



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

Építőmérnöki Kar

Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszék

Folyómedrek egyensúlyi állapotának nagy tér-idő léptékű vizsgálata 1D modellezéssel

Tudományos Diákköri Konferencia 2021

Készítette: Nyiri Emese

Konzulensek: Dr. Török Gergely Tihamér

Pomázi Flóra

Tartalomjegyzék

Absztrakt	3
1. Bevezetés	3
2. Irodalomkutatás	5
2.1. A Dráva Völgy kialakulása	5
2.2. A magyarországi Dráva morfológiai adatai	6
2.2.1. Mederalak.....	8
2.2.2. Görgetett hordalékhozam	13
2.2.3. Görgetett hordalék és mederanyag szemcseméretei.....	14
2.3. Vízrajz	18
3. Modellalkotás	19
3.1. Alapegyenletek	20
3.1.1. 0D modell alapja.....	20
3.1.2. 1D modell összefüggései.....	20
3.2. Modell paraméterezés	24
3.2.1. Szakirodalmi adatok	24
3.2.2. Mederérdesség és a mederellenállás kapcsolata	24
3.2.3. Periodicitás	25
3.3. Modelligazolás	25
4. 1D modellvizsgálatok	28
4.1. Alapmodell, egyenletes vízmozgást feltételezve	29
4.2. Fokozatosan változó szabadfelszín számításba vétele	32
4.3. Aprózódás beépítése a modellbe	36
4.4. Vegyes szemösszetétel vizsgálata	39
4.4.1. A Wilcock modell alkalmazása a vízlépcső előtti időszakban	39
4.4.2. Feltételezve, hogy nem épül vízlépcső.....	43
4.4.3. Wilcock modell alkalmazása 100000 éves tartományra.....	45
4.4.4. Vízlépcső hatásának érzékenységvizsgálata.....	46
4.4.5. Kotrások hatásának modellezése	51
5. Összefoglalás, értékelés	53
6. Ábrajegyzék	56
7. Táblázatjegyzék	57
8. Hivatkozások	58
9. Köszönetnyilvánítás	60
10. Függelék	61

Absztrakt

A folyamok életében számos változás következik be, melyeket befolyásolhat akár természetes folyamat vagy mesterséges beavatkozás is. Ezek a változások több problémát is okozhatnak akár a hajózásban vagy a folyam életközösségének mindennapjaiban. Dolgozatomban főként a Dráva magyarországi szakaszát vizsgálom, ahol a vizsgálatához szükséges adatokat szakirodalmak alapján határoztam meg. A mederfelvételek és eddigi tapasztalatok alapján elmondható, hogy a folyón nem áll fent az egyensúlyi állapot, illetve a medermélyülések és hordalékkúpok mozgása bár kevésbé intenzív mértékben, de ma is jelen vannak a vizsgált szakaszon. Az adatokra alapozva szeretnék felállítani egy morfodinamikai 1D modellt, ahol egy időlépésen belül az áramlási jellemzők számítása alapján a mederváltozás is számításra kerül. A modell akár évszázados léptékben is képes számolni. Ezzel a modellel szeretném meghatározni azt, hogy a Dráva vizsgált szakaszán (Őrtilos – Drávaszabolcs) mikor áll be az úgynevezett egyensúlyi állapot, amire a felvízre telepített vízlépcsőknek jelentős hatása lehet, amit a görgetett hordalék mennyiségi változása alapján szándékozom számításba venni. Az 1D modell lehetőséget biztosít az aprózódás szerepének vizsgálatára is. Szeretném a modellt úgy fejleszteni, hogy ne csak egy adott átlagos szemcsemérettel számoljon, hanem akár vegyes szemösszetételt is figyelembe tudjon venni. Amennyiben sikerül a modellt megfelelően igazolni, úgy számos tervem van a modellvizsgálatokra, illetve a modellfejlesztésekre, pl. kotrás hatásának vizsgálata, vagy a beavatkozások után várható új egyensúlyi állapot kialakulásához szükséges idő becslése.

1. Bevezetés

Dolgozatomban a Dráva folyó magyarországi szakaszának nagy időléptékű morfodinamikai változásait vizsgálom. Szakirodalmak alapján térképeztem fel a múltbéli „érintetlen” állapotát, amelynek segítségével a beavatkozások hatását vizsgáltam a későbbiekben. Mint minden folyónál, a Drávánál is megfigyelhetők morfológiai változások, melyek hatására a víz hol mélyíti medrét és hol építi. Ezeket a változásokat befolyásolhatja emberi beavatkozás is, illetve természetes folyamatok. Hosszabb időléptéket vizsgálva azonban az várható, hogy a mederváltozások végül egy ún. dinamikus egyensúlyi állapothoz formálják a medergeometriát. Az egyensúlyt elérve, továbbra is ellentétes értelmű mederváltozások követhetik egymást, de azok mértéke kiegyenlítik egymást, ezért csak átmenetileg várható a dinamikus egyensúlyi állapottól eltérő medergeometria. A mesterséges tevékenységek, illetve akár a természetes folyamatok kibillenthetik a vizsgált folyószakaszt dinamikus egyensúlyi állapotából, ha azok

jelentősen megváltoztatják a hidrológiai, hordalékháztartási, illetve áramlási jellemzőket. Az említett változások lehetnek előnyösek és kedvezőtlenek is, az utóbbi esetről gondolva itt a hajózás szempontjából az alacsony vízmélység az egyes gázlós szakaszokon, ahol nem biztosított a szükséges merülési vízmélység kisvíz idején. Másik probléma a hajózásnál a szűk mederszélesség, ami jelentős akadályt is okozhat, ezen tevékenység közben. Különböző folyószabályozási műtárgyak beépítésének jelentős hatása van az áramlásra és ezen keresztül a hordalékmozgásra és így végső soron az egyensúlyi medergeometriára is. Akármilyen beavatkozás esetében örökös kérdés, az új egyensúlyi medergeometria és hogy az milyen áramlási jellemzőket alakít ki. A Dráva esetében az egyensúlyi állapotot szeretném a dolgozatomban feltérképezni, de nemcsak a jelenkorit, hanem a múltbéli állapotát is. A folyószakaszt a 20. századi szabályozások kibillentették az egyensúlyából, habár kérdés az is, hogy a szabályozás előtt a dinamikus egyensúlyi állapot fenn állt-e. 20. századi szabályozás alatt elsősorban a vízlépcsők telepítését értem és a dolgozatomban is főként ennek a hatását vizsgálom.

Dolgozatomban nem az egész Drávát vizsgálom, hanem csak a magyarországi szakaszát, így a vízlépcsőknél is azokat vettem figyelembe, amelyek a legnagyobb hatást fejtették ki a vizsgált szakaszra. Az első ilyen vízerőmű 1975-ben épült Varasdon, majd 1989-ben megépült a domborúi vízerőmű is. Ebben a dolgozatomban nem vizsgálom külön-külön mindkét vízlépcső hatását, hanem csak a Varasdi vízerőművét, de fontosnak tartom a későbbiekben a domborúi vízerőmű vizsgálatát is, mert valószínűsíthető, hogy az is nagy hatással van a magyarországi szakaszra. Az első vízlépcső megépítését követően, tehát 1975-től jelentős változások tapasztalhatók a folyószakaszon. A beavatkozás hatására a felső szakaszon medermélyülés kezdődött meg, mely részben az akkori kavicskitermelés miatt és a részben a vízlépcső hordalék visszafogása miatt keletkezhetett. Hazánkban átlagosan 160-180 ezer t/év és a horvátországi oldalon pedig 500-700 ezer t/év volt a kavics-és homokbányászat mértéke. (Forrás: Andrási, 2015) A bányászat eredményeként Órtilos és Vízvár között nagyfokú túlkotrás volt, míg Vízvár és Barcs között mérsékelt. A vízerőművek és a kavicsbányászat együttesen (80-100 cm az elmúlt 50 év távlatát tekintve) medermélyülést mutatott (Forrás: Dráva folyó nagyvízi mederkezelési terv, 2014). A medermélyülés üteme a Vízvár feletti szakaszon intenzívebb, ugyanis ott kb. 2-4 cm/év, ami 50 év távlatát tekintve 1-2 m is lehet. A Vízvár alatti szakaszon, ahol a kavicsbányászat már kisebb hatást fejtett ki, inkább a folyószabályozások okozhatta a süllyedést, ami kb. 0,5-2 cm/év, tehát 50 évet tekintve 0,25-1 m süllyedést eredményez (Forrás: BME VVT, 2020). A kavicsbányászat azóta már befejeződött a természetvédelmi értékek

megőrzése végett. A vízlépcső hatásaként felróható, hogy a visszafogott hordalék miatt a magyarországi felső szakasz folyamatosan mélyült, tehát medererózióról beszélhetünk és ezáltal kisebb esésű szakasz alakult ki. Ahogy az alacsonyabb esésű folyószakasz veszít hordalékszállító kapacitásából, az alsó szakaszokon lerakja a nagyobb szemcséjű hordalékát, amelyet már nem képes tovább szállítani és a meder elkezd töltődni. Amíg Órtilosnál egy átlagos hordalékszemcse 1,275 cm átmérőjű, addig tőle 85 km-re már csak 0,5 cm-es átlagos szemátmérőről beszélhetünk (Forrás: BME VVT, 2019).

A dolgozatomban célja egy korábbi, 2020-ban írt TDK kutatásban megkezdett téma folytatása. Akkor egy 0D modellt dolgoztam ki, amivel folyószakaszok egy-egy szelvényének dinamikus egyensúlyi állapotát tudtam vizsgálni. Az eljárást a magyarországi Felső-Dunára alkalmaztam. Több vizsgálat konklúziója is az volt, hogy sokszor nem elég egy-egy szelvényt külön-külön vizsgálni, hanem azok között kapcsolatot kell teremteni és ilyen módon egy 1D modell építésére van szükség. Ilyen téma például a Felső-Dunán is tapasztalható hirtelen eséstörés vizsgálata a Nagybajcs és Gönyű közötti, alig pár kilométeres szakaszon. Az eséstörés kialakulásának vizsgálata (pl. kialakulásának oka, valamint az egyensúlyi állapot megléte), valamint a mesterséges beavatkozások hatásának számszerűsítése nem lehetséges pusztán 0D modell segítségével. Morfodinamikai szempontból így egy összetett folyamat vizsgálata végezhető el, amit magyarországi viszonylatban 1D morfodinamikai modell segítségével eddig nem műveltek.

Az 1D modellt a korábban kidolgozott 0D modell alapján építettem fel, ami nagy időléptékben is számításba tudja venni az egyensúlyi medergeometria jellemző paramétereit (pl. mederszélesség, vízmélység, vagy esés). Az 1D modell alkalmazása lehetőséget nyújt akár évezredes léptékű természetes folyamatok vizsgálatára, morfodinamikai paraméterek érzékenység-vizsgálatára, valamint sematizált beavatkozások által kiváltott mederváltozások elemzésére. Továbbá, egy ilyen eszközzel pontosabb előrejelzés tehető a várt mederváltozásokra, ami nagyban segítheti környezetvédelmi, élőhelyhidraulikai, társadalmi, turisztikai és gazdasági tárgyú szervek munkáját.

2. Irodalomkutatás

2.1. A Dráva Völgy kialakulása

A pliocén kori fejlődés egyik meghatározó eseménye hazánk vízrajzára nézve a Felső-Duna forrásvidékének elkülönülése volt. Ez a folyamat a svájci Jura hegységnek a Rhone-t és a Dunát elkülönítő kiemelkedésével ment végbe, tehát így a Duna kelet felé irányuló vízrendszere jelent

The map illustrates the geographical context of the Danube River (Duna) and its surrounding regions. Key features include:

- Cities:** Wien (Vienna), Budapest, and Beograd (Belgrade) are marked with dots.
- Rivers:** The Danube (Duna) is the central feature, with tributaries like the Tisza, Maros, and Sáp-Hernád shown.
- Mountains and Hills:** Keleti-Alpok, Kárpátok, Velencei-hg., and various smaller hills like Keszthelyi-hg. and Balaton are labeled.
- Islands and Shores:** Hódmezővásárhelyi-sziget, Kárpát-sziget, and various riverbanks (e.g., Balaton) are indicated.
- Legend:** A solid line represents the 1st boundary, and a dashed line represents the 2nd boundary.

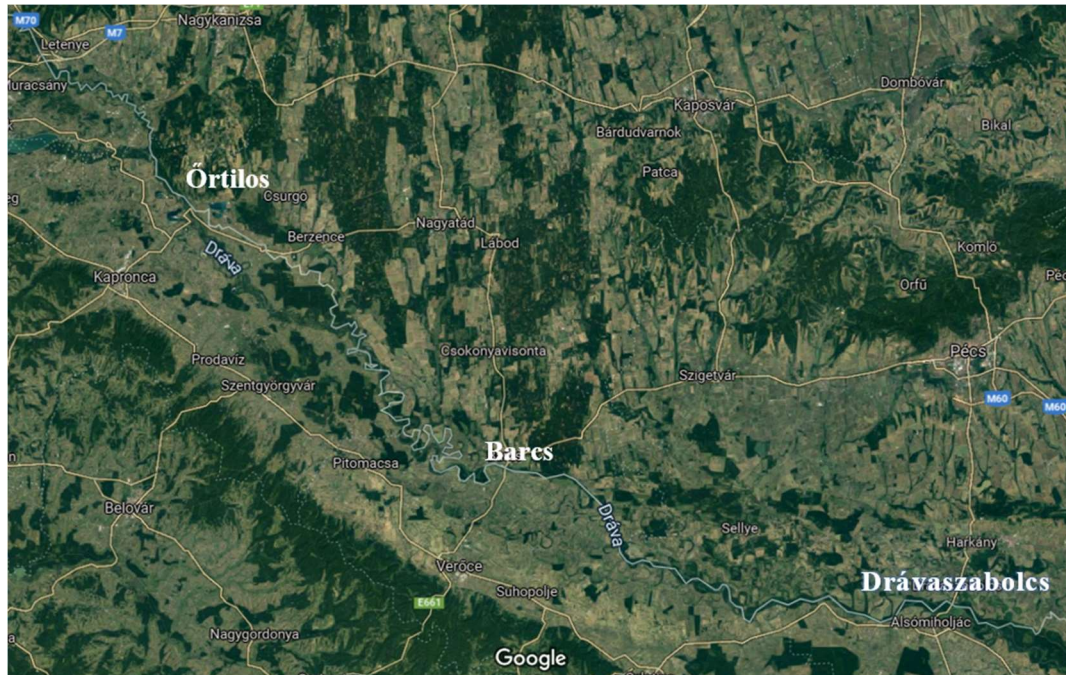
Ezen információk fényében megalapozott az a kijelentés, miszerint a Dráva Völgy homokos talajának kialakulása az Ős-Dunához köthető, ugyanis ezen területek képződésének kezdetét a felső miocén korszakra teszik (ami még a pleisztocén első felében is tarthatott). A pleisztocén középső részére teszik azt, amikor a Duna és a Dráva közötti kapcsolat fokozatosan megszűnt a feltöltődések és a tektonikus mozgások következtében (Forrás: Pécsi 1991, Burján 2002). Ekkorra datálható, hogy az Alpokból érkező, kavicsos medrű Dráva durva hordalékának fokozatos lerakásával elkezdte feltölteni az ekkor még homokos Dráva Völgyét.

2.2. A magyarországi Dráva morfológiai adatai

Az irodalomkutatás során több szakirodalmat és cikket is hasznosítottam. A legtöbb információt a Vízrajzi évkönyvekből vettem, de használtam további forrásokat is (Források: BME VVT, 2020; BME VVT, 2019; Andrási, 2015; Dráva atlasz hossz-szelvényrajz, 1970). Az adatgyűjtés során három szelvényre találtam a dinamikus egyensúlyi állapot vizsgálatához

Az irodalomkutatás során több szakirodalmat és cikket is hasznosítottam. A legtöbb információt a Vízrajzi évkönyvekből vettem, de használtam további forrásokat is (Források: BME VVT, 2020; BME VVT, 2019; Andrási, 2015; Dráva atlasz hossz-szelvényrajz, 1970). Az adatgyűjtés során három szelvényre találtam a dinamikus egyensúlyi állapot vizsgálatához

szükséges adatmennyiséget. A vizsgált szelvények: Őrtilos (235,9 fkm), Barcs (154,1 fkm) és Drávaszabolcs (77,7 fkm). A vizsgált szakasz, azaz Őrtilostól Drávaszabolcsig 158,2 km hosszú.



2. ábra: Vizsgált szakasz helyszínrajza (Forrás: Google Maps, 2021)

Az irodalomkutatás főként a vízlépcsők épülte előtti időszakra irányult, tehát az 1975 előtti medermorfológiai adatok összegyűjtésére. A múltbéli adatokat modellparaméterezésre, valamint modelligazolásra szeretném felhasználni. Továbbá, a folyószabályozási művek megépítése utáni időszakra gyűjtött adatok alapján a beavatkozások hatását szeretném vizsgálni, illetve az adatok fényében becslést tenni akár jövőbeli állapotra is.

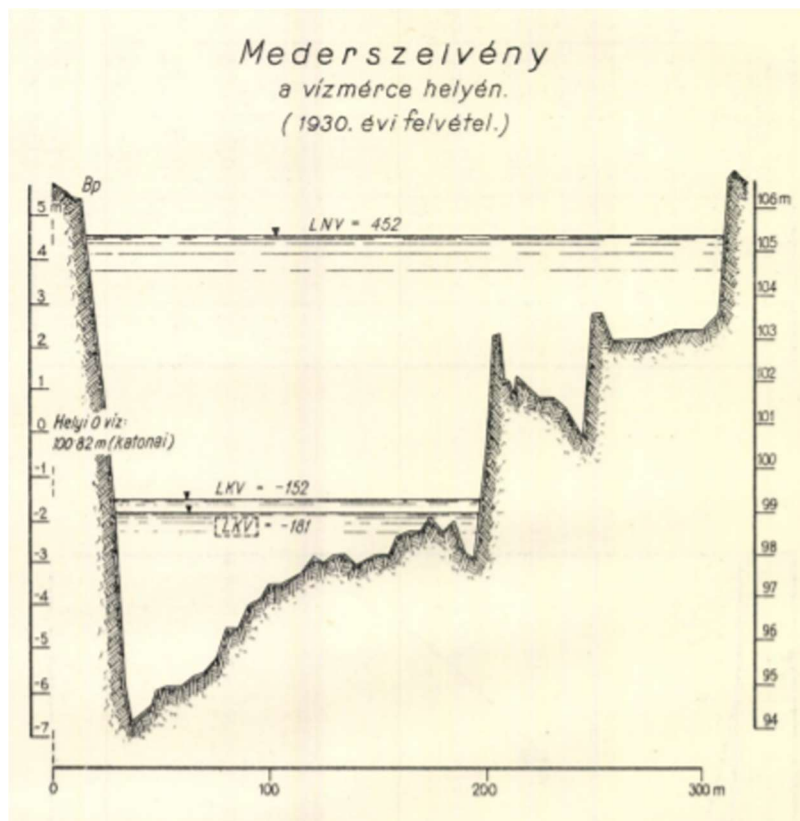
Az irodalomkutatás fő részei:

- Mederalak
 - szelvények
 - szélesség
 - esés
- Görgetett hordalékhozam
- Szemcseméret
 - szelvények jellemző szemcseméretei és szemösszetételi görbéi
- Vízrajz

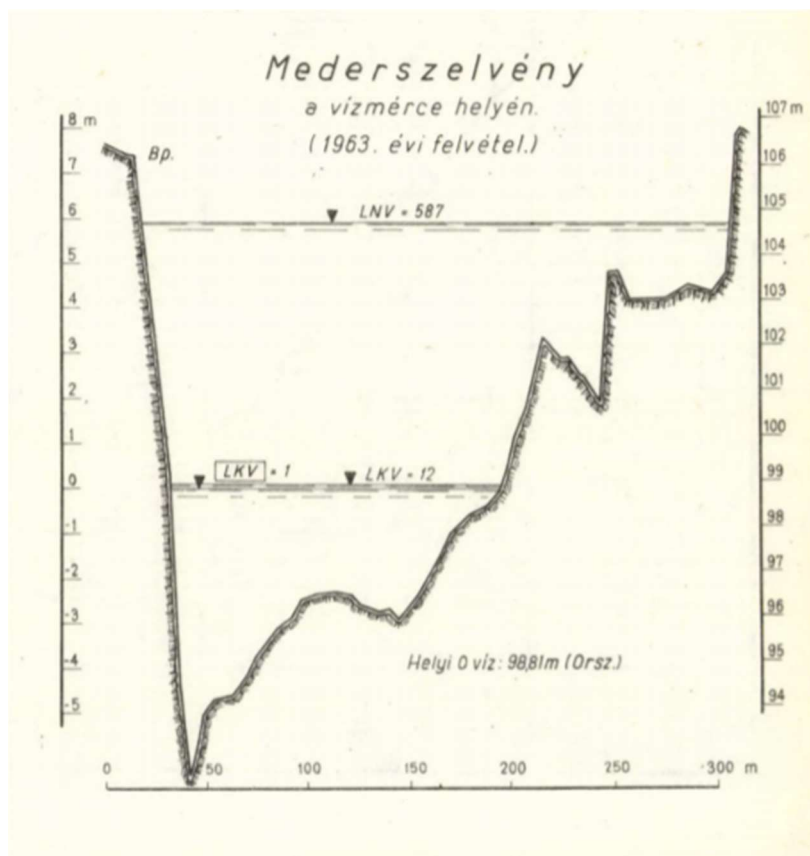
2.2.1. Mederalak

➤ Szelvények

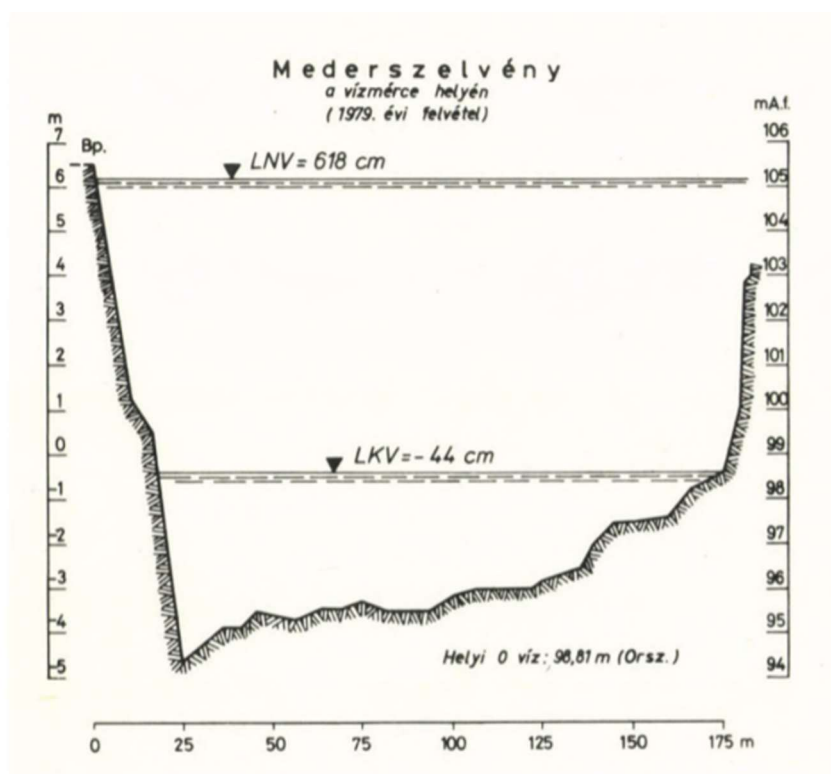
A mederalak vizsgálatához elsősorban a Vízirajzi Évkönyvek mederfelvételeit hasznosítottam. A Vízirajzi Évkönyvek az Országos Vízügyi Igazgatóság honlapján megtalálható digitalizált formában (Forrás: OVF, 2021). Az évkönyveket 1886-2000 között néztem át az adatgyűjtés reményében, azaz összesen 74 évkönyvet. A 3 szelvény közül az évkönyvekben csak Barcsra és Drávaszabolcsra találtam mederfelvételt. Barcsnál a legkorábbi feljegyzés, amit találtam 1930-ban készült. Drávaszabolcsnál az évkönyvekben sajnos nem találtam az első vízlépcső előtti időszakból mederfelvételt, így a legkorábbi az 1995. évi. Az őrtilosi szelvényt tekintve nem volt feljegyzés az évkönyvek alapján, de a (Forrás: BME VVT, 2019) alapján rendelkezésemre állt 1971-es felvétel mindhárom szelvényre, illetve további 2 évi felvétel is szerepel, ahol látszik az évek alatt létrejött morfológiai változás.



3. ábra: Barcs 1930-as mederfelvételi ábrája (Forrás: 1931. évi Vízirajzi Évkönyv)

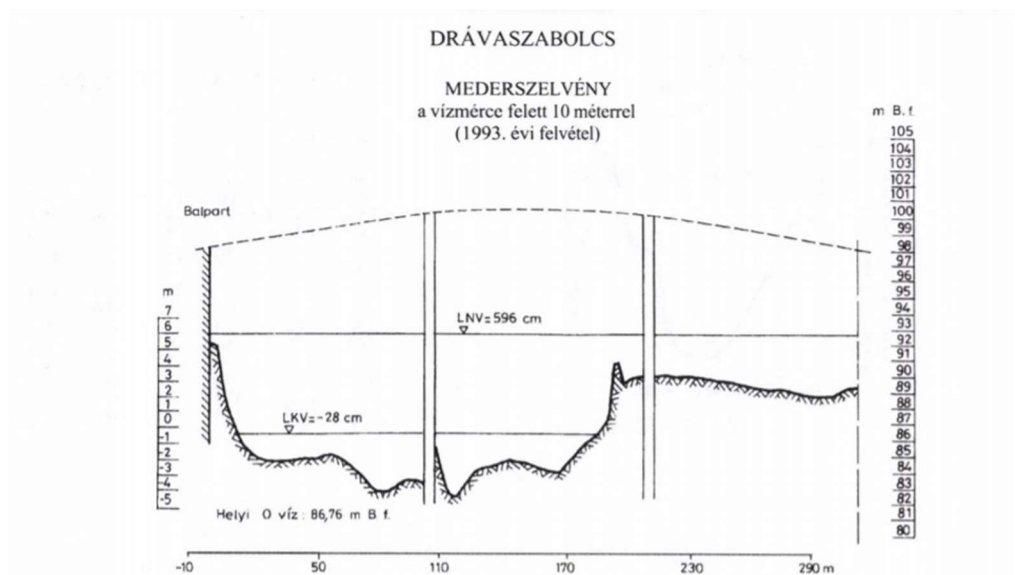


4. ábra: Barcs 1963-as mederfelvételi ábrája (Forrás: 1964. Vízrajzi Évkönyv)



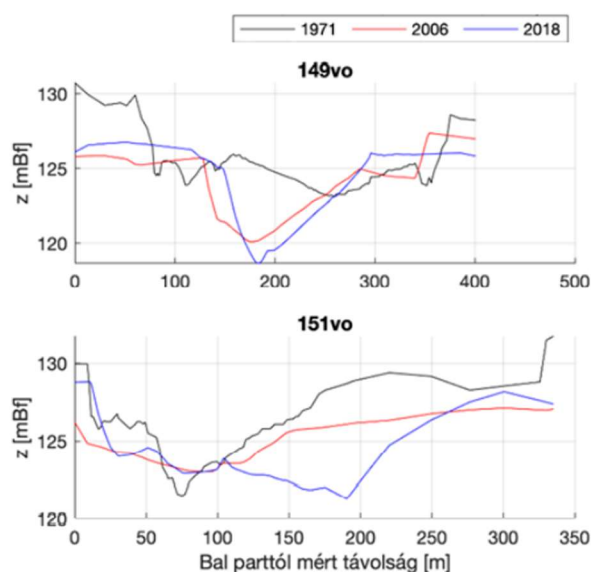
5. ábra: Barcs 1979-es mederfelvételi ábrája (Forrás: 1980. évi Vízrajzi Évkönyv)

A fenti ábrákon látható a 3 különböző évben készült barcsi mederfelvételen, hogy a 33 és 16 év elteltével mennyi változás ment végbe a medergeometriában. A legélesebb változás talán a 1963 és az 1979-es mederfelvétel között látható, ami során szembetűnő mederalakváltozás ment végbe (Az 1979-es évben csak közel 200 m-es szélességben lett felmérve a meder, a hullámtér kihagyásával). Ennek egy lehetséges magyarázata, hogy a két felmérés között 1975-ben egy vízlépcső épült meg. Drávaszabolcsra, mint már említettem az évkönyvekben csak a vízlépcső megépülése utáni állapotról volt feljegyzés.

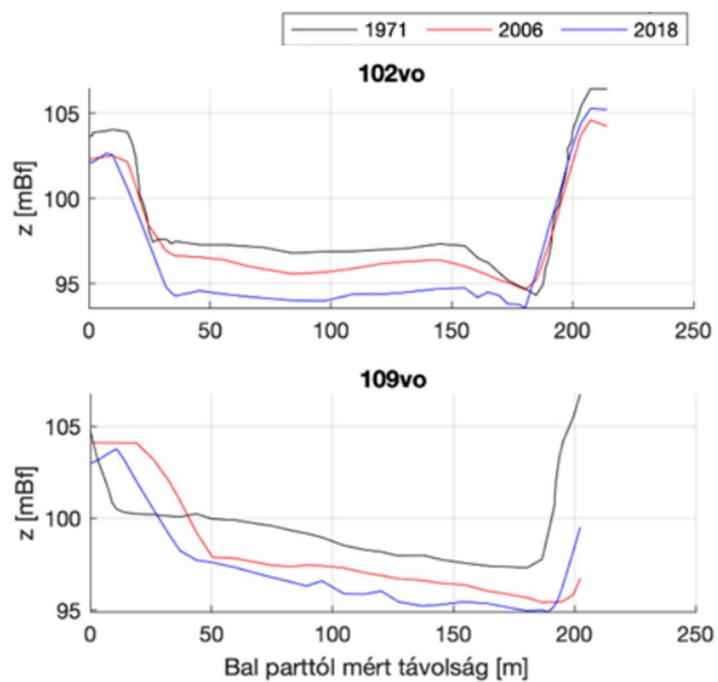


6. ábra: Drávaszabolcs 1993-es mederfelvételi ábrája (Forrás: 1994. évi Vízirajzi Évkönyv)

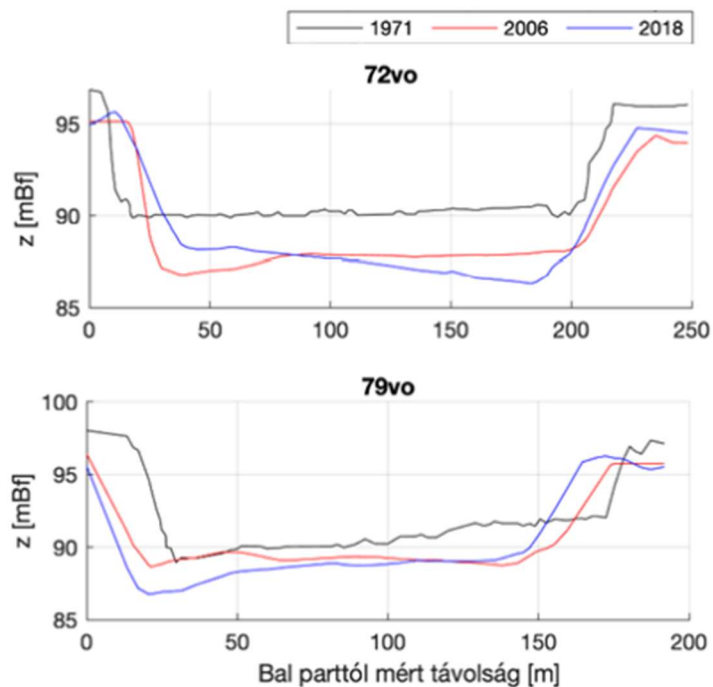
Az összehasonlító mederfelvételek, amelyet a tanszéki jelentésben találtam, a szelvényekre a következők:



7. ábra: Jellemző keresztaszelvények Örtilos környezetében 3 különböző időszakból (Forrás: BME VVT, 2020)



8. ábra: Jellemző keresztmetszvények Barcs környezetében 3 különböző időszakból (Forrás: BME VVT, 2020)



9. ábra: Jellemző keresztmetszvények Drávaszabolcs környezetében 3 különböző időszakból (Forrás: BME VVT, 2020)

A medergeometriák mindhárom szelvényénél látványos változásokat mutatnak a 47 év elteltével. Ez arra enged következtetni, hogy a meder nem volt, illetve feltételezhetően továbbra sincs dinamikus egyensúlyi állapotban.

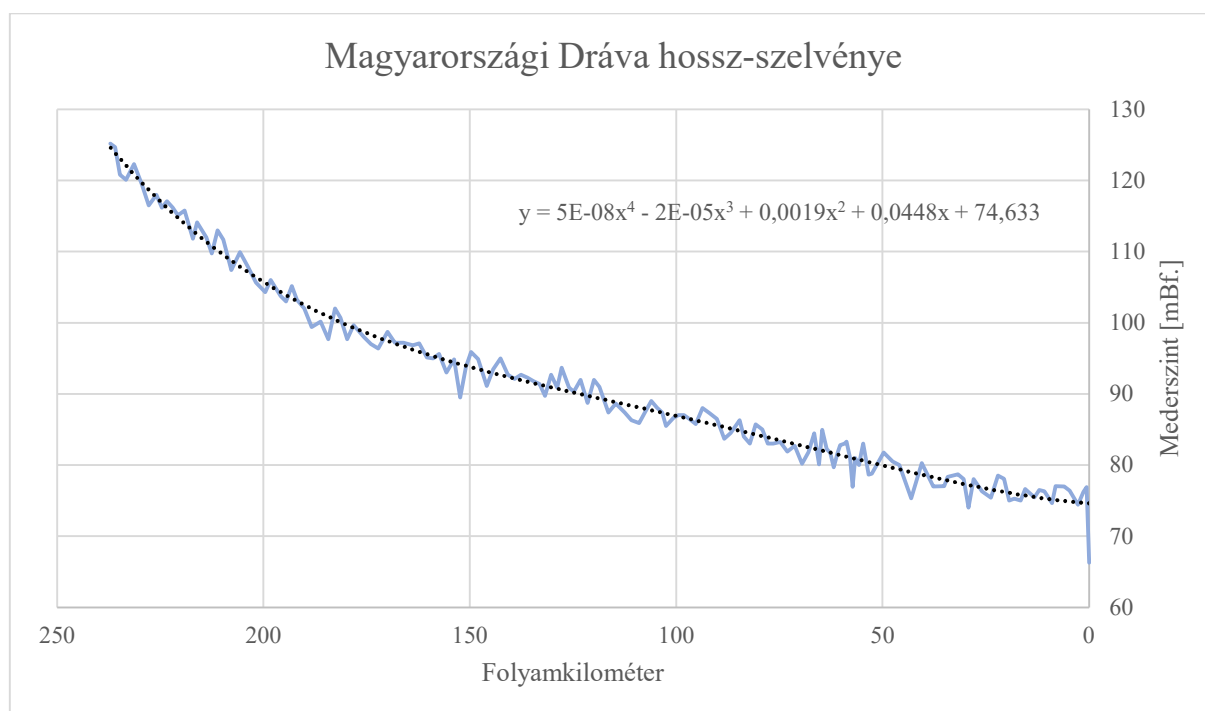
➤ Szélesség

Az előző részben látott mederfelvételek alapján is látható, hogy a vízlépcsők megépülte nem volt nagy hatással a szelvények szélességére. Megállapítottam, hogy a teljes Dráván átlagosan 160 m és 220 m között mozog a mederszélesség, ezen belül az általam vizsgált szelvények között átlagosan 180 m és 200 m közötti értéket vesznek fel. Más szelvényekben ettől sokkal nagyobb szélesség is előfordult. Az ilyen változatos szélesség részben a Dráva ezen szakaszára a korábban jellemző fonatos meanderező jelleggel magyarázható, aminek során a folyó néhol kiszélesedik. Napjainkban, a folyószabályozásnak köszönhetően a fonatos jelleg már nem mondható el, de a vonalvezetés kanyargósna mondható.

A modellezéshez az a szélesség mérvadó, amely a mederkitöltő állapotot jellemzi. A modellvizsgálatok ismertetése alapján látható, hogy téglalap szelvénnel közelítettem a valós geometriát, amit egy adott szélesség jellemez (A téglalap magasságát, vagyis a vízmélységet a modell számolja). Vizsgálataimban az egyes szelvények külön vizsgálatánál (0D modellvizsgálatok, lásd 0D modell alapja fejezet) az adott szelvényre megállapított szélességgel tudtam számolni. Szakaszléptékű vizsgálataim során azonban egy átlagos szélességgel dolgoztam (1D modellvizsgálatok, lásd 1D modell összefüggései fejezet). Ez azt eredményezte, hogy szakaszléptékű vizsgálataim során egy átlagos 185 m szélességű medret feltételeztem. A szelvények külön-külön történő vizsgálatai során a következő szélességeket vettem fel: Őrtilosnál 185 m, Barcsnál 180 m, míg Drávaszabolcsnál 200 m.

➤ Esés

A múltbéli esés megállapítására több forrásból származó adat is rendelkezésemre állt. Fontos megemlíteni, hogy a vízlépcső megépülte előtt hozzávetőlegesen Vízvárnál egy eséstörés jött létre. Vízvár felett a szakirodalmak szerint 45-50 cm/km-es esésű szakasról beszélhetünk, amely a hegyek felé közeledve egyre meredekebb, így Őrtilos környékén akár 50 cm/km feletti esést is meghaladhatta a folyó. A Vízvár alatti szakaszon hirtelen eséscsökkenés jött létre, amely Barcsnál 15 - 20 cm/km közötti tartományra becsülhető, illetve Drávaszabolcsra már csak 10 - 15 cm/km közöttire tehető, de egyes szakirodalmak szerint akár a 7 cm/km-es esés is elképzelhető azon a részen. (Forrás: Andrási, 2015)



10. ábra: Dráva hossz-szelvény (Forrás: Dráva atlasz, 1970)

2.2.2. Görgetett hordalékhozam

A vízlépcső megépülése előtti és utáni görgetett hordalékhozamok vizsgálatából kitűnik, hogy a vízlépcsők megépítésének jelentős hatása volt a hordalékháztartásra (Forrás: BME VVT, 2019). Barcsra és Drávaszabolcsra találtam éves hordalékhozam adatot még a beavatkozás előtti időszakról, de Őrtilosnál sajnos csak a vízlépcső megépülése után volt hordalékhozam-mérés. Az őrtilosi szelvényre egy becslés segítségével sikerült megadni a múltbéli hozamadatokat, amellyel a számításaimat is végeztem. A becslés folyamán először az 1986 után mért hordalékhozam adatok átlagát vettem, azzal a feltétellel élve, hogy 1975-től is elmondható ez a hordalékhozam átlagosan. Következő lépésként a lebegtetett hordalékhozam adatokat átlagolva egy arányt állítottam fel a görgetett hordalékkal azon időszakban, amelyben már volt görgetett hordalékhozam mérési adataim. Ezt az eljárást szakirodalmi következtetésből készítettem el. (Forrás: Bonacci, 2019) Erre az arányra azért volt szükség, ugyanis a lebegtetett hordalékra már a vízlépcső megépülése előtt is van már adat. Feltételezve, hogy a görgetett hordalék és a lebegtetett hordalék közötti arány állandó, így ezzel a feltétellel élve a múltbéli lebegtetett hordalékhozam adatokból meghatározható a görgetett hordalékhozam is. A vizsgált őrtilosi szakaszon a mederszintnél 1938 és 1960 között medersüllyedés volt megfigyelhető, de az utolsó évtizedet nézve (2011-től) 3,71 cm/év-es feltöltődés volt tapasztalható. A feltöltődés térfogatba átváltva majd a számolt hosszértékkel leosztva az eddig számolt görgetett hordalékhozamhoz

adódott hozzá. Ennek a becslésnek feltétele továbbá még, hogy a Murán nem volt beavatkozás és a feltöltődés szempontjából csak a Dráváról érkező hordalék a mérvadó. A hordalékszállítás Botovo/Örtilostól Vízvárig csökken, majd Vízvártól növekszik és Drávaszabolcsnál lesz a legmagasabb.

A szakirodalmak alapján a beavatkozás előtt Barcsnál a hozam 83000 t/év és Drávaszabolcsnál pedig 206000 t/év. (Forrás: Andrási, 2015)

2.2.3. Görgetett hordalék és mederanyag szemcseméretei

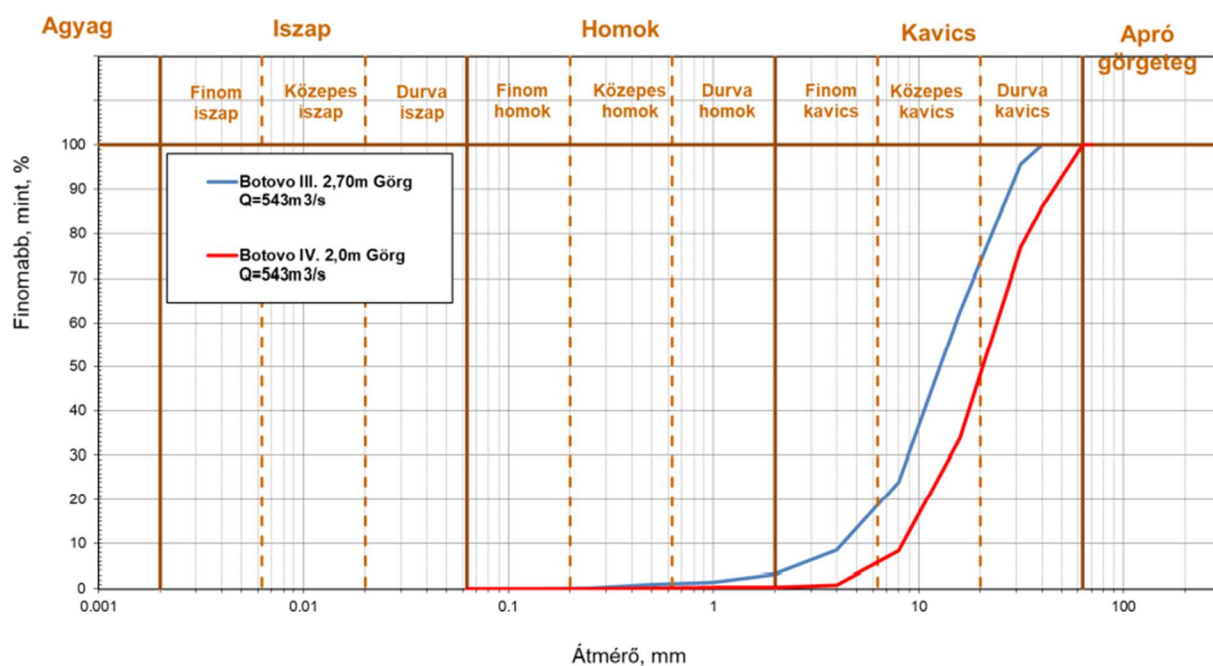
➤ Szelvények jellemző szemcseméretei és szemösszetételi görbéi

A vizsgált szakaszon Örtilosnál még az Alpokból érkező durvább frakciókban gazdag hordalék figyelhető meg. Ezt követően a vízvári eséstörés környezetéig ezeket a durvább szemcséket a folyó lerakja, amellyel épül a meder. Az alsó szakaszokon már egészen finom szemösszetétel tapasztalható. A modellvizsgálataim során a D_{50} -es jellemző szemcsemérettel, tehát az átlagos szemátmérővel, illetve szemösszetételi görbék alkalmazásával is számoltam. A szakirodalmak alapján a 3 szelvényre a következő szemátmérő tartományokat találtam (a szakirodalmi források alapján azzal a közelítéssel éltem, hogy a meder- és hordalék szemösszetétel megegyezik):

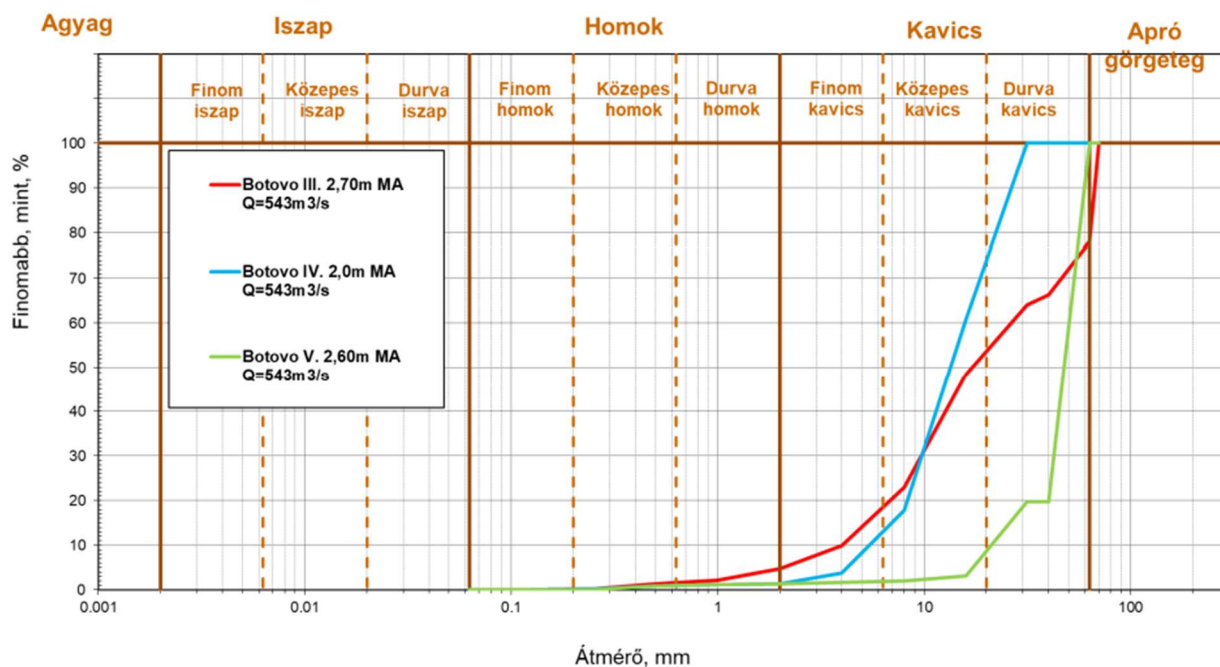
- Örtilos: 10-20 mm átlagos szemátmérőjű kavics
- Barcs: átmeneti szakasz, ahol 0,5-5 mm között változik az az átlagos szemátmérő
- Drávaszabolcs: teljesen homogén 0,35 mm átlagos szemátmérőjű homok

A vegyes szemösszetétel figyelembevételéhez szükséges volt a befolyási (örtilosi) görgetett hordalék és mederanyag szemösszetételi görbéire, illetve a kifolyási szelvény (drávaszabolcsi) görbéire. A szakirodalmi kutatások alapján a vízlépcső előtti állapotra jellemző szemcseméretet találtam a szelvényeimre, de szemösszetételi adatokat nem. A vizsgálataim során azzal a feltételezéssel kellett élnem, hogy a hordalék- és mederanyag szemösszetétele a vízlépcső telepítése óta lényegileg nem változtak. A vegyes szemösszetétel jellemzéséhez szükséges szemösszetételi görbéket a 2018-as mérési adatokból vettem, ahol 3 különálló időpontban is van mérési adat. (Forrás: BME VVT, 2019)

➤ Örtilos

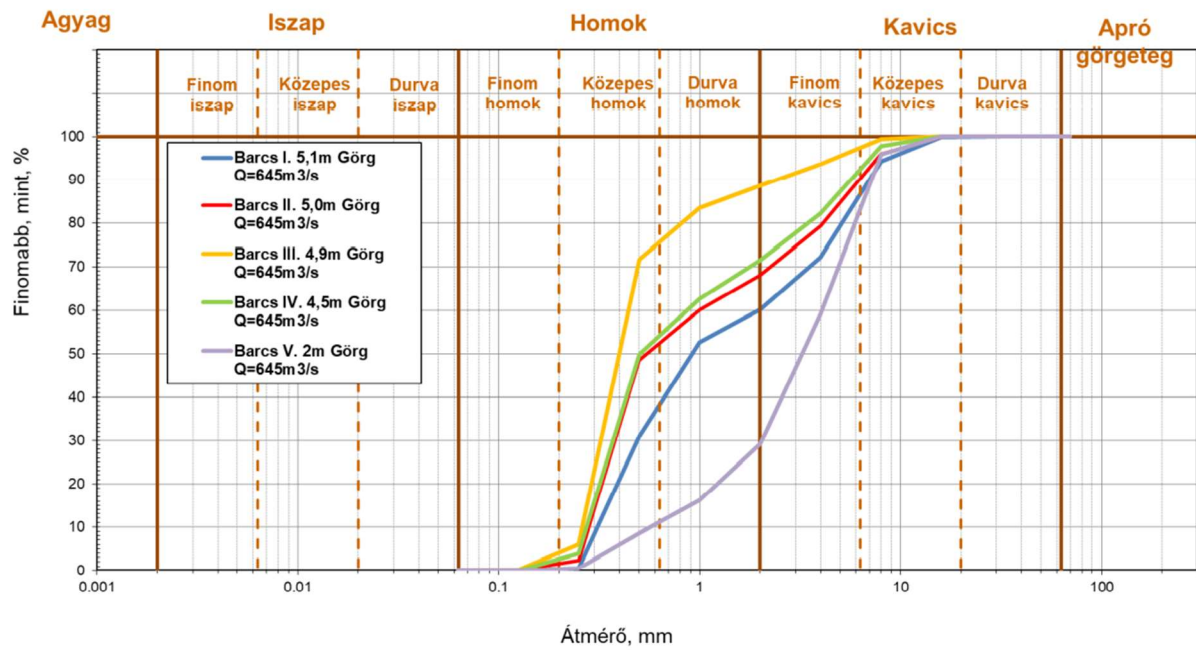


11. ábra: Örtilos gőrgőteg hordalék szemeloszlási görbe (Forrás: BME VVT, 2019)

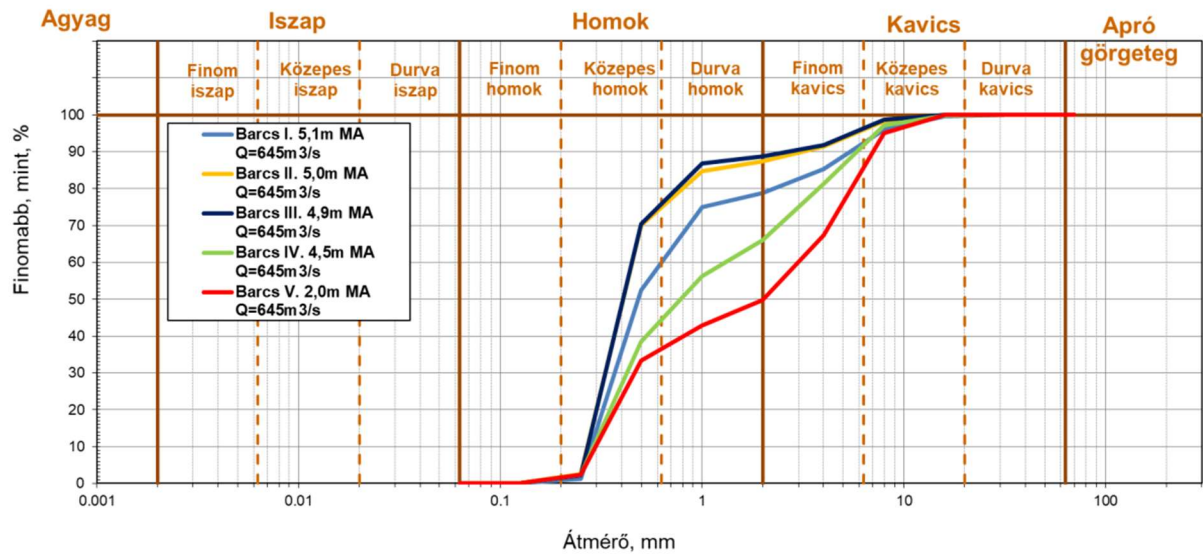


12. ábra: Örtilos mederanyag szemeloszlási görbe (Forrás: BME VVT, 2019)

➤ Barcs

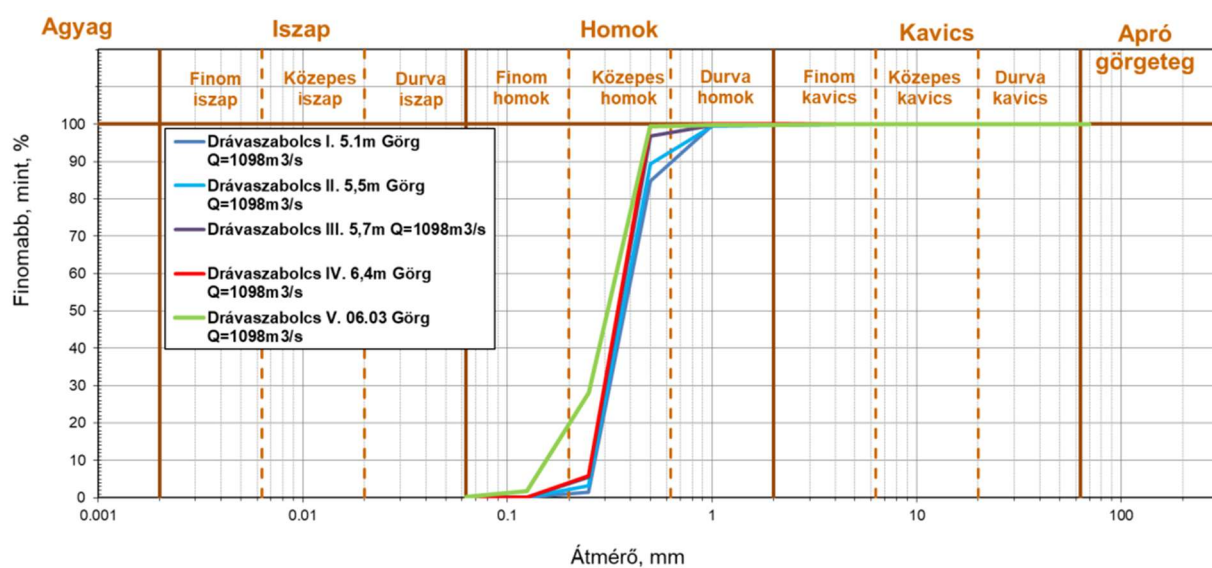


13. ábra: Barcs gőrgetett hordalék szemeloszlási görbe (Forrás: BME VVT, 2019)

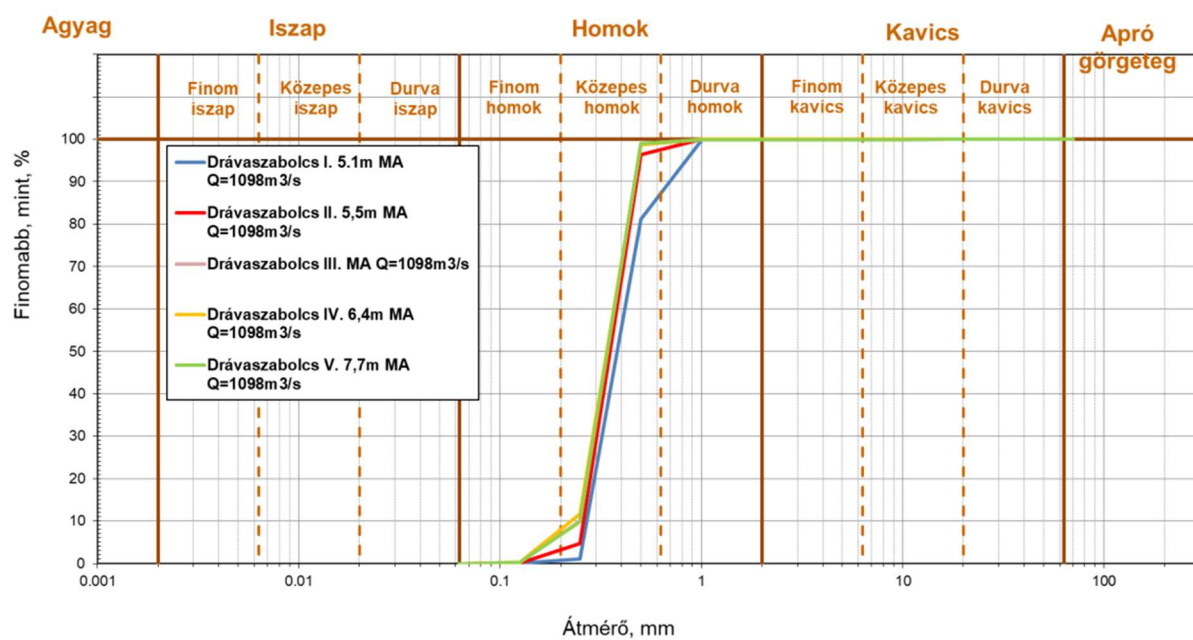


14. ábra: Barcs mederanyag szemösszetételi görbe (Forrás: BME VVT, 2019)

➤ Drávaszabolcs



15. ábra: Drávaszabolcs görgetett hordalék szemeloszlási görbe (Forrás: BME VVT, 2019)



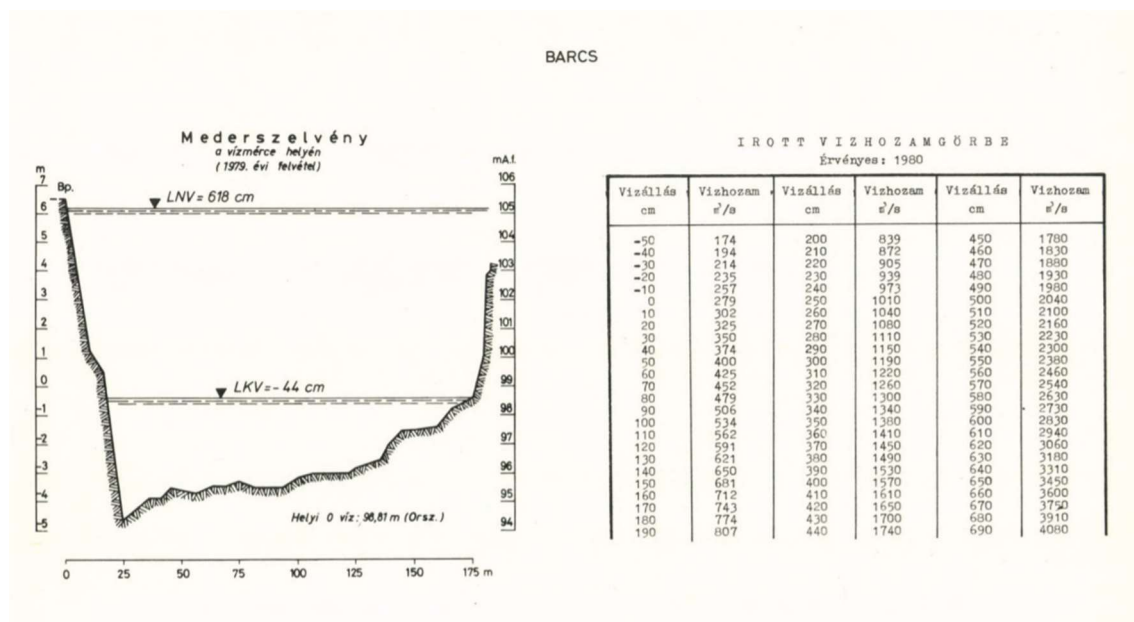
16. ábra: Drávaszabolcs mederanyag szemeloszlási görbe (Forrás: BME VVT, 2019)

2.3. Vízrajz

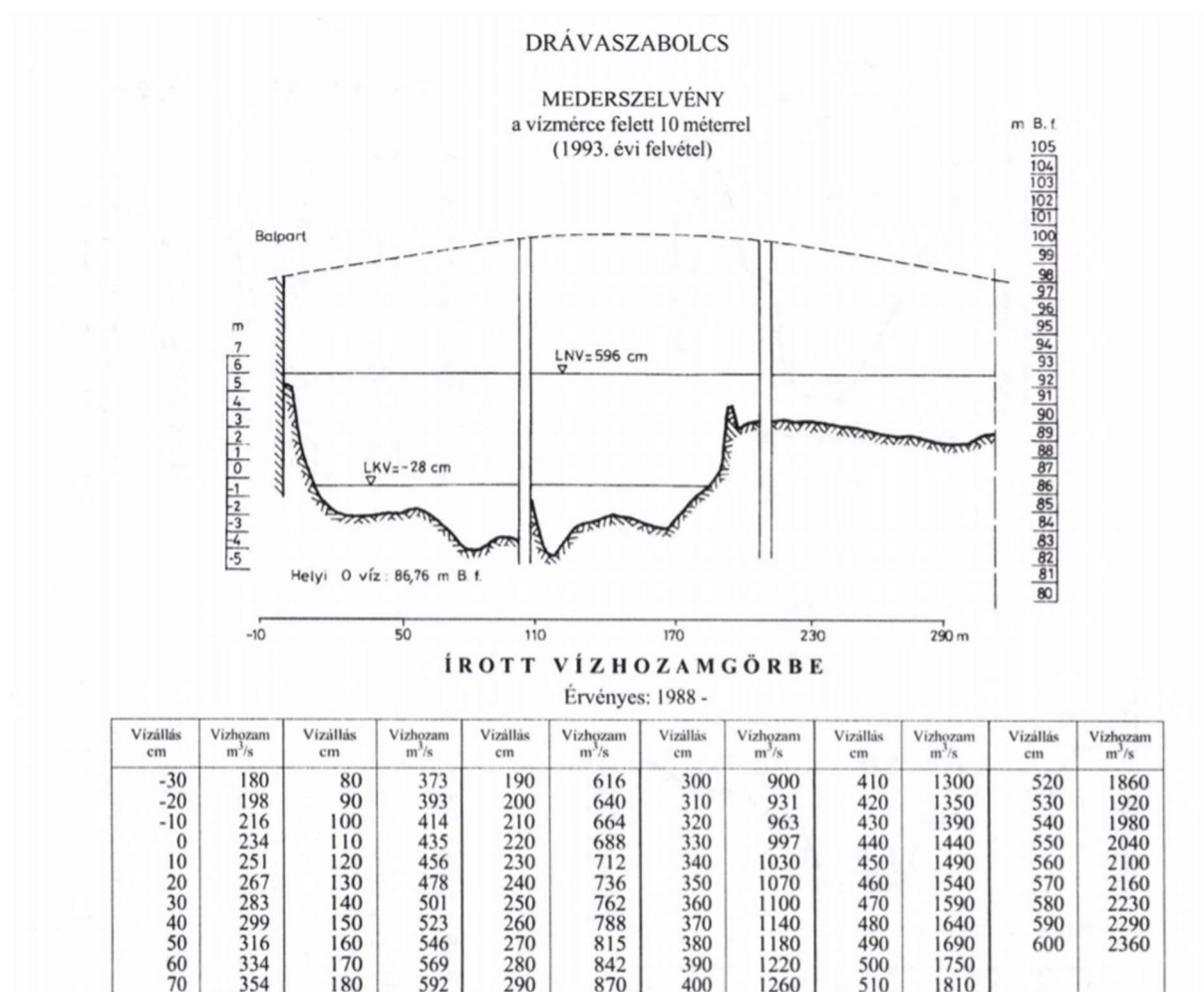
A kutatásomban a medergeometriai paraméterek mellett még szükség van hidrológiai adatokra is. Számításaim során alkalmaznom kellett a mederkitöltő állapothoz tartozó vízhozam meghatározására. Barcsra és Drávaszabolcsra megtaláltam az ottani vízmércék Q-H görbéinek összetartozó értékpárjait a Vízrajzi évkönyvekből. Szakirodalmak és a mederfelvételek alapján megállapítható a mederkitöltő vízszint, amelyből a Q-H görbék alapján leolvasható a hozzárendelt vízhozam érték is. Őrtilosra a 2018-as tanulmány Q-H görbéje alapján vettem fel a vízhozamot. A mederkitöltő vízhozamok kapcsán azzal a kezdeti feltételezéssel éltem, hogy azok a vizsgált időszak során érdemben nem változtak.

A források alapján az alábbi mederkitöltő vízhozamokat határoztam meg: Őrtilos: 240 cm, Barcs: 420 cm Drávaszabolcs: 500 cm

Az adatok alapján látható, hogy a mederkitöltő vízhozam folyásirányban csökken. Bár ezt a viselkedést nem vizsgáltam részletesen, egy lehetséges magyarázatnak az ár hullám ellapulását gondolom (Forrás: Use of hysteresis for defining the nature of flood wave propagation in natural channels (tandfonline.com)).



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



18. ábra: Drávaszabolcs 1993-es mederfelvétel és a vízálláshoz tartozó vízhozamai (Forrás: 1994. évi Vízrajzi Évkönyv)

3. Modellalkotás

A dinamikus egyensúlyi állapothoz először az előző TDK dolgozatomban felépített 0D modellt (Forrás: Nyiri, 2020) fejlesztettem tovább 1D modellre. Tulajdonképpen amíg a 0D modell csak egy adott szelvényre számította az egyensúlyi állapotot, addig az 1D modell már egy egész szakaszra végzi el a számítási lépéseket, kapcsolatot teremtve a szomszédos szelvények között. Az 1D modell egy folyásirányban változó modell, amely a térbeli és időbeli változásokat is képes számolni. Tehát például az egyensúlyi állapot beálltához szükséges idő vizsgálatára is alkalmas vizsgálati eszközről beszélünk. A modellt Matlab programban írtam meg és futtattam a programkódot. A programozáshoz alkalmazott megközelítést és egyszerűsítéseket Gary Parker professzor online jegyzetei alapján tettem meg (Forrás: Parker, 2004). Első lépésként az előző TDK-mban már részletesen bemutatott 0D modellvizsgálatokat végeztem el, hogy az eredmények támogassák az 1D modell paraméterezését.

3.1. Alapegyenletek

3.1.1. 0D modell alapja

A 0D modell összefüggései az 1D modell szerves része. A 3 egyenletből álló egyenletrendszer az egyensúlyi állapot számítását írja le (Forrás: Parker, 2004).

- Folyadékra vonatkozó folytonossági egyenlet

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

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

- Impulzus egyenlet

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

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

- Hordalékra vonatkozó folytonossági egyenlet

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

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

3.1.2. 1D modell összefüggései

- Hidrodinamikai összefüggések

a. Permanens, egyenletes vízmozgás esetén:

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

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

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

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

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

b. Permanens, fokozatosan változó vízmozgás esetén:

Ezzel az egyenlettel már a visszaduzzasztás, vagy leszívás is figyelembe vehető. Fokozatosan változó vízmozgásról beszélünk, ha az energiavonal (a vízfelszín esésével közelíthető) esése eltér a mederfenék esésétől. A vízmélységváltozást a Bernoulli egyenlet segítségével vezethető le. A fokozatosan változó vízmozgás egyenlete:

$$\frac{\partial H}{\partial x} = \frac{S - S_f}{1 - Fr^2} \quad (5)$$

Az egyenletben az S_f az energiavonal esése. Az egyenletben az Fr jelöli a Froude-szám értékét, ami egy dimenziómentes szám és a következőképpen lehet kiszámítani:

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

A fokozatosan változó vízmozgás egyenletét a predictor-korrektor sémával diszkrétizáltam, az alábbi módon (Forrás: Parker, 2004):

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

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

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

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

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

➤ Hordalékmozgás

a. Csúsztatófeszültség számítása

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

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

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

b. Aprózódás

Az aprózódás mértékét a Düll-féle kopási törvényt alkalmazva határoztam meg a vizsgált szakaszon. (Forrás: Bogárdi, 1955)

A hordalék fajsúlyát $2,60 \text{ g/cm}^3$ vettem fel, a $D [\text{cm}]$ átmérőjű hordalék kezdeti súlyának meghatározása (G'_0):

$$G'_0 = \frac{\pi * D^3}{6} 2,6 \quad (13)$$

Kopási együtthatónak hasonlóan a Dunához $k=0,031$ értékkel számoltam. Az egyenletben a számolt szakaszhosszt L változóval jelöltem, amely km-ben értendő. G' értéként szerepel az adott hosszon kopott hordalékszemcse súlya.

$$G' = (G'_0)^{0,45} - 0,45 * 0,031 L)^{1/0,45} \quad (14)$$

Utolsó lépésként a már kopott szemcse súlyát kell átszámolni a hordalék átmérőre.

$$D_{apr} = \left(\frac{G'_6}{2,6\pi} \right)^{1/3} \quad (15)$$

c. Hordalékhozam számítása

A hordalékhozam számítása a vizsgált szakasz esetében nem ugyanazon a módon történik mindhárom szelvényben. A transzportmodellek alkalmazásánál figyelembe kellett venni a görgetett hordalék szemcseméretét, mivel az egyes hordaléktranszport-modellek eltérő szemcseméret-tartományra lettek kidolgozva. Az őrtilosí és barcsi szelvényre Wong és Parker transzportmodelljét alkalmaztam, mert az kavicsos frakciókra van kidolgozva. Habár Barcs már az átmeneti állapotban van ($D_{50} = 0,5 \text{ cm}$) az őrtilosí durva ($D_{50} = 1,275 \text{ cm}$) és a drávaszabolcsi ($D_{50} = 0,035 \text{ cm}$) finom mederanyag között, de a Wong és Parker modelltől - annak alkalmazhatósági korlátai alapján - még megbízható számolás várható (Forrás: Wong és Parker, 2006). Drávaszabolcsnál teljesen más helyzet áll fenn, hiszen egészen finom homok frakciókról

beszélünk, tehát nem alkalmazhattam itt ugyanazt a hordaléktranszport-modellt. Drávaszabolcsra a Meyer Peter és Müller transzportmodelljét használtam, amelytől megbízható becslés várható a szóban forgó görgetett hordalék esetén (Forrás: Peter-Meyer, 1948).

A fajlagos hordalékhozam minden esetben az alábbi összefüggéssel számítható ki:

$$q_b = q_b^* \sqrt{RgDD} \quad (16)$$

A q_b^* a dimenziómentes fajlagos hordalékhozam. Számítására számos hordaléktranszport-modellt publikáltak (Forrás: Garcia, 2008). A szakirodalomban megtalálható összefüggéseket terepi, illetve laboratóriumi mérések alapján dolgozták ki, vagyis tapasztalati és féltapasztalati összefüggésekről beszélünk. A hordaléktranszport-modellek a dimenziómentes fenék-csúsztatófeszültség és a kritikus fenék-csúsztatófeszültség ismeretében adnak becslést a hordalékhozamra. Wong és Parker modellje 3,21 mm - 28,65 mm-es szemcseméret tartományra alkalmazható. A modell a következő összefüggést adja:

$$q_b^* = 3,97 * (\tau^* - \tau_c^*)^{3/2} \quad ; \quad \tau_c^* = 0,0495 \quad (17)$$

A Drávaszabolcsnál alkalmazott összefüggés, amely Meyer Peter és Müller hordaléktranszport-modelljére épül a következően számítja a dimenziómentes fajlagos hordalékhozamot:

$$q_b^* = 4,93 * (\tau^* - \tau_c^*)^{1,6} \quad ; \quad \tau_c^* = 0,047 \quad (18)$$

A dimenziómentes csúsztatófeszültséget minden szelvény esetében az alábbi összefüggéssel számíthatjuk:

$$\tau^* = \frac{\tau_b}{\rho g R D} = \frac{HS}{RD} = \frac{C_f U^2}{RgD} \quad (19)$$

➤ Mederváltozás számítása

A hidrodinamikai eredmények alapján minden egyes cellában számítható a hordalékhozam. Egy adott cella mederváltozását az azt megelőző szelvény és az azt követő szelvény cellájára számított hordalékhozamok különbsége alapján számítottam ki, amelyhez az Exner egyenletet alkalmaztam (Forrás: Parker, 2004).

$$(1 - \lambda_p) * \frac{\partial \eta}{\partial t} = \frac{\partial q_b}{\partial x} \quad (20)$$

1D modell számítás lépései:

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

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

1. Vízmélység számítása: (4)-es, vagy (10)-es egyenlet
 - Egyenletes vízmozgás esetén a kifolyási szelvénytől visszafelé haladva
2. Dimenziómentes csúsztatófeszültség számítása: (19)-es egyenlet
3. Hordalékhozam számítása: (16)-os egyenlet alapján
4. Mederszintváltozások számítása: (20)-as egyenlet alapján

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

3.2. Modell paraméterezés

3.2.1. Szakirodalmi adatok

A modell paraméterezéséhez a legtöbb adat a szakirodalmi forrásokban tatáltam. Ezeket az adatokat az alábbi táblázatba foglaltam össze:

1. táblázat: 1975 előtti paraméterek

	Órtilos	Barcs	Drávaszabolcs
Mederkitöltő vízhozam Q_{bf} [m ³ /s]	2100	1970	1710
Mederszélesség B [m]	185	180	200
Mederesés S [cm/km]	45-50<	20-15	15-10
Éves hordalékhozam $Q_{b,éves}$ [t/év]	186000	83000	206000
Hordalékszemcse méretek D_{50} [mm]	12,75	5	0,35
Periodicitás I [-]	0,05	0,05	0,05

3.2.2. Mederérdesség és a mederellenállás kapcsolata

Dimenziómentes mederellenállási tényező (C_f) értékét Parker 1991-ben publikált összefüggése alapján becsültem (Forrás: Parker, 1991).

$$C_z = 8,1 \left(\frac{r_b}{k_s} \right)^{1/6} \quad (21)$$

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

$$C_z = C_f^{-1/2} \quad (22)$$

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

$$k_s = 2 * D_{90}, \text{ ahol} \quad (23)$$

D_{90} az a szemcseméret, aminél a hordalékszemcsék 90%-a kisebb. Értékére pontos adat nem állt rendelkezésemre, de az irodalomkutatásom alapján az átlagos és maximális szemátmérők alapján a $D_{90} = 2D_{50}$ összefüggéssel közelítettem. Az alkalmazott összefüggésben változóként szerepel a vízmélység, aminek értékei ismeretlenek. A dimenziómentes mederellenállási tényező értékét még a 0D modell az egyenletrendszer megoldásával, iterációval számította ki. A C_z és C_f érték meghatározását követően az alapmodellt kellett átírni úgy, hogy az a C_z értékkel számoljon. Ez a változás csak a vízmélységek számítását érintette, így már ha C_z érték áll rendelkezésre, akkor külön átalakítás nélkül a modell már ezzel az értékkel is tud számolni.

3.2.3. Periodicitás

Ismétlésképpen, a periodicitás (I) azt mutatja meg, hogy a mederkitöltő vízhozamnak az év mekkora részében ($0 \leq I \leq 1$) kell jelen lennie ahhoz, hogy az a valós (mért) éves hordalékmennyiséget szállítsa úgy, hogy az év hátralevő részében ($1 - I$) elhanyagolhatóan kicsi hordalékmozgást feltételezünk. Az szelvényekre a periodicitás mértékét a tanszéki tanulmány tartóssági görbéi, illetve árvízi görbéi alapján határoztam meg.

3.3. **Modelligazolás**

Először a 0D modellt kellett igazolnom, hiszen az 1D modellem ráépül. A 0D modellt esés alapján szeretném igazolni. A szakirodalmak alapján mindhárom szakaszra rendelkezésem állnak bizonyos eséstartományok, ami Örtilosnál 45-50 cm/km között mozog, de akár 50 cm/km-es esést is meghaladhatta, a modellben én 50 cm/km feletti esést vártam, mert a Drávaatlasz hossz-szelvény vizsgálata alapján is hozzávetőlegesen 52 cm/km körüli esést

kaptam, illetve a későbbi vegyes szemösszetételi vizsgálataimban ennek lesz még jelentősége. Barcsra a szakirodalmak alapján 20 cm/km és 15 cm/km között várható a korabeli mederesés. Drávaszabolcsnál várható a legalacsonyabb esésérték, amely az irodalmak alapján 15 cm/km és 10 cm/km közötti értékre tehető fel.

Az *Irodalomkutatás* című fejezetben már ismertettem, hogy a 0D modellben az Örtilos alatti szelvény szélességgel számolok, hiszen ott a meder szabályosabb formát vesz fel, illetve közelítőleg téglalap szelvénynek mondható, az 1D modellben ez már nem hasznosítható, hiszen egy egész szakaszt számol, ahol előnyösebb olyan szélességgel számolni, amely átlagosan jellemző a szakaszra.

➤ Örtilos számítások

2. táblázat: Örtilos, peremfeltételek

Q [m ³ /s]	2100
B [m]	310
Cz [-]	15,25
D [m]	0,01275
Qb [t/év]	186000

A táblázatban látható változók fix paraméterek, amelyekkel a számításokat vezettem végig.

Az *Alapegyenletek* című fejezetben ismertetett egyenletrendszert végig vezetve az adataimból meghatároztam az ismeretlen változókat.

3. táblázat: Örtilos, számított értékek

S [-]	0,000533
U [m/s]	2,02
H [m]	3,35
τ^* [-]	0,08502

➤ Barcsi számítások

4. táblázat: Barcs, peremfeltételek

Q [m ³ /s]	1970
B [m]	180
Cz [-]	19,4
D [m]	0,005
Qb [t/év]	83000

5. táblázat: Barcs, számított értékek

S [-]	0,000177
U [m/s]	1,93
H [m]	5,68
τ^* [-]	0,12202

➤ Drávaszabolcsi számítások

A drávaszabolcsi számítások annyiban térnek el, hogy a hordalékszemcse már a finom homokos frakcióba sorolható, így a Wong és Parker hordaléktranszport-modellje nem ad megfelelő eredményeket, ezért erre a szelvényre Meyer Peter és Müller transzportmodelljét használtam.

6. táblázat: Drávaszabolcs, peremfeltételek

Q [m ³ /s]	1710
B [m]	200
Cz [-]	20
D [m]	0,00035
Qb [t/év]	206000

7. táblázat: Drávaszabolcs, számított értékek

S [-]	0,000126
U [m/s]	1,619
H [m]	5,281
τ^* [-]	1,15660

➤ 0D modell következtetések

A szelvények hordalékhozamai között nagy eltérés mondható, ez is bizonyítja azt, hogy a szakaszon az egyensúlyi állapot nem áll fenn. A különbség nemcsak a hordalékhozamban hanem a szemcsék méretei között is fellelhetők, ennek magyarázata is az egyensúlyi állapothoz köthető, mert a szelvények között jelentős lerakódás van, amely a szemcsék nagyléptékű finomodását is magyarázhatja. Az esések értékeit nézve a modell igazolást nyert, hiszen a szakirodalmi adattartományba a számított esések beleesnek, de az értékeket látva fontosnak tartom kiemelni, hogy a hirtelen eséscsökkenést is visszaadják az értékek és az eséstörés létét.

4. 1D modellvizsgálatok

Az 1D modell paraméterezésénél azokat az értékeket vettem fel, amelyet az igazolt 0D modellbe is megadtam. Alapmodellként vettem azt a legegyszerűbb modellt, ami az egyenletes vízmozgás egyenletével számolja a vízmélységet, a hordaléktranszport-modellnek pedig a Wong és Parker, egyfrakciós összefüggést adtam meg. Ezt a modellt, illetve az általa számított eredményeket vettem referenciának és ehhez viszonyítva értékeltem a további modellel kapott eredményeket:

- fokozatosan változó vízmozgás egyenletével számoló modell
- aprózódást is számító modell
- vegyes szemösszetétel figyelembevétele a Wilcock és Crowe hordaléktranszport modellel

A vizsgálatok során először a vízlépcsők előtti állapot kialakulását szerettem volna modellezni. Ehhez a kezdeti állapotnak azt vettem, amikor a Dráva Völgyét az Ős-Duna már finom mederanyaggal feltöltötte, egységes mederesést és mederanyagot kialakítva. Ezt az állapotot a drávaszabolcsi medereséssel és az ottani finom, homokos mederanyaggal jellemeztem. A befolyási peremen viszont a Dráva durva hordalékban gazdag hordalékhozamát feltételeztem. Éltem továbbá azzal a közelítéssel is, hogy a vízhozam, hordalékhozam és hordalék szemösszetétele a vízlépcsők építése előtti időszakban (egészen a pleisztocén közepéig, vagyis a Dráva durva hordalékának lerakódási folyamatának megkezdéséig) nem változott jelentősen. Arra voltam kíváncsi, hogy mi okozhatta az eséstörés, valamint az eséstörés környezetében végbemenő hirtelen mederanyagfinomodást.

Dingle és társai által közölt cikk (Forrás: Dingle et al., 2021) szerint a hirtelen mederanyagfinomodás okai a következők lehetnek. (1) Szelektív hordaléktranszport, aminek feltétele az alvízi irányba csökkenő fenékcúsztató-feszültségnek (lehetséges oka pl. tektonikai mozgások révén kialakuló hordalékszállító-kapacitás csökkenés, ami a durva szemcsék lerakódásához vezet). (2) Szemcseméret hiány, amit okozhat a: a) aprózódás, b) a mederanyagtól eltérő szemcséjű partfal/hegyoldal folyamatos bemosódása (ez az eset a Dráva esetén nem valószínű), c) homokfrakció növekedése eredményezheti kezdetben stabil kavicszemcsék mozgását (ez az eset folyásirányban nem a finomodást eredményezi) és d) Hordalékmozgási mód változás, ami azt jelenti, hogy a kezdetben csak lebegő mozgást végző nagyon finom szemcsék (washload) alacsonyabb turbulenciájú folyószakaszra érve már lebegtetett mozgást végeznek, ami miatt már befolyásolják a mederanyag összetételét. Az 1D vizsgálatokat úgy végeztem el, hogy

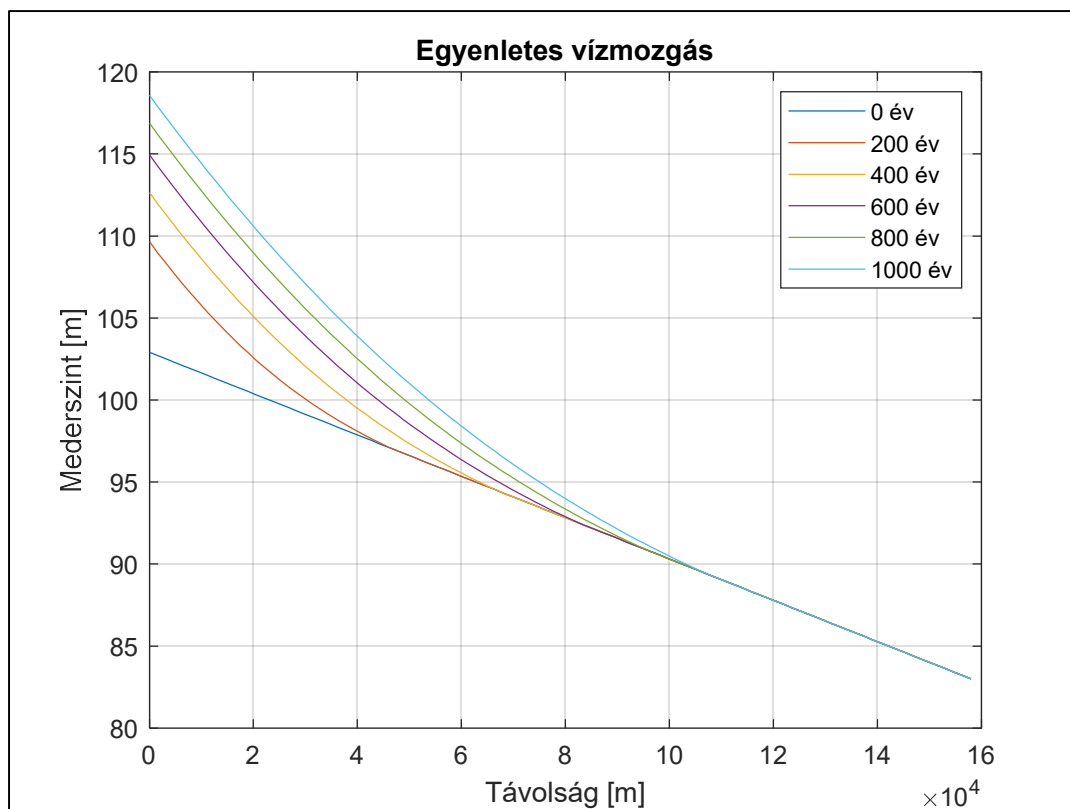
lehetőleg választ kapjak arra, hogy az előbb felsorolt jelenségek közül melyik okozhatja elsődlegesen a Barcs feletti eséstörést és hirtelen mederanyag-változást.

A modellel beavatkozások hatásvizsgálata is elvégezhető: ehhez a kezdeti és peremfeltételeket, valamint a morfológiai paramétereket úgy kell megváltoztatni, hogy azok helyesen írják le a beavatkozás hatását. Például, vízlépcső üzembehelyezése esetén a hordalékhiány figyelembevétele a befolyási peremre definiált hordalékhozam csökkentésével tehető meg, vagy kotrás esetén a megfelelő szakaszon a mederszint csökkentése szükséges. Ilyen módon vizsgálható, hogy a beavatkozás milyen módon változtatja meg kis időléptékben a medret, hosszú időtávon pedig az új egyensúlyi meder jellemezhető.

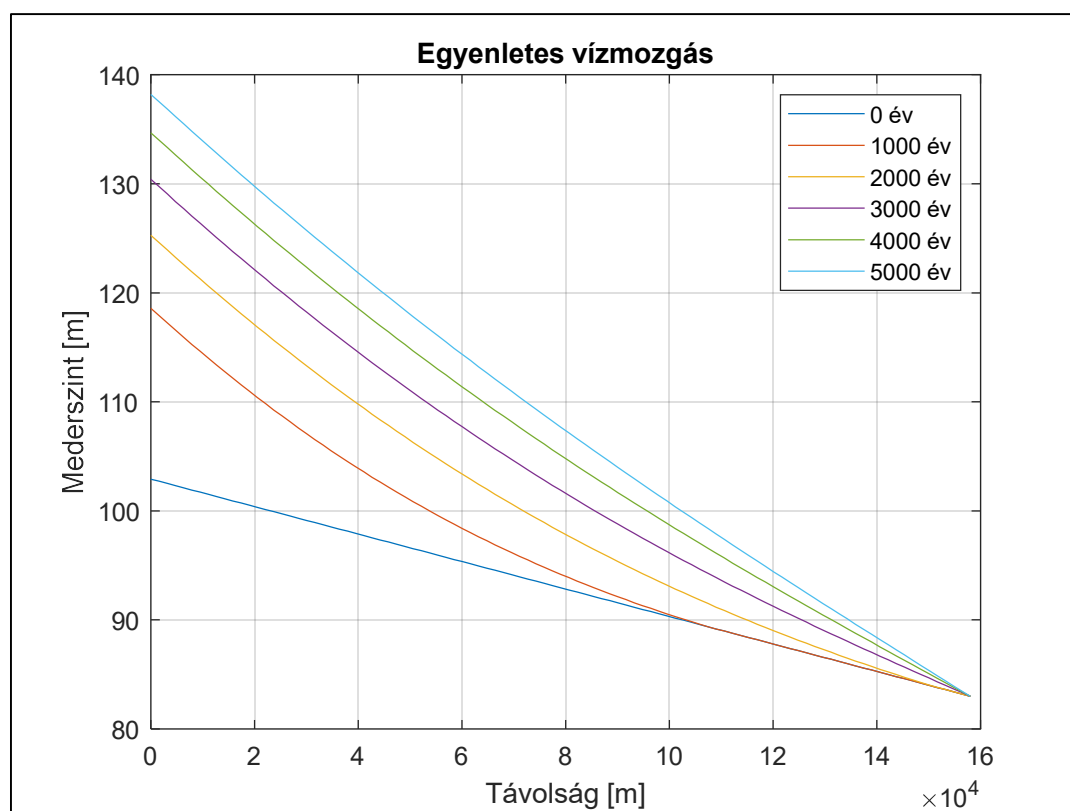
Az 1D modellel lehetőség nyílik a Barcs feletti eséstörés vizsgálatára is. Az alapmodell képes arra, hogy az egyfrakciós hordalék lerakódása okozta mederépülést megjelenítse. A szelektív eróziós folyamatot azonban nem képes számításba venni. A Wilcock és Crowe modell alkalmazását ezért láttam indokoltnak.

4.1. Alapmodell, egyenletes vízmozgást feltételezve

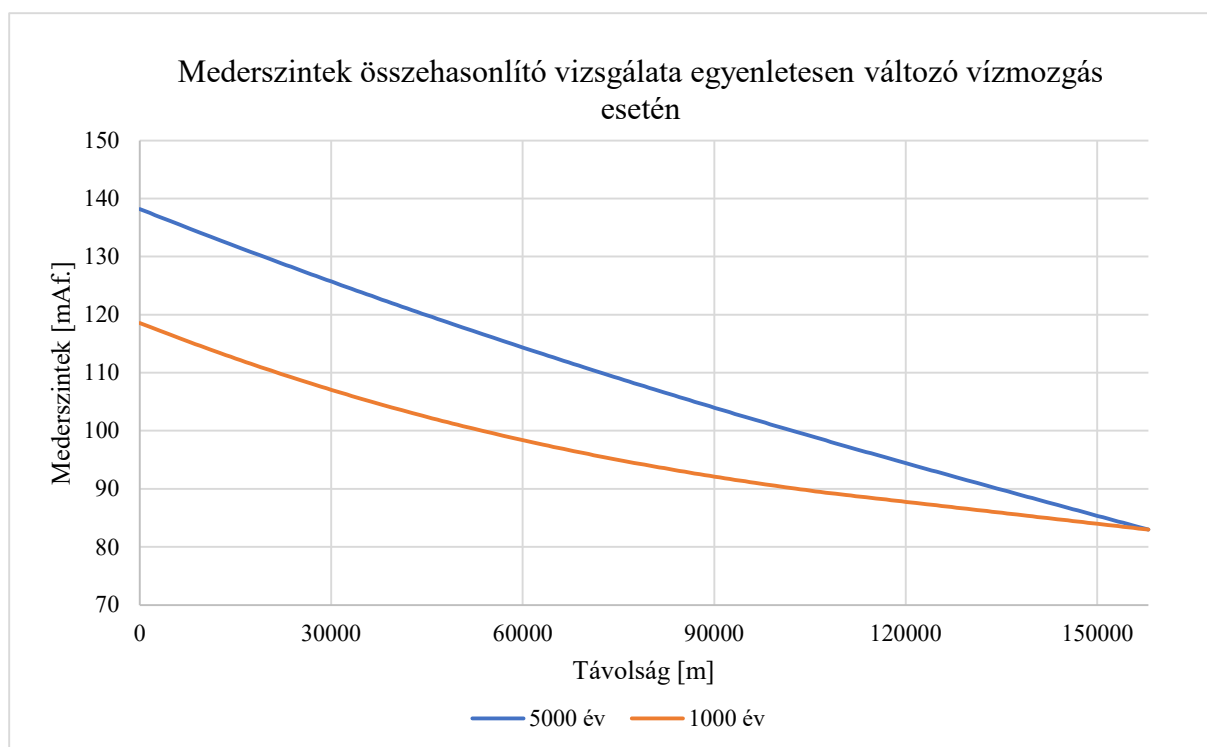
Az alap 1D modellt hosszabbidőléptékben is futtattam és a lefutott modell alapján a törést vissza is kaptam, de az alapfeltételekkel, nem tartom elég kielégítőnek a kapott eredményt, ezért szükséges volt a modellt tovább fejleszteni, hogy több tényezőre legyen érzékeny, ezáltal azt várom, hogy pontosabb eredményeket kapok. Az 1D modelleket 1000 és 5000 éven keresztül futtattam és a különböző modellvizsgálatok adott paramétereinek a különbségét figyeltem. A vizsgálatban az időszakokat 5 részre bontottam fel, tehát 1000 év esetén 200 évente irattam ki és rajzoltattam meg az eredményeket, illetve 5000 év esetén pedig 1000 évente. Részeredménynek minden esetben 100-at kértem be a modellből. A Matlabos futtatások eredményét ábrázoltam, ahol az időlépésenként alakuló mederszintváltozásokat ábrázolta a modell. A megjelenített hossz-szelvényeknél látható, hogy 5000 év elteltével érkezik meg az egyensúlyi állapothoz a vizsgált szakasz.



19. ábra: Mederszintek változása 1000 év alatt egyenletesvízmozgás esetén



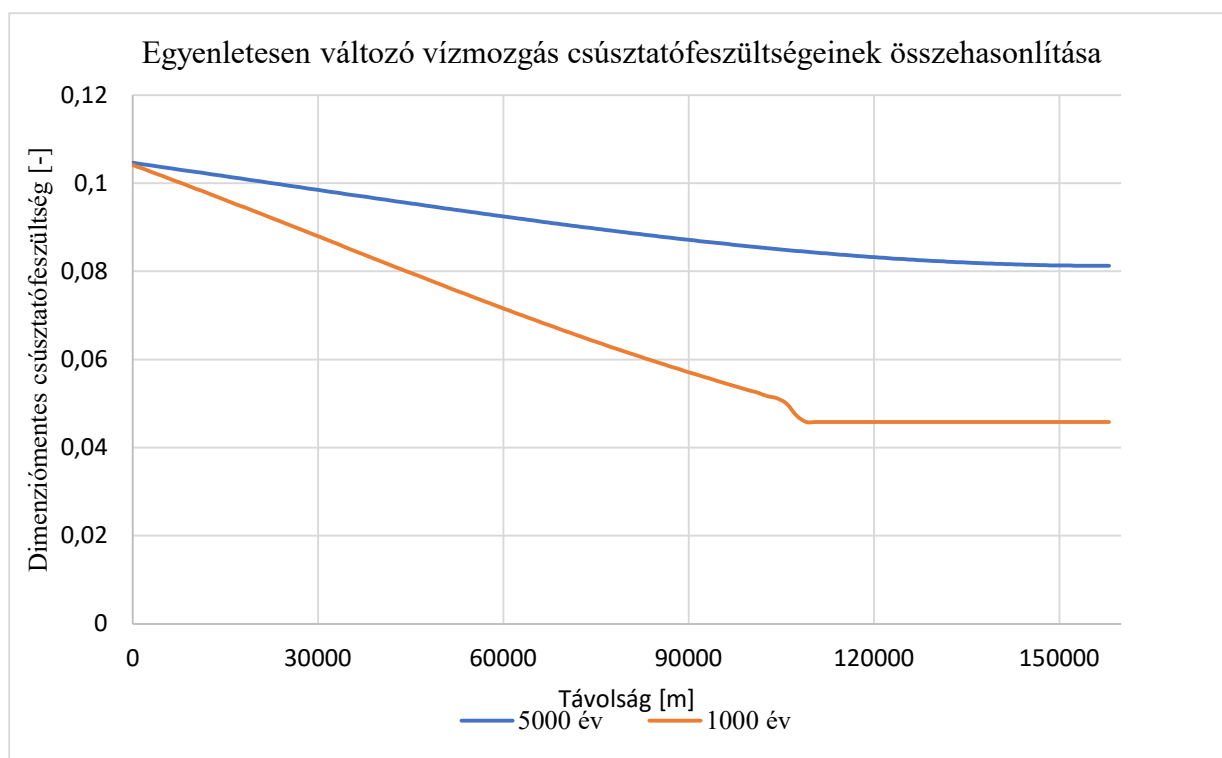
20. ábra: Mederszintek változása 5000 év alatt egyenletesvízmozgás esetén



21. ábra: Mederszintek összehasonlító ábrája a kezdeti állapottól 1000 és 5000 év elteltével

Külön megjelenítettem egy másik ábrával az 1000 és 5000 év alatt kialakuló mederszinteket. A hossz-szelvényen látható, hogy 4000 év alatt 18 métert emelkedik a meder kezdeti szintje. Látható az is, hogy az 5000 éves becslés esetén szinte lineáris a hossz-szelvény, amely azt jelenti, hogy az egyensúlyhoz közelít. Fontos megjegyezni, hogy a vízlépcső telepítése előtti időszak során végbement lerakódás okozta feltöltődést és az eséstörés kialakulását szándékoztam modellezni ebben a vizsgálatban. Ez arra utal, hogy a szakirodalmi forrás alapján közel 10 000 évre becsült töréspont kialakulását a modell sokkal gyorsabb folyamatként írja le. Mivel a Wong és Parker modell a hordalékhozamot helyesen írja le (a 0D vizsgálatok alapján), ezért a különbséget vagy az állandó és egyfrakciós mederanyag okozhatja, vagy esetleg a hidrodinamika közelítésében lehet gond.

A mederszintek mellett összehasonlítottam még a dimenziómentes csúsztatófeszültségek értékét is a két végső időlépésben.

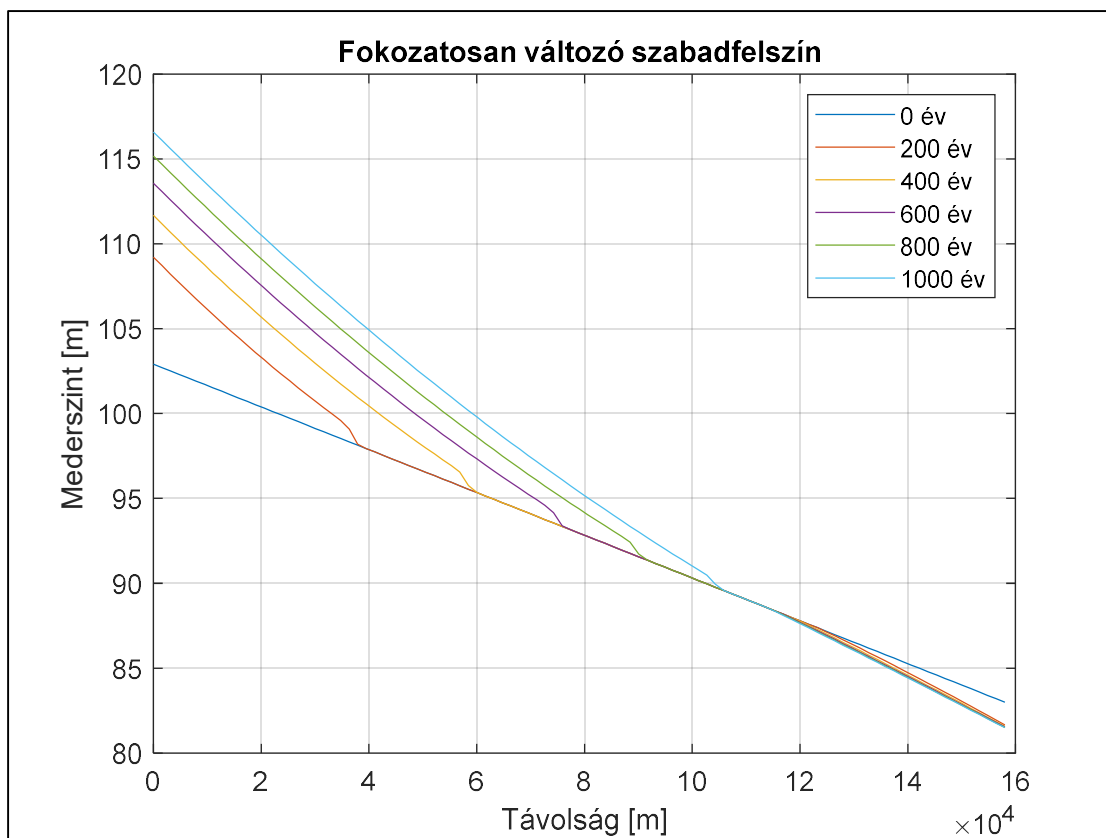


22. ábra: Dimenziómentes csúsztatófeszültségek összehasonlító ábrája a kezdeti állapottól 1000 és 5000 év elteltével

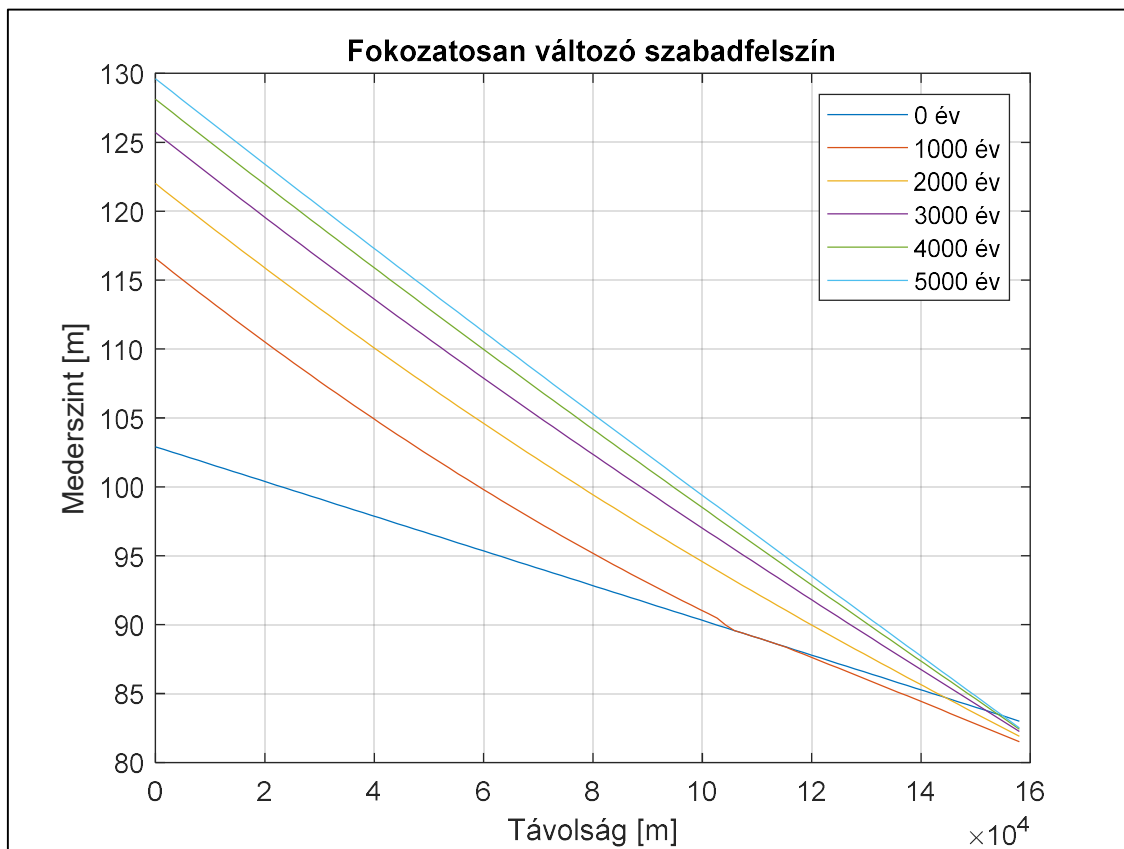
Látható a csúsztatófeszültségek alakulásánál, hogy hirtelen törés áll be, ez rámutat az eséstörés helyére. Az tapasztalható, hogy egészen a kritikus feszületig csökken a csúsztatófeszültség, Mivel az 5000 éves értékek rendre meghaladják az 1000 éveseket belátható, hogy 1000 év után még jelentős lerakódásra utal a csúsztatófeszültség eloszlás.

4.2. Fokozatosan változó szabadfelszín számításba vétele

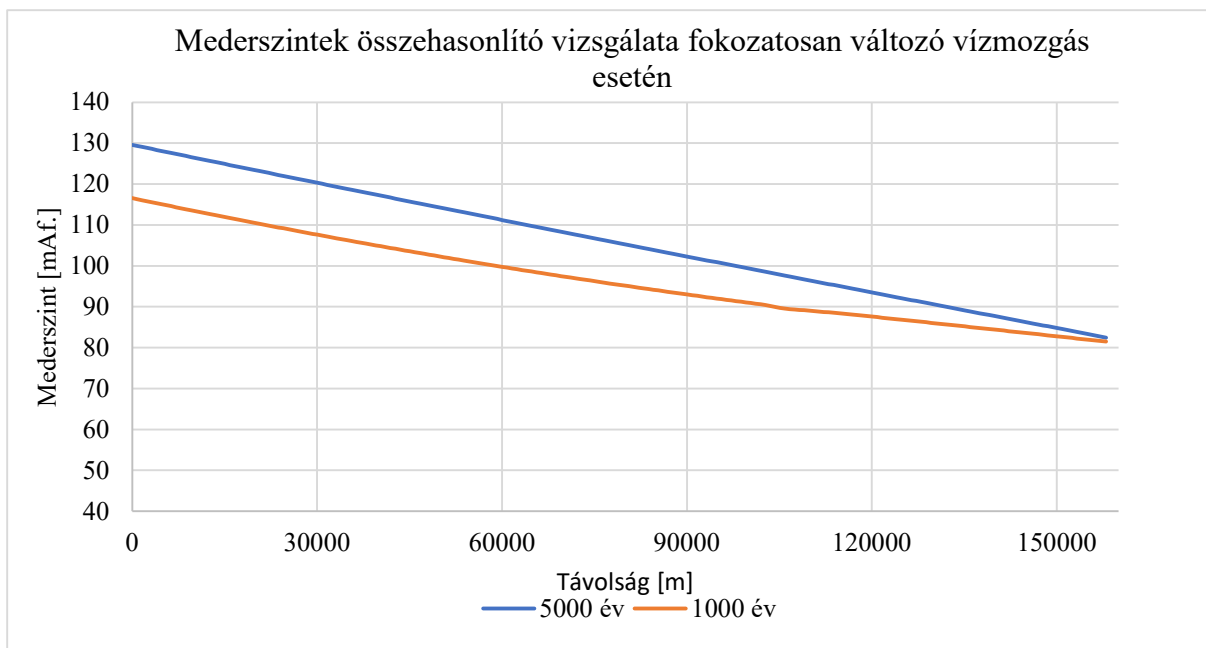
Arra voltam kíváncsi, hogy a fokozatosan változó vízmozgási jelleg a törés térségében okozhat-e jelentős különbséget az egyenletes vízmozgást feltételező modellhez képest. A modellt átalakítottam úgy, hogy permanens fokozatosan változó vízmozgást is számításba tudja venni, amely a visszaduzzasztás jelensége miatt tartottam fontosnak. Az eséstörés alatti, kis esésű szakaszon ugyanis nagyobb vízmélységek várhatók, mint az eséstörés feletti nagyobb esésű szakaszon. A nagyobb vízmélységek azonban beduzzaszthatják az eséstörés feletti szakaszt, amit a fokozatosan változó vízmozgás egyenletei figyelembe tudnak venni. Ebben a modellvizsgálatban megadtam a kifolyási szelvény vízfelszín magasságát. Már az előző fejezetekben is ismertettem, hogy Vízvárnál hirtelen esésváltozás történik és ennek szeretném az okait megvizsgálni. Ebben a modellvizsgálatban is 1000, illetve, 5000 éves vizsgálatokat végeztem. Az 1000 éves futtatású ábrán szépen látszik az évenkénti lerakódás, míg 5000 évnél ismét látható, hogy az egyensúlyi állapotot nagyjából kialakul.



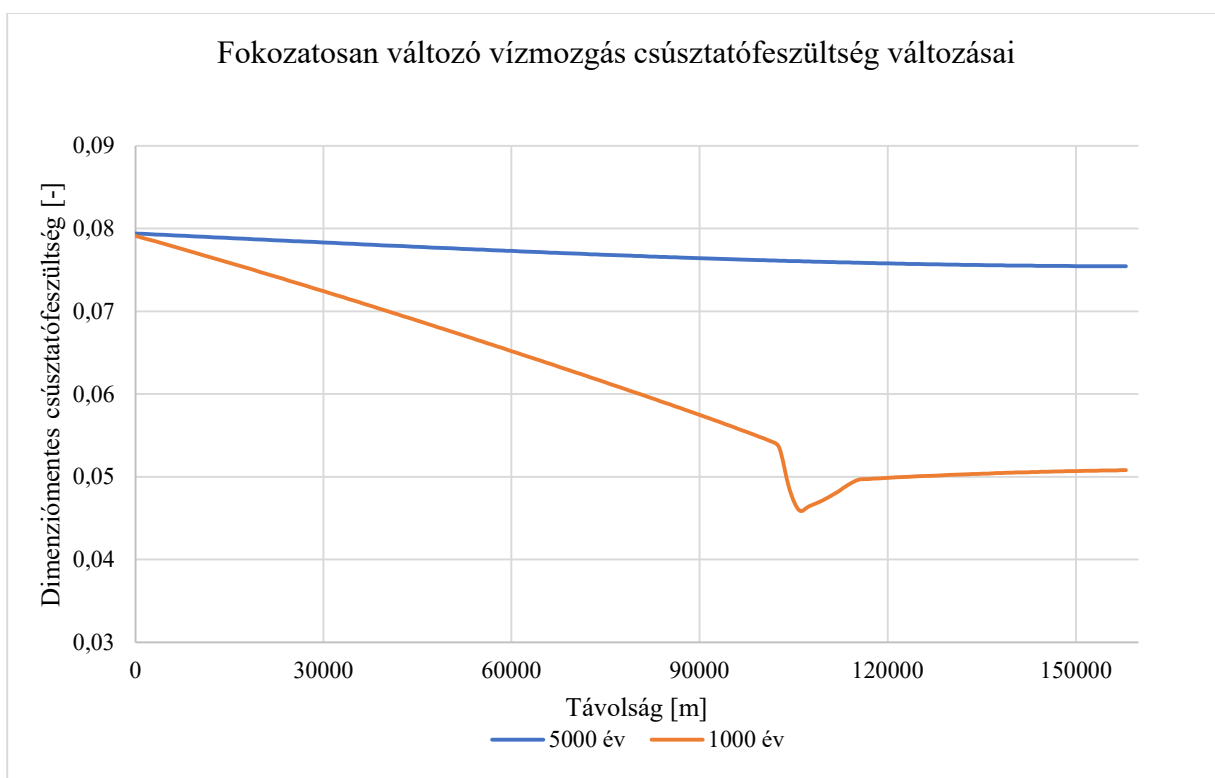
23. ábra: Mederszintek változása 1000 év alatt fokozatosan változó szabadfelszínű vízmozgás esetén



24. ábra: Mederszintek változása 5000 év alatt fokozatosan változó szabadfelszínű vízmozgás esetén



25. ábra: Mederszintek összehasonlító ábrája a kezdeti állapottól 1000 és 5000 év elteltével

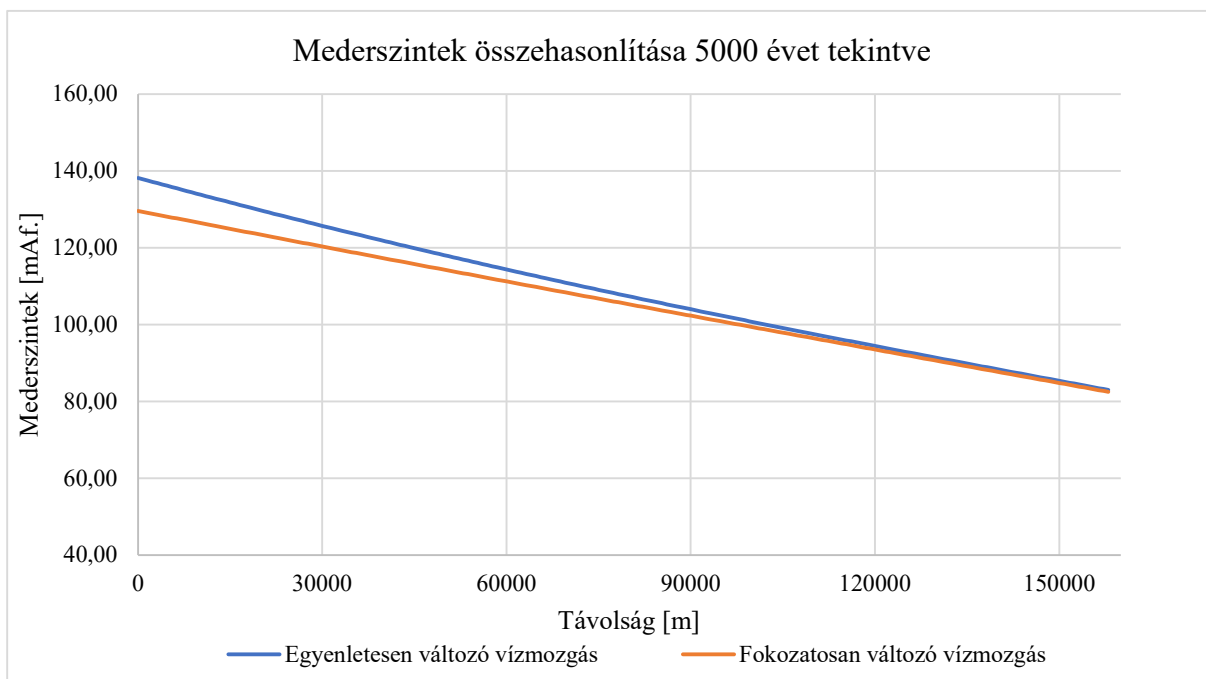


26. ábra: Dimenziómentes csúsztatófeszültségek összehasonlító ábrája a kezdeti állapottól 1000 és 5000 év elteltével

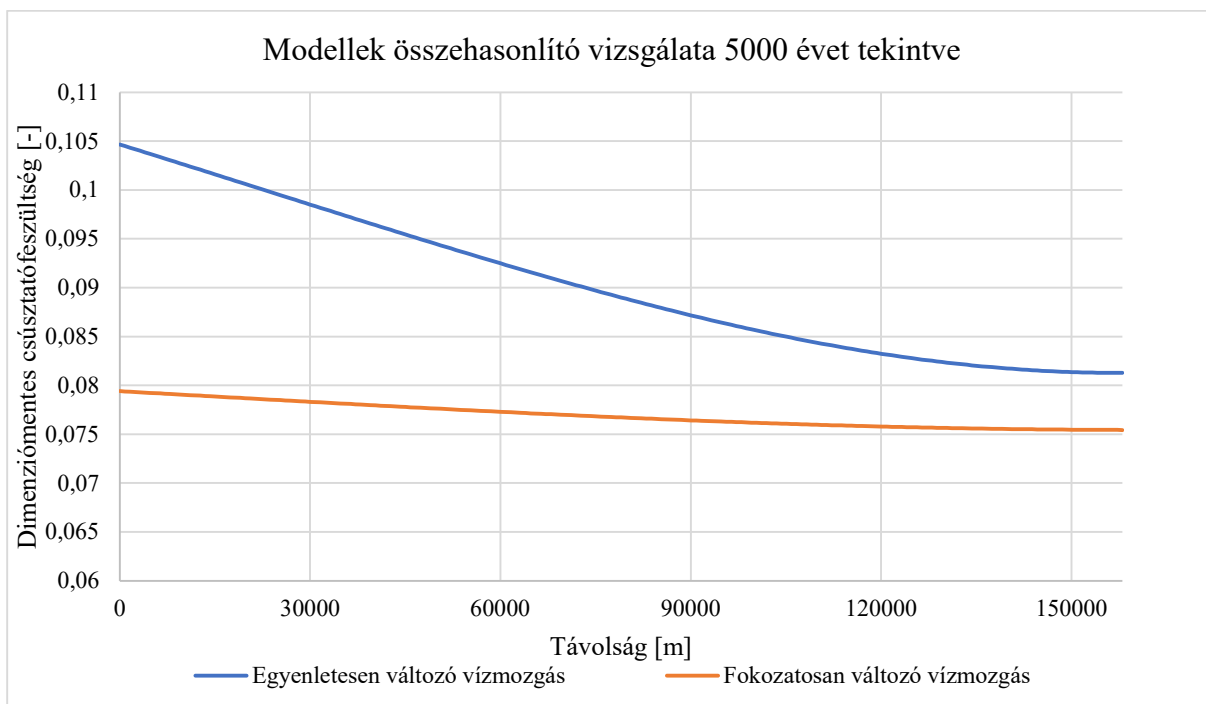
Mint már az előző vizsgálatomban is, itt is szerepeltettem a különböző évezredek összehasonlító ábráját. Ebben a modellvizsgálatban már jóval kisebb mederszint különbségekről beszélhetünk, hiszen az őrtilosi szelvénynél itt már mindössze 13 m különbséget mutat 4000 év elteltével. A törést a csúsztatófeszültségek összehasonlítása ebben

az esetben is megadta, mindössze annyi változással, hogy a töréspont a fokozatosan változó vízmozgás esetén előbb beáll.

Végül megjelenítettem a két modellvizsgálat összehasonlító ábráját 5000 évre. Ebben az esetben is külön ábrázoltam a mederszinteket és a csúsztatófeszültségeket.



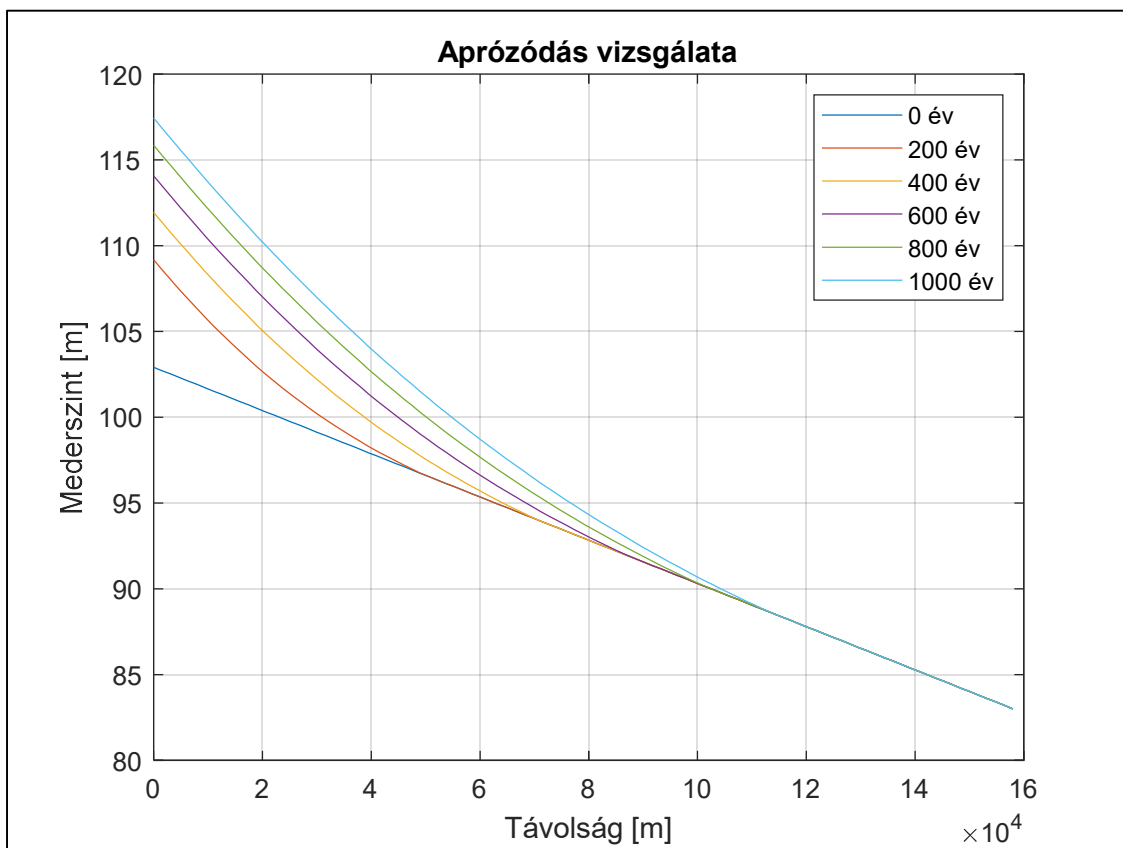
27. ábra: Mederszintek összehasonlítása egyenletes- és fokozatosan változó vízmozgások esetében 5000 év elteltével



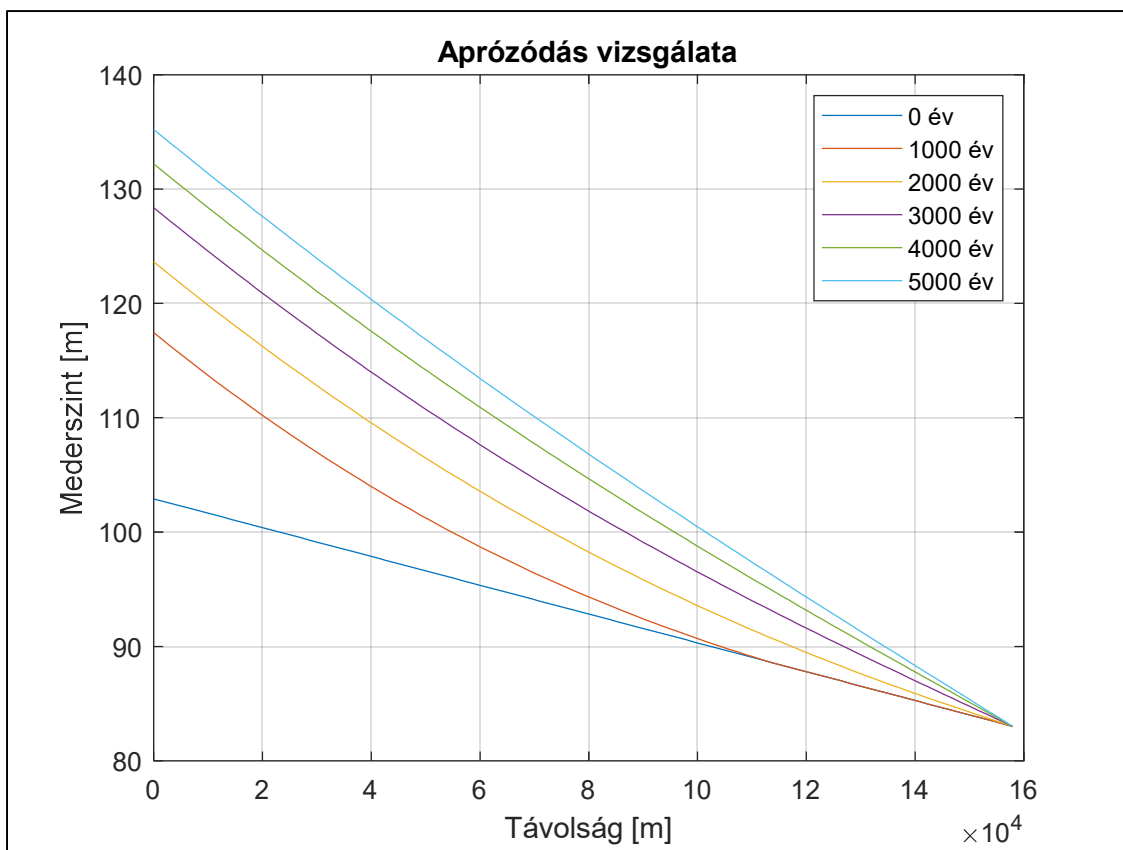
28. ábra: Dimenziómentes csúsztatófeszültségek összehasonlítása egyenletesen- és fokozatosan változó vízmozgások esetében 5000 év elteltével

4.3. Aprózódás beépítése a modellbe

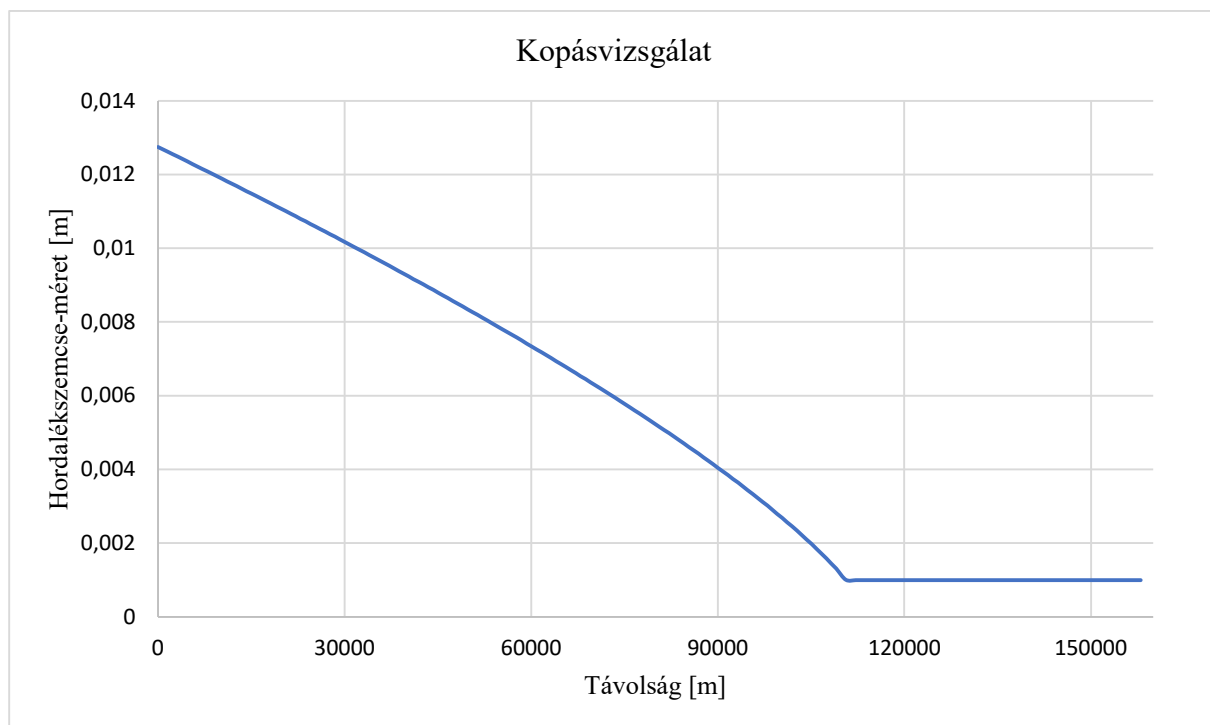
Következő modell vizsgálatom az aprózódás, amiben a hordalékszemcsék kopását vizsgálom. Azt akartam megvizsgálni, hogy a jellemző szemcseméret változása okozhat-e érdemi javulást az eséstörés modellezése szempontjából. Az *Aprózódás* című alfejezetben látható összefüggésekkel építettem fel a modellt. A Düll féle összefüggéseket alkalmazva vizsgáltam a változásokat. Pontos értékem nincs a Dráván alkalmazandó kopási együtthatóhoz, de mivel a szemösszetételekben nagy hasonlóság figyelhető meg a Felső-Dunával, az arra alkalmazott kopási együttható értékét vettem fel. Az előző vizsgálatokban egy adott szemcsemérettel számoltam végig a modellt, ami biztosan durva közelítése a valóságnak, hiszen a hordalékszemcsék méretében jelentős csökkenés figyelhető meg az egész szakaszon. A modellt 158 km-es szakaszra futtattam le. Mivel közel 111 km-et követően a kopásszámítás alapján elérjük a (kopásszámítás szempontjából) minimális 1 mm-es szemcseméretet, az ezt követő szakaszra 1 mm-es konstans értékkel számoltam.



29. ábra: Mederszintek változása 1000 év alatt egyenletes vízmozgás esetén az aprózódást is figyelembe véve

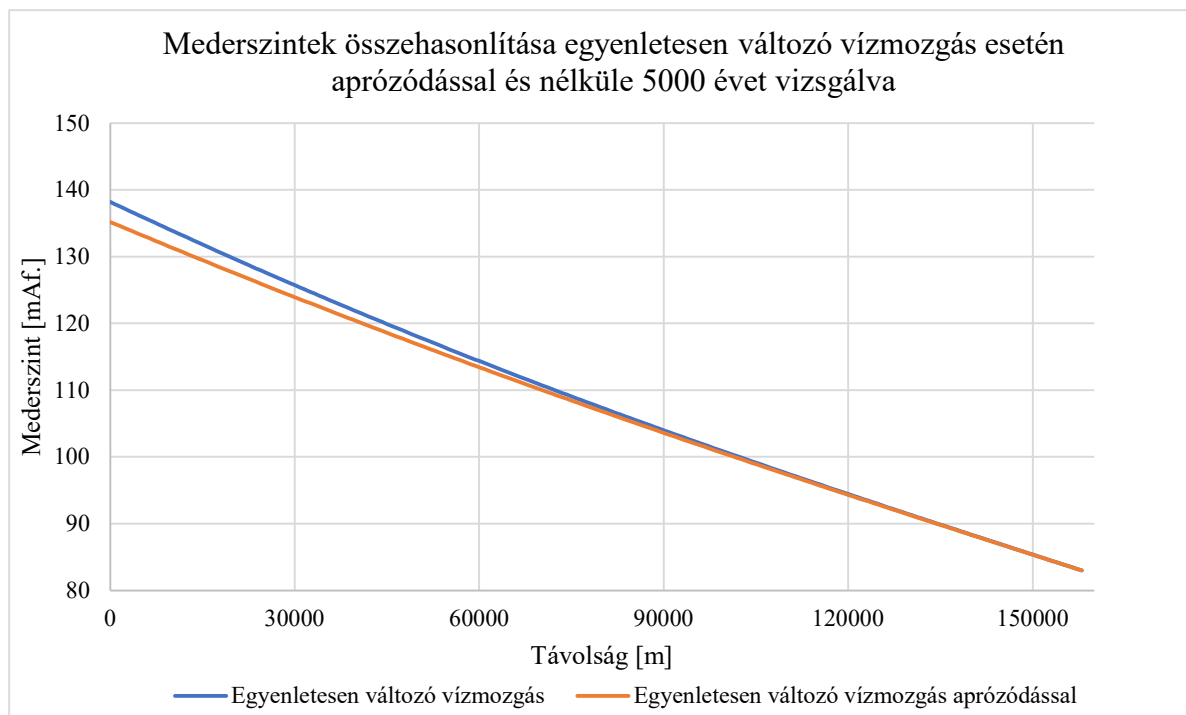


30. ábra: Mederszintek változása 5000 év alatt egyenletesen vízmozgás esetén az aprózódást is figyelembe véve



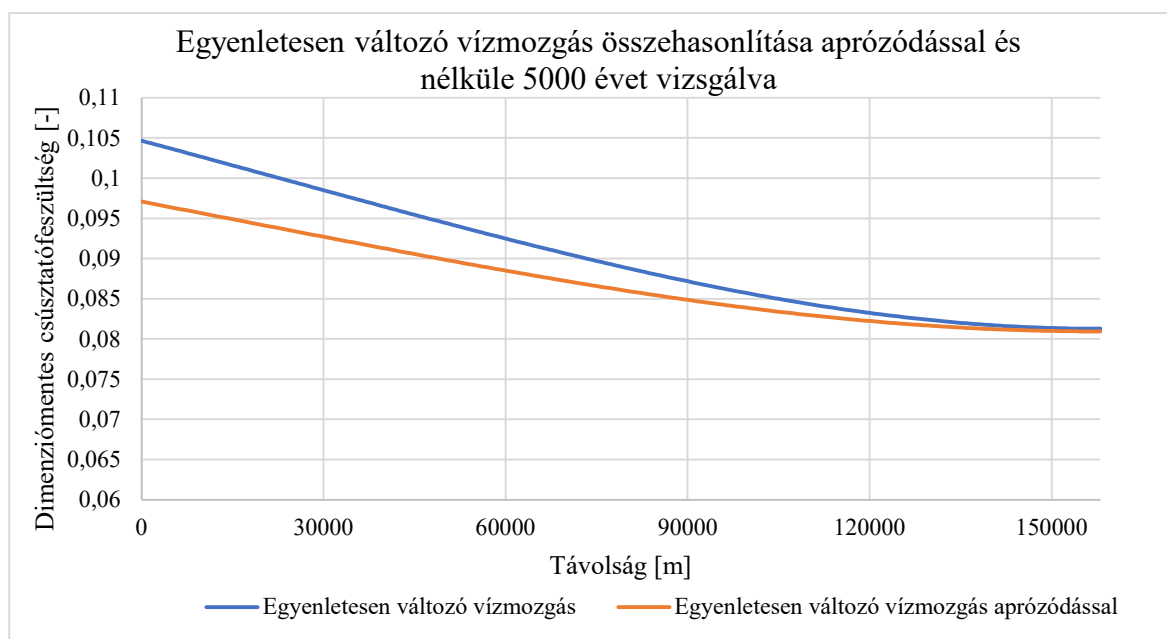
31. ábra: A vizsgált szakasz szemcseméret változása

Az aprózódásnál kapott mederszinteket és csúsztatófeszültség értékeket szintén összevetettem az alapmodellel egyenletesen változó vízmozgásnál kapott 5000 éves eredményekkel.



32. ábra: Mederszintek összehasonlítása egyenletes változó vízmozgások esetében az aprózódás nélkül és annak jelenlétével 5000 éves távlatban

A hossz-szelvényt tekintve látható, hogy csupán a kopás nem járul hozzá nagyban az eséstörés realisabb számításához. A megjelenített diagramon is látható, hogy szinte teljesen egymásba simultak a görbék, tehát csak a kopás nem járul hozzá a medergeometria hirtelen esésváltozásához.



33. ábra: Dimenziómentes csúsztatófeszültségek összehasonlítása egyenletesen változó vízmozgások esetében az aprózódás nélkül és annak jelenlétével 5000 éves távlatban

A jelenlegi kopásvizsgálat még nagyon kezdetleges, hiszen konstans kopási együtthatóval és szemcse fajsúllyal számoltam. A teljes vizsgált szakaszra ez biztosan nem igaz, hiszen a törés alatti homokos frakciók esetében nem beszélhetnénk jelentős kopásról. Továbbá, a változó szemösszetétel és a csúsztatófeszültség lényeges változása is a folyásirányban változó kopási együtthatót sejtet. További probléma még, hogy a jelenlegi vizsgálat nem veszi figyelembe a kopás időfüggését (vagyis az egyes szemcsék által megtett utat). Szintén pontatlan még abban a tekintetben is, hogy minden vizsgálatban eddig csak a D_{50} értékkel számolt a modell, holott a valóságban a hordalék több frakcióból tevődik össze.

Ahogy az előző összehasonlításban is látható volt úgy itt is az tapasztalható, hogy a kopással jelentős változás nem történik a szakaszon, ezzel szintén azt támasztva alá, hogy a szakaszon feltehetően a vegyes szemösszetétel miatti szelektív erózió játszhat kulcsszerepet.

4.4. Vegyes szemösszetétel vizsgálata

Végső modellvizsgálataimban a vegyes szemösszetételt is figyelembe vettem, amely azt jelenti, hogy nemcsak átlagos D_{50} szemcseátmérővel vizsgáltam a szakaszt, hanem az *Irodalomkutatás* című fejezetben bemutatott hordalék- és mederanyag szemösszetételi görbéi alapján. A modell, amellyel dolgoztam a Wilcock-Crowe modell (Forrás: Wilcock és Crowe, 2003). Ezeket a vizsgálatokat nem saját modellel futtattam, hanem külföldi forrásból származó, EXCEL VBA (Visual Basic for Application) nyelven írt kész programmal (Forrás: Parker, 2004) végeztem el.

4.4.1. A Wilcock modell alkalmazása a vízlépcső előtti időszakban

A Wilcock modellben állandó fix adatokként meg kell adni a következő paramétereket:

- Fajlagos vízhozam
- Fajlagos hordalékhozam
- Periodicitás
- Kifolyási mederszint
- Kezdeti mederesés
- Modellezendő szakasz hossza,
- Időlépés
- Cellák száma
- Modellezendő idő hossza

A befolyási szelvény esetében az őrtilos szelvény, aminek fajlagos vízhozam számítása a következőképpen alakult:

$$q_w = \frac{Q}{B} = \frac{2100}{185} = 11,35153 \text{ m}^2/\text{s} \quad (24)$$

A fajlagos hordalékhozam szintén a befolyási keresztmetszeté, számítása a következőképpen zajlott:

$$qbTf = \frac{Q_{bf}}{B \cdot I \cdot 365,25 \cdot 24 \cdot 3600 \cdot (R+1)} = 0,0002404 \text{ m}^2/\text{s} \quad (25)$$

A további peremfeltételek már adottak voltak a szakirodalom alapján. Kifolyási peremen a mederszintnek a drávaszabolcsi korabeli mederszintet adtam meg, amelyet a Dráva atlasz segítségével határoztam meg. Továbbá a kezdeti mederesésnél a drávaszabolcsi esést definiáltam és ott a 0D modell alapján számolt esést adtam meg, amely 12,6 cm/km. A vizsgált szakasz 158 km hosszú. A cellák száma 100 volt, az időlépés pedig egy hét.

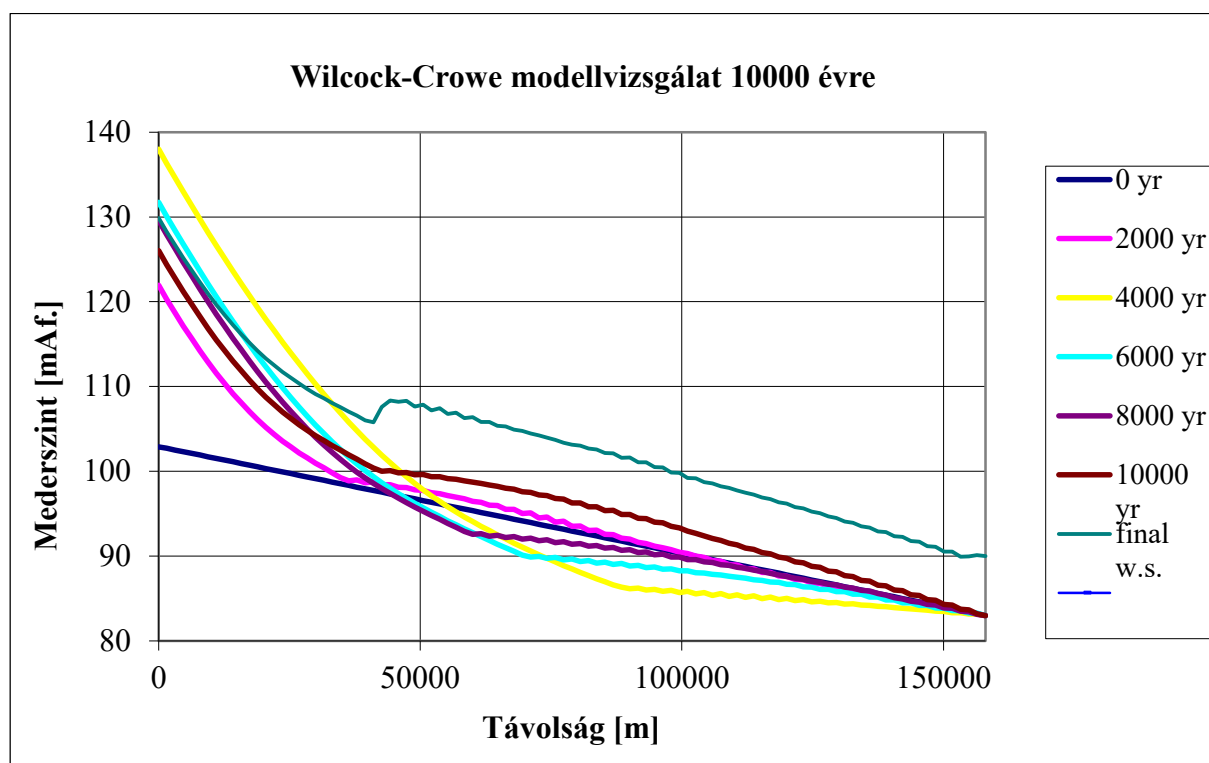
A mederanyag (aktív és inaktív réteg esetére) és a görgetett hordalék szemösszetételére több görbe állt rendelkezésemre. Érzékenységvizsgálat alapján szándékoztam meghatározni azokat az összetételeket, amik a valós törést a leghűebben számítják. A legjobb egyezést az alábbi összetételekkel kaptam:

8. táblázat: Modell kiindulási szemösszetételei

Dd,i mm	Feed	Initial Surface	Substrate
256	100	100	100
128	100	100	100
64	100	100	100
32	77	100	100
16	34,5	100	100
8	8	100	100
4	2	100	100
2	1	100	100
1	1	100	100
0,5	0	82	82
0,25	0	1,5	1,5
0,125	0	0	0

A táblázatban sárgával jelölve látható az az oszlop, amely az alkalmazott sziták átmérőjét tartalmazza. A Feed oszlopban az őrtilosi hordalék szemösszetétele látható. Az Initial Surface vagyis az inaktív részhez én a Drávaszabolcsi görbék alapján adtam meg az összetételt, ahogy a Substrate oszlophoz is.

Esetemben először 10000 évre futtattam le a modellt a korabeli paraméterekkel és a lefutott modellnél a vízlépcső telepítés előtti 1970-es állapotokat vártam, az eséstörés ehelyezkedésére, valamint annak felvizen és alvizen kialakuló esésekre összpontosítva.



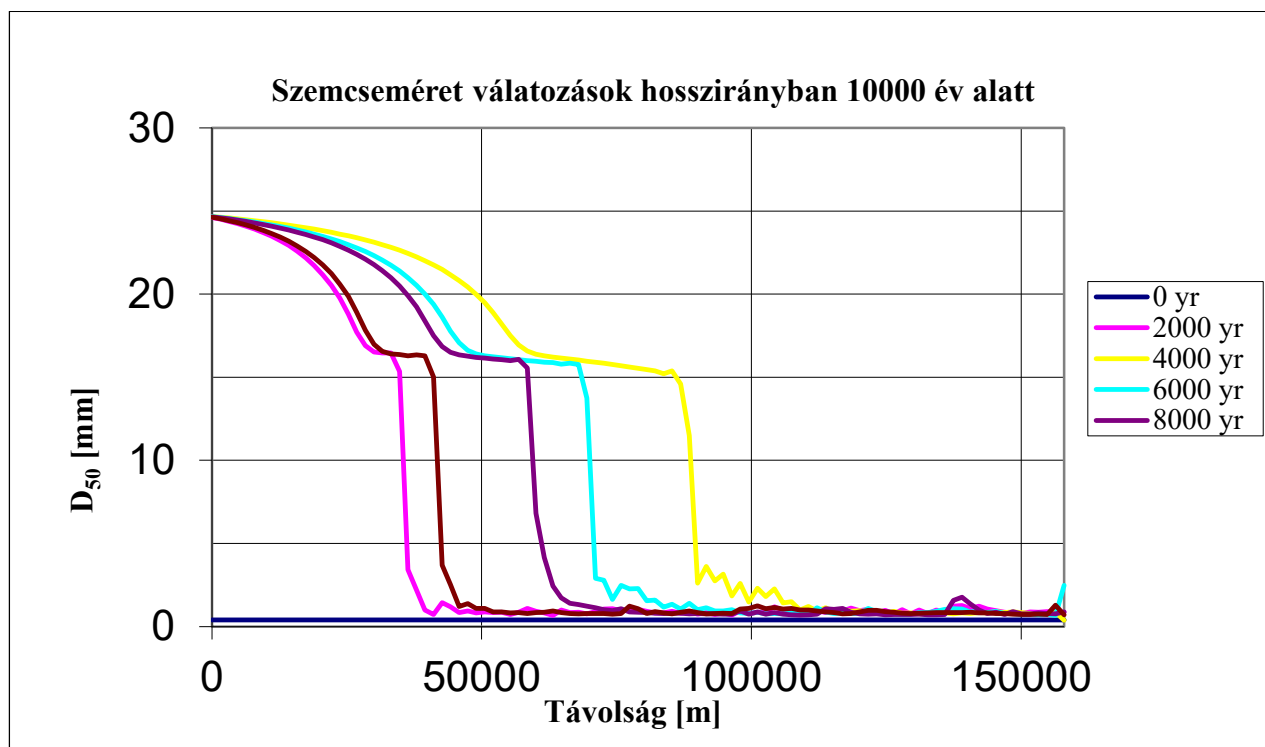
34. ábra: Wilcock és Crowe modell 10000 éves mederszint eredményei az Őrtilos-Drávaszabolcs szakasán

A bordó trendet nézve, tehát az 10000 éves mederszinten az látható, hogy a felső szakasz esése olyan 58 cm/km értéket vesz fel, amely a szakirodalomban említett és a 0D modell alapján számolt esést meghaladja, de csak 5 cm/km-el. Mivel ezek a modellek mind csak becslést adnak, így véleményem szerint nem számottevő ez a különbség, illetve egy adott eséstartományt tudnak megadni így, amely már nagy segítség lehet, ha a jövőbeli hatást vizsgálja az ember. Viszont amit nagyon szépen megmutat a modell az az eséstörés, amelynek ez a modell a helyét is jól visszaadja, hiszen Őrtilostól mindössze 45 km távolságra van és a 10000 éves görbében közel 44 km-nél történik meg az eséstörés. A Dráva atlaszban ábrázolt hossz-szelvény mederszintjeit is szinte pontosan megkaptam a vizsgált szelvényekre. Őrtilosnál a mederszelvény a szabályozás előtt 125 mAf. közeli mederszintet vehetett fel, a modellben

Őrtilosra 126,06 mAf. mederszintet kaptam meg. Barcsra az atlasz szerint a meder szint 94mAf. volt, a modellben a számított mederszint a szelvényre 95,4 mAf. Drávaszabolcsra értelemszerűen ezt nem kell megvizsgálni, hiszen az volt a kiindulási szint a modellben.

A hossz-szelvények alapján egy meglepő jelenség is megfigyelhető. Az eséstörés elhelyezkedését nézve látható, hogy az az évek során nemcsak folyásirányba tolódott, hanem 4000 év eltelte után csak a felvíz irányába mozdult el. Ez megcáfolja azt a várakozást, hogy az eséstörést egyszerűen az érkező hordalék lerakódása okozza, ami miatt az eséstörés csak az alvízi irányba mozoghat. Ez egyértelműen a vegyes szemösszetétel szerepét mutatja: a vegyes szemösszetételnek köszönhetően évezredes léptékben merően más mederváltozási folyamatok játszódnak le, mint egyfrakciós szemösszetétel esetén. Ez a hordaléktranszport-modell megválasztásának fontosságára is felhívja a figyelmet: ha helytelenül nem vesszük számításba a vegyes szemösszetételt, akkor nemcsak nagyságrendbeli hibát kaphatunk a mederváltozás mértékében, de akár elletétes értelmezésű változásokat is kaphatunk.

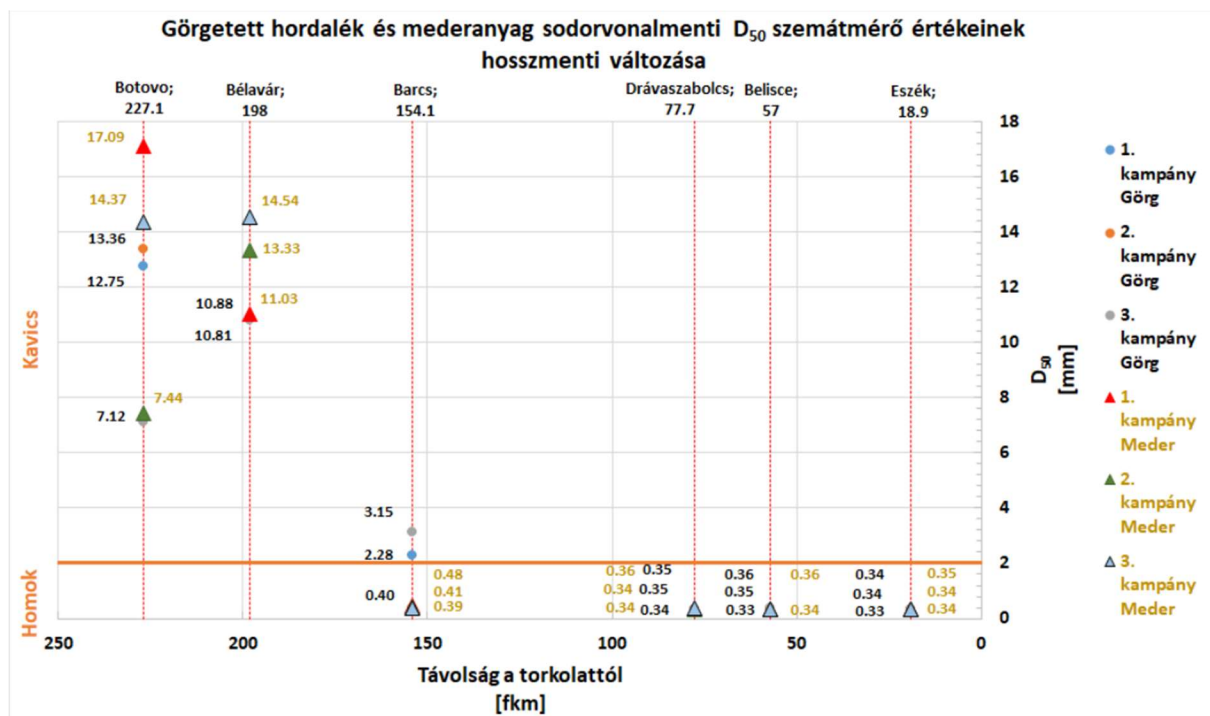
A Wilcock és Crowe modellel nemcsak a hossz-szelvény változásokat lehet megjeleníteni, hanem azt is, hogy a szemösszetétel évente miként változik a vizsgált szakaszon.



35. ábra: Wilcock és Crowe modell 10000 éves átlagos szemátmérő eredményei az Őrtilos-Drávaszabolcs szakaszon

A hirtelen eséscsökkenésnek köszönhető, hogy a szemcseméretek is hirtelen lecsökkennek. Azt már a Matlabos 1D vizsgálattal is kimutattam, hogy csak kopás miatt ilyen mértékű változás

nem lehetséges, ami a szelektív lerakódás jelenlétét támasztja alá. Az 10000 éves D_{50} eredmények a tanszéki jelentésben bemutatott ábrájával jelentős hasonlóságot mutat (A modellezett eredmények ábráján Drávaszabolcs 158 000 m-nél, Barcs ~82 000 m-nél, Órtilos pedig 0 m-nél helyezkedik el, ami a lenti ábrán látható Botovo szelvényétől alig pár kilométerre helyezkedik el.):



36. ábra: Görgetett hordalék és mederanyag hosszmenti változása (Forrás: BME VVT, 2019)

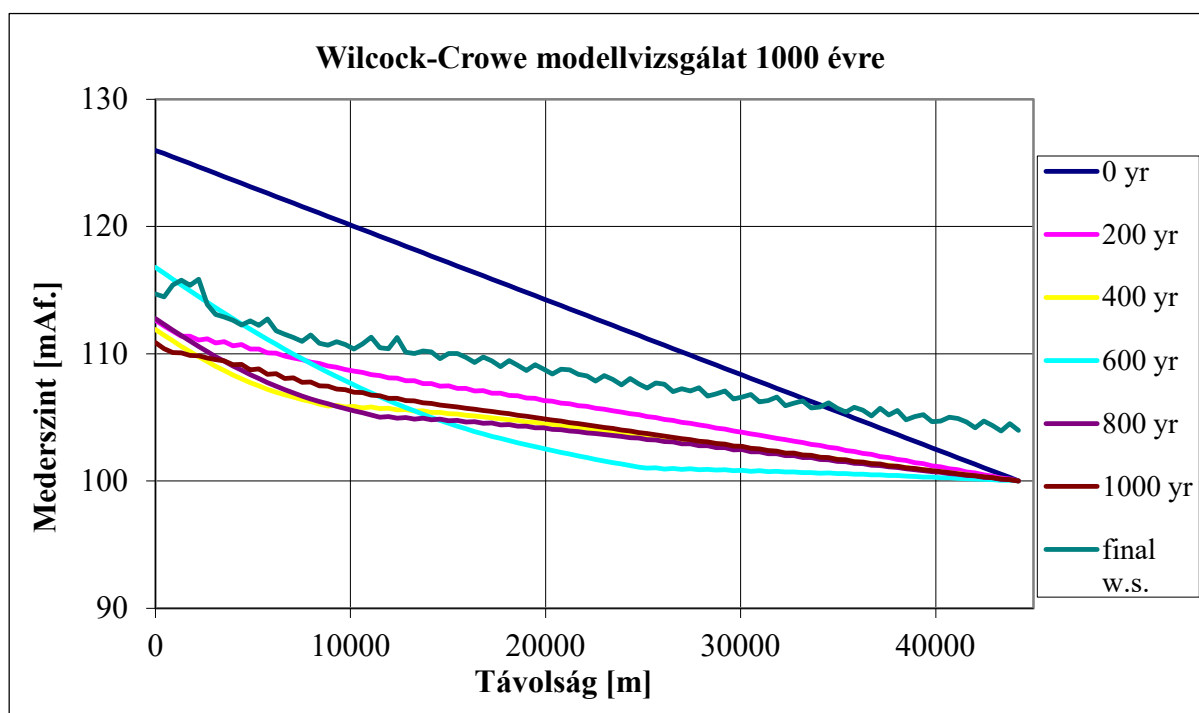
4.4.2. Feltételezve, hogy nem épül vízlépcső

A modellvizsgálatom következő lépcsője az volt, hogy a szakaszt ezentúl már csak a törés felett számítom, tehát 44,24 km-es távolságot nézek, ahol a kezdeti mederszint a 10000 éves futtatásban kapott mederszint a törésnél, ami 100,013 mAf. és a kezdeti esésnek pedig a törésig kapott esést adtam meg, amely 58 cm/km. A szemösszetételnek azt adtam meg, amit a végső időpillanatra határozott meg a modell.

9. táblázat: Számításhoz használt szemösszetételek

Dd,i mm	Feed	Initial Surface	Substrate
256	100	100	100
128	100	100	100
64	100	100	100
32	77,6	59,5	100
16	34,9	22,3	100
8	8,1	4,3	100
4	2	0,9	100
2	1	0,4	100
1	1	0,4	100
0,5	0	0	82
0,25	0	0	1,5
0,125	0	0	0

A modellt először 1000 évre futtattam le, a célom az volt ezzel az eljárással, hogy az egyensúlyi állapotot megkapjam, ha nincs beavatkozás és törés se. A következő eredményt kaptam a vizsgálat alapján:



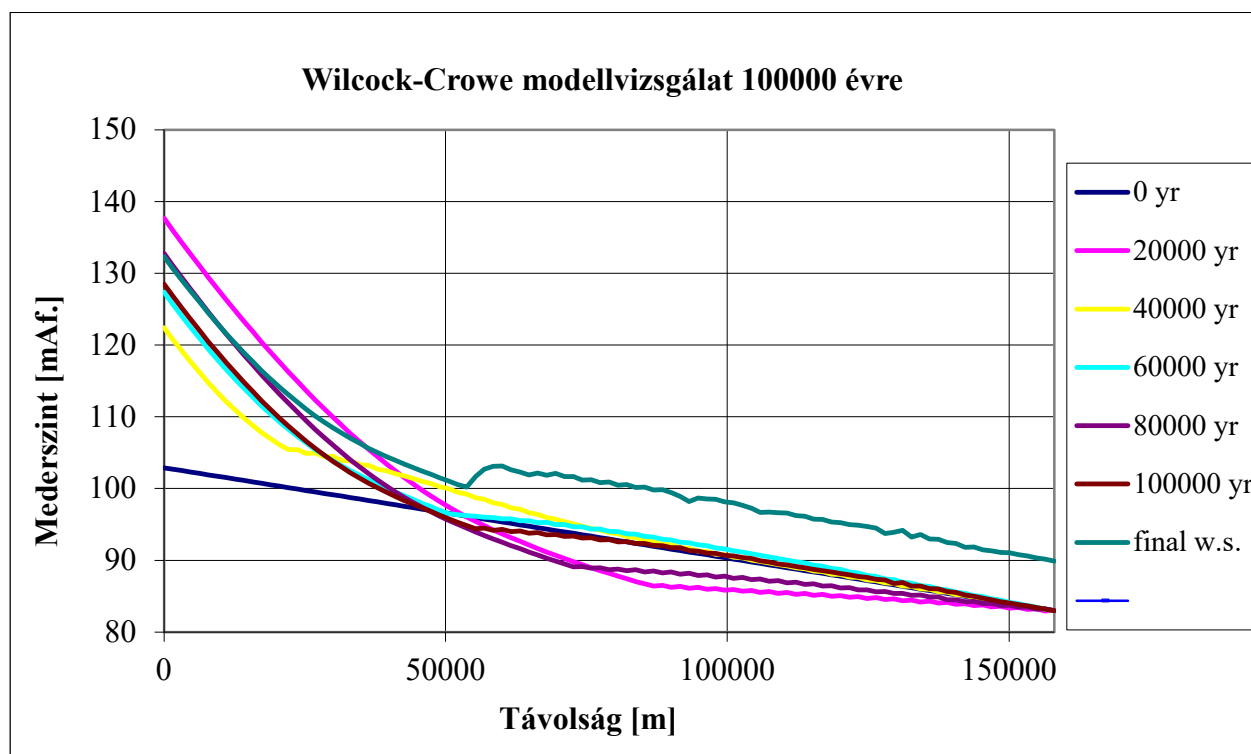
37. ábra: Múltbéli egyensúlyi állapot becslése a felső szakaszra, amennyiben nem épül szabályozási műtárgy

Az ábrán látható, hogy a kiinduláshoz képest a meder fokozatosan süllyedt, viszont az is látható, hogy az évek között nem mondható számottevő különbség, tehát az egyensúlyi állapotot sikerült elérni.

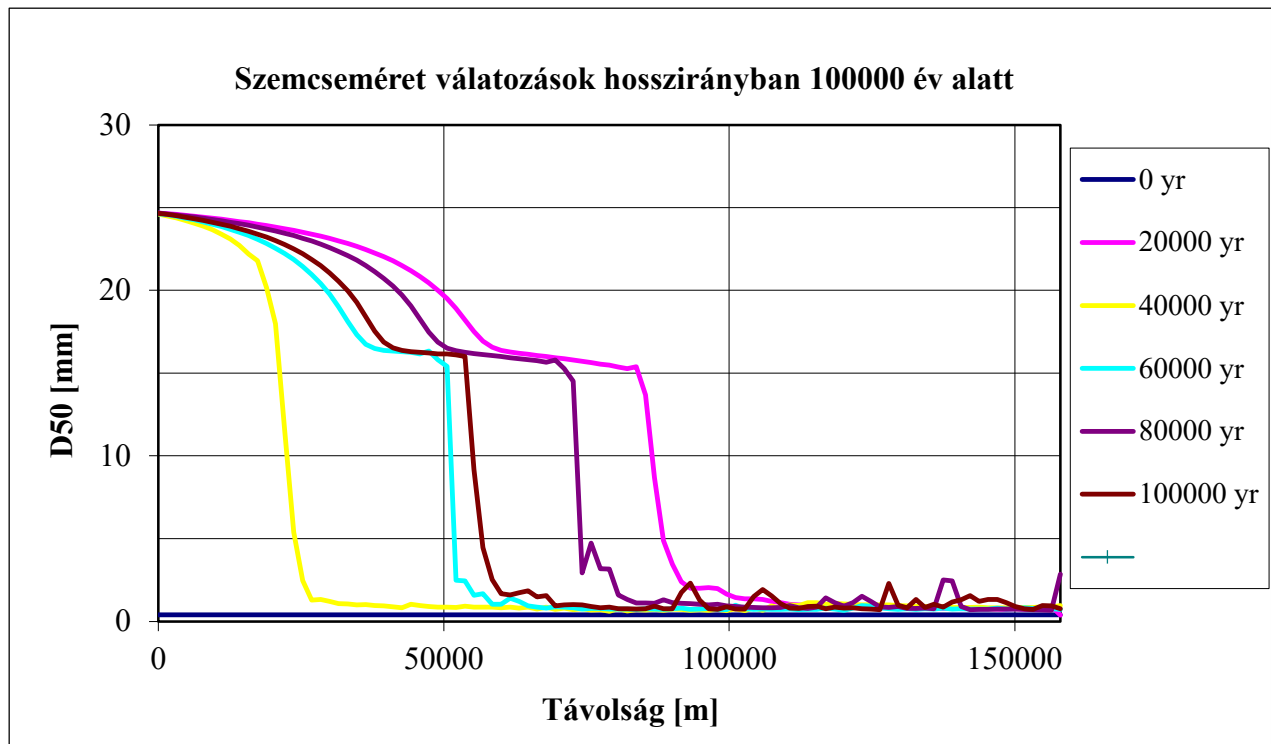
4.4.3. Wilcock modell alkalmazása 100000 éves tartományra

A kezdeti peremfeltételekkel (drávaszabolcsi esés, drávaszabolcsi mederanyag, de a befolyási peremen az Örtilosnál mért hordalék szemösszetétel és hordalékhozam) lefuttattam úgy a modellt, hogy mi lett volna, ha nem épül meg a vízlépcső. Ezzel a vizsgálattal nemcsak azt szerettem volna megmutatni, hogy miként alakulhatott a folyó morfológiája, hanem azt is, hogy milyen nagy mértékű intervallumban is lehet a modellel vizsgálni egy adott szakaszt és becslést adni bizonyos paramétereire.

A 100 000 éves futtatás eredménye alapján azt látom, hogy az eséstörés nem feltétlenül mozdul el az alvíz irányába. Vegyes szemösszetételű medret számításba véve tehát elképzelhetőnek tűnik az az eset, hogy egy eséstöréssel rendelkező folyószakasz egyensúlyi állapotban van.



38. ábra: Múltbéli egyensúlyi állapot becslése a teljes szakaszra, amennyiben nem épül szabályozási műtárgy



39. ábra: Wilcock és Crowe modell 100000 éves átlagos szemátmérő eredményei az Őrtilos-Drávaszabolcs szakaszán

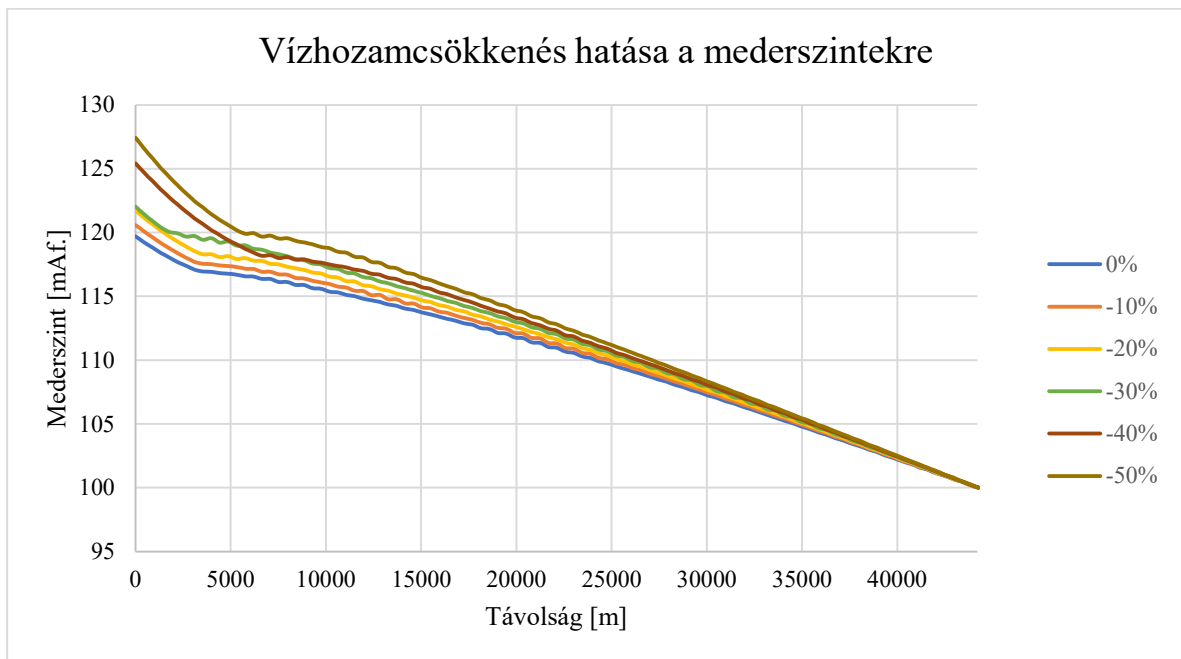
A szemösszetétel-változás ebben az esetben is azt mutatja, hogy az eséstörés váltakozva, hol felvízi, hol pedig alvízi irányba mozdul el. Az is látható, hogy a Dráva esetén ma is tapasztalható eséstörés ott helyezkedik el, ahová a 100000 éves modell predesztinálja.

4.4.4. Vízlépcső hatásának érzékenységvizsgálata

A varasdi vízlépcső telepítése 1975-ben történt, illetve amely nagyobb hatást gyakorolhatott valószínűleg a szakaszra a domború vízerőmű, ami 1989-ben épült. Ezen létesítményeknél bizonyos mértékben csökken az alatta lévő szakaszokon a hordalékhozam, illetve a vízhozam. A modellel érzékenység vizsgálatot végeztem mindkét tényező csökkenésére, külön-külön.

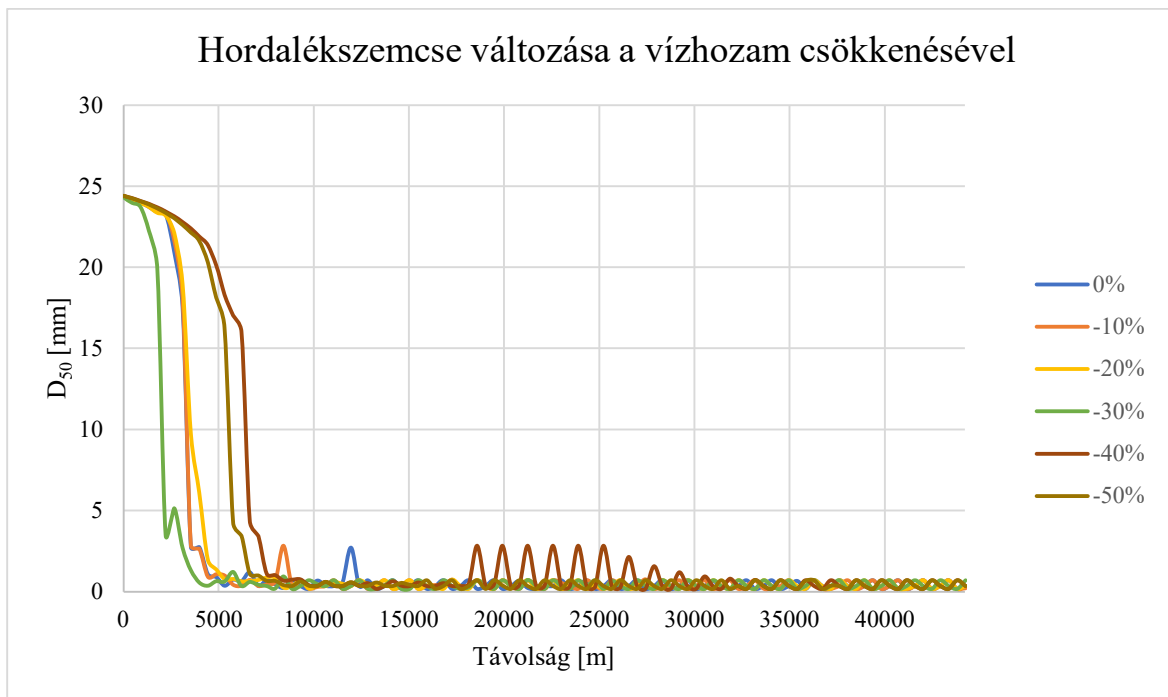
Az érzékenységvizsgálatokat a törés feletti szakaszra végeztem, azokkal a feltételekkel, amelyeket a modell számított 10000 év futás után, illetve az adott paramétert változtatva, amelyre irányul az érzékenység vizsgálat.

○ Vízhozam változása



40. ábra: Mederszintek összehasonlítása különböző vízhozamok szerint

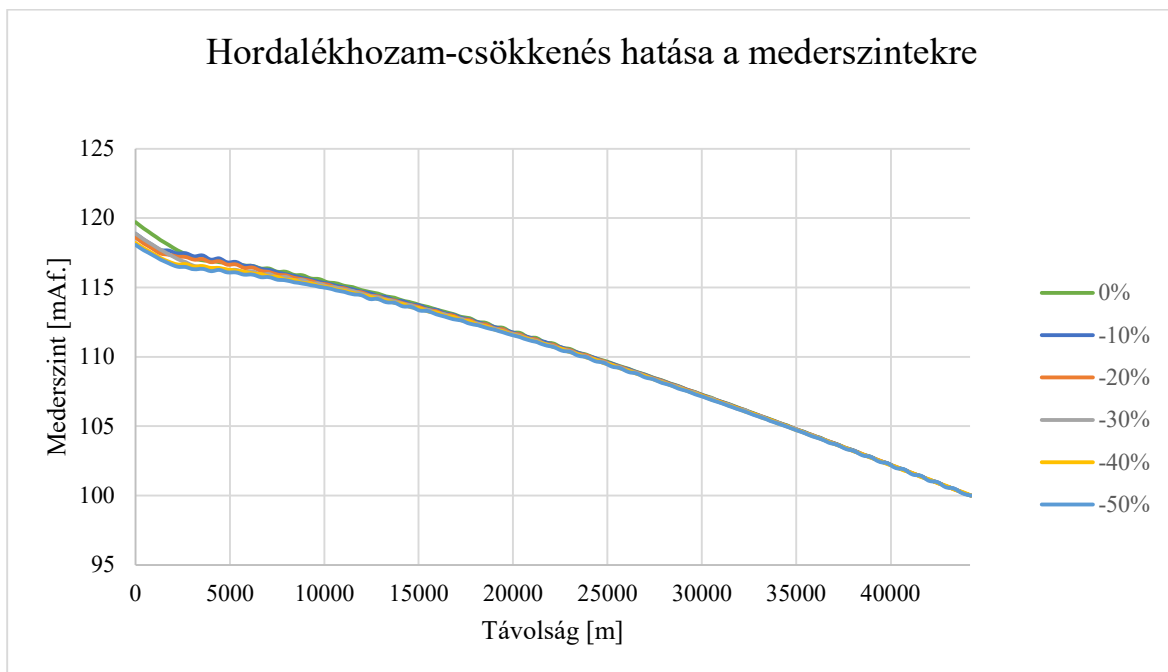
Az tapasztalható, hogy a vízhozam csökkenésével a meder elkezdi tölteni (hiszen a lecsökkent hordalékszallító kapacitás miatt lerakódás megy végbe) és a kezdeti eséstörés lejjebb tolódik a felső szakaszon. Látható, hogy már a vízhozam változása nagy hatást gyakorol a folyó morfológiájára.



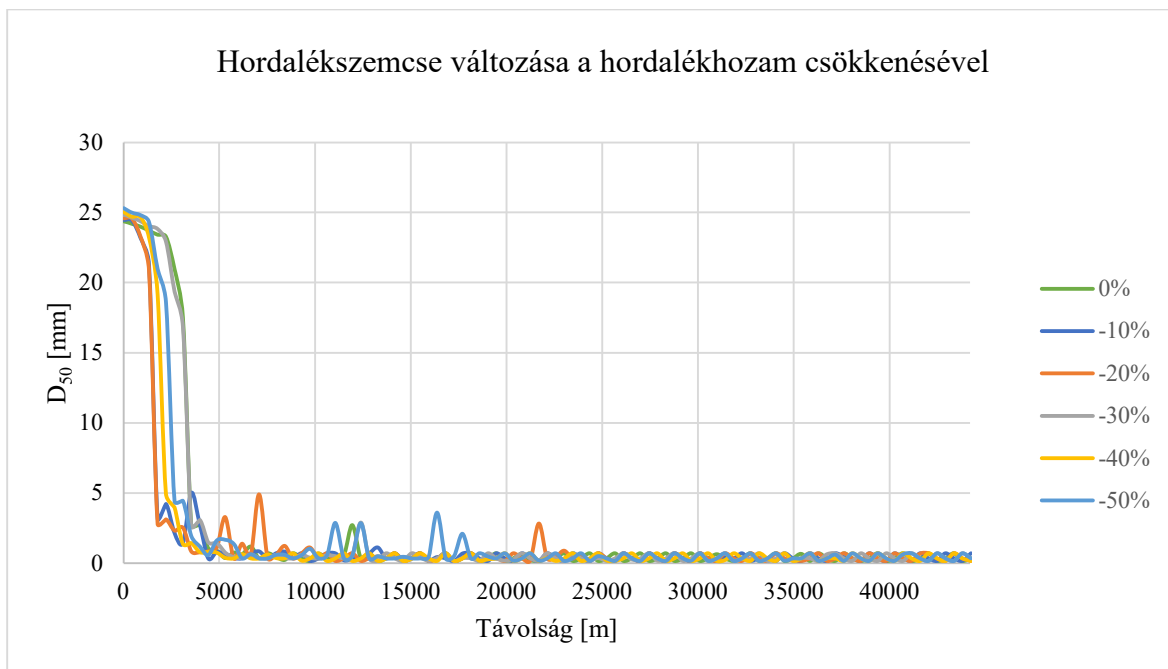
41. ábra: Hordalék-szemcseméret változások a vízhozam csökkenésének függvényében

A vízhozam csökkenés függvényében látható, hogy a szemösszetétel változása nem követ jól definiálható trendet.

- Hordalékhozam változása



42. ábra: Mederszintek összehasonlítása különböző hordalékhozamok szerint

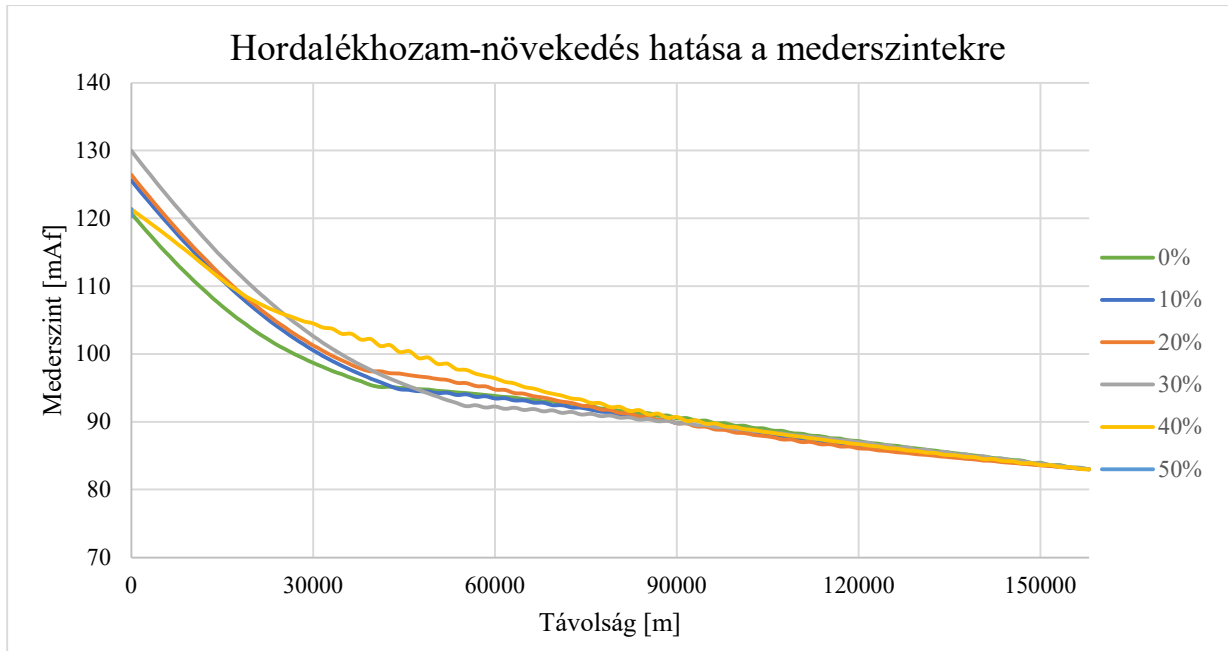


43. ábra: Hordalék-szemcseméret változások a hordalékhozam csökkenésének függvényében

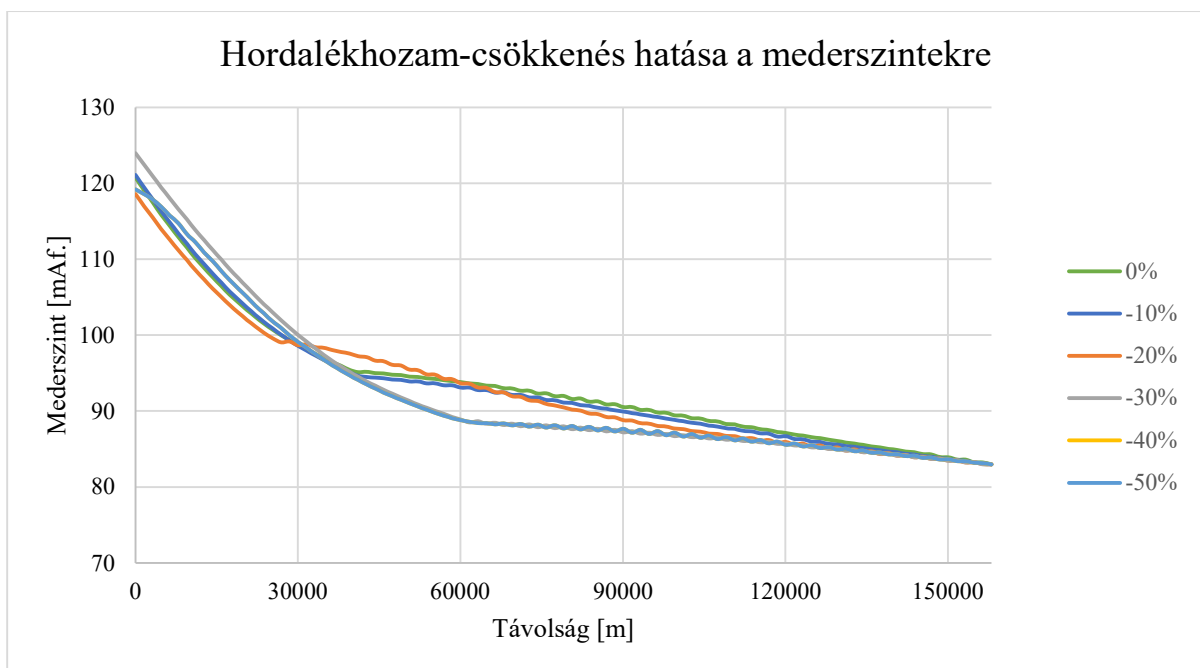
Megfigyelhető a mederszintek és a hordalékméretek között is, hogy a hordalékhozam-csökkenés önmagában nem fejt ki nagy hatást.

○ Érzékenység vizsgálat a teljes szakaszra

Ebben az utolsó érzékenység-vizsgálatban a teljes szakaszt vizsgáltam. A modellt 1000 évre futtattam minden esetben és mindenhol a kezdeti paraméterekkel dolgozva, kivételt képez ez alól a hordalékhozam, amelyre az érzékenységvizsgálatot végeztem. A következő modellvizsgálatban nemcsak azt az esetet néztem meg, hogy a hordalékhozam-csökkenés mit okoz, hanem azt is, hogy a növekedésével milyen változások alakulhatnak ki.

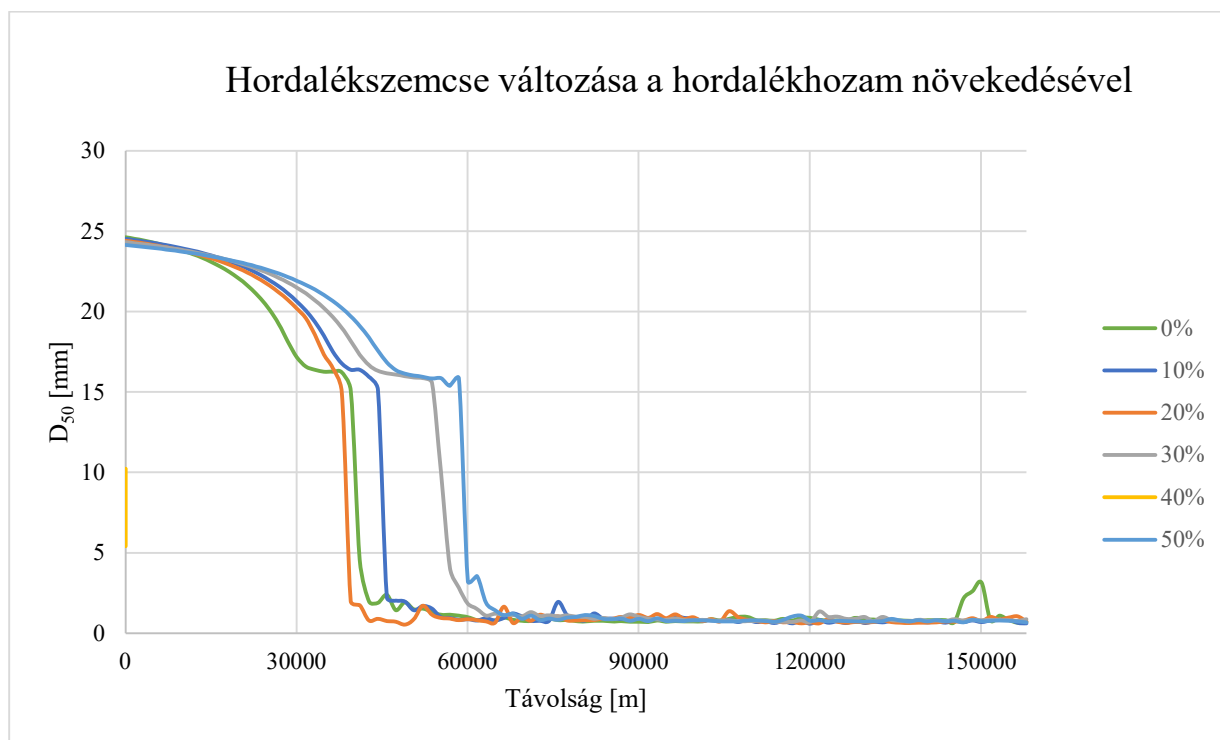


44. ábra: Mederszintek összehasonlítása különböző hordalékhozamok szerint a teljes hossz-szelvényre

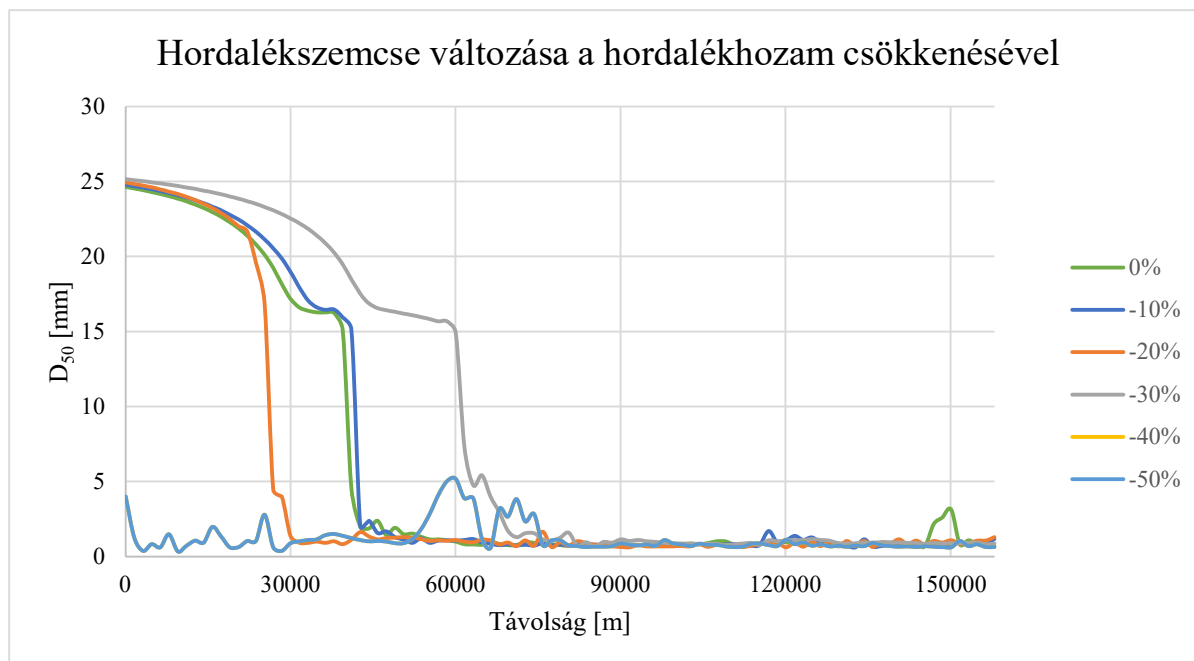


45. ábra: Mederszintek összehasonlítása különböző hordalékhozamok szerint a teljes hossz-szelvényre

Nem találtam egyértelmű trendet a változásokat illetően. Jelentős különbségek azonban megfigyelhetők a görbék között. Ez a vegyes szemösszetétel okozta összetett dinamikára utal. Ez rávilágít arra, hogy a vegyes szemösszetétel milyen bonyolult nagy léptékű folyamatokat eredményezhet. Vagyis a vegyes szemösszetétel számításba vétele elengedhetetlen a hasonló vizsgálatok során.



46. ábra: Hordalék-szemcseméret változások a hordalékhozam növekedésének függvényében a teljes hossz-szelvényre

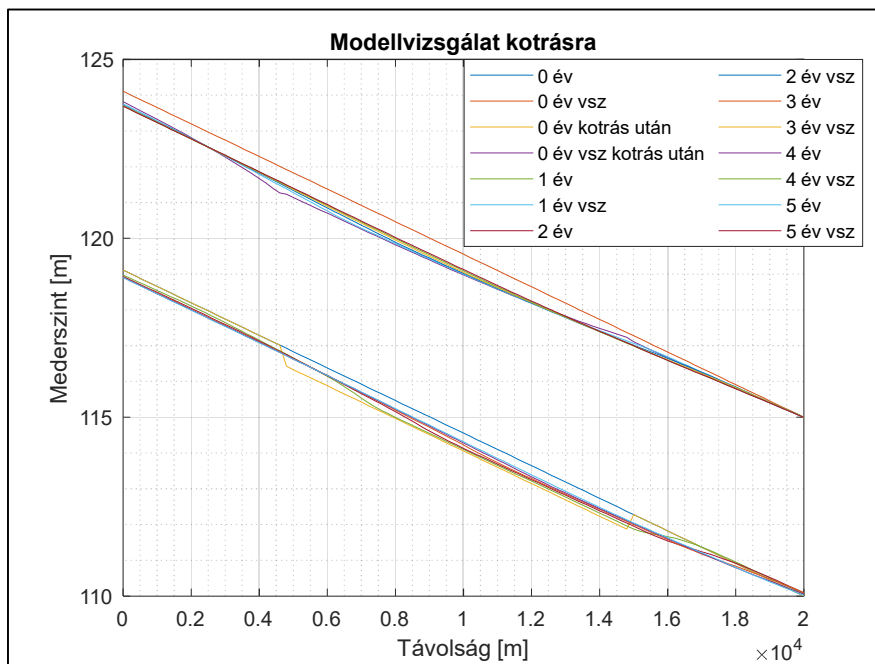


47. ábra: Hordalék-szemcseméret változások a hordalékhozam csökkenésének függvényében a teljes hossz-szelvényre

4.4.5. Kotrások hatásának modellezése

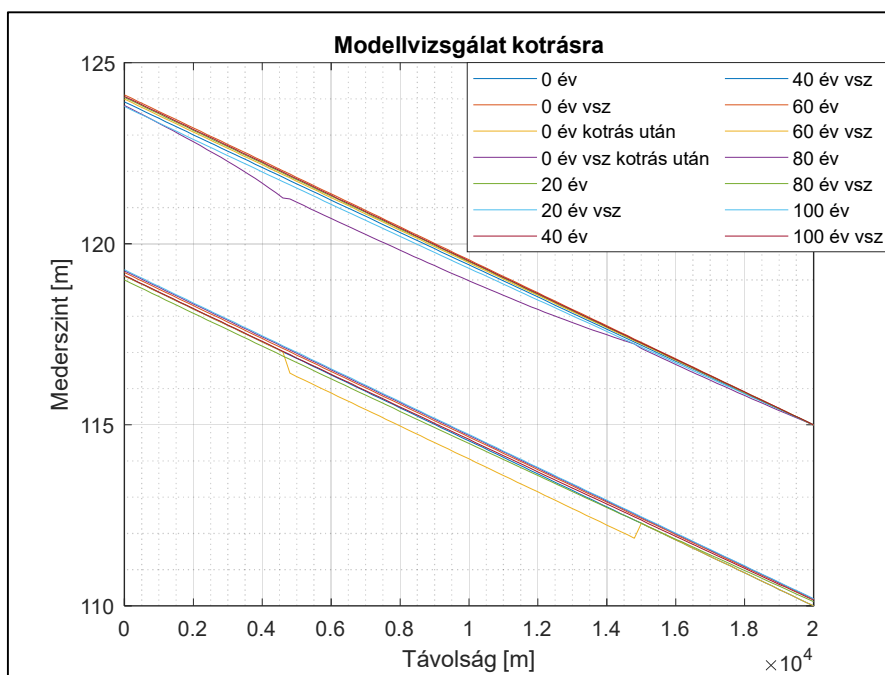
Utolsó modellvizsgálatomban a szakaszon elvégzett fiktív kotrás hatását vizsgáltam. Ahogy a bevezetésben is beszámoltam róla, a vizsgált szakaszon kavicsbányászat működött és az Őrtilos és Vízvár közötti szakaszt túlkotrás jellemezte, míg Vízvártól Barcsig húzódó részt pedig mérsékeltkotrás. Az egyensúlyi állapotra ez a beavatkozás is hatást gyakorolhatott, illetve mindig kizökkentette a folyót az egyensúlyi vagy az egyensúly közeli állapotából. Ezt a jelenséget szerettem volna modellezni úgy, hogy becslést szeretnék adni arra, hogy egy bizonyos mértékű kotrást követően, mennyi idő elteltével áll be újra az egyensúlyi állapot. Illetve demonstrálni szerettem volna, hogy 1D modellezéssel ilyen vizsgálat elvégezhető. A modellben először szükségem volt egy referenciaállapotra, aminél az egyensúly fennáll a szakaszra. A vizsgálatot csak saját modellel végezhettem el, mivel a mederszinteken egy köztes időlépésben kellett változtatnom. Mivel a Wilcock és Crowe modellt még nem sikerült beprogramoznom az 1D modellembe, ezért a Wong és Parker egyfrakciós hordaléktranszport-modelljével számoltam a hordalékmozgást. Tettem ezt annak tudatában, hogy a Wilcock és Crowe modell alkalmazása lett volna indokolt, főleg az előzőekben tapasztaltak tükrében. Ebben a vizsgálatban az őrtilosi szelvény esését 45 cm/km-re vettem fel és D_{50} -es szemátmérőt 19 mm-re emeltem. A kifolyási szinteken nem változtattam, ott minden érték maradt, mint az alapmodellben is. 20 km-es szakaszt vizsgáltam, ahol a középsőfelében, tehát kb. 10 km-es

szakaszon egységesen 0,5 m-es kotrást vettem számításba. A modellt kettő időtávban is futtattam. Először 5 éves időtávot vizsgáltam meg:



48. ábra: 5 éves modellvizsgálat 10 km-en keresztüli kotrásra

Az eredményben az látható, hogy a kikotort résznek kb. 5 évre van szüksége míg feltöltődik, de a kotrás hatása a vízszintekben még mindig fellelhető (közel 0,5 m-es vízszintcsökkenés). Látható az ábrán, hogy a vízszintcsökkenés 5 év elteltével sem állt vissza az eredeti szintre, tehát az egyensúly még nem alakult ki a kotrást követően.



49. ábra: 100 éves modellvizsgálat 10-en keresztüli kotrásra

A beavatkozást követő 100 év elteltével látható az, hogy a kikotort rész feltöltődése mellett a vízszint is stabilizálódik és megközelíti az eredeti értéket. Tehát 100 évvel a kotrást követően a teljes beavatkozás hatása eltűnik és a folyószakasz visszaáll az eredeti egyensúlyi állapotába.

5. Összefoglalás, értékelés

Dolgozatomban a magyarországi Dráva egy kijelölt szakaszának a morfordinamikáját vizsgáltam a dinamikus egyensúlyi állapotra összpontosítva. A vizsgált szakasz Őrtilostól Drávaszabolcsig húzódik, ami magában foglal egy hirtelen eséstörést és jelentős mederanyag finomodást. Az előző évi dolgozatomban felépített 0D modellt paramétereztem, kalibráltam és igazoltam a Dráva három szelvényére (Őrtilos, Barcs és Drávaszabolcs) és ezt használtam kiindulási modellnek. A 0D modell alapján felépítettem egy 1D modellt, amely a folyó morfológiájának időbeli változását képes számítani. Amíg a 0D modellnél fontos volt, hogy csak egy adott szelvénnel dolgozzam, addig a most fejlesztett 1D modellel már folyószakasz változása számítható. A két modell alkotása más platformon működik: míg a 0D modell egy egyszerű Excelben írt függvények sora, addig az 1D modellt már a Matlab programban írtam meg. Az 1D modellel évezredek során végbemenő változások becslése is elvégezhető. Már az előző kutatásban feltettem egy kérdést a dinamikus egyensúlyról, hogy vajon mikor is állhat be egy adott folyónak a dinamikus egyensúlyi állapota? Az előző modellem erre nem tudott választ adni, viszont az 1D modell már becslést tud rá adni.

A modellépítést követően tesztelni szerettem volna a modelletem: vajon lehetséges-e 1D-ben olyan bonyolult folyamat vizsgálata, mint pl. a Dráván tapasztalt eséstörés kialakulása?

Első esetként egyenletesen változó vízmozgást feltételezve alkalmaztam a modellt, egyfrakciós hordaléktranszport-modellt alkalmazva, ahol a múltbéli adatokkal paraméterezve az eséstörés kialakulását sikerült kimutatnom. A modellvizsgálatban feltűntettem, hogy évezredek alatt számszerűsítve mekkora változások léphetnek fel egy adott szakaszon. Azt tapasztaltam, hogy a modell sokkal gyorsabb folyamatnak becsülte az eséstörés kialakulását, mint azt az irodalmi források mutatták. Továbbá, az egyfrakciós közelítés eredményezte, hogy egy hosszú idejű futtatás szerint az eséstörés idővel eltűnik. Ezt a modellt egy későbbi vizsgálatban kiegészítettem a kopással, mert azt vártam, hogy az látványos különbséget ad majd. De azt tapasztaltam, hogy a kopás csak nagyon kismértékben járul hozzá a kialakult állapothoz. Ez is igazolta azt, hogy a hirtelen eséstörésben a szelektív erózió játszik főszerepet. A fokozatosan változó vízmozgást is számításba véve láttam azt, hogy bár annak figyelembevétele indokolt az eséstörés környezetében kialakuló vízfelszín pontos leírásához, de az sem eredményezett

jelentős javulást az eséstörés kialakulásának vizsgálatában. Arra jutottam, hogy nem tudom eléggé pontosan felmérni a változásokat, ha végig csak egy szemcsemérettel számolok.

Az előzőekben ismertetett tapasztalatok miatt kezdtem el vizsgálni a vegyes szemösszetételt is a vizsgált szakaszon. Az 1D modellbe implementált Wilcock és Crowe hordaléktranszport-modelljét használtam fel a vizsgált szakasz elemzésére. A Wilcock és Crowe modell egy nagyon összetett modell (lásd: Melléklet), ezért annak a Matlab környezetbe való kódolása nagyon időigényes és bonyolult feladat. Erre most sajnos nem volt lehetőségem, de távlati célom, hogy Matlabba beprogramozva alkalmazzam majd a hordaléktranszport-modellt. Saját modellel időben változó peremfeltétel megadására is sor kerülhetne, így jóval összetettebb modellvizsgálatok elvégzésére kerülhetne sor. A Wilcock és Crowe modell vizsgálatai alapján sikerült a legjobb egyezést kapnom az eséstörés helyzete, felvízén és alvízén tapasztalható esések, valamint a szemösszetételek tekintetében. Az előző, egyfrakciós modellváltozatokhoz képest nagyságrendi javulás egyértelművé tette a vegyes szemösszetétel számításba vételének szükségességét. Illetve azt is bebizonyította, hogy a Drávai eséstörést és mederanyag változékonyságot a szelektív lerakódás okozza. Ezzel sikerült bebizonyítanom, hogy a Dinge és társai által publikált lehetséges szemcseméret csökkenés magyarázatok közül a Dráva esetében nem az aprózódás, hanem a szelektív lerakódás a kiváltó jelenség.

A Wilcock és Crowe modellel a vízlépcsők hatását is vizsgáltam. Megnéztem, hogy a modell szerint a vízlépcsők telepítése nélkül mikor állna be az egyensúlyi állapot, ezt két módon tettem meg. Az egyik variációban a kezdeti feltételekkel futtattam a modellt 100000 éven keresztül, ahol a 100000 év végén az egyensúly még mindig nem állt fent. Vagyis az eredmények arra utalnak, hogy a vegyes szemösszetétel miatt egy folyamatosan változó állapot alakul ki, aminél az eséstörés nem tűnik el. Sőt, az elhelyezkedését illetően meglepő módon azt láttam, hogy az időnként alvízi, máskor felvízi irányba mozog. A 100000 év során végig nagyjából a mostani helyzete körül mozog. A másik állapotban csak a 10000 évre lefutott eredményekkel számoltam és az eséstörés előtti szakaszt vettem csak figyelembe, mivel a teljes szakasz helyes beépítéséhez saját fejlesztésre lenne szükség. A vizsgálat eredményeként sikerült meghatározni a Barcs feletti szakasz egyensúlyi állapotát.

Végül érzékenységvizsgálatokkal szemléltettem a vízlépcsők telepítésének alvízre gyakorolt hatását. A vizsgálatokkal az is célom volt, hogy demonstráljam, milyen gazdag vizsgálati eszköztárat nyújt egy (elsősorban saját kódolású) 1D morfordinamikai modell. Az érzékenységvizsgálatokban arra jutottam, hogy a vízhozam és hordalékhozam együttesen okozza a mederváltozásokat, de a vízhozamcsökkenésnek nagyobb szerepe van benne. Ugyanerre az

eredményre jutottam a tavalyi TDK dolgozatomban a dunaremetei szelvény szűkülésének vizsgálata során.

A modellek segítségével nagy időtávra is lehetséges becslést adni a morfordinamikai változásokra. A hordalékháztartásnak a megfigyelése és számításba vétele fontos a különféle szabályozások, beavatkozások tervezésénél, hiszen már bizonyította a 0D modell is, hogy jelentős befolyást gyakorol a későbbi mederalakulásra. A dolgozatomban alapján ezt 1D modellezéssel is demonstráltam, a vízlépcsők hatásának és a kotrás hatásvizsgálatának példájával. Úgy gondolom, hogy egy ilyen jellegű modell használata a jövőbeli tervek készítésében nagy segítséget nyújthat. Az 1D modellel ahogy az utolsó vizsgálatban bemutattam, a kotrások hatását is lehet számszerűsíteni és becsülhetővé vált az, hogy egy ilyen beavatkozás után mennyi idő elteltével áll vissza az eredeti egyensúlyi állapot, illetve mennyi ideig és milyen mértékben lehet jelen a meder- és vízszintekben okozott változás. Úgy gondolom az 1D és a Wilcock és Crowe modell számos problémában segítséget nyújthat. A vizsgálataim rámutatnak arra, hogy a hordalékháztartás számításba vétele kulcsfontosságú a folyószabályozás tervezésénél. Nem utolsó szempont, hogy egy ilyen morfordinamikai modell peremfeltételeket tud adni más szakágak vizsgálataihoz.

6. Ábrajegyzék

1. ábra: Pliocén kori vízrendszer (Forrás: https://static-cdn.arcanum.com/nfo-resources/pannon_pic/pannon/panfo-239-1.jpg)	6
2. ábra: Vizsgált szakasz helyszínrajza (Forrás: Google Maps, 2021)	7
3. ábra: Barcs 1930-as mederfelvételi ábrája (Forrás: 1931. évi Vízirajzi Évkönyv)	8
4. ábra: Barcs 1963-as mederfelvételi ábrája (Forrás: 1964. Vízirajzi Évkönyv)	9
5. ábra: Barcs 1979-es mederfelvételi ábrája (Forrás: 1980. évi Vízirajzi Évkönyv)	9
6. ábra: Drávaszabolcs 1993-es mederfelvételi ábrája (Forrás: 1994. évi Vízirajzi Évkönyv)	10
7. ábra: Jellemző keresztmetszvények Órtilos környezetében 3 különböző időszakból (Forrás: BME VVT, 2020)	10
8. ábra: Jellemző keresztmetszvények Barcs környezetében 3 különböző időszakból (Forrás: BME VVT, 2020)	11
9. ábra: Jellemző keresztmetszvények Drávaszabolcs környezetében 3 különböző időszakból (Forrás: BME VVT, 2020)	11
10. ábra: Dráva hossz-szelvény (Forrás: Dráva atlasz, 1970)	13
11. ábra: Órtilos görgetett hordalék szemeloszlási görbe (Forrás: BME VVT, 2020)	15
12. ábra: Órtilos mederanyag szemeloszlási görbe (Forrás: BME VVT, 2020)	15
13. ábra: Barcs görgetett hordalék szemeloszlási görbe (Forrás: BME VVT, 2020)	16
14. ábra: Barcs mederanyag szemösszetételi görbe (Forrás: BME VVT, 2020)	16
15. ábra: Drávaszabolcs görgetett hordalék szemeloszlási görbe (Forrás: BME VVT, 2020)	17
16. ábra: Drávaszabolcs mederanyag szemeloszlási görbe (Forrás: BME VVT, 2020)	17
17. ábra: Barcs 1979-es mederfelvétel és a vízálláshoz tartozó vízhozamai (Forrás: 1980. évi Vízirajzi Évkönyv)	18
18. ábra: Drávaszabolcs 1993-es mederfelvétel és a vízálláshoz tartozó vízhozamai (Forrás: 1994. évi Vízirajzi Évkönyv)	19
19. ábra: Mederszintek változása 1000 év alatt egyenletesen változó vízmozgás esetén	30
20. ábra: Mederszintek változása 5000 év alatt egyenletesen változó vízmozgás esetén	Hiba! A könyvjelző nem létezik.
21. ábra: Mederszintek összehasonlító ábrája a kezdeti állapottól 1000 és 5000 év elteltével	31
22. ábra: Dimenziómentes csúsztatófeszültségek összehasonlító ábrája a kezdeti állapottól 1000 és 5000 év elteltével	32
23. ábra: Mederszintek változása 1000 év alatt fokozatosan változó szabadfelszínű vízmozgás esetén	33
24. ábra: Mederszintek változása 5000 év alatt fokozatosan változó szabadfelszínű vízmozgás esetén	33
25. ábra: Mederszintek összehasonlító ábrája a kezdeti állapottól 1000 és 5000 év elteltével	34
26. ábra: Dimenziómentes csúsztatófeszültségek összehasonlító ábrája a kezdeti állapottól 1000 és 5000 év elteltével	34
27. ábra: Mederszintek összehasonlítása egyenletes- és fokozatosan változó vízmozgások esetében 5000 év elteltével	35
28. ábra: Dimenziómentes csúsztatófeszültségek összehasonlítása egyenletesen- és fokozatosan változó vízmozgások esetében 5000 év elteltével	35
29. ábra: Mederszintek változása 1000 év alatt egyenletesen változó vízmozgás esetén az aprózódást is figyelembe véve	36
30. ábra: Mederszintek változása 5000 év alatt egyenletesen változó vízmozgás esetén az aprózódást is figyelembe véve	37
31. ábra: A vizsgált szakasz szemcseméret változása	37
32. ábra: Mederszintek összehasonlítása egyenletes változó vízmozgások esetében az aprózódás nélkül és annak jelenlétével 5000 éves távlatban	38
33. ábra: Dimenziómentes csúsztatófeszültségek összehasonlítása egyenletesen változó vízmozgások esetében az aprózódás nélkül és annak jelenlétével 5000 éves távlatban	38

34. ábra: Wilcock modell 10000 éves mederszint eredményei az Őrtilos-Drávaszabolcs szakaszán ...	41
35. ábra: Wilcock modell 10000 éves átlagos szemátmérő eredményei az Őrtilos-Drávaszabolcs szakaszán	42
36. ábra: Görgetett hordalék és mederanyag hosszmenti változása (Forrás: BME VVT, 2019).....	43
37. ábra: Múltbéli egyensúlyi állapot becslése a felső szakaszra, amennyiben nem épül szabályozási műtárgy.....	44
38. ábra: Múltbéli egyensúlyi állapot becslése a teljes szakaszra, amennyiben nem épül szabályozási műtárgy.....	45
39. ábra: Wilcock modell 100000 éves átlagos szemátmérő eredményei az Őrtilos-Drávaszabolcs szakaszán	46
40. ábra: Mederszintek összehasonlítása különböző vízhozamok szerint	47
41. ábra: Hordalék-szemcseméret változások a vízhozam csökkenésének függvényében.....	47
42. ábra: Mederszintek összehasonlítása különböző hordalékhozamok szerint	48
43. ábra: Hordalék-szemcseméret változások a hordalékhozam csökkenésének függvényében.....	48
44. ábra: Mederszintek összehasonlítása különböző hordalékhozamok szerint a teljes hossz-szelvényre	49
45. ábra: Mederszintek összehasonlítása különböző hordalékhozamok szerint a teljes hossz-szelvényre	49
46. ábra: Hordalék-szemcseméret változások a hordalékhozam növekedésének függvényében a teljes hossz-szelvényre.....	50
47. ábra: Hordalék-szemcseméret változások a hordalékhozam csökkenésének függvényében a teljes hossz-szelvényre.....	51
48. ábra: 5 éves modellvizsgálat 10 km-en keresztüli kotrásra	52
49. ábra: 100 éves modellvizsgálat 10-en keresztüli kotrásra	52
50. ábra: Dráva hossz-szelvénye, 1970 (Forrás: Vízgazdálkodási Tudományos Kutató Intézet, II. Felszíni Vizek Osztálya, A Dráva folyó hossz-szelvénye, 1970)	63
51. ábra – A vizsgált keverékek frakcióinak kritikus fenék-csúsztatófeszültségei laboratóriumi mérések alapján és a Shields görbével becsülve (Wilcock and Crowe, 2003)	65
52. ábra – A referencia fenék-csúsztatófeszültségek és az átlagos szemcsék referencia fenék-csúsztatófeszültségeinek aránya, azok átmérőinek hányadosa függvényében (Wilcock and Crowe, 2003).....	66
53. ábra – Az átlagos szemcsemérethez tartozó dimenziómentes csúsztatófeszültség a mederfelszín homoktartalma függvényében (Wilcock and Crowe, 2003).....	67
54. ábra – A dimenziómentes hordalékhozam a fenék-csúsztatófeszültség és a hasonlósági paraméter (τ_{ri}) hányadosának függvényében (Wilcock and Crowe, 2003)	68

7. Táblázatjegyzék

1. táblázat: 1975 előtti paraméterek.....	24
2. táblázat: Őrtilos, peremfeltételek.....	26
3. táblázat: Őrtilos, számított értékek	26
4. táblázat: Barcs, peremfeltételek.....	26
5. táblázat: Barcs, számított értékek	27
6. táblázat: Drávaszabolcs, peremfeltételek	27
7. táblázat: Drávaszabolcs, számított értékek	27
8. táblázat: Modell kiindulási szemösszetételei.....	40
9. táblázat: Számításhoz használt szemösszetételek	44

8. Hivatkozások

- Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Építőmérnöki Kar, Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszék: Hidraulika I, egyetemi jegyzet, Budapest, 2004.
- Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Építőmérnöki Kar, Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszék: Hidraulika II, egyetemi jegyzet, Budapest, 2004.
- BME Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszék A Dráva-folyó 0-236 fkm-ek közötti szakaszán jelentkező medersüllyedés okainak feltárása, Budapest, 2020.
- BME Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszék Dráva hordalékmérés és morfológiai értékelés, Budapest, 2019.
- G. Andrási: A Dráva horvát-magyar szakaszán a vízjárás és a mederdinamika vizsgálata, SZTE. Ph.D. értekezés, Szeged, 2015
- Vízgazdálkodási Tudományos Kutató Intézet, II. Felszíni Vizek Osztálya, A Dráva folyó hossz-szelvénye, 1970
- Dráva folyó nagyvízi mederkezelési terv 05.nmt.01 örtilos államhatár 236 fkm – barcs szakaszhatár 154,1 fkm készült az 83/2014. (III. 14.) Korm. rendelet alapján, Pécs, 2014
- G. Mező: Magyarország természetföldrajza, Akadémia Kiadó, 2011
- M. Pécsi: Geomorfológia és domborzatminősítés. (Elmélet–Módszer–Gyakorlat 53.) MTA FKI, Budapest, 1991
- J. Bogárdi: *A hordalékmozgás elmélete*. Budapest, Hungary: Akadémiai Kiadó, 1955
- B. Burján: A Pesti-síkság fiatal-harmadidőszaki és negyedidőszaki kavicsképződményeinek összehasonlító vizsgálata. PhD-értekezés, TFGT, Szeged, 2002
- Bonacci és Oskoruš (2019) Human Impacts on Water Regime. In: Lóczy (Ed.) The Drava River, Springer Geography, Chapter 9, pp. 125-138. ISBN 978-3-319-92816-6
- C. Li, M. J. Czapiga, E. C. Eke, E. Viparelli & G. Parker: *Variable Shields number model for river bankfull geometry: bankfull shear velocity is viscositydependent but grain size-independent*, Journal of Hydraulic Research: 53:1, 36-48, 2015.
- G. Parker: *Selective Sorting and Abrasion of River Gravel. II: Applications*, Journal of Hydraulic Engineering: 117(2), 1991.
- M. Wong and G. Parker: *Reanalysis and Correction of Bed-Load Relation of Meyer-Peter and Müller Using Their Own Database*, Journal of Hydraulic Engineering 132(11), 2006.

- Meyer-Peter, E. and Müller, R., 1948, Formulas for Bed-Load Transport, *Proceedings*, 2nd Congress, International Association of Hydraulic Research, Stockholm: 39-64.
- M. Garcia: "Sedimentation Engineering: Processes, Measurements, Modeling and Practice", *American Society of Civil Engineers*, ISBN: 978-0-7844-0814-8, 2008
- Wilcock, P. R., and Crowe, J. C., 2003, Surface-based transport model for mixed-size sediment, *Journal of Hydraulic Engineering*, 129(2), 120-128.
- E.H. Dingle, K.M. Kusack and J.G. Venditti, The gravelsand transition and grain size gap in river bed sediments, *Earth-Science Reviews* (2021)
- Országos Vízügyi Főigazgatóság, Vízrajzi évkönyvek. Vízügyi honlap: <https://www.vizugy.hu/print.php?webdokumentumid=1524>, 2021.
- Google Maps, online légifelvétel, Google, <https://www.google.hu/maps>, 2021.
- G. Parker: *1D Sediment Transport Morphodynamics with applications To Rivers and Turbidity Currents*, e-book, http://hydrolab.illinois.edu/people/parkerg/morphodynamics_e-book.htm, 2004.
- https://static-cdn.arcanum.com/nfo-resources/pannon_pic/pannon/panfo-239-1.jpg
- Use of hysteresis for defining the nature of flood wave propagation in natural channels (tandfonline.com)
- G. T. Török: Vegyes szemösszetételű folyómeder morfodinamikájának numerikus vizsgálata, BME- ÉMK TDK, Budapest, 2011.
- E. Nyiri: Folyók dinamikus egyensúlyi állapotát becselő eljárás kidolgozása és alkalmazása a magyarországi Felső-Dunán, BME-ÉMK TDK, Budapest, 2020.

9. Köszönetnyilvánítás

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

Jelen TDK munka a Nemzeti Kutatási, Fejlesztése és Innovációs Hivatal – NKFIH PD 135037 számú OTKA pályázat támogatásával készült.

Köszönetemet fejezem ki a Kék bolygó Klímavédelmi Alapítvány Fontus vízügyi és környezetvédelmi hallgatói ösztöndíjáért, amely a kutatásomat támogatta.