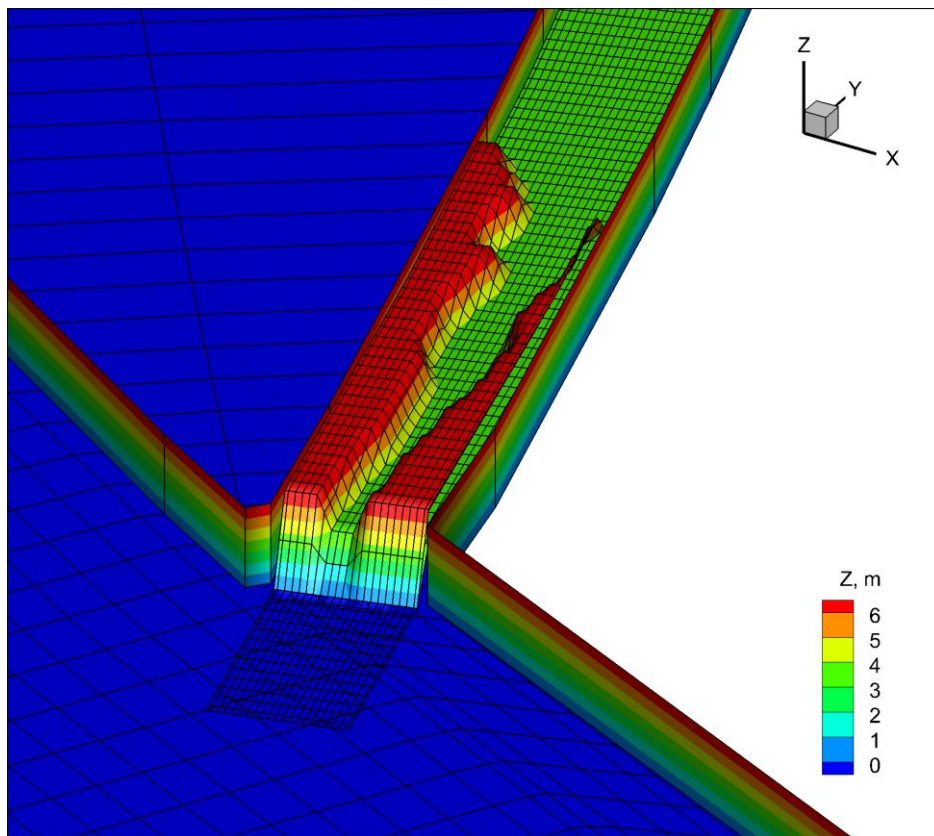


Folyók főág-mellékág kapcsolatának numerikus hidrodinamikai vizsgálata beágyazott rácsháló módszerrel



Készítette: Tóth Ágnes

Konzulens: Dr. Baranya Sándor, tudományos munkatárs

Tudományos Diákköri Konferencia 2012

Tartalmi kivonat

A Duna magyarországi szakaszán számos helyen jelentkeznek kisvizes időszakban hajózási problémák, melyek elsősorban a folyómeder kedvezőtlen mederváltozási folyamatainak eredményei. A hajózási akadályok megszüntetésére az elmúlt években egyértelmű igény jelentkezett, amely tervezési feladatokat és az azokat megelőző megalapozó vizsgálatokat igényel. A Duna főmedrébe való beavatkozások azonban kihatnak a kapcsolódó mellékágra is, ezért fontos a teljes rendszer együttes kezelése, figyelembe véve az esetleges mellékág rehabilitáció lehetőségét is.

A számítógépi kapacitás erőteljes növekedésével mára lehetőség adódott a folyószabályozási beavatkozások hatásának térbeli numerikus modellekkel való vizsgálatára. Ez idáig a modellvizsgálatok általában nem terjedtek ki a mellékágakra, mert a numerikus leképezés nehezen volt megoldható. Az elérhető 3D modellek ugyanis legtöbbször strukturált rácshálót alkalmaztak, így a főmederre felépített rácsháló felbontás nem tette lehetővé a mellékág pontos leírását annak eltérő geometriai méretei miatt.

Egy friss kutatás eredményeként lehetővé vált a modellezési tartomány ún. beágyazott rácshálóra való leképezése, amelynek a segítségével a terület bizonyos részein nagyobb felbontást tudunk definiálni, pl. mellékágaknál. A TDK dolgozatban ennek a modellnek a tesztelését hajtom végre, melyben egy sematizált folyó főág-mellékág rendszerének hidrodinamikai vizsgálata a cél. Mivel a beágyazott rácsháló leírást ennek a problémának a megoldására még nem alkalmazták, igen hasznos lehet a későbbi valós mérnöki feladatok során. A modellvizsgálataimban kitérek a rácsháló felbontás és a főág-mellékág méretbeli eltérések hatására, a térbeli áramlási struktúrák és bizonyos hidromorfológiai paraméterek vizsgálatára.

Tartalomjegyzék

1. BEVEZETÉS.....	1
A Duna hajózhatóságának javítása	1
A mellékágak rehabilitációja	3
2. AZ ALKALMAZOTT MODELL MATEMATIKAI HÁTTERE	4
A Navier-Stokes egyenletek.....	4
Reynolds-átlagolás	4
A turbulenciamodellezés alapjai	5
A k- ϵ turbulenciamodell	5
A beágyazott rácsháló numerikus megoldása.....	6
3. A SZÁMÍTÁSI RÁCSHÁLÓ FELÉPÍTÉSE	8
4. MODELLVÁLTOZATOK MEGHATÁROZÁSA	10
Gyakorlati példák leírása a modellváltozatok meghatározásához	10
A Gönyűi-mellékág rehabilitációja	10
Szabadság-zátony	11
Bölcskei-mellékág	12
Modellváltozatok bemutatása	12
5. AZ ÁRAMLÁSI MODELL FUTTATÁSI EREDMÉNYEINEK KIÉRTÉKELÉSE	19
A durva és finom felbontású rácsháló számítási eredményeinek összehasonlítása	19
A különböző műszaki beavatkozások hatásainak vizsgálata	33
A számított sebességek vizsgálata	33
A fenék-csúsztatófeszültségek vizsgálata	41
A valós mederviszonyokat reprezentáló modellváltozat kiértékelése	43
6. HORDALÉKMODELL ALKALMAZÁSA A BEÁGYAZOTT RÁCSHÁLÓN.....	49
7. ÖSSZEFOGLALÓ ÉRTÉKELÉS	51
8. IRODALOMJEGYZÉK.....	54
9. WEBES HIVATKOZÁSOK.....	54

1. Bevezetés

A Duna hajózhatóságának javítása

A Duna nemcsak hazánk, hanem Európa egyik legnagyobb folyója is. Németországban, a Fekete-erdőben ered és a Fekete-tengerbe torkollik. Eközben 10 országon folyik keresztül: Németországban, Ausztrián, Szlovákián, Magyarországon, Horvátországon, Szerbián, Románián, Bulgárián, Moldován és Ukrajnán.



1. ábra: Országok, melyeket a Duna érint (www.wikipedia.org)

Nem meglepő tehát, hogy a folyam az Európai Unió közlekedési hálózatnak (TEN-T) VII. számú közlekedési folyosója. 1992-ben összekötésre került a Duna-Majna-Rajna (DMR) csatornával, így Európa leghosszabb belvízi útszála jött létre.

Az Európai Bizottság megjelentette meg az első Fehér Könyvet (Európai Bizottság, 2011), amely a közös közlekedéspolitikai fejlesztésének javaslatát tartalmazta és komoly vízállítási fejlesztéseket is irányzott elő. Részletesen taglalja a vízi szállítás előnyeit (energiatakarékosság, csendesség, kis helyigény, energiahatékonyság, biztonság, nagysúlyú, kis fajlagos értékű termékek nagy távolságra való szállítása stb.), valamint azt is leírja, hogyan lehet ezen előnyök kiaknázásával megbízhatóbbá, hatékonyabbá és könnyebben hozzáférhetővé tenni ezt a szállítási módot:

- Szűk keresztmetszetek megszüntetése, merülési mélységek kiigazítása, hiányzó kapcsolatok létrehozása;
- az áruszállításra alkalmas, de felhagyott vízi utak újbóli üzembe helyezése,
- folyami összeköttetések létesítése és átrakó berendezések felszerelése,
- nagy hatékonyságú navigációs kiségitő és távközlési rendszer létrehozása a vízi úthálózatban.

Egy másik hajózással összefüggő Európai Uniósi program a NAIADES Program (<http://www.naiades.info/>), melyet 2006-ban adtak ki. A program neve „Az európai hajózási és belvízi szállításért tett fellépés és fejlesztés” angol megfelelőjének kezdőbetűi. A Bizottság célja a belvízi szállítás előnyeire való rávilágítás, valamint az ezt keresztező akadályok elhárítása volt.

Már az 1948-ban megalakult Duna Bizottság tagországai is vállalták, hogy a Duna országukban elhelyezkedő szakaszát hajózható állapotban tartják folyami és a megfelelő szakaszokon tengeri hajók számára; elvégzik a szükséges karbantartási munkákat és fejlesztéseket a hajózási feltételek biztosítása érdekében és nem akadályozzák a Duna hajózási csatornáin a hajózási tevékeniséget. A

víziútra kidolgoztak egy jól megalapozott, egységes elveknek megfelelő paraméter-rendszert, az ún. DB-ajánlásokat, mely alapján a víziút méreteit egy hajózási kisvízszinthez, az ún. DB-kisvízszinthez viszonyítva kell biztosítani. Ez a kisvízszint a meghatározást megelőző 30 év jégmentes időszak vízhozamaiból számított, 94%-os tartósságú vízhozamhoz tartozó vízszint.

A víziút fejlesztéshez közvetve kapcsolódik a „Duna komplex program” (Országos Területfejlesztési Hivatal, 2006), amely keretbe foglalja a Duna menti területfejlesztési, infrastrukturális és ökoturisztikai fejlesztési feladatok megvalósítását, természeti területeinek, tájainak, természeti értékeinek, Natura 2000 területeinek megőrzését és nem utolsósorban a folyam és mellékági rehabilitációját.

A Duna hajózhatóságának javítása tehát nemcsak nemzeti, de európai érdekünk is. 2005-2007 között a Gazdasági és Közlekedési Minisztérium ezért pályázatot írt ki európai uniós kötelezettségeink, valamint az uniós ajánlások teljesítése érdekében a Szap-Déli országhatár közötti Duna-szakasz hajózhatóságának javítása érdekében. A fejlesztési javaslat célja elsősorban a nemzetközi egyezmények alapján elfogadott paraméterek kialakítása és az üzemeltetés korszerűsítése.

A magyarországi szakasz jelenlegi állapotában nem felel meg a Duna Bizottság előírásainak, így nem tudjuk megfelelően kiaknázni a hajóút adta lehetőségeket. A fő probléma a mélységi és szélességi korlátok, így a víziút fejlesztésénél elsősorban a gázlók és szűkületek rendezése a cél.

A Duna hajózhatóságának javítása tárgyú projektet megalapozó tanulmányt kidolgozó konzorcium: VITUKI Kht., AQUAPROFIT Zrt., ÖKO Zrt., VTK Innosystem Kft. tagokból állt (VITUKI et al., 2009). A tanulmány céljai elsősorban a következők voltak:

- a hajózást akadályozó gázlók és szűkületek megszüntetése,
- a hajóút folyamatos üzemeltetésének biztosítása,
- a hajózási feltételek javításával összefüggő ökológiai rehabilitáció, rekreáció, turizmus fejlesztése és a partiszűrésű vízkészletek, vízkivételek védelme,
- az integrált folyógazdálkodási terv kidolgozásához az érdekeltek és az egyéb hasznosítási tervek, elképzelések számbavétele

A fenti célok megvalósítása azonban olyan komolyabb folyami beavatkozásokat kíván, amelyek jótékony hatásai mellett másképpen is befolyásolhatják a fő-és mellékág áramlási, hidromorfológiai, ökológiai és egyéb viszonyait is. Fontos tehát ezek vizsgálata, amelynek egyik legkézenfekvőbb megoldása a numerikus modellezés alkalmazása.

Hajózási szempontból a Duna szerteágazó mellékági rendszere is nehézséget jelenthet a főmeder és a főmederhez kapcsolódó mellékágak kölcsönös egymásra hatása miatt. Az alacsony kisvízfolyású szakaszokon ugyan megoldást jelenthet a mellékág lezárása, így a megfelelő vízmennyiség visszanyerése a főmederbe, ezzel azonban kockára tesszük a mellékág elmocсарosodását, illetve ökológiai értékének csökkenését. A tervezés során tehát a fő-és mellékágak együttes kezelése elengedhetetlen, hiszen így tudjuk csak figyelembe mind a hajózási, mind az ökológiai szempontokat.

A mellékágak rehabilitációja

Az Európai Unió Víz Keretirányelve (Európai Parlament és Európai Unió Tanácsa, 2000) kimondja, hogy 2015-ig az Európai Unió egész területén jó állapotba kell hozni minden felszíni és felszínalatti vizet. A Keretirányelv hatályba lépése óta még inkább sürgetővé vált a Duna egyes mellékágainak a rehabilitációja is.

A „Tanulmányok a Duna hajózhatóságának javításáról” program (<http://www.dunahajozhatosag.hu/>) keretében Stratégiai Környezeti Hatásvizsgálatot szintén a „VITUKI” Környezetvédelmi és Kutató Intézet végezte. Ebben a tanulmányban a legfontosabb környezeti hatásoknak a főági ökológiai állapot romlását és a vízbázisok biztonságának sérülését tekintették. A főági ökológiai állapot romlását a mellékágak rehabilitációjával kívánták megakadályozni.

A VKI szerint a főág és mellékág egy ökológiai rendszert alkot, azok között tehát szoros ökológiai kapcsolat van. A hajóút fejlesztése során a főmederben várhatóan okozott ideiglenes – közepesen tartós – tartós negatív ökológiai hatások egy része ellensúlyozható tehát olyan, a mellékág rendszerekben végzendő beavatkozásokkal (rehabilitáció), amelyek ott az ökológiai állapot jelentős javulásával járnak. Ráadásul a mellékági rehabilitáció néhány esetben megoldást jelenthet a vízbázis-biztonság növelésére is, hiszen a mellékági vízminőség javulás együtt jár a vízbázis védelmével is.

A fenti megállapítások azonban csak akkor igazak, ha a főág speciális élőhelyeinek védelme biztosított marad. Olyan intézkedésekre van tehát szükség a mellékágakban, melyek ezeket az élőhelyeket biztosítják, illetve a mellékág ökológiai állapotát javítják és hozzájárulnak a főág-mellékág kapcsolatoknak a mennyiségi és minőségi javításához is.

A Duna esetében a legnagyobb probléma a medersüllyedés, amely a kisvízszint csökkenését és ezzel együtt a mellékágak elmosódását, kiszáradását is okozhatja. Mivel a medersüllyedést tovább fokozhatják a hajóút biztosításának érdekében végzett kotrások, ezért ezeknek a folyami beavatkozásoknak a hatásait mindenképpen vizsgálni kell.

Jelen tanulmányban a főági és mellékági beavatkozások hatását egy olyan numerikus modellel fogom vizsgálni, mellyel a fő-és mellékágak kapcsolatát, illetve egymásra hatásukat is tudom elemezni. Ennek segítségével megkönnyíthetőek az eddig részletezett problémáknak a megoldásai.

2. Az alkalmazott modell matematikai háttere

A főág-mellékág kapcsolatot az SSIIM 3D hidrodinamikai modellel fogom vizsgálni (Olsen, 2010), melynek nagy előnye, hogy nemcsak a hossz-és keresztirányú, hanem a függőleges irányú áramlásokat is le tudja képezni. A segítségével a turbulencia térbeli eloszlása és a folyóban kialakuló csavaráramlások is modellezhetők. A numerikus modellt már számos esetben sikeresen alkalmazták hazai folyami áramlási és morfordinamikai vizsgálatokra (pl. Baranya és Józsa, 2006; Baranya *et al.*, 2008; Baranya *et al.*, 2010), de ezek a tanulmányok még nem terjedtek ki a beágyazott rácsháló leírásra.

A három-dimenziós áramlási modell a következő elemekből építhető fel:

- Folytonossági és impulzusegyenletek (Navier-Stokes),
- A turbulencia modellezés alapjai, (k-ε modell)
- Szabadszélű áramlás modellezése.

Maga a numerikus megoldás véges térfogat módszerrel és a sebesség és nyomás közötti összefüggéssel lehetséges.

A Navier-Stokes egyenletek

Összenyomhatatlan, állandó sűrűségű folyadék ($\rho = \text{constans}$) esetén a Navier-Stokes egyenletek a következőképpen épülnek fel:

Folytonossági egyenlet:

$$\frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0$$

Impulzusegyenlet:

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial u_i u_j}{\partial x_j} - \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + g \delta_{i3} = 0$$

$i, j = 1, 2, 3$

Az impulzusegyenlet tagjai balról jobbra haladva: helyi gyorsulás permanens áramlás esetén, a konvektív gyorsulás, diffúzió, nyomásgradiens, nehézségi gyorsulás (z irányban).

Reynolds-átlagolás

A Reynolds-átlagolás segítségével diskretizálni lehet az egyenletrendszer.

Egy tetszőleges a mennyiség időátlagára:

$$\overline{a(x_i, t)} = \frac{1}{T} \int_{t-T/2}^{t+T/2} a(x_i, t) dt$$

A turbulens fluktuáció Reynolds-féle felbontása:

$$a' = a - \bar{a}$$

Az időátlag azonosságai:

$$\overline{a'} = 0 \text{ és } \overline{\bar{a}} = \bar{a}$$

A Navier-Stokes egyenletekbe a pillanatnyi állapotváltozók helyére beírjuk a Reynolds-féle felbontást.

A Reynolds átlagolt folytonossági egyenlet:

$$\frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_j} = 0$$

Reynolds átlagolt impulzusegyenlet:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_i \bar{u}_j}{\partial x_j} - \nu \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j \partial x_j} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + g \delta_{i3} + \frac{\partial \overline{u'_i u'_j}}{\partial x_j} = 0$$

Az impulzusegyenlet utolsó tagja a Reynolds-féle turbulens pótfeszültség.

A turbulenciamodellezés alapjai

A Boussinesq-féle közelítés alapján a turbulenciamodellezés a gázkinetika elméletéből levezethető. Párhuzamot lehet ugyanis vonni a molekuláris és a turbulens diffúzió között. A Reynolds-féle pótfeszültséget a molekuláris diffúzióhoz hasonlóan szintén az alakváltozási tenzorból, de a molekuláris viszkozitás helyett ν_t örvényviszkozitásból számítható, amely a turbulens örvények okozta impulzuscsere erősségét jellemzi.

Ez alapján a Reynolds féle pótfeszültség az alábbiak alapján számítható:

$$\overline{u'_i u'_j} = -\frac{\tau_{ij}}{\rho} = -\nu_t \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) + \frac{2}{3} \delta_{ij} k$$

Ahol a zárójelen belüli kifejezés a Reynolds-átlagolt alakváltozási tenzor:

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right)$$

A turbulens kinetikai energia sűrűsége pedig:

$$k = \frac{\overline{u_1'^2} + \overline{u_2'^2} + \overline{u_3'^2}}{2}$$

A k- ϵ turbulenciamodell

A turbulens kinetikai energiával és annak disszipációjával a turbulencia leírható. Az örvényviszkozitást (Eddy-viszkozitás) a két változó segítségével számítjuk:

$$\nu_t = c_\mu \frac{k^2}{\epsilon}$$

,ahol c_μ egy kalibrált konstans.

A turbulens kinetikai energia az alábbiak alapján számítható:

$$k \equiv \frac{1}{2} \overline{u_i u_i}$$

modellezve:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + U_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\nu_T}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + P_k - \varepsilon$$

ahol P_k :

$$P_k = \nu_T \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \left(\frac{\partial U_j}{\partial x_i} + \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \right)$$

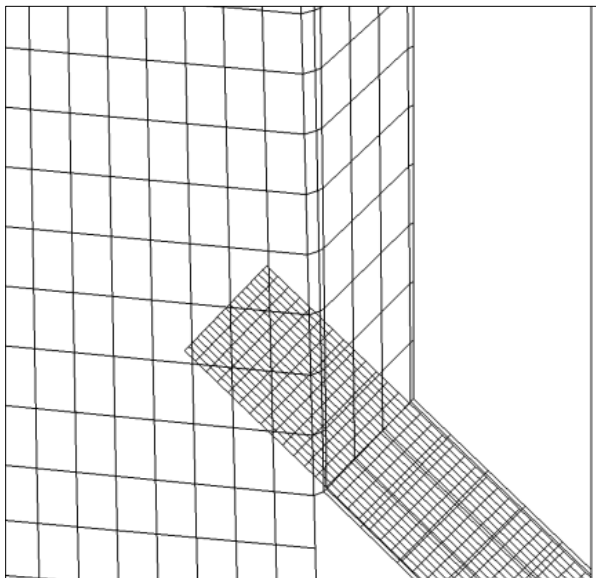
A turbulens kinetikai energia transzportegyenlete:

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + U_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\nu_T}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} P_k + C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k}$$

A beágyazott rácsháló numerikus megoldása

Dolgozatom egyik fő célja, hogy a hajózási és ökológiai problémák vizsgálatához megállapítsam a fő- és mellékág optimális rácsháló felbontását. Problémát jelenthetnek azonban a fő- és mellékág eltérő geometriai méretei. Az ilyen kapcsolatokban általában mind szélességben, mind mélységben a főág jóval nagyobb, ezért az ott alkalmazott rácsháló felbontása valószínűleg nem alkalmas a kisebb méretű mellékág áramlástani leképezésére. A problémára megoldást jelenthet a beágyazott rácsháló alkalmazása (Baranya et al. 2012).

A főági medret durvább, a mellékágot pedig finomabb rácshálóra fogom felépíteni, ez utóbbi lesz a beágyazott rácsháló. A durva és beágyazott rácsháló között a numerikus modell szükségszerűen kommunikációt kell, hogy biztosítson, hiszen a rácshálók átfedik egymást. Egyirányú kommunikáció esetén a finom rácsháló peremfeltételeinek értékei a durva rácsháló számított értékeiből adódnak. Kétirányú kommunikáció esetén pedig a finom rácsháló is ad át információt a durva rácshálóknak.



2. ábra: A beágyazott rácsháló beépítése

Az algoritmus azt számítja ki, hogy a durva és a finom rácsháló határánál mekkorák lesznek a sebesség, turbulencia és hordaléktöménység értékek, amelyeket a finom rácsháló határcelláiba

interpolál. Az interpolációhoz először meg kell állapítani a durva háló azon celláit, amelyekből a peremfeltételek számíthatók. Ez a finom rácshálóra négy legközelebbi és már kívül eső cellákat jelenti. Ahhoz, hogy a modell eldöntse, hogy ezek a cellák biztosan kívülre esnek a finom tartományon, a következő műveletet végzi el:

- Meghatároz egy \mathbf{n} vektort, amely a finom tartományon kívülre mutat, „s” felület felé
- Meghatároz egy \mathbf{r}_i vektort, amely „s” (finom) határfelületről mutat a durva rácsháló „i” cellájába
- Amennyiben a vektorok összege pozitív, a választott cella kívülre esik a finom tartományon.

A peremfeltételek értéke a négy cella súlyozott átlagából számítható, a súlyozási érték pedig a durva cella sebességvektorának ($\mathbf{u}_{c,i}$) skalárértékéből és a durva rácshálóra „s” határfelület középpontja felé mutató vektorokból ($\mathbf{n}_{sc,i} = -\mathbf{r}_i$). Az „s” határfelület peremértéke, „ λ_s ” az alábbi képlet alapján számítható:

$$\lambda_s = \frac{\sum_{i=1}^4 \lambda_{c,i} \max(0, \mathbf{n}_{sc,i} \cdot \mathbf{u}_{c,i})}{\sum_{i=1}^4 \max(0, \mathbf{n}_{sc,i} \cdot \mathbf{u}_{c,i})}$$

, ahol „ λ_c ” a durva rácsháló értéke.

A „ λ ” paraméter lehet sebesség, turbulencia jellemző vagy hordaléktöménység. A képlet alapján a modell nagyobb súlyban veszi figyelembe a felvízi cellákat. Ha mind a négy cella skalárértéke negatív, akkor a víz kifelé áramlik a határfelületről és a peremérték nulla.

A kétirányú kommunikáció esetén a finom rácshálóban számított értékek is hatással vannak a durva rácsháló celláira, vagyis visszahatás érvényesül. Ez a módszer sokkal bonyolultabb és gyakran instabil szimulációt eredményez. A korábbi tesztelések során a legjobb eredmények akkor születtek, amikor csak közvetlenül a határfelületnél lévő cellákat vonták be a számításba. A súlyozási értékek összegét „ a_p ” –t használták fel a durva cellák forrástagjának („S”) meghatározására. Ezt alkalmazták a sebesség és turbulencia számításakor. A finom hálóra (f) legközelebb eső durva cellák „ S_p ” értékeit az alábbi egyenletből nyerték:

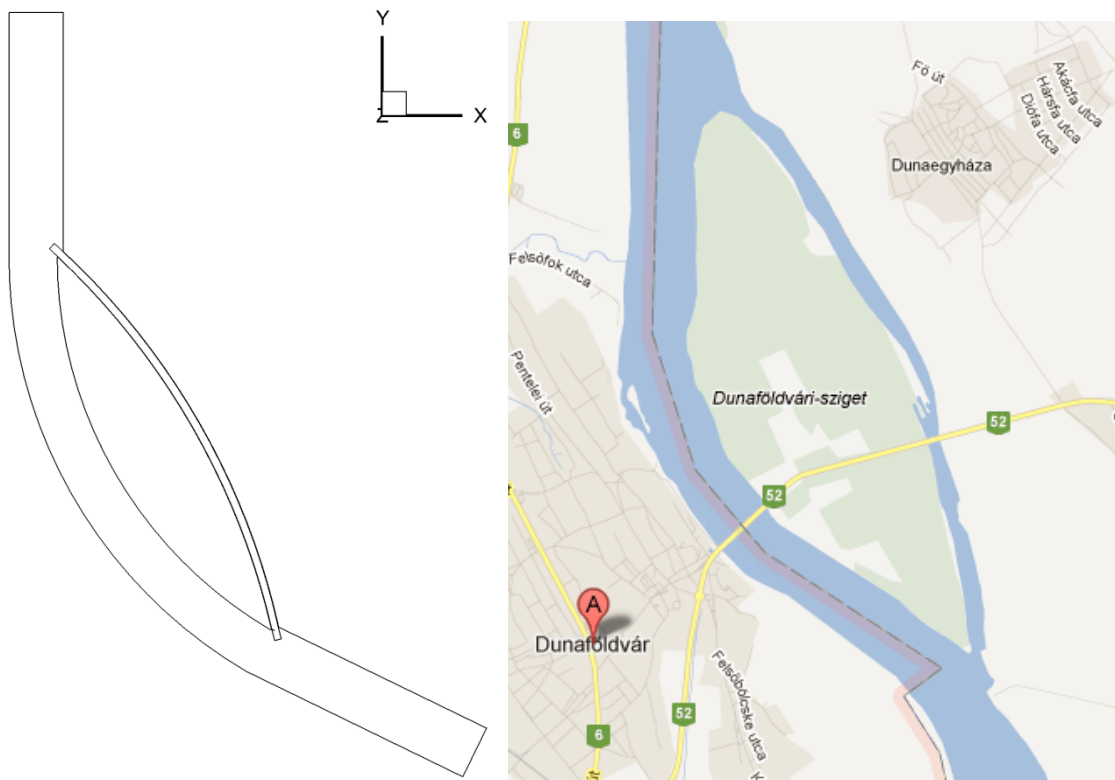
$$S_p = S_p^* + r \left(\frac{\sum \lambda_f}{j} - \lambda_c \right) a_p$$

ahol a * az eredeti értéket jelöli. A „j” paraméter a durva cellákhoz tartozó finom cellák száma, „ λ_f ” pedig a finom cellák értéke. Az „r” egy relaxációs faktor, értéke 0.01.

3. A számítási rácsháló felépítése

A rácsháló felépítése SMS (Surfacewater Modeling System) programmal történt (SMS Development Team, 2012). A szoftver funkciói lehetővé teszik a modell geometriájának felvázolását, a csomópontok és rácspontok megállapítását, valamint magának a rácshálónak a generálását is. A felépített rácsháló pedig könnyedén importálható a SSIIM programba, amellyel már a hidraulikai és hordaléktranszport számítások, szimulációk történtek.

A modell geometriájának felépítésekor fontos szempont volt, hogy az minél sematikusabb, egyszerűbb legyen és segítségével jól jellemezhetőek legyenek a fő-és mellékág mederáramlásai. A főág méreteit a Duna Dunaföldvár környéki szakaszához, a mellékágét pedig a Solti-mellékághoz idomítottam, mert a dolgozat tulajdonképpen egy valós vizsgálatot alapoz meg, ami erre a folyószakaszra terjed majd ki. A vizsgált főági szakasz így 10 km hosszú és 450 m széles, a mellékág pedig 3,5 km hosszú és 65 m széles lett. A geometriai kialakítást az **Hiba! A hivatkozási forrás nem található.** tartalmazza.



3. ábra: A numerikus modell geometriája és a Solti-mellékág

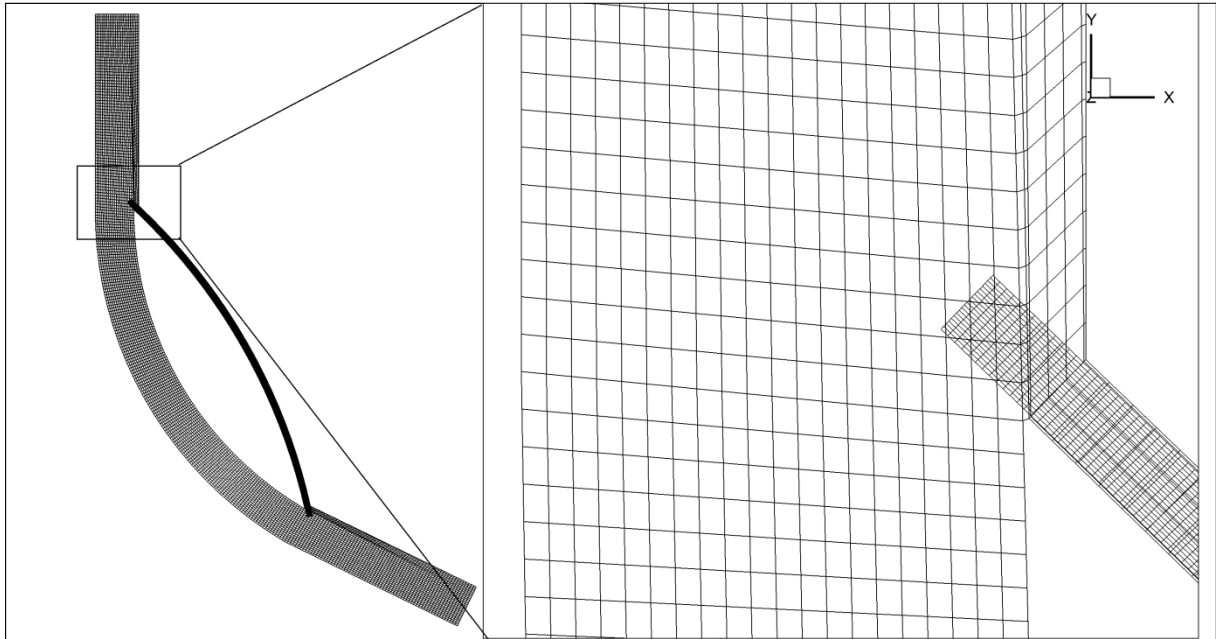
A medergeometria felvázolása után megállapítottam a durva és finom rácshálók felbontását. A beágyazott rácshálót külön fájlban építettem fel és csak a numerikus modellben illesztettem bele a durvább rácshálóba. A durva rácsháló cellái kb. 20 m szélesek és 30 m hosszúak, ez a felbontás elegendő ahhoz, hogy a fő-mellékág egymásra hatását meg tudjuk figyelni, ugyanakkor nem veszi annyira igénybe a gép memóriáját, így a futtatási idő sem lesz túl hosszú.

A beágyazott rácsháló felbontása és kiterjedése változó lehet a különféle futtatási variációk között. Ahhoz, hogy vizsgálni tudjam a mellékági beavatkozások főmederre való hatását is, a finomabb felbontású beágyazott rácshálót meg kell hosszabbítani a főmeder irányába, így részletesebb képet kaphatunk a csatlakozásnál történő áramlásokról. Ennek a benyúlásnak nem érdemes túl hosszúnak

lennie, hiszen bizonyos távolságban már a durvább rácsháló is elegendően pontos adatokat szolgáltat a beavatkozás hidrodinamikai hatásairól és minél kisebb a finom rácsháló kiterjedése, annál kisebb a számítási igény és így, a futtatási idő. A finom rácsháló beépítését a 4. ábra tartalmazza.

A finom rácsháló cellái általában 3 m szélesek és 7,5 m hosszúak. Ez kb. 25-ször nagyobb felbontást ad, mint a durva rácsháló, így a számítási eredmények pontossága és részletessége is sokkal nagyobb lesz. A cellaméret aránya a különféle variációknál torzulhat a beépített műtárgyak hatására.

A rácspontok magasságai a főmeder esetén 0, a mellékág esetén pedig +4 m, az egyes beépített műtárgyaké ennél nagyobb. Ez még valóságosabb képet ad a mederáramlások számítása során.



4. ábra: A durva felbontású és a beágyazott rácsháló

4. Modellváltozatok meghatározása

Gyakorlati példák leírása a modellváltozatok meghatározásához

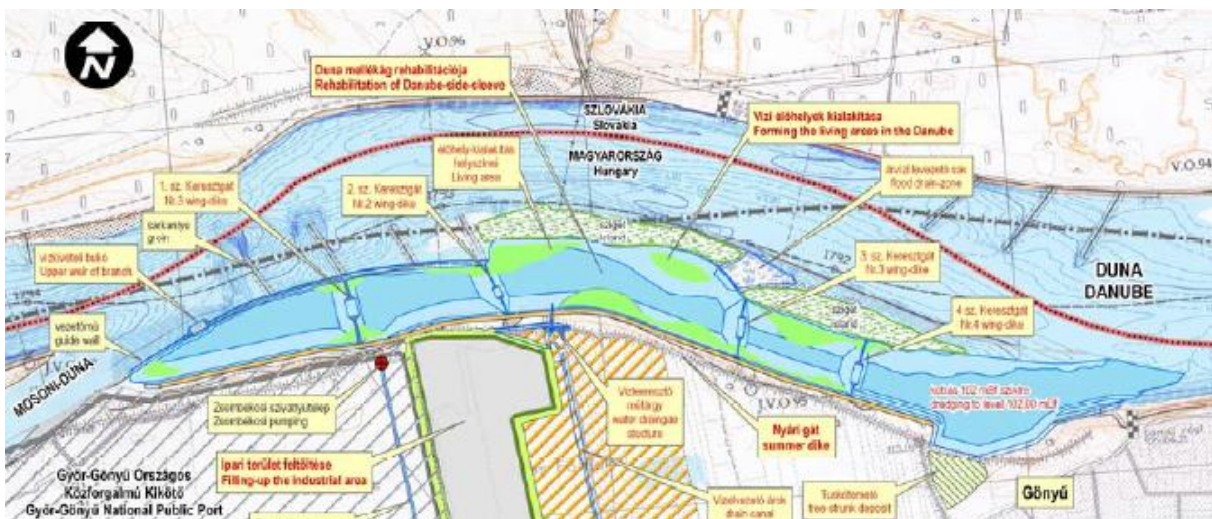
A bevezetésben már taglaltam, hogy a Duna hajózhatóságának javítása érdekében már számos tanulmány készült, melyek főként kotrással és terelőművek beépítésével kívánták biztosítani a megfelelő hajózási szinteket és szélességet. Félő azonban, hogy ezekkel a beavatkozásokkal a Duna igen nagy és gazdag mellékágrendszerét veszélyeztetjük. Jelen dolgozatban inkább a mellékágak vízpótlására próbáltam koncentrálni és arra, hogy az egyes beavatkozások milyen hatással lehetnek a fő-és mellékági rendszerekre, hajózási kérdésekkel részletesen nem óhajtottam foglalkozni.

A Duna mellékágainak rehabilitációjára szintén számos tanulmány készült, amelyek támponttal szolgálhattak abból a szempontból, hogy milyen modellváltozatokat érdemes kidolgozni. Ezek közül hármat emelnék ki, a Gönyői-mellékág, a Szabadság-zátony, illetve a Bölszei mellékág rehabilitációját.

A Gönyői-mellékág rehabilitációja

A gönyői gázerőmű építésével kapcsolatban napirendre került a gönyői Duna mellékág rehabilitációja is. A térségben a kisvízi meder beágyazódása miatt ugyanis a kis-és középvízszintek jelentősen csökkentek, amely a mederszelvény növekedését eredményezte. Kezdetben az árvízszintek is csökkentek, később azonban az árvízi levezetőképesség romlani kezdett, mert a szárazra került területeken a növényzet erősen elburjánzott, lecsökkentette a vízáramlást, amely a meder feltöltődéséhez vezetett. A modellvizsgálatok szerint a 100 éves visszatérési idejű vízhozamhoz tartozó felszín görbe 30-40 cm-rel haladta meg a mértékadó árvízszintet (MÁSz).

A mellékág rehabilitációjával az árvízi levezetőképességet, valamint a térség biodiverzitását kívánták javítani. Elvégezték a növényzet kiirtását, kotrásokat, valamint keresztgátakat, sarkantyút, vízkivételi bukót és vezetőművet létesítettek. Ezek helyét a 5. ábra és 6. ábra tartalmazza.



5. ábra: A Gönyői mellékág tervezett beavatkozások (www.edukovizig.hu)



6. ábra: A Gönyői-mellékágon megvalósult beavatkozások (<https://maps.google.hu/>)

Szabadság-zátony

A Szabadság-sziget mellékági vízáramlásának romlását elsősorban egy keresztgát okozta, amelybe a parti szűrésű kutakat és a regionális rendszerhez kapcsoló vízfőnyomó vezetékeket helyezték. A vizet így elterelték a mellékágtól, mely ennek következtében feliszapolódott.

A feliszapolódott medret kikutorták, így biztosították a mellékág hosszirányú átjárhatóságát. A kőanyagú keresztgátat elbontották, az ivóvízvezetékeket pedig a meder alá süllyesztették.

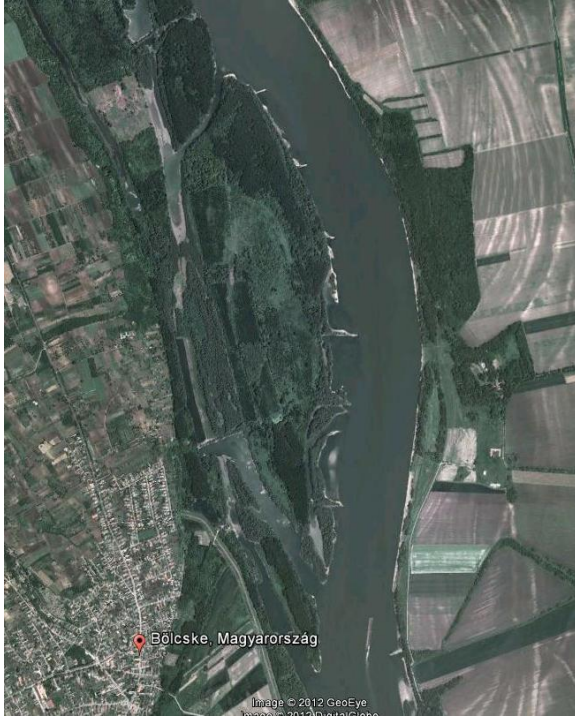
(<http://www.szabadsagsziget.hu/>)



7. ábra: A Szabadság-zátonyon megvalósult műszaki beavatkozások (<https://maps.google.hu/>)

Bölcskei-mellékág

A Bölcseki Duna holtág esetében a mellékágot három kőgáttal választották el a főmedertől. A mellékág rehabilitációjakor az egyik kőgátat elbontották, ritkították az elburjánzott növényzeten, valamint kotrási munkákat is végeztek. Ezzel biztosították a víz szabad áramlását a mellékágban, valamint élőhelyet számos hal-és madárfajnak.



8. ábra: A Bölcseki-mellékágon megvalósult műszaki beavatkozások (<https://maps.google.hu/>)

Modellváltozatok bemutatása

A fenti esetek vizsgálatával igyekeztem olyan modellváltozatokat meghatározni, melyek segítségével jellemezhetőek a legfontosabb mederbeli beavatkozások hatásai. Ennek alapján a modellváltozatok a következők:

1. Beavatkozás nélküli fő-és mellékági rendszer, a fő-és mellékági mederszint ugyanakkora
2. Terelőmű beépítése a mellékági csatlakozásnál
3. Keresztgát beépítése a mellékági csatlakozásnál
4. Terelőmű és keresztgát beépítése
5. Terelőmű és keresztgát beépítése a mellékág felvízi csatlakozásánál, valamint több sarkantyú beépítése a mellékág alvízi csatlakozásánál a főágban

Az 1. sz. változat nemcsak a műtárgyi beépítésekben, hanem a mederszintekben is eltér a többi változattól. Míg ebben a változatban a fő-és mellékági mederszintek megegyeznek, addig a műszaki beavatkozásokat tartalmazó változatokban a mellékági mederfenék 4 méterrel meg van emelve a főági mederfenékhez képest. Ez biztosítja egyrészt, hogy a mederszintek okozta változásokat is tudjuk elemezni, másrészt, sokkal realisabb képet mutat a fő-és mellékágak kapcsolatáról. A mellékág ugyanis a valóságban sekélyebb, mint a főmeder.

A terelőmű helyét úgy határoztam meg, hogy elegendően hosszú és magas legyen ahhoz, hogy befolyásolja a fő-és mellékág áramlásait is, de elég messze legyen a mellékágtól ahhoz, hogy ne zárja el a víz útját a mellékág felé.

A keresztgátat közvetlenül a mellékági becsatlakozásnál helyeztem el, magasságát pedig úgy határoztam meg, hogy a mellékág felé áramló víz könnyedén átbukjon rajta.

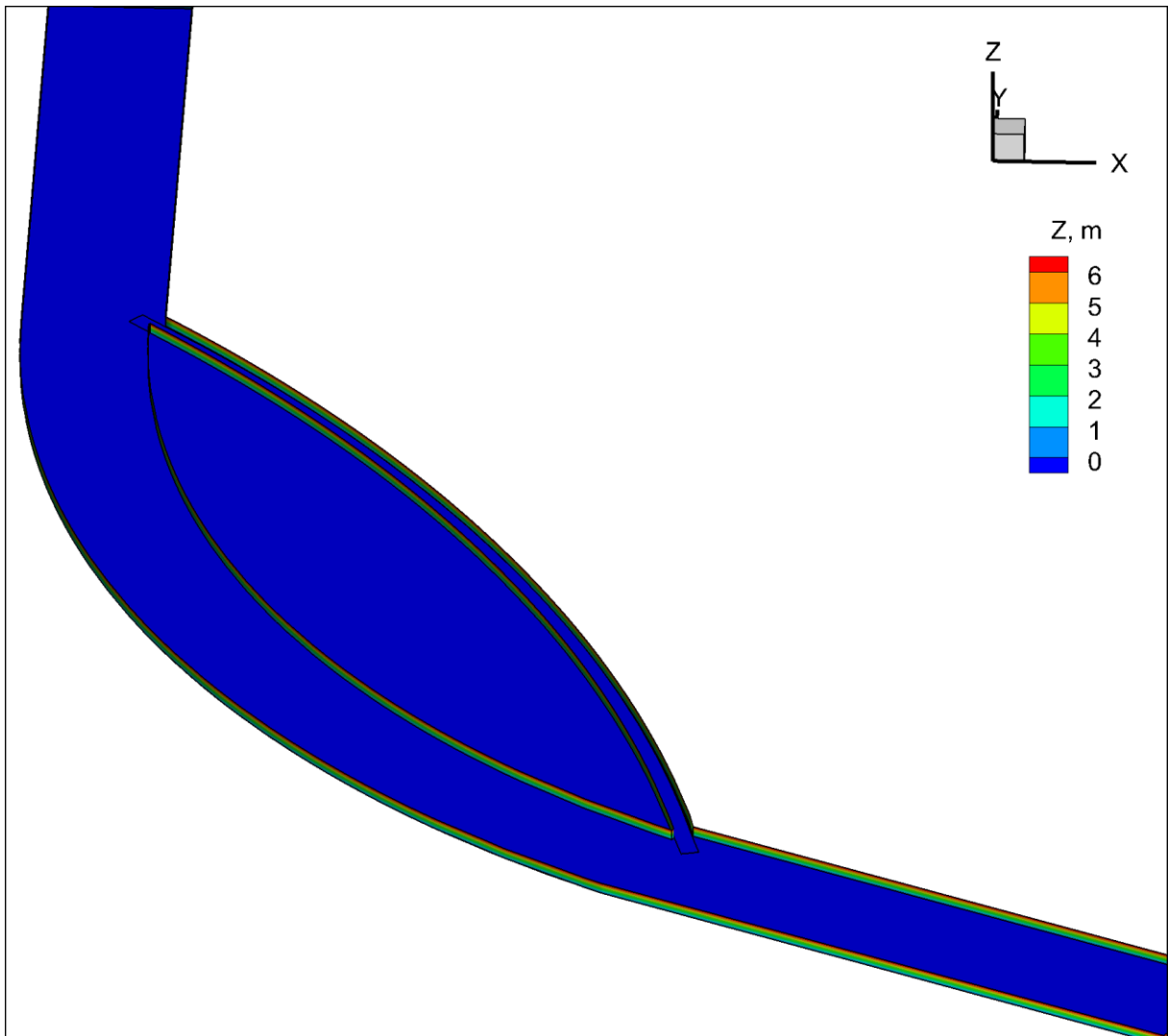
Az 5.sz. modellváltozat a 4.sz. változat kiegészítése az alsó mellékági csatlakozásnál 5 db sarkantyúval. Egymástól való távolságuknál azt vettem figyelembe, hogy egymás hatásait közvetlenül ne befolyásolják, de együttesen ki tudják alakítani az áramlás megfelelő terelését. Szögük és hosszuk kialakításánál arra törekedtem, hogy az összkép áramvonalas legyen és ne törjön meg túlságosan az áramló víz, mert az visszaduzzasztást eredményezhet.

Dolgozatom egyik fontos célja a Solti-mellékág rehabilitációjáról szóló tanulmány előkészítése, ezért szükségem volt egy olyan modellváltozat vizsgálatára is, amelybe belefoglalom a Solti-mellékág jelenlegi mederjellemezőit. Így további képet kaphattam arról, hogy mennyire összetett problémák esetén tudom alkalmazni a beágyazott rácshálót.

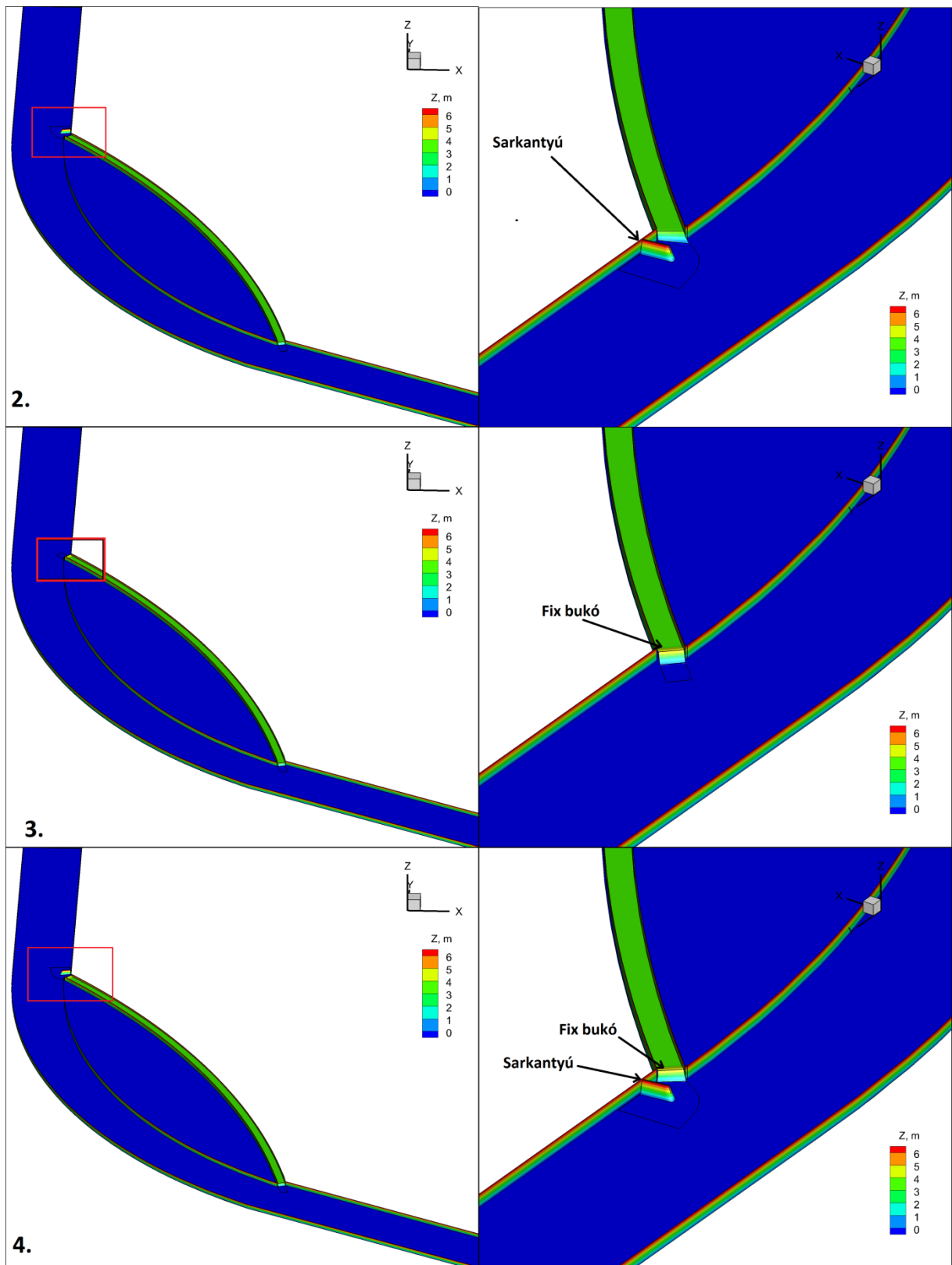
A 6.sz. modellváltozatban ezt próbáltam megvalósítani. Szigeteket, keresztgátakat, valamint egy csatornaszerű mederszűkítést helyeztem el a mellékág finom rácshálójában, melyek mind jellemzőek a Solti-mellékágra is, amint ezt a **14. ábra** is mutatja. A különféle módosításokat próbáltam úgy elhelyezni, hogy elég messze legyenek egymástól ahhoz, hogy közvetlenül befolyásolják egymás hatásait, viszont együtt egy egészet tudjanak alkotni és a későbbi elemzéseknél jól kivehető legyen, hogy az egyes mederszűkítések milyen hatással vannak a mellékági vízáramlásra.

A különféle változatok medergeometriáját az **9. ábra**, **10. ábra**, **11. ábra**, **12. ábra**, **13. ábra** és a **14. ábra** tartalmazza.

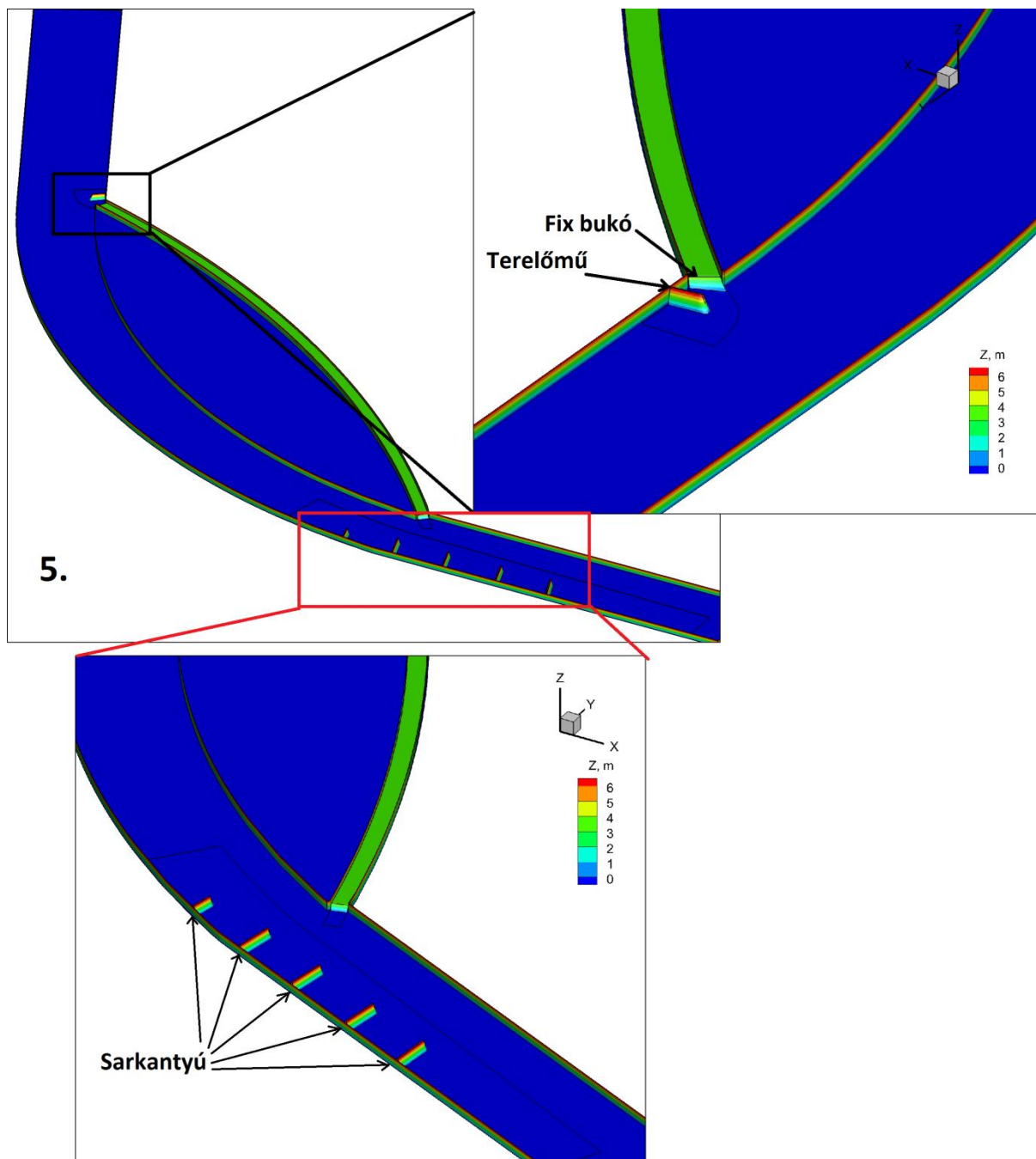
A beágyazott rácshálót úgy építettem fel, hogy illeszkedjen a beépítendő műtárgyakra, valamint azok „hatósugarára”, így részletesen tudtam elemezni azok hidraulikai hatásait a későbbiekben.



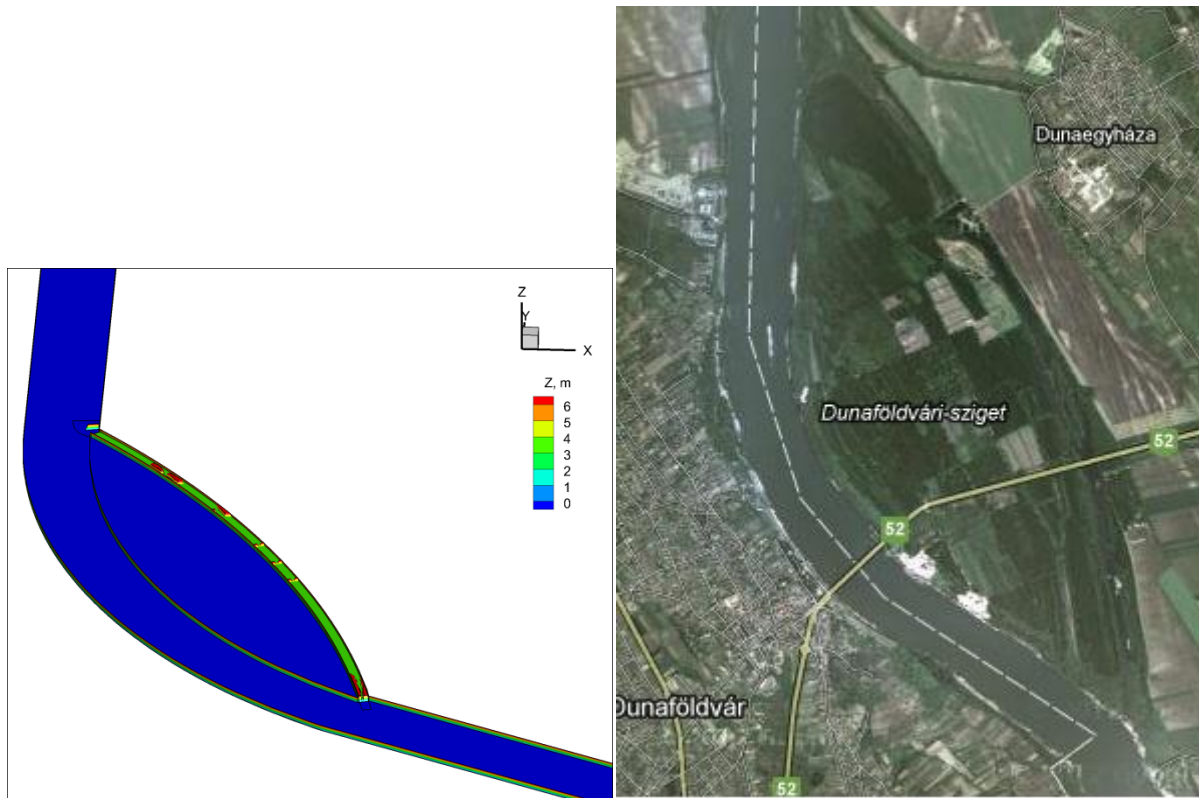
9. ábra: 1.sz. modellváltozat medergeometriája



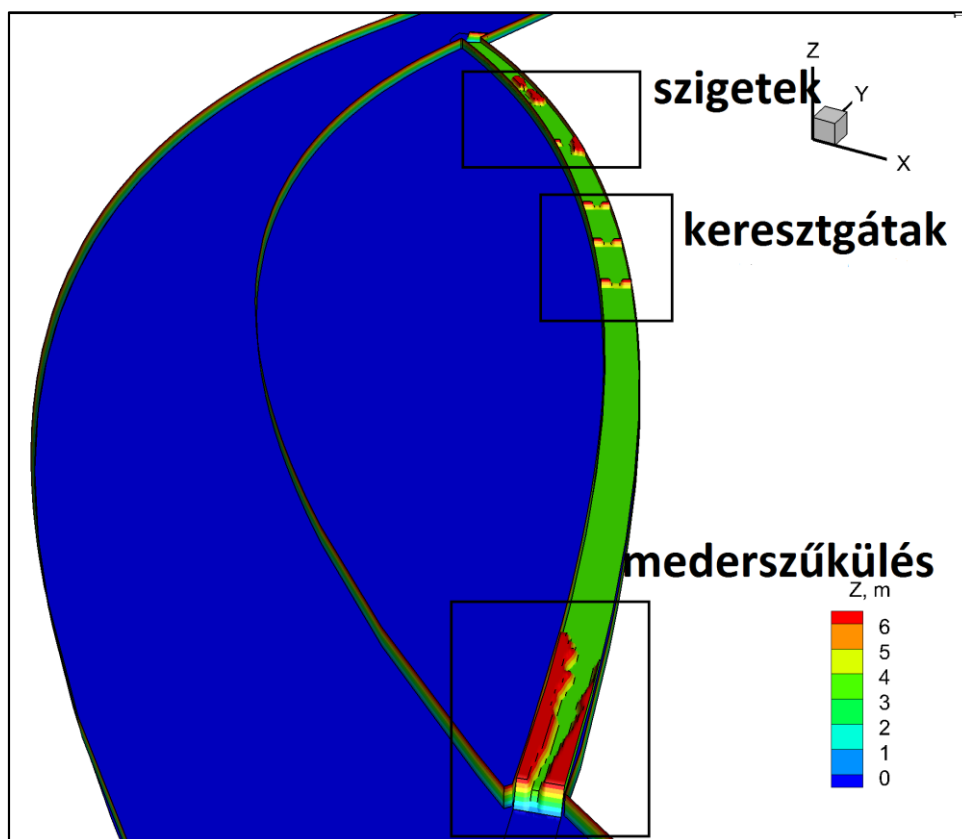
10. ábra: A 2.3. és 4. sz. modellváltozat medergeometriája



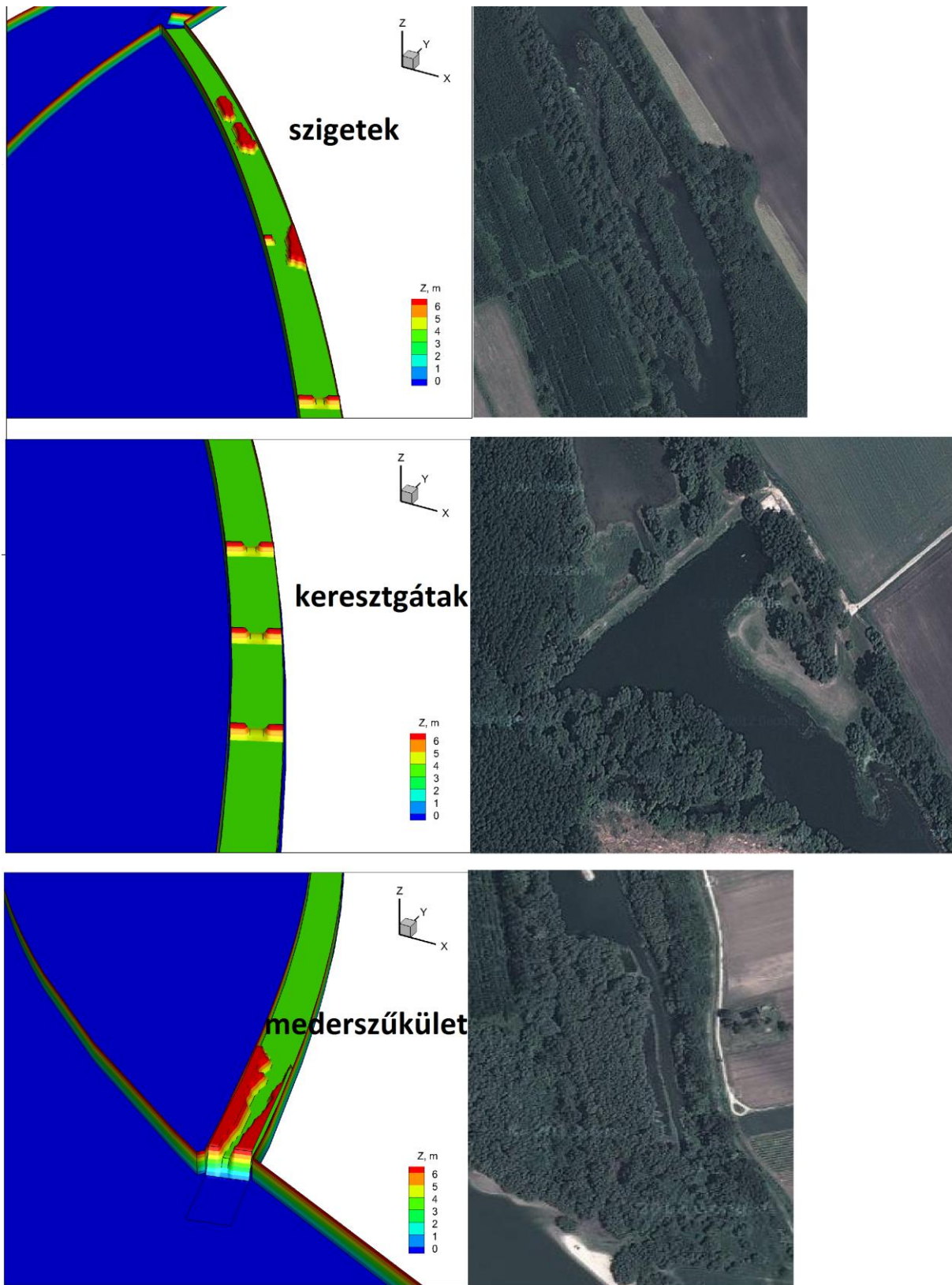
11. ábra: Az 5. sz. modellváltozat medergeometriája



12. ábra: 6. sz. modellváltozat medergeometriájának meghatározása (<https://maps.google.hu/>)



13. ábra: 6. sz. modellváltozat medergeometriájának meghatározása



14. ábra: 6. sz. modellváltozat geometriája összehasonlítva a Solti-mellékág egyes szakaszaival (<https://maps.google.hu/>)

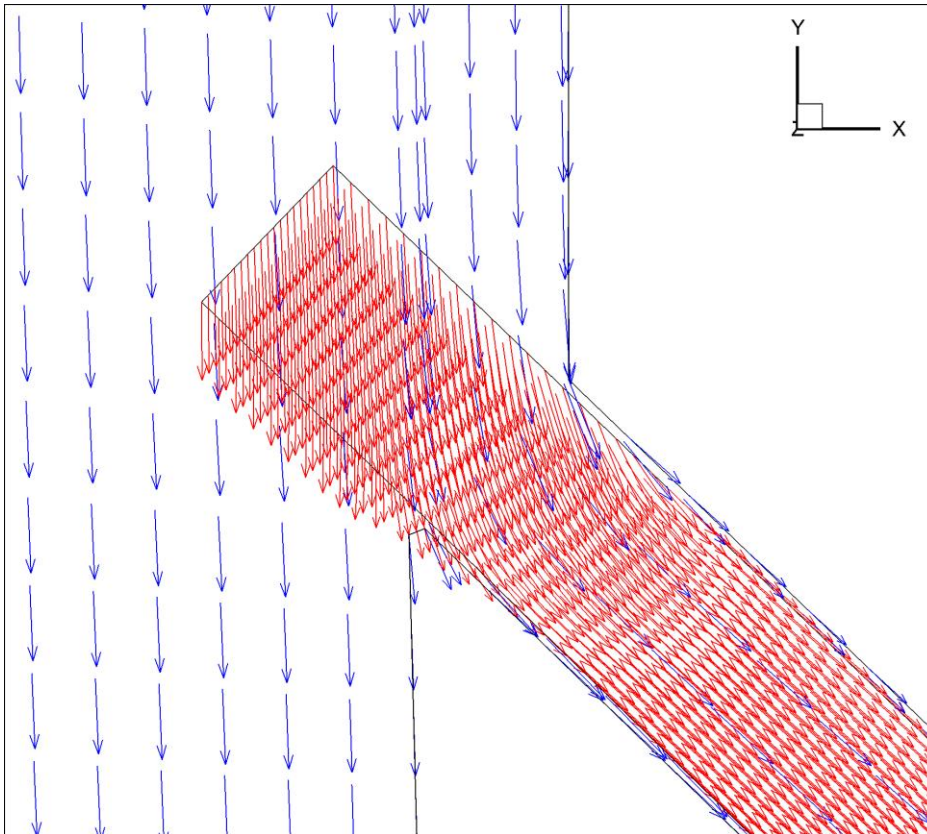
5. Az áramlási modell futtatási eredményeinek kiértékelése

Első lépésben minden modellváltozat esetére elvégeztem a szimulációkat, majd az eredményeket a Tecplot nevű programba olvastam be és értékeltem ki. Elsődleges célom az volt, hogy elemezzem a beágyazott rácsháló hasznosságát, valamint az egyes műszaki beavatkozások hidraulikai hatásait.

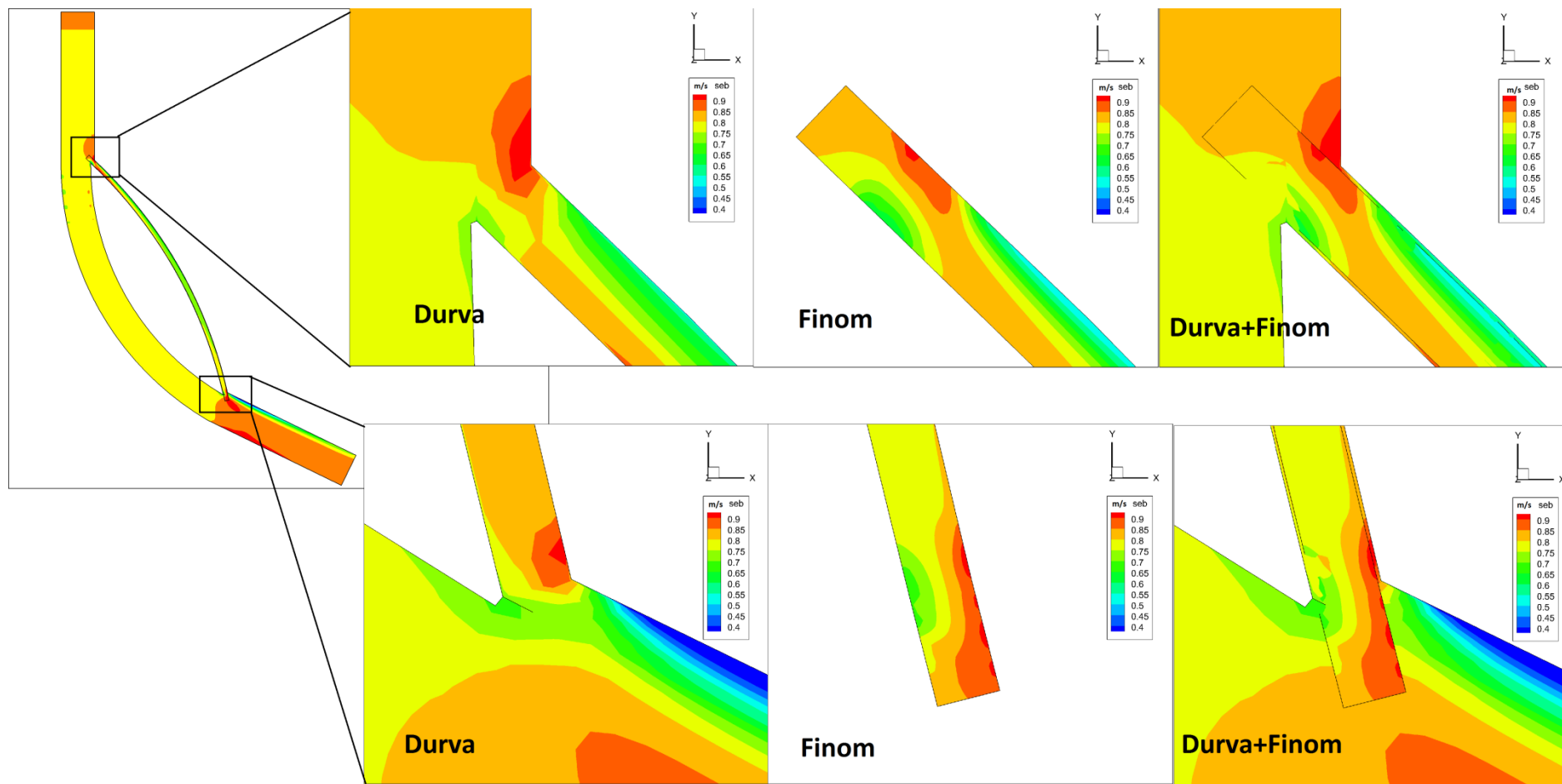
A durva és finom felbontású rácsháló számítási eredményeinek összehasonlítása

Már az *első modellváltozat* futtatási eredményeinek kiértékelésekor szembeötlő különbségeket láthatunk a durva és a beágyazott finom felbontású rácsháló eredményei között. Magától értetődően a finom rácsháló eredményei sokkal részletesebbek

15. ábra), de ezen kívül a kritikus szakaszokon (fő-és mellékág csatlakozásánál) eltérőek is lehetnek (**16. ábra**). Amennyiben az a feladatunk, hogy ezeken a szakaszokon részletesen elemezzük a hidrodinamikai viszonyokat, jobban tudunk támaszkodni a finom rácsháló eredményeire. Ebben a modellváltozatban azonban, azaz egy egyszerű mellékági csatlakozásnál, talán a markánsabb eredmények is elfogadhatóak lehetnek.



15. ábra: 1sz. modellváltozat, vízfelszínközeli sebességvektorok



16. ábra: Az 1.sz. modellváltozat vízfelszínközeli sebességeredményei

A rácsháló felbontásánál kisebb méretű mőtárgyak modellbeli leképzése nem volt megvalósítható a durva rácshálón, hiszen a cellák mérete túl nagy volt és a mőtárgyak méretei elnagyoltak lettek volna. Éppen ezért ezekben a modellváltozatokban eleve jobb feldolgozási lehetőséget nyújt a beágyazott rácsháló.

A 2.sz. modellváltozat kapcsán egy terelóművet illesztettem be nem messze a mellékági csatlakozástól. Ez a műszaki beavatkozás igen népszerű a mederszabályozási munkák során, ezért fontos, hogy tisztában legyünk az áramlásra gyakorolt hatásával, különösen ha az a mellékág szempontjából érzékeny területen, pl. annak bejáratához közel helyezkedik el. A terelómű beépítésével kapott legfontosabb eredményezőket a **17. ábra** és **18. ábra** mutatja be.

Látható, hogy a beágyazott rácsháló azon kívül, hogy könnyen meg tudtuk szerkeszteni a terelómű beépítését, abban is segítségemre volt, hogy pontosan meg tudjam határozni, hogy ez a beavatkozás hol és mekkora változásokat eredményez. A sebességeloszlásokból tudunk következtetni a mederkimélyülésekre, medererózióra és hordalék lerakódásokra, a sebességvektorok irányából pedig meggyőződhetünk arról, hogy a terelómű milyen hatással van a mellékági mederáramlásokra.

Már a futtatási eredmények megtekintése előtt is feltételezhető volt, hogy a korábbi változathoz képest nagyobb hidraulikai változások fognak történni a mellékági csatlakozásoknál. Az eredmények kiértékelésekor azonban már azt is láthatjuk, hogy a beágyazott rácsháló is nagyobb szerepet kap ebben a modellváltozatban.

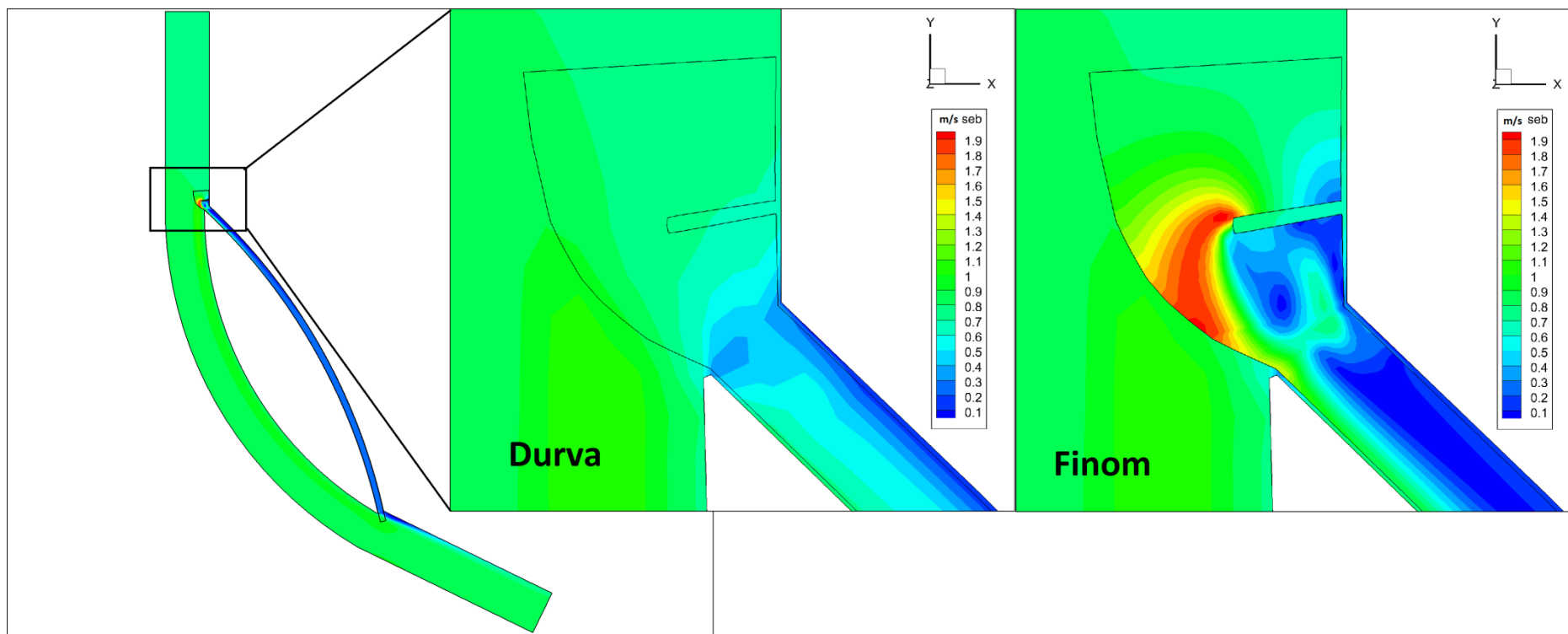
A 3. sz. modellváltozat során egy keresztgátat építettem be közvetlenül a mellékág felső becsatlakozásánál. A beágyazott rácsháló eredményei egyértelműen megmutatják ennek hatásait. A **19. ábra** jól illusztrálja, ahogyan a sebességek felgyorsulnak a mű környékén, majd a víz energiájának megtörése miatt lelassulnak.

A **20. ábra** és **21. ábra** szemlélteti a vízfelszín-és mederközeli sebességvektorok nagyságának és irányának eloszlását, így érzékelhetőbbé válik a víz áramlása. A beágyazott rácsháló igen részletesen mutatja meg, hogyan bukik át a víz a keresztgáton és utána hogyan lapul el. Meg tudjuk állapítani a pontos helyét, hol fog lelassulni vagy felgyorsulni az áramlás, illetve hol számíthatunk medererózióra és a mederanyag kiülepedésére.

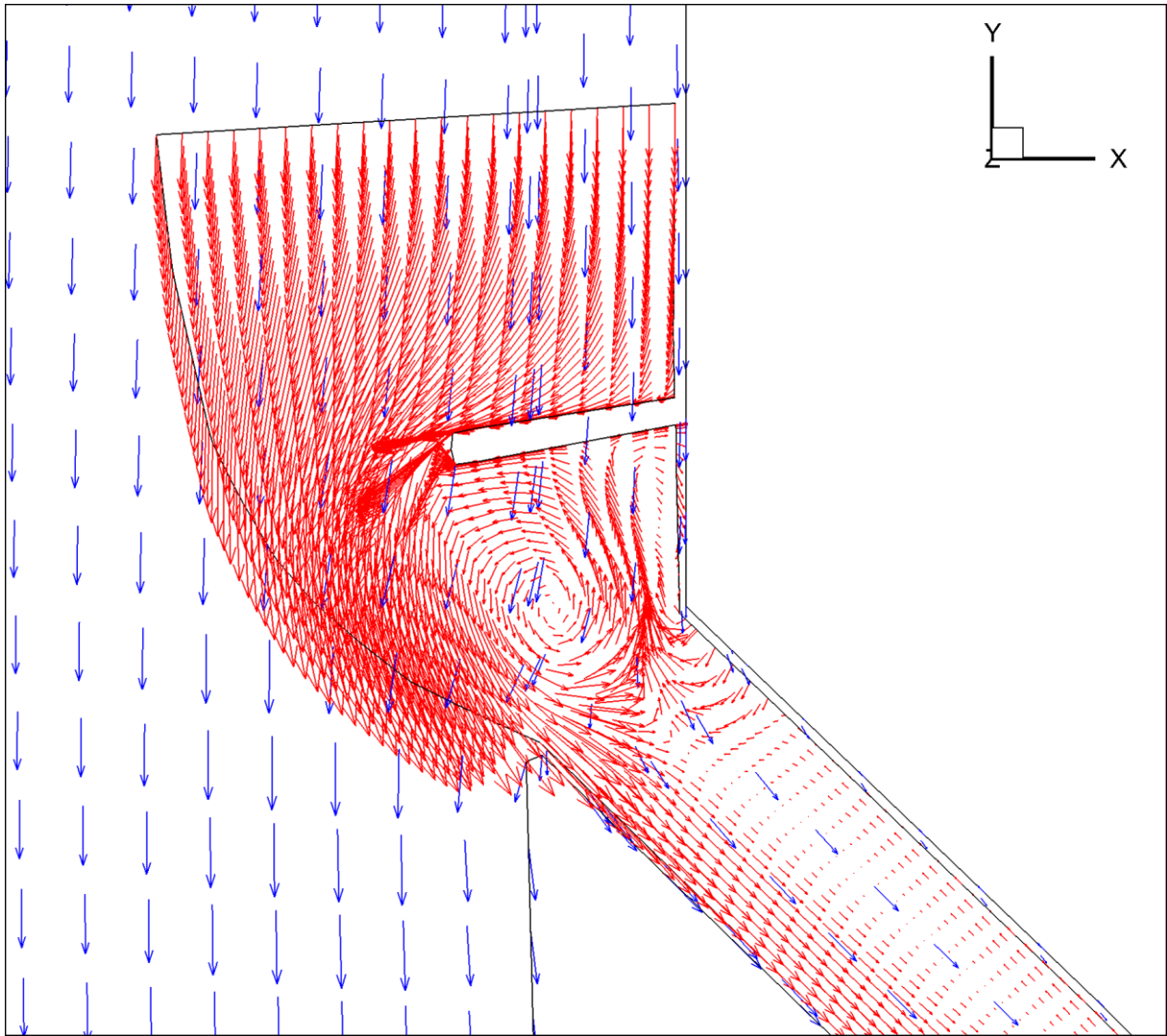
A 4.sz. modellváltozat tulajdonképpen a 2. és 3. sz. változatok összekapcsolása, ezért az ezekkel kapcsolatos megállapítások itt is helytállóak lesznek. Azt figyelhetjük meg az **22. ábra**, **23. ábra** és **24. ábra** kapcsán, hogy minél nagyobb és több a műszaki beavatkozás, a beágyazott rácsháló annál nagyobb szerepet fog kapni, hiszen az áramlások elemzése ekkor bonyolultabbá válik. Durvább rácsháló esetén nem kapnánk hű képet ennyi beavatkozás együttes hatásáról.

Azt is megfigyelhetjük, hogy a beágyazott rácsháló számításai nem illeszkednek pontosan a durva rácsháló számításaihoz. A finomabb felbontású rácsháló celláinak peremfeltételei a durva rácsháló számításaiból származik, valamint a durva rácsháló celláinak értéke is függnek a finom rácsháló celláinak számításaitól, ez utóbbi azonban nem elsődlegesen igaz. A durva rácsháló celláinak értékei elsősorban a saját peremfeltételeikből származik és azt csak csekély mértékben határozza meg a beágyazott rácshálón számított adatok, ezért nem teljesen egyeznek.

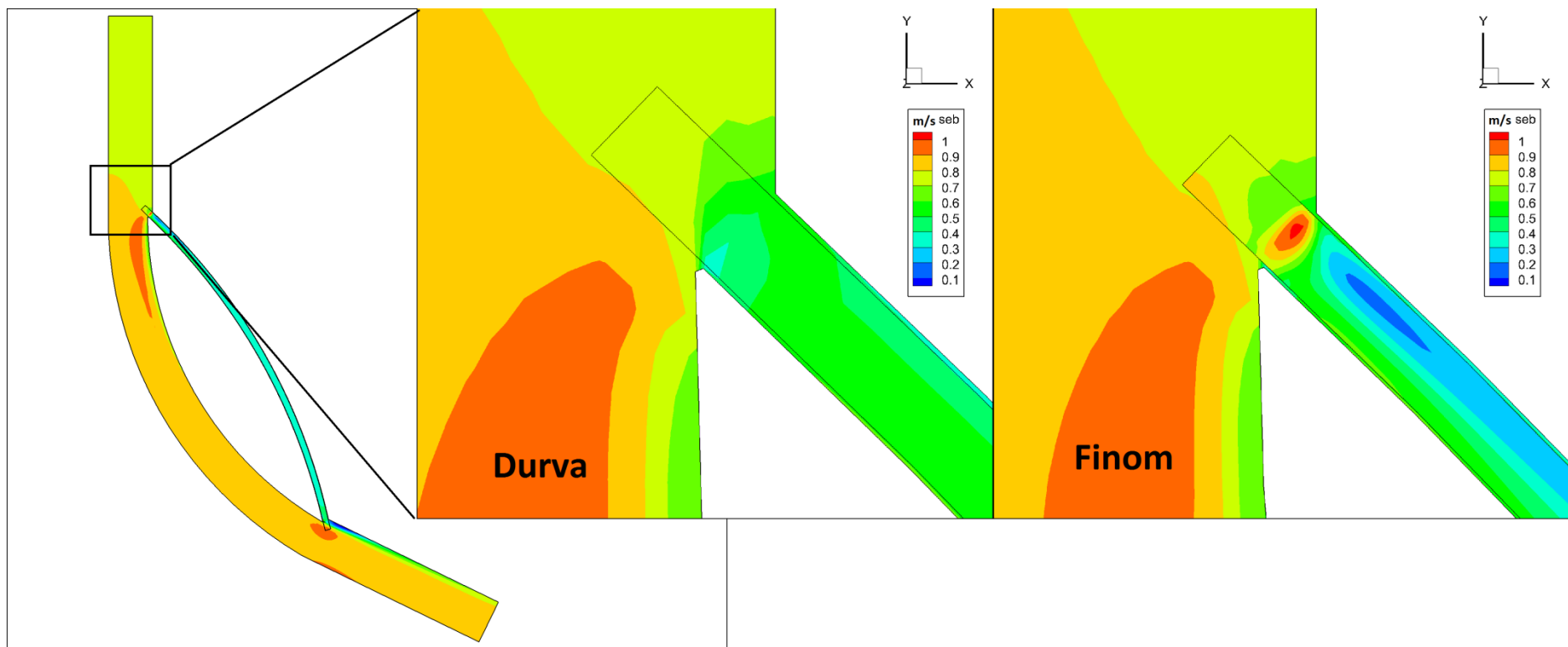
A különféle műszaki beavatkozások mérnöki szempontból releváns hatásait a későbbiekben fogom részletesen elemezni.



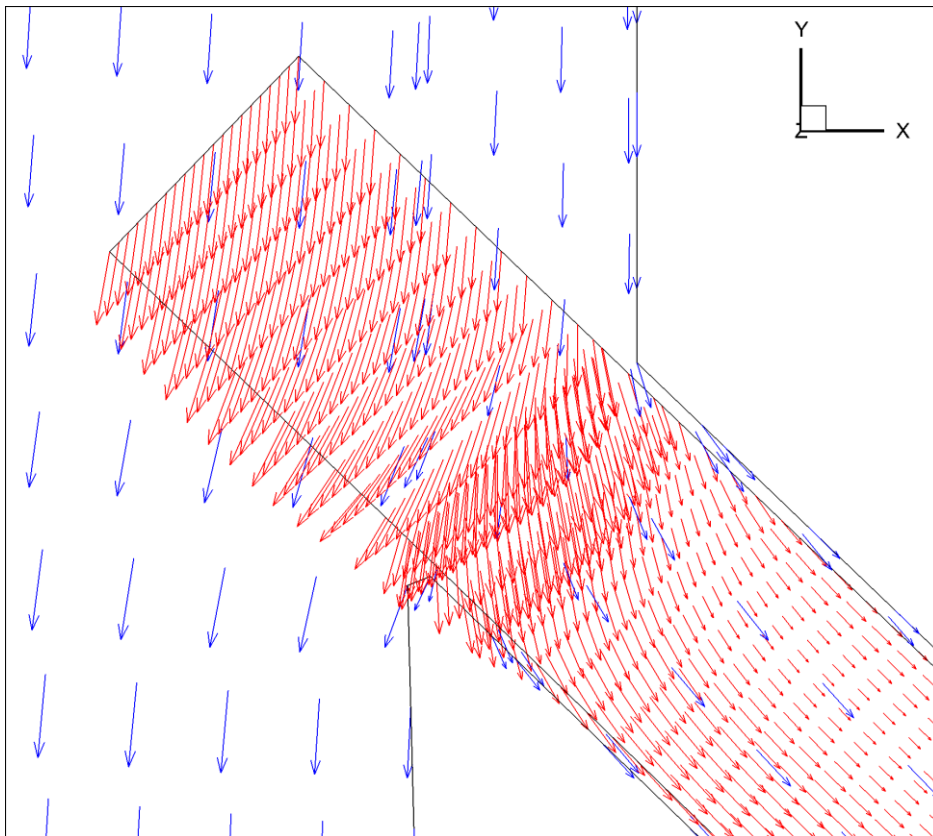
17. ábra: 2.sz. modellváltozat, vízfelszínközeli sebességeloszlások



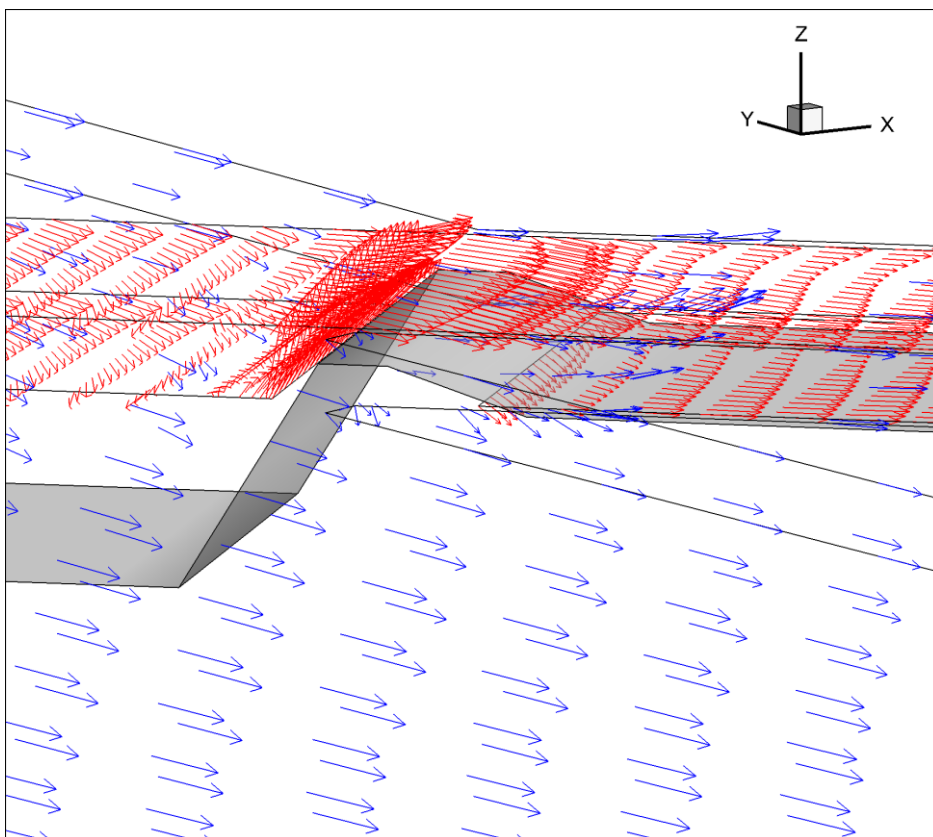
18. ábra: 2.sz. modellváltozat, vízfelszín közeli sebességvektorok



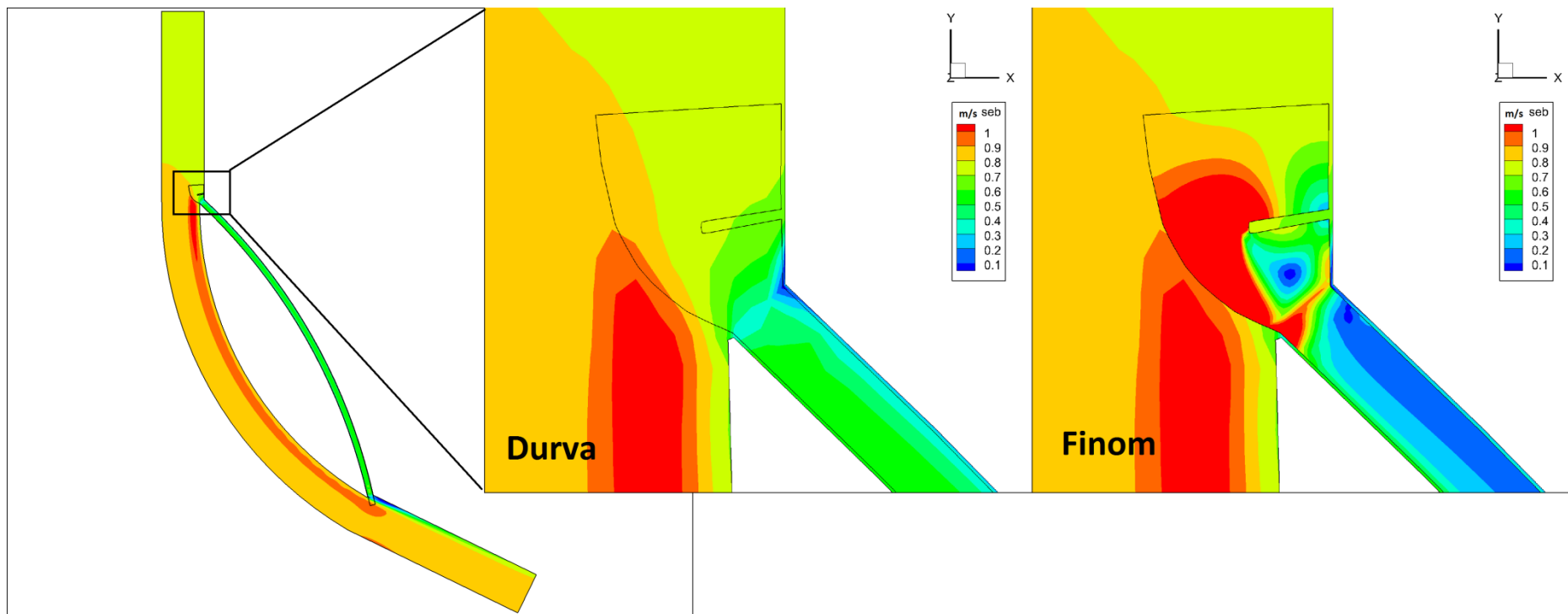
19. ábra: 3.sz. modellváltozat, vízfelszíni sebességeloszlás



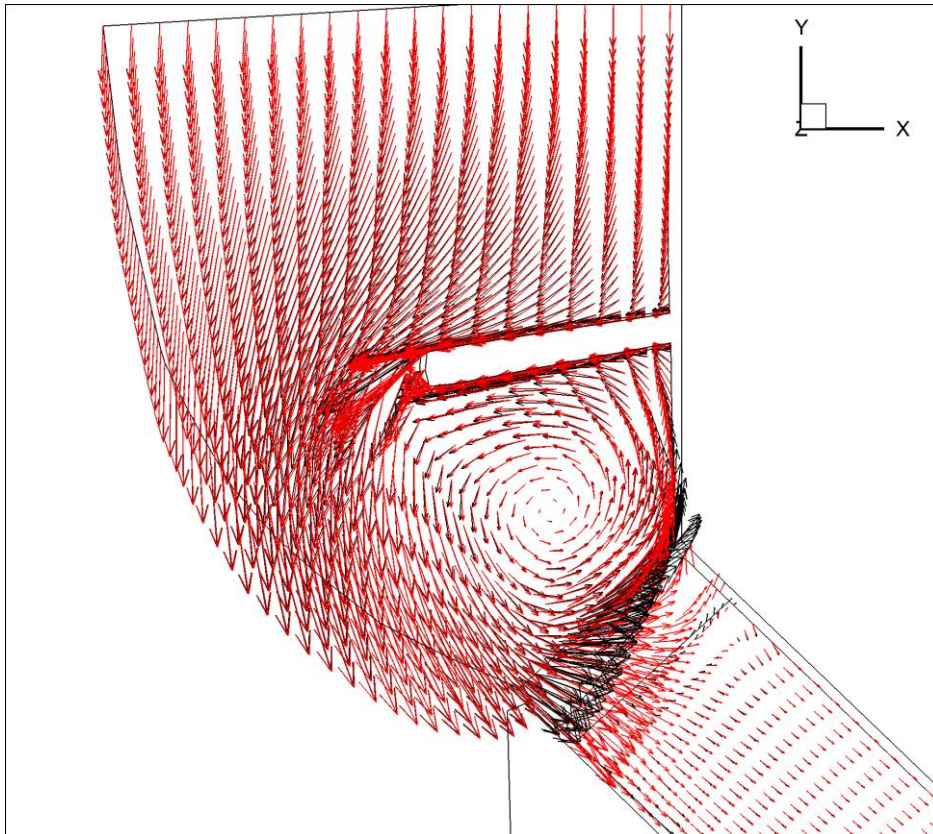
20. ábra: 3.sz. modellváltozat, vízfelszínközeli sebességvektorok



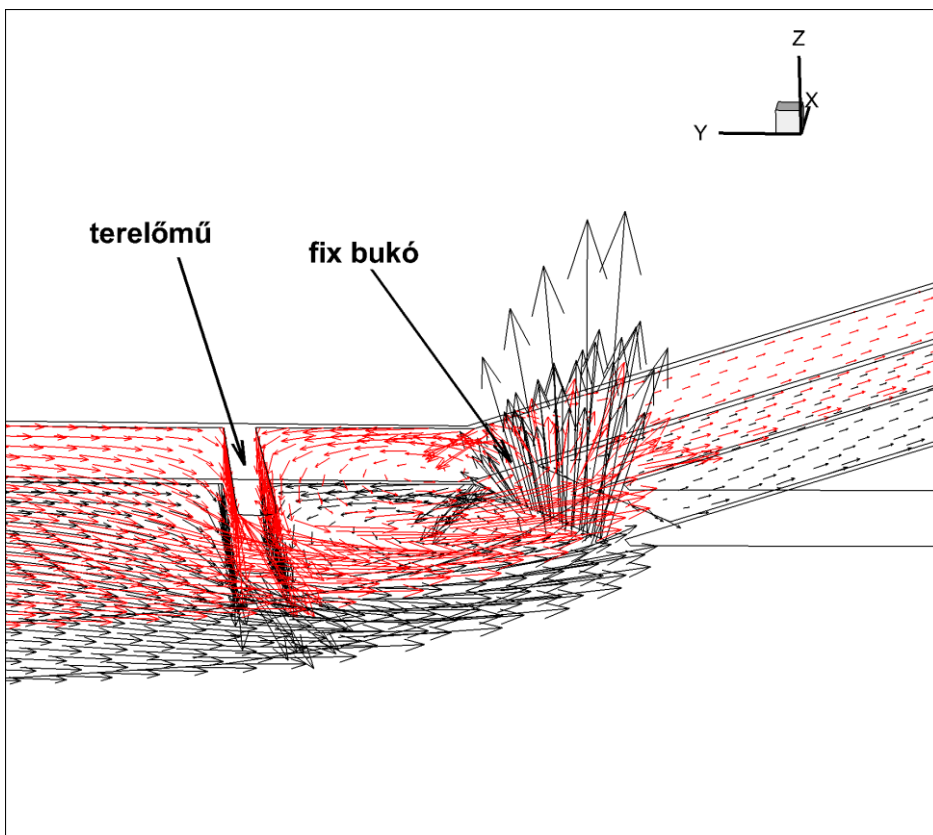
21. ábra: 3.sz. modellváltozat, a mellékág meder-és vízfelszínközeli sebességvektorai



22. ábra: 4.sz. modellváltozat, vízfelszíni sebességeloszlás



23. ábra: 4.sz. modellváltozat, mederfenék-és vízfelszínközeli vektorok



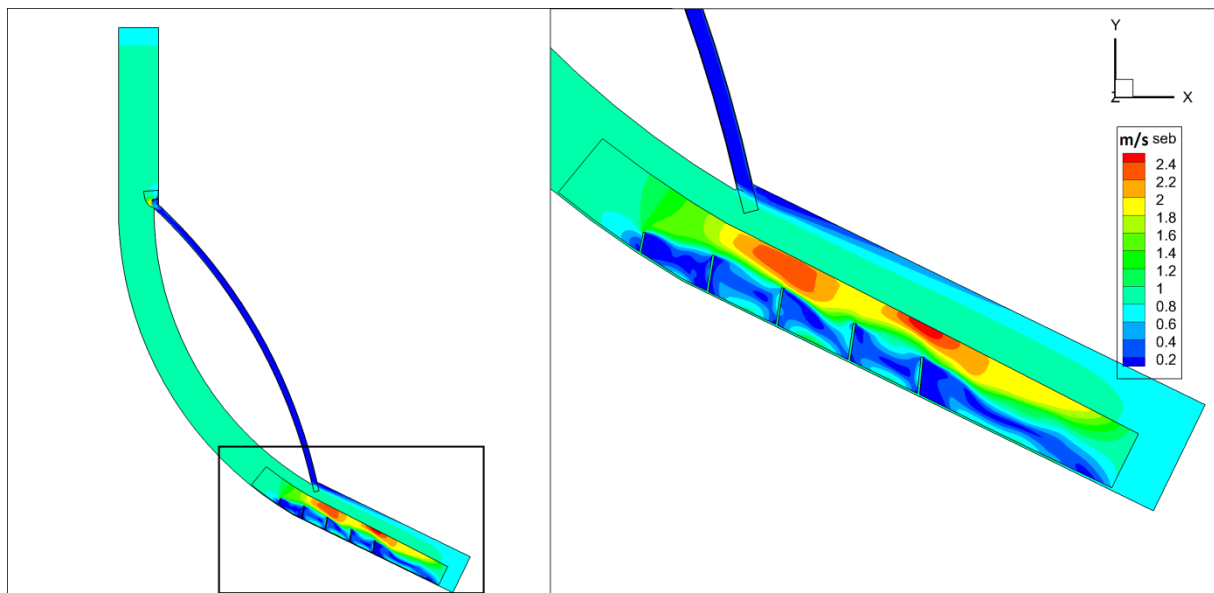
24. ábra: 4.sz. modellváltozat, mederfenék-és vízfelszínközeli vektorok

Az 5. sz. modellváltozat tulajdonképpen a 4. sz. változat kiegészítése 5 db, a főág jobb partján, a mellékág hozzáfolyásánál elhelyezett sarkantyúval. Ehhez egy új beágyazott rácshálót kellett létrehozni, hogy a sarkantyúk hatásai részletesen elemezhetők legyenek és a geometriájuk megfelelő részletességgel legyen leképezve. Természetesen emiatt bizonyos mértékben megnőtt a numerikus modell futtatási ideje is.

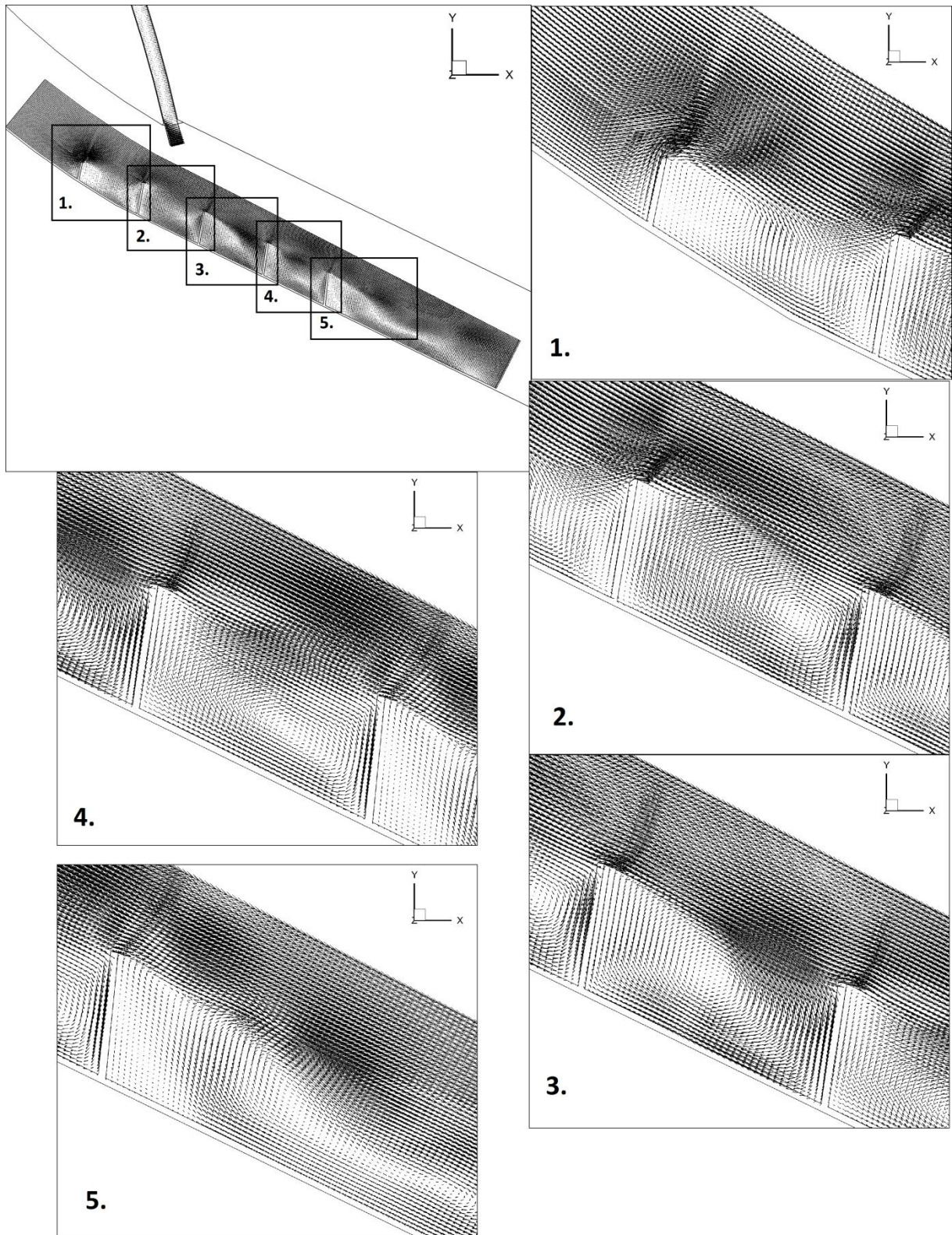
A számított eredmények alapján látható, hogy a beágyazott rácsháló ismét a feladathoz mérten megfelelő részletességű adatokat szolgáltat. A **25. ábra** jól mutatja, hogy a terelőművek hatására várhatóan hol fognak kialakulni hordalék lerakódások, illetve pontosan hol számíthatunk a sebességek jelentős növekedésére az alapállapothoz képest.

A rácsháló sűrűsége miatt a hosszú és rövidebb vektorok eloszlása szépen kirajzolja a sarkantyúk környéki sebességeloszlást, valamint a vektorok iránya az áramlás irányát (**26. ábra**). Főként a sarkantyúk közötti csavaráramlások és a terelőművek főáramképre gyakorolt hatásának elemzése miatt került fontos szerephez a beágyazott rácsháló (**26. ábra**). Ahhoz, hogy a vektorok és ezzel együtt az áramlás iránya is jobban érzékelhető legyen, ritkítottam a megjelenített vektorok számán (**27. ábra**).

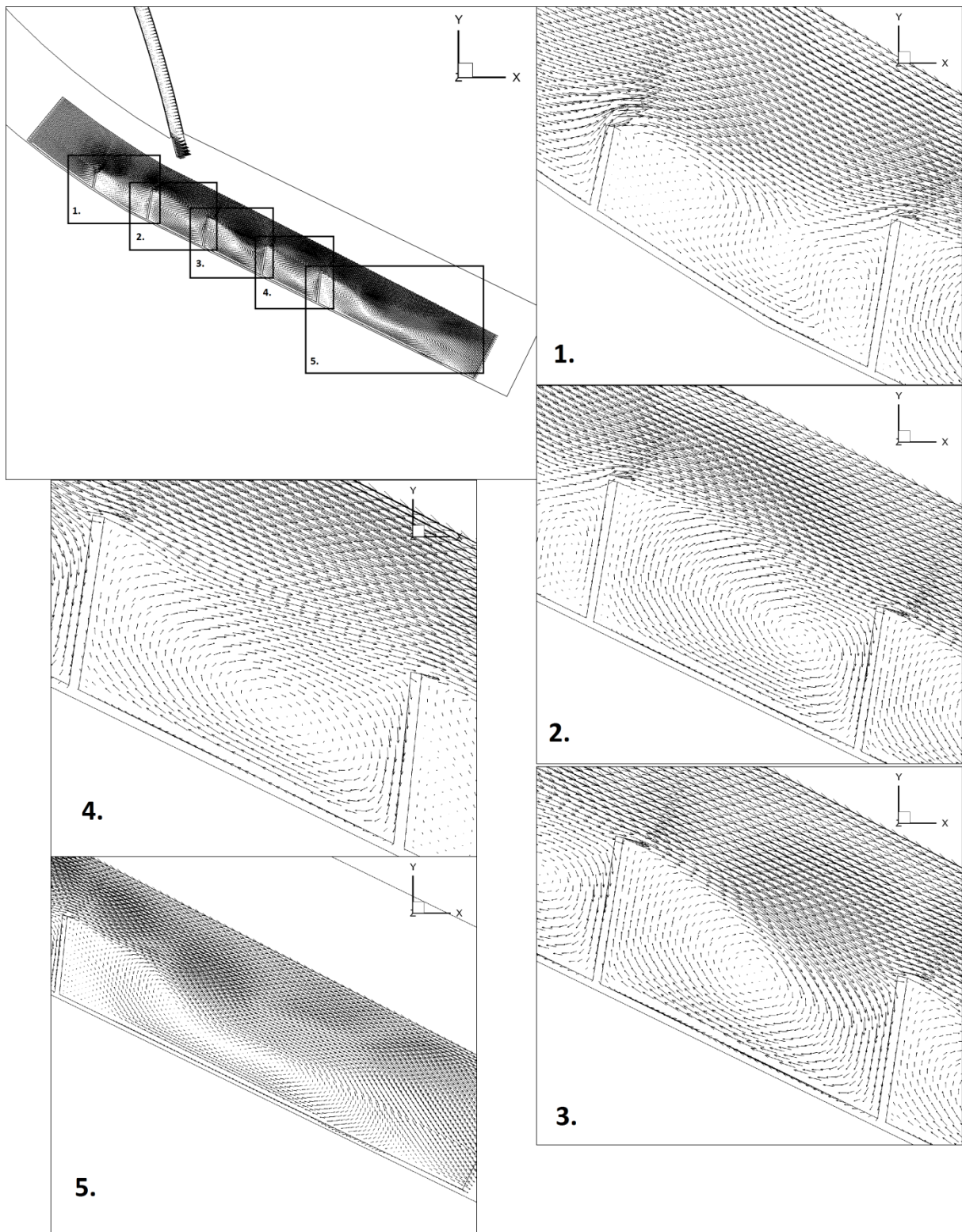
A finomabb rácsháló beépítése ebben a változatban tehát még nagyobb jelentőséggel bír, mint a korábbi változatokban, hiszen több műszaki beavatkozás történt, amelynek hatásának részletes elemzésére volt szükség. A számítási igény növekedése miatt azonban megfontolandó külön modellben beépíteni ezt a különbséget, hiszen a 4. sz. modellváltozat műtárgyi beépítései és a lenti terelőművek között igen nagy a távolság és a modelleredményeken is jól látható, hogy nem befolyásolják egymás hatásait.



25. ábra: 5.sz. modellváltozat, vízfelszín közeli sebesség eloszlása

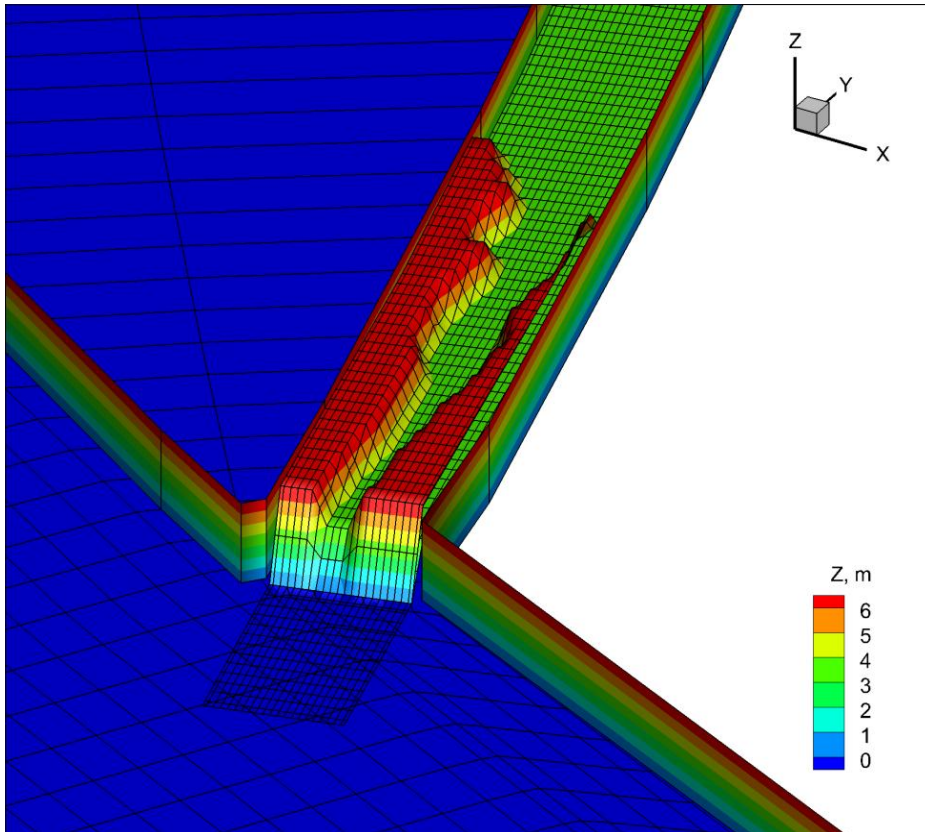


26. ábra: 5.sz. modellváltozat, vízfelszín közeli sebességvektorok eloszlása a sarkantyúk környékén



27. ábra: 5.sz. modellváltozat, vízfelszín közeli, ritkított sebességvektorok eloszlása

A 6. sz. modellváltozat a természetben sokszor tapasztalható, összetett mellékági mederviszonnyok áramlásra való hatásainak kiértékelését hivatott segíteni. A beágyazott rácsháló teljesen lefedi a mellékágat és a mellékági csatlakozások környezetét. Könnyű volt beépíteni a különféle műveket a mellékág teljes hosszán, köszönhetően a nagyfelbontású rácshálónak. A **28. ábra** azt mutatja, milyen részletességgel lehetett ezt megvalósítani. Ha összehasonlítjuk a mellette lévő durva rácshálóval, láthatjuk, hogy abban a felbontásban csak „pixelesen” tudtuk volna leírni pl. az ábrán látható szigetet, melyet a finom rácshálóval sikerült igen nagy részletességgel leképezni.

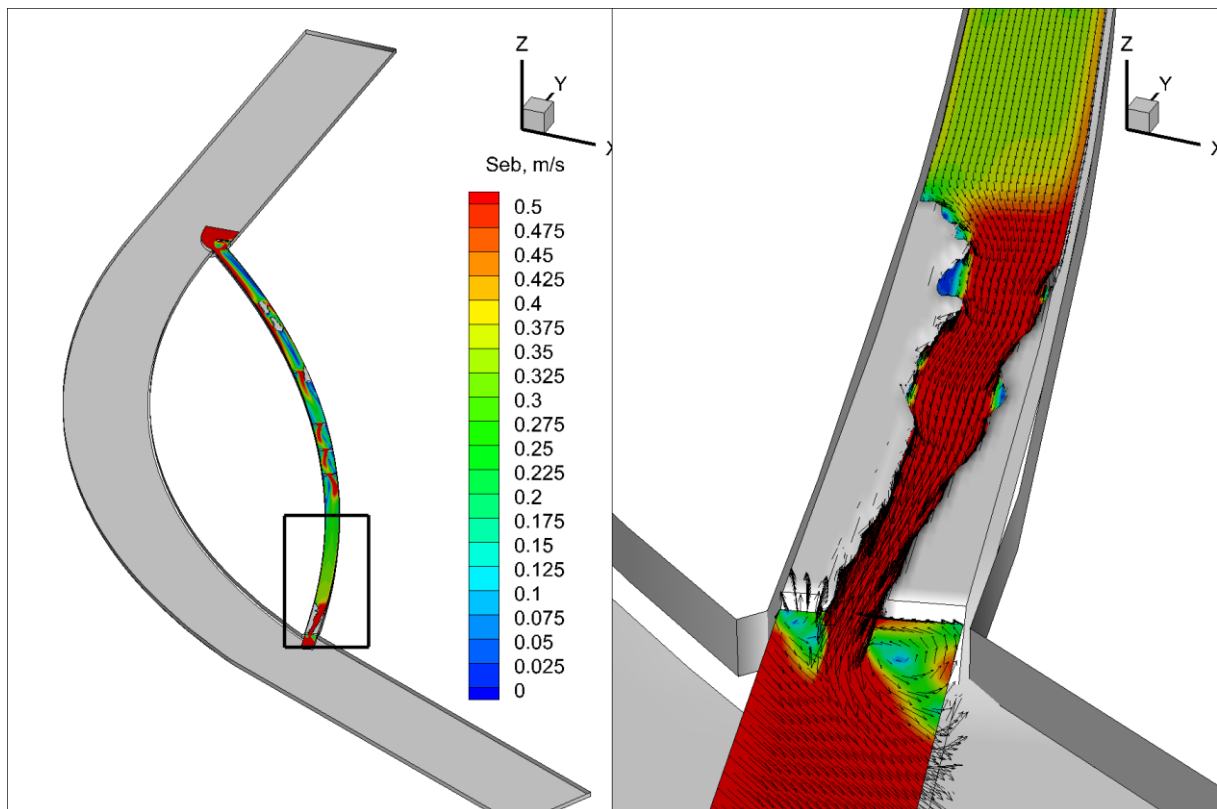


28. ábra: 6. sz. modellváltozat, rácshálófelbontás

Természetesen a finom rácsháló a számítási eredmények értékelésekor is nagy szerepet fog kapni. Már az előző változatoknál is megállapíthattuk, hogy minél összetettebb a meder felépítése (több terelőmű, műszaki beavatkozás, mederszűkület található rajta), annál hatékonyabb lesz a beágyazott rácsháló alkalmazása, hiszen segítségével a bonyolultabb áramlási viszonyok is pontosan leírhatók.

Ezt alátámasztja a **29. ábra**, amely a sebességek eloszlását mutatja az előző ábrán bemutatott alvízi mederszűkületben. A finom rácsháló részletes felbontásának segítségével pontosabb képet kaphatunk egyrészt a part mentén várható mederkimosódásokról és hordalék kiülepedésről, valamint arról, hogy hol és mekkora áramlási sebességek, visszaforgó áramlások fognak kialakulni, amikor a víz visszalép a főmederbe.

Részletes elemzést a hidrodinamikai viszonyokról a mellékág teljes hosszában a következő fejezetben fogok írni.



29. ábra: 6. sz. modellváltozat vízfelszín közeli sebességek eloszlása az alvízi mederszűkületben

A beágyazott rácsháló igen hasznosnak bizonyulhat a folyami beavatkozások vizsgálatakor. Nagy előnye, hogy igen részletesen le tudja írni az áramlási képen bekövetkező változásokat, ezért az eredményeink pontosabbak, az előrejelzéseink megbízhatóbbak lesznek. Ez különösen igaz a háromdimenziós szimulációk tekintetében, ahol az eltérő turbulencia tartalommal jellemezhető zónákat és a csavaráramlási struktúrákat is hűen szeretnénk visszakapni, valamint eleve térben részletesebb eredményekre van szükségünk.

Az egyszerűbb modelleknél (esetünkben 1. sz. modellváltozat) kielégítő lehet a durvább felbontású rácsháló is, ezeknél általában nincs is szükség az eredmények részletes felbontására. Minél bonyolultabbak azonban a fő-és mellékági kapcsolatok, valamint minél több műtárgy kerül beépítésre vagy a medergeometria mutat nagy komplexitást, annál nagyobb szükség lesz a részletesebb elemzésre, amit a beágyazott rácsháló tud szolgáltatni a kritikus területeken.

Megfigyelhetjük azonban, hogy a durva felbontású rácsháló számításai nem teljesen illeszkednek a finom rácsháló számításaira. Ez magyarázható egyrészt azzal, hogy a nagyfelbontású rácsháló részletesebb megoldást kínál, így a számításai is pontosabbak lesznek, másrészt azzal, hogy a beágyazott rácshálón kapott eredmények csak kismértékben befolyásolják a durva rácshálón számított változók értékeit. A finom rácsháló további kiterjesztésével megoldható lehet ez a probléma. Jelen esetben ugyanis csak a beavatkozások közvetlen közelébe került finomabb rácsháló beépítésre, pedig elnyúlhatna egészen addig, amíg a beavatkozások hatása érvényesül.

A továbbiakban a beágyazott rácsháló segítségével fogom részletesen kielemezni a különféle modellváltozatok eredményeit.

A különböző műszaki beavatkozások hatásainak vizsgálata

Az egyes modellváltozatok elsősorban abban különböznek egymástól, hogy eltérő műtárgyak kerültek beépítésre, melyek magától értetődően megváltoztatták a folyó áramlási viszonyait. A megváltozott áramlási viszonyok pedig nagyban befolyásolhatják pl. a mellékág ökológiáját, a hordalékvándorlást, a mederváltozásokat stb.

A háromdimenziós modellezés nagy előnye, hogy segítségével az áramlási turbulencia tartalma és a csavaráramlások is modellezhetőek. A turbulenciát a térben változó örvényviszkóziton keresztül írjuk le, amelyet az alkalmazott numerikus modell két skalár mennyiséggel modellezésével, a k turbulens kinetikai energiával és ϵ , turbulens kinetikai energia disszipációjával ad meg (lásd fent).

A fenék-csúsztatófeszültség, amely a mederfelszín és az áramló víz között kialakuló súrlódást jellemzi egy számszerű értékkel rámutat arra, hogy hol számíthatunk a szállított hordalék kiülepedésére, vagy éppen a mederanyag felkeveredésére. Az áramlási sebesség is adhat erre információt, de egyúttal arra is, hogy a mellékágban lesz-e megfelelő mennyiségű és sebességű víz a jó ökológiai állapot elérésére.

Mivel ezek a hidrodinamikai leíró paraméterek számos szempontból meghatározók (áramlási, morfológiai, ökológiai, stb.) a következőkben ezen változók térbeli eloszlásai alapján fogom bemutatni a különböző modellváltozatok, illetve beavatkozások hatását.

A számított sebességek vizsgálata

A **30. ábra** azt mutatja be, hogy hogyan változik a vízfelszín közeli sebességmező az egyes modellváltozatokban. Az 1. sz. változat az alap, semmiféle szintbeli vagy keresztirányú beavatkozást itt nem definiáltunk, ennek eredményeképpen a sebességeloszlás meglehetősen egyenletes. Az áramlási sebességek kismértékű megnövekedése tapasztalható a mellékág bejáratánál, a lokálisan beszűkülő jellege miatt, valamint megfigyelhető a mellékág visszacsatlakozása után a megemelkedő főági vízhozam hatására megnövekedő áramlási sebesség.

A 2. sz. változatban egy sarkantyút helyeztem el a mellékág bejáratának felvízi oldalán. Ezt a kialakítást pl. a Szabadság-zátony rehabilitációjánál alkalmazták, ezért érdekesnek találtam ennek vizsgálatát. A terelőmű képes a vizet részben a mellékág felé terelni, így biztosítva annak vízpótlását és a megfelelő áramlási sebességeket. Megfigyelhető, hogy az általam vizsgált csatornában ez a hatás nem érvényesül, sőt tulajdonképpen éppen az ellenkező hatást éri el, az érkező áramlást a főág felé tereli. Közvetlenül a sarkantyú alatt lelassul az áramlás, ezért itt várhatóan a műtárgy környezetében felgyorsult víz lerakja a hordalékát. Ez hozzájárul az áramlás további lassulásához és zátonyok kialakulásához, amely a szűkülő keresztmetszet miatt a túlpárti sebességnövekedéséhez vezethet.

A 3. sz. változatban egy bukót helyeztem el közvetlenül a mellékági csatlakozáshoz. Ez lehetővé teszi, hogy magasabb vízállások esetén be tudjon áramolni a víz a mellékágba is, az energiatörés miatt azonban a bukó mögött jelentős hordalék kiülepedés alakulhat ki. Az előző változattal összehasonlítva, amennyiben elég víz áramlik a főmederben is, valamivel gyorsabb a víz áramlása a mellékágban és a műtárgy közvetlen közelében, a főágban sem gyorsul fel annyira. A meder morfológiájának változása tehát vélhetően nem lesz jelentős.

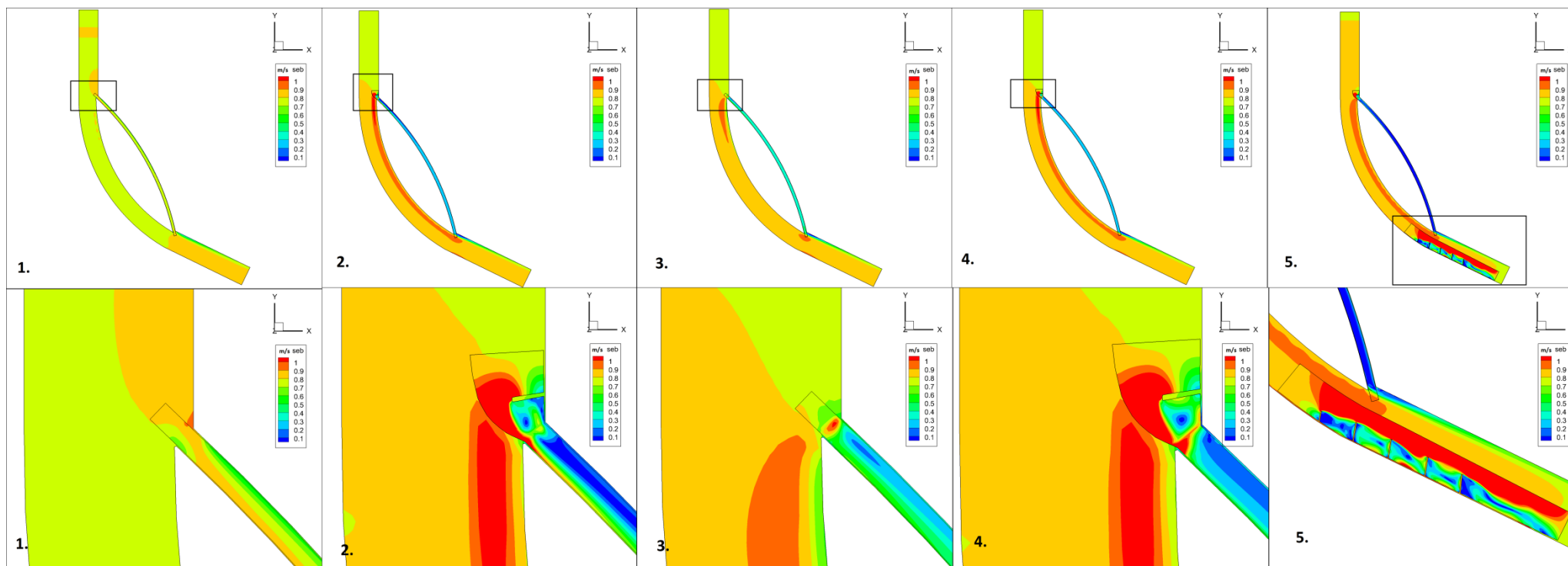
A 4. sz. változat a 2. és 3. sz. változat kombinációja, ezért egyesül a kétféle beavatkozás hatása. A terelőmű hatására a főágban, a bukó hatására pedig a mellékágban is megnőnek a sebességek a

beavatkozás nélküli állapothoz képest. A terelőmű mögötti visszaforgó áramlást pedig a bukó jelenléte még inkább felerősíti. Látható az is, hogy a bukó álvízi oldalán, tehát a mellékágban sokkal egyenletesebb az áramlás, mint a 2. sz. változatban, ahol csak a terelőmű került beépítésre, aminek az az oka, hogy az áramlás merőlegesen fog átbukni a küszöbön, vagyis már a mellékágba belépésnél egyenletesebb a kép.

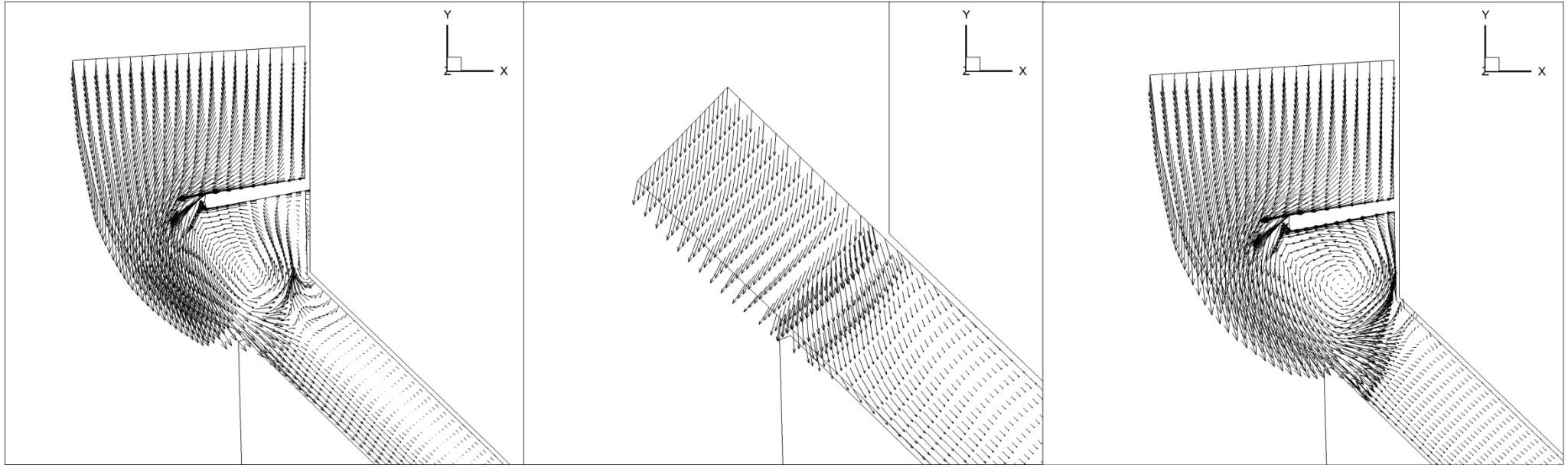
Az 5. sz. változat újítása az 5 db sarkantyú beépítése az alsó mellékági csatlakozás közelében a főág jobb partján. A jövőbeli, Duna-szakaszra kiterjedő vizsgálatoknál hasonlóképpen kerültek folyószabályozási művek beépítésre, ezért tartottam fontosnak ezt a modellváltozatot megvizsgálni. Jellemző a hasonló, valós folyószakaszok esetére az, hogy a sarkantyúk közötti zónákban lelassul az áramlás, míg a főág többi részén jelentősen megnő. Ezek, az általában hajózási célból létesített terelőművek elősegítik a jobb part feliszapolódását és a túloldal áramlási sebességének további növekedését eredményezik, aminek következményeképpen a meder mélyülése várható a hajózó útban, amennyiben a mederanyag erózióra hajlamos.

Könnyen belátható, hogy a legnagyobb változások a beavatkozások közvetlen környezetében fognak történni, azaz a fő-és mellékági csatlakozásnál. Ez volt a fő szempont a beágyazott rácsháló helyének meghatározásakor is. A sebességvektorokat ezért csak ezen a rövid szakaszon és a beágyazott rácshálón vizsgálom.

A **31. ábra** a 2. 3. és 4. sz. modellváltozat futtatási eredményeit mutatja: a sebességvektor mezőket felülnézetből. Jól látszik, hogy a kétféle beépítés hatásai a 4. sz. modellváltozatban hogyan erősítik fel egymást. Ez különösen a bukó környezetére igaz és a két műtárgy közötti területre, ahol igen jelentős csavaráramlás alakult ki, szélén nagy sebességű áramlatokkal. Az is megfigyelhető, hogyan erősödnek fel a terelőműnél az akadályba ütköző áramlások továbbá az is, hogy milyen irányba terelődnek el. Ezeken a szakaszokon medererózióval is számolhatunk.



30. ábra: Sebességeloszlások változása az egyes modellváltozatoknál



31. ábra: Vízfelszín közeli sebességvektor mező, 2.3. és 4.sz. modellváltozat esetén

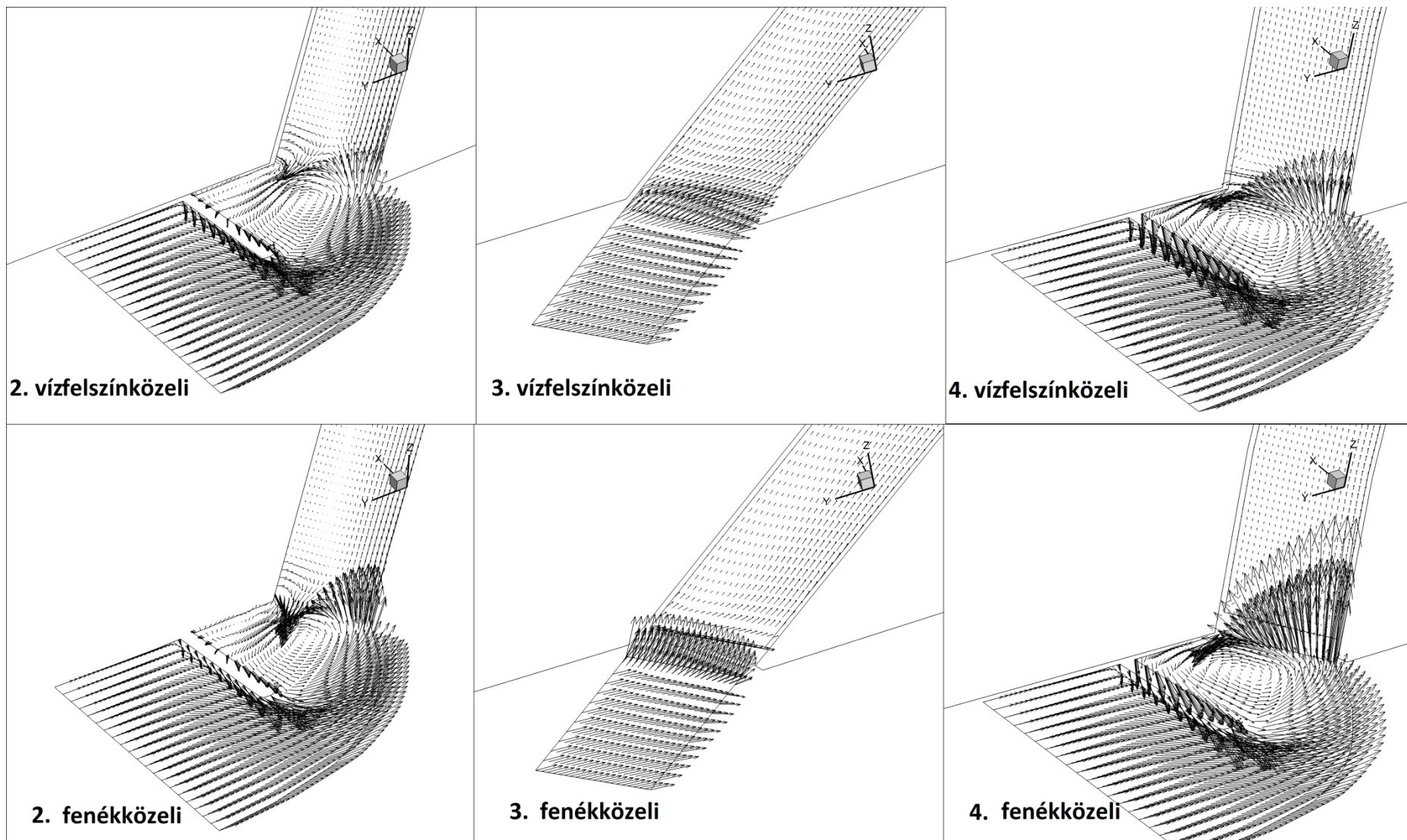
A **32. ábra** és **33. ábra** a sebességvektorok háromdimenziós eloszlását mutatja be. Jól látható, hogy a mederfenék közeli áramlás intenzívebb, mint a vízfelszín közelében, különösen a beépített művek környezetében. Az előző pontokban tett megállapításokat megerősítik ezek az ábrák. Kirajzolódik a terelőmű környéki áramlási viszonyok lokális megváltozása, valamint a bukó előtt a magassági értelemben leszűkülő átáramlási keresztmetszet hatása a mellékágba való belépéskor. A legmarkánsabb változások értelemszerűen a 4. sz. változat esetén lesznek, hiszen a két műtárgy áramlásra való együttes hatása fog ebben az esetben érvényesülni. A mederkimélyülés és medererózió is valószínűleg hatványozottabban fog jelentkezni.

A **33. ábrán** az egyes változatok, a jelölt függőleges síkra vetített vektorait láthatjuk oldalnézetben. A 2. és 4. modellváltozat esetén a kialakuló visszaforgó áramlási struktúrák miatt a műtárgyaknál és a hirtelen megváltozó magassági viszonyok környékén a vektorok hosszúak, vagyis lokálisan felgyorsuló áramlást jeleznek. A bukónál azonban az áramlás inkább felfele, a terelőműnél és a megemelkedett mederfenéknél pedig lefele irányul, ami a visszaforgó áramlás erős térbeliségét igazolja. A megnövekedett mozgási energia tartalmú áramlás miatt ezeken a helyeken erózióra számíthatunk.

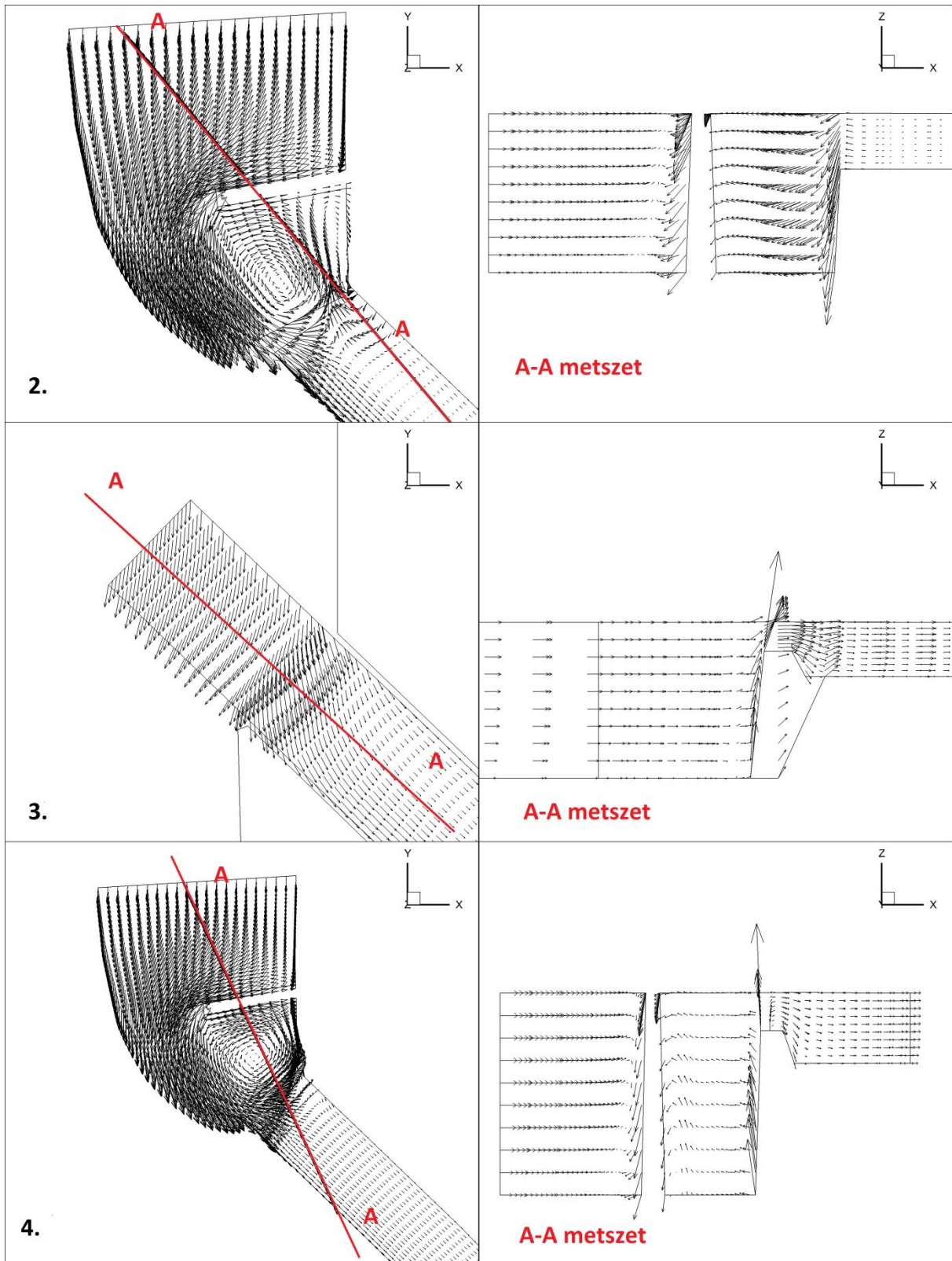
A mellékág ökológiai viszonyainak szempontjából az áramlási sebességek alapján a bukó beépítése okozza a legkevesebb változást az áramlás irányában és sebességében, ugyanakkor kellő sebességet és vízmennyiséget biztosít ahhoz magasabb vízállások esetén, hogy a jó ökológiai viszonyok fenntarthatóak legyenek.

A **34. ábra** az 5. sz. modellváltozat többi változattól eltérő műszaki beavatkozásainak hatását jeleníti meg. A sűrűbb, sötétebb szakaszokon hosszabb és több vektort látunk, ezeken a helyeken az áramlás jelentősen felgyorsul. Leginkább a sarkantyúk orra és a főágban áramló víz találkozásánál fordul ez elő. A sarkantyúk közötti területen, ahová a víz nehezebben áramlik be, a sebesség is csökkenni fog. Ezeken a helyeken fogja lerakni hordalékát a sarkantyú élén felgyorsult, majd két sarkantyú között lelassuló áramlás, tehát itt komoly hordalék kiülepedésre számíthatunk, amely csak még inkább fokozza a főág többi részén az áramlási sebességeket.

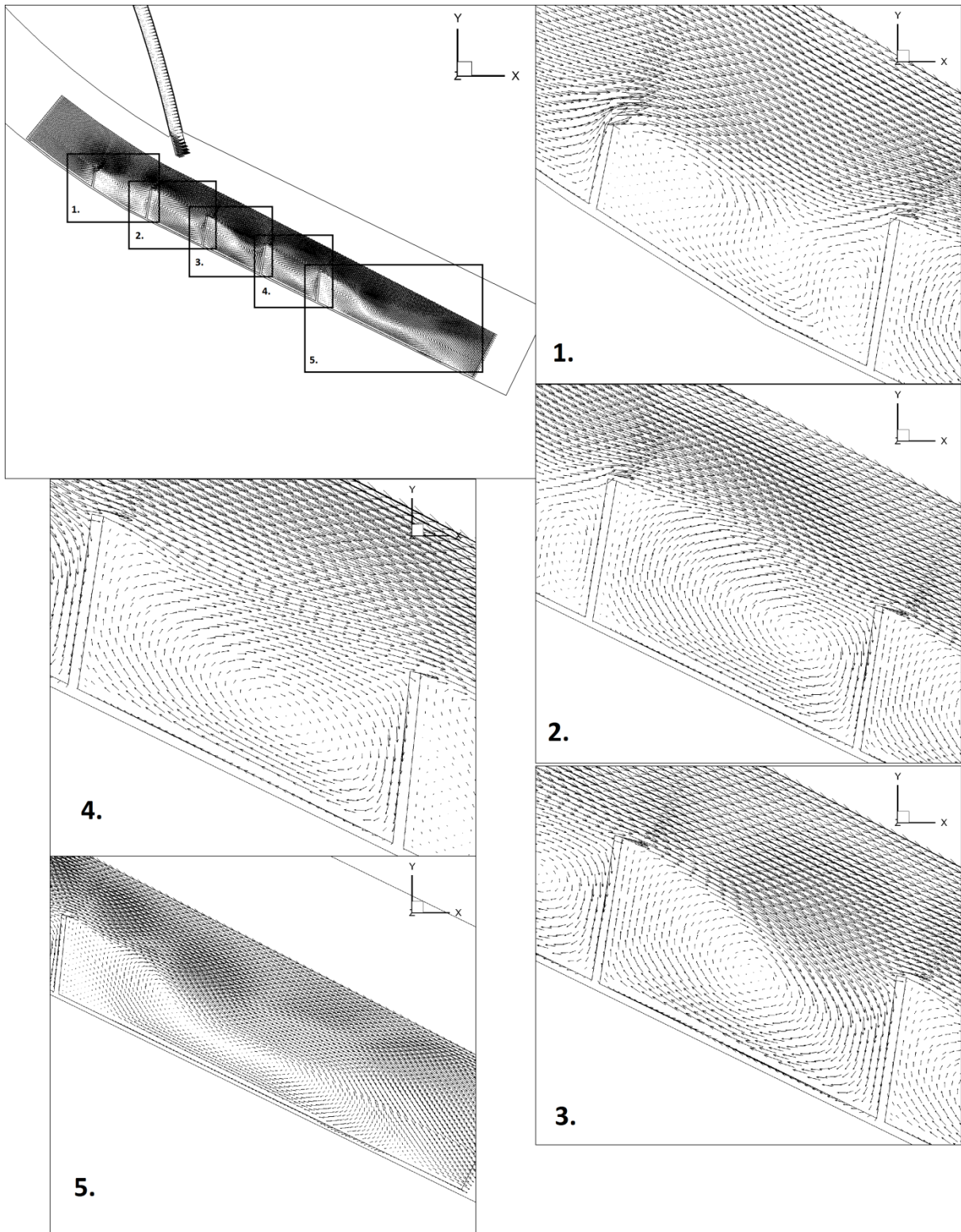
A 6. sz. modellváltozat eredményeit a későbbiekben fogom részletezni, mert abban a változatban a mellékági beavatkozások és mederszűkületek hatásait szeretném elemezni. Az előzőek változatoktól eltérő módon a mellékágra egy természet közeli, változatos medergeometriát hoztam létre, hogy a jövőbeli, valós vizsgálatokat még jobban megalapozzam.



32. ábra: A vízfelszín-és mederfenékközeli sebességvektorok, 3.4. és 5.sz. modellváltozat, folyásirány felé nézve



33. ábra: 2. 3. és 4.sz. modellváltozat, sebességvektorok oldalnézetből



34. ábra: Az 5sz. modellváltozat, a beépített sarkantyúk által gerjesztett áramlásmező

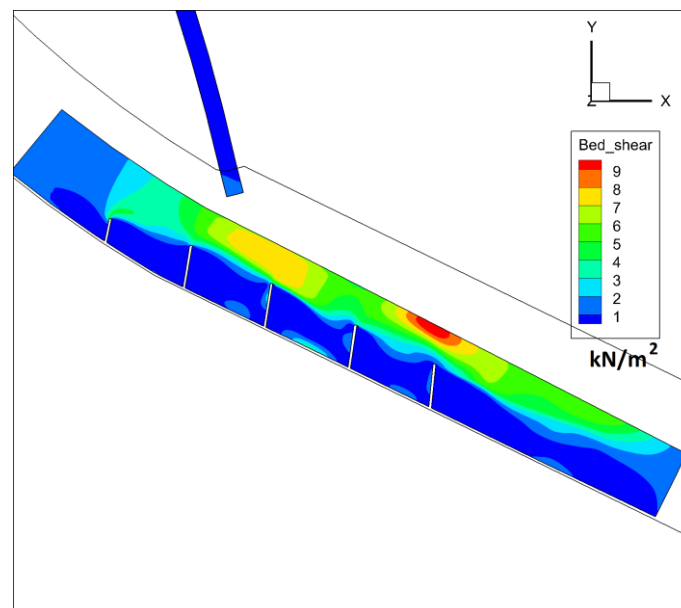
A fenék-csúsztatófeszültségek vizsgálata

A turbulencia egyik fő forrása a mederfenék mint szilárd felület és a víz között kialakuló súrlódás, amit a fenék-csúsztatófeszültségen keresztül tudunk számszerűsíteni. Ez a jellemző alapvetően determinálja a mederfenék közelében lejátszódó hordalékvándorlási viszonyokat, vagyis a szállított hordalék kiülepedését vagy a mederanyag felkeveredését. A hordaléktranszport folyamatok beágyazott rácshálóval való leírása lehetővé teszi, hogy a művek környezetében és a mellékágban pontosabban és részletesebben számítsuk a medermorfológiai változásokat.

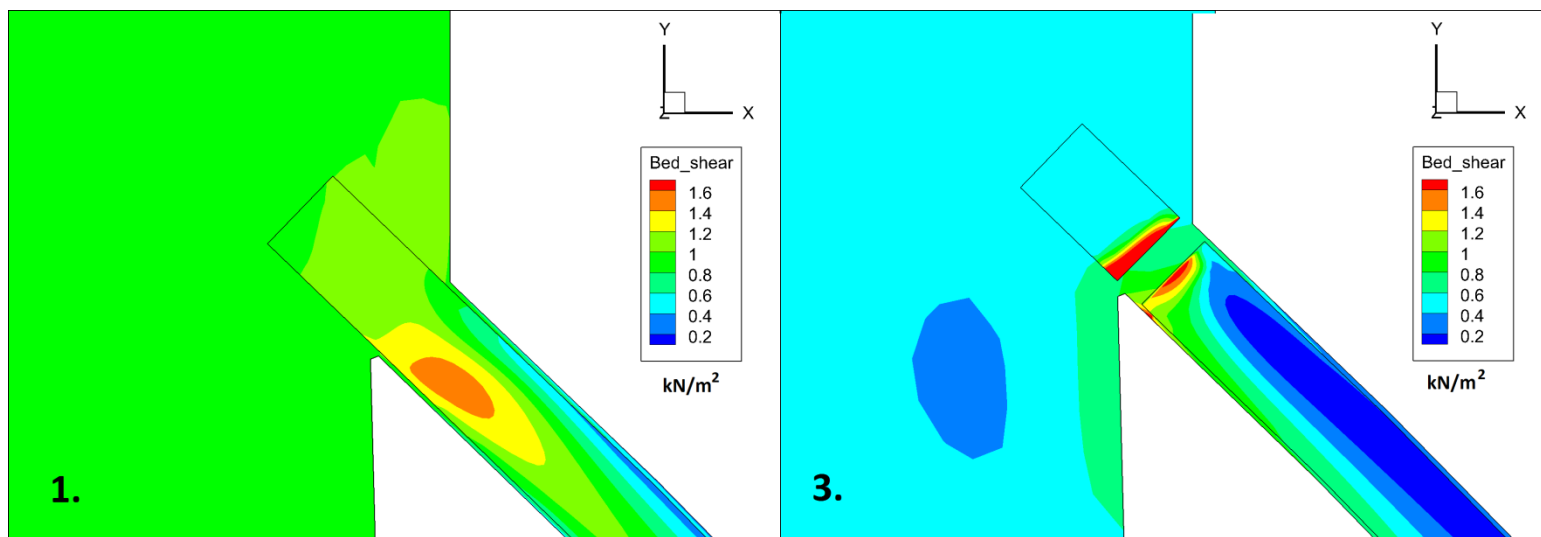
A **35. ábra** összehasonlítva a **34. ábrával** arra a megállapításra juthatunk, hogy a fenékcsúsztató feszültségnek ott lesz nagyobb az értéke, ahol maga az áramlás is nagyobb, hiszen az egységnyi felületre ható erő itt lesz a legnagyobb. Ezeken a helyeken a medererózió is jelentősebb. A sarkantyúk közötti területen azonban, ahol alacsonyabb az áramlási sebesség és a fenék-csúsztatófeszültség nagysága is, hordalék kiülepedésre számíthatunk.

A **36. ábra** az 1.2. és 4. sz. modellváltozatot hasonlítja össze a fenék-csúsztatófeszültség területi eloszlása alapján. Érdekes megfigyelni, hogy az 1. sz. változatban, ahol az áramlás szinte akadálytalan, nagyobbak a fenékcsúsztató feszültség értékek, mint a megemelt mellékági mederfenék esetén. Természetesen a bukó környezetében lesz a legnagyobb a medersúrlódás, hiszen itt keletkezik a legnagyobb energiatorés. A bukó környékén erodálódott mederanyagot pedig az alacsonyabb sebességű áramlás valószínűleg a mellékág bal partján fogja lerakni, ahol kisebb a fenékcsúsztató feszültség.

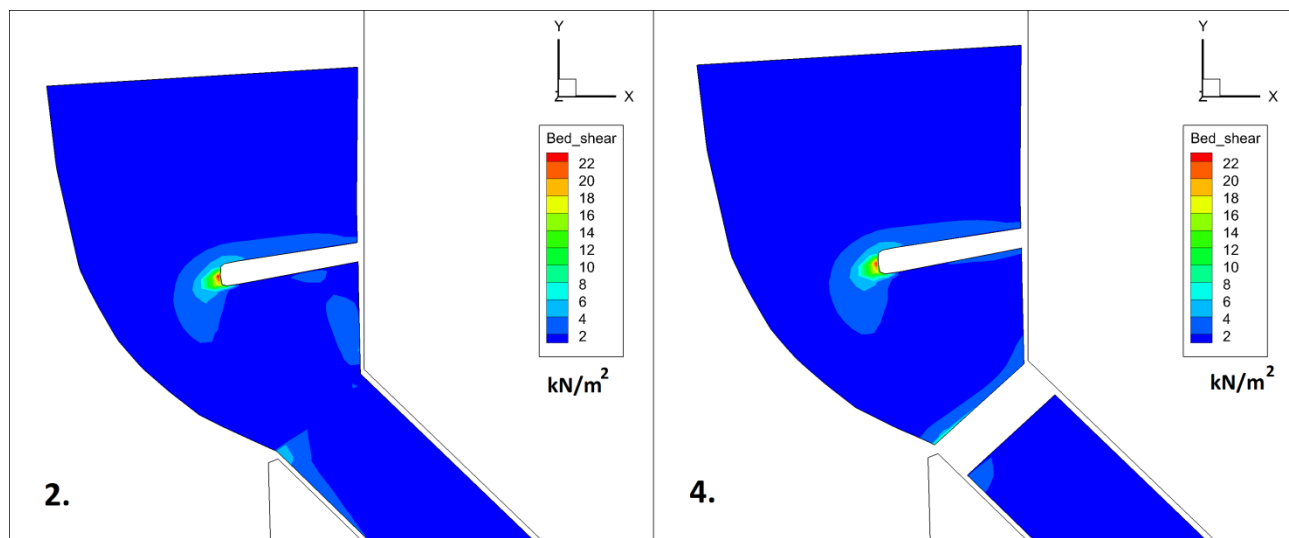
Könnyen belátható, hogy a 2. és 4. modellváltozat, azaz a terelőművek beépítése esetén nagyobb mértékű fenékcsúsztató feszültségekre számíthatunk, hiszen a mű környezetében nagyon intenzívvé váló áramlás ezt eredményezi. Ebben a zónában tehát jelentős mértékű mederkimosódásra számíthatunk. A bukóval ellátott modellváltozatban a nagyobb csúsztatófeszültség értékek a bukó környékén jelennek meg, melyek közel akkorák, mint a 3. sz. változatban. A 2. sz. változatban pedig inkább a belső ívben koncentrálódik, hasonlóan az 1. sz. változathoz.



35. ábra: A fenékcsúsztató feszültségek eloszlása a 6. sz. modellváltozat esetén



36. ábra: A fenéksúsztatató feszültség eloszlása az 1. és 3..sz modellváltozatban



37. ábra: A fenéksúsztatató feszültség eloszlása a 2. és 4. sz. modellváltozatban

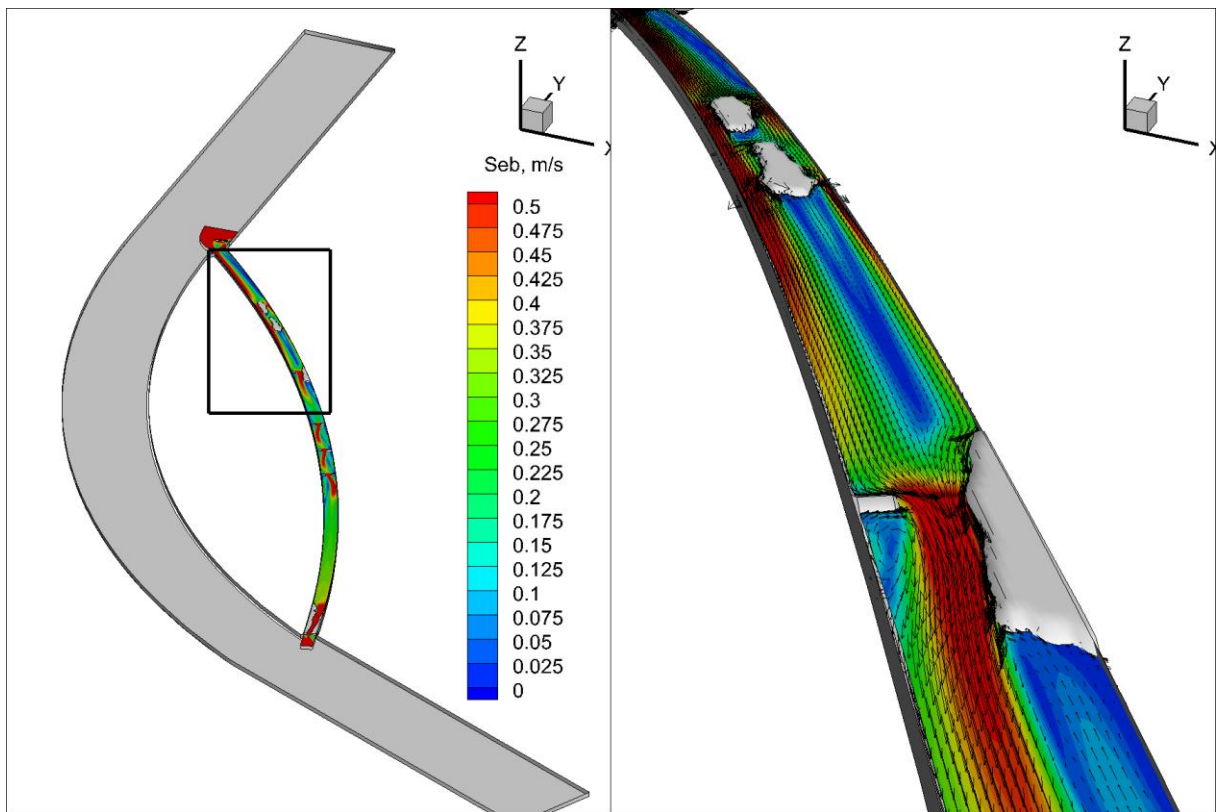
A valós mederviszonyokat reprezentáló modellváltozat kiértékelése

A 6. sz. modellváltozatban egymást érik a mellékágban az olyan művek, melyek lokálisan ugyan, de nagymértékben befolyásolhatják az áramlási viszonyokat. Az ilyen, a főág méretéhez képest sokkal kisebb térléptékű „áramlási akadályok” hatásának elemzéséhez nagyban hozzájárul az áramlási struktúra beágyazott rácshálósval való számítása, melynek segítségével nemcsak a medergeometria felépítése válik egyszerűbbé, hanem a számítási eredmények részlet gazdag megjelenítése is.

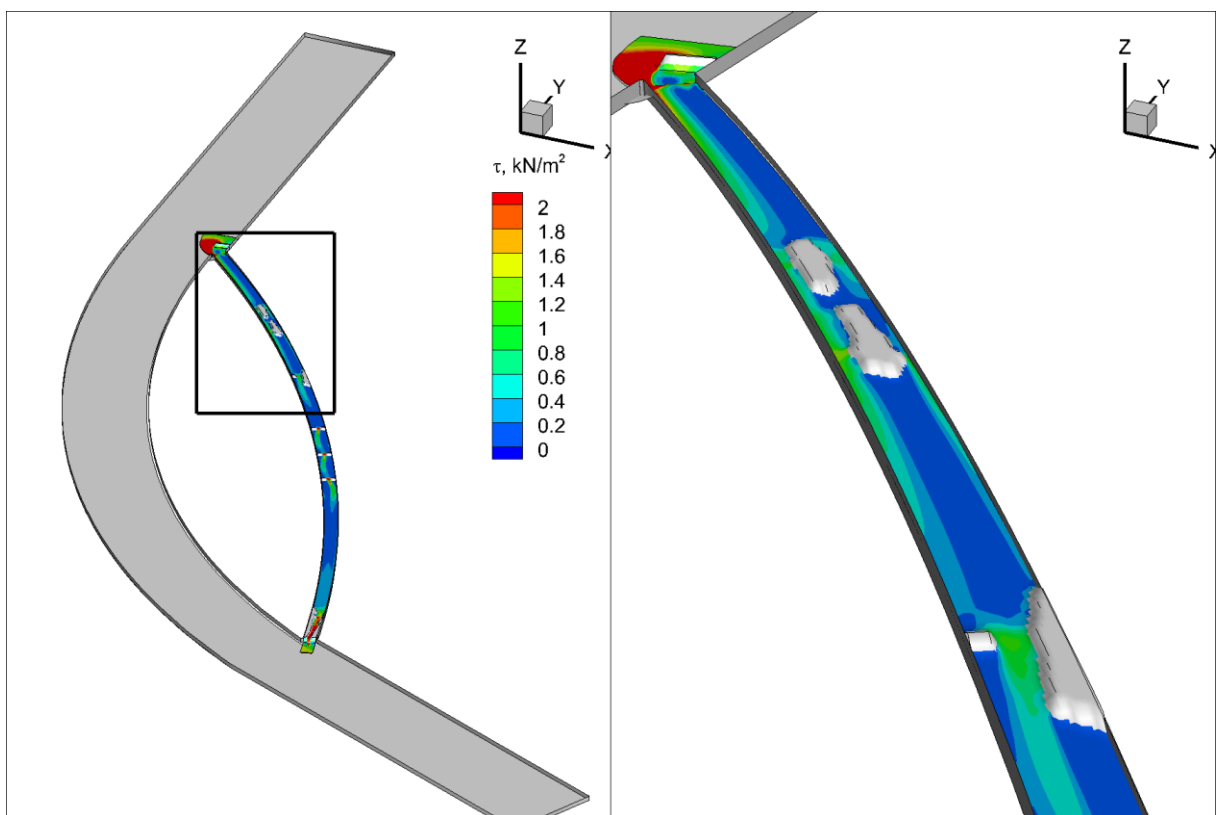
A **38. ábra** a szigetek közötti sebességviszonyokat mutatja be. Jól kivehető, hogy a megváltozott mederszelvény hatására hogyan gyorsul és lassul helyenként az áramlás, vagyis összességében igen komplex képet mutat. Természetesen közvetlenül a szigetek szelvényében, ahol a meder szűkül, a sebességek nőni fognak, a szigetek alatt pedig, ahol a mederszelvény ismét kibővül, a sebesség lassul. A vektorok irányából, sűrűségéből és hosszából arra lehet következtetni, hogy a szigetek szélén erózió alakulhat ki. A sarkantyú és sziget együttes jelenlétekor pedig a művek alatt közvetlenül visszaforgó áramlások jönnek létre, melyek szintén előrejelzik a lokális hordalék lerakódást.

A **39. ábra** mutatja be a fenék-csúsztatófeszültségek eloszlását ugyanezen a szakaszon. Megerősítve azt, hogy csakugyan ott fog nagyobb fenék-csúsztatófeszültség kialakulni, ahol az áramlás is intenzívebbé válik, így a víz hordalék elragadó ereje is.

A két felső szakaszon lévő sziget valószínűleg, a köztük kialakuló áramlási holtteréből adódóan a későbbiekben egyesülni fog, áramvonalasan keskenyedni, valamint hosszabbodni is. A partvonal mentén is, a belső íven, erózió alakulhat ki. Az alsó szakaszon lévő sarkantyú kis szigetté, a túlparti nagyobb sziget pedig keskenyebbé és hosszabbá fog válni. A szigetek ronthatják az árvízi levezetőképességet, környezetükben elmocсарasodhat a mederszakasz, az áramlás erodáló hatása miatt pedig további medermélyülésekre számíthatunk, mely veszélyezteti a vízutánpótlást és az esetleges vízbázisokat.



38. ábra: 6.sz. modellváltozat, sebességek eloszlása a szigetek környékén

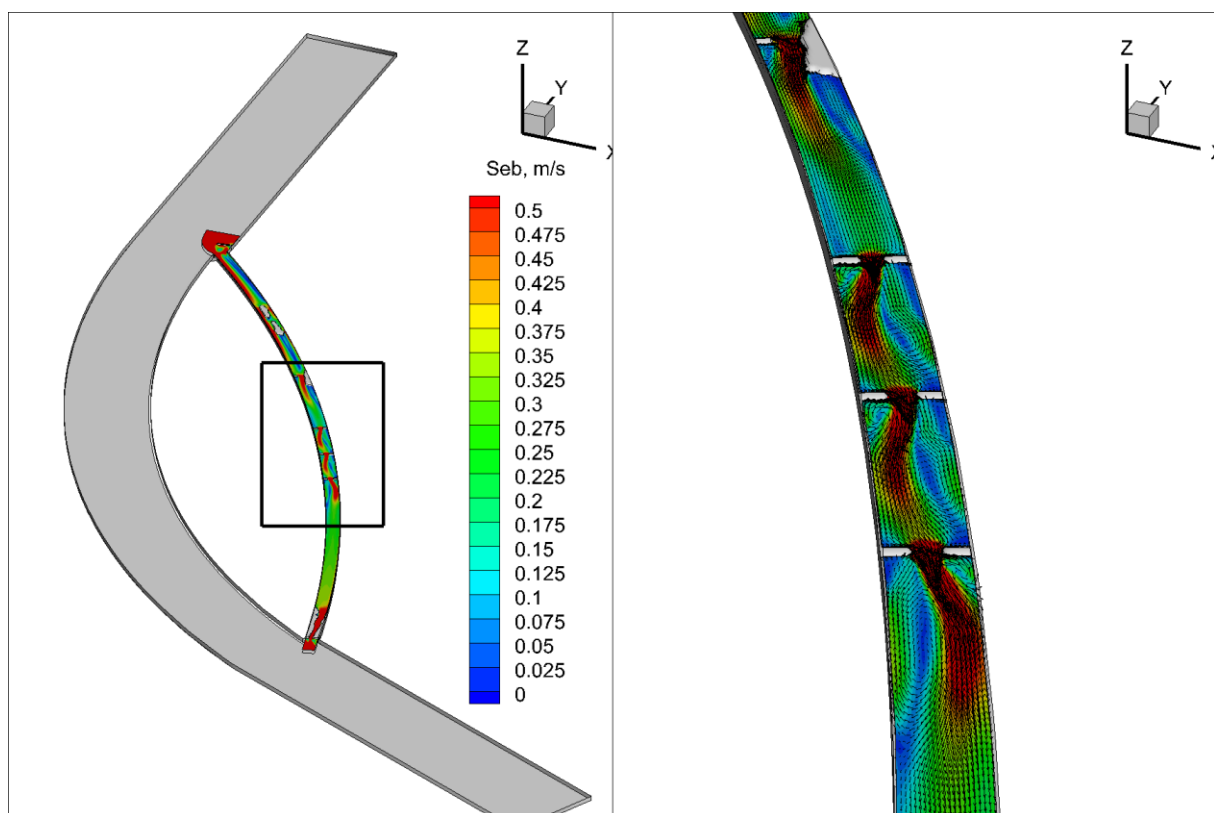


39. ábra: 6. sz. modellváltozat, csúsztatófeszültségek alakulása a szigetek környékén

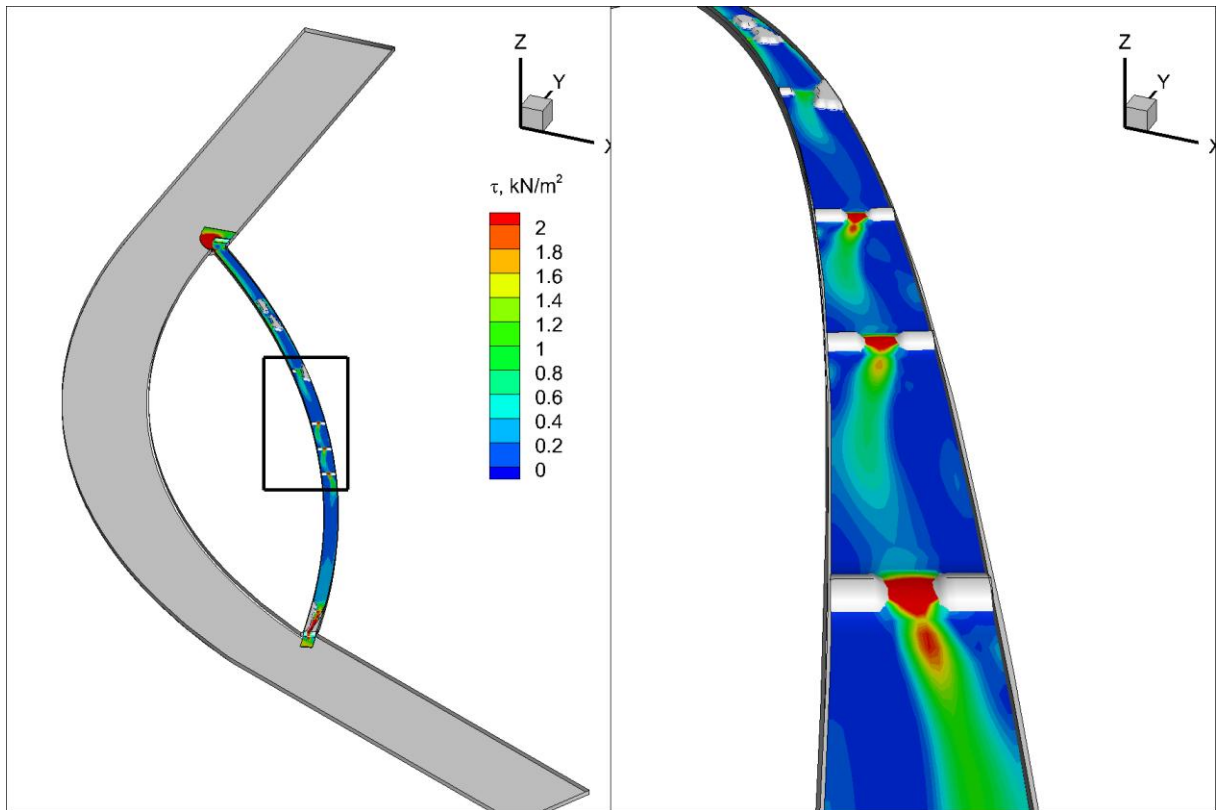
A mellékág középső szakaszán három keresztgát került beépítésre, melyeket középen elvágtam, hogy a víz szabadabban tudjon áramolni. Ilyen műre találunk példát a Solti-mellékágban is, de ez elmúlt években hasonló beavatkozást tettek a Gönyői-mellékágban is.

A **40. ábra** mutatja be a keresztgátak közötti sebességeloszlást. Jól megfigyelhető, hogyan gyorsul fel a sebesség a mederszűkületek hatására és milyen visszaáramló zónákat hoz létre a művek közötti „medencékben”. Egészen hasonló viselkedés fedezhető itt fel, mint a mesterségesen létrehozott medencesoros hallépcsőkben (Sokoray et al., 2007). A **41. ábrán** láthatjuk, hogy a legnagyobb fenékcúsztatófeszültség értékek közvetlenül a keresztgát nyílásában fognak keletkezni, tehát elsősorban ezen a területen érvényesülne a medererózió. A hasonló keresztgátak kialakításával éppen azt célozzák meg, hogy kisvízes állapotokban se legyen annyira alacsony az áramlási sebesség, hogy jelentős feliszapolódások alakulnának ki. Ezt a funkciót jól igazolja az itt bemutatott modelleredmény. (Sokoray-Varga, Baranya, Józsa, 2007)

Mivel jelenleg ívben helyezkednek el ezek a művek, ezért a sebességeloszlás is az ív vonalát fogja követni. A felső kettő keresztgátnál inkább a belső, a legalsónál pedig a külső ívben lesznek nagyobbak a sebességek. Ezeken a területeken mederkimélyülésre, a másik parton pedig hordaléklerakódásra számíthatunk. Ez a jelenség tovább fogja szűkíteni a meder szélességét, amely fokozza az áramlási sebességet és a medereróziót, a meder kimélyülését. Az aggasztó hatások ismét a mederszint csökkenése és a feliszapolódás együttes jelenléte lesznek, bár fontosnak tartom megjegyezni, hogy nagyvízkor ezeken a műveken átbukik a víz és az áramlás nagy impulzusa a lerakódott finom hordalék felkeveredését eredményezheti.



40. ábra: 6. sz. modellváltozat, keresztgátak környezetében lévő sebességeloszlás



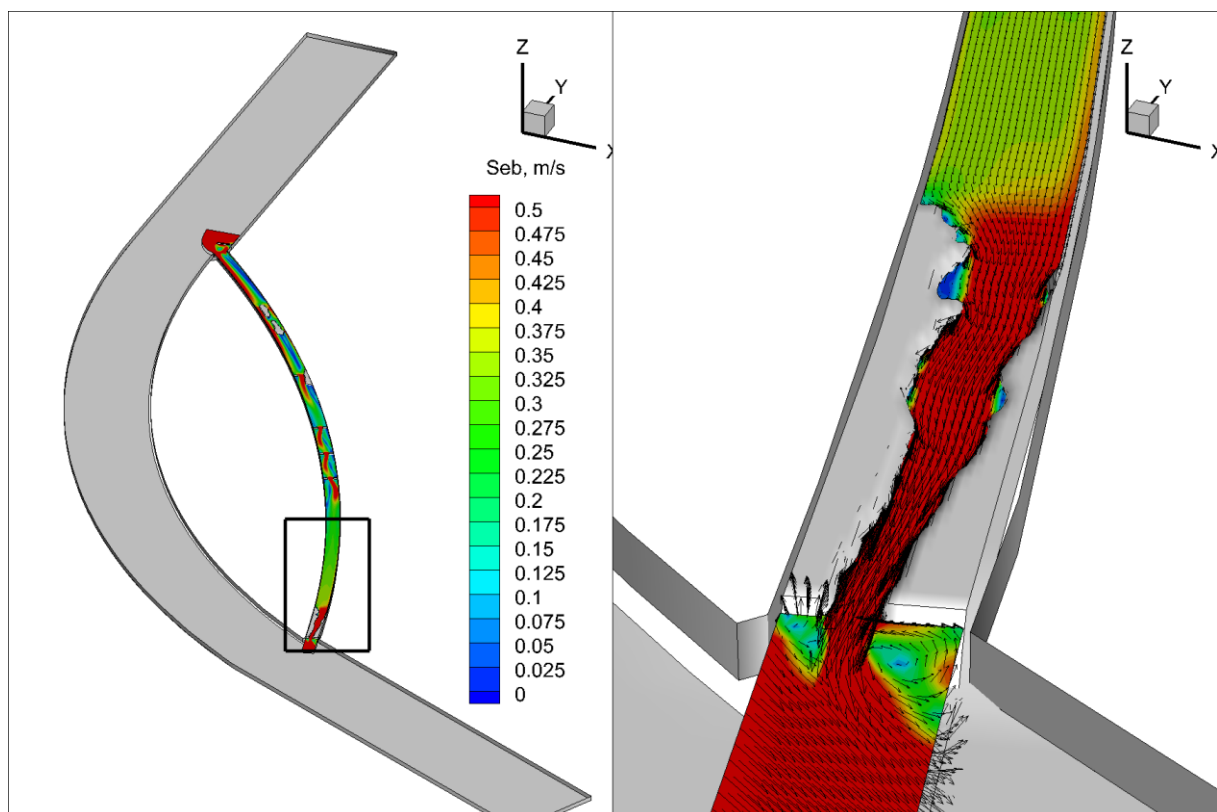
41. ábra: 6.sz. modellváltozat, keresztgátak környezetében keletkező csúsztatófeszültségek

A Solti-mellékág a felső és alsó szakaszokon is egy csatornaszerű mederszűkülettel csatlakozik a Duna medréhez. A 6. sz. változatban ennek egy sematizált változatának a hidrodinamikai hatását is meg szerettem volna vizsgálni azzal, hogy beépítettem egy, a Solti-mellékághoz hasonló mederszűkületet a mellékág alsó szakaszára.

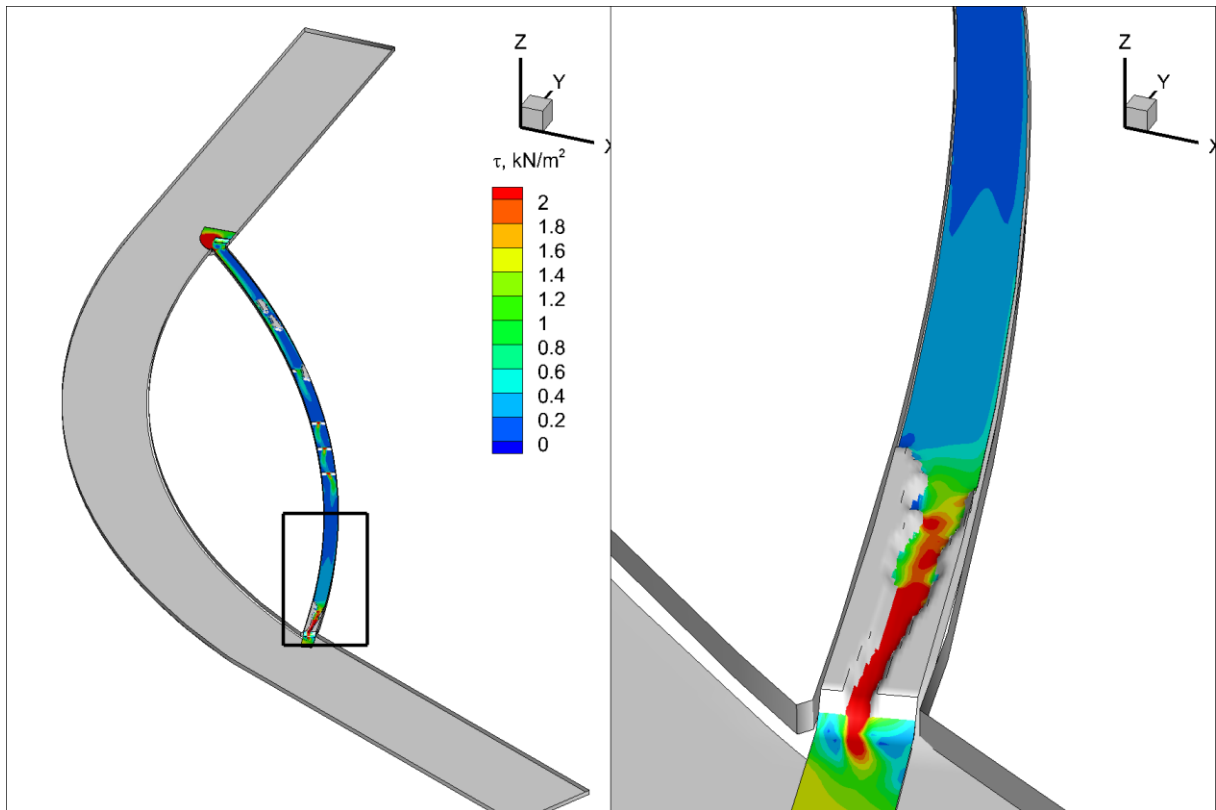
A **42. ábra** mutatja be, hogy milyen hatással volt ez a csatornaszerű mederszűkület a sebességek eloszlására. Természetesen jelentősen felgyorsul az áramlás a hirtelen szelvényváltozás hatására. Látható, hogy a partvonalak mentén hogyan sűrűsödnek és hosszabbodnak meg a sebességvektorok, így azt feltételezhetjük, hogy az áramlás ezeken a helyeken eróziót vált ki, míg azokon a területeken, ahová a víz nehezebben tud beáramolni, lelassul az áramlás és le fogja rakni hordalékát. Megjegyzendő, hogy a mellékág alsó végén kialakuló feliszapolódás vélhetően a főág nagyvízi állapotával is szoros kapcsolatban áll, amikor az alvízi irányból visszaható áramlás az ilyenkor jellemző nagymennyiségű hordalék bejutását okozhatja, ami a lokális kis sebességek miatt lerakódik.

Ezeket a megállapításokat megerősíti a **43. ábra** is, melyen a fenék-csúsztatófeszültségek eloszlását láthatjuk. Magától értetődően a feszültségek értékei ott lesznek a legnagyobbak, ahol a legnagyobb a szűkület. Érdekes, hogy nem a partfal mentén, inkább középen jelentkeznek ezek az értékek, ezért itt számíthatunk a legjelentősebb medererózióra.

A sebességvektorokat szemlélve láthatjuk, hogy ahol az áramlás belép a főmederbe, a mederszűkület mellett a mederszint süllyedése is szerepet játszik a hidrodinamikai viszonyok alakulásában. A szigetek alatt a keresztgátak alvízi oldalához hasonlóan leváló áramlások fognak kialakulni, melyek kisebb sebességűek, ezért a szűkületben erodálódott hordalék itt is kiüledésre hajlamos. Ezt a fenék-csúsztatófeszültségek értékei is megerősítik.



42. ábra: 6.sz. modellváltozat, az alsó szakaszon lévő mederszűkület környezetében lévő felszín közeli sebességeloszlás



43. ábra: 6.sz. modellváltozat, az alsó szakaszon lévő mederszűkület hatása a csúszatófeszültségek értékére

6. Hordalékmodell alkalmazása a beágyazott rácshálón

Az áramlási sebességek és fenék-csúsztatófeszültségek tanulmányozása jó kiindulópontot adhat a medermorfológiai változások előrejelzésére, de ha megbízhatóbb eredményekre van szükségünk, akkor szükségessé válhat az áramlási modell összekapcsolása egy hordaléktranszport modellel, ami képes a hordalékviszonyok megváltozása alapján a mederfelület megváltozásának számítására.

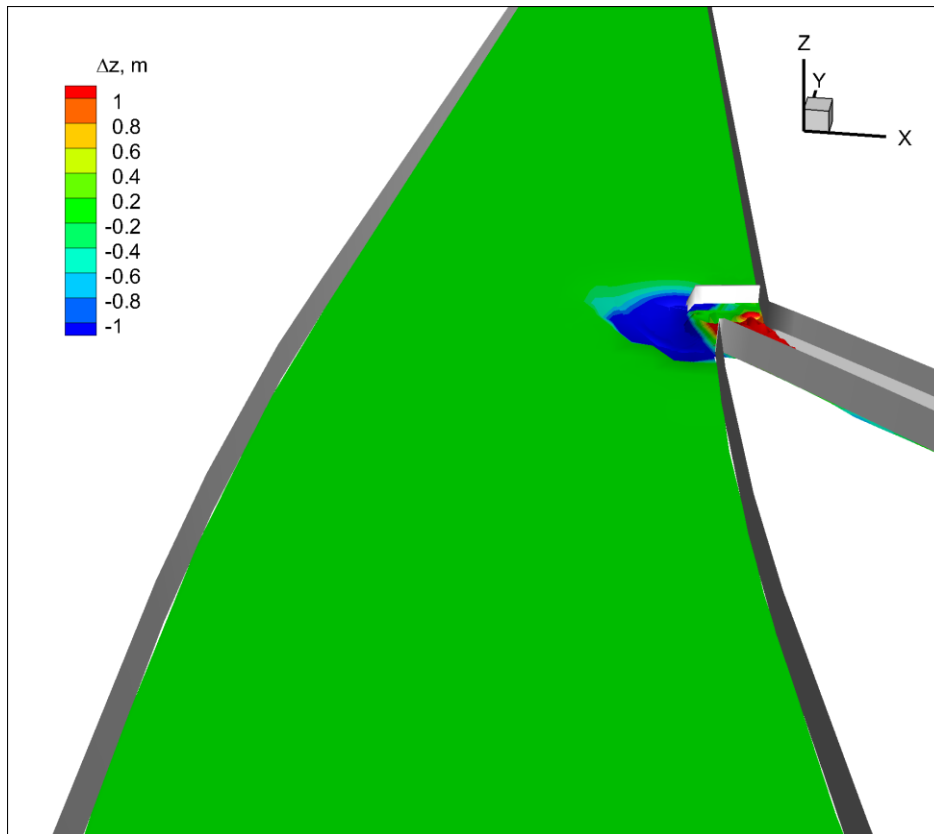
Az ilyen, ún. morfodinamikai modelleknek a futtatása nagyobb számítási igényű, ezért a modellváltozatok száma egy-egy vizsgálat készítésekor erősen korlátozott. Mivel az általam alkalmazott numerikus eszköz alkalmas a lebegtetett és görgetett hordalékmozgás okozta morfológiai változások számítására (a hordalékmodell részletes leírását pl. Olsen (2010) közli) egy változat erejéig teszteltem a beágyazott rácsháló leírást erre a modellre is. A vizsgálatra az 5. sz. modellváltozatot választottam ki és ezekre a geometriai viszonyokra futtattam a hordalékmodellt. Ennél a változatnál már az áramlási modell futtatása is relatíve hosszú időt vett igénybe (kb. 5 óra), ezért számolni lehetett azzal, hogy a hordalékmodell futtatásánál az időigény hatványozottan fog jelentkezni.

Ebben a modellváltozatban, a lehető legegyszerűbb hordalékviszonyokat feltételezve egy frakciójú, $d = 1$ mm szemátmérőjű mederanyagot definiáltam a teljes vizsgálati tartományon, és szintén az egyszerűsítés miatt a felvízi peremen beáramló hordalékot nem adtam meg, vagyis tiszta víz érkezett a vizsgált szakaszra. A morfodinamikai modell alkalmazásával egy két hetes időszakra végeztem el a szimulációt. A **44. ábra** a felső mellékági csatlakozás, a **45. ábra** pedig az alsó csatlakozás, sarkantyúk környéki mederváltozásait mutatja be.

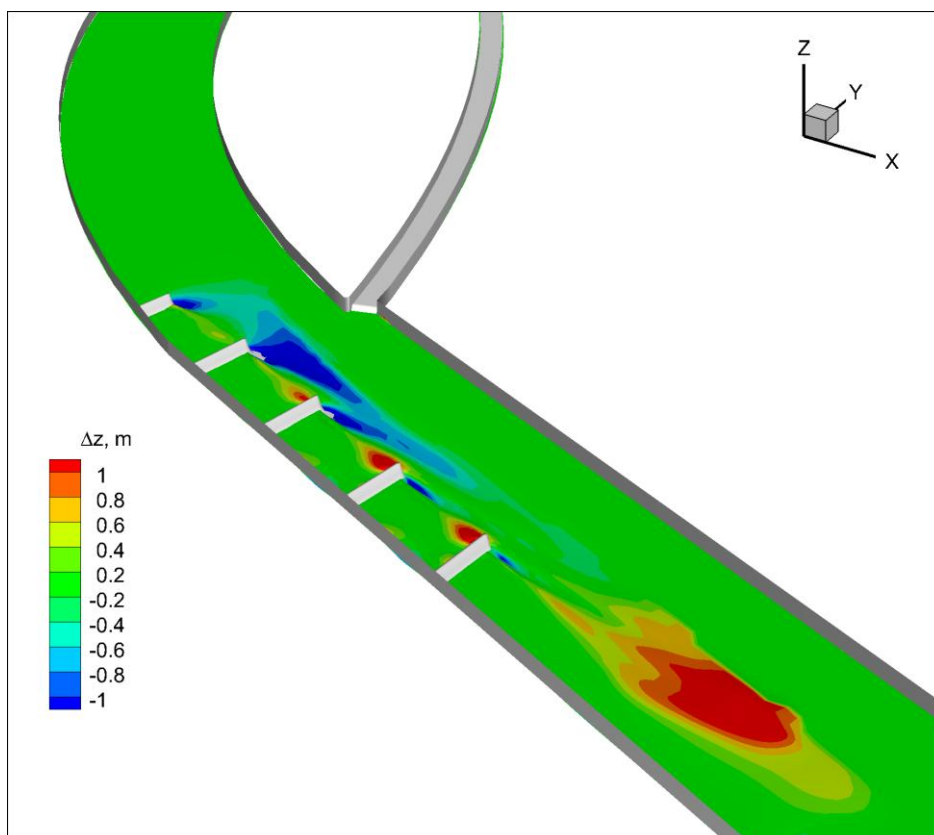
A morfodinamikai modell eredményei alátámasztják a korábbi megállapításainkat, miszerint főként a mőtárgyak közvetlen környezetében számíthatunk a meder fejlődésére. A fenti terelóműnél megnövekedett áramlási sebességek hatására legalább 1 méteres helyi kimélyülésre számíthatunk, közvetlenül a mőtárgy mögött és a bukó környékén pedig feliszapolódásra.

A sarkantyúk környezetében a nedvesített keresztmetszet beszűkülésének hatására az áramlás felgyorsul, hordalékszállítási és eróziós képessége megnő, majd az elragadott hordalék egy részét a sarkantyúk közötti zónákban rakja le, ahol az csapdázódásra hajlamos. A mederanyagból felkevert hordalék fennmaradó részét pedig a sarkantyúsor alvízi oldalán rakja le az áramlás, ahol a hirtelen megnövekedett mederszélesség hatására az áramlási sebességek lecsökkennek és a hordalékszállítási képessége mérséklődik.

Ismét megfigyelhető az éles különbség a finom és durva rácsháló számítási eredményei között. A modelleredmények alapján azt a javaslatot tenném, hogy a jövőben érdemesebb lenne a beágyazott rácshálót a sarkantyúsor mentén a meder teljes szélességére kiterjeszteni, így jobb képet kapnánk az egyes szakaszok medervándorlási viszonyairól.



44. ábra: Hordalékfeltöltődés alakulása az 5.sz. modellváltozatban a mellékág felett



45. ábra: A mederfeltöltődés alakulása az 5.sz. modellváltozatban a mellékági csatlakozás alatt

7. Összefoglaló értékelés

A Duna hajózhatóságának javítása érdekében már számos tanulmányt dolgoztak ki a szakemberek itthon és külföldön is. A megfelelő hajózási szelvények kialakítása érdekében elsősorban kotrási munkákat és folyószabályozási művek beépítését irányozták elő. Ezek a beavatkozások biztosítanák a megfelelő hajózási vízmélységet, de hatással lennének a Duna ökológiai állapotára és számos mellékágának vízpótlására is.

A fő-és mellékágak között igen szoros kapcsolat van, akár a hidrológiai, hidrodinamikai vagy ökológiai szempontokat nézzük. Amennyiben tehát bármilyen beavatkozást tervezünk a főági mederre, figyelembe kell vennünk, milyen hatással lesz ez a mellékágra, környezeti hatásvizsgálatot kell végeznünk és ha szükséges, meg kell tervezni a mellékág rehabilitációját. A hajózási beavatkozások mind a főág, mind a mellékág ökológiai viszonyait is befolyásolhatják. A kotrások és az egyéb műszaki beavatkozások hatással lehetnek a főmeder élővilágára, a miattuk keletkező medersüllyedés pedig befolyásolhatja a mellékvízi áramlásokat, a mellékág elmocsarasodásához és a vízbázisok veszélyeztetéséhez vezethet. A fő- és mellékág szoros kapcsolata miatt egyetlen ökológiai rendszerként kell kezelni őket, ezért elmondható, hogy a főági beavatkozások hátrányos hatásait ellensúlyozni lehet, ha a mellékágban jó ökológiai állapotokat teremtünk.

Ahhoz, hogy a fő-mellékág rendszer jó ökológiai állapotát biztosítani tudjuk, pontosan kell ismernünk a beavatkozások hatásait. Ennek egyik legmegfelelőbb módszere a numerikus modellezés, amely segítségével a hidrodinamikai, de akár a medermorfológiai hatásokat is részletesen és jól értelmezhetően tudjuk elemezni.

Példaként számos mellékági rehabilitációt tudunk említeni, mint pl. a Gönyúi-mellékág, Bölcскеi-mellékág vagy a Szabadság-sziget rehabilitációja. Ezek kiindulópontot adhatnak ahhoz, hogy milyen beavatkozási hatásokat érdemes elemezni a későbbiekben. Dolgozatomban azonban egy másik mellékág, a Solti-mellékág rehabilitációjának tanulmányát kívántam előkészíteni, aminek vizsgálatát majd a diplomamunkám keretében kívánom elvégezni. Ezen a Duna szakaszon az esetenként illegális mederkotrások miatt mára már 70 cm-es medersüllyedés keletkezett, ezért veszélybe került a mellékág vízpótlása és a vízbázisok védelme. A numerikus modell felépítésekor ennek a mellékágnak a geometriai viszonyait vettem alapul.

A széles és hosszú Duna meder és a keskeny mellékág között jelentős méretbeli különbségek vannak, melyek gondot okozhatnak a numerikus modell rácshálójának felépítésekor. A főmeder méretei alapján meghatározott rácsháló felbontás nem illeszkedik a mellékág méreteihez, nem tudja hűen leképezni a mellékági áramlásokat. A finomabb felbontás esetén azonban a számítási igény aránytalanul megnőne, hiszen nem a teljes tartományon van szükség ilyen mértékű felbontásra.

A problémára megoldást jelenthet a beágyazott rácsháló alkalmazása, amely egy, a durvább rácshálóba helyezett finomabb felbontású rácsháló. A szükséges peremfeltételeket a durva rácsháló szomszédos celláinak számított értékéből származtatja. A mellékágra és a vizsgálandó beavatkozások környezetére ezt a finomabb felbontású rácshálót illesztettem, így a szükséges helyeken megfelelő részletességű számítási eredményeket fogok kapni anélkül, hogy túlságosan megnövelném a számítási igényt.

Hatféle modellváltozatot vizsgáltam összesen. Az első változatban a beavatkozás nélküli alapeometriát építettem fel, hogy később össze tudjam hasonlítani a beavatkozásokat tartalmazó

modellváltozatokkal. A második változatban egy terelőművet, a harmadikban egy fix bukót építettem közvetlenül a mellékági csatlakozásnál. A negyedik változat a második és harmadik változat kombinációja, tehát tartalmazott sarkantyút és fix bukót is. Az ötödik változatban ezt a változatot egészítettem ki az alsó mellékági csatlakozásnál 5 db sarkantyúval. A 6. sz. modellváltozatban közvetlenül a mellékágba építettem be különböző műveket és mederszűkítő elemeket, melyeknek a Solti-mellékág volt az alapja.

Már a különféle műszaki beavatkozások beépítésekor igen hasznosnak bizonyult a beágyazott rácsháló. A durva felbontású rácsháló celláira nem lehet tökéletesen ráilleszteni ezeket a műveket, de a finomabb felbontás lehetővé teszi, hogy ne legyenek elnagyoltak, hanem reális méretűek.

Az eredmények kiértékelésekor ismét előtérbe kerültek a finomabb felbontás előnyei. Részletes képet kaphatunk a sebességek és a csúsztatófeszültségek eloszlásáról, így képesek leszünk előrejelezni a hidrodinamikai és medermorfológiai változásokat és azok pontos helyét. A sebességvektorokat sűrűn ki tudjuk rajzolni, ezért az áramlások pontos iránya is megállapítható.

A terelőművek élénél nagy sebességű áramlatok alakulnak ki, melyek erodáló hatása jelentős lehet. A szállított hordalékot közvetlenül a művek alatti visszaforgó áramlás vagy a tágabb mederszelvényben hirtelen lelassult áramlás rakja le. A nagy sebességek a belső, a kisebbek pedig a külső ívben, az erózió és a hordalék lerakódás pedig ennek megfelelően fog kialakulni. A terelőmű főként a főág és csak részben tereli a mellékág felé az áramlást, ez pedig fokozhatja a további feltöltődést.

A mellékági csatlakozásnál lévő fix bukó környezetében szintén nagy sebességek és medererózió alakulhat ki, ám a bukó energiatorése miatt rögtön le is lassul és itt feliszapolódásra számíthatunk. Utóbbi jelenség kedvezőtlen hatással lehet a vízpótlására.

A 4. sz. változat kiértékelésekor azt vehetjük észre, hogy a terelőmű és a bukó fokozzák egymás hatását, környezetükben pedig még összetettebb áramlások alakulnak ki, melyet a finomabb rácsháló megfelelően le tud képezni.

Az 5. sz. változat sarkantyúsorozatával kapcsolatban ugyanazt tudjuk megállapítani, mint amit a 2. sz. változatban. A sarkantyúk élén a finom felbontás segítségével részletesen megfigyelhető, hogyan törik meg az áramlás, majd lassul le a sarkantyúk között és mögött.

A 6. sz. változat tartalmaz szigeteket, keresztgátakat és csatornaszerű mederszűkítést. A számítási eredmények alapján jól kirajzolódik, hogy az áramlási sebességek hogyan fogják átformálni a felépített műveket. A szigetek szélei és a keresztgátak közepén található rés erodálódni fog és az elmosott mederanyagot vélhetően közvetlenül a szigeteket, illetve keresztgátak mögött fogja lerakni.

A durva és finom felbontású rácsháló együttes megjelenítésénél a határvonalaknál megfigyelhetjük, hogy a durva rácsháló eredményei nem mindig vannak összhangban a finom rácshálóéval. Igaz ugyan, hogy a finom cellák a peremfeltételeiket a durva rácsháló celláinak eredményeiből származtatják, de ez fordítva nem mindig igaz. A durva rácsháló celláinak értékeit elsősorban a saját peremfeltételeiből számítja és másodsorban csak a finom rácsháló eredményeiből. Amennyiben tehát a műszaki beavatkozás egész hatósugarát szeretnénk részletesen elemezni, érdemes arra a területre kiterjeszteni a beágyazott rácshálót.

Mivel a jövőben hordaléktranszport modell is alkalmazásra kerülne, szükségesnek tartottam a beágyazott rácsháló tesztelését a morfodinamikai modellre is, amihez az 5. sz. változatot választottam. A morfodinamikai modellnek jelentősen nagyobb a számítási igénye, amely a finom rácsháló miatt még tovább fokozódik, ezért a modellváltozatok számát tekintve erősen korlátozottak voltak a lehetőségeink. Az eredmények azonban meggyőzhetnek minket a beágyazott rácsháló hasznosságáról. Részletesen tudjuk követni, hogy az adott szakaszon hol alakulhatnak is mederkimélyülések illetve hordaléklerakódások. A sarkantyúk környékén csak az egyik partra terjesztettem ki a finom felbontású rácshálót, de az eredmények kiértékelésekor azt találtam, hogy hasznos lett volna, ha a sarkantyúzott folyószakasz teljes szélességét lefedte volna az.

Összességében elmondható, hogy a fő-és mellékági viszonyok elemzésekor a beágyazott rácsháló hasznosnak bizonyult. Nemcsak azért, mert a különböző geometriai adottságú vízfolyásokat és egymásra való hatásukat egyszerre le tudtam írni, hanem azért is, mert a mederbeli beavatkozások könnyedén és a valóságnak megfelelően voltak beépíthetők. A különféle modellváltozatok bemutatták, milyen sokféle mederjellelmzőt meg lehet jeleníteni és akár úgy is felépíteni, mintha nem lennének jelen. Folyószabályozási műveket (bukók, terelőművek), mederszűkületeket, szigeteket és akár hídpilléreket is be tudunk építeni és képesek vagyunk azok részletes geometriai leképezésére, így hű képet kaphatunk azok hatásairól.

A Solti-mellékág rehabilitációjának tanulmánytervében szintén beágyazott rácshálót kívánok majd alkalmazni, hiszen geometriai léptékei hasonlóak, mint annak a sematikus modellnek, amit ebben a dolgozatban vizsgáltam. Szémos mederjellelmző és műszaki beavatkozás hatásait kell megvizsgálnom, amely felépítéséhez és elemzéséhez szükség van a finom felbontású rácshálóra. A Duna főmedrére gyakorolt hatásait csak érintőlegesen, a kritikus szakaszokon kívánom majd részletesen elemezni, ezért azokat a területeket elegendő lesz kevésbé részletes rácshálóval felépíteni, így a számítási igény optimalizálható.

Mivel rugalmas rácsháló kialakítására képes (általában háromszög cellákat alkalmazó), szabadon elérhető háromdimenziós numerikus modellek egyelőre nem állnak rendelkezésre, a dolgozatomban tesztelt eljárás egy egészen újszerű leírási módja a vizsgálati terület méretéhez képest sokkal kisebb léptékű részletek áramlási és morfodinamikai elemzésének. Folyók mellékágának beágyazott rácshálóval való leírására hazai vizsgálatokban még nem volt példa, de az eredmények kiválóan igazolták az új modell létjogosultságát. Az eljárással jelentős időt spórolhatunk meg a numerikus modellvizsgálatok során, hiszen csak a geometriai és áramlási viszonyokban összetett területeken van szükség a részletes leírásra. Ez egyúttal azt is jelenti, hogy a korábbi vizsgálatokhoz képest hosszabb folyószakaszokat tudunk a jövőben a numerikus eszközzel elemezni anélkül, hogy az a pontosság vagy a számítási idő rovására menne. A bemutatott módszer különösen fontos szerepet kaphat az élőhely vizsgálatoknál, hiszen sok esetben nagyobb folyó és mellékág rendszerek (pl. Szigetköz, Gemenc) lokális problémáit kell vizsgálni.

8. Irodalomjegyzék

1. Baranya, S.; Goda, L.; Józsa, J.; Rákóczi, L (2008): „Complex hydro- and sediment dynamics survey of two critical reaches on the Hungarian part of river Danube”, *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 4 012038 (13pp) 2008.
2. Baranya, S.; Józsa, J.; Napoli, E. (2010): „ Field and numerical study of river confluence flow structures”, *Fifth International Conference on Fluvial Hydraulics, River Flow 2010*, Braunschweig, Germany.
3. Baranya, S., Józsa, J. (2006): „Flow Analysis in River Danube by Field Measurement and 3D CFD turbulence modelling”. *Periodica Polytechnica, Civil Engineering*, Budapest
4. Baranya, S., Olsen, N. R. B., Stoesser, T., Sturm, T. (2012). Three-dimensional RANS modelling of flow around circular piers using nested grids. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*. Nyomtatás alatt.
5. Európai Bizottság (2011): Fehér Könyv, Útiterv az egységes európai közlekedési térség megvalósításához – Úton egy versenyképes és erőforrás-hatékony közlekedési rendszer felé, Brüsszel
6. Európai Parlament, Európai Unió Tanácsa (2000): Az Európai Parlament és a Tanács 2000/60/EK Irányelve
7. Olsen NRB (2010). A three-dimensional numerical model for simulation of sediment movements in water intakes with multiblock option user’s manual. Department of Hydraulic and Environmental Engineering, NTNU, Trondheim.
8. Országos Területfejlesztési Hivatal (2006): Duna Komplex Program, Budapest
9. Sokoray-Varga, B.; Baranya, S.; Józsa, J. (2007): „Turbulent structures in vertical slot fish pass revealed by in situ measurements and numerical modelling”. The Fifth International Symposium on Environmental Hydraulics (ISEH V). Tempe, Arizona, 2007.
10. SMS Development Team (2012): SMS Software Help Manual. Aquaveo, LLC
11. "VITUKI" Környezetvédelmi és Vízgazdálkodási Kutató Intézet Nonprofit Közhasznú Kft., AQUAPROFIT Műszaki, Tanácsadási és Befektetési Zrt., TÉR-TEAM Mérnök Kft., VTK Innosystem Víz-, Természet- és Környezetvédelmi Kft. (2009): Stratégiai Környezeti Vizsgálat „Tanulmányok a Duna hajózhatóságának javításáról” program (a 2/2005 (I. 11.) Kormány Rendelet és 2001/42/EC Direktíva alapján), Budapest

9. Webes hivatkozások

<http://www.euvki.hu/>

<http://www.edukovizig.hu/>

<http://www.dunahajozhatosag.hu/>

<http://www.naiades.info/>

<http://www.szabadsagsziget.hu/>