



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

Építőmérnöki Kar

Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszék

A magyarországi Közép-Tisza szabályozásának morfodinamikai vizsgálata

Tudományos Diákköri Konferencia 2024

Készítette: Nyiri Emese

Konzulensek: Dr. Török Gergely Tihamér

Dr. Homoródi Krisztián

Tartalom

Kivonat	4
Abstract	5
1. Bevezetés	6
2. Irodalomkutatás.....	10
2.1. A meder geometriai jellemzői	11
2.1.1. Szélesség	11
2.1.2. Mederesés.....	12
2.1.3. Hossz-szelvény	13
2.2. Görgetett hordalékhozamok	13
2.3. Szemösszetétel és jellemző szemcseméretetek	14
2.4. Az irodalomkutatás összefoglalása	15
3. Alkalmazott módszertan	17
3.1. 0D modell.....	17
3.1.1. 0D alapegyenletek	18
3.2. pyRiverbed mederdomborzat-generátor.....	20
3.3. SRH-2D áramlásmodell	23
4. Módszertani igazolás	25
5. Modellvizsgálatok.....	30
5.1. Érzékenységvizsgálat	30
5.2. Korabeli állapot modellezése	31
5.3. Modell alkalmazás.....	37
5.3.1. Morfológiai alkalmazás.....	37
5.3.2. Élőhely szempontú alkalmazási lehetőségek	38
6. Összegzés	43
7. Ábrajegyzék	46
8. Táblázatjegyzék	47

9.	Hivatkozások.....	48
10.	Köszönetnyilvánítás	50

Kivonat

A folyók életében folyamatos változások mennek végbe, amelyek egy ún. dinamikus egyensúlyi állapot felé tartanak. Azt elérve is megfigyelhetők további mederváltozások, viszont azok hatására nem várható szignifikáns eltérés a dinamikus egyensúlyi állapottól. Jelentősebb természetes vagy mesterséges folyamatok miatt azonban a dinamikus egyensúlyi állapot megváltozása várható. Ilyen esetben kérdés, hogy milyen medergeometria, illetve áramlási viszonyok alakulnak ki. Jelen dolgozatomban a magyarországi Közép-Tiszán megvizsgálom a XIX. századi folyószabályozási munkálatok morfordinamikai hatását.

A 2022-es TDK dolgozatomban a Dunára, hazánkban elsőként, már alkalmaztam egy 1D morfordinamikai modellezési módszertant, amivel sikerült rámutatnom annak alkalmazásában rejlő lehetőségekre. A Tiszára azonban nincs elég adat a természetes állapotról, ami szükséges volna egy ilyen modellhez. Jelen kutatás célja egy olyan eljárás kidolgozása, ami a szabályozások előtti állapotot képes leképezni olyan módon, hogy az 1D morfordinamikai modellek paraméterezésére és igazolására is alkalmas legyen. Ehhez egy újszerű medergeometriát becselő eljárást alkalmazok. A pyRiverbed egy olyan eszköz, ami a folyók középvonala, valamint az átlagos medermélység és mederszélesség alapján becsüli a mederfelszínt. Az ilyen módon előállított „szintetikus” és a mai állapotot tükröző, felmért medergeometriát alkalmazva, 2D áramlásmodellek segítségével számítani tudom az áramlási jellemzőket (pl. jellemző áramlási sebesség és fenékesúsztató feszültség, szakaszléptékű mederellenállás) és azok szakaszra jellemző átlagos értékeiket a szabályozások előtti és utáni állapotra, és össze tudom hasonlítani e paramétereket. Továbbá, egy kifejlesztendő 2D-1D skálázási eljárás segítségével az 1D morfordinamikai modell számára további adatokat tudok ilyen módon szolgáltatni, amik reményeim szerint kiegészítik és így jelentősen növelik annak pontosságát.

A kutatásommal szeretnék továbbá rámutatni arra, hogy milyen fontos is a hordalék háztartás vizsgálata egy folyó esetében és milyen fontos szerepet játszik a medergeometria változásában. Úgy gondolom az ilyen jellegű modellek egy későbbi szabályozási munkálatnál nagy szerepet játszhatnak és segítséget nyújthatnak a szabályozási tervek előkészítésében is. Továbbá a modellek más szakágakat is ki tudnak szolgálni, ahol befolyásoló tényezők a folyó morfológiai és hidrodinamikai jellemzői.

Abstract

Rivers are in a constant state of change, moving towards a dynamic equilibrium. Even when this equilibrium is reached, we can still observe further changes in the riverbed, but these are not significant deviations from the dynamic equilibrium state. However, substantial natural or artificial processes are expected to cause changes in this dynamic equilibrium state. In such cases, the question arises about what kind of bed geometry or flow conditions will be formed. In this thesis, I aim to investigate the morphodynamic effects of the 19th-century river regulation works on the Hungarian Central Tisza.

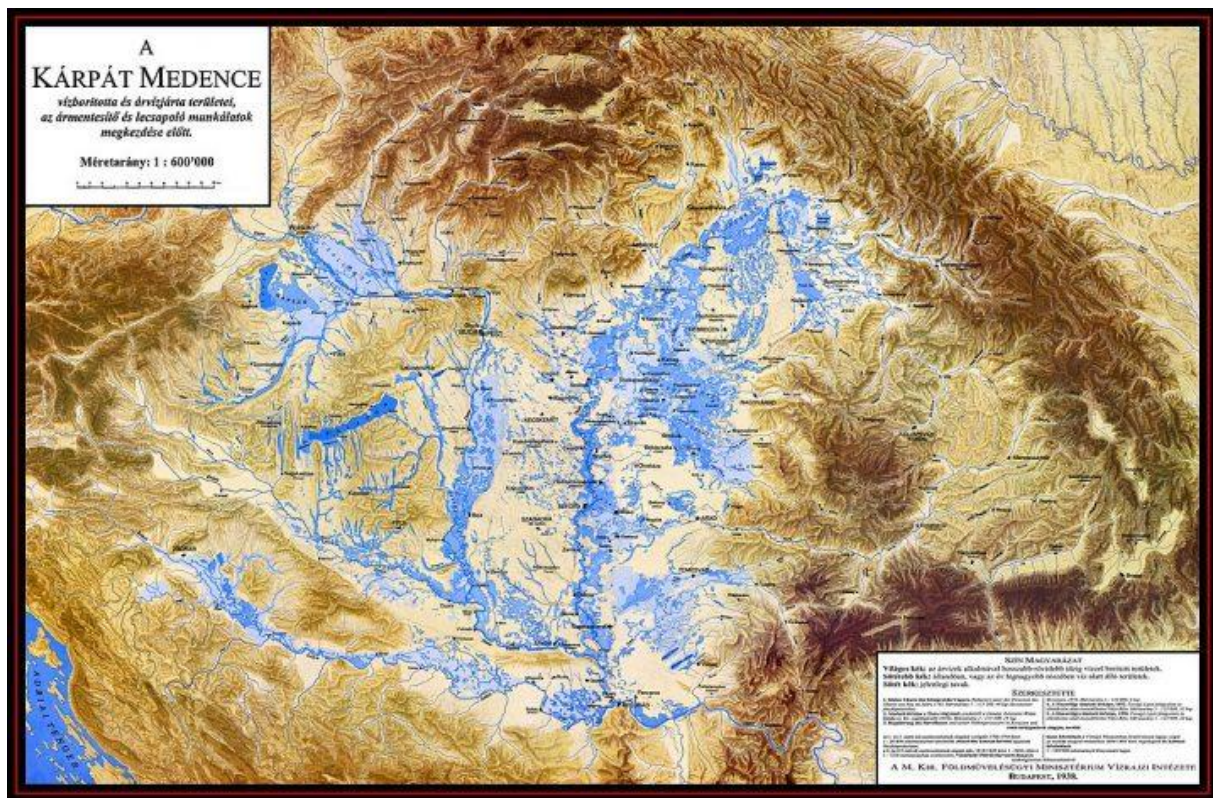
In my 2022 TDK thesis, I was the first in Hungary to apply a 1D morphodynamic modeling methodology to the Danube, which allowed me to show its application possibilities. For the Tisza, however, there is not enough data on the natural state to support such a model. The present research aims to develop a procedure that can map the pre-regulation state in a way that can be used to parameterise and verify 1D morphodynamic models. To this end, I apply a novel method for estimating the bed geometry. PyRiverbed is a tool that estimates the bed geometry based on the river's centerline and the average bed depth and width. Using this 'synthetic' and a surveyed riverbed geometry, which shows the current state, I can calculate flow characteristics (e.g. typical flow velocity and bottom-shear stress, bed resistance) and their sectional averages for the pre-and post-regulation states and compare these parameters using 2D flow models. Furthermore, by using a 2D-1D scaling procedure to be developed, I can provide additional data for the 1D morphodynamic model in this way, which I hope will add to and thus significantly increase its accuracy.

My research also seeks to demonstrate the significance of studying the sediment budget of a river and its impact on changes in riverbed geometry. These models can be instrumental in planning future regulatory initiatives. They can also benefit other fields where the morphological and hydrodynamic features of the river are influential factors.

1. Bevezetés

Minden folyó életében megfigyelhetők változások az idő teltével, amelyek egy úgynevezett dinamikus egyensúlyi állapot felé tartanak. Egy folyószakaszon dinamikus egyensúlyi állapotról beszélünk, ha a hordalékhozam megegyezik az befolyási- és a kifolyási, azaz az ellenőrző szelvényekben. Ekkor, bár megfigyelhetők mederváltozások, viszont hosszabb távon azok hatására nem várható szignifikáns eltérés a dinamikus egyensúlyi állapottól. Jelentősebb természetes vagy mesterséges folyamatok miatt azonban a dinamikus egyensúlyi állapot megváltozása várható. Napjainkban egyre nagyobb jelentősége van az előrejelzéseknek, amely a folyók morfológiai tulajdonságainál is fontos lehet, akár a hidraulikai változásokra vagy a medergeometria változására gondolunk. A természetes jelenségeket sokszor csak becsülni tudjuk, viszont a mesterséges beavatkozásokat tervezési munkák vagy egyeztetések előzik meg, melyek segítik azok hatásának előrejelzését. A Tiszán a 19. századi szabályozások jelentős morfológiai változásokkal jártak, ezen változások vizsgálatával foglalkozom jelen kutatómunkámban.

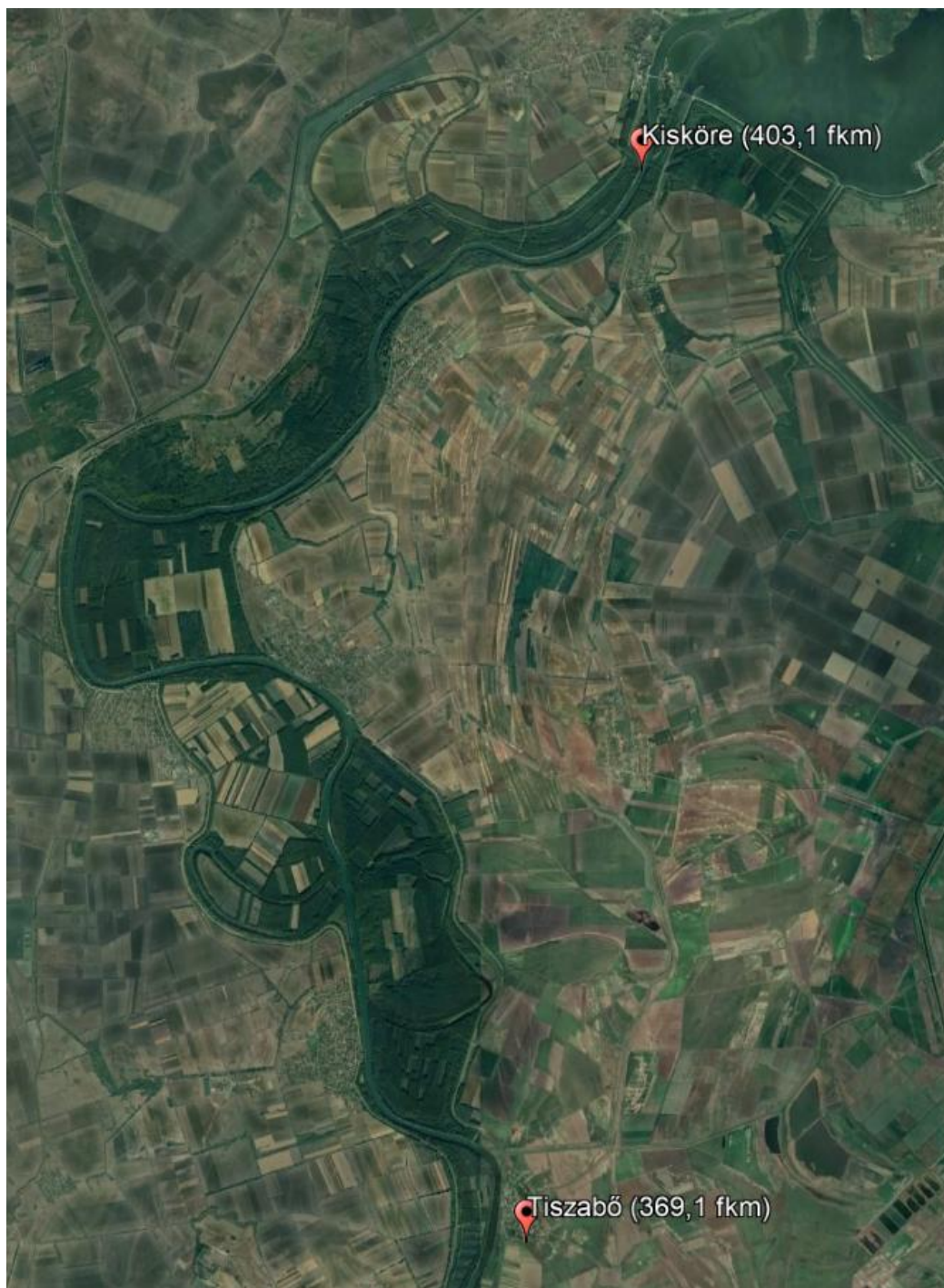
Dolgozatomban a magyarországi Közép-Tisza egy szakaszán vizsgálom a 19. századi szabályozások hatását. 19. században Magyarország területének 13%-át a szabályozatlan folyók rendszeresen elöntötték (**1. ábra**). Az árvízi területek több mint fele ~ 2 millió hektár a Tisza és annak mellékfolyóinak ártere.



1. ábra: Kárpát-medence vízborította és árvízjárta területei az ármentesítő és lecsapoló munkálatok megkezdése előtt
(A Magyar királyi Földművelésügyi Minisztérium Vízirajzi Intézete, 1938)

A szabályozási munkálatok 1846. augusztusában kezdődtek meg, melyeket gróf Széchenyi István szervezett meg. A folyó szabályozása előtti hossza 1419 km volt (2. ábra), mely a szabályozás végeztével 962 km-re rövidült. E mellett született 136 km-en új épített meder, illetve 589 km holtág. A szabályozási munkálatok első korszakának az 1846-1879-es időszakot nevezhetjük (Botár és Károlyi, 1971).

megmaradt egy meander, bár a szabályozások során ezen szakaszon is több átvágást eszközöltek.



3. ábra: A vizsgált Kisköre és Tiszabő közötti Tisza szakasz légifelvétele (Google Earth, 2024)

A dolgozatomban fókuszában a szabályozásokkor tett beavatkozások hatásvizsgálata szerepel, amihez szükséges az azokat megelőző, természetes állapot leképezése. A 2022. évi TDK dolgozatomban bemutatott 1D morfodinamikai modellt a Duna egy szakaszára igazoltam. A céljaim között szerepel a jelenleg vizsgált Tisza-szakaszra is alkalmazni azt.

Úgy gondolom, hogy ennek a kérdéskörnek a vizsgálata nagy érdeklődésre adhat számot, hiszen segítené a későbbi szabályzások tervezését is, továbbá peremfeltételeket tud adni más szakágak számára, gondolva itt akár olyan vizsgálatokra, melyek a morfordinamikai jelleggel közelítik akár egy adott vízi faj élőhelyét.

2. Irodalomkutatás

A korábbiakhoz hasonlóan a mostani vizsgálataim kiindulási pontja is az irodalom feltárása volt. Ennek során több forrásművet is feldolgoztam. Nagy segítségemre volt ebben a dolgozatban is Bogárdi János „Vízfolyások hordalékszállítása” című könyve, illetve a Vízrajzi Évkönyvek, melyekből 1954-től 1995-ig tartó 41 év adatait gyűjtöttem ki. Ezen forrásokon felül, jelen dolgozatom témájában is megkerestem a Vízügyi Levéltérát. Dolgozatomhoz továbbá fontos adatokat szolgáltatott számomra a BME Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszéke.

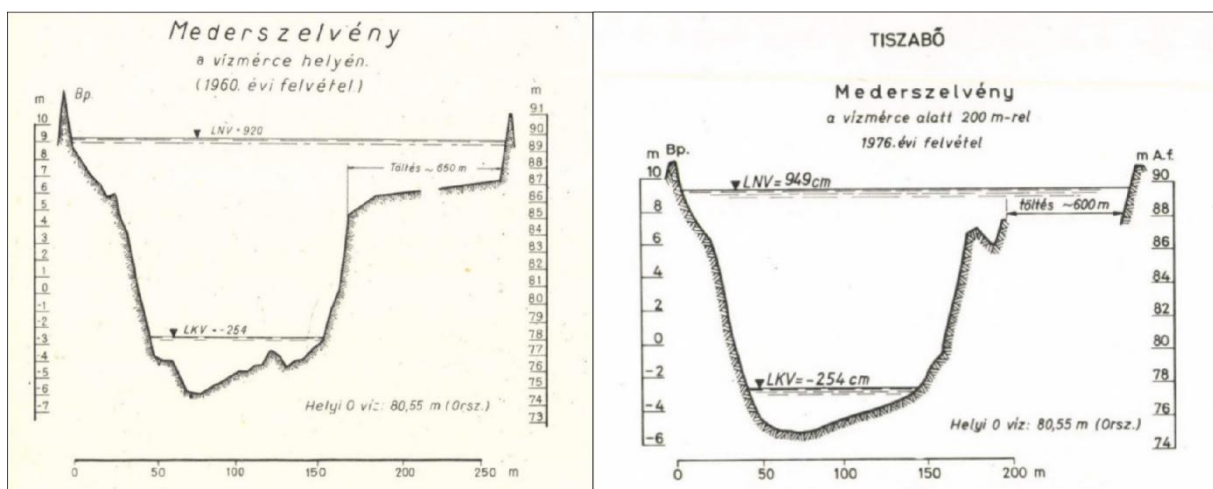
Az irodalomkutatás tehát jelen vizsgálatok során is nagy hangsúlyt kapott, bár az adatok sok esetben csak hiányosan állnak rendelkezésre. Ez indokolta, hogy a szabályozási munkálatok előtti meder geometriájának becslésére egy külön eljárást is alkalmaztam a rendelkezésre álló adatokat felhasználva. Habár ilyen hiányos mennyiségben, de több időszakból állt rendelkezésemre adat, melyek kiindulásnak megfelelőek voltak számomra.

A szakirodalmi feltárás során az alábbi, a meder- és a hordalékviszonyokat leíró adatokat gyűjtöttem össze:

- Mederjellemzők
 - Keresztszelvény alakja vagy a meder szélessége, ha nem áll rendelkezésre felmért keresztszelvény
 - Hossz-szelvény vagy mederesés, ha nem áll rendelkezésre hossz-szelvény
 - Mederanyag szemösszetétele
- Görgetett hordalék
 - Hordalékhozam és annak idősorai
 - Görgetett hordalék szemösszetétele vagy a jellemző szemcseméret, ha nem áll rendelkezésre részletes szemeloszlási görbe

2.1. A meder geometriai jellemzői

A Vízrajzi Évkönyvekből különböző évekből, különböző szelvények mederfelvételei is rendelkezésemre álltak, illetve egy részletes digitális medermodell (DTM) a főmederről és a hullámterekről 2017-ből. Sajnos egy-egy szelvényre csak egy-két különböző időpontban végzett felmérésből származó keresztshelvény állt a rendelkezésemre, így a keresztshelvények időbeli változására vonatkozó részletes következtetéseket nem tudtam tenni. A rendelkezésemre álló vízrajzi évkönyvekben a tiszabői shelvényre található egy az 1960-as és egy az 1976-os állapotot tükröző keresztshelvény (4. ábra), viszont a kiskörei shelvényre csak 1989-es felmérés eredménye.



4. ábra: Tiszabői shelvény változása év alatt (Vízrajzi Évkönyvek, 1960-1976)

A bemutatott keresztshelvények alapján elmondható, hogy nagymértékű változás nem történt a mederben, de kisebb lokális változások megfigyelhetők.

2.1.1. Szélesség

A jelenlegi állapotban a vizsgált ~44 km-es szakaszra a 110 m szélesség a jellemző, bár van egy-egy rövidebb szakasz, ahol ennél keskenyebb vagy szélesebb a főmeder. A Tisza szabályozások előtti állapotát tükröző térképek alapján a szabályozás előtti átlagos szélesség több, mint kétszerese a jelenlegi értéknek. A katonai felmérések (I. katonai felmérések, 1782-1785) térképein korabeli átlagos szélesség 250 m.



5. ábra: A Tiszaroffnál található kanyarulat az I. katonai felmérés térképén a szabályozási munkálatok előtt és a jelenlegi főmeder világoskék sávként ábrázolva (I. katonai felmérések, 1782-1785).

Az 5. ábrán kék színű sávval ábrázoltam a Tisza mai vonalvezetését. A sáv szélessége a mai átlagos 110 m mederszélesség. A képen látható a szélességekben lévő különbség a szabályozások előtti és a mai meder között, ahogy ezen a kiragadott kis részen megfigyelhető az is, hogy mekkora a különbség van a vonalvezetésben is.

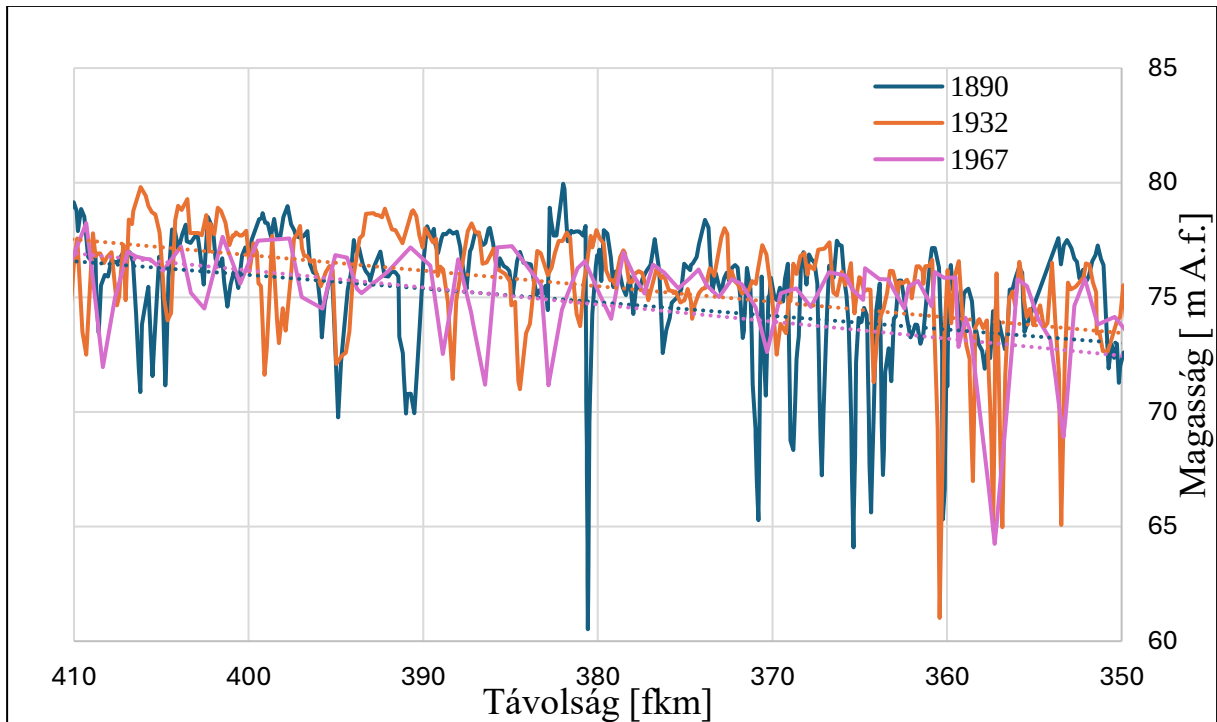
2.1.2. Mederesés

A vizsgált szakasz mederesésének átlagos értékét a rendelkezésemre álló hossz-szelvényekből számítottam ki. Elmondható, hogy a vizsgált szakaszon ezek alapján átlagosan 2,87 cm/km-es a mederfenék esése. A később bemutatásra kerülő modellvizsgálatokban is ezt az értéket használtam.

Míg az egyes hossz-szelvényekből számított értékek elég hasonlóak, azaz a mederesés jelentős időbeli változása nem mutatható ki, addig a szabályozások előtti mederesést nézve a szabályozások hatására jelentős esésváltozásról beszélünk, hiszen az átvágásokkal a teljes folyó átlagos esése majdnem a duplájára nőtt. A folyó átlagos esése 3,4 cm/km volt a szabályozás előtt és 6 cm/km utána. A szakirodalmi adatok alapján a vizsgált szakasz 2,3 cm/km-es átlagos esésű volt a 19. századi szabályozások előtt (Botár és Károlyi, 1971).

2.1.3. Hossz-szelvény

Hossz-szelvények tekintetében 3 évből voltak adataim, melyek az 1890-es (A m. kir. Országos Vízépítési Igazgatóság, 1906), 1932-es (A m. kir. Földművelésügyi minisztérium, 1934) és 1967-es (VITUKI, 1969) évek mederfelmérései. A hossz-szelvényeket a **6. ábrán** megjelenítettem egy diagramon, hogy láthatóak legyenek az egyes időpontok közti változások.



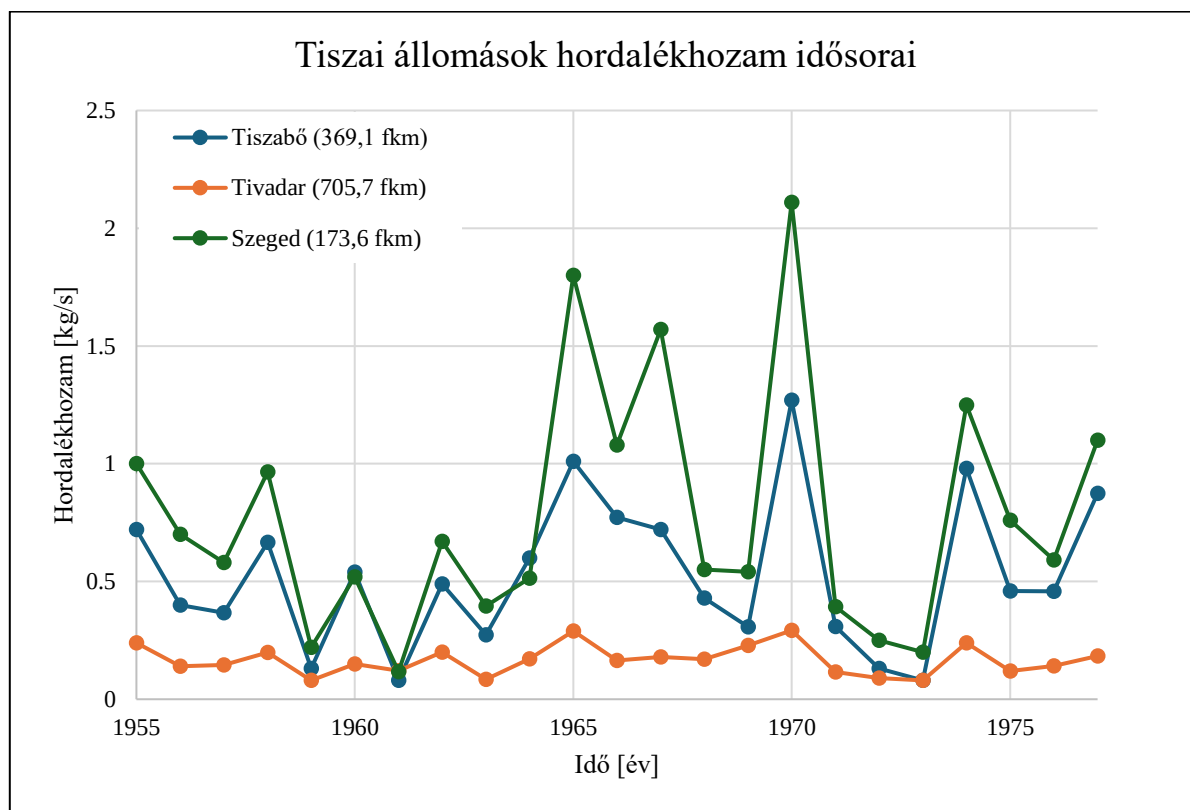
6. ábra: A vizsgált Tisza-szakasz 1890-es (kék vonal), 1932-es (narancs vonal) és 1967-es (lila vonal) hossz-szelvénye.

A hossz-szelvények trendjeit megfigyelve elmondható, hogy 1890-es és az 1967-es trendvonal szinte alig különbözik, az 1967-es valamivel nagyobb eséssel rendelkezik. Ezzel szemben az 1932-es hossz-szelvényre illesztett trendvonal ~1,5 m-el magasabban fut. A trendeket tekintve az is elmondható, hogy az hosszesés értéke minimálisan változik 1890 és 1967 között.

2.2. Görgetett hordalékhozamok

A görgetett hordalék mennyisége mindig nagy szerepet játszott a folyók életében. A hordaléktranszport alakulása nagyban befolyásolhatja a medermorfológiát. A folyó által szállított hordalék mennyiségére, hozamára a szabályozások előtti állapotra pontos adat nincs, de az valószínű, hogy a mainál a természetes, kanyargós folyású Tisza szélesebb, árterekkel szegélyezett mederében sokkal több hordalékot szállított és rakott le. A szabályozás előtti teljes hordalékmozgás éves szinten nagyságrendileg akár több tízmillió tonna is lehetett, ami jelentős mértékben csökkent a szabályozások után (Kiss et al., 2024). A Vízrajzi Évkönyvekben 19.

századi szabályozás után 1931 és 1977 közötti adatokat találtam. 1931-1940-es adat mellett 1954 és 1977 közötti évek átlagos hordalékhozama voltak fellelhetőek. A Tisza tekintetében 3 szelvényben volt elegendő adat a görgetett hordalékra, melyek a következők: Tivadar, Tiszabő és Szeged. Jelen vizsgálatok szempontjából a Tiszabői adatsor a lényeges (7. ábra). Ebben a szelvényben a 1931-1977 közötti évi átlagos hordalékhozam 16523,82 t.



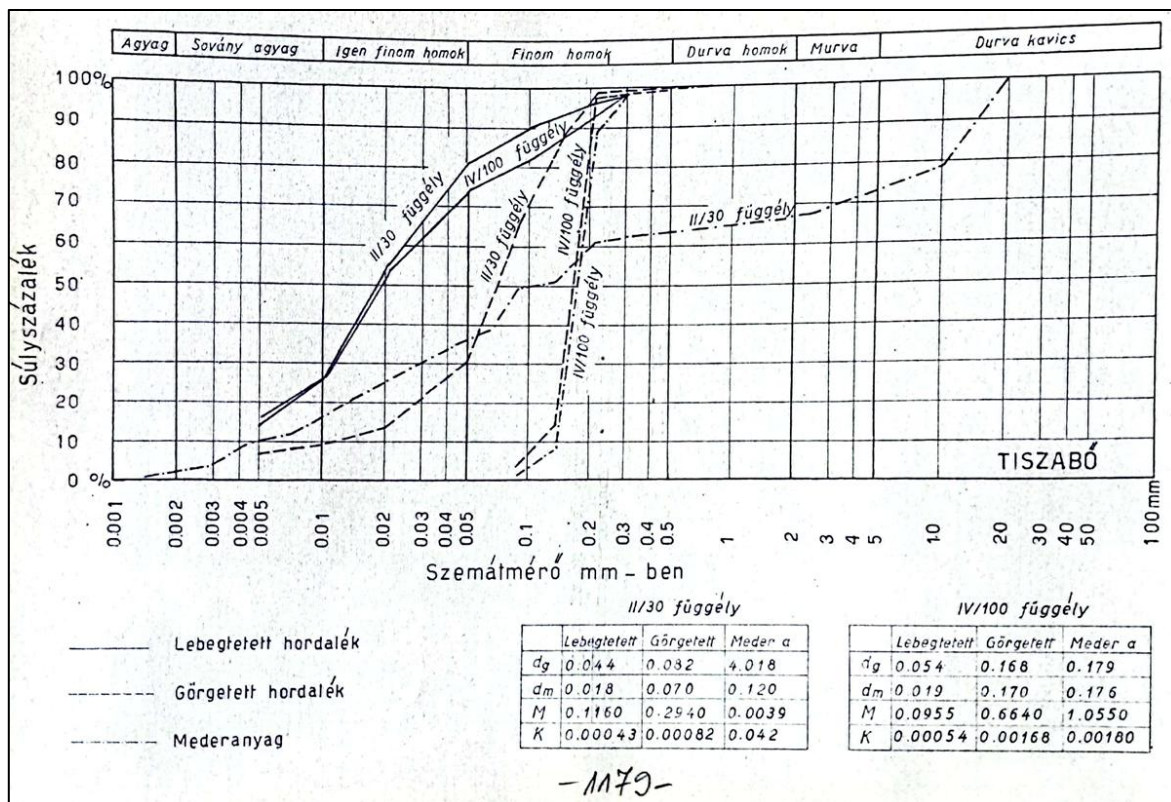
7. ábra: Görgetett hordalékhozam idősor Tivadarnál, Tiszabőnél és Szegednél

Az diagramon látható idősor 1955 és 1977 közötti mérési adatokat mutat be, viszont rendelkezésre áll egy régebbi adat is, amely 1931/1940 környékén állapítottak meg, ahol 0,5 kg/s volt a görgetett hordalékhozam.

2.3. Szemösszetétel és jellemző szemcseméretetek

A tiszabői hordalékállomás a vízmérce szelvényében van. A méréseket 1949-ben indították el, de sajnos az állomás működése 1952 vége óta szünetel. Az 1949-es méréseket alapul véve jelen szelvényben a görgetett hordalék átlagos szemcsemérete 0,125 mm, míg a mederanyagé 1,142 mm. Az adatokból látható, hogy a Tiszán finom homok frakciójú hordalék van többségében jelen, amit a hordaléktranszport-modelleknél is figyelembe kell venni a modell megválasztásakor. Az említett felvetés akkor lehet szükséges például, ha 0D modell kalibrálását választjuk vagy egy homogén 1D modell esetén is erről beszélhetünk. A későbbiekben

használni kívánt inhomogén 1D modellhez viszont szükséges a hordalék és a mederanyag szemösszetétele is, nemcsak az átlagos szemcseméret értékeire. A levéltári kutatás során találtam a VITUKI tanulmánytárában szemösszetételi görbéket, amelyek még Bogárdi János mérésein alapultak. A görgetett hordalék szemeloszlási görbéi mellett az 1D morfodinamikai modell paraméterezéséhez mederanyag görbéjére is szükség van. A VITUKI mérések alapján rendelkezésre álló lebegtetett és görgetett hordalék, illetve mederanyag szemösszetételi görbéket a **8. ábrán** mutatom be.



8. ábra: Tiszabói szemösszetételi görbék (VITUKI, 1954)

2.4. Az irodalomkutatás összefoglalása

Az irodalomkutatásomat végül táblázatos formába rendeztem, ahol látható melyik időszakból milyen paraméterre volt adat (**1. táblázat**). Ezek alapján végeztem el a modellépítést és a bemutatásra kerülő vizsgálatot is.

1. táblázat: Irodalomkutatást összefoglaló táblázat.

Paraméter/ Időszak	Mederszint	Mederfelv.	D_{sg}	D_{50}	Szemössz.	Q	H	B	Q_b	S
Átvágások előtt <~1846										Botár és Károlyi, 1971
Tiszalök <~1954	A m. kir. Országos Vízépítési Igazgatóság, 1906; A m. kir. Földművelésügyi minisztérium, 1934	A m. kir. Országos Vízépítési Igazgatóság, 1906; A m. kir. Földművelésügyi minisztérium, 1934	VITUKI 1954	VITUKI 1954	VITUKI, 1954		A m. kir. Országos Vízépítési Igazgatóság, 1906; A m. kir. Földművelésügyi minisztérium, 1934	A m. kir. Országos Vízépítési Igazgatóság, 1906; A m. kir. Földművelésügyi minisztérium, 1934	VITUKI, 1954	A m. kir. Országos Vízépítési Igazgatóság, 1906; A m. kir. Földművelésügyi minisztérium, 1934; Hossz- szelvényekből számított
Kiskörei vízlépcső előtt <~1973	VITUKI, 1969	VITUKI, 1969	VITUKI 1969	Bogárdi, 1955	VITUKI, 1969	Vízrajzi Évkönyvek	Vízrajzi Évkönyvek VITUKI,1969	Vízrajzi Évkönyvek VITUKI,1969	Vízrajzi Évkönyvek	VITUKI, 1969; Hossz- szelvényből számított
Napjainkig	Van	Van	Van	Van	Van	Van	Van	Van	Van	Van

3. Alkalmazott módszertan

A modellépítés és később a vizsgálatok kulcsa a dinamikus egyensúlyi állapot, ehhez a 2020-as TDK dolgozatomban kifejlesztett 0D modellt kalibráltam át a Tiszára (Nyiri, 2020). Távlati célként szeretnék olyan adatállományt, amely kielégíti a 2022-ben fejlesztett 1D modell (Nyiri, 2022) paraméterezését és annak továbbfejlesztését a szabályozások előtti állapotot leíró 2D áramlási modell eredményei alapján. Ahhoz, hogy ez a módszer megalakulhasson, szükséges egy 2D áramlási modell a Tiszára, viszont ehhez nincs elegendő adat a mederről, ezért alkalmazok egy új metódust, ami a pyRiverbed. Az említett pyRiverbed egy Python alapú eszköz, amelyet mederszint-becsléshez és folyómeder alakjának elemzéséhez használnak fel. Ez az program képes különböző paraméterek alapján előre jelezni a folyómeder változásait és profilját, ezzel segítve a medermélyülés, elmozdulások vagy más geomorfológiai jelenségek elemzését. Első lépésben az említett eljárást alkalmazva generáltam egy szintetikus medret, majd az abból kapott geometriával dolgoztam tovább. Következő lépésként a generált geometriát és rácshálót használva paramétereztem az SRH-2D modellt. A 2D modell futtatását elvégeztem a valódi geometriára és a szintetikus mederrel is, majd ezek összehasonlításával validáltam a módszert. A modelleredmények összevetésénél szelvénymenti átlagokat vettem a vízmélységre, a sebességre és a csúsztatófeszültségre és ezek kiértékelésével igazoltam a módszert. Ezen lépések után már volt egy módszertanom, amellyel modellezhetem ezen szakaszra a korabeli szabályozás előtti állapotot. Hasonlóan indultam el, mint a jelenlegi állapotnál, a pyRiverbeddel becslést adtam a szabályozások előtti mederre, majd ezt felhasználva kezdtem meg a 2D modell felépítését, ahol ugyanazon mederkitöltő áramlási viszonyokkal modelleztem a szakaszt. Később ezekkel az eredményekkel tudnám az 1D modell alapját megadni, melynek ez a kutatási munka adja meg az alapját.

3.1. 0D modell

Jelen kutatásban a kapott átlagos értékekkel a dinamikus egyensúlyi állapot becslésére szeretnék tenni megállapítást, melyet egy 0D modellel vizsgállok meg. A 2020-as TDK dolgozatomban fejlesztett 0D modellt bővítettem ki (Nyiri, 2020), hogy egy a Tiszára is megfelelően működő transzportmodellt is tudjon alkalmazni. Azért volt ez fontos, hiszen a transzportmodellek között nagy különbségeket ad, hogy milyen frakciójú görgetett hordaléka lettek kifejlesztve. A Tisza hordaléka finom homokos hordalék, melynek az átlagos szemátmérője 0,12 mm nagyságú a tiszabői szelvényben (VITUKI, 1954). Előzetes számítások

alapján úgy láttam, hogy egy új transzport modell beprogramozása szükséges, amely a Van-Rijn hordaléktranszport modell (van Rijn, 1984).

A 0D modell alapelve:

A 0D modell azt jelenti, hogy egy adott szelvényre értendő az egyenletrendszer, ami folyásirányban érdemi változás híján szakaszléptékben tud számítást adni. A 0D leírás a valós medergeometriát egy téglalap alakú szelvénnel közelíti, melyet egy magasság (H) és egy szélesség érték (B) jellemez. A folyómeder prizmatikus, illetve az áramlás permanens és egyenletes. A permanens jelleg a hordalékhozamra is vonatkozik, tehát állandó a hordalékhozam, illetve a mederanyag és a hordalék szemcseméretei megegyeznek. További közelítés, hogy a valós, nempermanens áramlás és hordalékmozgás morfordinamikai hatása egy évre vonatkozóan a mederkitöltő állapottal jellemezhető. A mederkitöltő állapot geometriai jellemzői a mederkitöltő vízhozam (Q_{bf}), vízmélység (H_{bf}), mederszélesség (B_{bf}) és esés (S), illetve a mederkitöltő állapotnál szállított hordalékhozam (Q_b). A 0D modell részletesen taglaltam a 2020-as TDK dolgozatomban, melyből átvettem a folyamatot (Nyiri és Török, 2022).

3.1.1. 0D alapegyenletek

A modell alapja az alábbi 3 egyenletből álló egyenletrendszer, amely az egyensúlyt adja meg:

- Folyadékra vonatkozó folytonossági egyenlet

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

Q_w 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 ($1000 \text{ kg}/\text{m}^3$), C_f a dimenziómentes mederellenállási tényező, g a nehézségi gyorsulás ($9,81 \text{ m}/\text{s}^2$) 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].

➤ Hordalékhozam számítása

A fajlagos hordalékhozam minden esetben az alábbi összefüggéssel számítható ki:

$$q_b = q_b^* \sqrt{RgDD} \quad (4)$$

A q_b^* a dimenziómentes fajlagos hordalékhozam. Számítására számos hordaléktranszport modellt publikáltak. Az egyenletben a D értéke a szelvény átlagos szemátmérője, tehát a D_{50} értéke. A szakirodalomban megtalálható összefüggéseket terepi, illetve laboratóriumi mérések alapján dolgozták ki, vagyis tapasztalati és féltapasztalati összefüggésekről beszélünk. A 0D modellhez a Van Rijn hordaléktranszport modelljét alkalmaztam, hiszen ez a transzportmodell adta a legjobb eredményeket, illetve 0,2 mm és 2,0 mm közötti szemcseméretre alkalmazható, amely a szakaszon megfelelő. A modell az alábbi összefüggést adja:

$$q^* = 0,053 \frac{T^{2.1}}{D_*^{0.3}}, \quad (5)$$

melyből a T egyenlete a következő:

$$T = \frac{\tau_s^* - \tau_c^*}{\tau_c^*} \quad (6)$$

A dimenziómentes csúsztatófeszültséget az alábbi összefüggéssel számíthatjuk:

$$\tau^* = \frac{HS}{RD} \quad (7)$$

A kritikus csúsztatófeszültség értékét az alábbi egyenlet adja meg:

$$\tau_c^* = 0,135 R_{ep}^{-0,261} \quad (8)$$

Az (5) egyenletből a D_* értékét, amely a dimenziómentes szemcseméret nagysága méterben a következőképpen számítható ki:

$$D_* = D_{50} \left(\frac{gR}{v^2} \right)^{1/3} = R_{ep}^{2/3} \quad (9)$$

Az (5) és (9) egyenletből az R_{ep} (részecske Reynolds szám) számítása a következő:

$$R_{ep} = \frac{\sqrt{gRDD}}{v} \quad (10)$$

A fentiekben definiált modellel kerestem az egyensúlyi állapotot jellemző értékeket.

2. táblázat: Jelenlegi állapot 0D modell eredményei

Adatok		Számítás	
<i>B</i>	110	<i>H</i>	8.1
<i>Q</i>	1260	τ^*	0.5
<i>S</i>	1.24E-05	q^*	1.0
<i>D</i>	0.00012	q_b	5.41E-06
<i>I</i>	0.33	Q_b	16410
τ_c	0.087406		
C_z	45		

A **2. táblázatban** az értékeket tekintve, feltűnhet, hogy az esés értékét a modell nem adta vissza, amely azt is jelezheti, hogy a szakasz nincs még egyensúlyban. A táblázatban az *I* a periodicitást adja meg, mely számítását szakirodalomból vettem át és a 2020-as TDK dolgozatomban taglaltam (Bogárdi, 1955), ugyanígy a C_z (dimenziómentes Chézy ellenállási tényező) érték számítását is 2020-ban részleteztem (Nyiri, 2020). Ha ezt a modellt szeretném alkalmazni a korabeli állapotra is, akkor több akadály is elélem tárul. Az egyik ilyen probléma, hogy a korabeli állapotra nincs hordalékhozam adatom, ahogy az érdeességet is maximum becsülni lehetne. Ezen bizonytalanságok idézte elő, hogy 2D modellezéssel egy részletesebb képet alkossak a korabeli állapotra.

3.2. pyRiverbed mederdomborzat-generátor

A pyRiverBed egy Python-alapú program, amelyet elsősorban folyók medrének geomorfológiai elemzésére, különféle terepi és modellezési adatok feldolgozására és elemzésére fejlesztettek ki. Az alkalmazás célja, hogy a folyómeder változásait, mint például a keresztmetszeti és hosszmenti profilokat, hordalékszállítás és mederalakulást, részletesen nyomon lehessen követni és elemezni.

A program elemzéséhez kulcsfontosságú egy mederközépvonal megadása, amely a kiindulási alapja a feldolgozásnak. Ezt én úgy adtam meg, hogy a jelenlegi állapotként megjelölt 2017-es DTM-ből vettem fel a meder középvonalát. A pyRiverbed txt. fájlból olvassa be az a megadott koordinátákat és dolgozza fel azokat. Meg kell adni ezenfelül az adott szakasz átlagos mélységét, szélességét és esését, illetve azt, hogy milyen cellafelbontásban generálja le a rácshálót. Megadható még egy úgy nevezett görbületi fázis késés is, amely az eredményt

befolyásolhatja és melynek a kalibrálása szükséges. A program lehetővé teszi a folyó különböző hossz- és keresztmetszeti szelvényeinek vizsgálatát. Ezen szelvények alapján elemezhető a meder mélysége, szélessége, formája és változásai. Az eredményekből grafikonokat és térképeket is létrehozhatunk, amelyeket különböző formátumokban ment el a program (jpg és PDF). A pyRiverbed különféle grafikus eszközöket biztosít a folyómeder változásainak térképezésére és megjelenítésére. Ezen vizualizációk lehetővé teszik a mederalakulás tendenciáinak ábrázolását, illetve a folyókanyarulatok elemzését.

A pyRiverbed alapja:

Az 1960-as évek óta számos empirikus vagy félig empirikus összefüggést állítottak fel a meanderező folyók jellemzőinek leírására. Az elmúlt két évtizedben számos elméleti módszert és számítógépes modellt fejlesztettek ki szintetikus medermodellek előállítására, annak ellenére, hogy a természetes medrek összetett geometriája komoly kihívást jelent. A pyRiverBed egy, a Beck-egyenleteken alapuló szintetikus mederdomborzat-generátor, mely a folyó középvezetét figyelembe véve hozza létre az egyensúlyi állapotban lévő meder domborzati modelljét (Li és García, 2021). E mellett a pyRiverbed tartalmaz egy meandervándorlási és kanyarulatlefüződési modult is, bár ezt jelen vizsgálatokban nem használtam. A pyRiverbed mederdomborzat-generátorát több valós meanderező folyóra alkalmazták (pl. az Amerikai Egyesült Államokban lévő Trinity-, Wabash- és Sabine-folyókra). A szintetikus meder elfogadható egyezést mutatott a felmért medrekkel.

Bár korábban is léteztek a Beck-egyenleteken alapuló medergenerátorok, azonban Xu et al. (2011) azt tapasztalta, hogy az eredeti Beck-egyenletek a kanyarulatokban túlbecsülik meder keresztirányú esését. Ezen kívül Beck egyenletei eredeti nem veszik figyelembe a maximális keresztirányú mederesés és a meder középvezetének görbületében lévő helyi maximum közötti fáziskésést sem. Bár maga Beck is tett javaslatot a fáziskésés figyelembevételére, azonban a meder keresztirányú esését ezek a modellek is túlbecsülték. A pyRiverBed mederdomborzat-generátor ebben jelent előrelépést a korábbiakhoz képest.

A pyRiverbed medergenerátor tehát az alábbi, módosított Beck-egyenleteken alapul:

$$\eta = H - \left(1 - \frac{h_c}{S_t n}\right) \|S_t n, 0\| - \frac{h_c}{S_t n} \exp\left(-S_t \frac{n}{H}\right) \|S_t n, 0\| \quad (11)$$

$$h_c = \frac{4BH|S_t| - S_t^2 B^2}{2B|S_t| + 2H \exp\left(-|S_t| \frac{B}{H}\right)} \quad (12)$$

$$S_t = \alpha \cdot A \mathbb{G} H, \quad (13)$$

$$A = 3,8 \left[1 + \frac{B}{6,96H} \exp \left(\frac{-6,96H}{B} \right) \right], \quad (14)$$

ahol η = mederszint; H = az átlagos vízmélység; h_c = a vízmélység a meder középvonalában, S_t = a meder keresztirányú esése; n = a keresztirányú koordináta; $\|X, Y\|$ = X és Y közül a nagyobb; B = a meder szélességének a fele; α = keresztirányú mederesés korrekciós tényezője; A = kimosási tényező, ami meder keresztirányú esésének meredekségét írja le; G = a meder középvonal görbületének folyásirányban vett, adott szélességű ablakkal meghatározott mozgó átlaga. A korábban említett fáziskésés nagysága az átlagolási ablak méretével, így az ablak szélesség kalibrációs paraméter. Korábbi terepi tapasztalatok azt mutatják, hogy a fáziskésés mértéke 2,1-4,7-szerese az átlagos mederszélességnek. E mellett α , azaz a keresztirányú mederesés korrekciós tényezője is kalibrálandó paramétere a módszernek. Ennek értéke jellemzően 0,5 és 1,0 között van.

Az (11)-(14) egyenletek a vízmélység, a csatorna szélessége és a csatorna görbülete függvényében határozzák meg a mederszintet. Beck (1988) egyenletének előnye más hasonló célú összefüggésekkel szemben, hogy a mederkeresztmetszvények alakját egy lineáris és egy exponenciális tagból állítja elő (lásd az (11) egyenletet). Ezzel szemben más, széles körben alkalmazott modellek esetén a keresztirányú mederprofilok vagy teljesen lineárisak vagy az egyenletük két, ellentétes előjelű exponenciális tagból állnak, így a csatorna középvonalára szimmetrikus keresztmetszvény alakot adnak. Ugyanakkor számos terepi vizsgálat szerint a keresztirányú mederprofil gyakran nem lineáris, sőt aszimmetrikus.

A felírt összefüggések közül a (13), a meder keresztirányú esését leíró egyenlet különbözik Beck eredeti egyenleteitől. A pyRiverbedben alkalmazott modell az alábbi feltételezéseken alapul:

- A csatorna szélessége és mélysége állandó a vizsgált folyószakaszon.
- A csatorna félszélessége sokkal kisebb, mint a csatorna középvonalának görbületi.
- A csatorna félszélessége sokkal kisebb, mint a meander hullámhossza.

3.3. SRH-2D áramlásmodell

A pyRiverbed alkalmazhatóságát a szabályozások előtti Kisköre-Tiszabő Tisza-szakasz medrének becslésére úgy igazoltam, hogy megvizsgáltam milyen medret ad a mai Tiszára. Mivel a cél a mederkitöltő állapot áramlási jellemzőinek meghatározása, amivel az 1D morfodinamikai modellt tudom a későbbiekben fejleszteni, ezért nemcsak azt vizsgáltam meg, hogy a programmal létrehozott, szintetikus meder a jelenlegi állapotra, mennyiben hasonlít vagy éppen különbözik a felmért medertől, de azt is, hogy a mederkitöltő állapotban kialakuló áramlási viszonyok a szintetikus és a valós mederben hogyan viszonyulnak egymáshoz. A mederkitöltő állapotban kialakuló áramlási viszonyok becslésére a két eltérő medergeometria alapján egy-egy 2D numerikus áramlási modellt építettem fel. Ehhez, azaz a vízszintek, fajlagos vízhozamok és sebességek eloszlásának meghatározására a választásom egy végestérfogat-elvű 2D modellre, az SRH-2D-re esett, amely háromszög- és négyszög elemekből álló strukturálatlan hálón oldja meg a vízmozgást leíró a Reynolds-átlagolt sekélyvízi egyenletekkel (Lai 2010):

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_A u dA + \oint_S (fn_x + gn_y) dS = \int_A s dA, \quad (15)$$

ahol t az idő; A és S a víztér egy lehatárolt ellenőrző térfogata alapjának területe illetve a határvonalának kerülete; $\mathbf{n} : (n_x, n_y)$ az S határvonal kifelé mutató normálirányú egységvektora az x - ill. y -irányú komponenseivel kifejezve. A víztér állapotát az

$$\mathbf{u} = \begin{bmatrix} h \\ p \\ q \end{bmatrix} \quad (16)$$

vektorral írjuk le, amely tartalmazza az (5) egyenlet ismeretlenjeit, azaz a h vízmélységet és a $\mathbf{q} : (p, q)$ fajlagos vízhozam-vektor két egymásra merőleges komponensét.

Az (1) egyenletben szereplő $\mathbf{f}$ és $\mathbf{g}$ vektorok az ún. fluxusvektorok

$$[\mathbf{f} \quad \mathbf{g}] = \begin{bmatrix} \frac{p^2}{h} + \frac{gh^2}{2} - hT_{xx} & \frac{pq}{h} - hT_{xy} \\ \frac{pq}{h} - hT_{yx} & \frac{q^2}{h} + \frac{gh^2}{2} - hT_{yy} \end{bmatrix}, \quad (17)$$

ahol g a nehézségi gyorsulás; ρ a víz sűrűsége; T_{xx} , T_{xy} , T_{yx} , T_{yy} a turbulens feszültségtenzor elemei.

A forrástagban pedig

$$s = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{\tau_{bx}}{p} - gh \frac{\partial z_b}{\partial x} \\ \frac{\tau_{by}}{p} - gh \frac{\partial z_b}{\partial y} \end{bmatrix} \quad (18)$$

a $\tau_b : (\tau_{bx}, \tau_{by})$ fenék-csúsztatófeszültséget és a mederesés hatását foglaljuk össze; z_b a mederszint.

A mélységátlagolt turbulens feszültségek:

$$T_{xx} = 2\rho\nu_e \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{2}{3}k, T_{xy} = T_{yx} = \rho\nu_e \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right), T_{yy} = 2\rho\nu_e \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{2}{3}k \quad (19)$$

ahol ν_e a mélységátlagolt örvényviszkozitási együttható; $(u, v) \equiv \mathbf{v}$ a függély-középsebesség vektor ill. annak x - és y -irányú komponense, k a fajlagos turbulens kinetikai energia.

A fenék-csúsztatófeszültséget pedig a szabadfelszínű turbulens áramlásokra szokásosan alkalmazott Manning-féle képlettel számítjuk,

$$(\tau_{bx}, \tau_{by}) \equiv \tau_b = -\frac{\rho g n^2 |v|}{h^{1/3}} v \quad (20)$$

amelyben n a Manning-féle érdességi együttható.

Az örvényviszkozitást az SRH-2D parabolikusnak nevezett eljárásával közelítjük:

$$\nu_e = C_t h \sqrt{\frac{|\tau_b|}{\rho}} \quad (21)$$

Az SRH-2D modell 3.2.0 verziója a fenti alapegyenleteket a már említett rugalmas osztású, strukturálatlan rácshálón, véges térfogat-módszerrel oldja meg. Az időbeli integrálást implicit Euler-féle eljárással végzi, amely elsőrendű pontosságú közelítést ad, vagyis a számítási háló elemméretének csökkentésével egyenes arányban növekszik a pontosság. Ez az időben fokozatosan változó vízmozgásnál elegendően pontos, és nagy előnye, hogy az időlépést nem köti az explicit sémák szigorú stabilitási korlátja. Az SRH-2D modell a térbeli deriváltakat másodrendűen pontos sémával közelíti (Lai 2003), azaz a rácsháló finomításával négyzetesen nő a numerikus pontosság.

A száraz területek elöntését és a víz visszahúzódását stabilan és tömegmegtartóan kezeli a megoldó algoritmus. Ennek kulcsa az, hogy csak azokban a cellákban számolja ki a mozgásegyenleteket, ahol a közepes vízmélység meghaladja az 1 mm-t, de emellett

természetesen megengedi a hullámfront terjedését a száraz cellaszomszédok felé. Ennek a később bemutatott permanens állapotok modellezésében ott van jelentősége, hogy a kezdeti és a konvergált permanens állapot között változik a vízborítottság.

A pyRiverbed igazolásán túl a szabályozások előtti Tisza áramlási viszonyainak jellemzéséhez is egy 2D modellt építettem fel, ezúttal a pyRiverbed által a rendelkezésemre álló mederadatokat alapján készített medermodellt felhasználva. Ennek a modellnek az eredményeit szeretném feldolgozni egy későbbi kutatásban bemutatásra kerülő 1D morfodinamikai modell fejlesztésénél.

4. Módszertani igazolás

A modelligazolásnál két állapotot vettem össze, az egyik egy valós geometria, amely alapján az igazolás történik. A másik állapot a generált szintetikus meder. Maga a validációs folyamat szokványosan a vízszintek összevetésével szokott történni. Jelen helyzetben ennek a módszernek nem sok értelmét láttam, mivel a pyRiverbed által generált szintetikus medernek megadott átlagos esés egyezik a valós geometria átlagos esésével, így a lokális változékonyságot nem kapjuk vissza a szintetikus medermodelltől. Ezen problémafelvetés miatt a vízmélységeket vizsgáltam, ahol első sorban azt figyeltem, hogy a teljes szakaszra nézve miként alakulnak. Ez azért volt fontos egyrészt, hogy az átlagos vízmélység azonos legyen, másfelől, hogy a vízmélység ne változzon a hossz mentén, hiszen akkor az azt jelentené, hogy a szakasz nincs egyensúlyi állapotban az adott mederérdesség és medergeometria esetén.

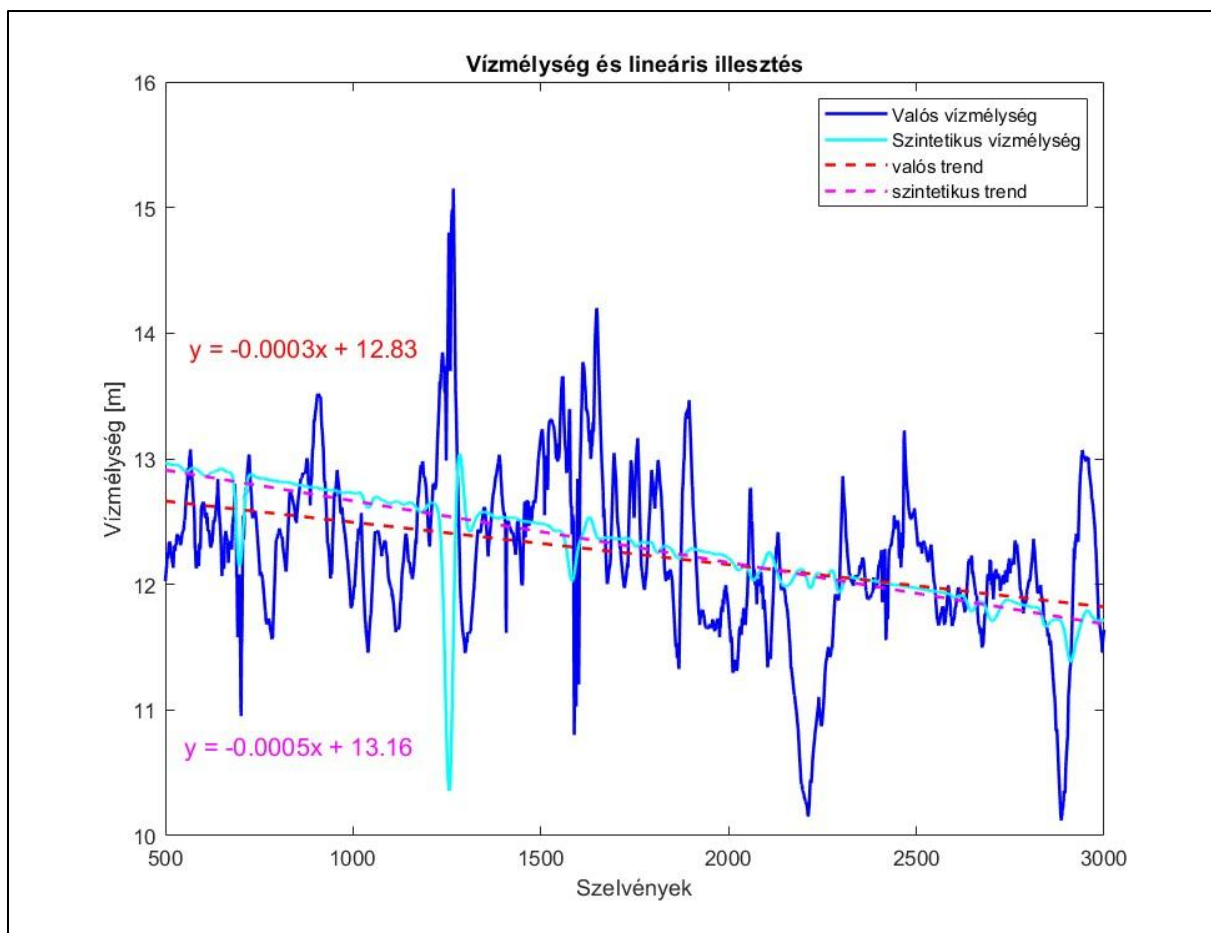
Az igazoláshoz szükséges valós állapotot a 2017-es DTM alapján képeztem le, ahol a 2D futtatásnál a vízhozamnak a mederkitöltő vízhozamot alkalmaztam befolyási peremnek, amely $1260 \text{ m}^3/\text{s}$. Kifolyási peremfeltételnek pedig a vízszintet adtam meg, mely jelen helyzetben $87,33 \text{ m B.f.-i}$ értéket vesz fel. Érdességnek $0,022 \text{ s/m}^{1/3}$ értéket adtam meg, hiszen korábbi vizsgálatok alapján (Krámer és Török, 2018) a Manning-féle simasági értéke jelen szakasz főmedrének $45 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$.

A szintetikus meder generálásánál a pyRiverbed-ben a szakaszon átlagos mélységet adtam meg, amely $8,1 \text{ m}$ (Kiss et al., 2024). Esésnek ugyanakkora esést adtam meg, amely a valós meder esése is volt, tehát $2,87 \text{ cm/km-t}$. A pyRiverbed-ben amit még fontos volt megadni az értelemszerűen a meder szélessége, ahol a szakasz átlagos mederszélességét vettem fel, amely 110 m . A cellafelbontást úgy adtam meg, hogy 10 cellára osztotta a szélességet, ugyanilyen cellakiosztással futtattam később a valósmedret is, hogy az összehasonlításnál a különböző méret ne okozzon gondot. Maga a pyRiverbed-nél, ami kulcsfontosságú, az a meder

középvonala, hiszen onnan építi fel a szintetikus medret, ezt a középvonalat a 2017-es DTM alapján vettem fel. Amely paraméter kalibrálását szükségesnek láttam az a, görbületi fázis késés volt, ahol szakirodalom alapján 2,1-4,7 közötti érték az ajánlott (Li és García, 2021). A vizsgálat alapján azt láttam, hogy erre a tényezőre érzékeny a modell, így én végül az értékét 4-re vettem fel. A felsorolt paraméterek és megfontolások következtében legeneráltam a szintetikus medret, amelyet ezután futtatam az SRH-2D-ben. Itt fontos megjegyezni, hogy a pyRiverbed-ben szinteket nem lehet megadni, így a szintetikus medermodell az nem ugyanazon szintekkel komponál, mint a valós meder, így kifolyási vízszintnek olyan mélységet adtam meg, amely a legjobban közelíti a valós meder kifolyási vízmélységét.

Ezt követően kezdtem a szintetikus meder futtatásához paraméterezni a 2D modellt. A peremfeltételek esetén a kifolyási vízszint, amely értéke változik a valós geometria futtatásához képest, illetve a simaság értéke. A kifolyási vízszint értékét 11,52 m-re vettem fel. A vízszintet oly módon vettem, hogy a kifolyási vízmélység minél jobb egyezést adjon, ennek oka az, hogy a pyRiverbed által generált meder teljesen más Z értéket generál és így volt a legcélszerűbb a valós szintekkel összhangba hozni. A meder simasági értékének ugyanazt vettem fel, mint a valósmeder vizsgálatánál is, tehát $45 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$.

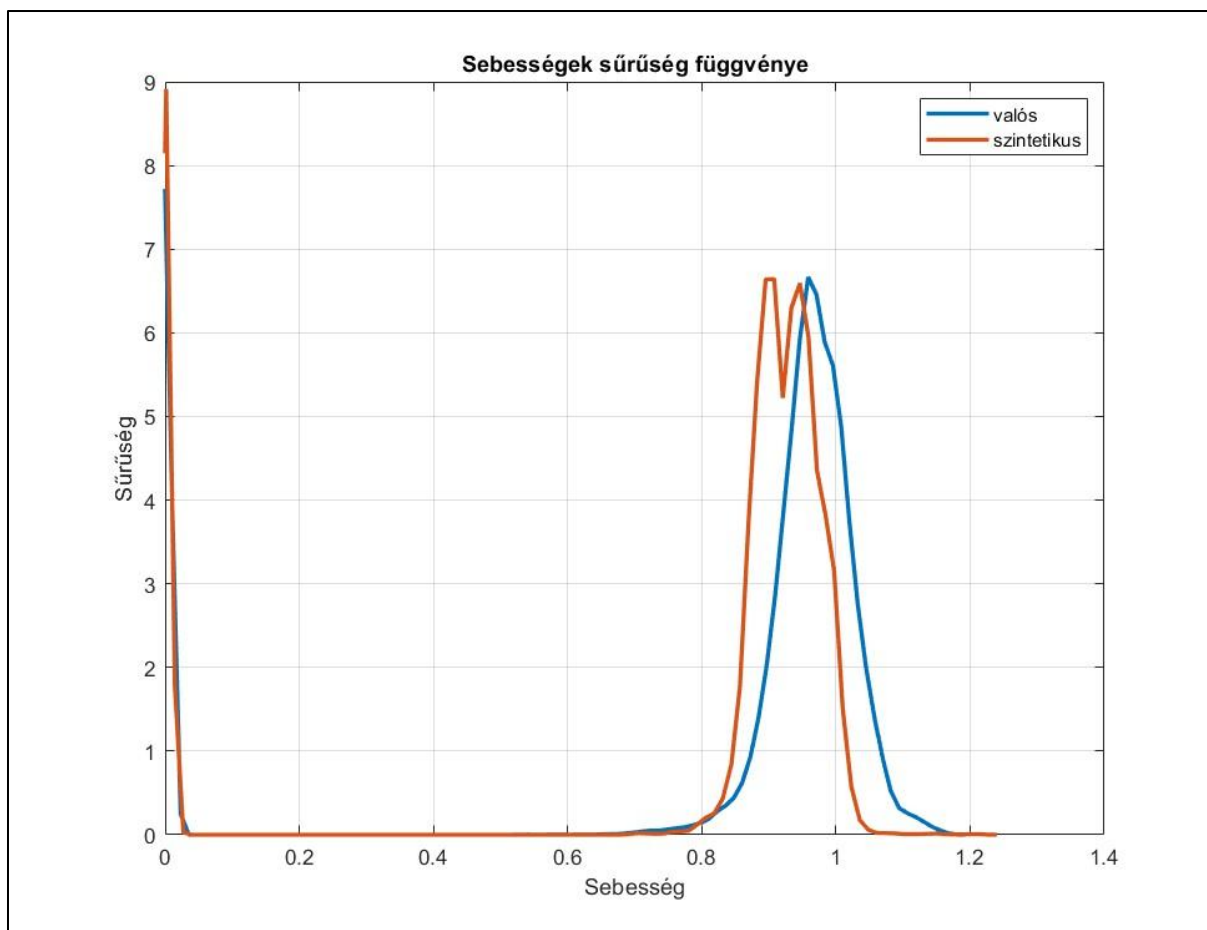
A modelligazoláshoz, mint már az elején is említettem, hogy a dolgozatomban a vízmélységeket hasonlítom össze, ahol a szintetikus és a valós meder vízmélység eredményeit a következő ábra mutatja be:



9. ábra: A valós- és a szintetikus mederrel számított vízmélységek hossz-szelvénye

A **9. ábrán** látható, hogy a valós meder és a szintetikus meder vízmélység trendje közeli eredményt adott. Mindkét állapotra kiszámítottam az átlagos vízmélységet is, amely a valós medernél 12,20 m, míg a szintetikus meder esetében ez 12,33 m. Az szakaszra számított átlagos mélységeket nézve mindössze 13 cm a különbség. A vizsgálataim célja, adatot szolgáltatni egy alacsonyabb rendű modellnek, így ezt az átlagos értékkülönbség elfogadottnak vélem.

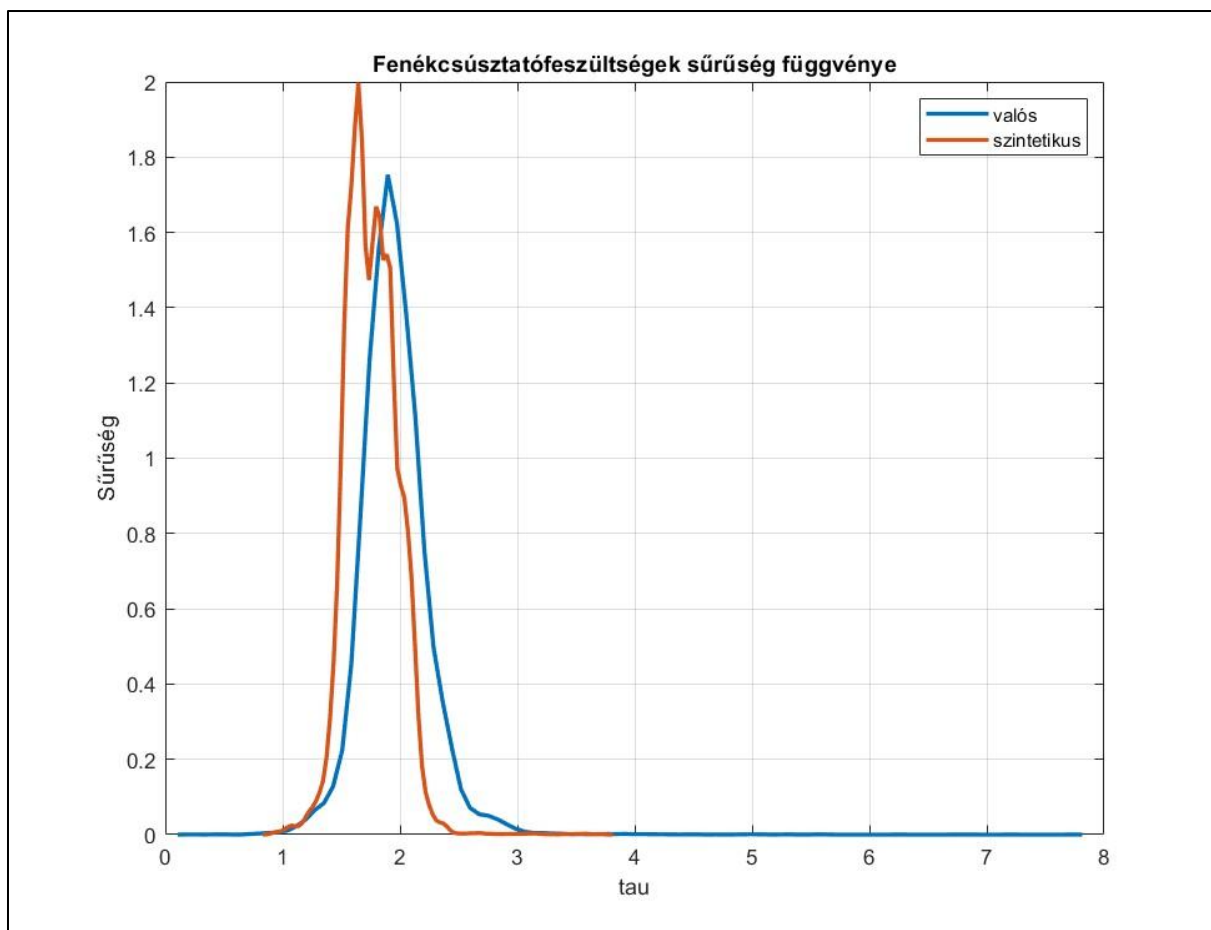
Továbbá megfigyeltem a miként alakult a két vizsgált állapot sebesség gyakoriságfüggvénye, melyet a következő **10. ábra** mutat meg:



10. ábra: Sebesség gyakoriságfüggvények összehasonlítása

A sebességek viszonylatában elmondható, hogy a modell leköveti a valós gyakoriságfüggvényt, de kismértékben alábecsüli annak értékét. Ha az egész folyón vett átlagos sebességet nézzük akkor a valós mederben 0,79 m/s, míg a szintetikus mederben 0,76 m/s. Amennyiben a 0 értékeket a számításból elhagyom, úgy az átlag 0,97 m/s a valós meder esetén és 0,93 m/s a szintetikus modell esetében.

Az igazolásban utolsó összehasonlításként a fenékcúsztató feszültségek sűrűség függvényét hasonlítottam össze. A 10. ábra mutatja be, ezen függvények ábrázolását. Az ábrán megfigyelhető, hogy a jelleget ebben az esetben is jól megadja, de a szintetikus modell összeségében a sebességekhez hasonlóan kismértékben alábecsüli a τ értékét. Átlagos értékeket tekintve a valós medernél 1,95 Pa, míg a szintetikus medernél 1,76 Pa az átlagos fenékcúsztató feszültség értéke. A két állapotot sűrűségfüggvényként ábrázoltam, melyet a következő **11. ábra** diagramja mutat be:



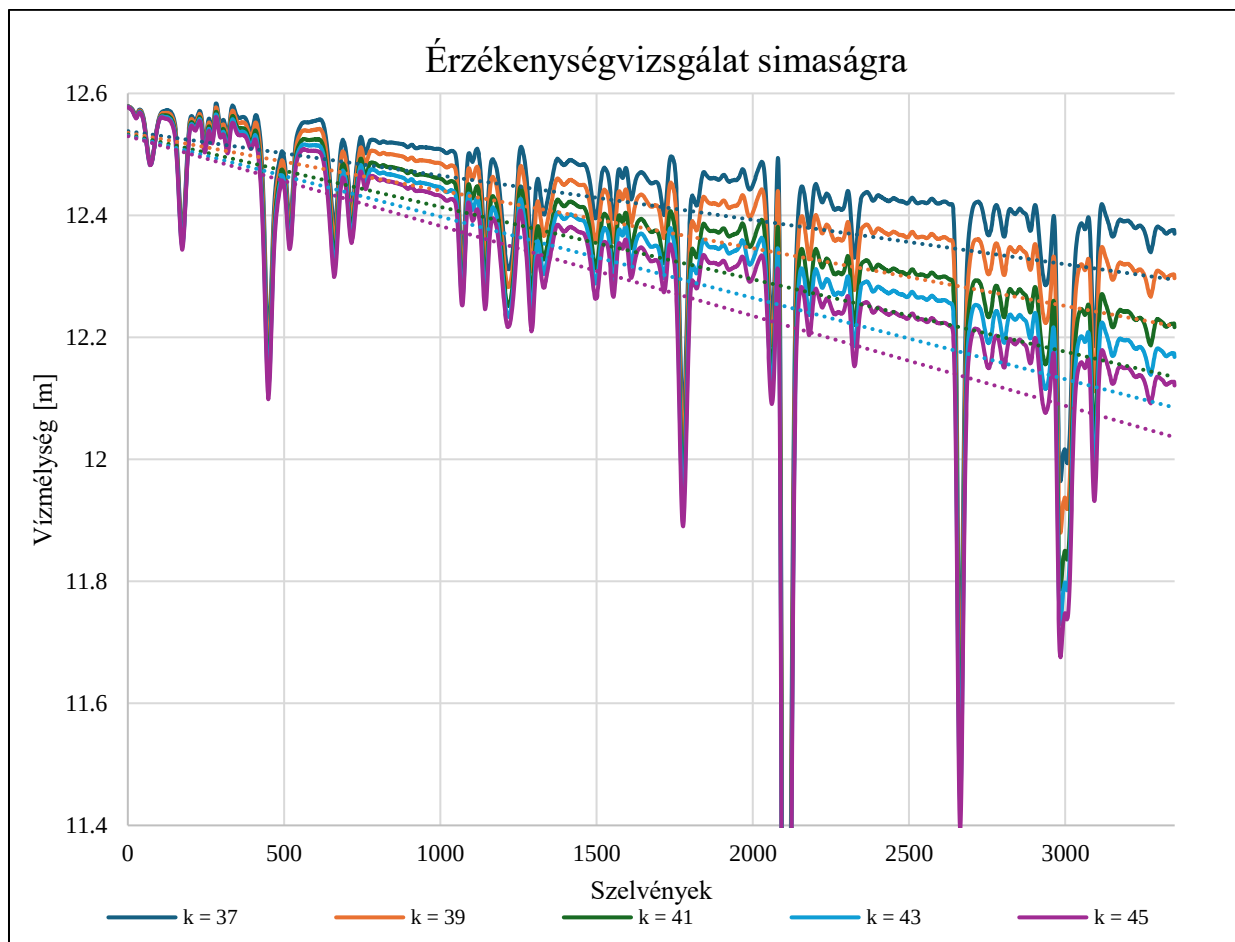
11. ábra: Fenékcúsztató feszültségek sűrűség függvényei

5. Modellvizsgálatok

Az előző fejezetben igazolt eljárást alkalmazva végeztem modellvizsgálatokat, melyeket ezen fejezetben mutatok be. A vizsgálatoknál először érzékenységvizsgálatot végeztem, mellyel látható egy-egy paraméter milyen hatást gyakorol az eredményekre. A második vizsgálat az a korabeli meder leképezése és végül egy alkalmazási módot mutatok be, melynél a modellek segítséget nyújthatnak.

5.1. Érzékenységvizsgálat

Első vizsgálatomban a k Manning féle simasági értéket figyeltem meg. A k értéke a jelenlegi valós állapotban állapotban $45 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$. Ebben a vizsgálatban azt figyeltem meg, hogy ha egy esetleges szabályozási munka előtti állapotot modelleznénk akkor nagy valószínűséggel a k értéke csökkenne, vagyis az a meder érdessége növekedne. Ebből indultam ki, így a simasági értékeket $2 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ -os lépcsőkben csökkentve mutatok be 5 állapotot, melyet **12. ábra** taglal.



12. ábra: A szintetikus mederben kialakuló vízmélységek hossz-szelvénye különböző medersimasági értékek esetén

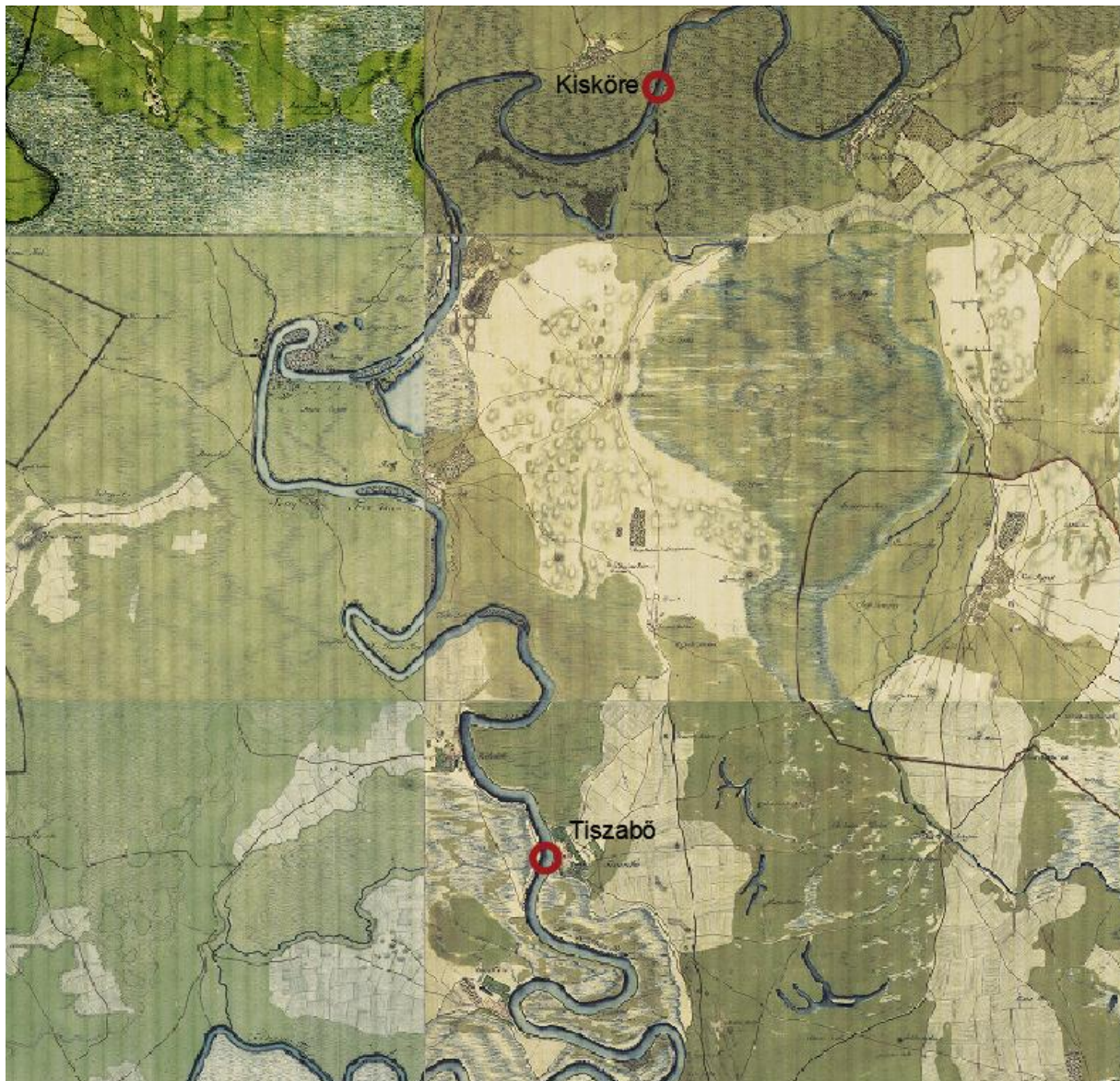
A diagramon a függőleges tengelyen a vízszinteket jelöltem, míg a vízszintesen a szelvényeket, ahol a kiindulási 0 pont Kirköre (403,1 fkm) és a végső 3350-es pont pedig Tiszabő (369,1 fkm). Az eredmények alapján elmondható, hogy az érdesség növelésével növekednek a vízmélységek és a trendvonalaik egyre laposabbak lesznek. Az is látható, hogy ez a növekedés a szakaszon a távolság arányában egyre nagyobb értékű, így a kifolyási peremen van a legnagyobb változás. A kifolyási peremen az alap $45 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ simaságnál a vízmélység 12,12 m, míg a legérdekesebb esetben, amely a $37 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ simasági értéket veszi fel, ott 12,37 m. Tehát ez azt jelent, hogy a két változat között 25 cm-es vízmélység különbség mondható el.

5.2. Korabeli állapot modellezése

Korabeli állapotról beszélek, ha a 19. századi folyószabályozás előtti időszakot mutatom be. Modellvizsálatomban a már igazolt módszerrel képeztem le a korabeli állapotot. A Tiszának szabályozása előtt kanyarulatok medre volt, a kanyarulatok egy részét a szabályozások következtében átvágták, így ma a folyó egyenesebb medret követett, illetve ezáltal hossza is csökkent.

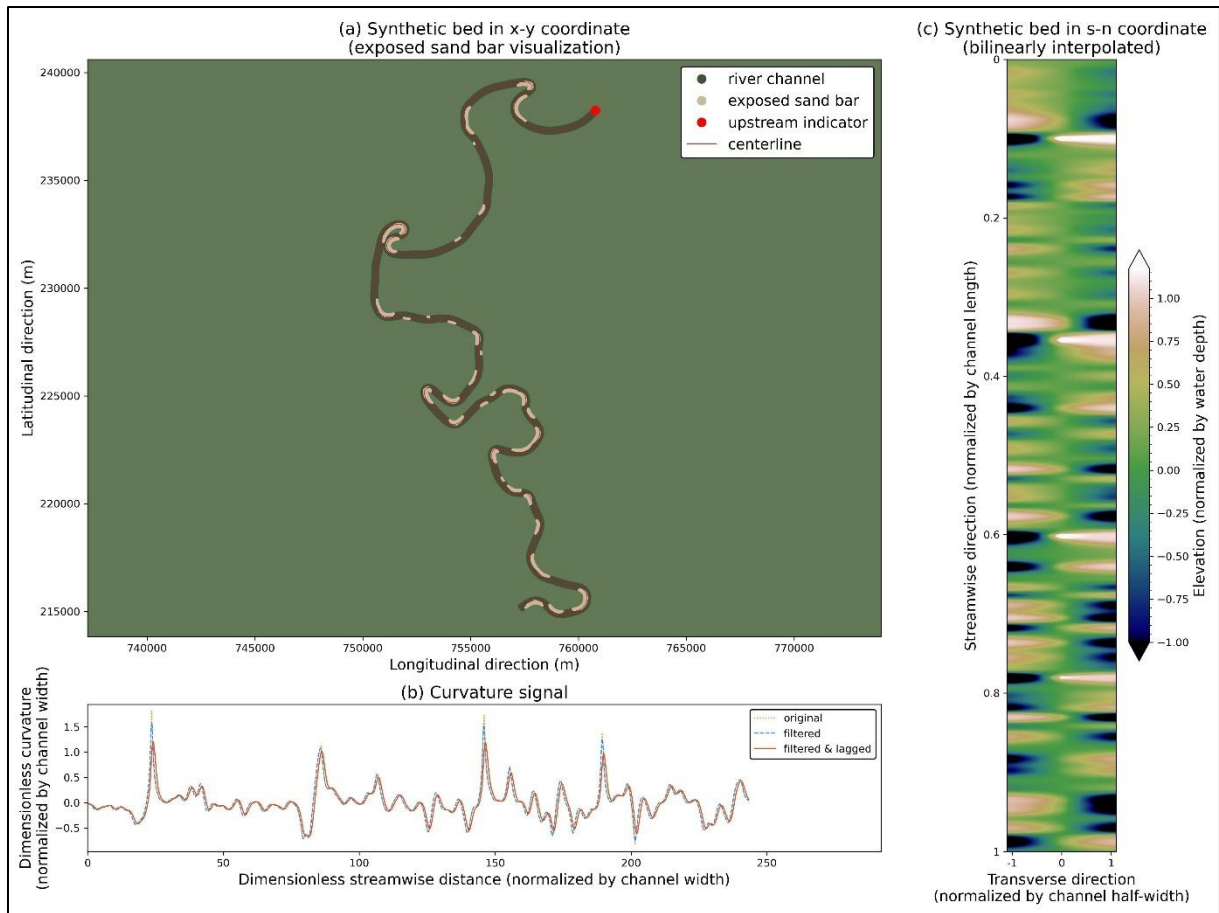
A régmúlt állapotoknál mindig kérdéses 1-1 modell felépítése, hiszen nem mindig állnak rendelkezésre megfelelő mennyiségben vagy akár minőségben adatok a modellépítéshez. Az említett problémához kulcs a bemutatott eljárás, mellyel későbbi modellezési munkák alapját is képezhetjük.

A pyRiverbed felépítéshez szükségem volt a korabeli meder középvonalára, ehhez az I. katonai felméréseket használtam fel (**13. ábra**). A felmérések georeferált térképeit illesztettem össze QGIS-ben, majd aszerint rajzoltam meg a középvonalat.



13. ábra: Korabeli meder az I. katonai felmérés térképén (I. katonai felmérések, 1782-1785)

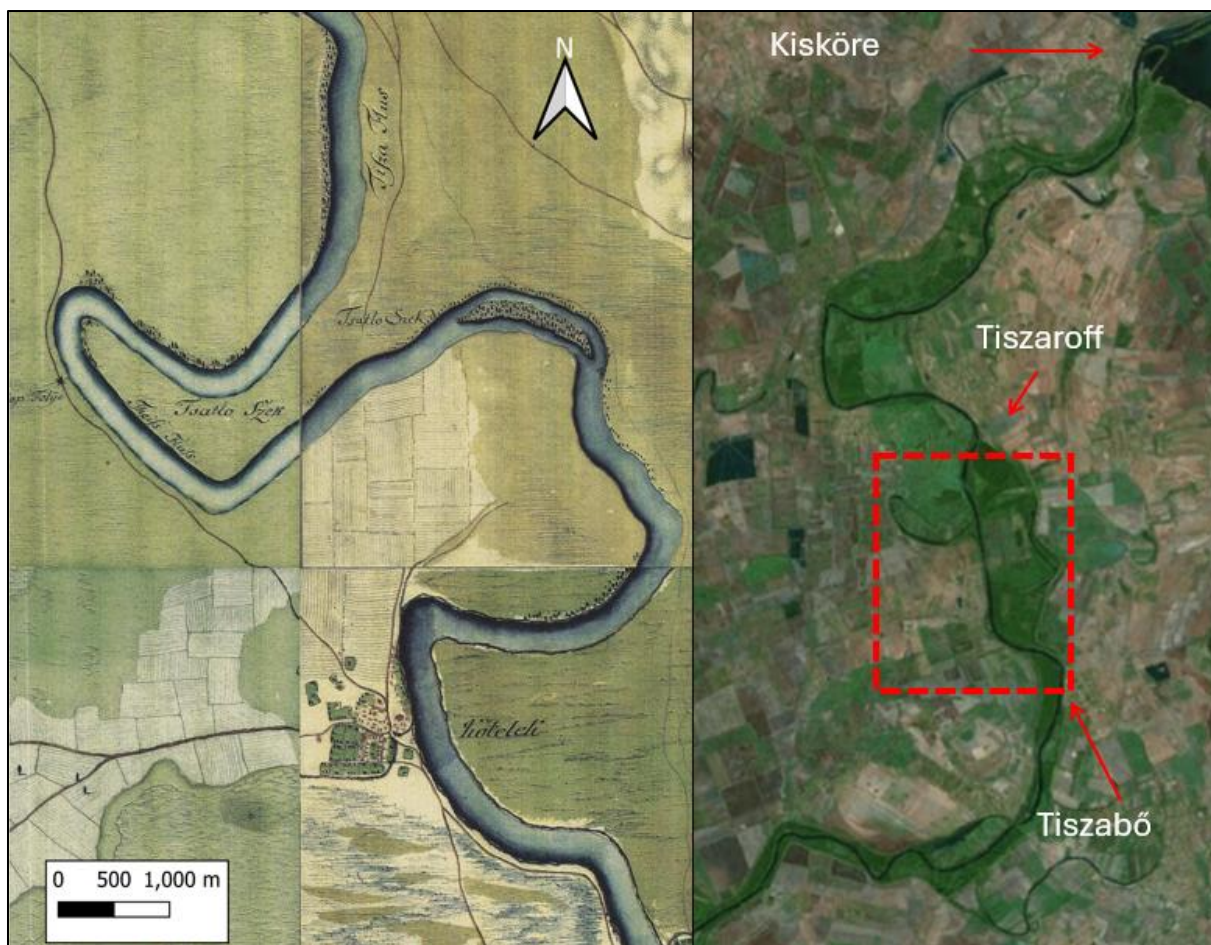
A **13. ábra** alapján felvett középvonalat adtam meg a pyRiverbednek és a katonai felmérés alapján QGIS-ben lemértem milyen széles a meder, így elmondható ezek alapján, hogy a szakaszon átlagosan 250 m a meder szélessége. Ez a korabeli szélesség több, mint duplája a jelenlegi állapot szélességének (110 m). Mederesésre szakirodalomban találtam adatot, így a modellben is 2,3 cm/km-t adtam meg (Botár és Károlyi, 1971). Vízmélységnek adatok híján a jelenlegi állapot átlagos vízmélységét adtam meg, amely 8,1 m. Az éles kanyarok végett a cellakiosztást és a görbületi fázis késést is szükséges volt állítanom, hogy olyan rácshálót kapjak, amely az SRH-2D-ben le tud futni. A pyRiverbed által készített térképet a **14. ábra** mutatja be:



14. ábra: Korabeli meder *pyRiverbed* megjelenítése

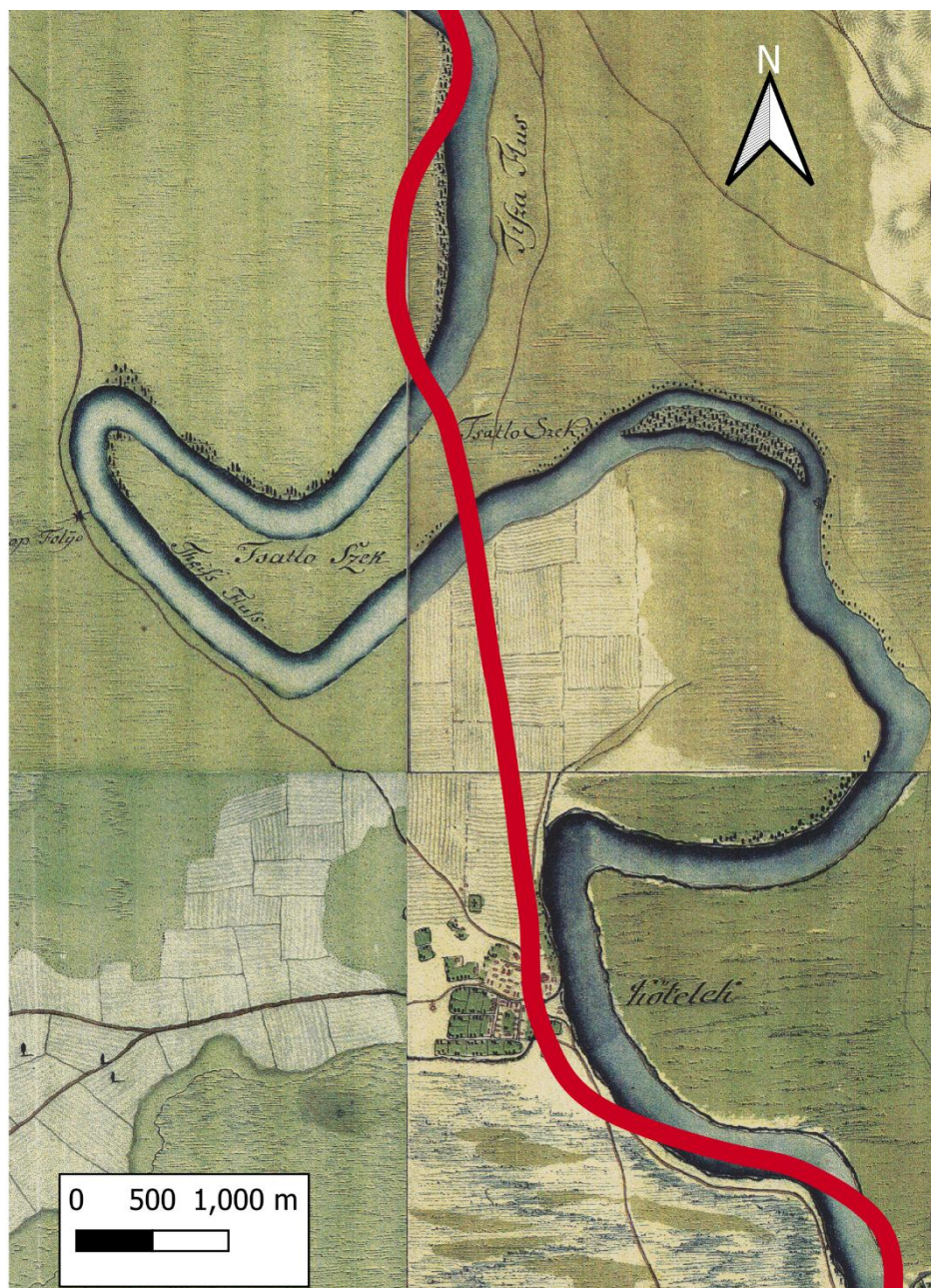
A 14. ábrán látható, hogy a medermentén a kanyarulatokban hordaléklerakódást ad meg a program, amely régmúlt meanderező állapotra jellemző volt.

A SRH-2D-t oly módon futtattam, hogy abba ugyanazon peremfeltételekkel paramétereztem a modellt, habár ezek nem felelnek meg a múltbéli viszonyoknak, de adathíján alapmodell futtatásnak megfelelőnek véltem ezt az állapotot modellezni. A modell eredményeket egy kijelölt részen mutatom be, mely Tiszaroff és a Tiszabő közti szakasz (15. ábra).



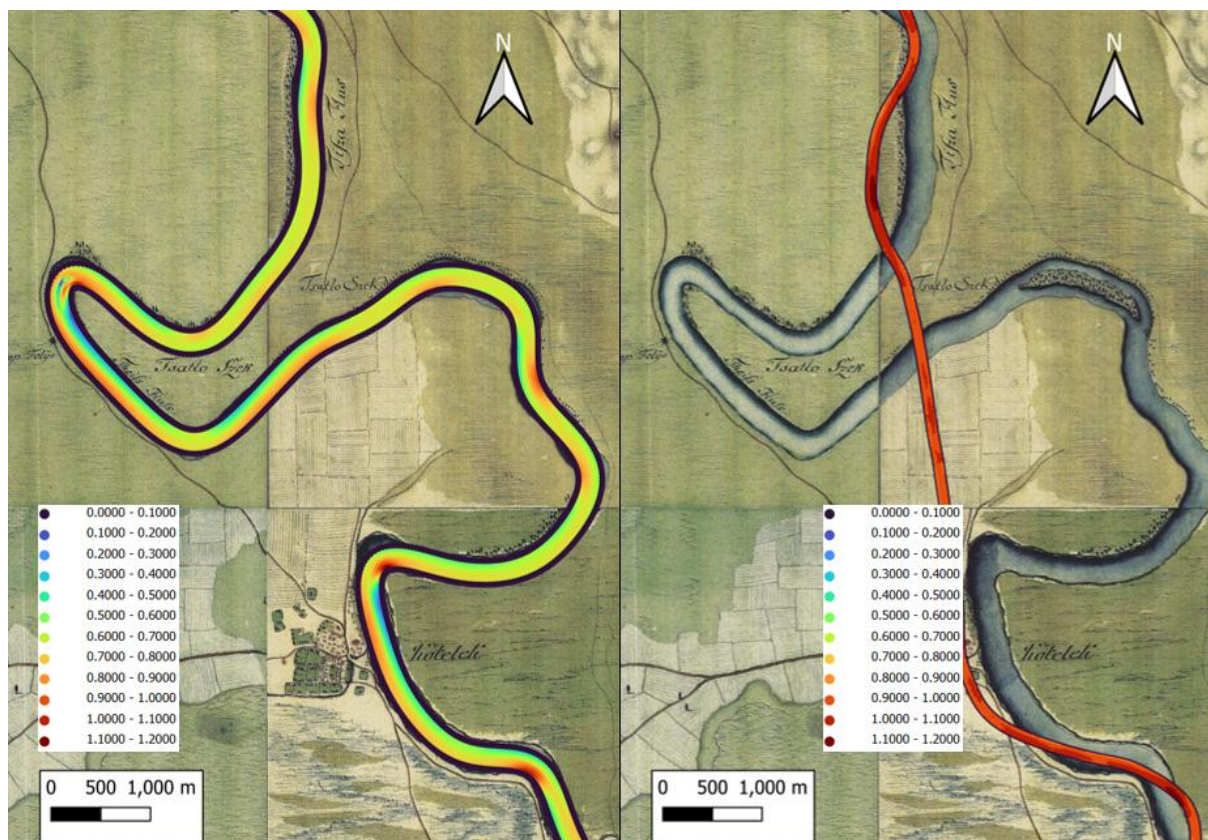
15. ábra: Vizsgált szakasz a szabályozás előtt és napjainkban

Megjelenítettem a szabályozott medret a katonai felmérések térképein, amelyet a **16. ábra** mutat be.



16. ábra: Szabályozott meder (piros sáv) bemutatása az I. katonai felmérés térképén

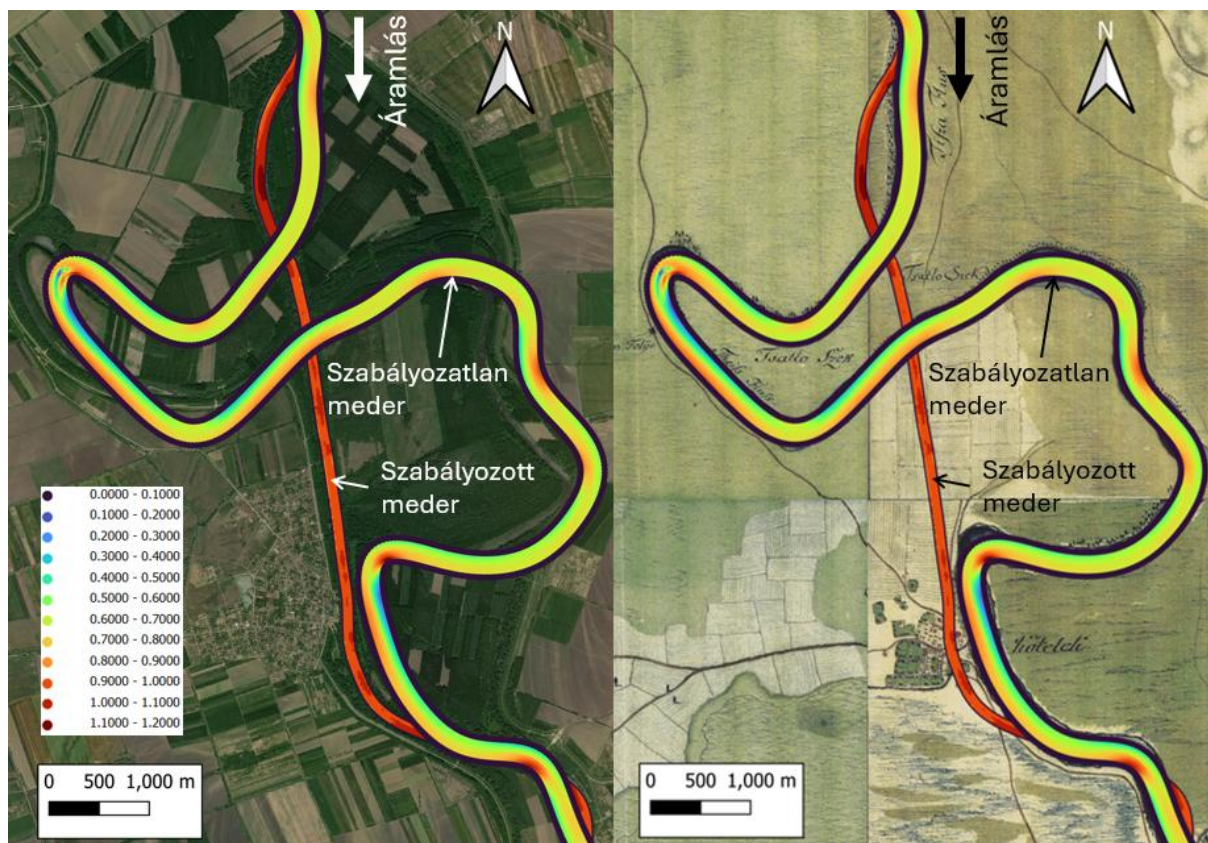
Ezt követően a 2017-es DTM alapján futtatott modellt és a korabeli állapot alapján végzett futtatási eredményeket vettem össze. A sebesség eloszlása szerint mutatom be a továbbiakban a modelleredményeket.



17. ábra: Sebesség eloszlás bemutatása a jelenlegi és a korabeli Tisza medrében

Az **17. ábrán** látható, hogy a korabeli mederben a sebesség alacsonyabb volt $\sim 0,7-0,8$ m/s-os átlag sebességgel, mint a jelenlegi mederben, ahol jellemzően $\sim 0,9-1$ m/s-os sebesség az átlag.

A **18. ábrán** látható, ahogy egymásra illesztettem a két állapotot, a sebesség alapján elmondható, hogy a korabeli állapotban jelentős kimosódások és medermélyülések voltak jelen, amely arra enged következtetni, hogy a szabályozatlan állapotban nem csak a vonalvezetés, de a medergeometria is változatosabb lehetett. A 2017-es állapot esetében a szakaszon a sebesség szinte alig változik.



18. ábra: Áramlási sebesség a korabeli és a mai mederben

5.3. Modell alkalmazás

Az eddig bemutatott vizsgálatok végső célja a korabeli morfodinamikai állapot még alaposabb megértése és megbízhatóbb paraméterezése. Ehhez tehát sikerült tesztelnem és igazolnom egy modellezési eljárást, aminek segítségével 2D áramlási mezőt kapok. Az eddigiek során csak a mederkitöltő állapotban végeztem modellfuttatásokat, ezért csak az arra vonatkozó eredmények feldolgozása alapján tudok alkalmazási példákat bemutatni.

5.3.1. Morfológiai alkalmazás

A modellfuttatásokkal kapott áramlási mezőből megfelelő módon ki lehet olvasni a szakaszra jellemző áramlási jellemzőket. Ügyelve arra, hogy a folytonossági egyenlet és az impulzus egyenlet se sérüljön az átlagolás során (vagyis a 2D megközelítésből egy 0D megközelítésbe való felskálázás során), ezért az átlagolást az alábbi módon végeztem el:

1. Először a rácsháló minden egyes sorára (minden keresztmetszvényre) végeztem el az átlagolást úgy, hogy minden egyes cellára kapott paramétert az energiával (stream power) súlyozva számítottam. Ilyen módon számítottam ki a szelvény menti átlagos csúsztató feszültséget, vízmélységet, és áramlási sebességeket.

2. Végül a folyásirány mentén egy egyszerű átlaggal számítottam a szakaszra jellemző átlagos értékeket.

A vizsgált szakaszra így számoltam a 2D modelleredményekből szakaszra jellemző értékeket. Hangsúlyozom, hogy az alkalmazott átlagolás során figyelembe vettem, hogy a kapott szakaszra jellemző átlagos érték reprezentatív érték legyen a hordalékmozgás szempontjából.

Ezen értékektől azt várom, hogy azokkal az 1. táblázat kiegészíthető olyan módon, hogy a korabeli morfológiai állapot értékelhetősége megvalósíthatóvá váljon.

Ezek alapján, a korábban ismertetett van Rijn összefüggést alkalmazva kiszámoltam a mederkitöltő állapotnál várható hordalékhozamot. (**3. táblázat**)

3. táblázat: 0D modell számítás a korabeli szakaszra

Paraméterek	Korabeli állapot
Mederkitöltő vízhozam [m ³ /s]	1260
Átlagos csúsztatófeszültség [Pa]	0.546
Szélesség [m]	250
Jellemző szemcseméret [m]	0.00012
Kritikus csúsztatófeszültség [-]	0.874057
Fajlagos hordalékhozam [kg/s]	0.7

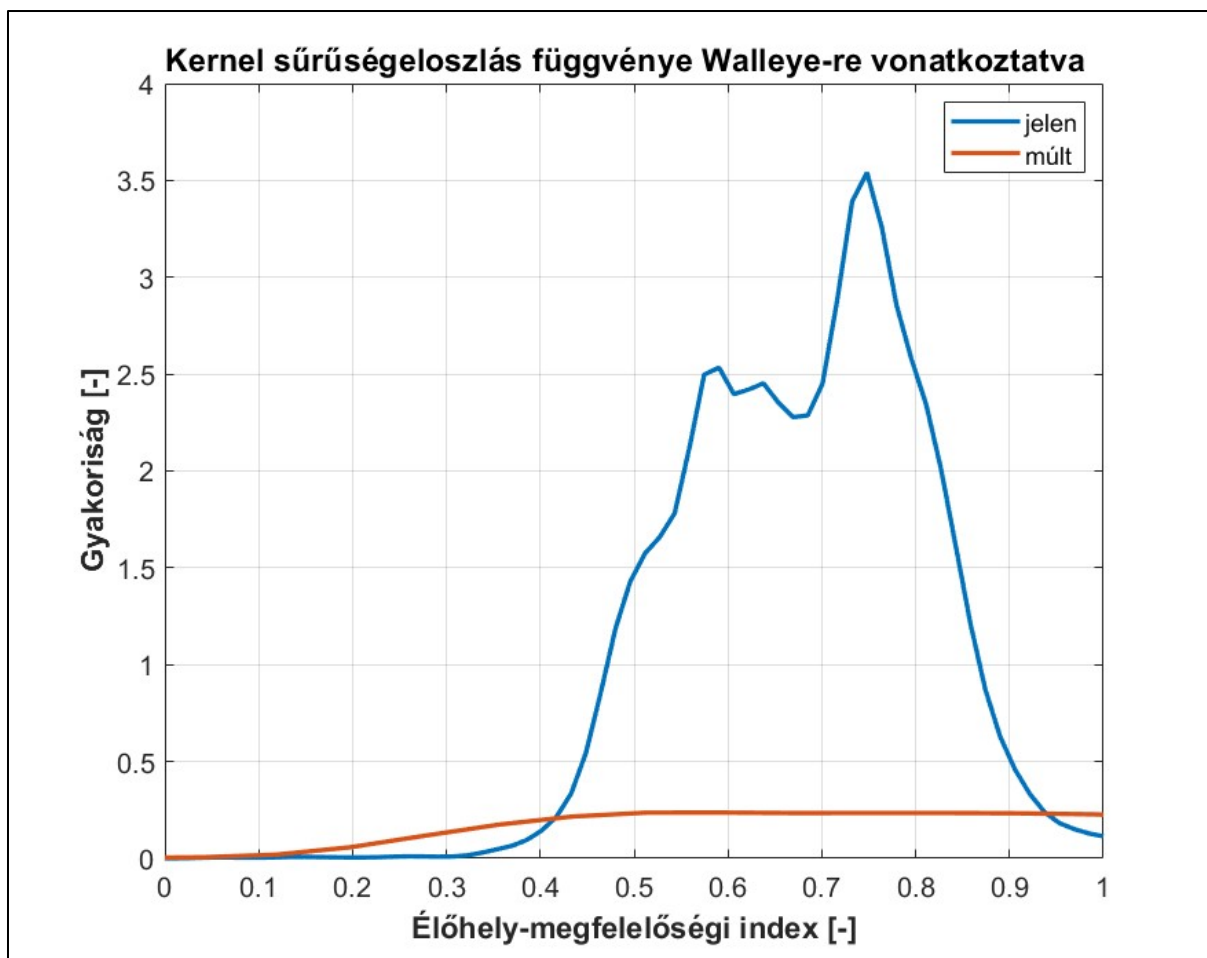
A szabályozatlan állapotra mederkitöltő állapotban 0,7 kg/s-os hordalékhozamot kaptam a van Rijn összefüggéssel, ami az 1950-70-es években mért értékek nagyságrendjébe esik. Mivel komolyabb elemzést, érzékenységvizsgálatot még nem végeztem, ezért ezt az értéket fenntartásokkal kell kezelni. De sikerült prezentálnom a 2D áramlásmodell eredményeiből következtethető morfordinamikai paramétereket és módszereket. A kapott érték alacsonyabb, mint a jelen állapotra becsült érték (ami végső soron irreális egyensúlyi mederesést eredményezett, 2. táblázat).

5.3.2. Élőhely szempontú alkalmazási lehetőségek

Kitekintésként szerepelt, hogy az ilyen típusú modellek/vizsgálatok más szakágakat is kiszolgálhatnak, erre egy példa lesz a következő elemzés. Ebben a vizsgálatban egy konkrét halfaj élőhely megfelelőségét vizsgálom meg a modelleredményeim alapján, csak a mederkitöltő állapotra. Egy átfogó vizsgálathoz azonban kis- és nagyvízi vizsgálatokra is szükség volna. Ezt az eljárást Fleit Gábor a 2013-as TDK dolgozatában a Sződligeti Duna szakaszra végezte el a

Sander vitreus (Walleye) nevű halfajra megadott paraméterek alapján (Fleit, 2013). A választás azért esett erre a halfajra esetében és esetemben is maradok ennél, mert ez egy süllő fajta és ezzel lehet legjobban közelíteni a Tiszában élő süllőfajt. Magyarország egyik legértékesebb és legkeresettebb halainak egyike a süllő. A fogassüllő vagy süllő (*Sander lucioperca*) a sugarasúszójú halak (*Actinopterygii*) osztályába, a sügéralakúak (*Perciformes*) rendjébe és a sügérfélék (*Percidae*) családjába tartozó faj. Azért tartottam fontosnak ezt a vizsgálatot, mert a külső változásokra (pl.: áradás, apadás) a Tiszai halai közül a süllő a legérzékenyebb. A süllő élőhely választását 3 dolog befolyásolja döntően: úszóképesség, oxigénigény és a táplálék elhelyezkedése. Anatómiai adottságai miatt nem alkalmas tartósan nagy erőfeszítést igénylő mozgásra, így a rohanó, gyors sodrást nem kedveli. Ezzel szemben a nagy oxigénigénye megköveteli azt, hogy ilyen sodró vizek környékén vagy ilyen vizekben tartózkodjon. A Tiszán fő tartózkodási helye a partszegély vízbe csúszott vagy víz alá került, elszáradt ágas-bogas világa. Ez azért is megfelelő számára, mert az ágak mögött a kimosódott gyökérzenél sodrásközele, tehát oxigéndúsabb élőhelyre talál.

A vizsgálat célja a leírt halfaj élőhely modellezése, melynél egy ún. élőhely-megfelelőségi index számítását végeztem el, mely számítási módszerét Fleit Gábor 2013-as TDK dolgozatából vettem át.



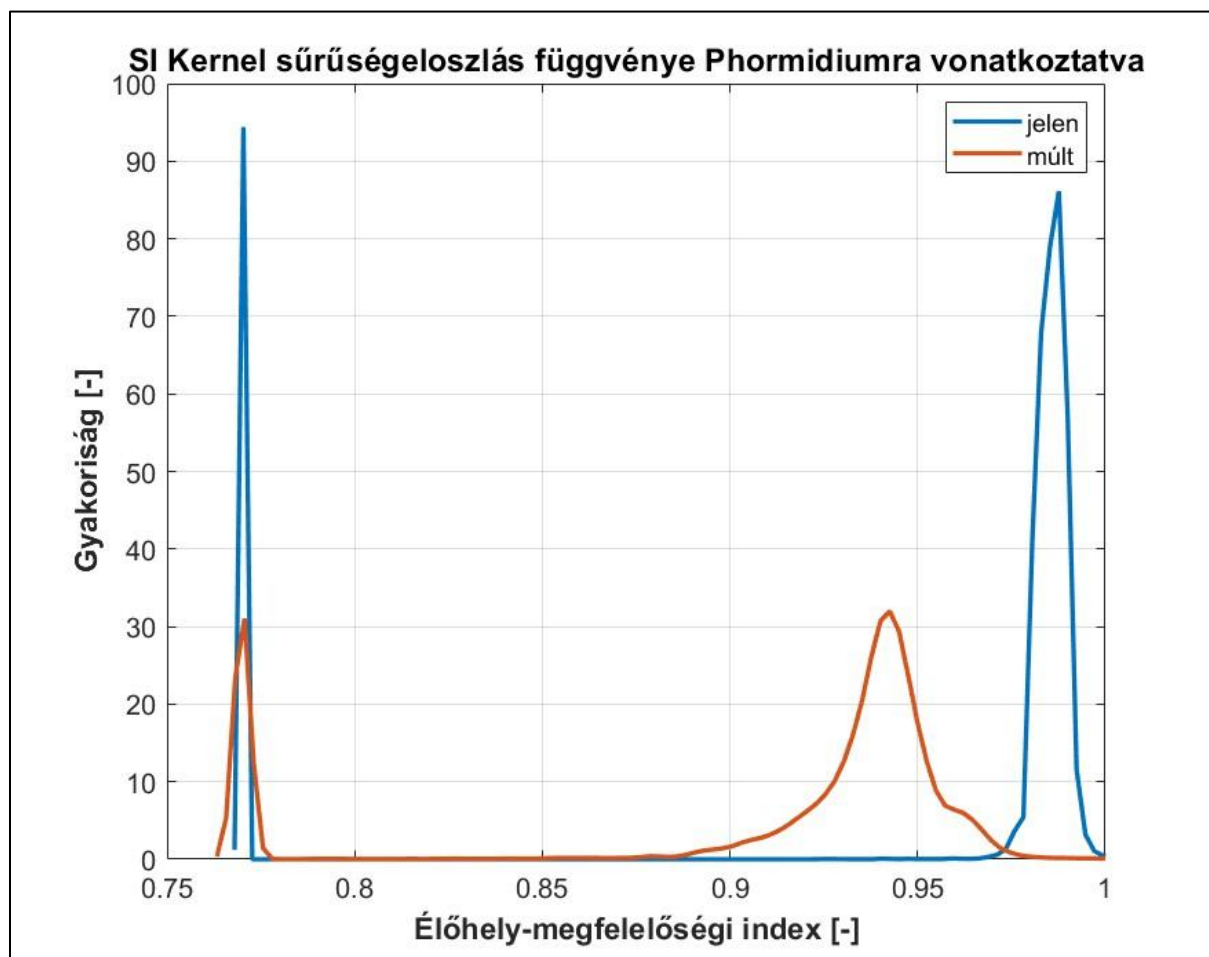
19. ábra: Élőhely-megfelelőségi index számítása a jelen és a korabeli állapot tükrében

A **19. ábra** jól szemlélteti azt, hogy a szabályozás előtti állapotnál kis eloszlást kapunk és megfigyelhető, hogy a szabályozott mederben nagy mértékben nő az index sűrűsége is 0,4 és 0,95 között, ez azzal is magyarázható, hogy a folyó sebessége nőtt, így a halfaj számára is oxigéndúsabb élőhelyet tud biztosítani.

Következő vizsgálatban a *Phormidium*-ot vizsgáltam meg. A *Phormidium* egy cianobaktérium fajta, amely világszerte elterjedt. Élőhely szempontjából különösen a sekély, lassan mozgó vagy állóvizet preferálja. Baktériumtelepei szőnyegszerűen képződik és időnként toxikus anyagokat, mint például anatoxinokat termel, amelyek az emberi szervezetre veszélyesek lehetnek. Élőhely szempontjából az optimális környezete a meleg hőmérséklet, a tápanyagdús víz és az alacsony áramlási sebesség, mindezek hozzájárulnak a növekedéséhez és a toxintermeléshez, melyek vízminőségi és közegészségügyi gondokat idézhetnek elő. Egy tanulmány alapján kezdtem el a vizsgálatot, amely kifejezetten a *Phormidium* növekedésével, terjedésével és az általa termelt anatoxinok koncentrációjával foglalkozott (Heath et. al., 2011).

A tanulmány eredményei fontosak, hiszen így előre lehet lépéseket tenni ilyen jellegű vizsgálatokkal a vízminőség és a közegészség megóvása érdekében.

Az előző példához hasonlóan jártam körbe ezt a kérdéskört is, melynek eredményeit a **20. ábra** jeleníti meg.

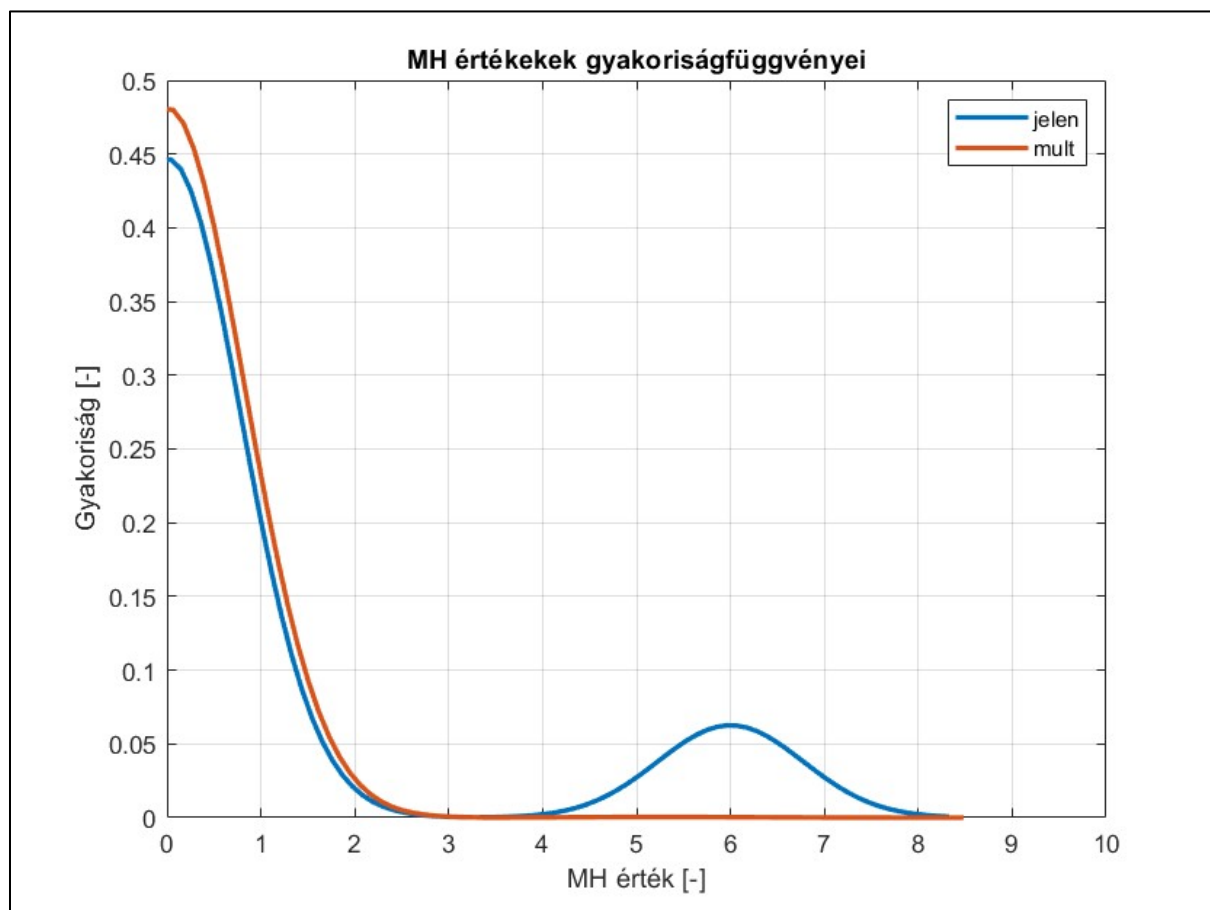


20. ábra: A *Phormidium* élőhely-megfelelőségi index gyakoriságfüggvénye a jelen és a korabeli állapot tükrében

A 20. ábrán látható sűrűség függvény azt mutatja meg, hogy a szabályozatlan folyó esetében 2 helyen és szélesebb előfordulhatott vagy előfordulhatott volna ez a baktérium fajta, míg a szabályozott mederben két nagyon specifikus környezet jelenlétében tudna fennmaradni, melyet a keskeny sűrűségfüggvények is jeleznek esetében. Fontosnak tartom, hogy ezen eredményeket csak egy alkalmazási példaként mutatom be jelen dolgozatban.

Végül A Hauer-féle élőhely jellemzést készítettem el, mely eljárás egy osztrák tanulmányra alapul (Hauer et al., 2008), de már hazai viszonylatban is alkalmazták a Duna egyes szakaszaira (Baranya és Józsa, 2009; Fleit, 2013). Az MH index vagyis a mesohabitat index segítségével elvégezhető az élőhely típusokba sorolása, erről részletes leírást ad Fleit Gábor 2013-as TDK

munkája. Amikor az MH értéke 0 vagy ahhoz közeli ott két állapotot ad meg: ha a vízmélysége $< 0,4$ m, akkor sekély vizet, de ha nagyobb, akkor beduzzasztott vizet. Esetünkben a vízmélység mindenhol meghaladja ezt az értéket. 2-4 közötti értéknél az élőhelytípust medencének definiálja, míg 5 és 9 között áramló szakasról van szó. A korabeli és a jelenlegi állapotra számított MH értékeket sűrűség függvényként ábrázoltam, melyet a **21. ábra** mutat be.



21. ábra: MH értékek gyakoriságfüggvénye a Tiszán

6. Összegzés

Dolgozatomban a magyarországi Közép-Tisza egy kijelölt szakaszának morfordinamikai vizsgálatát készítettem a dinamikus egyensúlyi állapotra összpontosítva.

Először részletes irodalomkutatás révén feltártam a releváns múltbéli adatokat. Az adatok tekintetében megismertem a múltbéli morfordinamikai jellemzőket és azokat kronológiailag rendeztem. Az irodalomkutatás során szerzett adatok alapján következtetni lehet a beavatkozások hatására. Jelen irodalomkutatás célja nem a szakasz állapotértékelése volt, hanem egy dinamikus egyensúlyi állapotot becslő modell paraméterezéséhez szükséges alapok megteremtése. A 2020-ban fejlesztett OD modellem alkalmazását szerettem volna használni a szakaszon, de több bizonytalanság okán is, másfajta metódust kellett alkalmazzak a megfelelő adatszolgáltatáshoz/becsléshez. Az adatmennyiség alapján kiválasztott szakasz Kisköre (403,1 fkm) és Tiszabő (369,1 fkm) közé esett. A dolgozat fő célja az volt, hogy olyan becslést tudjak adni, mellyel későbbi kutatásban paraméterezni és fejleszteni tudjam a 2022-ben felépített 1D modellt. Ezekhez a célokhoz egy másik modellezési eljáráshoz kellett forduljak, mely a dolgozatom építőkövét adja. A módszerhez szükségem volt egy 2D áramlástan modellre, viszont ehhez nem volt megfelelő adathalmazom a mederről, ezért alkalmaznom kellett egy új metódust, ami a pyRiverbed. Az említett modell egy Python alapú Beck-egyenleteken alapuló eszköz, mely képes a különböző paraméterek alapján megbecsülni a meanderező folyók egyensúlyi medergeometriáját.

A modellezésnél első lépésben a pyRiverbed segítségével generáltam egy szintikus medret, majd ezt használva paramétereztem az SRH-2D áramlástan modellt. A 2D modell futtatást elvégeztem a valódi geometriára és a szintikus mederre is. A két modell eredményeit szelvénymenti átlagokká alakítottam, majd összehasonlítottam egymással a kapott eredményeket és ezzel validáltam a modellt. A modell igazolását 3 paraméter vizsgálatával tettem meg: vízmélységek, sebesség és fenék csúsztatófeszültség. A vízmélységek összevetésénél egymáshoz közeli trendeket kaptam, majd a szakaszra számított átlagos mélységeket összevetve összesen 13 cm-es különbséget kaptam, melyet jó egyezésként fogadtam el. Ezt követően ábrázoltam a modellek sebesség sűrűségfüggvényeit és kiszámítottam az átlagos sebességeket a szakaszra. A valódi meder 0,97 m/s sebességet adott, míg a szintikus medernél 0,93 m/s sebességet számítottam, mely értékek között 0,04 m/s különbség van. Utolsó lépésben a fenék csúsztatófeszültség értékeket vettem össze, ahol a

valós meder 1,95 Pa és a szintetikus meder 1,76 Pa értéket adott. A három vizsgálat eredményei alapján igazoltnak vélem az eljárást.

Az igazolást követően 3 fajta modellvizsgálatot végeztem el.

Először érzékenységvizsgálatot készítettem a k Manning-féle simasági együttható értékére, ahol az eredmények alapján elmondható volt, hogy ennek az értéknek a csökkentése a vízmélységek trendjének meredekségét növelte és a kifolyási peremen adta a legnagyobb

A következő modellvizsgálatban a szabályozások előtti Tiszát modelleztem. Ehhez a vizsgálathoz a katonai felmérések alapján rajzoltam meg a folyó középvonalát, illetve mértem le az átlagos mederszélességét. Ezen értékkel és korabeli eséssel paraméterezve futtattam a pyRiverbed-et majd a kapott medergeometriát 2D áramlástanai modell geometriájának megadva végeztem modellvizsgálatokat. Magán a szakaszokon is látszott mekkora változás történt az átvágások következtében. Az eredmények bemutatásához kijelöltem a Tiszaroff és Tiszabő közti szakaszt. Ezen szakaszon mutattam be a sebességek változását, melynél a szabályozott meder $\sim 0,9-1$ m/s-os sebességet ad, míg a szabályozás előtti sebességek tekintetében vegyes, főleg a kanyarulatokban mutatkozik meg nagyobb változása, mely azt vonja maga után, hogy helyenként erodálódik, máshol épül a meder, ami tipikus meanderezési viselkedésre utal.

Ezzel a modellváltozattal azt is vizsgáltam, hogy a kapott mezőszerű eredményeket hogyan tudom szakaszra jellemző paraméterekké átszámolni. Ehhez egy olyan átlagolási eljárást dolgoztam ki, ami figyelembe veszi, hogy a kapott paraméterek (vízmélység, sebesség, csúsztató feszültség) ugyanúgy kielégítsék a folytonossági egyenletet és az impulzus egyenletet, amiként a 2D áramlásmező teszi. A kapott szakaszra jellemző paraméterek alapján kiszámoltam a van Rijn összefüggéssel a szabályozatlan mederkitöltő állapotra vonatkozó hordalékhozamot, ami $0,7$ kg/s volt. Ezt az értéket fenntartásokkal kell kezelni, mert egy alaposabb érzékenységvizsgálat szükséges lenne a kapott érték validálásához. Az érték az 1950-70-es években mért hozamok nagyságrendjébe esik, de egy kicsit alacsonyabb értéket vesz fel, mint azon időszak átlaga ($0,52$ kg/s). Ez azt sejteti, hogy a folyószabályozások miként borították fel a hordalékháztartást és így a morfológiai egyensúlyi állapotot, ami az 1950-70-es évekre még nem állhatott helyre (még nem alakulhatott ki az új egyensúlyi állapot). A jelen TDK dolgozatom eredményei alapján ezt a kérdéskört szeretném alaposabban megvizsgálni.

Utolsó vizsgálatomban alkalmazásokat mutattam be, ahol először egy halfaj élőhely megfelelőségi indexét mutattam be, ezáltal bemutatva, hogy a szabályozással jobb életter lett biztosítva a süllőnek. Másodszor a Phoridiumon végeztem el egy hasonló vizsgálatot, amely

vizsgálata fontos, hiszen az emberi szervezetre veszélyes lehet annak elszaporodása/jelenléte. A vizsgálat nem teljesértékű, ugyanis csak egy vízjárási állapotra végeztem el. A vizsgálattal azt szerettem volna szemléltetni, hogy a bemutatott 2D áramlásmodellezési eljárás a szabályozások előtti állapotnak nem pusztán áramlástani, vagy morfológiai szempontú értékelését segíti elő, de más tudományterületek vizsgálataihoz is hozzá tud járulni. A vizsgálat eredményeként látható, hogy a szabályozás előtt jobb feltételei voltak az akkori meder adottságokkal, míg a szabályozások után csak egy nagyon specifikus esetben képes az élettér megteremtésére. Utolsó vizsgálatként egy Hauer-féle élőhely jellemzést végeztem el, ahol a szakaszra számított MH értékek sűrűségfüggvényét jelenítettem meg.

A modellvizsgálatok alapján azt látom, hogy ez a szintetikus egyensúlyi medergeometria becslésén alapuló 2D áramlásmodellezési eljárás alkalmas a vizsgált beavatkozások hatását vizsgálni, ha a vizsgált szakaszra a paraméterezés és a kalibrációs megbízható adatok alapján megtörténik. Ez az eljárás későbbi modelleknek alapot adhat, melyek a későbbi beavatkozásoknál segítséget nyújthatnak az előnyösebb tervezésben, mert segítségével kimutatható, hogy milyen állapotot idéz elő egy adott beavatkozás. A modell nemcsak beavatkozások tervezéséhez tud segítséget adni, hanem úgy gondolom, hogy más szakágaknak is peremfeltételeket és becsléseket tud szolgáltatni morfodinamikai paramétereket illetően.

7. Ábrajegyzék

1. ábra: Kárpát-medence vízborította és árvízjárta területei az ármentesítő és lecsapoló munkálatok megkezdése előtt (A Magyar királyi Földművelésügyi Minisztérium Vízirajzi Intézete, 1938).....	7
2. ábra: Közép-Tisza szabályozás előtti térképe (https://dka.oszk.hu/083100/083192)	8
3. ábra: A vizsgált Kisköre és Tiszabó közötti Tisza szakasz légifelvétele (Google Earth, 2024)	9
4. ábra: Tiszabói szelvény változása év alatt (Vízirajzi Évkönyvek, 1960-1976).....	11
5. ábra: A Tiszaroffnál található kanyarulat az I. katonai felmérés térképén a szabályozási munkálatok előtt és a jelenlegi főmeder világoskék sávként ábrázolva (I. katonai felmérések, 1782-1785).	12
6. ábra: A vizsgált Tisza-szakasz 1890-es (kék vonal), 1932-es (narancs vonal) és 1967-es (lila vonal) hossz-szelvénye.....	13
7. ábra: Görgetett hordalékhozam idősor Tivadarnál, Tiszabónél és Szegednél.....	14
8. ábra: Tiszabói szemösszetételi görbék (VITUKI, 1954).....	15
9. ábra: A valós- és a szintetikus mederrel számított vízmélységek hossz-szelvénye	27
10. ábra: Sebesség gyakoriságfüggvények összehasonlítása	28
11. ábra: Fenéksúsztató feszültségek sűrűség függvényei	29
12. ábra: A szintetikus mederben kialakuló vízmélységek hossz-szelvénye különböző medersímasági értékek esetén	30
13. ábra: Korabeli meder az I. katonai felmérés térképén (I. katonai felmérések, 1782-1785).....	32
14. ábra: Korabeli meder pyRiverbed megjelenítése	33
15. ábra: Vizsgált szakasz a szabályozás előtt és napjainkban.....	34
16. ábra: Szabályozott meder (piros sáv) bemutatása az I. katonai felmérés térképén	35
17. ábra: Sebesség eloszlás bemutatása a jelenlegi és a korabeli Tisza medrében	36
18. ábra: Áramlási sebesség a korabeli és a mai mederben.....	37
19. ábra: Élőhely-megfelelőségi index számítása a jelen és a korabeli állapot tükrében.....	40
20. ábra: A Phormidium élőhely-megfelelőségi index gyakoriságfüggvénye a jelen és a korabeli állapot tükrében	41
21. ábra: MH értékek gyakoriságfüggvénye a Tiszán.....	42

8. Táblázatjegyzék

1. táblázat: Irodalomkutatást összefoglaló táblázat.....	16
2. táblázat: Jelenlegi állapot 0D modell eredményei.....	20
3. táblázat: 0D modell számítás a korabeli szakaszra	38

9. Hivatkozások

- I. katonai felmérések, 1782-1785
- A Magyar királyi Földművelésügyi Minisztérium Vízhajzási Intézete: Kárpát-medence vízborította és árvízjárta területei az ármentesítő és lecsapoló munkálatok megkezdése előtt , 1938
- A m. kir. Földművelésügyi minisztérium Vízhajzási Intézete: A Tisza helyszínrajza, hosszszelvénye és keresztaszelvényei Tiszabecstől Szegedig, Budapest, 1934
- A m. kir. Országos Vízépítési Igazgatóság: A Tisza hajdan és most, Budapest, 1906
- Beck, S.M., 1988. Computer-simulated Deformation of Meandering River Patterns. University of Minnesota, Twin Cities, Minnesota, PhD Dissertayion
- BME-VIT, T. Krámer, G.T. Török: AZ ÁRVÍZI TÁROZÓK ÖSSZEHANGOLT ELŐREJELZÉSI HATÁSELEMZÉSI HIDROLÓGIAI-HIDRAULIKAI, 2018
- E. Nyiri: Folyók dinamikus egyensúlyi állapotát becselő eljárás kidolgozása és alkalmazása a magyarországi Felső-Dunán, BME-ÉMK TDK, Budapest, 2020.
- E. Nyiri: A Felső-Duna régmúlt szabályozásainak hatásvizsgálata 1D morfodinamikai modellel, 2022
- E. Nyiri, G.T. Török: Folyók dinamikus egyensúlyi állapotát becselő eljárás kidolgozása és alkalmazása a magyarországi Felső-Dunára, Hidrológiai Közöny 102 évf. 3.szám, 2022
- Google Earth, 2024
- Hauer, C., Mandlbürger, G., Habersack, H. (2008) Hydraulically related hydromorphological units: description based on a new conceptual mesohabitat evaluation model (MEM) using lidar data as geometric input. *River Research and Applications*, 2008, 25:(1), pp. 29-47.
- <https://dka.oszk.hu/083100/083192>
- I. Botár és Zs. Károlyi: A Tisza szabályozása I. rész (1846-1879) (Vízügyi Történeti Füzetek 3. Budapest, 1971)
- J. Bogárdi: Vízfolyások hordalékszállítás. Budapest, Hungary: Akadémiai Kiadó, 1955
- Lai, Y.G., Weber, L.J., Patel, V.C. (2003): Non-hydrostatic three-dimensional method for hydraulic flow simulation - Part I: formulation and verification. *Journal of Hydraulic Engineering*, 129(3): 196-205. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2003\)129:3\(196\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2003)129:3(196))

- Lai, Y.G. (2010): Two-dimensional depth-averaged flow modeling with an unstructured hybrid mesh. *Journal of Hydraulic Engineering*. 136(1):12-23. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0000134](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000134)
- Országos Vízügyi Főigazgatóság, Vízrajzi Évkönyvek. Vízügyi honlap: <https://www.vizugy.hu/print.php?webdokumentumid=1524>, 2022
- T. Kiss, M. Tóth, G.T. Török és Gy. Sipos: Reconstruction of a Long-Term, Reach-Scale Sediment Budget Using Lateral Channel Movement Data as a Proxy: A Case Study on the Lowland Section of the Tisza River, Hungary, 2024
- VITUKI Felszíni Vizek Főosztálya: TISZA I., Déli országhatár-Tiszabő közötti szakasz, Budapest, 1969
- VITUKI Tanulmánytár XXVI. 5/b (77-78), 1954
- Van Rijn, L. (1984). "Sediment Transport, Part III: Bed forms and Alluvial Roughness." *J. Hydraul. Eng.*, 110(12), 1733–1754
- Xu, D., Bai, Y.C., Ma, J.M., Tan, Y., 2011. Numerical investigation of long-term planform dynamics and stability of river meandering on fluvial floodplains. *Geomorphology* 132, 195–207. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2011.05.009>.
- Z. Li and M. García: pyRiverBed: A Python framework to generate synthetic riverbed topography for constant-width meandering rivers, 2021

10.Köszönetnyilvánítás

Köszönöm Dr. Török Gergely Tihamér és Dr. Homoródi Krisztián konzulenseimnek, hogy végig támogattak és segítették a dolgozatom haladását, valamint minden esetlegesen felmerülő kérdésekre segítőkészen rendelkezésemre álltak.

Dolgozatom a Kulturális és Innovációs és Minisztérium EKÖP-24-2-BME-164 kódszámú Egyetemi Kutatói Ösztöndíj Programjának a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alapból finanszírozott szakmai támogatásával készült.