

Budapest árvízi öblözeteinek 2D-s szimuláción alapuló elöntési elemzése, térképezése

Rácz Tibor⁽¹⁾ – Réti Gábor⁽²⁾ – Németh Tamás⁽¹⁾ – Sütő Gergely⁽¹⁾ – Balogh Balázs⁽¹⁾ – Ádám Zsófia⁽¹⁾ – Szabó János Adolf⁽²⁾

- 1) **Fővárosi Csatornázási Művek Zrt.**, Ár- és Belvízvédelmi Osztály
- 2) **HYDROInform Bt.**, Hidroinformatikai Kutató, Rendszerfejlesztő és Tanácsadó BT.

Bevezetés

Budapest természeti katasztrófa veszélyeztetettségének legfontosabb elemét a Duna árvizei jelentik. A főváros lakosságának és a lakosság, valamint a társadalom közös javainak árvízi károsodás elleni védelme, az ország termelésének bő harmadát biztosító Budapest működésének fenntartása alapvető feladat. Ezt még abban az esetben is fenn kell tartani, ha bármilyen havária miatt a Duna árvize elöntést okozna a város egyes területein. A kérdés az, hogy melyek azok a területek, amelyek a Duna árvize szempontjából valóban veszélyeztetettek lehetnek egy szélsőséges árvízi helyzet esetén, valamint az, hogy a veszélyhelyzet miatti lokalizálásra milyen lehetőségek állnak rendelkezésre.

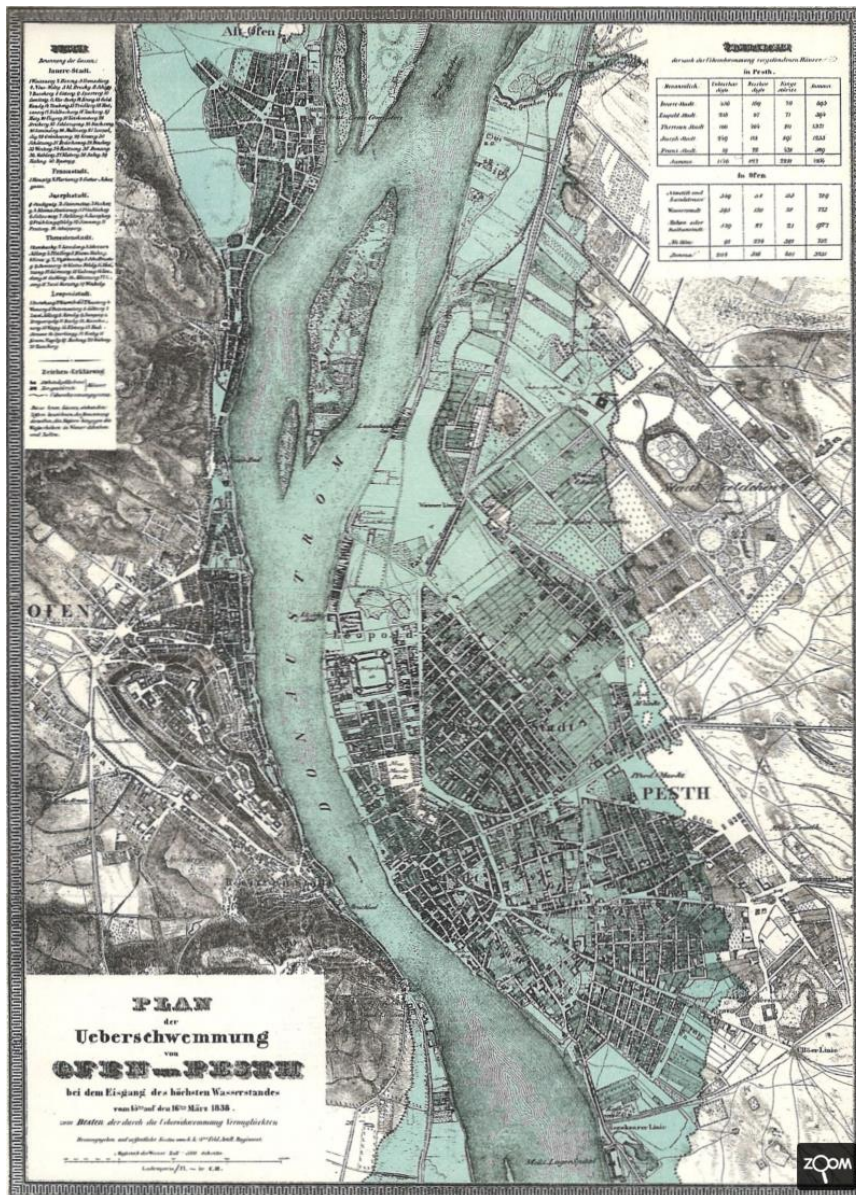
Budapesten a védművek – kevés állami tulajdonú védművet leszámítva – a Fővárosi Önkormányzat tulajdonában vagy fenntartásában állnak. A vízgazdálkodásról szóló 1995. évi LVII. tv. 17.§ (3) bekezdése szerint az önkormányzati tulajdonban levő védműveken az árvíz- és belvízvédekezés műszaki feladatait a polgármester, Budapesten a főpolgármester látja el. A feladat operatív ellátását a Fővárosi Csatornázási Művek végzi a második világháborút követő megalakulása óta hagyományosan, és a cég részvénytásasággá alakulásával, valamint részleges privatizációját követően a feladat végrehajtását megbízási szerződés is rögzíti.

A feladat ellátásának része a hatályos jogszabályi feltételek teljesítése, így a 10/1997. (VII. 17.) KHVM rendeletben foglaltak szerint az árvízvédelmi lokalizációs tervek elkészítése is. A lokalizációs tervek elkészítése azon területekre kell kiterjedjen, amelyeket a folyó elönthet. Az elönthető területek kiterjedése a domborzat és az elöntéssel kialakuló vízszintek (vízfelszín görbe) függvénye. E két mennyiség egymásra is hatással van, hiszen a domborzat az ártéren befolyásolja a kétdimenziós vízfelszín alakulását duzzasztással, leszívó hatással. A városi felszín igen dinamikusan változó felület, amely a beépítés és a terepszint változásával egy esetleges elöntés alkalmával lényegesen eltérő elöntési karakterisztikát eredményez, értve ez alatt a kialakuló vízmélységeket, a jelenség lefolyása közben kialakuló sebességeket és az elöntés kifejlődési területének méretét. A folyami vízfelszín ugyancsak befolyásolja azt, hogy milyen távolra képes a folyó vize eljutni. Az árvízvédekezésben sok esetben elválik a természetes vízfelszín és a védekezési felkészülést megalapozó, jogszabályban rögzített mértékadó árvízszint. A 2013-as árvíz újra igazolta azt a tapasztalatot, hogy a jégmentes árvizek Budapest környezetében az akkor érvényes árvízszinthez képest lényegesen eltérő vízfelszínnel vonulnak le. A főváros déli területein a Duna vízfelszíne a jogszabályban rögzítetttnél alacsonyabban alakult, míg az északi szakaszon (kb. a Határ-árok torkolatától északra) attól magasabban volt észlelhető. Nyilvánvaló, hogy a korábbi árvízvédelmi tervek ezzel a jelenséggel nem számolhattak, így az elöntési területek felülvizsgálata szintén indokolt volt. Az elöntési modellezés végrehajtása tehát elkerülhetetlen volt a lokalizációs tervezés sikeres és a kialakulható valós állapotot tükröző végrehajtásához.

1. Az elöntési modellezés előzményei Budapesten

A Duna árvizeinek hatásterületét a korábbi időszakokban is igyekeztek meghatározni, az adott kor technikai színvonalának megfelelően. A történeti árvízi térképezés legmarkánsabb megjelenése az 1838-as jeges árvíz elöntésének kiterjedését ábrázoló térkép előállítás volt. Amint az ismert, a jeges árvíz kb. 1030 cm mai vízállásnak megfelelően, de nehezen beazonosítható vízfelszínnel vonult le, az

árvíz okozó jégtorlasz miatt duzzasztott vízfelszín mellett. A város kiterjedése is kisebb volt akkoriban, így jelentős területekről nem ad információt ez a térkép. E körülmények miatt, valamint a felmérés utólagos, esetleges pontossága következtében ezt az elöntési térképet tájékoztató jellegűnek és történeti fontosságúnak lehet tekinteni.



1. ábra: az 1838-as árvíz elöntési területe (Megjelent a Némethy Károly szerkesztette A pest-budai árvíz 1838-ban című kötetben, Budapest, 1938) (forrás: http://mnl.gov.hu/mnl/ol/hirek/a_budapesti_ozonviz_terkepe)

A későbbiekben az elöntési térképezés a korszak rendelkezésre álló technológiája szerint történhetett, így a számítástechnikai kapacitás rendelkezésre állása előtt csakis jelentős közelítéssel lehetett az elöntött területeket meghatározni. Az árvízvédekezési tervek jellemzően tartalmaztak az elönthető területekre vonatkozó ábrázolásokat, ilyen található az 1945-ös budapesti védvonal térképeken is. Ebben az időszakban a mértékadó árvízszint meghatározása is teljesen más alapon állt, a legmagasabb árvízszintnek az 1876-os jeges árvíz burkológörbéjét tekintették (867 cm a Vigadó téri vízmércén). Sajátos módon lényegében ez a vízszint öröklődött át a későbbi, immár valószínűségi alapon meghatározott mértékadó árvízszintekre, amelyek 2010-ig voltak hatályban.

A Duna Atlasz 1970-es elkészülte során ugyancsak készült elöntést bemutató térkép, amely feltüntette az 1 % és a 0,1 % valószínűséggel előforduló árvíz esetén kialakuló vízborítást.

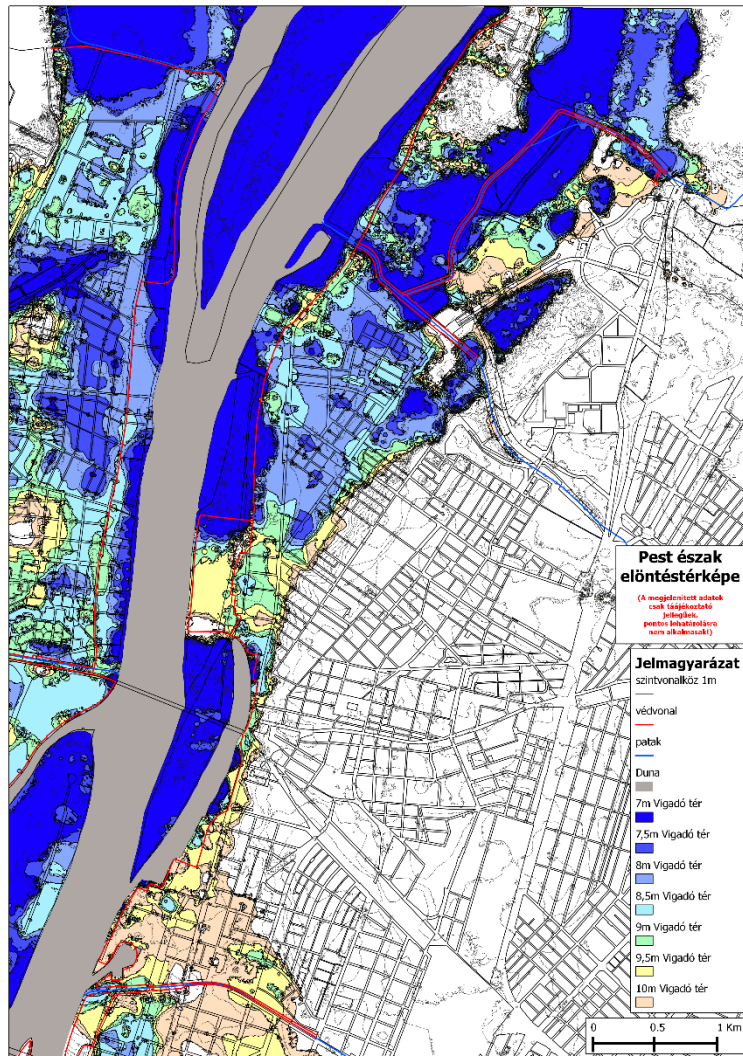
A számítástechnika alkalmazását megelőző korszak utolsó ilyen célú térképezése a Fővárosi Önkormányzat megrendelésére 1995-ben készített lokalizációs terv volt (FŐMTERV Zrt.).

A Duna vízfelszínének MÁSZ-tól eltérő nagyvízi jellegét ismerve az FCSM Zrt.-nél már 2012-13-ban felmerült az igény egy korszerűbb elöntési térkép kialakítására. A térképet statikus állapotra az FCSM Zrt. Ár- és Belvízvédelmi Osztálya készítette el, részben az elérhető űrrepülőgépről készített radar felvételezés domborzat modelljének felhasználásával, amelyet – ahol erre lehetőség volt – az FCSM Zrt. csatorna fedlapmagasság adatbázisának felhasználásával egészítettek ki. A térkép olyan színezésben készült, amely az elöntés bekövetkezését ábrázolja a Vigadó téri vízmérce vízálláshoz kódolt színezéssel (2.).

A 2013-as, minden addigit meghaladó jégmentes dunai árvíz következtében a mértékadó árvízszint meghatározása új, hidraulikai alapokon, a mért vízfelszínhez kalibráltan megtörtént, és jogszabályban az előírás 2014 végén jelent meg.

Az árvízi kockázatkezelési térképezés során 2016-ban Budapest árvízvédelmi öblözeteinek vizsgálatára is sor került, amely kapcsán a kárbecslés értékelésére és a fejlesztési igények számszerűsíthető alátámasztása érdekében készült elöntési térkép. Ez a térkép ugyanakkor nem lehetett alapja a lokalizációs tervezést megalapozó térképezésnek, mert felbontása és peremfeltételei erre nem tették alkalmassá.

A 2013-as árvízvédelmi tapasztalatok alapján számos intézkedés történt az érintettek, így a főpolgármester és munkatársai, valamint az operatív védekezést biztosító FCSM Zrt. apparátusa részéről. Ezek javarészt a védelmi rendszer kijavítását és megerősítését célozták elsődlegesen, majd a teljes védvonalrendszer felmérését és fejlesztési lehetőségeinek félvázolását a továbbiakban. 2018-ban végül a főpolgármester árvízvédelmi felkészülési tevékenység keretében elrendelte az árvízvédelmi tervek, így az elöntési tervek felülvizsgálatát. E munka keretében az FCSM Zrt. részéről olyan szakmai tartalom meghatározására került sor, amely a kor technológiai lehetőségeinek megfelelő, számos cél kiszolgálására alkalmas hidrodinamikai alapokon kidolgozandó elöntési modellt készített. Tekintettel a szakmai felkészültségre és referenciákra, a feladat kidolgozására az FCSM Zrt. a HYDROinform Bt.-t kérte fel.



2. ábra: Pest-Észak terület előntési térképe 2012-13, FCSM Zrt.

2. A dinamikus előntési modell készítése

2.1. A modellezés előfeltételei

A szimuláció kivitelezése során három lényeges pillérre kellett koncentrálni:

1. a szimuláció térinformatikai megalapozására,
2. a szimuláció peremfeltételeinek definiálására és előállítására,
3. a numerikus hidraulikai modell felépítésére.

A szimuláció térinformatikai megalapozásához mindenképp elő kellett állítani a célterület digitális domborzati modelljét (DDM). Ahol szükséges volt, ott a még hiányzó adatok forrásait kellett feltárni, vagy meg kellett tervezni a hiányok elhárításának egyéb módját. Majd fel kellett mérni a vízterelő objektumokat (épületek, hídlábak, töltések, stb.), és ezeket be kellett építeni a DDM-be. A DDM e feladatban áramlási tér, amellyel kapcsolatban arra is kellett gondolnunk, hogy a szimulációs szoftvernek az adatigényéhez biztosított legyen a megfelelő csatlakozás. E körben már itt figyelembe kellett venni, hogy a szoftver miként kezeli a vízterelő objektumokat, felszíni struktúrákat, avagy, a gyorsabb numerikus végrehajtás érdekében hogyan lehet a numerikus gridek számát csökkenteni, stb. Az áramlási tér digitális érdességi modelljének tervezése kapcsán a legmegbízhatóbb, és szabadon hozzáférhető forrásadatok megkeresése is feladat volt.

2.2. A térinformatikai adatok és azok feldolgozása

A szimuláció kivitelezéséhez számba kellett venni a rendelkezésre álló térinformatikai állományokat, vizsgálva azok alkalmazhatóságát. A felhasznált adatok körét a mutatja be az 1. táblázat.

1. táblázat: A térinformatikai adatok forrása és felhasználási területei

Megnevezés	Forrás	Felhasználási terület
Lidar DTM	FCSM	DDM előállítás
Lidar DTM javítás	FCSM	DDM Boráros téri hibájának javítása
Védvonalak	FCSM	vízterelő objektum a DDM-ben és a HEC-RAS modellben, 1D-s és 2D-s modellt összekapcsoló „lateral structures”; térképi ábrázolás
Öblözetek	FCSM	öblözetek lehatárolása; térképi ábrázolás
Szakadási pontok	FCSM	szakadási helyek megjelölése a HEC-RAS modellben; térképi ábrázolás
Kerülethatárok	FCSM	vizsgálendő terület kijelölése; térképi ábrázolás
Előntés feltételezett maximális kiterjedése	FCSM	vizsgálendő terület kijelölése; térképi ábrázolás
Egyedi hidak	FCSM	DDM korrigálása
M0 átereszei	FCSM	DDM korrigálása
Sodorvonal	FCSM	1D modellgeometria felépítése
Sodorvonal fkm	HYDROInform	1D modellgeometria felépítése
Duna	FCSM	Duna poligonja DDM felépítéséhez; térképi ábrázolás
Lidar felmérés - épületek	FCSM	Épületek helye a DDM-ben és a HEC-RAS modellben
Lidar felmérés - alacsony növényzet	FCSM	Alacsony növényzet lehatárolása a területhasználat fedvényben az áramlás érdességi modelljéhez
Lidar felmérés - közepes növényzet	FCSM	Közepes növényzet lehatárolása a területhasználat fedvényben az áramlás érdességi modelljéhez
SRTM 30m domborzatmodell	Shuttle Radar Topography Mission	DDM (tározók) előállítás
OSM szabad felhasználású rétegek - épületek	OpenStreetMap	Épületek helye a DDM-ben és breakline a HEC-RAS 2D modellben
OSM szabad felhasználású rétegek - úthálózat	OpenStreetMap	vízterelő objektum (breakline) a HEC-RAS 2D modellben, területhasználati fedvény pontosítása; térképi ábrázolás
OSM szabad felhasználású rétegek - vasúthálózat	OpenStreetMap	vízterelő objektum (breakline) a HEC-RAS 2D modellben; térképi ábrázolás
OSM szabad felhasználású rétegek - területhasználat	OpenStreetMap	Területhasználatok lehatárolása az áramlás érdességi modelljéhez
OSM szabad felhasználású rétegek - vízfelület	OpenStreetMap	Területhasználatok lehatárolása az áramlás érdességi modelljéhez
Urban Atlas	Copernicus Land Monitoring Service	Területhasználatok lehatárolása az áramlás érdességi modelljéhez
Corine 2012	Copernicus Land Monitoring Service	Területhasználatok lehatárolása az áramlás érdességi modelljéhez
Hajóút kitzzési terv	FCSM	Mellékágak DDM-be illesztése
Hajóút kitzzési terv	KDVIÍZIG honlap	Mellékágak DDM-be illesztése
Folyamtérkép	FCSM	Mellékágak DDM-be illesztése
Duna keresztshelvények	HYDROInform	Duna főmeder DDM-be illesztése, 1D modellgeometria felépítése

A modellezéshez rendelkezésre állt a 2016-17 során készített nagyfelbontású légi LIDAR felvétel, amely révén a feladatban érintett terület nagy pontosságú DDM-jének előállítására sor kerülhetett. Felhasználásra kerültek egyéb, nyílt hozzáférésű térinformatikai adatbázisok, így az OpenStreetMap, SRTM, Copernicus Land Monitoring Service Urban Atlas és Corine adatbázisai, de a nyilvánosan elérhető folyami térképek is. Az adatok feldolgozása a parti területeken 1x1 méteres rasterekben történ, a folyam és mellékágai tekintetében – egyéb megfontolások mellett, amelyekre a továbbiakban kitérünk – 100 m-es keresztshelvény felvételek révén készült.

A térinformatikai adatok feldolgozása során figyelembe kellett venni a vízterelő objektumokat, amelyek a későbbiekben a hidraulikai modellezés során is figyelembe veendőek voltak. A végleges áramlási modell előállításának megtervezése során a HEC-RAS modellező szoftver adottságait is tekintetbe kellett venni. Többek között figyelembe kellett venni, hogy a szoftver hogyan kezeli a vízterelő objektumokat, felszíni struktúrákat, avagy, a gyorsabb numerikus végrehajtás érdekében hogyan lehet a numerikus grillek számát csökkenteni, stb. Az áramlási tér digitális érdességi modelljének tervezése kapcsán a legmegbízhatóbb, és szabadon hozzáférhető forrásadatok megkeresése volt a feladat.

Az elárasztás lehetséges kiterjedése alapján a modellezésbe vont terület, és ezzel a számítási igény is nagymértékben csökkenthető volt. Az áramlási tér véglegesítéséhez a DDM kiegészítésére is szükség volt. Az áramlás elsődlegesen a városi területen az utcák által definiált csatornák hálózatán történik. E hálózat leírása csak úgy történhetett meg, hogy az áramlási térben található épülettömböket egy adatbázisból átvettük, majd a tömbök kontúráját vízét át nem eresztő vonalként definiáltuk a hidraulikai program számára. Ez a megközelítés a biztonság javára történő közelítést tartalmaz, hiszen a víz akár át is áramolhat bizonyos épületrészekben. valamint az egyes vízzel feltelők helyiségek tározása a lefolyást bizonyos mértékben befolyásolja. Mindazonáltal, hogy az épülettömbökben nem vesszük figyelembe az áramlásba, ez maga után vonja, hogy az elöntés kiterjedése és az elöntési térben kialakuló sebességek is magasabb értékekkel mutatkoznak meg a modellezés során, mintha figyelembe vettük volna. Az épületek az OpenStreetMap adatbázisa alapján kerültek feldolgozásra. Az egyes külön elönthető öblözetek a városi közműrendszerek révén kapcsolatban lehetnek egymással. Az ilyen összeköttetések feltérképezése csak részlegesen volt lehetséges, alapvetően a gravitációs csatornákra vonatkozóan. A vonatkozó előzetes vizsgálat szerint a csatornák vízátervezése nem okoz jelentős felszíni elöntési veszélyeztetést, de a kérdés további vizsgálata szükséges lehet.

A geodéziai adatok térinformatikai feldolgozása során lényeges kérdés volt az olyan felszíni létesítmények megfelelő modellezése, amelyek vízátervezési tulajdonságai ismertek és lényegesek. Ilyenek a Duna árvízének hatásterületén található patakok hídjai, amelyeken a víz átbocsájtása a természetben biztosított, de a DDM nyers állapotában ezek jellemzően „átjárhatatlanok”. Ugyancsak hasonló kiigazítás volt szükséges például a városban található vasúti töltésekben kialakított hidak esetében.

Azon területek esetében, amelyek az áramlási modell szempontjából lényegesek voltak, de a LIDAR felmérésben nem szerepeltek, a végleges DDM-et az SRTM modell átskálázott adataival egészítettük ki.

Az áramlási tér hidraulikai paraméterezésének előállítása a térinformatikai adatokon nyugodott. Az érdesség becsléséhez a LIDAR, OpenStreetMap, UrbanAtlas és Corine2012 adatbázisok felhasználására is sor került.

2.3. A szimulációhoz felhasznált szoftverek

A terepmodell elkészítésére az ArcGIS került felhasználásra. Ugyancsak e csomag keretében lettek definiálva az olyan vízterelő elemek, amelyek figyelembevételére a hidraulikai modellezés során szükség volt.

A hidraulikai modellezéshez az alvállalkozó (HYDROInform Bt.) a HEC-RAS 5.0.3. 2D szimulációra is alkalmas szoftverét használta, melyet egy speciális, kifejezetten ebből a célból tervezett és felépített szuper-workstationon futtatott. A 12 magos, magonként akár 5.2 Mhz-re is képes Intel Core i-9 -es processzorral, és speciális folyadékhűtéssel ellátott számítógép párhuzamos futtatásban egyszerre 3-4 projekt egyidejű futtatására is képes volt.

2.4. A szimuláció peremfeltételeinek definiálása és előállítása

A lokalizációs tervek dinamikus elöntési modellezésének célja az elöntés időbeni lefolyásának (dinamikájának) a vizsgálata, a felételek mentén kialakulható sebességek modell alapú jellemzése, és

az elöntés dinamikájának (időbeni terjedésének) reális, fizikai alapokon alátámasztható becslése. A modellezés során két öblözeti kategóriát kellett megkülönböztetnünk. A geometriai értelemben jól körülhatárolható, kis kiterjedésű öblözeteket zártak, az olyan öblözeteket, amelyekben a szétterülő víz nagy területre terjedhet ki, akár a főváros területét is elhagyva, nyílt öblözetnek nevezzük a továbbiakban. A megkülönböztetésnek a modellezés szempontjából lényeges szerepe van. Míg a zárt öblözet elöntése numerikusan viszonylag egyszerűen kezelhető, időben behatárolt folyamat, addig a nyílt, jelentős kiterjedésű öblözetek esetében a feltöltődés, illetve a kijutott víz terjedése jelentős modellezési időt vesz igénybe, ugyanis mivel a statikai egyensúly szinte sohasem áll be, ezért az elárasztási terület növekedésével a numerikus gridek száma is növekszik, amellyel aztán exponenciálisan növekszik a számítási időigény is. A modellezési folyamat kézbeartásához (az időbeli befejezhetőség érdekében) az elöntés realiztikus peremfeltételeinek meghatározása szükséges

2.4.1. Hidrológiai peremfeltétel

A hidrológiai peremfeltétel alatt a Duna modell időszakban kialakuló vízállása tartozik. A Duna vízállásának felvétele során kétféle megközelítés adódik.

Az első megközelítés az időben állandó, permanens állapot feltételezése lehetne. Ebben az esetben az elöntés fejlődésének vizsgálatára folyamatos, állandó szinten megvalósuló vízkiáramlás mellett kerülne sor. Ennek a megközelítésnek egyértelmű ellenjavallata a budapesti nyitott hullámterek problémája, amely miatt pl. a pesti oldalon a víz a Pesti síkság irányában korlátlanul tovább képes elfolyani.

A második megközelítés az időben változó dunai vízállások melletti kiömlés, illetve elöntés vizsgálata, amely a természetben lejátszódó folyamatot jól követi. Ennek során a kiáramló víz mennyiségét nagyban befolyásolja a Duna feltételezett vízállása.

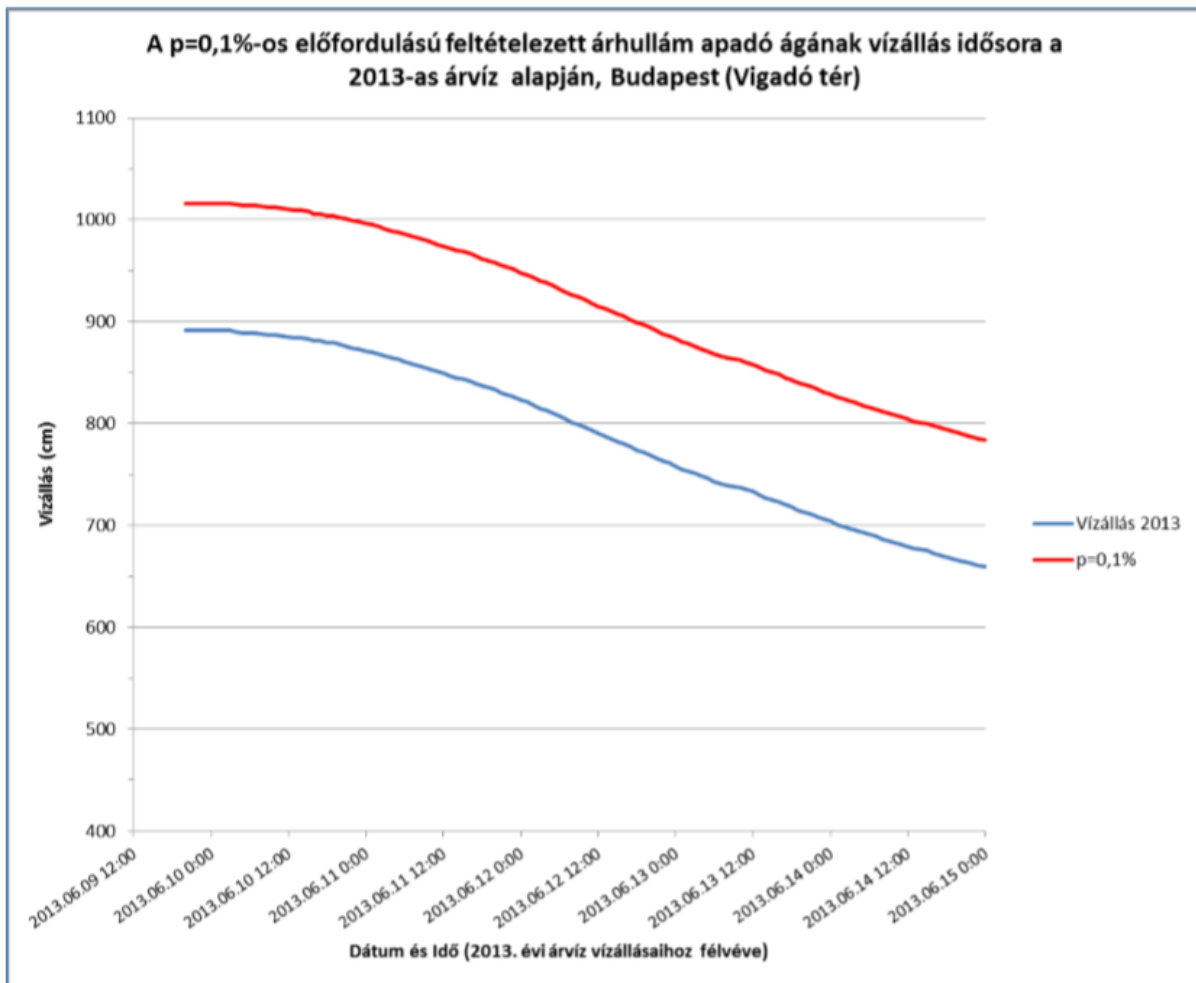
A vizsgálatot a változó dunai vízállások feltételezésével folytattuk le.

A hidrológiai peremfeltétel részét képezi a mértékadó árhullám kiválasztása is. Az elöntés vizsgálatát az 1000 évente átlagosan egyszer előforduló árvízszinttel tetőző árhullám felvételével hajtottuk végre, 1016 cm tetőzési vízállással a Vigadó téri szelvényre vonatkoztatva. Mivel ilyen nagy árhullám időszora az eddigi tapasztalatok alapján nem áll rendelkezésre, feltételezéssel kellett élni. A modell árhullám karakterisztikáját a budapesti szelvényben a 2013. évi jelenleg ismert jégmentes legnagyobb vízállást (LNV-t) adó árhullámával egyezően vettük fel, azt a 891 cm-es tetőzésről függőleges értelemben eltolva.

A feltételezés megfelelősége elvi megfontolásokkal igazolható az alábbiak szerint:

- a várható árvíz jégmentes lesz, azaz a kialakuló vízállás alapvetően a vízhozamtól függ,
- az igen magas vízállások tartóssága egy-egy árhullámon belül egyre kisebb,
- az igen magas vízállás mellett bekövetkező tetőzés előtti időszakot hevesen áradó, az azt követőt pedig gyorsan apadó vízállások jellemzik.

Az előbbi feltételezések alapján a 2013-as 891 cm-es tetőzéshez képest egy feltételezett 1016 cm-es tetőzés igen gyors bekövetkezéssel, a 2013-as árvíz alkalmával észlelt áradás és apadás intenzitásával azonosan, vagy annál hevesebb módon következhet be az előbbi várakozás szerint. Ez azt jelenti, hogy amennyiben a 2013-ban észlelt vízállásváltozásokat a 891 cm-ről az 1016 cm-re toljuk el, a lehetséges árhullámképek közül egy szélsőségesen kedvezőtlen (tartós) alakot veszünk fel. Ez várakozás szerint a biztonság javára történő eltérést épít a modellbe.



3. ábra: A $q=0,1\%$ -os előfordulású feltételezett árhullám apadó árának vízállás idősora a 2013-as árvíz alapján, Budapest (Vigadó tér)

Az elöntés fizikai kialakulása jelentős mértékben függ a feltételezett védvonali szakadások jellegzetességétől. Ebben a körben nemzetközileg is kevés tapasztalat áll rendelkezésre, így leginkább műszaki becslésekre hagyatkozva kerülhetek/kerültek meghatározásra a szakadások karakterisztikái. Az elöntés kiterjedése szempontjából nem lényegtelen a szakadási helyek kijelölése. Ahhoz, hogy a legnagyobb elképzelhető elöntés alakulhasson ki, a szakadási helyeket az egyes öblözetek felvízi végénél kellett felvenni. Ebben az esetben az öblözet alvízi szakaszánál kialakuló vízszintnél magasabb (a legmagasabb) lehetséges vízszinttel lehet számolni az öblözetben belül, így a scenárió szerint az elöntött terület a lehető legnagyobb lesz.

A szimuláció peremfeltételei közé tartozik az is, hogy az egyes scenáriók során mely pillanatban állítható meg számítási folyamat. Erre azért van szükség, mert egyrészt a víz kiáramlása állandó vízszint mellett is lehet végtelen, amennyiben az öblözet alvízi irányban nyitott és a víz kvázi korlátlan mennyiségben tud kilépni a modellezett térrészből, másrészt a vízutánpótlás megszűnésével is maradhatnak áramlások egy egyre inkább szétterülő elöntésben, amely bár lassan mozoghat is, további műszaki szempontból releváns megállapítások levonására már nem alkalmas. A jelen fejezet e kérdések modellezés során figyelembe vett eljárásait mutatja be.

Az árhullámkép meghatározását követően a feltételezett szakadás időpontjának felvétele szükséges. A modellben ez a 1016 cm-es vízállás bekövetkezésére, a tetőzés időpillanatára lett időzítve, sikeres védekezést feltételezve a tetőzésig, ahol a feltételezett szakadás bekövetkezik, és az apadó ágon a

szakadás állandó nyílással fennáll. Ez a hidrológiai peremfeltétel a hullámtérre kijutó víz mennyiségét korlátozza, amennyiben a zárt öblözetek feltelnek a lehetséges kiegyenlítési szintig, majd a Duna felé leürülnek a domborzat adta lehetőségeknek megfelelően. A modellezés során 15 szakadási hely vizsgálatára került sor a fővárosi 30 km-nyi folyamszakaszon, így az árhullámkép mellett a vízfelszín leírására is szükség volt.

Ahhoz, hogy a mértékadó Vigadó téri vízmércétől távolabb feltételezett szakadásokon a kiáramló víz modellezhető legyen szükséges volt a vízfelszín helyi modellezése. Ezt oly módon került modellezésre, hogy a 2013-ban kimért hossz mentén tetőzéskor észlelt – és kiegyenlített - vízszintek függőleges értelemben el lettek tolvá. Ez a közelítés nem veszi – nem veheti – figyelembe azokat a folyamhidraulikai körülmények miatt kialakuló duzzasztásból vagy leszívásból kialakuló hatást, amely abban nyilvánulhat meg, hogy a Vigadó téren észlelt 1 cm vízállás növekedés a folyószakasz távolabbi részein ennél több vagy kevesebb lehet. Ez több tíz centiméteres vízállás változás mellett halmozódhat. Ennek az eltérésnek a becslése a jelen projekt keretében nem volt lehetséges, ilyen vízállás kialakulására mindeddig nem volt példa, és emiatt validálhatatlan lenne bármilyen feltételezés. A további vizsgálatok során ez a téma finomításra szorul, és az új validált felszín görbe ismeretében az előntési modellezés is tovább pontosítható.

2.4.2. A szakadási helyek karakterisztikája

A szakadási helyek kijelölésére annak a megfontolásával került sor, hogy a szakadással a lehető legnagyobb terület előntése következhesse be. E tekintetben el kellett szakadni attól a műszaki feltételtől, hogy a védmű az adott szakadási helyen milyen állapotú és valójában mekkora a szerkezet biztonsága, legyen az földmű vagy árvízvédelmi fal. A szakadások két típusba lettek sorolva, töltéses és magasparti karakterisztikával.

1. A töltéses szakaszokon kialakuló szakadások esetén 30 m széles szakadási nyílás kialakulásával számoltunk, amely kopolyát – a szakadás helyénél kialakuló több méter mély kimosódást - nem alakít ki, és amely nyílás téglalapszelvényű. A nyílás teljes kialakulásának időtartama a modellben az átfolyás megkezdődésétől számított 30 perc. Ezek egyike a Csillaghegy elnevezésű pont, ahol a minimálszelvényt jelentősen meghaladó méretű, szerkezetes (a modellben jétfallal ellátott) töltés található (a modellezés óta itt szádfalazás kialakítására került sor). A szerkezet akadályozza a szakadás szélesedését és kopolya kialakulását. Másik ilyen jellegű pont a Káposztásmegyér jelű, amely esetében ugyan a minimálszelvénynek kb. megfelelő méretű földtöltés található, amely szakadása esetén az alacsony térszín miatt akár kopolya is képződhetne, de a hozzáfolyást a Mogyoródi-patak és a Szilas-patak medre (a patakok medrének korlátozott vízszállítási kapacitása) korlátozza. A kiömlő víz hozama az előbbieket miatt várhatóan nem elégséges a kopolya jelentős mélyítéséhez, másrészt itt korlátos alacsony ártér található, amelynek feltöltődése miatt hamar alvízi befolyásoltság alakul ki, így csökken a víz eróziós hatása. A harmadik az Albertfalva-Dél jelű szakadási pont, ahol 4 m koronaszélességű, a minimálszelvényénél kisebb szelvényű töltés található. A mentett oldal alacsonyabb része hamar feltöltődik, így az erózió hatás kialakulása alacsony valószínűségű. A negyedik az Újpest-Megyér töltés, amelynél az alacsony ártér limitált térfogata miatt ugyancsak jelentős alvízi hatás alakulna ki igen hamar.

2. A magasparti magasításon és árvízvédelmi falon kialakuló szakadások esetében a szakadás szelvénye téglalap formájú, és kopolya képződéssel itt sem kell számolni (elsősorban a feltételezett térburkolatok miatt). A szakadás legnagyobb szélességét ebben az esetben 100 m-ben határozzuk meg. A szakadás teljes kifejlődése 15 perc alatt történik meg. A jelenség a természetben valószínűleg több időt vehet igénybe, árvízvédelmi falak esetében minden bizonnyal jelentős többlet biztonságot tartalmaz ez a megközelítés. A kifolyás leírt módját az alábbiak feltételezései (peremfeltételek) mégis indokolják:

- A városi területen feltételezhető olyan terepi akadály, amely miatt a szakadás szélesedése megáll.

- A szakadás szélesedésének esélyét csökkenti az is, hogy amennyiben keskenyebb mentett oldali területsávra szakad ki a folyó vize, a kitörő víz a keskeny sáv (parti sétány, utca) Dunától távolabbi széléről a víz „visszaverődik”, visszaduzzad, így a szakadás fejlődése csökken, majd megáll. A meginduló víz előbb nagy intenzitással bontja a szerkezetet, majd ez a kitört víz okozta alvízi befolyásolás miatt jelentősen csökken, így a nyílás szélesedése megáll. Ezen állapot kialakulását 15 percre becsüljük.

2.4.3. A numerikus modellezés befejezésének kritériuma

A numerikus modellezést célszerűen be kell fejezni valamely ponton. Erre az alábbi kritériumok szolgálták a modellezés során.

- Áramlási kritérium. A kiömlő víz előbb-utóbb nyugalomba kerül, a sebesség értéke lecsökken. Várhatóan még hosszabb ideig lehet alacsony, cm/s nagyságrendű sebesség a területen, de ez már kvázi nyugalmi állapotot jelent. Ez az állapot a futattási scenáriókban 10 cm/s-ban lett meghatározva. Emellett a befolyás (vagy kifolyás) áramlási sebessége mutatja, hogy van-e még töltődés (vagy azzal egyenértékűnek tekinthető átfolyás), vagy már nincs, illetve nem számottevő.
- Kiterjedési kritérium. Zárt öblözetek esetében a kiterjedés korlátos, mind a hidrológiai határfeltételek, mind a domborzati adottságok miatt. Ebben az esetben vizsgálható a kiterjedés mértékének állandósulása, vagy éppen csökkenése, amennyiben a víz vissza tud jutni a Dunába a szakadási nyíláson át. Nyílt öblözeteknél ez a kritérium nem értelmezhető pontosan, mert a víz távolabbra is eljuthat a korábbiakban leírtak szerint, miközben utánpótlódása akár már nincs is.

A modellezési tapasztalat azt mutatta, hogy a 4. napon a víztér már egyrészt bizonyosan nyugalomba került, vagy épp visszaáramlásra került sor, illetve a nyíláson megszűnt a vízkiáramlás. A vizsgálat során így a 4 napos -96 órás – szimulációs idő volt a leghosszabb.

2.4.4. A numerikus hidraulikai modell felépítése

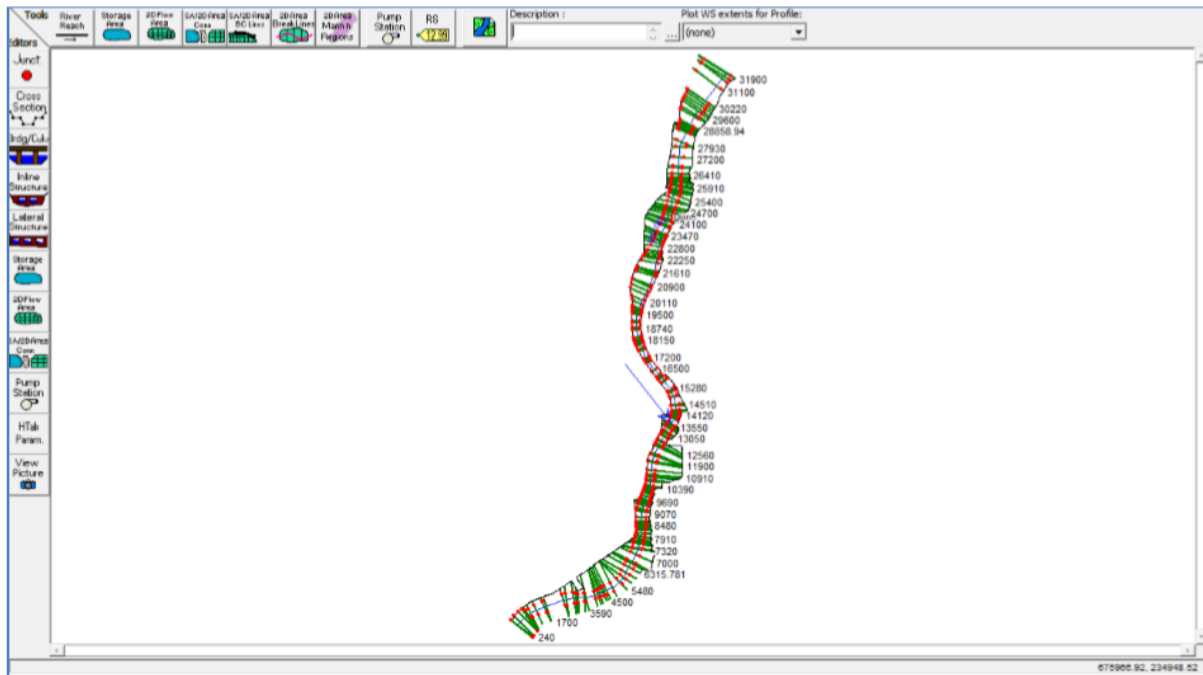
A szimulációkhoz használt modell felépítését alapvetően meghatározta az, hogy

- az előntések szimulációjánál nem zárt (tehát adott kontúrvonallal körülhatárolt) öblözetek kerültek kijelölésre, hanem a víz nyílt ártéren is áthaladhatott,
- az előntések szimulációja során mindig csak egy szakadás került figyelembevételre, így a budai és a pesti oldal külön modellben volt reprezentálható. A kétdimenziós modell térbeli felbontását finomabbra vehettük, ezért a hidraulikai számítás hálójának átlagos él szélessége 7 méterben lett megállapítva, ami a budai oldalon 994229 darab cellát, a pesti oldalon pedig 1703461 darab cellát eredményezett. Ez a futási idő szempontjából sokkal kedvezőbb helyzetet jelentett, hiszen elegendő volt két relatíve kisebb modell futtatása.
- a modellnek képesnek kellett lennie a szakadási helyeken kiömlött víz visszafolyatására a Duna medrébe bárhol a teljes budapesti folyószakasz mentén, így csakis egy egy- és kétdimenziós modell összekapcsolásával létrehozott modellgeometria jöhetett szóba a szimulációk elvégzéséhez. Az egy- és kétdimenziós modell összekapcsolása viszont szükségessé tette a Duna beépítését is a modellbe, amire a tisztán 2D-s esetben nem lett volna szükség. A Duna beépítése szükségessé tette az egydimenziós modell peremfeltételeinek előállítását, annak kalibrálását.
- a nagy pontosságú felmérésen alapuló terepmodell felépítésre Budapest határáig állt rendelkezésre LIDAR adat.

2.4.5. A Dunai egydimenziós modell

Az összekapcsolt egy- és kétdimenziós modellgeometria felépítésének első lépése az egydimenziós modell elkészítése volt. Ennek alapja a Danube Floodriks projekt során a HYDROInform Bt.

rendelkezésre bocsátott dunai keresztmetsvények, illetve a folyó sodorvonalának shapefile-ja jelentette (4.). Az egydimenziós modell a Duna egy 31.89 km hosszú szakaszát fedi le az 1628+900 és az 1660+790 Fkm között, 268 darab keresztmetszénnyel, reprezentálva a folyószakasz minden jelentősebb változását. Minden felvett szakadási hely középpontjánál keresztmetszvény lett felvéve a modellben.



4. ábra: A budapesti Duna szakasz projekt során alkalmazott 1D modellje

2.4.6. A kétdimenziós ártéri modell

Az ártér modellezésére kettő kétdimenziós modell készült, külön a pesti és a budai oldalra. A modellek előállításánál olyan cellaméretet választottunk, amely mellett ésszerű futásidő mellett a maximális információt kapjuk a domborzatról. A cellaméretet 7 m-es átlagos értékben vettük fel.

Annak érdekében, hogy olyan terepminták is megjelenjenek a modellben, amelyek nem rajzolódna ki a 7 m-es cellaméret mellett, a HEC-RAS un. breakline-jait használtuk. A Breakline elemek a vízterelésben aktív szereppel rendelkező felszíni létesítmények modellezésére alkalmasak, így töltések, épületek, vasutak határoló vonalai ábrázolására például.

2.4.7. Az egy- és kétdimenziós modell összekapcsolása

Az egy- és kétdimenziós modell összekapcsolására a HEC-RAS un. Lateral Structure objektumai adnak lehetőséget. Ezek a folyásiránnyal párhuzamos műtárgyakat reprezentálnak. A szoftver az egydimenziós modellből ugyanis csakis akkor enged oldalirányú kifolyást, ha adott keresztmetszvény legszélső pontján ilyen objektum van megadva. A HEC-RAS-ban a töltésszakadás szimulációjához is ugyanezeket az elemeket kell alkalmazni.

Az egy- és kétdimenziós modellek az elsődleges védvonalak mentén lettek összekapcsolva, biztosítva, hogy azok teljes hossza mentén. A Duna felől a védvonalakon át csakis a megadott szakadási helyeken volt lehetőség arra, hogy a víz kifolyjon a mentett oldalra, mivel a védvonalak magassági adatai úgy lettek megadva, hogy azok sehol sem lehettek alacsonyabbak a modellezett árhullám adott keresztmetszvényben kialakuló maximális vízszintjénél. Az ártér felől ugyanakkor a víz visszafolyhatott a Duna felé, ha meghaladta a vízszint a töltés magasságát.

2.4.8. Városon kívül eső területek hatásának kérdése

A domborzati modell alapját képező LIDAR adatok csak a főváros területére voltak elérhetőek, ennek megfelelően a kétdimenziós számítások hálóját is csak erre a területre korlátozódott. A védvonalak és öblözetek geometriája miatt ugyanakkor a városon kívüli területek is érintettek a feltöltődésben, illetve a víz továbbvezetésében, amennyiben a terep erre lehetőséget ad. Annak érdekében pedig, hogy a kifolyt víz ne „torlódjon fel” a főváros határán, olyan megoldást kellett találni.

Azon helyekre, ahol a víz szabadon eltávozhatott (alvízi irányban, a pesti oldalon), alsó peremfeltétel bevezetésére került sor a városhatár mentén. A jelenlegi feladatban a terep átlagos esésének megadását adtuk meg, és ennek révén a városhatárra elért víz eltávozott a rendszerből. Ezt a rendszert finomítottuk továbbá azzal, hogy nagytömegű víz eltávozása esetén a lefolyó víz visszaduzzasztó hatását is figyelembe lehessen venni. Ennek a követelménynek megfelelően a budai és a pesti kétdimenziós modell északi és déli oldalán a városhatár mentén szintetikus (tehát nem valóságos) tározókat építettünk a rendszerbe. Ezeket a tározókat a Linear Routing nevű módszer segítségével töltöttük. Az eljárás lényege az, hogy a tározó pereméhez elérő vízmennyiséget annak szabad kapacitása függvényében tölti a tározóba a szoftver. A Linear Routing alapegyenlete az alábbiakban kerül ismertetésre:

$$Q = K \times V_p / t$$

$$V_p = \Delta Z \times A(Z)$$

, ahol

Q: vízhozam

K: Linear Routing együttható (értéke 0.0 és 1.0 között lehetséges),

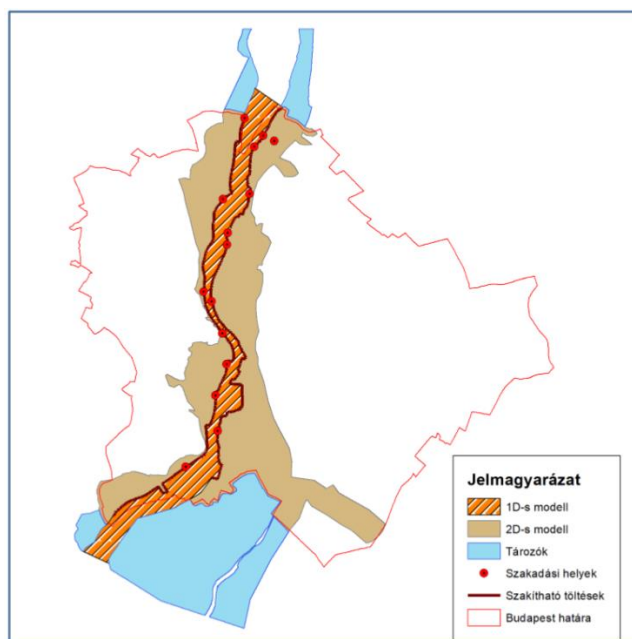
V_p : a tározó szabad kapacitása,

ΔZ : a tározó és a tározó pereménél fennálló vízszint különbsége

$A(Z)$: a képzetes tározó felülete a vízszint függvényében

A Linear Routing együttható tipikus értéke 0.05 és 0.2 között szokott lenni, azonban pontos meghatározásához kalibráció szükséges. Mivel jelen esetben nem álltak rendelkezésre a kalibrációhoz szükséges adatok, a modellezéshez a szakirodalom szerint ajánlott 0.05-ös értéket használtuk.

A fentieket figyelembe véve a szimulációkhoz egy olyan komplex modellrendszert építettünk fel, amely az egy- és kétdimenziós hidraulikai modellek, illetve tározók összekapcsolásából állt össze. Az elkészült modellkonceptiót a (5.) tartalmazza.



5. ábra: A modellkonceptió vázlata

2.5. A hidraulikai modell kalibrációja

Az 1D-s modell kalibrációjának célja, hogy adott felső és alsó peremfeltételek mellett találjunk az egydimenziós modellhez olyan reális érdességi viszonyokat, amelyek hatására egy megadott kontroll szelvényben a modell által számított vízállás adatok megegyeznek az ugyanott mértekkel. Jelen projekt keretében azonban erre az eljárásra nem volt mód, mivel olyan árhullámra történt a kalibráció, ami még soha elő sem fordult a Dunán (mióta mért adatokkal rendelkezünk). Ennek pótlásaként – közelítésként – a 2013-as árvíz során észlelt vízállás és vízfelszín párhuzamosan eltolt értékeiből indulhattunk ki. Alsó peremfeltételként a szakirodalomban is általánosan elfogadott normál mélységet alkalmaztunk, amelynek egyedüli adatigénye az egydimenziós modell legalsó szelvényének környezetében mérhető mederesés mértéke, amely a rendelkezésre álló adatok alapján az 1628+900 Fkm környezetében 14.3 cm/km volt.

Felső peremfeltételként a vízállást vettük fel. A kalibrációs szelvényben mért vízállást a Duna átlagos esésével (7 cm/km) feltöltük a felső peremfeltétel szelvényéig, majd a felső peremfeltétel vízállás idősorát addig finomítottuk, amíg a kalibrációs szelvényben meg nem kaptuk a mért idősort minden időlépésben 1 cm-es hibahatáron belül.

A folyamat eredményeképpen az alábbi ábrákon látható, megfelelően meggyőző pontossággal sikerült előállítanunk a kontroll szelvény vízállás sorát (6.).

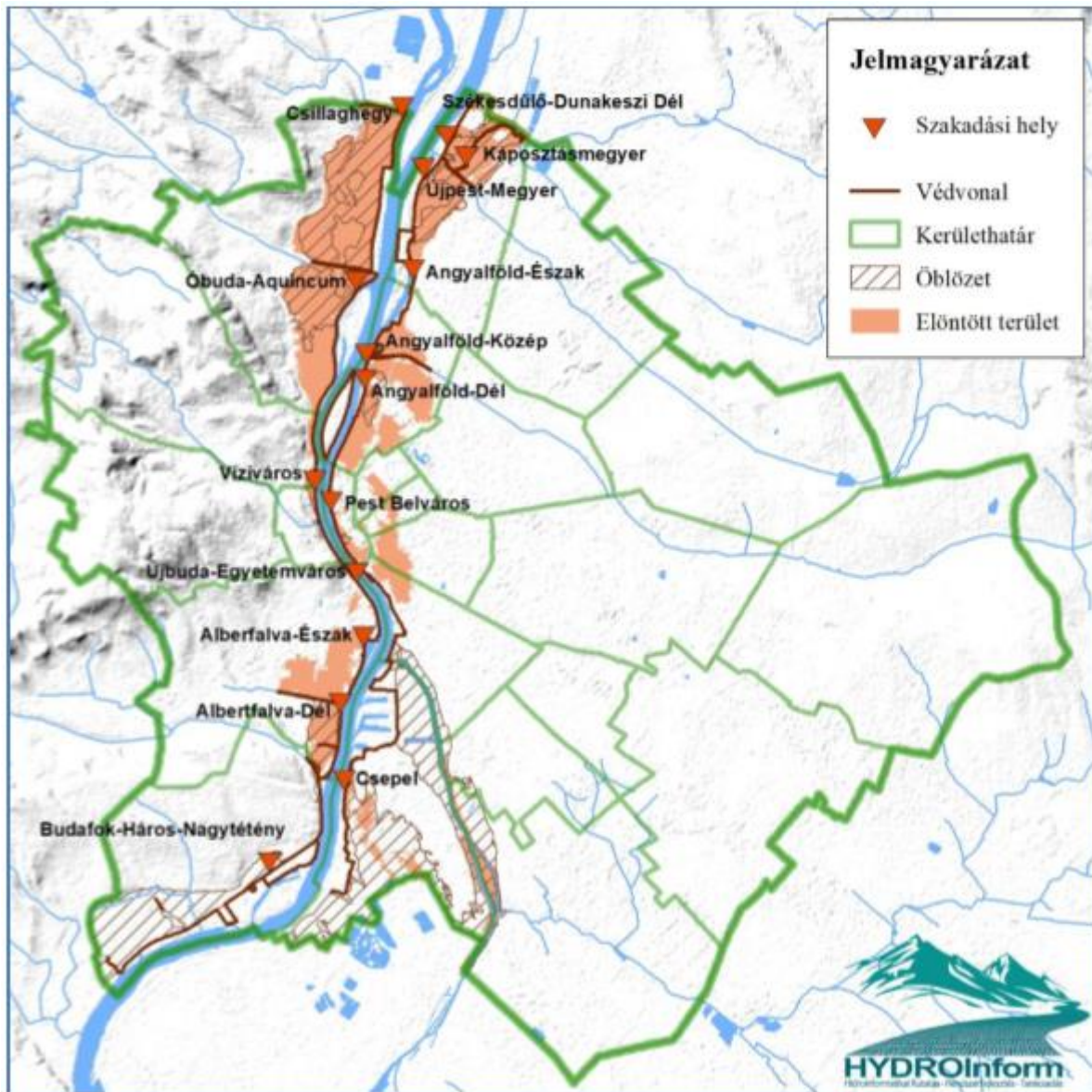


6. ábra: Az 1D modell kalibrációja: eltérések a mért és számított adatok között a futás időtartományában

A 2D-s modell kalibrációja mért adatok hiányában nem lehetséges. A rendszer megfelelő paraméterezését csak a szakirodalom szerinti átlagos érdességi együtthatók alkalmazásával igyekezhettünk biztosítani. Ezeket a publikált érdességi értékeket döntő többségében laboratóriumi tesztek alapján határozták meg. A projekt végrehajtása során az egyes felszínborítottságokhoz a szakirodalmi érdességi értékek középértékét választottuk ki.

3. A szimuláció eredményei

A szimulációk során összesen 15 helyen tételeztünk fel gátszakadást. A szakadási helyek térbeli elhelyezkedését, valamint a kialakult dimanikus modell alapján számolt előntési foltokat a (7.) szemlélteti.



7. ábra: A szimuláció eredményei - szakadási helyek és elöntési foltok

A szimulációk addig folytak, amíg az áramlási tér egy pontján sem volt mérhető 0.01 m/s-nál nagyobb sebesség. Amennyiben nem állt elő a kívánt sebességi helyzetet a töltésszakadástól számított 96 órán belül, a szimulációt a negyedik nap végén leállítottuk.

A szimulációk során több helyen megfigyelhetők voltak olyan esetek, hogy ugyan a Duna vízszintje már a szakadási szelvény legmélyebb pontja alá esett, a szimulációknak mégis folytatódniuk kellett. Ennek egyik oka lehetett, hogy a kifolyt víz – a domborzati viszonyoknak köszönhetően – a kritériumként rögzített 0.01 m/s-nál nagyobb sebességgel tudott még további területeken szétterülni azt követően is, hogy már nem kapott utánpótlást a mederből. Ugyanakkor, a 0.01 m/s-nál nagyobb sebességeket emellett okozhatta az is, hogy a mederből való táplálás megszűntével a víz a Duna felé kezdett visszaáramlani, és ennek sebessége meghaladta a leállítási kritériumként meghatározott sebességnagyságot.

Előfordultak olyan esetek is, ahol ugyan a vízszint alapján még lehetett volna után pótlódás a mederből, ennek ellenére a sebességek már nem mutattak nagyobb vízmozgást. Ennek oka a kifolyt víz visszaduzzasztó hatása, ami nem engedte, hogy szakadáson kifolyó víz hatással legyen a már kifolyt és elterült vizekre.

Az alábbiakban ismertetésre kerülnek a modellezett 15 szakadási hely elöntésének legfontosabb jellemzői.

A modellezés eredménye a fővárosi öblözetek elöntésének valóságú, időben és térben történő alakulását bemutató videók, valamint a vízmélység és az elöntés kiterjedésének szélsőértékeit szemléltető térképek jelentették. A projekt kapcsán elkészített modell a továbbiakban alkalmas lesz arra is, hogy a kezdeti feltételek alkalmas változtatásával tetszőleges helyen és vízállás figyelembevételével alapadatokat nyújtson lokalizációs művek tervezéshez, valamint a vészhelyzetben szükséges katasztrófavédelmi intézkedések meghatározásához.

Előadásunkban megfogalmazzuk a feladatot, áttekintjük a meglehetősen specifikus áramlási tér kialakítását, és annak végtermékét, majd végezetül bemutatjuk a szimulációk végeredményét.

A szimuláció eredményét a szimulációról készített jelentés tartalmazza, amelyhez a műszaki megoldás részletezésén (eljárások, kezdeti és peremfeltételek, kimenetek leírása) az eredmények térképes bemutatását tartalmazó kötet is készült.

A térképek többféle tartalommal kerültek előállításra, így bemutatják a

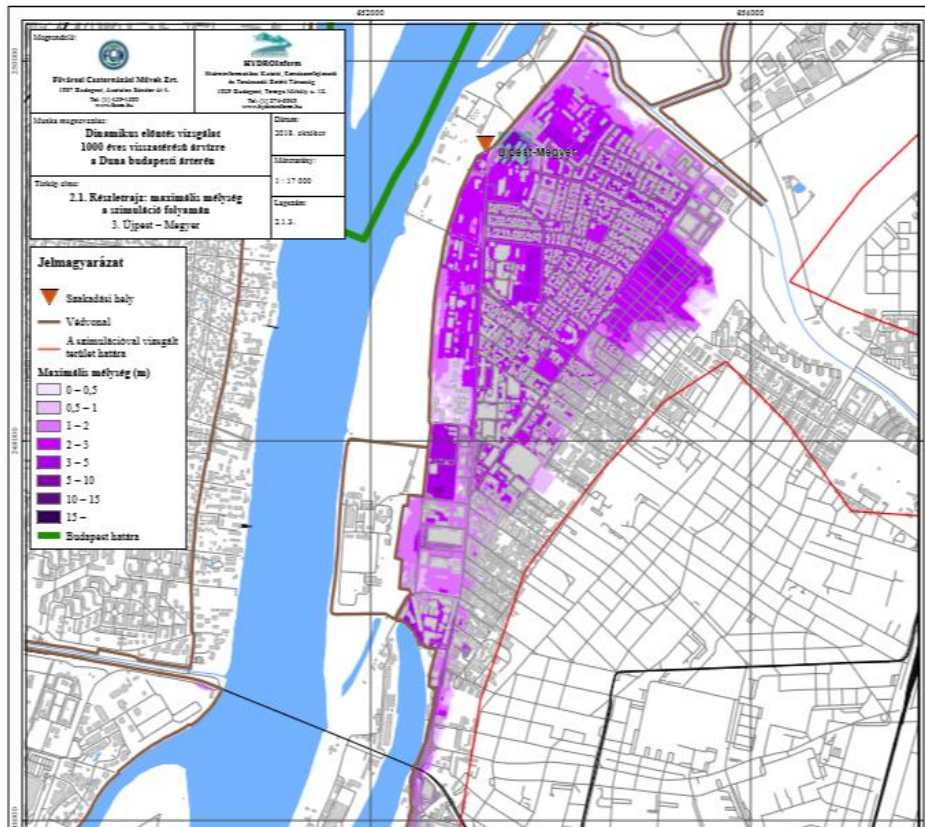
- a szimuláció során kialakult legnagyobb vízmélységet az elöntött területen (8.),
- a szimuláció során kialakult legnagyobb sebességet (9.),
- a szimuláció végén kialakuló vízmélységeket (10.).

Az eredmények ilyen megkülönböztetésére azért volt szükség, mert a feltöltődés során a vízmélységek értéke változhat, pozitív és negatív értelemben egyaránt. Pozitív értelemben a feltöltődés miatt magától értetődő a változás, a negatív értelem pedig abból a megfontolásból következik, hogy a modellezés során felvett szakadás apadó Duna figyelembevételével történt, így elképzelhető a modellezés végállapotában a menet közben kialakuló maximálisnál kisebb elöntési vízmélység is.

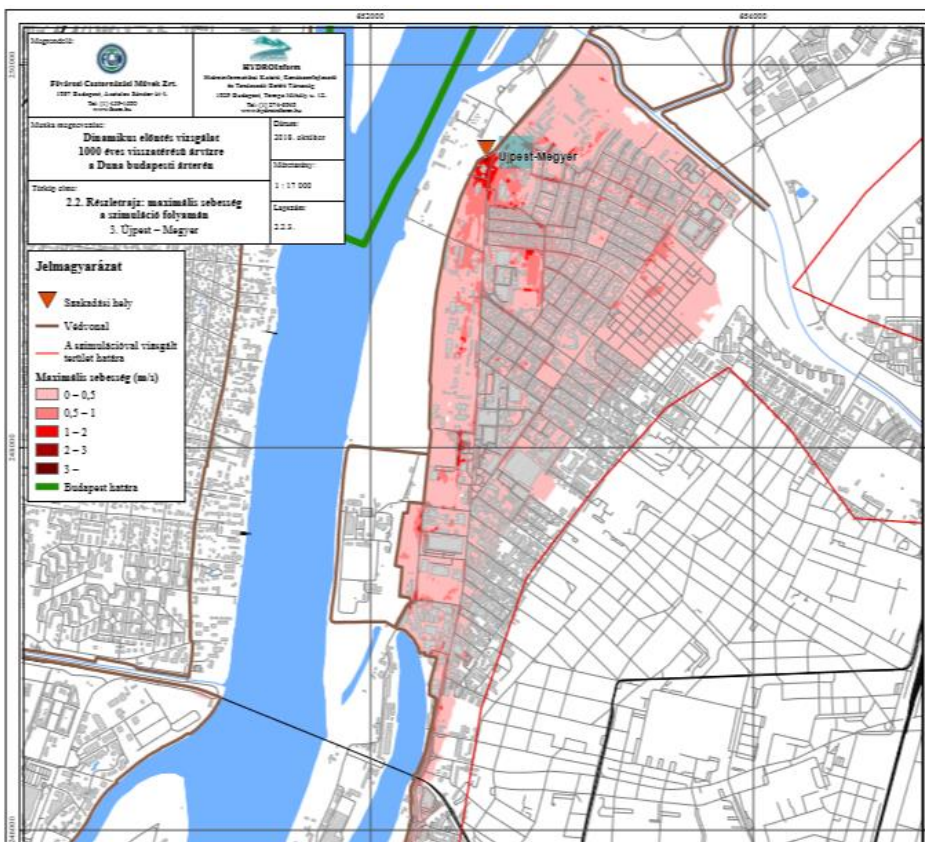
A legnagyobb sebességek kialakulása az esetleges mentési vagy lokalizációs feladatok tervezése során lehet hasznos a későbbiekben.

Az eredmények a nyomtatott változaton túlmenően nagyfelbontású, így háztömb szintig nagyítható pdf állományban elérhetők.

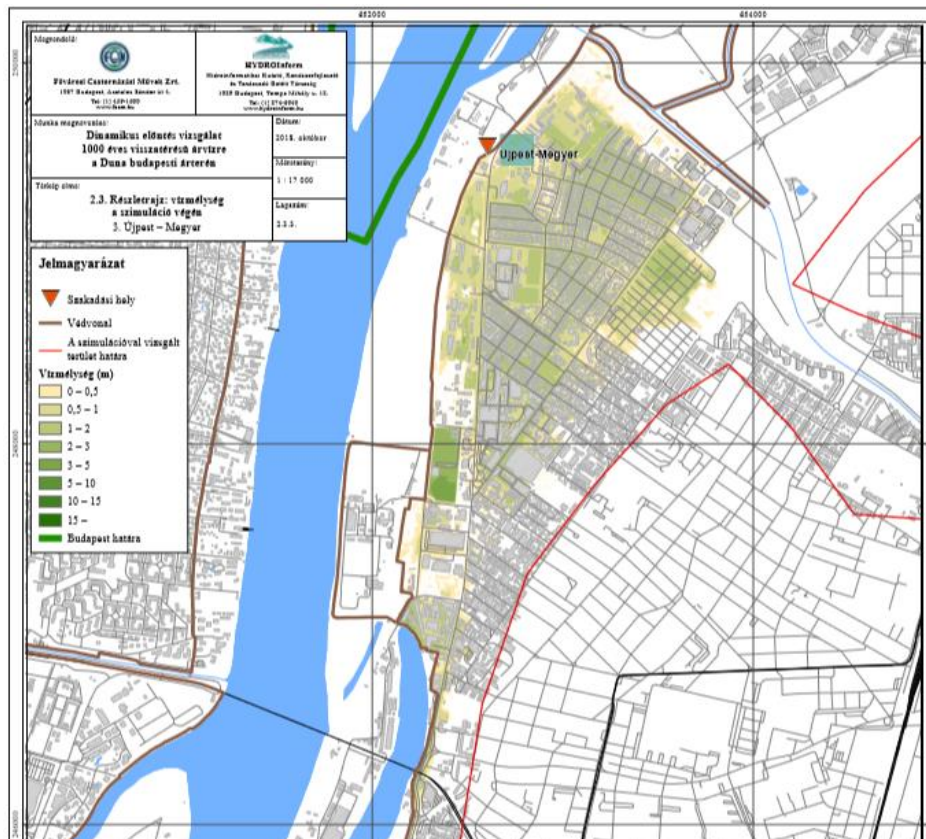
Ugyancsak szemléletes kimenetet nyújt az elöntés pillanatfelvételeiből készített animáció, amely a folyamat fejlődését mutatja be.



8. ábra: A szimuláció során kialakult legnagyobb vízmélységek



9. ábra: A szimuláció során kialakult legnagyobb vízsebességek



10. ábra: A szimuláció végén kialakult legnagyobb vízmélységek

4. Összefoglalás

A fővárosi Duna szakaszon a hatályos jogszabály szerint felújítandó lokalizációs tervhez statikus és dinamikus előntési modell készült 2018 során. A statikus előntési modell szakmai újdonságot nem jelentett, lényegében az előntések várható legnagyobb kiterjedésére adott választ. A szakmai szempontból lényeges előrelépést jelentő dinamikus előntési modell a HIDROInform Bt. bevonásával készült el, felhasználva a tárgyban már korábban igazolt tapasztalataikat, szakismeretüket. A modell a 0,1% valószínűséggel előforduló Vigadó téri tetőzéshez felvett vízfelszín figyelembevételével történt. A modellezés során a budapesti külön elönthető öblözeteket egy-egy, a várhatóan maximális előntési szintet okozó szakadási hely lett felvéve. A szakadásokat kétféle típus szerint meghatározva magasparton kialakított magasítás (nyúlgát vagy parapetfal), illetve alacsonyabb töltés figyelembevételével vettük figyelembe. A szakadás modellezése során gyors kifejlődéssel és az elhárításra törekvő munka figyelmén kívül hagyásával számoltunk.

A modellezés különös nehézségét jelentette a városi terület áramlási terének leírása. A rendelkezésre álló felmérési és szabad hozzáférésű adatok alapján vízvezető és vizet át nem engedő területek lettek lehatárolva. Az épülettömbökön a víz átjutását a modell nem veszi figyelembe, ahogy a kialakuló előntési szint alatti üres helyiségek térfogatának feltelését sem. Ez a biztonság javára történő eltérés, mert ezzel a feltételezéssel a valóságnál nagyobb előntési képet mutat a modell.

A modellezés az ArcGIS és a HEC-RAS 5.0.3. szoftverek felhasználásával történt.

Az eredmények térképi megjelenítése három típusú térképlapon történt meg minden egyes öblözetre. Ezek a legnagyobb előntés során kialakuló vízmélységeket, a kialakuló legnagyobb sebességeket, valamint a kialakuló legnagyobb előntés során a vízmélység végső értékét mutatják be.