeti dunaremete adatokhoz képest (3. táblázat) a szemcseméretben is változtattam, mégpedig azt 12 mm-nek vettem fel, a következő megfontolás alapján: Feltételezhető, hogy alacsonyabb vízhozam esetén csökken a csúsztatófeszültség, aminek

következtében a mozgásba hozható görgeteg mérete is. Keressük tehát azt a kritikus szemcseméretet, amit az 1500 m<sup>3</sup>/s-os vízhozam épp mozgásba tud hozni. Megoldva az egyenletrendszer (3. táblázat adatai közül csak  $Q$ -t változtatva)  $H = 3,6$  m-t kapok. Ezután (15)-ös egyenletben  $\tau^*$ -re a Wong és Parker modell alapján a kritikus csúsztatófeszültség értékét veszem fel ( $\tau^* = 0,0495$ ), amiből  $D$ -t kifejezve 13,3 mm-t kapok. Mivel ez a kritikus érték, a jellemző görgetett hordalék méretét ennél kisebbnek veszem, így 12 mm-nek feltételezem.

A mederszélességet illetően szabadfolyásúnak tekintem a vízfolyást, ha az az eredeti, feltehetően kőszórással megerősített partfal által kijelölt 300 m-es szélességnél kisebb. Ekkor ugyanis a folyó szabadon, hordaléklerakás révén csökkenti saját mederszélességét. Ilyen esetben (szabadfolyású állapot) az egyenletrendszerem a (16)-os egyenlettel bővül ki és ( $\tau^*$ ,  $S$ ,  $H$ ,  $U$  mellett)  $B$  szelvény szélesség is számíthatóvá válik.

20. táblázat: Számított értékek

$Q_b/Q_{eredeti}$ [-]	$S$ [-]	$B$ [m]	$\tau^*$ [-]
1	0,000463	295	0,06871
0,8	0,000433	289	0,06629
0,6	0,000400	282	0,06357
0,5	0,000382	279	0,06206
0,3	0,000343	270	0,05863
0,2	0,000321	265	0,05656
0,1	0,000294	258	0,05402



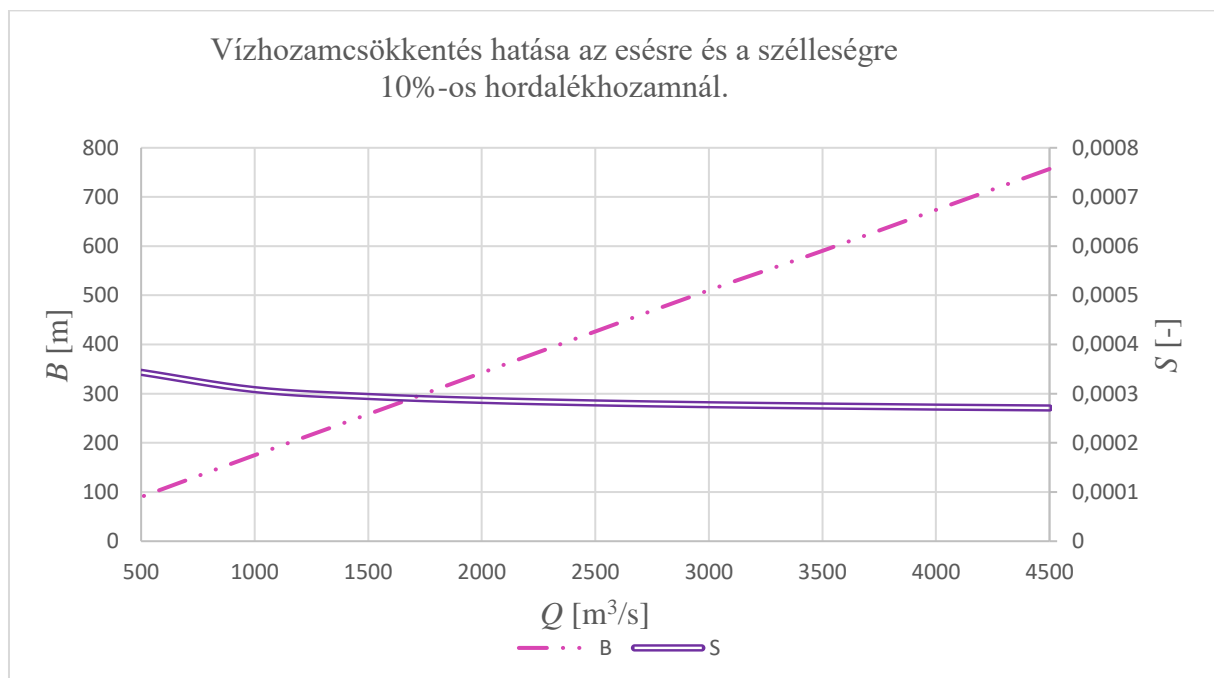
33. ábra: Hordalékhozam változásának hatása Dunaremeténél

A kapott eredményeket a 33. ábra: Hordalékhozam változásának hatása Dunaremeténél33. ábra mutatja be. Látható, hogy a hordalékhozam csökkenésével az esés és a szelvénytérség is jelentősen lecsökken. A mederszélesség értékek mind 300 m alá esnek, de így is közelebb vannak az eredeti 300 m-hez, mint a Google Maps alapján inkább 200 m körüli értékhez. A legkisebb szélességet a legkisebb hordalékhozamnál, 0,1-nél kapjuk. A mederesést illetően is a  $Q_b/Q_{b \text{ eredeti}} = 0,1$  körüli érték adja a reálisnak feltételezett 0,0003-as értéket.

Elvégeztem egy olyan számítást is emellé, hogy a vízhozam adatokat csökkentem/növelem és arra voltam kíváncsi, hogy miként változtatja ez a többi paramétert úgy, hogy a hordalékhozamot az eredeti érték 10 %-ának vettem.

21. táblázat: Szélesség és esés változása a különböző hozamokra

$Q$ [m <sup>3</sup> /s]	$S$ [-]	$B$ [m]	$\tau^*$ [-]
4500	0,000271	757	0,05171
4000	0,000273	674	0,05189
3500	0,000275	590	0,05211
3000	0,000278	510	0,05237
2500	0,000281	426	0,05274
2000	0,000286	342	0,05325
1500	0,000294	258	0,05402
1000	0,000308	175	0,05536
500	0,000343	90	0,05863



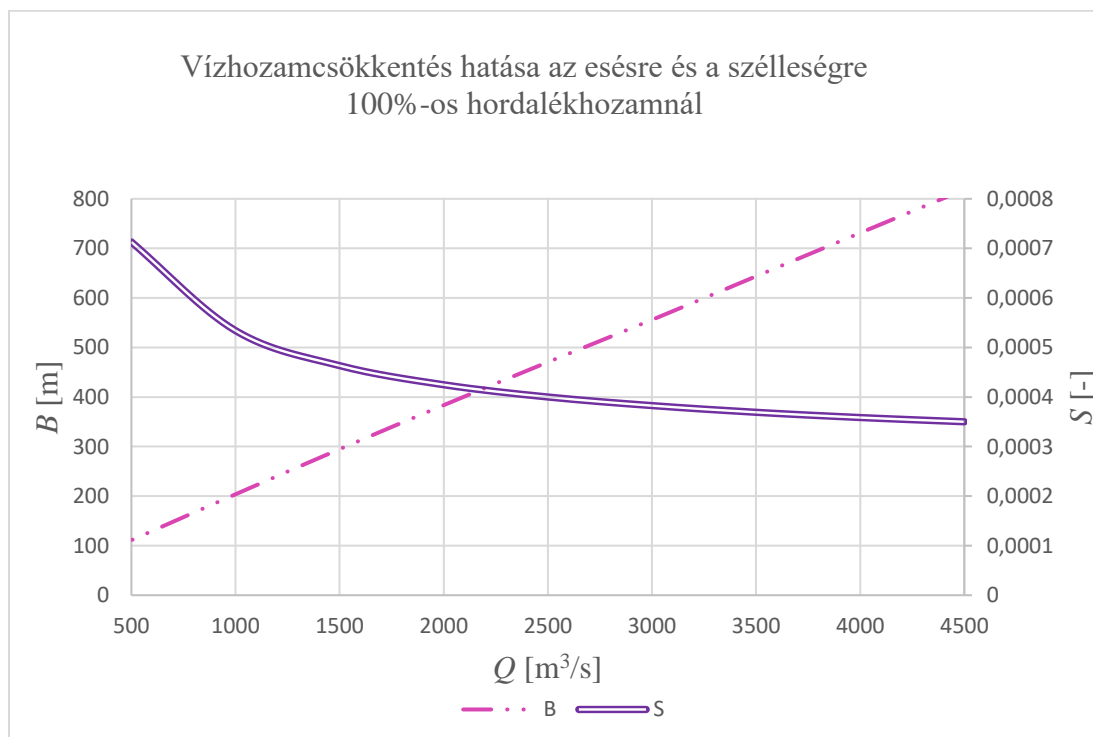
34. ábra: A táblázatban foglalt adatok ábrázolása

A táblázatból és a hozzá kapcsolódó ábráról kiolvasható, hogy a vizsgált szakaszon ebben az esetben leginkább az 1000 - 1500 m<sup>3</sup>/s-os vízhozamtartomány adja a reális  $S$  és  $B$  értékeket, a légifelvételről lemerített ~170 m-es szélességet az 1000 m<sup>3</sup>/s.

Következő idekapcsolódó esetemben ezt a vizsgálatot még végig futtattam arra az esetre is, hogyha a hordalékhozam nem csökkenne a 10%-ára hanem megmaradna az eredeti érték. Ehhez az értékhez kerestem a megfelelő  $B$  szélességet és  $S$  esést.

22. táblázat: 2. eset vizsgálata

$Q$ [m <sup>3</sup> /s]	$S$ [-]	$B$ [m]	$\tau^*$ [-]
4500	0,00035	819	0,05923
4000	0,000359	731	0,05999
3500	0,000369	644	0,06092
3000	0,000383	556	0,06209
2500	0,000400	470	0,06357
2000	0,000425	384	0,06562
1500	0,000463	295	0,06871
1000	0,000534	204	0,07408
500	0,000713	111	0,08634



35. ábra: 2. eset ábrázolása

Megfigyelhető, hogy a teljes hordalékmenyiséget jelentősen nagyobb esés képes elszállítani, ami az alacsonyabb vízhozamtartományban akár a 10 %-os hordalékmenyiséghez tartozó esés



kétszerese is lehet. Ugyanakkor megfigyelhető az is, hogy a vízhozam csökkenésével csökken a víztükörszélesség is.

A Dunaremetére végzett vizsgálataim során tehát sikerült kimutatnom, hogy a vízhozam és a hordalékhozam jelentős csökkenése valóban csökkentheti a valóságban tapasztalt mértékben az egyensúlyi mederszélességet.

## **5.5 A szabályozások előtti állapot becslése Nagybajcsnál**

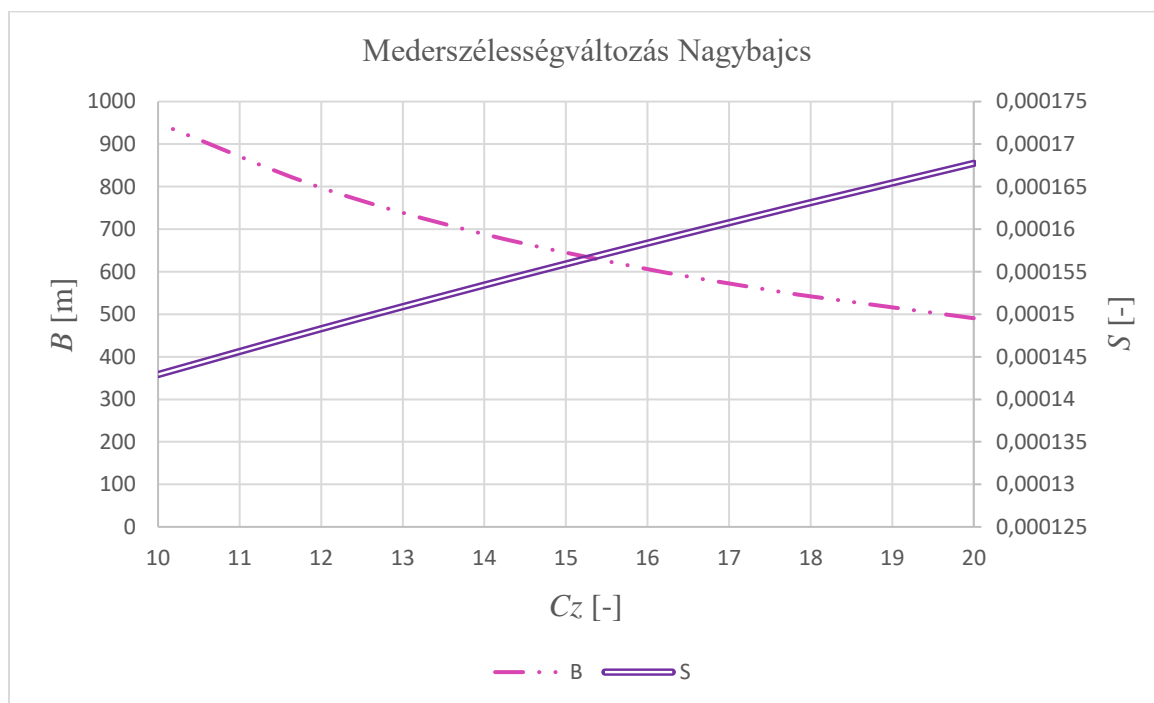
Nagybajcsra az előzőekben bemutatott vizsgálathoz hasonlóan végeztem, vagyis főszerepet ebben a vizsgálati részben is az esés és a szélesség számítása kapta. A vizsgálat apropóját azonban nem a jelen medergeometria becslése adta, hanem épp ellenkezőleg: azt vizsgáltam, hogy a modellel lehetséges-e múltbéli, szabadfolyású állapot számítása. A 3., 4. és 5. ábrák alapján látható, hogy ekkor fonatos alakot öltött a meder, vagyis több sziget és hordalékkúp is megjelent a mederben. Főleg az 5. ábra alapján látható (ahol pirossal a szabályozás utáni, ~ 380 m-es meder is látható), hogy a szabadfolyású meder szélessége jelentősen nagyobb volt a szabályozottéhoz képest, akár a duplája is lehetett. A vizsgálataim során a modellparaméterezésnél ismertetett paraméterekből indultam ki (6. táblázat). Mivel a szabályozás előtti állapotban a folyó szabadfolyású volt, ezért a modellemet újfent a (16)-os egyenlettel bővített egyenletrendszerként alkottam meg, vagyis  $B$  mederszélesség is ismeretlenként jelent meg. Arra vonatkozóan azonban nem volt információ, hogy a szigetek és hordalékkúpok mekkora többletellenállást eredményezhettek, vagyis  $C_z$  értékét miként vegyem fel. Azzal a feltételezéssel éltem, hogy a pusztán mederanyagból számított ellenállást ezek a mederképződmények csak növelhették, vagyis  $C_z$  reális értéke a 8. táblázatban ismertetett értéknél csak kisebb lehetett.

Éppen ezért, ezen szelvényt az úgynevezett dimenziómentes Chézy ellenállási tényező (vagy simasági tényező) változásával vizsgáltam. Ennek függvényében kerestem a különböző értékekhez tartozó szélességet és esést.

23. táblázat: Simasági vizsgálat

$C_z$ [-]	$S$ [-]	$B$ [m]	$\tau^*$ [-]
20	0,000168	491	0,064166
18	0,000163	542	0,063223
17,5	0,000162	557	0,062981
16	0,000158	606	0,062238
14	0,000153	688	0,061204
12	0,000148	797	0,06011
10	0,000143	950	0,058943

Megfigyelhető, hogy a simaság csökkenésével, vagyis az érdesség növelésével a folyó szélessége nő, az esésében pedig csökkenés tapasztalható.



36. ábra: Nagybajcs simasági (érdességi) vizsgálat szemléltetése

A számított eredményeket bemutató ábra alapján azt látom, hogy a megvalósított, közel 380 m-es mederszélesség (6. táblázat) dupláját (700 – 800 m) kijelölő sávban a dimenziómentes Chézy ellenállási tényező 12 – 14 értékeket vesz fel. Ez Parker és Wong cikke alapján reális nagyságrendbe esik, jelentős mennyiségű mederformák esetén (Forrás: Wong és Parker, 2006). A szóban forgó mederszélességhez tartozó mederesés 14 cm/km feletti érték. Történelmi adat híján ezt az értéket nem tudom értékelni.

## 5.6 Kopásvizsgálat

Utolsó vizsgálatomban a szemcsék kopását használtam fel. Tegyük fel, hogy nincs lerakódás, hanem a szemcseátmérő csökkenése csak kopás útján történik meg. Ebben az esetben a hordalékhozam nem változik, hiszen nincs lerakódás és ez biztosítaná a dinamikus egyensúly fennállását. Vizsgálatomban kiszámoltam azt, hogy Dunaremetétől 5 km-enként mekkorára csökkenhetne a szemcseméret csak kopás útján. A kapott szemátmérőkhöz kiszámoltam azt az esést, amellyel az egyensúly tartható lenne. A kapott esés értékek, valamint a távolságok ismeretében egy közelítő hossz-szelvény alapját kaptam meg.

24. táblázat: Kopások okozta aprózódás számítása

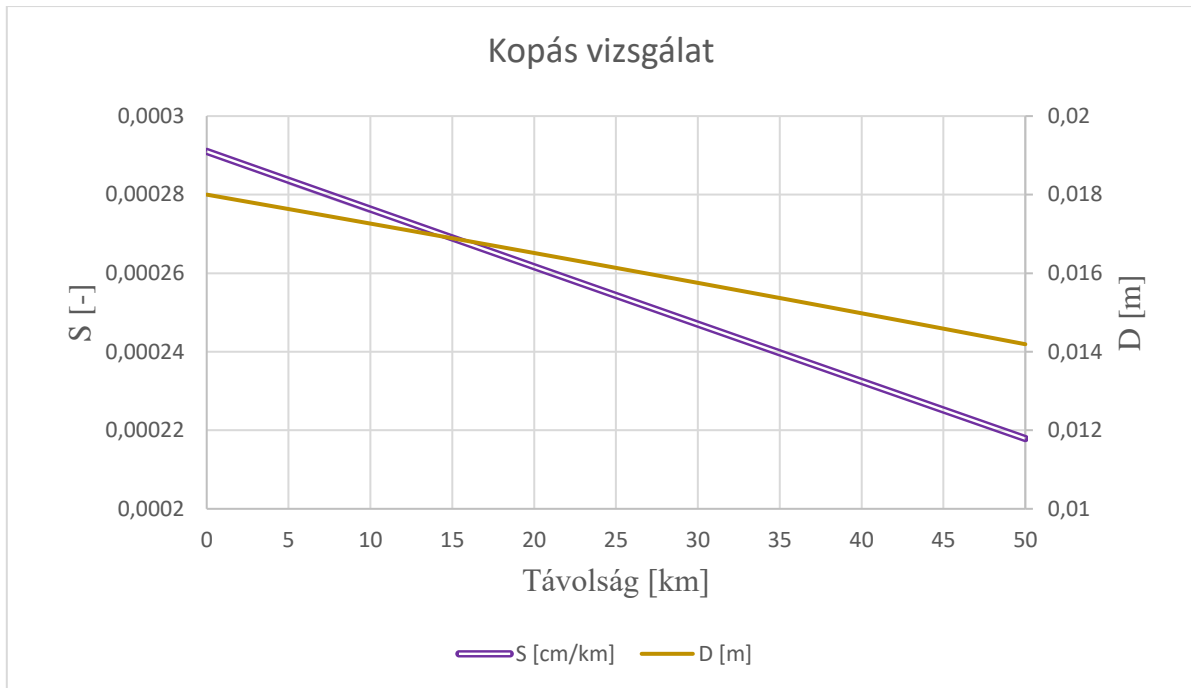
Távolság [km]	Hordaléksúly [g]	$D$ [m]
0	7,939	0,18
5	7,463	0,01763
10	7,003	0,01726
15	6,559	0,01689
20	6,131	0,01651
25	5,718	0,01614
30	5,322	0,01575
35	4,941	0,01537
40	4,575	0,01498
45	4,225	0,01459
50	3,891	0,01419

Ezeket az értékeket azon a felvételek alapján és egyenletekkel vezettem le melyeket egyszer már bemutattam a szakirodalmi következtetések című fejezetben a (3)-tól a (9)-el bezárólag.

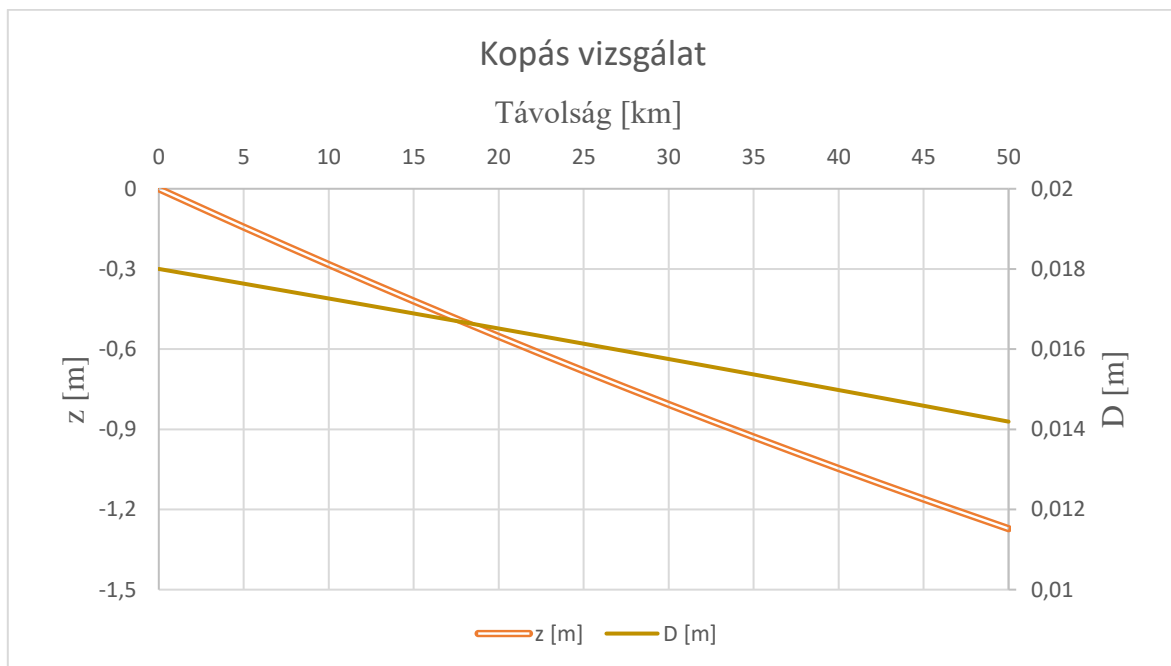
25. táblázat: Szemcseméretetekhez tartozó esések

Távolság [km]	$D$ [m]	$S$ [-]	$z$ [m]
0	0,018	0,000291	0
5	0,01763	0,000275	-0,141
10	0,01726	0,000268	-0,277
15	0,01689	0,000260	-0,409
20	0,01651	0,000253	-0,538
25	0,01614	0,000246	-0,662
30	0,01575	0,000239	-0,783
35	0,01537	0,000232	-0,901
40	0,01498	0,000224	-1,015
45	0,01459	0,000217	-1,125
50	0,01419	0,000210	-1,232

Ezekből az adatokból és számított értékekből állítottam fel az alábbi két diagramot:



37. ábra: Kopásvizsgálat 1. rész



38. ábra: Kopásvizsgálat 2. rész

A számításaim alapján azt látom, hogy pusztán a kopás is jelentősen hozzájárul az eséscsökkenéshez. Esetemben, a vizsgált 50 km-es szakaszon ~27 %-os eséscsökkenést számoltam. A valóságban dinamikus egyensúlyi állapot esetén csak ez a hatás okozna eséscsökkenést, a szelektív lerakódás hatása nem léphetne fel.

## 6. Összefoglalás

Dolgozatomban a magyarországi Felső-Duna szakaszának morfordinamikáját vizsgáltam, a dinamikus egyensúlyi állapotra összpontosítva.

Először irodalomkutatás révén feltártam a releváns múltbeli adatokat. Ezáltal a rendelkezésre álló adatok alapján megismertem a múltbeli morfordinamikai jellemzőket, és azokat kronológiailag beazonosítottam a jelentősebb folyószabályozási beavatkozásokhoz képest. Az irodalomkutatási adatok és beavatkozások alapján következtetni lehet a beavatkozások hatására. Az irodalomkutatásom fő célja azonban nem a szakasz állapotértékelése volt, hanem egy dinamikus egyensúlyi állapotot becsülő modell paraméterezéséhez és igazolásához szükséges adatok összegyűjtése. Mivel érdemi adatot Dunaremete és Nagybajcs szelvényére találtam, ezért a továbbiakban ezzel a két szelvényvel, illetve a közöttük lévő 27 km-es szakasszal foglalkoztam. A vizsgált szelvényeknél nem csak az esésükben volt jelentős különbség, hanem hordalékhozamaikban és szemcseméreteikben is. Mindezek azt mutatják, hogy a folyó dinamikus egyensúlya nem állt fenn a vizsgált, 1950 – 1970 körüli időszakban. Vizsgáltam a szemcsék kopását is a vizsgált szakaszon, ami ugyancsak azt támasztotta alá, hogy a vizsgált időszakban nem állt fenn az egyensúly. Számításaim ugyanis azt mutatták, hogy jelentős a szelektív lerakódás mértéke. Kérdés, hogy az új egyensúlyi állapot elérésekor a morfordinamikai változók mekkora értékeket vesznek fel.

A folyadékra és görgetett hordalékra felírt folytonossági egyenletek, valamint az impulzusegyenlet alapján elkészítettem egy 0D modellt, ami alatt prizmatikus mederre felírt, permanens egyenletes víz- és hordalékmozgást leíró egyenletrendszer értéket. A bemutatott egyenletrendszer külföldi szakirodalomból vettem át, ahol is ezek az alapegyenletek (további alapegyenlettel kiegészülve) 1D morfordinamikai modellt alkotnak. A modellezéssel célom a dinamikus egyensúlyi állapot vizsgálata volt. Hazai viszonylatban ilyen morfordinamikai modell felépítésére és alkalmazására nem találtam példát. Miután az alapegyenleteket ismerttettem, a két vizsgált szakaszon alkalmaztam is őket. A meghatározott paraméterek közül az  $S$  esés kiszámított értéke alapján igazoltam a modellt: mindkét szelvény esetén az irodalomkutatásom során talált eséstartományba esetek a modellezett értékek.

A *Modellvizsgálatok c.* fejezetben elsőként érzékenységvizsgálatokat hajtottam végre, amely arra ad választ, hogy az esetleges paraméterváltozások, illetve azok pontatlan felvétele miként és mennyiben befolyásolják a többi számított változót. Következő lépésben már a vizsgált szakasz dinamikus egyensúlyi állapotának vizsgálatával foglalkoztam. Azt az esést kerestem

Dunaremeténél és Nagybajcsnál is, aminél a hordalékhozamuk egyenlő nagyságú. Erre azért volt szükség, mert ha a hordalékhozam megegyezik az azt jelenti, hogy nincs sem lerakódás, sem pedig erózió. Ezt a szemcseméret tekintetében két esettel vizsgáltam: az első esetben heterogén, a másodikban homogén görgetett hordalékot feltételezve a folyószakaszon. Az eredményeim alapján azt látom, hogy további beavatkozás híján a dinamikus egyensúlyi állapot elérésekor Dunaremeténél nem csökkenne 20 cm/km alá, Nagybajcsnál pedig nem nőne ugyanezen érték fölé az esés. A vizsgálataim azonban az eljárás korlátjaira is felhívták a figyelmet: a permanens egyenletes vízmozgás megközelítéssel az áramlás menti változások nem írhatók le. A vizsgált probléma azonban ezt megköveteli, vagyis legalább permanens változó leírás szükséges pontosabb számítás eléréséhez.

Következő vizsgálatomban már szabadfolyású mederként vettem számításba a vizsgált szelvényeket. Vagyis olyan esetet vettem számításba, ahol partvédőművek nem befolyásolták a mederszélesség alakulását. Ebben az esetben az egyenletrendszeremet egy újabb egyenlettel tudtam kibővíteni, így már a szélességet is képes volt számítani a modellem. Ilyen, szabadfolyású folyókra kidolgozott modellre a külföldi szakirodalomban sem találtam példát. Az így kibővített egyenletrendszerrel két esetet vizsgáltam:

A, Napjainkban Dunaremeténél a Duna elterelése miatt a hordalékhozam és a vízhozam is jelentősen lecsökkent, valamint a mederszélesség is közel 2/3-ára szűkült. A Vízrajzi évkönyvek alapján becsülni tudtam a mederkitöltő vízhozam nagyságrendjét (1000 – 1500 m<sup>3</sup>/s). Eredményeim azt mutatták, hogy a hordalékhozam közel 10 %-ára való csökkenése idézhető elő közel 30 %-os, ~100 m-es mederszűkülést. A vizsgálataim alapján arra következtetek, hogy bár a hordalékhozam és a vízhozam csökkenése együttesen okozták a mederszűkülést, a vízhozamcsökkenés nagyobb szerepet játszott ebben. Ezzel az esettanulmánnyal bemutattam, hogy az alkalmazott számítási eljárással lehetséges vízlépcsők alvívén az új egyensúlyi medergeometria becslése. Azonban - összhangban az előző vizsgálataimban tapasztaltakkal - ilyen vizsgálatoknál elengedhetetlen megbízható mérési adatok megléte.

B, Nagybajcsi vizsgálatomnál arra voltam kíváncsi, hogy ugyanezen kibővített egyenletrendszerrel tudunk-e meghatározni múltbéli jellemzőket. Ebben a részben az érdekesség értékén változtatva becsültem a különböző mederszélességeket. Arra a következtetésre jutottam, hogy a 19. századi szabályozás előtti, a mostaninál jelentősen szélesebb meder kifejlődésében fontos szerepet játszott a hordaléklerakódás okozta fokozott mederellenállás. A

vizsgálattal rámutattam arra, hogy lehetséges múltbéli állapotok becslése. Segítségével számíthatóvá válhat például árvízszintek folyószabályozások hatására történő változása.

Az utolsó vizsgálatomban azt néztem, hogy milyen dinamikus egyensúlyi állapotot eredményezne az az eset, amikor csak kopás okoz szemcsecsökkenést, vagyis szelektív lerakódás nem lépne fel. Számításaimban meghatároztam adott távolságokhoz rendelhető kopás mértékét, majd ezekkel a szemcseméretekkel kerestem az adott távolságok szelvényeihez egyensúlyi állapotot. Azt tapasztaltam, hogy a kopás önmagában okozhat számottevő esécsökkenést, esetemben a vizsgált 50 km-es szakaszon 27 %-os csökkenést számoltam.

Az általam bemutatott vizsgálatok, illetve egyenletrendszerek használata egy kezdetleges megoldást nyújt arra, hogy a jövőben meg lehessen jósolni egy folyamtnak a természetes változásait, illetve meg tudjuk határozni azt, hogy egy adott műtárgy, vagy beavatkozás miként hat majd a folyó medergeometriájára. Az eljárás segítségével meghatározható a dinamikus egyensúlyi állapot, vagyis a morfodinamikai paraméterek közelítő értéke. Ehhez az alkalmazott egyenletrendszer és vizsgálatok adnak útmutatást. A modellel olyan problémák vizsgálhatók, mint például partmenti kavicspadok (pl. kavicspadok a véneki Duna-szakaszon) stabilitása is: amennyiben azok az egyensúlyi szélességhez közelítik a medergeometriát, úgy feltehetően nem csak átmenetei mederformaként jelennek meg. De ugyancsak hazai lehetséges esettanulmány a magyarországi Dráva vizsgálata, aminek felvízét a szomszédos országok vízlépcsővel építették be, valamint aminek az Eszék feletti szakaszán a partvédőművek karbantartásának hiánya miatt a folyószakasz szabadfolyásúvá válása figyelhető meg a II. világháború óta.

A vizsgálataim során arra jutottam, hogy a dinamikus egyensúlyi állapotvizsgálatához elengedhetetlen a megbízható, pontos méréseken alapuló adathalmaz a folyószakasz morfodinamikai állapotára vonatkozóan. Azon belül is hangsúlyos a mederkitöltő állapotot jellemző adatok megléte, ami felhívja a figyelmet a mederkitöltő vízhozamkor végzett terepi mérések kiemelkedő fontosságára.

Vizsgálataim arra is rámutatnak, hogy a bemutatott számítási eljárást 1D leírásra (folyásirányban változó) szükséges kibővíteni, a még pontosabb és átfogóbb vizsgálatok érdekében. Továbbá, a helyes hordaléktranszport modell megválasztása is sarkalatos, amit érzékenységvizsgálatokkal lehet kellőképpen megtámogatni. Vegyes szemösszetételű meder esetén a modell pontosságán jelentősen javítana, ha a görgetett hordalék anyaga több frakció keverékeként lenne számításba véve.



## 7. Ábrajegyzék

1. ábra: Duna a 19.századi szabályozás előtt (Forrás: Szombati Dóra diplomamunka 2016).....	7
2. ábra: A 19. századi szabályozás után (Forrás: Szombati Dóra diplomamunka 2016).....	8
3. ábra: A Duna térképe Szap és Nagybajcs közti szakaszról a szabályozás előtt (Forrás: DuRe Flood project 2015).....	8
4. ábra: Térkép Szaptól Nagybajcsig 1869-1877 (Forrás: DuRe Flood project 2015).....	8
5. ábra: Duna szabályozás előtt/után összehasonlítás (Forrás: DuRe Flood project 2015).....	9
6. ábra: A Duna szabályozás utáni állapota Szap- Nagybajcs 1941 (Forrás: DuRe Flood project 2015)	9
7. ábra: Ortofotó a Duna jelenlegi állapotáról (2012) (Forrás: DuRe Flood project 2015).....	9
8. ábra: Dunaremete 1952-es mederfelvételi ábrája (Forrás: 1959. évi Vízirajzi Évkönyv).....	11
9. ábra: Dunaremete 1969-es mederfelvételi ábrája. (Forrás: 1970. évi Vízirajzi Évkönyv).....	12
10. ábra: Dunaremete 1979-es mederfelvételi ábrája (Forrás: 1980. évi Vízirajzi Évkönyv).....	12
11. ábra: 1975.évi Vízirajzi Évkönyv Hordalékhozam táblázata (Forrás: 1975. évi Vízirajzi Évkönyv)	15
12. ábra: Görgetett hordaléksúly és a Vízhhozam összefüggése (Forrás Bogárdi János- Vízfolyások hordalékszállítás).....	15
13. ábra: Dunaremete és Nagybajcs éves hordalékhozamai.....	16
14. ábra: Osztrák vízlépcsők telepítései (Forrás: <a href="https://w.owr.at/index.php?page=schleusenzeiten-donau">https://w.owr.at/index.php?page=schleusenzeiten-donau</a> ).....	17
15. ábra: Vízlépcsők telepítésének szemléltetése a hordalékhozam diagramon.....	17
16. ábra: Aprózódás szemléltetése különböző szakaszokon (Forrás: DuRe Flood project 2015).....	19
17. ábra: Dunaremete 1979-es mederfelvétel és a vízálláshoz tartozó vízhozamai (Forrás: 1980. évi Vízirajzi Évkönyv).....	20
18. ábra: Duna hosszszelvény ábrázolása (Forrás: Katarina Holublová - Impact of hydropower schemes at bedload regime and channel morphology of the Danube River).....	22
19. ábra: A 0D modell mederfeltételezésének szemléltetése (Forrás: <a href="http://hydrolab.illinois.edu/people/parkerg/powerpoint_lectures.htm">http://hydrolab.illinois.edu/people/parkerg/powerpoint_lectures.htm</a> ,Chapter 5.ppt.).....	23
20. ábra: Megközelítéshez hasznosított sematikus ábra (Forrás: <a href="http://hydrolab.illinois.edu/people/parkerg/powerpoint_lectures.htm">http://hydrolab.illinois.edu/people/parkerg/powerpoint_lectures.htm</a> , Chapter 3.ppt.).....	23
21. ábra: Szabadfolyású medrek csúsztatófeszültség- szemcseméret diagramja (Forrás:.....)	27
22. ábra: Hordalékhozam és a csúsztató feszültség a szélesség függvényében Dunaremete.....	35
23. ábra: Hordalékhozam és a mélység kapcsolata a szélesség függvényében Dunaremete.....	35
24. ábra: A Hordalékhozam és a csúsztatófeszültség összefüggése a szélesség függvényében Nagybajcs.....	37
25. ábra: A hordalékhozam és a vízmélység kapcsolat a szélesség függvényében Nagybajcs.....	37
26. ábra: Érzékenységvizsgálat a szemnagyságra.....	38
27. ábra: Érzékenységvizsgálata szemcseméret nagyságára.....	39
28. ábra: Dinamikus egyensúlyi vizsgálat.....	41
29. ábra: Dinamikus egyensúlyi vizsgálat 2.eset.....	42
30. ábra: Hordalékhozam vizsgálat.....	43
31. ábra: Hordalékhozam vizsgálat.....	44
32. ábra: Dunaremete szakasz napjainkban.....	45
33. ábra: Dunaremete hordalék változásának diagramja.....	46
34. ábra: A táblázatban foglalt adatok ábrázolása.....	47
35. ábra:2. eset ábrázolása.....	48
36. ábra: Nagybajcs simasági (érdességi) vizsgálat szemléltetése.....	50
37. ábra: Kopás vizsgálat 1.rész.....	52
38. ábra: Kopás vizsgálat 2.rész.....	52

## 8. Táblázatjegyzék

1. táblázat: Vízrajzi évkönyvek hordalékhozam adatai (Forrás: 1955-1977. évi Vízrajzi Évkönyvek)	16
2. táblázat: Összefoglaló táblázat a talált adatokhoz	28
3. táblázat: Dunaremete, peremfeltételek	30
4. táblázat: Dunaremete, számolt értékek	30
5. táblázat: Nagybajcs, adatok a tervezett szélességgel	31
6. táblázat: Nagybajcs, adatok a megvalósult szélességgel	31
7. táblázat: Számított értékek	31
8. táblázat: Adatok a sarkantyúzott szélességgel	32
9. táblázat: Számolt értékek	32
10. táblázat: Dunaremete hordaléktranszport modelleredmények	32
11. táblázat: Nagybajcs hordaléktranszport modellek	33
12. táblázat: Érzékenység vizsgálat a szélesség függvényében	34
13. táblázat: Érzékenység vizsgálat a szélesség függvényében	36
14. táblázat: Érzékenység vizsgálat a szemnagyság változásával, Dunaremete	38
15. táblázat: Érzékenység vizsgálat a szemcseméret függvényében	39
16. táblázat: Esés vizsgálat	40
17. táblázat: Esés vizsgálat 2.eset	41
18. táblázat: Hordalékhozam vizsgálat Dunaremete	43
19. táblázat: Hordalékhozam vizsgálat Nagybajcs	44
20. táblázat: Számított értékek	46
21. táblázat: Szélesség és esés változása a különböző hozamokra	47
22. táblázat: 2. eset vizsgálata	48
23. táblázat: Simasági vizsgálat	50
24. táblázat: 5 km-enkénti kopások	51
25. táblázat: Szemcseméretekhez tartozó esések	51

## 9. Hivatkozások

- Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Építőmérnöki Kar, Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszék: *Hidraulika I, egyetemi jegyzet*, Budapest, 2004.
- C. Li, M. J. Czapiga, E. C. Eke, E. Viparelli & G. Parker: *Variable Shields number model for river bankfull geometry: bankfull shear velocity is viscositydependent but grain size-independent*, *Journal of Hydraulic Research*: 53:1, 36-48, 2015.
- B. Csiti: *Görgetett hordalékmérési eljárások tesztelése a hazai Felső-Dunán*, BME-ÉMK MSc diplomamunka, Budapest, 2018.
- D. Cs. Szombati: *A Szap-Gönyű közötti Duna-szakasz hidromorfológiai vizsgálata*, BME-ÉMK BSc diplomamunka, Budapest, 2016.
- D. Ihrig: *A magyar vízszabályozás története (History of the Hungarian water regulation)*, Budapest: Országos Vízügyi Hivatal, 1973.
- E. Eke, G. Parker, Y. Shimizu: *Numerical modeling of erosional and depositional bank processes in migrating river bends with self-formed width: Morphodynamics of bar push and bank pull*, *Journal of Geophysical Research: Earth Surface* 119 (7), 1455-1483.
- Észak-Dunántúli Vízügyi Igazgatóság: *Nagyvízi mederkezelési terv (High water river management plan) 01.nmt.02. (egyeztetési terv) - Duna 1809,76 - 1786,00 fkm*, 2014.
- G. Parker: *1D Sediment Transport Morphodynamics with applications To Rivers and Turbidity Currents*, e-book, [http://hydrolab.illinois.edu/people/parkerg/morphodynamics\\_e-book.htm](http://hydrolab.illinois.edu/people/parkerg/morphodynamics_e-book.htm), 2004.
- G. Parker: *Selective Sorting and Abrasion of River Gravel. II: Applications*, *Journal of Hydraulic Engineering*: 117(2), 1991.
- G. T. Török and S. Baranya: *Morphological Investigation of a Critical Reach of the Upper Hungarian Danube*, *Period. Polytech. Civ. Eng.*, vol. 61, no. 4, pp. 752–761, 2017.
- Google Maps, online légifelvétel, Google, <https://www.google.hu/maps>, 2020.
- J. Bogárdi: *A hordalékmozgás elmélete*. Budapest, Hungary: Akadémiai Kiadó, 1955.
- K. Holubová, M. Comaj, M. Lukác, K. Mravcová, Z. Capeková, and M. Antalová: *Final report in DuRe Flood project - 'Danube Floodplain Rehabilitation to Improve Flood Protection and Enhance the Ecological Values of the River in the Stretch between Sap and Szob*, Bratislava, 2015.
- K. Holubová, Z. Capeková, and J. Szolgay: *Impact of hydropower schemes at bedload regime and channel morphology of the Danube River*, in *River Flow 2004*:

*Proceedings of the Second International Conference on Fluvial Hydraulics*, 2004, no. 1, pp. 135–142.

- K. Naito and G. Parker: *Can Bankfull Discharge and Bankfull Channel Characteristics of an Alluvial Meandering River be Cospecified From a Flow Duration Curve?*, *Journal of Geophysical Research: Earth Surface* 124 (10), 2381-2401.
- K. Tőry: *A Duna és szabályozása*, Budapest, , Hungary: Akadémiai Kiadó, 1952.
- L. Rákóczi: *A Duna Szap-Gönyű közötti szakaszának hajózási viszonyait javító beavatkozások vizsgálata (Investigation of interventions for navigation improvement at the Danube channel between Szap and Szob)*, Szakértői tanulmány, 2004.
- M. H. García: *Sediment Transport and Morphodynamics*, in *Sedimentation engineering: processes, measurements, modeling, and practice*, *Manuals and reports on engineering practice*, ASCE, Ed. Reston, 2008, pp. 21–163.
- M. Liedermann, P. Gmeiner, A. Kreisler, M. Tritthart, and H. Habersack: *Insights into bedload transport processes of a large regulated gravel-bed river*, *Earth Surf. Process. Landforms* 43(2), 2017.
- M. Wong and G. Parker: *Reanalysis and Correction of Bed-Load Relation of Meyer-Peter and Müller Using Their Own Database*, *Journal of Hydraulic Engineering* 132(11), 2006.
- Országos Vízügyi Főigazgatóság, *Vízrajzi évkönyvek*. Vízügyi honlap: <https://www.vizugy.hu/print.php?webdokumentumid=1524>, 2020.
- Országos Vízügyi Főigazgatóság, *Vízügyi honlap*: <http://www.vizugy.hu/>, 2020, <https://www.vizugy.hu/print.php?webdokumentumid=1524>
- Österreichische Wasserrettung honlapja: <https://w.owr.at/index.php?page=schleusenzeiten-donau>, 2020.
- S. A. Schumm (1981): *Evolution and Response of the Fluvial System*, *Sedimentologic Implications*, DOI: <https://doi.org/10.2110/pec.81.31.0019>.
- Z. Károlyi (1947): *Kísérletek a hordalékfogóval*, *Vízügyi Közlemények*, 29. évf., pp. 100-107.

## **10. Köszönetnyilvánítás**

Köszönöm Dr. Török Gergely Tihamér konzulensemnek, hogy végig támogatott és segítette a dolgozatom haladását, valamint minden esetlegesen felmerülő kérdésemre segítőkészen rendelkezésemre állt.

# 11. Függelékek

## 11.1 Kavicsra kidolgozott, egyfrakciós hordaléktranszport modellek

Ezt a fejezetet Parker összefoglalója alapján ismertetem (Parker, 2004).

Többféle transzport modell létezik, ami azt takarja, hogy több elmélet is született, ezek mind tapasztalati képletek. A dimenziómentes fajlagos hordalékhozamot becsülik ( $q_b^*$ -t) a dimenziómentes csúsztatófeszültség ( $\tau^*$ ) függvényében. A dimenziómentes kritikus csúsztatófeszültség ( $\tau_c^*$ ) a különböző modellek esetén eltérő lehet, az egyes modellek esetén azonban állandó értéket vesz fel (Parker, 2004).

1. Ashida & Michiue (1972)

$$q_b^* = 17 * (\tau^* - \tau_c^*) * (\sqrt{\tau^*} - \sqrt{\tau_c^*}) ; \tau_c^* = 0,05 \quad (\text{F.1})$$

2. Engelund & Fredsoe (1976)

$$q_b^* = 18,74 * (\tau^* - \tau_c^*) * (\sqrt{\tau^*} - 0,7 * \sqrt{\tau_c^*}) ; \tau_c^* = 0,05 \quad (\text{F.2})$$

3. Fernandez Luque & van Beek (1976)

$$q_b^* = 5,7 * (\tau^* - \tau_c^*)^{1,5} ; \tau_c^* = 0,0455 \quad (\text{F.3})$$

4. Parker (1979)

$$q_b^* = 11,2 * (\tau^*)^{1,5} * \left(1 - \frac{\tau_c^*}{\tau^*}\right)^{4,5} ; \tau_c^* = 0,03 \quad (\text{F.4})$$

5. Meyer-Peter és Müller (1948)

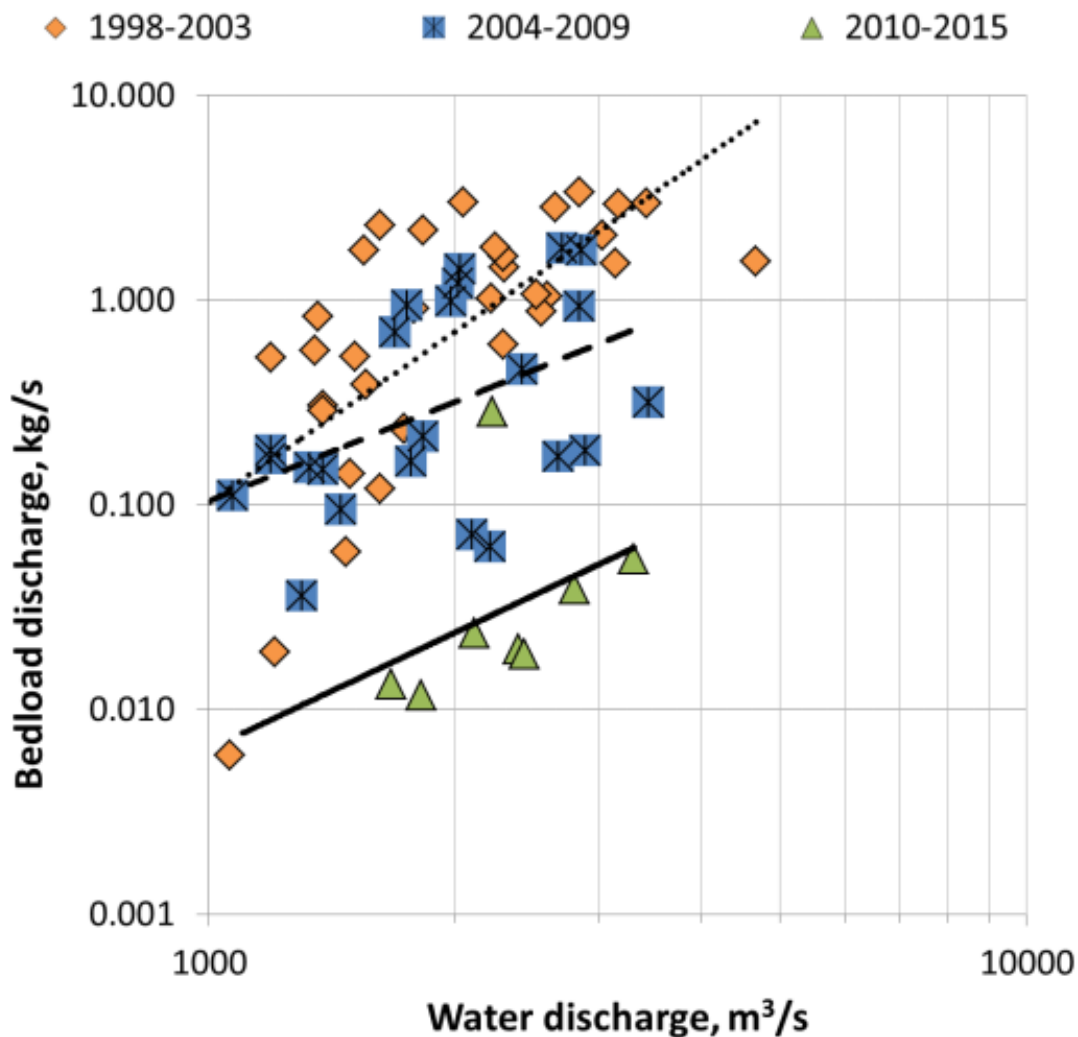
$$q_b^* = 8 * (\tau^* - \tau_c^*)^{\frac{3}{2}} ; \tau_c^* = 0,047 \quad (\text{F.5})$$

6. Wong and Parker

$$q_b^* = 3,97 * (\tau^* - \tau_c^*)^{\frac{3}{2}} ; \tau_c^* = 0,0495 \quad (\text{F.6})$$

## 11.2 Vízhhozam – Görgetett hordalékhozam összefüggések

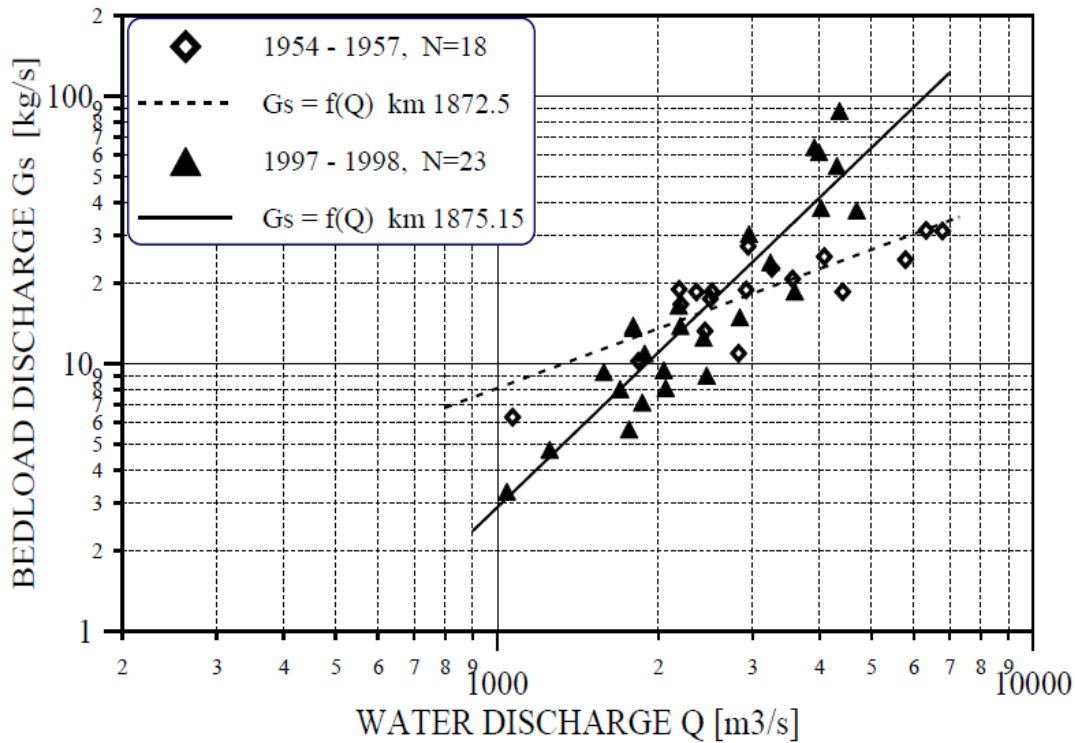
Az alábbi fejezetben azokat a  $Q - Q_b$  ábrákat gyűjtöttem össze, amik magyarországi Felső-Dunához közeli szelvényekre lettek kidolgozva



F.1.. ábra: Vízhhozam-görgetett hordalékhozam összefüggés a Duna 1806 fkm (1998 és 2015 közötti adatok) vonatkozásán, Medvei-híd, Magyarország (Forrás: Török et al, 2017)

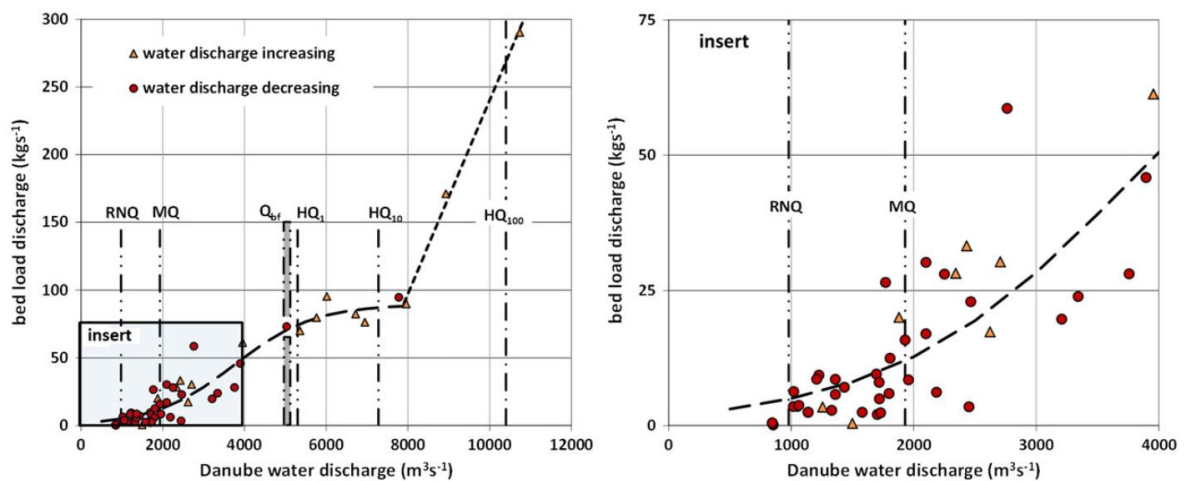
A méréseket az ún. kicsinyített Károlyi-mintavevővel végezte az Észak Dunántúli Vízügyi Igazgatóság vízrajzi mérőcsapat megbízhatósága. Mivel a kicsinyített Károlyi-mintavevőről bebizonyosodott a Felső-Dunán való pontatlan alkalmazhatósága (Forrás: Csiti, 2018), az ábrán látható értékek is fenntartással kezelendők!





F.2. ábra: Vízhozam-görgetett hordalékhozam összefüggés a Duna 1872,5 (1954 és 1957 közötti adatok) és 1875,15 fkm-ére (1997 és 1998 közötti adatok) vonatkozóan, Szlovákia (Forrás: Holubová et al., 2004)

A méréseket ismeretlen műszerrel, feltehetően szlovák fejlesztésű műszerrel végezték. A műszer megbízhatóságáról nincs adatunk.



F.3. ábra: Vízhozam-görgetett hordalékhozam összefüggés a Duna 1886 fkm-ére vonatkozóan, Bad Deutsch-Altenburgnál, Ausztriában (Liedermann et al., 2017)

A méréseket az ún. BfG műszerrel végezték, ami korunk egyik legmegbízhatóbb görgetett hordalékmintavevő műszerének tekinthető.