

# MÁSZ meghatározása szélsőségesen magas biztonsági szintre a Közép- és Alsó-Dunán

Krámer Tamás, Szilágyi József

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszék

Cikkünkben egy esettanulmányt mutatunk be, amelyben az évi  $10^{-5}$  meghaladási valószínűségű árvízszintek modellezési lehetőségét vizsgáljuk a Budapest-Baja közötti Duna-szakaszra. Budapestnél felső peremfeltételként egy évszakos változásokat is figyelembe vevő vízhozam-idősor generáló eljárással előállított mértékadó árhullámképet adtunk meg, amit 1D-2D áramlástanivali modellel transzformáltuk az ártér teljes szélességében, az árvízvédelmi töltések három változat szerinti leírásával. A vizsgálataink megmutatták, hogy a Budapestnél bevezetett  $10^{-5}$  valószínűségű árhullámkép lefejezve érkezik a középső és alsó Duna-szakaszra, mivel a fővédvonalon átbukva hatalmas területen folyhat tovább a bal parti ártéri öblözetben a Dunával párhuzamosan. Ezen a szakaszon a fővédvonalak mentén az árvízszintet a nagyvízi Duna-meder Budapest alatti minimális vízszállító képessége határozza meg. Baja környékén az ártéri lefolyás visszatér a folyóba és ezzel együtt visszaduzzaszt a fölötté lévő szakaszon. Kimutattuk, hogy ha a bal parti fővédvonal koronaszintjét megemelnék, akkor az évi  $10^{-5}$  valószínűségű árvízszintek közel azonos mértékben emelkednének a középső modellszakaszon.

**Kulcsszavak:** Mértékadó árvízszint, áramlástanivali modellezés, valószínűségi modellezés, hidrológiai statisztika

## BEVEZETÉS ÉS CÉLKITŰZÉS

Nagy duzzasztóművek, atomerőművek és egyéb folyó menti kritikus infrastrukturális létesítmények méretezéséhez számos külföldi országban (pl. USA-ban, Ausztráliában, Norvégiában) használatos a maximális észszerűen elképzelhető árvízi esemény („probable maximum flood”, PMF) fogalma, amelyet a fizikailag még elképzelhető legkedvezőtlenebb időjárás okoz (pl. FEMA 2013, NRC 1988). A PMF-et valamilyen determinisztikus vízgyűjtő-lefolyási eljárással számítják. Mivel se az előidéző időjárási körülményhez, se a PMF-hez nem rendelnek valószínűséget, ezért az kockázati elemzésre nem alkalmas (NRC 1988). Duzzasztóművek méretezésére vonatkozóan Graham (2000) további kritikákat is összegyűjtött a PMF alkalmazásáról, és végül az évi  $p = 10^{-2}$  és  $10^{-6}$  valószínűségű maximális vízhozamok (NQ) között egy exponenciális függvény szerint javasolja interpolálni az NQ(p) függvényt.

A szélsőségesen alacsony (évi  $10^{-4}$  vagy annál is kisebb) meghaladási valószínűségű, bibliai özönvízhez hasonlítható árvizek kockázatainak felmérése hidrológiai és hidraulikai kihívást jelent. Noha ezeknek az árvizeknek a valószínűsége töredékét teszik ki a hazai árvízi kockázatkezelésben figyelembe vett  $10^{-2}$ ,  $10^{-3}$  valószínűséghez tartozó értékeknek, a folyóvölgy adottságaitól függően az általuk okozott kár akár nagyságrendekkel tetemesebb lehet, és ennek következtében mégis számottevően hozzájárulhatnak a teljes árvízi kockázathoz.

Ami pedig atomerőművek tervezését illeti, a hazai előírások a nemzetközi gyakorlatot követik: a kockázatelemzés során meg kell határozni az évi  $10^{-5}$  (meghaladási) valószínűséget elérő, természeti eredetű külső veszélyeztető tényezőket (OAH 2022, 3a.2.2.5000. §), így folyó mentén a jeges és jégmentes árvizet is.

Általában jelentős bizonytalanságot és modellezési nehézséget okoz a mértékadó vízhozam kiterjesztése a mérések adattartományán jócskán kívülre. Ez különösen igaz a síkvidéki, töltésezett folyóvölgyekre, ahol az árhullám transzformációja a vízrajzi mérésekkel lefedett viselkedéshez képest jelleget vált, ha a vízhozam a fővédvonalak tömeges tönkremenetelével jár.

Cikkünkben egy esettanulmányt mutatunk be, amelyben az évi  $10^{-5}$  valószínűségű árvizek modellezési lehetőségét vizsgáljuk a Budapest-Baja közötti Duna-völgyre.

## MÓDSZER

Vizsgálatunkban a MÁSZ módszertant vettük alapul (Krámer et al. 2015., Vituki Hungary-BME 2013, Krámer-Szilágyi 2022), de a valószínűségi modellezést a számítási feladat nagysága miatt egyetlen mértékadó árhullám determinisztikus modellezésével helyettesítettük.

Azt feltételeztük, hogy a Duna árhullámai az ártérre való kiöntés nélkül érnek el Budapestig, így a maximális vízhozam eloszlásfüggvénye kiterjeszhető a megfigyeltnél sokkal szélsőségesebb, évi  $10^{-5}$  meghaladási valószínűségekre. Ez még egy olyan ideális helyzetben is csak komoly bizonytalansággal tudnánk megtenni, ha időben nem változna a folyó vízjárása és a maximális vízhozamokat pontosan ismernénk a vízrajzi mérések kezdete óta. Azonban egy kataklizmaszerű árvíz súlyossága olyan tényezőktől is függhet, amelyek nem szerepelnek a mért adatokban, pl. az árvízvédelmi infrastruktúra teljes tönkremenetelével is számolni kellene. Ugyanakkor látni fogjuk, hogy a vizsgált Duna-szakaszon a nagyvízi meder árvízi lefolyása ebben az extrém tartományban mégse érzékeny a vízhozam maximumára.

A budapesti mérceszelvénybe egy adatalapú hidrológiai eljárással nagyon hosszú vízhozam-idősort generálunk úgy, hogy az tükrözze a múltbeli vízhozam-adatsorok néhány fontosabb statisztikai és autoregressziós jellemzőjét. Ezek után az évi  $10^{-5}$  valószínűségű árhullámképet (beleértve az  $NQ_{10^{-5}}$  maximális vízhozamot) ennek az idősrnak a statisztikájából vezetjük le.

A Budapest alatti szakaszon pedig a tényleges domborzati körülményekkel számolva 1D-2D áramlástanai modell alkalmazásával vizsgáltuk, hogy a generált budapesti árhullámok hogyan vonulnak le Bajáig. Alapvető eltérés a MÁSZ módszertanhoz képest, hogy az árhullámtranszformáció az 1D-2D modellezés miatt nagyon költségessé vált, ezért az áramlástanai modellezést nem a teljes generált időszakra végezzük el Monte Carlo szimulációs elven, hanem egyetlen mértékadó árhullámképre.

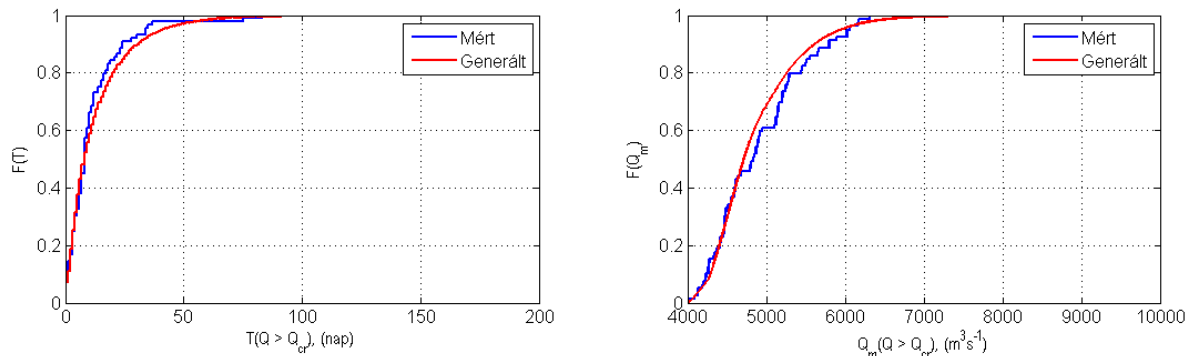
A sokkal alacsonyabb biztonsági szintre, a  $10^{-2}$  éves valószínűségekre kiépített árvízvédelmi töltéseket óhatatlanul meghágnak a mostani vizsgálatunkban megcélzott szélsőséges árvizek, ezért fontos volt, hogy az áramlástanai modell pontosan leírja az ártéri öblözetek fokozatos feltöltődését és azok bekapcsolódását a lefolyásba.

## A HIDROLÓGIAI MODELL

A vízhozamgeneráló modellt a Duna budapesti napi vízhozam-adatai segítségével kalibráltuk. A MÁSZ módszertanhoz (Vituki Hungary-BME 2013) képest további feltétel volt, hogy az árhullám tömegének statisztikai jellemzői is megőrződjenek. Ezek után 30-szor százezer évnvi (összesen 3 millió évnvi) napi vízhozam-adatot generáltunk, hogy az évi  $10^{-5}$  valószínűségű, azaz százezer éves visszatérési idejű maximális vízhozamok becslésére reprezentatív számú mintánk legyen. Ezek a minták többlettudást nem adnak hozzá a vízrajzi idősorokhoz, így éppúgy nem képesek leírni azt, hogy hogyan változik meg a lefolyás a Budapest fölötti fővédvonalak tömeges meghágnása esetén. Ugyanakkor az áradás és apadás ütemét, az egymást követő árvizek egymásra halmozódását ez az adatalapú modell megtanulja a vízrajzi mérésekből és ezt érvényesíti a minden mérésnél nagyobb árhullámok alakjában.

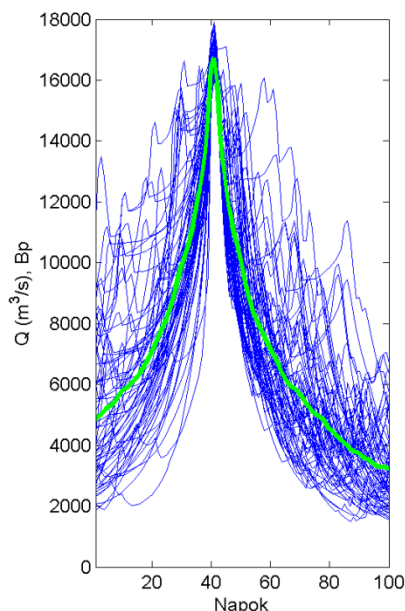
A vízrajzi adatokra való illeszkedés mérésére a napi vízhozamok és az éves maximális vízhozamok (NQ) eloszlásfüggvénye mellett még az évi maximális vízhozamú árhullámok mederkitöltő vízhozam ( $Q_{cr} = 4000 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ ) feletti tartóságának ( $T$ ) és átlagos napi vízhozamának ( $Q_m$ ) eloszlásfüggvényeit is összehasonlítottuk. Ezt itt külön be is mutatjuk (1. ábra). A generált értékek eloszlásai statisztikailag nem különböznek a mért értékektől a Kolmogorov-Szmirnov próba 5%-os szintjén. A generált vízhozamidősor tapasztalati

eloszlásfüggvénye alapján végül Budapestnél  $NQ_{10}^{-5} \approx 17\,000 \text{ m}^3/\text{s}$ -ra tehető. Mivel nem vettük figyelembe azt, hogy a felszíni tározódás és az ellapulás rendkívüli mértékben megnőne, ha a Duna Budapest fölötti ártéri öblözeteibe kitörne egy extrém árvíz, ennél fogva a becslésünk valószínűleg a bizonytalansági sáv felső határához van közelebb.



1. ábra Az évi maximális vízhozamú árhullámok mederkitöltő vízhozam ( $Q_{cr} = 4000 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ ) feletti tartósságának ( $T$ , bal ábra) és átlagos napi vízhozamának ( $Q_m$ , jobb ábra) tapasztalati eloszlásfüggvényei.

A 3 millió évnyi generált idősből kiválogattuk azokat az árhullámokat, amelyek  $NQ_{10}^{-5}$  körül, az  $16\,000$  és  $18\,000 \text{ m}^3/\text{s}$  közötti vízhozam-tartományban tetőztek (2. ábra). A tetőzés időpontjában szinkronizált árhullámokból végül egyetlen mértékadó árhullámképet vezetünk le, amely az egyes árhullámok vízhozam-értékeinek számtani közepeként adódik. Megfigyelhető, hogy egyes realizációk több csúccsal is rendelkeznek, de a mértékadó árhullámkép egy sima, klasszikus alakot ölt. Megjegyezzük, hogy az átlagolásunk elve megegyezik Hegnauer et al. (2014) módszerével, azzal a különbséggel, hogy ők a vízhozam-idősort vízgyűjtőlefolyás-moddal generálták.



2. ábra A  $10^{-5}$  visszatérési idejű maximális vízhozam körül  $\pm 1000 \text{ m}^3/\text{s}$ -os tartományban, a 40. napon tetőző, modellezett árhullámképek 100 napja Budapesten. A vastag zöld kiegyenlítő vonal a realizációk napi vízhozam-értékeiből számított számtani középértéket mutatja.

## AZ ÁRAMLÁSTANI MODELL

A Duna nagyvízi medrét 1D modellel írtuk le, az ezt határoló fővédvonalak túloldalán a meghatározó ártereket pedig egy olyan 2D modellel, amely az 1D modellel számítási

lépésenként, szorosan össze van kapcsolva. A modellt a HEC-RAS szoftver 5.0 verziójában valósítottuk meg.

A Budapest belvárosában beszűkült Duna (1641 fkm) célszerű belépő peremet tesz lehetővé, az alvízen pedig a Dráva torkolatáig (1380 fkm) tart a modell.

A 2D modell négy ártéri öblözetet (01.42 Budapest-Bajai bal parti, 01.24 Madocsi jobb parti, 01.25 Duna-Sióközi jobb parti, 01.31 Duna-Sárközi jobb parti) tartalmaz, de a területet a magas terep irányában még jelentősen ki kellett bővíteni, hogy a 100.000 éves árvízi lefolyás ne ütközzön a modell határába. A domborzat a FÖMI 50 m-es vízszintes felbontású digitális terepmodelljén alapul. A lokalizációs töltéseket és a simaság területi változását az ártéren nem vettük figyelembe, de ennek nincs jelentősége a fővédvonalak mentén várható árvízszintekre.

A 1D modell befolyási szelvényében peremfeltételként a vízhozamot írjuk elő. A kifolyási szelvényben nem számolunk a Dráva visszaduzzasztásával, a Duna a Dráva torkolata alatti Aljmaš/Almás vízrajzi állomásánál adjuk meg a vízhozamgörbét Tadić et al. (2013) cikkében közölt adatok extrapolálásával. Fontos érv volt a determinisztikus áramlástan vizsgálatok mellett az a tény, hogy a modellezett Duna-szakaszon nincs jelentős árvízi vízhozamú mellékfolyó.

A 2D modell az 1D modellel a fővédvonal mentén kapcsolódik össze, amit a HEC-RAS szoftverben oldalbukóként írunk le. Az oldalbukó koronaszintjét a modellben nem a tényleges jelenlegi koronaszintekkel adtuk meg, mert egy hosszú élettartamú létesítmény tervezése szempontjából a hosszabb távon várható árvízi veszély meghatározása a mértékadó. Hogy mennyire nem állandó a koronaszint, azt két jellemény is mutatja az utóbbi évtizedből: a töltések méretezését meghatározó MÁSZ-nak 2014-ben sor került a felülvizsgálatára, valamint a vizsgált Duna-szakaszon a Duna-projekt (2013) keretében fejlesztették az árvízvédelmi fővédvonalakat.

Éppen ezért a tényleges koronaszintek helyett három elvi változatot vettünk alapul, egységesen 1,00 méteres magassági biztonsággal:

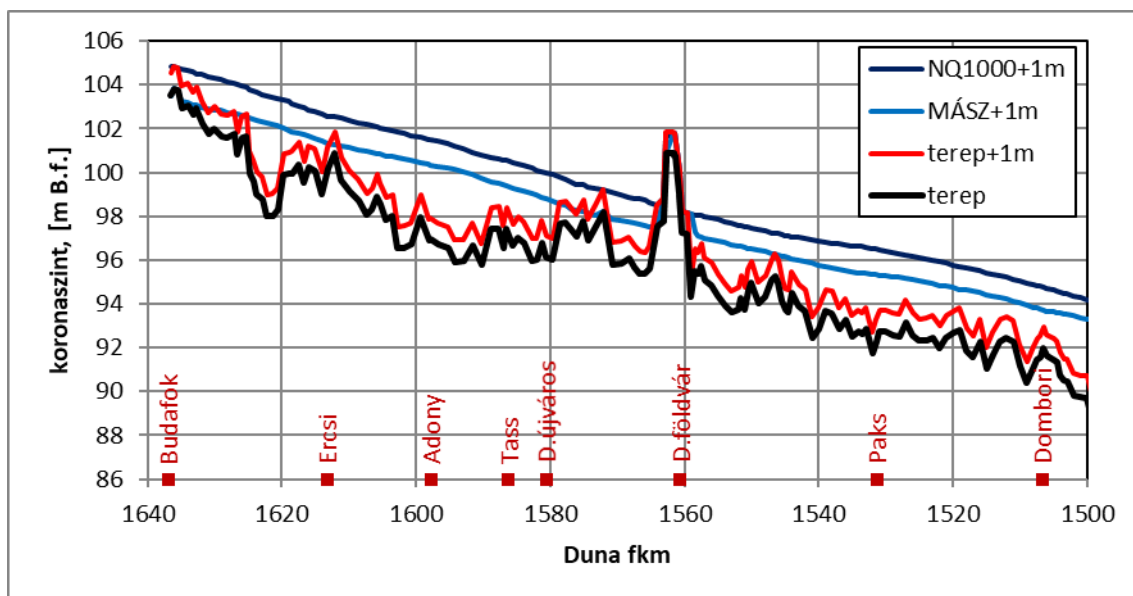
- a hatályos **MÁSZ + 1,00 m** (MÁSZ 2014),
- az 1000 éves árvízi hozamokkal modellezett vízszint,  **$z(NQ_{1000}) + 1,00$  m.**
- a töltés magassága a helyi átlagos terepszint fölött alig 1 méter,  **$Z_{\text{terepszint}} + 1,00$  m.**

A MÁSZ az  $NQ_{100}$ -hoz kötött vízszint (Krámer-Szilágyi 2015).

A  $z(NQ_{1000})$  vízszintet jelen tanulmányban kialakított modellel, az  $NQ_{1000} = 14.720$  m<sup>3</sup>/s permanens vízhozammal becsültük meg, azt feltételezve, hogy ez a vízhozam a fővédvonalak meghágása nélkül, a nagyvízi mederben folyik le. A 3. ábra szerint  $z(NQ_{1000})$  1,0-1,2 m-rel magasabbra adódott a MÁSZ-nál a bal parti fővédvonal mentén.

A terepszint + 1,00 m koronaszintűre felvett töltés a MÁSZ + 1,00 m-nél 0-3 m-rel alacsonyabb. Ez a változat annak a közelítése, hogy a fővédvonalat meghágó vízhozam ott helyben (1 m-es magasságúnak tekintett visszamaradó csonk fölött) elmossa a töltést. Természetesen nem egyenértékű vele, mivel a víz azokon a töltésszakaszokon is képes átfolyni, ahol a másik két modellváltozatban a fővédvonalat nem hágja meg a víz.

Az 1565 fkm szelvény környékén, a Dunaföldvári híd fölött megfigyelhető a magaspart.



3. ábra A balparti (01.42 Budapest-Baja) ártéri öblözet fővédvonalának hossz-szelvénye a Duna szelvényezésére vetítve a három modellváltozatban (terepszint + 1,00 m; MÁSZ + 1,00 m;  $z(NQ_{1000}) + 1,00$  m), valamint az átlagos terepszint a töltés lábánál.

A töltésekről azt feltételeztük, hogy nem szakadnak át, így csak átbukással léphet át a víz az 1D-2D modelltartományok között. A felszíni lefolyás és a talajvíz közötti kölcsönhatás figyelembe vételére a szoftver nem adott lehetőséget. Elhanyagoltuk a szél hatását is.

A 2D modell rácsfelbontása 500 m, az 1D modell szelvényköze átlagosan mintegy 1,0 fkm.

Az 1D modellben a Manning-féle simaságokat a 2013. júniusi árvíz mért tetőtű vízszintjeivel és árhullámképeivel kalibráltuk, az igazoláshoz pedig a 2006. tavaszi és a 2002. augusztusi árvíz adatait használtuk fel. Az ártéri öblözetek 2D modelljének a pontosságát ebben a tanulmányban nem tudtuk igazolni, mert az ártéri lefolyásról nincsenek adataink.

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

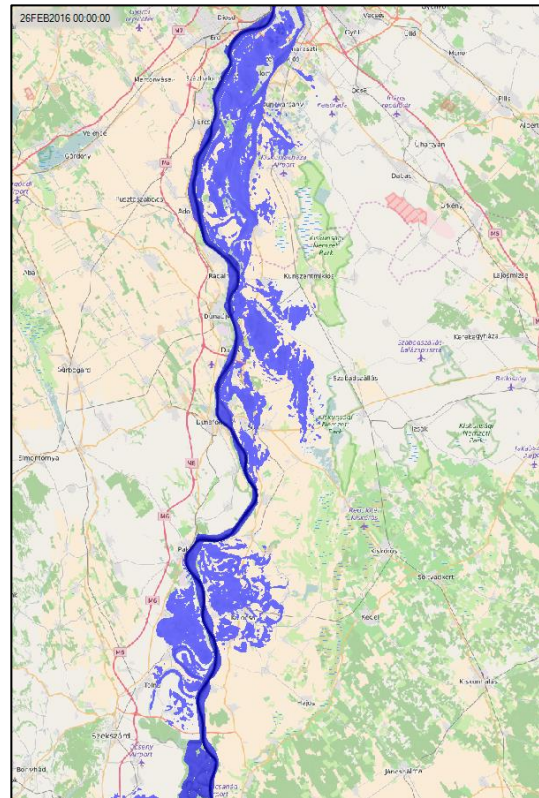
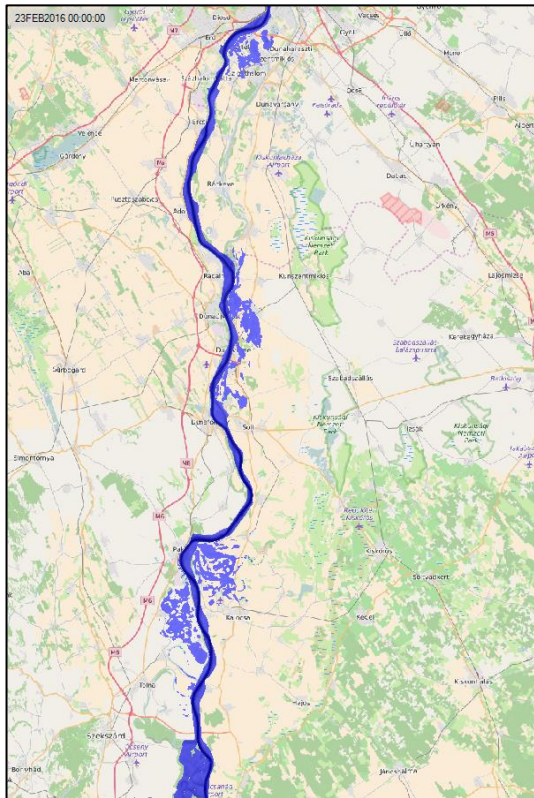
## EREDMÉNYEK

A következő ábráson (4. ábra - 6. ábra) az ártéri elöntések terjedését mutatjuk be arra a helyzetre, amikor a fővédvonalak koronaszintjét MÁSZ + 1,00 m-re állítottuk be.

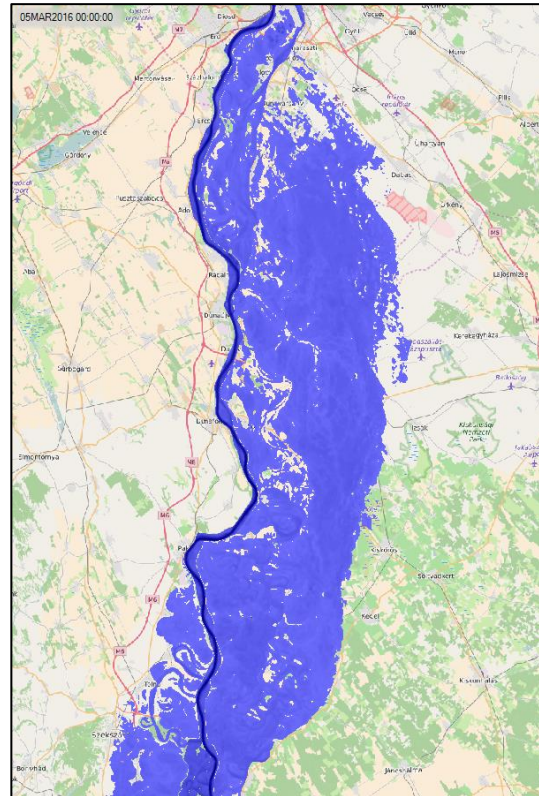
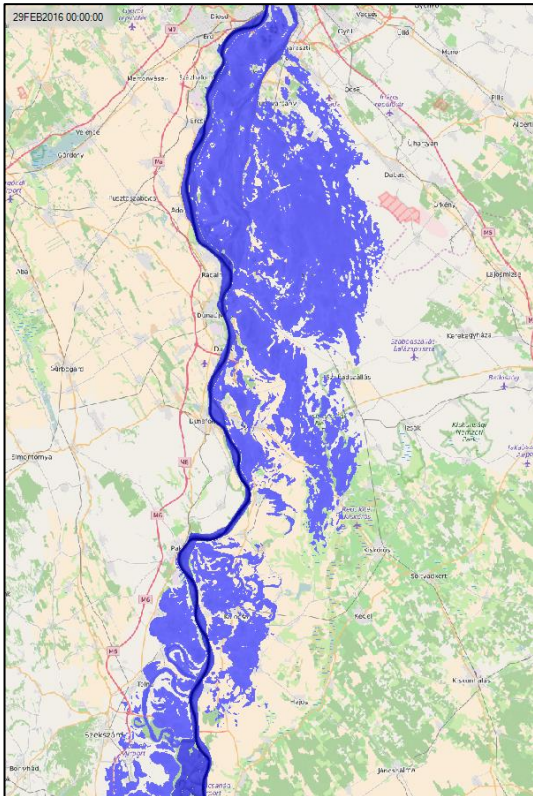
Az  $NQ_{10}^{-5}$  árhullám a Duna hossza mentén egyszerre több helyen átbukik a fővédvonal fölött. Azért nem a teljes hosszban, mert a vízszint emelkedésével nem egyenletesen nő a Duna vízszállító képessége a hossz mentén, és így a MÁSZ-ra rátett 1,00 m-es magassági biztonság változó mértékű vízhozam-növekménynek feleltethető meg. A várakozásnak megfelelően általában azokon a töltésszakaszokon jelenik meg először az átbukás, amelyek keskenyebb hullámteret szegélyeznek.

Miután a víz kiönt az ártérre, a terep mélyvonulatain vonul tovább délnek. Területe folytán a bal parti Budapest-Baja ártéri öblözet tározása a meghatározó. Ebben a Kiskunsági-főcsatorna völgye gyűjti össze a terepi lefolyást és vezeti azt az öblözet déli területeire. Az öblözet déli részén aztán a fővédvonalnál magasabbra torlódik fel az összegyűlő víztömeg, és Foktő szelvénye alatt (1520 fkm) visszabukik a Dunába. A maximális elöntési vízmélység 2,5 m körülire adódik az ártéri öblözetek mélyebb területein. Az ártér elöntésének két

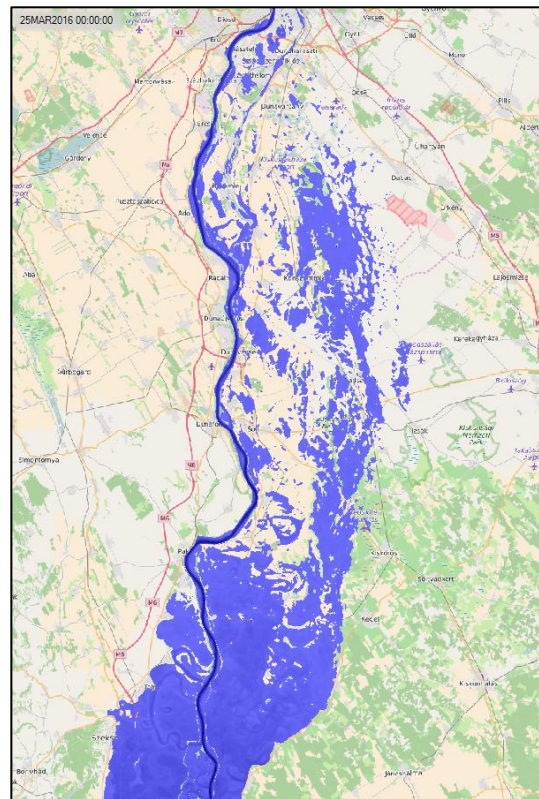
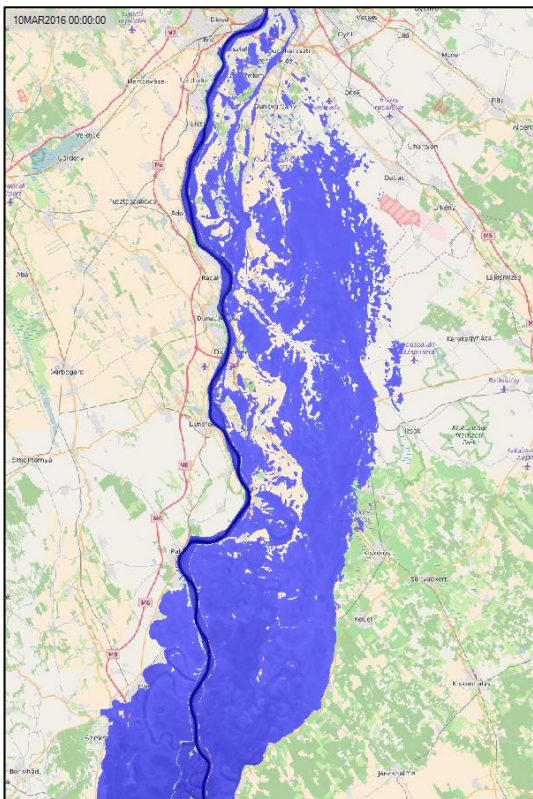
következménye van: a vízhozam átbukó része a Dunával párhuzamos ágon (és késleltetve) ér le az alsóbb szakaszra, és egyszersmind a víz maradandóan tározódik az ártér mélyedéseiben és a fővédvonal mögött.



4. ábra Az  $NQ_{10}^{-5}$  árhullám modellezett kiöntése az árterekre az időszak 53. és 57. napján (MÁSZ + 1,00 m-re emelt fővédvonalak).



5. ábra Az  $NQ_{10}^{-5}$  árhullám modellezett kiöntése az árterekre az időszak 59. és 64. napján (MÁSZ + 1,00 m-re emelt fővédvonalak).



6. ábra Az  $NQ_{10}^{-5}$  árhullám modellezett kiöntése az árterekre az időszak 69. és 84. napján (MÁSZ + 1,00 m-re emelt fővédvonalak).

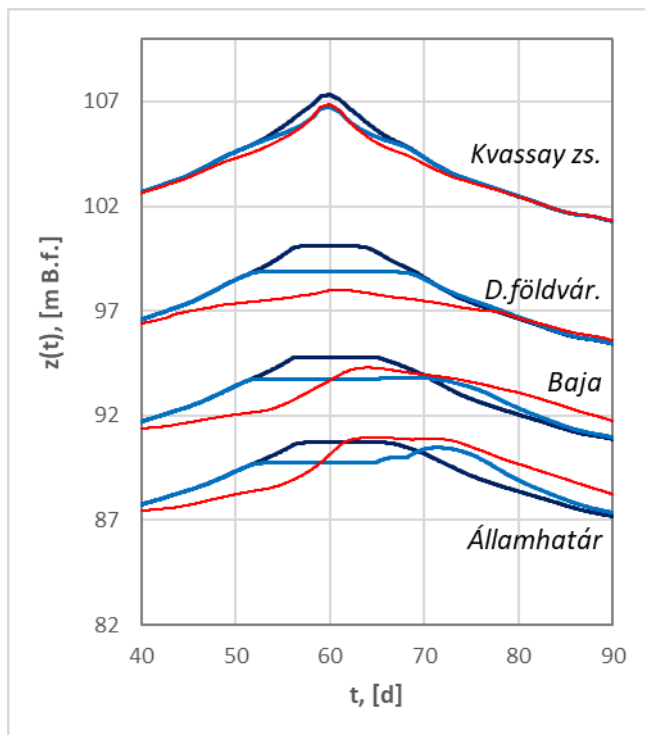
Már a Kvassay zsilipnél (1642,2 fkm) megmutatkozik a nagyvízi meder árhullámképeiben az, hogy a három modellváltozatban a víz eltérő mértékben hágja meg a fővédvonalakat (7. ábra).

A középső szakaszon, így Dunaföldvárnál is, már csak egy lefejezett vízhozam vonul végig a MÁSZ + 1,00 m és a  $z(NQ_{1000})$  koronaszintű változatok esetén, míg a terepszint + 1,00 m változat esetén a nagyvízi meder és a mentett oldal között a kapcsolat szorosabb, a belépő árhullám csúcsának terjedése követhető.

Bajánál az árvíz a terepszint + 1,00 m változatban már magasabban tetőzik, mint a MÁSZ + 1,00 m-es változatban.

Tetten érhető, hogy a déli államhatárnál a MÁSZ + 1,00 m változatban egy plató után késleltetve jelenik meg az árhullám csúcsa. Időbe telik ugyanis, amíg a bal parti öblözet alja feltöltődik és a fővédvonal meghágásával a víz vissza tud folyni a nagyvízi mederbe. A  $z(NQ_{1000}) + 1,00$  m változatban egyrészt az ártérre kilépő víztömeg ennél kisebb, másrészt pedig az öblözet alján nagyobb a tározható víztérfogat, ezek következtében Bajánál a nagyvízi mederben lefolyó árhullám platója idején nincs visszaáramlás az öblözet felől. Az államhatárnál a terepszint + 1,00 m változat adja a legmagasabb tetőző szintet.

Árvíz esetén nemcsak a tetőző szintet, hanem annak az időtartamát is figyelembe kell venni, mivel az infrastruktúra igénybevétele, az okozott kár ettől is függ. Atomerőművek telephely-értékelésénél is nevesítik ezt a szempontot (OAH 2015). Ez a maximális terhelés rendkívül hosszán, szakasztól és változattól függően 2-3 hétig fennáll a platókon.



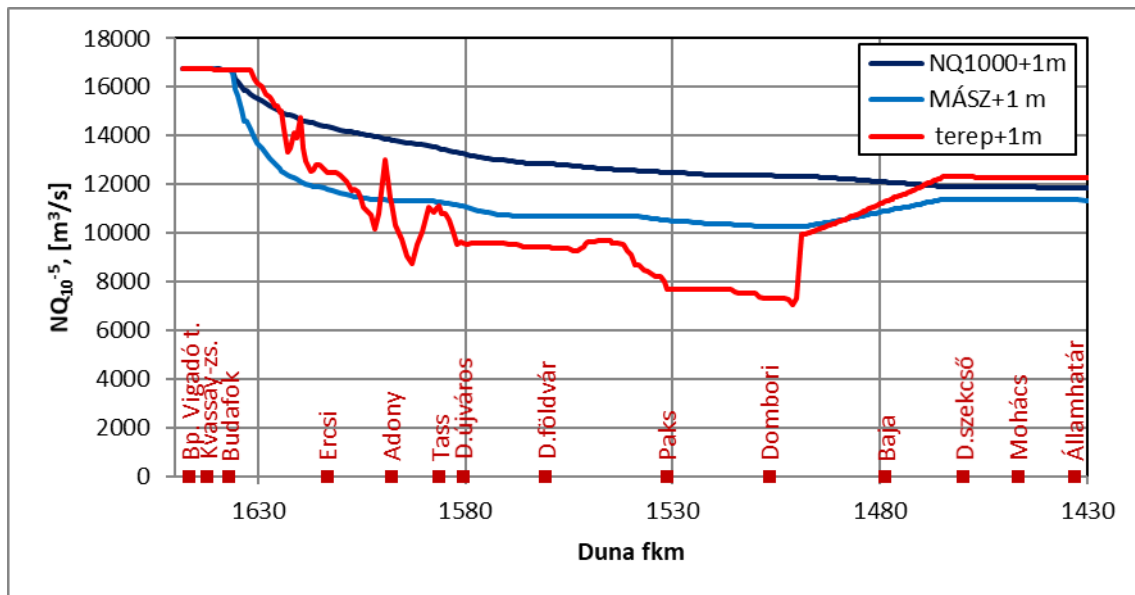
7. ábra Az  $NQ_{10}^{-5}$  árhullámra számított árhullámképek a Duna néhány vízmérce-szelvényében a három modellváltozatban. Színezés a fővédvonalak koronaszintje alapján:

- NQ1000+1m
- MÁSZ+1m
- terep+1m

A Duna nagyvízi medrében levonuló maximális vízhozamok hossz-szelvénye (8. ábra) világosan megmutatja, hogy az ártérre kibukó vízhozam hogyan csapolja meg az áradó folyót. A modellben az 1636 fkm-es budafoki szelvény alatt adódik lehetőség az átbukásra, mégpedig folyásirányban először a bal parti ártéri öblözet felé. Budafok alatt a maximális vízhozam a hossz mentén meredeken esik. Domboripuszta szelvényig a maximális nagyvízi mederbeli vízhozam  $12.300 \text{ m}^3/\text{s}$ -ra ( $NQ_{1000} + 1,00 \text{ m}$ ),  $10.500 \text{ m}^3/\text{s}$ -ra (MÁSZ + 1,00 m), illetve  $7300 \text{ m}^3/\text{s}$ -

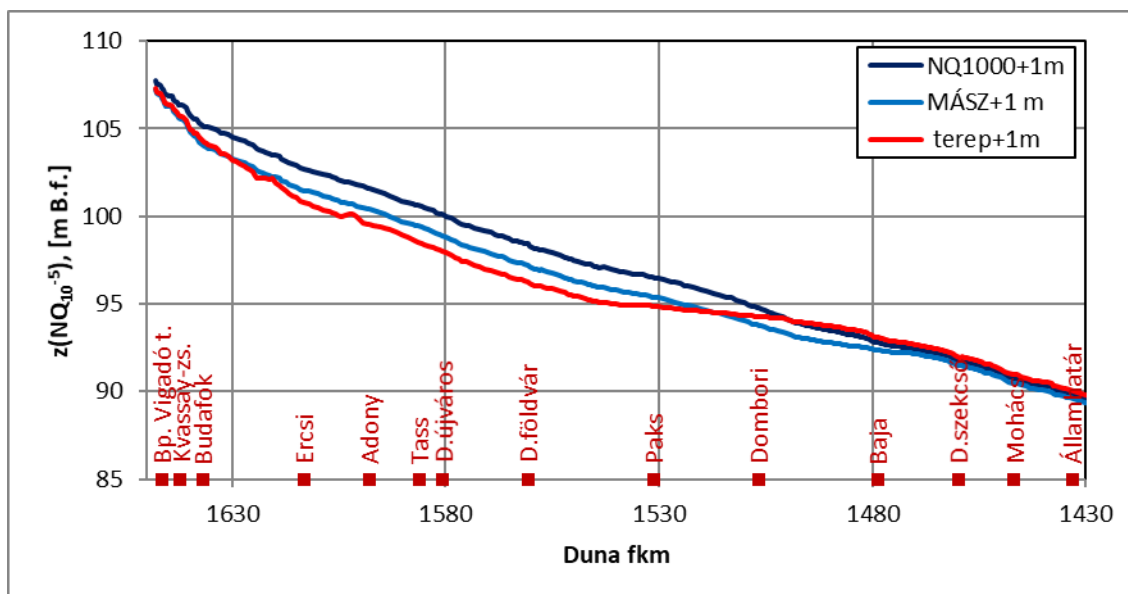


ra (terepszint + 1,00 m) csökken. A terepszint + 1,00 m változatban a görbe hossz menti változékonysága azt tükrözi, hogy a nagyvízi meder és az ártéri öblözetek között a keresztirányú átáramlás a középső szakaszon is meg tud valósulni, ráadásul mindkét irányban. Megjegyezzük, hogy a Gemenci-erdő térségében az 1D modell ágakra bontott szerkezete miatt nehézkesen lehetett volna a maximális vízhozamot a teljes nagyvízi mederre meghatározni, ezért az 1498-1465 fkm szakaszon (beleértve a Bajai szelvényt is) lineárisan interpoláltuk azt. Valahol ezen a szakaszon a terepszint + 1,00 m változat maximális vízhozama megelőzi a másik két változatét amiatt, hogy az ártéri öblözetekben kisebb a fennmaradó tározódás (ahogy azt a 7. ábra kapcsán már tárgyaltuk).



8. ábra Az  $NQ_{10}^{-5}$  árhullámra számított, nagyvízi mederre jutó maximális vízhozamok hossz-szelvénye a Duna mentén a három modellváltozatban (terepszint + 1,00 m; MÁSZ + 1,00 m;  $z(NQ_{1000}) + 1,00$  m). Az 1D modell ágakra szakadása miatt a Gemenci-erdő térségében (1498-1465 fkm) lineárisan interpolálva.

Az  $NQ_{10}^{-5}$  árhullámhoz tartozó maximális vízszintek az NQ1000 + 1,00 m változatban Domboripuszta fölött 1,2 méterrel magasabb, mint a MÁSZ + 1,00 m változatban, alatta a két görbe konvergál. A terepszint + 1,00 m változatban Paks fölött 0,7-0,8 m-rel alacsonyabb a maximális vízszint a MÁSZ + 1,00 m változaténál, alatta viszont fokozatosan csökken az elmaradása, olyannyira, hogy Domboripuszta alatt már az lesz a legmagasabb a három változat közül. Az előző ábránál említett hossz menti interpolációra a nagyvízi meder vízszintjei esetén a Gemenci-erdő mentén nem volt szükség, azokat az 1D fő Dunaág mentén közvetlenül kiolvashatók a szoftverből.



9. ábra Az  $NQ_{10}^{-5}$  árhullámra számított tetőző vízszintek hossz-szelvénye a Duna középvonala mentén a három modellváltozatban (terepszint + 1,00 m; MÁSZ + 1,00 m;  $z(NQ_{1000}) + 1,00$  m).

## KÖVETKEZTETÉSEK

A vizsgálataink megmutatták, hogy egy évi  $NQ_{10}^{-5}$  meghaladási valószínűségű dunai árvíz lefejezve érkezik a Budafok alatti szakaszra amiatt, hogy a fővédvonal szintjét elérve azon hosszú szakaszon bukhat át az ártérre és ott továbbfolyhat a Dunával párhuzamosan. Ebben a bal parti ártér a meghatározó. A paksi völgy-szelvényben például ez az ártéri ág a MÁSZ + 1,00 m-re kiépített fővédvonal (~jelen állapot) esetén mintegy 5000-6000 m<sup>3</sup>/s csúcsvízhozamot szállít, ami a teljesnek a harmada. Ennek a bal parti ártéri lefolyásnak egy jó része tározódik, a maradék Baja fölött tér vissza a Dunába és visszaduzzasztja azt.

Nem állítjuk, hogy a budapesti szelvénybe generált évi  $10^{-5}$  valószínűségi árhullámok fizikailag lehetségesek, mivel már a Budapest fölötti Duna-szakaszon (pl. a Kisalföldön) le kellett volna fejeződniük. Mégis, ahogy azt az érzékenységvizsgálat alátámasztotta, a középső Duna-szakaszra a fővédvonal menti mértékadó árvízszintet a nagyvízi Duna-meder vízszállító képessége határozza meg ilyen szélsőséges vízhozamoknál. A modellezés kiterjesztése egy felsőbb Duna-szelvényig (pl. Esztergomig vagy akár Pozsonyig) nem hozott volna számottevő pontosodást a fővédvonal mentén, mégis sokkal drágább lett volna, és az árhullám-generálásban a jelentős bal parti mellékfolyók árvizeinek együttállását is kezelni kellett volna.

A budapesti  $NQ_{10}^{-5}$  vízhozamú mértékadó árhullámkép megválasztására csak minimálisan érzékenyek a középső szakasz nagyvízi medrében lefolyó maximális vízhozamok és vízszintek. Ebből az is következik, hogy a vízhozamidő-sor-generálás és abból levezetett statisztikák bizonytalansága ezeket az értékeket ott szerencsére nem érinti. Ezzel szemben az ártéri öblözetek árvízi veszélyeztetettségét és fővédvonal kritikus hidraulikai terhelésének időtartamát érzékenyen befolyásolja nemcsak az  $NQ_{10}^{-5}$  vízhozam nagysága, de az árhullám térfogata is.

Végezhettünk volna Monte Carlo szimulációt a generált árhullám 3 millió éves időszakával vagy egy ügyesen kiválasztott részhalmazával is, és ennek a statisztikai kiértékelésével megkaphattuk volna az évi  $NQ_{10}^{-5}$  meghaladási valószínűségű vízszintek valószínűségi eloszlását. A 2D számítások költsége az ilyen hosszú szimulációt nem engedte meg, de (itt be

nem mutatott) érzékenységvizsgálattal alátámasztottuk, hogy megengedhető volt az a kompromisszum, hogy az áramlástan vizsgálatokat determinisztikus módon, egyetlen mértékadó árhullámmal végeztük. A középső modellszakaszon a mértékadó árhullámmal kapott tetőző vízszint ugyanis alig 1-2 deciméterrel marad el attól, amit egy háromszoros (hullámtér fölötti) víztömeggel levonuló, de ugyanúgy  $NQ_{10^{-5}}$  vízhozammal tetőző árvíz okoz. Egy ilyen nagy tömegű árhullámnak kétségkívül kisebb a valószínűsége, mint a közepesnek, annak ellenére, hogy a maximális vízhozamuk megegyezik. Számszerűsíteni ezt azért nehéz, mert egy kétváltozós (maximális vízhozam és térfogat) valószínűségi eloszlás az egyváltozósnál (maximális vízhozam) bizonytalanabban extrapolálható a történelmi adatokból, ugyanis több mintát igényel.

Az árvízvédelmi töltés koronaszintjére ugyanakkor érzékeny a nagyvízi meder  $NQ_{10^{-5}}$  vízhozama és az ehhez tartozó vízszint is. Itt elsősorban a bal parti fővédvonal koronaszintje a meghatározó, mert e mögött fekszik a Közép-Duna messze legnagyobb ártéri öblözete. A három közül a MÁSZ + 1,00 m szintre kiépített fővédvonal jellemző a jelenre, ugyanis ez megegyezik a hatályos törvényben előírt töltésmagassággal. Ha feltételeznénk ehhez képest a töltés közel egy méteres megmagasítását ( $z(NQ_{1000}) + 1,00$  m változat), akkor a Dombori fölötti szakaszon az árvízszint közel azonos mértékben változna meg a töltésszinttel. Dunaszekcső alatt a három töltésváltozattal egy alig 0,7 méter magas sávban mozognak a maximális vízszintek, bár hozzá kell tenni, hogy a vízhozamgörbén mozgást kikényszerítő kilépő peremfeltétel közelítése az alsó modellszakaszon már hangsúlyozott hatással van.

A fővédvonal koronaszintje nem a természet véletlenszerű változékonyságától függő paraméter, hanem azt a jövőbeli vízgazdálkodási, katasztrófavédelmi stratégia is alakítani fogja. A koronaszintet előrejelezni nem lehet, erre még valószínűségi alapon sem vállalkoztunk. A megelőző megállapítások értelmében a klímaváltozásnak a hidrológián keresztül nem lehet érdemi hatása a középső modellszakasz évi  $10^{-5}$  valószínűségű árvízi jellemzőire.

## HIVATKOZÁSOK

FEMA (2013). Inundation Mapping of Flood Risks Associated with Dam Incidents and Failures. *Report FEMA P-946*, Federal Emergency Management Agency, Washington, DC.

Graham, W. J. (2000). Should dams be modified for the probable maximum flood? *Journal of the American Water Resources Association*, 36(5), pp. 953-963.

Hegnauer, M., Beersma, J. J., Van den Boogaard, H. F. P., Buishand, T. A., & Passchier, R. H. (2014). Generator of Rainfall and Discharge Extremes (GRADE) for the Rhine and Meuse basins; *Final report of GRADE 2.0*. Deltares, NL.

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

Krámer, T., Szilágyi, J. (2022). A Felső-Duna mértékadó árvízszintjeinek legújabb felülvizsgálata, Proc. Szilávik L. (szerk.) Az MHT XXXIX. Országos Vándorgyűlése, Magyar Hidrológiai Társaság, 13 pp. ISBN 978-963-8172-44-0.

NRC (1988). *Estimating probabilities of extreme floods*. National Research Council (U.S.). Committee on Techniques for Estimating Probabilities of Extreme Floods. National Academy Press, Washington, D.C.

OAH (2015). N3a.12. sz. útmutató Általános tervezési elvek új atomerőművek és rendszereinek tervezéséhez. 1. verzió.

OAH (2022). 1/2022. (IV. 29.) OAH rendelet a nukleáris létesítmények nukleáris biztonsági követelményeiről és az ezzel összefüggő hatósági tevékenységről.

*Tadić, L., Dadić, T., & Barač, B. (2013). Flood frequency modelling of the Kopački rit Nature Park. Tehnički vjesnik 20(1), pp. 51-57.*

*Vituki Hungary-BME (2013). A Duna mértékadó árvízszintjeinek felülvizsgálata. (Készült az Országos Vízügyi Főigazgatóság megbízásából). Kutatási jelentés. Kézirat. Budapest.*

Duna Projekt (2013). <https://www.ovf.hu/hu/lezart-projektek/duna-projekt>

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