



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

ÉPÍTŐMÉRNÖKI KAR

VÍZÉPÍTÉSI ÉS VÍZGAZDÁLKODÁSI TANSZÉK

TUDOMÁNYOS DIÁKKÖRI KONFERENCIA 2023

VÍZMÉRNÖKI SEKCIÓ

# **1D NUMERIKUS MORFODINAMIKAI MODELL FEJLESZTÉSE KANYARULATFEJLŐDÉS HATÁSVIZSGÁLATÁHOZ**

**Készítette: Nagy László Benedek**

**Konzulensek: Dr. Török Gergely Tihamér**

**Dr. Farkas Dávid**

# Tartalom

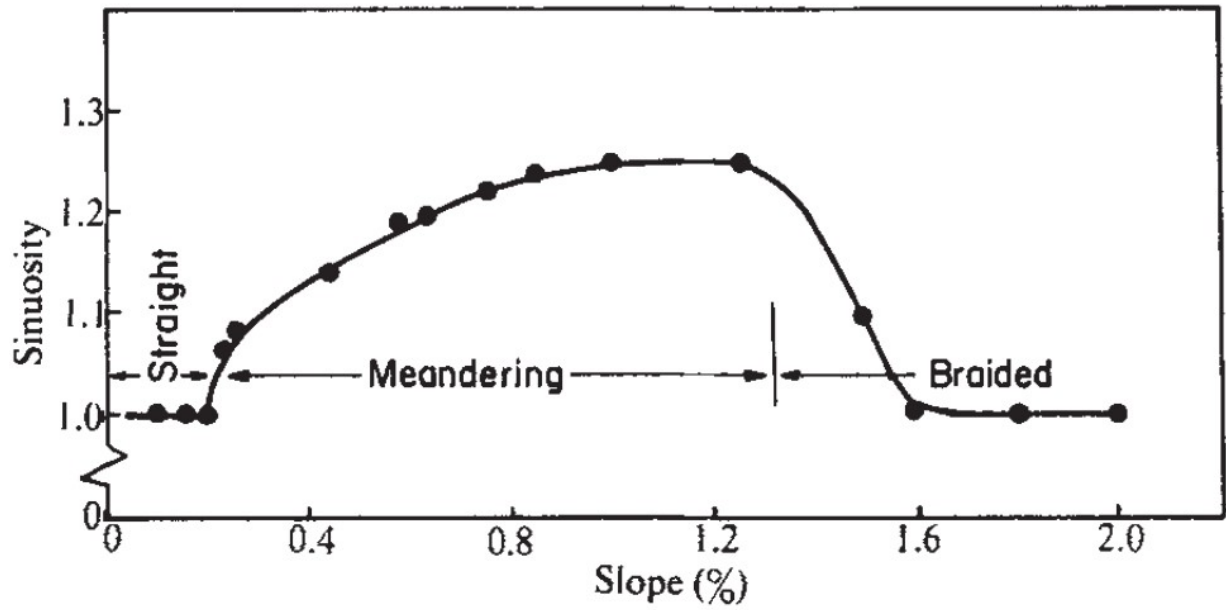
<b>1. Bevezetés</b> .....	3
<b>2. Célkitűzés</b> .....	7
<b>3. Módszertan</b> .....	9
3.1. Meander Statistics Toolbox program ismertetése .....	9
3.2. Alkalmazott statisztikai eljárások .....	9
3.3. 1D morfordinamikai modellezési módszertanok.....	9
<b>4. Eredmények</b> .....	12
4.1. Kanyarulatfejlődés vizsgálata .....	12
4.1.1. Térbeli vizsgálatok.....	13
4.1.2. Időbeli vizsgálatok .....	14
4.1.3. Ívcsoportok vizsgálata.....	23
4.2. Modellfejlesztés .....	28
4.2.1. Mederszélesség változása .....	28
4.2.2. Meanderezési fok időbeli változása .....	29
4.2.3. Térbeli lépték változása .....	30
4.3. Modellvizsgálatok.....	32
4.3.1. „A” modellváltozat .....	33
4.3.2. „B” modellváltozat.....	37
4.3.3. „C” modellváltozat.....	40
<b>5. Összefoglalás, kitekintés</b> .....	45
<b>Irodalomjegyzék</b> .....	48
<b>Köszönetnyilvánítás</b> .....	49

## 1. Bevezetés

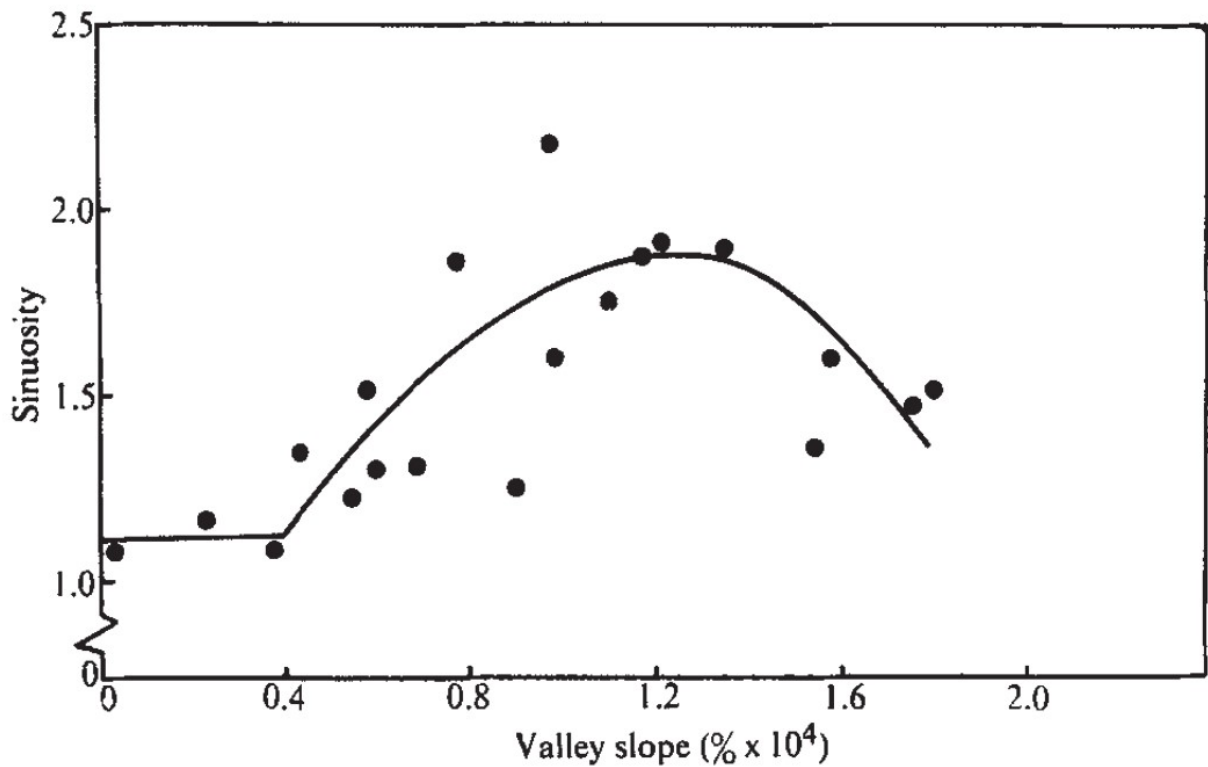
Folyók morfordinamikai vizsgálata során azt figyelhetjük meg, hogy az áramlás és a hordalékmozgás egy dinamikusan változó medergeometriát alkot. Állandó kutatási témát ad a különböző morfordinamikai paraméterek és jelenségek (folyadék áramlása: vízhozam, vízsebesség, vízmélység, mederesés, csúsztatófeszültség, mederellenállás; hordalékmozgás: hordalék és mederanyag jellemző szemcsemérete, hordalékhozam, stb.) közötti esetleges kapcsolat feltárása és leírása. Ilyen módon a törvényszerűségekre vagyunk kíváncsiak. A folyómedrek vonalvezetése kapcsán megfigyelhető, hogy a folyó jellemzően kanyarulatok egymásutánjából épül fel. Megfigyelhető, hogy az ívek görbülete és ívhossza nem véletlenszerűen alakulnak, hanem folyószakaszokra jellemző ívek követik egymást. Feltételezhető tehát, hogy a kanyarulatfejlődés folyamatát és a kialakult ívek jellemzőit is törvényszerűségek határozzák meg, nyilván valóan a természetben általánosan megfigyelhető véletlenszerűségekkel kiegészülve.

A kanyarulatok egy, a morfordinamikai vizsgálatokban gyakran alkalmazott paramétere a meanderezési fok (sinuosity), ami egy adott ív kezdő és végpontja, vagyis (az egymást követő íveket összekötő) inflexiós pontok közötti ívhossz és az inflexiós pontoktávolságának aránya. A definícióból következik, hogy a meanderezési fok minimális értéke 1, maximális értékére elvileg nincs felső korlát, de a természetben a 3 körüli érték már extrém nagy értéknek tekinthető. Mivel számos vizsgálat kimutatta már, hogy adott folyószakaszra jellemzően bizonyos szűk tartományon belül változik a meanderezési fok jellemzője, ezért feltételezhető, hogy azokat különböző morfordinamikai folyamat és paraméter határozza meg (pl. Guo et al., 2019, Donovan et al., 2021).

A publikált eredmények alapján bizonyíthatóan nagy hatása van a meanderezési fokra a mederesésnek, amit először Schumm és Khan mutattak ki laborkísérleteik alapján, valamint további szerzőtársaikkal a Mississippi vizsgálata alapján (Schumm & Khan, 1972; Schumm et al., 1972).



1. ábra: Meanderezési fok és völgyesítés közötti kapcsolat vizsgálata laboratóriumi kísérletek alapján (Schumm & Khan, 1972)



2. ábra: Meanderezési fok és völgyesítés közötti kapcsolat vizsgálata a Mississippi példáján (Schumm et al., 1972)

Donovan és társai a Minnesota folyó vizsgálata kapcsán arra mutattak rá, hogy a hordalékhozamnak is számottevő szerepe van a kialakuló jellemző kanyarulatok meanderezési

fokára. Vizsgálataik során azt találták, hogy közel azonos morfordinamikai paraméterek mellett (mederanyag, vízhozam, stb.) a folyószakasz azon részén (0 - 100 fkm), ahol nagyobb a hordalékhozam, ott a meanderezési fok is jelentősen nagyobb értéket vesz fel, mint a felsőbb, alacsonyabb hordalékhozamú szakasz (100 – 180 fkm) Donovan et al., 2021.

Berky 2023 BSc diplomadolgozata során kb. 100 (változatos méretű és morfordinamikai jellemzőkkel bíró) folyót vizsgált és kapcsolatot talált a mederanyag és a várható meanderezési fok között: az eredmények azt mutatták, hogy a 0,4 – 0,6 mm átmérőjű szemcseméretből felépülő mederanyag esetén várható a legnagyobb meanderezési fok. Az ennél finomabb és durvább mederanyag esetén alacsonyabb meanderezési fok kialakulása várható.

A teljesség igénye nélkül említett fenti példák alapján látható, hogy a folyószakaszok meanderezési foka és a különböző morfordinamikai paraméterek között létezik kapcsolat, annak precíz leírása viszont még nem valósult meg.

A folyószakaszokra jellemző morfordinamikai kapcsolata alapján kialakuló mederváltozások nagy tér-időléptékű becslésére egy elérhető vizsgálati eszköz az 1D morfordinamikai modellezés. A téma egy nemzetközi szinten is elismert kutatója Gary Parker, akinek online elérhető jegyzete (Parker, 2004) számos különböző vizsgálatra kidolgozott modellezési eljárása elérhető. A módszertan nagy előnye, hogy egy-egy újonnan kidolgozott morfordinamikai törvényszerűség könnyen implementálható a meglévő és elérhető modellbe és így saját fejlesztésű modellek dolgozhatók ki. Az online jegyzetben bemutatott eljárások képesek a meanderezés hatásának figyelembevételét, de csak olyan módon, hogy az térben és időben is állandó értéket vesz fel a teljes modellezett folyószakaszon.

Jelen kutatómunkámban azt tűztem ki célul, hogy a folyók meanderezési fokának időbeli változásának hatásvizsgálatára alkalmas módszertant dolgozok ki, 1D morfordinamikai környezetben. Egy ilyen eszközzel lehetőség nyílik a térben és időben is változatos meanderezési fokkal jellemezhető folyószakaszok morfordinamikai változásának becslésére. Donovan et al. publikációjában a Minnesota folyó példáján keresztül került bemutatásra, hogy mikro környezetben vizsgálódva a kanyarulatok folyamatosan fejlődése figyelhető meg úgy, hogy makro környezetben (folyószakasz léptékben) érdemi változás (átlagos meanderezési fok) nem feltétlenül tapasztalunk változást. Kérdéses viszont, hogy a folyamatosan fejlődő kanyarulatok hatással vannak-e a fel- és alvízre, és ha igen, akkora mekkora kiterjedésben érzékelhető ez a hatás? Egy-egy markáns, természetes és mesterséges kanyarulatváltozásként tekinthetünk a kanyarulatok lefűződésére, vagy átvágására. Kérdéses, hogy ilyen esetben, a

kanyarulat átvágódása hatására létrejövő hirtelen esésnövekedésnek milyen morfordinamikai hatása van, felvízi és alvízi irányban? Ilyen, és ehhez hasonló kérdésekre választ adó 1D morfordinamikai modellkonceptióra nem találtam példát sem a korábban említett Parker-féle online jegyzetben, sem pedig egyéb más publikációban. Emiatt fogalmazódott meg bennem a vázolt jelenségek vizsgálatára alkalmas 1D morfordinamikai modellfejlesztési feladat. A feladat elvégzéséhez kanyarulatfejlődési folyamatok elemzésére van szükség, amit a Minnesota folyóra beszerzett részletes adatai alapján terveztem elvégezni. A vizsgálatoktól azt reméltem, hogy segítségével olyan kanyarulatfejlődési törvényszerűségeket tudok kimutatni, amik számszerűsítésével azok morfordinamikai hatásai egy saját fejlesztésű 1D modellbe implementálhatók válnak.

## **2. Célkitűzés**

Kutatásom célkitűzéseit három fő csoportra osztottam fel, melyek a valós adatsorok feldolgozásához, 1D numerikus morfordinamikai modell fejlesztéséhez, valamint a fejlesztett modell alkalmazási lehetőségeinek bemutatását célzó modellváltozatok bemutatásához köthetők.

### **Valós adatsorok idősoranalízise**

A kutatási témám szempontjából fontos annak vizsgálata, hogy valós adatsorokon is vizsgáljam a kanyarulatfejlődések és a meanderezési fok közötti összefüggéseket. Ennek érdekében a Minnesota folyóra készült x évet felölelő medermorfológiai (geometriai, vonalvezetési) adatok elemzésére van szükség. Az elemzés célja, hogy vizsgáljam van-e összefüggés az egymás mellett lévő kanyarulatok meanderezési foka között, valamint megfigyelhető-e periodikus változás az idő függvényében. A vizsgálatok elvégzéséhez egy-egy rövidebb kanyarulatcsoportra, illetve a teljes folyószakaszra is idősoranalízist készítek.

### **1D numerikus morfordinamikai modell fejlesztése**

A szakirodalomban elérhető 1D numerikus morfordinamikai modellezési eljárásokban (Parker, 2004) a meanderezési fok a futtatások alatt térben és időben is konstans értékkel szerepelt. Kutatómunkámban célként tűztem ki, hogy a numerikus modellt tovább fejlesszem oly módon, hogy képes legyen folyószakaszok meanderezési fokának (térbeli és időbeli) változásából létrejövő morfordinamikai folyamatok modellezésére. Ezzel vizsgálhatóvá válna, hogy miként reagál egy folyó al- és felvízi medre egy kanyarulat mesterséges átvágására, vagy természetes módon történő kanyarulatfejlődésére, illetve lefűződésére.

A meanderezési fok mellett a Parker féle online jegyzetben elérhető 1D modell a mederszélesség változását sem vette figyelembe, ezért ennek beépítését a modellbe is szükségesnek tartom. Mederváltozást számításba vevő módszertanra példaként Török és Parker tettek már kísérletet (Török & Parker, 2021).

### **Kanyarulatfejlődés és meanderezési fok vizsgálata a továbbfejlesztett modellváltozatokkal**

A továbbfejlesztett 1D numerikus modellel történő futtatások célja, hogy a kanyarulatátvágódás hatását több modellváltozatban is vizsgálni tudjam. Három modellváltozat elkészítését tartom szükségesnek, ahol:

- egy egyensúlyban lévő meder kanyarulatai közül csak az egyik vágódik át. Ebben az esetben az átvágódás irányítottan történik, hatása pedig térben és időben is megfigyelhető. Az egyes paraméterek megváltoztatásával (például időbeli lépték) a modell érzékenységvizsgálatát is kívánom elvégezni.
- egy egyensúlyban lévő meder kanyarulatai közül irányított körülmények között több is átvágódik. Az átvágódások hatása itt nem külön-külön, hanem egymásra halmozódva jelentkezik, ami komplexebb morfordinamikai változásokat eredményezhetnek.
- a kanyarulat átvágódása nem irányítottan, hanem egy függvény alapján dinamikusan történhet meg. Ennek a változatnak a célja, hogy minél természetesebb módon történjen a kanyarulatfejlődés modellezése, emiatt a vonalvezetéshez is egy valós folyó adatait használom fel.



### 3. Módszertan

#### 3.1. Meander Statistics Toolbox program ismertetése

A dolgozatban a Meander Statistics Toolbox (továbbiakban: MStaT) nevezetű programot arra használtam, hogy egy folyómeder helyszínrajzi koordinátaiból kiszámítsam a szükséges paramétereit az íveknek. A program beazonosítja a koordináták alapján az inflexiós pontokat, amelyekkel a kanyarokat határolja. Ezt követően az ívek hosszának és az inflexiós pontok távolságának az arányaként egyszerűen kiszámítható a meanderezési foka az egyes íveknek.

#### 3.2. Alkalmazott statisztikai eljárások

Egy szakasz meanderezési fokainak egyszerű átlagának számítása:

$$\bar{\Omega} = \frac{1}{n} \sum \Omega = \frac{1}{n} \sum \frac{L_i}{L_e}$$

[1]

Egy szakasz meanderezési fokainak súlyozott átlagának számítása:

$$\bar{\Omega} = \frac{\sum(\Omega \cdot L_e)}{\sum L_e} = \frac{\sum\left(\frac{L_i}{L_e} \cdot L_e\right)}{\sum L_e} = \frac{\sum L_i}{\sum L_e}$$

[2]

A dolgozatban alkalmaztam a BME Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszék, (2012): Hidrológia II jegyzetében szereplő módon a:

- Idősoranalízist
- Empirikus eloszlásfüggvény előállítását
- Lineáris kapcsolat számítását

#### 3.3. 1D morfordinamikai modellezési módszertanok

A kanyarulatok fejlődésének és lefűződésének vizsgálatára egy 1D-s modellt építettem Matlab programban. A modell alapját Gary Parker online jegyzete alapján készítettem el (Parker, 2004). Az eljárás permanens áramlást feltételezve, a mederkitöltő állapot alapján becsüli a hosszú idejű mederváltozásokat (az eljárásról részletesen olvasható az online jegyzetben). Az alapegyenletek a következők:

I. Folyadékra vonatkozó folytonossági egyenlet:

$$Q_w = U \cdot B \cdot H$$

[3]

ahol  $Q_w$  a folyó vízhozama [m<sup>3</sup>/s],  $U$  a szelvény-középsébség [m/s],  $B$  a szelvény szélessége [m] és  $H$  a vízmélység [m].

II. Impulzus egyenlet:

$$\tau_b = C_f \cdot U^2 \cdot \rho$$

[4]

ahol  $\tau_b$  a fenék-csúsztatófeszültség [N/m<sup>2</sup>],  $C_f$  a dimenziómentes mederellenállási tényező,  $U$  a középvízsebesség [m/s] és  $\rho$  a víz sűrűsége (1000 kg/m<sup>3</sup>).

III. Hordalékra vonatkozó folytonossági egyenlet:

$$Q_b = B \cdot q_b \cdot (R + 1) \cdot t$$

[5]

ahol  $Q_b$  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  $\rho_s$  a hordalék sűrűsége, 2650 kg/m<sup>3</sup>) és  $t$  az eltelt idő [s].

A hidraulikai számításokra a fokozatosan változó vízmozgás egyenletét alkalmaztam, permanens vízmozgást feltételezve, ami az alábbi formát ölti:

$$\frac{dH}{dx} = \frac{S - S_E}{1 - Fr^2}$$

[6]

ahol  $x$  a folyó menti távolság [m],  $S$  a mederszintesés [-],  $S_E$  az energiavonal esése [-] és  $Fr$  a Froude-szám.

$$Fr^2 = \frac{Q_w^2}{g \cdot H^3 \cdot B^2}$$

[7]

$$S_E = C_f \cdot Fr^2$$

[8]

A sematizált mederben a diszkrét  $dx$  esetén az ún. predictor-corrector eljárást alkalmaztam (Gary Parker, 2004), ami a következőképpen néz ki:

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

[9]

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

[10]

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

[11]

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

[12]

A hidraulikai számításokhoz a kezdeti feltételek a folyó hossz-szelvénye ( $\eta_b$ ) (amiből az esés értékek számíthatók), mederkitöltő vízhozam ( $Q_w$ , mederszélesség), mederérdesség ( $C_f$ ) és a kifolyási szelvényben a vízszint ( $\eta_{ws,out}$ ).

A hidraulikai modell mederváltozás modellel egészül ki. Ez lényegében az Exner-egyenletet jelenti:

$$\eta_i|_{t+\Delta t} = \eta_i|_t - \frac{1}{1-\lambda_p} \frac{\Delta q_{it}}{\Delta x} I_f \Delta t, \quad i = 1 \dots n$$

[13]

ahol  $\eta_i|_t$  az i-edik szelvény mederfenékszintje a t időpontban [m],  $\lambda_p$  a mederben ülepedett hordalék porozitás [-],  $\Delta q$  a fajlagos hordalékhozam [ $m^2/s$ ],  $I_f$  a mederkitöltő vízhozamhoz tartozó időszakossági tényező [-] és  $\Delta t$  az eltelt idő [s].

Az egyenletben szereplő hordalékhozam számítására számos összefüggés található a szakirodalomban. Én ezek közül én az Engelund-Hansen összefüggést alkalmaztam:

$$q^* = \frac{0.05}{C_f} \cdot \tau^{*\frac{5}{2}}$$

[14]

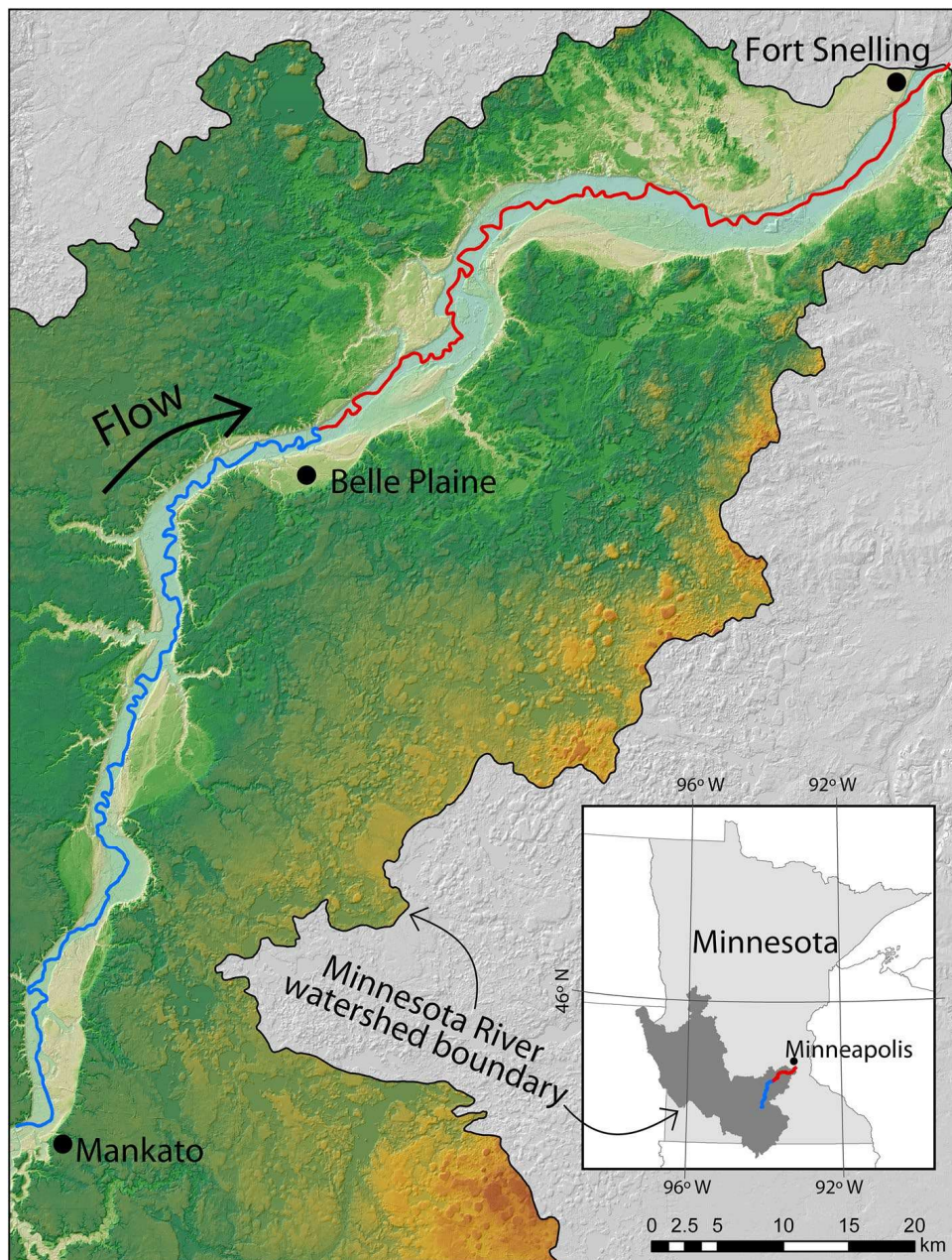
ahol  $q^*$  a dimenziómentes hordalékhozam és  $\tau^*$  a Shields szám.

A hordaléktranszport modellek kezdeti feltétele a mederanyag ismerete (D), valamint a befolyási szelvényben definiált befolyó hordalékhozam ( $Q_b$ ).

## 4. Eredmények

### 4.1. Kanyarulatfejlődés vizsgálata

A meanderezés változásának vizsgálatát a Donovan et al. által készített adatsor használatával készítettem a Minnesota River egy szakaszára. Azért választottam ezt a folyót, mert az adatokat közvetlen az előállítótól tudtam megszerezni.

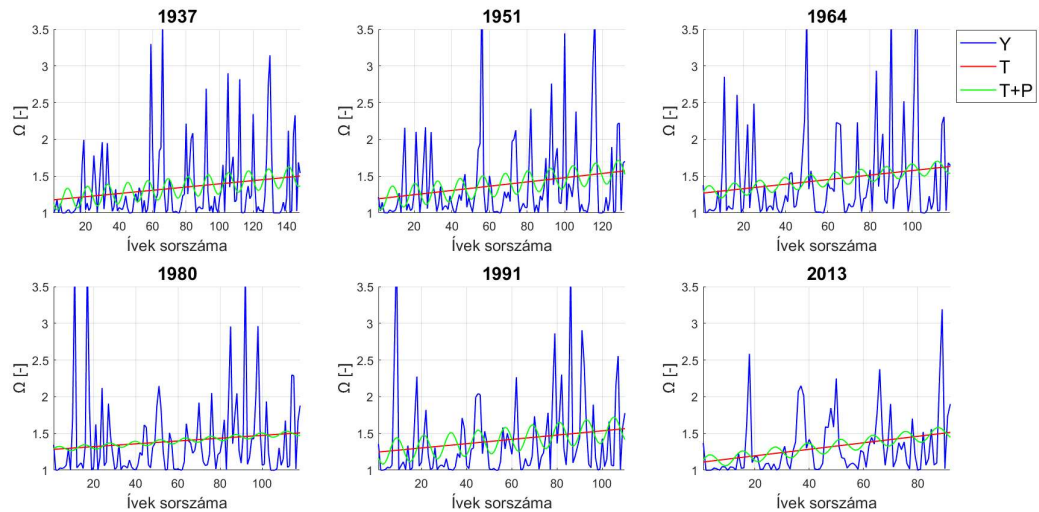


3. ábra: Minnesota folyó vizsgálat szakasza

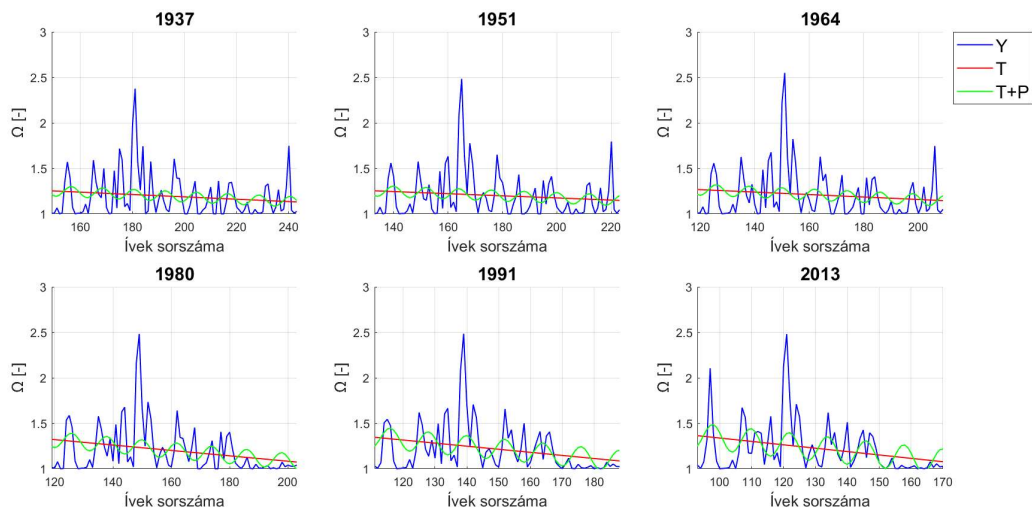
A folyó vizsgált szakasza 180 km hosszú a folyó Mankato közelében ered és Fort Snelling környékén, a Minnesota River torkolatának közelében végződik. Egy 76 évet átölelő intervallumban 6 adathalmaz készült (1937, 1951, 1964, 1980, 1991, 2013) ezen a szakaszon.

Fontos megkülönböztetni a 180 km-es szakasz első 100 km-ét, és az azt követő részt, ugyanis a folyó morfológiailag jelentősen eltér e két szakaszon. Megfigyelték egy hirtelen szemcseméret és esés csökkenést, változásokat az ívek geometriájában.

#### 4.1.1. Térbeli vizsgálatok



4. ábra: Meanderezési fokok értéke (Y), annak trendje (T), és a trend- és periodikus komponensek összege (T+P), az első szakaszon (0 – 100 km)



5. ábra: Meanderezési fokok értéke (Y), annak trendje (T), és a trend- és periodikus komponensek összege (T+P), a második szakaszon (100 – 180 km)

A 4. és 5. ábrán a függőleges tengelyen ábrázoltam az MStaT által kiszámított egymást követő ívek meanderezési fokát. Az  $\Omega$  értékekben nagy mértékű a szórás szemrevételezésből nem tudtam megállapítani semmilyen törvényszerűséget vagy szabályosságot. Az idősoranalízishez hasonló módszerrel megkíséreltem egy térbeli periodicitást kimutatni a meanderezési fokokban. Ennek eredménye az ábrákon zölddel jelölt trend és periodikus komponensek

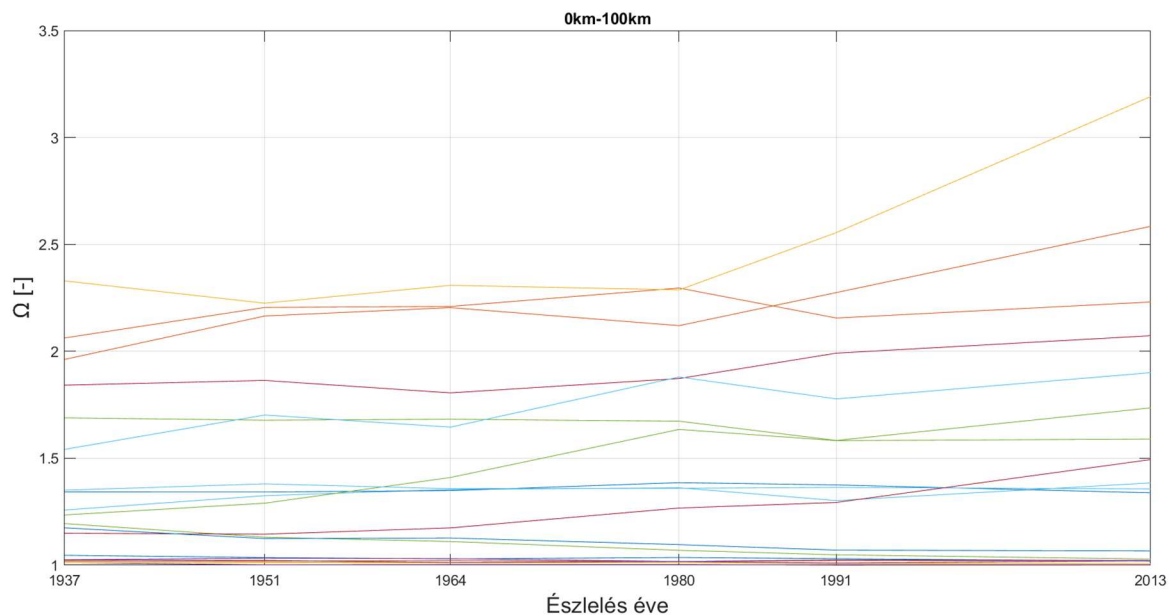
összege, amelynek már szemmel láthatóan nagyon bizonytalan az illeszkedése, a továbbiakban nem szolgál hasznos információval.

#### 4.1.2. Időbeli vizsgálatok

Az MStAT program által készített inflexiós pontok a különböző években készített felmérések között nem feltétlenül maradnak ugyanott, illetve lefűződések is történnek, ezek miatt például az 1937-ben 100-as azonosítószámú kanyar 2013-ban már lehet a 80-as számú kanyarnak felelhet meg. Ha egy adott ív időbeli változását szeretnénk vizsgálni, szükséges minden évre külön meghatározni a sorszámát. A biztonság kedvéért én ezt manuálisan végeztem el. A kanyarok kiválasztásánál néhány szempont, amit figyelembe vettem:

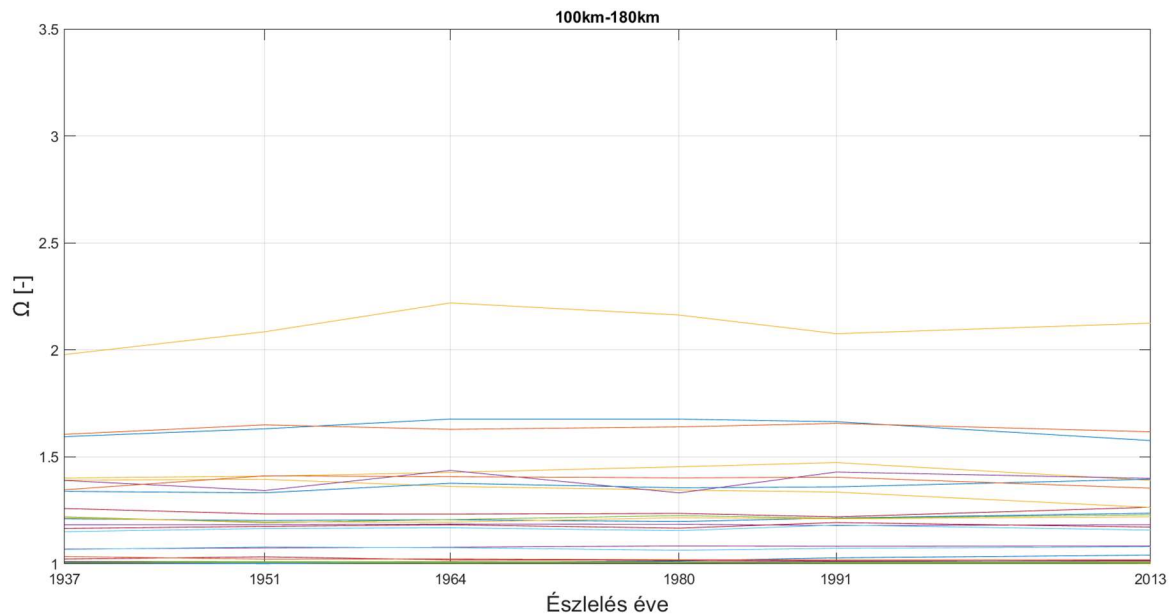
- ne történjen benne lefűződés, csak fokozatos változás
- Ne legyen szomszédos ívben sem lefűződés, ugyanis annak hatása kihat a környező kanyarokra
- Az ívet határoló, definiáló inflexiós pontok ne mozduljanak el nagy mértékben

Ezeket szem előtt tartva 46 db kanyart jelöltem ki, 20 db-ot a magasabb hordalékkoncentrációval bíró első 100 km hosszú szakaszból, 26 db-ot pedig a második 80 km hosszú szakaszból. Erre a 46 db ívre tudtam időbeli vizsgálatokat végezni.



6.ábra: Ívek meanderezési foka az évek során a 0km-100km közötti szakaszon



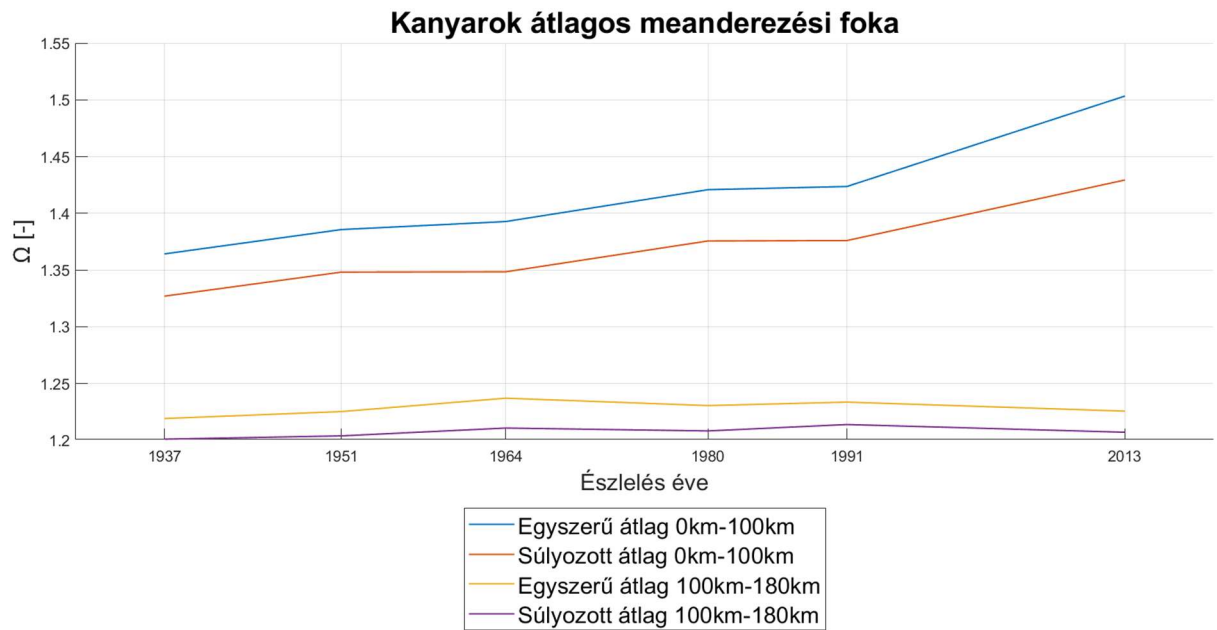


**7. ábra: Ívek meanderezési foka az évek során a 100 km-180 km közötti szakaszon**

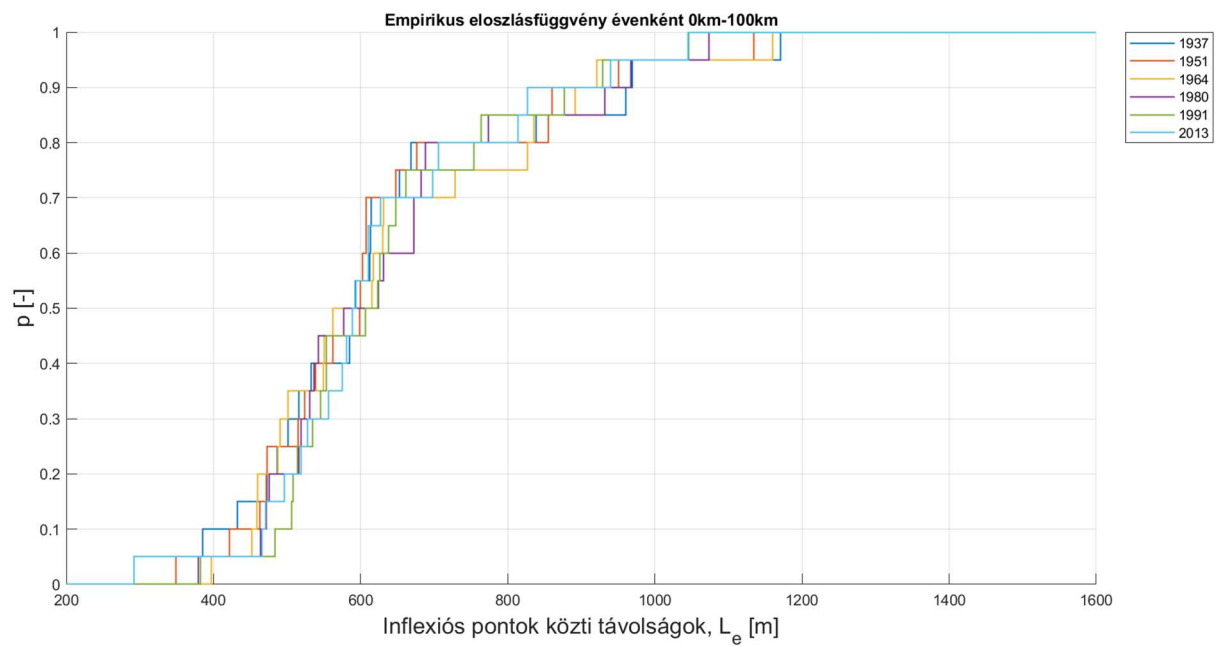
Első vizsgálatként az ívek meanderezési fokát ábrázoltam az évek függvényében. A 6. ábrán összességében egy növekedési trend látszódik a meanderezési fokban, de vannak negatív változások is, főként 1980 és 1991 között. A legnagyobb növekedés pedig pont az ezt követő időintervallumban, 1991 és 2013 között figyelhető meg.

A 7. ábrán túlnyomóan jelentősen kisebb értékek szerepelnek, illetve az értékek változása is kisebbnek tűnik. A 6. és 7. ábra közti különbség már alátámasztja azt a gondolatot, hogy az ívek meanderezési foka, illetve azok változásának nagysága és a hordalékhozam között van egy pozitív összefüggés.

### Átlagok

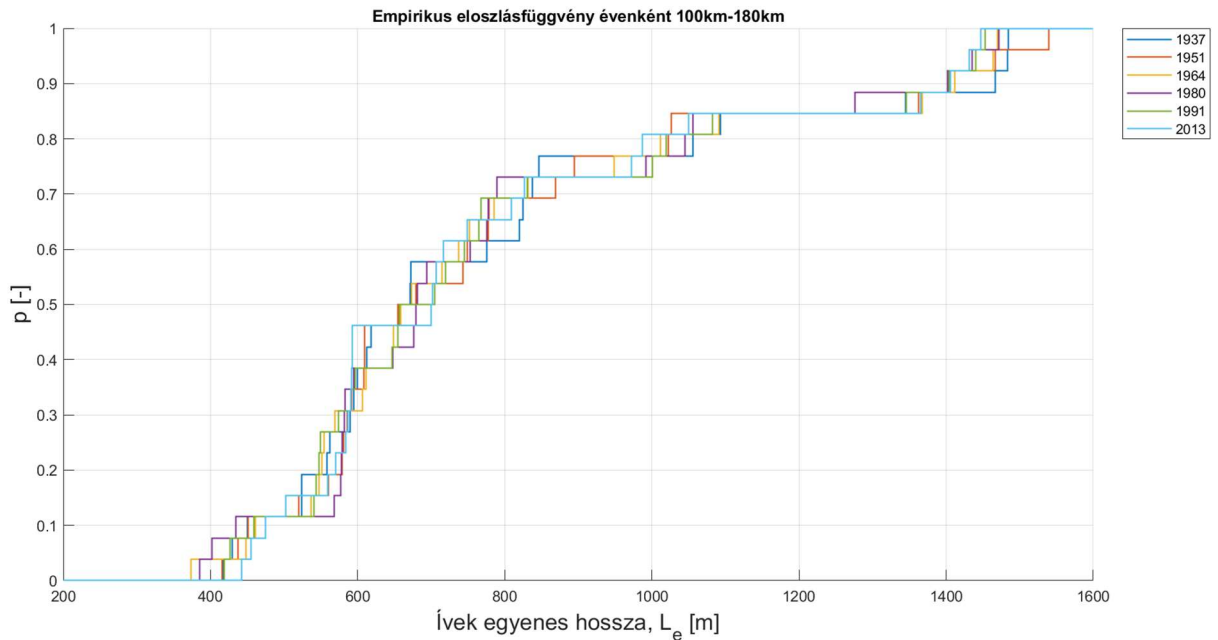


8. ábra: Ívek átlagos meanderezési foka évente, egyszerű és súlyozott átlagok



9. ábra: Inflexiós pontok távolságának eloszlása a 0 és 100 km közötti szakaszon





**10. ábra: Inflexiós pontok távolságának eloszlása 100 és 180 km közötti szakaszon**

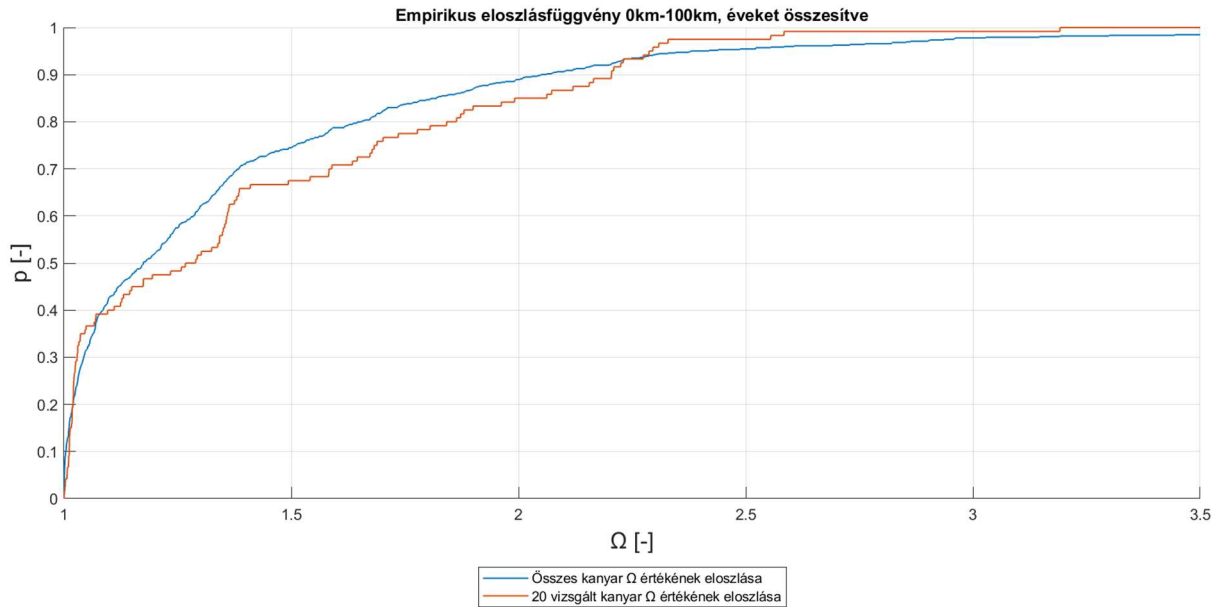
A 8. ábrán látható az ívek meanderezési fokának két-két átlaga évenként, az első 100 kilométeres, és az azt követő 80 kilométeres szakaszra. A 6. és 7. ábra összehasonlításából levontakat megerősítve, a 8. ábrán szintén látszódik, hogy 0-100 km-es szakasz jobban meanderezik mint a 100-180 km-es, illetve meanderezés időbeli változása is jelentősebb. Az egyszerű és a súlyozott átlagot a következőképpen számoltam:

A súlyozott átlag esetén a meanderezési fokokat az inflexiós pontok távolsággal súlyozzuk, ami ugyanazt az eredményt adja, mintha az egész szakaszra az ívek hosszának összegét elosztanánk az egyenesek hosszának összegével.

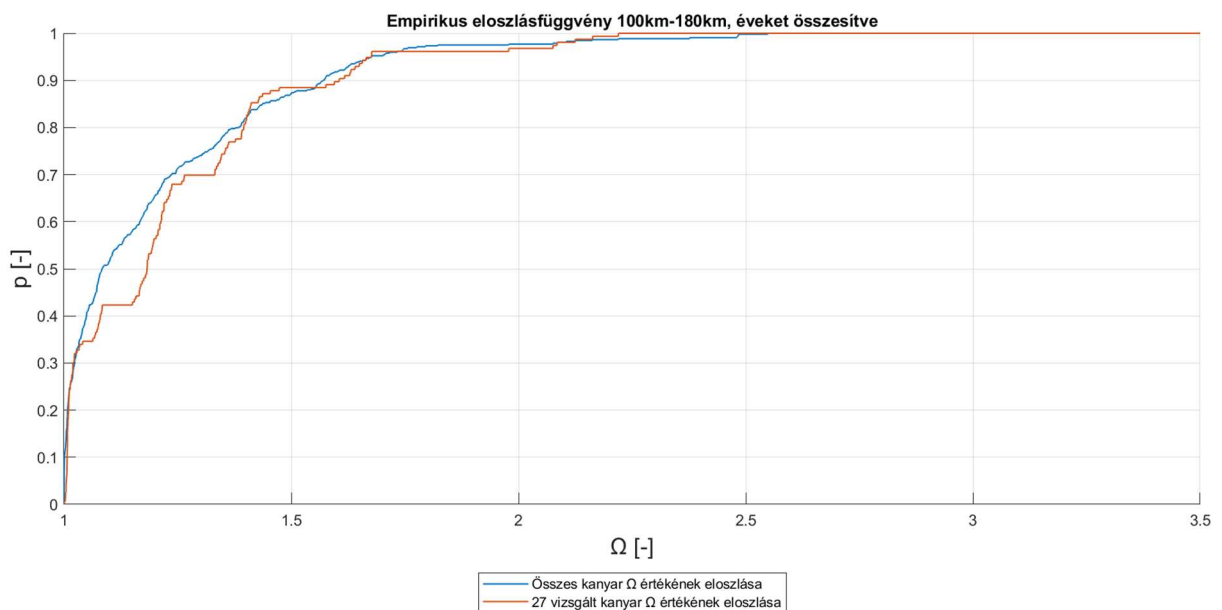
A kétféle átlag vizsgálata mögött az volt a gondolat, hogy a folyószakaszokon az inflexiós pontok közti távokban van akkora szórás, ahogy azt az 9. és 10. ábra mutatja, hogy lényeges legyen megkülönböztetni a „rövid” és „hosszú” íveket. Ha például a nagy meanderezési fokú ívek főként a kisebb, rövidebb ívekkel egyenlőek, a hosszabb ívek pedig egyenesebbek, az egyszerű átlag nagyobb értéket fog adni, mint a súlyozott. A 8. ábrán pont ezt a jelenséget látjuk, az egyszerű átlag mindkét szakaszon nagyobb értékeket produkál, tehát a rövidebb ívek kanyargósabbak, míg a hosszabb ívek egyenesebbek.

Ennek több oka is lehet. Elképzelhető, hogy a hosszú, nagy meanderezési fokú ívek többsége a 76 éves időszak alatt valamikor lefűződött, így ezek kizáródtak a vizsgált kanyarok halmazából. Másik lehetőség, hogy egyszerűen egy hosszabb, nagyobb görbületű szakasz

hajlamosabb több, kisebb ívekre bomlani, mert valószínűbb, hogy kialakul ellentétes görbületű szakasz. Egy ilyen ív szintén kizáródna a vizsgált ívek halmazából.

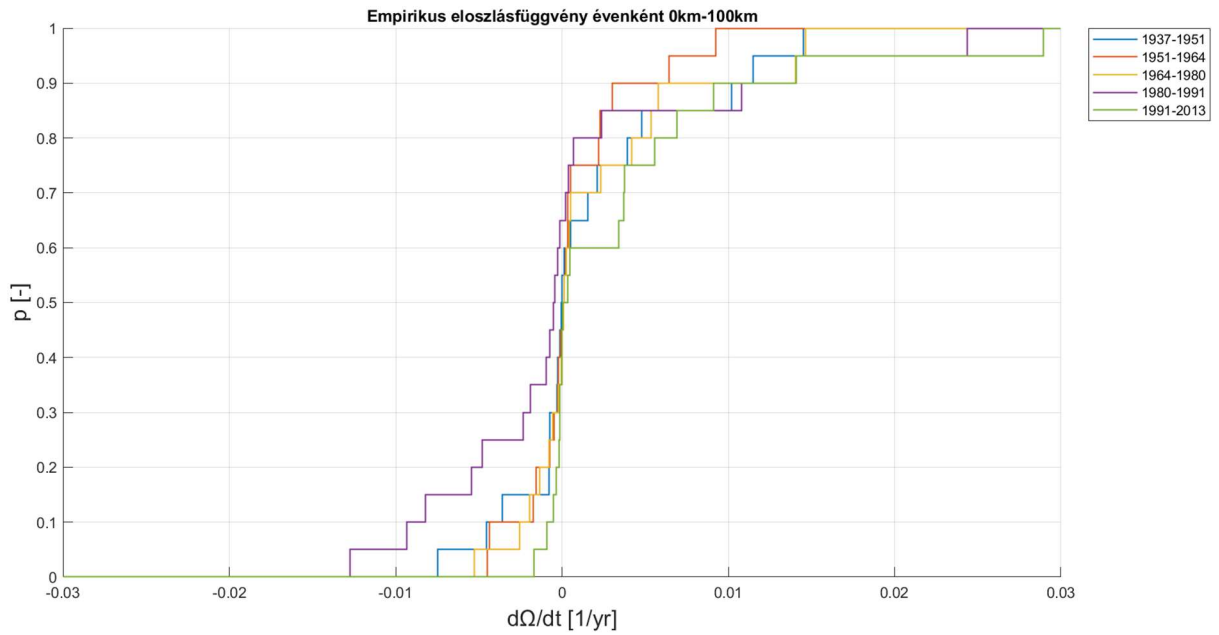


**11. ábra: Vizsgált és összes ívek meanderezési fokának eloszlásai a 0 és 100 km-es szakaszon**

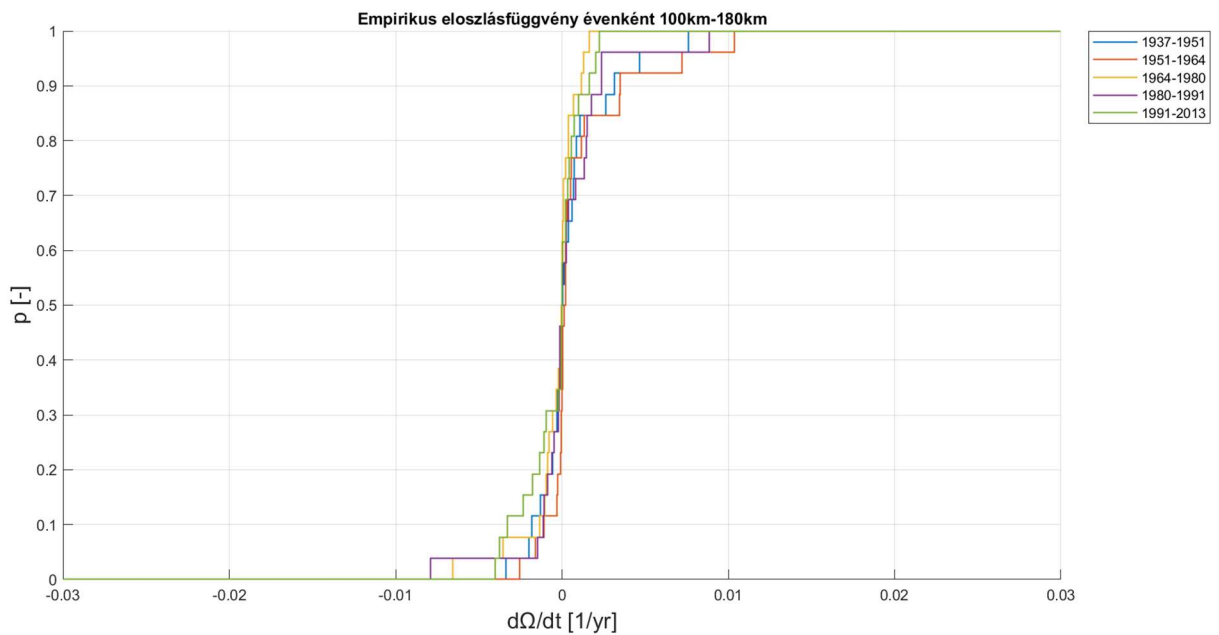


**12. ábra: Vizsgált és összes ívek meanderezési fokának eloszlásai a 100 és 180 km-es szakaszon**

A 13. és 14. ábrán megfigyelt évek közötti relatív egységesség miatt nem vizsgáltam külön-külön minden évre a kiválasztott és összes ívnek a meanderezési fokát, hanem összesítettem a 6 db adatsort, és azt jelenítettem meg a 11. és 12. ábrán. Az illeszkedés nem tökéletes, vannak eltérések, de a további vizsgálatokhoz megfelelően reprezentálja a 20 és 26 db kiválasztott ív az adott szakaszt.



13. ábra: Meanderezési fok időegység alatti változásának eloszlásfüggvénye évenként a 0 és 100 km közötti szakaszon



14. ábra: Meanderezési fok időegység alatti változásának eloszlásfüggvénye évközönként a 100 és 180 km közötti szakaszon

A 13. és 14. ábrán a meanderezési fok időbeli változásának  $\left(\frac{d\Omega}{dt}\right)$  empirikus eloszlásfüggvényét ábrázoltam az egyes időintervallumokban. Példaként az 1937 és 1951 közötti értékek számítása a következő:

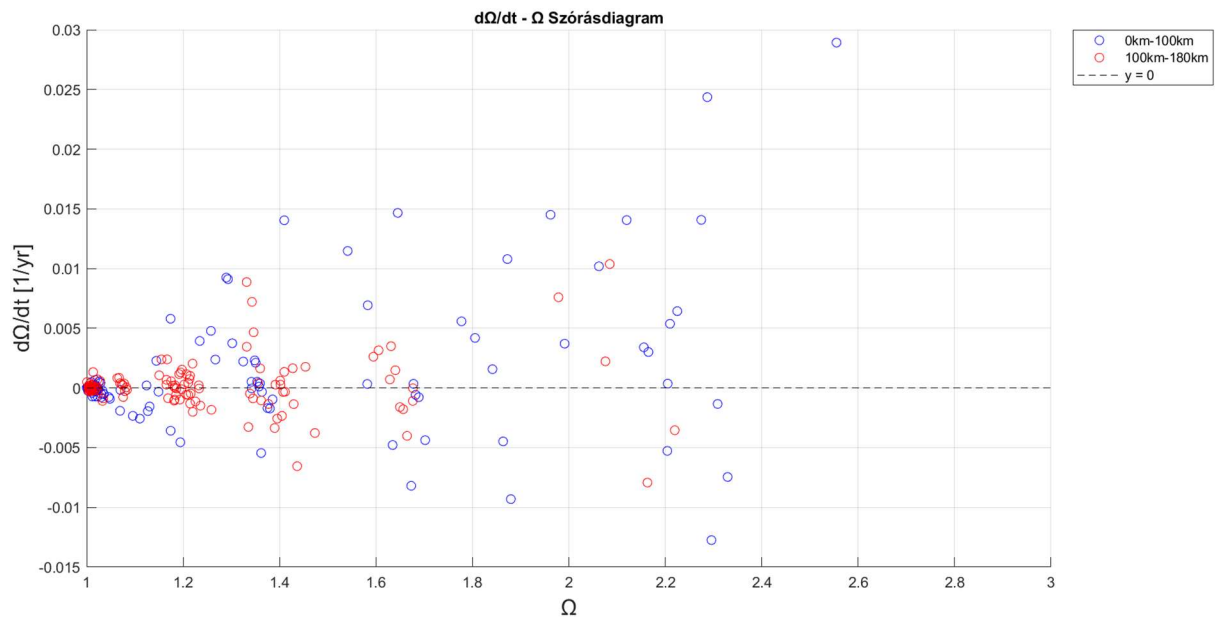
$$\frac{d\Omega}{dt}_{i,1937-1951} = \frac{\Omega_{i,1951} - \Omega_{i,1937}}{1951 - 1937}$$

[15]

Egy váratlan eredménye a 13. ábrának, hogy az  $p = 0,5$  valószínűséghez tartozó  $\frac{d\Omega}{dt}$  értékek nagyon közelítik a nullát, ráadásul az ettől eltérőnek mondható 1980-1991-es intervallumban negatív értéke van. Ez azt jelenti, hogy a negatív meanderezési fok változások száma körülbelül megegyezett a pozitívokkal, vagy éppen meghaladta őket. Ez azért meglepő, mert a 6. ábrából már megállapítottam, hogy az évek során pozitív  $\Omega$ -beli változások történtek, és nagyobb számban pozitív  $\frac{d\Omega}{dt}$  értékekre számítottam. A 13. ábrán látható eloszlásfüggvény azonban nem szimmetrikus, és bár a negatív és pozitív értékek közel egyenlő számban jelennek meg, a függvény pozitív értéktartományba tartozó szakaszában abszolút értelemben is nagyobb értékek fordulnak elő.

A 14. ábrában nagy meglepetés már nem ért, az értékek jóval közelebb vannak a nullához, a  $p = 0,5$  előfordulási valószínűséghez tartozó érték ismét nagyon közelíti a nullát, de ez megegyezik a 4. ábrából levont következtetésekkel, miszerint a meanderezési fok értékei alig változnak ezen a szakaszon. Az eloszlás ismét nem szimmetrikus, a pozitív értékek itt is nagyobb abszolút értékekkel fordulnak elő.

### Szórásdiagram

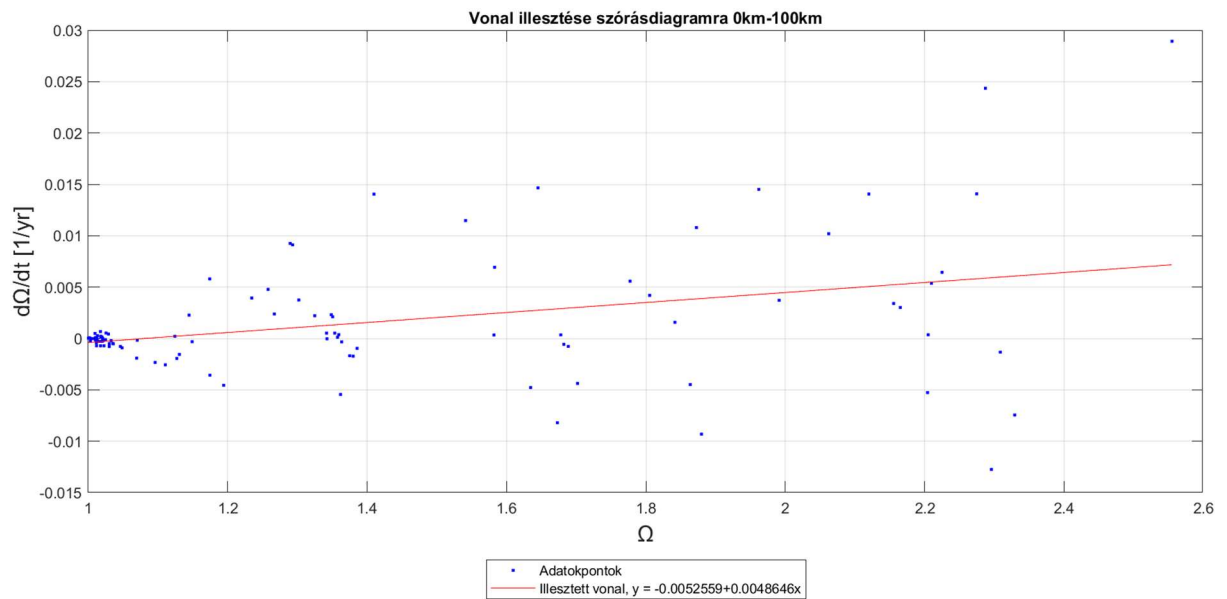


**15. ábra: Szórásdiagram – A meanderezési fok változása időegység alatt az ív meanderezési fokának függvényében**

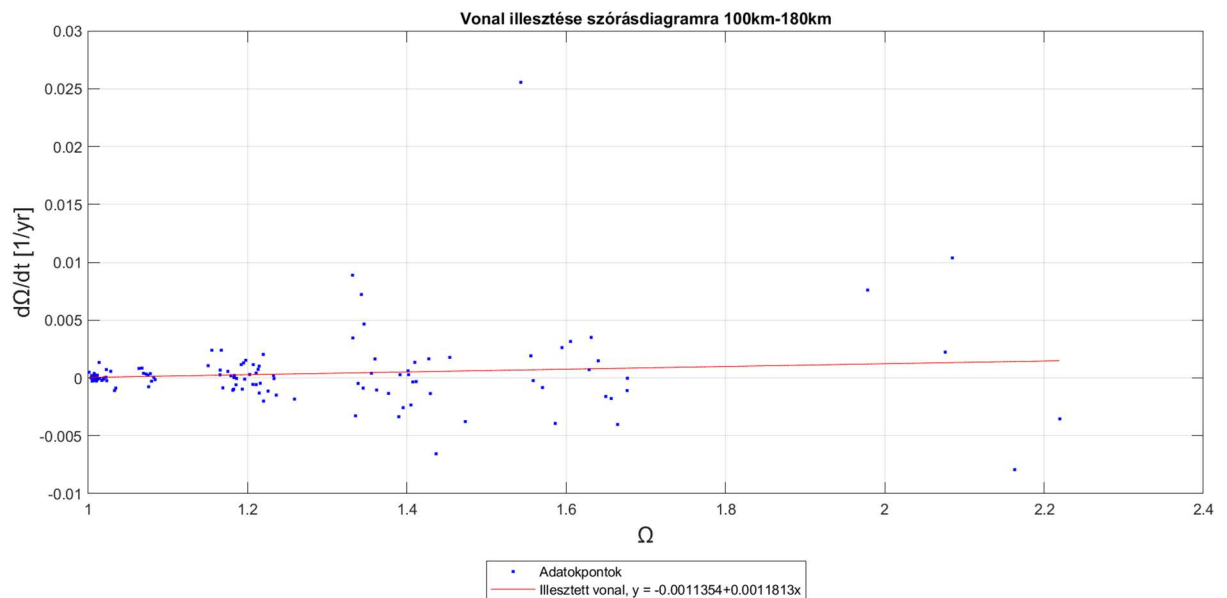
A 15. ábrán a vízszintes tengelyen az ívek meanderezési fokai ( $\Omega$ ) szerepelnek, a függőleges tengelyen pedig annak az ívnek a változása a következő mérési évig, leosztva az eltelt idővel ( $\frac{d\Omega}{dt}$ ). A kék körök az első, nagyobb hordalékhozamú szakaszhoz tartoznak, míg a piros körök a második szakaszhoz.

A nagyon kicsi  $\Omega$  értékeknél (1 – 1,05), nagyon sűrű a ponthalmaz mindkét szakasz esetén, a vízszintes tengelyen a nagyobb értékek felé haladva pedig a függőleges tengelyeken is abszolút értelemben nagyobb értékek is tartoznak. Az ábra előállítására előtt az volt a hipotézis, hogy a nagyobb  $\Omega$  értékek általában nagyobb  $\frac{d\Omega}{dt}$  értékeket fognak eredményezni, azonban a 15. ábrán látszódik, hogy mindenhol történik kicsi mértékű változás is. A pontok közt nagy a szórás, és egyértelműen látszódik, hogy nem illeszkedik rá semmilyen lineáris vagy magasabb fokú függvény. Ennek ellenére illesztettem egy vonalat a pontokra, legalább egy trend kimutatása érdekében.

#### Szórásdiagramokra illeszkedés



16. ábra: Trendvonal illesztése a 0 és 100 km közötti szakaszhoz tartozó szórásdiagramra



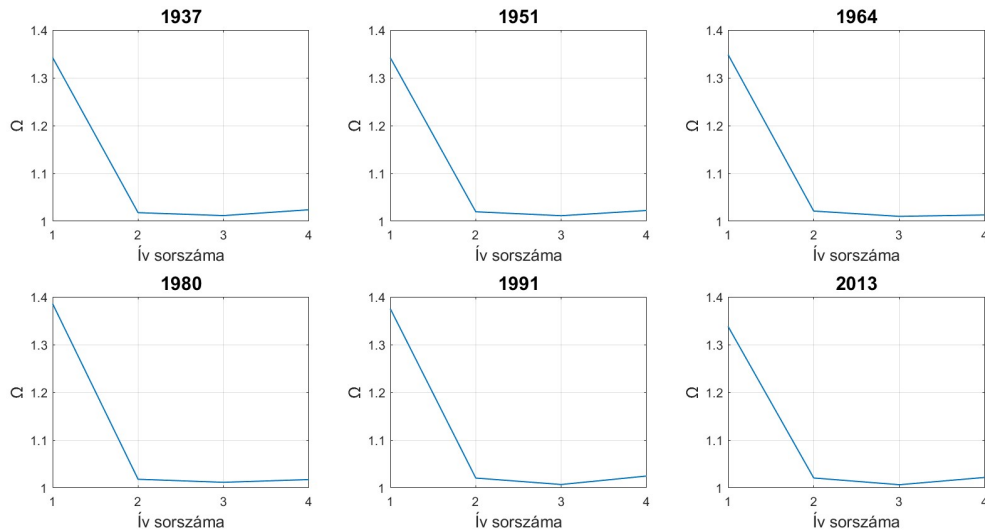
17. ábra: Trendvonal illesztése a 100 és 180 km közötti szakaszhoz tartozó szórásdiagramra

A 15. ábrán külön színnel ábrázolt pontokat elkülönítettem, és egy trendvonalat illesztettem rájuk, ezeket a 16. és 17. ábra tartalmazza. A trendvonalak egyenlete a jelmagyarázatban található. A 16. ábrán nagy a szórás a pontok közt, az illeszkedés igen rossznak mondható. A 17. ábrán a szórás valamelyest jobb, de nem venném alapul ezeket az adatokat egy robusztus összefüggés felírásához.

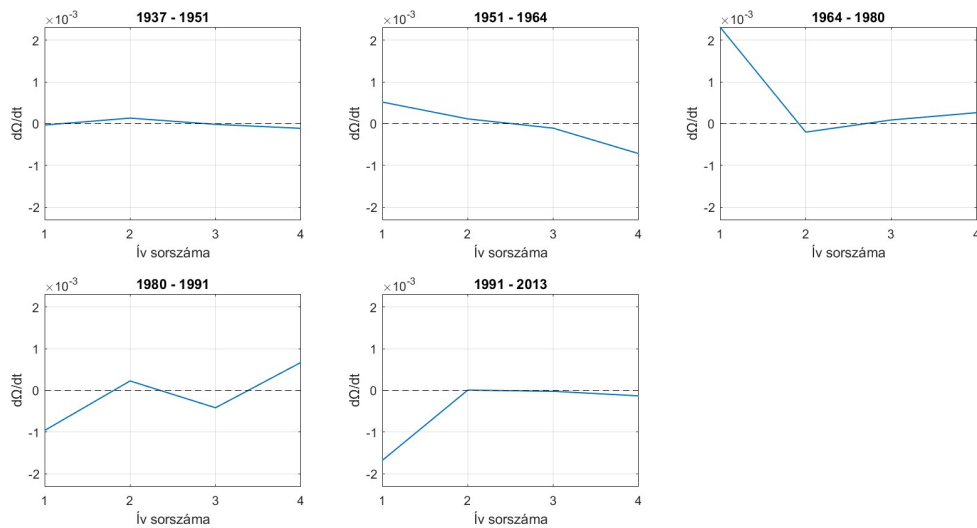
### 4.1.3. Ívcsoportok vizsgálata

A 46 db időben vizsgált ívből egyesek közvetlen egymás mellett helyezkednek el. Négy ilyen ívcsoport van, amelyekkel vizsgálni lehet, hogy például az egymást követő ívek  $\frac{d\Omega}{dt}$  értékei között van-e összefüggés.

#### Első ívcsoport

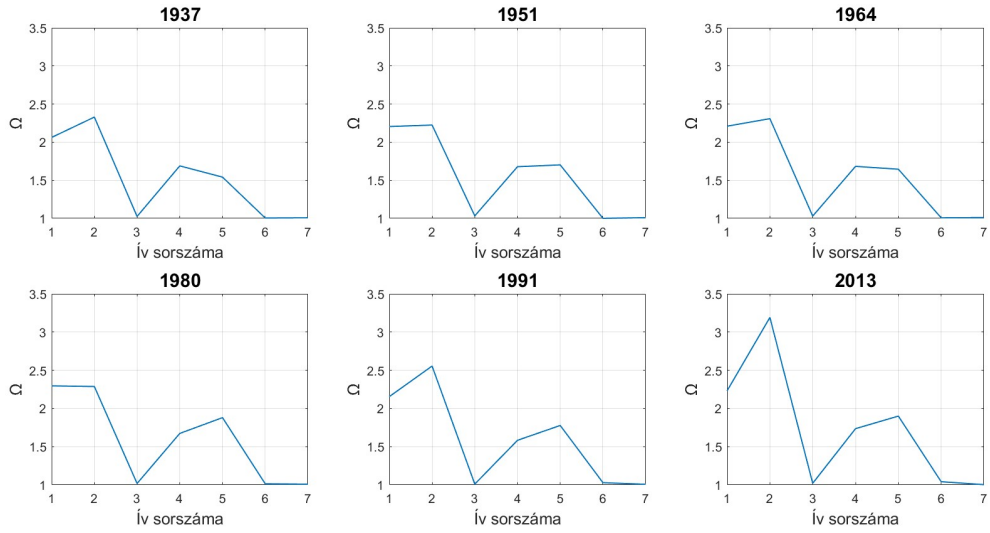


18. ábra: Az első ívcsoport meanderezési fok értékei az egyes években

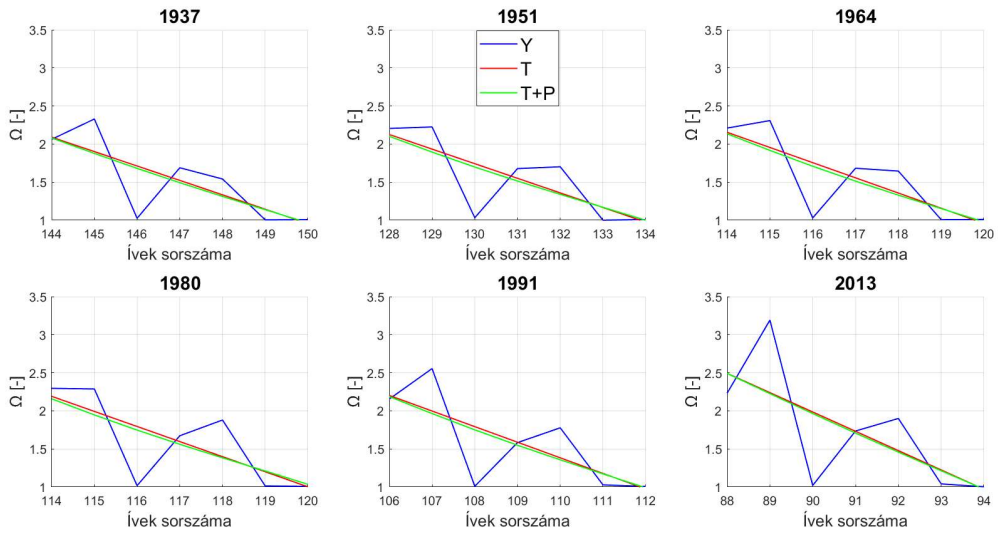


19. ábra: Az első ívcsoport meanderezési fokainak változása

#### Második ívcsoport

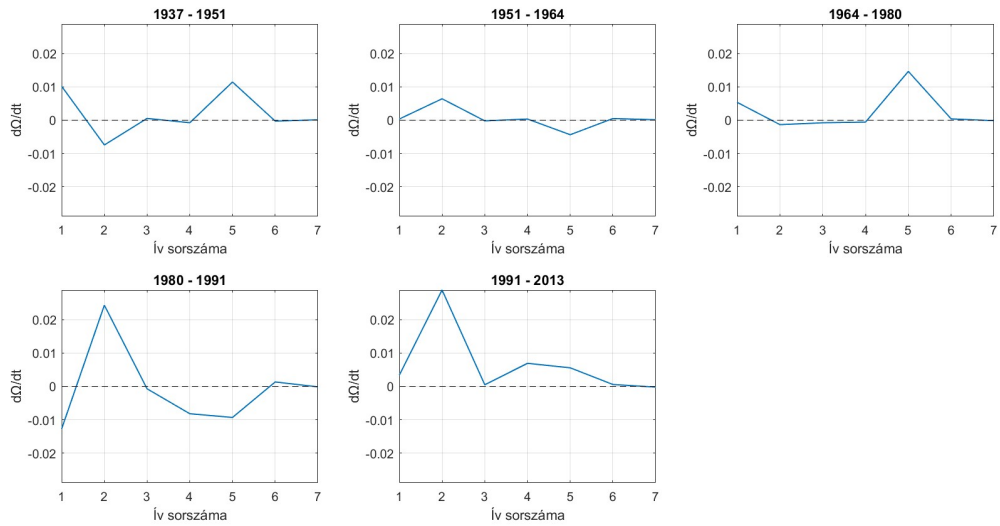


20. ábra: A második ívcsoport meanderezési fok értékei az egyes években

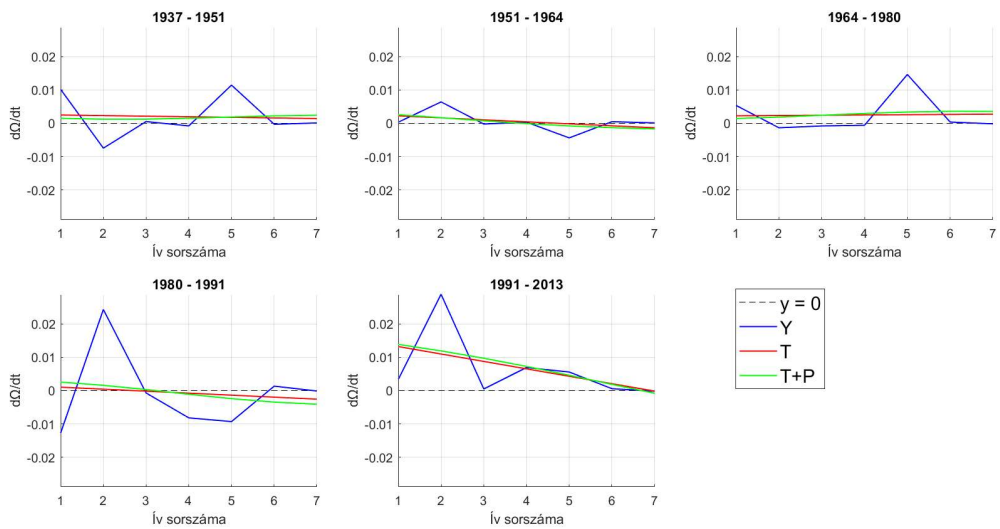


21. ábra: A második ívcsoport meanderezési fok értékeire (Y) kiszámított trendkomponens (T), és az összegzett trend- és periodikus komponens (T+P)



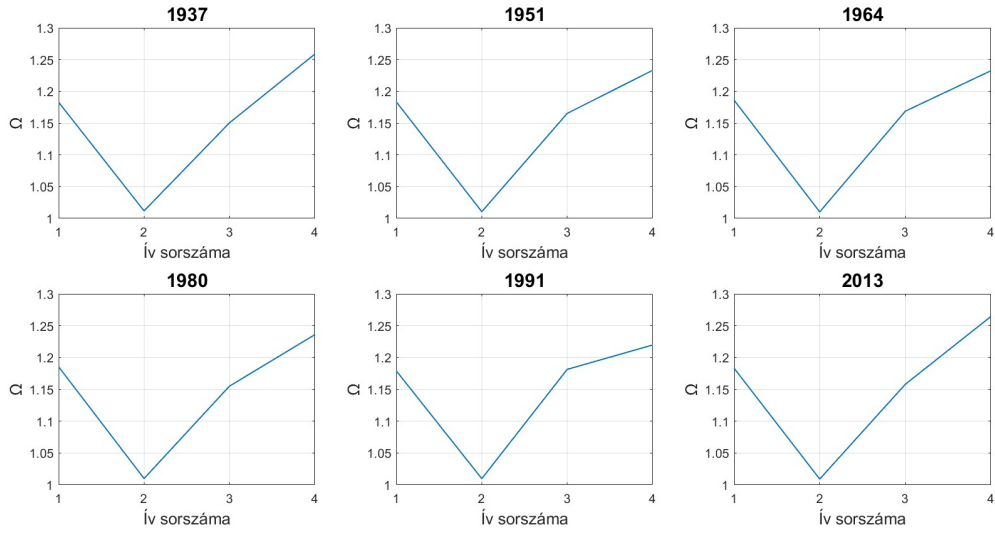


22. ábra: A második ívcsoport meanderezési fokainak változása

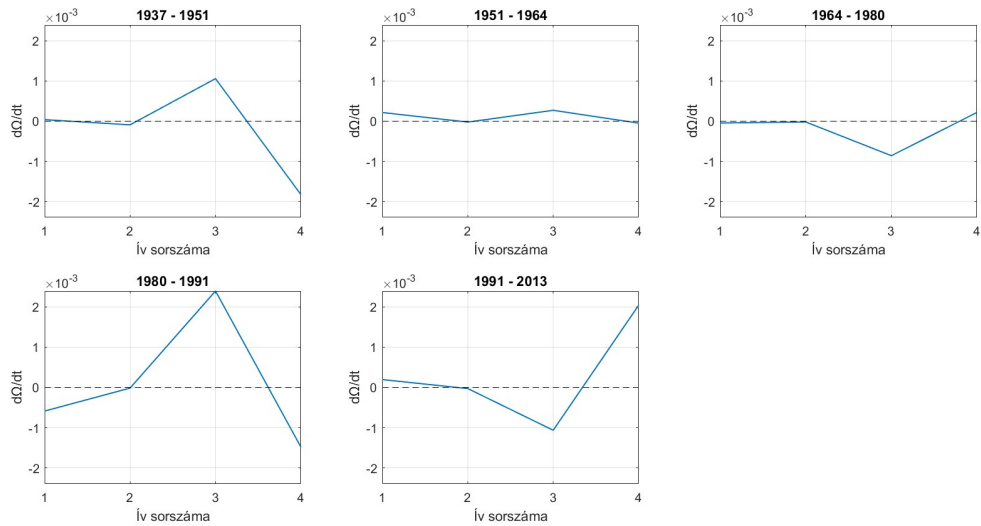


23. ábra: A második ívcsoport meanderezési fok időegység alatti változásaira (Y) kiszámított trendkomponens (T), és az összegzett trend- és periodikus komponens (T+P)

Harmadik ívcsoport

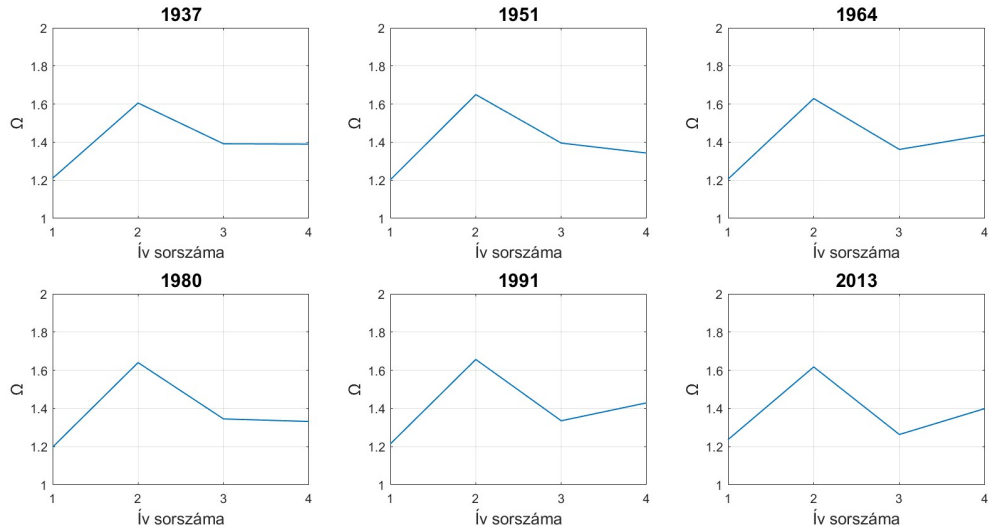


24. ábra: A harmadik ívcsoport meanderezési fok értékei az egyes években

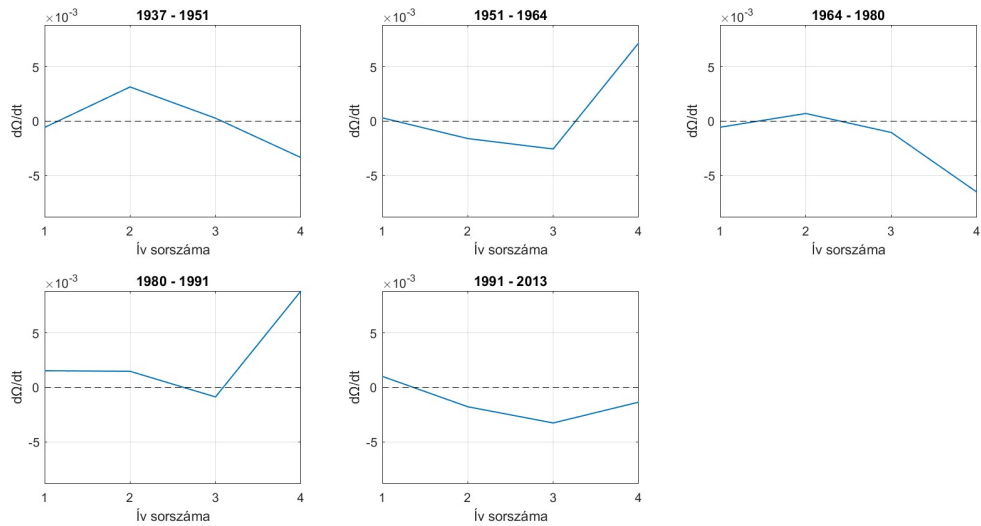


25. ábra: A harmadik ívcsoport meanderezési fokainak változása

Negyedik ívcsoport



26. ábra: A negyedik ívcsoport meanderezési fok értékei az egyes években



27. ábra: A negyedik ívcsoport meanderezési fokainak változása

Az első, harmadik és negyedik ívcsoportokban az ívcsoportok rövidsége miatt lényeges statisztikai összefüggést nem tudtam találni. A második ívcsoportra megkísértem az idősoranalízis eljárásával egy periodikus komponenst találni az egymást követő ívek  $\frac{d\Omega}{dt}$  értékeiben (23. ábra). Ez a vizsgálat nem járt nagy sikerrel, lényeges periodicitást nem találtam ezekben az értékekben, de az ilyenképp vizsgálható adatsorom is nagyon limitált volt, így egyértelműen nem tudom kijelenteni hogy nincsen ilyen összefüggés.

## 4.2. Modellfejlesztés

A 3.3. fejezetben ismertetett egyenletrendszer egy negyedik egyenlettel bővítettem ki (Nyíri (2020) alapján), ami az egyensúlyi, mederkitöltő állapothoz tartozó Shields számra ( $\tau^*$ ) ad becslést a mederesés és a mederanyag függvényében (Li et al., 2014):

$$\tau_{bf}^* = \beta \cdot (D^*)^{-1} \cdot S^m, \quad [16]$$

ahol  $\beta = 1220$  és  $m = 0,53$  (230 db folyószakasz adatai alapján közelítő értékeknek tekintendők),  $D^*$  pedig a dimenziómentes szemcseméret, amely a következőképpen számítható:

$$D^* = \frac{(Rg)^{\frac{1}{3}}}{v^3} D. \quad [17]$$

Az egyenletben  $v$  a folyadék kinematikai viszkozitása, a további számításokban feltételezett értéke  $v = 1 \cdot 10^{-6} m^2s^{-1}$  (Li et al., 2014)

A mederkitöltő állapothoz tartozó Shields szám közelítő egyenlete adott folyószakasz ismert mederkitöltő állapothoz tartozó adatai függvényében, a szerzők által ajánlott összefüggés szerint korrigáltam (Li et al., 2014):

$$\beta = \frac{\tau_{bf,ismert}^* \cdot D^*}{S_{ismert}^{0,53}}. \quad [18]$$

Az összefüggés korrigálására azért van szükség, mert az esetleges esésváltozás hatására a Shields szám is változik, amit csak egy korrigált összefüggés képes helyesen leírni.

### 4.2.1. Mederszélesség változása

Az előzőekben ismertetett négy egyenletre bővített egyenletrendszer négy ismeretlen megoldására lett képes, amik rendre a vízsebesség, vízmélység, csúsztatófeszültség és mederszélesség ( $U$ ,  $H$ ,  $\tau$  és  $B$ ).

A mederszélesség időbeli változását az alábbi összefüggés alapján számítottam a modellben:

$$\Delta B = N \cdot \left( \frac{\tau^*}{\tau_{bf}^*} - 1 \right) \cdot \Delta t \quad [19]$$

ahol  $\Delta B$  a szélességváltozás [m],  $N$  az adott folyóra jellemző kalibrálandó paraméter, az oldalirányú eróziós állandó [m/év] és  $\Delta t$  az eltelt időtartam évben. A szélességváltozás ismeretében a következő időlépésre kialakuló mederszélesség már egyszerűen számítható:

$$B_{t+1} = B_t + \Delta B. \quad [20]$$

Az összefüggés alapja a  $\frac{\tau^*}{\tau_{bf}^*}$  hányados, melynek hasonló alkalmazásra, de más formában létezik korábbi példa a szakirodalomban (Eke et al., 2014). Ha a modell által éppen számított  $\tau^*$  Shields szám éppen egyenlő a  $\tau_{bf}^*$  egyensúlyi csúsztatófeszültséggel, akkor nem történik parterózió. Ha  $\tau^*$  nagyobb  $\tau_{bf}^*$ -nál, azaz az egyensúlyi állapothoz képest feszültségtöbblet van, a partfalak erodálódnak, az összefüggés egy pozitív  $\Delta B$  értéket ad, ami egy mederszélesedésnek felel meg.

A 19. összefüggésben szereplő  $N$  értékre pontos adattal nem rendelkezem, így egy közelítő, de reális értéket vettem fel a Mississippi esetére. Ennek értéke  $N = 12.5$  m/év, ami az ún. Harold Fisk's meander map néven elhíresült (Mississippi folyó elmúlt több, mint 1500 évre vonatkozó partvonalváltozását mutatja be) térképek digitalizálása alapján végzett morfordinamikai adatfeldolgozás eredményeképpen kapott közelítő, oldal irányú eróziós érték. A digitalizálást és adatfeldolgozást egy koreai kutatócsoport végezte el (Wu et al., 2022).

#### 4.2.2. Meanderezési fok időbeli változása

A kanyarulatok fejlődése, mint komplex morfordinamikai folyamat, rengeteg paramétertől és változótól függ, amelyeket ebben a dolgozatban átfogóan és nagy mélységben nem volt céлом elemezni. A 4.1.2. alpont eredményei alapján egy egyszerű összefüggést mégis felállítottam, amellyel a továbbiakban lehetőségem adódik a modell alkalmasságát bemutatni a természetes kanyarulatfejlődés vizsgálatára. Az említett összefüggés a következőképpen néz ki:

$$\Omega_{t+1} = \Omega_t + \Delta\Omega_t \quad [21]$$

$$\Delta\Omega_t = a + b \cdot \Omega_t \quad [22]$$

ahol  $b$  a 0 és 100 km közötti szakaszon a 16. ábrára illesztett trendvonal meredeksége.

A 16. ábrára illesztett trendvonal szerint az  $\Omega = 1$  értékhez negatív  $\frac{d\Omega}{dt}$  érték tartozna, de mivel az egy 1-nél kisebb meanderezési fokhoz vezetne, emiatt egy peremfeltételt vezettem be. Feltételeztem, hogy egy teljesen egyenes szakaszon nincsen kanyarulatfejlődés, vagyis:

$$\Delta\Omega_t(\Omega_t = 1) = 0 \quad [23]$$

A 22. egyenletbe behelyettesítve  $\Delta\Omega_t = 0$  -t és  $\Omega_t = 1$  -et

$$0 = a + b \cdot 1 \quad [24]$$

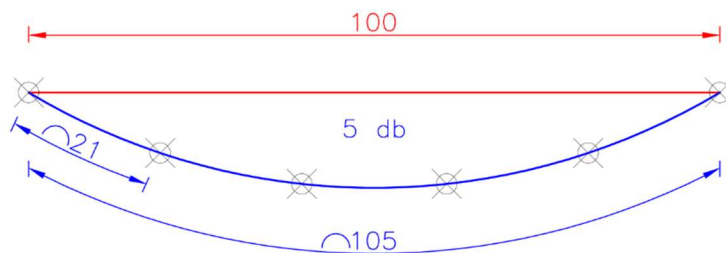
$$a = -b \quad [25]$$

A modell ennél sokkal összetettebb összefüggést is képes lenne kezelni, de a továbbiakban ezt fogom alkalmazni.

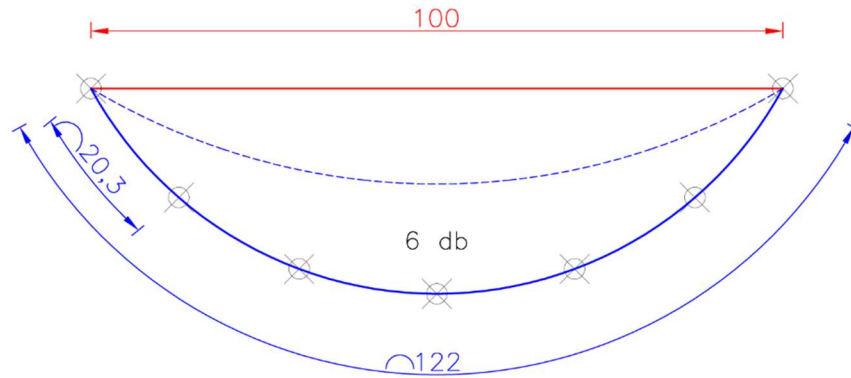
### 4.2.3. Térbeli lépték változása

A meanderezési fok időbeli változásának hatása jelenlegi dolgozatomban az ívek hosszmenti változásában jelenik meg. Ahogy azt a valós Minnesota adatoknál a 46 db vizsgált kanyar kiválasztásakor is szempontnak vettem, a modellben az inflexiós pontok helyzetét állandónak tekintem, így az időben a kanyarok száma, és az inflexiós pontok közötti távolság változatlan a vizsgált szakaszon. Ami változik a kanyarulatfejlődések és levágódások során, az a kanyarok hossza, azaz az a megtett út, amit a víz és a hordalék megtesz a két inflexiós pont között. Ezt a hosszváltozást valamilyen módon muszáj figyelembe vennem, ugyanis két fontos modellezett változóm is függ ennek a nagyságától: az esés és a 13. (Exner) egyenlet szerint a lerakódott, vagy erodált hordalék mennyisége (ismert mederszélesség esetén tehát a lerakódott, vagy erodált rétegvastagság, vagy mederváltozás).

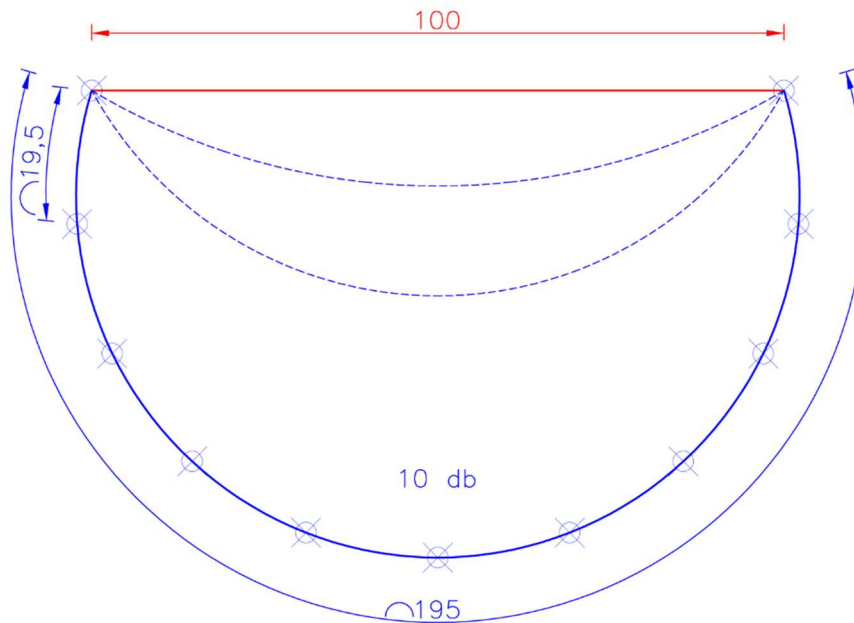
Az egyes ívek hossza nagyban el tud térni egymástól, emiatt az nem nyújt megoldást, hogy egy kanyart egy térbeli lépéssel jellemezzünk. Ennek egyik oka a 13. (Exner) egyenletet megfontolva belátható, mert ugyanakkora hordalékhozam-különbség ( $q_i - q_{i+1}$ ) és időlépés esetén is eltérne a különböző hosszúságú ívekben a lerakódott, vagy erodált hordalék mennyisége.



28. ábra: Változó térbeli lépték értelmezése a kanyarulatfejlődés modellezéséhez: I. lépés



29. ábra: Változó térbeli lépték értelmezése a kanyarulatfejlődés modellezéséhez: II. lépés



30. ábra: Változó térbeli lépték értelmezése a kanyarulatfejlődés modellezéséhez: III. lépés

A megoldásban, amit alkalmaztam, bemeneti adatként egy „durva  $\Delta x$ ” cellaméret értéket adok meg. A kifejlesztett eljárásom az egyes térben változó ívhosszokat egyenlő  $dx$  méretekké felosztja olyan módon, hogy a felosztás darabszámának és a  $dx$  értékének szorzata minél közelebb legyen a valós ívhossz értékéhez. Miután megváltozik a meanderezési foka az ívnek, ez a felosztási eljárás megismétlődik. A megértés segítésének érdekében a 28., 29. és 30. ábrán látható ugyanannak a kanyarnak három különböző időpillanathoz tartozó felosztása. A példában a „durva  $\Delta x$ ” értéke 20 méter.

A három ábrán eltérő a pontokkal jelzett szelvények száma, a 28. ábrán 5 db, a 29. ábrán 6 db, a 30. ábrán pedig 10 db egyenlő lépésközre lett bontva a kanyar. Akár ebben az esetben, akár egy átvágódás esetén (például 30. ábrából kiindulva a 28. ábra helyzetébe kerülve), a

szelvények számának változásakor új értékeket kell meghatározni a legalapvetőbb paraméterekre. A két legkritikusabb paraméter a mederfenékszint és a mederszélesség. Ezeket a mozdulatlan inflexiós pontokban vett értékek segítségével határozom meg, egyszerű lineáris interpolációval.

A többi változó a már tárgyalt módon meghatározható.

### 4.3. Modellvizsgálatok

A modellvizsgálatok elvégzéséhez szükséges volt paramétereznem a modellt. A paraméterezést adathiányból kifolyólag a Minnesota folyó helyszínrajzi nyomvonalának és a Mississippi folyó morfordinamikai paramétereinek az ötvözésével oldottam meg. Ezzel célom egy olyan modell felállítása volt, ami valóságos adatok alapján kerül paraméterezésre, így a fejlesztett modellt reális morfordinamikai paraméterek alapján sikerül tesztelnem. A Minnesotából felhasznált adatok az MStA programmal előállított 2013-as felmérés szerinti inflexiós pontok távolsága ( $L_E$ ), az ívek hossza ( $L_I$ ), illetve az ezekből kiszámított meanderezési fok ( $\Omega$ ).

Az alkalmazott morfordinamikai paramétereket a Mississippi folyóra egy, a szakirodalomban elérhető 1D modellből vettem át (An et al., 2020). Az innen felhasznált paraméterek, amelyek a modell kezdeti, dinamikus egyensúlyi állapotát írják le, a következők:

Mederszélesség $B$	1100 m
Dimenziómentes Chézy ellenállási tényező $C_z$	14.55
Egységnyi mederszélességre jutó vízhozam $q_w$	31.82 m <sup>2</sup> /s
Mederkitöltő árvízhozam időszakossági tényezője $I_f$	0.34
Átlagos szemcseméret $D$	0.426 mm
A hordalék súlya a vízben $R$	1.65 t/m <sup>3</sup>
Mederfenéken lerakódott hordalék porozitása $\lambda_p$	0.4
Számítási időlépés $\Delta t$	10 <sup>-4</sup> év

**1. táblázat: Mississippi folyó alsó szakaszának 1D dinamikus egyensúlyi állapotát leíró morfordinamikai paraméterek**

A Minnesota és Mississippi folyók paraméterezett szakaszai a mederszélességben eltérnek egy nagyságrenddel, a Mississippi mederszélessége az 1. táblázatból  $B_{Mississippi} = 1100$  m, a Minnesota átlagos szélessége 2013-ban pedig  $B_{Minnesota} = 100$ m (Donovan et al., 2021). Emiatt az  $L_E$  és  $L_I$  értékeket a szélességek arányában módosítottam, és 11-gyel megszoroztam őket. A meanderezési fokok változatlanok maradtak. Ezek alapján tehát egy olyan dinamikus egyensúlyi állapotban lévő modellt hoztam létre, ami a Mississippi morfordinamikai adatai alapján került paraméterezésre, azonban a meanderezést a Minnesota folyó helyszínrajza alapján, azt a mederszélességek aránya alapján felnagyítva vettem figyelembe.



A paraméterezett modell segítségével három teoretikus scenáriót vizsgáltam: mindhárom esetben az 1. táblázatban ismertett paraméterek alapján leírt dinamikus egyensúlyi állapot volt a kezdő állapot, amit kanyarulatok átvágásával zavartam meg. Vizsgálataimban azt akartam megvizsgálni, hogy a különböző kanyarulatátvágások milyen morfodinamikai hatást fejtenek ki az al- és felvízre.

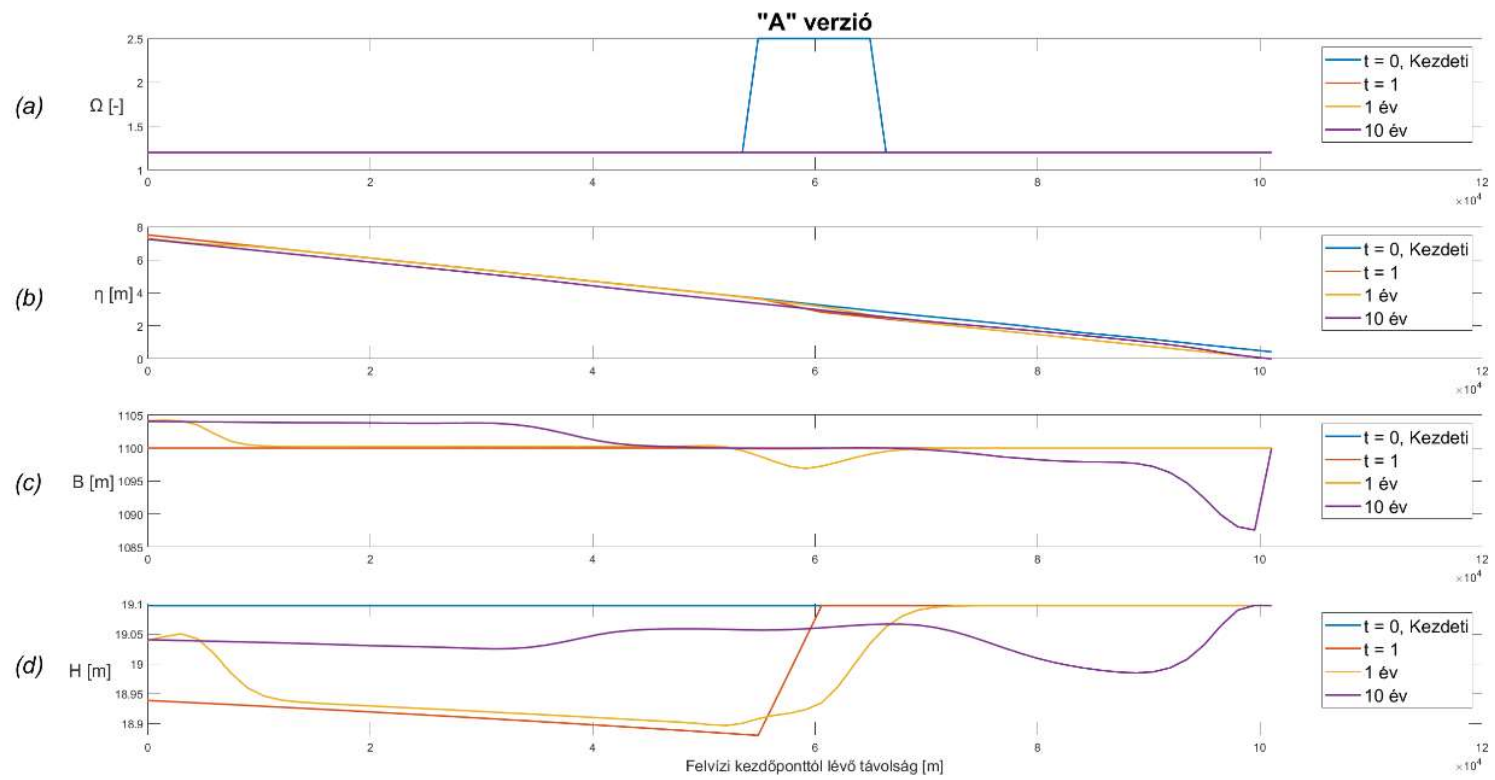
Az első változatban ("A" változat) a modelltartomány közepén egy kanyarulat átvágásának hatását vizsgáltam. A második változat ("B" változat) a modellezett folyószakasz három kanyarulatának azonos időpontban történő átvágódásának hatásvizsgálatát mutatja be. Az utolsó, "C" változatban az egyes kanyarulatok a Minnesota folyón tapasztalt módon és ütemben fejlődnek monoton növekvő módon, majd a feltárt törvényszerűség alapján a természetes folyamatot követve fűződnek le (amit a **Hiba! A hivatkozási forrás nem található.** fejezet ismertet).

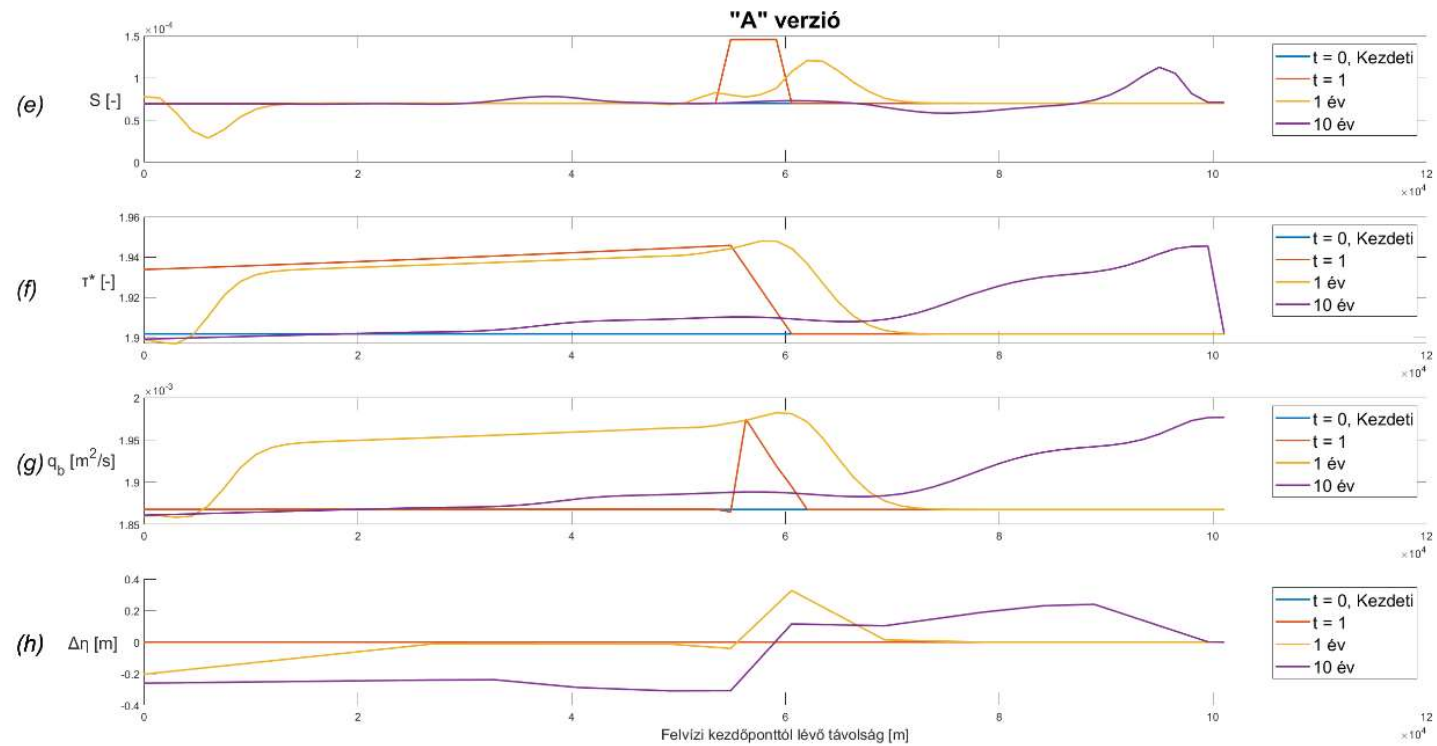
#### 4.3.1. „A” modellváltozat

Az első, „A” verzió a legegyszerűbb, itt még nem veszem figyelembe a meanderezési fok időbeli változását, csak azt feltételezem, hogy egy  $\Omega = 2.5$  meanderezési fokú kanyar átvágódik. A vizsgált szakasz a 4.1. fejezetben vizsgált Minnesota folyószakaszának az első 11 db kanyarja, ezek közül a középső, 6. kanyart jelöltem ki átvágásra.

Az eredmények azt mutatják, hogy a kanyarulat átvágódásának komoly hatása van fel- és alvízi morfodinamikára is, ugyanis jelentősek a változások az egyes morfodinamikai paraméterekben (**Hiba! A hivatkozási forrás nem található.** ábra). A  $t = 0$  kezdeti és  $t = 1$  közvetlen átvágás utáni állapotokat összehasonlítva megállapítható, hogy az átvágódás miatti a meanderezési fok csökkenés (a) a mederfenékszintek hosszszelvényét (b) az egész modellezett szakaszon befolyásolta. Egy lokális esésnövekedést okozott (e), amely aztán a fokozatosan változó vízmozgás révén megváltoztatta az átvágás felvizen a vízmélységi viszonyokat (d). A megváltozott vízszintnek hatása volt a Shields számra (f), ami pedig a hordalékhozam változását okozta (g), ami végül a felvízi szakasz eróziójához vezetett (h). A felvízi medererózió egy hullámszerű módon levonuló hordalékcsóvát eredményezett, amire a fajlagos hordalékhozam hossz-szelvénye utal (g). Mivel a Shields szám megváltozását okozta az átvágódás, emiatt a mederszélesség is változott az egyes szelvényekben. 1 év elteltével az időbeli vizsgálat elejéhez képest nem csak egyetlen lokális maximum van az (e) ábrának. 1 év alatt a Shields szám változásából már a mederszélességben (c) is van változás, aminek a fajlagos hordalékhozam

értékre közvetlen hatása van. A Shields szám növekedése szelvénytévesztéssel jár, ez figyelhető meg a c ábrán. Ez a változás viszont nem jelentős, alacsonyabb mint 0,5 %-os. A mederváltozás (h) és mederszélesség-változás időbeli alakulását összehasonlítva kirajzolódik, hogy a feszültségváltozásra ugyan mederszélesség változással is reagál a folyó, de annak szerepe kisebb, mint a mederváltozásé és az új egyensúlyi állapot beálltához is több idő szükséges: a mederváltozás ábráról az olvasható le, hogy 10 év elteltével nagyjából a vizsgált szakasz közepéig egy közel állandósult mederváltozás ( $\sim -0,25$  m) áll be, a mederszélesség kapcsán viszont ennél rövidebb, a teljes szakasz közel 40%-án figyelhető meg közel állandósult mederszélesség. A morfodinamikai hatások tekintetében tehát az eredmények arra utalnak, hogy a mederszint változás a jelentősebb, az új egyensúlyi mederszélesség beálltához több időre van szükség.





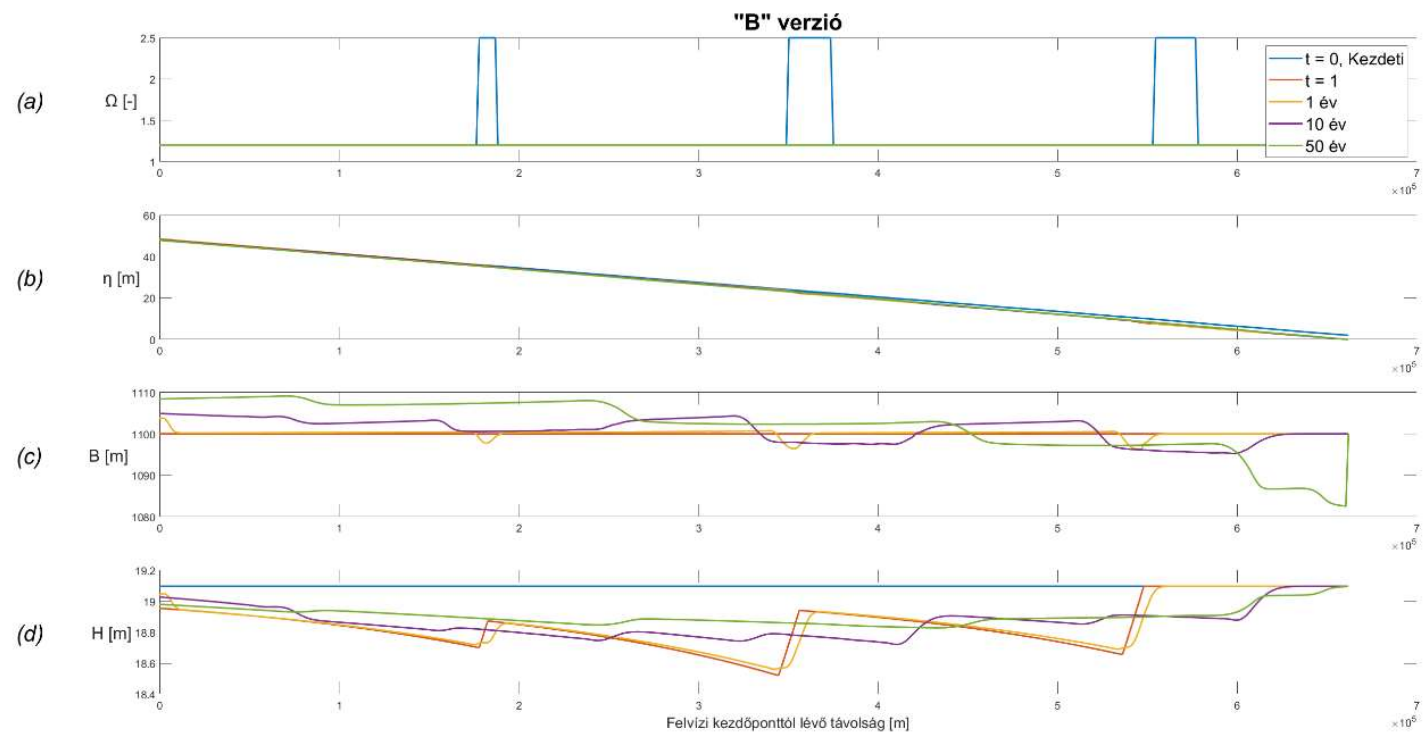
31. ábra: (a) Meanderezési fok, (b) mederfenékszint, (c) mederszélesség, (d) vízmélység, (e) mederesés, (f) fenék-csúsztatófeszültség, (g) fajlagos hordalékhozamás (h) mederfenékszintváltozás alakulása 10 év alatt, "A" verzió

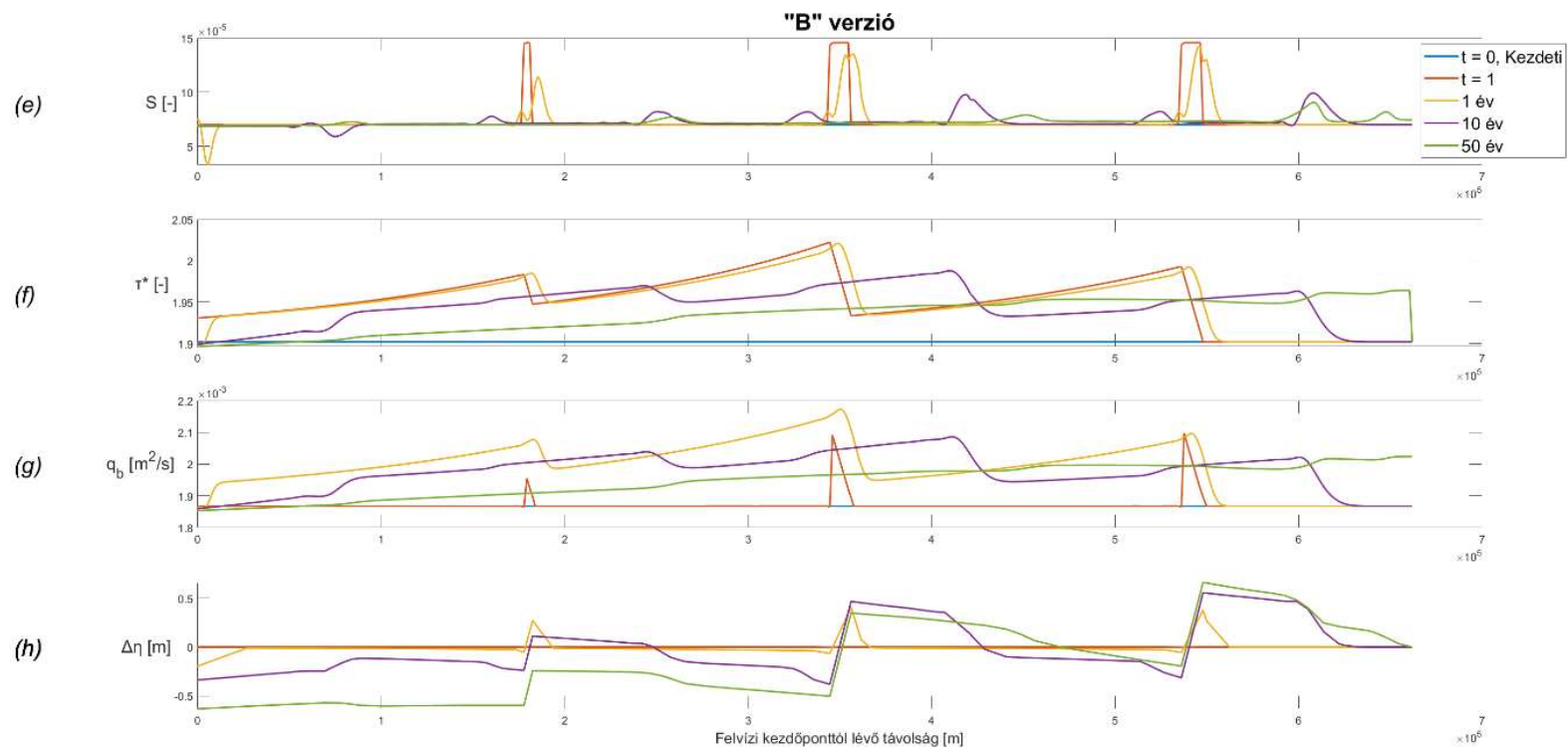
10 év után az első 20000 méteren közel beállt egy új egyensúlyi állapot, ezalatt a mederfenék több mint 20 cm-t erodálódott (h), a mederszélesség közel 5 métert növekedett (c), emiatt a Shields szám (f) és fajlagos hordalékhozam (g) egyensúlyi értéke is (kis mértékben ugyan, de) változott. A folyamatok lezajlását követően a normál vízmélység körülbelül 5 cm-rel csökken. A szakaszra jellemző esés értéke elhanyagolható mértékben csökken.

#### 4.3.2. „B” modellváltozat

A következő, az előző változathoz képest összetettebb vizsgálat a „B” verzió, ami abban tér el az „A”-tól, hogy egyszerre több kanyarulat átvágását is feltételezem.

Az „A” változatban azt tapasztaltuk, hogy egy kanyarulat átvágódásának a teljes modellezett szakaszon érzékelhető morfordinamikai hatása van. Ezzel összhangban, a három kanyarulat egyidejű lefűződésének olyan összetett morfordinamikai hatása van, ami az egyes lefűzések hatásának szuperpozícióját jelentik. A bekövetkezett változások magyarázatának metodikája hasonló az előző esetben bemutatotthoz, azonban az egyes lefűzések együttes hatása érvényesül. Nevezetesen, az egyes átvágódások ugyancsak felvízi leszívást okoztak (h), de a (folyásirányban számított) második kanyarulat vízszintje nem az eredeti egyensúlyi állapothoz tartozó szintről indul, hanem a harmadik kanyarulat átvágódása okozta leszívás miatt egy alacsonyabb szintről. Az első kanyarulat esetén hasonló mondható el, ott a második és harmadik kanyarulat átvágódása okozta leszívás miatt csökkentett vízszintről indul a leszívás. Ez okozza, hogy (az „A” változattal szemben) Az első és második átvágódásnál a Shields szám már egy, az egyensúlyi értékhez képest magasabb értékről emelkedik az átvágás hatására. A megnövekedett Shields szám (f) a eróziót okoz (h), de mivel az előző esethez képest nagyobb a növekmény, a mederszélességre (c) is nagyobb hatással van (már közel 1%-os). A medererózió ebben az esetben is az alvíz irányába terjedő hordalék hullámot indít. Mivel bizonyos szelvényekben a Shields szám nem képes az átmenetileg megnövekedett hordalék mennyiséget tovaszállítani, ezért ezeket a helyeken (második és harmadik átvágódás alvízén) átmeneti mederszint emelkedés figyelhető meg (h). Az új egyensúlyi állapot várhatóan közel 60 cm-rel alacsonyabb mederszintet, közel 10m-rel szélesebb mederrel és elhanyagolható mértékű Shields szám és eséscsökkenéssel áll majd be, aminek kialakulásához 50 év sem volt elegendő.





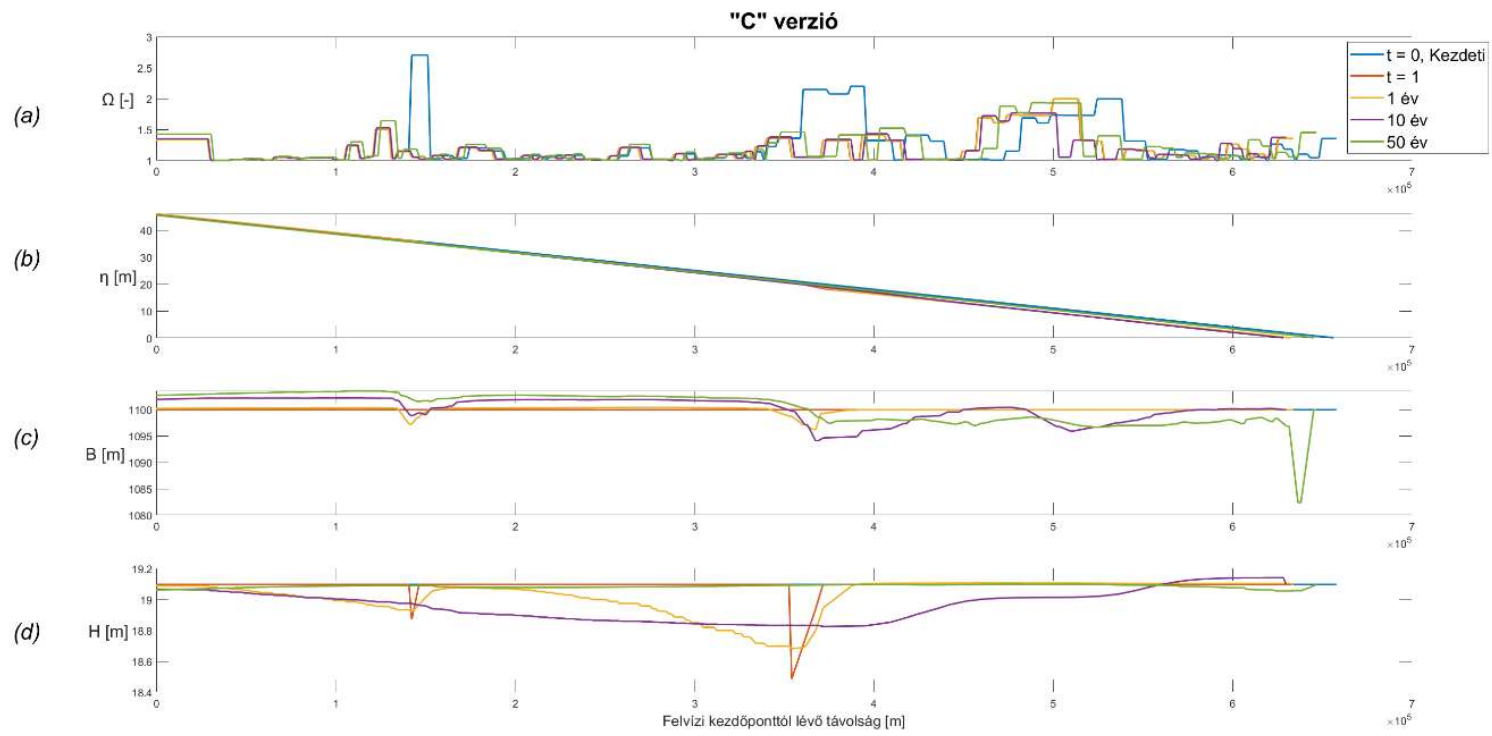
32. ábra: (a) Meanderezési fok, (b) mederfenékszint, (c) mederszélesség, (d) vízmélység, (e) mederesés, (f) fenék-csúsztatófeszültség, (g) fajlagos hordalékhozam és (h) mederfenékszintváltozás alakulása 50 év alatt, "B" verzió

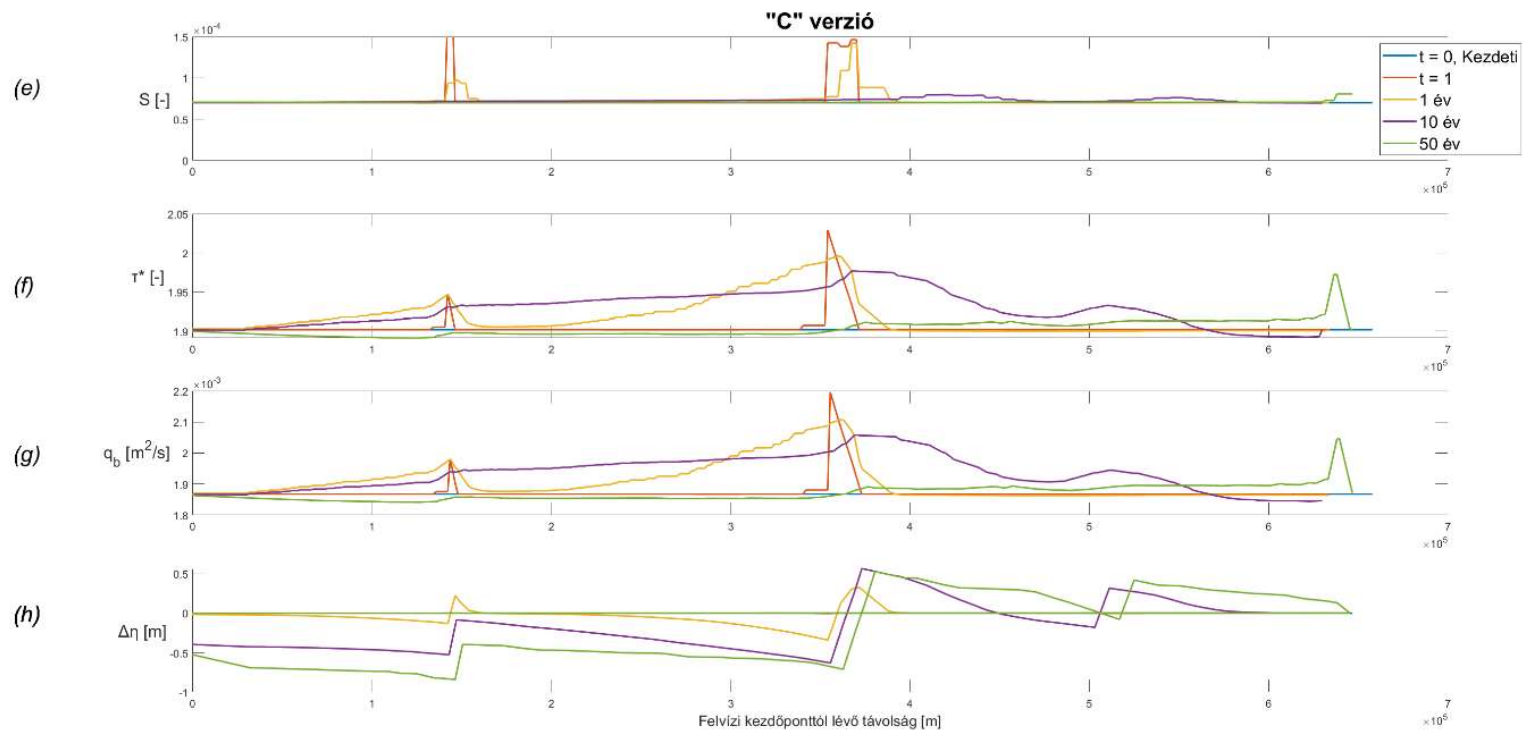
### 4.3.3. „C” modellváltozat

Az utolsó, legösszetettebb vizsgálat során azt feltételeztem, hogy az egyes, eltérő kezdeti meanderezési fokú ívek meanderezési foka az idővel monoton növekedhet. Az átvágódásoknak feltételt szabva a modell automatikusan szimulálja a kritériumok teljesülése esetén az átvágódások hatását. Az alábbi ábrarozat (a) ábráján a meanderezési fok hossz- és időbeli változása látható, ami alapján három érdemi kanyarulat átvágódás detektálható. Erre utalnak a további ábrák is. A tapasztalt morfordinamikai folyamatokat az előző két esetben részletezett részfolyamatokkal magyarázok, aminek kulcsa az egyes átvágódások okozta felvízi leszívás. Jelen változatban megjelenik továbbá az összes kanyarulat fejlődése is, aminek még lokális hatása is eltöprel az átvágódások teljes szakaszon tapasztalt hatása mellett.

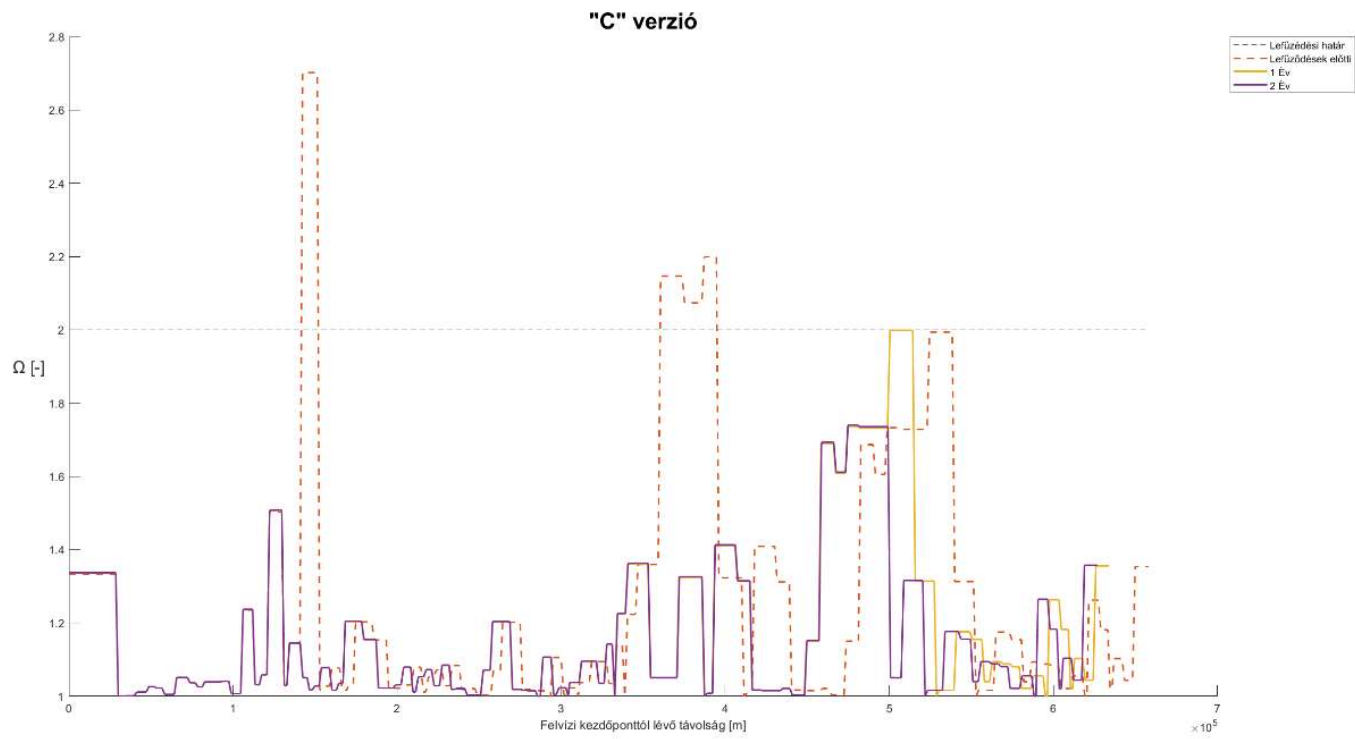
A változások időbeliségének vizsgálata alapján megállapítható, hogy egy Mississipp-i dimenziójú folyó esetén, egy természetes módon történő kanyarulat lefűződés, vagy mesterséges kanyarulatátvágás morfordinamikai hatása évtizedek múltán is érzékelhető. Új dinamikus egyensúlyi állapotról nehéz beszélni, hiszen a kanyarulatfejlődések révén folyamatos változás figyelhető meg. Hosszú idősorok átlagértékeivel viszont lehetőség nyílna az egyensúlyi állapot paramétereit közelíteni.



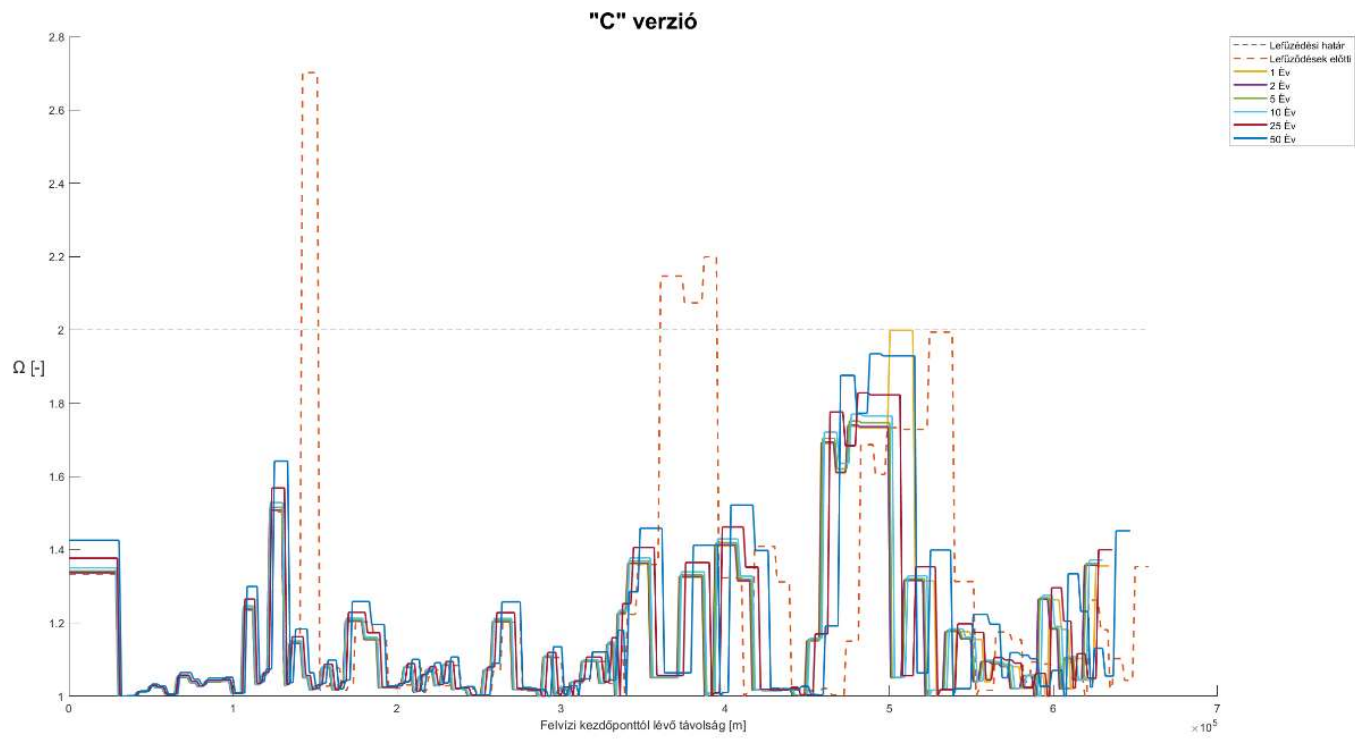




33. ábra: (a) Meanderezési fok, (b) mederfenékszint, (c) mederszélesség, (d) vízmélység, (e) mederesés, (f) fenék-csúsztatófeszültség, (g) fajlagos hordalékhozamás (h) mederfenékszintváltozás alakulása 50 év alatt, "C" verzió



**34. ábra: A meanderezési fokok 2 év alatti változása részletesebben, „C” verzió**



**35. ábra: A meanderzési fokok 50 év alatti változása részletesebben, „C” verzió**

## 5. Összefoglalás, kitekintés

A bemutatott kutatás során a folyómedrekben tapasztalható kanyarulat-átvágódások morfordinamikai hatásvizsgálatával foglalkoztam. A kanyarulatfejlődés során túlfejlett kanyarulatok alakulhatnak ki, amik jellemzően nagy árhullámok levonulása alatt lefűződhetnek. Az elmúlt közel másfél évszázadban a folyószabályozások egy meghatározó beavatkozási formája a kanyarulatok átvágása volt, amivel az árvízi kockázatokat szerették volna csökkenteni. Ez megfigyelhető például a Mississippin, de hazánkban a Tiszán tapasztalhattunk radikális beavatkozásokat, aminek hossza a kanyarulatátvágások miatt közel kétharmadára csökkent. A fő kérdés, ami a vizsgálataim inspirációját adták az az, hogy az átvágódásoknak milyen morfordinamikai hatása van a folyó szakaszléptékű állapotára.

A vizsgálataimat két csoportra osztva tudom ismertetni. Egyrészt fontosnak tartom valós adatok alapján történő természetes morfordinamikai változások tanulmányozását annak érdekében, hogy a lefűződési folyamatokat jobban megérthessem és esetleges törvényszerűségeket állapíthassak meg. Mivel a folyók kanyarulatfejlődésből fakadó morfordinamikai állapotváltozása egy lassú folyamat, nagyon kevés olyan adat áll rendelkezésünkre, ami folyószabályozási munkálatoktól mentes, természetes folyók sokévi mederváltozásait mutatja be. Szerencsémre a Minnesota folyó kapcsán sikerült beszerezni a folyó 1937 és 2013 közötti partváltozásainak adatait, közel 180 km hosszú szakaszra. Bemutattam az adatok vizsgálatát. A meanderezési fok változása kapcsán sikerült egy trendvonalat illeszteni, ami egy reális időbeli változási mértéket szolgáltatott. Az adatok vizsgálata kapcsán viszont arra jutottam, hogy önmagában a meanderezési fok változása nem nyújt kellő mennyiségű adatot általánosítható törvényszerűségek feltárásához. Gyanúm szerint például a hordalékhozam, illetve a hordalékhozam és az adott szelvény hordalékszállító kapacitásának aránya egy fontos paraméter lehet, aminek ismeretében talán precízebben és általánosabb formában lehetne kapcsolatot teremteni a kanyarulatfejlődés és a morfordinamikai paraméterek között.

Ezután tértem rá 1D morfordinamikai modellezési feladatok bemutatására. Az 1D morfordinamikai modellek nagy előnye, hogy számos lokális hatást és tényezőt elhanyagolhatunk, mivel a nagy tér- és időbeli vizsgálatok során azok hatása elenyészik. Viszont lehetőséget biztosít morfordinamikai folyamatok nagy tér- és időbeli vizsgálatára. A kanyarulat átvágódások évtizedeken át és több tíz

kilométeren érzékelhető hatásának vizsgálata egy kimondottan 1D modellezési eszközzel vizsgálandó jelenség. Kezdetben vizsgáltam a már publikált modellezési eljárásokat és azok alapján építettem fel egy saját 1D morfordinamikai modellt, MatLab környezetben. Azt találtam, hogy a kanyarulatok meanderezési fokának eltérő tér- és időbeli értékének, illetve változásának számítására képes eljárás nem található a szakirodalomban. Ezért kifejlesztettem egy új eljárást, ami képes a kanyarulat átvágódás hatásának 1D modellbe történő implementálására. Ezt követően, a Mississippi folyóra paramétereztem egy olyan 1D modellt, ami morfordinamikai paramétereket illetően validált adathalmazként helyesen írja le a folyó dinamikus egyensúlyi állapotát. Mivel a vonalvezetést illetően nem volt elérhető adat a birtokomban, ezért azt feltételeztem, hogy a Minnesota folyó vonalvezetésének a Mississippire arányosított másával még mindig a reális meanderezési és morfordinamikai adatokkal bíró folyómodellt kapok.

Ezt követően különböző modellváltozatok ismertetésével céltom annak demonstrálása volt, hogy sikerült olyan modellezési eljárást kidolgoznom, amivel kanyarulat átvágódások hosszú időre vonatkozó morfordinamikai hatásvizsgálata elvégezhető. Kimutattam, hogy az átvágódásoknál lokálisan jelentkező esésnövekedés a szabad felszínű egyenletes vízmozgás miatt jelentős leszívást okoz a felvízen, aminek morfordinamikai hatása számottevő. A lecsökkenő vízmélység növeli a csúsztatófeszültséget, ami medereróziót okoz. Az erodált mederanyag az alvíz irányába haladó hordalékhullámot indít, ami lokálisan átmenetileg ugyan mederszint emelkedést okoz, de hosszútávon, az új egyensúlyi állapot elérésekor (a hordalékhullám levonulását követően) a teljes folyószakaszon mederszint csökkenést okoz. Az esés érdemben nem változik, a mederszélesség érzékelhető, de nem nagy mértékű növekedése várható. Azt is sikerült kimutatnom, hogy az egyensúlyi állapot megzavarására horizontális és vertikális mederváltozások is indukálódnak, de a vertikális (mederszint változás) változások gyorsabban és jelentősebb mértékben jelentkeznek, mint a horizontális (mederszélesség változás) változások.

A fejlesztett modell paraméterezéséhez, igazolásához és peremfeltételeinek (átvágódások jellemzői, törvényszerűségei) megadásához megbízható adathalmazra, illetve azokban erős kapcsolatokra van szükség. A jövőben tervezem, hogy a Minnesota változásának adatait tovább elemzem és nem pusztán a meanderezési fok változásának trendjét jellemzem, hanem annak szűrését is megpróbálom precízebben, legalább statisztikai alapon leírni. Továbbá, próbát teszek a

Mississippi elmúlt közel másfél évezredére vonatkozó mederváltozási adatainak beszerzésére a dolgozatban említett koreai kutatócsoporttól, akinek tagjaival első témavezetőm kapcsolatban áll. Segítségével a Mississippi folyóra tudnék egy, a jelen dolgozatban bemutatottnál korrektebb modellt felépíteni, a kanyarulatfejlődési adatok vizsgálata alapján pedig a változásokat valósághűen megadni a modellbe peremfeltételként. Ilyen módon lehetőségem nyílna a Mississippi folyó közel másfél évezredes kanyarulatfejlődésének alapos numerikus modellezéssel történő vizsgálatára.

A vizsgálat hazai relevanciáját egyértelműen a Tisza kanyarulatátvágásokkal történő szabályozásának vizsgálatában látom. Mai napig kérdéses, hogy a korabeli kanyarulatátvágások miként hatottak az akkori morfordinamikai állapotra és vajon az azóta eltelt idő alatt beállt-e egy új dinamikus egyensúlyi állapot, vagy még bizonyos szakaszokon a mai napig érezhető annak hatása. Kérdéses továbbá, hogy a tapasztalt mederváltozásokat az egyes beavatkozások (vízlépcső, kanyarulatátvágások, törtésekkel történő hullámtérszűkítés, partfalbiztosítás, stb.) milyen mértékben okozták. Ennek kapcsán a kanyarulatátvágások hatásvizsgálatát célszerű lenne elvégezni a Tisza esetében. Ehhez azonban komoly irodalomkutatás szükséges az 1D modell korabeli állapotára vonatkozó paraméterezéséhez

## Irodalomjegyzék

Berky, B. (2023): Folyók meanderezésének műholdfelvételek alapján történő vizsgálata. BSc diplomadolgozat, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Vízépítési és vízgazdálkodási Tanszék

Dayoung; Chun, Byongsuk (2022): Revitalizing the Harold Fisk 1944 Mississippi River Valley Maps. AGU Fall Meeting 2022 Abstracts, EP52B-0766

Donovan, M., Belmont, P., & Sylvester, Z. (2021). Evaluating the relationship between meander-bend curvature, sediment supply, and migration rates. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 126, e2020JF006058. [https:// doi.org/10.1029/2020JF006058](https://doi.org/10.1029/2020JF006058)

Eke, E., Parker, G., Shimizu, Y., (2014): Numerical modeling of erosional and depositional bank processes in migrating river bends with self-formed width: Morphodynamics of bar push and bank pull, *JGR Earth Surface* Vol. 119. Issue 7., 1455-1483 pp.

Fisk, H. N. (1944): Geological investigation of the alluvial valley of the lower Mississippi River. [U.S. Army Corps of Engineers](#).

Guo, X., Chen, D., & Parker, G. (2019): Flow directionality of pristine meandering rivers is embedded in the skewing of high-amplitude bends and neck cut-offs. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 116(47), 23448–23454.

Nyiri, E. (2020): Folyók dinamikus egyensúlyi állapotát becsülő eljárás kidolgozása és alkalmazása a magyarországi Felső-Dunán, TDK dolgozat, BME-ÉMK, Vízépítőmérnöki szekció

Parker G. (2004): 1D Sediment Transport Morphodynamics with applications To Rivers and Turbidity Currents, e-book, [http://hydrolab.illinois.edu/people/parkerg/morphodynamics\\_e-book.htm](http://hydrolab.illinois.edu/people/parkerg/morphodynamics_e-book.htm)

Schumm, S.A. & Khan, H.R. (1972): Geological Society of America Bulletin Experimental Study of Channel Patterns. *Geological Society of America Bulletin*, 83(6), 1755. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1972\)83](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1972)83)

Schumm, S.A., Khan, H.R., Winkley, B.R. & Robbins, I.G. (1972): Variability of River Patterns. *Nature Physical Science*, 237(74), 75–76. [https:// doi.org/10.1038/physci237075a0](https://doi.org/10.1038/physci237075a0)



Török, G. T., Parker, G., (2021): Numerical investigation of the effect of riparian vegetation on bankfull river morphodynamics, In: AGU Fall Meeting 2021. EP55B-1119p

Wu, C., Wonsuck, K., Junsung, K., Sojung, S., Minsik, K., Duhwan, K., Kyoungwon, K., Jiyoung, L., Yunhyeong, L., Jaehyung, L., Dayoung, J., Byongsuk, C. (2022): Revitalizing the Harold Fisk 1944 Mississippi River Valley Maps, AGU Fall Meeting 2022, held in Chicago, IL, 12-16 December 2022, id. EP52B-0766.

### **Köszönetnyilvánítás**

A dolgozat a Kulturális és Innovációs és Minisztérium ÚNKP-XXX kódszámú Új Nemzeti Kiválóság Programjának a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alapból finanszírozott szakmai támogatásával készült.

A kutatást az MTA Fenntartható Fejlődés és Technológiák Nemzeti Program (FFT NP FTA) támogatta.