



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem  
Építőmérnöki Kar  
Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszék

**Tudományos Diákköri Konferencia 2016**

**Extrém nagy dunai árhullámok ártéri  
tározódásának hatása a tetőző  
vízszintekre**

**Készítette: Ács Bence Tamás**

**Konzulens: Krámer Tamás**

## Tartalomjegyzék

1. Bevezetés .....	3
2. Megelőző tanulmányok.....	4
3. Terület bemutatása .....	6
4. Vizsgált árhullámok .....	9
5. Alkalmazott modell jellemzése .....	12
5.1. Numerikus megoldó által használt hidraulikai egyenletek.....	12
5.2. 2D Számítási háló kialakítása.....	14
5.3. Modell felépítés .....	16
6. Modell eredmények .....	18
6.1. Hossz-szelvények vizsgálata .....	21
6.2. Árhullámképek alakulása szelvényenként.....	28
6.3. Árhullámképek hossz mentén.....	38
6.4. Érzékenységvizsgálat.....	39
7. Véggövetkeztetés .....	42
8. Felhasznált irodalom .....	42

## 1. Bevezetés

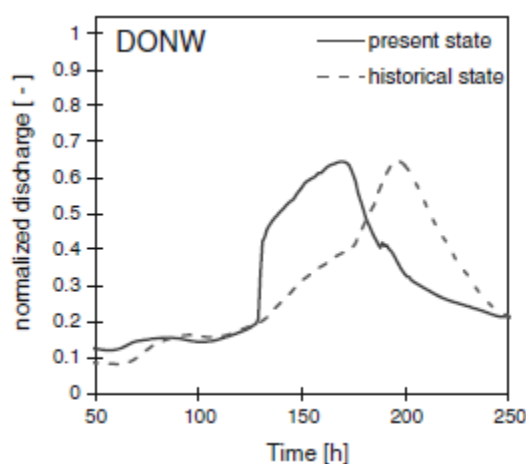
Az árvizek modellvizsgálatának fő célja jellemzően annak elősegítése, hogy megfelelő hullámtéri területhasználattal, illetve megfelelő magasságú árvízvédelmi töltések kialakításával megakadályozzuk, hogy a levonuló vizek a mentett ártérre lépjenek. A töltéseket kis valószínűségű árvizekre alakítják ki, annak céljából, hogy gazdaságosak legyenek, azaz ne kerüljön a megépítésük többbe, mint a megépítés elmaradása esetén várható kár. A 100 évesnél jóval súlyosabb, extrém árvizekkel kapcsolatban azonban sokkal kevesebb vizsgálat történt. Az ilyen 10 000 vagy 100 000 éves visszatérési idejű áradások megállíthatatlanul kilépnek a „mentett” ártérre. Noha ezekben az előtött ártéri öblözetekben katasztrofális károkat okoz az árvíz, a kilépett víztömeg ideiglenes tározódásának köszönhetően az alsóbb folyószakaszon mégis enyhül az árvízi fenyegetettség ahhoz képest, mintha az árhullám a fővédvonalak között érne oda le. Az extrém árvízszintek számítása a hidrológiai elemzések mellett tehát hidrodinamikai modellezésre is ki kell, hogy terjedjen.

Munkám során egy 1D-2D összekapcsolt hidrodinamikai modell segítségével vizsgáltam az extrém árhullámok terjedését a Közép-Duna völgyében, Budapest és Baja között. Ezen a nagyjából 200 km hosszú Duna-szakaszon található egy rendkívül nagy kiterjedésű bal parti ártéri öblözet, így ettől a mintaterülettől érdekes, előre nem látható eredményeket várhatunk. A különböző visszatérési idejű befolyó árvízi vízhozamokat Budapestenél fix árhullámképekkel vettem föl, és azt vizsgáltam meg, hogy különböző töltéskialakítások mellett a Duna hossza mentén hogyan alakulnak a Duna tetőző vízszintjei. Ezen felül néhány jellemző szelvényben összehasonlítom az árhullámképek alakulását mind visszatérési valószínűség, mind töltéskialakítás szerint.

## 2. Megelőző tanulmányok

Hasonló témakörrel 2014-ben került publikálásra egy német tanulmány D. Skublics és P. Rutschmann által A Bajor Dunaszakaszc természetes árvízi késleltetésének megváltozása (Progress in natural flood retention at the Bavarian Danube) címen. Azt vizsgálták, hogy egy a természeteshez közeli, nagyjából kétszáz évvel ezelőtti mederállapotban, árvízi töltésezés nélkül, hogyan alakul az árvizek levonulása a jelenlegi, jelentősen módosított folyómederhez képest. A természetes állapot felvételéhez korabeli dokumentumokat használtak föl, és ez alapján hoztak létre egy kétdimenziós lefolyásmodellt a vizsgált 270 km hosszú folyószakaszon.

Az összehasonlítást két paraméterre végezték el, egyrészt a visszatartott víztömegek nagyságára, másrészt 100 éves visszetérési valószínűségű vízhozamra normalizált árhullámképek alapján a csúcsvízhozamok alakulására a főmederben. A tapasztalat az volt, hogy bár a visszatartott víztérfogat jóval jelentősebbnek bizonyult (2. ábra) a természetes állapotban, a főmeder normalizált csúcsvízhozama nem volt alacsonyabb, sőt, néhány szelvényben éppen hogy magasabbra adódott. Az ártéri levonulás hatása sokkal inkább az árhullámcsúcs késleltetésében nyilvánult meg, mintsem annak csökkenésében; az alábbi ábrán (1. ábra) jól látható ez egy 2005-ös árhullám szimulációs eredménye Donauwörthnél a tényleges árvízi mérésekhez viszonyítva.

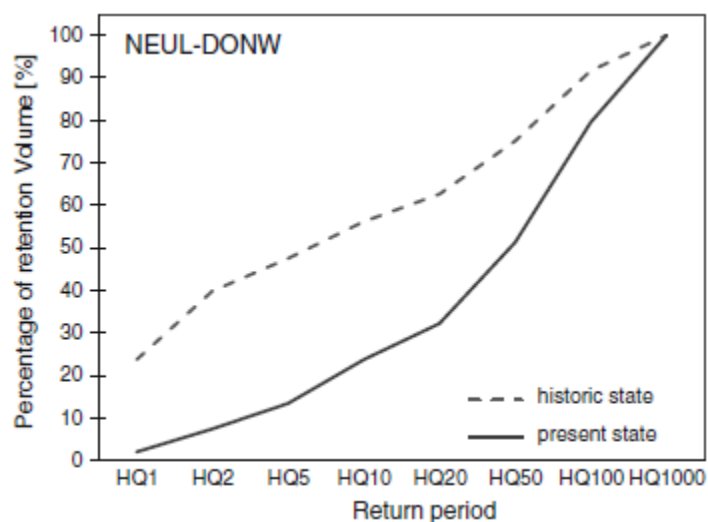


**1. ábra 100 éves vízhozamra normalizált árhullámképek Donauwörth szelvényében egy 2005-ös árvízre.**

Fontos megjegyezni, hogy a tanulmány nem tér ki a tetőző vízszintek viszonyára. Az, hogy egy nyílt ártér milyen mértékben képes csökkenteni ezeket, jelentősen függ az ártér lefolyási viszonyaitól, az ott kialakuló vízsebességektől; a vízhozamokkal nincsenek egyenes arányosságban. Szintén jelentős különbség ezen tanulmány és a saját vizsgálatom között

terület léptéke. Bár hosszában a bajor dunaszakasz nagyobb, a hozzá tartozó ártéri terület jelentősen kisebb az általam vizsgált területéhez képest.

A német tanulmány végkövetkeztetése az, hogy a jelentős árvizek esetén hatékonyabbak a szabályozott árvízvédelmi beavatkozások; a természetes állapot csillapító képessége nem különbözik számottevően a töltésezett, erősen módosított állapothoz képest. A természetes meder csillapítóképesége is jelentősen csökken ahogy a visszatérési idő növekszik (2. ábra). Dolgozatomban a 100 évest is jóval meghaladó árvízhozamokkal számolok, melyekre az ábra alapján nem volna meglepő, ha a tározódó térfogat a töltések mellett lenne nagyobb.



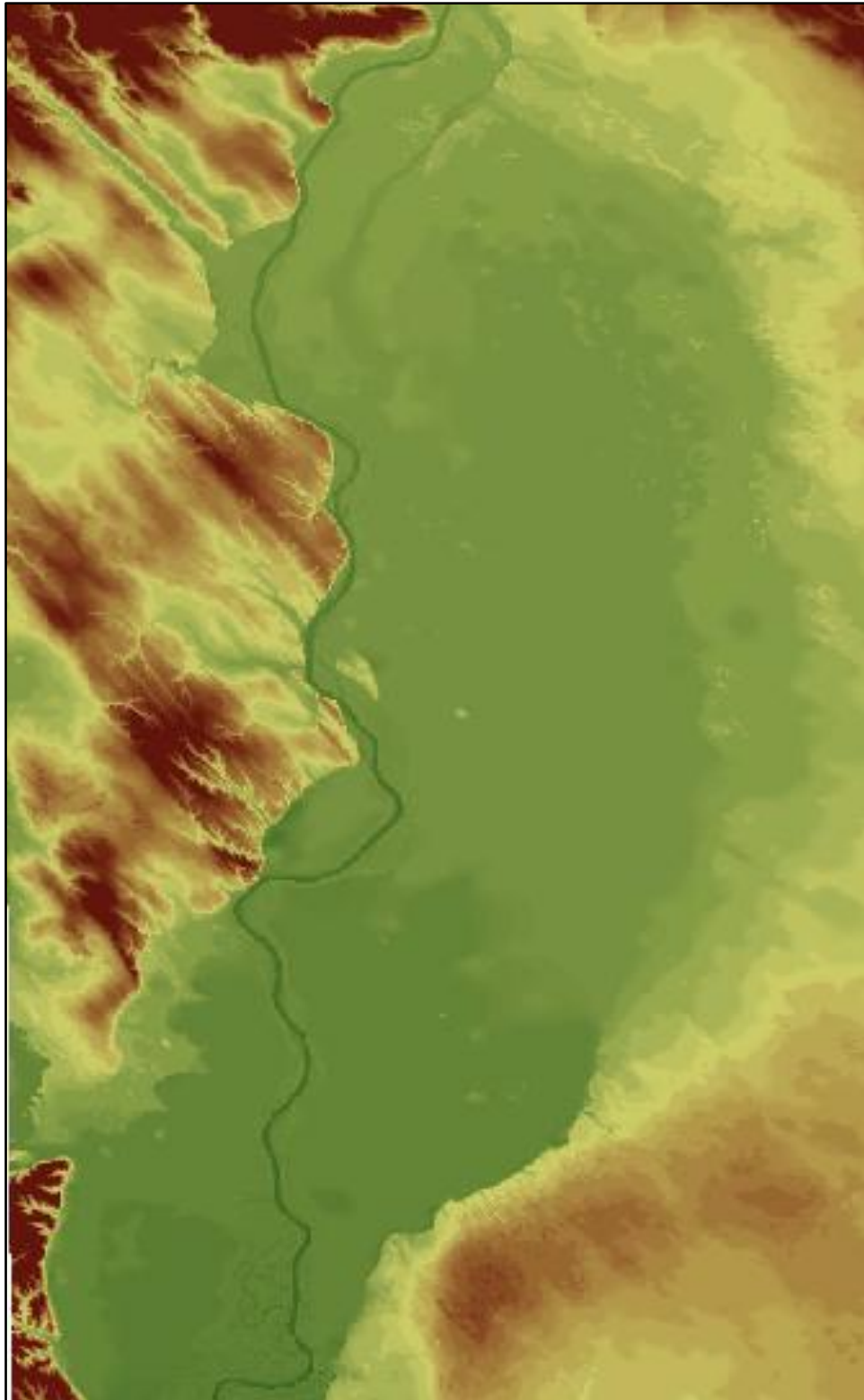
**2. ábra Tározódás normalizált mértéke a visszatérési valószínűség függvényében Donauwörth szelvényében.**

### 3. Terület bemutatása

A vizsgált terület a Közép-Duna völgye Budapest és Baja között (3. ábra és 4. ábra). A vizsgált folyószakasz mintegy 200 km hosszú, a mederesés átlagosan 9-10 cm/km körüli, a teljes esés mintegy 18,5 méter. A vizsgált terület felső határa a Duna 1648,5 fkm-e, alsó határa az 1447,0 fkm-e. Maga a modell ennél hosszabb, hogy az alvízi peremfeltétel ne tudja befolyásolni az eredményeket. Az alvízi perem ez alapján a 1384,25 fkm szelvényében helyezkedik el. Ezen a területen négy jelentősebb kiterjedésű ártéri öblözet található, melyek a modellbe is be lettek építve:

- 01.42 Budapest-Bajai bal parti
- 01.24 Madocsai jobb parti
- 01.25 Duna-Sióközi jobb parti
- 01.31 Duna-Sárközi jobb parti

A fenti ártereken többszáz település található, köztük néhány jelentősebb település is, mint Dunaharaszti, Szigetszentmiklós, Dabas, Kiskörös, Kalocsa, Tolna és Szekszárd. Nagyrészüket nem helyezkedik közvetlenül az öblözetek kijelölt határain belül, de a vizsgált extrém árvízi jelenségek a fenti települések mindegyikét veszélyeztetik. Vizsgálatom során nem a tényleges, jelenlegi koronaszinteket vettem figyelembe, hanem két elméleti kialakítást építettem be a modellbe, melyek közül a MÁSZ+1m-es magasság a jövőre nézve egy valószínű koronaszintnek tekinthető.



**3. ábra A vizsgált terület domborzata**



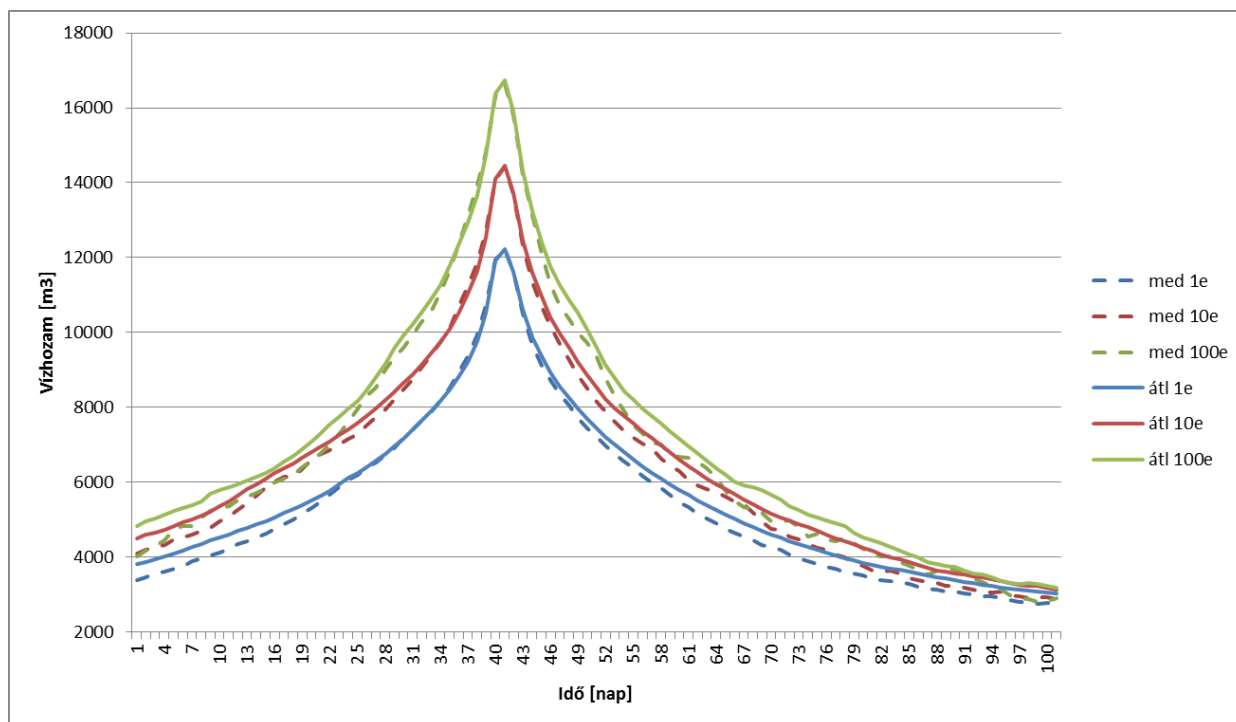
4. ábra A vizsgált terület. Google maps



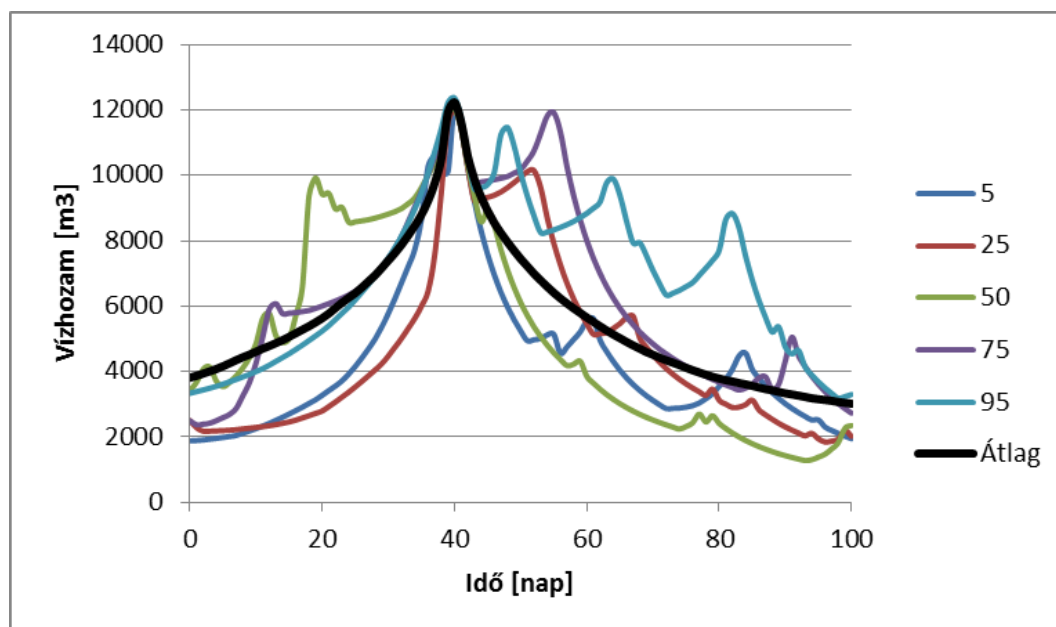
#### 4. Vizsgált árhullámok

A tanszék rendelkezésemre bocsátott egy valószínűségi alapokra épülő módszerrel létrehozott adatsort, melyben számos lehetséges vízhozam idősorokat hoztak létre 1000, 10e és 100e éves visszatérési valószínűségekkel, melyet a mértékadó árvízszintek meghatározásakor állítottak elő (Krámer et al. 2014). A módszer Markov-láncokra épül, figyelembe veszi a szezonális változásokat is, és nagy előnye, hogy nem igényli az árhullámokat létrehozó csapadékok ismeretét, bemenetként napi vízhozam értékeket igényel. Ez alapján képes oly módon véletlenszerű árhullámképeket létrehozni, melyeknél az egymást követő értékek nem függetlenek egymástól. Ezek az idősorok nagy mennyiségű lehetséges árhullám kombinációt fednek le. Ezek közül nehéz önmagában kiválasztani a mértékadónak mondható árhullámot, de a jelen vizsgálat szempontjából a levonuló víztérfogat a legjelentősebb tényező, mivel azt elemzem, hogy milyen hatékonysággal tud az ártér részt venni a levezetésben, illetve hogyan tud szükségtározóként viselkedni. A kutatásra rendelkezésre álló idő viszonylagos szűkösségére való tekintettel nem volt lehetőségem a valószínűségi vizsgálatot hosszabb időszak szimulációjával kiterjeszteni a hidrodinamikára, ezért az egyszerűsítés kedvéért valamilyen módszerrel létre kellett hozzak egy mértékadónak mondható állapotot. Két lehetőség merült föl erre: az adatsorok mediánja vagy azok átlaga. A tapasztalat az volt, hogy az átlagok szinte minden esetben meghaladták a mediánokat, valamint az, hogy a mediánokkal létrehozott árhullám sokkal egyenetlenebb, mint az átlagokból alkotott. Konzultáció során ezen két szempont alapján tehát az utóbbit választottuk a vizsgálatok alapjának. A szimuláció hossza megegyezik a kapott adatsorok hosszával, azaz 100 nappal. Az aggregált vízhozam idősorokat valószínűség és aggregációs módszer szerint az 5. ábra mutatja be.

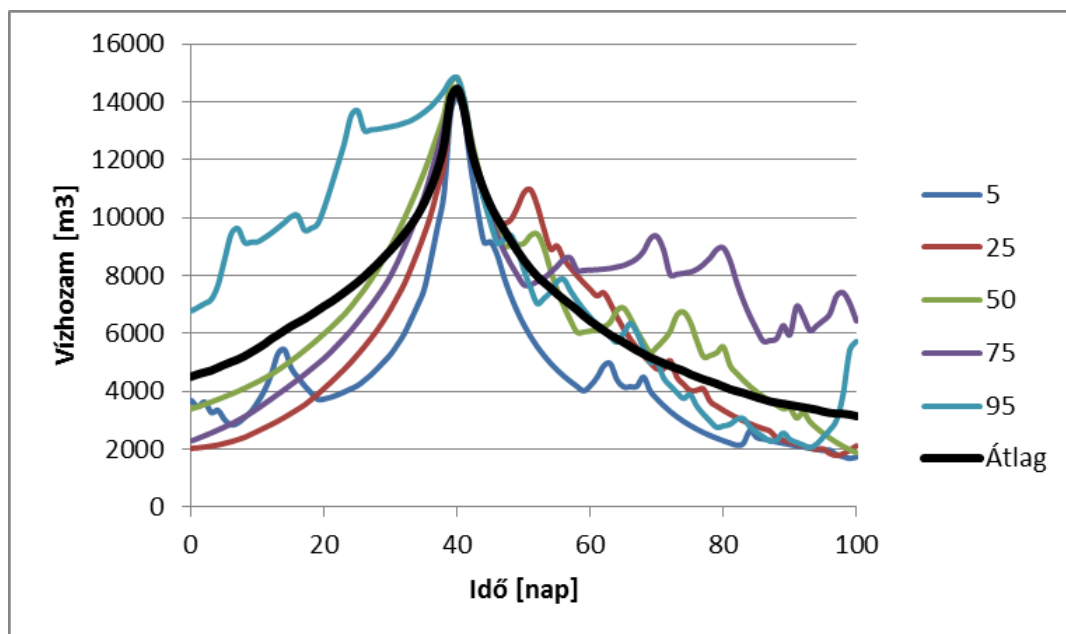
Az ezt követő ábrákon néhányat bemutatok az aggregáláshoz felhasznált árhullámok közül. Kiemeltem 5-5 árhullámot a térfogatuk alapján. Ezen a szakaszon nagyjából 4000 m<sup>3</sup>/s-os vízhozam fölött hagyja el a víz a főmedret, tehát ezt vettem egy alsó küszöbnek, és az ezt meghaladó vízhozamokhoz tartozó térfogat alapján sorba rendeztem az árhullámokat, feltüntetésre pedig az 5, 25, 50, 75 és 95 százalékos kvantilisekhez tartozó árhullámokat tüntettem föl az átlag mellett az egyes visszatérési valószínűségekhez (6. ábra - 8. ábra).



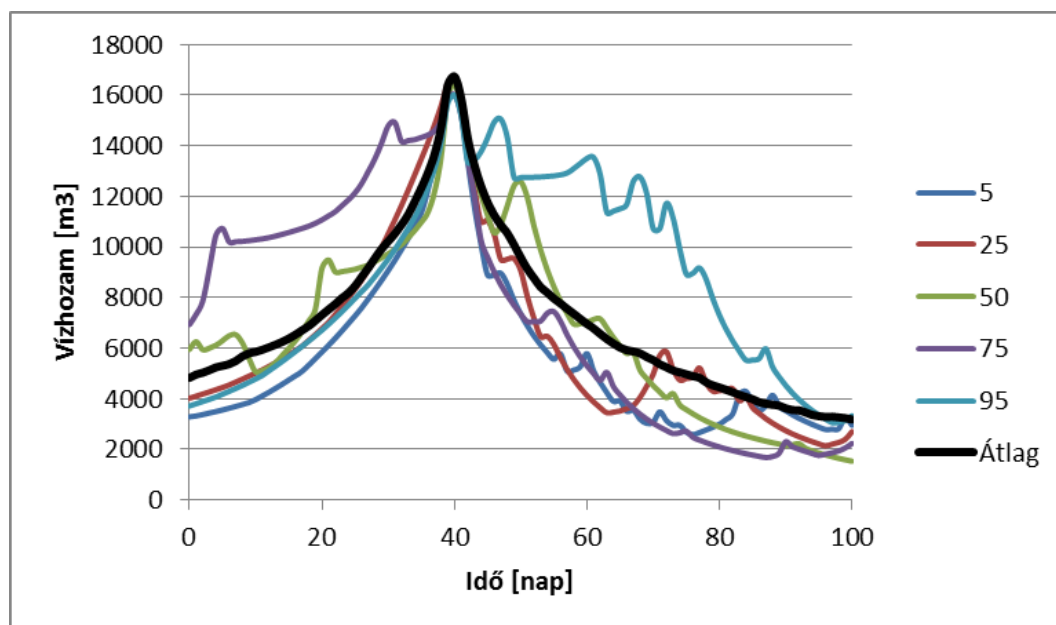
5. ábra Átlagolással és mediánnal aggregált árhullámképek a befolyási peremnél az 1, 10 és 100 ezer éves visszatérési időkhöz.



6. ábra Azonos Q-val tetőző néhány árhullám a több százere éves szimulált időszakból, a tetőzésnél szinkronizálva az összes árhullám átlagához viszonylatva 1000 éves visszatérési valószínűség mellett



7. ábra Azonos Q-val tetőző néhány árhullám a több százere éves szimulált időszakból, a tetőzésnél szinkronizálva az összes árhullám átlagához viszonyítva 10 000 éves visszatérési valószínűség mellett



8. ábra Azonos Q-val tetőző néhány árhullám a több százere éves szimulált időszakból, a tetőzésnél szinkronizálva az összes árhullám átlagához viszonyítva 100 000 éves visszatérési valószínűség mellett

## 5. Alkalmazott modell jellemzése

A következőkben bemutatom a vizsgálat során alkalmazott modellt. A vizsgálataimhoz a HEC-RAS 5.0.3. 1D-2D összeépített hidraulikai modelljét alkalmaztam. Az eszköz kézikönyve alapján a következő alfejezet mutatja modell matematikai hátterét.

### 5.1. Numerikus megoldó által használt hidraulikai egyenletek

Az 1D modellben keresztmetszvényenként két változóval, a közepes vízszinttel és a vízhozammal írjuk le a szelvény hidraulikai állapotát. Ezek hossz-menti és időbeli változását a térfogat- és az impulzus-megmaradási törvényeken alapulva számoljuk. A keresztmetszvényenként így adódó két ismeretlenre két differenciálegyenlethez álló egyenletrendszer, az ún. de Saint-venant egyenleteket kapjuk, melyek peremfeltételekkel kiegészítve egy matematikailag határozott, megoldható feladatot eredményeznek.

A térfogat-megmaradást kifejező 1D egyenlet:

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

ahol  $A$  = nedvesített szelvényterület,  $t$  = idő,  $Q$  = vízhozam,  $l$  = az áramlási irányban növekvő ívhossz-koordináta.

Az 1D impulzusegyenlet:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial l} \left( \frac{Q^2}{A} \right) = gA \left( S_E - \frac{\partial z_b}{\partial l} \right),$$

ahol  $z$  = vízszint,  $g$  = nehézségi gyorsulás,  $z_b$  = mederszint,  $S_E$  = energiavonal esése, amelyet összetett,  $n$  darab részre osztott keresztmetszvényre a Manning-képlettel számolunk:

$$S_E = Q|Q| \left( \sum_{j=1}^n \frac{1}{k_j^2 A_j^2 R_j^{4/3}} \right),$$

ahol  $k$  = Manning-féle simaság (az érdesség reciproka),  $R$  = hidraulikus sugár.

A 2D modell ugyanezeket a megmaradási törvényeket alkalmazza, de itt a teljes vízmélység mentén integrált három változóval írjuk le a függély állapotát: a vízmélységgel és a fajlagos vízhozam descartes-i vetületeivel. A függélyenként így adódó egyenletrendszer ezúttal sekélyvízi egyenleteknek nevezzük, amelyeknek a peremeire szintén peremfeltételeket kell előírni.

A térfogat-megmaradást kifejező 2D integrálegyenlet egy függőleges hasáb alakú ellenőrző térfogatra van felírva, amelyet alulról a meder, felülről a vízfelszín határol:

$$\int_{\Omega} \frac{\partial h}{\partial t} d\Omega + \oint_S \nabla \cdot \mathbf{q} dS = 0,$$

ahol  $\Omega$  = hasáb alapterülete,  $h$  = vízmélység,  $\mathbf{q}$  = fajlagos vízhozamvektor,  $S$  = a hasáb kerületének vízszintes vetülete.

A 2D impulzusegyenlet integrálalakban a  $\mathbf{q}$  vektorral felírva a következő:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} \mathbf{q} d\Omega + \oint_S (\mathbf{f}n_x + \mathbf{g}n_y) dS = \int_{\Omega} s d\Omega,$$

ahol  $\mathbf{n} : (n_x, n_y)$  = az  $S$  kerület kifelé mutató normálirányú egységvektora az  $x$  ill.  $y$  irányú komponenseivel kifejezve.

A  $\mathbf{f}$  és  $\mathbf{g}$  vektorok az ún. fluxusvektorok

$$[\mathbf{f} \quad \mathbf{g}] = \begin{bmatrix} \frac{p^2}{h} + \frac{gh^2}{2} & \frac{pq}{h} \\ \frac{pq}{h} & \frac{q^2}{h} + \frac{gh^2}{2} \end{bmatrix},$$

ahol  $g$  = nehézségi gyorsulás;  $\rho$  = víz sűrűsége. Az  $s$  forrástagban pedig

$$s = \frac{\tau_b}{\rho} - gh\nabla z_b,$$

a  $\tau_b : (\tau_{bx}, \tau_{by})$  fenék-csúsztatófeszültség és a mederesés hatását foglalja össze,

$$\tau_b = -\frac{\rho g n^2 |\mathbf{q}|}{k^2 h^{7/3}} \mathbf{q}.$$

### 1D-2D kapcsolat

Az egy- és kétdimenziós modellrészek közötti kapcsolatot az ún. oldal szerkezetek (Lateral Structure) biztosítják. Ezeket az 1D modellen vesszük föl, és megadjuk, hogy melyik 2D területhez kapcsolódjanak. Ez a szerkezettípus megadható az 1D modell viszonyrendszerében, vagy georeferáltan. Minden esetben szükséges megadni egy töltésgeometriát, abban az esetben is, ha az ember terepi lefolyást kíván számolni. A szerkezet fölötti áramlásra az 5.0.3-as verzióban két féle számítási mód is rendelkezésünkre áll. Számolhatunk a bukó képlettel, amennyiben magas szerkezetről van szó, de amennyiben kellően alacsony a töltésünk (például amikor terepi lefolyást akarunk számolni), alkalmazhatjuk a normál 2D lefolyás egyenleteket, mintha az 1D szakasz oldalsó szerkezete a 2D területnek egy vízszint típusú peremfeltétele lenne. Ezen kívül még számos egyéb szerkezet is beépíthető a modellbe az 1D-2D kapcsolat kialakítására, mint például

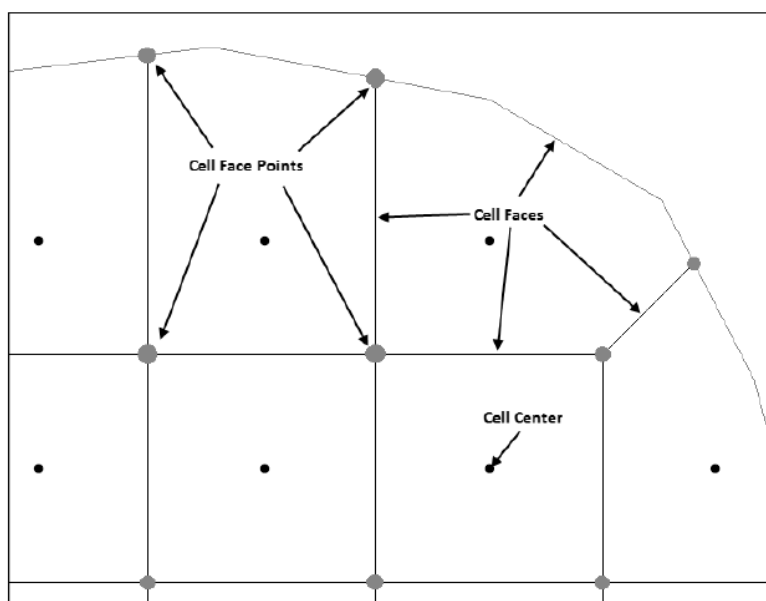
átereszek és zsilipek, de ezek a jelen vizsgálat szempontjából nem fontosak, nem kerültek felhasználásra. A felhasznált bukóegyenlet a következő:

$$Q = CLH^{3/2}$$

ahol  $Q$  = átfolyó vízhozam,  $C$  = bukótényező,  $L$  = bukóél hossza,  $H$  = bukóél fölötti energiamagasság.

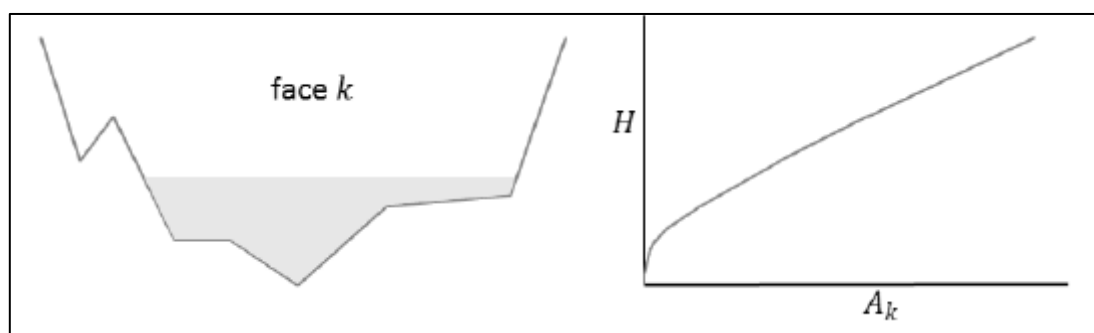
### 5.2.2D Számítási háló kialakítása

A modern műholdas és légi távmérési technológiák nagy mennyiségű adatot tudnak szolgáltatni a terepfelzínről, de sok esetben az így létrejött adathalmaz túl sűrű ahhoz, hogy ésszerűen felhasználható legyen a numerikus modellben. Ez hagyományos esetben nehézséget okoz, a legtöbb megoldó számára szükséges egy olyan számítási háló, amely sokkal kisebb felbontású mint az eredeti terepmodell. Más szoftverek, mint például az SRH-2D, melyet Hidrionformatika c. tárgyunk keretében is alkalmaztunk háromszöghálót alkalmaz, a számítási háló egyes cellái sarokpontjaikkal vannak jellemezve. Ezekon a pontokon ismertek pontosan a terepmodell magassági adatai, a cellák élei mentén a terepesés lineáris interpolációval kerül közelítésre. Ezen módszer nagy hátránya egyrészt, hogy az interpoláció során nagy mennyiségű terepadat figyelmen kívül van hagyva, másrészt szerencsétlen esetekben olyan domborulatok is bekerülhetnek a számítási hálóba, melyek a terepmodellen nincsenek jelen, de a pontok nem optimális elhelyezése miatt a modellbe beépülnek, ezzel a modell számára áramlási akadályt okozva, vagy más esetben domborulatot figyelmen kívül hagyva áramlási csatornát.



9. ábra – HEC-RAS 5.0.3. 2D modell számítási hálójának vázlata.

A hagyományos megoldással ellentétben a HEC-RAS 5.0. modellje a cellákat „középpontjukkal” jellemzi. A fenti ábrán (9. ábra) látható egy számítási cella kialakítása HEC-RAS-ban. A felhasználó a cella középpontokat (Cell Center) tudja megadni. A szoftver ez után meghatározza az egyes középpontokhoz tartozó területet a pontok közé húzható szakaszok felező merőlegeseinek segítségével. A hagyományos interpolációs megoldással szemben a szoftver a terepmodell alapján minden cella oldalra felveszi annak profilját (10. ábra), és ez alapján kiszámolja a vízállás-nedvesített szelvényterület görbét. A megoldó ez alapján tudja eldönteni, hogy egy adott cella oldalon milyen vízszint mellett és mennyi víz tud átfolyani.



**10. ábra – HEC-RAS 5.0.3. 2D modell cellaoldalán felvett profil, és az az alapján számolt (H-A) vízállás-nedvesített szelvényterület görbe.**

A szoftver cellafelvételi módszerének köszönhetően tetszőleges oldalszámú cellák alakíthatóak ki, bár a készítőik 8 darabra korlátozták a felvehető oldalak számát, egyrészt a hatékonyság, másrészt a memóriaigény korlátozása céljából. A cellák nem szükségszerűen strukturáltak tehát, de a program sok szempontból támogatja ennek a módszernek az alkalmazását. Elsőként, mivel minden él mentén felvételre kerül egy terep-profil, általános terepviszonyok mellett nincs nagy jelentősége a cellahatár elhelyezkedésének. Másodikként, a szoftverbe be van építve a strukturált háló automatikus generálásának lehetősége. Harmadikként, a HEC-RAS 5.0.3. egy másik nagy előnye, hogy amikor az egyes cellák előntésével számol, hagyományos megoldókkal ellentétben nem feltételezi, hogy az egész cella előntésre kerül; a terepmodellre visszavetíti a vízszinteket, és ez alapján rajzolja ki az előntés határát. Negyedikként pedig a strukturált hálóra a szoftver segítségével el lehet helyezni törésvonalakat (Break Line), melyek rákényszerítik a hálót, hogy ezt a vonalat vegyék alapul a cella oldalak kialakításakor. Szükség esetén további pontokat is el lehet automatikusan helyezni a törésvonalak környezetében tetszőleges sűrűségben, ha a területen pontosabb számítások szükségesek. A szoftver nem az első, ami hasonló módszerrel dolgozik, voltak már korábban hasonló 1D-2D összeépítésre képes modellek (Beffa 2002), de a térinformatikai feldolgozóképesége egyedülálló az ingyenes szoftverek körében.

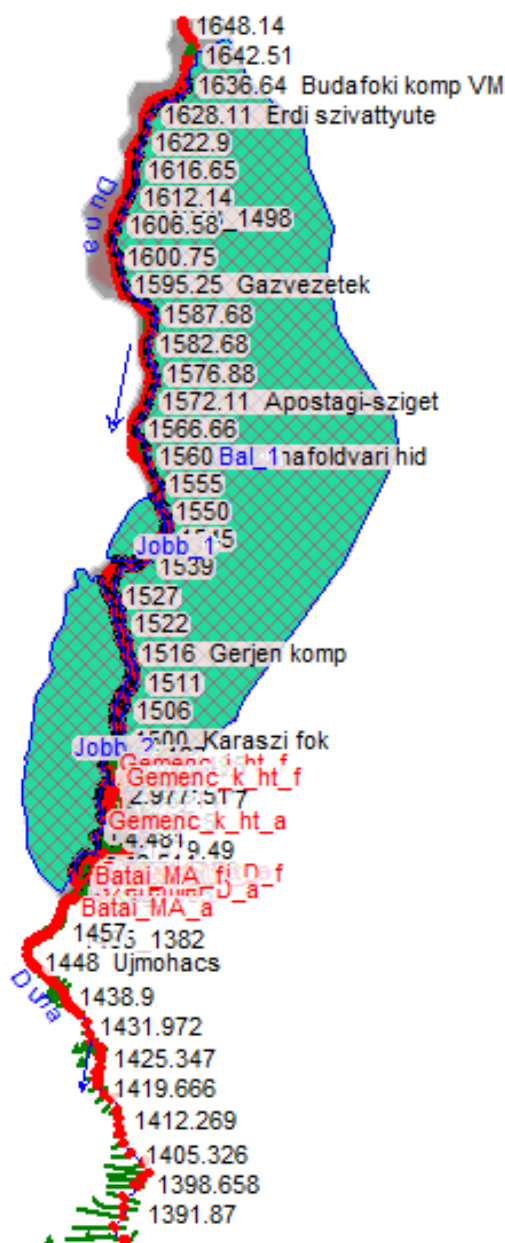
### 5.3. Modell felépítés

A modell kialakításához a Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszék rendelkezésemre bocsátotta a Duna egydimenziós modelljét az vizsgált szakaszra. Ez annak az 1D modellnek egy részlete, amit az új mértékadó árvízszintek meghatározására is használtak (Krámer 2015). A szakasz felső határa Budapest déli vége, ahol vízhozamidősorként adtam meg a peremfeltételeket, míg az alsó határa a Dráva torkolata vízhozamgörbével megadva. Ez kellően távol van a vizsgált területtől, hogy a hatása ne érvényesüljön jelentősen. Ennek igazolására végeztem érzékenységvizsgálatot az alvízi peremfeltételre, azt 5%-kal megnövelve a modell déli végén a referencia állapotban nagyjából deciméteres eltérés volt tapasztalható, ami még kalibrációs hibának is betudható volna ilyen vízhozamok mellett. A főmederben elegendő az 1D lefolyásmodell, a rendelkezésemre bocsátott modellrészlet igazolva lett a 2013-as árvízre, ezen felül a teljes területre 2D modellt alkalmazni jelentősen megnövelte volna a számítási igényt, újrakalibrációt igényelt volna, és várhatóan nem növelte volna meg jelentősen az eredmények pontosságát. 2D lefolyási területnek a vizsgált szakasz jelentősebb ártereit vettem föl, három különböző területtel. A kialakítás során nem törekedtem arra, hogy a területeken belül pontosan vizsgáljam a lokalizációs töltések és egyéb vonalas létesítmények hatásait. Az 1D-2D egybeépített modell a 11. ábra látható.

Az 1D modell szelvényköze átlagosan mintegy 1 fkm, a 2D modell rácsfelbontása 500, mely a terület méretét tekintve kellően sűrűnek tekinthető (M.S. Horritt 2001), mivel nem vizsgálok részletesen az ártéri elöntést, a 2D területekhez a terepmodell a FÖMI 50 m-es vízszintes felbontású digitális terepmodelljén alapul; ezt a tanszék adta rendelkezésemre. A két modelltér közötti kapcsolatot az 5.2. fejezetben leírtak alapján hossz menti szerkezetekkel vettem föl, az árvízvédelmi fővédvonalak mentén. Két különböző töltéskialakítással dolgoztam: egyrészt egy MÁSZ + 1m-es koronaszintű töltéssel, melyben egy reális jövőbeli töltéskialakítást feltételeztem, bukóképlettel számolva; másrészt egy terepszint + 1m-es kapcsolattal, mely esetben a 2D lefolyás egyenletekkel dolgozott a modell. A terep szint fölé való emelésnek az az oka, hogy sajnos a modell közvetlen terepszintű kifolyások esetén instabillá vált. A terep szint fölött egy méterrel elhelyezkedő koronaszint azonban nem különbözik sokban a terepszinti lefolyástól, akár a folyó hordaléka is kialakíthat egy ilyen természetes töltést. A továbbiakban az egyszerűség kedvéért ezt a változatot terepi lefolyásként említem. Ezen felül készült egy referencia változat is, ahol csak az 1D modellel számoltam, nem engedtem a vizet az ártérre kilépni. A MÁSZ + 1m-es töltés magassága jellemzően 2-5 m között mozog. Az esetleges töltésszakadások hatását nem vettem



figyelembe a modellben. A HEC-RAS 2D megoldója nem alkalmas az elszivárgás modellezésére, pedig ilyen nagy területű elöntések eset ez igen jelentős további tározódást jelenthetne. Ennek figyelmen kívül hagyása azonban a biztonság javára való elhanyagolás. A 2D területeken az érdességeket egységesen  $k = 10 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$  értékre vettem föl. Végeztem érzékenységvizsgálatot az érdességre az 1000 éves visszatérési valószínűségű árvízi eseményekre, egységesen  $k = 20 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$  értékre felvett érdességgel.



**11. ábra 1D-2D egyesített modell kialakítása. Zöld színnel láthatóak az 1D modell keresztmetsvényei, a kék sraffozott területek a 2D számítási területeket jelölik, szaggatott fekete vonallal látható az 1D és a 2D modellterületek kapcsolata.**

## 6. Modell eredmények

A kutatás célja az volt, hogy megállapítsam, milyen hatással van az ártéri tározódás az extrém nagy árvizek tetőző vízszintjeire. Ehhez három különböző töltéskialakítást feltételeztem, melyek a következők:

- **inf** – végtelen magas töltéskoronát feltételezve kizárólag az 1D modellterületen engedem meg az árvíz levezetését; ezt tekintetem referencia állapotnak,
- **masz** – MÁSZ+1m magas töltéskorona szintek
- **zero** – töltésezés nélküli állapot, az árvíz akadály nélkül juthat ki az ártérre.

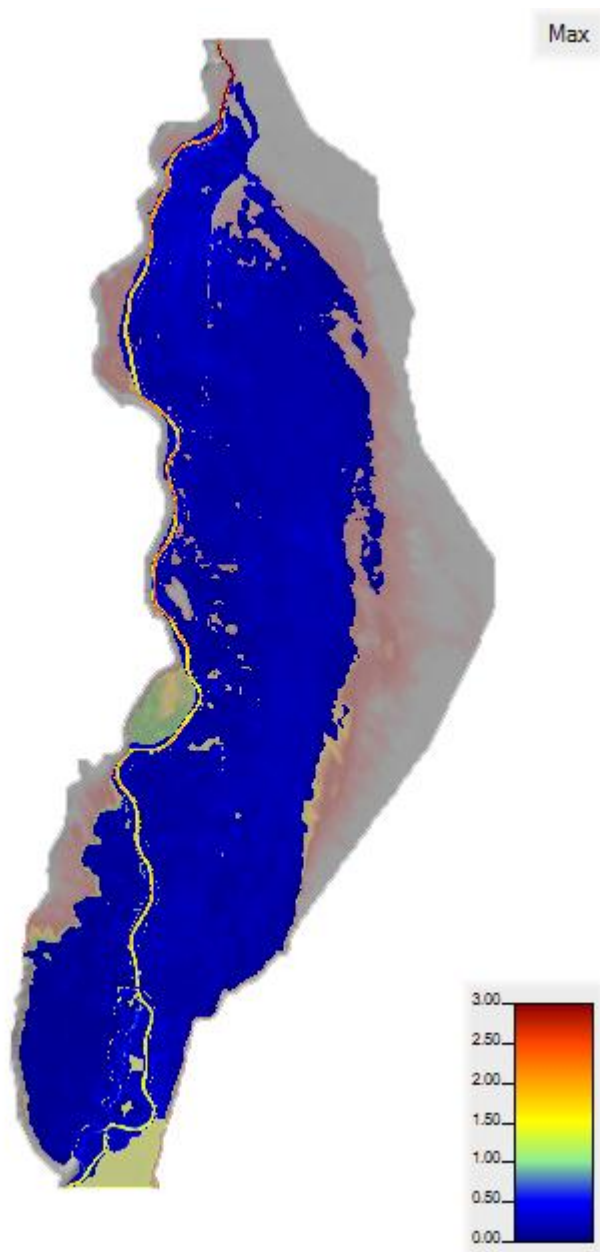
A vizsgálat során 12 különböző futtatást végeztem a modellen; 3-3 futtatást minden egyes töltéskialakításra, valamint két érzékenységvizsgálatot az ártéri érdességekre, egyet pedig az alsó peremfeltételre. A továbbiakban a fenti jelöléseket használom az egyes diagramokon jelmagyarazatként. A kialakítást követő szám a visszatérési időt jelöli (**1e, 10e, 100e**).

A fővédvonal teljes hosszán észlelhető kifolyás, de csak az alsó szakaszokon tud visszaáramlani a víz a főmederbe (12. ábra). Általánosan kijelenthető, hogy áramlási sebességek az ártéren lényegesen kisebbek, a maximális vízsebességek 1-2 nagyságrenddel is kisebbek lehetnek a főmederben mérhetőnél (13. ábra). A főmederben a maximális vízsebességek 2 m/s-os érték körül mozognak, míg az ártéren az abszolút maximum 0,2 m/s körül alakul, ami egyes helyeken 0,02 m/s körüli értékre csökkenhet.

A következőkben három szempontból fogom az eredményeket összehasonlítani: az egyes események tetőző felszín görbéje alapján, kialakítás szerint; az egyes események kitüntetett szelvényeiben kialakuló árhullámképek alapján a szelvények összehasonlítása, kialakítás szerint; valamint az egyes szelvényekben összemérem mind a visszatérési valószínűség, mind a töltéskialakítás függvényében az árhullámkép alakulását. Ezen felül hasonló szempontok alapján elemzem még a két érzékenységvizsgálati futtatást.



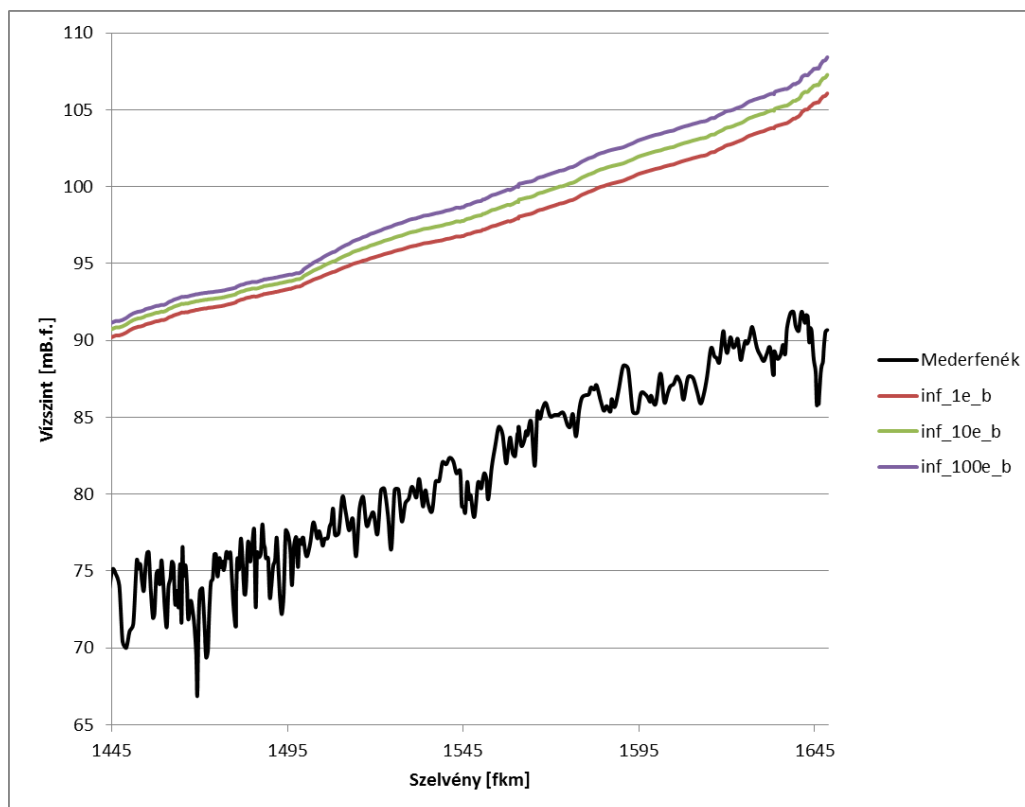
**12. ábra 100 000 éves árvíz maximális vízmélységei MÁSZ+1m-es töltés kialakítás mellett, valamint a jellemző áramlási útvonalak (piros nyilakkal jelölve).**



**13. ábra Maximális áramlási sebességek térképe töltésezett állapotban a 100 000 éves árhullámra (színezés mértékegysége m/s)**

### 6.1. Hossz-szelvények vizsgálata

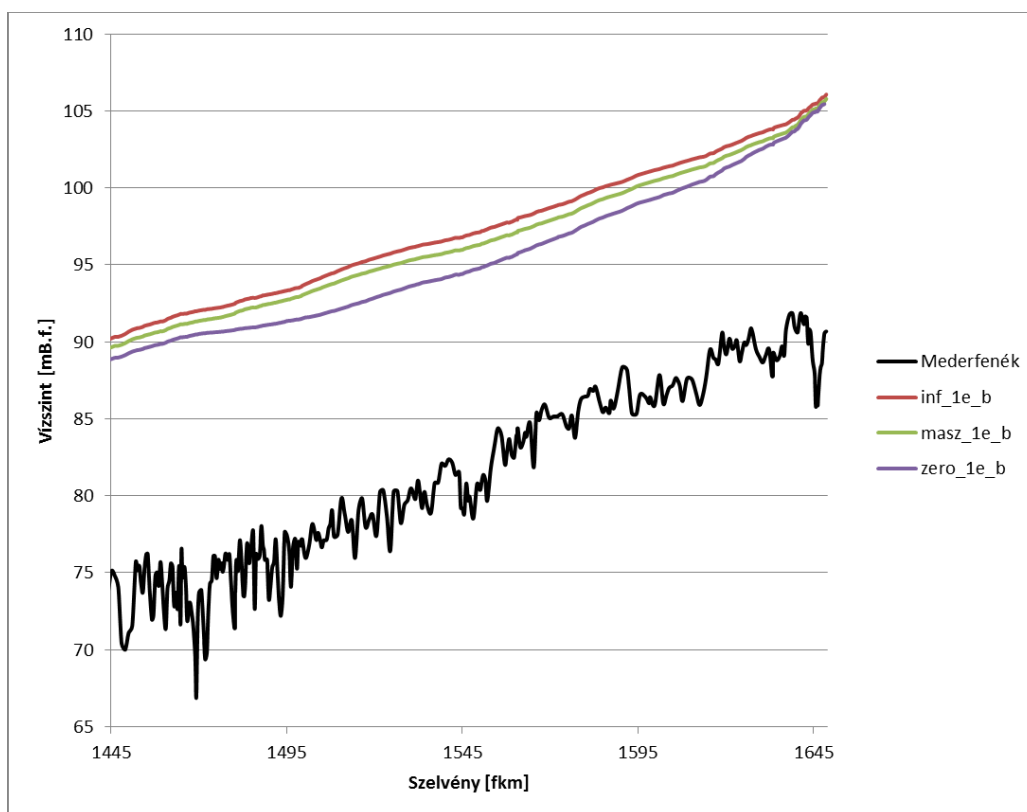
Ebben az alfejezetben a tetőző vízszintek hossz-szelvényeit fogom bemutatni, de említésre kerülnek majd egyéb jellegzetességek is, amiket egy statikus felszín görbével nem lehet jól érzékeltetni. Ahogy azt az 5.3. fejezetekben már említettem, készült minden árhullámhoz egy-egy referencia futtatás. Ezek tetőző felszín görbéjét a 14. ábra mutatja.



**14. ábra Referencia állapot tetőző felszín görbéi.**

Jól látható, hogy a visszatérési idő növekedésével emelkedik a tetőző vízszint is. A vizsgálati terület alvízi végén a hullámtér kiszélesedik, mely jól tettenérhető abban, hogy itt a felszín görbék egymáshoz jóval közelebb helyezkednek el, vagyis ugyanaz a vízhozam növekedés kisebb vízszintváltozást eredményez.

### 1000 éves árvíz

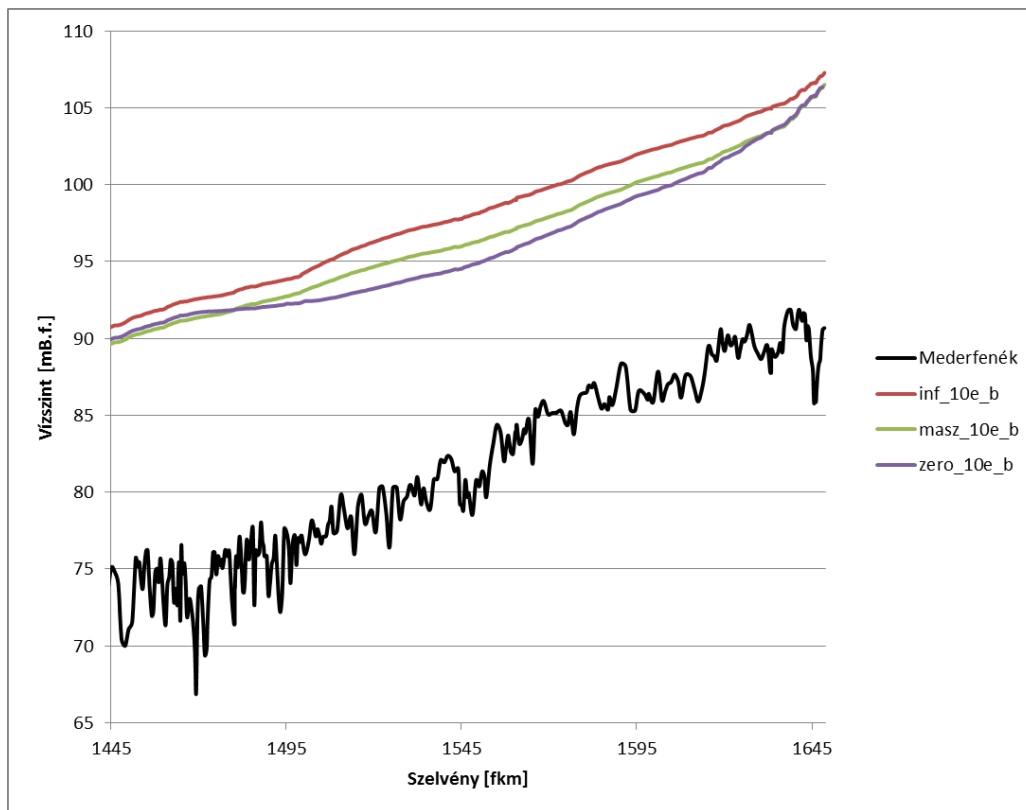


**15. ábra 1000 éves árvíz tetőző felszín görbéi a három különböző töltés kialakítás mellett.**

A 15. ábra azt mutatja, hogy a relatíve kisebb árvizek esetén nagyjából egyforma jellegben alakulnak a tetőző vízszintek. Az alacsonyabb töltéskorona alacsonyabb tetőző vízszinteket eredményez. A nyílt lefolyásos esetben az ártéren levonuló víztömeg ugyan lassabban ér az alvízre, és bizonyos mértékben érzékelhető, hogy a késleltetett összefolyás hatására a vízszint magasabban tetőzik, mintha párhuzamosan folyrna tovább az ártéren, mintegy mellékágként viselkedve; ugyanakkor egyértelműen alacsonyabb szintekkel vonul le minden szelvényben.

MÁSZ+1m-es töltés kialakítás mellett szinte végig a töltéskorona fölött néhány centivel vonul le az árvíz. Az ártér szinte teljes egészében képes felemészteni és tározni a víztömeget. Az alvízen a töltéskorona mögött felhalmozódott víztömeg viszonylag kis mértékben folyik vissza a főmederbe.

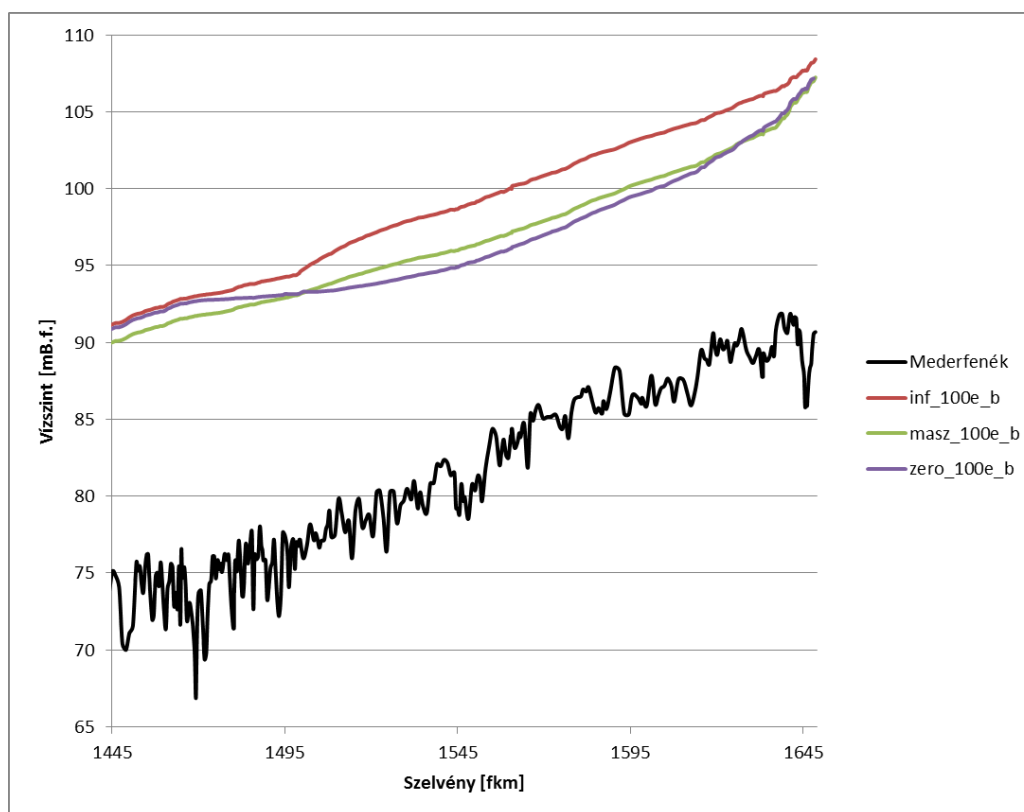
**10 000 éves árvíz**



**16. ábra 10 000 éves árvíz tetőző felszín görbéi a három különböző töltés kialakítás mellett.**

A 16. ábra már azt mutatja, hogy jelentősebb árhullámok esetén egészen másként viselkedik a töltés nélküli eset, mint a töltésezett. A MÁSZ+1m-re kiépített töltés továbbra is nagyjából azonos szinten tudja tartani a tetőző felszín görbét, és a töltés nélküli állapotban továbbra is alacsonyabban tetőzik a bal parti ártér szakaszán. Az alvízi szakaszon azonban most már nem csak jelentősen megnövekszik a vízmélység a késleltetett visszafolyásnak köszönhetően, de már meghaladja a töltésezett állapot tetőző vízszintjét, annak ellenére, hogy a lefolyás nincs a főmederre korlátozva, vagyis sokkal szélesebb területen tud továbbra is levonulni az árvíz. A referencia állapotot ugyan még nem éri el, de már azt is erősen megközelíti.

### 100 000 éves árvíz

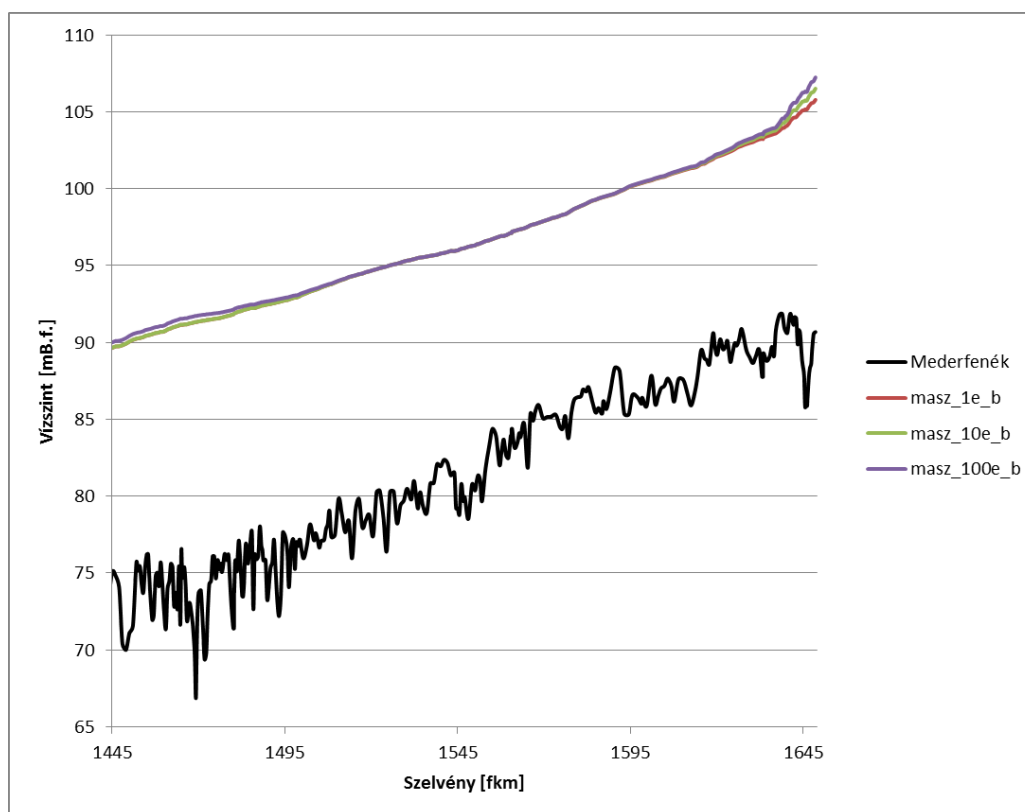


17. ábra 100 000 éves árvíz tetőző felszín görbéi a három különböző töltés kialakítás mellett.

A 17. ábra már egyértelműen mutatja, hogy ameddig a felsőbb szakaszokon, ahol a levonuló víz ki tud térni oldalra az ártér irányába, a tetőző vízszintek továbbra is alacsonyabban alakulnak mint a töltésezett állapotban, az alvízen, ahol hatalmas víztömegek érkeznek vissza a főmederbe az ártérről, a referencia állapotot is megközelítő tetőző vízszintek alakulnak ki. A késleltetett lefolyás hatására hatalmas vízhozamok alakulnak ki ezen a szakaszon. Amit a felsőbb területeken megspórolunk, az alsóbb részekben kamatosan visszkapjuk. Erről az ábráról az is leolvasható, hogy a MÁSZ+1m-es szintnél mennyivel kéne magasabbra építeni a töltéseket, hogy azok tökéletes biztonságot nyújtsanak a legnagyobb vizsgált árvíz ellen is. Ez a két görbe különbségéből számolható, értéke pedig 1 és 3 méter között mozog, átlagosan 1,9 m. Ekkora töltésmagasítás igen nagy költségekkel járna, de még ahhoz is meg kéne emelni sok helyen a koronaszintet, hogy esély lehessen helyszíni védekezésben egyáltalán gondolkodni.



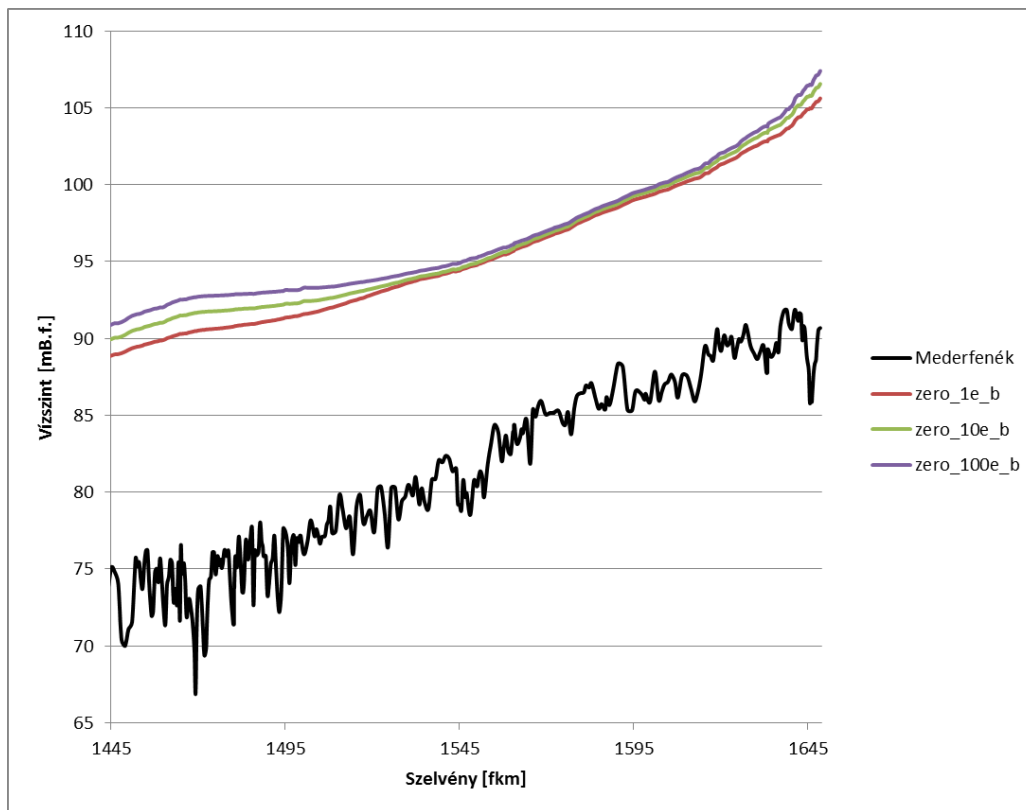
**Töltésezett változat**



**18. ábra A tetőző felszíngörbék alakulása MÁSZ+1m-es töltéskoronaszint mellett a visszatérési idő alapján.**

A fenti 18. ábra A tetőző felszíngörbék alakulása MÁSZ+1m-es töltéskoronaszint mellett a visszatérési idő alapján. jól érzékelteti, hogy a MÁSZ+1m-es töltéskialakítás mellett azon a szakaszon, ahol a folyó az ártére képes átvezetni a vizét, az árhullám nagyságától függetlenül a töltés magassával közel egy szintben tetőzik az árvíz. Ez abból adódik, hogy az ártér képes eltározni az árhullám töltéseken átbukó részének jelentős hányadát. Kizárólag a legextrémebb vizsgált állapotban, a 100 000 éves visszatérési idejű árhullám esetén érezhető valamennyire, hogy az alvízen a visszafolyás hatására megnövekedik a tetőző vízszint. Ez persze többek közt annak is betudható, hogy a vizsgálatok során egyáltalán nem számoltam töltésszakadással. Érdekességként érdemes megemlíteni itt, hogy meglepő módon kivétel a terület alvízi végén jelentkezett elsőként az ártéri elöntés, az árhullám nagyságától és a töltésezés mértékétől függetlenül. Ebből az is következik, hogy amennyiben az ottani töltések kimosódnának, a főfolyásba visszaérkező víztömeg valószínűleg jóval jelentősebb alvízi hatással bírna a valóságban.

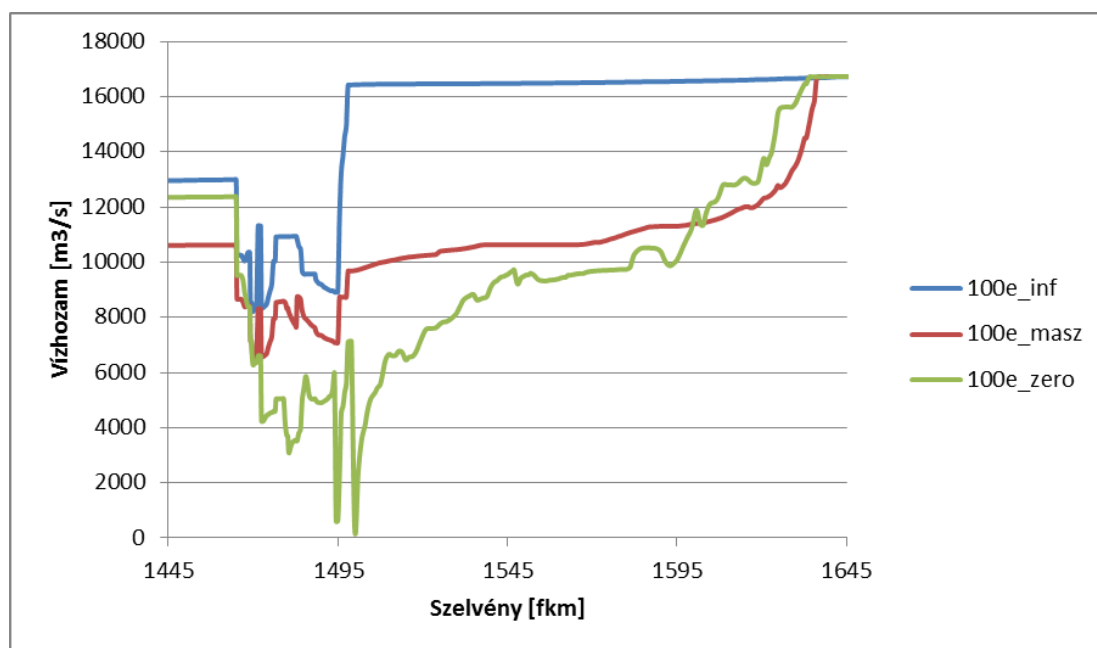
**Terepi lefolyásos változat**



**19. ábra A tetőző felszínörbék alakulása terepi lefolyás mellett visszatérési idő alapján.**

A 19. ábra azt mutatja, hogy terepi lefolyás mellett sokkal jelentősebb különbségek adódnak az ártérrel kapcsolatban álló szakaszon a tetőző vízszintek között az árhullám nagyságától függően. Ennek az az oka, hogy ugyan sokkal nagyobb mennyiségű vizet képes elnyelni a felsőbb szakaszokon az ártér, azoknak visszatartására nem képes, mivel az alvízi végen nincsen semmilyen töltés, ami visszatartaná a vizeket. Ami a felvízen távozik a főmederből, késleltetve újra csatlakozik az alvízen, így az eredeti vízhozamoknál is nagyobbak alakulnak ki. A középső szakaszon a töltésezett állapothoz hasonlóan igen kis különbségek tapasztalhatóak a tetőző vízszintekben. Ennek vélhetően az az oka, hogy bár az ártér érdessége nagyobb, mégsem egy 0 dimenziós tározóként kell tekinteni rá. Ugyan létezik kvázi-2D módszer a terepi lefolyások vizsgálatára, ahol több összekötött 0D tározótérrel modellezzük az árteret (Aureli), ez a módszer nem alkalmas a víz terjedési sebességének figyelembevételére, amire pedig igen érzékeny a terepi lefolyás. A kifolyó vizek képesek szinte teljes egészében levonulni, és mivel itt még nincs késleltetett visszafolyás, lényegében csak a terep érdessége szab határt a távozni képes vízmennyiségnek.

## Vízhozamok



**20. ábra 100 000 éves árhullámok vízhozam hossz-szelvénye töltés kialakítás szerint.**

A fenti **20. ábra** a legnagyobb árhullámhoz tartozó vízhozam görbéket mutatja. A referencia állapotban is észrevehető egy hirtelen kilengés a maximális vízhozamokban, melynek az az okát, hogy ezen a szakaszon a Duna több mellékágra bomlik, melyek közösen vezetnek le az árvizet, itt viszont csak a főágban számított vízhozamokat ábrázoltam. Ez az ábrázolásmód ugyanakkor sokat segít a terepi lefolyásos változat megértésében. Ahogy a mellékágak esetén is több ágon történik az áramlás, a terepi lefolyásnál is egy mellékágként tekinthetünk az ártérre. A vízhozamok erősen függenek az ártér és a főmeder közötti domborzattól, és az ártér domborzatától általában. A mellékágakban azonban sokkal lassabb az áramlás, így az ott levonuló víztömeg késleltetve érkezik az alvízre, ahol a mellékágak újra egyesülnek. Amikor azonban újra egyesülnek, már a hullámtérről, vagy a terepi lefolyásos változatban az ártérről érkező vízhozamok újra összeadódnak, de a mellékágak áramlás lassító, csillapító hatásának köszönhetően már a szétválás előtti állapothoz képest kisebb vízhozamok alakulnak ki. A referencia állapotban ez a mellékágas rendszer viszonylag kis területre terjed ki, terepi lefolyás mellett azonban gyakorlatilag az egész vizsgált területen ez a jellemző. Az is látható, hogy a töltésezett változatnál, jóval nagyobb vízhozamok távoznak végül az öblözetek alatt, mivel a töltések sokkal nagyobb tározóképeséggel bírnak, mint a terepi lefolyásnál mindössze a lokális mélypontok, melyekben megül a víz az ártéren. A főmederből mindkét változat jelentős vízhozamot vesz ki, de az alvizet a terepi lefolyásos változat sokkal jobban terheli.

## 6.2. Árhullámképek alakulása szelvényenként

A következőben azt mutatom be, hogy egy-egy szelvényben hogyan alakulnak az árhullámképek töltéskialakítás és visszatérési idő függvényében. Hat szelvényt jelöltem ki, vizsgálatra, nagyjából egyenletes hossz menti eloszlásban, úgy, hogy jól reprezentálják az összes jellegzetes interakciót a főmeder és az ártér között.

Felső szakasz jelleggel bírnak:

- Adony – 1597,84 fkm
- Dunaföldvár – 1569,74 fkm

Középső szakasz jelleggel bírnak:

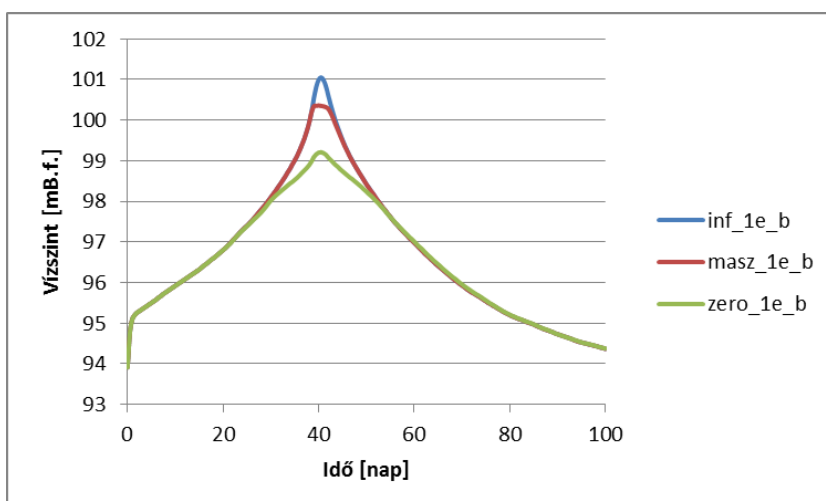
- Paks – 1532,40 fkm
- Dombori 1507,00 fkm

Alsó szakasz jelleggel bírnak:

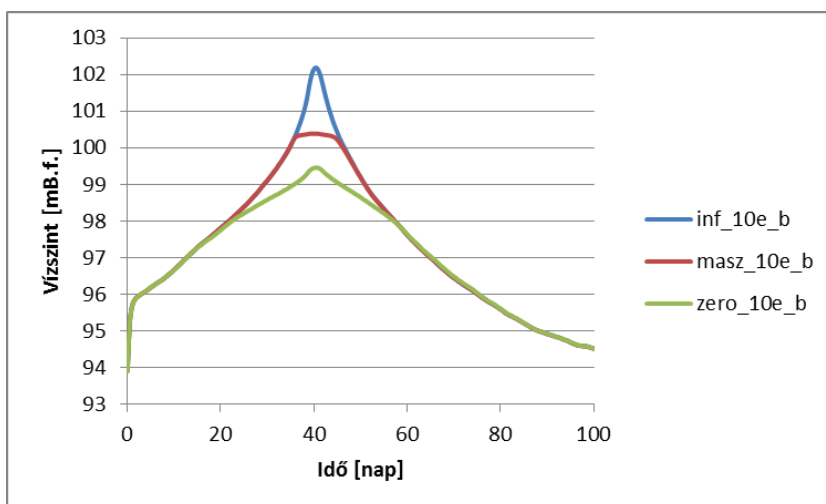
- Baja – 1478,50 fkm
- Mohács – 1447,00 fkm

Ezek nem összetévesztendőek a folyók szakaszjellegével. A felvízi szelvényekre jellemző, hogy az ártérről visszafolyó víz visszaduzzasztása semmilyen esetben nem jelenik meg, az árhullámképet kizárólag az befolyásolja, hogy az ártérre hogyan képes kijutni a víz. A középvízi szakaszokon töltésezett állapotban szintén csak a kifolyás jellemző, azonban terepi lefolyás mellett már kimutatható a késleltetett alvízi visszafolyás hatása. Az alvízi jellegű szelvényekben sokkal jelentősebb ez a hatás, ezen felül viszont már töltésezett állapotban is megmutatkozik a késleltetett visszafolyás hatása a legnagyobb, 100 000 éves visszatérési idejű árvíz esetén. Ezeken a területeken már jelentőséggel bír, hogy milyen víztérfogatot képes visszatartani a fővédvonal. Az, hogy ezek a jelleghatárok hol húzódnak meg, erősen függ attól, hogy milyen töltéskialakításra vizsgáljuk. Magasabb koronaszintek mellett a tározótérfogat is megnő, és értelemszerűen alacsonyabb koronaszintnél lecsökken. A terepi lefolyás ilyen szempontból egy szélsőségesen kis töltésszintnek felel meg, vagyis ebből a szempontból a középvízi szakaszok alvízi szakaszjellegűnek mondhatóak, ha csak a terepi lefolyást vizsgálánánk.

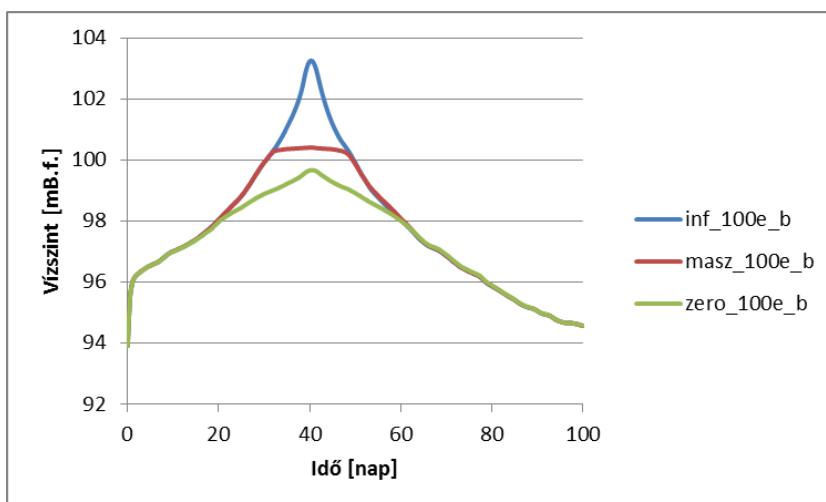
**Adony – 1597,84 fkm**



**21. ábra 1000 éves árvíz árhullámképei Adonynál**

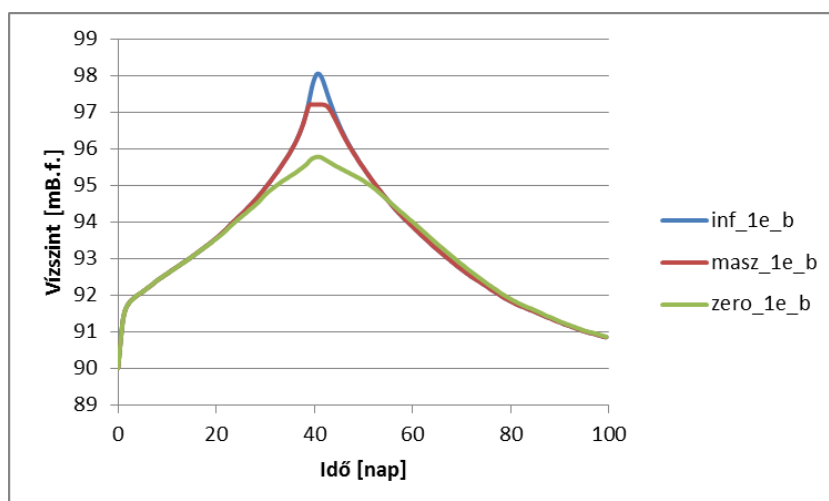


**22. ábra 10 000 éves árvíz árhullámképei Adonynál**

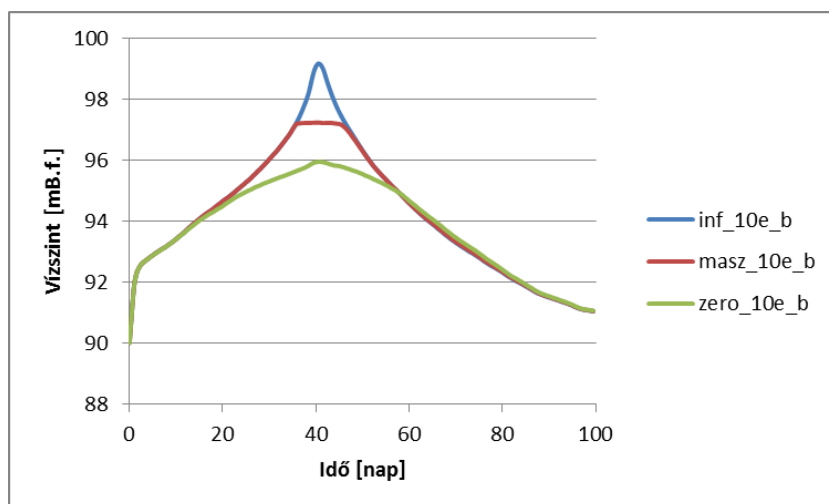


**23. ábra 100 000 éves árvíz árhullámképei Adonynál**

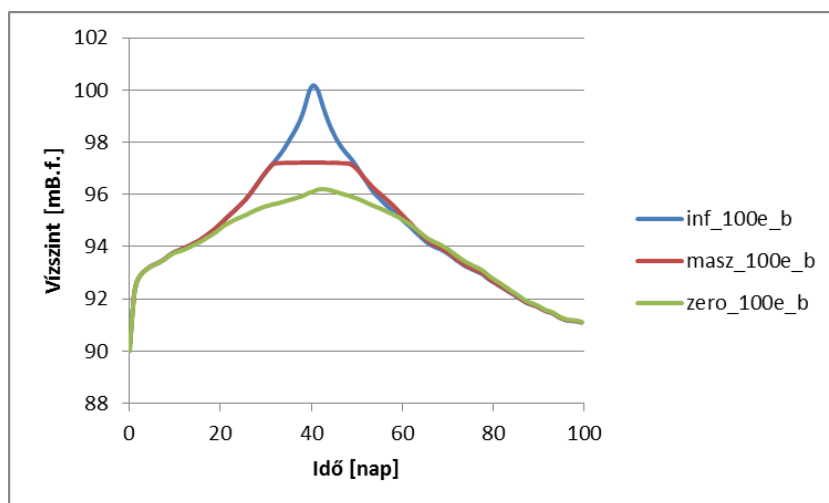
**Dunaföldvár – 1569,74 fkm**



**24. ábra 1000 éves árvíz árhullámképei Dunaföldvárnál**



**25. ábra 10 000 éves árvíz árhullámképei Dunaföldvárnál**

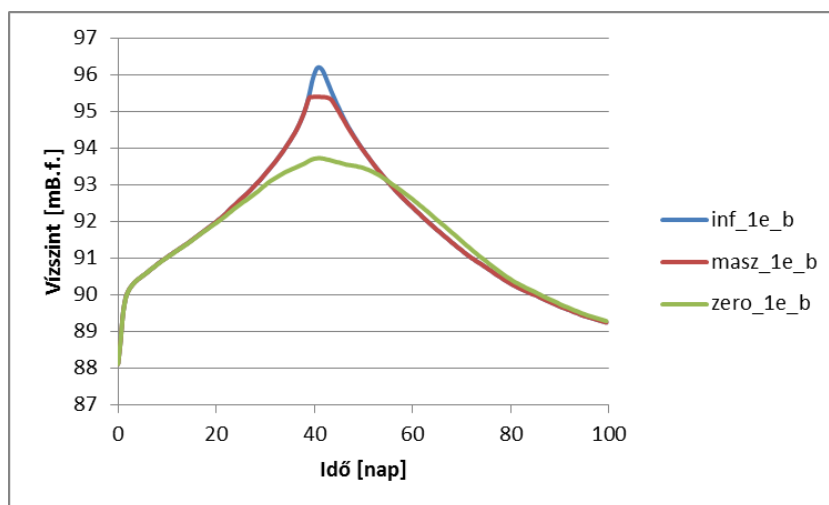


**26. ábra 100 000 éves árvíz árhullámképei Dunaföldvárnál**

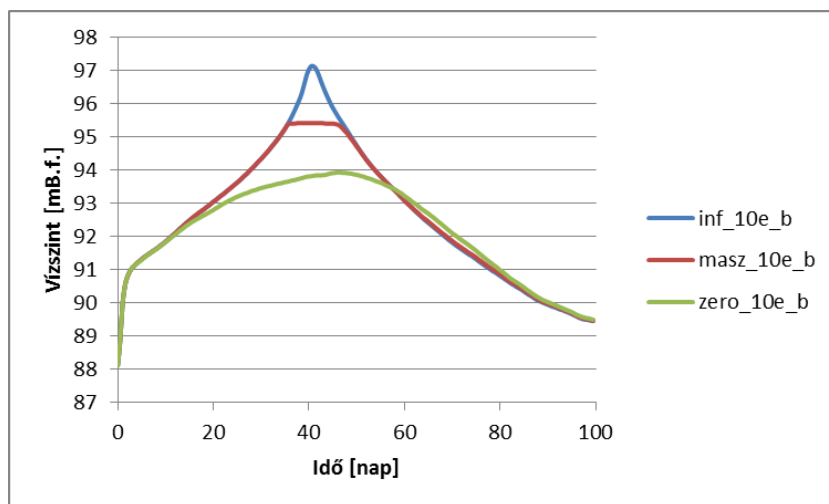
A fenti ábrákon (21. ábra - 26. ábra) a felső szakasz jellegű szelvények árhullámképei láthatóak. Két fontos jellemzőjük emelhető ki. Egyrészt az, hogy minden esetben, visszatérési időtől függetlenül a töltésezett állapot tetőző vízszintjei egyformán alakulnak, csak a töltés koronaszintje befolyásolja azt. Ezekben a szelvényekben nem érvényesül az alvízi visszaduzzasztás. Ez abban is megmutatkozik, hogy az apadó ág vízszintjei a töltéskialakítástól igen kis mértékben függenek, vagyis ahol lényegében csak a főmederben zajlik a lefolyás, ott közel egyformán is viselkednek a változatok. Ezen a szakaszon egyértelműen pozitív hatással van a tetőző vízszintek csökkenésére a töltések koronaszintjének csökkentése. Az alacsonyabb koronaszint természetesen azt is jelentené, hogy a sokkal valószínűbb, kisebb vízhozamú árvizek is kilépnének az ártérre, jelentős károkat okozva ezzel. Ezáltal az árvízi kockázat szempontjából összességében előnytelen volna ilyen célból a töltéseket alacsonyabb szintre kiépíteni.

A terepi lefolyásos változat ezen a szakaszon úgy viselkedik, mintha megnövekedett szelvénnel vezetnénk le az árvizet, az árhullám főmederből kilépő szakasza egy ellaposodott képe az eredeti árhullámnak.

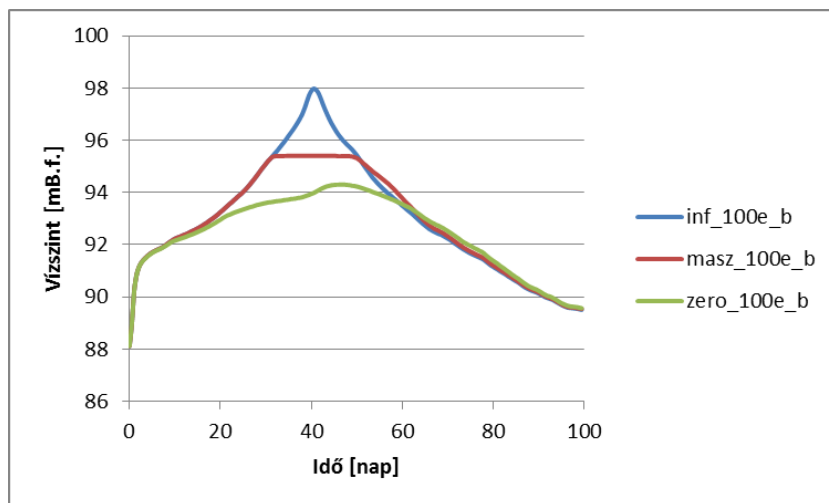
**Paks – 1531,40 fkm**



**27. ábra 1000 éves árvíz árhullámképei Paksnál**



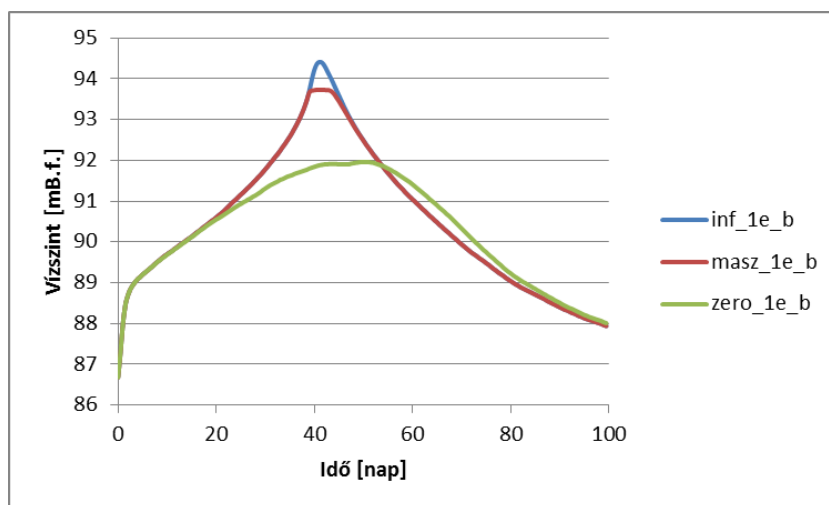
**28. ábra 10 000 éves árvíz árhullámképei Paksnál**



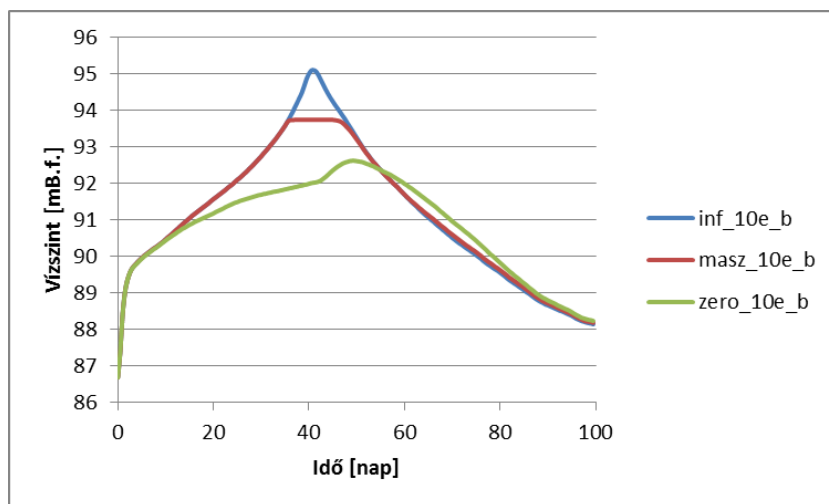
**29. ábra 100 000 éves árvíz árhullámképei Paksnál**



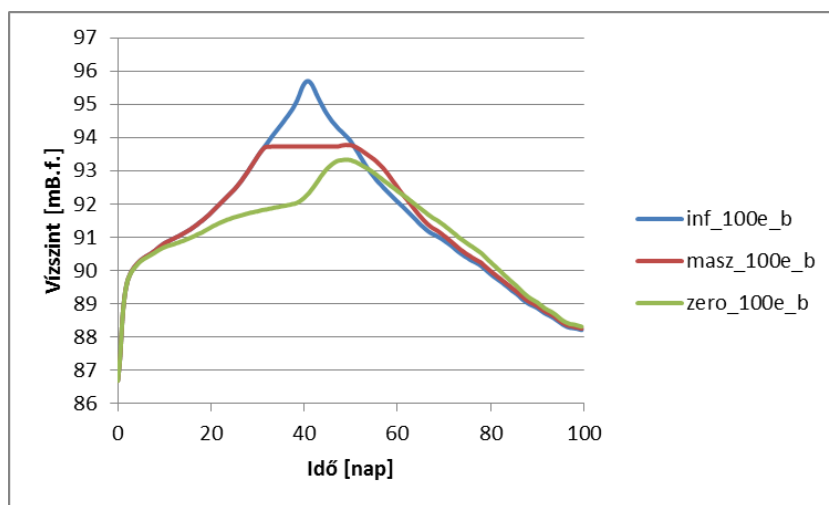
**Dombori – 1507,00 fkm**



**30. ábra 1000 éves árvíz árhullámképei Domborinál**



**31. ábra 10 000 éves árvíz árhullámképei Domborinál**

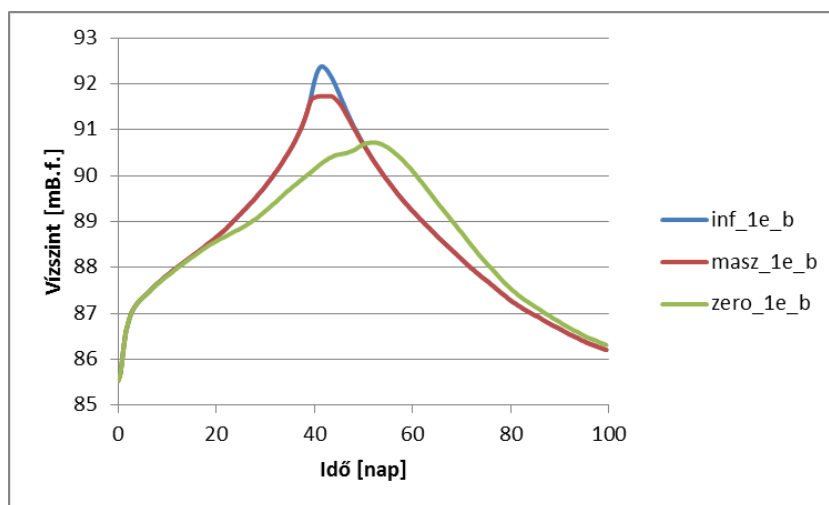


**32. ábra 100 000 éves árvíz árhullámképei Domborinál**

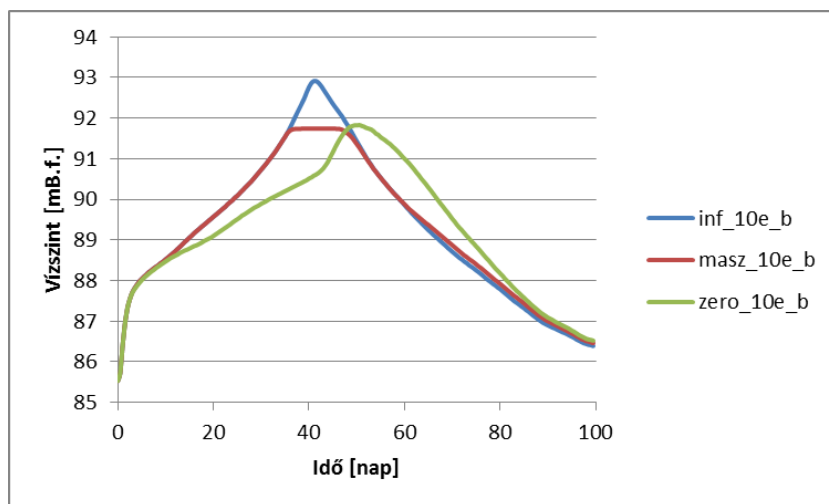
A fenti ábrákon (27. ábra - 32. ábra) a középső szakasz jellegű szelvények árhullámképei láthatóak. Már a paksi szelvényben látható, hogy a tetőző vízszint időpontja eltolódott, ami az ártérről késleltetett lefolyással érkező vízhozamnak köszönhető. Ez az eltolódás 1000 éves árvíznél még nem túlságosan jelentős, de már itt is látszik az apadó ágon a visszafolyás hatása. Nagyobb árhullámok esetén már teljesen egyértelmű az a törés a görbén, amit a késleltetett lefolyás okoz. A tetőzés időpontja nagyságrendileg tíz nappal tolódik el. Míg Paksnál csak viszonylag kis mértékű a visszaduzzasztás hatása, ha kimutatható is, Dombori magasságában már nagyobb árhullámok esetén jóval jelentősebb. Terepi lefolyás mellett a 100 000 éves árhullám már magasabban tetőzik ebben a szelvényben mint töltésezett állapotban.

Szintén észrevehető, hogy ezekben a szelvényekben az apadó ágon a terepi lefolyásos változatban a vízszintek magasabban alakulnak, mint a referencia állapotban és a töltésezett állapotban. A 100 000 éves árvíznél már a töltésezett változaton is mutatkozik némi nemű alvízi visszahatás, bár a tetőző vízszintek ezáltal még nem nőnek meg jelentősen, a tetőzés hosszabb idejű, az apadó ágban már magasabban alakulnak a vízszintek. A legnagyobb árhullám víztömegét már nem képes visszatartani az ártéri töltés, még akkor sem, ha sehol nem feltételezünk töltésszakadást.

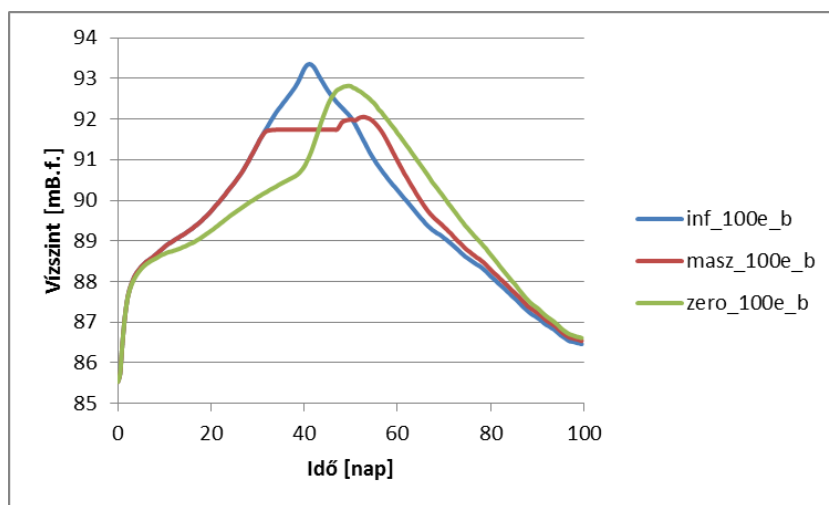
**Baja – 1478,50 fkm**



**33. ábra 1000 éves árvíz árhullámképei Bajánál**

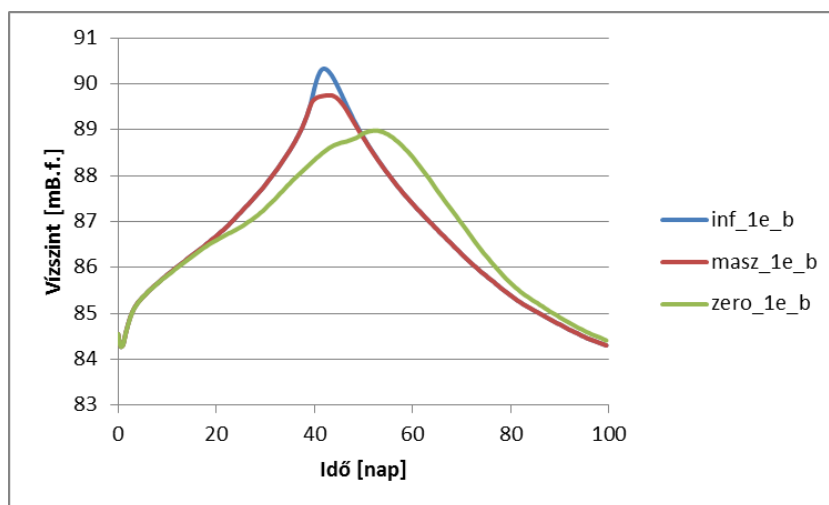


**34. ábra 10 000 éves árvíz árhullámképei Bajánál**

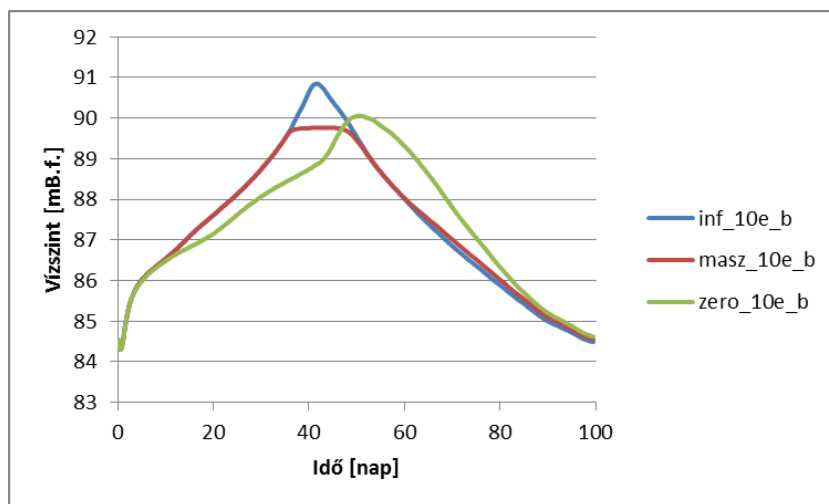


**35. ábra 100 000 éves árvíz árhullámképei Bajánál**

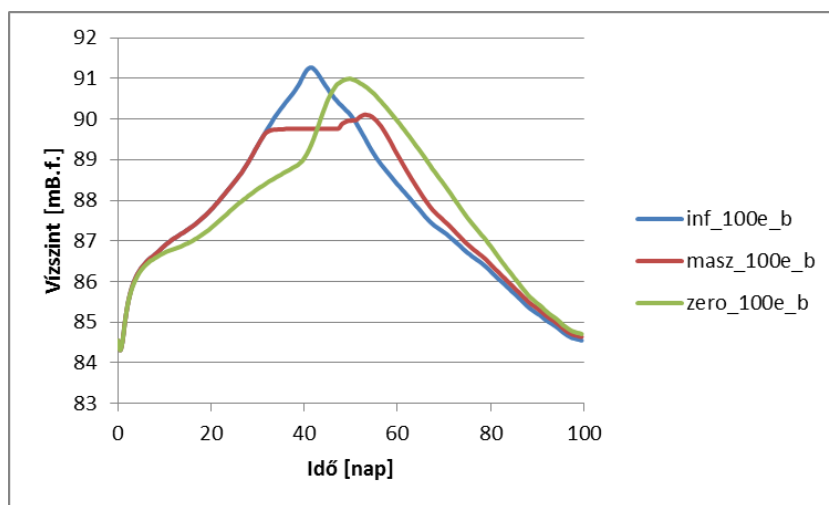
**Mohács – 1447,00 fkm**



**36. ábra 1000 éves árvíz árhullámképei Mohácsnál**



**37. ábra 10 000 éves árvíz árhullámképei Mohácsnál**

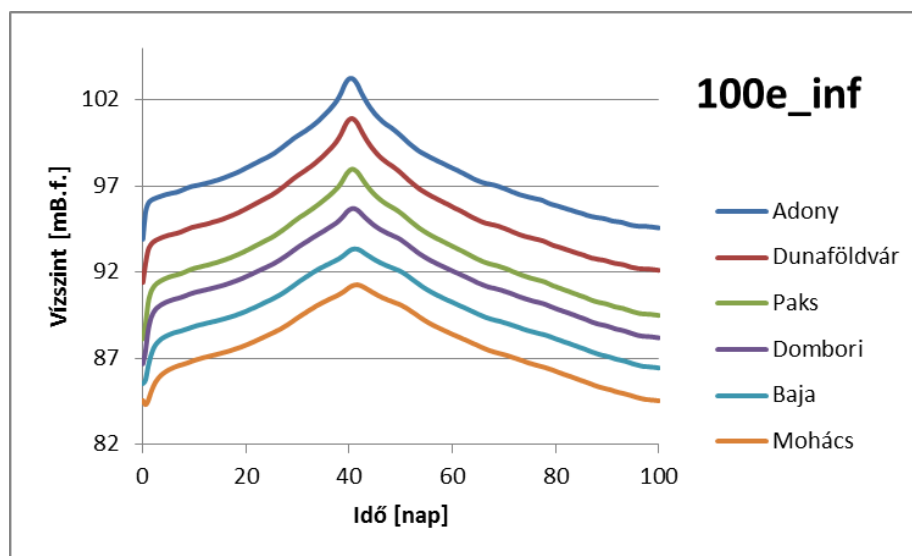


**38. ábra 100 000 éves árvíz árhullámképei Mohácsnál**

A fenti ábrákon (33. ábra 38. ábra) az alvízi jellegű szelvények árhullámképei láthatóak. Ahogy az várható is a korábban tárgyaltak alapján, itt terepi lefolyás mellett egyértelműen látszik a késleltetett visszafolyás hatása. A tetőzés időpontja továbbra is nagyjából 7-10 napos eltolódással jelentkezik. Ezekben a szelvényekben már erősen megközelíti vagy meg is haladja a tetőző vízszint a referencia állapotét, és minden esetben az 1000 éves árvíz kivételével a töltésezett állapotét is. A 100 000 éves árvíz esetén már azt tapasztalhatjuk, hogy ezekben a szelvényekben nem a visszaduzzasztásból, hanem a közvetlen visszafolyásból fakadóan a töltésezett állapotban is számottevően magasabb a tetőző vízszint. Ennek oka, ahogy korábban is már említésre került, hogy az ártér tározó kapacitása kimerül, az alvízi töltések szakadás hiányában sem képesek visszatartani a nagy térfogatú árhullámot. Ez a hatás még jelentősebbnek bizonyulna, ha nem az átlagos, mértékadónak kinevezett árhullámmal, hanem egy annál nagyjából megegyező csúcsvízhozamú, de térfogatában nagyobb árhullámot vizsgáltam volna.

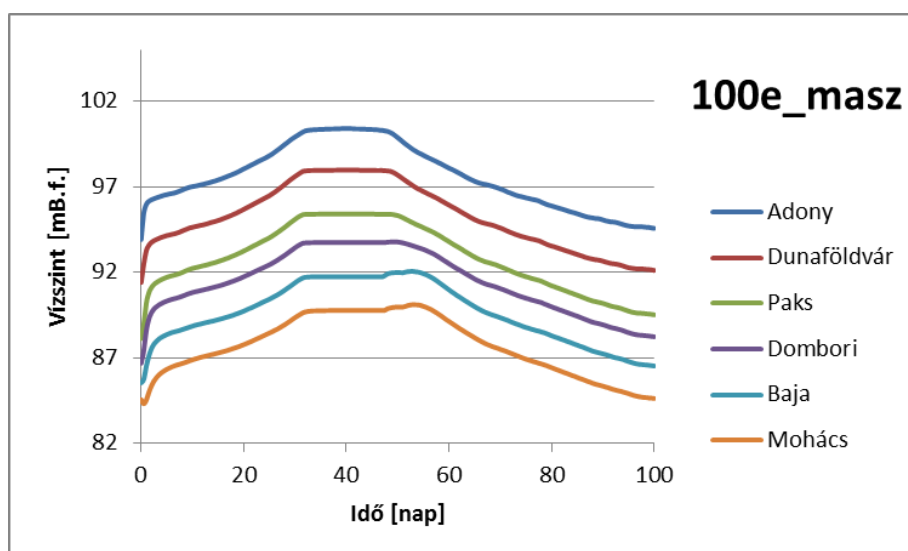
### 6.3. Árhullámképek hossz mentén

Ebben a fejezetben azt mutatom be, hogyan alakulnak az árhullámképek a szelvényekben egymáshoz képest, különböző töltésialakítások mellett. Ebben az összehasonlításban csak a legnagyobb visszatérési idejű árhullámok alakulását érdemes bemutatni, mert ezek mutatják be az adott kialakítás jellegzetességeit a legjobban.



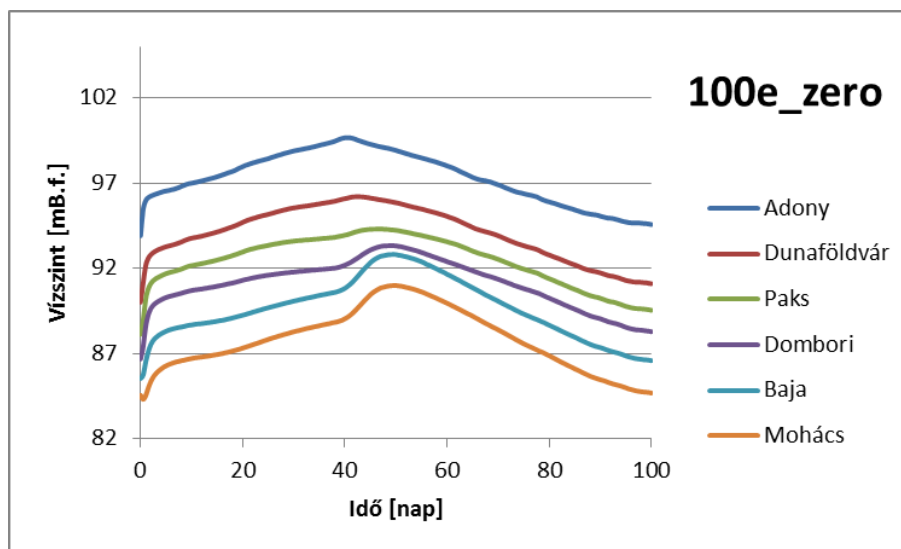
**39. ábra 100 000 éves árvíz árhullámképeinek alakulása hossz mentén referencia állapotban**

A 39. ábra azt mutatja, hogy teljes védekezés esetén a teljes szakaszon nagyjából egyszerre tetőzik az árhullám. A főmederben relatíve kis ellenállással, nagy sebességgel képes levonulni az árvíz. Az árhullámképek alakilag sem túlságosan változékonyak hossz mentén, mindössze az árhullám csillapodásából fakadó ellaposodás figyelhető meg.



**40. ábra 100 000 éves árvíz árhullámképeinek alakulása hossz mentén MÁSZ+1m-es töltés kialakítása mellett**

A töltésezett változatban (40. ábra) azt láthatjuk, hogy a korábbiakban tárgyalt módon az árhullám tetejét lecsapja a töltések fölött való átbukás, azonban Domboritól kezdve érzékelhető a visszafolyás hatása. Bajánál már egyértelműen közvetlen módon nyilvánul ez meg, nem mint visszaduzzasztás.



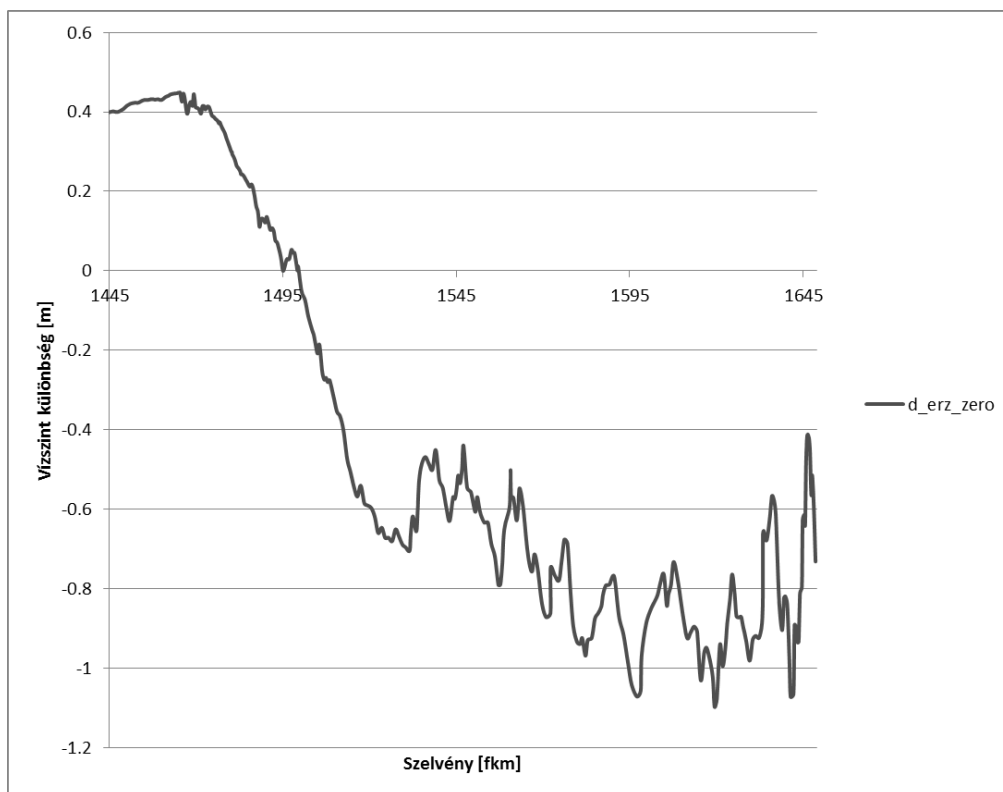
**41. ábra 100 000 éves árvíz árhullámképeinek alakulása hossz mentén terepi lefolyás mellett**

Terepi lefolyás mellett (41. ábra) a leglátványosabb a hossz menti alakulás. Pakstól kezdve megjelenik a visszafolyás hatása, fokozatosan eltolva a tetőzést, miközben annak szintjét is fokozatosan növeli. Ez a hatás ugyanígy jelentkezik kisebb vízhozamok mellett is, bár kisebb intenzitással is, mivel nincs jelentős tározott vízhozam az ártéren, leszámítva a lokális mélypontokban megülő vizeket.

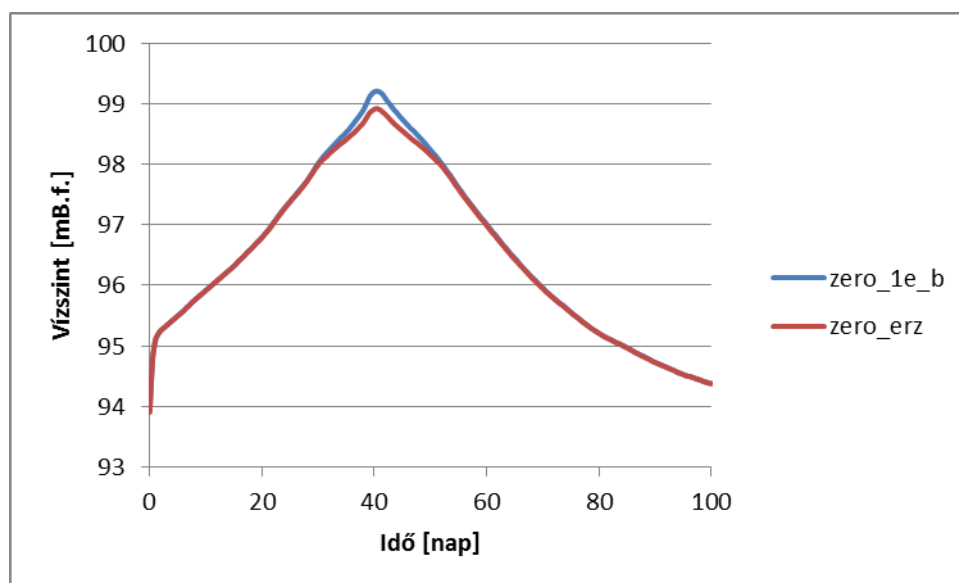
#### 6.4. Érzékenységvizsgálat

Végeztem érzékenységvizsgálatot az ártéri terep érdességére vonatkozóan. Alapállapotban a terep érdessége egységesen  $k = 10 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ , az érzékenységvizsgálat során ezt  $k = 20 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ -ra növeltem. A vizsgálatot elvégeztem az 1000 éves árvízre mind töltésezett kialakításra, mind terepi lefolyásra. Ahogy az várható volt, töltésezett változatban nem volt semmilyen jelentősége az érdességnek, mivel az ártér teljes mértékben képes volt tározni az oda kijutó víztömeget. Terepi lefolyás esetén az eredmény az lett, hogy ameddig a felvízen alacsonyabbra adódott a tetőző vízszint, nagyobb mennyiségű víz jutott ki az ártérre, ez a nagyobb víztömeg az alvízen a késleltetett visszafolyásnak köszönhetően még nagyobb tetőző árhullámot okozott (42. ábra). A felvízi (43. ábra) és alvízi (44. ábra) árhullámképeken látható, hogy hossz mentén visszafelé tolódott az árhullámcsúcs. Ez az állapot az elvárásokkal némiképp ellentétes. Azt várnánk a megnövekedett érdességtől, hogy pont a felvízi végen

okoz vízszint növekedést és az alvízi végén vízszint csökkenést. A váratlan eredményt az indokolhatja, hogy a víz a terület alvízi végén lép ki először az ártérre (45. ábra), vagyis az alvízen nagyobb visszaduzzasztást okoz, mint a felvízen. Azt azonban, hogy a felvízen miért tetőzik alacsonyabban ez nem indokolja.

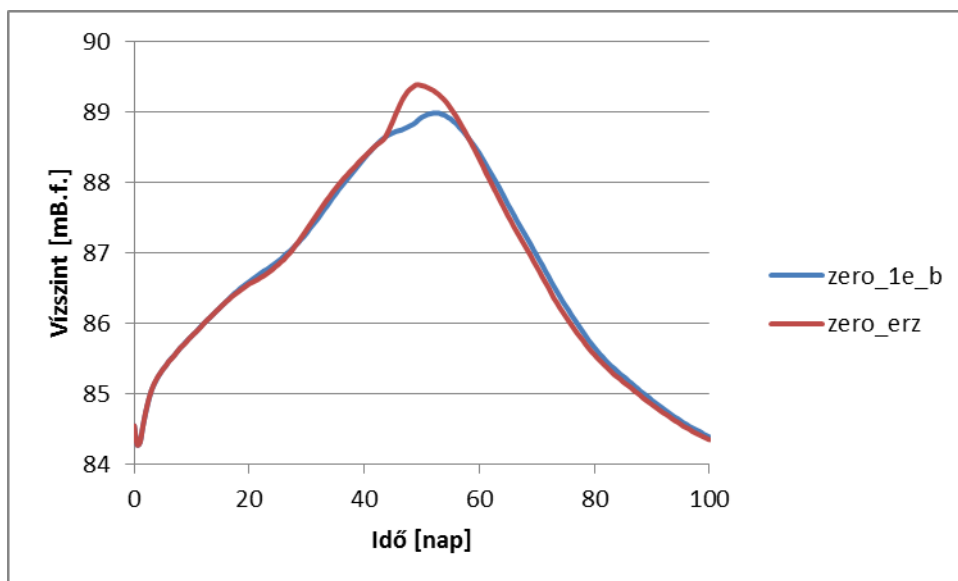


42. ábra Az érzékenységvizsgálat és az alapállapot tetőző felszín görbéinek különbsége. ( $k = 20 \text{ m}^{1/3}/\text{s} - k = 10 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ )



43. ábra Az érzékenységvizsgálat és az alapállapot árhullámképei Adonynál





44. ábra Az érzékenységvizsgálat és az alapállapot árhullámképei Mohácsnál



45. ábra Az 1000 éves árvíz elöntési képe a szimuláció 19. napján éjfélkor. Színskála vízszint alapján.

## 7. Végkövetkeztetés

A vizsgálatok alapján egyértelmű, hogy az ilyen extrém nagy árvizek esetén a felszínigörbék és az árhullámképek nagy alakulását nagy mértékben befolyásolja a töltésezés mértéke. A 10 000 és 100 000 éves árvizek esetén a víz mindenképp kilép az ártére, ezt gazdaságos módon nem igazán lehet megakadályozni. Az azonban, hogy ezek után hogyan kezeljük a helyzetet, jelentős mértékben befolyásolja a potenciális károk mértékét. Ha szabályozottan kezeljük az ártereket, lehetséges volna a 01.42 számú Budapest-Bajai bal parti ártéri öblözet szabályozott elöntésével, a felvízi szakaszon töltés átszakítással szükségtározóként használni azt. Ezt az öblözetet nem lehetséges megvédeni az ilyen extrém nagy árvizektől – hacsak nem emeljük meg a MÁSZ+1m-es szintnél még több mint egy méterrel a koronaszinteket a teljes szakaszon, de ez valószínűleg igencsak gazdaságtalan volna a vizsgált árvizek extrém jellegéből adódóan – de igen nagy tározó kapacitással bír, így a legnagyobb árvizek kivételével mindent teljes mértékben vissza tudna tartani, majd szükség szerint szabályozott körülmények között ez a víztömeg visszavezethető volna a főmederbe. Ezzel egyes lejjebb elhelyezkedő öblözetek teljes mértékben megóvhatóak volnának az elöntéstől, például vizsgált töltés koronaszintek mellett a 01.24 számú Madocsi jobb parti ártéri öblözet teljes mértékben mentesül az árvíztől (12. ábra). Ez sajnos azzal jár, hogy a teljes 01.42-es öblözet elöntésre kerül, ami nagyságrendileg százas nagyságrendű települést érint, ahogy azt a 3. fejezetben bemutattam, ezért csakis akkor érdemes egyáltalán fontolóra venni, ha biztosan elkerülhetetlen az elöntés. Fontos, hogy a kérdést óvatosan kezeljük, mert az is látható, hogy rossz esetben, például egy töltés szakadásnál az alvízi végen, egy feltöltött tározótér mellett, rosszabbul is járhatunk, mintha nem is építettünk volna egyáltalán töltést.

## 8. Felhasznált irodalom

- D. Skublics, P. Rutschmann, Progress in natural flood retention at the Bavarian Danube, *Nat Hazards* 75:S51–S67 (2015)
- Ács Bence Tamás, A nagyvízi mederkezelés hatása a pilismaróti hullámtér árvízi kockázatára, BSc Diplomamunka (2016)
- FÖMI domborzati adatok  
<http://www.fomi.hu/portal/index.php/termekeink/magassagi-adatok/domborzat>
- HEC-RAS 5.0 Reference Manual
- Hidroinformatika c. tárgy honlapja  
<http://oktatas.epito.bme.hu/enrol/index.php?id=1358>

- SRH-2D version 2: Theory and User's Manual
- Szilágyi József, Krámer Tamás, Józsa János, Mértékadó árvízszintek, *Mérnök újság* XXII. évf. 1-2. szám: 22-24 (2015)
- F. Aureli, P. Mignosa, C. Ziveri, A Maranzoni, Fully-2D and quasi-2D modeling of flood scenarios due to embankment failure, *River Flow* (2006)
- M.S. Horritt, P.D. Bates, Effects of spatial resolution on a raster based model of flood flow, *Journal of Hydrology* 253:239-249 (2001)
- Cornel Beffa, Integration ein- und zweidimensionaler Modelle zur hydrodynamischen Simulation von Gewässersystemen, *Moderne Methoden und Konzepte im Wasserbau* 7.-9. (2002)