



Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

Építőmérnöki kar

Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszék

A Hídvégi-tó áramlási viszonyainak numerikus modellvizsgálata

Országos Tudományos Diákköri Konferencia 2023.

Papp Laura Dorottya

Konzulensek:

Dr. Torma Péter

Lükő Gabriella

Budapest, 2022. szeptember 30.

Tartalomjegyzék

Kivonat.....	4
Abstract.....	5
1. Bevezetés és célkitűzés	6
2. A Kis-Balaton Vízvédelmi Rendszer ismertetése.....	7
2.1. Elhelyezkedése, alapadatok	7
2.2. Története	8
2.3. Részei, üzemeltetése	10
2.3.1. Az üzemeltetésről általában	10
2.3.2. A Hídvégi-tó (I. ütem) és üzemeltetése	11
2.3.3. Kazetta	13
2.3.4. Kísérleti-tó	14
2.3.5. Laki István-zsilip	14
2.3.6. Hallépcső.....	15
2.4. A Hídvégi-tó vízminőségi szerepe.....	15
3. Módszertan.....	16
3.1. Áramlás számítása	16
3.1.1. Matematikai modell	16
3.1.2. Változatok és peremfeltételek.....	18
3.2. Domborzat modell	20
3.3. Számítási háló	23
3.3.1. Területhasználati osztályok.....	26
4. Eredmények	27
4.1. Szélmeghajtás hatása	27
4.2. Érzékenységvizsgálat.....	45
5. Összefoglalás és konklúzió	49

6. Kitekintés	52
7. Hivatkozások.....	54
8. Mellékletek	56
8.1. A Kis-Balaton és környékének térképe.....	56
8.2. A Kis-Balaton és környékének térképe (A3 méretben).....	57

Kivonat

A Kis-Balaton Vízvédelmi Rendszer alapvető célja a Balaton vízminőségének megóvása oly módon, hogy a Zala vízgyűjtőjéről érkező lebegőanyagot és tápanyagokat visszatartjuk a tározórendszerben. A rendszer legfelső eleme a Hídvégi-tó, ahol mindezen folyamatok nagy része lejátszódik. A kiülepedést és ezáltal a feliszapolódást alapvetően meghatározzák a kialakuló áramlási és keveredési viszonyok, amit a Zala vízhozama, a szél, a mederdomborzat és a növényborítottság alakít ki. Ennek részletes feltárására numerikus hidrodinamikai modellt állítunk fel, amivel vizsgáljuk a kialakuló áramképeket és hullámozást, valamint a mederfenéken kialakuló csúsztató-feszültségeket. Célunk, hogy meghatározzuk a szél szerepét. A vizsgálat során egy hónapnyi időszakot modellezünk, ami jól jellemezi az átlagos vízrajzi állapotokat.

Abstract

The essential purpose of the Kis-Balaton Water Protection System is to protect the water quality of Lake Balaton by retaining suspended solids and nutrients coming from the catchment of the Zala River in the reservoir system. The upstream element of the system is Lake Hídvégi, where most of these processes are taking place. The sedimentation, thereby the siltation of the reservoir, is basically determined by the flow and the mixing conditions that are driven by the flow of the Zala River, the wind, the topography of the lakebed, and the vegetation coverage. We are intended to apply a numerical hydrodynamic model to explore these in detail: the circulation patterns and wave motions, and the bottom shear stresses. One of the main aims is to define the role of wind. In the study, a one-month-long period is modeled, which describes the average hydrographic conditions well.

1. Bevezetés és célkitűzés

A Kis-Balaton Vízvédelmi Rendszer (KBVR) Európában egyedülálló, mesterségesen kialakított vízi létesítmény. A Zala-folyó vizének természetes szűrőjeként funkcionál, a Balaton megfelelő vízminőségének és vízmennyiségének biztosítását szolgálja. Nemcsak víz-, hanem egyben természetvédelmi céllal alakították ki, fokozottan védett természetvédelmi terület. Számos ritka, védett vízi növény- és állatfaj megtalálható itt (Duna-Dráva Nemzeti Park Igazgatóság, 2020-2021.). 1979. április 11. óta a Ramsari egyezmény védelme alatt áll 14659 ha területtel. 1986-ban kialakították a Kis-Balaton Tájvédelmi Körzetet, így nagyobb területre kiterjeszthették a Ramsari egyezmény hatályát (Wikipédia 2021.). Ma a Balaton-felvidéki Nemzeti Park Igazgatóság területe. A Natura 2000 hálózat eleme, „Különleges Természetmegőrzési és Madárvédelmi Terület” státuszban, 128.03 km² nagyságú területen (Magyar Madártani és Természetvédelmi Egyesület 2021.).

Egy ilyen nagy jelentőségű és kiterjedésű vízi létesítmény kialakítása és működtetése befolyásolja a terület áramlási viszonyait és élővilágát. Fontos tehát, hogy minden üzemállapotban, minden nagyobb valószínűségű körülmény és esemény esetén ismertek legyenek a rendszer várható reakciói és hatásai. Ezek felderítése és számszerűsítése numerikus modellvizsgálatokkal korszerűen elvégezhető, majd közvetlenül alkalmazható az üzemeltetés, a további fejlesztések, vagy esetleg hasonló vízvédelmi rendszerek jövőbeli tervezése során.

Dolgozatom tárgya a Kis-Balaton Vízvédelmi Rendszer felső tározója, a Hídvégi-tó kétdimenziós hidrodinamikai modelljének létrehozása és áramlásvizsgálata normál üzemállapotban. Ennek részeként vizsgálom a szél áramlásmódosító hatásának szerepét is.

Létrehozom a tározó jelenlegi állapotának terepmodelljét, majd erre előállítok egy olyan számítási hálót, amely kellően pontos eredményeket ad, valamint alkalmas a numerikus megoldás elvégzésére. A számítási hálóban az egyes területhasználati osztályokhoz különböző simasági együtthatókat rendeljek hozzá, amelyek jellemzik az egyes zónák vízelvezetési képességét. A várhatóan legérzékenyebb simasági együtthatóra elvégzem a modell érzékenységvizsgálatát.

Az ily módon kialakított 2D numerikus modellel vizsgálom az egyes változatokat, amelyeket az áramlási sebesség nagysága és iránya, valamint a fajlagos vízhozam alapján hasonlítok össze. Az eredmények alapján következtetéseket vonok le az áramlás esetleges hatásaira az

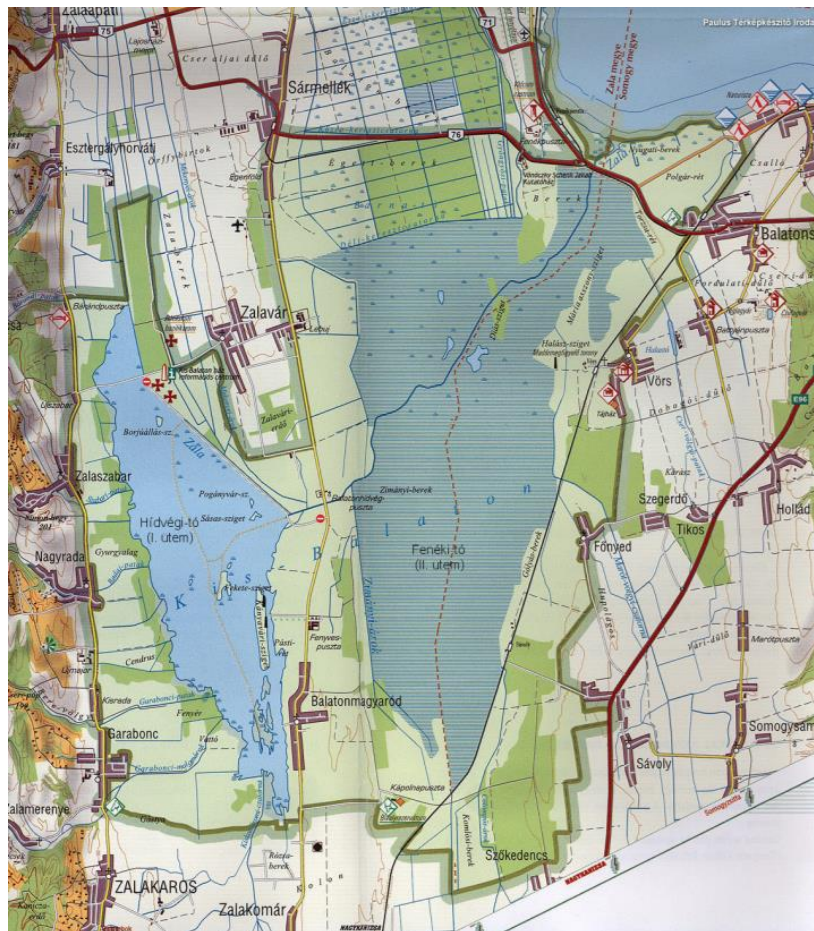
üzemeltetés során, valamint meghatározom a szél áramlásmódosító szerepének mértékét és lehetséges következményeit normál üzemállapotban.

Célom, hogy ezen hidrodinamikai modell segítségével felfedjem a Hídvégi-tó jelenleg csak részben ismert áramlási jelenségeit és azok következményeit, ezáltal segítsem a vízvédelmi rendszer biztonságos üzemeltetését. Ezenkívül szeretnék egy korszerű, friss adatokra épülő, továbbfejleszthető modellt létrehozni a további üzemállapotok, a feliszapolódás, az árhullámok érkezése, a betározás, a rövidrezárás és az üzemeltetés során felmerülő egyéb körülmények, havariák, beavatkozások hatásvizsgálatainak és előrejelzéseinek támogatására.

2. A Kis-Balaton Vízvédelmi Rendszer ismertetése

2.1. Elhelyezkedése, alapadatok

A Kis-Balaton Vízvédelmi Rendszer (KBVR) a Dunántúli-dombság Kis-Balaton-medence kistáján található (Lájer et al. 2016.). Ide torkollik a Zala-folyó, mely vizének természetes szűrőjeként és tározójaként funkcionál, majd a víz tovább halad a Balatonba. A Kis-Balaton két sekélyvizű tározómedencéből áll: a nyugatabbra lévő Hídvégi-tóból, és a keletebbre található Fenéki-tóból. Nevüket elhelyezkedésükről kapták: Balatonhídvég, illetve Fenékpusztá területén találhatóak (lásd: 2.1.1. ábra). A Kis-Balaton vízvédelmi rendszer fő céljai a Balaton vízminőségének védelme a Zala vizének megszürése és hordalékának elnyelése által, valamint a vízi élővilág megóvása.



2.1.1. ábra: A Kis-Balaton térképe (Forrás: MTA Központi Fizikai Kutatóintézet, Kocsonya András, 2009. <https://www.kfki.hu/~kocsonya/tura/Kis-Balaton/Kis-Balaton.pdf>)

A Kis-Balaton vízgyűjtő területe 2587 km^2 , vízfelülete 70 km^2 . Szélessége változó, 1-5 km. Átlagos mélysége 1.15 m. A tározók összes tározótérfogata (V) $21 \cdot 10^6 \text{ m}^3$. A Hídvégi-tó tervezett tartózkodási ideje (τ) 28 nap, a Fenéki-tóé 90 nap.

2.2. Története

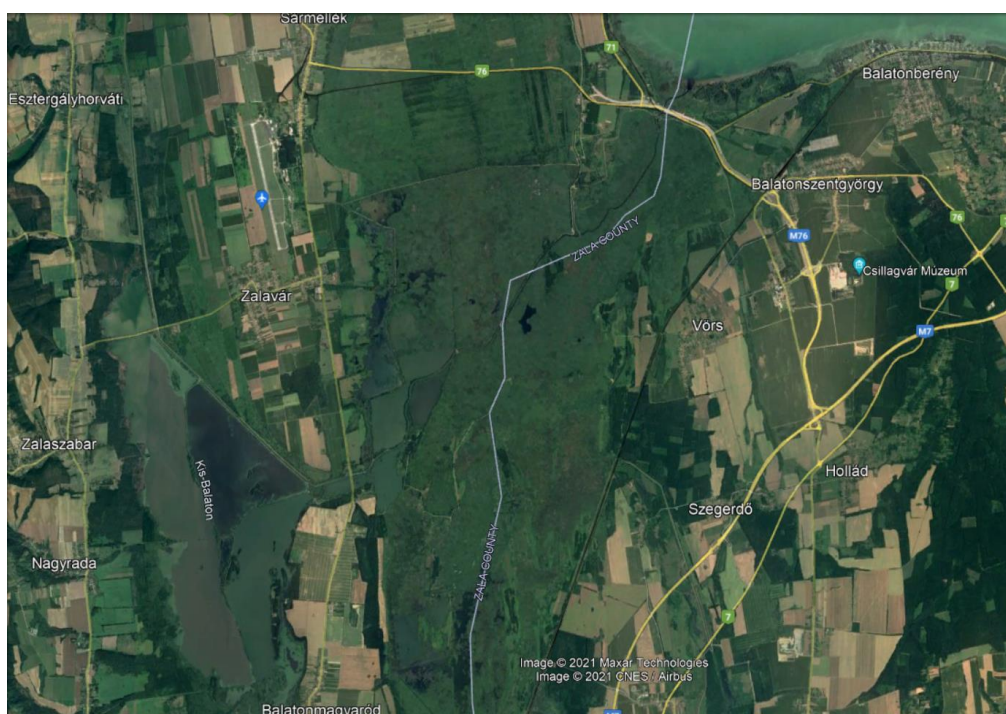
A ma Kis-Balatonnak nevezett tározórendszer eredetileg a Balaton két legnyugatibbi öble volt a Keszthelyi-öböl után, tehát ekkor a Balaton egészen Balatonhídvégig nyúlt. Itt rakta le a Zala-folyó a hordalékát és a tápanyagokat. Fenékpusztánál volt a legkeskenyebb a Balaton keresztmetszete, így itt már időszámításunk előtt átkelőhely létesült, akárcsak Balatonhídvégnél. A Római Birodalom idején már a Fenékpusztai átkelő volt a nagyobb fontosságú, erőd is épült itt. Az átkelő része volt a Pécsre, valamint a Nagykanizsára vezető útnak is. A Nagykanizsán áthaladó út vélhetően az Itáliát Aquincummal, A Pécsre vezető pedig a Savaria-Sopianae összekötő út része volt (Müller 1987.).

<https://maps.arcanum.com/en>)

9

A folyamat megállításának érdekében megkezdődött a megfelelő szennyvízelvezetés és -tisztítás kialakítása, valamint a Nyugat-dunántúli Környezetvédelmi és Vízügyi Igazgatóság elkészítette a Kis-Balaton Vízvédelmi Rendszer (KBVR) terve, amely a korábbi állapot mesterséges, szabályozható visszaállításával a természetes szűrés folyamatának újraindítását tűzte ki célul.

A Kis-Balaton Vízvédelmi Rendszer két részletben valósult meg. Az I. ütem, a felső tározómedence 1985-ben készült el. A II. ütem, a Fenéki-tó, 1992 óta működött részleges üzembehelyezéssel. Végül 2014-ben készült el teljesen a Kis-Balaton Vízvédelmi Rendszer a mai formájában (Országos Vízügyi Főigazgatóság, Siklós Gabriella, szóvivő, 2014. december 12.), amelyet a 2.2.2. ábrán látható ortofotó szemléltet.



2.2.2. ábra: A Kis-Balaton ma (Forrás: Google Earth)

2.3. Részei, üzemeltetése

2.3.1. Az üzemeltetésről általában

A Kis-Balaton Vízvédelmi rendszer létesítésének céljait a 2317/2005. (XII.11.) kormányhatározat írta elő, amely a Kis-Balaton Vízvédelmi Rendszer II. ütem beruházás felülvizsgálatáról és a beruházási program módosításáról szól. Ennek értelmében a Kis-Balaton megvalósításának célja a Balaton vízminőségének védelme úgy, hogy a tó vízminőségi és ökológiai értékei az üzemeltetés során egyaránt érvényesüljenek. Fontos, hogy a rendszer úgy

legyen kialakítva, hogy elegendő üzemviteli rugalmasságot biztosítson, illetve hogy lehetőséget nyújtson a Zala vizének közvetlenül a Balatonba vezetésére (a tározók megkerülésével), amelyet rövidre zárásnak neveznek.

A KBVR üzemeltetési és kezelési feladatait jelenleg a Nyugat-dunántúli Vízügyi Igazgatóság (NYUDUVIZIG) és a Balaton-felvidéki Nemzeti Park Igazgatóság (BfNPI) végzi. Rendes körülmények között normál üzemállapot szerint kell működtetni a rendszert. Kétféle normál üzemállapotot határoztak meg az évszakok szerint: nyári és téli üzemállapotot. A nyári üzemállapot április 1-től október 31-ig tart; a téli november 1-től március 31-ig (Nyugat-Dunántúli Vízügyi Igazgatóság és Balaton-felvidéki Nemzeti Park 2021. április). A két tározón, valamint a Kazettában eltérő az előírt vízszint, funkciójuknak megfelelően (Nyugat-Dunántúli Vízügyi Igazgatóság (NYUDUVIZIG) és Balaton-felvidéki Nemzeti Park 2021. április).

2.3.2. A Hídvégi-tó (I. ütem) és üzemeltetése

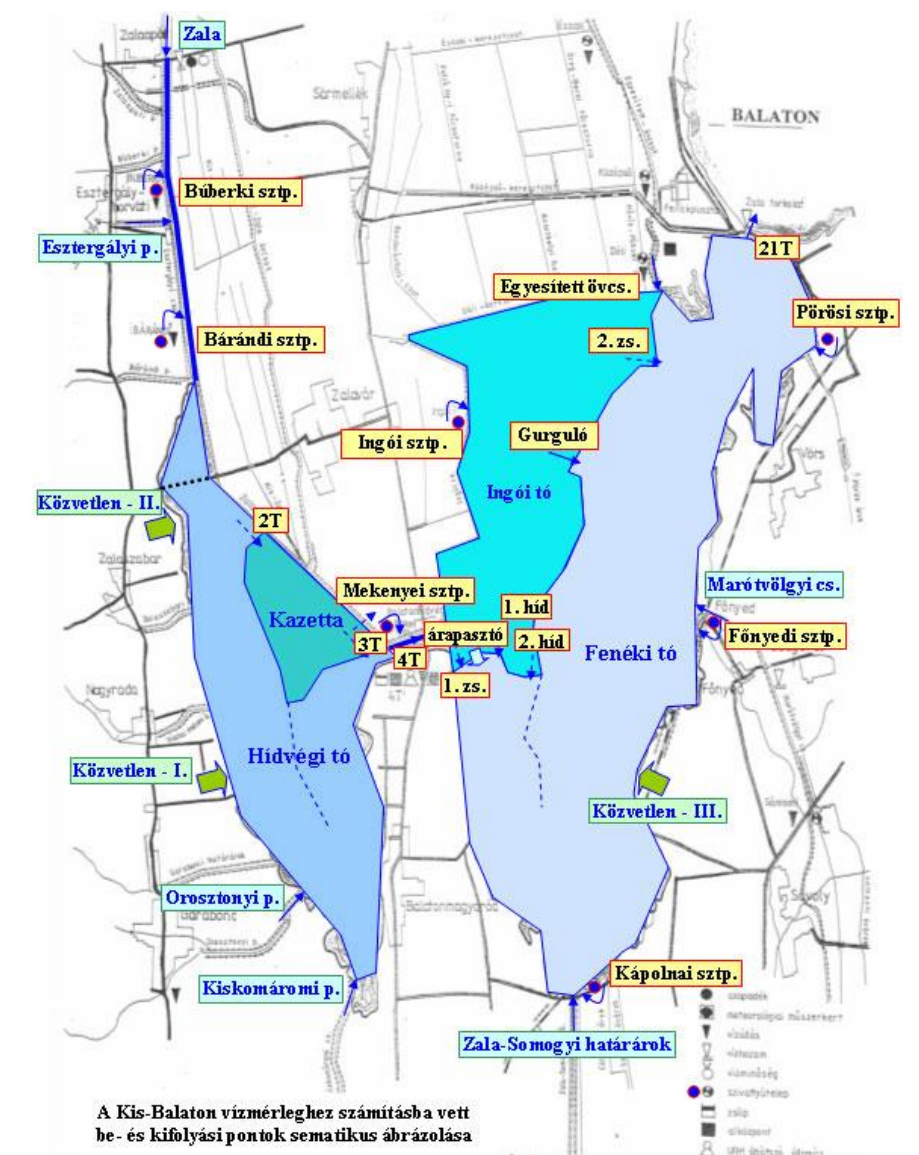


2.3.2.1. ábra: A Hídvégi-tó



2.3.2.2. ábra: A Kányavári-sziget és hídja

Az általam vizsgált terület a Kis-Balaton Vízvédelmi Rendszer I. üteme, a Hídvégi-tó (2.3.2.1. ábra). Vízfelületének nagysága 18 km^2 . A tározón belül, töltésekkel elkülönítve található egy Kazetta, valamint a Kísérleti-tó, amelyek zsilipekkel kapcsolhatóak össze a rendszerrel. Több kisebb-nagyobb sziget is található a tározó területén. A legnevesebbek ezek közül a Kányavári-sziget (2.3.2.2. ábra), a Fekete-sziget, valamint a Pogányvári-sziget.



2.3.2.3. ábra: A Kis-Balaton vízmérleghez számításba vett be- és kifolyásainak térképe (Forrás: Nyugat-dunántúli Vízügyi Igazgatóság 2018. <http://www.nyuduvizig.hu/index.php/vizrajz/kis-balaton-tavmero-rendszer-vizmerleg>)

A Zala és a Balaton vízgyűjtőjének több vízfolyása is a Kis-Balatonba érkezik (2.3.2.3. ábra). A Hídvégi-tó befolyó kisvízfolyásai: Zalaapáti-patak, Búberki-patak, Esztergályi-patak, Bárándi-patak, Pogány-szigeti-árok, Zalasabari-patak, Nagyradai-patak, Garabonci-patak, Orosztonyi-patak, Banyavölgyi-árok, Kiskomáromi-csatorna, Sanyari-malomárok, Kis-Zala (Nyugat-dunántúli Vízügyi Igazgatóság, 2018.).

A Kazettán kívüli terület előírt üzemeltetési vízszintje nyári üzemmódban 106.30 mBf. Kisebb árhullámok betározása esetén a vízszint megemelkedhet 106.80 mBf magasságúra maximum 60 napon át. Aszály esetén pedig az előírt üzemvízszintnél alacsonyabb is tartható, amennyiben

a vizet a Fenéki-tó élővilágának fenntartására engedik tovább. Azonban ekkor sem szabad 105.70 mBf alá engedni; ilyenkor még természetvédelmi célból sem adható víz az Ingói-berekbe.

Téli üzemmódban az előírt üzemvízszint 106.20 mBf, amelytől csak ± 10 cm-rel szabad eltérni. Téli időszakban az üzemvízszinttől való eltérést főként a csapadékok mennyisége okozhatja, illetve a jég alatti vízszint tartása.

Normál üzemállapotban a Hídvégi-tó műtárgyai közül a 2T, a 3T, az 5T és a 22T, valamint a Kísérleti-tó ki- és beeresztő zsilipek zárva tartandók, míg a 4T zsilip szabályozva működtetendő, és a 4T hallépcső is nyitva tartandó. A hallépcsőt kizárólag rendkívüli esetben szabad elzárni, például halpusztulás vagy meghibásodás esetén (Nyugat-Dunántúli Vízügyi Igazgatóság és Balaton-felvidéki Nemzeti Park, 2021. április).

A tartózkodási idő (τ) megnövelésének céljából terelőtöltésekkel, kanyarokat leírva irányítják a tározókon át a vizet a Balatonba. Az I. ütemben a 7512-es mellékút alatt áthaladva (egy áteressen és egy közúti híd alatt) a Zala vize kettéválik: egy része a tározó, másik része a régi Zala meder (Holt-Zala) felé folyik tovább. Utóbbiban jellemzően jelentősebb kisebb vízmennyiség halad, mint amennyi a tározórészben. A Holt-Zala mederben haladó víz a tározót és a Kazettát megkerülve folyik tovább a II. ütem felé. A Kazettától keletre haladó víz a terelőtöltést délről megkerülve folytatja útját a 4T műtárgyon (Laki István-zsilip), illetve a hallépcsőn át a II. ütembe.

A terelőtöltés egy szelvényében 2+000 fkm előtt létesült egy ideiglenes árapasztó Laki István korábbi szakaszmérnöknek köszönhetően. Ez azért volt szükséges, mivel a terelőtöltés kanyarulatában a víz lelassul, lerakja a hordalékát, így a meder feliszapolódik. Ennek következtében megnő itt a vízszint, tehát a tározó egyik oldalán a vízszint magasabbá válik, mint a másikon. Az ideiglenes árapasztóval „segítenek” a víznek átjutni a terelőtöltés túloldalára, főként árhullámok esetén.

2.3.3. Kazetta

Az I. ütemben található 3.4 km² vízfelületű Kazetta egy, a tározótól elkülöníthető medence (2.3.3. ábra). Célja, hogy a nagyobb árhullámokat a töltések kímélésével el lehessen vezetni; valamint, hogy szennyezés esetén a szennyezett víz a Kazettába áramoljon, és ott elkülöníthető, majd onnan eltávolítható legyen, ezáltal védve az élővilágot, a vízminőséget, a környezetet. A Kazettában 106.10 mBf az előírt üzemvízszint, vagy annál alacsonyabb, a körülötte lévő

medencék vízszintjétől függően. A lényeg, hogy a Kazettában alacsonyabb legyen a vízszint, mint a körülötte lévő tározórészekben. Ennek köszönhetően megnyitása esetén szívóerő lép föl, ami biztosítja a víz beáramlását a Kazettába. Beeresztő műtárgya a 2T jelű zsilip, leeresztő műtárgya a 3T jelű zsilip. A Kazetta zsilipjei tehát csak havaria és vízszintszabályozás esetén vannak nyitva. A töltések két oldalán ugyanis a vízszintek különbsége nem lehet nagyobb 0.5 m-nél előírás szerint (Nyugat-Dunántúli Vízügyi Igazgatóság (NYUDUVIZIG) és Balaton-felvidéki Nemzeti Park, 2021. április).



2.3.3. ábra: Hídvégi-tó, Kazetta

(Forrás: <http://www.ovf.hu/hu/galeria-1/kis-balaton-vizvedelmi-rendszer>)

2.3.4. Kísérleti-tó

A Kísérleti tó vagy más néven Major-tó szintén egy, a tározótól elkülönített medence. Jelenleg a természetvédelmi, biológiai szakemberek használják kutatásra.

2.3.5. Laki István-zsilip



2.3.5.1. ábra: A 4T műtárgy (Laki István-zsilip)



2.3.5.2. ábra: A 4T műtárgy, balra a hallépcső

A Laki István-zsilip, másik nevén 4T a Hídvégi-tavat és a Fenéki-tavat elválasztó műtárgy (2.3.5.1. és 2.3.5.2. ábrák). Az Északi lezáró-töltés 0+000 tkm szelvényében található. Nevét, akárcsak az ideiglenes árapasztó, a korábbi szakaszmérnökökről kapta. $50 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ a tervezett maximális kapacitása. Ez egy síktáblás és billenőtáblás zsilip. A vízleeresztés a síktábla feletti átbukással valósítható meg $8\text{-}10 \text{ m}^3/\text{s}$ nagyságú vízhozam értékig. Annál nagyobb leeresztendő vízhozam esetén megengedett a tábla alatti átfolyás. Szintén megengedett a tábla alatti átfolyás rendkívül fagyveszélyes időszakban is. A síktábla 3.00 m nyílású, min. süllyesztési szintje 105.40 mBf. A mellette található billenőtábla 5.00 m nyílású (Nyugat-Dunántúli Vízügyi Igazgatóság (NYUDUVIZIG) és Balaton-felvidéki Nemzeti Park, 2021. április). A zsilip alsó elzárását támkapu biztosítja.

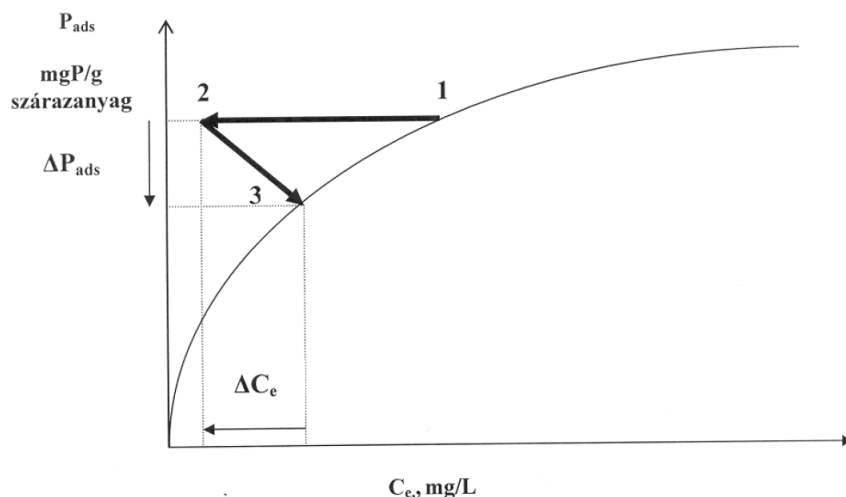
2.3.6. Hallépcső

A két tározó összeköttetéséhez tartozik még egy kőbukós hallépcső (2.3.5.2. ábra), illetve egy mobilfal, amely a kolokán nevű invazív vízínövény terjedésének megfékezésére szolgál.

2.4. A Hídvégi-tó vízminőségi szerepe

A Hídvégi-tó elsődleges feladata, hogy a Zala itt rakhassa le hordalékát, valamint hogy a folyó és egyéb befolyók vizéből felvegye a tápanyagok jelentős részét. Modellvizsgálatok igazolták, hogy a foszfor eltávolítás hatásfoka a beérkező terheléstől és vízhozamtól függ. Minél nagyobbak ezek értékei, annál nagyobb mennyiségű foszfort képes eltávolítani a rendszer. A rendszerre leginkább jellemző foszforeltávolítási mód a kiülepítés. Ekkor az általában szilárd részecskékhez kötődő foszfor azokkal együtt ülepedik ki. A folyóvízzel érkező oldott tápanyagokat a vízi élőlények hasznosítják. Az összefüggést jól mutatja az alábbi eset: 1991-ben a zalaegerszegi szennyvíztisztítóban alkalmazni kezdték a foszforkicsapatást. Ez a szennyvíztisztító volt a Kis-Balaton Vízvédelmi Rendszer legfontosabb pontszerű foszforforrása. A foszforkicsapatás miatt azonban jelentősen kisebb foszforterhelést kapott a Zala, és ezáltal a Hídvégi-tó. Erre a rendszer ún. „késleltetett választ” adott. Ez azt jelenti, hogy bár a külső foszforterhelés csökkent, a belső terhelés megnőtt. E folyamat lényege (2.4.1. ábra), hogy a magas foszfortartalmú üledék egyensúlyban van a viszonylag nagy egyensúlyi foszfáttartalmú vízfázissal. Azonban a külső foszforterhelés csökkenésekor megborul ez az egyensúlyi állapot, mivel a foszfát koncentráció kisebb lesz a vízfázisban. Mivel a rendszer egyensúlyra törekszik, ezért az ennek helyreállításához szükséges foszfátmennyiséget az üledék a felső rétegeből adja le a vízbe úgy, hogy az algák anyagcsere folyamatai során beépül az

algabiomasszába. Az üledék foszfáttartalma Zala vizéből korábban kiülededett, szilárd szemcsékhez kapcsolódó foszforból; valamint a bomlásban lévő elpusztult élőlények szervesanyagából származik (Szilágyi 2007).



A foszforterhelés csökkentésének hatása

2.4.1. ábra: A foszforterhelés csökkentésének hatása sekélyvizű tavakban (Forrás: Dr. Szilágyi 2000.)

Ennek megfelelően kis beérkező vízhozamok esetén viszonylag alacsony foszfortartalmú víz érkezik a rendszerbe a Zala-folyón, így a nyári kisvizes időszakokban tömegesen elszaporodhatnak az algák (alga-tömegreprodukció).

3. Módszertan

A következő fejezetben a Hídvégi-tó kétdimenziós numerikus modelljének matematikai hátterét, a domborzatmodelljét, majd a számítási hálóját mutatom be.

3.1. Áramlás számítása

3.1.1. Matematikai modell

2D modellezés során az áramlási mezőt a teljes vízmélység mentén átlagoljuk, és vízszintes változásait közvetlenül leképezzük. Az átlagolt mennyiségeket tehát követjük x , y és t szerint, azaz a vízszintes síkban. A sebesség a vízszintes síkban tetszőleges irányt felvehet. Két vízszintes síkú, egymástól független összetevőből áll, ezek: u és v .

A szabadfelszínű vízmozgás 2D alapegyenletiben hasonló egyszerűsítéseket teszünk, mint a sekélyvízi Saint-Venant egyenleteknél. Feltételezzük, hogy a nehézségi erő (g), a tehetelenség, a hidraulikai ellenállások, valamint sekélyvízű tó modellezése esetén a szélmeghajtás ereje a meghatározók. A Saint-Venant egyenletekhez hasonlóan kis mederesést, hidrosztatikus nyomáseloszlást (kis görbületeket), és fokozatosan változó vízmozgást feltételezünk.

A mozgó víztér állapotát 2D-ben három állapotváltozóval írjuk le: a vízmélységgel (h), valamint a fajlagos vízhozam x és y irányú összetevőivel (q, p). A független változók az idő (t) és a két vízszintes sík koordináta (x, y). Így felírhatóak a szabadfelszínű sekélyvízi áramlások 2D egyenletei: egy folytonossági, és két impulzusegyenlet. A folytonossági egyenlet:

$$\frac{\delta h}{\delta t} + \frac{\delta p}{\delta x} + \frac{\delta q}{\delta y} = 0$$

Az x és y irányú impulzusegyenletek:

$$\frac{\delta p}{\delta t} + \frac{\delta}{\delta x} \left(\frac{p^2}{h} + \frac{1}{2} g h^2 \right) + \frac{\delta}{\delta x} \left(\frac{pq}{h} \right) + g h \frac{\delta z_0}{\delta x} + \frac{\tau_{sx} - \tau_{mx}}{\rho} = 0$$

$$\frac{\delta q}{\delta t} + \frac{\delta}{\delta x} \left(\frac{pq}{h} \right) + \frac{\delta}{\delta y} \left(\frac{q^2}{h} + \frac{1}{2} g h^2 \right) + g h \frac{\delta z_0}{\delta y} + \frac{\tau_{sy} - \tau_{my}}{\rho} = 0$$

Ahol:

h : vízmélység

p, q : a fajlagos vízhozam x és y irányú összetevői

t : idő

x, y : vízszintes síkkoordináták

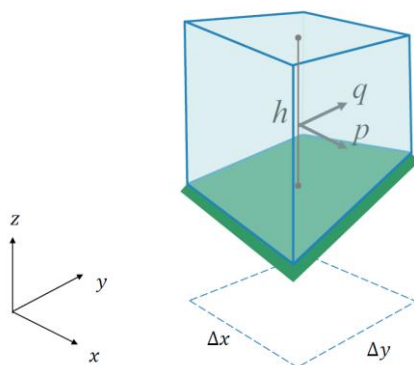
z_0 : mederszint

g : nehézségi gyorsulás

τ_s, τ_m : a szél- és a meder csúsztatófeszültsége

ρ : víz sűrűsége

A folytonossági egyenlet kifejezi a térfogatomegmaradást, míg az impulzusegyenletek azt, hogy az áramlás impulzusából származó nyomáserők, a hidrosztatikus nyomáserők és a csúsztatófeszültségek hatása egyenlő a medersúrlódási ellenállással. Ezen egyenletek numerikus megoldását végzi el az alkalmazott MIKE 21 program a modell futtatása során.

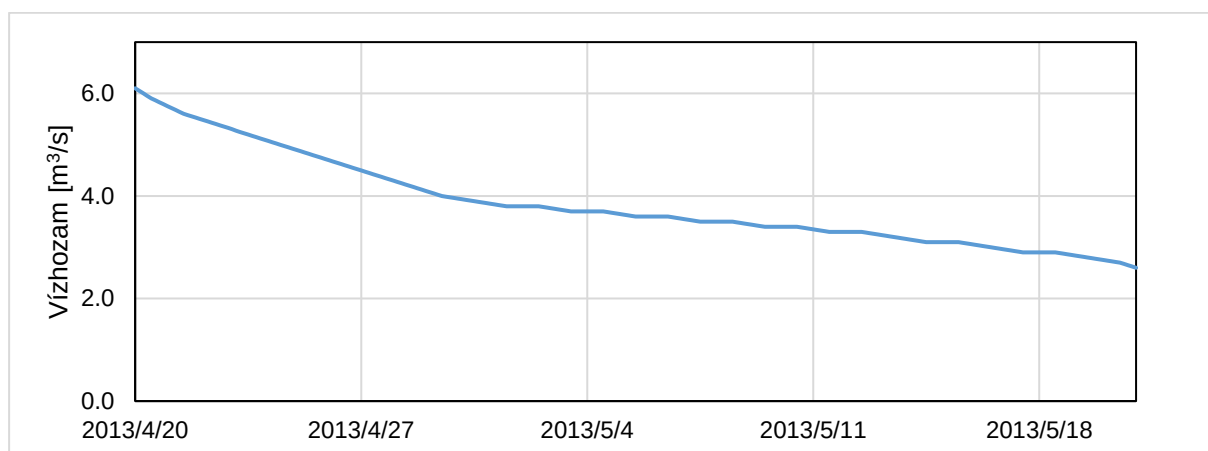


3.1.1.1. ábra: a mozgó víztér állapotát leíró állapotváltozók (Forrás: Dr. Krámer Tamás, 2021.)

3.1.2. Változatok és peremfeltételek

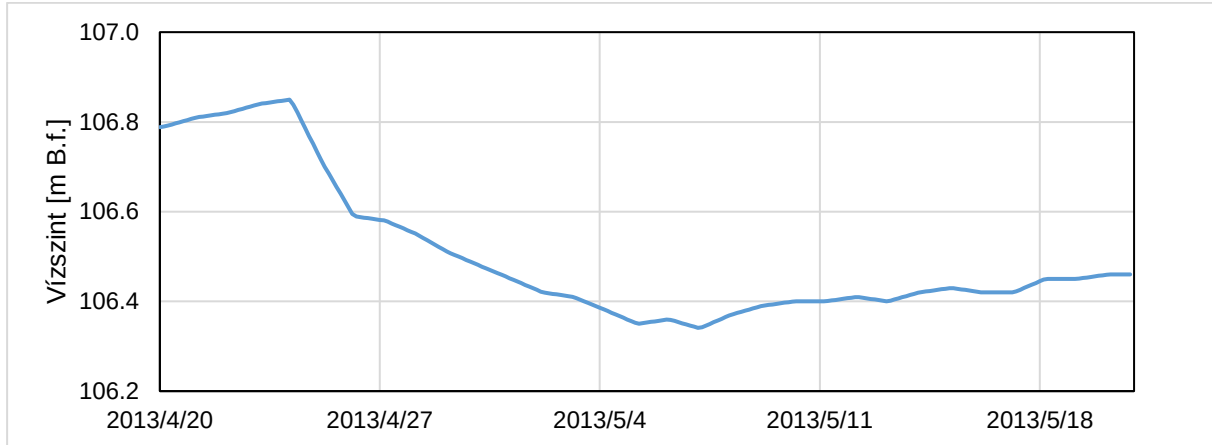
Az egyes változatokhoz részben különböző peremfeltételeket adtam meg a modell számára. Három változatot vizsgáltam a felépített modell segítségével, mindegyiket normál üzemállapotban. Az egyes változatokhoz részben eltérő peremfeltételeket adtam meg.

A modellben csak a Zalát befolyását vettem figyelembe, mivel a kisebb patakoknak és csatornáknak kicsi, nem számottevő a vízhozama a sokéves középvízi vízhozamot tekintve. Tehát a modellnek csak egy befolyási peremet vettem fel, a Zala befolyását. Mindhárom változat esetén a befolyási peremfeltétel a Nyugat-dunántúli Vízügyi Igazgatóság által rendelkezésemre bocsátott egy, a sokéves középvízi vízhozamhoz közel álló egyhavi vízhozam idősor volt. A vizsgált időszak ez alapján 2013. április 20-tól 2013. május 21-ig tartott. A méréseket egy automata ultrahangos vízhozammérő berendezés végezte minden nap 12:00 időpontban, Zalaapátinál (a közúti hídnál).



3.1.2.1. ábra: A vizsgált időszak vízhozam idősorának ábrázolása

A modell kifolyási peremét a Laki István-zsilipnél (4T műtárgynál) vettem fel. Ezen zsilip köti össze a KBVR felső és alsó tározóját, azaz a Hídvégi- és a Fenéki-tavat. Kifolyási peremfeltételként mindhárom változatban a 4T műtárgy felvizen naponta, reggel 7:00 körül mért vízszinteket adtam meg, amelyeket szintén a NYUDUVIZIG bocsátott rendelkezésemre.



3.1.2.2. ábra: A vízszint változása a vizsgált időszakban

A harmadik alkalmazott peremfeltétel az adott időszakban kialakult szél nagysága és iránya volt. Az Országos Meteorológiai Szolgálat adott időszakra vonatkozó keszthelyi méréseit használtam fel, amelyet háromórás időlépésre átlagoltam. A szélesebességből aerodinamikai ellenállási tényező függvény alapján számítja a modell a vízfelszínen ható szélcsúsztatófeszültséget, az alábbi képlettel:

$$\bar{\tau}_s = \rho_a C_d |U| \bar{U}$$

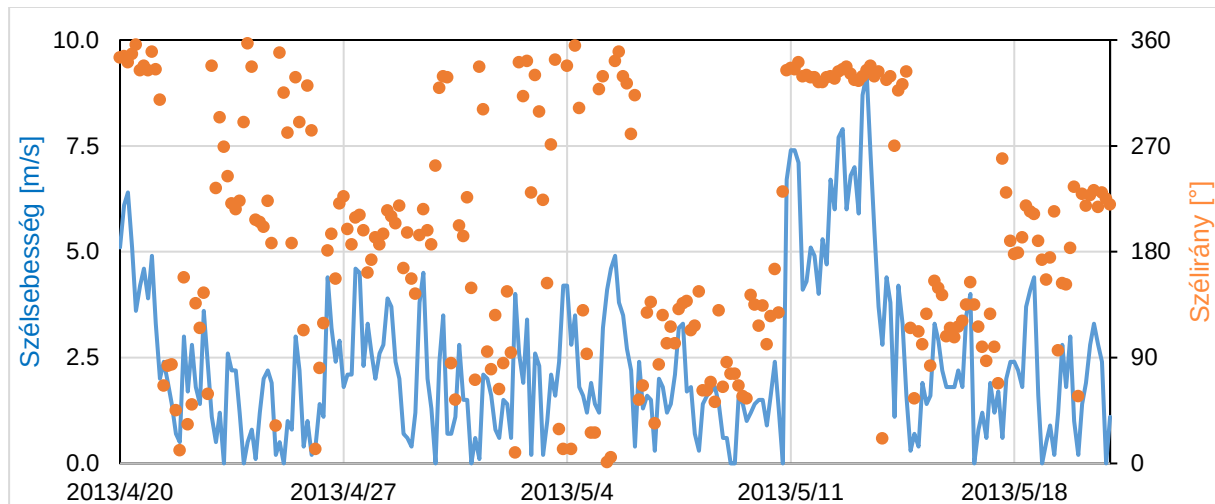
Ahol:

$\bar{\tau}_s = (\tau_{sx}, \tau_{sy})$: a szél-csúsztatófeszültség és annak x és y irányú komponense,

ρ_a : a levegő sűrűsége,

C_d : az ellenállási tényező, értéke $1,255 \cdot 10^{-3}$

$\bar{U} = (U_x, U_y)$: a 10 m magasan mért szélesebesség és annak x és y irányú vetülete.



3.1.2.3. ábra: A peremfeltételként megadott szél idősor ábrázolása

Az 1. változatban az áramlási viszonyokat a szél hatásának figyelembevétele nélkül vizsgáltam. Ennek megfelelően befolyási peremfeltételként a Zala Zalaapátinál mért vízhozam idősorát adtam meg, kifolyási peremfeltételként pedig a 4T műtárgy vízszintjeit az adott időszakban.

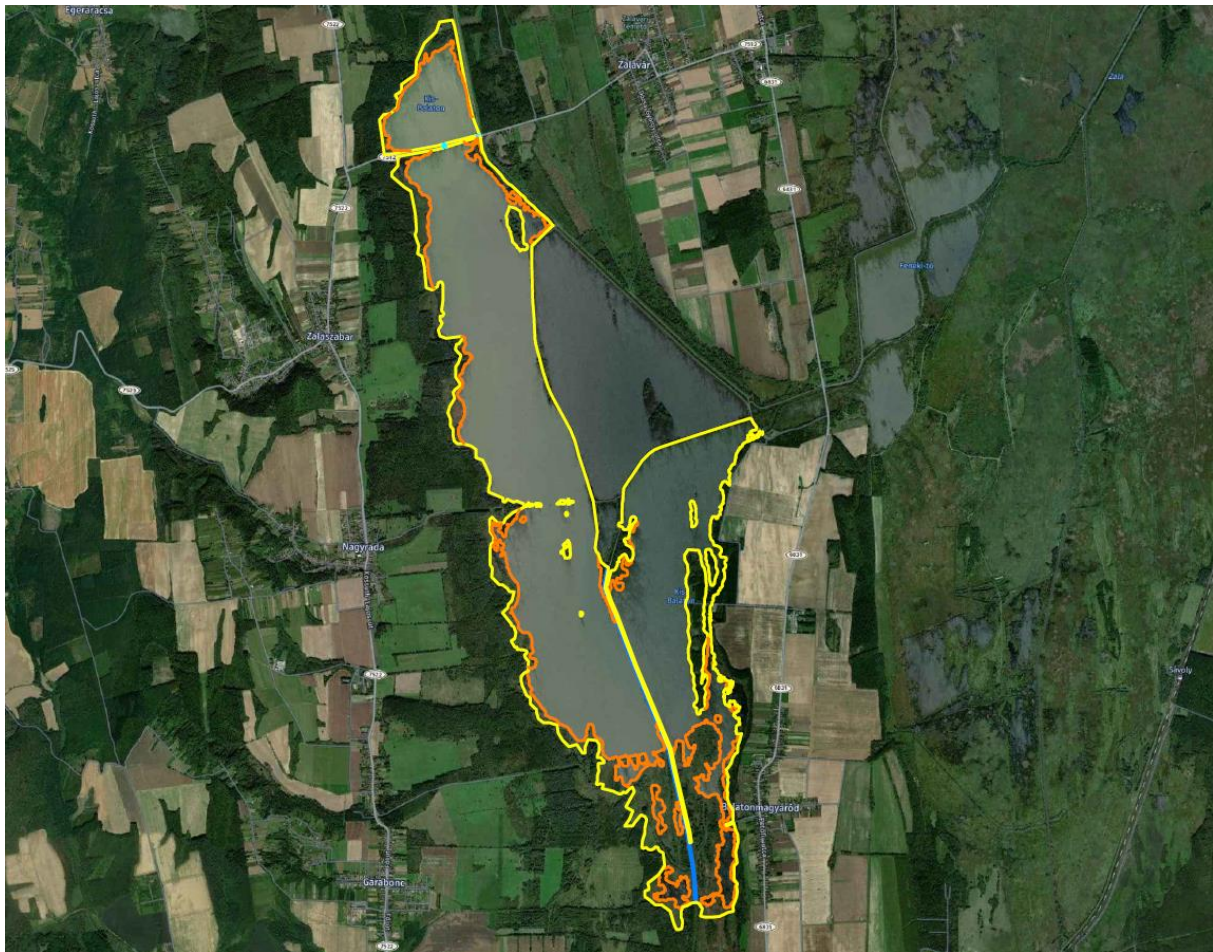
A 2. változatban a szél áramlásmódosító hatásait vizsgáltam, majd ezt vettem össze a szél nélküli 1. változattal. Be- és kifolyási peremfeltételnek ugyanazokat az idősorokat adtam meg, mint az 1. változatban, csak ezeken kívül még a Keszthelyen az adott időszakra mért szélidősort is megadtam peremfeltételként.

A 3. változatot érzékenységvizsgálat céljából hoztam létre. Azt vizsgáltam vele, hogy a modell érzékeny-e növényzet simaságára. A szél hatását nem vettem figyelembe, így az előbbi szél idősort nem adtam meg peremfeltételként. A be- és kifolyási peremfeltételeim megegyeztek az előző két változatban megadottakkal.

3.2. Domborzat modell

A terepmodell a Kis-Balaton felső tározója, a Hídvégi-tó medrét tartalmazza, a töltésekkel és a főbb műtárgyakkal együtt, jelen állapotában. A kiindulási adatokat figyelembe véve két részből áll: a tározó északi és déli részéből.

A meder, a szigetek, a töltések és a műtárgyak körvonalát a Google Maps ortofotója alapján vettem fel, Autocad 2018 szoftverben részletesen körberajzoltam a 3.2.1. ábrán látható módon. Sárga színnel a szigetek és a tározó medrének partját, narancssárgával a növényzet borította területek határát, kézzel a Kiskomáromi-csatorna medrét, türkizzel pedig a műtárgyakat jelöltem.



3.2.1. ábra: A Hídvégi-tó körvonalainak felvétele, alávétítve az ortofotó

A tározó északi részén a Nyugat-dunántúli Vízügyi Igazgatóság 2019-ben, egysugaras ultrahangos mélységmérő és RTK GNSS műszerekkel készült felmérései alapján dolgoztam. Ezeket shape fájl formájában kaptam meg. A mérések 100 m-enként felvett szelvények mentén, keresztirányban, sűrűn történtek a meder teljes szélességében. Déli határunk a Kányavári-szigettől kissé délre, a Radai-víz déli részén át húzódik, a Babos-szigettől kissé északra. Az ennél délebbre eső területek nem voltak megközelíthetőek a nagymértékű növényzetborítottság miatt (Viziterv Environ Kft. 2019. december).

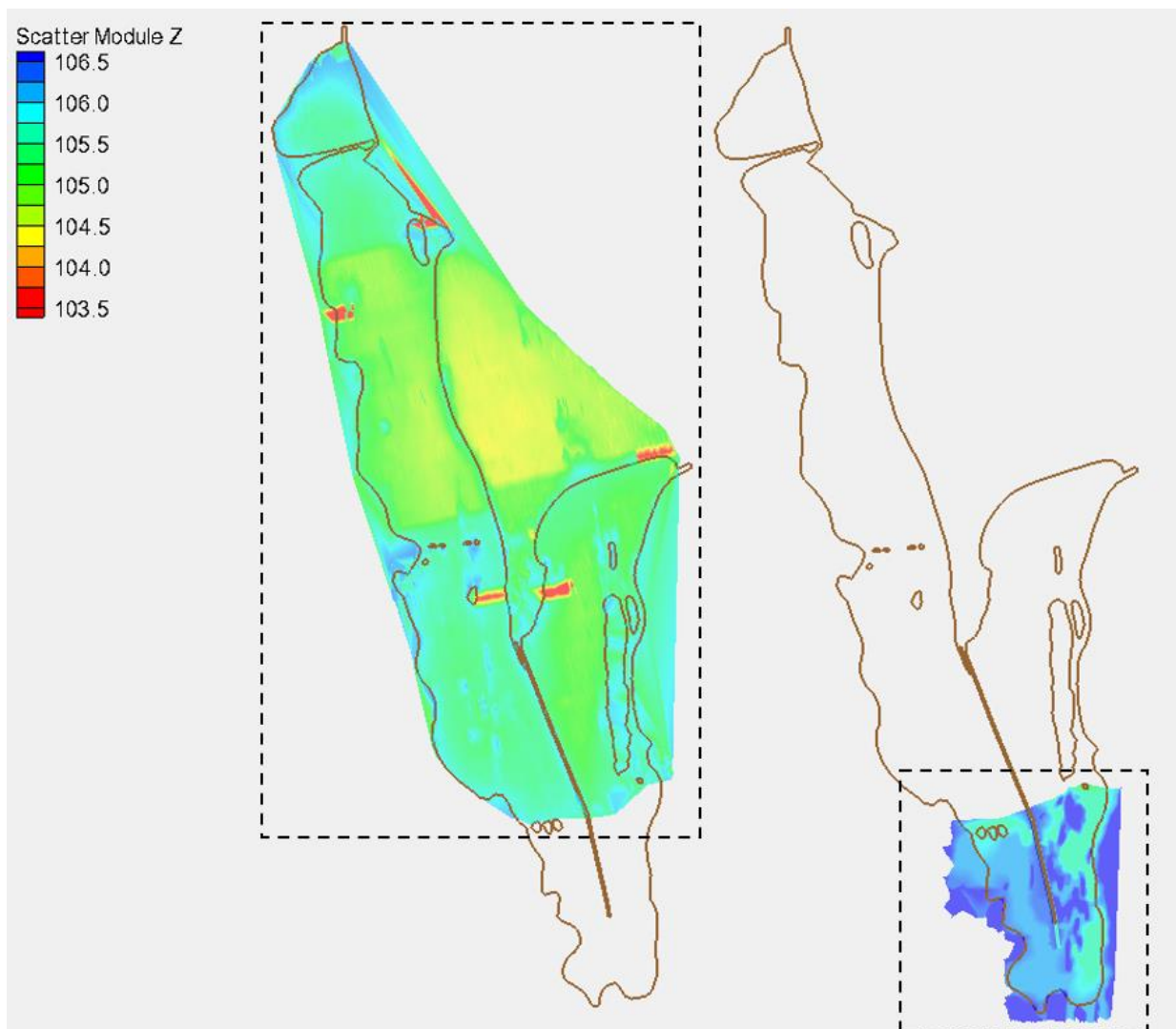
A terepmodell kiterjed a Kazetta területére is, bár az normál üzemállapotban nem vesz részt az áramlásban, mivel zsilipjei zárva tartandók. Ugyanez érvényes a Kísérleti-tóra is. Mederadataikat további vizsgálatokra való tekintettel tartalmazza a készített domborzat modell.

A Hídvégi-tó déli részén, ahol nem állt rendelkezésemre viszonylag friss mederfelmérés, egy 1986-ban készült szintvonalas térképet (8.1. és 8.2. melléklet) tekintettem a terepmodell alapjának, amelyet szintén a Nyugat-dunántúli Vízügyi Igazgatóság bocsátott rendelkezésemre.

A térkép alapján magassági pontokat képeztem, amelyek meghatározták a déli rész terepmodelljét.

A fenti kiindulási adatok alapján létrehoztam egy-egy háromszögelt (TIN) felületű terepmodellt (3.2.2. *ábra*). Ehhez az SMS 11.0 szoftvert használtam.

A két különböző forrásból előállított terepmodell (3.2.2. *ábra*) területi átfedésben van egymással, a Kányavári-sziget és a Szalay-kertjének nevezett területtől a Kányavári sziget és a Mester-sziget között található szelvényig. Ezen terület alapján megállapítottam, hogy valóban megfelelőek és összekapcsolhatóak.



3.2.2. *ábra*: Létrehozott terepmodellek a tározó északi és déli részére

3.3. Számítási háló

Az Autocad-ben lehatárolt területre SMS 11.0 szoftverrel háromszögelt számítási hálót készítettem, amely a 3.3.1. ábrán látható. Úgy alakítottam ki, hogy mindhárom változatra alkalmazható legyen: szél nélküli és széllal meghajtott futtatásokra, valamint a növényzet megváltoztatott simasági együtthatójával történő érzékenységvizsgálatra.

A lehatárolás vonalláncai kijelölték a számítási tartomány körvonalait. Ezekből zárt poligonokat készítettem, amelyeket le lehet fedni háromszög cellákkal. A számítási háló a magassági adatokat a létrehozott terepmodell alapján lineárisan interpolálta a csomópontokra. A tartományon kívüli extrapolációt a távolság reciprokának négyzetével arányosan súlyozva végeztem a programmal.

A háló készítése folyamán a területhasználati osztályok alapján osztottam ki az egyes poligonok körvonalain a cellák sűrűségét meghatározó pontokat. Általánosan elmondható, hogy ahol a víz várhatóan akadályba ütközik, illetve útja nem vagy kevésbé kiszámítható, ott sűrűbb számítási hálót alakítottam ki, minél pontosabb eredmények érdekében. Ennek megfelelően a nyíltvízi területek határán a 100 m-enként történt felmérésekhez igazodva 80-100 m, míg a növényzet borította részeken 50-80 m nagyságú hálóközt alkalmaztam. Ezekbe beleértendő a szigetek határai is.

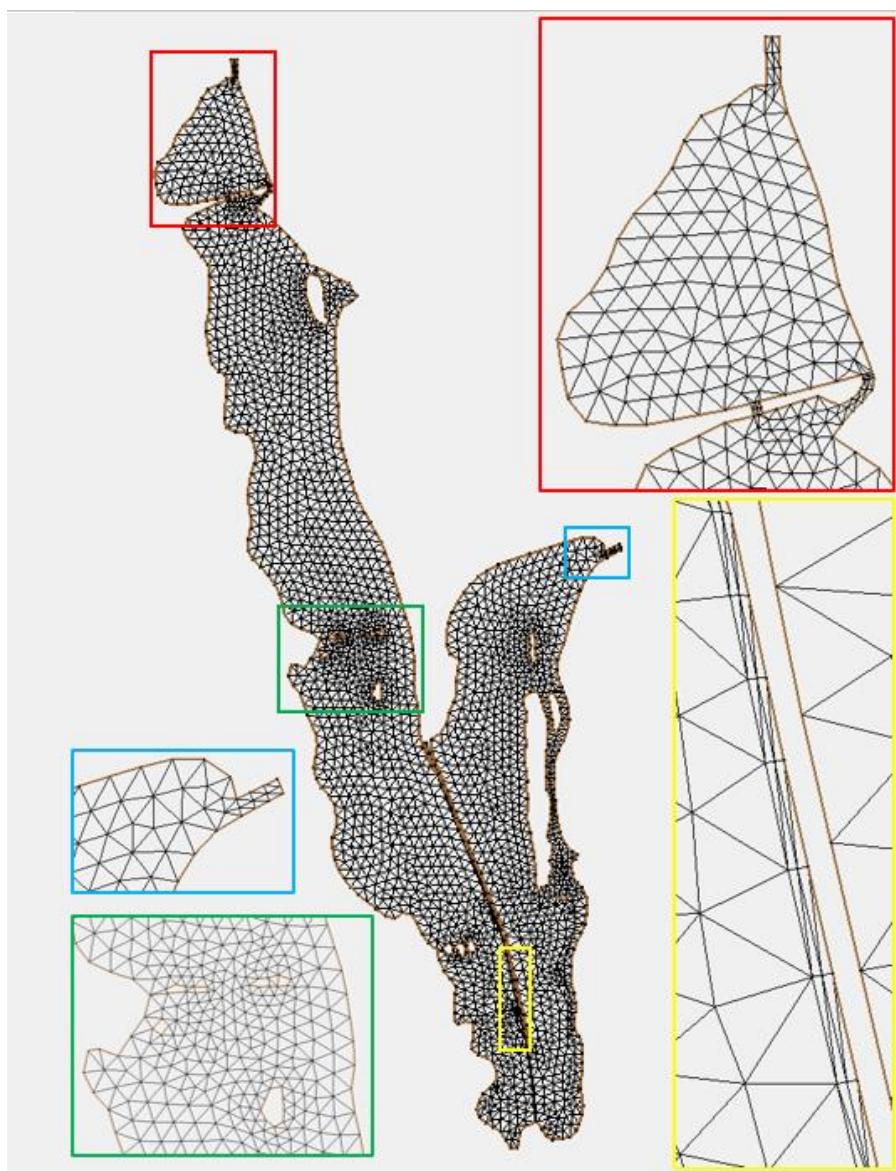
A Zala befolyásának szelvényében is kisebbre vettem fel a cellaméretet, így elérve, hogy a folyó jobb és bal partja, valamint a sodorvonal mentén is legyenek számítási csomópontok.

A tározó Zalán kívüli legfőbb befolyása, Kiskomáromi-csatorna medre mentén általában 100 m -enkénti kiosztást állítottam be, amelyet a növényzet borította részeken sűrítettem 75-80 m-ig. A csatorna hálóját úgy alakítottam ki, hogy a meder jobb és bal partja mellett a meder közepére, a feltételezett sodorvonal mentén is helyeztem el számítási csomópontokat.

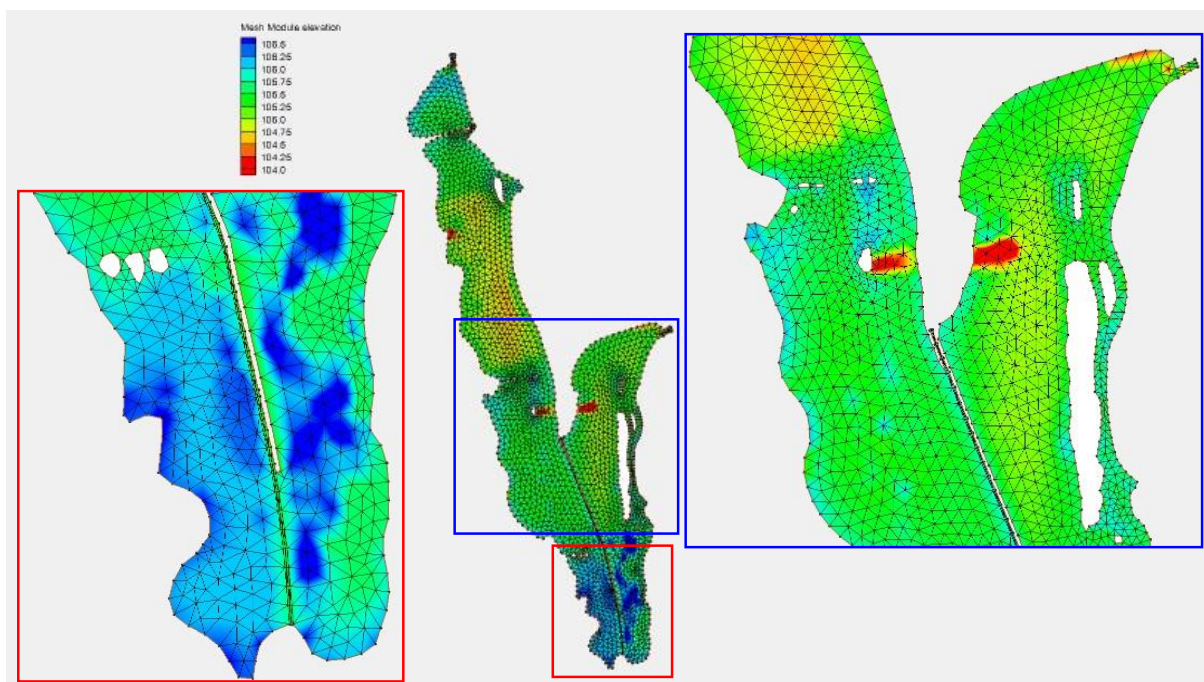
A műtárgyak közelében is sűrűbbre vettem a hálóközt, méretüktől függően: általánosan 50 m-es cellaméretet alkalmaztam, de úgy, hogy a műtárgy minden oldalán legalább két darab téglalap (s ezáltal min. négy darab háromszög) keletkezzen a hálóban a számítás megfelelő pontossága érdekében. Amennyiben nem teljesült ez a feltétel, úgy sűrítettem a hálót, kisebbre véve a cellák méretét.

A háromszög kialakítású háló előnye, hogy egyszerűen, rugalmasan illeszthető a terep alakzataihoz, valamint, hogy lokálisan sűríthető a modell legfontosabb helyein. A 3.3.2. és a

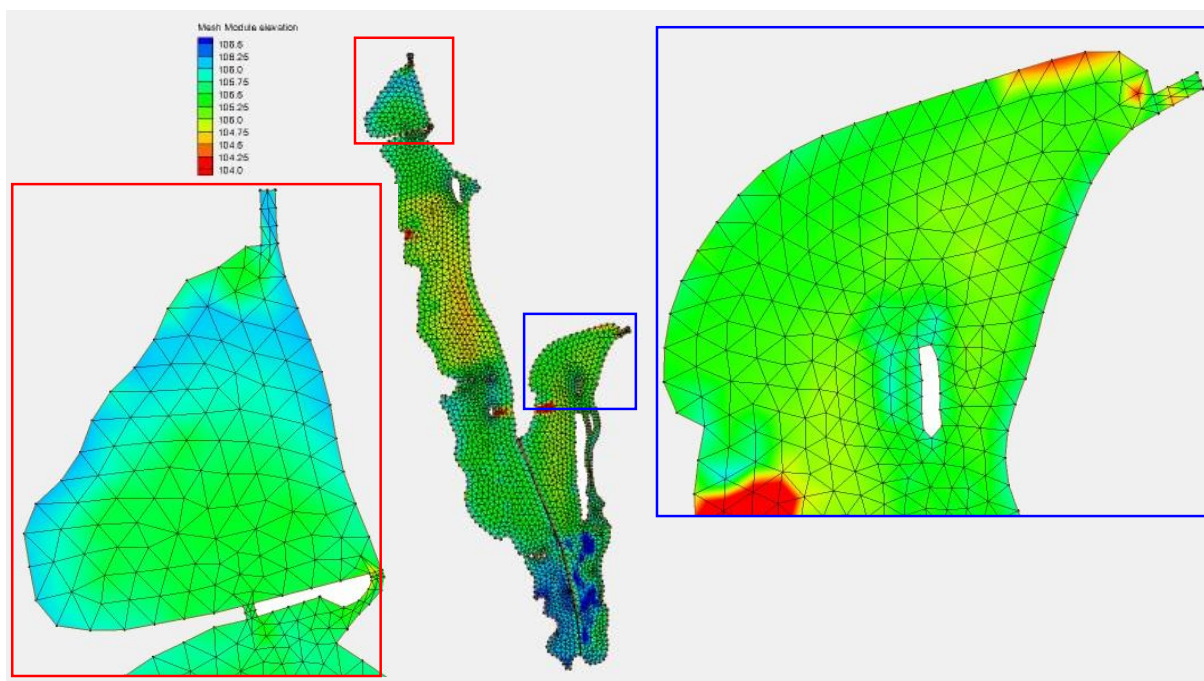
3.3.3. *ábrákon* látható, hogy a létrehozott háromszöglapos számítási háló jól követi a terepmodellt, a fontosabb helyeken sűrűbb csomópontokkal.



3.3.1. *ábra*: A létrehozott háromszöglapos számítási háló



3.3.2. ábra: A Hídvégi-tó terepmodellje és számítási hálója. Kiemelve a terelőtöltés vége, és a Kiskomáromi-csatorna befolyása



3.3.3. ábra: A Hídvégi-tó terepmodellje és számítási hálója. Kiemelve a Zala befolyása és a Kifolyási szelvény a 4T műtárgynál

3.3.1. Területhasználati osztályok

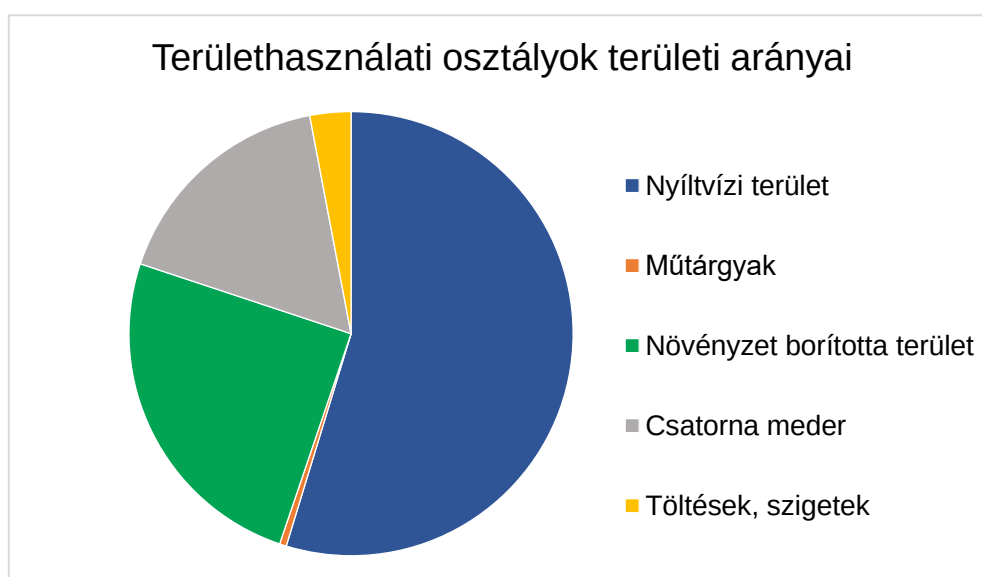
Az különböző területhasználati osztályokat a Google maps ortofotója, valamint a NYUDUVIZIG-től kapott mederfelmérések alapján állapítottam meg. Az ortofotót georeferáltam, majd Autocad 2018 szoftverben lehatároltam a különböző területhasználati osztályú területeket.

5 területhasználati osztályt különítettem el: nyíltvízi területeket, növényzet borította területeket, a Kiskomáromi-csatorna medrét, a műtárgyakat, valamint azon területrészeket, amelyeken nem áramlik a víz (töltések, szigetek). Az egyes területhasználatok simasági együtthatóit a 3.3.1. táblázat tartalmazza.

Területhasználati osztály	Simasági együttható, $k [m^{1/3}/s]$
Nyíltvízi területek	40
Csatorna meder	20
Műtárgyak	15
Növényzet borította területek	5
Növényzet borította területek, III. változat	2.5
Töltések, szigetek	0

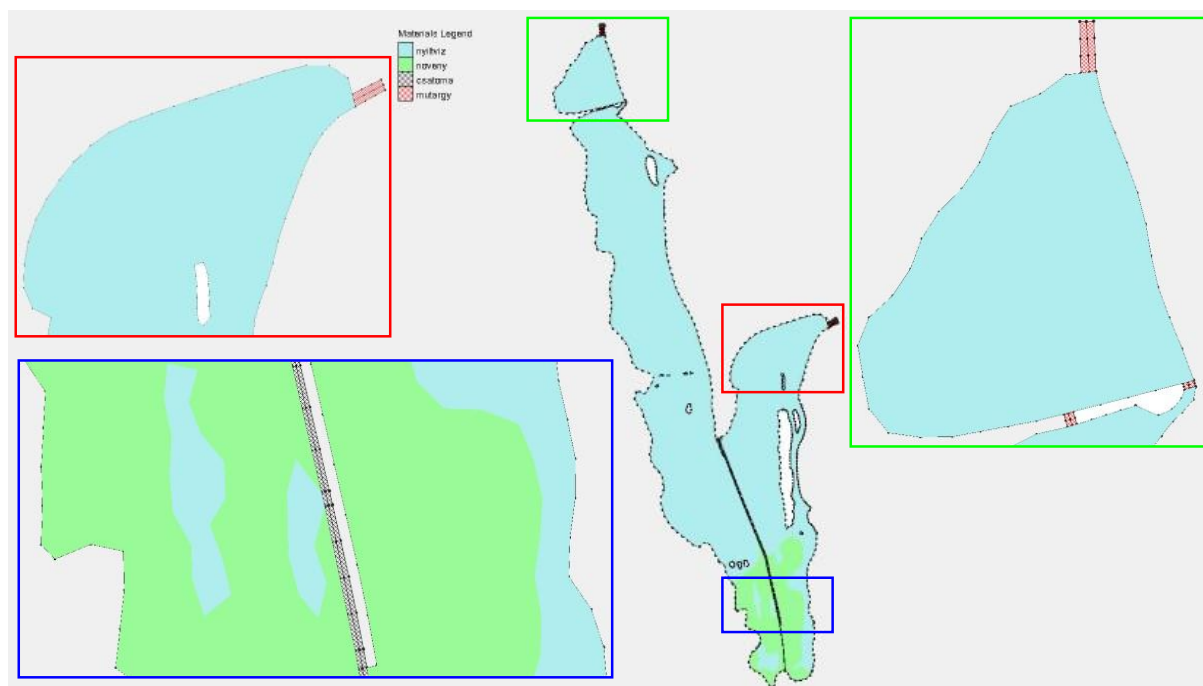
3.3.1. táblázat: Az egyes területhasználati osztályok simasági együtthatói

A „Műtárgyak” területhasználati osztályban figyelembe vettem a 7512-es mellékutat keresztező hidat és átereszt, valamint a kifolyási peremen a 4T műtárgyat (másnéven Laki István-zsilipet). Szintén ebbe az osztályba soroltam a Zala befolyását is.



3.3.1.1. ábra: Területhasználati osztályok területi arányai

A 3.3.1.1. és a 3.3.1.2. ábrákon jól látható, hogy a nyíltvízi területeken kívül a legnagyobb kiterjedésű a növényzet borította területek nagysága, így arra várhatóan érzékeny lesz a modell. Ezért III. változatként érzékenységvizsgálatot végeztem, megváltoztatva a területhasználati osztály simasági együtthatóját.



3.3.1.2. ábra: A vizsgált terület területhasználati osztályai

4. Eredmények

4.1. Szélmeghajtás hatása

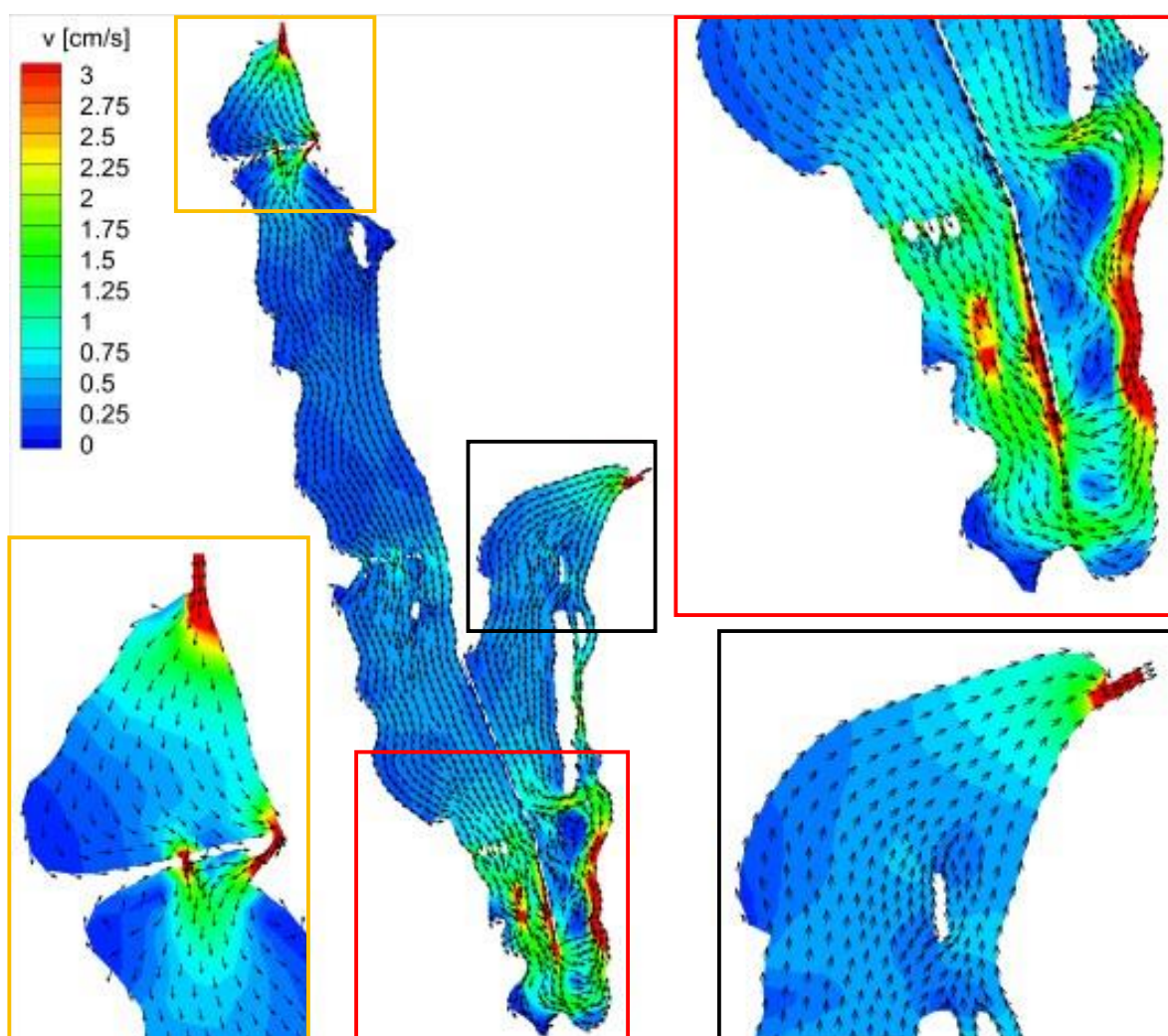
Elsőként a szél figyelembevétele nélkül, normál üzemállapotban (2.3.2. fejezet, 11-12. oldal) vizsgáltam meg a tározó áramlási viszonyait. Így a széllal meghajtott változat után megfigyelhető, hogy melyek azok az esetleges jelenségek, amelyeket a szél okoz, illetve amelyekre kifejezetten erősebb, viharos szél esetén kell ügyelni az üzemeltetés során.

A modellt MIKE 21 szoftverben futtattam, a sokéves középvízi vízhozamhoz legközelebb álló vízhozam idősor alapján, amely a 2013. április 20 – 2013. május 20 közötti. A program előnye, hogy képes kezelni az áramló és rohanó vízmozgásokat, a szél dinamikus változó hatását, valamint a meder esetleges kiürülését és a víz esetleges kiöntését is a mederből. A peremfeltételeket a 3.1.2. fejezet tartalmazza.

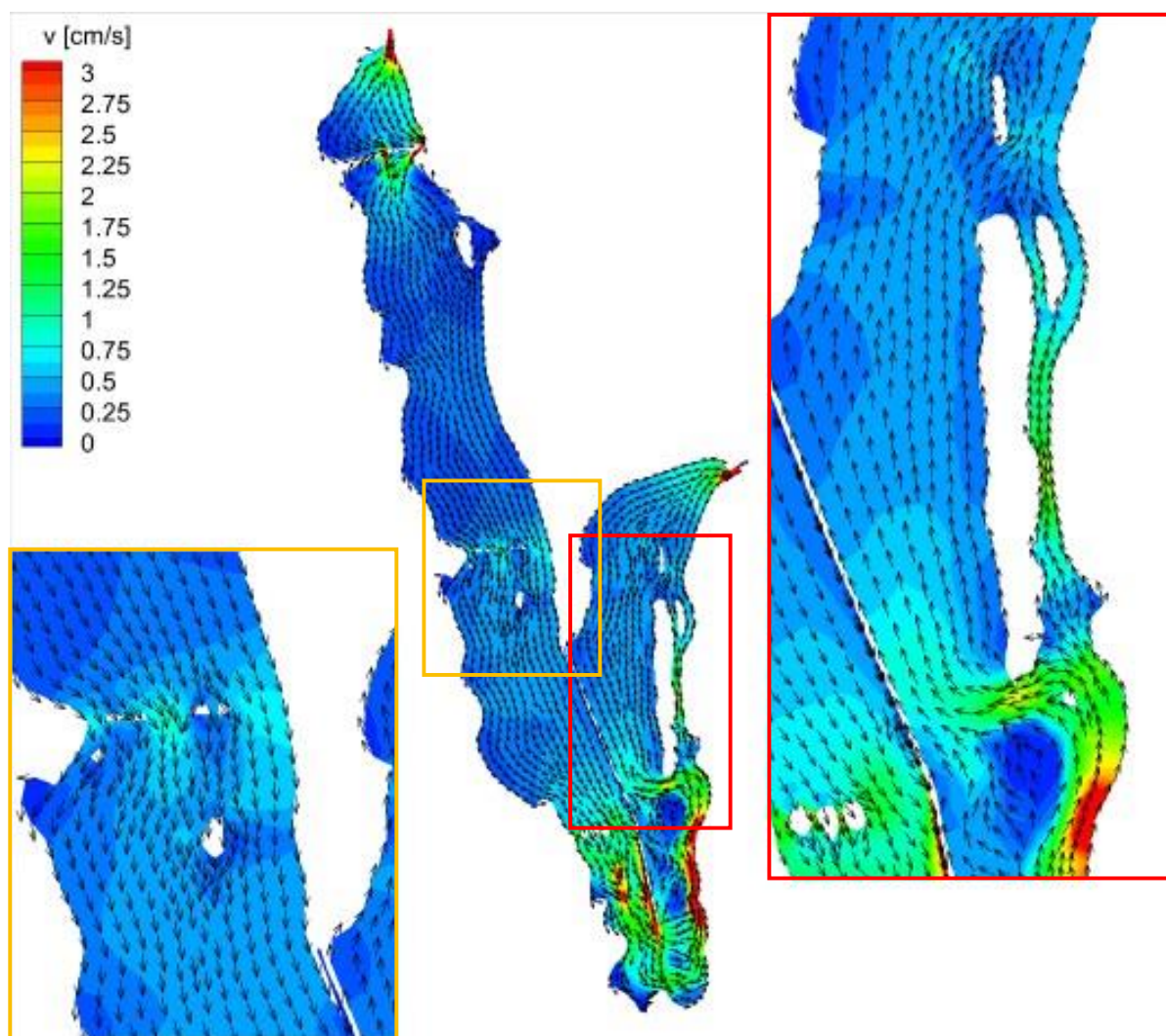
Mivel az alkalmazott peremfeltétel egy jellemző középvízi vízhozamokból álló mért idősor, így a modell vízhozama nem permanens. Az általános következtetések levonására így létrehoztam

ebből egy időátlagolt állapotot, amelyet ábrázoltam. Elsősorban az áramlási sebesség nagyságát és irányát vizsgáltam, valamint összevettem a terep jellemzőivel.

A 4.1.1. ábrán látható, hogy szél nélküli állapotban (1. változat) a víz a Zala folyásirányának megfelelően északról dél felé folyik a tározó nyugati oldalán. A terelőtöltés és a tározómeder déli vége között visszakanyarodik a töltés másik oldalára (4.1.1. ábra, piros színű keret), s a Hídvégi-tó keleti oldalán halad a kifolyási szelvény (a 4T műtárgy) felé. Normál üzemállapotban a Kazetta és a Major-tó zsilipjei zárva tartandók, így ekkor a Kiskomáromi-csatorna igen kis esésű medrében a tározón belül, a terelőtöltés mentén a víz dél felé halad, visszafolyás keletkezik.



4.1.1. ábra: Az 1. változat (szél nélküli futtatás) eredménye



4.1.2. ábra: Az 1. változat (szél nélküli futtatás) eredménye. Kiemelve a szigetek körüli sebességek

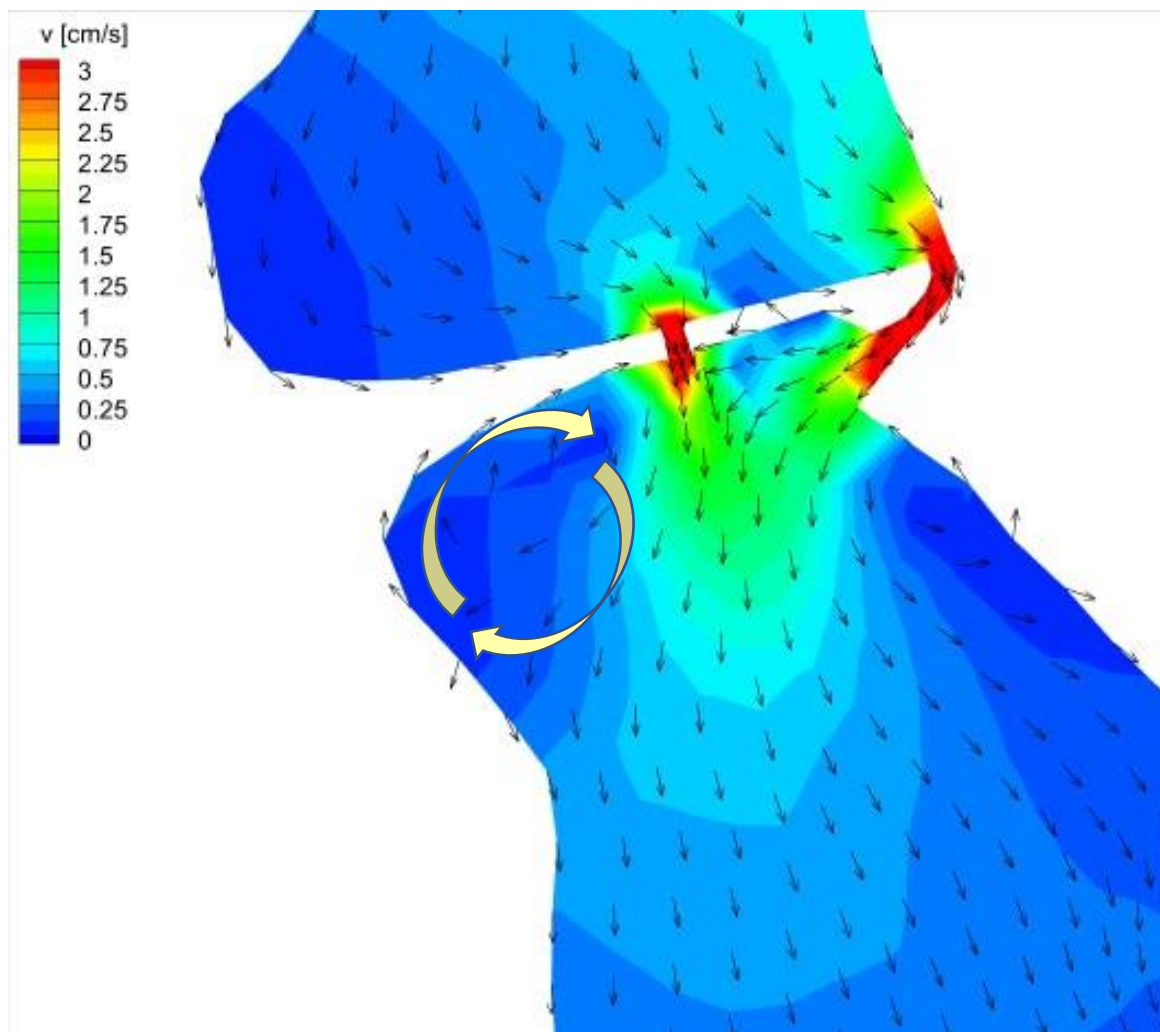
A meder egészében a víz a terephez igazodva a szigeteket megkerülve folyik. Ekkor megfigyelhető, hogy a szigetek és a meder partja, illetve a terelőtöltés között keletkezett szűkületekben a sebesség nagysága általában megnő (4.1.1. ábra, piros színű keret). Minél kisebb az átfolyási keresztmetszet, annál nagyobb sebesség alakul ki. Ez történik például a Kányavári-sziget, a Szarkavár és a tározó partja közötti (4.1.2. ábra, piros színű keret); valamint a Garabonci-víz északi részén található egymás melletti kisebb szigetek (4.1.1. ábra, piros színű keret), a part, és a terelőtöltés közötti szűkületekben.

Ez alól részben kivételt képeznek a Pogányvári-vízen, a Radai-malomárok torkolata közelében kialakult szigetek és a part közötti szűkületek (4.1.2. ábra, sárga színű keret). Itt is megnő az áramlási sebesség, ám a legnagyobb sebesség érték a szigetek közötti legszélesebb keresztmetszetben alakul ki. Ennek oka, hogy itt a legszélesebb keresztmetszetű szűkületben a legalacsonyabb a terepszint.

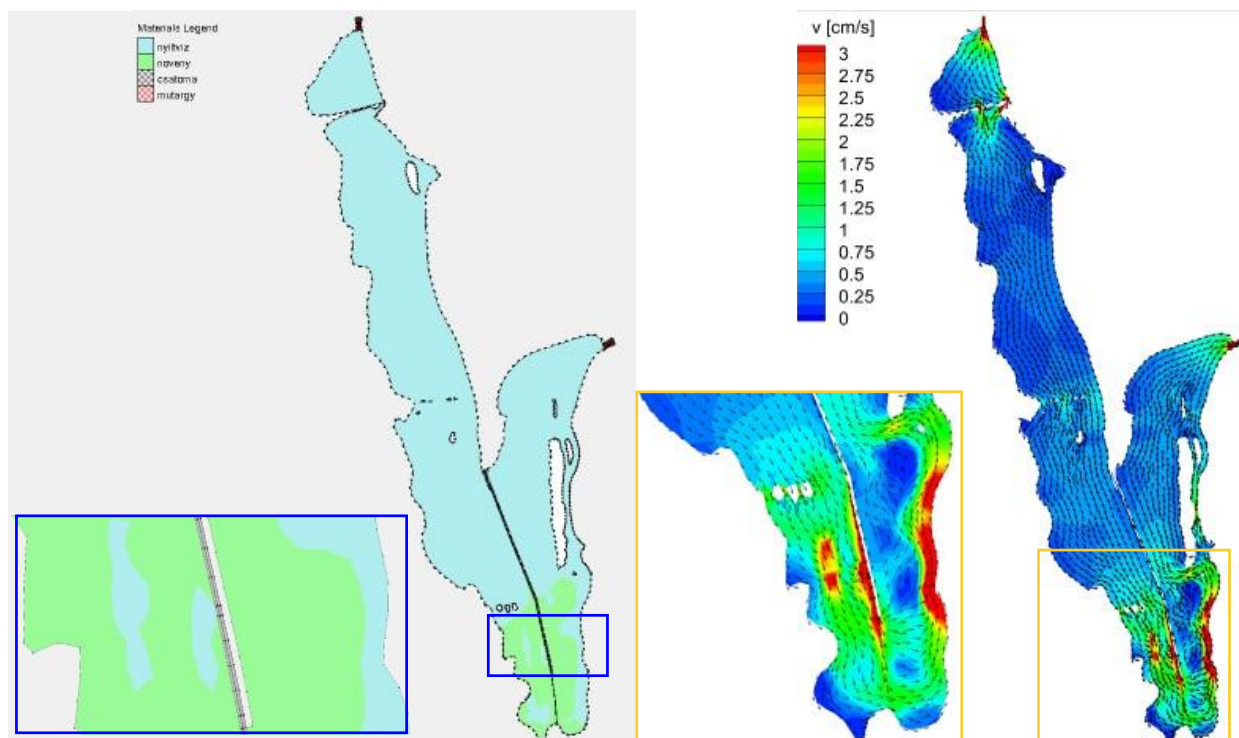
A befolyási szelvényben, ahol a Zala a Hídvégi-tóba torkollik (4.1.1. ábra, sárga színű keret), szintén nagyobb sebességek figyelhetők meg, melyek a tározóban tovább haladva egyre csökkennek (az áramlási keresztmetszet szélesedése által).

A műtárgyak közelében található szűkületekben is ugyanez a jelenség figyelhető meg: a szűkületekben megnő az áramlási sebesség nagysága, majd azon áthaladva lecsökken. Ez történik a kifolyási szelvényben a 4T műtárgynál (4.1.1. ábra, fekete színű keret), amennyiben a normál üzemállapotban történő üzemeltetési előírásnak megfelelően (lásd: 2.3.2. fejezet, 11-12. oldal) szabályozott zsilipet feltételezünk; valamint a 7512-es mellékút keresztező műtárgyainál (a hídnál és az áteresznél, 4.1.1. ábra, sárga színű keret) is.

Továbbá megjegyzendő, hogy az átereszen való áthaladás után kialakul egy körkörös áramlás a Szabari-víz nyugati oldalán lévő kisebb öblében (4.1.3. ábra). Itt a vízfésztek visszakanyarodnak a szűkület végső keresztmetszetéhez, majd ismét csatlakoznak a tovább áramló víztömeghez.



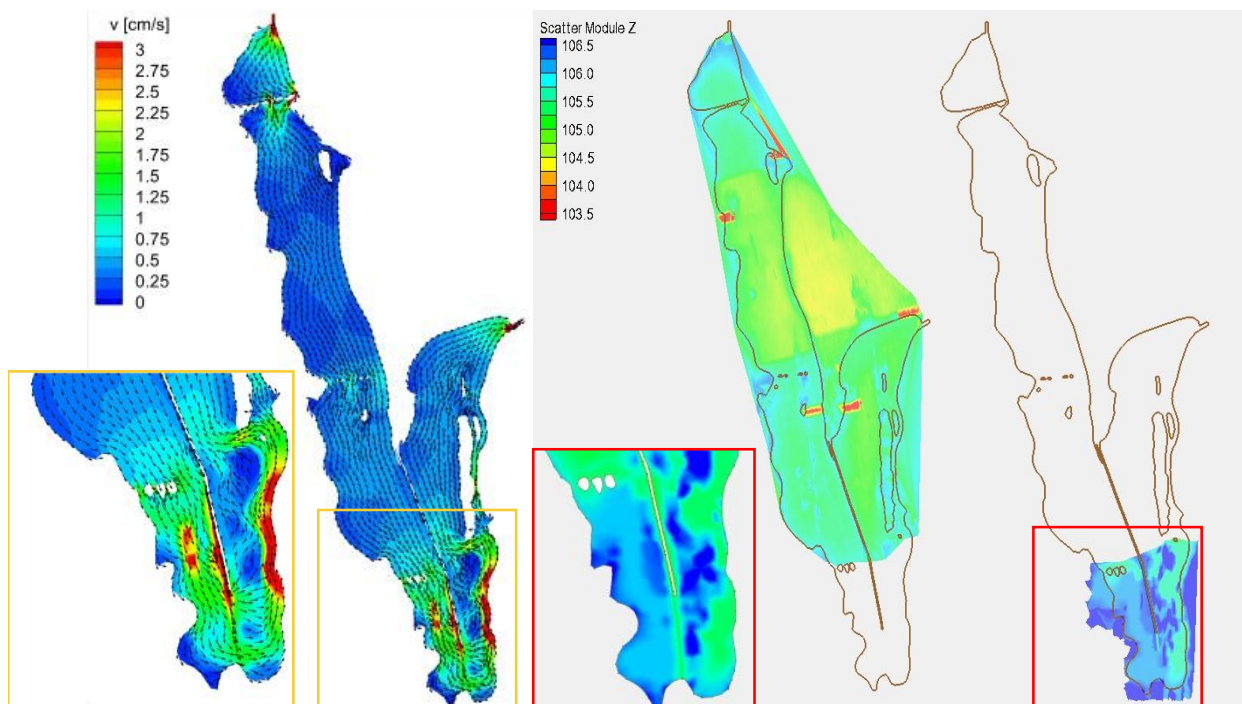
4.1.3. ábra: Körkörös áramlás a Szabari-víz öblében, az áteresz közelében



4.1.4. ábra: Simaságok és sebességek a déli növényzet borította területen

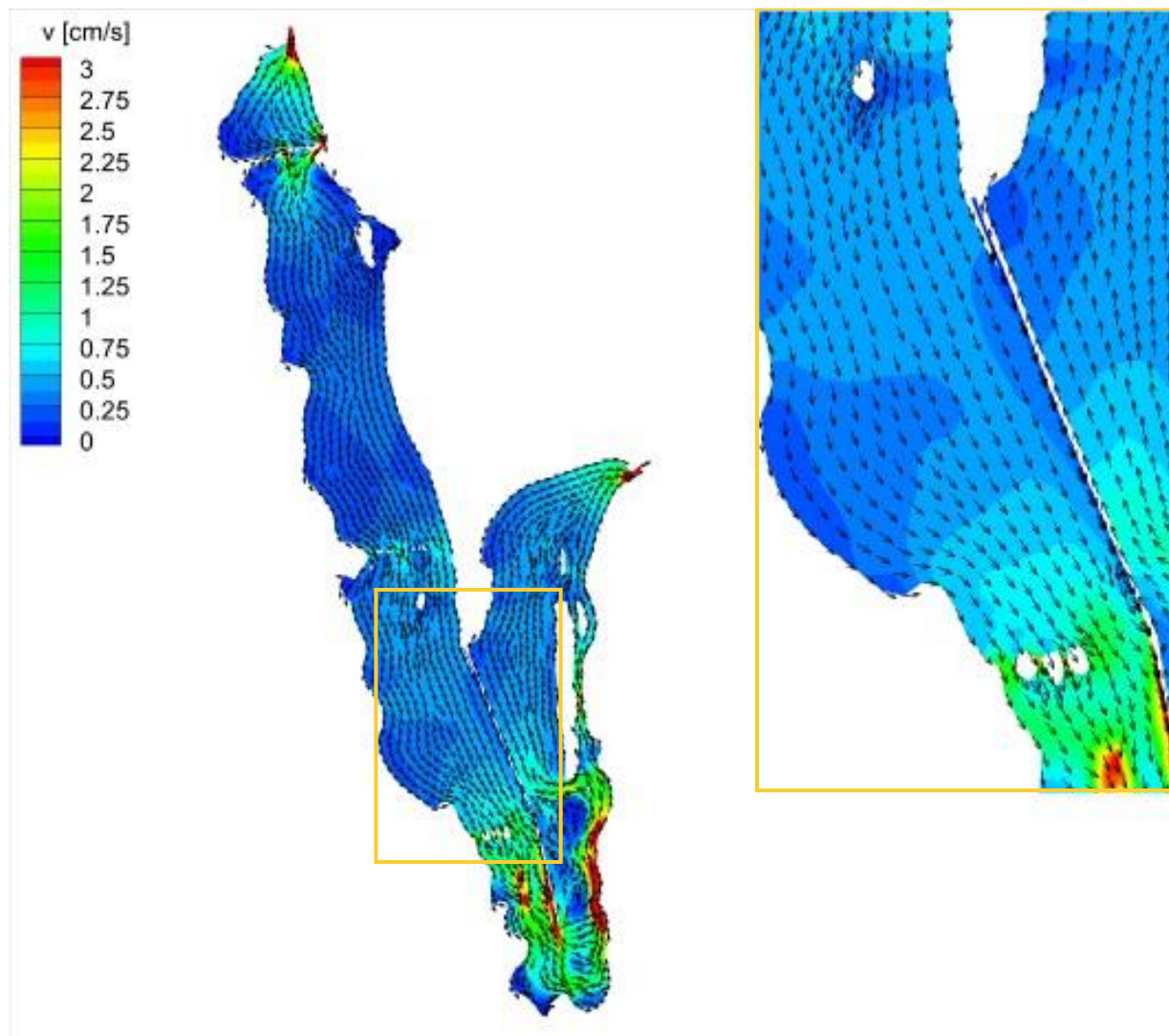
A simaság hatása leginkább a déli, növényzet borította területen figyelhető meg (4.1.4. ábra). Az itt található nyílt vízfelületeken, ahol nagyobb a terep simasága, látványosan felgyorsul az áramlás, akár 3 cm/s értéknél is nagyobbra. A növényzet nélküli nyíltvízi területekhez képest is nagyobb sebesség alakul ki, bár simaságuk megegyezik. A terelőtöltéstől nyugatra lévő nyílt vízfelületű részen is ez történik, ám a terület közepén némiképp lelassul az áramlás a terep kisebb kismértékű emelkedésének köszönhetően. Ugyanez a jelenség figyelhető meg a növényzet borította terület keleti oldalán elhelyezkedő nyíltvízi részen is, a tározó partvonalának közelében: a sebesség nagysága megnő, mindössze a terep megemelkedésénél csökken le kissé.

Hasonló okból gyorsul fel az áramlás a Kiskomáromi-csatorna medrében is a tározó déli részén. Ez a növényzet borította terület legmélyebb része; kisebb árokként vonul végig (4.1.5. ábra, piros színű keret). Ennek megfelelően, a terepet követve, minél több vízrészecske igyekszik ide, az alacsonyabb potenciálú hely felé. Nem elhanyagolható, hogy a csatorna simasági együtthatója négyszerese a növényzet borította területének (4.1.4. ábra), tehát itt jelentősen könnyebben és gyorsabban képes áramlani a víz. Mindezeknek köszönhetően e szakaszon a csatorna medrének jelentősen nagyobb a fajlagos vízhozama (q , [m²/s]) az egyes tározókeresztmetszetek többi részénél.



4.1.5. ábra: Az 1. változat (Szél nélküli futtatás) eredménye. Kiemelve a tározó déli része

A Kiskomáromi-csatorna medre tározón belüli északibb szakaszán továbbra is a terelőtöltéssel párhuzamosan halad, egészen a Kísérleti-tó beeresztő műtárgyáig a Kísérleti-tó töltés 0+597 tkm szelvényében, amely egy csőzsilip betétpallós elzárószerkezettel (4.1.6. ábra). Normál üzemállapotban a zsilip zárva tartandó (lásd 2.3.2. fejezet, 11-12. oldal), így a modellben is zártnak tekintettem. A zárt zsilipnél az azt elérő víz visszairányul a csatorna medrébe. A csatorna meder azon a szakaszon, amelyen szomszédos a nyíltvízi területtel, magasabban fekszik annál. Emellett a tározó nyíltvízű medrének simasági együtthatója kétszerese a csatorna medrének, így a víz legnagyobb részét ezen szakaszon a tározó medre vezeti el.



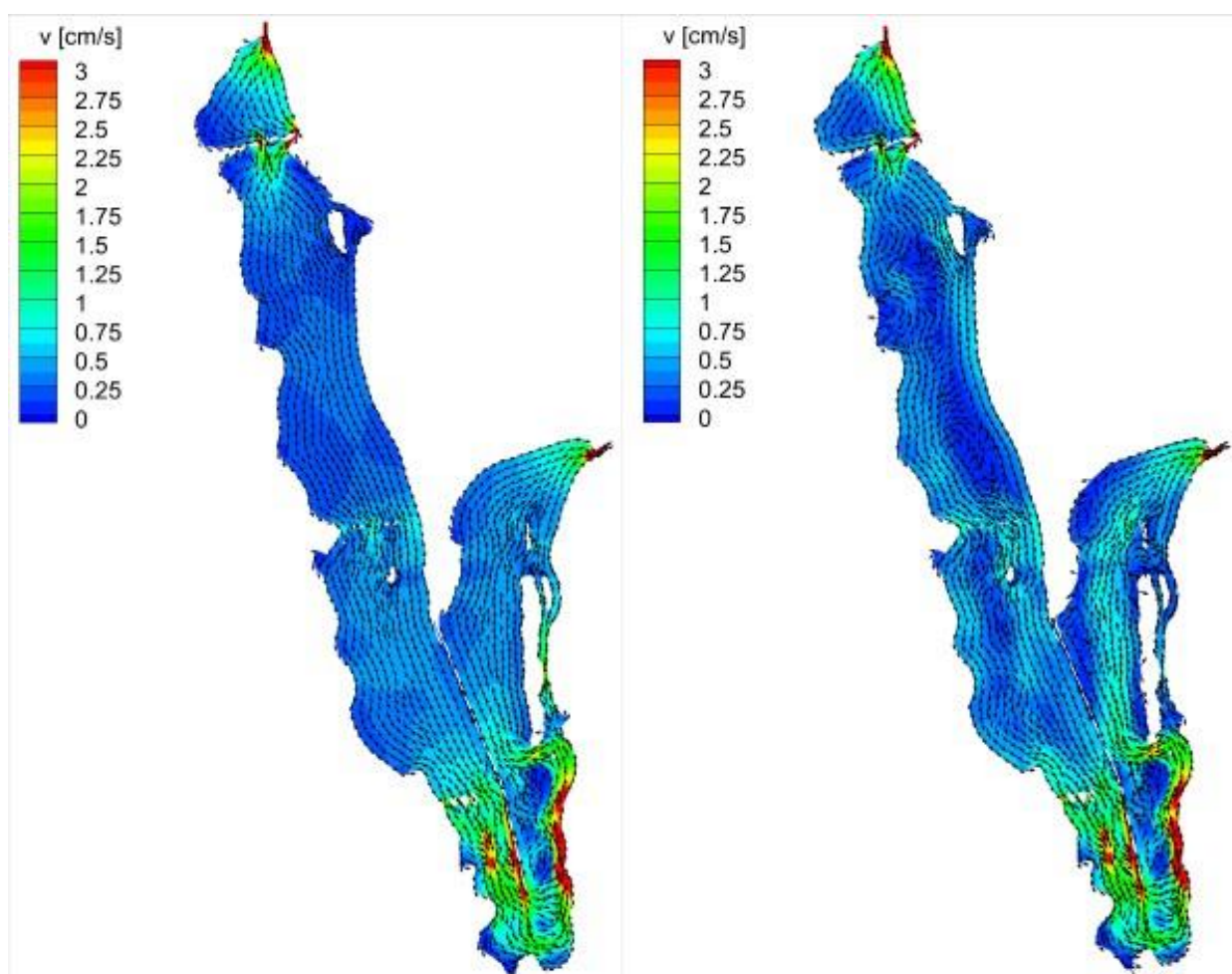
4.1.6. ábra: Az 1. változat (szél nélküli) futtatás eredménye. Kiemelve a Kiskomáromi-csatorna medre

A 2. változatban az elsőhöz képest még egy peremfeltételt adtam meg, az adott időszak szélidősort (lásd 3.1.2. fejezet, 18-19. oldal), majd így is elvégeztem a szimulációt. A simasági együtthatókat nem változtattam. A jellemző szélirány az északkeleti, a Zalai-dombság északkeleti vonulatának megfelelően, ám dinamikusán változó hatás lévén nagysága és iránya gyakran és hirtelen változik a vizsgált időszak során. Azonban erős, viharos szelek a térséget jellemző uralkodó észak-északnyugati irányból érkeztek. Az alkalmazott szél és vízhozam idősorok értékei ez esetben sem tekinthetők permanensnek, így ezúttal is létrehoztam a futtatás egészéből egy időátlagolt állapotot, ezzel egyszerűsítve az eredmények elemzését. Ezután a 2. változatot összevettem a szél meghajtás nélküli 1. változat eredményeivel (4.1.7. ábra).

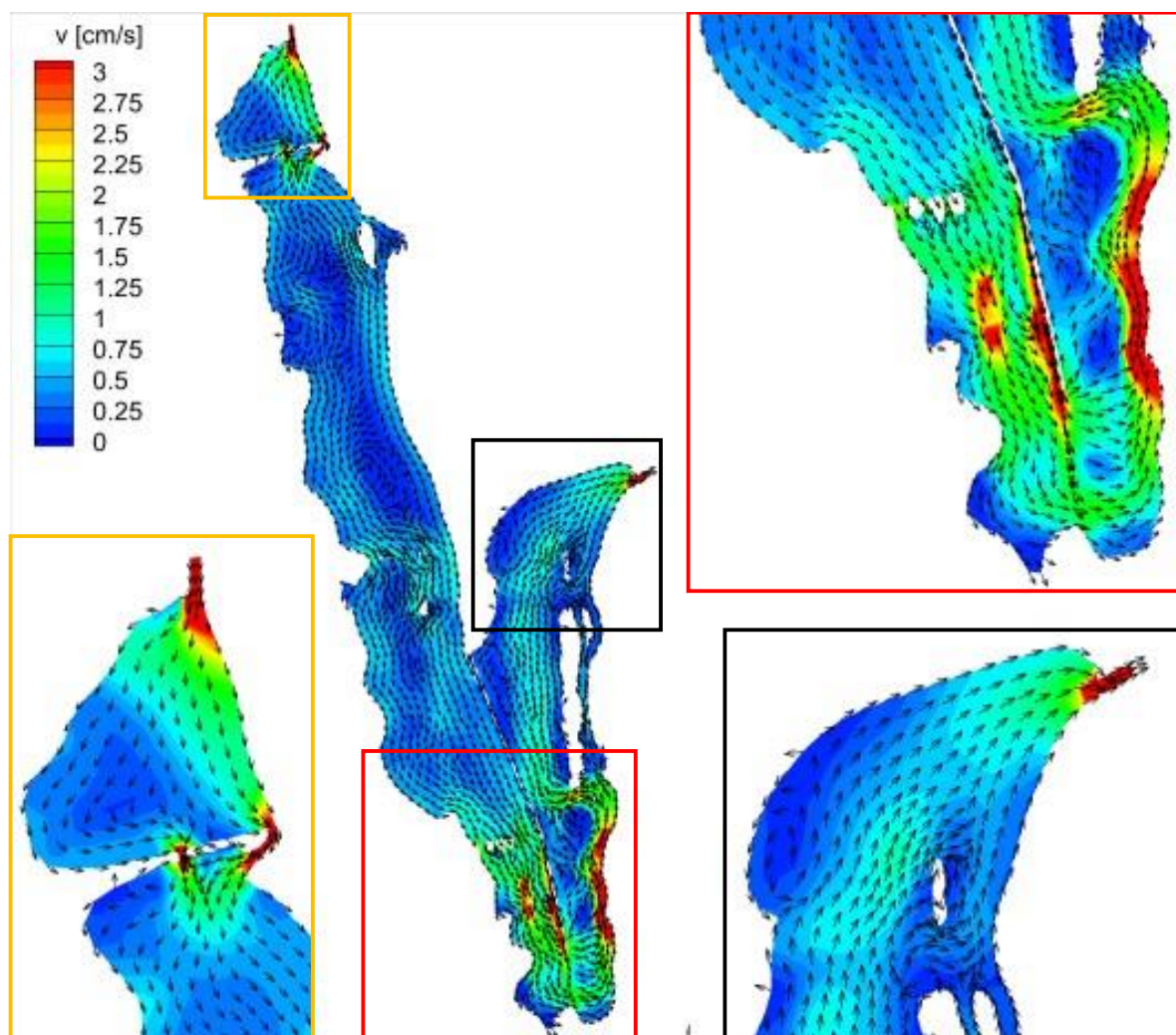
A fő áramlási irány szél hatása mellett is azonos marad: a tározó nyugati oldalán a víz északról dél felé halad, majd a terelőtöltés vége után visszakanyarodik, és annak másik oldalán folyik a 4T műtárgy felé (4.1.7. és 4.1.8. ábra). Ez esetben is normál üzemállapotban vizsgáltam a

Hídvégi-tavat, így a Kiskomáromi-csatorna kis esésű medrének tározón belüli szakaszán a Kísérleti-tó beeresztő zsilipjétől a terelőtöltés végéig ezúttal is visszafolyás alakul ki (4.1.8. ábra, piros színű keret).

A víz szél esetén is a terepnek megfelelően a szigeteket megkerülve halad. A szigetek és a part, illetve a terelőtöltés közötti szűkületekben jellemzően megnő a sebesség nagysága, akár csak a szél figyelembevétele nélküli 1. változatban. Azonban ez esetben nem jelenthető ki, hogy minél kisebb a szűkület, annál nagyobb sebesség alakul ki. Ez a jelenség ugyanis egyedül a Garabonci-víz északi részén található egymás mellett kisebb szigetek, a part, és a terelőtöltés közötti szűkületekben figyelhető meg (4.1.8. ábra, piros színű keret).



4.1.7. ábra: Az 1. (szél nélküli) és 2. (szélmeghajtásos) változat eredményei

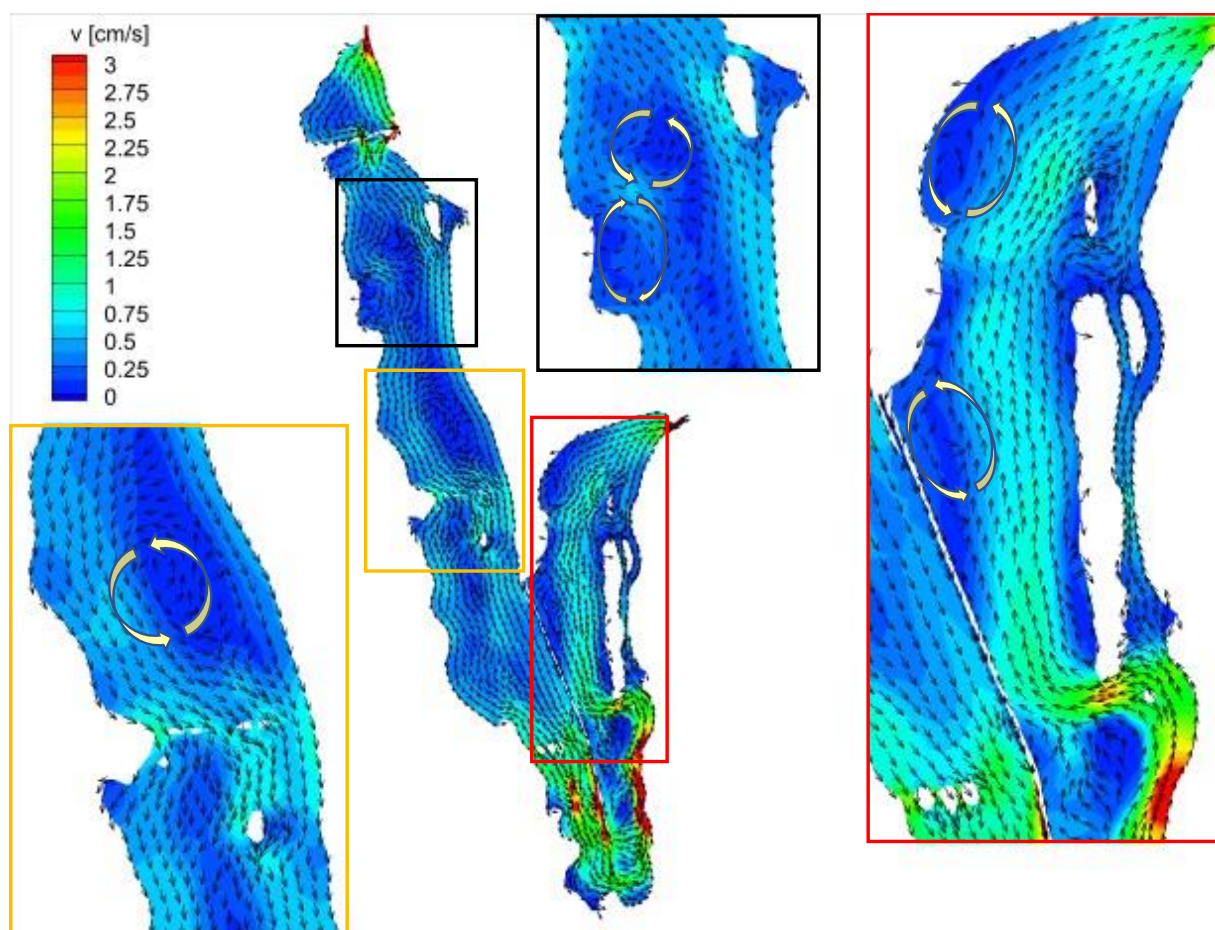


4.1.8. ábra: A 2. (szélmeghajtásos) változat eredménye

A Kányavári-sziget, a Szarkavár, és a tározó medrének partja közötti szűkületekben az 1. változathoz képest kisebb sebességek alakulnak ki (4.1.9. ábra, piros színű keret). Feltételezhetően azért, mert a Kányavári-szigettől délre található kis szigetet (Mester-sziget) megkerülve a terep kisebb szintkülönbségei is felértékelődnek: a Mester-sziget déli oldalán a meder terepszintje alacsonyabb, mint az északi oldalán, így a szél miatt nagyobb sebességgel áramló vírzecskék nagyobb hányada irányul az alacsonyabb potenciálú, kevesebb akadállyal és íránymódosítással járó útvonal felé. Azok a vírzecskék, amelyek északról megkerülik a Mester-szigetet, jellemzően a tározó partjának vagy a Kányavári-szigetnek ütköznek, ám nagyobb részük a Mester-szigetet északról megkerülve halad tovább. Érdeemes megemlíteni, hogy ahol a szigetet kétoldalról megkerülő áramlások összefolynak, ott szintén nagyobb sebesség alakul ki, amely aztán fokozatosan lecsökken a meder mélyülése és szélesedése által. A Kányavári-sziget és a part között ugyanis nemcsak szűkületben, hanem az uralkodóan északi széllel szemben kellene haladniuk, ráadásul a Kányavári-sziget déli részének keleti oldalán a

terep is megemelkedik kissé. E három hatás eredményezi azt, hogy az áramló víztömeg legnagyobb hányada a Mester-sziget déli vagy északi oldalról történő megkerülése után a Kányavári-szigetet nyugatról megkerülve folyik. Ezen terület egészen a terep szintje alacsonyabb, mint a sziget keleti oldalán, így a víz kisebb sebességgel haladhat tovább a kifolyási szelvény felé.

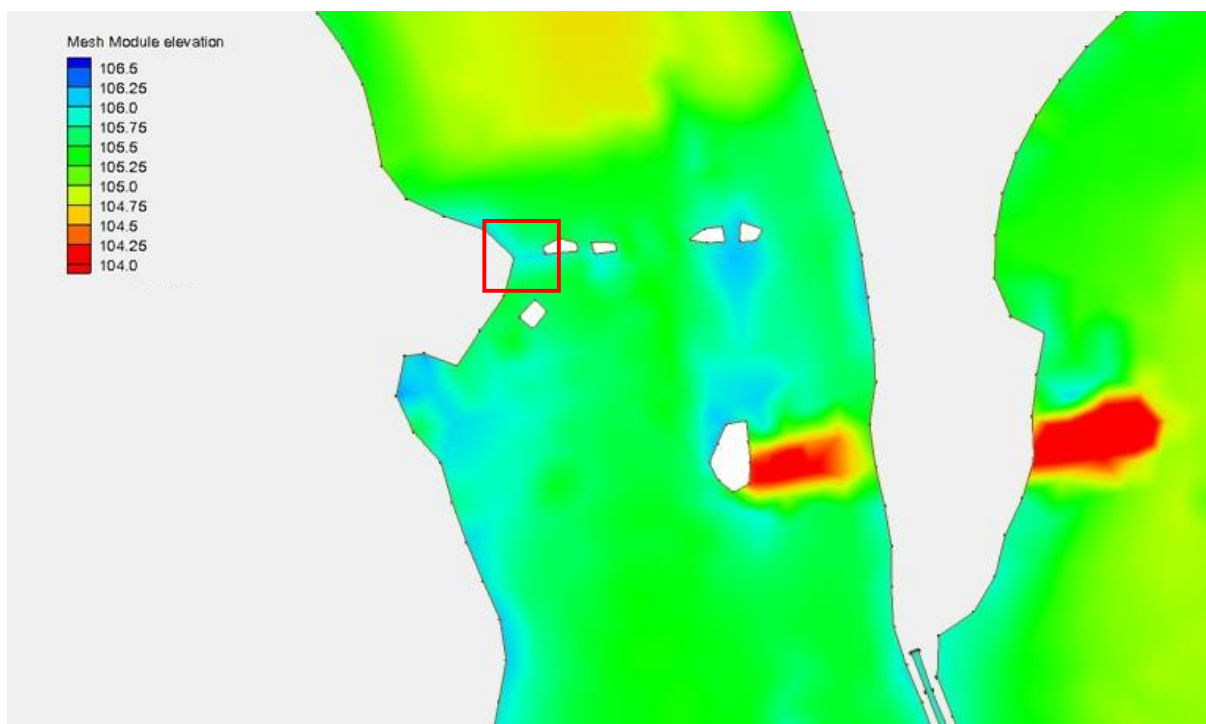
A Pogányvári-vízen, a Radai-malomárok torkolatának közelében kialakult szigetek és a tározó medrének partja közötti szűkületekben is a szél figyelembevétele nélküli 1. változattól eltérően alakult az áramlási sebesség (4.1.9. ábra, sárga színű keret). Előző esetben a legszélesebb és egyben legalacsonyabb terepszintű keresztmetszetben alakult ki a legnagyobb sebesség. A szél figyelembevétele esetén azonban a legnagyobb sebesség a tározó nyugati partja és a hozzá legközelebbi sziget között alakul ki.



4.1.9. ábra: A 2. változat eredményei. Kiemelve a körkörös áramlások.

Érdekes, hogy itt a terep keresztirányban tulajdonképpen egy vonalban kb. 1 m-t emelkedik, majd vissza is csökken, mintegy természetes fenékküszöbként (4.1.10. ábra, piros színű keret). Mivel egy időátlagolt állapottal dolgozom az eredmények elemzése során, e jelenség esetében

ezen mennyiségeket permanensnek tekintettem, valamint a „fenékküszöb” lejtőjét enyhének feltételeztem a terep természetes alakulásából kiindulva. A „küszöb” felett a vízmélység (h [m]) lecsökken, a fajlagos vízhozam (q [m²/s]) és a sebesség (v [cm/s]) nő. A „természetes fenékküszöb” előtt és után közel azonos vízmélység alakul ki. A küszöb előtti mozgás áramló (mivel a vízmélység nagyobb a kritikus vízmélységnél), így a küszöb felett pedig a vízszint lesüllyed, utána pedig visszaáll az eredeti vízmélység. A modell eredményeként kapott sebességekből és vízmélységekből kiszámítottam a fenékküszöb feletti Froude-számot, amely kisebb volt 1-nél, így megállapítottam, hogy itt is áramló a vízmozgás. Ugyanezt elvégeztem a „fenékküszöb” utáni vízmélységekre is, ott is áramló a vízmozgás. Összefoglalva tehát a terepnek ezen keresztirányú megemelkedése megváltoztatja a felszín görbe alakját, lecsökkenti a vízmélységet, valamint megnöveli a fajlagos vízhozamot és az áramlási sebességet a keresztmetszetben.



4.1.10. ábra: Terep alakulása a Pogányvári-víz szigeteinek közelében. Bekeretezve a „természetes fenékküszöb”

Hasonló jelenség játszódik le a befolyási és kifolyási szelvények, valamint a műtárgyak okozta szűkületekben is. Az átfolyási keresztmetszet keskenyebb, emiatt a fajlagos vízhozam megnő, s így a sebesség is. Ezen vizsgálati helyeken hasonlóak a lejátszódó áramlási jelenségek a szél figyelembevétele nélküli 1. változat eredményeihez. Azonban megjegyzendő, hogy a 7512-es mellékút áteresze után szél jelenléte esetén nem alakul ki körkörös áramlás a Szabari-víz

nyugati oldalán elhelyezkedő kisebb öbölben (4.1.8. ábra, sárga színű keret). Ehelyett a víz a fő áramlási iránynak megfelelően halad tovább.

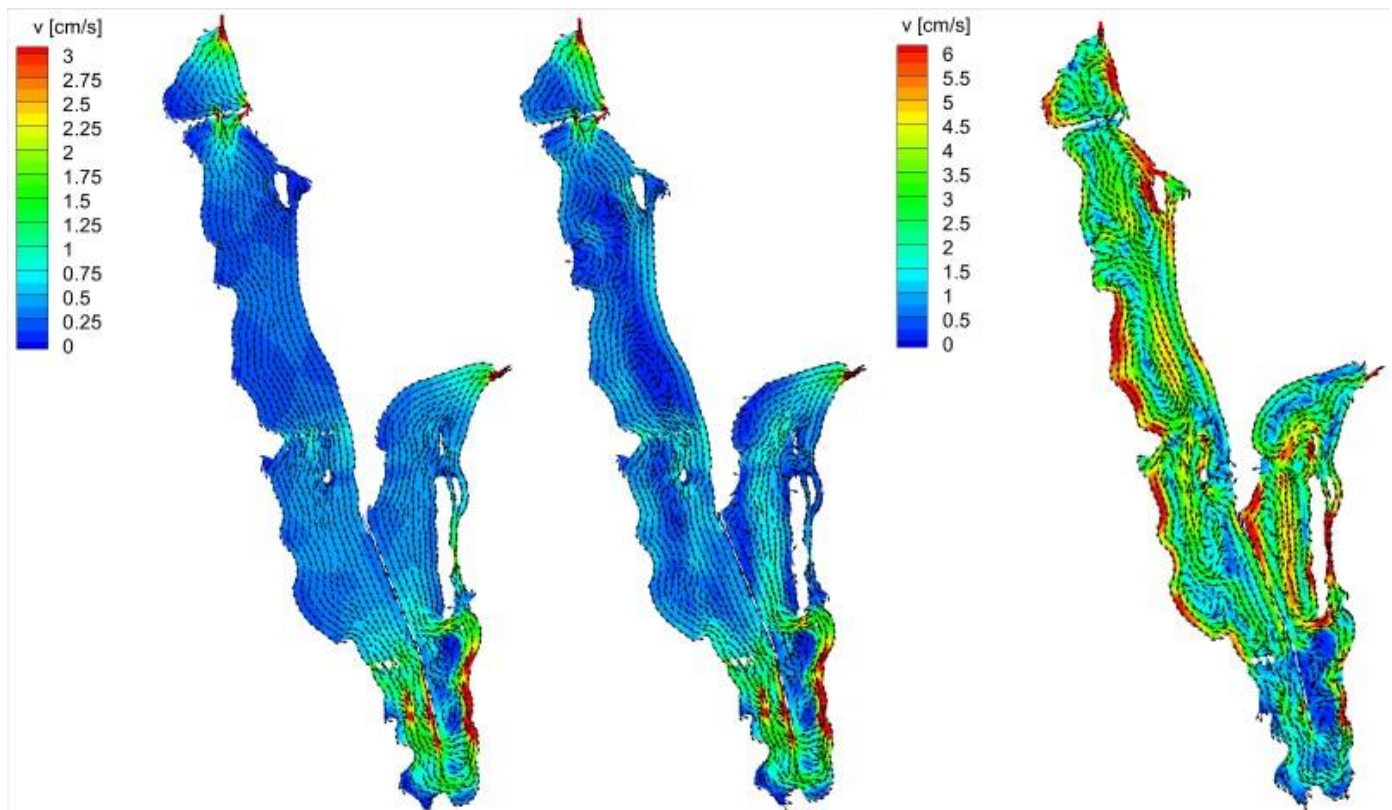
A tározó déli, növényzet borította területén is hasonló áramlási jelenségek figyelhetők meg, mint a szél figyelembevétele nélküli 1. változatban (4.1.8. ábra, piros színű keret). A nyílt vízfelületeken nagyobb sebességek alakulnak ki, mint a kisebb simaságú növényzet borította területeken. Az áramlás mindössze a terep kismértékű emelkedéseinek következtében lassul le helyenként. E területen nem alakulnak ki körkörös áramlások a szél hatására.

A Kiskomáromi-csatorna tározón belüli medrének déli szakaszán, a növényzet borította területen szintén hasonló a modellfuttatás eredménye, mint az 1. változatban (4.1.8. ábra, piros színű keret). Az alacsonyabb terepszint, és a nagyobb simaság miatt gyorsabban áramlik itt a víz, nagyobb fajlagos vízhozammal, majd a terelőtöltés vége után a szállított víztömeg visszakanyarodik a töltés mentén, egyesülve a Kiskomáromi-csatorna beérkező kicsinek tekinthető vízhozamával. A csatorna északibb szakaszán, a nyíltvízi területtel szomszédosan sem történik jelentős változás az áramlásban (4.1.9. ábra, piros színű keret).

A legfontosabb különbség a szél figyelembevétele nélküli 1. változat és a széllal meghajtott 2. változat között a tározómederben megjelenő körkörös áramlások, és a nagyobb áramlási sebességek megjelenése (4.1.7. ábra). Általánosan kijelenthető, hogy a szélerő hatására gyorsabbá válik az áramlás, nagyobb sebességek alakulnak ki a Hídvégi-tó medrében. Ez azért fontos, mert nagyobb sebesség esetén nagyobb a szállított vízhozam, ezáltal a tározó tartózkodási ideje lecsökken.

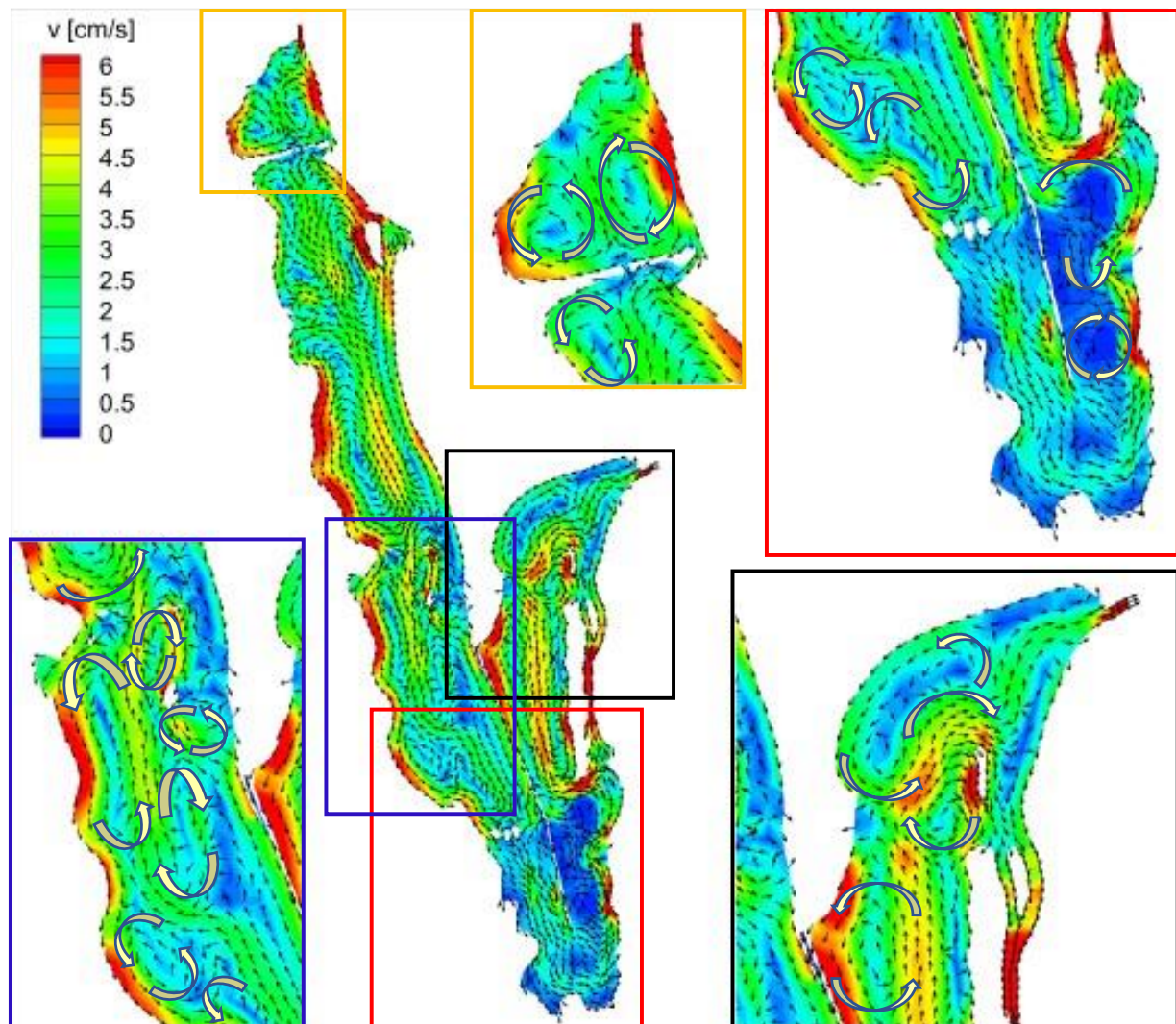
A szél több helyen is körkörös áramlásokat okoz a tározóban. A Borjúállás-szigettől délnyugatra, a Zalasabari-patak torkolatától északra is megfigyelhető két ilyen szél okozta körkörös áramlás (4.1.9. ábra, fekete színű keret). Ezek közül a délebbi a terep egy mélypontja körül alakul ki, míg a másik szintén a terep egy előzőnél kisebb mélyedése körül. Hasonlóan a magyarázata a Pogányvári-vízen, a feljebb említett szigetektől északra kialakuló körkörös áramlásnak, amely szintén a meder kismértékű mélyedése körül mozog.

A Fekete-sziget északi és déli végének közelében, a töltés kanyarulataiban is kialakulnak ilyen körkörös áramlások a szél hatására (4.1.9. ábra, piros színű keret). E helyeken azonban nem a terep mélypontjai körül történik az áramlás, hanem a töltésnek, illetve a szigetnek ütköző víz fordul vissza. A töltés nyugat-keleti irányultsága miatt a töltésen átbukó, jellemzően észak-déli irányú szél körkörös áramlást okoz ott, ahol „lecsapódik” a vízfelületre.



4.1.11. ábra: A szél nélküli 1. változat (balra), a szélmeghajtásos 2. változat (középen), és ez utóbbi változat idősorának legnagyobb szelének (jobbra) hatása az áramlásra

A 2. változat esetében megvizsgáltam az adott időszak legnagyobb mértékű szelének hatását is. Megfigyelhető, hogy ekkor a szél még több körkörös áramlást okoz (4.1.11. ábra), ám a fentiekől eltérő helyeken, valamint az áramlási sebességeket is jelentősen megnöveli (kb. a kétszeresére). A maximális szél hatására kialakuló körkörös áramlások jellemzően a meder magasabb és mélyebb részei körül, valamint a kisebb öblöknél alakulnak ki, valamint szűkületeknél.



4.1.12. ábra: A szélmeghajtásos 2. változat idősor legnagyobb szelének hatása az áramlási sebességre

A 7512-es mellékúttól északra, az áteresz és a híd nyílásai előtt két visszaforduló áramlás is létrejön, mivel a szűkület nem tudja megfelelően felvenni és elvezetni az erős szél miatt nagyobb sebességgel mozgó vizet (4.1.12. ábra, sárga színű keret). Az átereszen és a híd nyílásán át nem jutó vízrészecskék visszafordulnak a tározó északi részében.

A mellékúttól délre elhelyezkedő nyíltvízű területen a víz jellemzően a partok mentén áramlik dél felé, a meder közbenső részén pedig vissza, észak felé. Ezáltal a tározó ezen felén az erős szél hatására létrejön egy külön nagy cirkuláció, amelyen belül kisebb körkörös áramlások alakulnak ki a kisebb partmenti öblökben, illetve a terep mély- és magaspontjai körül (4.1.12. ábra; kék színű keret; 4.1.13. ábra; 4.1.14. ábra, kék színű keret).

Azonban amint a szél hajtotta víz eléri a déli, növényzet borította területet, a sebesség lecsökken (4.1.12. ábra, piros színű keret). Az ezen belül található nyíltvízű részeken ismét felgyorsul az áramlás, azonban itt is csak a csatorna medréhez közelebbi nyíltvízes területen haladja meg a

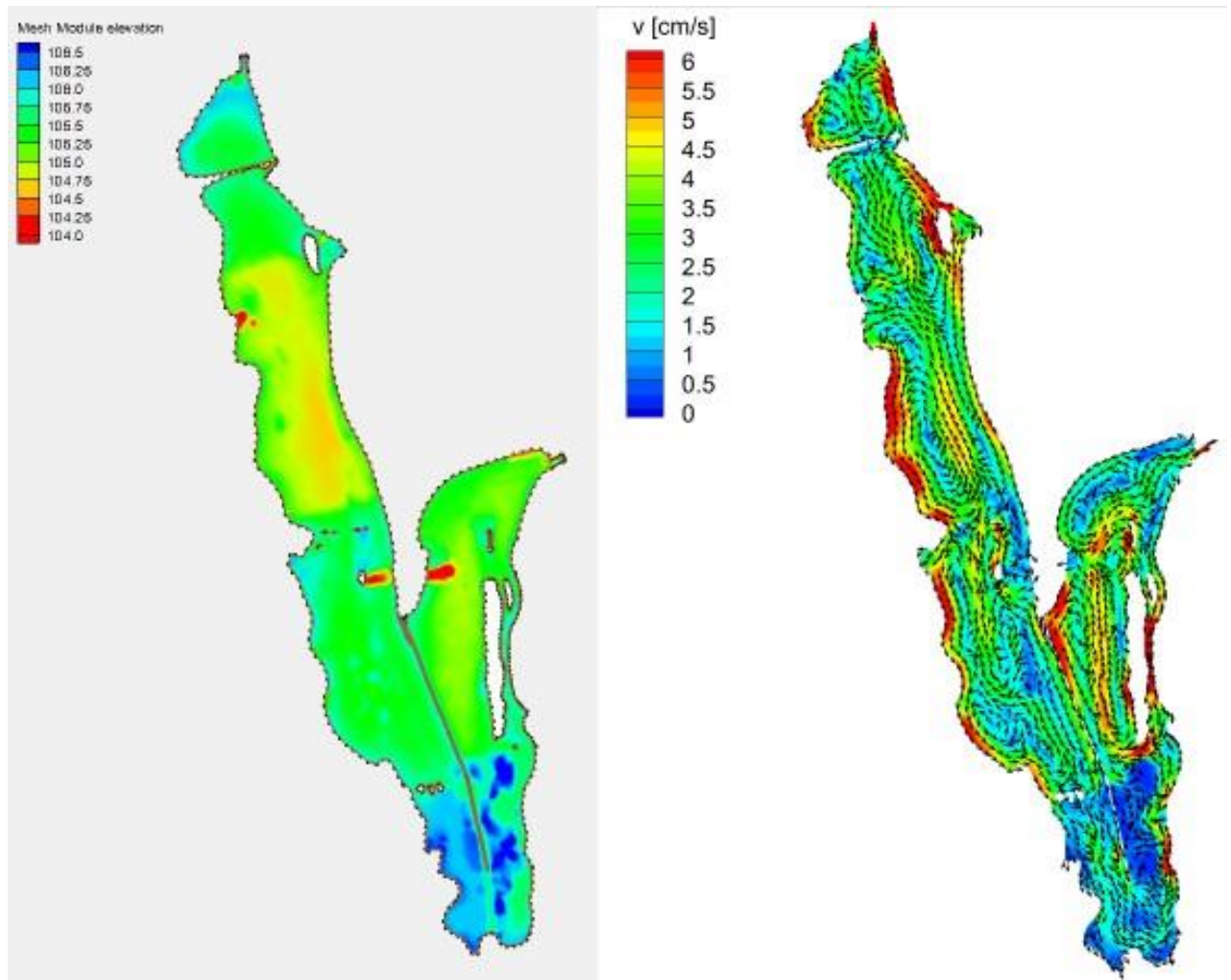
legnagyobb elért sebesség (6 cm/s-nál nagyobb) az időátlagolt változat maximális sebességét (3 cm/s-nál nagyobb) ezen kisebb, déli, növényzettel határolt nyíltvizű területeken (4.1.11. ábra).

A Kiskomáromi-csatorna medrének tározón belüli szakaszán az erős szél nem változtatja meg az áramlás irányát normál üzemállapotban, a víz továbbra is dél felé halad a terelőtöltés mentén (4.1.12. ábra, piros színű keret és 4.1.14. ábra., sárga színű keret).

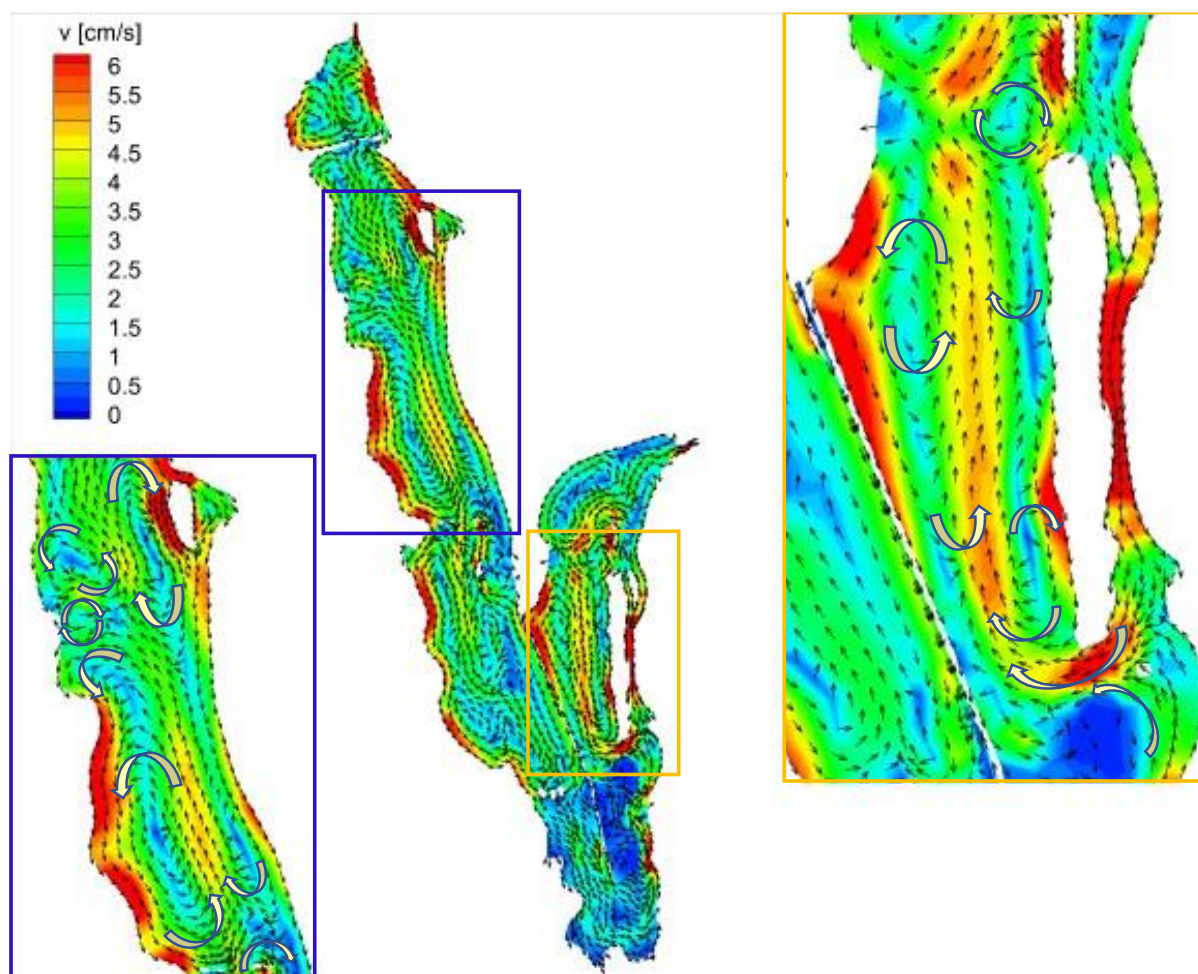
Miután a víz visszakanyarodott a terelőtöltés végénél észak felé, a tározó keleti felében ismét körkörös áramlások alakulnak ki az erős szél hatására. A Kányavári- és a Mester-szigettől délre a terep magasabb részei körül cirkulálnak (4.1.12. ábra, piros színű keret).

Kiemelendő, hogy a tározó keleti felében is hasonló irányú körkörös áramlások alakulnak ki, mint a nyugati felében. Azonban itt a meder középső részén történő, északi-északkeleti áramlási irány megfelel a fő áramlási iránynak, amely a szél nélküli és a szélmeghajtásos időátlagolt változatokban uralkodott, míg a meder nyugati felében a maximális szél okozta áramlási irány a meder középső részén éppen ellentétes volt azzal. A tározó keleti felében tehát szintén kialakul egy nagyobb körkörös áramlás: a meder partjai mentén a víz vissza, dél felé halad, míg a meder középső részén észak-északkelet, a kifolyási szelvény felé (4.1.12. ábra). Ezt leglátványosabban az mutatja, hogy a Kányavári-sziget és a Hídvégi-tó partja között az eddigi állapotokhoz, változatokhoz képest 180 fokkal megfordul az áramlás iránya, és dél felé folyik a víz (4.1.14. ábra, sárga színű keret).

A jellemző nagyobb cirkuláción belül a tározó keleti részén is létrejönnek kisebb körkörös áramlások az erős szél hatására, itt is jellemzően a terep mélyebb és magasabb pontjai körül. Az időátlagolt változattal történt vizsgálattal megegyező helyen, a Fekete-sziget északi és déli végénél lévő töltéskanyarulatokban hasonló okból alakul ki körkörös mozgás: a jellemzően észak-dél irányú szél a kelet-nyugati vonulatú töltésen átbukik, és leérkezéskor a vízfelszínnel ütközve hirtelen erővel meghajtja azt (4.1.14. ábra, sárga színű keret). Ezenkívül a Szalay kertje körül is köröző áramlás jön létre az erős szél hatására (4.1.12. ábra, fekete színű keret). A keletnyugati irányban húzódó töltésen átbukott észak-déli irányú erős szél a víz egy részét eltéríti dél felé, így az a part, valamint a Kányavári-sziget két oldala mentén megindul visszafelé. A víz többi része áramlik tovább a 4T műtárgynál található kifolyási szelvény felé.



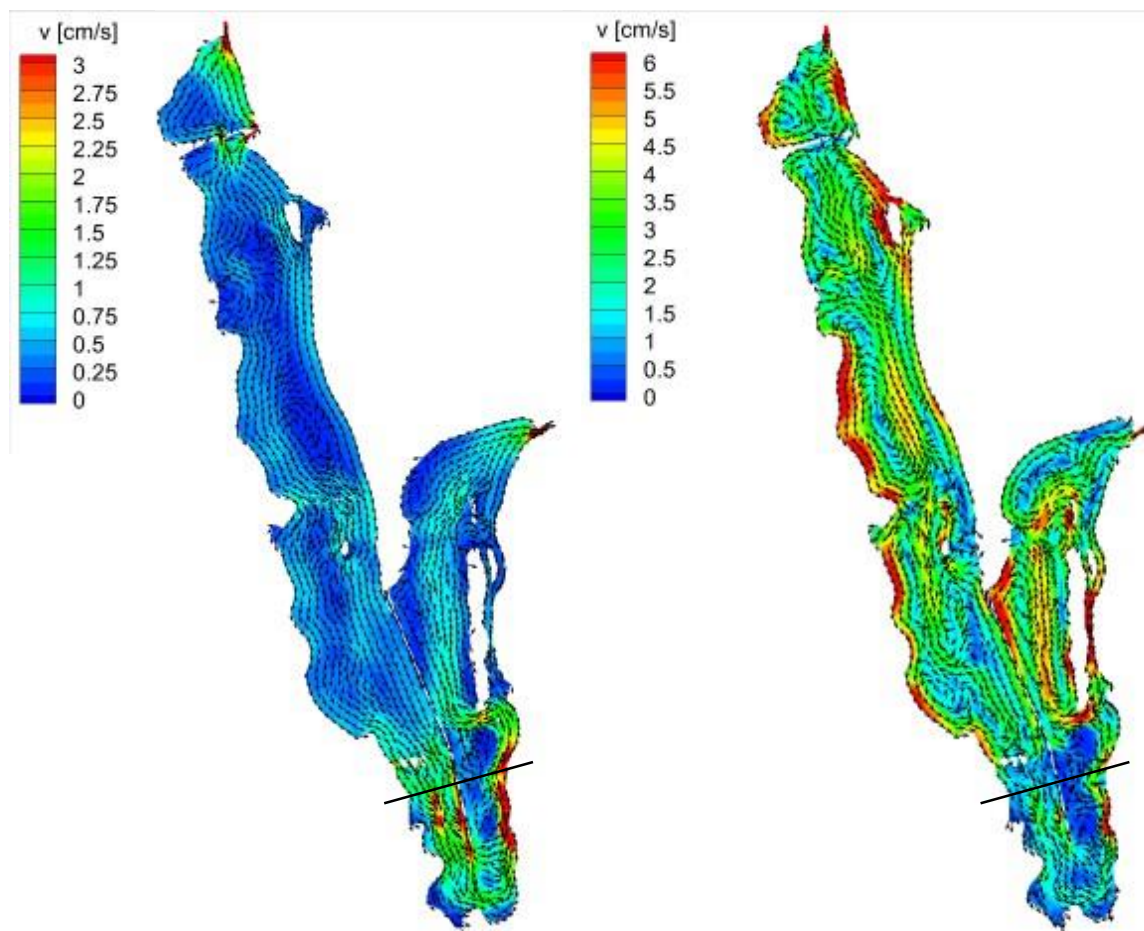
4.1.13. ábra: A terepmodell és a 2. szélmeghajtásos változat maximális szele okozta áramlások



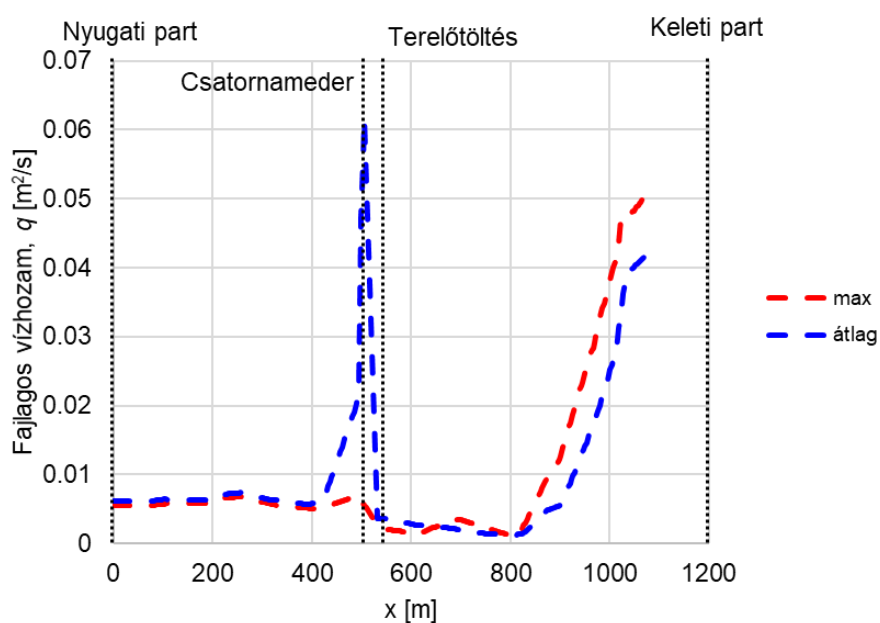
4.1.14. ábra: Az 2. szélmeghajtásos változat maximális szelének hatása az áramlási sebességre.

Kiemelve a körkörös áramlások

Ezután megvizsgáltam, hogy az idősor legerősebb szélviharja ($U_{max} \sim 9$ m/s), az átlagosan jellemző kisebb szelekhez ($U_{\text{átl}} \sim 3.5$ m/s) képest hogyan változtatja meg az áramlási viszonyokat. A Tecplot 360 programban meghatároztam a fajlagos vízhozamot a vizsgált területen, majd felvettem az időátlagolt 2. változatban és a maximális szél állapotában is ugyanazt a keresztmetszetet a tározó déli részén, amely keresztez növényzet borította és nyíltvízű területet, valamint a Kiskomáromi-csatorna medrét és a terelőtöltést is (4.1.15. ábra). Ezek mentén felvettem 500-500 pontot, amelyekben lekérdeztem a fajlagos vízhozam értékeit. Ezt átvetítettem egy keletnyugati irányultságú keresztmetszetre, és ábrázoltam (4.1.16. ábra).



4.1.15. ábra: A vizsgált keresztmetszet a 2. szélmeghajtásos változat időátlagolt változata, és legnagyobb szele esetén



4.1.16. ábra: A vizsgált keresztmetszet fajlagos vízhozama az átlagolt állapotban és maximális szél esetén

Látható, hogy nagy szél hatására a Komáromi-csatorna medrében jelentősen lecsökken a fajlagos vízhozam az átlagosan jellemző kisebb szelekhez képest. Ennek oka, hogy a nagy szél teljesen megváltoztatja az áramlási viszonyokat tározó keleti részén, ahol a szél északi, ellentétes irányból érkezik az átlagos, kisebb szeles áramlási viszonyokhoz képest (4.1.12. ábra, piros színű keret), így a vizsgált keresztmetszetben is.

A nyíltvízű területeken kis mértékben megnő a fajlagos vízhozam (kb. $0.01 \text{ m}^2/\text{s}$ -mal). A növényzet borította részeken nem változik meg jelentősen a fajlagos vízhozam értéke. Jellemzően a terelőtöltés keleti oldalán nő meg a fajlagos vízhozam az átlagolt változathoz képest, mivel ezen az oldalon alakulnak ki a vizsgált keresztmetszetben körkörös áramlások.

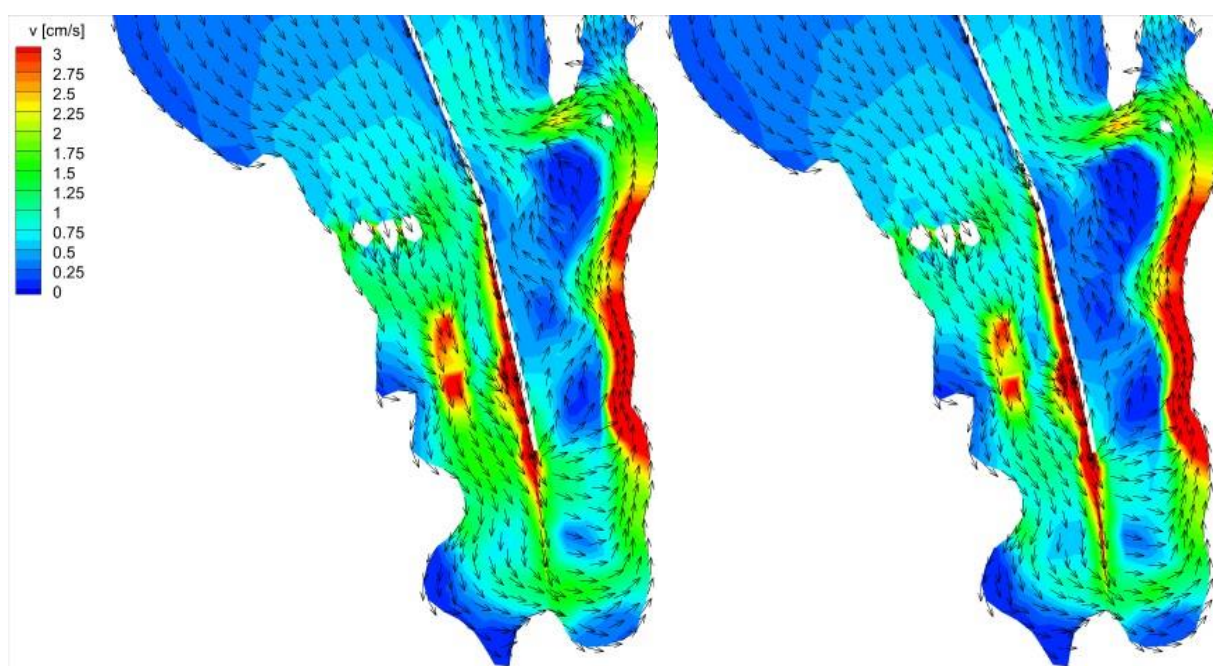
4.2. Érzékenységvizsgálat

A fenti változatokon kívül érzékenységvizsgálatot is végeztem a létrehozott modellre. Az érzékenységvizsgálat célja, hogy megtudjuk, mely paraméterekre és milyen mértékben reagál érzékenyen a modell. Az általam használt paraméterek a 3.1.2. fejezetben leírt peremfeltételek voltak, valamint az egyes területhasználati osztályokhoz rendelt simasági együtthatók. A befolyási szelvényben a Nyugat-dunántúli Vízügyi Igazgatóságtól (NYUDUVIZIG) kapott vízhozam idősort írtam elő, míg a kifolyási peremnél szintén a NYUDUVIZIG által a 4T műtárgy felvizen ugyanazon időszakban mért vízszinteket. Ezen peremfeltételekre nem végeztem érzékenységvizsgálatot, mivel olyan mért adatokból származnak, melyek közel állnak a sokéves középvízi vízhozamhoz, így egy átlagosnak tekinthető állapotot vizsgáltam. A modell azonban várhatóan érzékeny a megadott peremfeltételekre. A szél esetében ez látható is volt az előbbi összehasonlítás során, hiszen az időszak maximális nagyságú szele jelentősen nagyobb sebességeket okozott, mint a szél értékeinek átlagolásával készített 2. változat.

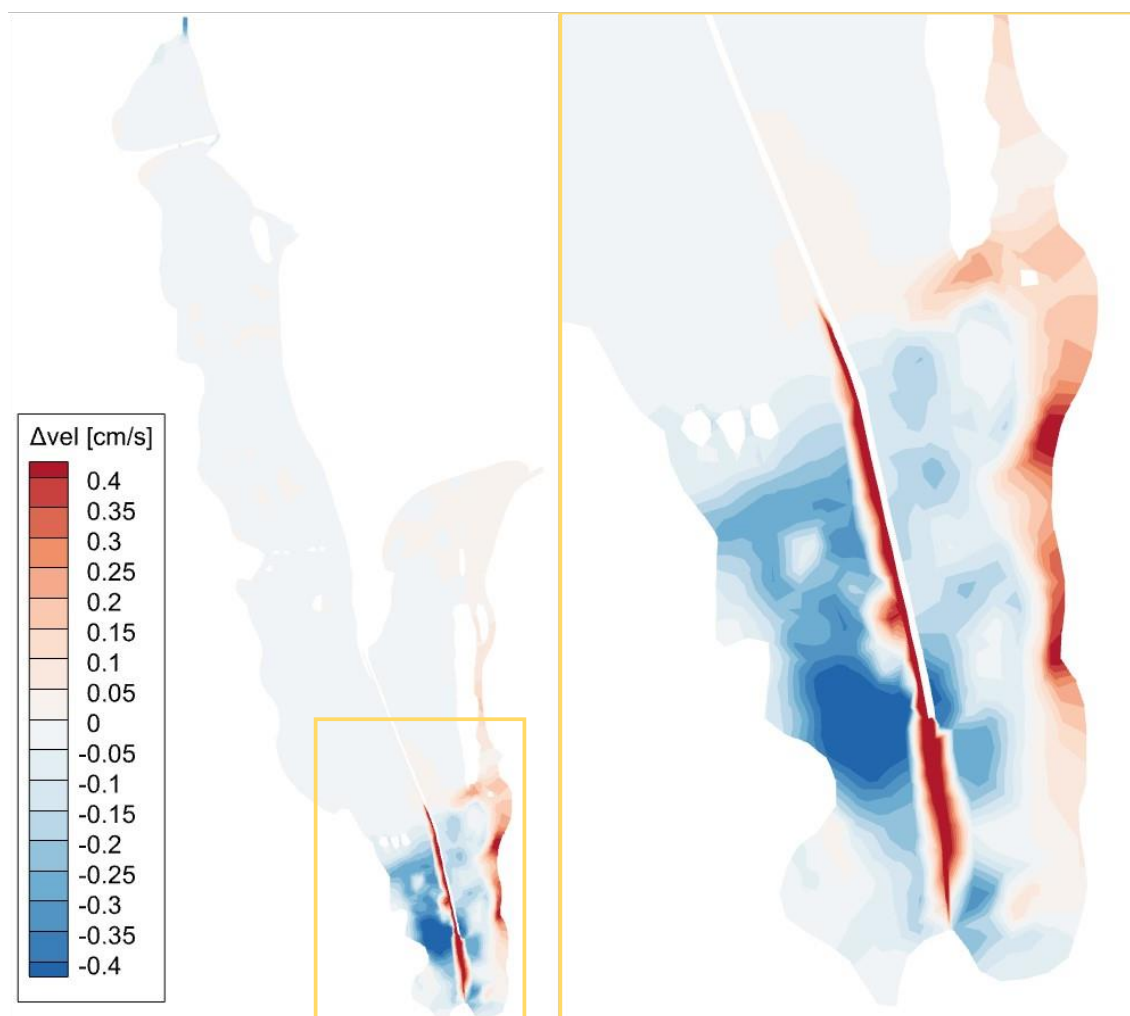
Az érzékenységvizsgálatot a növényzet simasági együtthatójára végeztem el, mivel az a legnagyobb kiterjedésű területhasználati osztály a nyílt víz után, így várhatóan erre a simasági együtthatóra lesz érzékeny a modell. A vizsgálat során az 1. változatban $k = 5 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ -os simasági együttható helyett ezúttal $k = 2.5 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ értéket vettem fel. Ez a simaság 50%-os lecsökkenését jelenti. A szél hatásától eltekintettem ezúttal is, akárcsak az 1. változatban. A be- és kifolyási peremfeltételekként is ugyanazon időszakban mért vízhozam és vízállás idősort adtam meg. Az így lefuttatott modellt tekintettem a vizsgálat 3. változatának.

A 4.2.1. ábrán is látható, hogy a növényzet kisebb értékű simasági együtthatója nem változtatta meg az áramlás irányát, megegyezik az 1. változatéval. Az 1. és a 3. változat eredményeit

összehasonlítva a 4.2.1. ábrán csak minimális sebességkülönbségek figyelhetőek meg. A pontosabb összehasonlítás érdekében megvizsgáltam az egyes változatok eredménye közötti eltérést: a 3. változat időátlagolt sebességmezőjéből kivontam az 1. változatét (4.2.2. ábra). Látható, hogy a növényzet borította területen a sebesség lecsökkent a kisebb simaság hatására. Ezzel együtt a csatornában megnőtt az áramlási sebesség, mivel nagyobb víztömeg irányult a jelentősen nagyobb simaságú csatorna mederbe. Mindezek a sebességváltozások azonban ± 0.5 cm/s értéken belül maradtak.



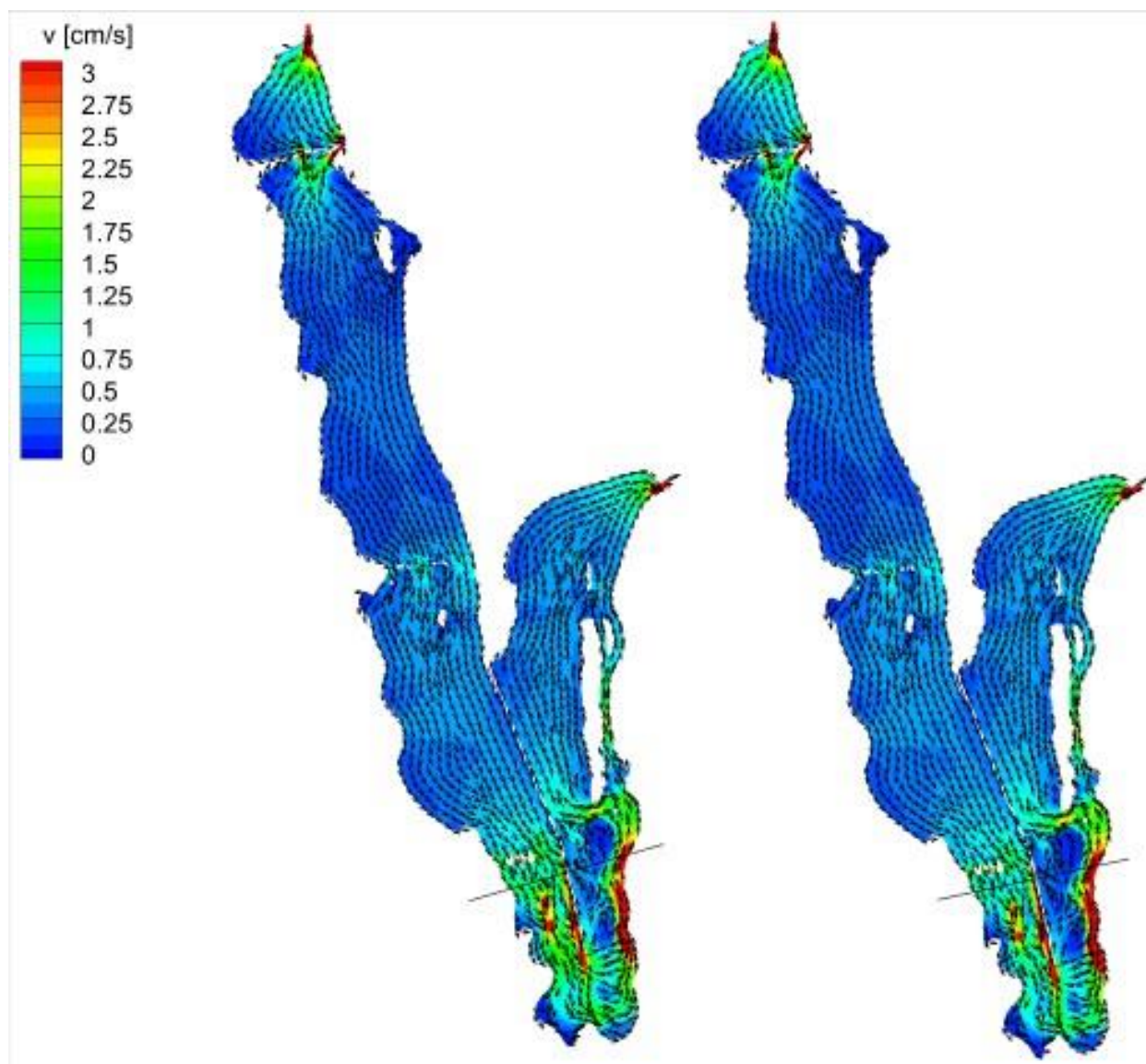
4.2.1. ábra: A vizsgált növényzet borította terület áramlási sebességei az 1. és 3. változatban



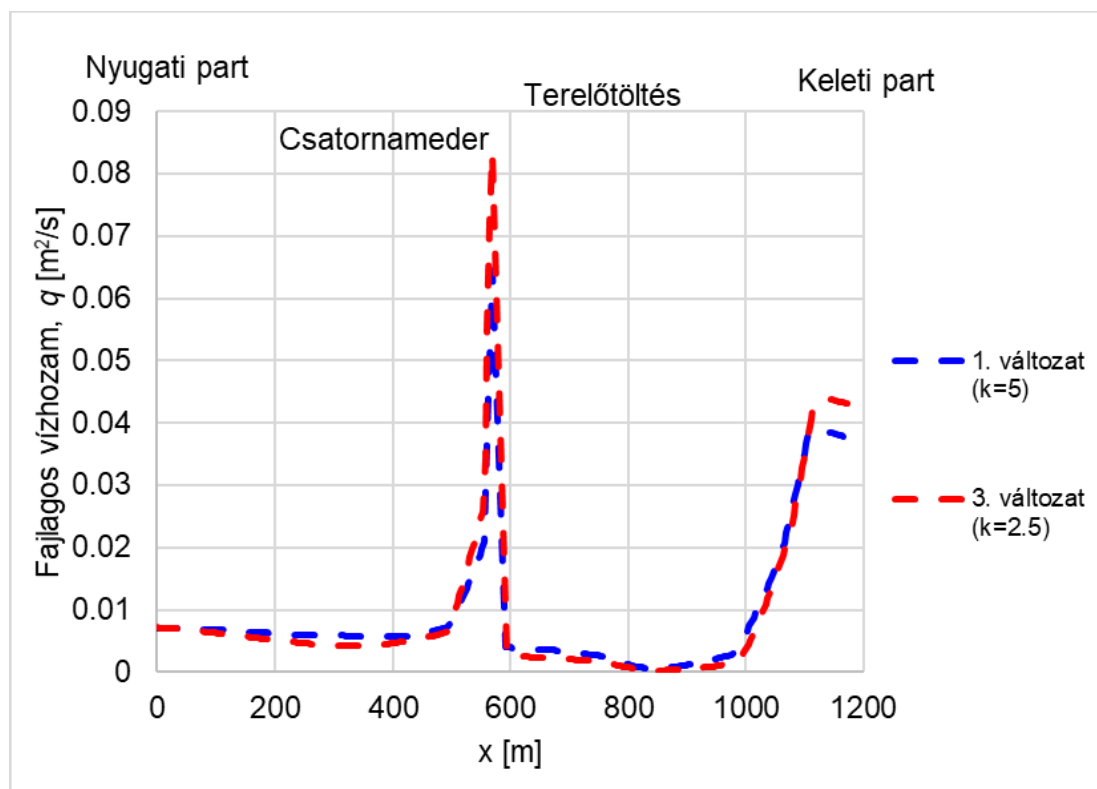
4.2.2. ábra: Az 1. és 3. változat közötti sebességkülönbségek

Ezután kiszámítottam Tecplot 360 programban az egyes modellváltozatok fajlagos vízhozam értékeit a teljes vizsgált területen, majd felvettem ugyanazt a keresztmetszetet a két változatban, a Garabonci-víz északi-részén található szigektől kissé délre, a növényzet borította területen belül (4.2.3. ábra), amelyet bemutattam az előző fejezetben. Hasonlóan, a keresztmetszetek mentén 500-500 pontban lekérdeztem a modell fajlagos vízhozam értékeit, rávetítettem egy keletnyugati irányú keresztmetszetre, majd ábrázoltam (4.2.4. ábra). Látható, hogy a tározó nyugati partjától 500-600 m-re elhelyezkedő Kiskomáromi-csatorna medrének fajlagos vízhozama jelentősen nagyobb, mint a környező növényzet borította területeké, mivel simasági együtthatója többszöröse (négyeszerese, illetve nyolcszorosa) a növényzetének. Ugyanez állítható a tározó keleti partjának közelében található nyíltvízű területről: simasági együtthatója az 1. változatban nyolcszorosa, a 3. változatban tizenhatszorosa a növényzetének, így itt is mindkét változatban jelentősen megnő a fajlagos vízhozam. Azonban a két keresztmetszet fajlagos vízhozamának különbségeit tekintve megállapítható, hogy a növényzet simasági

együtthatójának csökkentésével kis mértékben csökken a fajlagos vízhozam, ám a kisebb simaság hatására a Kiskomáromi-csatornában és a nyíltvízi területen megnőtt – a csatorna medrében kb. $0.02 \text{ m}^2/\text{s}$ -mal, a nyílt vízen $0.005 \text{ m}^2/\text{s}$ értékkel. Ezek igen kicsi értékek, így kijelenthető, hogy a növényzet simaságára nem érzékeny a modell.



4.2.3. ábra: Az érzékenységvizsgálathoz felvett keresztmetszetek az 1. és a 3. változatban



4.2.4. ábra: A fajlagos vízhozam változása a felvett keresztmetszet mentén az 1. és a 3. változatban

5. Összefoglalás és konklúzió

A hidrodinamikai vizsgálat során elemeztem a Kis-Balaton felső tározójának, a Hídvégi-tónak az áramlási viszonyait és a szél hatását az áramlásra, valamint elvégeztem a modell érzékenységvizsgálatát a növényzet simaságának csökkentése esetén. Mindezeket normál üzemállapotban vizsgáltam. Három változatot futtattam MIKE 21 kétdimenziós numerikus áramlástanival. Az eredmények alapján következtetéseket vontam le a tározó medrében kialakuló viszonyokról.

1. változat

Az 1. változatban a szél hatását nem vettem figyelembe. Ekkor az áramlás az eredeti terveknek megfelelően halad végig a tározón, a nagymértékű növényzet borítottság ellenére is. A Major-tó zárt beeresztő zsilipje miatt a Kiskomáromi-csatorna tározón belüli mederszakaszán visszafolyás alakul ki a terelőtöltés végéig, ahol a víz a csatorna medréből kilépve csatlakozik a fő áramláshoz, kelet felé kanyarodva halad tovább észak felé a tározóban.

A vizsgált sokéves középvízi vízhozamhoz közeli időszakkal rendelkező időszakban a Hídvégi-tó medrének nem volt olyan pontja, amely szárazra került volna, valamint a tározó nem is telítődött túl, a kívánt víztérfogat tározására és elvezetésére alkalmas volt.

A víz műtárgyak alatt való áthaladása nem akadályozott, a műtárgyak képesek elvezetni a vízhozamot. Azonban a sebesség megnő a műtárgyak szűkületeiben, ám ekkor sem lépik át a 6 cm/s-ot. Ezen maximális sebesség érték kicsinek mondható, így számottevő káros hatása nem várható. Azonban a sebesség megnövekedésével érdemes számolni a 7512-es mellékút átereszének és hídjának karbantartása és esetleges felújítása során.

A Laki István-zsilipen normál üzemállapotban a víz akadálytalanul, ám nagyobb sebességgel halad át (6-10 cm/s). A megnövekedett sebességgel érkező hozamot a tározó normál üzemállapotban előírt nyílása képes elvezetni.

A tározón belül általánosan elmondható, hogy igen kicsik a sebességek, emiatt nagymértékű feliszapolódás, hordaléklerakódás várható. Ez megfelel a tározó funkciójának, mivel a Zala és az egyéb kisebb befolyások vizét hivatott megszűrni, főként kiülepítés által. Azonban a túlzott feliszapolódás elmocsarasodáshoz, ezáltal a tározótérfogat jelentős csökkenéséhez és az élőhelyek megváltozásához vezethet, ezért szükségesnek tartom kontrollálni, például időnkénti mederkotrással. A feliszapolódás mértéke egy feliszapolódás vizsgálat elvégzése után (például ezen modell alkalmazása és továbbfejlesztésével) meghatározható, és a jövőben előrejelezhető.

A Kiskomáromi-csatorna medrének növényzet borította részen haladó szakaszán megnő az áramlás sebessége, ám a maximálisan elért sebesség is kicsinek tekinthető (kb. 6 cm/s), nem kizárt a csatorna medrének feliszapolódása. Javaslom tehát a csatorna medrének karbantartó kotrását is, valamint a közvetlenül mellette haladó terelőtöltés állékonyságvizsgálatát kotrás után.

A Hídvégi-tó déli részének erős növényzet borítottsága kis mértékben csökkenti az áramlás sebességét, a Kiskomáromi-csatorna medrében, valamint az ezen területen található nyílt vízfelszínű részeken megnöveli, akár két-háromszorosára. Azonban az így kialakuló sebességek is igen kicsik (max. 6-10 cm/s), így itt is a feliszapolódás lehetőségével érdemes számolni. A nagymértékű növényzetborítottság ezenkívül más módon nem hat az áramlási viszonyokra, azonban gyors és agresszív terjedése akadályozza a műtárgyak üzemeltetését és karbantartását (például a terelőtöltését és a Kiskomáromi-csatorna medréét).

A kis áramlási sebességek az élővilág számára is veszélyt jelenthetnek szélsőséges hőmérsékletek esetén. Télen a tározó vize befagyhat (mivel kicsi a vízmélysége és az áramlás

sebessége); ez bizonyos élőlények pusztulását okozhatja. Nyáron, főként tartós magas hőmérséklet esetén pedig megindulhat az algák tömegreprodukciója, valamint jelentősen lecsökkenhet a víz oxigéntartalma, amely tömeges halpusztulást eredményezhet. Emellett a rossz vízminőség kedvezőtlen hatással lehet az alsó tározó, valamint a Balaton élővilágára is.

2. változat

A 2. változat vizsgálata során a szél hatását is figyelembe vettem. Megvizsgáltam az időszakot jellemző, átlagos nagyságú, valamint a maximális erősségű szél áramlásmódosító hatásait. Megállapítottam, hogy a vizsgált időszakban a jellemző szélirány az északdéli, erős vihar esetén pedig észak-északnyugati.

Szél hatására a tározó nyugati és keleti felében egy-egy nagy cirkuláló mozgás alakul ki, azokon belül pedig kisebb körkörös áramlások. Ezek általában a terepszint, a part vonala, az áthaladási keresztmetszet szélessége, valamint a szél iránya és erőssége alapján változnak.

A szél általánosan megnöveli az áramlási sebességeket a tározón belül. Azonban a vizsgált időszak maximális erősségű szele sem emelte 10-13 cm/s fölé az áramlási sebesség nagyságát. Ez továbbra is kis sebességnek tekinthető, így kijelenthető, hogy átlagos szélviszonyok idején is fennáll a feliszapolódás veszélye a tározóban.

Szélsőségesen erős szelek esetén a kialakuló nagysebességű körkörös áramlások kimoshatják a tározó töltéseinek oldalát. Ilyen például a 7512-es mellékút földműve is. Azonban átlagosan jellemző szél esetén az áramlási sebesség kicsi, így ez csak extrém erős szél esetén veendő figyelembe. Érdemes azonban a közút földművét időnként felmérni, és megvizsgálni állékonyságát.

A szél hatására kialakuló körkörös áramlások és nagyobb sebesség hatással lehetnek a tározó tartózkodási idejére, megnövelhetik vagy lecsökkenthetik. A változás mértékét érdemes meghatározni az üzemeltetés biztonságának elősegítése érdekében.

A vizsgált időszakban előforduló legnagyobb erősségű szél sem okozott szárazrakerülést a tározóban, sem pedig olyan nagy sebességet, amelyet a meder ne lett volna képes elvezetni.

Az üzemeltetés során azonban figyelembe veendő, hogy a nagyobb erősségű szelek megfordítják az áramlást a Kányavári-sziget és a Hídvégi-tó keleti partja között. Ez hatással lehet az élővilágra, valamint a szigetre bejáratát jelentő gyalogos hídra és a gázló használatára, továbbá az azt jelző cölöpökre a vízben.

3. változat

A modell harmadik változatát érzékenységvizsgálat céljából hoztam létre. Azt vizsgáltam vele, hogy a modell érzékeny-e a növényzet simaságára. A vizsgálat eredménye azt igazolja, hogy nem érzékeny. Azonban e vizsgálat során megállapítottam, hogy a növényzet simaságának csökkenése lassítja az áramlást a tározó medrében, valamint azt okozza, hogy a Kiskomáromi-csatorna medrében megnő a fajlagos vízhozam. Ezen sebességkülönbségek igen kicsik, nem haladják meg a ± 0.5 cm/s értéket. Ez alapján arra következtettem, hogy a növényzet sűrűsége (akár a különböző évszakokat tekintve) nem befolyásolja jelentősen az áramlást, a kiterjedése viszont figyelembe veendő mértékű hatással van az áramlás irányára. Érdeemes tehát kontrollálni a meder feliszapolódása mellett a növényzet kiterjedését is.

Dolgozatom célkitűzéseit megvalósítottam, a Hídvégi-tóra egy 2D hidrodinamikai modellt sikeresen felépítettem, érzékenységvizsgálatot végeztem a legfontosabb modellparaméterre, a simaságra. A modell segítségével részletesen elemeztem a jellemző áramlási viszonyokat és felfedtem a szél áramlásmódosító hatásának szerepét is a tározóban. A megvalósult modell hiánypótló eszköze lehet számos további vizsgálatnak, így a jövőben a gyakorlatba átültethetve segítheti Kis-Balaton rendszer üzemeltetését.

6. Kitekintés

A létrehozott hidrodinamikai modell számos további vizsgálat alapját képezheti mind jelen formájában, mind kisebb-nagyobb továbbfejlesztésekkel. Ezeket lehetőség szerint szeretném elvégezni és értékelni a jövőben. Az üzemeltetés során is hasznos lehet, sőt akár előrejelzésre is alkalmazható a megfelelő fejlesztésekkel, például egyes tervezett beavatkozások előtt, vagy közelgő árhullám esetén.

Véleményem szerint az üzemeltetésnek fontos információkat adna a hullámváz, a feliszapolódás, valamint a tartózkodási idő vizsgálata a felépített modell alapján. A víz tartózkodási ideje hatással van a víz minőségére, és a tározó feliszapolódására is. Ismeretében hatékonyabb, rugalmasabb vízszintszabályozást lehet megvalósítani.

A feliszapolódás mértékének megállapítása elengedhetetlen az üzemeltetés szempontjából, mivel a tározó elmocsarasodása hatással van annak vízszállító és -tározó képességére, valamint mind a Hídvégi-tó, mind a Fenéki-tó és a Balaton vízminőségére és élővilágára. A vizsgálat

elvégzésével következtetések vonhatók le a szükséges mederkarbantartási munkálatok (pl. mederkotrás) időpontjára, módjára és mértékére.

A hullámozás mértékének, irányának és hatásainak meghatározása pedig segít a feliszapolódás mértékének meghatározásában. Ezenkívül a hullámozás megváltoztathatja a tározón belüli áramlási viszonyokat. Erős szél esetén akár nagyobb mértékű vízlengés is kialakulhat, amely hatással lehet mind a rendszer műtárgyaira, mind az élővilágra.

Ezenkívül érdemes megvizsgálni rövidrezárás üzemállapotát és működését is, amelynek során részben kizárják az áramlásból a tározó medrét, így a Zala vizét közvetlenül a Balatonba vezetik. Az eredeti terv a tározó teljes kizárásának biztosítása volt, ám eddig nemigen volt szükség ezen üzemállapot alkalmazására, így egy esetleges éles helyzet vagy egy esetleges sikertelen próba előtt érdemes elméletben, egy modell által felmérni a működését és hatásait.

7. Hivatkozások

- Nyugat-Dunántúli Vízügyi Igazgatóság (NYUDUVIZIG) és Balaton-felvidéki Nemzeti Park, 2021. április. *Kis-Balaton Vízvédelmi Rendszer Üzemeltetési Szabályzat*
- Müller R. 1987. Megjegyzések Fenékpusztá történetéhez. *Zalai Múzeum*, 1. évf. p. 105-122. (https://library.hungaricana.hu/en/view/MEGY_ZALA_GZ_Zm_01/?pg=106&layout=s)
- Viziterv Environ Kft., 2019. A Kis-Balaton feltöltődés-vizsgálata. *Összefoglaló jelentés*, Budapest.
- Szilágyi F. 2007. Hidrobiológiai, *Egyetemi HEFOP jegyzet*, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem.
- Bárdosi L., Biri G., Farkas J., Gáli I., Gecseg M., Srágli L., Szabó L., Tóth E., Vajda L., Varga G., Wellner P. 2004. Hidak Zala megyében. Szerk: Tóth E., Zalaegerszeg.
- I love Hévíz blog 2021. Fenékpusztá regényes múltja. *Blogbejegyzés* (https://iloveheviz.blog.hu/2021/02/03/fenekpuszta_telepulesrol_nem_beszelhetunk_de_a_multja_alapjan_viragzo_varos_is_lehetne)
- Nyugat-dunántúli Vízügyi Igazgatóság 2014. Kis-Balaton. *A Kis-Balaton hivatalos weboldala* (<http://kisbalaton.hu/index.php/hu/>)
- Nyugat-dunántúli Vízügyi Igazgatóság 2020. Kis-Balaton, vízrendezési célok. *A Nyugat-dunántúli Vízügyi Igazgatóság weboldala* (<http://www.nyuduvizig.hu/index.php/hu/vizrendezes/kis-balaton/kis-balaton-celok>)
- Magyar Madártani és Természetvédelmi Egyesület 2021. Kis-Balaton. *Natura 2000 adatbázis* (<https://natura.2000.hu/hu/teruletek/k/HUBF30003>)
- Wikipédia, 2021. Rámszari egyezmény. *Online enciklopédia szócikk* (https://hu.wikipedia.org/wiki/R%C3%A1mszari_egyezm%C3%A9ny)
- Duna-Dráva Nemzeti Park Igazgatóság 2020-2021. A Természetvédelmi Őrszolgálat története. (https://www.ddnp.hu/igazgatosag/orszolgalat/a_termeszetvedelmi_orszolgalat_tortenete)
- Országos Vízügyi Főigazgatóság, Siklós G. 2014. Immár hivatalosan is elkészültnek tekinthető a Kis-Balaton Vízvédelmi Rendszer II. üteme. *Sajtóközlemény* (<http://www.ovf.hu/hu/korabbi-hirek-2/kis-balaton-vizvedelmi-rendszer-ii-uteme-hivatalos-atadasa>)

- Lájer K., Bódis J., Szeglet P., Csiky J., Pfeiffer N., Tóth I., Kevey B., Pál R., Purger D., Dénes A., Juhász M. 2009. Dunántúli-dombság - földrajzi kistájak növényzete. *MÉTA Informatika* - MTA Ökológiai Kutatóközpont weboldala (<https://www.novenyzetiterkep.hu/node/399#T>)
- Arcanum Adatbázis Kft. 2006. Magyar Királyság (1819-1869.) – Második katonai felmérés. *Térkép* (<https://maps.arcanum.com/hu/map/secondsurvey-hungary/?layers=5&bbox=2077097.8956962836%2C6006638.829450766%2C2193205.741661466%2C6050207.935573315>)
- Nyugat-dunántúli Vízügyi Igazgatóság 2018. Kis-Balaton – Vízmérleg. (<http://www.nyuduvizig.hu/index.php/vizrajz/kis-balaton-tavmero-rendszer-vizmerleg>)
- Krámer T. 2021. Szabadszínű áramlások 2D hidrodinamikai modellezésének alapjai. *Hidroinformatika tárgy (BMEEOVVA-F3) előadás anyaga*

8. Mellékletek

8.1. A Kis-Balaton és környékének térképe

Az alábbi QR-kódos hivatkozást megnyitva megtekinthető elektronikusan a később A3 méretben is mellékelte (8.2. melléklet) térkép, amelyet a NYUDUVIZIG bocsátott rendelkezésemre.



KIS-BALATON ÉS KÖRNYÉKE

Készítette: FÖLDMÉRÉSI ÉS TÁVÉRZÉKELÉSI INTÉZET AGROCARD VEG.

1995

1:10 000

Szolgálati használatra

FOUR eng.sz.: 7145, 186

The map is a detailed topographic representation of the Kis-Balaton region. It features numerous contour lines indicating elevation, with labels such as 14000, 13000, and 12000. Several water bodies are labeled, including BÁRÁNDI-VÍZ, SZABARI-VÍZ, POGANYVÁRI-VÍZ, RADAI-VÍZ, KANYAVÁRI-VÍZ, SANYARI-VÍZ, GARABONCI-VÍZ, and MAGYARÓDI-VÍZ. Islands and smaller water features are also labeled, such as KAZETTA, MAJOR-TO, and various 'sziget' (island) locations. Settlements and towns are marked with dots and labels, including Zalacsazar, Nagyrada, Garabona, and Balatonmagyaród. The map includes a grid system with crosshair markers. A legend in the top right corner provides technical details about the map's scale and purpose.