



**Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem**

**Építőmérnöki Kar**  
Vízépítőmérnöki szekció

**Tudományos Diákköri Konferencia**  
**2014**

**100 éves árvízszintek sztochasztikus vizsgálata**  
**1D hidrodinamikai modellel a Rába alsó**  
**szakaszán**

Szerző: Csibrán Adrián Zoltán

**Konzulens: Dr. Krámer Tamás**

## Tartalomjegyzék

Ábrajegyzék .....	2
1. Bevezetés.....	4
2. A 2013. júniusi dunai árvíz .....	5
3. A Rába.....	6
4. HEC-RAS.....	8
5. A Rába árvízi modellje.....	10
5.1. Geometria .....	10
5.2. Érzékenység-vizsgálat .....	12
5.3. Kalibráció .....	15
5.4. Validáció .....	20
6. MÁSZ vizsgálatok.....	23
6.1. Peremfeltételek.....	24
6.2. MÁSZ meghatározása .....	31
6.3. Eredmények.....	31
6.4. Árhullámok elemzése .....	34
6.5. MÁSZ alternatívák.....	36
6.6. Érzékenység-vizsgálatok.....	39
6.7. Adathalmaz csökkentése .....	41
7. Konklúzió .....	42
Felhasznált irodalom .....	44
Melléklet.....	45

## Ábrajegyzék

1. ábra: Rába geometria helyszínrajzi részlet ArcGIS-ben, oldalsó megvilágítással érezkeltetve a domborzati viszonyokat. A zöld vonalak a számítási keresztmetszvényeket jelölik, a lila vonalak a töltéseket. ....	11
2. ábra: A Rába-modell helyszínrajzi kialakítása HEC-RAS szoftverben .....	11
3. ábra: A meder és a hullámtér érdessége változtatásának modellezett hatása az árhullámképre a Rába – Ragyogó-híd szelvényben, a 2013. februári árvíz során .....	13
4. ábra: A meder és a hullámtér érdessége változtatásának modellezett hatása az árhullámképre a Rába - Nick szelvényben a 2013. februári árvíz során .....	13
5. ábra: A meder és a hullámtér érdessége változtatásának modellezett hatása az árhullámképre a Rába – Vág szelvényben a 2013. februári árvíz során .....	14
6. ábra: A meder és a hullámtér érdessége változtatásának modellezett hatása az árhullámképre a Rába – Árpás szelvényben a 2013. februári árvíz során .....	14
7. ábra: A fontosabb szelvények helyszínrajzi elhelyezkedése .....	16
8. ábra: A modellezett és a megfigyelt idősor a 2013-as kora tavaszi árhullámokon a Rába - Ragyogó-híd szelvényben .....	17
9. ábra: A modellezett és a megfigyelt idősor a 2013-as kora tavaszi árhullámokon a Rába - Nick szelvényben .....	18
10. ábra: A modellezett és a megfigyelt idősor a 2013-as kora tavaszi árhullámokon a Rába - Vág szelvényben. ....	18
11. ábra: A modellezett és a megfigyelt idősor a 2013-as kora tavaszi árhullámokon a Rába - Árpás szelvényben.....	19
12. ábra: A modellezett és a megfigyelt vízhozam idősor a 2013-as kora tavaszi árhullámokon a Rába - Árpás szelvényben. ....	20
13. ábra: A modellezett és a megfigyelt idősor a 2009-es árhullámon a Rába - Ragyogó-híd szelvényben .....	21
14. ábra: A modellezett és a megfigyelt idősor a 2009-es árhullámon a Rába - Nick szelvényben .....	21
15. ábra: A modellezett és a megfigyelt idősor a 2009-es árhullámon a Rába - Vág szelvényben .....	22

16. ábra: A modellezett és a megfigyelt idősor a 2009-es árhullámon a Rába - Árpás szelvényben .....	22
17. ábra: Geometria a MÁSZ vizsgálatokhoz .....	24
18. ábra: Generált idősor a Duna - Medve szelvényben.....	25
19. ábra: Generált idősor a Rába - Ragyogó-híd szelvényben .....	26
20. ábra: Idősorok eloszlása a Duna - Medve szelvényben.....	27
21. ábra: Idősorok eloszlása a Duna - Medve szelvényben 2.....	27
22. ábra: Idősorok eloszlása a Rába- Ragyogó-híd szelvényben .....	28
23. ábra: Idősorok eloszlása a Rába- Ragyogó-híd szelvényben 2. ....	28
24. ábra: Autokorreláció a Duna - Medve szelvényben .....	30
25. ábra: Autokorreláció a Rába- Ragyogó-híd szelvényben.....	30
26. ábra: Mértékadó árvízszint hossz-szelvénye 1. ....	32
27. ábra: Mértékadó árvízszint hossz-szelvénye 2. ....	32
28. ábra: Mértékadó árvízszintet kialakító árhullámok .....	33
29. ábra: Mértékadó árvízszintek a számítási szelvényekben .....	34
30. ábra: A felső szakasz mértékadó árvízszintjeit kialakító árhullámok .....	35
31. ábra: Az alsó szakasz mértékadó árvízszintjeit kialakító árhullámok.....	35
32. ábra: A középső szakasz mértékadó árvízszintjeit kialakító árhullámok.....	36
33. ábra: MÁSZ alternatívák: Vízállás és vízhozam alapú mértékadó árvízszintek generált adatsor 100 éves visszatérésű árhullámai alapján .....	37
34. ábra: Az eredeti MÁSZ eljárás és az alternatívák közötti eltérés.....	38
35. ábra: Érzékenység-vizsgálat: a mértékadó árvízszintekben beálló változások az alvízi szakaszt befolyásoló konstans változása esetén .....	39
36. ábra: Érzékenység-vizsgálat: a mértékadó árvízszintekben beálló változások a százévenként előforduló vízhozam változtatása esetén .....	40
37. ábra: A mértékadó árvízszintek adathalmaz nagyságára való érzékenysége .....	41

## 1. Bevezetés

2013-ban a Dunán addig soha nem látott árvíz vonult végig, meghaladva az addigi jégmentes LNV-t. A vízügyi igazgatóságok sikeres együttműködésének köszönhetően nem következett be komolyabb baj, sikeresen megvédték a településeket az áradástól. A 2013-as árvíz rávilágította a vízügyben dolgozókat arra, hogy a mértékadó árvízszinteket felül kell vizsgálni, és ez 2014 őszére az ország több folyójára meg is történt. Bár a 2013-as év árvize indította el az elemzések sorozatát, a századforduló környékén előforduló veszélyes árvizek már rávilágítottak a szakembereket arra, hogy az árhullámok levonulást befolyásoló feltételek vélhetően megváltoztak (Szigyártó 2009).

Az új MÁSZ-módszertan nagyszámú árvízi helyzet hidrodinamikai modellezésén alapul, azok közül választja ki mértékadónak az 1%-os valószínűséggel előforduló legmagasabb vízszintet. A BME Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszéke irányította ezeket a munkákat, amely során számos olyan kérdéssel találkoztak, ami részletesebb vizsgálatot is megérdemel. Az itt bemutatott TDK munkámmal a MÁSZ felülvizsgálatának eljárásaiból kiindulva elemeztem az árhullámok levonulásának a dinamikáját és a mértékadó vízszintek és a vízhozamok összefüggését a Rába esettanulmányként kiválasztott Sárvár-Győr közötti szakaszán. Vizsgálataimhoz 1D árvízi modellt építettem föl erre a szakaszra.

Az egydimenziós modellt a HEC-RAS hidrodinamikai alapú programban készítettem el. A geometriához szükséges digitális terepmodellt az ArcGIS térinformatikai szoftverben hoztam létre, majd a HEC-GeoRAS segítségével exportáltam. A peremfeltételhez használt hidrológiai idősorok Monte-Carlo szimulációval kerültek létrehozásra, az eredményeket a Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszéktől kaptam. A programok segítségével elsősorban az újonnan alkalmazott eljárással kívántam megállapítani a mértékadó árvízszinteket. Az eredményeken ezután különböző statisztikai elemzéseket és érzékenységvizsgálatokat végeztem.

## 2. A 2013. júniusi dunai árvíz

2013 nyarán a Dunán levonult minden idők eddigi legnagyobb árvize, amely ellen a védekezés az egész ország figyelmét magára vonta.

Az árhullámot a felső vízgyűjtőn tapasztalható hatalmas csapadék indította el. Az árhullámot meteorológiai körülmények sorozata erősítette tovább. A hosszú európai tél, alacsony hőmérsékletek, késői hóolvadás, kevés napfény és a magas talajtelítettség együtt segítettek létrehozni egy gyors lefolyású, magas árvízi csúccsal rendelkező árhullámot. Az árhullám Németországtól egészen Romániáig végig vonult. A lehulló csapadék meghaladta a 400 mm-t is mindössze 90 óra alatt. Mivel a csapadék elsősorban koncentrált, lokális volt, a mellékfolyókon nem érkezett többlet víztömeg a Dunába. Így a visszaduzzasztott mellékfolyók tározó szerepét töltötték be, minimálisan csökkentve a Duna vízhozamát.

Mohács térségének kivételével a Duna minden szelvényében meghaladta a vízszint az addigi LNV-t. A helyzet súlyosságát tovább növelte, hogy ehhez hasonló meteorológia esemény nem is olyan régen, 2002-ben is bekövetkezett. Tehát nem kizárt, hogy a közeljövőben ismét a 2013-hoz hasonló csapadék hullik a vízgyűjtőre, ami más körülmények között még nagyobb vízszinteket okozhat. Az ÉDUVIZIG ADCP műszerrel vízhozam méréseket végzett az árvíz idején. Vámoszabadinál  $10640 \text{ m}^3/\text{s}$ -os vízhozamot mértek. A korábbi számítások alapján ez egy 125-135 éves visszatérésű idejű vízhozamnak felel meg, azonban az új számítások már csak 80-nak vélelmezik. Összesen 800 kilométer hosszú szakaszon folyt a védekezés, ebből 540 kilométeren extrém árvízi készültség volt elrendelve. A tényleges védekezés május 31-től június 19-ig tartott.

(- Floods in June 2013 in the Danube River Basin- Published by: ICPDR – International Commission for the Protection of the Danube River)

A védekezés során kiderült, hogy a települések nem képesek egyedül megfékezni egy ekkora árhullámot. Az ország egész területéről szükség volt emberekre, akik elsősorban tűzoltók, katonák, katasztrófavédők és önkéntesek voltak. Az árvíz idején a legkritikusabbnak ítélt szakaszok az ÉDUVIZIG területén: Komárom-almásfüzitői árvízvédelmi szakasz, Vének-dunaremetei árvízvédelmi szakasz, Dunaremete-rajkai árvízvédelmi szakasz, Vének-

dunaszentpáli árvízvédelmi szakasz, Győr-koroncói árvízvédelmi szakasz, az ADUVIZIG területén: Baja-foktői árvízvédelmi szakasz.

(KÖTIVIZIG Védelmi Osztag Zárójelentés 2013-08-05)



**Bordás megtámasztás Győrújfaluban**

(KÖTIVIZIG Védelmi Osztag Zárójelentés 2013-08-05)

Az árvíz felhívta a vízügyben dolgozók figyelmét arra, hogy a korábban megállapított mértékadó árvízszintek valószínűleg már nem megfelelőek a jelenlegi viszonyokra. Ennek legvalószínűsíthetőbb oka a klímaváltozás, melynek egy jelentős formája a szélsőségek gyakoriságának növekedése, de többletnövekedést okozhatnak még a geometria és érdességi változások is. Ennek következtében az összes magyarországi folyóra megindult a mértékadó árvízszintek felülvizsgálata, kezdve a Dunával.

### **3. A Rába**

A Rába Ausztriában, a Fischbachi-Alpokban két ágból ered, melyek Passainál egyesülnek. Magyarország harmadik leghosszabb folyója, teljes hossza eléri a 283 kilométert (ebből 188 kilométer a magyarországi szakasz). Torkolata a Mosoni-Dunával Győr belvárosában található. Magyarországra Szentgotthárdnál lép be. A Rába kizárólag Győr és Sárvár között van szabályozva, a fentebbi szakaszokon az egész árteret elöntheti a víz árvizek idején. A Rába töltésésésének folyamata 1870-ben a Szombathelyen tartott találkozóval kezdődött el. 1883-ban a gyenge gátakat könnyedén átszakította az érkező árhullám, hatalmas pusztításokat

végezve elsősorban Árpás és Győr térségében. Ezután a kormány támogatásával felgyorsult a Rába menti töltések építése, mintegy 10 év alatt a Sárvár alatti szakasz töltésezésre került.

A Rába esése a hegyek között körülbelül 89,6 cm/km, a Kis-alföldre érve azonban lecsökken, Győr térségében már csak 24,1 cm/km körüli. A Sárvár feletti szakaszon a folyó elsősorban meanderező, ezért nehezen modellezhető. Sárvár alatt inkább az egyenes szakaszok dominálnak, könnyebben modellezhető. A továbbiakban leírtak kizárólag erre a szakaszra érvényesek.

(<http://hu.wikipedia.org/wiki/R%C3%A1ba>)

Az árvízi lefolyást nagyban akadályozza a sűrű növényzet. Győr térségében elsősorban a fűz- és nyárfák elterjedtek, míg Árpástól az akác és a tölgy dominál. A fentebbi szakaszon megjelenik a kőris és a bodza is. A szakaszon több szűkület is található, melyek árvízkor kritikus részek lehetnek. Ilyen szűkület található például Rábakecöl és Vág között. Tovább rontja a lefolyási viszonyokat a szakaszon található 15 darab műtárgy. Bár a hidak pályája nem lóg bele az árvízi úrszelvénybe, mégsem elhanyagolható az általuk okozott visszaduzzasztó hatás. Néhány, nagyvíz idején is üzemelő híd esetében a vízszállítást nem csak kizárólag a pillérek akadályozzák, a hídra rávezető földművek olykor teljes egészében elzárják a hullámtéri vízszállítást (Például a Rábakecöl térségében elhelyezkedő híd esetében). A folyó legjelentősebb műtárgya a Nicki duzzasztómű, mely árvíz idején nem üzemel, így csak a mederben elhelyezkedő pillérek okoznak vízszintemelkedést. A Rábán továbbá találhatóak jégvezető sávok is.





**Rába medre kisvíz idején**

Az egyik legkomolyabb problémát a nagyvízi mederbe belógó növényzet okozza. A legjelentősebb levezető sávban akadályozza a víz mozgását, az árvízi medernek ezzel igen nagy többlet Manning-féle érdességi tényezőt kölcsönözve.

## **4. HEC-RAS**

A dolgozatom során használt elsődleges program a HEC-RAS, amely az Egyesült Államok Hadseregének Mérnök hadteste által kifejlesztett egydimenziós hidrodinamikai modellező program, melyet a Mérnökhadtest továbbra is folyamatosan fejleszt. Könnyen használható, praktikus, és egyik legnagyobb előnye, hogy ingyenes, ezért az egyik legismertebb egydimenziós modellnek számít. Hazánkban is igen elterjedt, a vízügyi igazgatóságok nagy része folyamatosan használja, naprakész modellekkel rendelkezve. Több programhoz is biztosítja a könnyed átjárás. Talán legfontosabb ezek közül az ArcGIS-hez megírt HEC-GeoRAS című kiegészítő program, amit én is használtam dolgozatomban. A HEC-GeoRAS

segítségével az ArcGIS-ben definiálni lehet a hidraulikai egységeket, majd exportálni HEC-RAS-sal kompatibilis formátumban a geometriát.

A HEC-RAS egy modell indításához 3 input fájlt igényel. Első a geometria, második a peremfeltétel - mely lehet permanens vagy nem permanens -, a harmadik a terv fájl. Az idősorokat a HEC-RAS dss formátumban kezeli, melyek szerkesztésére a HEC-DSSVue nyújt lehetőséget.

([http://vit.bme.hu/targyak/hidroinf/HEFOP\\_Hidroinformatika.pdf](http://vit.bme.hu/targyak/hidroinf/HEFOP_Hidroinformatika.pdf))

(Árvízi 1D modellezés HEC-RAS programmal [www.vit.bme.hu](http://www.vit.bme.hu))

A program a szabadfelszínű, fokozatosan változó nempermanens vízmozgásokat a Saint-Venant egyenletek segítségével írja le. A Saint-Venant egyenletek két részre oszthatóak, a folytonossági és a dinamikai egyenletekre (HEC-RAS User's manual 2010).

A folytonossági egyenlet a térfogat megmaradás elvén alapul:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0$$

ahol:

- A: Nedvesített keresztmetszetszelvény
- Q: Vízhhozam [m<sup>3</sup>/s]
- x : folyás menti helykoordináta
- t: idő

A dinamikai egyenlet az impulzus megmaradás elvén alapul:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial \left( \frac{\beta \cdot Q^2}{A} \right)}{\partial x} + g \cdot A \cdot \left( \frac{\partial z}{\partial x} + S_E \right) = 0$$

ahol:

- $\beta$  : a sebesség egyenetlen eloszlása miatti bevezetett tényező
- g : nehézségi gyorsulás
- $S_E$  : súrlódási veszteség

Az alapegyenletek egy differenciálegyenlet-rendszert alkotnak, amelyet a program numerikusan old meg a véges differencia módszer alapján a folytonos értelmezési tartományt diszkretizálva.

(<http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/>)

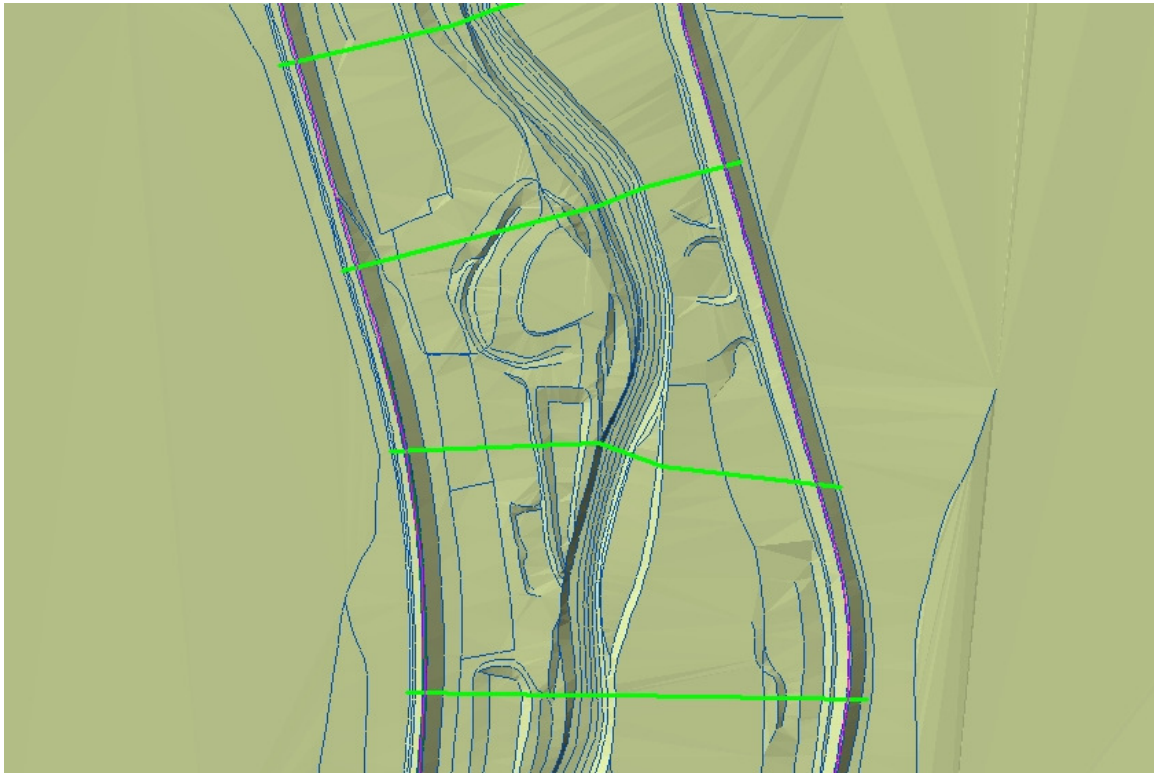
## 5. A Rába árvízi modellje

### 5.1. Geometria

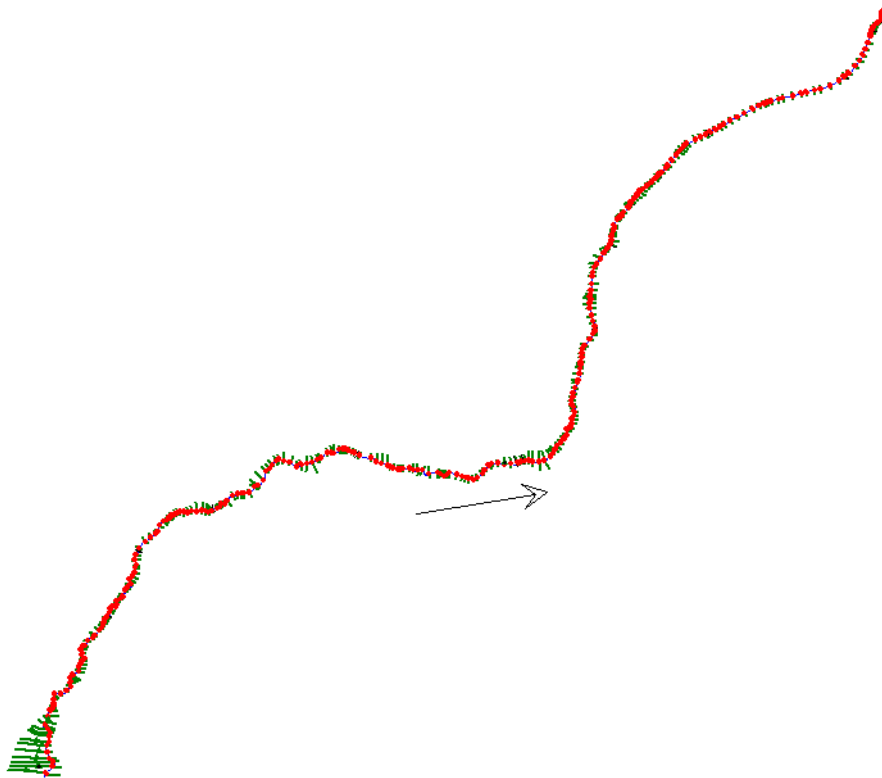
Először a modell legösszetettebb input fájlját, a geometriát kellett elkészítenem. A geometria kizárólag a Sárvár Győr közötti szakaszt foglalja magába. A Sárvár feletti szakaszon nem lett volna szerencsés egy egydimenziós modell használata, ugyanis ezen a területen a Rába nincs töltésezve, azaz árvízkor a folyó nagyobb területeket, az egész árteret maga alá gyűri. Másik oka, hogy a fentebbi szakaszon a Rába jellege megváltozik, erősen kanyargós, meanderező meder lesz jellemző. E két tényező miatt jelentős oldalirányú sebességek keletkeznek, amelyek elhanyagolása egy hitelességét veszített modellhez vezetne.

A területi felméréseket az Észak-dunántúli Vízügyi Igazgatóság szolgáltatta a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszékének, és ezeket használtam én is fel a munkámban. Külön fájlban álltak rendelkezésemre a sztereofotogrammetriai eljárással készített hullámtéri felmérések és a 352 darab metszetben ultrahangos mélységmérővel történő medergeometria mérések. A keresztmetszvényeket belesüllyesztettem a terepmodellbe, a mederfelmérések közötti szakaszokon a partél geometriáját követve lineárisan interpoláltam a függőleges koordinátákat. A felmért pontokat az ArcGIS térinformatikai szoftverbe importáltam (1. ábra), ahol a program segítségével egyszerű háromszög hálót generáltam. Az ArcGIS-hez ingyenes letölthető bővítmény a HEC-GeoRAS, amely segítségével a geometria importálható a HEC-RAS-ba (2. ábra). Az ArcGIS-ben külön layer-eken meg kellett adni a meder partéleit, a sodorvonal helyét, a töltések koronáját, a keresztmetszvényeket és a hullámtér lefolyási vonalát. A keresztmetszvényeket a felmért keresztmetszvények helyéhez és a modell megkívánt pontosságához igazodva körülbelül 200 méterenként jelöltem ki, ez a 80 kilométeren összesen körülbelül 400 keresztmetszvényt jelent. A keresztmetszvények minden esetben merőlegesek voltak a meder középvonalára, a keresztmetszvények hullámtéri része általában kisebb-nagyobb szögben eltért, mert így igyekeztem az 1%-os árvíz várható áramlási irányaira merőlegessé tenni. A becsült hullámtéri lefolyási vonal elsősorban a hullámtér alacsonyabb pontjain vezet keresztül. A digitális terepmodellen továbbá szerepelnek épületek, azonban ezek minden esetben két keresztmetszvény között helyezkednek el, ezért az egydimenziós modell nem érzékeli őket.

Lokális érdesítéssel figyelembe vehetőek lennének, azonban mivel számuk minimális, hatásukat elhanyagoltam.



1. ábra: Rába geometria helyszínrajzi részlet ArcGIS-ben, oldalsó megvilágítással érzékeltetve a domborzati viszonyokat. A zöld vonalak a számítási keresztmetsvényeket jelölik, a lila vonalak a töltéseket.



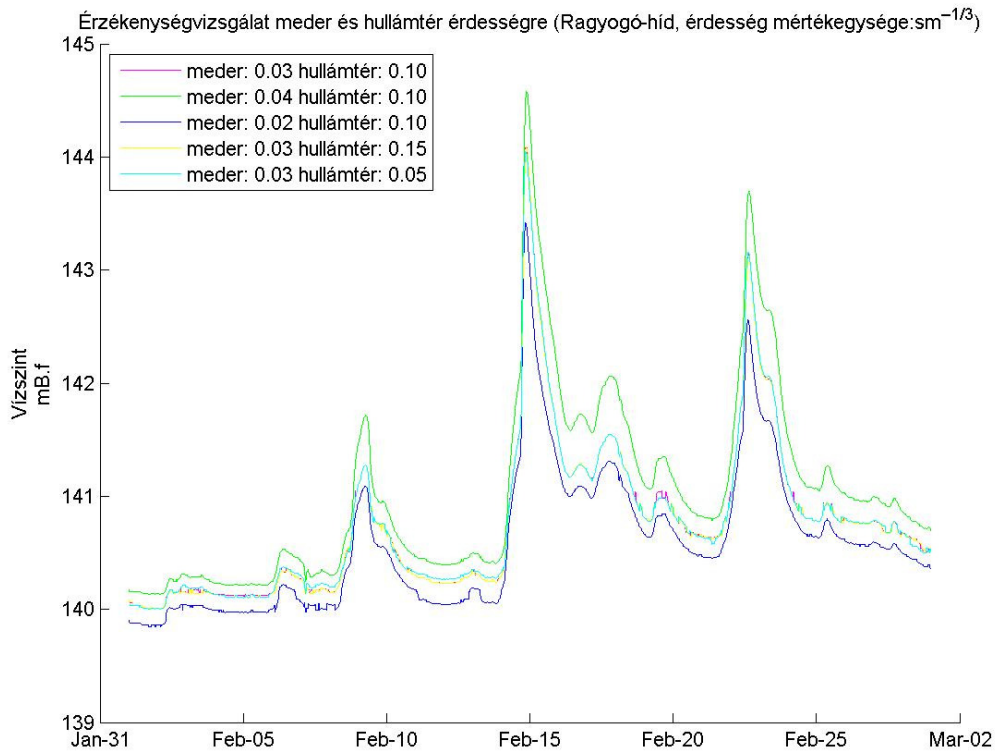
2. ábra: A Rába-modell helyszínrajzi kialakítása HEC-RAS szoftverben

A hidak helyét az ArcGIS-ben jelöltem ki, geometriájukat azonban a HEC-RAS-ban rajzoltam meg. A pillérek helyét, szélességét és a pálya magasságát a <http://www.hidadatok.hu> webes adatbázisból gyűjtöttem ki, a rávezető földművek helyzetét pedig a terepmodellről olvastam ki. Igyekeztem a keresztmetszvényeket úgy felvenni, hogy a hidaktól az alvíz illetve a felvíz irányába közel azonos távolságra legyen a két szelvény. Összesen 15 darab hidat (a Nicki duzzasztóművel együtt) vittem be a modellbe, ebből 4 híd Győrben található.

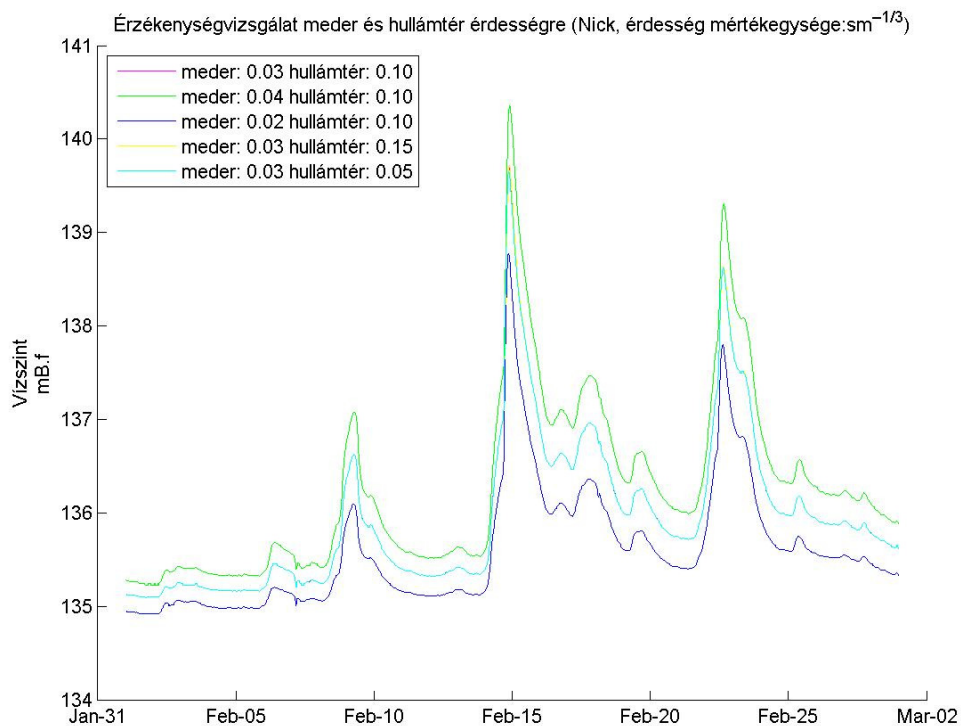
## ***5.2. Érzékenység-vizsgálat***

A kalibráció előtt, azt megkönnyítve, elvégeztem egy érzékenységvizsgálatot. A vizsgálat célja a modell érzékenységének meghatározása volt a kalibrálandó paraméterekre. Az én esetemben kizárólag egy paraméter került kalibrálásra, a Manning-féle érdességi tényező. Az tényező fizikai tartalommal rendelkezik, de a helyszínen közvetlenül nem mérhető, kizárólag a modellezett vízszintekből számolható vissza. Az érdesség csökkentésével értelemszerűen a terep simasága növelhető, aminek hatására csökken a folyékony víz és a szilárd talaj között létrejövő csúsztatófeszültség, és adott fajlagos vízhozam nagyobb sebességgel, alacsonyabb vízmélységgel folyik le. Az érdességi tényezőt külön lehet beállítani a mederre, és külön a jobb és bal oldali hullámtérre. Ha nincs különösebb különbség az utóbbi kettő között, akkor a jobb és a bal hullámtér érdessége megegyezőnek tekinthető a modellben.

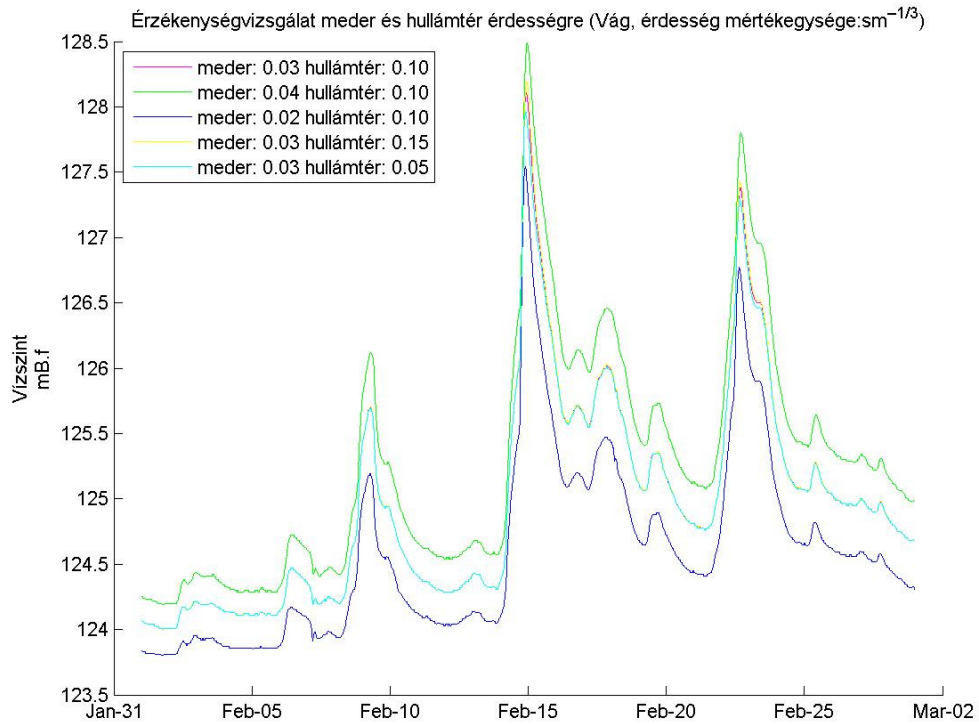
Az érzékenység vizsgálatot a 2013-as árvízen végeztem el. Kiindulási meder érdességnek  $0,03 \text{ sm}^{-1/3}$ -t vettem fel, a hullámtér kiindulási érdességének értékére  $0,1 \text{ sm}^{-1/3}$ -t alkalmaztam. Négy különböző szelvényben vizsgáltam a vízszintek változását, 4 különböző esetben. Két esetben a meder érdességét változtattam meg  $0,01 \text{ sm}^{-1/3}$ -al, két esetben pedig a hullámtér érdességét  $0,05 \text{ sm}^{-1/3}$ -al. Az eredményeket a 3-6. ábrák prezentálják.



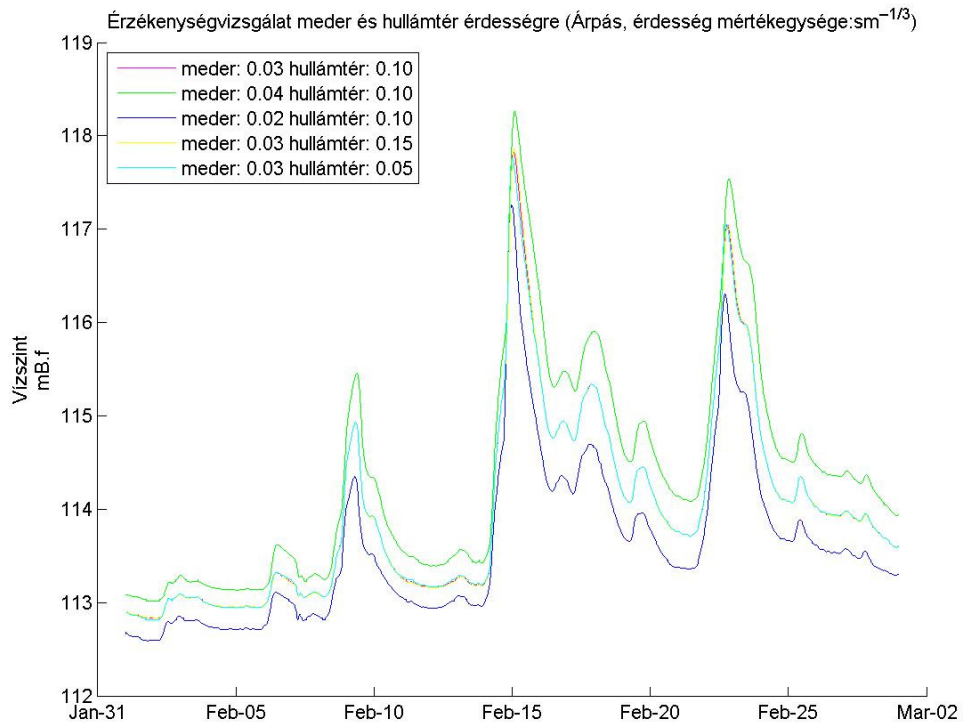
3. ábra: A meder és a hullámtér érdessége változtatásának modellezett hatása az árhullámképre a Rába – Ragyogó-híd szelvényben, a 2013. februári árvíz során



4. ábra: A meder és a hullámtér érdessége változtatásának modellezett hatása az árhullámképre a Rába - Nick szelvényben a 2013. februári árvíz során



5. ábra: A meder és a hullámtér érdessége változtatásának modellezett hatása az árhullámképre a Rába – Vág szelvényben a 2013. februári árvíz során



6. ábra: A meder és a hullámtér érdessége változtatásának modellezett hatása az árhullámképre a Rába – Árpás szelvényben a 2013. februári árvíz során

A meder érdességének  $0,01 \text{ sm}^{-1/3}$ -al való növelése általánosan körülbelül 30 centiméterrel növeli a vízszintet. A felső peremtől lefelé a változás mértéke, tehát a vízszint mederérdességre való érzékenysége valamelyest nő. Ennek oka, hogy a folyó hosszabb szakaszán folyik át az árvíz, mielőtt a vizsgált szelvényhez ér, ezért már megelőzően hosszabb szakaszon összegződik az érdesség változtatása, illetve a keresztshelvény alakja is eltérő. Hasonló a helyzet akkor is, amikor a meder érdességét csökkentjük. A peremek közelében az érdesség változtatása a várakozásnak megfelelően minimális változást okoz, ezeken a szakaszokon elsősorban a peremfeltétel pontossága a mértékadó.

A hullámtér érdességének változtatására minimálisan érzékeny a modell. Nyilvánvalóan az igen nagy érdesség változtatás a kisvízi viszonyokat egyáltalán nem befolyásolja, de az árvízi vízszinteket is maximálisan csak 20-30 centiméterrel növelte. Ez ahhoz köthető, hogy a modell szerint árvizek esetén a hullámtéri lefolyás jóval kisebb a mederben történő lefolyásnál. Kérdéses lehet, hogy a 2013-asnál nagyobb, pl. 1%-os valószínűségű árvíz esetén ezek a megállapítások hogyan változnának. Az érzékenység-vizsgálat összefoglalása a 1. táblázatban látható, amelyben a kiindulási esettől való differenciák kerültek feltüntetésre.

Érdesség	Meder	0,03	0,04	0,02	0,03	0,03
	Hullámtér	0,1	0,1	0,1	0,15	0,05
Ragyogó-híd	Átlag	0,00 m	0,26 m	-0,19 m	0,00 m	-0,02 m
	Max	0,00 m	0,64 m	-0,74 m	0,07 m	-0,15 m
Nick	Átlag	0,00 m	0,32 m	-0,36 m	0,00 m	0,00 m
	Max	0,00 m	0,78 m	-1,01 m	0,05 m	-0,11 m
Vág	Átlag	0,00 m	0,31 m	-0,38 m	0,00 m	-0,01 m
	Max	0,00 m	0,52 m	-0,75 m	0,11 m	-0,21 m
Árpás	Átlag	0,00 m	0,37 m	-0,40 m	0,01 m	-0,01 m
	Max	0,00 m	0,86 m	-1,11 m	0,13 m	-0,29 m

1. táblázat: Érzékenység-vizsgálat összefoglalása

### 5.3. Kalibráció

A kalibráció bemeneti adatának szintén a 2013-as év koratavaszi árhullámát adtam meg. Ebben az évszakban két árhullám is levonult a folyón, ezért a kalibrációt egyszerre két árhullámon lehetett elvégezni. A maximális vízhozam Sárvárnál  $539 \text{ m}^3/\text{s}$  volt, ami jóval

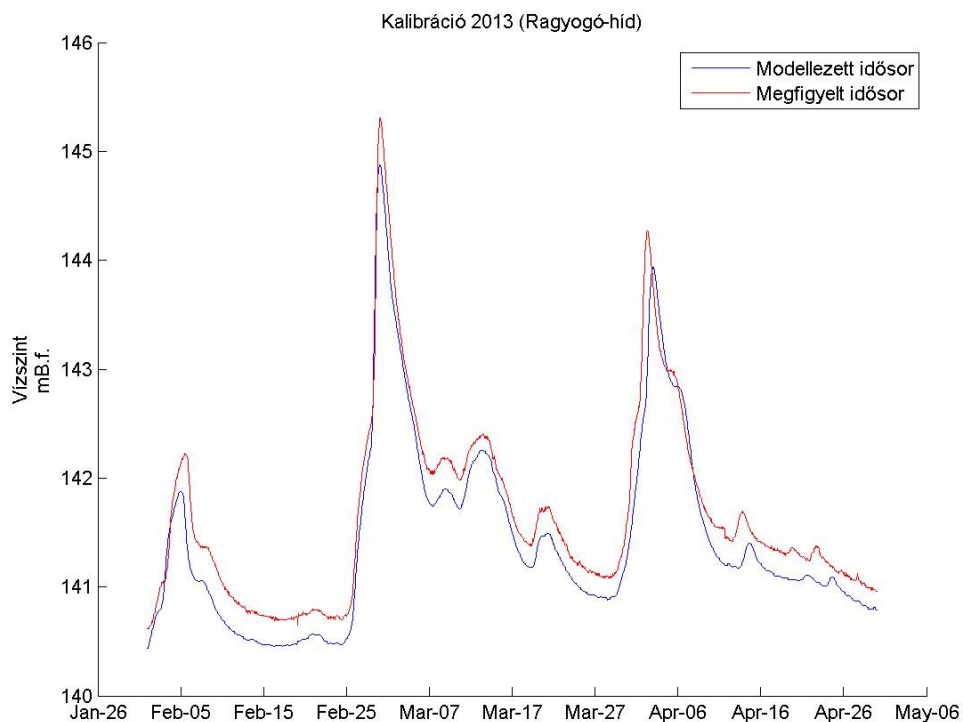


kisebb az újonnan megállapított 100 évenként előforduló vízhozamnál. Az érdességi viszonyok így a kora tavaszi növényzet alapján lettek beállítva. Célszerűtlen lett volna a modellt a nyári árhullámon kalibrálni, ugyanis ez esetben az alsóbb szakaszokon az alvízi visszaduzzasztás okozta a magas vízszinteket. Mivel a hullámtér érdességére kis érzékenységet mutatott a modell, a kisvizek és a nagyvizek vízszintjeit egyszerre nem lehetett reprodukálni. Ennek egyik fizikai oka az, hogy a meder érdessége teljesen mást mutat kisvíz és nagyvíz idején: a nagyvízi mederbe fasorok tömkelege lóg be a partról - akadályozva ezzel a víz szabad folyását -, ezért ebből a hatásból várhatóan nagyobb lesz a meder látszólagos nagyvízi érdessége. Esetemben legfontosabb feladat volt a maximális vízszintek idejének és nagyságának helyes kalibrálása, a kisvizek pontossága másodlagos. A kalibráláshoz 4 szelvényben álltak rendelkezésemre a vízszintek. Ezek: Ragyogó-híd (73,4 fkm), Nicki duzzasztómű alvize (68,5 fkm), Vág (51,2 fkm) és Árpás (29,0 fkm). A kalibráció során a Marcal (10,5 fkm) vízhozamát pontszerű hozzáfolyásként definiáltam, a Répce-árapasztó (61,1 fkm) hatása a kalibrációs időszakban minimális volt, ezért elhanyagoltam. Az érdességek szempontjából a folyót 4 jellegszakaszra osztottam, elsősorban az ellenőrző keresztshelvények alapján, másodsorban a növényhatárok alapján. A fontosabb szelvények helyszínrajzi elhelyezkedése a 7. ábrán látható.

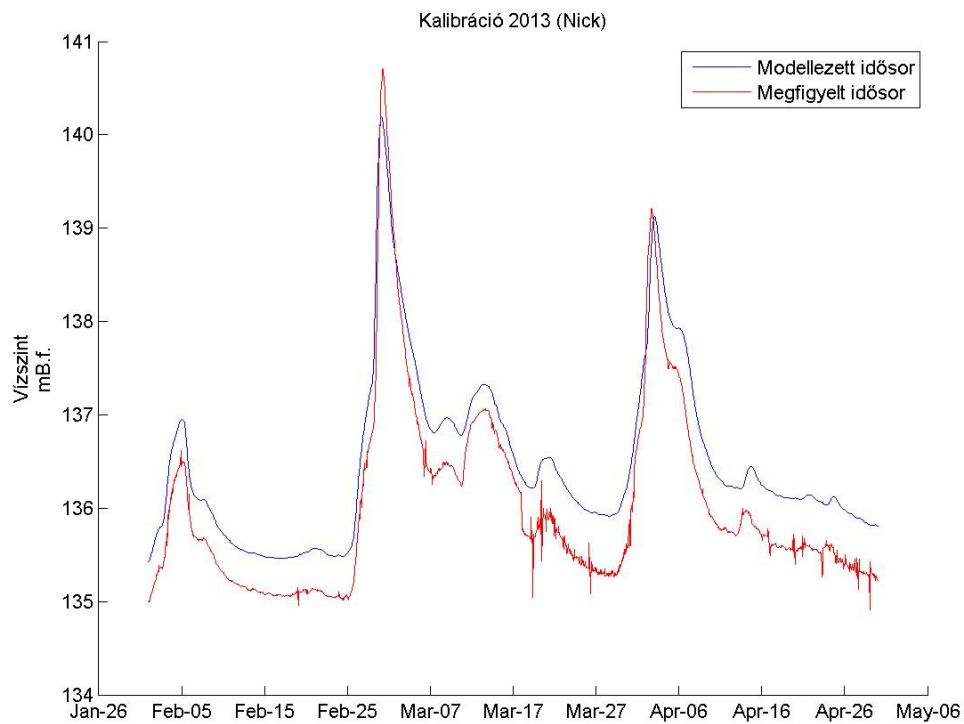


7. ábra: A fontosabb szelvények helyszínrajzi elhelyezkedése

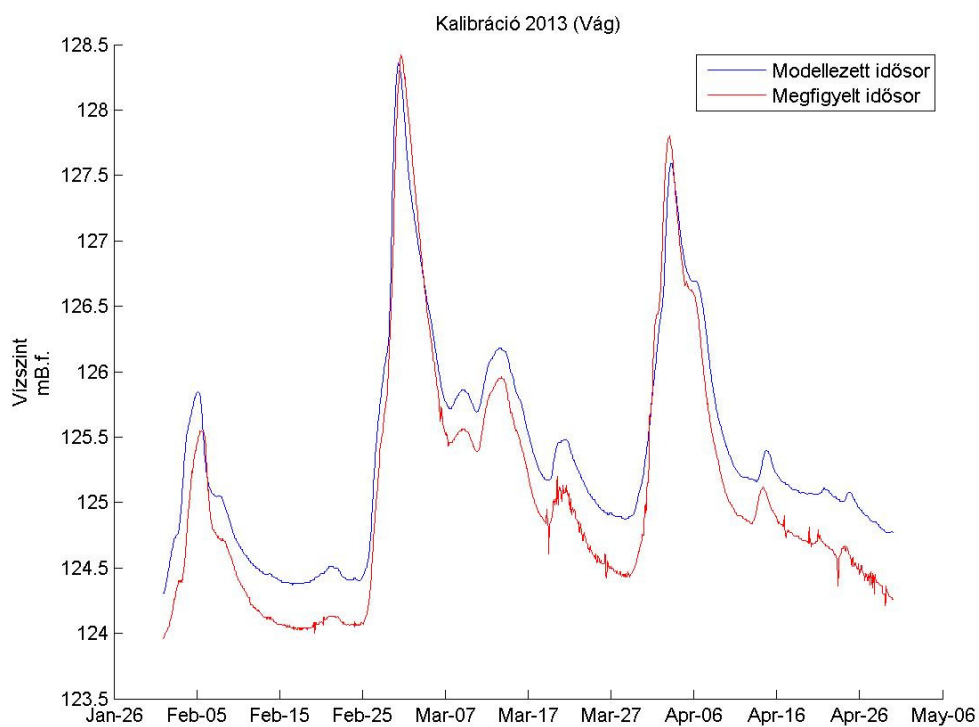
A kalibráció eredményeként megállapítható, hogy a folyót túlnyomórészt a nagy érdesség jellemzi. Ez várható is volt a sok helyen igen benőtt mederszelvénynek köszönhetően. A kalibráció során nem kívántam kilépni az érdességi tényező értékének fizikailag lehetséges határai közül, ezért néhány esetben a modell kismértékben alábecsüli a hullámot. Ez elsősorban a felső peremhez közeli szakaszon okozhat problémát, ugyanis ebben a térségben az érdességi tényező nagy változtatására gyengén reagáltak a vízszintek. A hullámtéri érdességet egységesen  $0,2 \text{ sm}^{-1/3}$ -nak vettem, amely fizikai értelemben a felső érdességi határ közelében található. A meder érdessége fentről-lefelé haladva rendre az alábbi módon változott:  $0,044$ ,  $0,037$ ,  $0,033$  és  $0,034 \text{ sm}^{-1/3}$ . Az ellenőrző szelvények modellezett és mért árhullám képei az 8-11. ábrákon láthatóak.



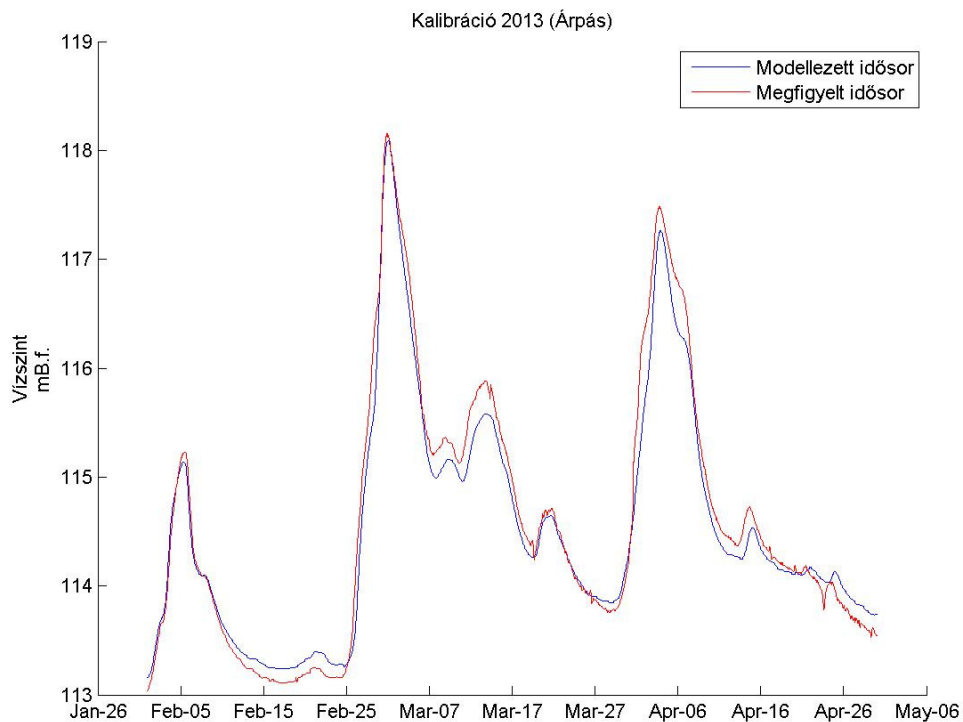
8. ábra: A modellezett és a megfigyelt idősor a 2013-as kora tavaszi árhullámokon a Rába - Ragyogó-híd szelvényben



9. ábra: A modellezett és a megfigyelt idősor a 2013-as kora tavaszi árhullámokon a Rába - Nick szelvényben



10. ábra: A modellezett és a megfigyelt idősor a 2013-as kora tavaszi árhullámokon a Rába - Vág szelvényben.

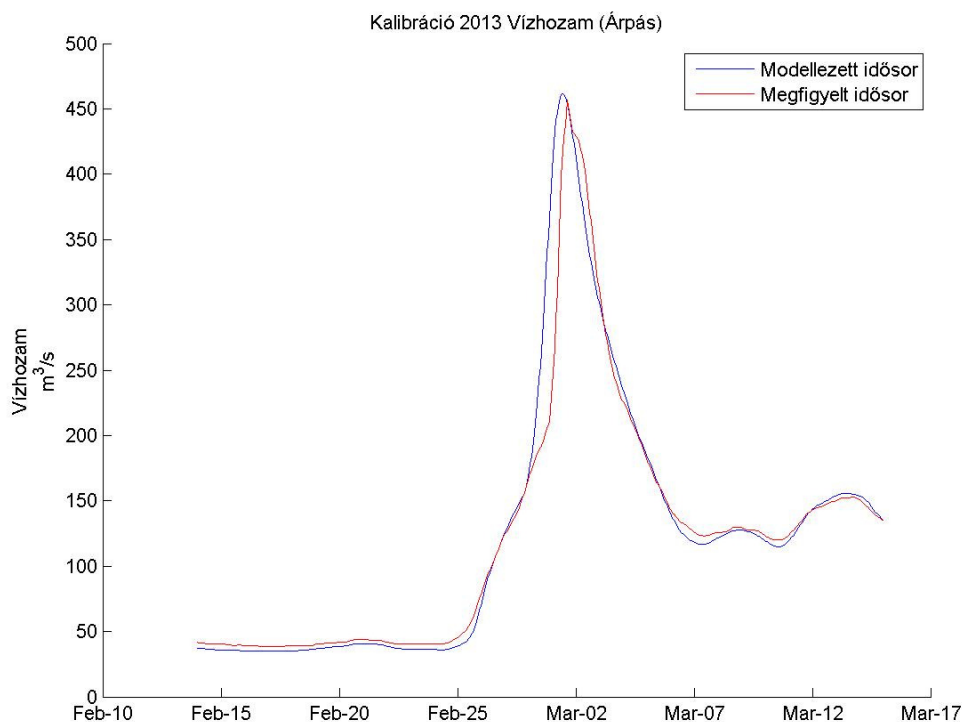


**11. ábra:** A modellezett és a megfigyelt idősor a 2013-as kora tavaszi árhullámokon a Rába - Árpás szelvényben.

A kisvizek idején a kalibrált modell néhány esetben akár 1 méterrel is eltért a mért vízállásoktól. Nagyobb probléma, hogy a fentebbi szakaszokon a nagyvizek idején is több vízmércénél pontatlan volt a modell. Az első árhullám esetén a ragyogó-hídi szelvényben a tetőző vízállások között 43 cm-es különbség volt, a nicki alvízi szelvényében ugyanez az érték már közel félméteres volt. A második, kisebb árhullám reprodukálása jobban sikeredett, itt ugyanezek az értékek 33 és 8 cm-re csökkentek. A problémát a felvízi vízhozam alapú perem közelsége okozhatja, valamint a Nicki duzzasztómű tökéletlen modellezése.

Lefelé haladva a kalibráció pontosabb eredményeket adott. A modellezett folyószakasz felső 40%-nál található vági keresztzelvényben a modell által előállított árhullám maximuma mindössze 6 centiméterrel tért el a valóságtól. Ugyanez az érték volt jellemző az árpási keresztzelvényben. Érdekes, hogy a fentebbi szakaszokkal szemben itt az áprilisi árhullámot sikerült kevésbé pontosan előállítani, itt a különbség 21-22 centiméter volt.

A kalibráció során végeztem egy ellenőrzést a vízhozamokra is. A vízhozam vizsgálatot célszerűen a felső vízhozam alapú peremtől távol, az árpási szelvényben végeztem. Az eredményt a 12. ábra mutatja.

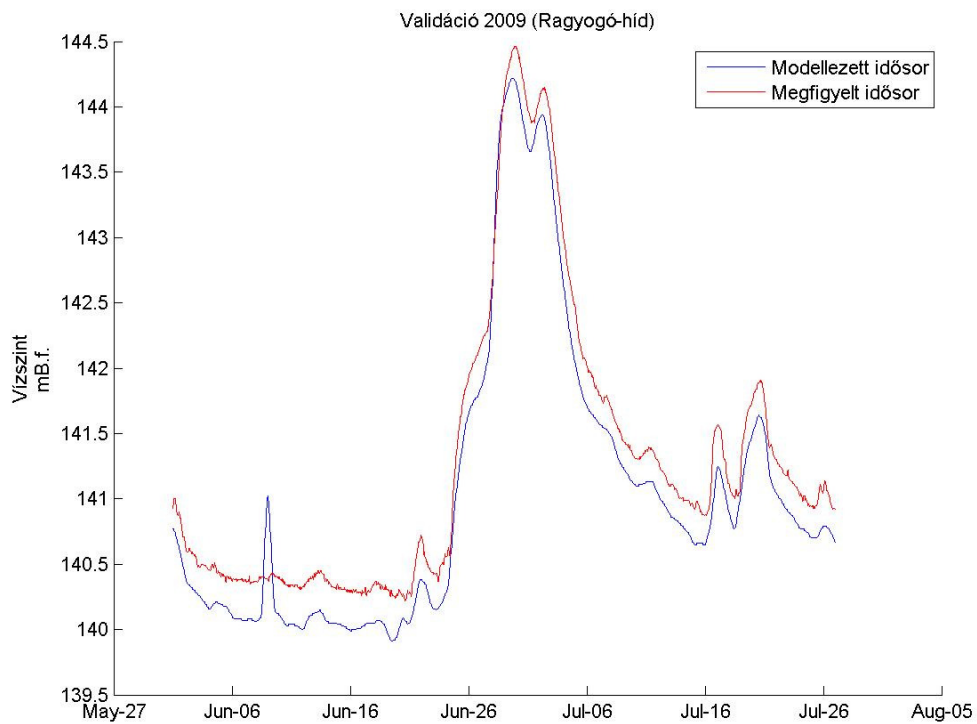


12. ábra: A modellezett és a megfigyelt vízhozam idősor a 2013-as kora tavaszi árhullámokon a Rába - Árpás szelvényben.

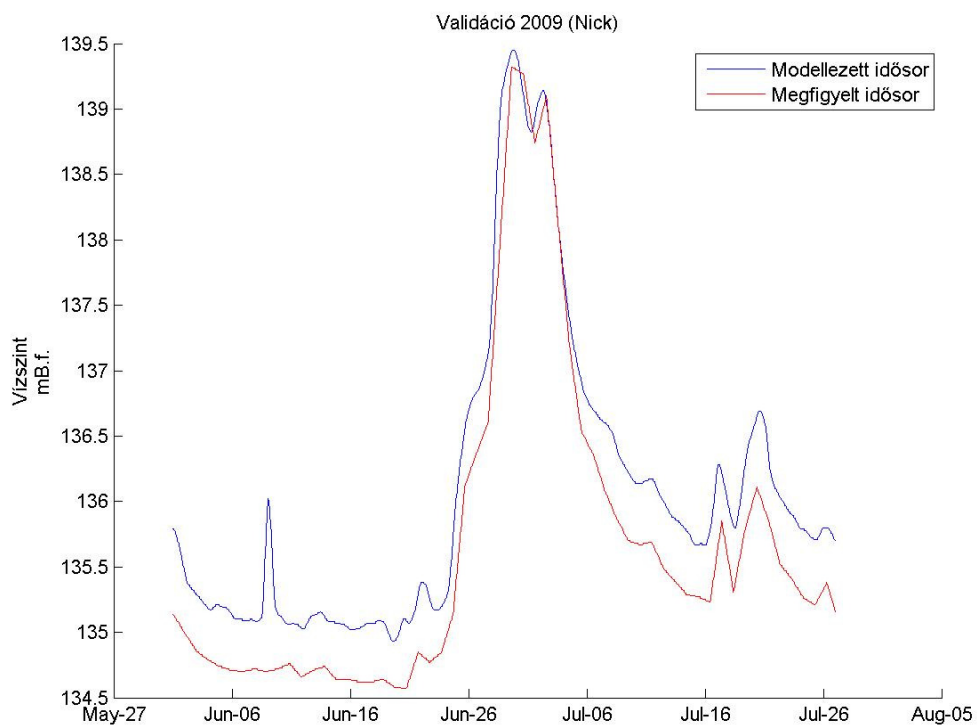
A maximum vízhozamok között  $4,35 \text{ m}^3/\text{s}$  volt a differencia, ami az 1%-os különbséget se éri el. Bár az árhullám alakja jól követi a valóságban mértét, a maximum vízhozamok időbeni megjelenése pár órást eltérést mutat, ez azonban a tűréshatáron belülnek tekinthető. Itt meg kell jegyezni, hogy a vízhozamot alig néhány időpontban mérik, általában vízhozamgörbével a vízállásból becslik meg.

#### 5.4. Validáció

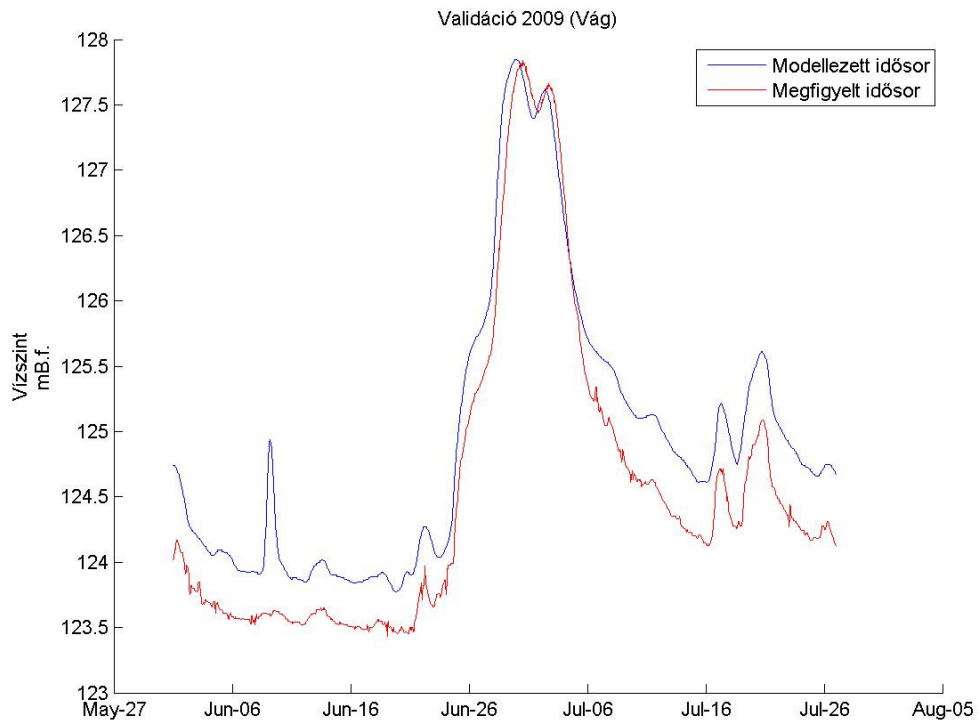
A validációt egy kevésbé korábbi évre vonatkozóan, a 2009-es árhullámon végeztem el. A 2013-as tavaszi árvízzel szemben igazolni kívántam a modellt egy nyári árhullámon is, így támasztva alá, hogy a modell más típusú árvizek esetén is megfelelően működik. A maximális vízhozam 2009-ben  $389 \text{ m}^3/\text{s}$  volt. Ez a 2013-as  $533 \text{ m}^3/\text{s}$  vízhozamhoz képest 27 %-os csökkenés. Így tehát a validáló árhullám nem csak típusát tekintve, hanem nagyságát tekintve is különbözött a kalibráló árhullámtól. A validáció az ellenőrző szelvényekben a 13-16. ábrákon látható.



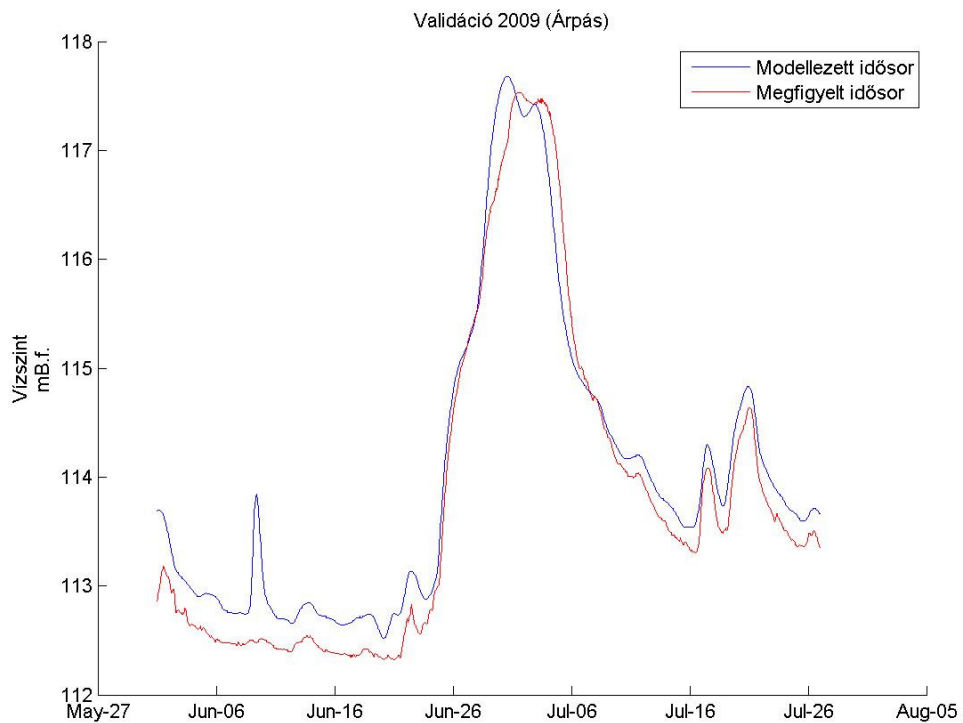
13. ábra: A modellezett és a megfigyelt idősor a 2009-es árhullámon a Rába - Ragyogó-híd szelvényben



14. ábra: A modellezett és a megfigyelt idősor a 2009-es árhullámon a Rába - Nick szelvényben



15. ábra: A modellezett és a megfigyelt idősor a 2009-es árhullámon a Rába - Vág szelvényben



16. ábra: A modellezett és a megfigyelt idősor a 2009-es árhullámon a Rába - Árpás szelvényben

Szokatlan, de a validáció esetében pontosabbra sikerült, mint a kalibráció. Fentről lefelé haladva a maximum vízszintek különbségei: -24 cm, +13 cm, +1 cm, +15 cm. Bár a kalibráció esetében a modell alábecsülte a maximális vízszinteket, a validáció során 3 esetben is felülbecsüli. Ezáltal megerősítést nyert az a gondolat, hogy az érdesség további növelése rontott volna a modell minőségén. Érdekes, hogy a modellben június elején megjelent egy kisebb árhullám, amely a megfigyelt idősoron nem látszik. Valószínűleg ezt egy hibás adat okozta az input vagy a megfigyelt adatsorban. Mivel látható hatása nincs az igazoló árhullámra, jelentőséget nem tulajdonítottam neki.

A felállított Rába modellt tehát 1-2 dm-es pontossággal alkalmasnak találtam a további árvízi vizsgálatokra.

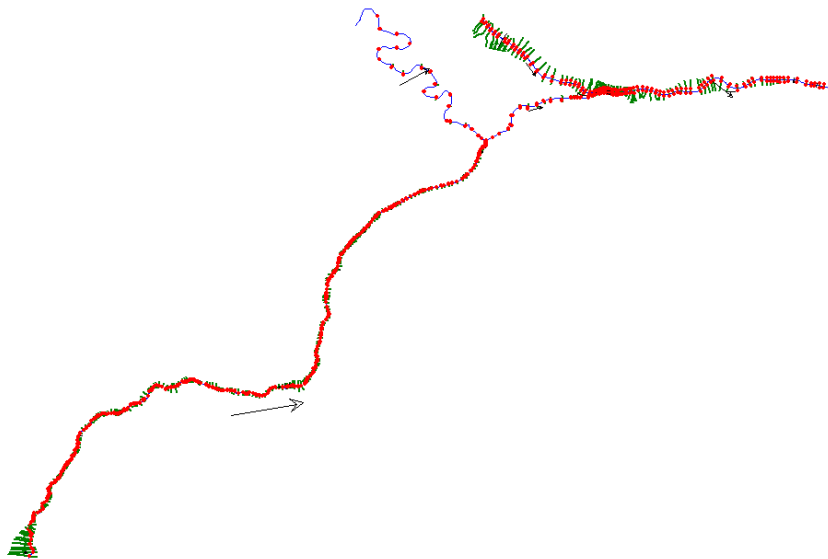
## **6. MÁSZ vizsgálatok**

A vizsgálat egyik legjelentősebb újdonsága, hogy a mértékadó árvízszinteket nem a vízszintekhez, hanem a vízhozamokhoz köti. A vízhozam mint valószínűségi változó előnye, hogy kevésbé érzékeny a helyi hatásokra és változásokra (Krámer, 2014). Általában a levonuló vízhozamok tekinthetőek állandónak, a kialakuló vízállások csak ezek eredményei. Míg néhány geometria beavatkozás nagymértékben megváltoztathatja a vízállásokat, a vízhozamok kevésbé alakulnak át. Hátránya, hogy a vízhozamokat sokkal pontatlanabban és nehezebben lehet meghatározni, időigényessége miatt ritkábban mérik (Krámer, 2014).

A vizsgálathoz nem volt elég csupán a Rába vizsgált szakaszát modellezni, ugyanis az alsóbb részén a Duna visszaduzzasztása okozza a legnagyobb árvizeket. Ezért a modellhez csatoltam a Mosoni-Duna és a Duna egy-egy rövid szakaszát. A Rábára újonnan kellett felépítenem az 1D modellt, ellenben a csatlakozó két folyószakasz modelljét a Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszék munkatársai a Duna MÁSZ tanulmányában már kellő pontossággal kidolgozták, így azokat célszerűen onnan vettem át. A Mosoni-Duna legfelső szelvénye így a mecséri, legalsó a torkolati. A Dunának a Medve és Vág közötti szakaszát csatoltam a modellhez (17. ábra). A Medve fölötti szigetközi szakasz modellezése igen bonyolult, olykor bizonytalan, ezért nem terjesztettem ki följebb a modellt.



Az elemzés során 4000 fiktív év vízhozam idősorát futattam le a programmal, keresve közülük a mértékadókat. A 4000 árhullám peremfeltételei az elmúlt évek adatai alapján lettek generálva, bonyolult hidrológiai számítások során. A mértékadó árvízszinteket a 100 évenként előforduló árvizek jelölik ki. Azonban az időben visszamenőleg nem rendelkezünk elég méréssel, hogy biztosan megállapíthassuk a 100 évenként előforduló árvizeket, továbbá az évtizedek során végbemenő geometriai és klímaváltozások miatt a régi adatsorok már nem tekinthetőek reprezentatívnak. A peremfeltételek generálását a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszéke végezte el, és a hidrodinamikai modellhez hasonlóan szintén a rendelkezésemre bocsátotta.

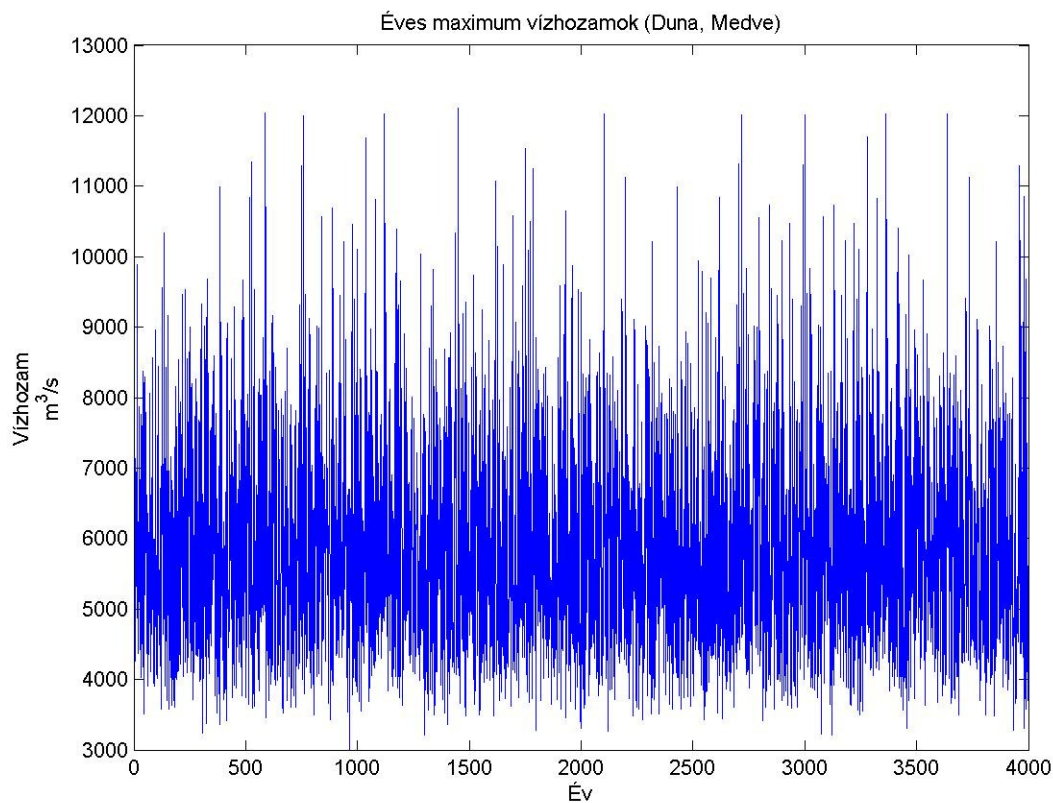


17. ábra: Geometria a MÁSZ vizsgálatokhoz

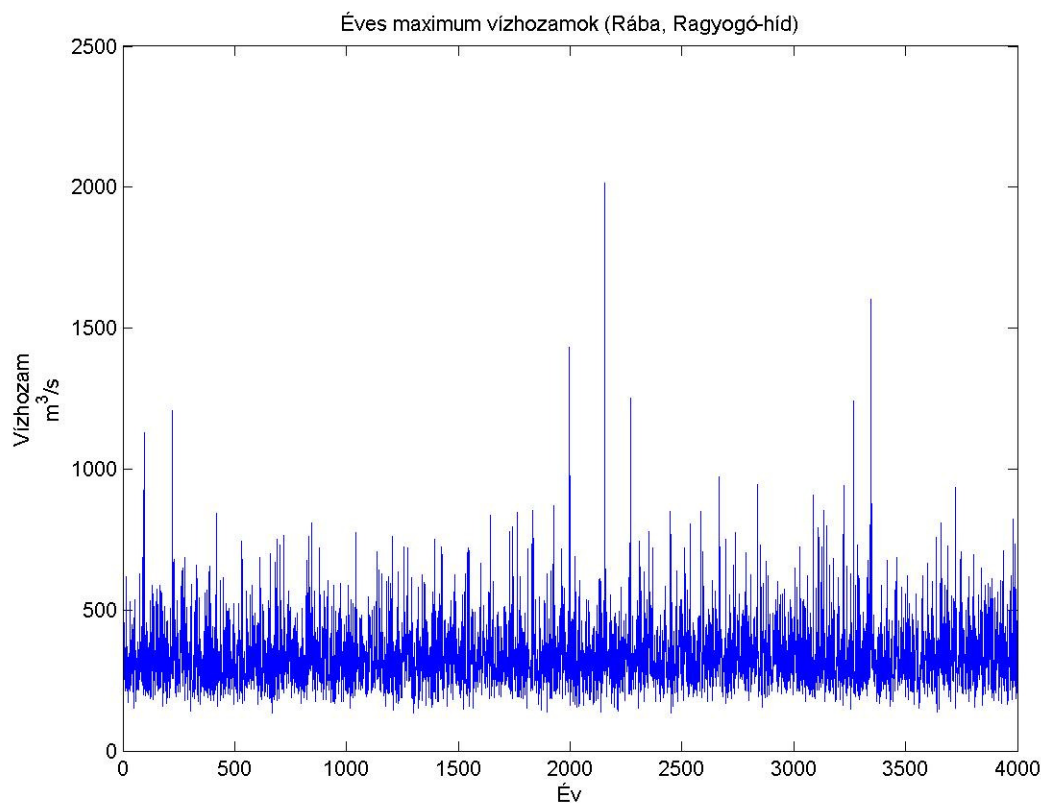
### 6.1. Peremfeltételek

Összesen 6 peremfeltétel szükséges a modell futtatásához. A Duna alsóperemének az oda modellezett vízhozamhoz tartozó normálmélységet adtam meg, amit a HEC-RAS maga számol. A Mosoni-Duna peremfeltételére konstans  $10 \text{ m}^3/\text{s}$ -os vízhozamot feltételeztem, ugyanis a Rábára mértékadó árvízi vízhozama nincs. A Duna medvei felső peremére, a Rába sárvári felső peremére, és a pontszerű befolyásként modellezett Marcalra és Répce-árapasztóra változóként a generált vízhozamokat adtam meg.

A vizsgálat során a mértékadó idősorok a medvei és a sárvári adatok lesznek, ezért azokon egyéb statisztikai elemzéseket végeztem, összehasonlítva az 1930-2012 közötti 82 éves történelmi idősorral. Az adatok azonban nem a sárvári szelvényre, hanem az attól 4,9 kilométerre elhelyezkedő ragyogó-hídi szelvényre lettek generálva. Ennek egyik oka, hogy Sárvárnál a mérések bizonytalanabbak, ugyanis az árvizek egy hullámtéri nyíláson is átfolytak, így nehezebben lehet következtetni a vízszintekre a vízhozamokból. Ezért az adatsort felszoroztam egy konstanssal. A konstans az ÉDUZIVIZG által elfogadott 1%-os NQ hossz-szelvényen (Melléklet) található sárvári és ragyogó-hídi vízhozamok hányadosaként került megállapításra, értéke 1,075-re adódott. Ugyanez a hányados a kalibrációs időszakban valamivel alacsonyabb volt, ezért ezt figyelembe véve a konstans értékét 1,07-re csökkentettem. Ez minimálisan eltolja az árvizek időpontját, de mivel fiktív árhullámokról beszélünk, amelyek konkrét időpontja nem mérhető, ez nem jelent problémát.

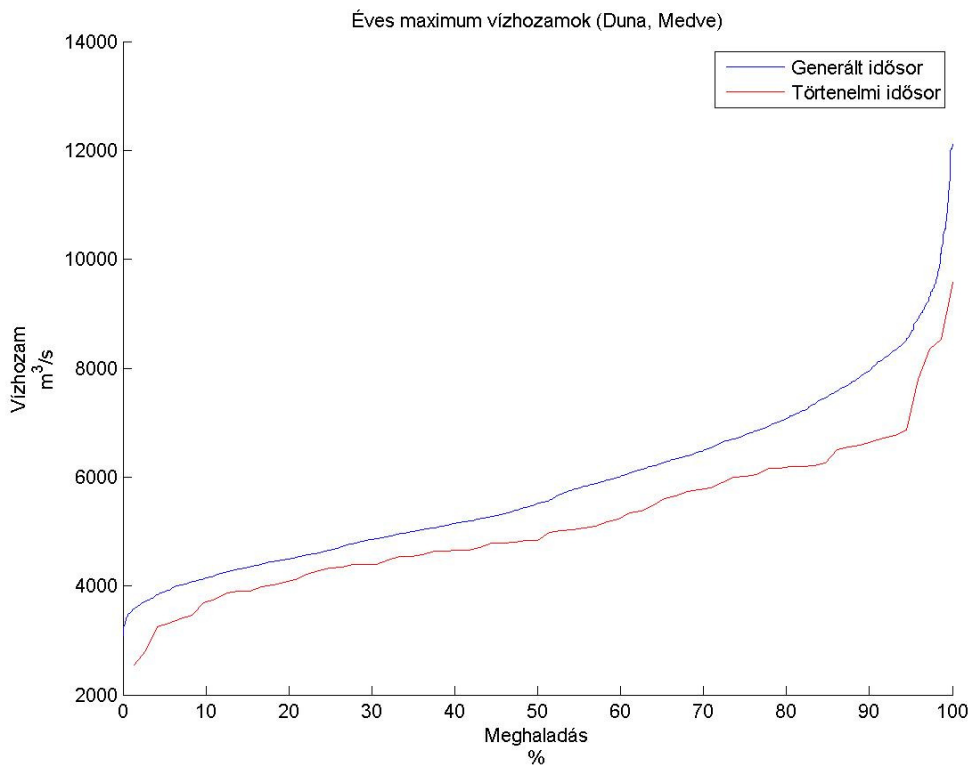


18. ábra: Generált idősor a Duna - Medve szelvényben

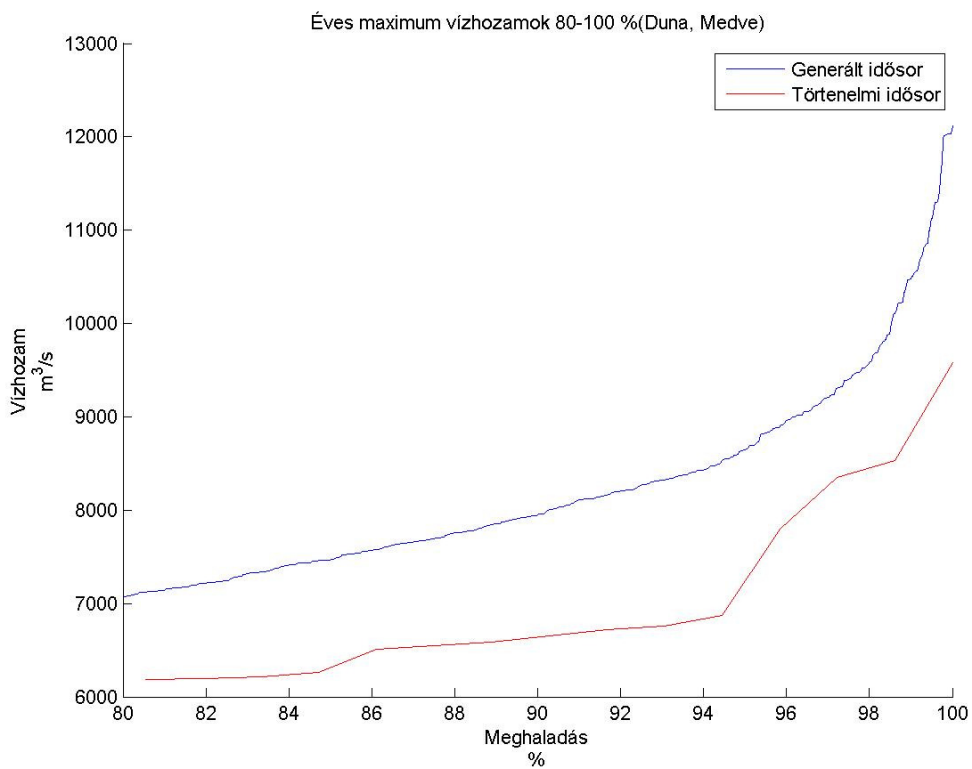


19. ábra: Generált idősor a Rába - Ragyogó-híd szelvényben

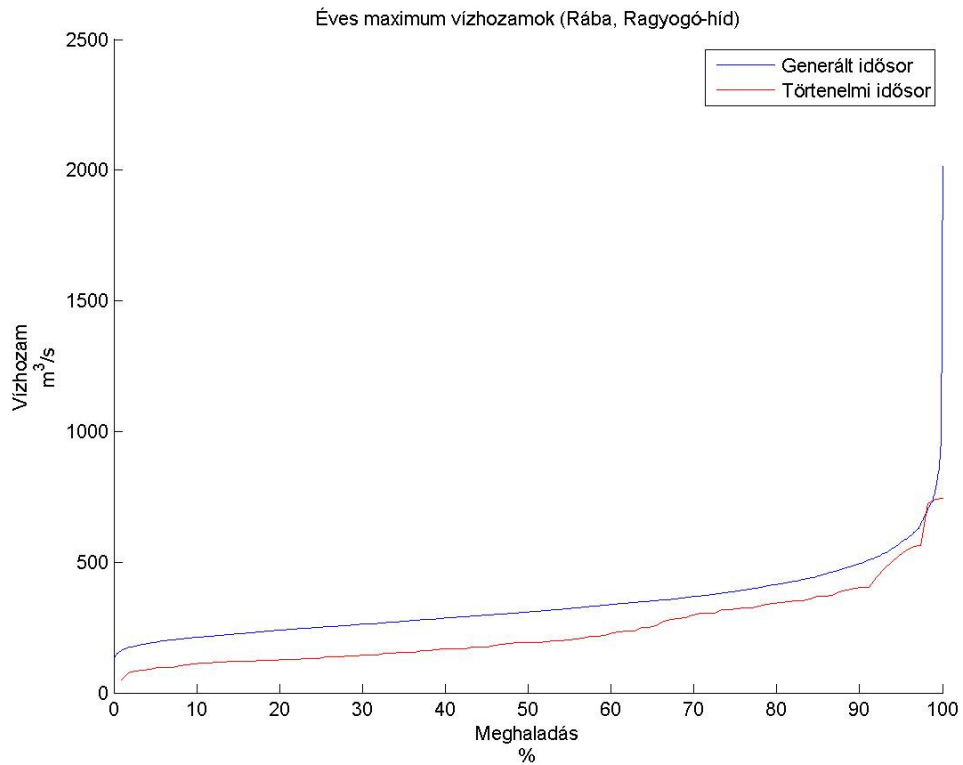
A medvei és a ragyogó-hídi idősorok éves maximum vízhozamai a 18. és 19. ábrákon láthatóak. A történelmi és generált idősorok éves maximális értékeinek tapasztalati eloszlásfüggvényeit a 20. és 22. ábrákon tüntettem fel. Mivel a dolgozat szempontjából elsősorban a nagyvizek a lényegesek, a felső 20% kinagyítva a 21. és 23. ábrákon látható. A generált idősorok elégséges pontossággal követik a történelmi idősorok alakját, kismértékben meghaladva az értéket. Azonban ez a meghaladás elvárt volt az évenként folyamatosan növekvő vízhozamok tendenciájának megtartását figyelembe véve. A legnagyobb értékek a generált idősoron első ránézésre túlzónak tűnhetnek, azonban míg a generált idősoron 2-3-4 ezer évenként előforduló értékek is előfordulhatnak, a történelmi idősoron azt se lehet egyértelműen kijelenteni, hogy 100 éves visszatérési idejű érték fordult volna elő. Ezt bizonyítja az is, hogy a Duna mértékadó árvízszintjeinek felülvizsgálatán dolgozó szakemberek azt állapították meg, hogy a 2013-as nyári LNV-ket megdőntő árhullámot csak egy mintegy 60 éves visszatérési idejű árhullám okozta. Megemlítendő, hogy a Rába esetében a számomra legfontosabb 1%-os éves LQ érték körülbelül egybeesik a történelmi 1%-os NQ-val.



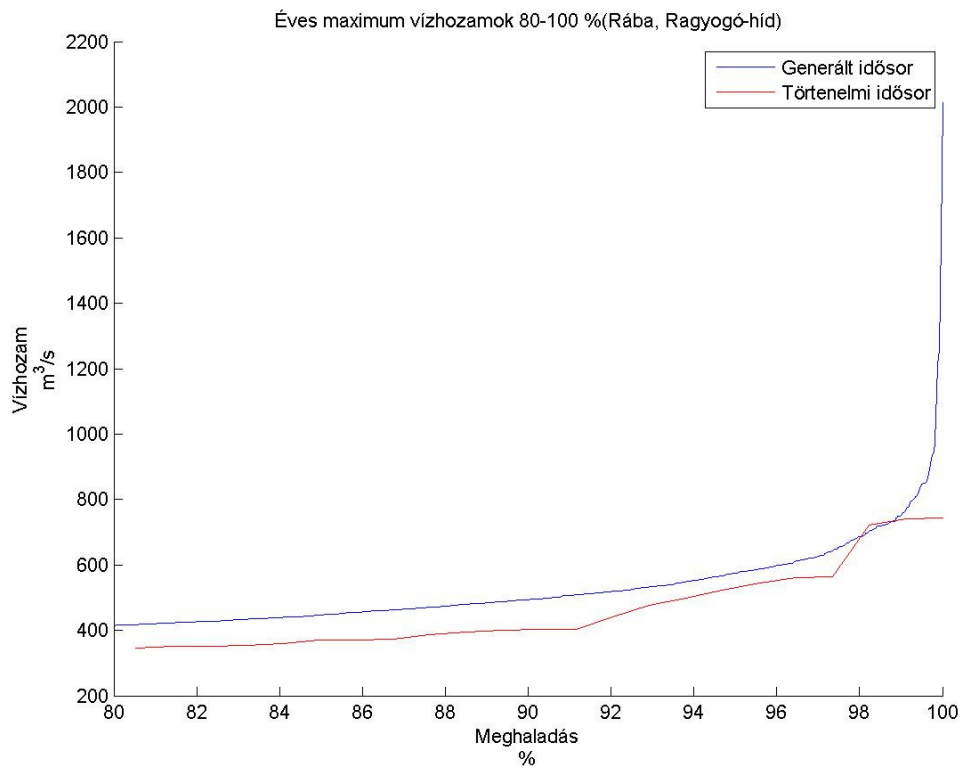
20. ábra: Idősorok eloszlása a Duna - Medve szelvényben



21. ábra: Idősorok eloszlása a Duna - Medve szelvényben 2.



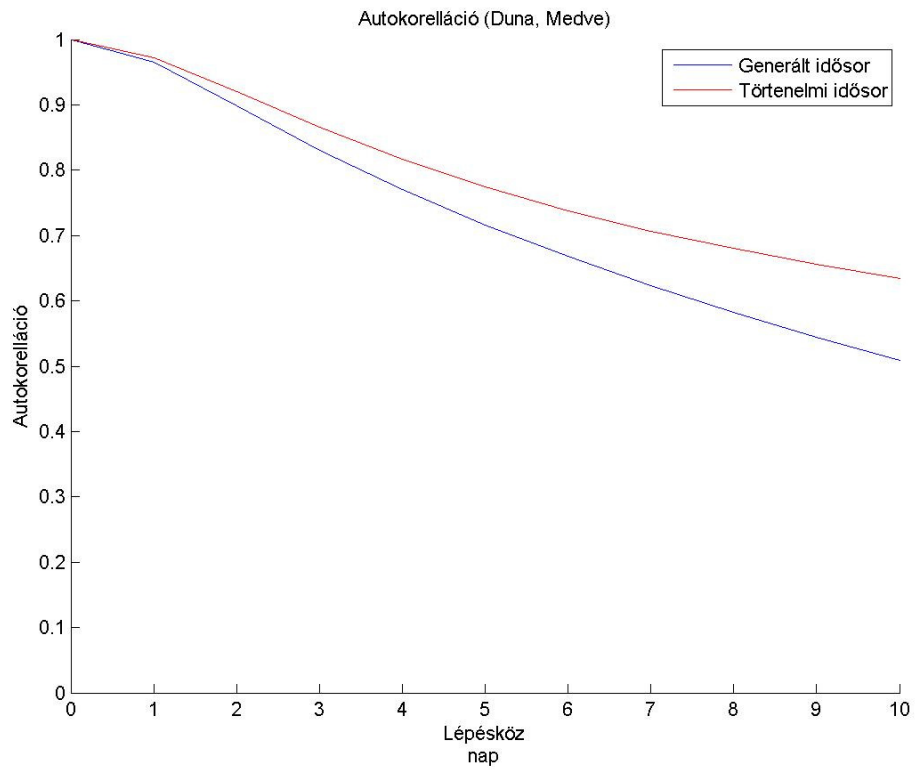
22. ábra: Idősorok eloszlása a Rába- Ragyogó-híd szelvényben



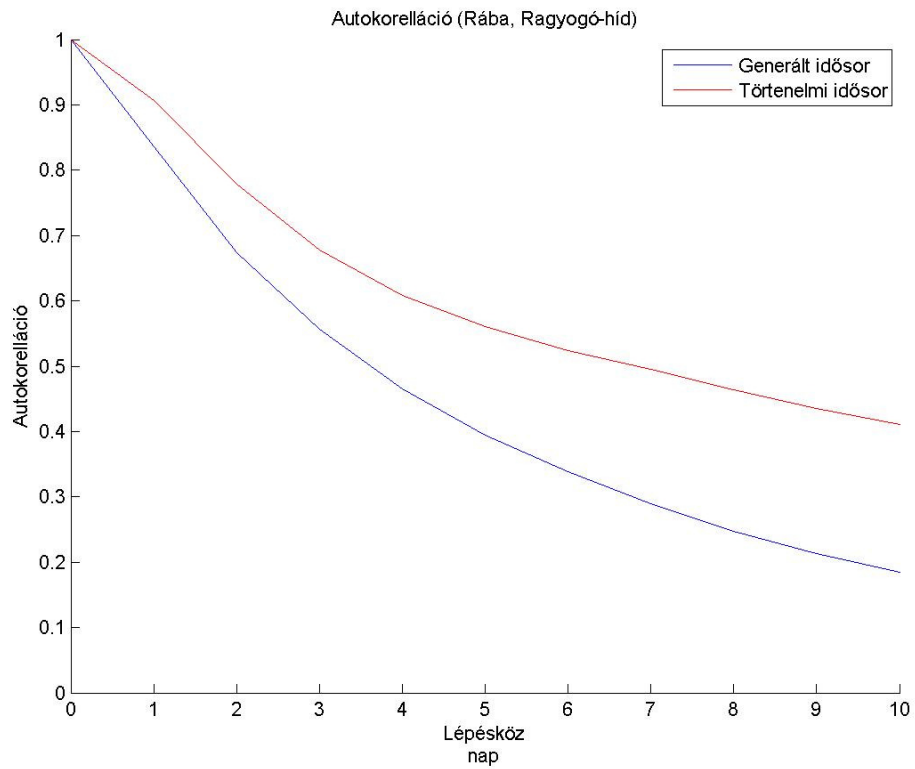
23. ábra: Idősorok eloszlása a Rába- Ragyogó-híd szelvényben 2.

Egyéb, a generálás során is figyelembe vett értékes statisztikai mutatók az autókorrelációs függvény és a keresztkorreláció. Bár a Duna felvízi vízgyűjtője és a Rába vízgyűjtője viszonylag nagy távolságra helyezkedik el egymástól, az árhullámok együttállásainak valószínűsége nem elhanyagolható. A történelmi idősoron a keresztkorreláció a vízhozam értékek között 0,293 volt, míg a generált idősoron ettől minimálisan eltérve 0,299. Ezek az értékek igen csekély egymástól való függést mutatnak, azonban így bizonyítást nyert, hogy a generált idősorokon se várhatunk valószínűtlenül gyakori, egy időben jelentkező árhullámokat.

A Rábán igen gyakoriak a gyors lefolyású árhullámok, ezek esetenként alacsony autókorrelációt okozhatnak. Mi sem bizonyítja ezt jobban, mint az 1965 áprilisi árvíz, amikor az eddigi LNQ-t mérték a ragyogó-hídi szelvényben. Míg április 23-án csak  $186 \text{ m}^3/\text{s}$  volt a vízhozam, másnap már  $744 \text{ m}^3/\text{s}$ -ot mértek. 25-ére már ismét visszacsökkent  $480 \text{ m}^3/\text{s}$ -ra. Ebben az esetben még az egy- vagy kétnapos autókorrelációról se igen lehet beszélni. A medvei és ragyogó-hídi 1-től 10 lépésig tartó autókorrelációs függvény az 24. és 25. ábrákon látható. A generált idősorok 6 órás időközzel lettek előállítva, a történelmi idősorok 1 napos időközzel álltak rendelkezésemre, ezért az autókorrelációs függvénynek a napos időközt vettem alapul. Az egy és kétlépéses korrelációk esetén jó egyezést mutat a generált idősor, azonban növelve a lépések számát, egyre jobban csökken az egyezés. Ennek oka, hogy az autókorrelációs függvényt nehéz pontosan reprodukálni, ugyanis a generálás során csak hét igazítható paramétert használtak. Bár ez gyenge kapcsolat, és nagymértékben nem rontja a modellezés megbízhatóságát, mindenképp említést érdemelt.



24. ábra: Autokorreláció a Duna - Medve szelvényben



25. ábra: Autokorreláció a Rába- Ragyogó-híd szelvényben

## 6.2. MÁSZ meghatározása

A peremfeltételeket betáplálva lefutattam a HEC-RAS modellel a 4000 év szimulációját éves egységekben. A számítási intervallumot 1 órára vettem fel. A kiírási intervallumot a gyorsaság érdekében 1 hónapra állítottam be, ez azonban csak az árhullám alakja szempontjából fontos.

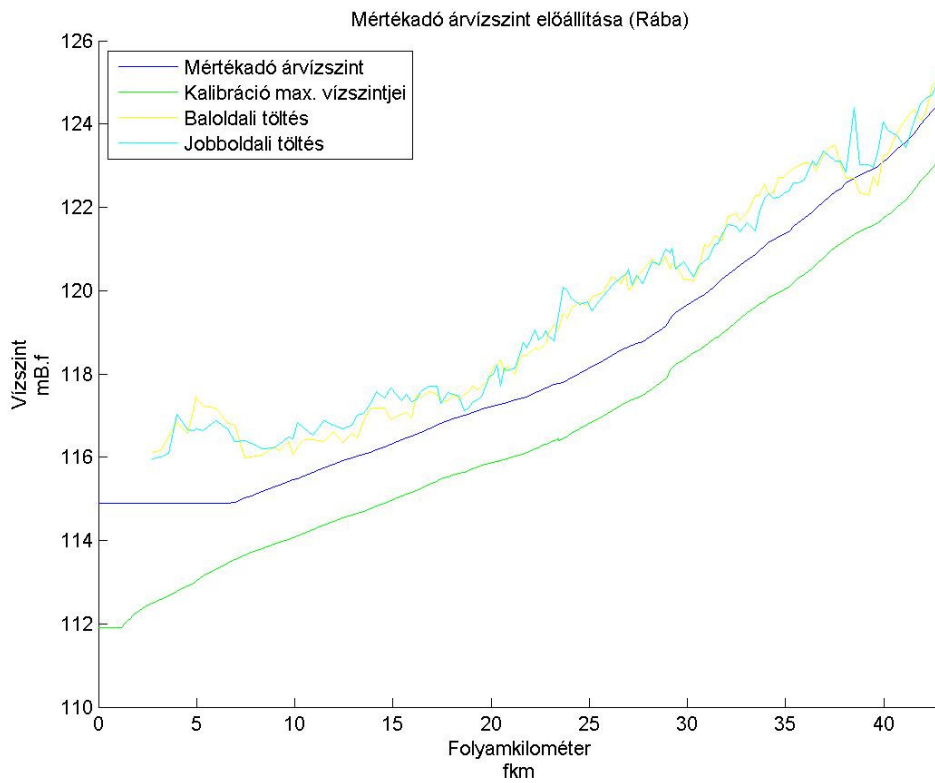
Egy adott számítási szelvényben az az év jelöli ki a mértékadó árvízszintet, amelyikben a mért NZ érték a legnagyobb, és kielégíti azt a feltételt, hogy az alvízi befolyásoló folyószakaszon végig igaz, hogy  $NQ(x) \leq NQ_{1\%}(x)$ . Az alvízi befolyásoló szakasz hossza addig tart, amíg igaz, hogy az éves maximális vízszint hossz-szelvényén a csökkenés a vizsgált szelvény vízszintjénél kisebb, mint 4 méter. Az 1%-os NQ hossz-szelvényének az ÉDUVIZIG által meghatározott értékeket vettem fel (Melléklet).

A HEC-RAS minden egyes év futtatása után eltárolja az NZ és NQ hossz-szelvényét. Az alvízi befolyásoló szakasz meghosszabbítása érdekében a Mosoni-Duna és a Duna egy rövid szakasza is bekerült az elemzendő adatok közé. A 4000 év éves NZ és NQ hossz-szelvényeit a HEC-DSSVue segítségével szöveg formátumba exportáltam. A szöveg formátumú fájlt Matlab segítségével nyitottam meg, majd a saját kezűleg írt program lefuttatásával előállítottam a mértékadó árvízszint hossz-szelvényét.

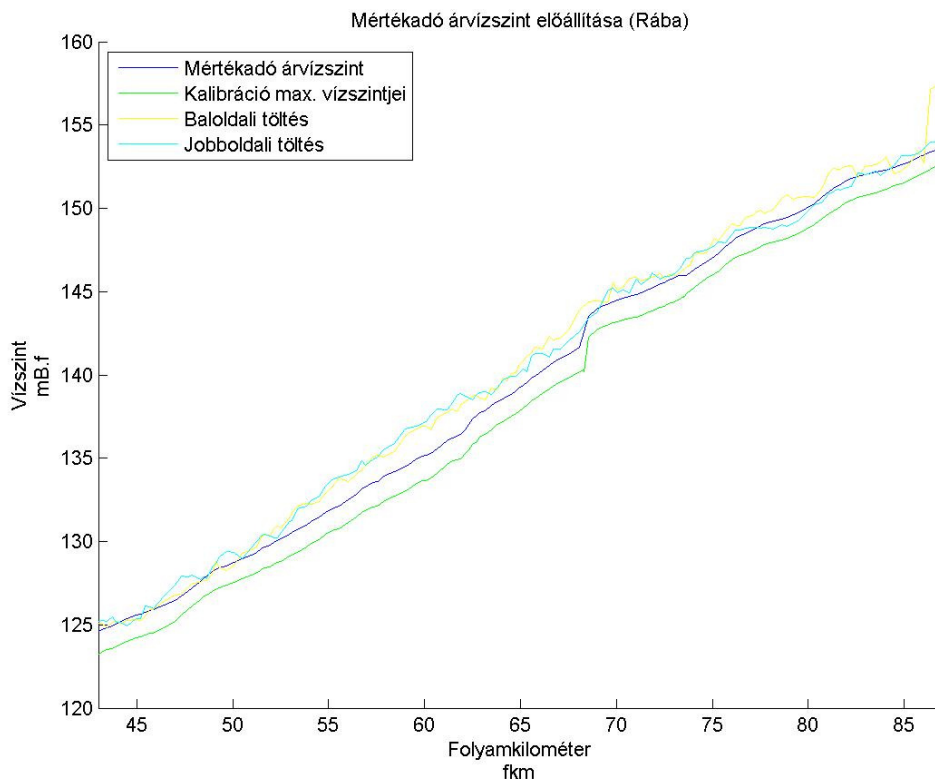
## 6.3. Eredmények

Az előállított mértékadó árvízszintek a 26. és 27. ábrákon láthatóak. A könnyebb összehasonlíthatóság érdekében az ábrán egyéb adatsorokat is feltüntettem. A mértékadó árvízszintek jóval nagyobbakra adódtak, mint a 2013-as kalibráló árhullám, néhol még többméteres különbségek is jelentkeztek. Az általam számolt MÁSZ néhol meghaladja a töltések magasságát is, a legkritikusabb szakasz Várkesző és Marcaltó térsége.



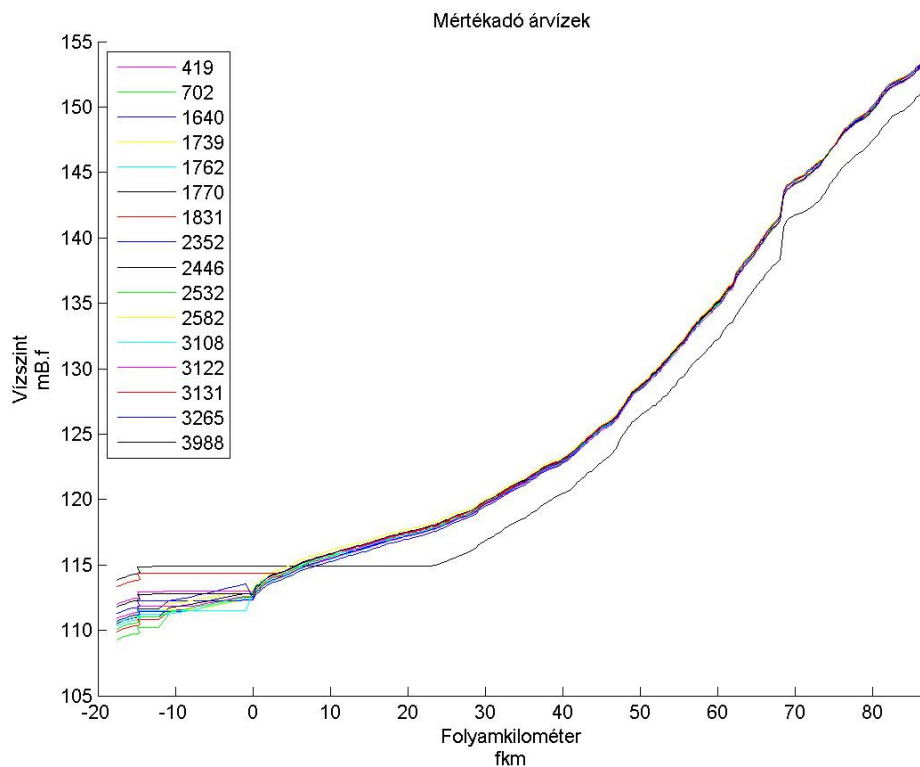


26. ábra: Mértékadó árvízszint hossz-szelvénye 1.



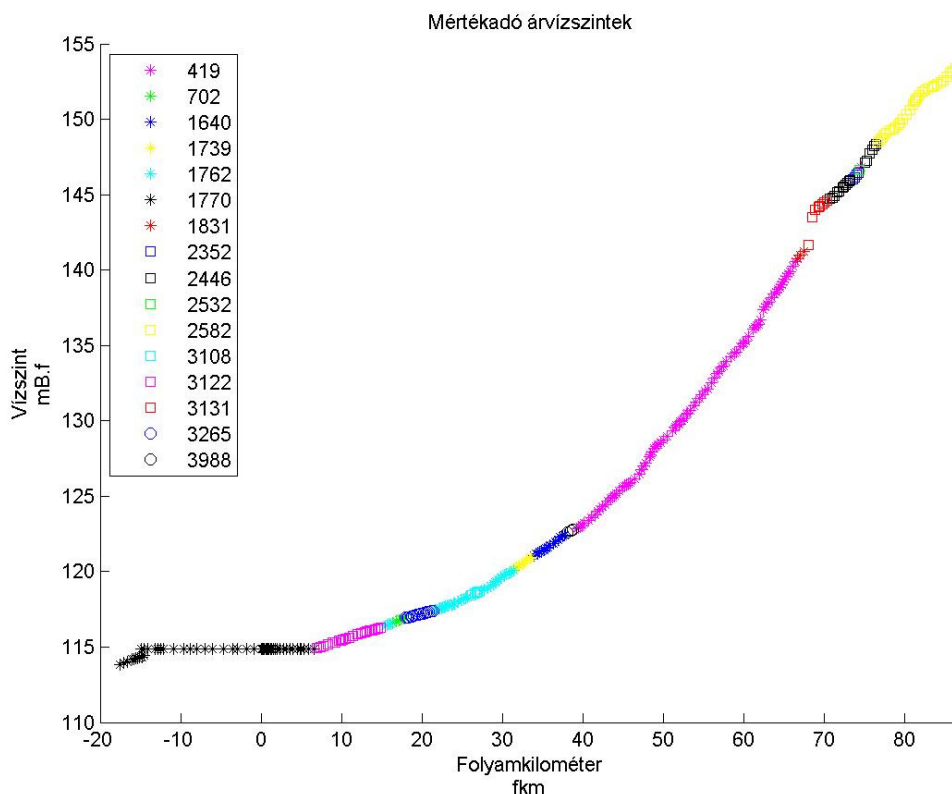
27. ábra: Mértékadó árvízszint hossz-szelvénye 2.

A mértékadó árvízszintek 16 különböző év vízszintjeiből álltak elő. Az egyes évek maximális vízszintjei a 28. ábrán láthatóak (az évek sorszámát mutatja a jelmagyarázat). A negatív folyókilométerek a Rába Mosoni-Duna torkolattól értendőek, azaz a Mosoni-Duna rábai és dunai torkolata közötti szakaszt és a Duna egy rövid szakaszát foglalják magukba. A modell szépen visszaadta a vártakat, miszerint az alvízi szakaszon a Duna visszaduzzasztása eredményezi a mértékadó árvízszintet.



28. ábra: Mértékadó árvízszintet kialakító árhullámok

A 29. ábrán a számítási szelvényekben kialakuló vízszinteket okozó fiktív árhullámok éveinek hossz-szelvény menti eloszlása látható. Az ábra igazolja ennek az új eljárásnak a szükségességét, ugyanis különböző szakaszokon különböző évek árhullámai voltak a mértékadóak, ezért nem lehet a mértékadó árvízszinteket egy év egy árhullámához kötni.



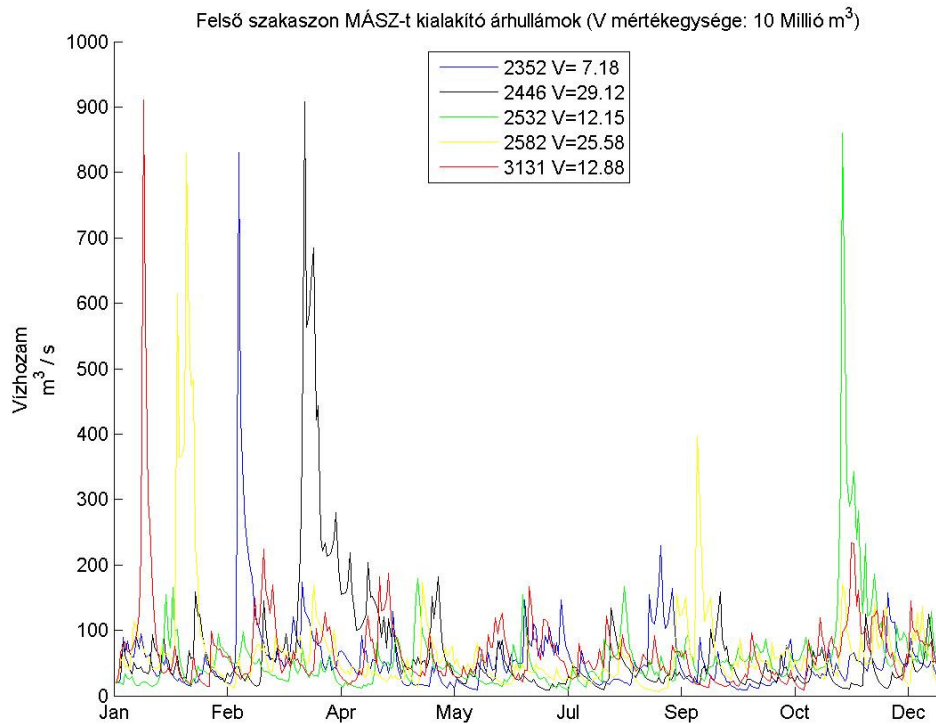
29. ábra: Mértékadó árvízszintek a számítási szelvényekben

#### 6.4. Árhullámok elemzése

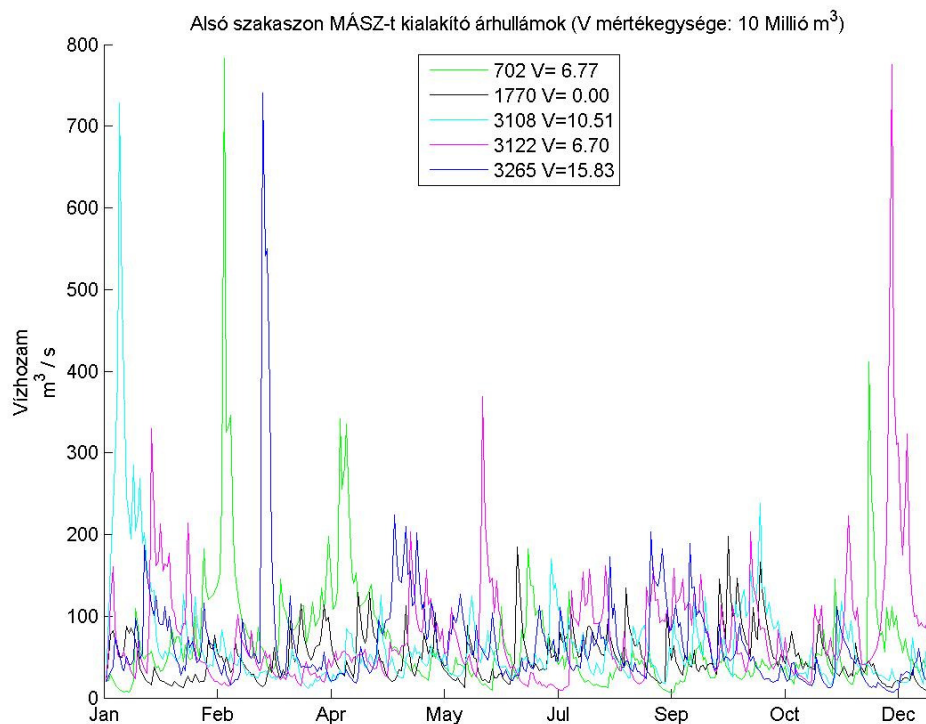
Következő lépésben a mértékadó árvízszinteket kialakító éveket vizsgáltam a legfelső sárvári szelvényben. Integrálással megállapítottam az egyes mértékadó árhullámok térfogatát. Küszöbszintnek az 1%-os sárvári vízhozam felét vettem, így az árhullámok elejét és végét a  $464 \text{ m}^3/\text{s}$  vízhozam átlépésével definiáltam. Az egyes szakaszokra érvényes árhullámok alakjai és térfogatai a 30-32. ábrákon láthatóak.

A folyó felső szakaszán található mértékadó árvízszintek álltak a legjelentősebb függésben a sárvári szelvény árhullámainak nagyságával. Ezek az árhullámok nagy térfogattal rendelkeztek, a maximális vízhozamuk  $800$  és  $900 \text{ m}^3/\text{s}$  között változott. A legkisebb tömegű árhullámok az alsó szakasz esetén voltak mértékadóak. Ezek mind térfogatukat, mind időtartalmukat tekintve alacsonyabbak voltak. Ennek oka, hogy itt elsősorban a Duna vízhozama volt a mértékadó (az 1770-es évben a Rába felső szakaszán nem is volt árvíz), a Rába árhullámának csak másodlagos szerepe van és a 4000 évben valószínűbb volt, hogy a néhány rendkívüli Duna-árvízzel egyidőben csak kisebb árhullám vonul le a Rábán. A

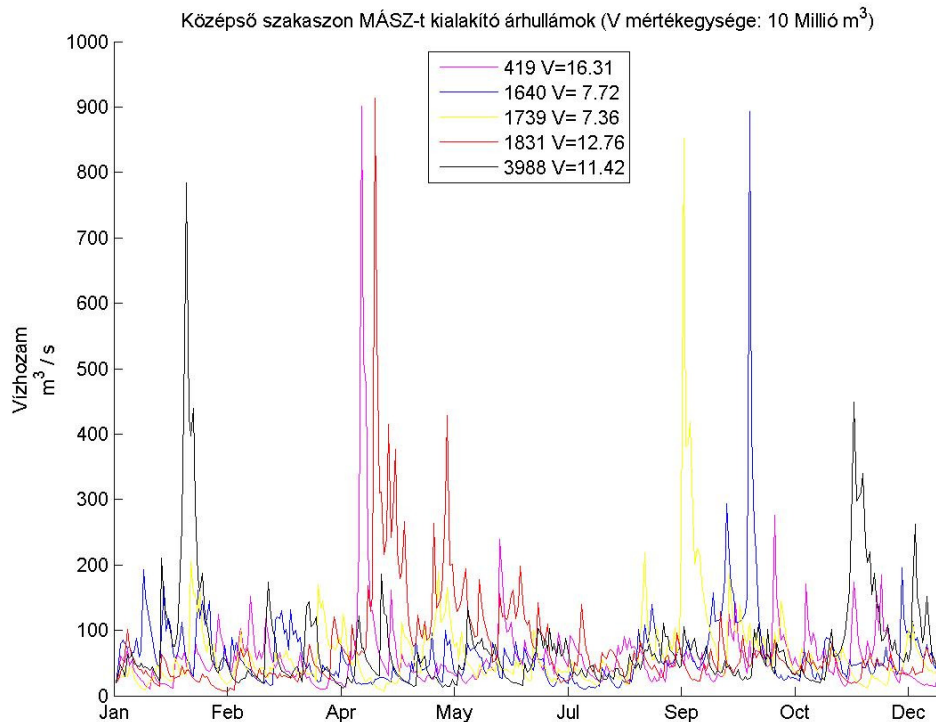
középső szakaszon mind időtartam, mind térfogat szempontjából a kettő közötti árhullámok voltak a jellemzőek. Megjegyzendő, hogy kivételek mind a három esetben voltak.



30. ábra: A felső szakasz mértékadó árvízszintjeit kialakító árhullámok



31. ábra: Az alsó szakasz mértékadó árvízszintjeit kialakító árhullámok



32. ábra: A középső szakasz mértékadó árvízszintjeit kialakító árhullámok

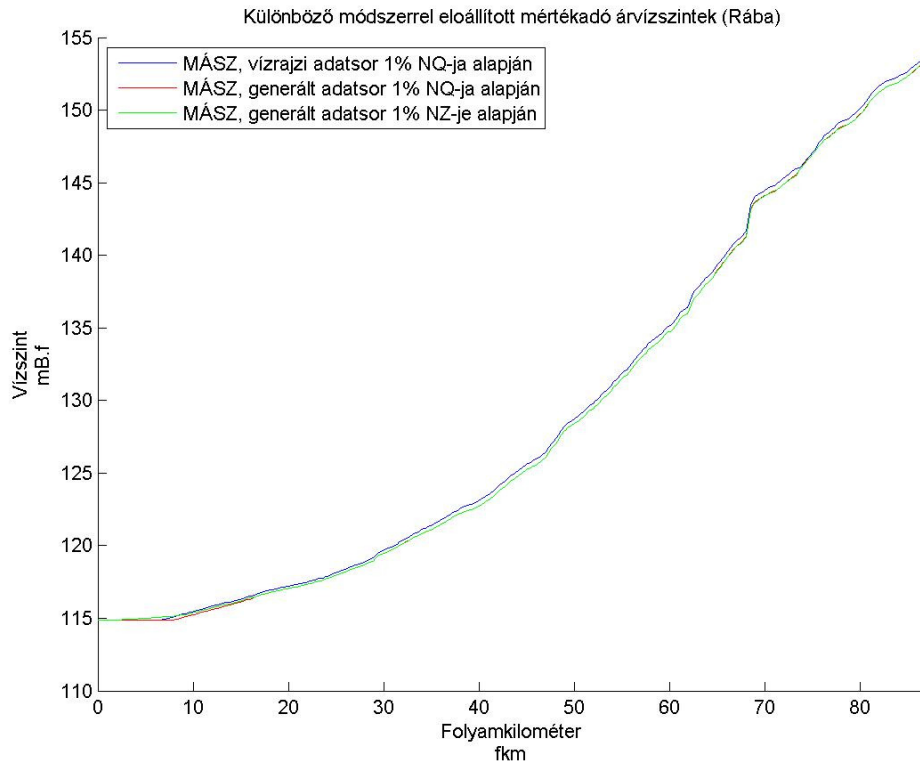
## 6.5. MÁSZ alternatívák

Az eredeti eljárásban a szimulált éves NV-ről az alapján döntöttem el, hogy alatta maradt-e az 1%-os valószínűségnek, hogy az NQ-kat összehasonlítottam az NQ(1%)-kal. Az NQ(1%)-os hossz-szelvényt az ÉDUVIZIG a vízrajzi adatsorokból becsülte meg. Egy másik lehetőség szerint a 4000 évnyi szimulált NQ értékek alapján kerülnének meghatározásra minden szelvényben az 1%-os NQ-k. Ehhez a folyó hossza mentén nem is lenne szükséges megbecsülni NQ(1%)-ot, csak a belépő peremeknél, a generáláshoz.

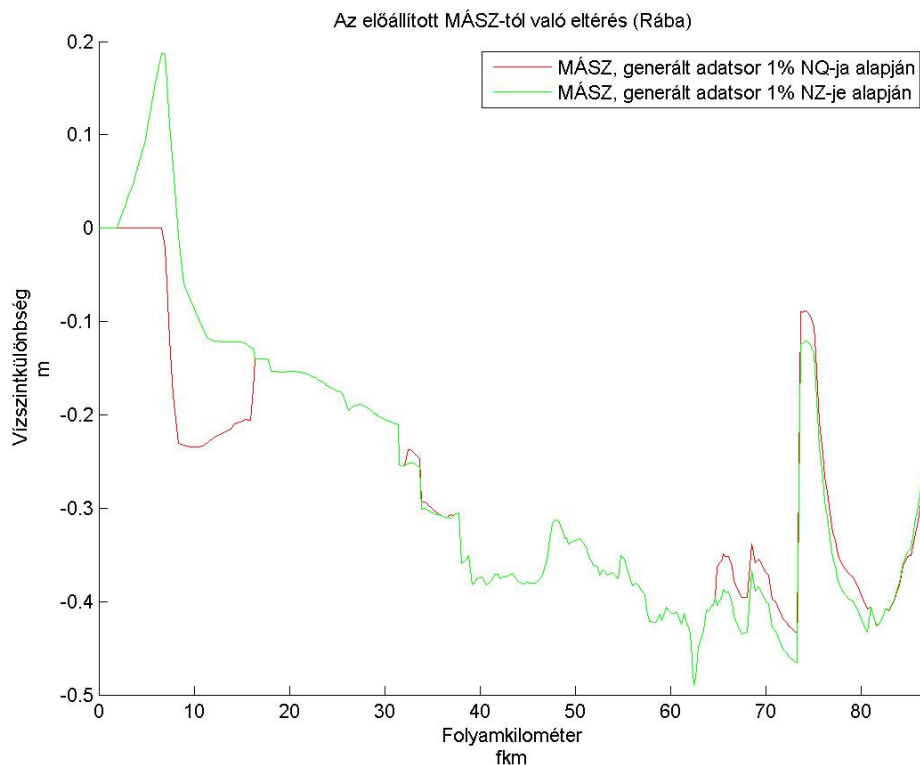
Néhány esetben szerencsésebb lehet levezetni a mértékadó árvízszinteket az 1%-os NZ-ből(=éves maximális vízszintből) az 1%-os NQ helyett. Például a Tisza völgyben a vízhozam mérések igen bizonytalanok, ezért azokkal csak bizonytalanul lehet számolni. A vízszintekből levezetett eljárás megegyezik az eredeti módszerrel, annyi különbséggel, hogy a vízhozamok helyett az alvízi befolyásoló szakasz vízszintjeit hasonlítjuk a 100 éves visszatérési idejű vízszinthez. Más megközelítésből: ahelyett, hogy a vízmércéknél számolnánk a mért NV-kből

NZ(1%)-ot és közöttük bizonyos szabályok szerint interpolálnánk, azt a szimulált 4000 évnvi NZ-ből vezettem le minden számítási szelvényben.

A három változat a 33. ábrán látható, az alternatívák és a MÁSZ közötti eltérés a 34. ábrán.



33. ábra: MÁSZ alternatívák: Vízállás és vízhozam alapú mértékadó árvízszintek generált adatsor 100 éves visszatérésű árhullámai alapján



34. ábra: Az eredeti MÁSZ eljárás és az alternatívák közötti eltérés

A két alternatíva vízszintjeinek különbsége az eredeti eljárástól akár fél méteres is lehet, ami igen nagynek tekinthető. Általánosságban elmondható, hogy az NZ-ből való levezetés esetén csökkennek a vízszintek, tehát ez adott esetben a biztonság rovására való átszámítás lehet. A másik feltűnő különbség, hogy az alvízi visszaduzzasztást ez a módszer máshogy kezeli, nagyobb vízszinteket eredményez, adott esetben tehát túlbecsülheti.

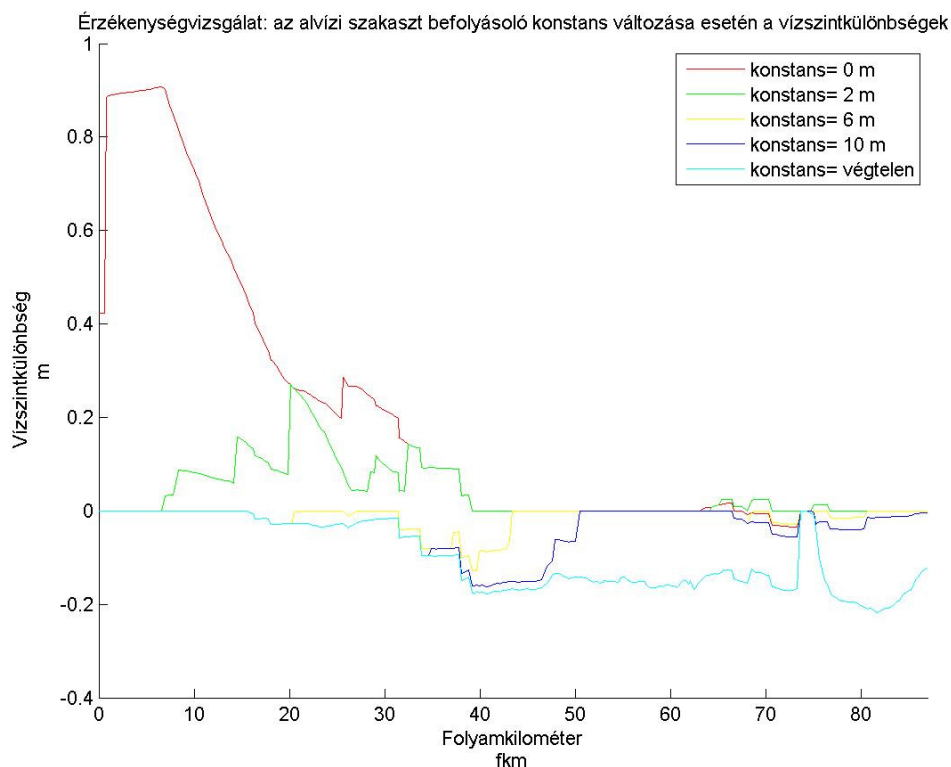
A generált adatsor 1%-os NQ-ja alacsonyabb a vízrajzi adatsor 1%-os NQ-jánál (Sárvárnál:  $928 \text{ m}^3/\text{s}$  helyett  $805 \text{ m}^3/\text{s}$ ). Ebből kifolyólag az alvízi szelvényeknek szigorúbb követelményeknek kell megfelelniük, így csökkennek a mértékadó árvízszintek. Mivel a két új alternatíva esetén az NZ(1%) és NQ(1%) hossz-szelvények ugyanazon adatsor alapján lettek megállapítva, a két eset vízszintjeinek alakja követi egymást, leszámítva az alvízi szakaszt.

## 6.6. Érzékenység-vizsgálatok

Az érzékenységvizsgálat fontos lépése a MÁSZ elemzésnek, ugyanis fontos említést tenni arról, hogy bizonytalan adat esetén hogyan módosulhatnak az eredmények. Ha valamelyik adatra nagyon érzékeny a modell, arról tájékoztatást kell adni.

Az érzékenységvizsgálat első lépéseként egy általam önkényesen kiválasztott konstans változásának hatását mértem. A konstans kijelöli az alvízi befolyásoló szakasz hosszát úgy, hogy az adott szelvénytől mért vízszint és az alvízi befolyásoló szakasz utolsó keresztaszelvényének vízszintje ne legyen nagyobb ennél a konstansnál. A mértékadó árvízszint meghatározásánál 4 méteres értékkel számoltam.

A különböző konstansok esetén az eredetitől mért különbséget a 35. ábra mutatja. A "konstans=0" eset azt jelenti, hogy az alvízi szakasz befolyásolása nem lett figyelembe véve, a "konstans=végtelen" esetén az egész alvízi szakasz figyelembe lett véve egy-egy szelvény esetében.



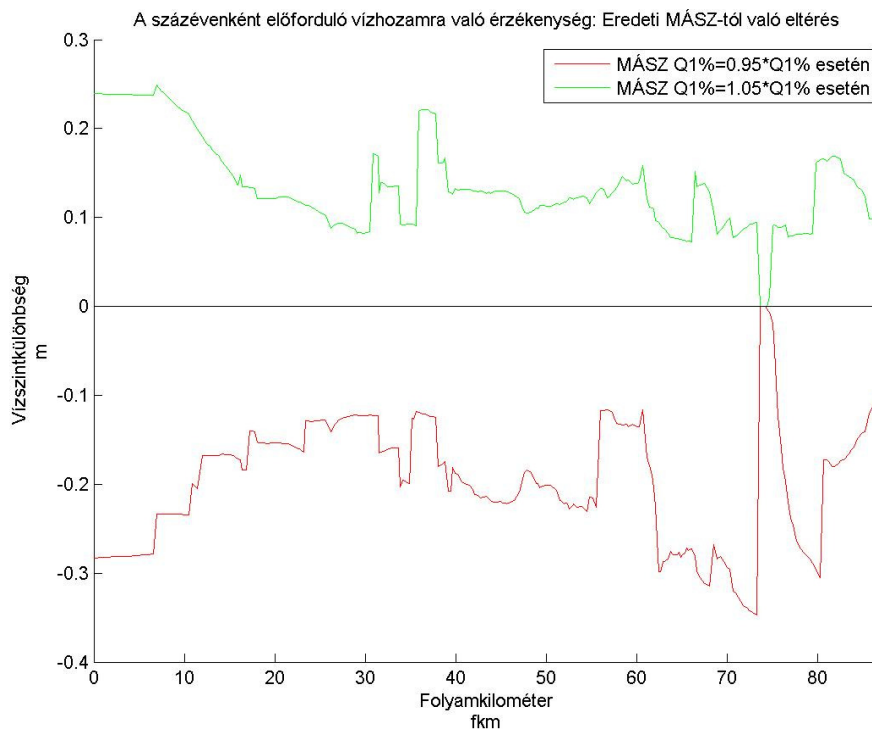
35. ábra: Érzékenység-vizsgálat: a mértékadó árvízszintekben beálló változások az alvízi szakaszt befolyásoló konstans változása esetén



Az eredmények azt mutatták, hogy az alvízi befolyásoló szakasz hosszának növelésével (amelyet a konstans növelése okoz) a mértékadó árvízszintek csökkennek. Ez várható volt, hiszen ezzel egy plusz feltételt adunk az árvízszinteknek, ugyanis nem elég, ha az adott szelvényben nem haladja meg a vízhozam az 1%-os vízhozamot, az alvízi szelvényekben sem haladhatja meg. Amennyiben az alvízi befolyásoló szakaszt figyelembe vesszük, az eredmények egy  $\pm 20$  centiméteres intervallumon belül maradnak. Azonban ez az ábra is mutatja, hogy a feltétel elhagyása óriási különbségeket okozna, elsősorban az alvízi szakaszon.

Amennyiben a konstans értéke zérustól eltérő, a mértékadó árvízszintet  $15 \pm 1$  év árhulláma jelölte ki, bár ezek minden esetben különböztek egymástól. A "konstans=0" esetében a MÁSZ 4 árhullám vízszintjeiből állt össze.

Ez után vizsgáltam az 1%-os NQ-ra való érzékenységet. A 100 évenként előforduló vízhozamok csak a fontosabb szelvényekben kerültek meghatározásra, a köztes szelvényekben lineárisan interpoláltak. Emiatt érdemes volt vizsgálni a modell érzékenységét  $\pm 5\%$ -os 100 évenként előforduló NQ-ra. A előálló különbségeket a 36. ábra mutatja.

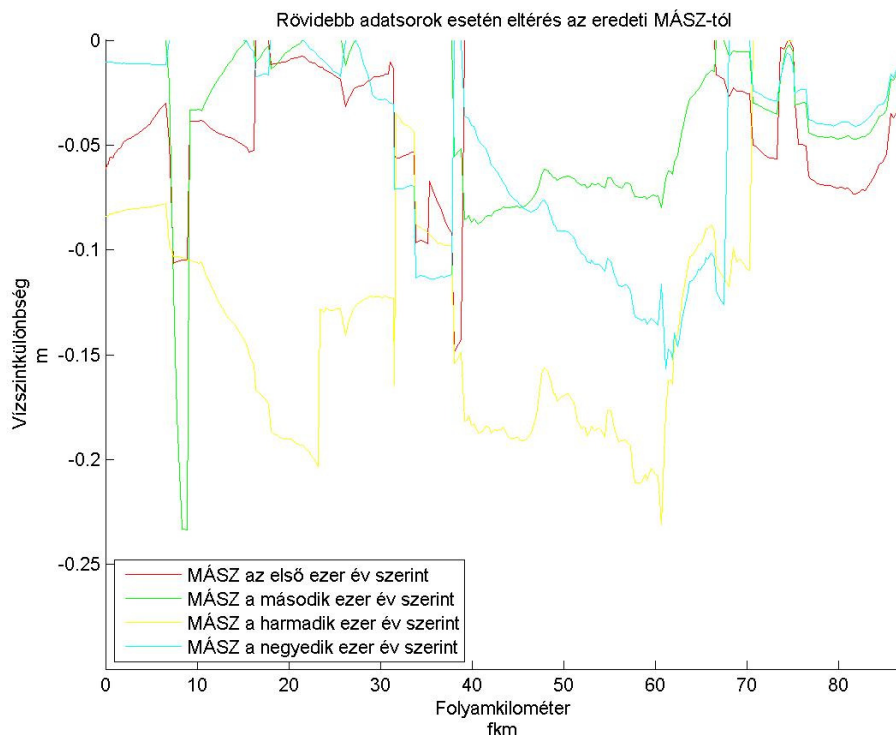


36. ábra: Érzékenység-vizsgálat: a mértékadó árvízszintekben beálló változások a százévenként előforduló vízhozam változtatása esetén

A program valamivel nagyobb érzékenységet mutatott az 1%-os NQ csökkenésére, de összességében egy 30 centiméteres határon belül maradtak az értékek. Érdekes, hogy a Ragyogó-híd feletti szelvény egyáltalán nem reagált a változásra. Ennek valószínűsíthető oka, hogy a MÁSZ kevés olyan évből lett levezetve, amelyekre igaz volt az  $NQ < NQ(1\%)$  feltétel, és így ugyanazokra az évekre volt igaz a  $NQ < 0,95 * NQ(1\%)$  feltétel is.

### 6.7. Adathalmaz csökkentése

Vizgáltam a MÁSZ alakulását alacsonyabb elemszám esetén. Az idősort 4 részre osztottam, és azokra külön-külön elvégeztem a MÁSZ vizsgálatokat. Az eredményeknek a 6.3. pontban meghatározott MÁSZ értéktől való eltérése a 37. ábrán látható. Magasabb MÁSZ értéket egy szelvényben sem adhatott egyik eljárás sem, ugyanis az 1%-os Q értékek nem változtak, ezért minden magasabb MÁSZ szint kizárásra került az alvízi kritérium miatt. Számottevő különbség nincs a négy eset között, ezért közel fölösleges lenne újabb 4000 éven lefuttatni a modellt. Azonban a generált idősor meghosszabbításával lehetséges, hogy tovább nőnének a mértékadó árvízszintek. Érdekes lehetne további vizsgálatokat végezni hosszabb időszoron, aminek eredményeként a folyamatos biztonság felé haladna az árvízszintek meghatározása.



37. ábra: A mértékadó árvízszintek adathalmaz nagyságára való érzékenysége

## 7. Konklúzió

A munkám során egy új, az árvízi gyakorlatban egyre jobban elterjedő módszerrel határoztam meg a lehetséges mértékadó árvízszinteket. Ehhez elkészítettem a Rába alsó szakaszának egydimenziós hidrodinamikai modelljét, amelyet 10-20 centiméteres pontossággal alkalmasnak találtam a munkálatokra. A Duna és a Mosoni-Duna egy-egy rövid szakaszának a modellhez kapcsolása után megállapítottam az új vízhozam összehasonlításra alapuló mértékadó árvízszinteket. Bár a vízhozam adatsorok bizonytalanok, - általában csak néhány mérésen alapulnak, - a Rába alsó szakaszán viszonylag könnyen mérhetőek. Ezért úgy gondolom, a módszerrel megfelelő pontosságú eredményt sikerült előállítanom a vizsgált szakaszra.

A kutatásom során kapott eredmények azt mutatják, hogy a Rába folyón egyes szakaszokon nincsenek kiépítve a töltések a 100 évenként előforduló árvizekre, esetleges magasztásuk javasolt. Azonban a mértékadó árvízszintek minden egyes felülvizsgálat során várhatóan nőni fognak, elsősorban a hidrológiai, másodsorban a hidraulikai változások következtében. A legnagyobb nehézséget e változások gyorsasága okozza. Ugyanis nehéz egy olyan időintervallumban elhelyezkedő adatsort kijelölni, amely egyértelműen kötődne a jelenlegi viszonyokhoz. A dolgozatomban alkalmazott módszer ezt a problémát a fiktív árhullámok segítségével valamennyire kiküszöböli, azonban a 4000 év hosszú adatsor is az előző 83 év árhullámait figyelembe véve lett generálva, tehát az esetlegessége és az információtartalma azonos.

A fejlődő világban egyre jobban elterjednek a modellezési eljárások, a modellező programok használata, ezért nem meglepő, hogy a vízügyi szakemberek kidolgoztak egy olyan eljárást, amely szintén egy modellezési technikát hív segítségül egy olyan fontos kérdésben, mint a mértékadó árvízszintek kijelölése. A módszerrel a valósághoz közelítőbb eredményeket kapunk, ugyanis minden egyes szelvényben meghatározásra kerülnek az értékek, interpoláció nélkül. Azonban, mint minden módszernek, ennek is megvannak a hátrányai. A vízhozam peremtől való jelentős függőség és a pontos geometriától való függőség nagymértékben korlátozzák az eredmények pontosságát.

A mértékadó árvízszintek vizsgálatát számtalan módon tovább lehet gondolni, víztesttől függően. A Rába esetében a legérdekesebb vizsgálat a Sárvár fölötti szakasz modellezése lehetne. Azonban ehhez már jóval célszerűbb lenne egy kétdimenziós modell használata, bár ez jelentősen több adatot és teljesítményt igényelne. Egyéb statisztikai módszerekkel mélyebben is elemezni lehetne a mértékadó árvízszinteket kialakító árhullámokat, megállapítani, miben térnek el más hasonló árhullámoktól.

## Felhasznált irodalom

Árvízi 1D modellezés HEC-RAS programmal [www.vit.bme.hu](http://www.vit.bme.hu) (2014), 10-17. dia

Floods in June 2013 in the Danube River Basin- Published by: ICPDR – *International Commission for the Protection of the Danube River*

HEC-RAS (2010). HEC-RAS River Analysis System, Version 4.1. Jan 2010. User's manual. Hydraulic Engineering Center, US Army Corps of Engineering.

KÖTIVIZIG Védelmi Osztag Zárójelentés 2013-08-05

MÁSZ felülvizsgálata során alkalmazott modellezési technikák, tapasztalatok - Krámer Tamás előadás: *Új irányok és eszközök az árvízvédelmi tervezésben* konferencián, Nyíregyháza, 2014. 10. 15.

Szigyártó Z. (2009). A mértékadó árvízszint és a valószínűség, *Hidrológiai közlöny*, 89. Évf. 1. Szám, 2009. január-február 23-34. o.

<http://hu.wikipedia.org/wiki/R%C3%A1ba> (2014)

[http://vit.bme.hu/targyak/hidroinf/HEFOP\\_Hidroinformatika.pdf](http://vit.bme.hu/targyak/hidroinf/HEFOP_Hidroinformatika.pdf) (2014), 10-11. o.

<http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/> (2014)

<http://www.hidatok.hu> (2014)

# Melléklet

