

A FELSŐ-DUNA MÉRTÉKADÓ ÁRVÍZSZINTJEINEK LEGÚJABB FELÜLVIZSGÁLATA

Krámer Tamás, Szilágyi József

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszék

KIVONAT

2013-ban a Duna hazai szakaszának mértékadó árvízszintjei (MÁSZ) megújított módszertannal, valószínűségi modellezéssel lettek újraszámítva. Az azóta eltelt időszakban nemcsak 8 évvel bővültek a statisztikai mintáink, de az árvízi lefolyás jellemzői is változtak: meghosszabbodtak a vízrajzi idősorok, újabb domborzati adatok állnak rendelkezésünkre, megépült a Mosoni-Duna árvízkapuja és módosult a Duna nagyvízi medre. Dolgozatunkban a Duna Szap-Szob közötti szakasza MÁSZ-értékeinek újraszámításáról számolunk be. Ez a 2013-assal lényegében megegyező elvet követte. Az egyik alapvető kérdés az volt, hogy a hidrológiai statisztika vajon alacsonyabb 100 éves árvízi vízhozamokat eredményez-e, mivel 2013 óta a legnagyobb lefolyt árvíz visszatérési ideje alig 2 éves volt. Bemutatjuk, hogy igazolódott-e ez a várakozás, és a felújított folyómodellel végül változtak-e érdemben a mértékadó árvízszintek.

KULCSSZAVAK: Mértékadó árvízszint, áramlástan modellezés, valószínűségi modellezés, mederváltozás, hidrológiai statisztika

BEVEZETÉS ÉS CÉLKITŰZÉS

A Duna árvízvédelmi műveit egy minisztériumi rendeletben szabályozott mértékadó árvízszintre (MÁSZ) kell megépíteni, előírt magassági biztonsággal. A hatályos rendelet (74/2014. (XII. 23.) BM rendelet) a MÁSZ-t már nem a jégmentes árvizek évi 1%-os meghaladási valószínűségű vízszintjeként határozza meg, hanem a jégmentes árvizek évi 1%-os meghaladási valószínűségű vízhozamából származtatott vízszintjeként. A rendelet előírja, hogy a mértékadó árvízszinteket hat évenként felül kell vizsgálni, a nagyvízi mederkezelési tervek felülvizsgálatának előkészületeként.

A felülvizsgálatok rendszeres ütemezését egyrészt az indokolja, hogy a valószínűségi eloszlásokat a nagyobb mintaszámnak köszönhetően pontosabban tudjuk megbecsülni a statisztikával. Ez különösen igaz az árvízi szélsőértékekre: a 2014. évi MÁSZ-meghatározás óta nyolc értékkel, azaz mintegy 1/10-del bővült az évi maximális vízhozamok és vízszintek adatsora. Nemcsak a statisztikai mutatók, hanem a numerikus modellek is pontosíthatók, ha jól dokumentált, szélsőséges árvizek vonulnak le. Míg a Duna 2014-es MÁSZ értékei már a 2013-as nyári rekordárvíz figyelembe vételével lettek meghatározva, 2014 óta kis árvizek vonultak le, a legnagyobbnak se haladta meg a visszatérési ideje a két évet.

A felülvizsgálatokat a vízrajzi statisztikák újraszámolása mellett az árvízi lefolyási körülmények megváltozása is indokolja. 2013 óta újabb domborzati adatok állnak rendelkezésre, megépült a Mosoni-Duna torkolati műve (ÉDUVIZIG 2022) és részben mederkezelési beavatkozásoknak (83/2014. (III. 14.) Korm. rendelet), részben természetes folyamatoknak (lásd pl. Török et al. 2020) következtében módosult a Duna nagyvízi medre.

Dolgozatunkban a Felső-Duna MÁSZ-értékeinek újraszámításáról számolunk be. Pontosabban a célunk az volt, hogy a 2013-assal lényegében megegyező módszertannal, de a legújabb adatok felhasználásával meghatározzuk a Duna Szap-Szob közötti szakaszának mértékadó árvízszintjeit.

Az egyik alapvető kérdésünk az, hogy az elmúlt árvízszegény évek után a hidrológiai statisztika vajon alacsonyabb 100 éves árvízi vízhozamokat és MÁSZ-t eredményez-e. Azt is vizsgáljuk, hogy a bekövetkezett mederváltozások, a szlovákiai mellékfolyók medertározásának pontosabb modellezése és a Mosoni-Duna torkolati árvízkapujának megépülte érdemben befolyásolja-e a mértékadó árvízszinteket.

MÓDSZEREK

A 2014. óta hatályos árvízszintek már egy numerikus modellezésen alapuló, megújult módszertan szerint kerültek meghatározásra (Krámer et al. 2015., Vituki Hungary-BME 2013). Az egyik alapvető különbség a korábbi módszertanhoz (Szigyártó 2006) képest az, hogy a vízszint helyett a vízhozam lett a valószínűségi változó, amelyhez valószínűségi hidrodinamikai modellezéssel van hozzárendelve a vízszint. Ez egy kompromisszummal járó váltás, amelynek a kedvező és kedvezőtlen vonatkozásait pl. Szigyártó (2006) vagy Okoli et al. (2019) is tárgyalja. A vízhozam kevésbé érzékeny a morfológiai változásokra, az alvízi mellékfolyók befolyására, és egy változó éghajlat vagy az árvízi kockázatkezelési intézkedések a vízhozam megváltozásán keresztül érvényesülnek a vízszintben. Vannak viszont szempontok, amelyekből a vízszint statisztikája kedvezőbb: kisebb a mérési bizonytalansága, olcsóbban kiértékelhető és az árvízvédelmi töltések tervezését közvetlenül meghatározza.

A mostani felülvizsgálatban alapvetően ugyanazt a módszertant alkalmaztuk, mint a 2013. decemberiben (Vituki Hungary-BME 2013). Az akkori vizsgálat eredményeit vette át a 2014. évi MÁSZ-rendelet is.

A MÁSZ-t az évi 1%-os meghaladási valószínűségű – azaz 100 éves visszatérési idejű – jégmentes vízhozamhoz kötjük. A statisztikai elemzés adatsorát mesterségesen generált dunai árhullámok 1D áramlástan modellezésével állítjuk elő. Ezzel az ún. Monte Carlo eljárással nemcsak nagyságrenddel megsokszorozzuk a szélsőséges árvízi események számát, de a folyó árvízi viselkedését is jobban megértjük. Sőt, a modellezéssel könnyen értelmezhető módon kiértékelhetjük árvízi kockázatkezelési intézkedések vagy jövőbeli hidrológiai terhelések hatását, azokat a modellszerkezetben, ill. a peremfeltételekben érvényesítve. Babister et al. (2016) vagy Liu & Liu (2018) hasonló valószínűségi elven határozta meg a Pó ill. egy tajvani folyórendszer adott visszatérési idejű árvízszintjeit.

A Duna vizsgált szakaszát a peremfeltételeken keresztül hajtjuk meg a Duna és a nagyobb mellékfolyóinak mesterséges vízhozam-idősorával, míg a szakaszon belül numerikus modellel vizsgáljuk az árhullámok levonulását és kölcsönhatását. A szimulált árvizek számát a vizsgált valószínűségek tartományhoz helyénvaló illeszteni. Például egy tízezer éves szimuláció várhatóan 100 darab 100 éves árvízi maximumot tartalmaz, amelyből a 100 éves vízszinteket és vízhozamokat már kellő megbízhatósággal meg tudjuk becsülni. Természetesen ezzel csupán a végső statisztikai becslés bizonytalansága csökkenthető; a peremfeltételeket és a modellszámításokat számos hiba és bizonytalanság terheli.

Az eljárásnak három fő eleme van:

1. A Duna vizsgált szakaszának összes vízhozam-nyilvántartási szelvényében és a mellékfolyók befolyási szelvényében előállítjuk a vízhozam valószínűségi eloszlásfüggvényét és a Duna 100 éves vízhozamának hossz-szelvényét.
2. A hidrodinamikai modell befolyási szelvényeibe idősortmodellezéssel előállítjuk a Duna és a nagyobb mellékfolyók vízhozam-idősorait. Ezek az idősorok ugyan mesterségesek, és az (1)-es pontban meghatározott statisztikákra jól illeszkednek. Ehhez egy általunk kifejlesztett hibrid, Markov-láncon alapuló, többváltozós, adatvezérelt idősortmodellt alkalmazunk 1 napos időfelbontással.
3. A befolyási szelvényeken belépő árhullámokat 1D hidrodinamikai modellel transzformáljuk a vizsgált folyószakaszokon. Az így kapott numerikus eredmények elemzésével meghatározzuk az NQ_{100} alatti vízhozammal tetőző árhullámok legmagasabb vízszintjeinek hossz-szelvényét, azaz az új MÁSZ-t.

A befolyási határszelvényekbe a napi vízhozam idősor generálása egy sztochasztikus és egy fizikai alapú modell összekapcsolásán alapul. A sztochasztikus modell a főágra megbecsüli a két alapállapot (24-órás áradás vagy apadás) közötti átmeneti valószínűségeket. Áradó időszakban véletlenszerűen napi vízhozam-növekményeket generál Weibull-eloszlás szerint, majd az árhullámok áradó ágaira jellemzően sorba rendezi a generált értékeket. Az árhullámok közel exponenciálisan lecsengő ágait pedig egy nemlineáris tározási egyenlettel írja le. A mellékfolyókra az idősortmodell az áradó ágban a napi növekmények között a Dunával nemlineáris keresztkorrelációt igyekszik betartani, az apadó ágakra pedig szintén egy nemlineáris tározómodellt alkalmaz (Szilágyi et al. 2006).

A Duna 1D nagyvízi hidrodinamikai modelljét a HEC-RAS szoftverben építettük fel. Ez Szaptól (1809 fkm) bőven a vizsgált szakasz alatt, Vác-Tahitótfalu völgymentséig (1679 fkm) tart. A modellt a 2013. júniusi árvíz adataival igazoljuk.

A MÁSZ-rendeletben meghatározott módon kizárólag jégmentes viszonyokat elemzünk. Tudva levő, hogy a Dunán az évi legnagyobb vízállás kialakulását csak nagyon ritkán befolyásolja a jég (Szigyártó 2006). A vízjárás jövőbeli megváltozásával nem foglalkoztunk ebben a tanulmányban, pusztán az évi legnagyobb vízhozamok hosszú múltbeli trendjét küszöböltük ki homogenizálással.

A meghatározott mértékadó árvízszintek kijelölik a fővédvonalak igényelt minimális szintjét. Ennek megfelelően a modellezésben a fővédvonalakat meghághatatlan, zárt peremnek tekintettük.

A következőkben bemutatjuk a felülvizsgálat érdekesebbnek tartott eredményeit, elsősorban a módszertanra összpontosítva.

EREDMÉNYEK

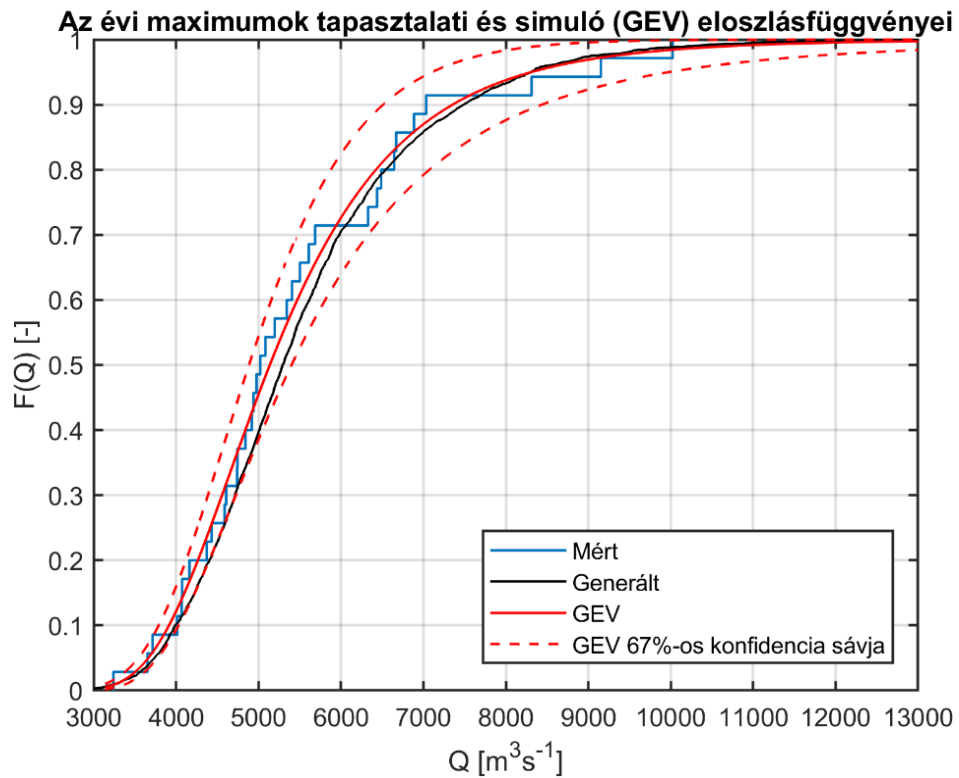
A generált vízhozam-idősorok

Az éves legnagyobb vízhozamok (NQ) tapasztalati eloszlásfüggvényére a legtöbb belépő mérce-szelvénynél kielégítően illeszkedett az általánosított szélsőérték-eloszlás (GEV). A Duna Medve szelvényére a 67%-os konfidenciasáv szinte teljesen tartalmazza a tapasztalati eloszlásfüggvényt (1. ábra). A felülvizsgált hidrológiai elemzés (Vituki Hungary-BME 2013) egységesen a log-Pearson III eloszlást alkalmazta, mi itt áttértünk a GEV eloszlásfüggvényre annak matematikai megalapozottsága miatt. Ismert, hogy a GEV speciális esetként magában foglalja a Gumbel, a Fréchet és a Weibull eloszlásokat is. Az 1930-2021. évek homogenizált NQ adatsora alapján a 10 éves visszatérési időig 14%-os relatív megbízhatósággal becsülhető meg a maximális vízhozam.

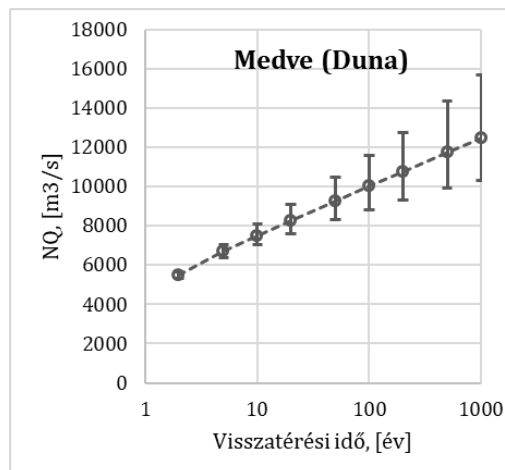
Az áramlástanai modell befolyási szelvényeire – Medve (Duna), Árpás (Rába), Mecsér (Mosoni-Duna), Vágsellye (Vág), Kéménd (Garam), Ipolytölgyes (Ipoly) – egymással időben összefüggő, 90 ezer évnnyi napi vízhozam-értéket generáltunk. Ebből a Monte Carlo szimulációhoz annak nagy számítási költsége miatt 10 ezer évet használtunk fel. Ez a hosszúság biztosítja, hogy a gyakorlati számításokhoz fontos visszatérési időhöz a statisztikai elemzésekhez elegendő mennyiségű generált árhullám álljon rendelkezésre. Az adatgenerálást az 1985-2021 évek idősorával tanítottuk be, hogy minél közelebb legyünk a jelen állapothoz és csökkentjük az esetleges hosszútávú trendek hatását. Ez közel 30%-kal hosszabb, mint a 2013-as MÁSZ tanulmányban fgyelembbe vett 1985-2013 időszak.

A Duna Medve szelvényére generált napi vízhozam-idősor tetszőleges 1000 napra kiragadott időszaka már vizuálisan is hasonló dinamikát mutat, mint egy mért idősor jellemző időszaka (3. ábra). A tanítást számszerűen az éves legnagyobb vízhozamok eloszlásfüggvénye (1. ábra), a napi vízhozam-értékek eloszlásfüggvénye és azok autokorrelációs függvénye vezérelte. A

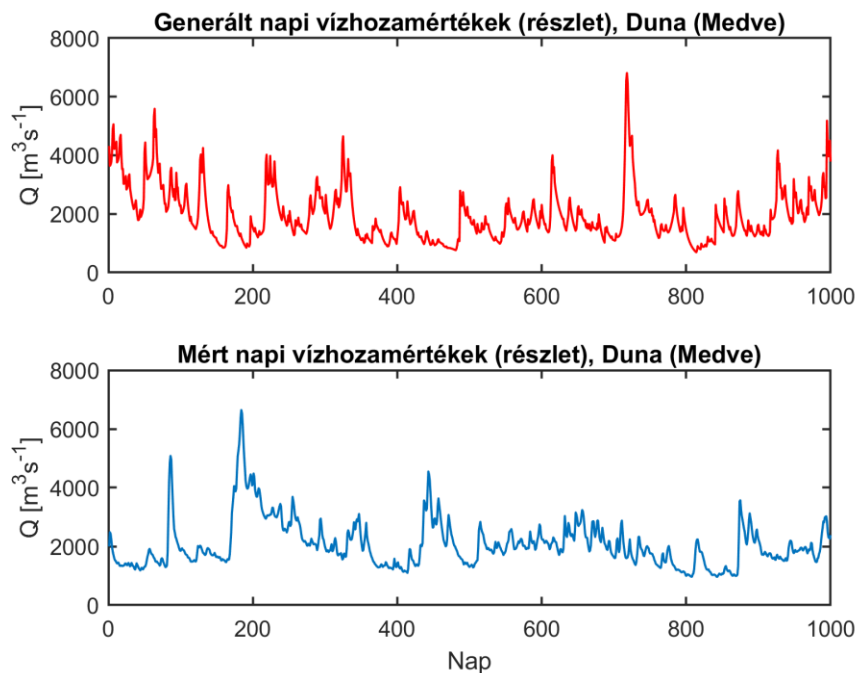
mellékfolyók idősorainak generálásánál az előzőeken túl még a Duna és a mellékfolyó napi vízhozamainak korrelációs együtthatója is a tanítás célváltozója volt.



1. ábra. A mért ill. a generált idősorokból számolt évi maximális vízhozam-értékek (NQ) tapasztalati eloszlásfüggvényei, valamint a mért idősorokra illesztett GEV eloszlásfüggvény és annak 67%-os konfidenciasávja Medve (Duna) szelvényre.



2. ábra. A Medve (Duna) szelvényre meghatározott legnagyobb vízhozamok a visszatérési idő függvényében. A függőleges tüskék a 67%-os konfidenciasávot jelölik.



3. ábra. Generált (fenn) és mért (alul) napi vízhozam-idősorok tetszőlegesen kiválasztott részleteinek összehasonlítása Medve (Duna) szelvényre.

Az áramlási modell felújítása

A 2013-as Duna MÁSZ tanulmányban HEC-RAS szoftverre kifejlesztett, a teljes magyarországi Dunát és a fő mellékfolyóinak torkolati szakaszát magába foglaló 1D áramlási modell (*Vituki Hungary-BME 2013*) komolyabb változtatások nélkül ma is alkalmas a feladatra. A modellt levágtuk Szap fölött, valamint Vác és Tahitótfalu alatt, a keresztmetszetek alakját pedig felújítottuk a Duna-meder 2019-es geodéziai felméréseinek adataival.

A Duna-árvizek medertározásának modellezését pontosítottuk. Legfontosabb változás, hogy bevittük a Mosoni-Duna torkolati duzzasztóművét 109,3 m B.f. rehabilitációs vízzszinttel. A szlovákiai mellékfolyók torkolati szakasza a 2013-as modelltanulmányban csak prizmatikus mederrel volt felvázolva. Ezeket kicseréltük lézerszkennelt domborzati adatok alapján (*Geoportál 2021*) létrehozott új modellgeometriával annak érdekében, hogy a Duna által visszaduzzasztható folyószakaszokat jobban leírjuk. A Vág és a Csallóközben beletorkolló Kis-Duna a Mosoni-Dunához hasonló mértékű medertározást okoz, mégis a Kis-Duna teljesen hiányzott a 2013-as MÁSZ modellből.

2013. óta nem folyt le akkora árvíz a Dunán, amely lehetővé tette volna a felújított geometriájú modell újralibrálását. Komáromnál ugyanis a legnagyobb vízhozam a 2014-2020. években $5100 \text{ m}^3/\text{s}$ volt (2019-ben), ami alig 2 éves visszatérési időnek felel meg.

A belépő perem helyét Rajkáról a bösi üzemvízcsatorna torkolatához, Szapra helyeztük át. Az új peremfeltétellel, új geometriával, de változatlan érdességekkel -10 cm -es következetes hibát kaptunk volna a 2013. júniusi árvízre, ezért a korábbihoz képest egységesen 3%-kal csökkentettük a korábbi Manning-féle mederérdességeket. Ez megszüntette a modell torzítását. Ezzel a korrekcióval a felújított modell a 2013-as maximális vízhozamokat 2%-on belül, a maximális vízszinteket pedig 18 cm -en belül reprodukálta.

Érzékenységvizsgálatok

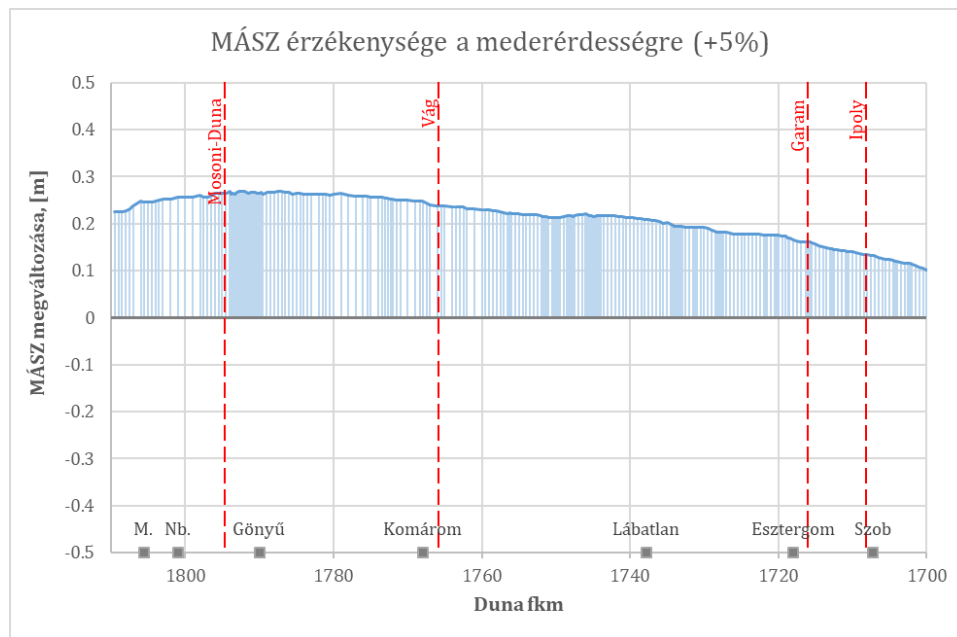
Megvizsgáltuk, hogy a Felső-Duna MÁSZ-értékeit hogyan befolyásolják az árvízlevezető képesség 2013. óta bekövetkezett egyes változásai és az áramlástanai modell javítása.

- A meder és a hullámtér érdességének bizonytalansága
- A medergeometria felújítása
- A szakaszon végzett nagyvízi mederkezelési beavatkozások
- Mosoni-Duna torkolati művének megvalósulása
- A Vág medertározásának figyelembe vétele

Ahhoz, hogy a teljes Monte Carlo-szimulációt ne kelljen minden esetben elvégezni, az átlagos érzékenységet a Monte Carlo szimuláció ötven olyan évre határoztuk, amelyek valamelyik szakaszon megközelítette az NQ₁₀₀ vízhozamot.

Érzékenység a Duna mederérdességére

Amikor a Duna medrét érdesebbé tettük a Manning-féle érdesség 5%-os növelésével, akkor az NQ₁₀₀ körüli ár hullámok csúcsa közel 10 m³/s-mal nagyobb mértékben csillapodott, a tetőző vízszintek pedig nagyjából a normálmélységgel azonos mértékben, 0,20–0,25 m-rel megemelkedtek (4. ábra).



4. ábra. A 100 éves árvízszint megváltozása a Duna mentén a Duna-meder Manning-féle érdességének 5%-os növelése hatására.

Érzékenység a hullámtéri ellenállásra

Egy egyetemesen pontos árvízi modell felépítését megnehezíti, hogy a hullámtér érdessége évszakosan változik és még évszakra bontva is bizonytalanul kalibrálható. 100 éves vízhozammal tetőző ár hullámok esetén a hullámtéri lefolyás a Felső-Dunán csupán a Mosoni-Duna torkolata fölött jelentős. A vízhozamot alig néhány m³/s mértékben fogja vissza a hullámtérnek a bizonytalanság nagyságához mérhető, 20%-os érdesítése. A maximális vízszintek növekedése is csak Komárom fölött érzékelhető. Ez a megállapítás igazolja azt, hogy a kalibráció elsősorban a mederérdességre irányult, a hullámtér érdességét pedig elég volt közelítőleg felvenni a 0,10 és 0,15 s/m^{1/3} tartományban.

Érzékenység a medergeometria felújítására

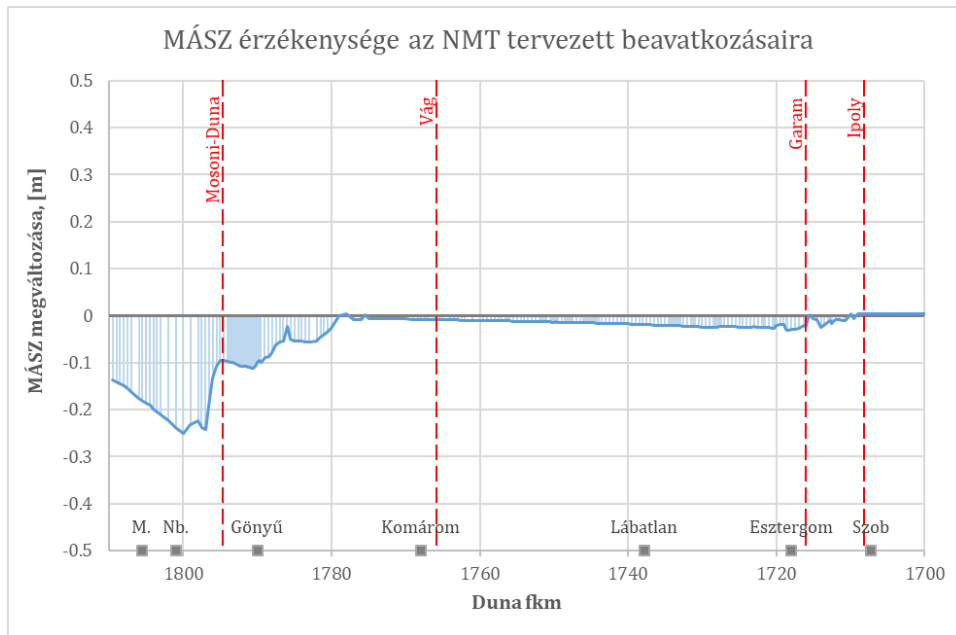
A modellt azonos peremfeltételekkel, érdességekkel és szelvénykiosztással lefuttattuk a 2013-as MÁSZ felülvizsgálat modellgeometriájával is. Ahhoz viszonyítva a 2019-es mederfelmérés beépítésének a maximális vízhozamokra alig mutatható ki a hatása. A maximális vízszintek Komárom fölött már említésre méltó mértékben, 0,05 – 0,07 m-rel emelkedtek. Ebben a lehetséges okokat (a hidraulikus sugár csökkenése, mederfeltöltődés) nem tártuk fel, a változás nagyságrendje ezt nem tette szükségessé.

Érzékenység a nagyvízi mederkezelés beavatkozásaira

A MÁSZ felülvizsgálatába a Duna nagyvízi mederkezelési beavatkozásait is bevettük. A 2015-ös nagyvízi mederkezelési tervezés (NMT) a hullámtér rövidebb szakaszain növényzetmódosításokat, mellékágak és hullámtéri hídnyílások fokozottabb bekapcsolását vizsgálta. Az akkori vizsgálatokat az ÉDUVIZIG Duna-szakaszára a BME készítette nagy felbontóképességű 2D modellel, permanens NQ_{100} lefolyásra (*SOLVEX-BME 2015*). Ezek a beavatkozások – különösen a vezetóművek eltávolítása és a mellékágak megnyitása – nem építhetők be közvetlenül egy 1D modellbe. De erre nincs is szükség, mert az NMT modelltanulmányoknak az volt a következtetése, hogy észszerű beavatkozásokkal csak a széles hullámtérű Szap-Gönyű közötti szakaszon csökkenthető érdemben, 0,1-0,2 m közötti mértékben a MÁSZ.

A hullámtéri beavatkozásokat összevontan építettük be az 1D modellbe. Olyan egyenértékű jobb parti hullámtéri érdességet állítottunk be a beavatkozások szakaszán, hogy azok az NMT-beavatkozásokkal javított árvízlevezető képességet eredményezzék.

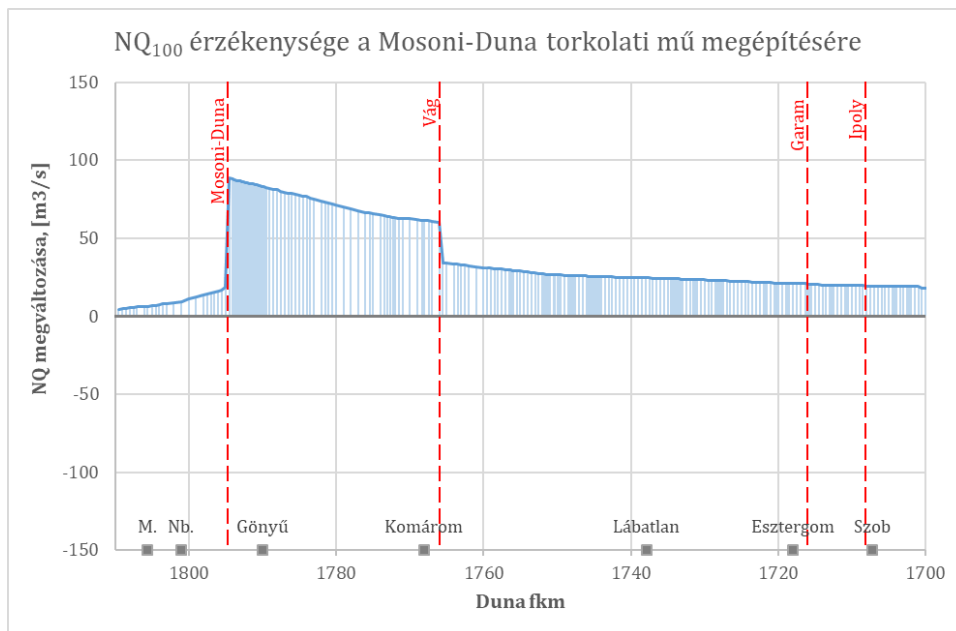
Az eredmények szerint az NMT beavatkozásainak maradéktalan megvalósulásával a 100 éves vízhozam maximuma alig $5 \text{ m}^3/\text{s}$ -mal csillapodna. A felső szakaszon – a várható módon – a MÁSZ csökkenése eléri az NMT-ben meghatározott értéket. A Mosoni-Duna torkolata fölött a csicsói mellékág megnyitásával és egyéb intézkedésekkel 0,2 – 0,25 m-es csökkentés valósítható meg, az 1780 fkm szelvényig 0,05 – 0,1 m, alatta pedig alig néhány centiméter (5. ábra). Az árvízi lefolyás felső megkönnyítésével az alsóbb szakaszokra nagyobb tetőző hozammal érkezik az árvíz, ami az eredmények szerint semlegesíti az alsóbb szakaszok nagyvízi mederkezelési hatásait. Ez a megállapítás hasznos kiegészítése az NMT tervezési szakaszokra tagolt, permanens állapotokat feltételező, egymással nem kölcsönható vizsgálatok eredményeinek.



5. ábra. A 100 éves árvízszint megváltozása a Duna mentén a Duna 2015-ös nagyvízi mederkezelési tervében elemzett geometriai és érdességi beavatkozások együttes hatására, a 2013-as hullámtéri lefolyási körülményekhez viszonyítva.

Érzékenység az árvizek a Mosoni-Duna torkolati művel való kizárására

A torkolati mű beépítése egy jelentős eltérés a 2013-as MÁSZ vizsgálatokhoz képest. Az új MÁSZ meghatározásánál azt feltételeztük, hogy a Mosoni-Duna torkolati műve 109,30 m B.f. rehabilitációs vízszinttartással működik és a mögöttes böge tározókapacitásának erejéig kizárja a Duna árvizeit. Viszonyítási alpnak egy olyan modellváltozatot választottunk, amelyben az egyetlen különbség, hogy a torkolati mű nem szerepel benne.

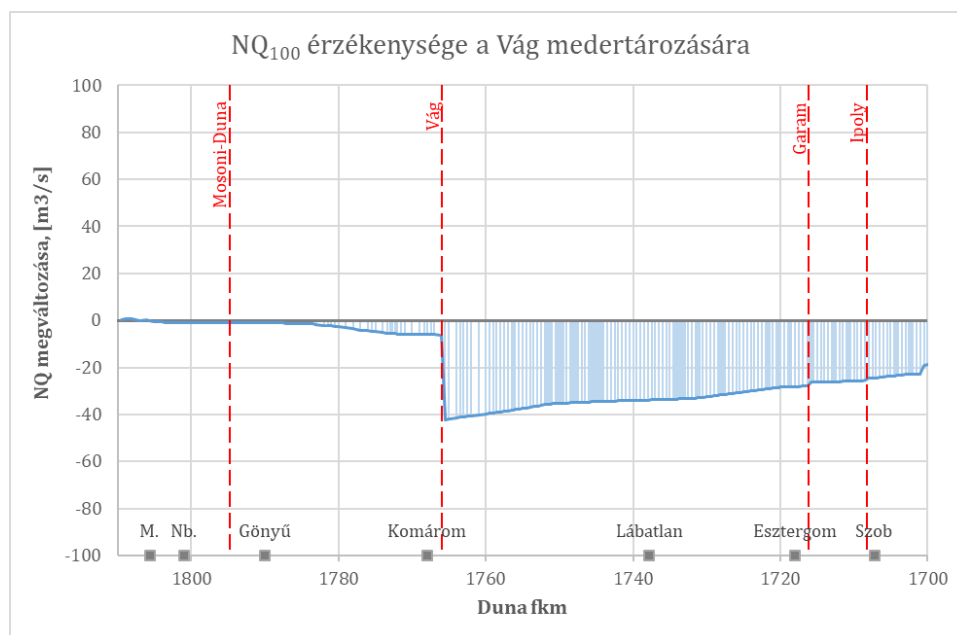


6. ábra. A 100 éves nagyvízi hozam megváltozása a Duna mentén a Mosoni-Duna torkolati mű megvalósításának hatására, egy torkolati mű nélküli állapothoz viszonyítva.

Az eredmények alapján a Mosoni-Duna létesülő torkolati árvízkapuja a Mosoni-Duna és a Rába medertározását olyan mértékben csökkenti, hogy annak hatására a Duna NQ_{100} vízhozammal érkező árvizei $70 \text{ m}^3/\text{s}$ -mal magasabb vízhozammal tetőznek Gönyűnél, a Vág alatt pedig mintegy $30 \text{ m}^3/\text{s}$ -mal. A Vág-torkolat medertározása mintegy $30 \text{ m}^3/\text{s}$ -mal csökkenti a dunai árhullám tetőző vízhozamát. A Mosoni-Duna torkolati műve az árvízszinteket a $0,03 \text{ m}$ -rel növeli, nagyságrendi összhangban a BME hasonló valószínűségi modelleredményeivel (BME VVT 2016). A különbség elsősorban annak tulajdonítható, hogy az itteni érzékenységvizsgálat alig 50 minta átlagával közelítette a korábbi Monte Carlo szimulációt eredményeit, ami a Mosoni-Duna és a Duna árvizeinek együttes előfordulásához kis mintaszám.

Érzékenység a Vág medertározásának pontosabb leképezésére

Egy másik különbség a 2013-as MÁSZ modellezéshez képest a Vág és az abba torkolló Kis-Duna folyók Duna által befolyásolt alvízi szakaszának pontosabb beépítése. A Kis-Duna a Mosoni-Dunához hasonlóan nagyon kis mederesésű folyó, a Duna 100 éves árvize a Vágon keresztül nagy távolságban vissza tud folyni. Az áramlástanai modellben a Vág torkolatához illesztett képzületbeli árvízkapuval megakadályoztuk a Duna-árvizek behatolását. Az eredmények szerint a Vág és a Kis-Duna alsó szakaszának medertározása a Duna mentén a 100 éves maximális vízhozamokat Komárom alatt $25 - 40 \text{ m}^3/\text{s}$ -mal csökkenti (7. ábra), míg a MÁSZ-értékek alig $0,01 - 0,02$ méterrel változtak.



7. ábra. A 100 éves nagyvízi hozam megváltozása a Duna mentén annak következtében, hogy a Duna árvizeinek Vág-mederben való tározódását figyelembe vesszük.

MÁSZ a Felső-Dunára

A hidrodinamikai modellel 10 ezer éves folyamatos időszakot értékeltünk ki. Ebben várhatóan van 100 db 100 éves árvíz, ami már elegendően sok ahhoz, hogy a tapasztalati eloszlásfüggvényéből megbízhatóan levezessük a MÁSZ-t.

A Medve mérceszelvényre kapott, különböző visszatérési idejű NQ_T vízhozamokat összehasonlítjuk a Duna MÁSZ 2013-as felülvizsgálata (Vituki Hungary & BME 2013) során kapott eredménnyel. Ebben az NQ hossz-szelvényt modellezés nélkül, pusztán vízrajzi adatok statisztikai

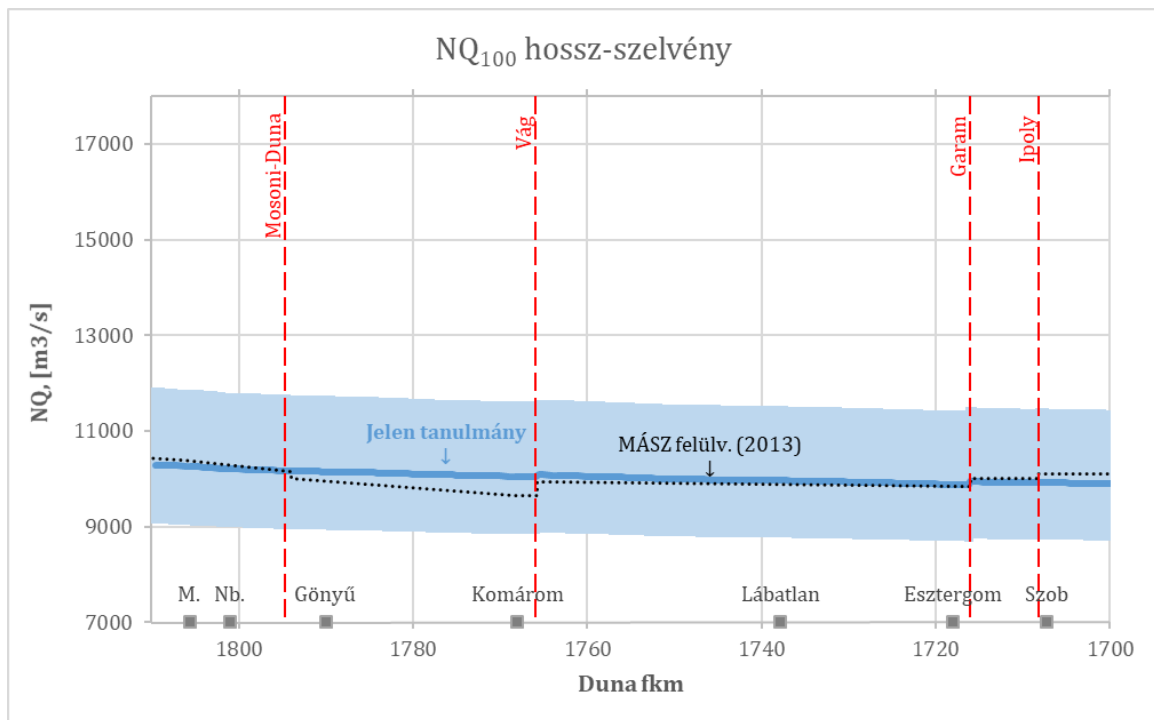
feldolgozásával, log-Pearson III eloszlással állították elő. A bősi vízierőmű legfrissebb, XI. kezelési szabályzatának mellékletében (Vodohospodárska výstavba 2018) is a 2013-as MÁSZ-tanulmány NQ értékek szerepelnek.

1. táblázat. Medve (Duna) különböző visszatérési idejű maximális vízhozamok $[m^3/s]$ (1) a jelen tanulmány hidrológiai elemzése alapján, GEV típusú eloszlásfüggvénnyel, (2) a jelen tanulmány Monte Carlo szimulációi alapján, valamint (3) a 2013-as MÁSZ számítások szerint, Log-Pearson III eloszlásfüggvénnyel.

T, év	Jelen tanulmány (GEV)	Jelen tanulmány (MC szim.)	MÁSZ 2013 (Log Pearson III)
10	7506	7451	7950
100	10026	10268	10400
1000	12487	13368	12800

Medve állomásra a hidrológiai statisztika és a Monte Carlo szimuláció számottevően eltérő értékeket adott. NQ_{50} vízhozam alatt a hidrológiai statisztika értékei alacsonyabbak, egyébként pedig a Monte Carlo szimuláció. Ez abból fakad, hogy az idősgeneráló eljárás kalibrációja során a vízrajzi idősor statisztikai mutatóit (beleértve az NQ eloszlásfüggvényét) csak tűréshatáron belüli eltérésekkel tudtuk reprodukálni. A generátornak ugyanis nincs annyi paramétere, hogy minden mutatót meg lehessen egyeztetni. Ugyanakkor az NQ_T eltérései bőven a bizonytalansági sávon belül vannak, és arra törekedtünk, hogy NQ_{100} -nál legyen minimális a különbség.

A MÁSZ kiszámításának fontos eleme az NQ_{100} vízhozam hossz-szelvénye. Ennek a megszerkesztése különösen a mellékfolyók torkolatánál nehéz, hiszen az árvizek tetőzése idején napi (vagy még sűrűbb) időközzel kellene hozzá rekonstruálni vízhozamot a torkolat mindkét oldalán. Hidrológiai becslések helyett a torkolatoknál az NQ_{100} hossz-szelvényt a Monte Carlo szimuláció eredményeiből vezettük le (8. ábra). A vízhozam-nyilvántartási szelvényekben egyrészt közvetlenül a vízrajzi adatsorokból meg lehet becsülni a különböző visszatérési idejű NQ értéket, másrészt az áramlástanai modell eredményeiből számított tapasztalati eloszlásfüggvényekből is.

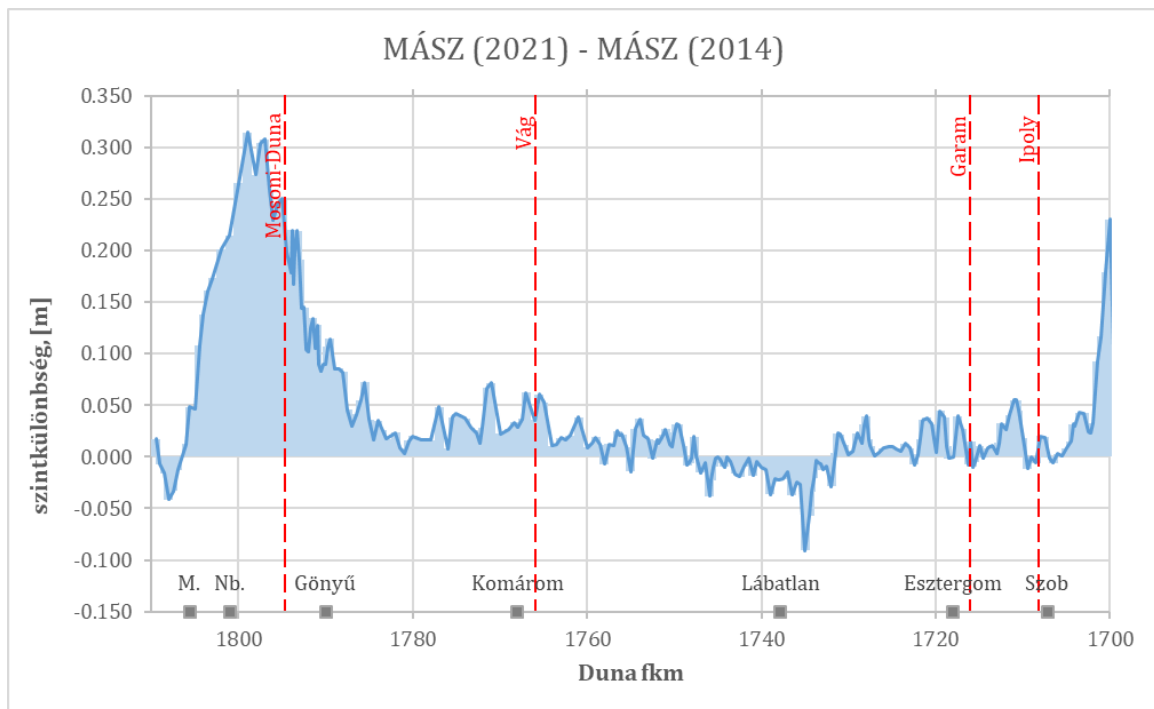


8. ábra. A 100 éves visszatérési idejű (NQ_{100}) nagyvízi vízhozam hossz-szelvénye a Dunán, valamint a homogenizált árvízi adatsorból számított 67%-os konfidenciasávja. A szaggatott vonal a 2013-as MÁSZ tanulmányban (Vituki Hungary-BME 2013) levezetett, vízrajzi adatok statisztikáján alapuló görbét mutatja.

Figyelemreméltó, hogy a mellékfolyók torkolatainál a numerikus modellezéssel sokkal kisebb lépcsőt kaptunk, mint a 2013-as hidrológiai elemzésben. Nincs arról információnk, hogy az idézett munkákban milyen módszerrel rekonstruálták az éves maximális vízhozamokat a torkolatoknál, de az könnyen belátható, hogy a vízhozamgörbék pontatlanok, különösen a torkolat fölötti beduzzasztott szakaszokon. Éppen ezért a numerikus úton meghatározott lépcsőt pontosabbnak tartjuk, hiszen az a mellékfolyó-torkolatok vízmérlegét és esésviszonyait a modell a tényleges geometriával és vízszállító képességgel számítja. Ugyanakkor a numerikus eljárás egyik gyenge pontja, hogy az idősgenerátor a Duna és a mellékfolyók árvizeinek egyidejű bekövetkezését csak egyetlen korrelációs együtthatón keresztül képezi le, a vízgyűjtők és a szélsőséghez vezető csapadékmezők földrajzi elhelyezkedését nem veszi figyelembe.

Az NQ_{10} értékeire a tanulmányunkban a GEV eloszlásfüggvénnyel 6-8%-kal alacsonyabb értéket állapítottunk meg, mint a 2013-as MÁSZ tanulmányban.

Ami pedig az 1000 éves visszatérési idejű vízhozamokat (NQ_{1000}) illeti, azokra jóval nagyobb szórás mutatkozik a különböző források között. Medvénél a hidrológiai statisztikai elemzésünk és a Monte Carlo szimulációnk 7%-kal eltérő eredményt ad (1. táblázat), ami – mint ahogy arra hivatkoztunk NQ_{100} esetében is – az idősgenerátor korlátozott kalibrálhatóságából fakad. Az 1000 éves árvizek azonban Ausztriában és Szlovákiában komoly elöntéseket okozva, erősen csillapodva érnének hazánkba. Az eloszlásfüggvény extrapolációja eleve nagyon bizonytalan az NQ idősor hosszát többszörösen meghaladó visszatérési időkre, különösen akkor, ha megváltozik a hidrológiai folyamat jellege. Valószínűleg hidrológiai statisztikával túlbecsüljük ezeknek a sosem látott, szélsőséges vízhozamoknak a nagyságát.



9. ábra. Az új és a 74/2014. (XII. 23.) BM rendelet szerinti 2014-es Duna-MÁSZ különbsége.

A Duna mértékadó árvízszintjei a 2013-as MÁSZ-hoz képest Gönyű felett változtak számottevően (9. ábra). A Mosoni-Duna torkolatánál 0,2-0,3 méterrel emelkedtek. Mint láttuk, ebből csupán 0,05 m-nyi tudható be a Mosoni-Duna torkolati árvízkapujának. A Mosoni-Duna környéki változás a MÁSZ algoritmusból fakad. Egy adott Duna-szelvényben a MÁSZ azoknak az árhullámoknak a legmagasabb vízszintje, amelyeknek a tetőző vízhozama se helyben, se egy hosszabb alvízi szakaszon nem haladja meg az NQ_{100} értéket. Ennek az alvízi szakasznak a vége ott van, ahol a tetőző vízszint 4,0 m-rel alacsonyabb a vizsgált szelvénybeli értékénél. A $\Delta z_{\max} = 4,0$ m-es szintkülönbség az eljárásunknak egy szabadon megválasztható paramétere, amelyre a megállapított MÁSZ meglehetősen erős érzékenységet mutat az 1800 fkm környékén (Vituki Hungary-BME 2013 tanulmány).

A jelen tanulmányban javasolt MÁSZ-t ezzel szemben úgy határoztuk meg, hogy se ezt a Δz_{\max} paramétert, se az NQ_{100} hossz-szelvényt nem vettük igénybe. Ehelyett a különböző meghaladási valószínűségű vízszintet közvetlenül a 10 ezer darab éves maximális vízszint statisztikájából vezettük le. A MÁSZ-t ennek ellenére továbbra is a 100 éves vízhozamhoz kötjük, ugyanis a modellt a kívánt valószínűségi eloszlást mutató (generált) vízhozamokkal hajtottuk meg. Ha az eddigi MÁSZ eljárást követjük, és az NQ_{100} hossz-szelvény alapján választjuk ki az 1%-os meghaladási valószínűségű árvízcsúcsokat, akkor két megállapítást tehetünk:

- Ha a Monte Carlo szimulációval kapott NQ_{100} hossz-szelvényt vesszük alapul a kiválasztáshoz (8. ábrán a folytonos vonal), akkor 0,03 m-t se meghaladó eltérést kapunk a szimulált NV_{100} -hoz képest.
- Ha pedig a 2013-as MÁSZ felülvizsgálatnál alkalmazott NQ_{100} hossz-szelvényt (8. ábrán a pontozott vonal), akkor az eltérés már Nagybjacs környékén eléri a 0,20 m-t. Ez azonban még mindig az elemzés bizonytalansági sávján belül van.

A jelen tanulmányban meghatározott MÁSZ a 2013-as tetőző vízszintek fölött halad 0,3-0,4 méterrel (9. ábra).

ÖSSZEFOGLALÁS

A Felső-Duna mértékadó árvízszintjeit lényegében a 2013-as tanulmányéval azonos módszertan szerint vizsgáltuk felül. Az eltérések csupán Gönyű fölötti szakaszon haladják meg az 5 cm-t.

HIVATKOZÁSOK

74/2014. (XII. 23.) BM rendelet a folyók mértékadó árvízszintjeiről.

83/2014. (III. 14.) Korm. rendelet a nagyvízi meder, a parti sáv, a vízjárta és a fakadó vizek által veszélyeztetett területek használatáról, hasznosításáról, valamint a folyók esetében a nagyvízi mederkezelési terv készítésének rendjére és tartalmára vonatkozó szabályokról.

Babister, M., Retallick, M., Loveridge, M., Testoni, I., Varga, C., & Craig, R. (2016). A Monte Carlo framework for assessment of how mitigation options affect flood hydrograph characteristics. *Australian Journal of Water Resources*, 20(1), 30-38.

BME VVT (2016). *A Mosoni-Duna torkolatához tervezett vízszintszabályozó műtárgy környezeti hatásvizsgálatát megalapozó modellvizsgálatok*. Ad Statua Konzorcium. Megrendelő: ÉDUVIZIG.

ÉDUVIZIG (2022): Megkezdődött a Mosoni-Duna torkolati műtárgy próbaüzeme. Észak-Dunántúli Vízügyi Igazgatóság honlapja, eduvizig.hu (2022.03.08.)

Geoportál (2021). Airborne Laser Scanning and DTM 5.0. geoportal.sk

Krámer, T., Szilágyi, J., Józsa, J. (2015). Mértékadó árvízszintek - Országos felülvizsgálat után, *Mérnök Újság* 22(1-2), pp. 22-25.

Liu, W. C., & Liu, H. M. (2019). Integrating hydrodynamic model and Monte Carlo simulation for predicting extreme water levels in a river system. *Terrestrial, Atmospheric & Oceanic Sciences*, 30(4).

Okoli, K., Breinl, K., Mazzoleni, M., & Di Baldassarre, G. (2019). Design flood estimation: exploring the potentials and limitations of two alternative approaches. *Water*, 11(4), 729.

Solvex-BME (2015). *Nagyvízi mederkezelési terv 01.NMT.02,03,04*. Egyeztetési tervdokumentáció. Megrendelő: ÉDUVIZIG.

Szigyártó Z. (2009): A mértékadó árvízszint és a valószínűség. *Hidrológia Közöny*, (1) pp. 23-33.

Szilágyi, J., Bálint, G., Csik, A. (2006). A hybrid, Markov chain-based model for daily streamflow generation at multiple catchment sites, *J. Hydrol. Engin.*, 11(3), 245-256.

Török, G. T., Józsa, J., & Baranya, S. (2020). A Novel Sediment Transport Calculation Method-Based 3D CFD Model Investigation of a Critical Danube Reach. *Polish Journal of Environmental Studies*, 29(4).

Vituki Hungary-BME (2013). *A Duna mértékadó árvízszintjeinek felülvizsgálata*. Kutatási jelentés. Megrendelő: Országos Vízügyi Főigazgatóság.

Vodohospodárska výstavba (2018): *Dočasný manipulačný poriadok pre sústavu vodných diel Gabčíkovo-Nagy-
maros na území Slovenskej republiky Aktualizácia XI. dodatok č.1. - zmeny*, Bratislava.