

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

Építőmérnöki Kar

Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszék

A Felső-Duna régmúlt szabályozásainak hatásvizsgálata 1D morfodinamikai modellel

Tudományos Diákköri Konferencia 2022

Készítette: Nyiri Emese

Konzulensek: Dr. Török Gergely Tihamér

Tartalom

Absztrakt	3
1. Bevezetés	4
2. Irodalomkutatás	8
2.1. Mederalak	11
2.1.1. Szélesség	12
2.1.2. Mederesés	12
2.1.3. Hossz-szelvény	12
2.2. Görgetett hordalék	14
2.2.1. Mennyiség	14
2.3. Szemösszetétel	15
2.3.1. Jellemző szemcseméretek.....	15
2.4. Szelektív erózió	19
3. Modellépítés	19
3.1. Alapegyenletek	20
3.1.1. 1D modell összefüggései.....	21
4. Modelligazolás	27
5. Modellvizsgálatok	29
5.1. Érzékenységvizsgálat	29
5.1.1. Vízhozam.....	30
5.1.2. Szélesség	31
5.1.3. Mederérdesség (Cz).....	33
5.1.4. Hordalékhozam.....	34
5.2. Fonatos ágrendszer szabályozása	36
5.3. Sarkantyúsor beépítése a modellbe	39
5.4. Vízlépcső beépítése a modellbe	43
7. Ábrajegyzék	49
8. Táblázatjegyzék	49
9. Hivatkozások	50
10. Köszönetnyilvánítás	52

Absztrakt

Vízfolyások medergeometriáját vizsgálva megállapítható, hogy azok folyamatos alakváltozáson mennek keresztül, amik egy ún. dinamikus egyensúlyi állapot felé tartanak. Azt elérve is megfigyelhető további mederváltozás, azonban azok hatására nem várható a dinamikus egyensúlyi állapottól való szignifikáns eltérés. Jelentősebb természetes vagy mesterséges folyamatok hatására a dinamikus egyensúlyi állapot jelentős változása várható. Ekkor kardinális kérdés, hogy milyen új medergeometria, illetve áramlási viszonyok (tetőző vízszint) várhatók.

Dolgozatomban a magyarországi Felső-Dunán vizsgálom a múltbéli beavatkozások dinamikus egyensúlyi állapotra gyakorolt hatását. A 2020. évi TDK dolgozatomban már megállapítottam egy 0D hordalékmodell kidolgozásával, hogy az egyensúlyi állapot az említett szakaszon nem áll fenn, hanem a szelektív erózió miatt folyamatos lerakódás megy végbe. Az előző kezdetleges modellel a beavatkozások (mederszűkítés, sarkantyúzás, vízlépcső beépítése) hatásának mértékét tudtam megállapítani egy-egy szelvényre. Jelen kutatómunkában a már megalkotott 0D modell fejlesztését tettem meg, annak 1D modellre való kiterjesztésével, valamint a vegyes szemösszetétel figyelembevételével. Ezzel nemcsak pontosabb eredmények várhatók, de az 1D modellel időbeni becslést lehet adni egy-egy beavatkozás hatására. A modellépítés során továbbá szükséges olyan innovatív modellezési metodika kidolgozására, illetve alkalmazására, amivel a sarkantyúsor hatása (az áramlási viszonyokra és a hordalékmozgásra) számításba vehető 1D megközelítésben.

A vizsgálatom fontos pillérét képezi az alapos irodalomkutatás, amivel célom a XIX. századi folyószabályozási munkák előtti időszaktól a beavatkozások kronológiájának, valamint morfordinamikai adatok (mederszintek, mederanyag, hordalékhozam, stb.) felkutatása és a rendelkezésre álló adatok elemzése. A vizsgálataimat ezen adatok alapján paraméterezett 1D modell segítségével végeztem el.

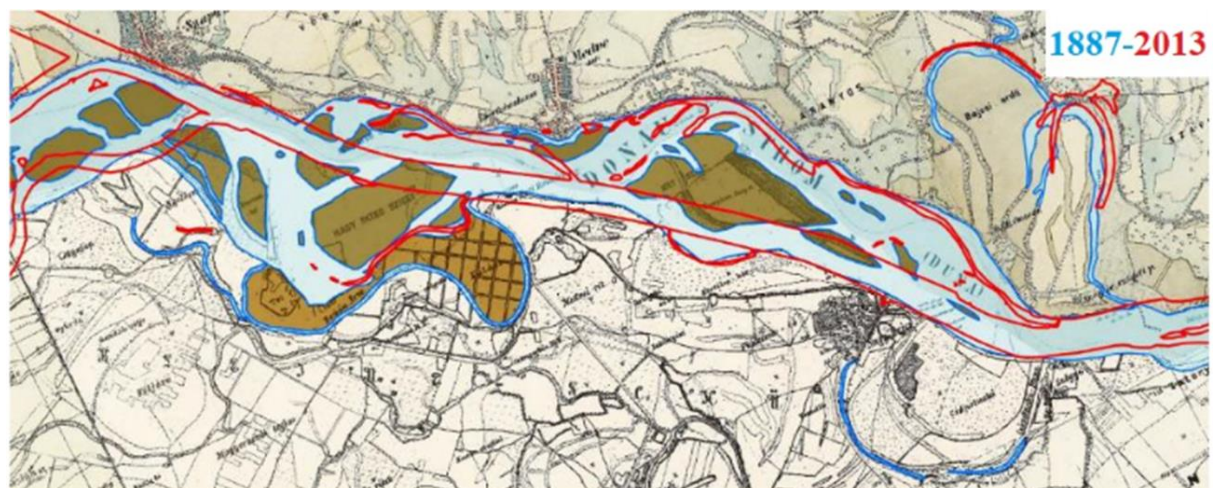
1. Bevezetés

Minden folyó esetében megfigyelhetőek morfológiai változások az idő teltével, amik hatását a dinamikus egyensúlyi állapothoz való viszonyítással szükséges jellemezni. A változásokat okozhatja mesterséges beavatkozás, illetve természetes jelenség is. Manapság egyre nagyobb hangsúlyt fektetünk az előrejelzésekre, amely a folyók morfológiai jellemzőinél is fontos lehet, gondolva itt a medergeometriai és a hidraulikai változásokra is. A természetes jelenségek bekövetkeztét sokszor csak becsülni tudjuk, viszont a mesterséges beavatkozások komoly tervezési munkálatok vagy egyeztetések előzik meg, amik megkönnyítik azok hatásának előre jelezhetőségét. A Felső-Dunán eszközölt beavatkozások kapcsán megfigyelhető, hogy az egyes beavatkozások olyan medergeometriai változásokat indukáltak, amelyet a tervezésnél nem, vagy nem tudtak számításba venni. Ilyen például egy felvízi beavatkozás medereróziójához köthető alvízi hordaléktöbblet okozta lerakódás és kavicspad épülés, vagy akár mederszint emelkedés. Ilyen esetben a felvízi beavatkozás hajózási nehézségeket okozhat az alvízen, ami újabb beavatkozásokat követel majd meg az így problémássá váló folyószakaszon.

Dolgozatomban a magyarországi Felső-Duna egy szakaszával foglalkozok és azon a mesterséges beavatkozások hatásait vizsgálom. A Duna folyó megélt már számtalan szabályozási műveletet, gondolva itt akár a 19. századi szabályozásra, ahol az akkori fonatos ágrendszerből alakítottak ki egy főmedret, amit a hajózhatósági feltételek javulását, valamint az árvízlevezetőképesség növelését várták (1. és 2. ábra).



1. ábra: A magyarországi Felső-Duna szabályozás előtti fonatos jellege (Forrás: Szombati, 2016)

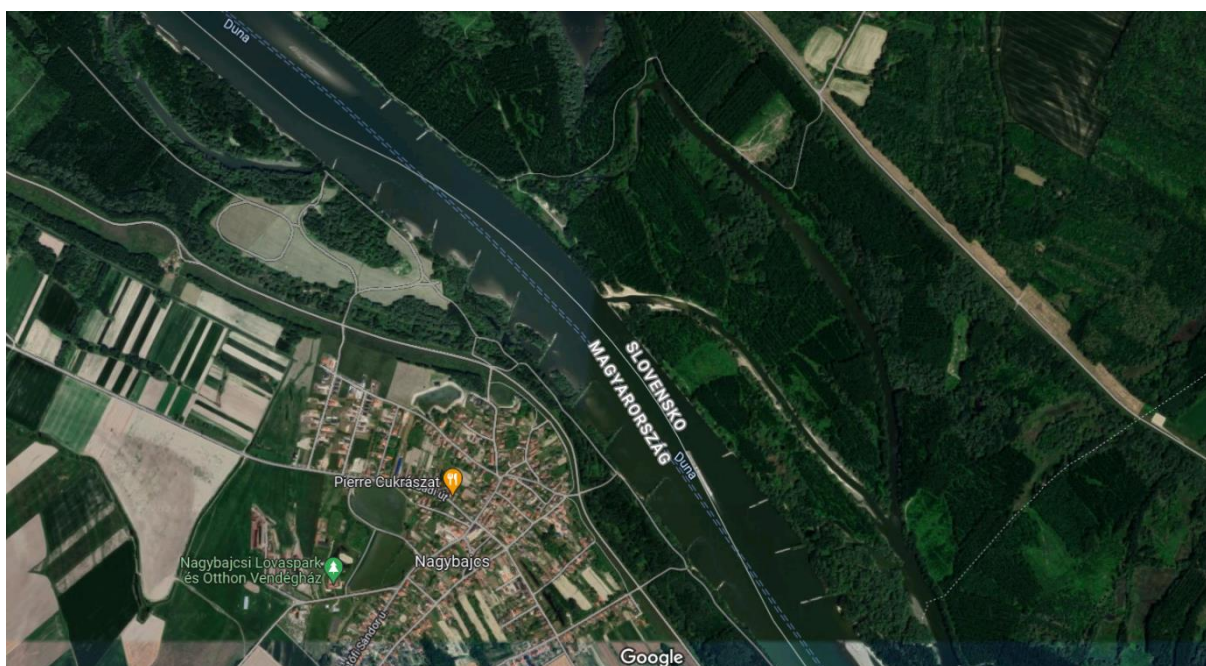


2. ábra: Összehasonlító ábra a vizsgált szakasz szabályozás előtti/utáni állapotáról (Forrás: DuRe Flood project, 2015)



3. ábra: Szabályozás utáni állapot a nagybajcsi szakaszon (Forrás: DuRe Flood project, 2015)

Ahogy a 3. és 4. ábra is illusztrálja, egy szakaszokon sarkantyúk, vagy akár sarkantyúsorok is épültek, amiktől elsősorban a hajózhatóság számára előnyös morfordinamikai folyamatok kiváltása várható.



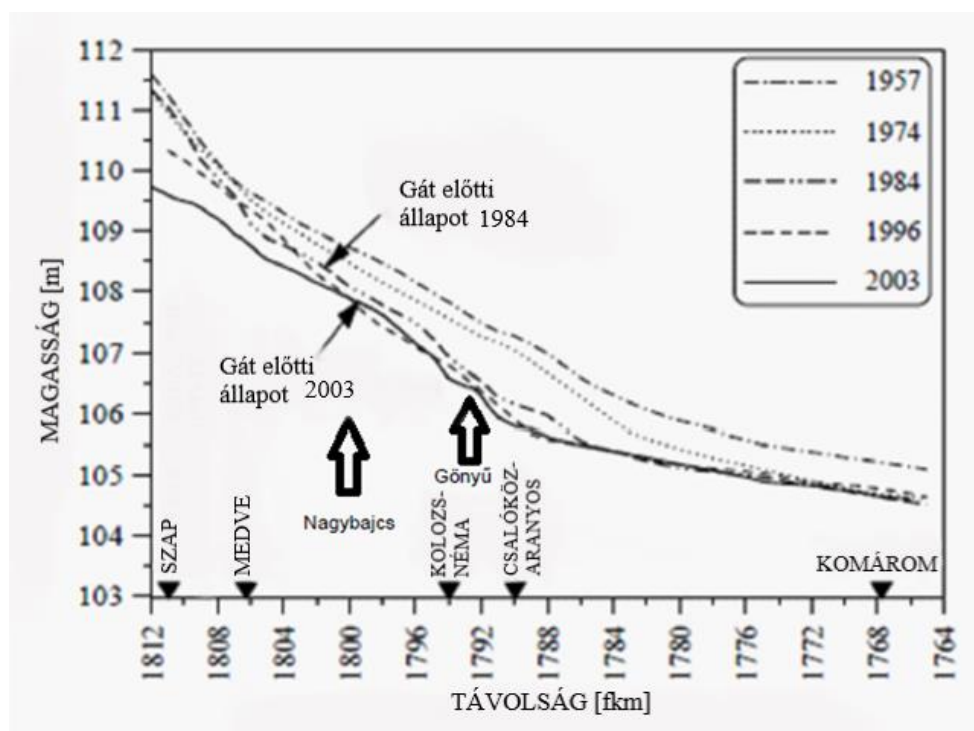
4. ábra: Sarkantyúsor Nagybajcsnál (Forrás: Google Maps, 2022)

A felsoroltakon felül még megemlítendő a bösi vízlépcső megépítése és üzembe helyezése a vizsgált folyószakasz felvívén, ami a hordalékfolytonosságot borította fel. Vagyis az 1992-es elterelés óta a vizsgált szakaszra jelentősen kisebb görgetett hordalék érkezik.

A vizsgálatom vezérfonalát az alábbi kérdés adja: a folyószabályozási beavatkozások milyen hatást gyakoroltak a folyó egyensúlyi állapotára? Gondolva itt arra, hogy egy-egy akár kisebb

szabályozási művelet is kibillentheti-e a folyót az egyensúlyi állapotából? A legfontosabb kérdés, hogy tudjuk-e előre jelezni az új dinamikus egyensúlyi állapotot, illetve annak beálltához szükséges időtávot? A kérdésekre egy saját fejlesztésű 1D morfordinamikai modell segítségével keresem a választ.

Munkám fontos és nélkülözhetetlen pillérét képezi többek között levéltárakban fellelt irodalmi adat és leírás. Az adatmennyiségek alapján kiválasztottam a modellezés szempontjából legideálisabb szakaszt. Ez a szakasz a Dunaremete (1825,5 fkm) és a Dunaalmás (1752,0 fkm) között helyezkedik el, ugyanis erre a szakaszra találtam megbízható peremfeltételeket. Morfordinamikai szempontból egy meglehetősen összetett szakasról beszélhetünk, hiszen a szakaszon akár egyidejűleg vízlépcső, sarkantyúsor, valamint mesterséges mederátvágás és mederszűkítés hatása is jelentkezett. Továbbá a szakasz természetes állapotának egyedisége, hogy a kezdő és a végszelvénye között majdnem félúton, Gönyű térségében (~1790,0 fkm) egy hirtelen eséstörés figyelhető meg. Ezt a törést több szakirodalom is alátámasztja (5. ábra), illetve a felmért hossz-szelvények is ezt igazolják.



5. ábra: Duna hossz-szelvény ábrázolása (Forrás: Holublová et al., 2004)

A fenti ábrán látható (5. ábra), hogy Gönyű felett sokkal meredekebb eséssel írható le, ahol a szakasz esése (30-45 cm/km), míg a Gönyű alatti szakaszon kis esés figyelhető meg (9-8 cm/km, vagy néhol még ettől is kisebb értéket vesz fel).

A dolgozatom fókuszában a beavatkozások hatásvizsgálata szerepel. A 2020. évi TDK dolgozatomban bemutatott 0D modell egy-egy szelvényre alkalmazható dinamikus egyensúlyi állapot becslésére alkalmas. Azonban jelen dolgozatomban nem pusztán egy-egy szelvény dinamikus egyensúlyi állapotának becslése volt, hanem adott folyószakasz morfológiájának időbeli változását akartam számításba venni. Emiatt volt szükséges a 0D modell továbbfejlesztése egy 1D morfodinamikai modellre.

A dolgozatomban ezért az alábbi célokat fogalmaztam meg: 1D morfodinamikai modell felépítése, ami képes (1) a vizsgált szakaszra jellemző vegyes szemösszetétel számításba vételére és (2) különböző folyószabályozási beavatkozások morfodinamikai hatásának implementálására. A modellt mért adatok alapján validálom, majd segítségével következtetéseket vonok le az egyes beavatkozásokról.

Meggyőződésem, hogy a kérdéskör vizsgálata nagy érdeklődésre ad számot, hiszen segítené a későbbi szabályzások tervezését, illetve peremfeltételeket tud adni más szakágak számára.

2. Irodalomkutatás

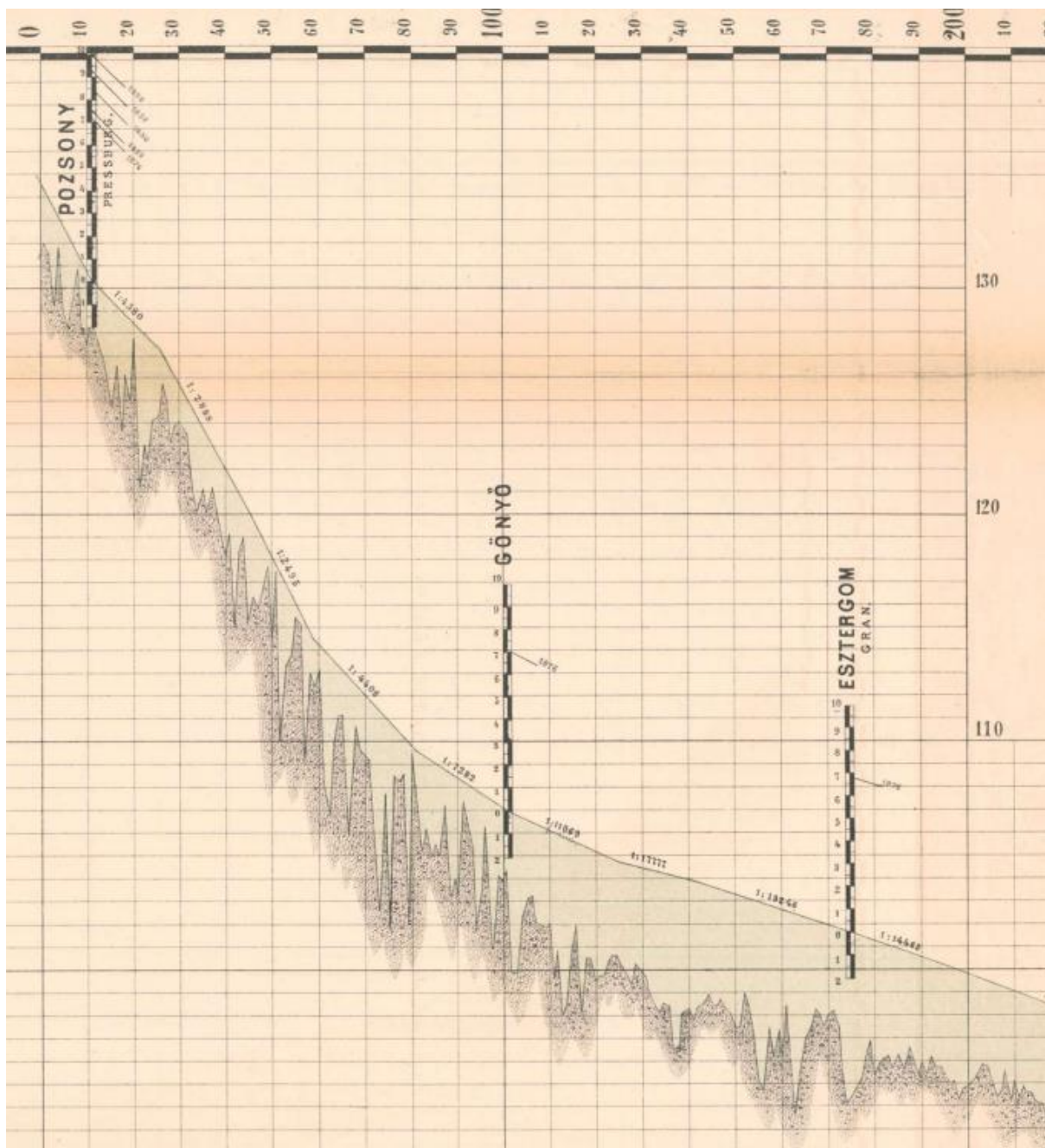
Az irodalomkutatás során több szakirodalmi forrást dolgoztam fel. Ezek közül már az előző 2020-as TDK munkámhoz használt szakirodalmak biztos alapot nyújtottak. A már 2020-ban is nagy segítséget szolgált „Bogárdi János: Vízfolyások hordalékszállítása” című könyve és a „Tőry Kálmán: A Duna szabályozása” című könyve, ezek jelen kutatásomhoz is további adatokkal és leírásokkal szolgált. A már 2020-ban hasznosított Vízrajzi Évkönyvek akkor kigyűjtött adatait bővítettem a dunaalmási szelvény adatokkal is. Ezen felül nagy segítségemre szolgált a Vízügyi Levéltári nyári kutatómunkám, ahol számos értékes adatot szerezhettem be például a VITUKI Tanulmánytár 1954-es feljegyzéseiből.

Az irodalomkutatásra nagy hangsúlyt fektettem, hiszen a modellparaméterezés és a modelligazolást is az irodalomkutatástól várom. Továbbá, a több időszakból összegyűjtött adatokból megállapítást tudok tenni a morfológiai folyamatokra. Főleg három beavatkozás hatását terveztem modellezni, így azokat megelőző, illetve követő adatok gyűjtése volt a célom. A három beavatkozás egyike a 19. századi szabályozás (a fonatos ágrendszerbe való egy főág kiépítése), a sarkantyúk beépítése a 20. század első felében, valamint a bösi vízlépcső megépítése. Az irodalomkutatás alapján összegyűjtött adatokat forrás alapján egy táblázatba foglaltam (1. táblázat). A táblázatban a kihúzott egységekre ezen kutatás keretében nem találtam még számszerű adatot. A feltüntetett források és információk a teljes szakaszt lefedik, tehát Dunaremetétől Dunaalmásig foglalják magukba a keresett adatokat.

1. táblázat: Irodalomkutatás összefoglaló táblázat

Paraméter/ Időszak	Mederszint	Mederfelvétel	Mederanyag	Görgetett hordalék D ₅₀	Szemösszetétel	Vízhozam vagy Q-H görbe	Vízmélység	Mederszélesség	Hordalékhozam	Esés
19. századi szabályozás előtt (1881- 1885)	Lanfranconi, 1882	-	-	-	-	-	Lanfranconi, 1882	Becsült korábbi modell eredményből (Nyiri, 2020)	-	Lanfranconi, 1882
Szabályozás után, de a sarkantyúk előtt (1936- ig)	Tóry, 1952	-	-	-	-	Tóry, 1952	Tóry, 1952	Tóry, 1952	VITUKI, 1954; Tóry, 1952	Tóry, 1952
Sarkantyúk után, de a vízlépcső előtt (1936- 1992)	VITUKI, 1970	Vízrajzi Évkönyvek	VITUKI, 1970	Vízrajzi Évkönyvek	VITUKI, 1954 VITUKI, 1970	Vízrajzi Évkönyvek	Vízrajzi Évkönyvek	Vízrajzi Évkönyvek	VITUKI, 1954 Vízrajzi Évkönyvek	VITUKI, 1970
Vízlépcső megépítése után (1992- től)	Van	Van	Van	Van	Van	Van	Van	Van	Van	Van

Ahogy az 1. táblázat is mutatja a 19. századi szabályozás előtt nem sok érdemi adat állt rendelkezésemre, viszont a szakirodalmi kutatásom alapján egy nagyon lényeges adathalmazra tettem szert, amely a szabályozás előtti Duna hossz-szelvénye (6. ábra, Forrás: Lanfranconi, 1882).



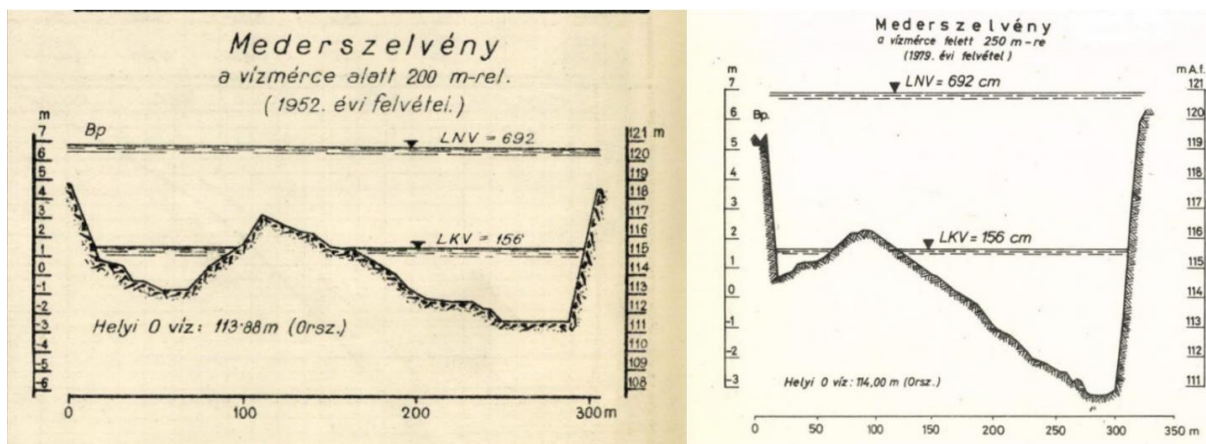
6. ábra: Szabályozás előtti Duna hossz-szelvénye (Forrás: Lanfranconi, 1882)

Az irodalomkutatás során az alábbi morfológiai paramétereket és jelenségeket vizsgáltam:

- Mederalak
 - Szélesség
 - Mederesés
 - Hossz-szelvény
- Görgetett hordalékhozam
 - Mennyiség és idősor
- Szemösszetétel
 - Jellemző szemcseméret
 - Görgetett hordalék szemösszetétele
 - Mederanyag szemösszetétele
 - Szelektív erózió

2.1. Mederalak

A Vízirajzi Évkönyvekből rendelkezésemre álltak mederfelvételek Dunaremetére és Dunaalmásra is. Dunaremetére már sokkal korábbi feljegyzések találhatók, mint Dunaalmásra. A mederfelvételek jelentősége az összehasonlításnál jelent nagy hangsúlyt, hiszen a medergeometriai változások a különböző időszaki mederfelvételeken megfigyelhetők.



7. ábra: Dunaremetei szelvény változása 17 év alatt (Vízirajzi Évkönyvek, 1953 és 1980)

A 7. ábrán példaként mutatja a dunaremetei szelvény két időponthoz tartozó szelvényalakját. Az ábra alapján egy jobb parti kimélyülés figyelhető meg, aminek köszönhetően a legmélyebb pont 1952-ben még 111,5 m.A.f., de 1979-re ez legalább 1 méterrel lejjebb húzódik. A kereszt-szelvények vizsgálata fontos lehet, amennyiben csak adott szelvény tulajdonságokat szeretnénk vizsgálni és az abban történő változást.

2.1.1. Szélesség

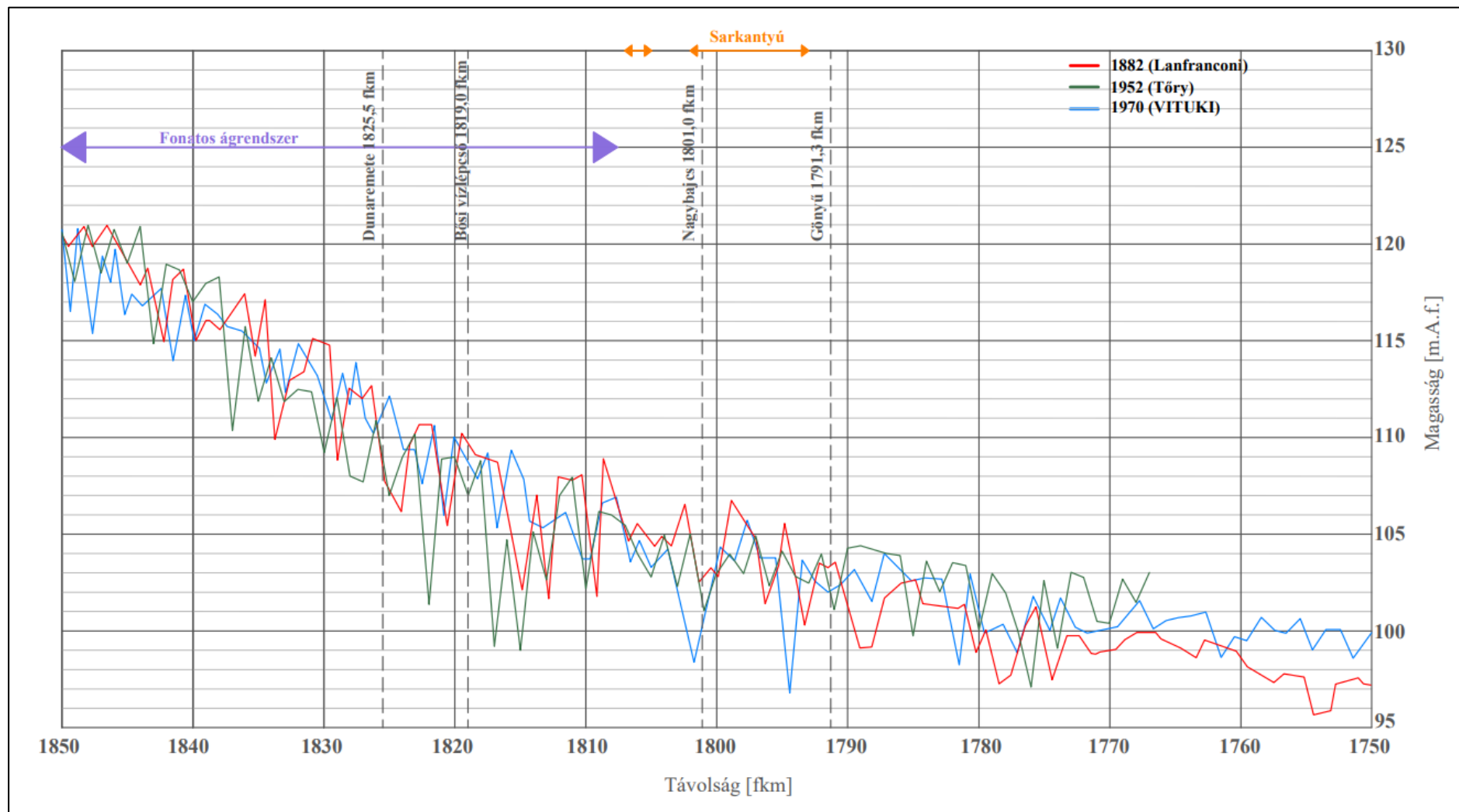
A magyarországi Felső-Duna a szabályozások előtt fonatos jelleget követett. A folyó szélessége néhol a 7-800 m-t is elérhette (Nyiri, 2020). A szabályozás célja egy főmeder kialakítása volt, ezzel a szélesség drasztikus csökkenését is megkövetelve. Ennek oka volt a hajózás segítése, a jobb hajóutak kialakítása, továbbá a szabályozás fő célja volt még, hogy segítse a folyó árvízlevezető képességét. A 19. századi szabályozás során több tervet készült, de a kivitelezés során más szélesség valósult meg több szakasz esetében is. A dunaremetei szelvényénél 300 m-es szélességgel terveztek és az a szabályozási munkálatok végére meg is valósult. A dunaalmási szelvény esetében is külön megtaláltam a tervezett és a megvalósult szélesség adatot. A szakaszon 470 m-es tervezési szélességet állapítottak meg, de ebből 450 m-es szélesség valósult meg. A tervezett és elkészült szélességek különbsége azt is adhatja, hogy a szélesebb meder esetében a fentről érkező hordalék lerakódott volna a szakaszon, ezzel a meder feltöltődését eredményezve. Az említett probléma a hajózást nem segítette volna és további sűrűbb kotrási eljárásokat eredményezett volna, így szükséges volt a szélesség leredukálására.

2.1.2. Mederesés

A meder esésére több adat is szolgált. Régebbi feljegyzések alapján Szap felett 25-35 cm/km-es esés értéket állapítottak meg, míg feljebb haladva a folyón ez már a 45 cm/km-es esést is elérhette. A Szap alatti szakaszon már mindössze 12-15 cm/km-es esés mondható el, viszont Gönyűtől lefelé már csak 8-10 cm/km-es esést mutat. Az esések megállapítására még a rendelkezésre álló hossz-szelvények is megfelelő információkat adnak. A szabályozás előtti hossz-szelvényen (Lanfranconi, 1882) bizonyos szakaszok jellemző esésértékei fel vannak tüntetve, ahogy Töry Kálmán könyvében talált hossz-szelvényen is.

2.1.3. Hossz-szelvény

A folyó hossz-szelvények esetében 3 időszakból is találtam hossz-szelvényeket, amelyek nagyban segítették a munkámat és összehasonlítva őket láthatóak a változás értéke. A legkorábbi vizsgált hossz-szelvény a szabályozás előtti időszakból van, amely 1882-ben jelent meg. Töry Kálmán könyvében az egész Duna hossz-szelvénye felelhető és ebből a magyarországi Felső-Duna szakaszát digitalizáltam (Töry, 1952). A harmadik hossz-szelvény 1970-ben készült a VITUKI által. A talált hossz-szelvényeket a 8. ábrán tüntettem fel. Az ábra alapján, illetve a beavatkozások időpontjának ismeretében becslés tehető a beavatkozások mederszintekre gyakorolt hatására.



8. ábra: Dunai vizsgált hossz-szelvények (Forrás: Tőry, 1952; VITUKI, 1970; Lanfranconi, 1882)

A 8. ábrán megrajzolt hossz-szelvényeken megfigyelhető, hogy a szabályozás után a meder Gönyű (1790 fkm) felett láthatóan mélyül, míg Gönyű alatt már jelentős lerakódás figyelhető meg. Az 1970-es hossz-szelvényt hasonlítva a szabályozás előttihez elmondható, hogy kisebb kimosódás van jelen Gönyű felett és Gönyű alatt már fokozatosan feltöltődő rész látható. Ami megfigyelhető egy-egy jelentősebb lokális változás, amiket akár egy-egy lokális beavatkozás is okozhatja. Ilyen beavatkozások hatását nem volt célom vizsgálni, hiszen arra egy 1D modell nem is nyújthat érdemi alternatívát.

2.2.Görgetett hordalék

2.2.1. Mennyiség

A görgetett hordalék mennyisége mindig is nagy szerepet játszott a folyók életében. A hordaléktranszport alakulása nagyban befolyásolhatja a medergeometriáját. Általam legkorábban talált feljegyzésekből találtam adatot a Felső-Dunán lefolyó hordalék éves átlagára, amely 660000 m³/év. Az említett érték az 1936 és 1937 közötti mennyiségre értendő. A mennyiségek megállapításához a Vízrajzi Évkönyvek adatsorait bővítettem ki a dunaalmási hozamokkal. Az idősort tekintve több kiugró érték is volt, emiatt az évek átlagát vettem alapul. Ennek az értéknek a későbbiekben lesz jelentősége, amikor már a beavatkozás hatását vizsgálom. A modellezés során a legkorábbi hordalékhozam mérési adatokat használtam, amelyeket a levéltári kutatáskor találtam a VITUKI feljegyzéseiben. Ugyanis ahogyan az alábbi táblázatban is megfigyelhető a felhasznált adat a legkorábbi, amelyet a szelvényekre külön-külön találtam, illetve a levéltári kutatásnál a mérések feljegyzéseit is megtekinthettem. Érdekes egybeesés, hogy a Vízrajzi Évkönyvek a hordalékhozam adatainál egy régi 1931/40-es mérés adataihoz viszonyítja a különböző évi adatokat. Ez amiatt érdekes, mert megegyeznek az adatok a VITUKI-s mérési adatokkal, amelynek a forrása biztosabb támpontot ad a meglátásom szerint.

2. táblázat: Hordalékhozam adatok

Mérés ideje/helye	1952-1953	1966-1992
Dunaremete	185400 t/év	730607 t/év
Nagybajcs	22000 t/év	483873 t/év
Dunaalmás	38850 t/év	65000 t/év

A korabeli állapot modellezéséhez a VITUKI-s 1952-53-as adatait hasznosítottam.

2.3.Szemösszetétel

2.3.1. Jellemző szemcseméretetek

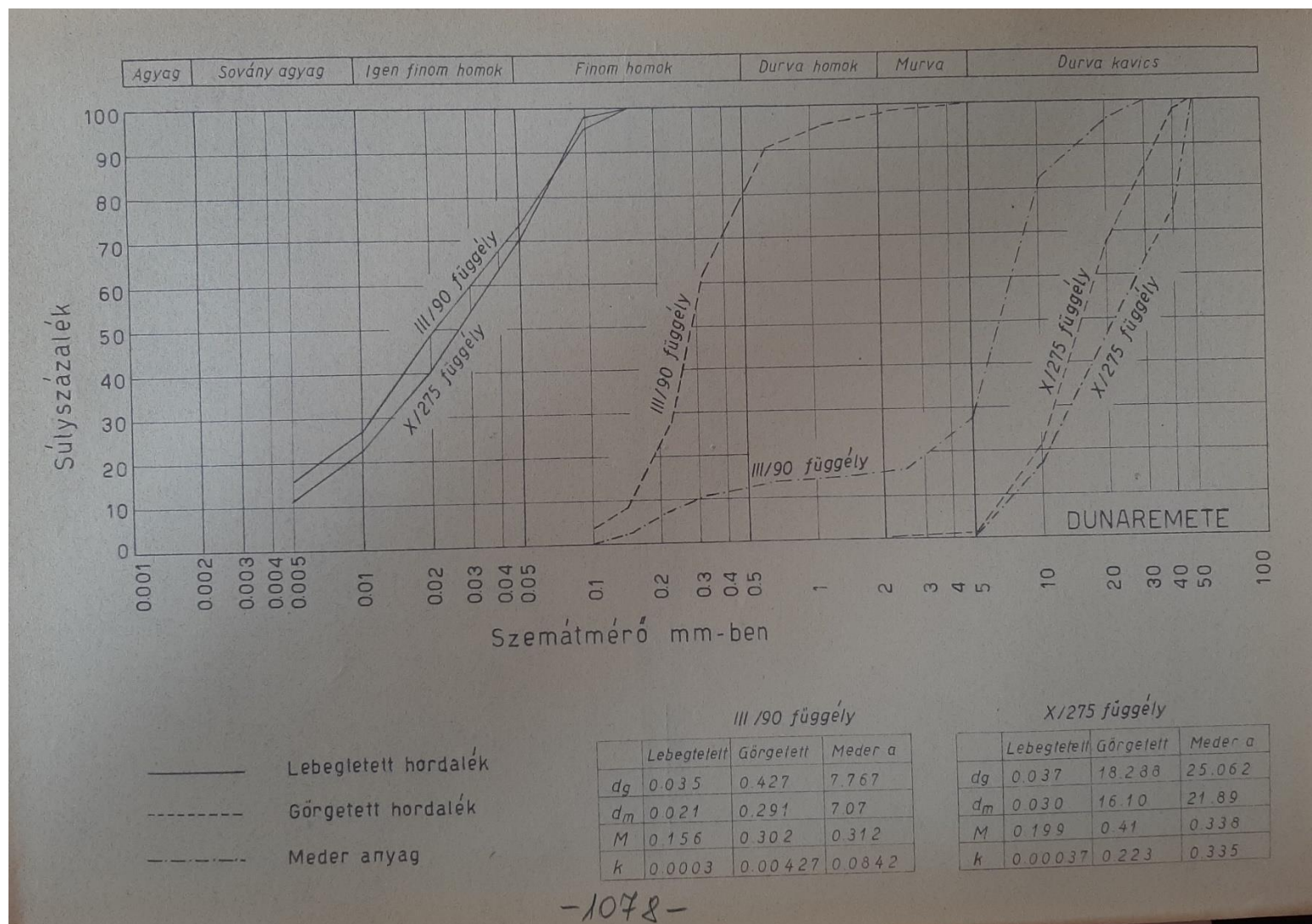
A szelvényekre jellemző szemcse és mederanyag értékeket az 1952 és 1953 közötti mérési adatokból származnak, melyeket táblázatba foglalva az alábbiakban lehet látni:

3. táblázat: Jellemző szemcse adatok

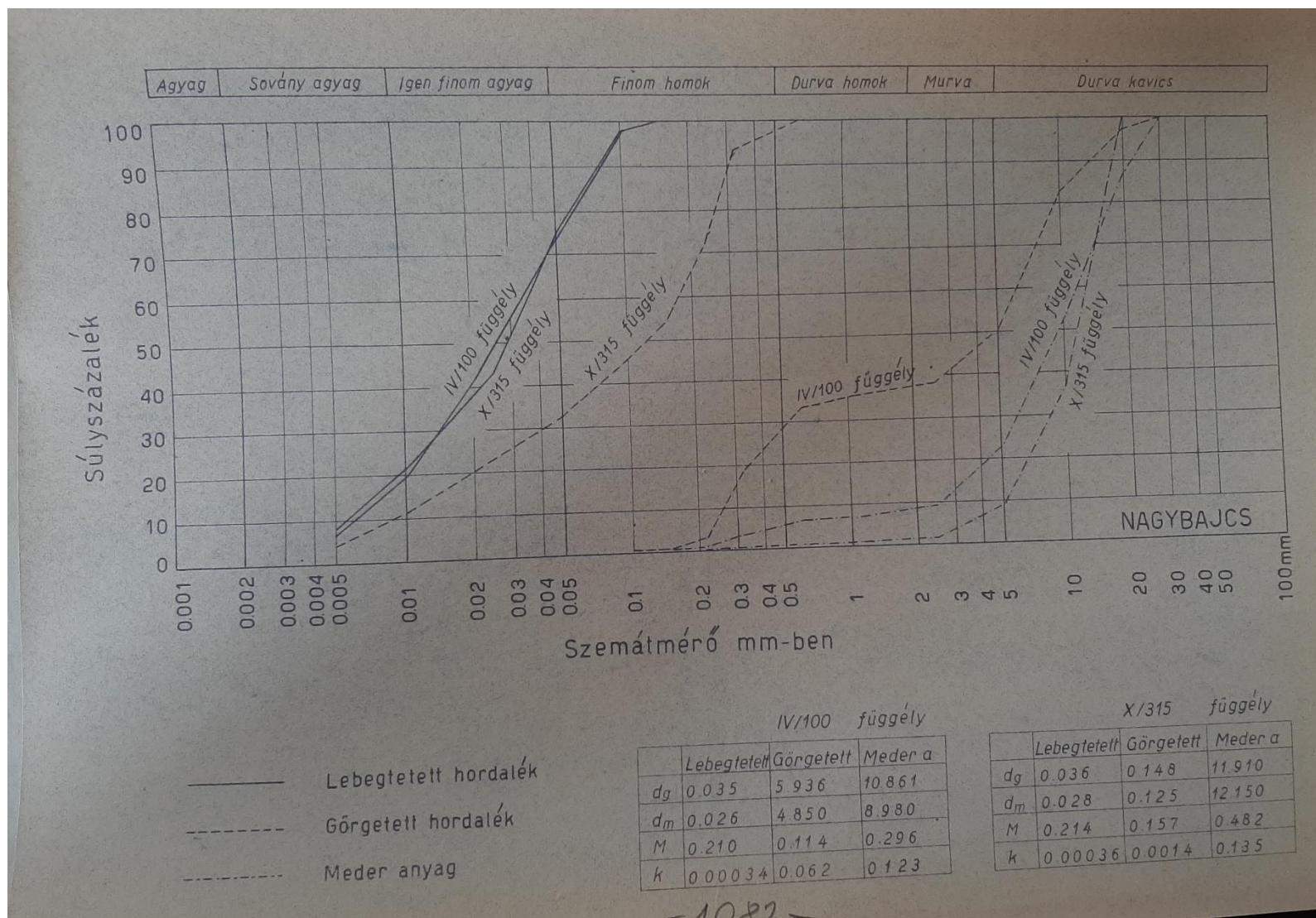
	Szemösszetételek		
	Dunaremete	Nagybajcs	Dunaalmás
D ₅₀	18 mm	7.5 mm	0.245 mm
Mederanyag	19 mm	13 mm	18 mm

A táblázatban látható, hogy egyes szelvények között mekkora különbségek vannak. Dunaremete és Nagybajcs között mindössze 25 km van és a nagybajcsi szelvényen a jellemző szemcseméret kevesebb, mint fele a dunaremetei értéknek. Ennek oka a szakaszon fellépő szelektív erózió. Valamennyi változás a kopás útján is végbe megy, de a 2020-as TDK dolgozatomban kiszámoltak alapján ez eléggé elenyésző, ami szintén a lerakódást támasztja alá. A dunaalmási szelvény esetében is ez mondható el, hiszen a különbség az nagy.

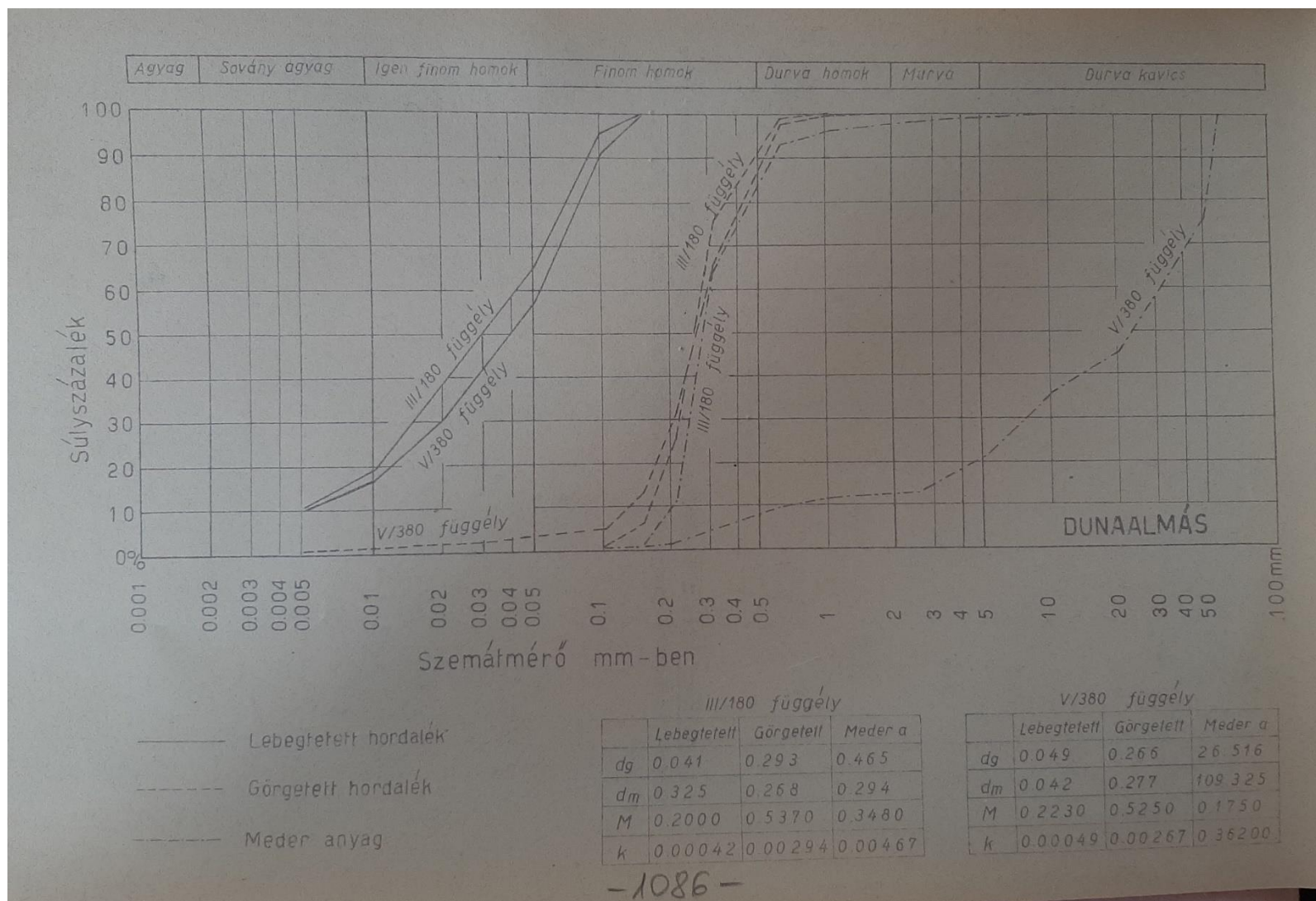
A modell paraméterezéséhez szükséges volt szemösszetételre is, nemcsak a D₅₀ értékre. A levéltári kutatás során találtam a VITUKI tanulmánytárába szemösszetételi görbéket, amelyeket még a Bogárdi János rögzített. Fontos azonban, hogy nem volt elég csak a görgetett hordalékra görbét találnom, hanem mederanyagra is szükségesem volt. A VITUKI méréseik alapján rögzítették egy ábrán a görgetett hordalékot, a mederanyagot és a lebegtetett hordalék szemösszetételét is. A talált görbéket a következőkben láthatók mindhárom szelvényre (9. 10. és 11. ábra).



9. ábra: Dunaremete szemösszetételi görbéi (Forrás: VITUKI, 1954)



10. ábra: Nagybaics szemösszetételi görbéi (Forrás: VITUKI, 1954)



11. ábra: Dunaalmás szemösszetételi görbéi (Forrás: VITUKI, 1954)

A vegyes szemösszetételű mederben olyan folyamatok játszódhatnak le, mint például a szelektív erózió, vagy a mederpáncélozódás. Emiatt a vegyes szemösszetétel számításba vételétől nem pusztán pontosabb eredmények várható (szemben az egy, vagy átlagos szemcseméret alapján működő hordaléktranszport modellekkel), hanem az előbb említett jelenségek leképzése is sarkalatos lehet. A 2021-es TDK dolgozatomban mutattam rá, hogy mennyire jelentős hiba várható vegyes szemösszetételű medrek esetén a szemösszetétel átlagos mérettel való közelítésével.

2.4. Szelektív erózió

A vizsgált szakasz jellegzetessége az a Gönyű térségénél tapasztalható hirtelen eséstörés jelensége. Gönyű felett 25-40 cm/km közötti esés alakult ki és Ausztria felé egyre meredekebb szakaszok is előfordulnak. Gönyű alatt pedig már 8-10 cm/km-es vagy ettől kisebb esés dominál. Az eséstörés számos kérdést vet fel. Ilyen például, hogy vajon milyen folyamat okozhatta kialakulását? Illetve, hogy milyen szerepet játszik a beavatkozások okozta morfordinamikai változásokban?

Az eséstörés miatt az várható, hogy az érkező hordalék Gönyű után intenzívebben rakódik le és az is simítja ki a mederszintet. Ez a jelenség vegyes szemösszetétel esetén szelektív eróziót eredményez. Erről árulkodik az a megállapítás, hogy amíg Dunaremeténél 18 mm körüli átlagos szemcséről beszélhetünk, addig a tőle 25 km-re lejjebb levő Nagybajcsnál ez már csak 7,5 mm. 2020-ban számoltam a Düll-féle kopási egyenletekkel, hogy vajon a kopás egy ilyen szakaszon milyen mértékű lehetett, hátha azzal is magyarázható ez a nagy csökkenés. A számításaim alapján a kopás nagyon elenyésző csökkenést ad. Tehát a jelenséget elsősorban azt okozza, hogy a nagyobb szemcsék a két szelvény között lerakódnak. A lerakódást már több régebbi szakirodalomban is olvastam ezen a szakasza (Tóry, 1952; Bogárdi, 1955; VITUKI, 1954).

3. Modellépítés

A dinamikus egyensúlyi állapothoz először a 2020-as TDK dolgozatomban felépített 0D modellt (Nyiri, 2020) fejlesztettem tovább 1D modellre a 2021-ben a TDK dolgozatomban (Nyiri, 2021). Most az 1D modellt bővítettem és fejlesztettem tovább, illetve kalibráltam át a Dráváról a Dunára. Tulajdonképpen amíg a 0D modell csak egy adott szelvényre számította az egyensúlyi állapotot, addig az 1D modell már egy egész szakaszra végzi el a számítási lépéseket, kapcsolatot teremtve a szomszédos szelvények között. Az 1D modell egy folyásirányban változó modell, amely a térbeli és időbeli változásokat is képes számolni. Tehát

például az egyensúlyi állapot beálltához szükséges idő vizsgálatára is alkalmas vizsgálati eszközről beszélünk. A modellt Matlab programban írtam meg és futtatam a programkódot. A programozáshoz alkalmazott megközelítést és egyszerűsítéseket Gary Parker professzor online jegyzetei alapján tettem meg (Parker, 2004). Első lépésként a 2020-as TDK-mban már részletesen bemutatott 0D modellvizsgálatokat végeztem el, hogy az eredmények támogassák az 1D modell paraméterezését.

3.1. Alapegyenletek

A modell alapja a 3 egyenletből álló egyenletrendszer, amely az egyensúlyt adja meg.

- Folyadékra vonatkozó folytonossági egyenlet

$$Q_w = UHB \quad (1)$$

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

- Impulzus egyenlet

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

Az egyenletben a τ_b a fenék-csúsztatófeszültség [N/m^2], ρ a víz sűrűsége (1000 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

$$Q_b = Bq_b(R + 1)t \quad (3)$$

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

3.1.1. 1D modell összefüggései

➤ Hidrodinamikai összefüggések

a. Permanens, egyenletes vízmozgás esetén:

Erre az egyenletre a kialakuló vízmélységek számításánál van szükség. Ebben az esetben azt az állapotot vizsgálom, amikor a vízszínesés és a mederesés párhuzamos.

$$H = \left(\frac{Q_f^2 \cdot C_f}{\frac{B^2}{g \cdot S}} \right)^{1/3} \quad (4)$$

Az egyenletben Q_f jelöli a kezdeti befolyási vízhozam értékét, amit az egyenletben a B szélességgel leosztva kapható meg a fajlagos vízhozam (q_w) értéke.

A C_f értéke jelöli a mederellenállási tényezőt, amely a modellben már az átszámolt C_z értékkel szerepel.

Az S a mederesés értéke, amelyet minden időlépésben újra számol a modell minden szelvényre. Mivel állandó szelvény szélességet feltételeztem, ezért a vízmélység számításában ez az egyetlen változó.

b. Permanens, fokozatosan változó vízmozgás esetén:

Ezzel az egyenlettel már a visszaduzzasztás, vagy leszívás is figyelembe vehető. Fokozatosan változó vízmozgásról beszélünk, ha az energiavonal (a vízfelszín esésével közelíthető) esése eltér a mederfenék esésétől. A vízmélységváltozást a Bernoulli egyenlet segítségével vezethető le, ahol minkét szelvényre ki kell számítani a geodéziamagasságot, a nyomásmagasságot és a sebességmagasságot. Az eltérést a két szelvény között a veszteség magasságból lehet megkapni, amit a Bernoulli egyenlet két oldalának a különbsége adja meg. Az egyenlet felírásakor tekintettel kell lenni arra, hogy a mederesés és az energiavonal esése eltérnek egymástól. Ezen megfontolásokból kiindulva vezethető le a fokozatosan változó vízmozgás egyenlete:

$$\frac{\partial H}{\partial x} = \frac{S - C_f \frac{q_w^2}{gH^3}}{1 - \frac{q_w^2}{gH^3}} \quad (5)$$

Az egyenletben az S_f az energiavonal esése.

Az későbbi egyenletben az Fr jelöli a Froude-szám értékét, ami egy dimenziómentes szám és a következőképpen lehet kiszámítani:

$$Fr = \frac{U}{\sqrt{gH}} \quad (6)$$

A fokozatosan változó vízmozgás egyenletét a predictor-korrektor sémával diszkretizáltam, az alábbi módon:

$$S_f(H) = C_f \frac{q_w^2}{gH^3} \quad (7)$$

$$F(H) = \frac{S - S_f(H)}{1 - Fr(H)^2} \quad (8)$$

$$\frac{dH}{dx} \approx \frac{H_n - H_{n+1}}{\Delta x} = F(H_n) \quad (9)$$

$$H_{p,n+1} = H_n - F(H_n)\Delta x \quad (10)$$

$$H_{n+1} = H_n - \frac{1}{2}[F(H_n) + F(H_{p,n+1})]\Delta x \quad (11)$$

➤ Hordalékmozgás

❖ Homogén szemösszetételű modell

a. Csúsztatófeszültség számítása

A csúsztatófeszültséget általános alakban (fokozatosan változó és egyenletes vízmozgás esetén) az alábbi egyenlet adja:

$$\tau_b = \rho C_f U^2 \quad (12)$$

Az egyenletben szereplő ρ a folyadék sűrűségét jelöli, az U érték pedig a szelvény középsebességének a mértéke.

b. Hordalékhozam számítása

A fajlagos hordalékhozam minden esetben az alábbi összefüggéssel számítható ki:

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

A q_b^* a dimenziómentes fajlagos hordalékhozam. Számítására számos hordaléktranszport modellt publikáltak. A szakirodalomban megtalálható összefüggéseket terepi, illetve laboratóriumi mérések alapján dolgozták ki, vagyis tapasztalati és féltapasztalati összefüggésekről beszélünk. A hordaléktranszport modellek a dimenziómentes fenék-

csúsztatófeszültség és a kritikus fenék-csúsztatófeszültség ismeretében adnak becslést a hordalékhozamra. Wong és Parker modellje 3,21 mm - 28,65 mm-es szemcseméret tartományra alkalmazható. A modell a következő összefüggést adja:

$$q_b^* = 3,97(\tau^* - \tau_c^*)^{3/2} ; \tau_c^* = 0,0495 \quad (14)$$

A dimenziómentes csúsztatófeszültséget az alábbi összefüggéssel számíthatjuk:

$$\tau^* = \frac{\tau_b}{\rho g R D} = \frac{H S}{R D} = \frac{C_f U^2}{R g D} \quad (15)$$

➤ Mederváltozás számítása

A hidrodinamikai eredmények alapján minden egyes cellában számítható a hordalékhozam. Egy adott cella mederváltozását az azt megelőző szelvény és az azt követő szelvény cellájára számított hordalékhozamok különbsége alapján számítottam ki, amelyhez az Exner egyenletet alkalmaztam.

$$(1 - \lambda_p) \frac{\partial \eta}{\partial t} = \frac{\partial q_b}{\partial x} \quad (16)$$

Homogén szemösszetételű modell számítási lépései:

Kezdeti- és peremfeltételek: Mederszintek, vízhozam (fokozatosan változó vízmozgás esetében kifolyási vízszint) és egyéb morfodinamikai paraméterek (C_f , D_{50} , stb)

Egy időlépésen belül, egy szelvényre az alábbi számítást végzi a modell:

1. Vízmélység számítása: (4)-es, vagy (10)-es egyenlet
 - Egyenletes vízmozgás esetén a kifolyási szelvénytől visszafelé haladva
2. Dimenziómentes csúsztatófeszültség számítása: (15)-ös egyenlet
3. Hordalékhozam számítása: (13)-as egyenlet alapján
4. Mederszintváltozások számítása: (16)-os egyenlet alapján

Ezt a ciklust ismétli a modell egy időlépésen belül, az összes szelvényre (egyenletes vízmozgás esetén a kifolyástól a felvízi irányban haladva). A megváltozott medret kiszámolva a következő időlépéshez tartozó számítások kezdődnek, az előbbi 4 lépésből álló ciklussal.

3.1.2. Inhomogén szemösszetételű modell (Wilcock & Crowe, 2003)

A Wilcock modell beprogramozását matlabba szükségesnek láttam a vizsgált szakaszon jelentkező morfodinamikai folyamatok leképezhetőségének céljából. A modell vegyes

szemösszetételt is számításba tud venni, így sokkal pontosabb eredményeket ad és annyi frakciót lehet benne megadni, amennyit szeretnénk, ellentétben a homogén modellekkel, ami általában a D_{50} frakcióval számolnak. A modell nagy előnye, hogy a szemcsék mérete miatti kölcsönhatást figyelembe veszi, ezáltal jóval bonyolultabb az alkalmazása, mint a homogén modelleknek, mert minden egyes frakcióra külön kell kiszámítani minden szükséges paramétert. Illetve vegyes szemösszetétel esetén a szemösszetétel a mozgó réteg, illetve a meder aktív és inaktív rétegében is változik. Tehát az említett három réteg közötti transzportot is folyamatosan számítani kell, ezt követően az ezek okozta szemösszetételváltozást is, minden egyes cellára. Ezen okok miatt az inhomogén modellek programozása jóval bonyolultabb feladatnak mondható. A modellezéshez a Wilcock&Crowe modellt használtam. A modell programozása számos nehézséget okozhat, hiszen amíg egy alap homogén modell kb. 100 soros modellel leírható, addig az általam beprogramozott inhomogén modell a 800 sort is meghaladja.

```

323
324 for z = 1 : Nprint_sark
325     nn = 0;
326     w = 0;
327     while w == 0
328         nn = nn + 1;
329         %
330         if z == 1 && nn == 1 (...)
331             [tausg, taus50, H, S, Q_m, Q_wd, q_w, dz_E, Em, Ewd, xi_wd, aa] = backwater_wing_dam(eta, xio, dx, M, alr, nk, ds90s, qw, B, g, Rr, dsgs, ds50s, er, B_wd, B
332             if Equation_selector == 2
333                 [qbT, pl] = find_load_MC(M, fracsand, tausg, np, ds, dsgs, F, Rr, g);
334             else
335                 [qbT, pl] = find_load_Parker(M, np, F, psi, Rr, g, ds, dsgs, tausg, taursgo, lowphi, po, oo, so, beta, Mo);
336             end
337             [eta, time, Results, dsgs, ds90s, ds50s, fracsandt, F, Fft, Ft, Laold] = ...
338             find_eta(M, nactive, ds90s, di, au, qbT, qbTf, dx, np, npp, Fs, atrans, F, pl, plf, lps, dt, Inter, eta, time, Results, Laold, psi, z);
339             if nn == Ntoprint_sark
340                 w = 1;
341                 figure(21)
342                 plot(fkm, Results(:, 5 + 4 * z))
343                 hold on
344                 figure(23)
345                 plot(fkm, dsgs)
346                 hold on
347                 legend('kezdeti', '-1950', '10 év', '20 év', '30 év', '40 év', 'Location', 'SouthOutside', 'NumColumns', 3)
348             end
349         end
350     end
351
352
353
354
355 function xp = renormalize(np, xp) (...)
356
357
358 function xp = fraction(np, xpf) (...)
359
360
361 function xpf = perfin(xp, npp) (...)
362
363
364 function xtdy = finer (xpf, xty, di) (...)
365
366
367 function xdm = mean(xp, np, psi) (...)
368
369
370 function xfsand = find_sand_fraction(np, di, xpf) (...)
371
372
373 function [log2] = logtwo(xarg) (...)
374
375
376
377
378
379
380
381
382
383
384
385
386
387
388
389
390
391
392
393
394
395
396
397
398
399
400
401
402
403
404
405
406
407
408
409
410
411
412
413
414
415
416
417
418
419
420

```

12. ábra: Inhomogén modell kód részlet

➤ A Wilcock modell alapegyenletei:

Az alapösszefüggéseket egy másik tanulmányból vettem át (Török, 2011), illetve a 2021-es TDK dolgozatom függelékében is megtalálható (Nyiri, 2021).

- Hasonlósági összefüggés a következő:

$$W_i^* = f(\tau/\tau_{ri}) \quad (17)$$

ahol: W_i^* az i-dik frakció dimenziómentes hordalékhozama, τ a fenék-csúsztatófeszültség, τ_{ri} pedig a referencia fenék-csúsztatófeszültség (hasonlósági paraméter).

- A dimenziómentes hordalékhozam fizikai jelentése a következő egyenlettel írható le:

$$W_i^* = \frac{(s-1)gq_{bi}}{F_i u_*^3} \quad (18)$$

ahol: s a hordalék és víz sűrűségének aránya, q_{bi} az i-dik frakció egységnyi szélességre vett hordalékhozama, F_i az i-dik frakció tömegaránya a mederanyagban, u_* a csúsztató sebesség ($u_* = [\tau/\rho]^{0,5}$), ρ a víz sűrűsége.

- Az egyszerűbb számolás végett a Shields görbét egy hatványfüggvénnyel célszerűbb leírni, amit Wilcock és Crowe az alábbi szerint vett föl:

$$\frac{\tau_{ri}}{\tau_{rm}} = \left(\frac{D_i}{D_{sm}} \right)^b \quad (19)$$

$$b = \frac{0,67}{1 + e^{\left(1,5 - \frac{D_i}{D_{sm}}\right)}} \quad (20)$$

- A mederfelszín anyagának homoktartalma (F_s) és az átlagos szemcseméret dimenziómentes csúsztatófeszültsége között egy jól illeszkedő görbét lehet meghatározni, amit az alábbi egyenlettel írtak le:

$$\tau_{rm}^* = 0,021 + 0,015e^{-20F_s} \quad (21)$$

- A dimenziómentes csúsztatófeszültség ismeretében a referencia fenék-csúsztatófeszültség már számítható:

$$\tau_{rm}^* = \frac{\tau_{rm}}{g(\rho_s - \rho_w)d} \quad (22)$$

- A dimenziómentes hordalékhozam számításához az arányossági összefüggést használták fel. A W_i^* és a τ/τ_{ri} hányadosok között fennálló kapcsolatot leíró összefüggés vizsgálatához felrajzolták a méréseikből származó, két változó pontthalmazát. A pontokra illesztett görbével jól közelíthető a két mennyiség közötti

összefüggés. A görbe és a pontok között ugyan nem tökéletes az egyezés, a trendet tisztán követi. A két mennyiség között felállított összefüggés az alábbi:

$$W_i^* = \begin{cases} 0,002\theta^{7,5} & \text{ha } \theta < 1,35 \\ 14 \left(1 - \frac{0,894}{\theta^{0,5}}\right)^{4,5} & \text{ha } \theta \geq 1,35 \end{cases} \quad (23)$$

ahol: $\theta = \tau/\tau_{ri}$.

- A dimenziómentes hordalékhozamból és a (18) összefüggéssel kifejezett egységnyi szélességre vett hordalékhozamból a koncentrációt az alábbi összefüggéssel lehet meghatározni:

$$c_i = \frac{q_{bi}}{vh\rho_s} \quad (24)$$

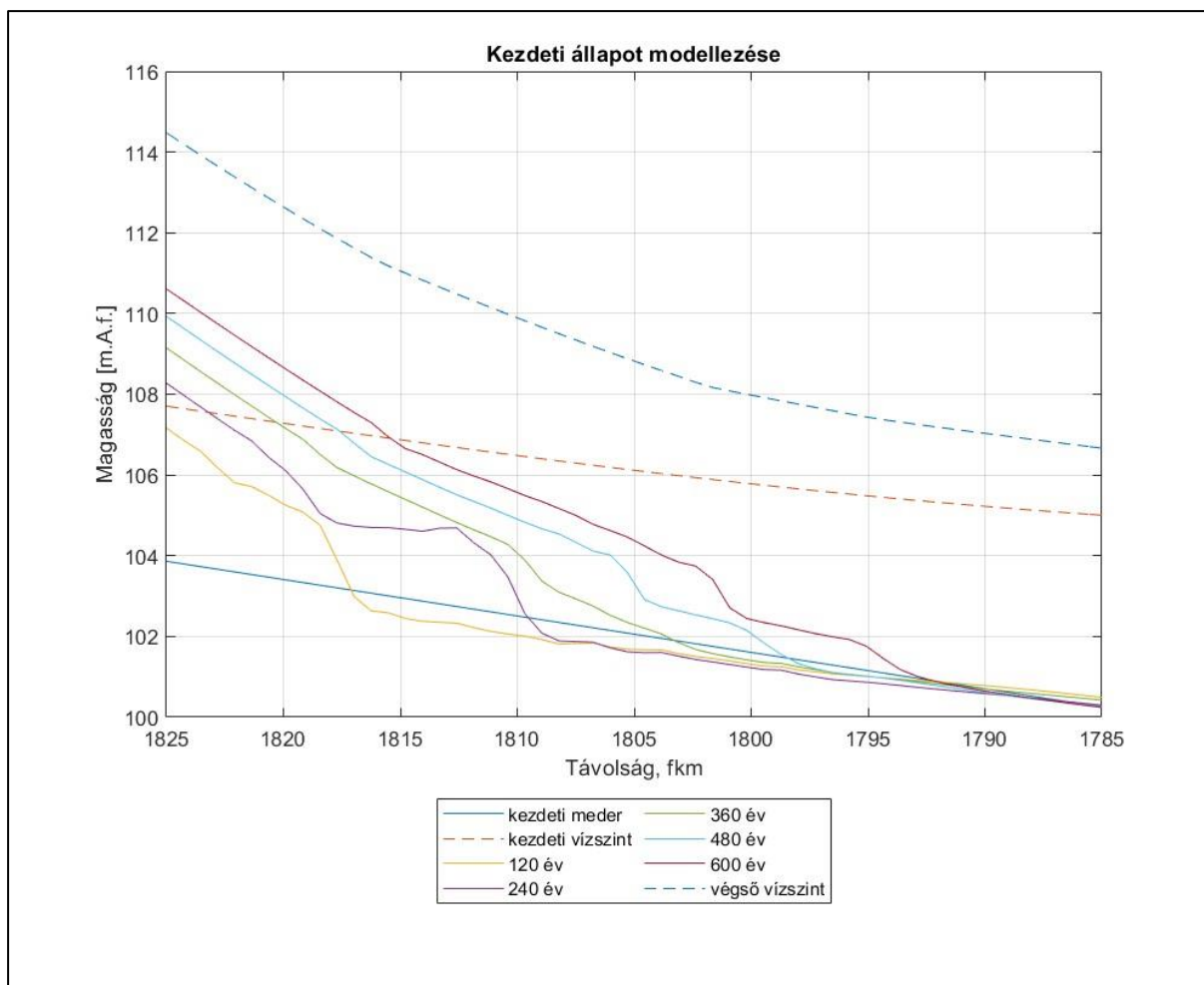
ahol: c_i az i-dik frakció koncentrációja, h a vízmélység, v pedig a fenék-közeli áramlási sebesség (Wilcock and Crowe, 2003).

A Wilcock modell számítási menetének lépései:

1. Az átlagos szemcsemérethez tartozó dimenziómentes csúsztatófeszültség meghatározása a homoktartalom függvényében (21)-es egyenlet
2. Az átlagos szemcsemérethez tartozó referencia fenék-csúsztatófeszültségének meghatározása a dimenziómentes csúsztatófeszültség függvényében (22)-es egyenlet
3. Az i-dik frakció referencia fenék-csúsztatófeszültségének meghatározása az átlagos szemcsemérethez tartozó referencia fenék-csúsztatófeszültség, valamint az i-dik frakció átmérőjének és az átlagos szemcseméret átmérőjének függvényében (19)-es és a (20)-as egyenlet
4. Az i-dik frakció dimenziómentes hordalékhozamának számítása a referencia fenék-csúsztatófeszültségének és a fenék-csúsztatófeszültségnek az arányából (23)-as egyenlet
5. Az i-dik frakció egységnyi szélességre vett hordalékhozamának számítása a dimenziómentes hordalékhozam, a frakció aránya és a csúsztatósebesség függvényében (18)-as egyenlet
6. Az i-dik frakció koncentrációjának számítása a hordalékhozam, a vízmélység és a vízsebesség függvényében (24)-es egyenlet

4. Modelligazolás

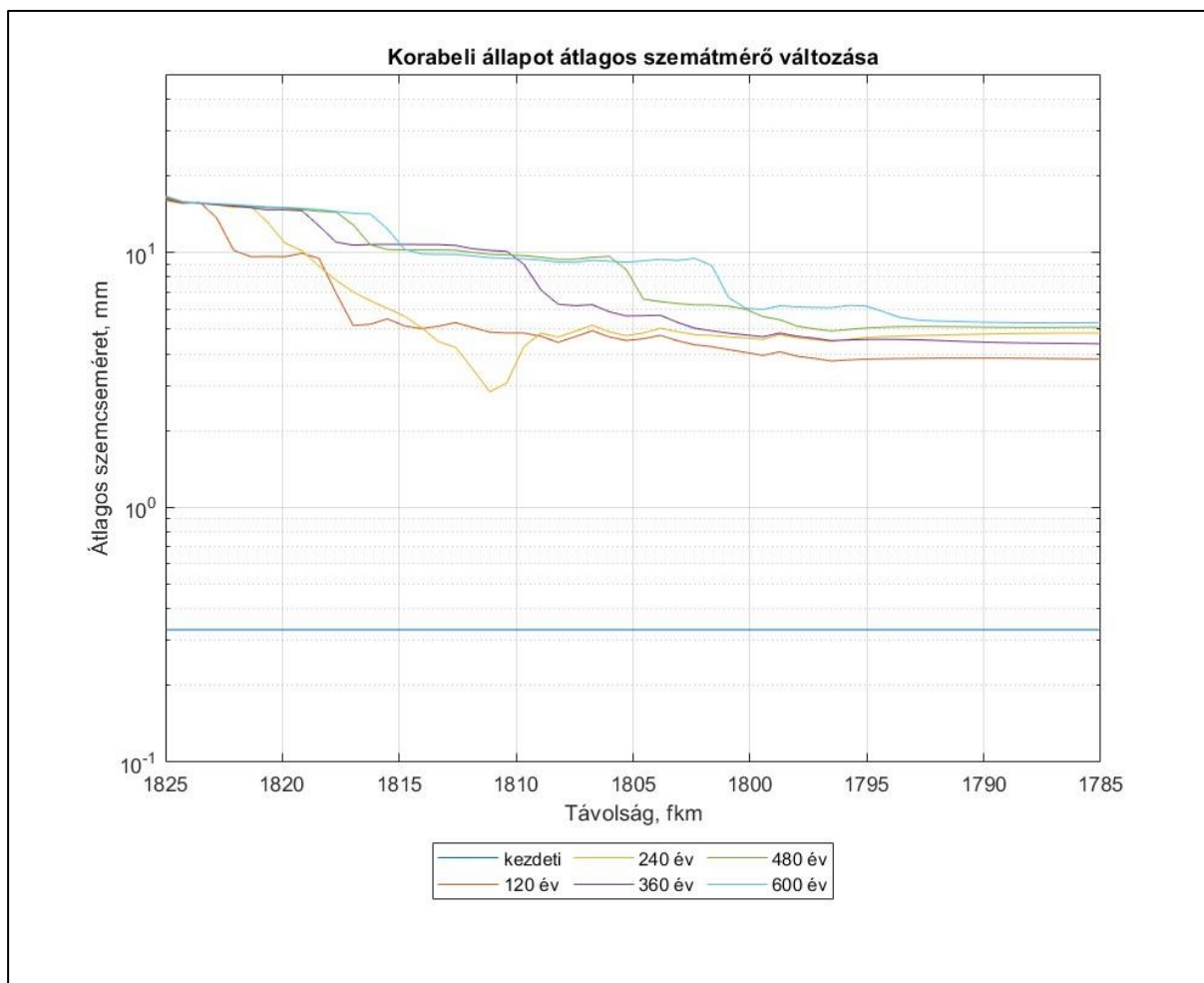
Az inhomogén 1D modell igazolását úgy tettem meg, hogy a modellezett időszakkal a korabeli szabályozás előtti állapotot akartam megkapni. Fontos, hogy a modell még inkább trendekben és viszonyító értékekben tud iránymutatást adni. A modell paraméterezéskor a korabeli szélességgel láttam el a modellt és azzal a vízhozammal, amellyel már 2020-ban is a korabeli állapotot modelleztem a 0D modellel. Ez a vízhozam $4100 \text{ m}^3/\text{s}$ és a szélességet pedig 600 m-re vettem fel Dunaremeténél. Tehát a kezdő szelvény Dunaremete (1825 fkm), amelynek a korabeli szemösszetételéről nem állt rendelkezésemre adat, így a legkorábbi szemösszetételi görbékkel, melyek rendelkezésemre álltak, azokkal validáltam a modellt. Kifolyási szelvénynek a dunaalmási (1752 fkm) szelvényt tettem meg, mindezt azért, hogy a törés, amely Gönyűnél helyezkedik el a két szelvény közé essen. Dunaalmásnál a szemösszetételt hasonlóképp határoztam meg, mint Dunaremeténél, a célom az volt, hogy a szemösszetételek variálásával kapjam meg az esés helyét és a jellemző szemcseméreteket. A kifolyási szintnek Dunaalmást adtam meg, tehát 97,27 m.A.f-i szintet. A mederesésénél viszont a közvetlen Gönyű alatti esést adtam meg, amely $\sim 9 \text{ cm/km}$. Ezt az esés értéket a szakirodalmak is igazolják. A befolyási hordalékhozamnak a 1953-54-es mérési értéket adtam meg, tehát 185400 t/év . A paraméterezést követően addig futtatam a modellt, ameddig az 1882-es hossz-szelvény jellegét meg nem kaptam. Esetemben a használt paraméterekkel ez az állapot 600 évet vett igényben.



13. ábra: Korabeli állapot modellezése

Ahogy az ábrán is látható a törés kivehető és kb. 1792,9 fkm-nél helyezkedik el. Mivel a törés nem pontosan Gönyűnél (1791,5 fkm) van, így ezt elfogadhatónak tekintettem. A másik nézőpont az Gönyű szintje volt, melyet a modell 100,80 m.A.f.-ként határozott meg, ez a valós hossz-szelvény szerint 103,27 m.A.f., amely kb. 2,47 m-el tér el a modelltől. Valószínűleg a kezdeti kis esés nem tette lehetővé, hogy a szintet a modell visszaadja, hiszen hiába számolt közvetlen a Gönyű alatti közvetlen eséssel, ha a kifolyási szelvény kb. 40 km-el lejjebb helyezkedik és ezen a szakaszon változó esésértékek vannak. Sajnos közelebbi szelvényre nem állt rendelkezésemre adat, de úgy gondolom, hogy a törés helyét a modell aránylag így is jól megadta. A befolyási vízszintet vizsgálva a modell eredményként azt kaptam, hogy Dunaremete szintje 110,61 m.A.f., amíg ez a valóságban 110,69 m.A.f, tehát a modell deciméter pontosan visszaadta a használt paraméterekkel a kezdőszintet. A Gönyű feletti profilok melyek a lerakódást mutatják azok jellege hasonló a Bevezetésben bemutatott (5. ábra) hossz-szelvényekkel.

A modell igazolásaként még a modell számolt átlagos szemcseméreteit is figyelembe vettem, melyek alakulása a következőképpen volt:



14. ábra: Átlagos szemcseméret változása

Az ábra alapján a kezdeti szelvényben tehát Dunaremeténél (1825 fkm) a modell 16,7 mm-t határozott meg, a szakirodalomban átlagosnak 18 mm-t találtam, de leggyakoribbnak viszont 14 mm-es szemátmérőt (Tóry, 1952), így a modell eredményét megfelelőnek tartom. Nagybajcsot (1801 fkm) tekintve a modell által számított szemcse átmérője 7 mm-nél helyezkedik el, ami szintén nagyon közeli a szakirodalomban talált 7,5 mm-es adathoz.

5. Modellvizsgálatok

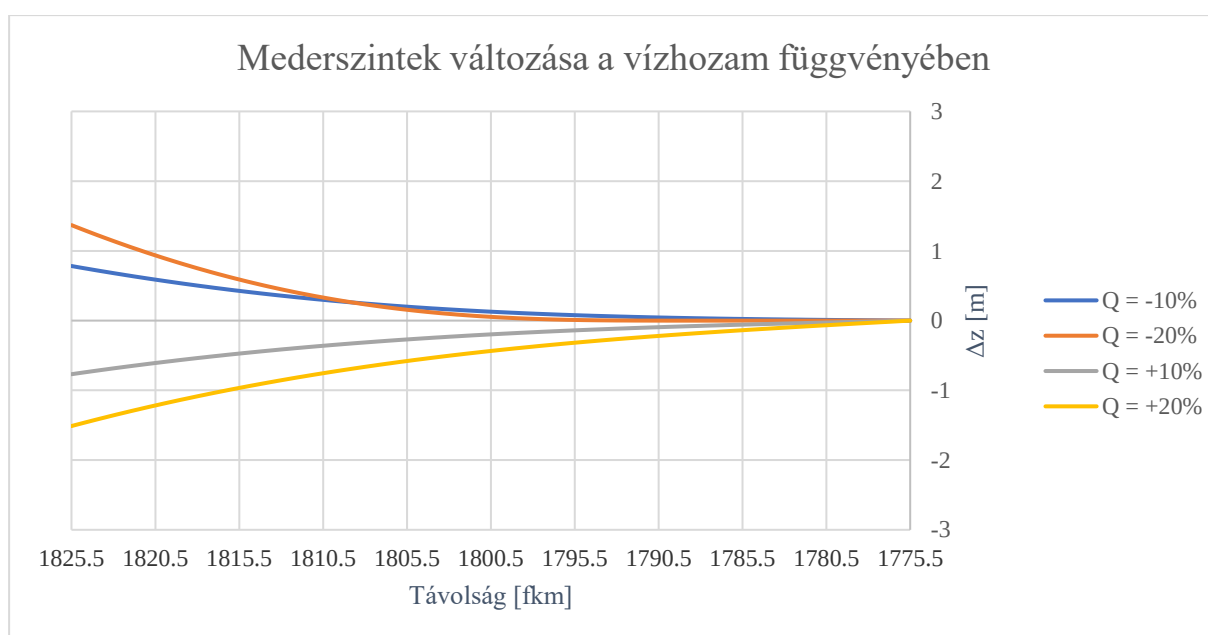
5.1. Érzékenységvizsgálat

A felépített 1D homogén modellel érzékenységvizsgálatokat végeztem. Ezek a vizsgálatok amiatt is tartottam fontosnak, mert láthatóak, hogy egyes paraméterek mekkora hatással vannak az egyensúlyra. 4 paraméter változását vizsgáltam meg, ezek: a vízhozam (Q), szélesség (B), medersímaság (C_z) és a hordalékhozam (Q_b). Az érzékenységvizsgálatok adatait a matlabból

raktam át az excelbe és ott a kezdeti állapothoz viszonyítottam. Kezdeti állapotnak azt vettem, amikor még az eredeti adatokkal futtattam 100 évet a modellt és annak használtam fel a kezdeti meder- és vízszintjeit. A további futtatások is ugyanúgy 100 éves ciklust néznek. Excelben a kezdeti állapot és az érzékenységvizsgálat 100 éves állapotából vontam különbséget és jelenítettem meg azokat a diagramokon.

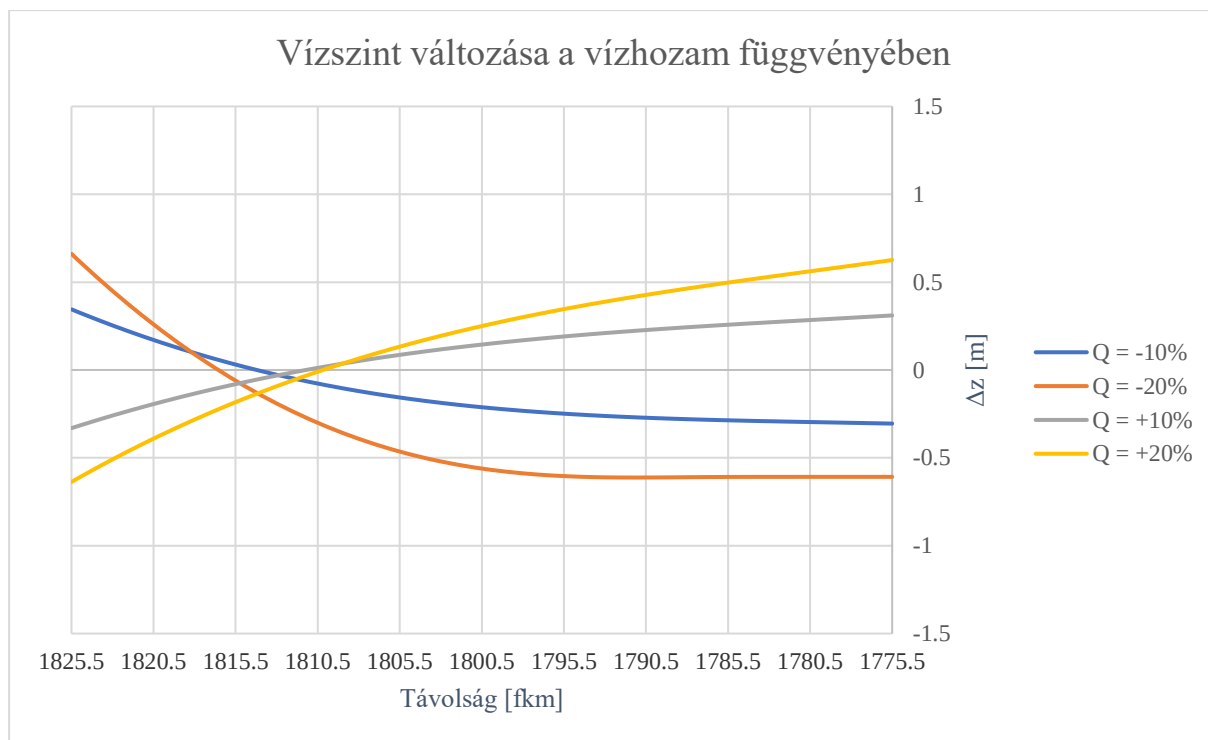
5.1.1. Vízhozam

A vízhozam változásánál azt figyeltem meg és jelenítettem meg, hogy milyen hatással van a mederszintek és a vízszintek változására. A vizsgálatnál a vízhozam 10%-os és 20%-os változásait néztem.



15. ábra: Mederszintek változása a vízhozam változás függvényében

A megjelenített ábra jobboldali tengelyén a mederszintváltozás mértéke látható, míg függőlegesen a távolság mértéke folyamkilométerben kifejezve. Az ábrán látható, hogy a vízhozam csökkenésével a meder elkezd emelkedni, amely magyarázható azzal, hogy a lecsökkent vízhozam nem képes a hordalékot tovább szállítani és azt lerakja és ezzel a meder töltődik. Ellenkező esetben kimélyülés figyelhető meg a kezdő szelvényben, amely nagyobb mélyülést eredményez 120%-nál, mint amennyi feltöltődést eredményezett 80%-nál.

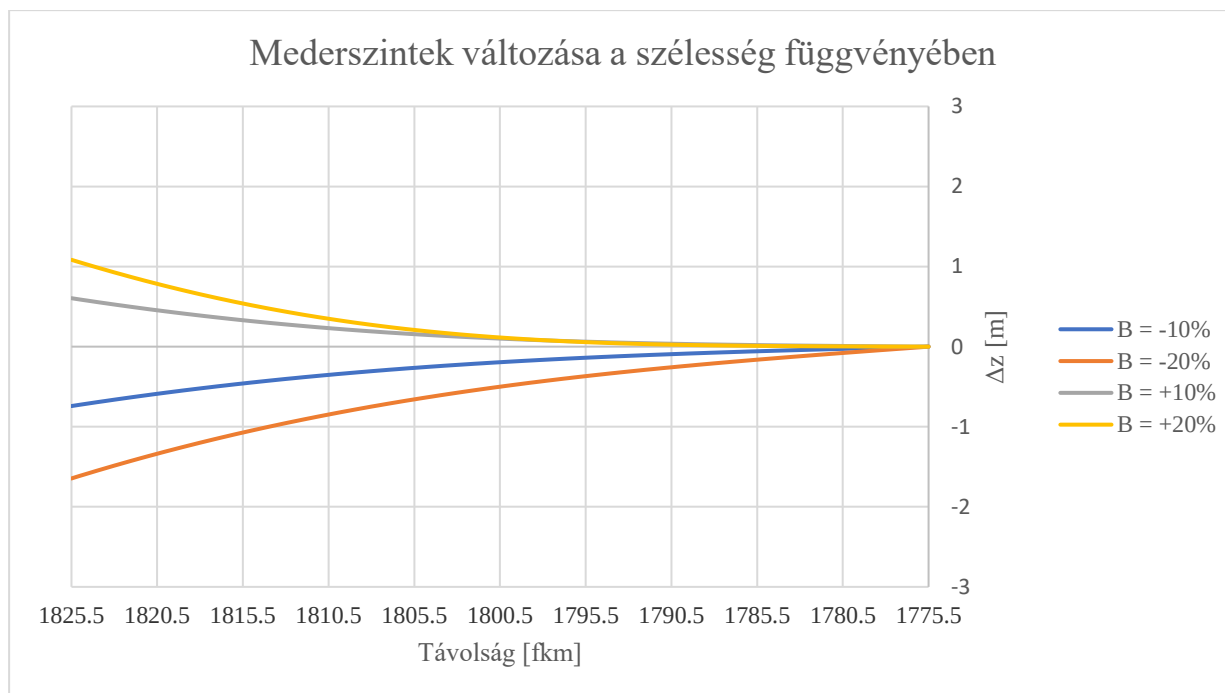


16. ábra: Vízszint változása a vízhozam függvényében

Az ábrán a jobboldali tengely a vízszint változás mértékét mutatja, míg a vízszintes tengely a távolságot folyam kilométerben. A vízhozam változásával a vízszint változásnál elmondható, hogy a 80%-os vízhozamnál a vízszint görbe láthatóan más trendet vesz fel, mint a többi felszíngörbe.

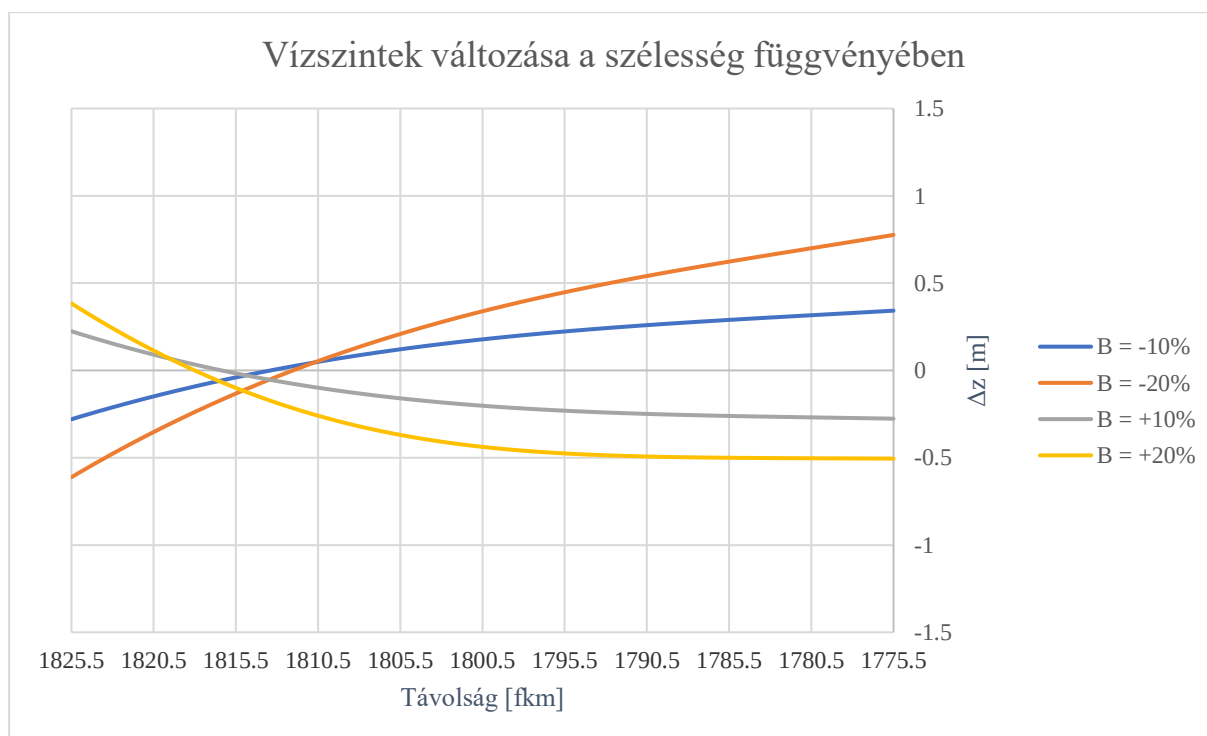
5.1.2. Szélesség

A szélesség esetében hasonlóképpen végeztem az érzékenységvizsgálatot, mint a vízhozamnál. Megvizsgáltam azt, ha 60 m és 120 m-el csökkentem és növelem, tehát 10% és 20%-kal, akkor az miként befolyásolja a mederszint és vízszint alakulását. Ez olyan szempontból is fontos lehet, hogy a szabályozásoknál a mederszélességet a főmeder kialakításával lecsökkentették. A kiindulási szélességet 600 m-re vettem fel, mert úgy saccoltam meg a korabeli szélesség értékét. Nem elfelejtendő, hogy hordalékszempontjából is igen fontos adat, hiszen szélesebb mederben ugyanaz a vízhozam és hordalékhozam feltöltődést okozhat vagy akár a mederszűkülését. Ezzel a hajózási nehézséget okozva, illetve további szabályozást követne, gondolva itt akár kotrási munkálatokra vagy sarkantyú sorok beépítésére. Ugyanakkor keskenyebb meder esetén pedig a meder kimosódását és akár az oldalfalak erózióját okozhatja. Az utóbbi esetben újabb munkálatokat követel meg, mint például partvédő művek építését.



17. ábra: Mederszint változások a szélesség függvényében.

Ahogy a probléma felvezetésében is taglaltam a modellvizsgálat is ezeket a problémákat hozza elő, hiszen látható, hogy 720 m-es meder esetében több mint 1 m-es feltöltődésről beszélhetünk. Azonban a 20%-os csökkenésnél, amely 480 m-es mederszélesség, ott több mint 1,5 m-es kimosódás figyelhető meg.

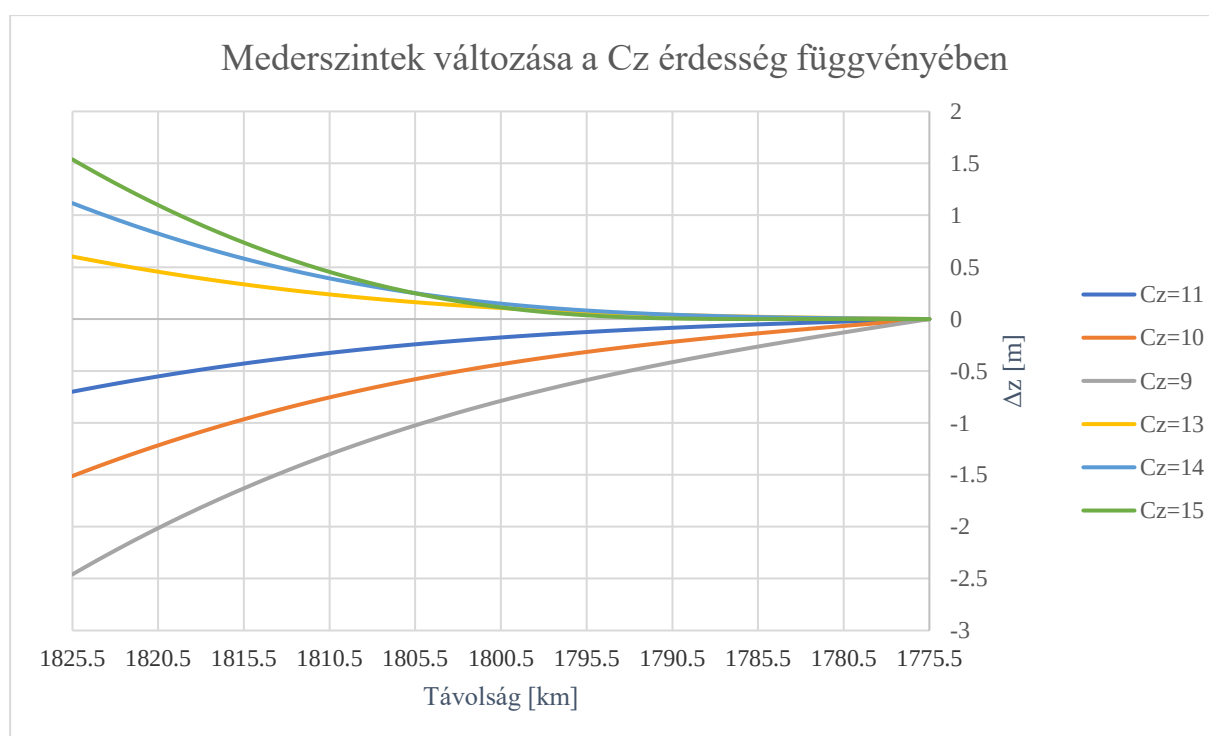


18. ábra: Vízszint változás a szélesség függvényében

Ahogy a vízhozam változásnál is látható volt, itt is trendben változatos a vízszint változása, mert amíg a csökkentett meder szélességnél meredekebb emelkedés figyelhető meg a vízszintben, addig a növelt szélesség esetében lefelé haladva ellaposodó trendet követ.

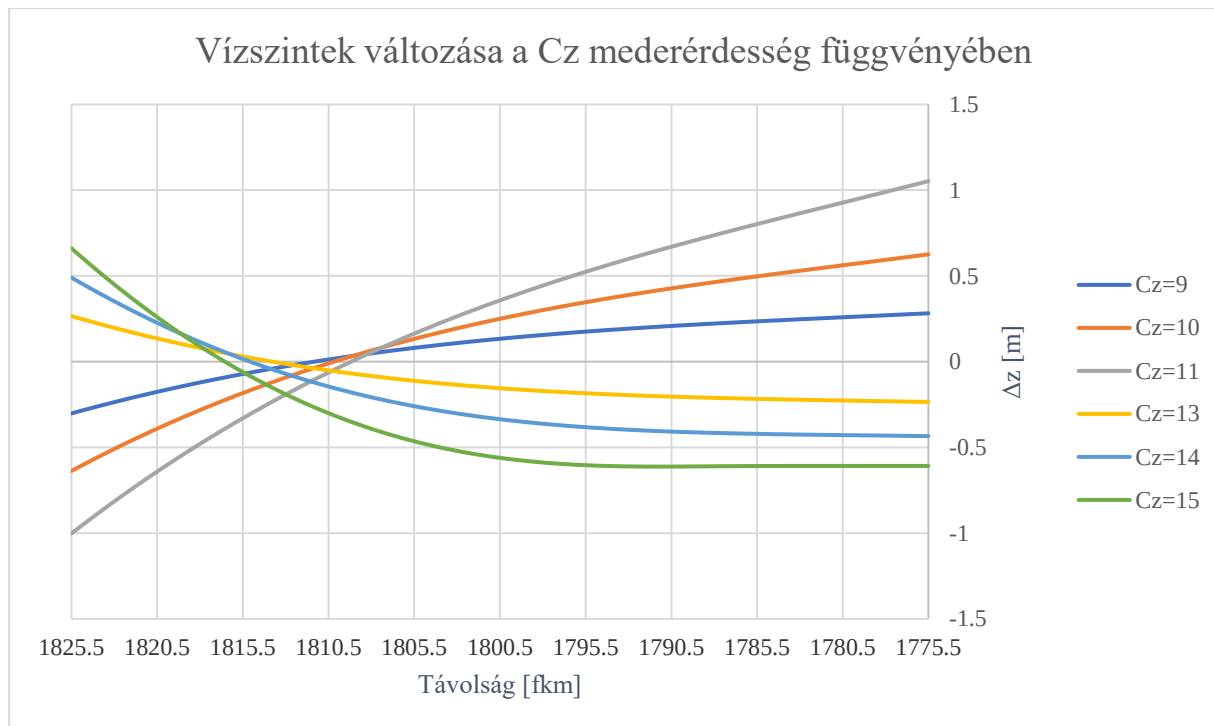
5.1.3. Mederérdesség (C_z)

A mederérdességnél a C_z értékét 12-nek vettem fel alapértéknek. Az említett feltételezésnek az az oka, hogy a szabályozás előtt fonatos ágrendszer volt, amely azt jelenti, hogy az érdesebb és emiatt egy kisebb simasági együtthatót kellett felvegyek. Továbbá amelyet a 2020-as TDK-mban modellvizsgálatként bemutattam, hogy a korabeli állapotban és a meandereknél a 12-14 érték reális a C_z -re, ezt Parker egyik tanulmánya és feltételezései is igazolták.



19. ábra: Mederszintek változása a C_z érték függvényében

Az érzékenységvizsgálat véleményem szerint igen beszédes, hiszen látszik az ábrán, hogy a simaság mekkora befolyásoló szereppel bír. Több leírásban is olvasható, hogy a fonatos ágrendszerben a hordalék lerakódások zátonyokat okoztak, ezzel is az érdességet növelve, vagyis a simaságot csökkentve. Ezesetben is látható, hogy a hordalékváltozás hangsúlyos a kisebb értékeknél. A C_z értékét drasztikusan lecsökkentve 9-re közel 2,5 m-es kimélyülést okoz, amely magyarázható a hordalékvándorlással. A simaság növelésével kisebb változásokat lehet látni, de 15-nél ígyis 1,5-es feltöltődést lehet megfigyelni. A szabályozással a meder simasági együtthatója növekedett és a szabályozás után ténylegesen mederemelkedés is történt.

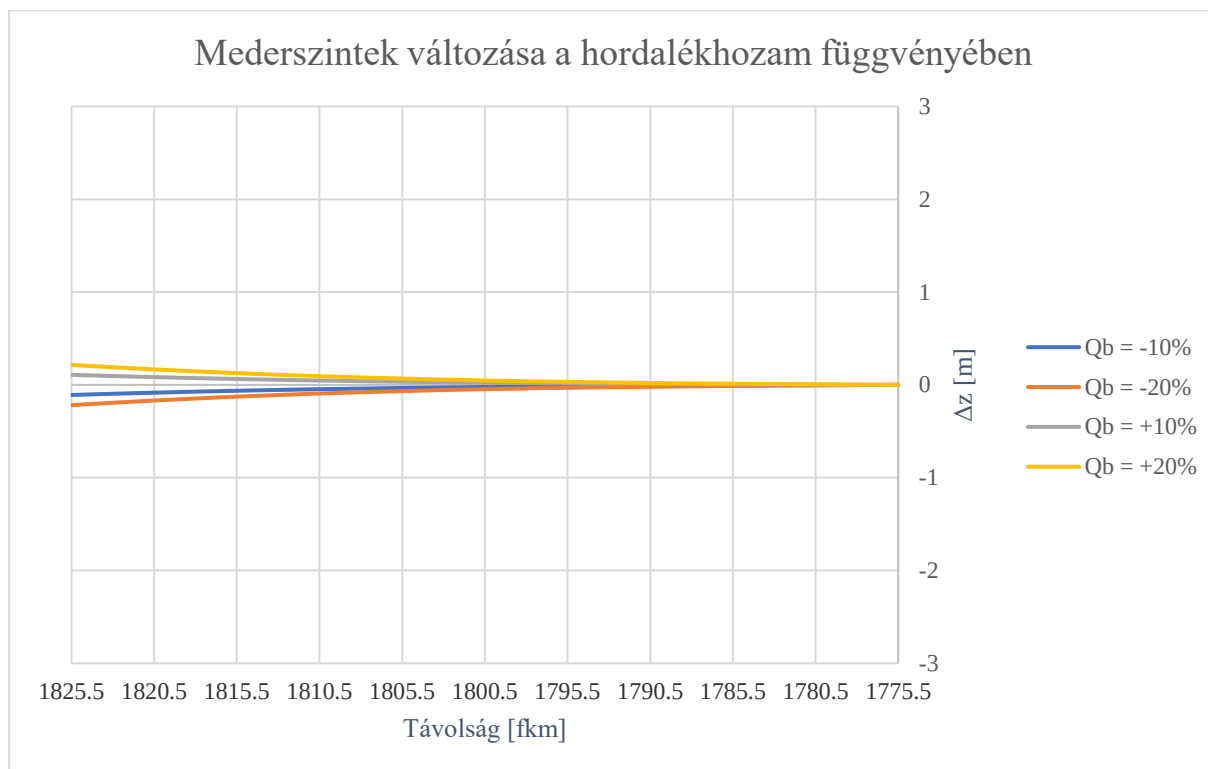


20. ábra: Vízszint változás a Cz függvényében

A trendbeli változás hasonló viselkedést mutat, mint az eddigiekben. A Cz érték változásával mondható el a legnagyobb vízszint változás. Az érdesség növelésével egyre meredekebb görbét kaptam és a végszelvényben ez 1 m-es növekedést eredményezett.

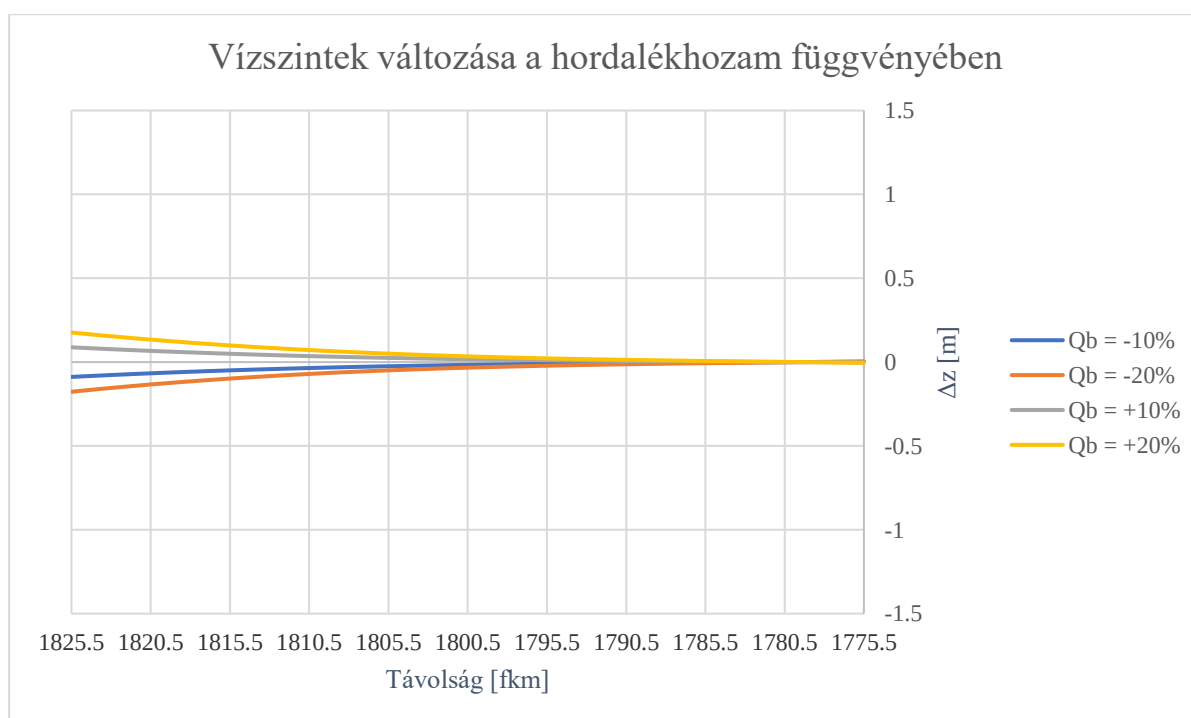
5.1.4. Hordalékhozam

Utolsó érzékenységvizsgálatomnál a hordalékhozam változását figyeltem meg. A hordalékhozam változása a dinamikus egyensúlyi állapot egyik kulcseleme. Magas hordalékhozam esetén egy kevésbé meredek szakaszon lerakódásokat okozhat, amely azért probléma, mert feltöltődést okozhat és zátonyokat. Alacsony hordalékhozam esetében egy meredekebb szakaszon medererózió is felléphet, mert a meder alján az inaktív részt felszakítja és azt viszi tovább, ezt meg akár egy laposabb szakaszon pedig lerakja. A hordalékhozamra olyan értéket vettem fel, amellyel a 0D modell szerint egyensúly van. Ez volt a kezdeti állapotom és ennek a 10%-os és a 20%-os változásait vizsgáltam.



21. ábra: Mederszint változás a hordalékhozam függvényében

Az ábrán látható, hogy habár 20%-os csökkenést és növekedést is figyelembe vettem, de önmagában a hordalékhozam nem okoz nagy változásokat. Ezt a jelenséget vizsgáltam a 0D modellel is 2020-ban és ott is azt az eredményt kaptam, hogy elenyésző a változás ennek a paraméternek a hatására.

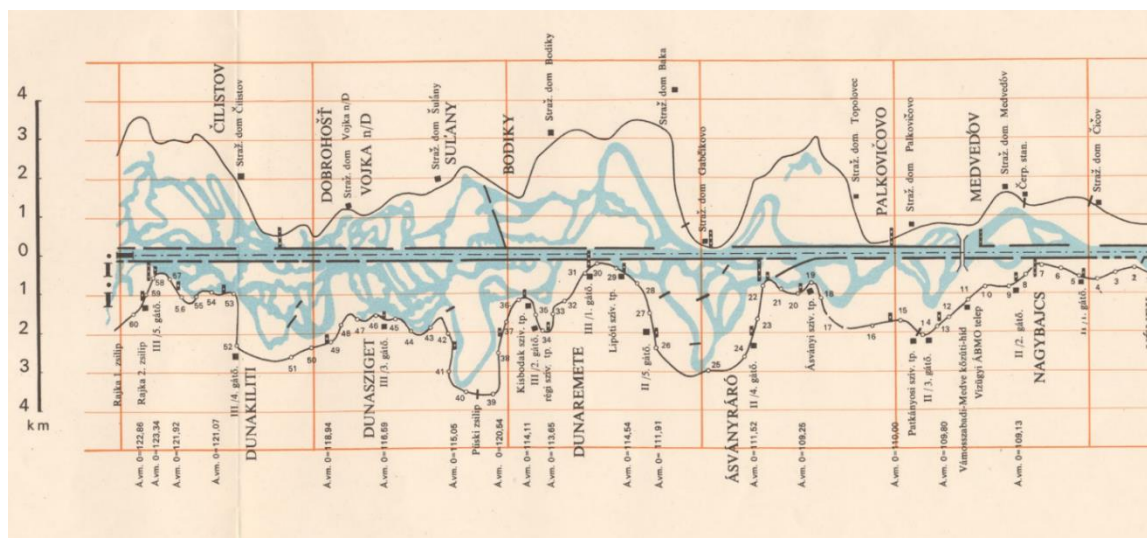


22. ábra: Vízszint változás a hordalékhozam függvényében

A vízszintnél is ugyanaz mondható el, mint a mederszint változásnál. Elenyésző a változás.

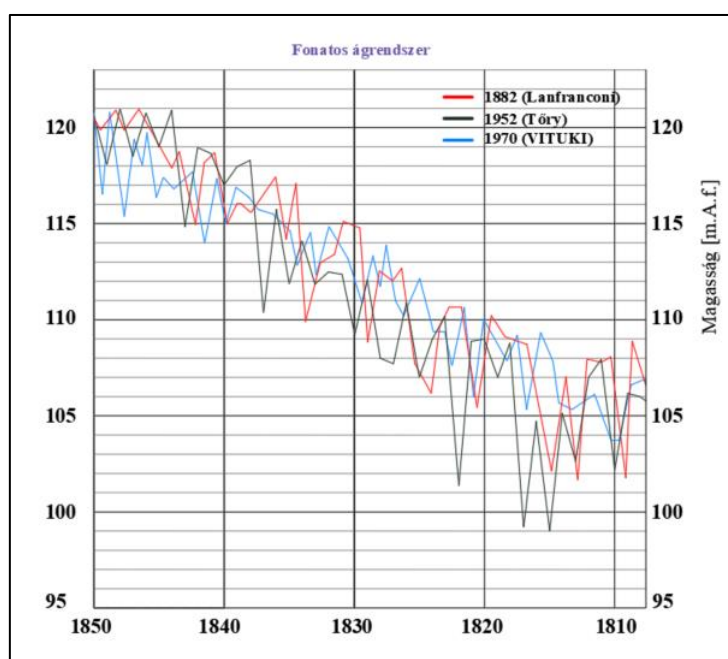
5.2. Fonatos ágrendszer szabályozása

A szabályozás előtt a Felső-Duna fonatos jelleget mutatott, a szabályozás célja egy főmeder kialakítása volt, ami előnyösebb feltételeket biztosít. Az alábbi képen látható a fonatos jelleg:



23. ábra: Fonatos ágrendszer a magyarországi Felső-Dunán (Forrás: VITUKI, 1954)

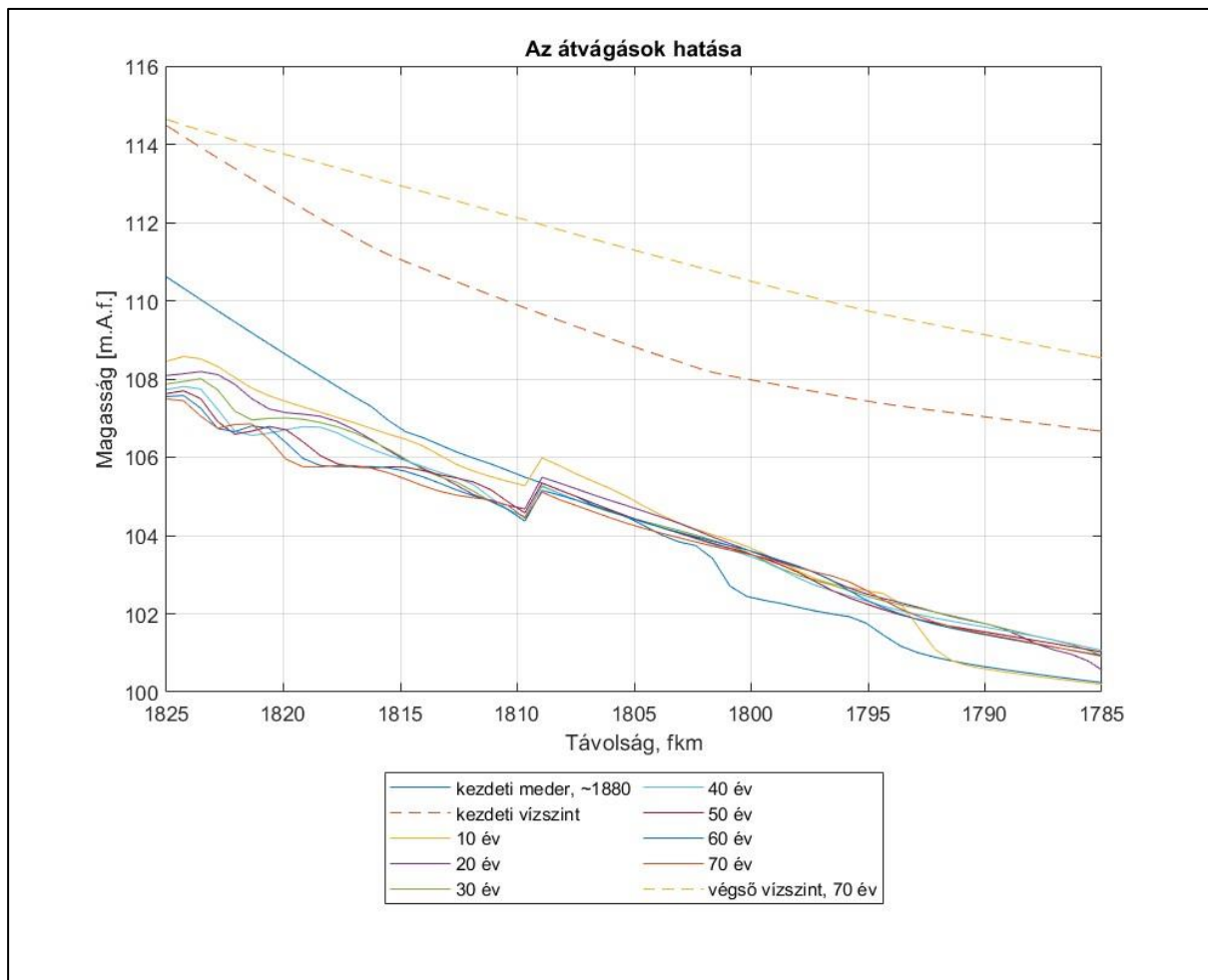
Az meanderek átvágásával a folyó hossza is értelemszerűen megrövidült, továbbá a munkálatokkal a hordalékháztartás is változott. A talált hossz-szelvényeket összehasonlítottam és külön a fonatos jelleget kiemeltem.



24. ábra: Hossz-szelvények a fonatos ágrendszerénél

A fonatos jelleget beépítettem a már megalkotott inhomogén 1D modellbe. Az átvágást azzal érzékeltettem, hogy az átvágásokkal a folyó hossza is lerövidül, így a modell úgy vette ezt figyelembe, hogy a Δx -et csökkentette le egy csökkentő tényezővel, melyet én 0,9-nek vettem fel a szakirodalmi adatok alapján.

Ezzel a feltételezéssel a modell a következő eredményt adta:

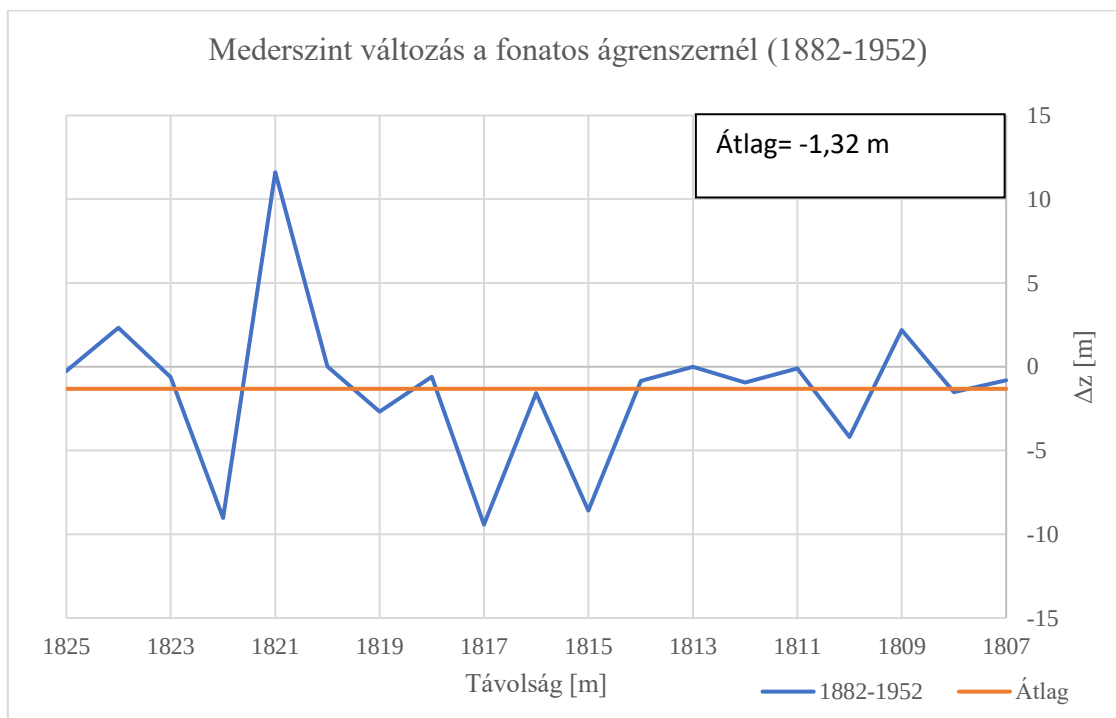


25. ábra: Átvágások modellezése

Az ábrán az látható, hogy a 1880-tól indítottam, mert utána kezdődtek el a szabályozási munkálatok és 70 évet vizsgáltam, mivel 1950-re vonatkozóan már volt másik mederszint adatom. A modell alapján azt látom, hogy a kezdőszelvényben kb. 3 méteres mélyülés történik, ami a fonatos jelleg végén már kb. 1 m-es mélyülést mutat. Sajnos idő és adat híján nem tudtam a modellt a fonatos jelleg kezdő fkm-étől indítani (ill. felépíteni), így nem tudom az mennyit javítana az eredmények alakulásán. Viszont látható, hogy a beavatkozás alvizen az erodált hordalék jelentős lerakódást okozott. A vízszintek megfigyelése alapján az következtethető,

hogy ez a lerakódás végül visszaduzzasztás révén megnöveli a vízszintet a beavatkozások helyén.

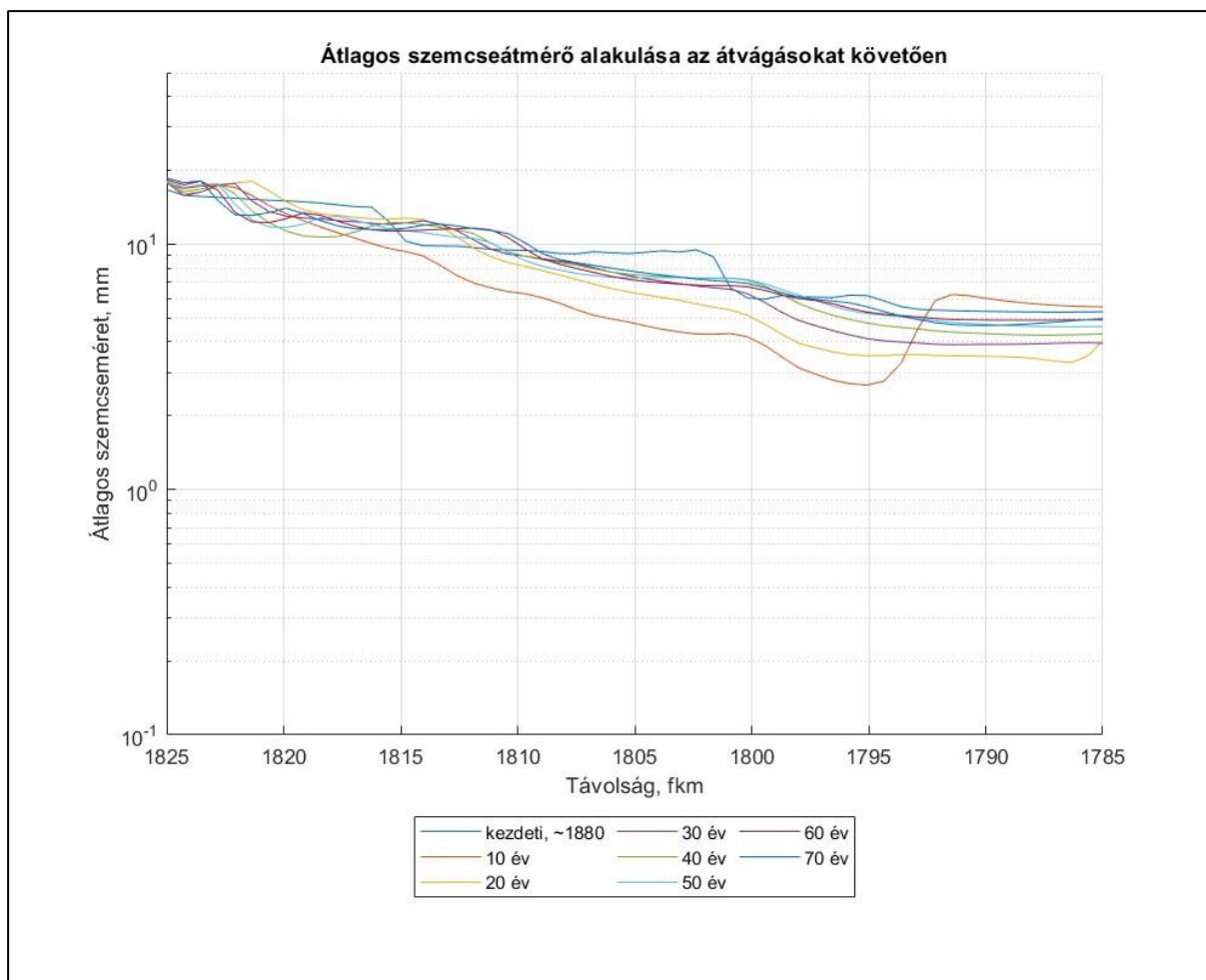
A meglévő hossz-szelvényeket összehasonlítottam és a mederszintek különbségét ábrázoltam, illetve az átlagos mederváltozást is ezek alapján kiszámítottam, hogy össze lehessen vetni a modell adatokkal (26. ábra).



26. ábra: Mederszint különbségek összevetése

Az ábrán látható, hogy 1882-1952 közötti időszakban medermélyülés figyelhető meg, amely átlagosan -1,32 m. Tehát 1,32 m-es átlagos mélyülés történt a hossz-szelvények alapján. Ezt a medermélyülést jól adja vissza a modell a fonatos ágrendszer alsó felén (ahol feltehetően a befolyási perem hatása már nem érvényesül).

A modellel nemcsak a mederszint és vízszint változásokat rajzoltattam ki, hanem azt is, hogy az átlagos szemátmérő miként alakul (27. ábra).

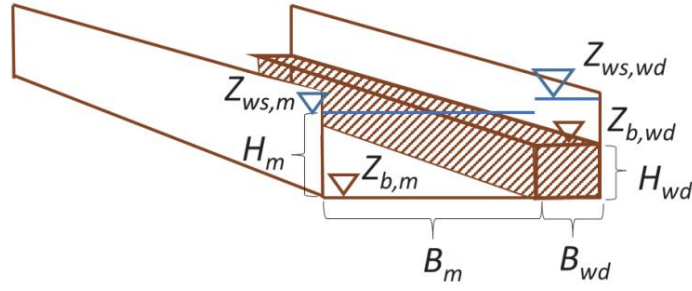


27. ábra: Átlagos szemátmérő változása

5.3. Sarkantyúsor beépítése a modellbe

A sarkantyúk beépítésénél is először elvégeztem egy hossz-szelvény vizsgálatot, hogy a modellel majd legyen viszonyítási alapom. A leírások alapján azt találtam, hogy a vizsgált szakaszra 1938-1944 között két sarkantyúsor épült, az egyik a medvei 1807- 1805 fkm míg a másik a Nagybajcs-Vének vonalon, amely 1802-1793 fkm. A sarkantyú sorok beépítésére valószínűleg azért volt szükség, mert a mederátvágásokkal nőtt a hordalék lerakódás és ezzel akarták a mederszintet javítani. Az átvágások követő hordalék lerakódást már az átvágások modell eredményében is látni lehet. A modellbe az említett két sarkantyúsor egy összefüggő sarkantyúsorként építettem be, mert félő volt, hogy 2 részletben ekkora közelségben még bizonytalan a modell. Tehát 14 km-es távon vizsgáltam meg a sarkantyúk hatását a modellel. Ehhez a vizsgálathoz további egyenletekkel kellett bővítenem a modellt, melyeket egy külföldi cikkből vettem át (Török és Parker, 2022).

A sarkantyúk beépítésének alapelveinek magyarázatát a következő ábra segít (28. ábra).



28. ábra: Magyarázó ábra a sarkantyúk modellbe építéséhez (Forrás: Török és Parker, 2022)

A beépítés lényege, hogy a modellezni kívánt szakaszt felosztjuk két párhuzamos csatornára: az egyik a szűkített rész lesz, a másik pedig maga a sarkantyúsor. A két csatorna hidraulikai paraméterei viszont nem megegyezők.

A következő közelítéssel kell élni:

Mivel a teljes szélesség megegyezik a szűkített rész és a sarkantyúzott rész szélességének összegével:

$$B = B_m + B_{wd} \quad (25)$$

A két csatornában a mederszintek, vízszintek és vízmélységek között az alábbi kapcsolatok írhatók fel:

$$H_m = z_{ws,m} - z_{b,m} \quad (26)$$

$$H_{wd} = z_{ws,wd} - z_{b,wd} \quad (27)$$

A vízfelületre ható légköri nyomás mindkét csatornában azonos. E megfontolások alapján a Bernoulli-egyenlet a következő formában érvényes:

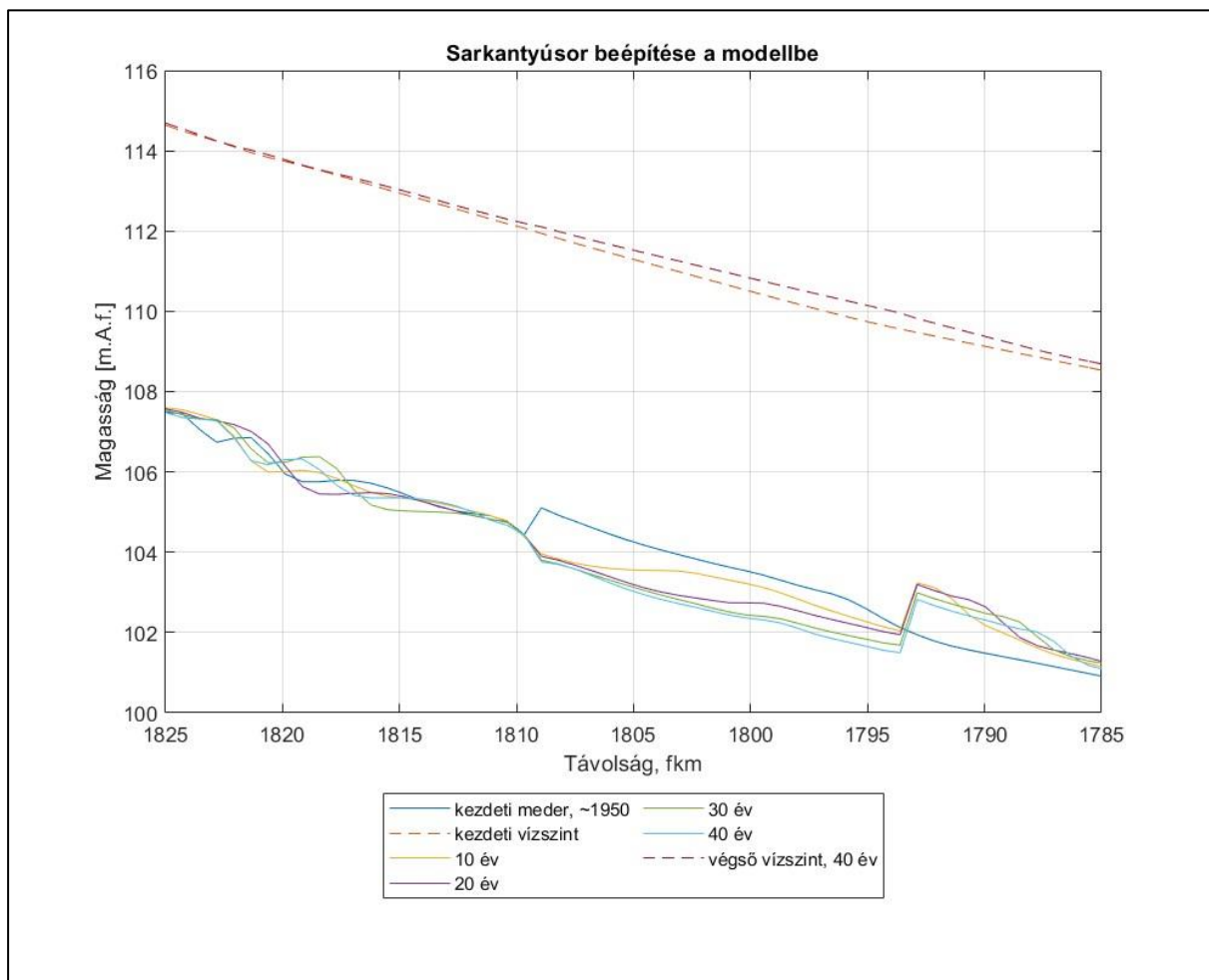
$$\frac{U_m^2}{2g} + z_{ws,m} = \frac{U_{wd}^2}{2g} + z_{ws,wd} \quad (28)$$

Továbbá a folyadék folytonossági egyenlete is érvényes, azaz a teljes vízhozam egyenlő a két csatornában áramló vízhozamok összegével:

$$Q_{total} = Q_m + Q_{wd} = U_m H_m B_m + U_{wd} H_{wd} B_{wd} \quad (29)$$

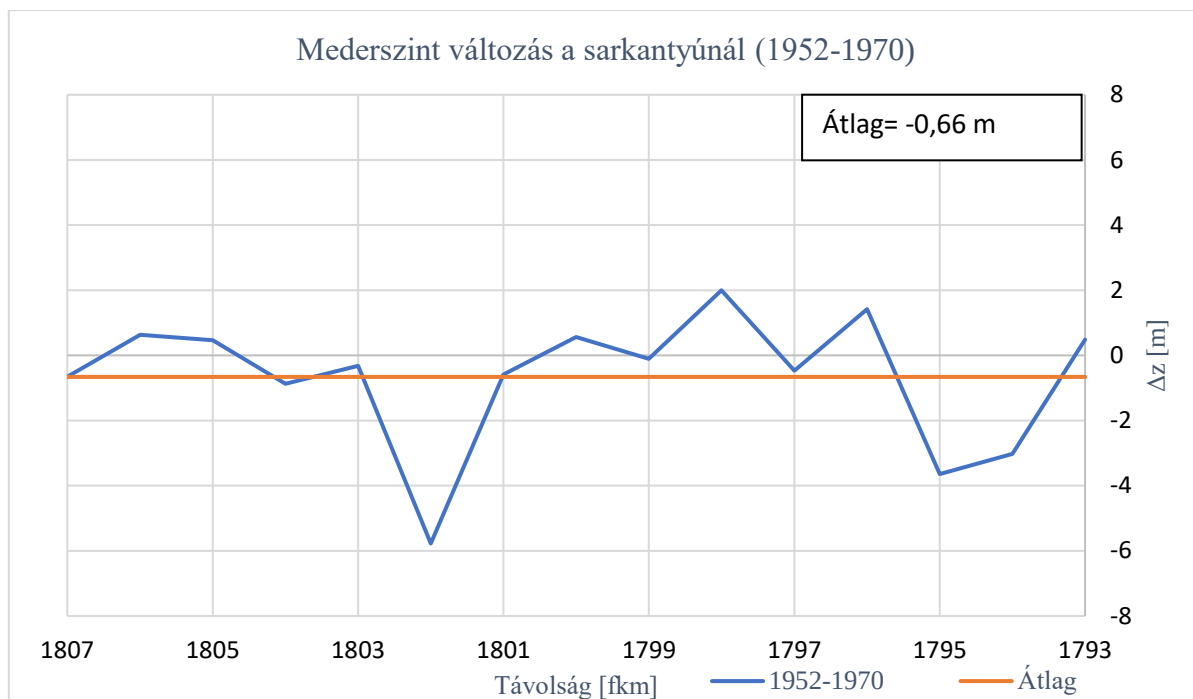
Az egyenletekkel ellátott modell már figyelembe tudja venni a sarkantyúzás hatását is, így a beavatkozás vizsgálatát el tudtam végezni. A modellvizsgálatot ~1950-től indítottam, ahonnan az egyik hossz-szelvény forrás származik és a vízlépcső megépüléséig (~1990) futtattam.

Ellenőrző pontnak vettem a 20 évvel később kialakult állapotot, hiszen 1970-es hossz-szelvényt találtam az irodalomkutatás alatt. A futtatáshoz a szabályozáskor megvalósult szélességgel paramétereztem a modellt és abba helyeztem bele a sarkantyúsort. A modell futtatás eredménye a következőt adta:



29. ábra: Sarkantyúk hatásvizsgálata

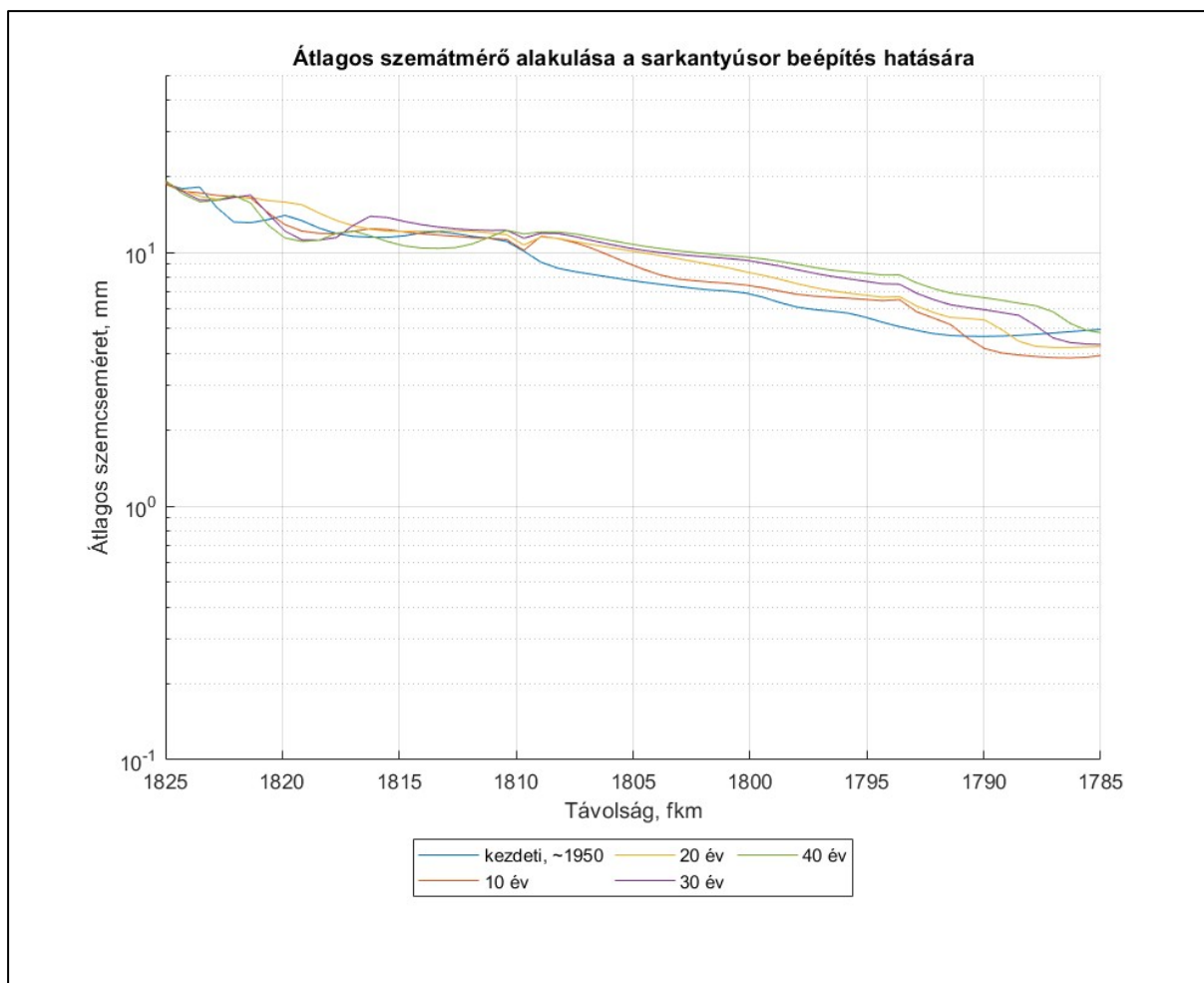
Az 1970-es állapot lila színnel van jelölve. Látható, hogy a sarkantyú megépülésével a meder elkezd kimosódni, amely a sarkantyú egyik célja. A modellel szépen kirajzolható a hatása, amely kb. ~70 cm-es átlagos kimosódást mutat átlagosan a sarkantyúzott szakaszra 20 év után. A vizsgált hossz-szelvényeknek ezen kérdéses részét én is összehasonlítottam és a szintek különbségeit összevetettem, amelyet a következő ábra mutat:



30. ábra: Mederszint változása a sarkantyúsnál 1952- és 1970 között

Amint látható az ábrán is és a valóságban is a meder mélyülése volt hangsúlyos. A meder változásának a szakaszon az átlagos értékét vettem, ami 66 cm-es kimosódást mutat. Ez azt jelenti, hogy a modell és a valóság között csupán 4 cm-es különbség van.

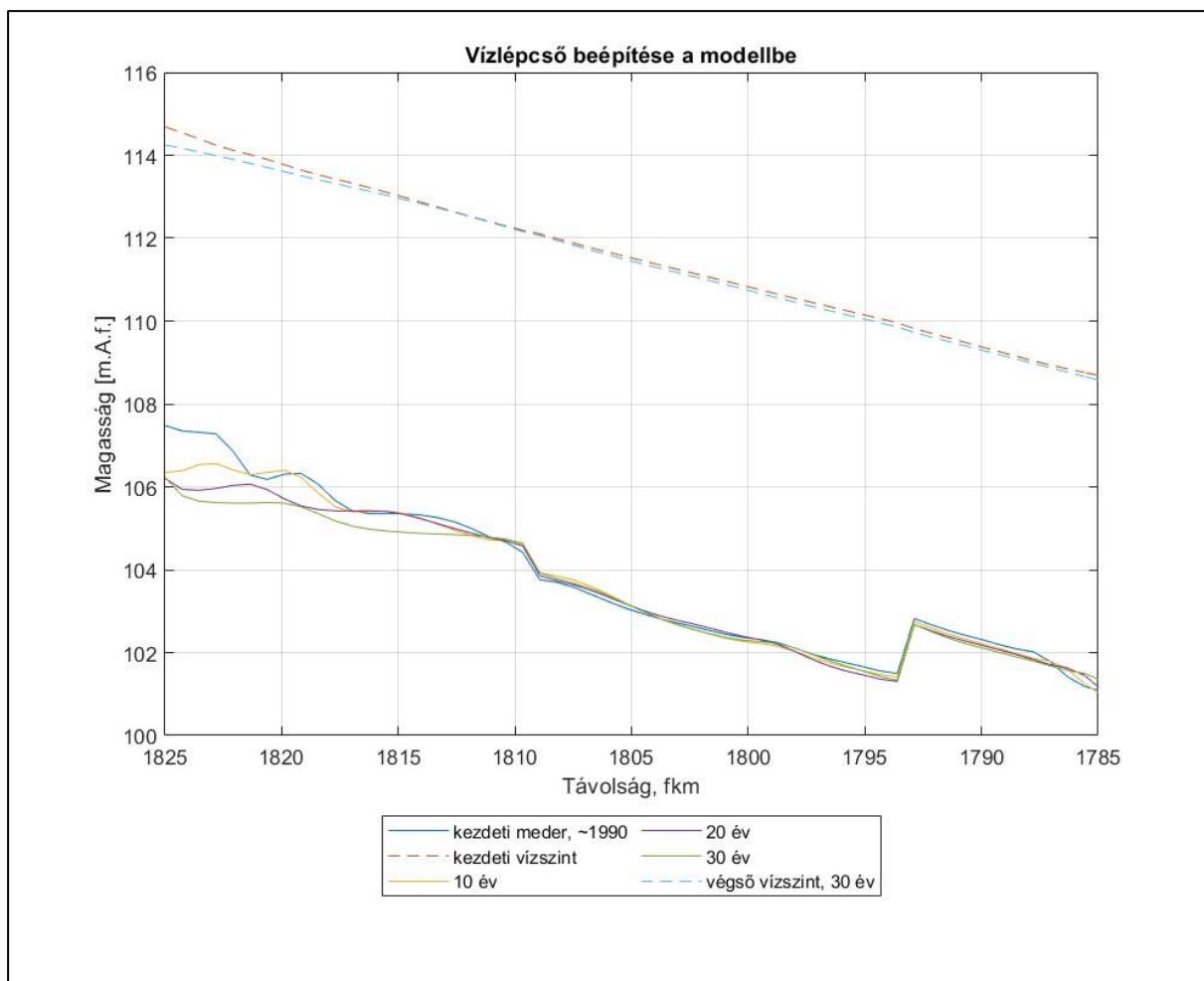
Ebben az esetben is a modell nem csak a mederszint változását adja, hanem az átlagos mederanyag szemcseméretét is a vizsgált években.



31. ábra: Szemcseméret alakulása

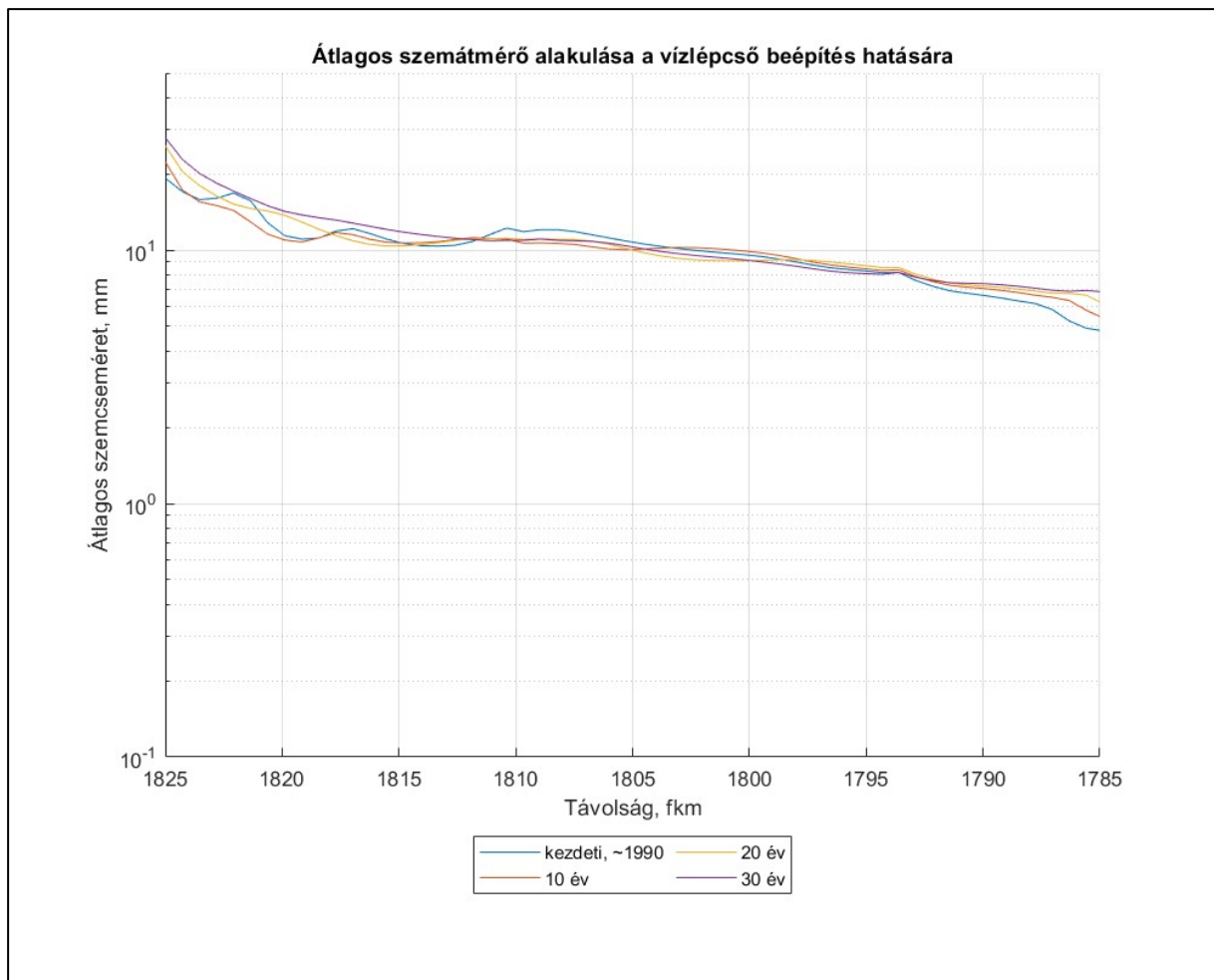
5.4. Vízlépcső beépítése a modellbe

A vízlépcső modellbe építésénél azt vettem figyelembe, hogy a megépülés és üzembe helyezés után a vízlépcső felvizen ragad meg a hordalék, tehát az alvízen a hordalékhozam csökken. A modellben az 1990-ben épült bösi vízlépcsőt modelleztem. A modellvizsgálatom alapja az volt, hogy a már beépített sarkantyúk után 1990-ig futtatott modell lesz az alapja a modellvizsgálatnak. A vízlépcső beépítését 1990-től úgy érzékeltettem, hogy a hordalékhozamot 90%-kal csökkentettem a szakaszon és így futtattam a modellt 30 évet, tehát 2020-ig. A modelleredmények alapján azt látom, hogy a vízlépcső alatti kis szakaszon erózió lép fel, de ez a későbbi szelvényekben már nem okoz jelentős változást. A modelleredmények a következők:



32. ábra: Vízlépcső modellezése

Ahogy az előbbiekben említettem az ábrán megfigyelhető, hogy az első 9 km-en van jelen erózió, majd az azt követő szelvényekben az évtizedek múltával is hasonló helyen mozog a meder és a változás elhanyagolható, illetve a profilja nem változik a kiindulási állapothoz képest.



33. ábra: Átlagos szemátmérő változása

A D_{50} változásánál az látható, hogy a befolyási szelvény közelében a megbontott durva mederanyag az áramlás a szelektív erózió révén fokozatosan lerakja, ezzel egyre durvább mederfelszín alakít ki. A mederpáncélozódás hatására egyre stabilabb a meder, ami magyarázza, hogy ott miért nem tapasztalható további medermélyülés.

6. Összefoglalás

Dolgozatomban a magyarországi Felső-Duna egy kijelölt szakaszának a mesterséges beavatkozások okozta morfordinamikai változásait vizsgáltam egy saját fejlesztésű 1D morfordinamikai modell segítségével. A vizsgált szakasz Dunaremetétől (1825 fkm) Dunaalmásig (1752 fkm) húzódik, amely két szelvény között egy eséstörés tapasztalható. Kezdetben egy homogén szemösszetételű modellt építettem fel, majd paramétereztem a vizsgált szakaszra. Ezzel a modellel érzékenységvizsgálatokat végeztem különböző morfordinamikai paraméterekre. Azt tapasztaltam, hogy a mederváltozások és a vízsztintváltozások jelentős érzékenységet mutattak a vízhozamra, mederszélességre és a mederérdességre, de meglepően érzéketlenül reagáltak a mérések és irodalomkutatások szempontjából legmegbízhatatlanabb paraméterre, vagyis a hordalékhozamra.

Célom volt, hogy Matlab környezetben az 1D modellt tovább tudjam fejleszteni egy inhomogén szemösszetételű modellre. Korábbi vizsgálataim ugyanis azt mutatták, hogy a vegyes szemösszetétel figyelembevétele nagyon fontos a vizsgált szakaszon tapasztalható szelektív erózió és mederpáncélozódás modellbe való implementálhatósága miatt. Ezen tapasztalatok miatt a modellt a Wilcock & Crowe vegyes szemösszetételre kifejlesztett hordaléktranszport modelljének beprogramozásával fejlesztettem tovább. Vegyes szemösszetételű modell esetében a kezdeti és peremfeltételek már szemösszetételi görbéket kívánnak meg. Ezért részletes irodalomkutatást végeztem, hogy minél megbízhatóbb paraméterezést és kalibrációt tudjak elérni.

A modellel három beavatkozás hatásvizsgálatát szerettem volna elvégezni. Mivel az első ilyen beavatkozás a 19. század végén lévő kanyarulatátvágási, valamint mederszűkítési munkák voltak, így szükségem volt a folyószabályozás előtti korabeli állapotra. Az 1D modell validálását úgy végeztem el, hogy az irodalmi adatokat teljesen vagy térhelyesen visszakapjam vele és azt vettem később kezdő állapotnak (szabályozás előtti állapotnak).

Első modellvizsgálatom a már említett 19. századi mederrendezés volt. Ebben a vizsgálatban a kanyarulatátvágások és mederszűkítések hatását vizsgáltam a modellel. A vizsgálat azért fontos, mert az átvágásokkal a medergeometria is és ezáltal a hordalékháztartás is változott, nem beszélve arról, hogy a folyó hossza is lerövidült. A modellvizsgálat azt mutatta, hogy a szakirodalmak alapján számított átlagos medersüllyedést a modell befolyási szakaszát leszámítva (ahol nagy kimosódást tapasztaltam a modelleredményekben) a modell közelítőleg jól adja vissza. Úgy vélem, hogy ha a befolyási szelvényt egy felsőbb szelvényben tudnám

definiálni (de felsőbb szelvényre nem találtam megfelelő mennyiségű adatot), akár a fonatosság elejénél, úgy kedvezőbb eredményt kaphatnék, a pontatlanságot ugyanis elsősorban a befolyási szelvénynél tapasztalható intenzív kimosódás okozza. Magát a jelleget a modell viszont jól adta vissza és látható benne a hossz-szelvényeken is megfigyelhető mederváltozási trend. Eszerint az átvágások helyén medererózió lép fel és az azalatti szakaszon pedig egységes medertöltődést lehet észlelni. A medertöltődés visszaduzzasztása okán az árvízszinteket feltehetően mégsem csökkentette a mederátvágási beavatkozás.

Második vizsgálatomban a Medvétől (1807 fkm) majdnem Gönyűig az 1793 fkm-ig húzódó sarkantyúsort implementáltam a modellbe. A sarkantyúsor megépítésétől feltehetően a mederátvágások okozta hordaléklerakódások kimosását várták, ezzel is csökkentve a visszaduzzasztás okozta vízszintemelkedést. A vizsgált sarkantyúsor 1938 és 1944 között épült meg, ezért a hozzá legközelebbi hossz-szelvény időszakában végeztem a vizsgálatot. Az átvágások vizsgálatát 1950-ig végeztem, majd itt építettem a modellbe a sarkantyúkat és futtattam 1990-ig az utolsó általam vizsgált beavatkozásig. Az 1970-es a hossz-szelvényt vettem viszonyítási alapnak. Kiszámítottam, hogy az irodalomkutatásban talált 1952-es és 1970-es hossz-szelvényeknek a sarkantyúzott szakaszon mekkora az átlagos mederváltozása, hogy a modellezett eredményt tudjam hozzá hasonlítani. A modellnél is átlagos mederváltozást néztem, ahogy a valós értékeknél is és azt a végső eredményt kaptam, hogy a modell 4 cm-es tévedéssel írta le a meder átlagos változását: a számított valós medersüllyedés 0,66 m volt, a modell által kiszámított átlagos eredmény pedig kb. 0,70 m. A 8. ábrán bemutatott hossz-szelvényeken az látható még, hogy a sarkantyúk alvízén lerakódás jelenik meg, amelyet a modell is megmutat, tehát ennek a jellegét is jól megadta a modell.

Utolsó modellvizsgálatomban a vízlépcső hatását vizsgáltam meg. 1990-ben épült a Felső-Dunán a bősi vízlépcső. Ennek a hatását építettem be utoljára a modellbe. A vízlépcső hatását úgy vettem figyelembe, hogy a befolyási peremfeltételeknél a hordalékhozamot 90%-kal csökkentettem. Erre azért volt szükség, mivel a vízlépcső visszafogja a hordalékot és ezzel lehet a legjobban a hatását leírni a modellben. A modell eredményeként azt kaptam, hogy a vízlépcső közvetlen alvízi, közel 9 km-es szakaszán, habár medererózió lép fel, de azon túl számottevő hatása nincs. Ennek feltehetően elsősorban a már bepáncélozódott mederfelszín az oka. Ezzel a vizsgálattal arra is rámutattam, hogy a vizsgált beavatkozásoknak feltehetően nincs érdemi hatása a napjainkban tapasztalható morfordinamikai folyamatokat tekintve. Vagyis, a beavatkozásoknak jelentős morfordinamikai hatása volt és kibellentették a szakaszt a dinamikus egyensúlyi állapotából, de mára már kialakult az új egyensúlyi állapot.

A modellvizsgálatok alapján azt látom, hogy a modell alkalmas a beavatkozások hatását megbízhatóan vizsgálni, ha a vizsgált szakaszra a paraméterezés és a kalibráció megbízható adatok alapján megtörténik. Ez amiatt is nagyon fontos, mert a modell azt is megmutatja, hogy a hordalékháztartás a folyó életében mennyire fontos és mennyit befolyásol. A modell a későbbi beavatkozásoknál segítséget nyújthat az előnyösebb tervezésben, mert segítségével kimutatható, hogy milyen állapotot idéz elő egy adott időtávra egy-egy beavatkozás. Fontos, hogy az 1D jelleg miatt nem pusztán a tervezett beavatkozások helye vizsgálható, hanem azok alvízi (pl. erodált hordalék okozta lerakódások) és felvízi (pl. hordalékkúpok okozta visszaduzzasztás) környezete is. A modell nemcsak beavatkozások tervezéséhez tud segítséget adni, hanem úgy gondolom, hogy más szakágaknak is peremfeltételeket és becsléseket tud szolgáltatni morfordinamikai paramétereket illetően.

7. Ábrajegyzék

1. ábra: A magyarországi Felső-Duna szabályozás előtti fonatos jellege (Forrás: Szombati, 2016)	5
2. ábra: Összehasonlító ábra a vizsgált szakasz szabályozás előtti/utáni állapotáról (Forrás: DuRe Flood project, 2015)	5
3. ábra: Szabályozás utáni állapot a nagybajcsi szakaszon (Forrás: DuRe Flood project, 2015).....	6
4. ábra: Sarkantyúsor Nagybajcsnál (Forrás: Google Maps, 2022).....	6
5. ábra: Duna hossz-szelvény ábrázolása (Forrás: Holublová et al., 2004).....	7
6. ábra: Szabályozás előtti Duna hossz-szelvénye (Forrás: Lanfranconi, 1882)	10
7. ábra: Dunaremetei szelvény változása 17 év alatt (Vízrajzi Évkönyvek, 1953 és 1980)	11
8. ábra: Dunai vizsgált hossz-szelvények (Forrás: Tőry, 1952; VITUKI, 1970; Lanfranconi, 1882)...	13
9. ábra: Dunaremete szemösszetételi görbéi (Forrás: VITUKI, 1954).....	16
10. ábra: Nagybajcs szemösszetételi görbéi (Forrás: VITUKI, 1954)	17
11. ábra: Dunaalmás szemösszetételi görbéi (Forrás: VITUKI, 1954)	18
12. ábra: Inhomogén modell kód részlet	24
13. ábra: Korabeli állapot modellezése	28
14. ábra: Átlagos szemcseméret változása	29
15. ábra: Mederszintek változása a vízhozam változás függvényében	30
16. ábra: Vízsint változása a vízhozam függvényében.....	31
17. ábra: Mederszint változások a szélesség függvényében.....	32
18. ábra: Vízsint változás a szélesség függvényében	32
19. ábra: Mederszintek változása a Cz érték függvényében.....	33
20. ábra: Vízsint változás a Cz függvényében.....	34
21. ábra: Mederszint változás a hordalékhozam függvényében	35
22. ábra: Vízsint változás a hordalékhozam függvényében.....	35
23. ábra: Fonatos ágrendszer a magyarországi Felső-Dunán (Forrás: VITUKI, 1954).....	36
24. ábra: Hossz-szelvények a fonatos ágrendszerénél	36
25. ábra: Átvágások modellezése	37
26. ábra: Mederszint különbségek összevetése	38
27. ábra: Átlagos szemátmérő változása	39
28. ábra: Magyarázó ábra a sarkantyúk modellbe építéséhez (Forrás: Török és Parker, 2022)	40
29. ábra: Sarkantyúk hatásvizsgálata.....	41
30. ábra: Mederszint változása a sarkantyúsnál 1952- és 1970 között.....	42
31. ábra: Szemcseméret alakulása	43
32. ábra: Vízlépcső modellezése	44
33. ábra: Átlagos szemátmérő változása	45

8. Táblázatjegyzék

1. táblázat: Irodalomkutatás összefoglaló táblázat	9
2. táblázat: Hordalékhozam adatok	14
3. táblázat: Jellemző szemcse adatok	15

9. Hivatkozások

- J. Bogárdi: A hordalékmozgás elmélete. Budapest, Hungary: Akadémiai Kiadó, 1955
- G. Parker: Selective Sorting and Abrasion of River Gravel. II: Applications, Journal of Hydraulic Engineering: 117(2), 1991.
- 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.
- M. Garcia: "Sedimentation Engineering: Processes, Measurements, Modeling and Practice", American Society of Civil Engineers, ISBN: 978-0-7844-0814-8, 200
- Wilcock, P. R., and Crowe, J. C., 2003, Surface-based transport model for mixed-size sediment, Journal of Hydraulic Engineering, 129(2), 120-128.
- Országos Vízügyi Főigazgatóság, Vízrajzi Évkönyvek. Vízügyi honlap: <https://www.vizugy.hu/print.php?webdokumentumid=1524>, 2022
- Google Maps, online légifelvétel, Google, <https://www.google.hu/maps>, 2022
- 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, 2004.
- G. T. Török: Vegyes szemösszetételű folyómeder morfológiájának numerikus vizsgálata, BME-ÉMK TDK, Budapest, 2011.
- E. Nyíri: Folyókák dinamikus egyensúlyi állapotát becslő eljárás kidolgozása és alkalmazása a magyarországi Felső-Dunán, BME-ÉMK TDK, Budapest, 2020.
- E. Nyíri: Folyómedrek egyensúlyi állapotának nagy tér-idő léptékű vizsgálata 1D modellezéssel, 2021
- G.T. Török, G. Parker: Significance of Time Dependence in The Effect of Wing Dams on Water Levels, 2022
- E. Lanfranconi: Magyarország ármentesítése, 1882
- 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
- VITUKI Tanulmánytár XXVI. 5/b (77-78), 1954

- K. Tőry: A Duna és szabályozása, Budapest, , Hungary: Akadémiai Kiadó, 1952.
- VITUKI: Duna atlasz, 1970

10.Köszönetnyilvánítás

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

A Kulturális és Innovációs és Minisztérium ÚNKP-22-1-I-BME-72 kódszámú Új Nemzeti Kiválóság Programjának a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alapból finanszírozott szakmai támogatásával készült.