

# Számítógépes szimulációs eljárások ökohidraulikai alkalmazhatóságának vizsgálata

---

*Tudományos Diákköri Konferencia 2018.*

Szerző:

**Füstös Vivien**

MSc hallgató

Konzulensek:

**Dr. Baranya Sándor**

**Fleit Gábor**

Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszék  
Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem  
Budapest, 2018.

## Tartalomjegyzék

I.	Bevezetés .....	3
II.	Irodalomkutatás .....	4
II.1.	Cél, módszerek .....	4
II.2.	Kihívások.....	5
II.3.	Numerikus áramlásmodellezés (2D vs 3D).....	7
III.	A használt szoftverek bemutatása .....	10
III.1.	Az alkalmazott 2D modell – AdH.....	10
III.2.	Az alkalmazott 3D modell – SSIIM .....	12
IV.	Numerikus áramlásmodellezés .....	13
IV.1.	A modellezett területek bemutatása.....	13
IV.1.1.	A fiktív medrek .....	13
IV.1.2.	A valós meder.....	14
IV.2.	Rácshálóépítés .....	15
IV.3.	Futtatás, utófeldolgozás .....	16
V.	Modelleredmények értékelése .....	20
V.1.	Egyenes csatorna, sarkantyúval.....	20
V.2.	Meanderező szakasz .....	25
V.3.	Gödi szakasz.....	29
V.4.	Az átlagos eltérések számszerűsítése .....	31
V.5.	Élőhelyhidraulikai értékelés .....	33
VI.	Összefoglalás, következtetések.....	36
VII.	Köszönetnyilvánítás .....	39
VIII.	Ábrák és táblázatok jegyzéke .....	40
IX.	Irodalomjegyzék .....	42
X.	Függelék .....	44
X.1.	Egyenes sarkantyúval .....	44
X.2.	Meanderező csatorna.....	48
X.3.	A gödi szakasz.....	52

## I. Bevezetés

A vízépités az öntözés szükségletének révén már az ókori mezopotámiai időktől fogva kíséri az emberiséget (Mays, 2008). Ekkora időtávlatot felölelve nem érzem túlzásnak kijelenteni, hogy gyakorlatilag a jelenkorig nem volt jellemző szempont a vízi élővilág, élőhelyek épsége, folytonossága. Az első lépést ebbe az új irányba a keresztirányú elzárások mellett megjelenő halátjárók jelentették, az utóbbi 20-30 évben pedig egyre több cikk, tanulmány, kutatás mélyed el a témában (akár vízépitési beavatkozástól függetlenül is), új fogalmak születtek: *ökohidrológia, ökohidraulika, élőhely alapú hidraulika*. Persze főként angolul – *ecohydrology, ecohydraulics* –, a magyar nyelvű értekezéseket a fenti időtartamon belül is inkább csak az utolsó 5-10 év hozta. Érdekességnek számít a sok szakmai cikk között a fenti fogalmak előfordulásáról, terjedéséről, trendekről, s mindezek alapján az ökohidraulika társtudományokhoz képest elfoglalt helyéről (inter-, multi- avagy transzdiszciplinaritás) készült szaknyelvi, szóhasználati elemzés (Casas-Mulet et al., 2016). Hasonló fogalomhasználati összefoglaló található a 2013-as *Ecohydraulics – An integrated approach* c. kiadvány első fejezetében (Maddock et al., 2013). Szintén itt olvasható, hogy a 2000-es évek elején szinte a világ minden táján érvénybe léptek vízvédelmi, ökológiai célokat megfogalmazó irányelvek, programok – hazai vonatkozásban az Európai Víz Keretirányelv –, melyek erős indokot szolgáltatnak a tudományterület gyakorlására, fejlesztésére.

## II. Irodalomkutatás

### II.1. Cél, módszerek

Az ökohidraulika, vagy élőhely alapú hidraulika az ökológia és a hidraulika határán elhelyezkedve a vízi környezetbeli élő és élettelen, biotikus és abiotikus paraméterek között igyekszik összefüggéseket keresni; az abiotikus tényezők összessége által meghatározott élettereket biotikus szempontok nyomán osztályozni.

Ennek az osztályozásnak egyelőre külföldön nagyobb hagyománya van, és ilyenformán a kidolgozott módszerek mennyiségében is előttünk járnak. Fleit Gábor konzulensem vonatkozó témájú TDK-dolgozatában két főbb eljárást ír le: élőhelymodellezés (*mesohabitat evaluation model – MEM*), illetve megfelelőségi indexek számítása (*microhabitat jellemzés, suitability indices –SI*).

A mezohabitat jellemzés az osztrák ökohidraulikai munkák kedvelt módja (Hauer et al., 2008; Hauer et al., 2011). Kijelölik a három legfontosabb hidraulikai paramétert (vízmélység, mélységátlagolt áramlási sebesség, fenék-csúsztatófeszültség), majd bármilyen georeferált pontot a fentiek mentén kiértékelnek, és besorolják hat, előre definiált mezohabitat osztály egyikébe. Ezután az osztályozott területeken vizsgálják az ott fellelhető halfajok előfordulását, s ebből vonnak le a vizsgált halak preferenciáira vonatkozó következtetéseket.

A megfelelőségi indexek módszere, azaz a mikrohabitat leírás ettől kissé különbözik, ott egyidejűleg vesznek biotikus mintát, valamint feljegyeznek bizonyos hidromorfológiai paramétereket, ezután pedig statisztikai analízisnek vetik alá az adathalmazt, és kapcsolatot keresnek az élettelen paraméterek és a begyűjtött egyedek mennyisége között (Fleit, 2014). A hazai vizeken főleg ezt, illetve ezzel rokon módszert alkalmaznak ökohidraulikai kutatások során (Erős et al., 2008, Baranya et al., 2018).

Az angol elnevezésekből is kiértődik, az mikrohabitat eljárás pontszerű léptéken értékeli az élőhelyek minőségét, míg a mezohabitat módszer ettől nagyobb területeket, élőhelytípus „foltokat” vizsgál.

A mikrohabitat eljárás afféle kiterjesztéseként értelmezem az élőhelytérképezést (*habitat mapping*), mely hazai fejlesztés. Fajonként (akár életszakaszonként) az egyes abiotikus paraméterekre az SI-k alapján görbét illesztenek (*suitability curves, SI-görbék*), így egy-egy modellfuttatás után az egyes számítási cellák egy adott eredményéhez (pl. vízmélység) hozzárendelhető egy vonatkozó megfelelőségi érték, s ezáltal térben folytonossá tehető az élőhely-minősítés. Külön érdekesség, hogy a fenék-csúsztatófeszültség és a szemcseméret

közi erős összefüggés által az egyes mederanyagok térbeli kiterjedése – mint meghatározó élőhely jellemző – is modellezhető volt (mederanyag-térképezés – *bed material mapping*), így erre a paraméterre is adódott egy-egy érték minden cellában (Baranya et al., 2018).

## II.2. Kihívások

Az ökohidraulika eszközeit illetően nélkülözhetetlenek a terepi mérések, melyek optimálisan ugyanazon időben, ugyanazon helyen mérik fel mind az ökológiai (pl. halfajok minősége, mennyisége, mérete), mind a hidraulikai jellemzőket (pl. vízhőmérséklet, áramlási sebesség, vízmélység). Belátható, hogy az idő és hely (legalább közelítőleges) egyezése elengedhetetlen a felállítandó kapcsolatok érvényessége miatt, mindazonáltal ezek a mérések az idő- és helyszinkron nélkül is hordoznak kihívásokat, bizonytalanságokat, már csak a vízi környezet változékonysága miatt is.

Egy fő kihívás a biotikus mintavétel reprezentativitása. Zajicek és Wolter 2018-as cikkükben az előbbi szempont szerint egy fő és három kiegészítő halmintázási módszert hasonlítanak össze egymással: *electrofishing*; *trawling*, *seining*, *drift-net*. Az első módszerben egy enyhe elektromos sokkal elkábítják a begyűjteni kívánt egyedeket, és aztán bármilyen hálóval – akár egyszerű merítoszákkal – kiemelik. (*Game and Wildlife Conservation Trust – Electro-fishing* c. weblap alapján.) A másik három módszer közelebb áll a klasszikus halászathoz, különféle hálók használatával, elektromos „segítség” nélkül fogják be a halakat. (A *trawl* egy zsákszerű, tetszőleges méretű vontatott háló; a *seine* általánosan hálót jelent, lehet például mederfenéktől felszínig húzódó háló, melyet egy körvonal mentén vetnek ki, s az alsó kerületet összehúzza csészeként csapdáz; a *drift-net* szintén gyűjtőnév, lehet eresztett és állóháló is. Előbbit leginkább a Duna főágában használják (kivetik és sodródnak vele), utóbbi állóvizekben vagy holtágakban alkalmazható, bójákra felfüggesztve lóg a víztérben. *Gears database – Search* c. weblap alapján, külső kiegészítéssel.) Megállapításuk szerint az elektromos halászat – ellenére annak, hogy használata a partmenti zónákra korlátozott – elégségesen reprezentatív mintákat nyújt, amennyiben hidromorfológiai változások vagy folyószabályzás hatásait kell vizsgálni, komplexebb esetekben kiegészítő módszer alkalmazása is javasolt (Zajicek & Wolter, 2018).

Kötődve a reprezentativitáshoz, egy további kérdésfelvetés, hogy mennyit kell mintázni ahhoz, hogy az adott területre jellemző fajgazdagságot eredményezzen a mérés. Téves következtetés többféleképpen is levonható, előfordulhat, hogy egy egyedet többször is kiemelünk (amikor az ismétlődő egyed valamilyen tulajdonságában, pl. méretben eltér a minta átlagos egyedétől, még szakavatott szem esetleg felismeri, de egyéb esetben biológus legyen a

talpán, aki megállapítja az ismétlődést), és az is megeshet, hogy dacára annak, hogy egy adott faj nem képviseltette magát a mintában, jelen van, csak elkerülte a hálót. Erős Tibor, Tóth Balázs és Sevcsik András 2007 nyarán végeztek méréseket Gönyű és Budapest között, melyek eredményeiből többek között két görbét szerkesztettek a fajszám és a mintavételi egységek, valamint a gyűjtött egyedek számának összefüggésére. E szerint a fajszám egyre csökkenő ütemben nő a két független változó növekedésével, tehát kijelölhető egy optimális mintavételi erőfeszítés. Azt is megállapították, hogy éjszakánként több, köztük ritkább fajok gyűjthetőek, mint nappal. Ennek 4 fő okát jelölték meg: a halfajok többsége éjjel aktív; jellemző, hogy a nappal a mederben tartózkodó halak éjjelre a partmenti zónába húzódnak; éjjel kevésbé észlelhetőek a mintavételezők; valamint hogy az éjjel a partközeli övezetben összegyűlt nagyobb halállományból nagyobb méretű minta vehető, ami megnöveli a ritka fajok begyűjtésének esélyét. (Erős et al., 2008). Méréseiket hajóról, aggregátoros halászgéppel, „elektromos kecével” végezték, mely a korábban ismertetett halászati módszerek közül nagyjából az *electrofishing* és a *trawling* keveréke, összetétele pedig egy Fisheries Research-cikkben olvasható. Egy 2 m széles és 1 m magas, 3,4 cm átmérőjű rozsdamentes acél keretre egy 5 m mély zsákhálót erősítettek, mely 5 mm-es belső és 8 mm-es külső szembőséggel rendelkezik. A zsákháló végének helyét a felszínen egy ahhoz kötéllal hozzáerősített bója jelzi. A keret fémkerekeken gördül, melyek 6 cm-rel felemelik a meder aljától, megakadályozva ezzel, hogy a háló mederanyaggal telítődjön. A halászat „lelke” egy Hans-Grassl EL 64 II GI aggregátoros halászgép, mely egyenáramot produkál. A keret az anód, egy 6 m hosszú rézkábel pedig a katód, mely kb. 2 m-rel a keret elé lóg vontatás közben (Szalóky et al., 2014). Az enyhe áramütéstől elkábult halak belesodrónak a folyásiránnyal megegyezően vontatott hálóba.

Egy következő bizonytalanság a hal egyéni viselkedése, válasza bizonyos (akár az átlagostól jobban eltérő, gyakoribb, szélsőségesebb) ingerekre. Hervé Capra és csapata 2009-ben a franciaországi Rhône folyó egy atomerőművet környező, kb. 2 km-es szakaszán kutatta 18 kiválasztott egyed (márnák, harcsák és keszegek) mozgását 3 hónapon keresztül. Hűtővízigényéből kifolyólag a létesítmény felvizen és alvizén is gyakoriak a gyors, rövid időtartamú vízhozam- és hőmérsékletingadozások, melyek módfelett változékony folyami környezetet (*hydropeaking*) eredményeznek. A 18 egyed mindegyikébe akusztikus azonosítót ültettek, melyek jelkibocsátása (kb. 3 másodpercenként) alapján követték a halak mozgását, mindeközben pedig folyamatosan mérték az abiotikus jellemzőket is. Az egyik eredmény egészen meglepő volt a kutatók számára: a halak helyzete, mindenkori életterük megválasztása nemcsak az aktuális, hanem a korábbi (kutatásukban a megelőző 15 napi)

hidraulikai paraméterek függvénye is volt; ezáltal feltételezhetőek bizonyos (bár egyedenként eltérő mértékű) tanulási folyamatok az efféle erősen fluktuáló környezetben élő halak részéről (Capra et al., 2017).

Habersack többedmagával az osztrák Dunán és mellékfolyóin a mikro- és a mezoskálás élőhelyvizsgálatokat vetette össze egymással. Három vizsgált területet választottak meg jellemző méretekkel: az „A” szakasz a Bécs melletti Duna-szakasz volt, a „B” a Pielach mellékfolyó nem sokkal a Dunába torkollás fölött, a „C” pedig az Ybbs mellékfolyó a forrása közelében. A hatékonyság optimalizálására a nagy kiterjedésű területekre a fenti két módszer kombinációját ajánlják, míg a közepes és kis méretű területekre nevezéktanuknak megfelelően a mezo- és mikrohabitat jellemzést. Sikerült továbbá kapcsolatot vonniuk az egyes bizonytalanságok és a vizsgálat, vizsgált terület léptéke, mérete között. Eszerint az élőhelyek besorolása (mezohabitat) és a megfelelőségi indexek megállapítása (mikrohabitat) a mérettel egyre kétségesebb, míg a megfelelőségi görbék nagyobb biztonsággal alkalmazhatók a nagy folyók kombinált módszerű vizsgálatokor (Habersack et al., 2014).

A biotikus mintázás bizonytalanságai mellett nem tekinthetünk el az abiotikus, azaz a hidraulikai paraméterek (vízhozam, áramlási sebesség, fenék-csúsztatófeszültség, mederanyag-összetétel stb.) mérésének bizonytalanságaitól sem, jóllehet, ezekről többet tudunk, illetve kielégítőbben tudjuk számszerűsíteni.

### **II.3. Numerikus áramlásmodellezés (2D vs 3D)**

A terepi mérések adatmennyiségéből levont következtetéseknek egy nagy korlátja van, mégpedig hogy azok csak a mérés idejére vonatkoznak, tehát csak a jelenlegi állapotot írhatjuk le vele. A kapcsolatok felállítása szempontjából ez nem gond, de amikor múltbeli állapotokat kívánunk megismerni, vagy alkalmazási szintre emelnénk a tapasztalatokat és tervezett beavatkozások hatását vizsgálnánk, ott számítógépes modellezésre van szükség az abiotikus környezet megfelelő reprezentációjához. (Egyelőre nem hallottam olyan szoftverről, amely biotikus, tehát a vízi élővilág megbízható modellezésére képes, de a mesterséges intelligencia olyan ütemben fejlődik, hogy személy szerint nem tartom megvalósíthatatlannak a nem is olyan távoli jövőben.) Az előbbi részfejezet fényében fontos kijelenteni, hogy a modellezés önmagában is további bizonytalanságokat hordoz (peremfeltételek, hibák, stabilitás), ezek azonban nem újszerűek.

Tekintve a különböző dimenziójú megközelítések adottságait, valamint azt, hogy a szakirodalom milyen mennyiségeket tart fontosnak az élőhelyminősítési kérdésekben, arra a következtetésre juthatunk, hogy az ökohidraulikai modellezés legalább kétdimenziós kell

legyen. Nem példa nélküli azonban az 1D modellezés sem, Borsányi Péter doktori disszertációja során olyan megközelítést alkalmazott, amelyben az 1D keresztmetszvényeken belül további függvényeket határozott meg, s ezek között manuálisan (Excellel) osztotta fel az eredményül kapott hidrodinamikai paramétereket, ez lett az élőhely-indexek számításának inputja. (Borsányi, 2006).

A dimenzió megválasztása minden esetben az időre, erőforrásokra és a számítani kívánt paraméterekre elvégzendő optimalizációs feladat. A háromdimenziós megközelítés megbízhatóbban számítja pl. a fenékközeli áramlási viszonyokat, többek között a fenékcúsztatófeszültséget, ami a mederanyag-térképezés kiindulópontja (Baranya et al., 2018), azonban a rácshálóépítést, a modell adatigényét (kezdeti és peremfeltételek), a futtatás idejét tekintve sokkal többet kell ráfordítani, mint a kétdimenziós számításra. Felmerül tehát a kérdés, hogy tudunk-e olyan kompromisszumokat, egyszerűsítéseket tenni, melyek mellett szabad csak az utóbbi megközelítésre hagyatkoznunk. Nem ez az első alkalom, hogy ezt a kérdést felteszik, s mint most én, korábban ugyancsak a két eljárás összehasonlításában keresték a választ.

Már szinte 20 évvel ezelőtt, egy 1999-es cikkben is beszámoltak annak a vizsgálatáról, hogy az a plusz erőfeszítés, melyet a számítás és a peremfeltételek meghatározása igényel egy 3D szimulációnál, meghozza-e az ennek megfelelő mértékű minőségjavulást az áramlási viszonyok előrejelzése terén. Azt tapasztalták, hogy míg a 3D modell előrejelzését korlátozta a terepi változékonyság, a 2D erre kevésbé bizonyult érzékenynek, sokkal inkább a súrlódás paraméterezésére, és ennek adott (a mértéknél magasabb értékekkel való) beállításával javítható volt a 2D megközelítés előrejelző-képessége. A fenékközeli viszonyokat viszont egyértelműen a komplexebb szimuláció számította megbízhatóbban. Leszögezték továbbá, hogy elengedhetetlen a jó minőségű terepi adat a modelleredmények ellenőrzésére (Lane et al., 1999).

Arrowsmith és Zhu egy létező, fülkés halátjárót modellezett két és három dimenzióban MIKE21 és ANSYS CFX szoftverekkel. Tapasztalataik szerint a 3D modell bonyolultabb felépítése, valamint az időbeli különbségek mellett a falmenti veszteség hiánya a 2D modellben magasabb vízszinteket eredményezett, de ezt a simaság lokális megváltoztatásával lehet kompenzálni (Lauchlan Arrowsmith & Zhu, 2014).

A medervándorlás feltételezése (ami egy beton halátjárónál kevésbé fordul elő) összetettebbé teszi a szimulációt. Huybrechts és társai a mederfenéki dűnék mozgását modellezték Telemac-2D és -3D szoftverrel, ezeket egy Sisyphé nevű morfordinamikai modullal összekapcsolva. Egy, a mélységátlagolt sebességet korrigáló tényezőt bevezetve (lankás



dűnék esetében) a korrigált 2D szimuláció eredménye jól közelített a 3D-s eredményekhez (Huybrechts et al., 2010).

Egy finn kutatás szerint a 3D megközelítésnek egyértelmű fölénye van a mederfenék-közeli és a kanyarbeli áramlási viszonyok feltárásában a 2D-hez képest; továbbá a 2D-re jellemző mélységátlagolásnak erős hatása van az áramlás eróziós tulajdonságaira (pl. a fenék-csúsztató feszültségre), amit szem előtt kell tartani. Másfelől azonban egymáshoz nagyon hasonlóan (és a mérésektől meg kissé elütve) teljesített a két megközelítés, amikor egy árvízi elöntés mederátrendező hatását szimulálták egy ív domború oldalán. Egy két- és háromdimenziós számításra is képes szoftvert, a Delft3D-FLOW-t használták (Kasvi et al., 2014).

A fentiek nyomán úgy gondolom, hogy a háromról kétdimenziósra történő egyszerűsítés lehetősége mindenképpen függ a mindenkor feladat célkitűzéseitől, de részben talán az alkalmazott szoftverektől is (pl. a rácsháló felépítése). A 3D megközelítés egyértelmű előnye a fenékközeli viszonyok, a térbeli struktúrák hűebb visszaadása, míg a 2D egyszerűbb felépítésű, gyorsabban számít, következésképpen jóval nagyobb léptéken alkalmazható. Az ilyenkor tett szükségszerű egyszerűsítések általában kompenzálhatók korrekciós tényezőkkel, a bemeneti adatok finomhangolásával.

Dolgozatom célja, hogy sematizált, illetve valós folyószakaszokon többféle vízjárásra is megvizsgáljam az ökohidraulikai szempontú két- és háromdimenziós számítógépes modellezés létjogosultságát, hogy mely esetekben nem kerülhetjük meg a nagyobb erőfeszítéseket igénylő 3D modellezést, és mikor élhetünk olyan egyszerűsítésekkel, ami elegendővé teszi a 2D megközelítést. Miután az élővilág preferenciáiban is vannak bizonytalanságok (részint a méréseinkből, részint az élet természetéből kifolyólag), könnyen lehet, hogy ehhez a feladathoz elég egy, a 3D-nél „kevésbé megbízható”, de más jellemzőiben (idő-, erőforrásigény, egyszerűség) előnyösebb megközelítés is.

A témaválasztás oka mellett, hogy reményeim szerint az élőhelyvédelmet alkalmazásában támogató dolgozatot tudok készíteni, a téma két fő komponensében áll: a családban apai ágon erős a „halas vonal”, a modellezést pedig izgalmasnak találom, és érzésem szerint a mai informatika-alapú világban bizonyítottan van jövője.

### III. A használt szoftverek bemutatása

A kétdimenziós modellezést az AdH-val, a háromdimenziósat pedig a SSIIM nevű programokkal végzem. Azért ezekre esett a választás, mert egyrészt mindkettő ingyenes, másrészt a SSIIM-et már használtam BSc-s diplomamunkám során (Füstös, 2017), az AdH-t pedig konzulenseim ismerik.

A két program közti fontosabb különbségeket az 1. táblázat mutatja.

Program	AdH	SSIIM
Dimenziószám	2	3
Alapegyenletek	sekélyvízi	RANS
Rácsháló típusa	strukturálatlan	strukturált
Fenék-csúsztatófeszültség számítása	közvetlenül nem számítja	a fenékcella turbulens kinetikus energiájából

1. táblázat: Az alkalmazott numerikus modellek jelen tanulmány szerinti legfontosabb jellemzőinek összehasonlítása

#### III.1. Az alkalmazott 2D modell – AdH

Az AdH (Adaptive Hydraulics Modeling System) az amerikai mérnökhadtest által fejlesztett, véges elem módszeren alapuló numerikus megoldó program, a sekélyvízi egyenleteket oldja meg a számítás során. Elméletileg létezik 3D modulja is, azonban a program kézikönyve szerint csak a 2D modult szánták általános felhasználásra. Ez imént említett kézikönyvre támaszkodom a szoftver bemutatásában. (Berger et al., 2010)

A kiindulási sekélyvízi egyenlet:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial F_x}{\partial x} + \frac{\partial F_y}{\partial y} + H = 0,$$

ahol:

$$Q = \begin{pmatrix} h \\ uh \\ vh \end{pmatrix}; F_x = \begin{pmatrix} uh \\ u^2h + \frac{1}{2}gh^2 - \frac{h}{\rho}\sigma_{xx} \end{pmatrix}; F_y = \begin{pmatrix} vh \\ uvh - \frac{h}{\rho}\sigma_{yx} \end{pmatrix}; H = \begin{pmatrix} 0 \\ gh \frac{\partial Z_d}{\partial x} + ghS_x \\ gh \frac{\partial Z_d}{\partial y} + ghS_y \end{pmatrix},$$

ahol:

- $h$  – vízmélység,
- $u, v$  – vízszintes sebességkomponensek,
- $g$  – nehézségi gyorsulás,
- $\rho$  – víz sűrűsége,
- $\sigma_{xx}, \sigma_{yx}$  – Reynolds-feszültség x és y irányban,

- $Z_d$  – vízszint,
- $S_x, S_y$  – vízfelszínésés x és y irányban.

A további kifejtéseket, képleteket, illetve az alkalmazott numerikus sémákat a használati útmutató tartalmazza.

A program futtatásához három fájl megléte szükséges: egy a számítási rácshálóval, egy a peremfeltételekkel, valamint egy „melegindító” (*hotstart*) fájl, azaz vagy kézzel bevitt kezdeti feltételek, vagy egy korábbi futtatás eredményfájlja. Ezek kiterjesztése rendre *.3dm*, *.bc* és *.hot*, az ezek előtti fájlnev pedig azonos kell legyen.

- A **rácsháló** elkészítésére többek között tökéletesen alkalmas egy általam ismert és már használt szoftver, az AQUAVEO által fejlesztett Surface-water Modeling System, azaz SMS. Az AdH strukturálatlan, háromszög elemekből álló rácshálón számít, az SMS-ből kimenthető *.2dm* kiterjesztést kézzel át kell írni a kívánt *.3dm* kiterjesztésre.
- A **peremfeltételek fájlja** egy afféle kapcsolótábla, melyben rövid parancsokkal (*control cards*) kell „utasítani” a programot, milyen beállításokkal kívánjuk elvégezni a szimulációt. Itt kell megadni a számítógép erőforrásaira vonatkozó beállításokat, az iterációk maximális számát, toleranciát, a mederre vonatkozó egyéb hidraulikai paramétereket, a futtatás időbeállításait, valamint a végére szükséges egy END lezárás. A szoftver egyik sajátossága, hogy amennyiben az előre definiált időlépéssel nem képes konvergálni a számítás, negyedére csökkenti az időlépést, s azzal próbálkozik. Minden létező parancskód, és azok leírása megtalálható a kézikönyvben.
- A **hotstart fájlban** meg kell adnunk a kezdeti feltételeket, melyek jellege lehet vízmélység, sebesség, koncentráció, illetve medermozgás. A vízmélységre mindenképp meg kell adni értéket (bár egyes pontokban ez az érték lehet 0 vagy negatív – száraz tartományok), a többi kihagyható. Korábbi futtatásból is lehet hotstart fájlt készíteni.
- Amikor a fenti három fájl rendelkezésre áll, a *pre\_adh fájlnev* paranccsal **input fájl** íródik, amellyel végül a tényleges számítás indítható (*adh fájlnev* parancs).
- Az **eredményfájlok** (számított paraméterekre külön-külön) tabulátorokkal tagoltak, a számítás részleteit időlépésenként adott sorrendben listázzák, *.dat* kiterjesztésű fájlok. Ez a kiterjesztés az SMS-be betölthető, azzal megtekinthető. A vízmélység-, sebesség- és hibafájlok minden esetben létrejönnek, míg a további paraméterek eredményfájljai a peremfeltételeknél meggett beállítások függvényében íródhatnak ki. Jelen feladat esetében

fontos tény, hogy az AdH a fenék-csúsztatófeszültségeket közvetlenül nem számítja, azokat az eredményekből nekem kell kiszámolni (IV.3. fejezet).

### **III.2. Az alkalmazott 3D modell – SSIIM**

A SSIIM (Simulation of Sediment Movements in Water Intakes With Multiblock Option) a Norvég Műszaki Egyetem kutatóinak fejlesztése, egy szabad felhasználású numerikus megoldó, mely a Reynolds-átlagolt Navier-Stokes (*RANS*) egyenleteket oldja meg  $k-\varepsilon$  típusú turbulenciamodellel, strukturált rácshálón, véges térfogat módszerrel. Használatát leírtam a BSc-s diplomamunkám 4.2.1-2. fejezeteiben (Füstös, 2017), jelen dolgozatbeli alkalmazása is ugyanezen eljárás mentén történik.

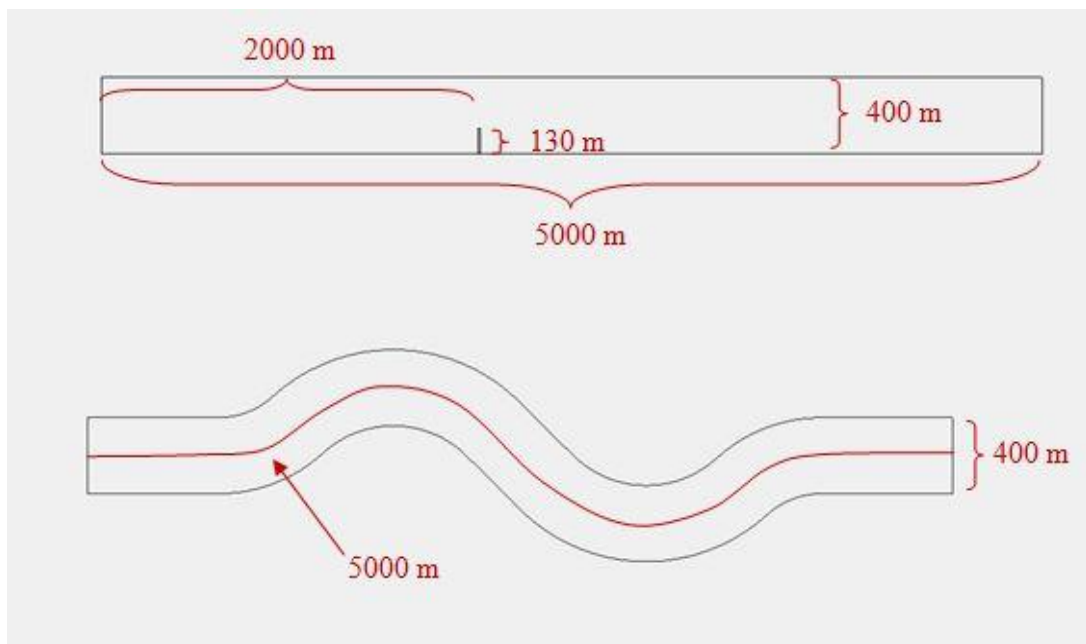
## IV. Numerikus áramlásmodellezés

### IV.1. A modellezett területek bemutatása

A számítást két különböző fiktív és egy valós mederben végzem el, előbbi kettőre a rácshálót én készítettem el, utóbbira készen kaptam.

#### IV.1.1. A fiktív medrek

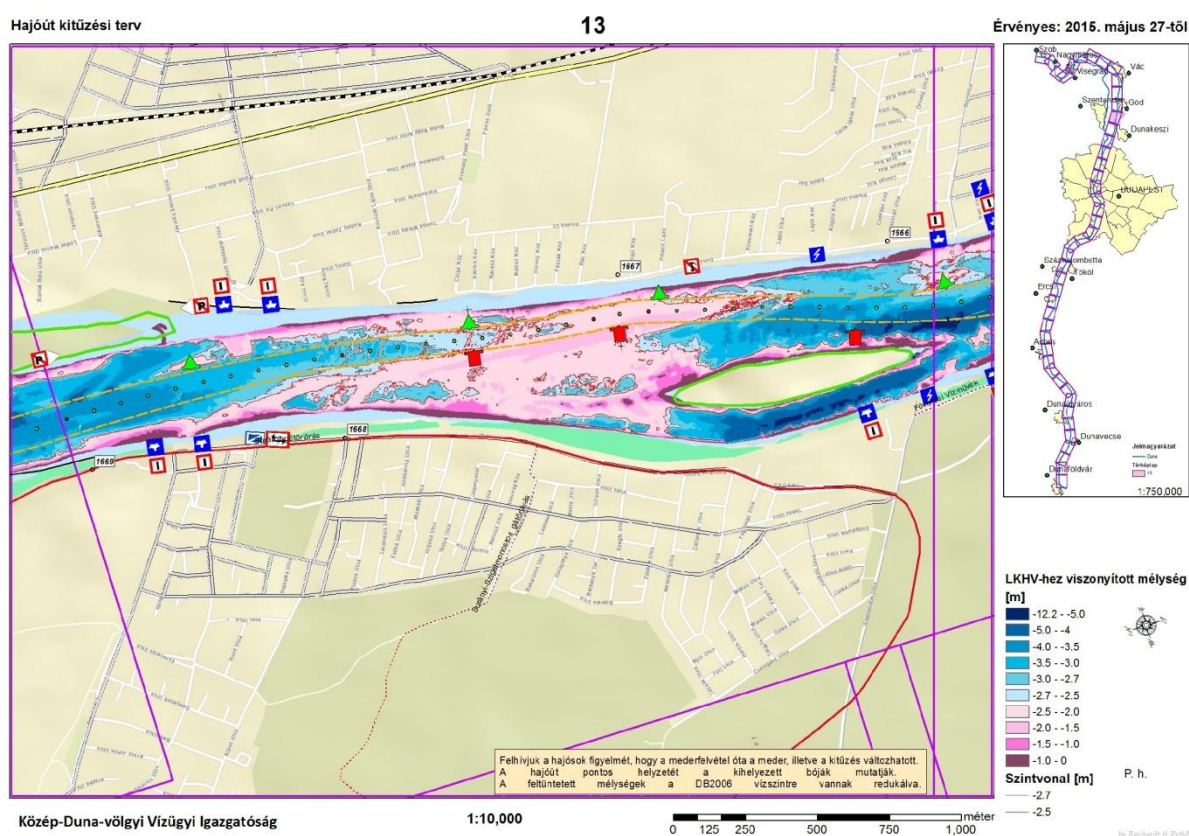
Két olyan sematikus csatornát építettem, melyek esetében jellemző eltérés várható a két-, illetve háromdimenziós megközelítés esetén. Mindkettő a középvonala mentén 5000 m hosszú, 400 m széles, 5 cm/km keleti irányú hosszseséssel bíró, parabolaszelvénű csatorna. A befolyási szelvény partpontjai 0 m, legmélyebb pontja -2 m szinttel rendelkeznek. (Ugyanakkor, mivel a partvonalak egyben a modelltartomány határai is, nem áteresztő peremként, végtelen magasságúnak is tekinthetők, a későbbiekben emiatt adhattam meg 0 méternél magasabb vízszinteket.) Az első geometria esetén a csatorna teljesen egyenes, ebbe azonban a befolyási szelvényétől 2000 m-re egy, a partvonalra merőleges, keresztirányban 130 m széles, 3 m koronaszintű, 5 m koronaszélességű, trapézszelvénű sarkantyút helyeztem el. A második esetben a meder meanderező, a szabályos ívek sugarai önkényesen kerültek felvételre. A fő cél egy sematikus, mégis természetes folyókanyarulat jellegzetességét tükröző geometria létrehozása volt. A sematikus csatornák mérettartományukat tekintve Duna-léptéket hivatottak szemléltetni. Az 1. ábrán a két meder vázlatos rajza látható.



1. ábra: A sematikus medrek vázlata, főbb méretekkel

#### IV.1.2. A valós meder

Jó feltártsága miatt a gödi Németh Endre Mérőtelep előtti Duna-szakaszra esett a választás, mely Tőkési Nikoletta 2016-os MSc diplomamunkájának tárgya is volt, így a szakasz bemutatását az ő vonatkozó fejezete alapján teszem. A terület határai 1672 és 1665 fkm, jelenleg a Közép-Duna-völgyi Vízügyi Igazgatóság alá tartozik, a honlapjukról elérhető hajóút-kitűzési terv 12–14. lapjai mutatják be a szakaszt. A hajózást a mérőteleptől kb. egy folyamkilométerrel alább a gödi gázló nehezíti, egy 1400 m hosszon húzódó 80 m széles hajóútszűkület. Két sziget (Gödi- és Horányi-sziget) és összesen négy sarkantyú (1-1 pár a két oldalon) található a 7 folyamkilométeren, melyek szűkítése miatt a mederszélesség 350-500 m között változik. Ennek köszönhetően a kialakult sebességek eloszlása, az átlagok és a maximumok is igen sokfélék (Tőkési, 2016).



2. ábra: A gödi gázló a KDVVIZIG hajóút kitzési 13-as térképlapján

A szakasz a mérőtelep közelsége miatt több diplomamunka tárgya volt már, illetve a mérőgyakorlatok mindenkor „célpontja”, így a Tanszék és a hallgatók igen sok és jó minőségű adatot gyűjtöttek össze róla az évek során, melyet (többek között a rácshálót) így most én is felhasználhatok a feladatomhoz. A korábban már hivatkozott élőhelytérképezés-témájú magyar ökohidraulikai kutatás is ezen a területen zajlott (Baranya et al., 2018). A

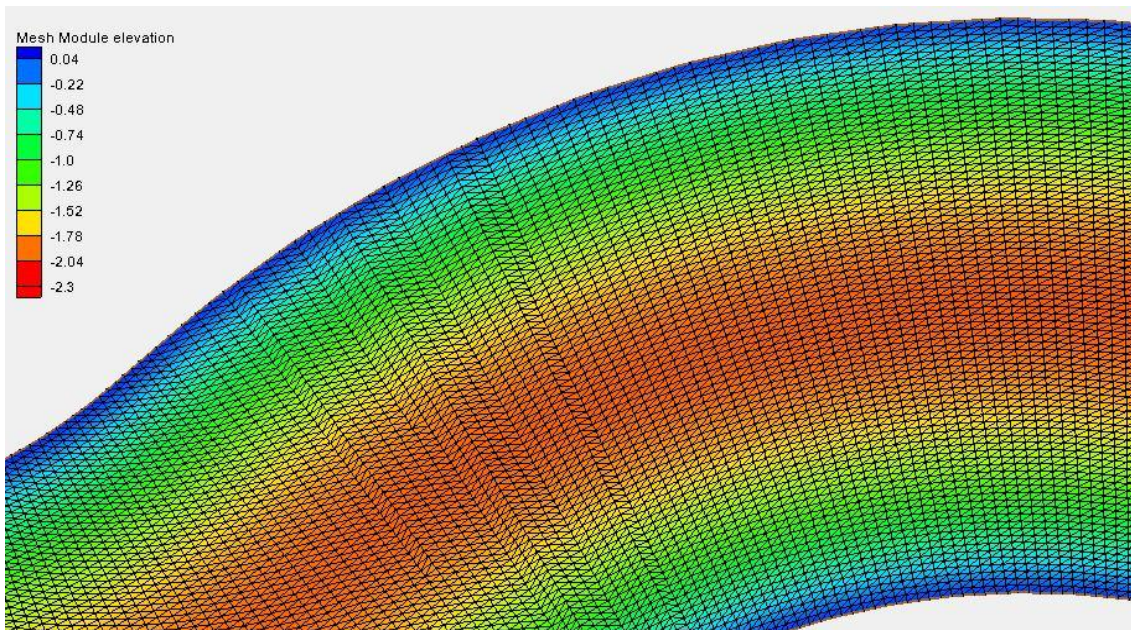
szakasz közepe látható a gödi gázlóval a 2. ábrán egy hajóútkitűző tervlapon, mely a Közép-Duna-völgyi Vízügyi Igazgatóság honlapjáról ([www.kdvvizig.hu](http://www.kdvvizig.hu)) letölthető.

## IV.2. Rácshálóépítés

A rácshálóépítést a III.1 fejezetben már említett SMS (verzió: 11.0), az AutoCAD Civil 3D (2016), valamint a Microsoft Excel (2007) szoftverekkel végeztem.

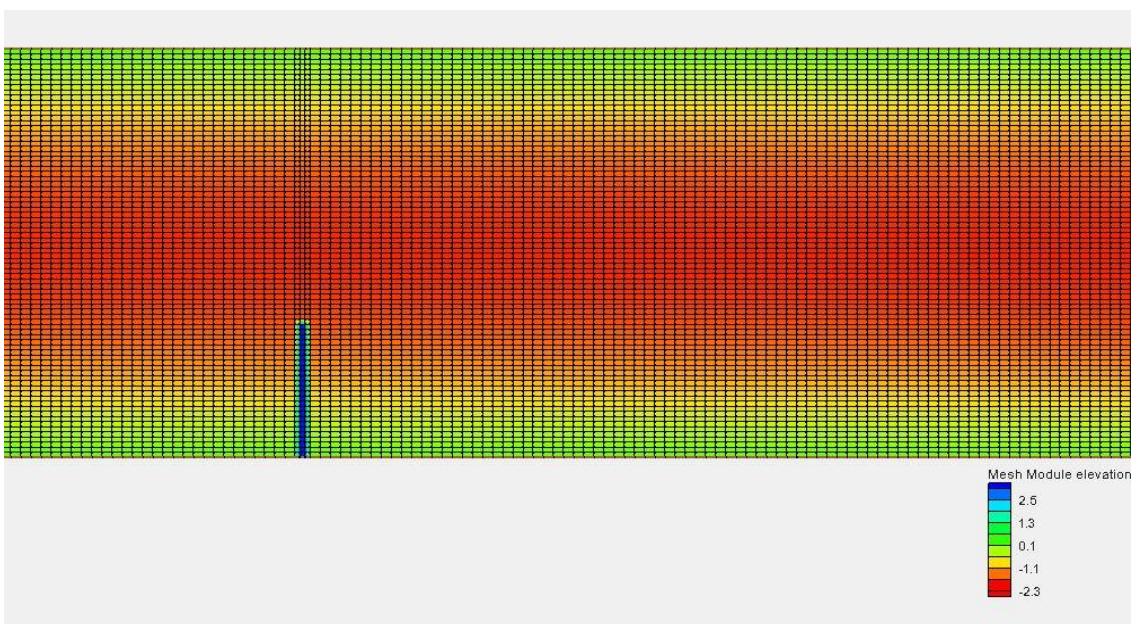
- Excelben számítottam ki a mederszinteket a leendő rácspontok helyén (kb. 5 m × 10 m-es számítási cellákat tervezve), illetve később itt hoztam létre a tereppontokat tartalmazó fájlt is.
- Az AutoCAD-del a meanderező csatorna ívét rajzoltam meg, egy törtvonalra érintő íveket illesztve. Ezt 5000 m hosszúra léptékeztve létrejött a meder középvonala, melyet ±200 m-re párhuzamosan eltolva kialakult a meder két partvonala. Innen vettem ki koordinátákkal együtt azokat a pontokat is (mind a meanderező, mind az egyenes csatorna esetében), amelyeknek korábban az Excelben a magasságait meghatároztam. Ezekhez kétféleképpen is hozzájuthattam: vagy a középvonal mentén útmenti kiosztással 10 méterenként létrehozott keresztmetszvényeken, vagy a párhuzamos eltolással 5 méterenként létrehozott hossz-szelvényeken. Bármelyik módon is teszünk, a szelvényeken a szükséges darabszámú COGO, azaz *Coordinate Geometry* pont létrehozása után a ponthalmaz exportálható (a sima AutoCAD-pontok nem azok), ezután hozzárendelhető a számított magasságokhoz, így jött létre a tereppontfájlom.
- SMS-be betöltöttem a meanderező csatorna két partvonalát az AutoCAD *.dxf* formátumával, valamint az imént létrehozott pontfájlt *Scatter Set*-ként, ez lett a domborzati modellem. Ezután a BSc-s diplomamunkám 4.1.1. fejezetében (Füstös, 2017) részletesen ismertetett módon folytattam a hálószerkesztést. Hogy a két szoftverhez használt, elemeinek alakjában különböző rácsháló vízszintes értelemben megegyezzen az összevethetőség végett, strukturált négyszög-rácshálót szerkesztettem, amit a SSIIM-hez való kimentés után egy paranccsal háromszöghálóvá lehet formázni (Mesh modulban *Elements >> Split Quadrilaterals*), ennek során minden négyszögből két háromszög lesz. Ezután még egyszer újra kell számozni a csomópontokat, végül kimenthető az AdH-hoz szükséges háló is, melynek még a kiterjesztését, mint korábban szó esett róla, a használat előtt át kell írni *.2dm*-ről *.3dm*-re.





3. ábra: A meanderező csatorna háromszöghálójának egy részlete

A 3. és 4. ábra mutatja a rácshálók egy-egy részletét. (Ha az egész rácshálót ábrázolnám ilyen méretű képen, összefolynának a vonalak.)



4. ábra: Az egyenes csatorna négyszöghálójának egy részlete a sarkantyú környezetében

### IV.3. Futtatás, utófeldolgozás

Mindhárom rácshálón három állapotra, kis-, közép- és nagyvízi viszonyokra végeztünk permanens szimulációt, két- és háromdimenziós megközelítéssel, azaz összesen 18 szimuláció történt. Minden futtatást fix mederben végeztünk, azaz nem számoltunk hordaléktranszportot, a sematikus medrek fenékszintjeit semmi hasonló előzetes hatást nem feltételezve,

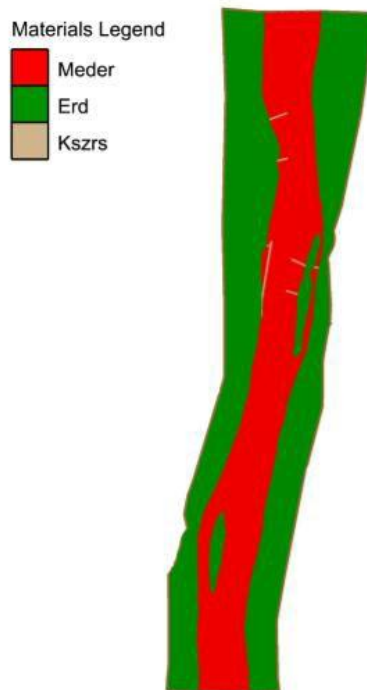


szimmetrikus parabolaszelvénnyel alakítottam ki. A peremfeltételként használt vízhozam-vízszint párokat különböző vízjárásoknál a 2. táblázat mutatja. A továbbiakban már csak a vízrajzi állapot neveivel fogok hivatkozni az egyes futtatásokra.

Peremfeltételek	Sematikus csatorna			Gödi szakasz		
	Kisvíz	Középvíz	Nagyvíz	Kisvíz	Középvíz	Árvíz
Befolyás: Q [m <sup>3</sup> /s]	1100	2200	5000	1150	1690	6100
Kifolyás: z [m] / Z [mB.f.]	2	3	5	98,16	98,86	105,4

2. táblázat: A modelleket meghajtó peremfeltételek

A sematikus csatornákra vonatkozó vízszinteket úgy választottuk meg, hogy kisvíznél a sarkantyú egyértelműen kiemelkedjen a vízfelszínből (3 m-es koronaszint), középvíznél épphogy átbukjon felette az áramlás (a vízfelszínesést figyelembe véve kb. 10-20 cm-es vízmélység alakul ki ekkor a sarkantyú felett), nagyvíznél pedig bőven víz alatt legyen. A gödi szakasz Q-Z párjai Tökési Nikoletta diplomamunkájában szereplő értékek, melyeket rendelkezésre álló adatok hiányában HEC-RAS 1D modellezéssel határozott meg. (Az árvízi értékek a 2013-as árvíz értékei.) Az ide vonatkozó érdességeket is az ő javaslatai alapján vettük fel:  $n=0,09$  a mederben és  $n=0,50$  a kőszórásokon és az erdős területeken. Ezek területi eloszlása látható az 5. ábrán. A sematikus medrekben mindenhol  $k=40 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$  ( $n=0,025$ ) a simasági tényező.



5. ábra: A gödi szakasz érdesség-kategóriái (forrás: Tökési, 2016)

A szimulációkat a befogadó tanszék nagy kapacitású számítógépén futtattuk, mely i9-7980xe 18 magos 4,2 GHz-es processzorral rendelkezik, jóval nagyobb teljesítményre képes, mint egy átlagos személyi számítógép, vagy laptop. Egy 2D modellváltozat ca. 80.000 számítási cellával nagyjából 3 perc alatt, míg egy 3D-változat ca. 440.000 cellával másfél óra alatt konvergált. (A 3D változat vízszintes cellaszáma fele a 2D-nek – ahogy azt a IV.2. fejezetben említettem, – azonban függőlegesen 11 réteg került definiálásra).

Mindkét szoftvernek van Tecplotba beolvasható eredményfájlja, melyekben az alábbi paramétereket listáztattuk:

AdH:

- $x, y$  koordináták
- mederfenékszintek
- vízfelszín, vízmélység  $h$
- $x$  és  $y$  irányú sebességvektorok ( $u$ ,  $v$ )
- maradványtag

SSIIM:

- $x, y, z$  koordináták
- $x$ ,  $y$  és  $z$  irányú sebességvektorok
- $k$  és  $\varepsilon$
- vízfelszín, vízmélység
- mederfenékszintek
- másodlagos áramlási szög
- fenék-csúsztatófeszültség
- mélységátlagolt sebesség

Ahogy a fentiekből is látszik, a 2D eredmények még utólagos számításokat igényeltek ahhoz, hogy minden tekintetben összevethetőek legyenek a 3D eredményekkel. Ez alapvetően a Tecplotban is elvégezhető, megadhatunk egyszerűbb egyenleteket a betöltött paraméterekkel (*Data >> Specify Equations*), így a 2D mélységátlagolt sebességet kiszámíthattam az  $x$  és  $y$  irányú sebességek négyzetösszegének gyökeként. Viszont csak egész számú hatvány értelmezhető, a fenék-csúsztatófeszültség számításához használt Manning-képletet a vízmélység 1/3-os kitevője miatt nem lehetett beleírni. A formula a következő:

$$\begin{pmatrix} \tau_{bx} \\ \tau_{by} \end{pmatrix} = \rho * \frac{g * n^2}{h^{\frac{1}{3}}} * \begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} * \sqrt{u^2 + v^2},$$

ahol

- $\tau_{bx}$  és  $\tau_{by}$  a feszültség  $x$  és  $y$  irányú komponense,
- $\rho$  és  $g$  a víz sűrűsége, valamint a nehézségi gyorsulás,
- $n$  pedig a Manning-féle érdességi tényező.

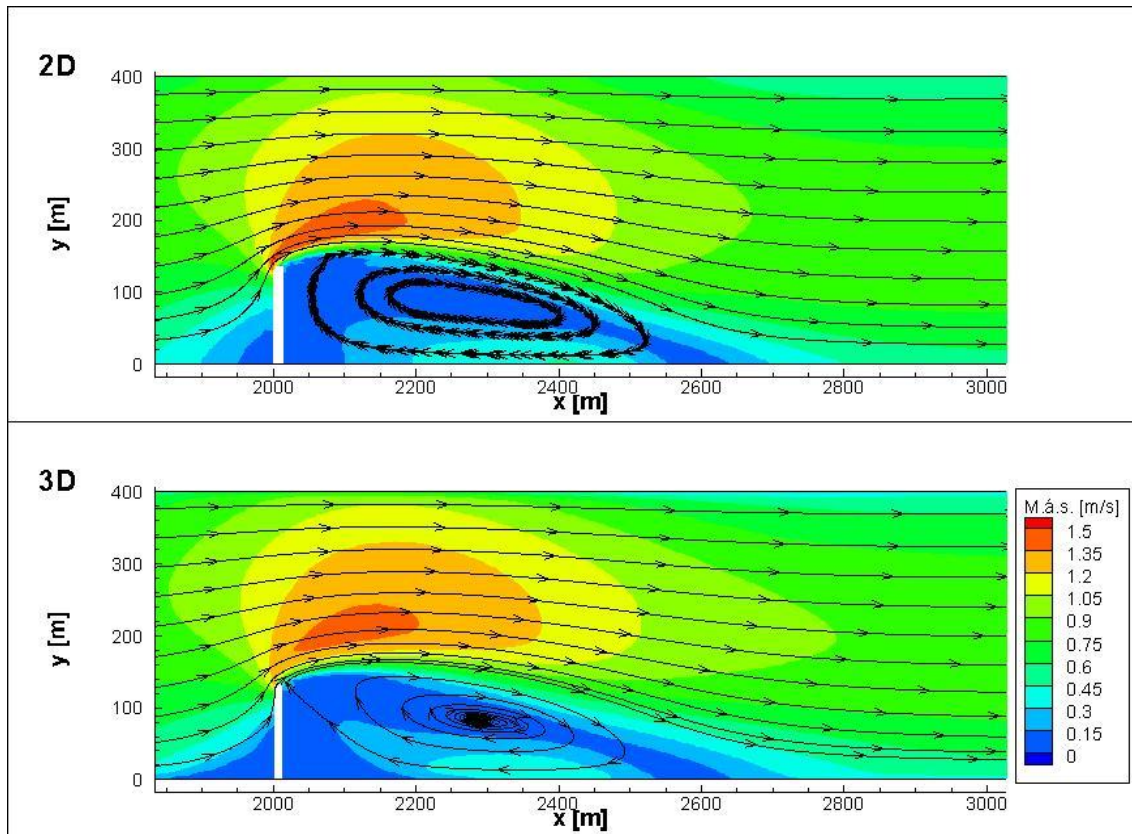
Mivel nem volt szükség az AdH összes eredmény-paraméterére, ezért már a Tecplotba betöltés után exportáltam ki a szükséges változókat ( $x$ ,  $y$ ,  $h$ ,  $u$ ,  $v$ ), Excelben kiszámítottam a fenék-csúsztatófeszültséget, majd ezt visszamásolva az exportfájlba a fejléc apró módosításai után az egészet visszaolvastattam a Tecplotba.

## V. Modelleredmények értékelése

Az eredmények megjelenítéséhez a fentebb már említett Tecplot 360 2012R1 szoftvert használtam, mely licenzhez kötött program, ezt a Tanszék biztosította. Az összevetést a két- és háromdimenziós eredmény együttes megjelenítésével végzem, egyező színskálával, mely a 3D ábrarész mellett jelenik meg. Helytakarékosság végett egy-egy paraméterről nem minden ábrát illeszték be ide, a szövegközből kimaradtakat a Függelékben csatolom. Az elsődlegesen összevetendő paramétereim a mélységátlagolt áramlási sebesség (az ábrák jelmagyarázatán *M.á.s.*), a fenék-csúsztatófeszültség (az ábrák jelmagyarázatán *tau*) és a vízmélység, de esetenként egyéb paraméterekre is kitérek. Valamennyivel precízebb ábrázolást tesz lehetővé az eltérések különbségtérképekkel való bemutatása, melyeket minden vízjárásra, fő paraméterenként, a 3D eredményeket a 2D-ből kivonva (tehát a skála szerinti pozitív színezésű területeken a 2D, a negatívokon a 3D adott magasabb értékeket) készítettünk el. Egy-egy paraméterre a külön vízjárások térképeit az *y* (sematikus csatornák) vagy az *x* (gödi szakasz) tengely mentén eltolva, egymás mellett, azonos skálával mutatom be. A különbségtérképek bemutatását követően számszerű becslést adok a számított paramétereloszlások közötti eltérések területi átlagára is.

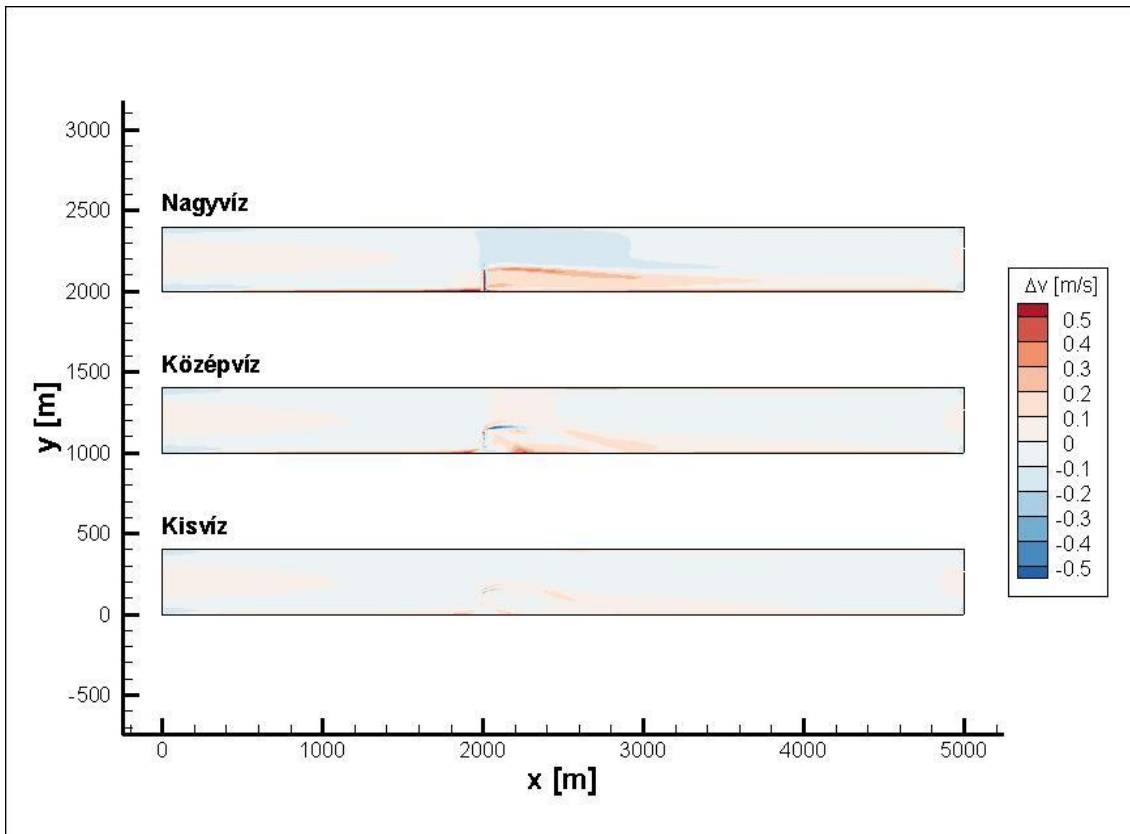
### V.1. Egyenes csatorna, sarkantyúval

Alapvetően mindenhol jó egyezéseket kaptam, kiváltképpen kis- és középvízes állapotban. Az értékek minimálisan eltérnek, de a kontúrok, formák, a mezők kiterjedése mind nagyon hasonlóak. A sarkantyú kontrakciós hatása, és az emiatt megnövekedő sebességek és feszültségek, a kialakuló limány (visszaforgó áramlás) mindkét megközelítésben szépen kirajzolódnak (a 6. ábrán éppen kisvízes állapotban). A sarkantyú elhelyezkedését kisvíznél fehér téglalap jelöli. A mélységátlagolt sebességet és a fenék-csúsztatófeszültséget a mű közelebbi környezetében mutatom be, mert ott alakulnak ki olyan összetett áramlási struktúrák, amelyek miatt esetleg eltérhet a két megközelítés eredménye.



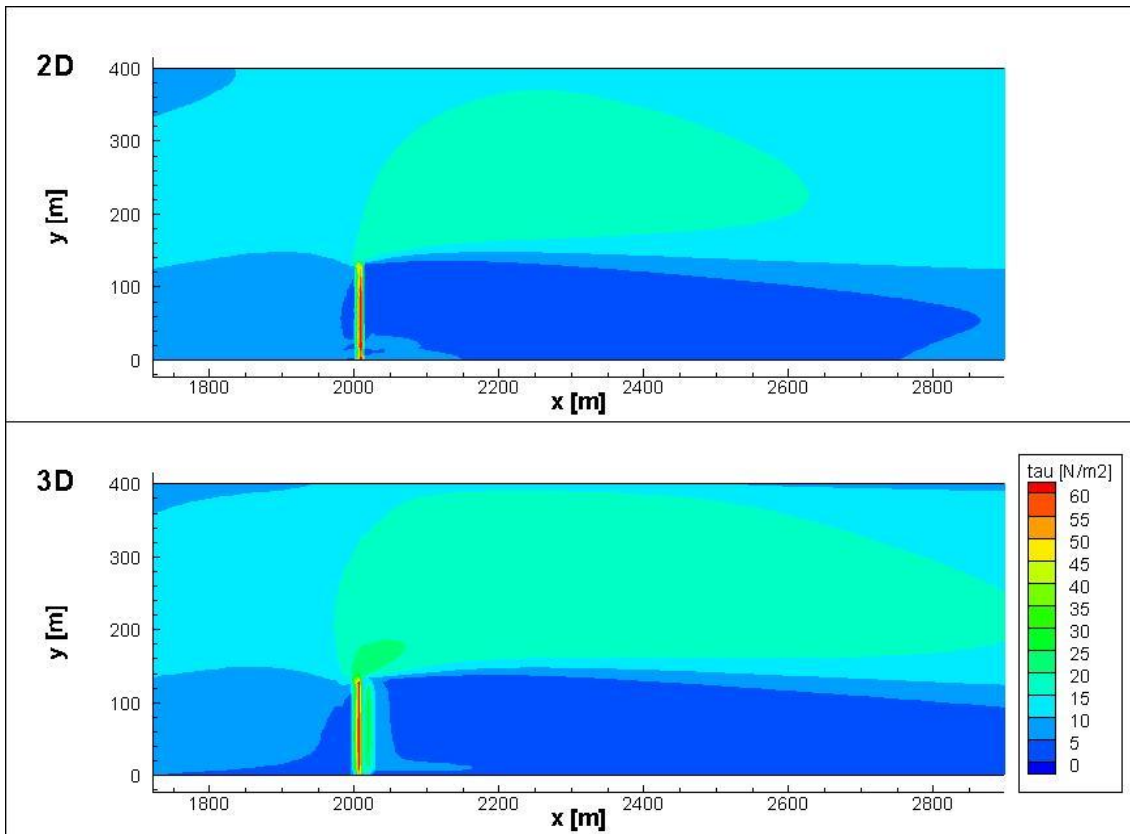
6. ábra: Mélységátlagolt sebességek áramvonalakkal kisvízes állapotban (egyenes csatorna, sarkantyúval)

A mélységátlagolt sebességek terén kis- (6. ábra) és középvíznél (Függelék, 24. ábra) a mezők nagyon hasonló mintázatot mutatnak, szabad szemmel alig érzékelhető különbség. Az eltéréseket jól értékelhető módon ezért különbségtérképen keresztül (7. ábra) mutatom be. Az áramvonalak (melyek esetében a nyílfejek egymás közötti távolsága a sebesség nagyságával arányos) szépen láttatják a sarkantyú mögötti tipikus, visszaforgó struktúrát, a limányt, illetve a középvízes 3D ábrán (Függelék) egy második, ellentétes körzés is látszik. Ennél messzemenőbb következtetéseket az áramvonalakból nem igazán vonhatunk le, ugyanis ezeket a program az  $x$  és  $y$  irányú sebességvektorokból ( $u$  és  $v$ ) generálja, melyek a 2D megoldás esetén a mélységátlagolt vektorok, a 3D esetében azonban egy adott szintben kialakuló sebességvektorok (a SSIIM-ből bármely cellaszinten kiirathatók az eredmények, e fentiek a vízfelszín szintjéről származnak, a fentebb említett második visszaforgás tehát a vízfelszínen történik). A legnagyobb mértékű eltérések nagyvízi állapotban (Függelék, 25. ábra) figyelhetők meg, ahol helyenként a 0,5 m/s-ot is meghaladja a hiba mértéke (7. ábra). Mindhárom vízjárásállapotban a limány és a fő áramlás közötti nyírózóna környezetében alakulnak ki a legnagyobb eltérések, melyek a nyírózóna eltolódására utalnak.



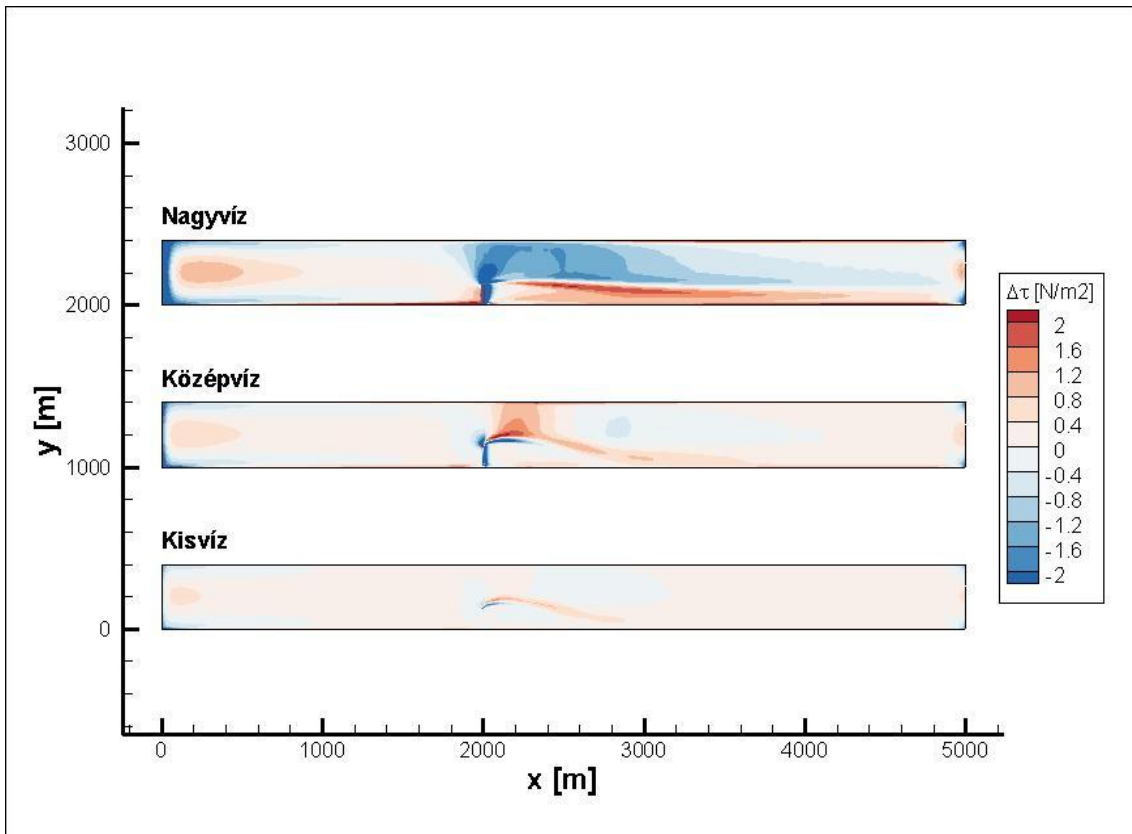
7. ábra: A mélységátlagolt sebességek 2D és 3D futtatásból eredő különbségmezői (egyenes csatorna, sarkantyúval)

A **fenék-csúsztatófeszültségek** mezői között kisvízes állapotban (Függelék, 26. ábra) elhanyagolható a különbség, a kontúrok formája az ugyanezen vízjáráshoz tartozó mélységátlagolt sebességekére (6. ábra) hajaz. Középvízes állapotban (Függelék, 27. ábra) ugyancsak a sarkantyú celláinál van a szembeötlő eltérés, a mű fölött foltokban alábecsüli a 2D megoldás a 3D értékeit, ugyanakkor előbbi modellben a sarkantyú csúcsánál lévő cellában erősen kiugró,  $115,9 \text{ N/m}^2$  értéket kaptam, ez az ottani alig több mint 10 cm-es vízszint és az ezzel egyidejű 2-3 m/s-os sebesség Manning-képletbe való behelyettesítésének eredménye.

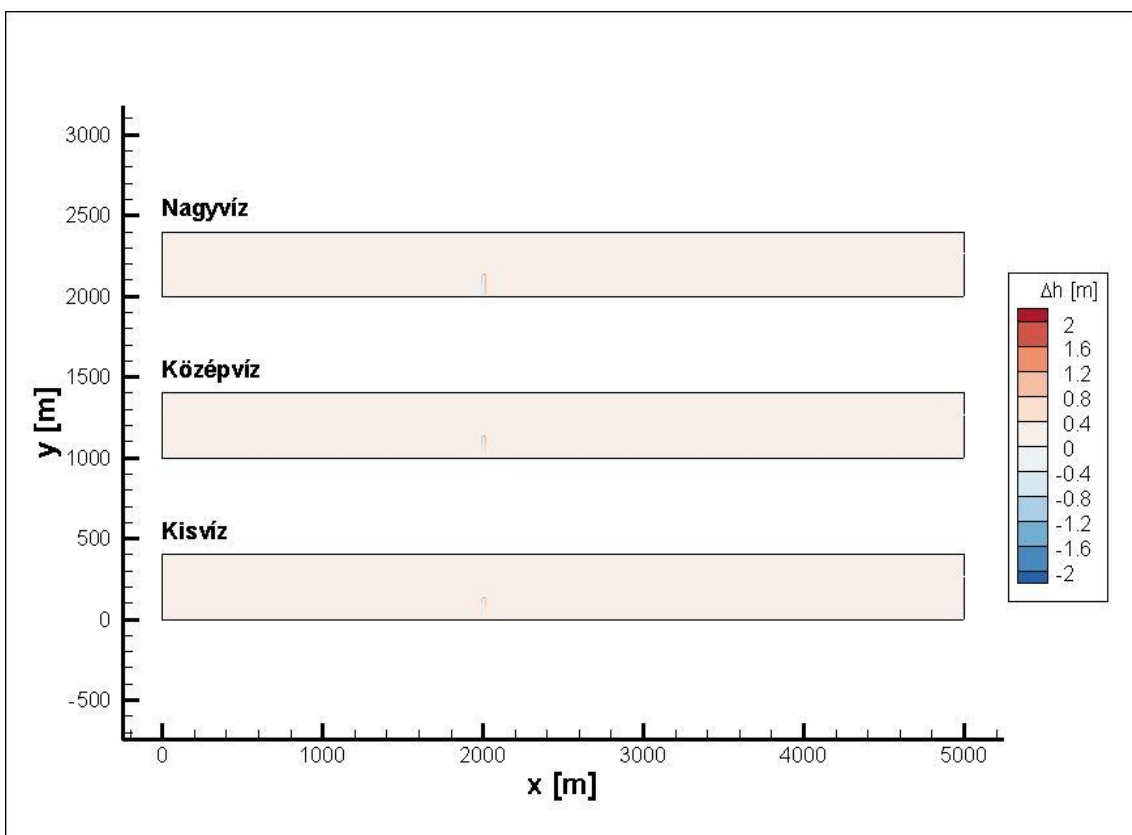


8. ábra: Fenék-csúsztatófeszültségek nagyvízi állapotban (egyenes sarkantyúval)

A nagyvízi futtatás feszültségmezőjéről (8. ábra) is úgy gondolom, hogy a struktúrát tekintve nem tér el számottevően a két- és háromdimenziós megközelítés, bár ez utóbbinál hosszabb a kontrakció okozta növekmény kiterjedése. Ami egyértelmű különbség, az a 3D modell által számított, a sarkantyú alvízi oldalán, azzal párhuzamos zóna, melynek ca. kétszeres feszültségértékei vannak az alvízi környezetéhez képest, ami jól kivehető a különbségtérképen is (9. ábra). Ez a következőképpen magyarázható: ahogy a sarkantyún átbukik a víztömeg, az túlnyomórészt lefelé áramlik tovább, a meder aljánál ível újra folyásirányba, később pedig feláramlik. A függőleges irányú áramlásokból kialakuló többletfeszültséget értelemszerűen csak a 3D modellel van lehetőség képezni, ahol az impulzusegyenlet mindhárom irányban megoldásra kerül. A mederfenékkal való „találkozás” történik a fentebb látható sávnál, a csóva eltérése nyomán alakulnak ki a nagyobb csúsztatófeszültségek. A fenék-csúsztatófeszültségek különbségtérképein hasonló mintázatok figyelhetők meg, mint az áramlási sebességek esetén, ez a két paraméter közötti szoros fizikai kapcsolatból adódik.



9. ábra: A fenék-csúsztatófeszültségek 2D és 3D futtatásból eredő különbségmezői (egyenes sarkantyúval)



10. ábra: A vízmélységek 2D és 3D futtatásból eredő különbségmezői (egyenes sarkantyúval)

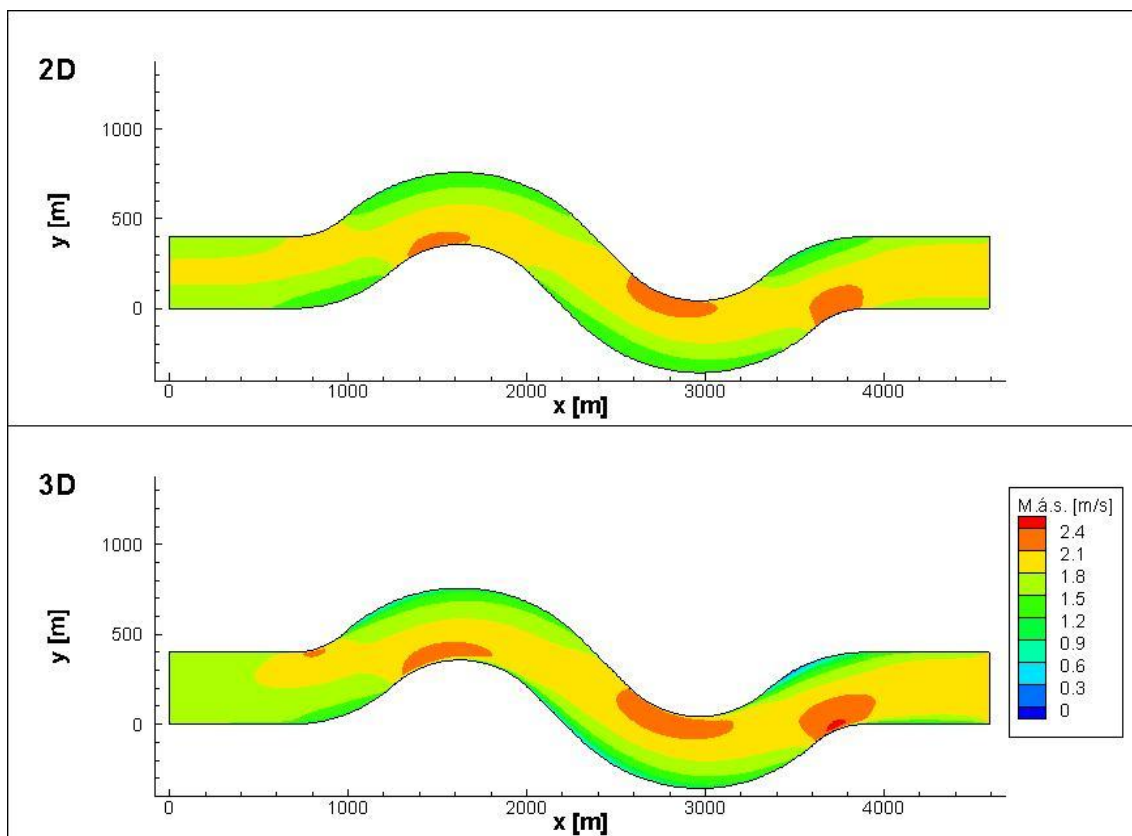


A **vízmélységek** terén a legkifogástalanabb az egyezés, általánosan elmondható, hogy a 2D kicsit nagyobb mélységeket ad, de ezek centiméteres nagyságrendű különbségek. A különbségtérkép a 10. ábrán látható, a további, ide tartozó ábrákat a Függelékben csatolom (Függelék, 28-30. ábrák).

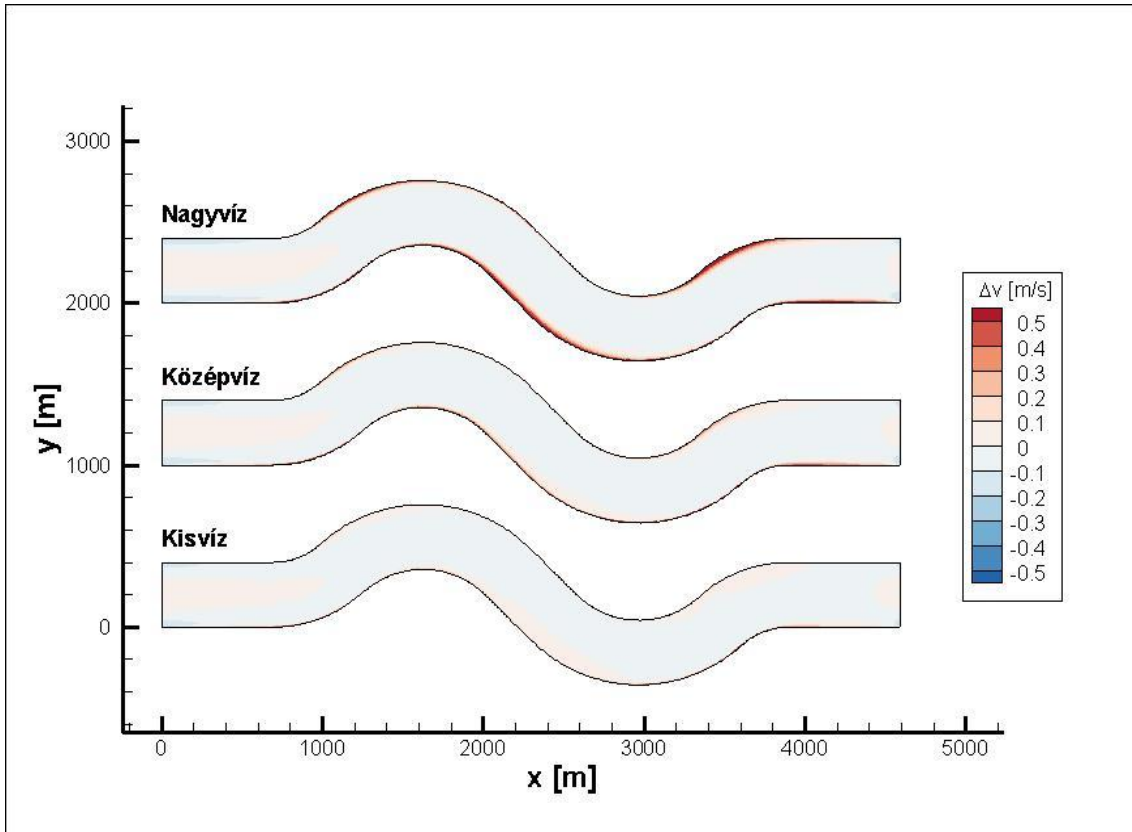
## V.2. Meanderező szakasz

Elmondható, hogy a sarkantyús szakaszhoz hasonlóan a meanderező szakasznál is jó globális egyezések születtek.

A **mélységátlagolt sebességek** esetén a 3D megközelítés minden vízjárásban szélsőségesebb értékeket ad, a lokális maximumok nagyobbak (bár csak pár cm/s-mal), a minimumok kisebbek. Utóbbi esetben megfigyelhetünk nagyobb, ca. 1 m/s-os eltérést is a nagyvízi állapotban (11. ábra), a homorú ívek kezdeteinél. Ezek a szekundér áramlások jelenlétére hívják fel a figyelmet, melynek matematikai leírása megköveteli a háromdimenziós megközelítést. A különbségtérképen (12. ábra) is a nagyvízi állapot szembeötlő, a másik két részen enyhébbek az eltérések. (Kis- és középvíz: Függelék, 31-32. ábrák)

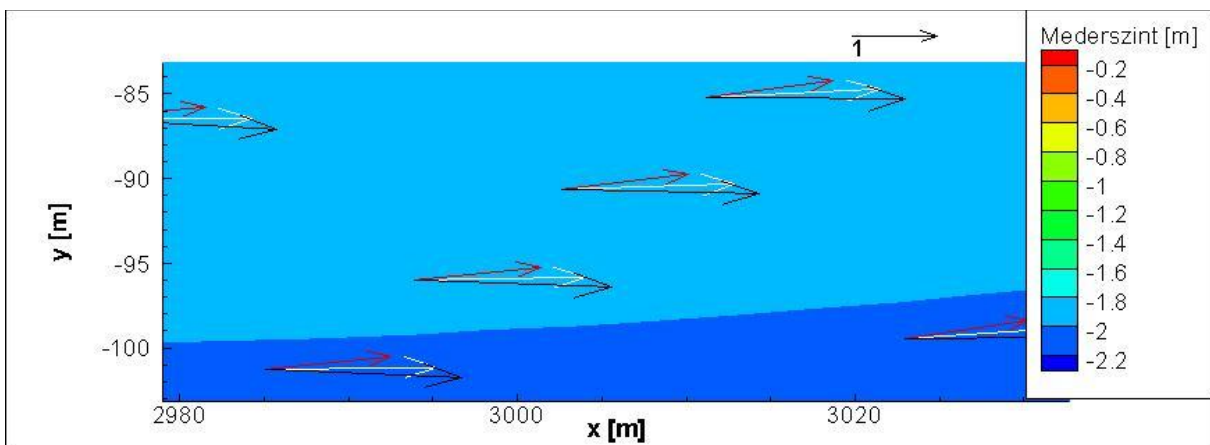


11. ábra: Mélységátlagolt sebességek nagyvíznél (meanderező csatorna)



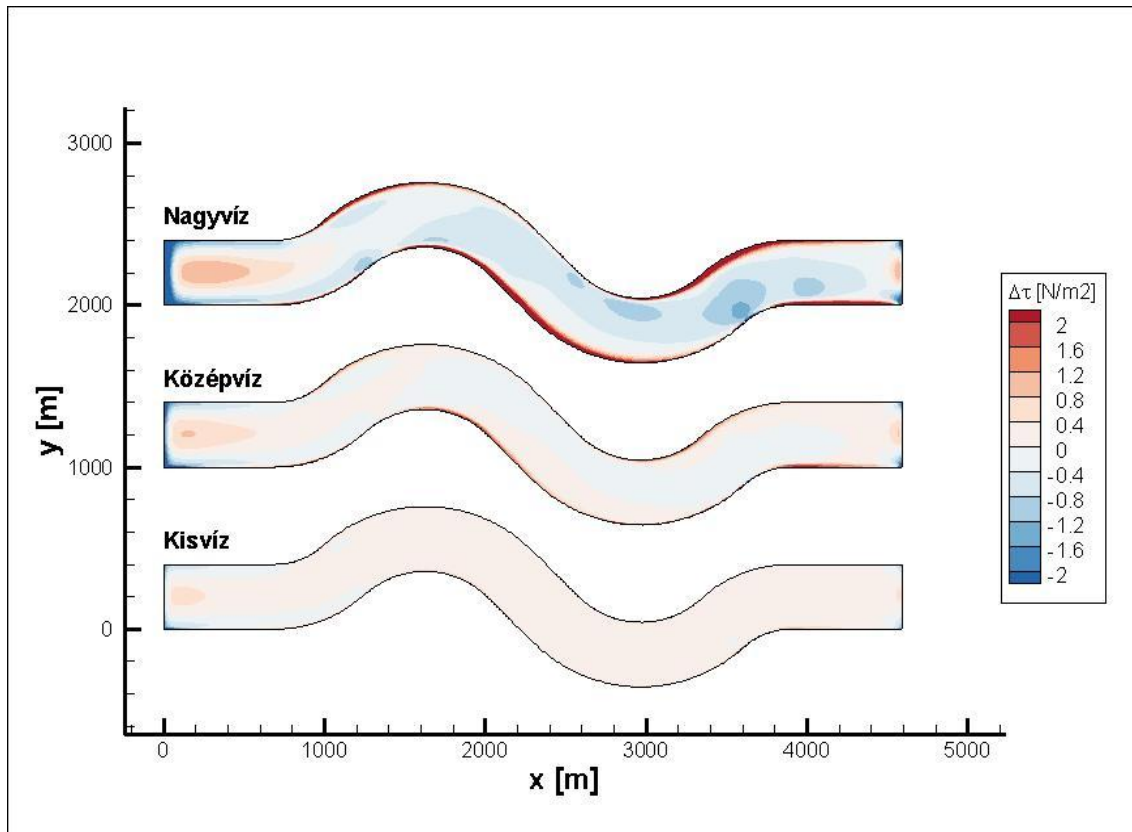
12. ábra: A mélységátlagolt sebességek 2D és 3D futtatásból eredő különbségmezői (meanderező csatorna)

A csavaráramlás megléte másképpen is kimutatható, a 13. ábrán egymással szögben álló sebességvektorokat látunk. Fehér színnel a 2D megközelítés vektorai, melyek mélységátlagolt sebességek, a meder vonalával párhuzamosak; a vörös nyilak a 3D futtatás eredményezte mederfenék-közeli vektorok; a feketék pedig a 3D futtatás felszíni vektorai. Az ábra a balos ívről készült, ahol folyásirányban nézve óramutató járásával megegyező irányú csavar alakul ki, és ez így is történik, a SSIIM alsó vektorai enyhén balra, a felsők enyhén jobbra húznak a párhuzamoshoz képest. A fejlécen az 1 m/s sebességhez tartozó referenciavektor áll.



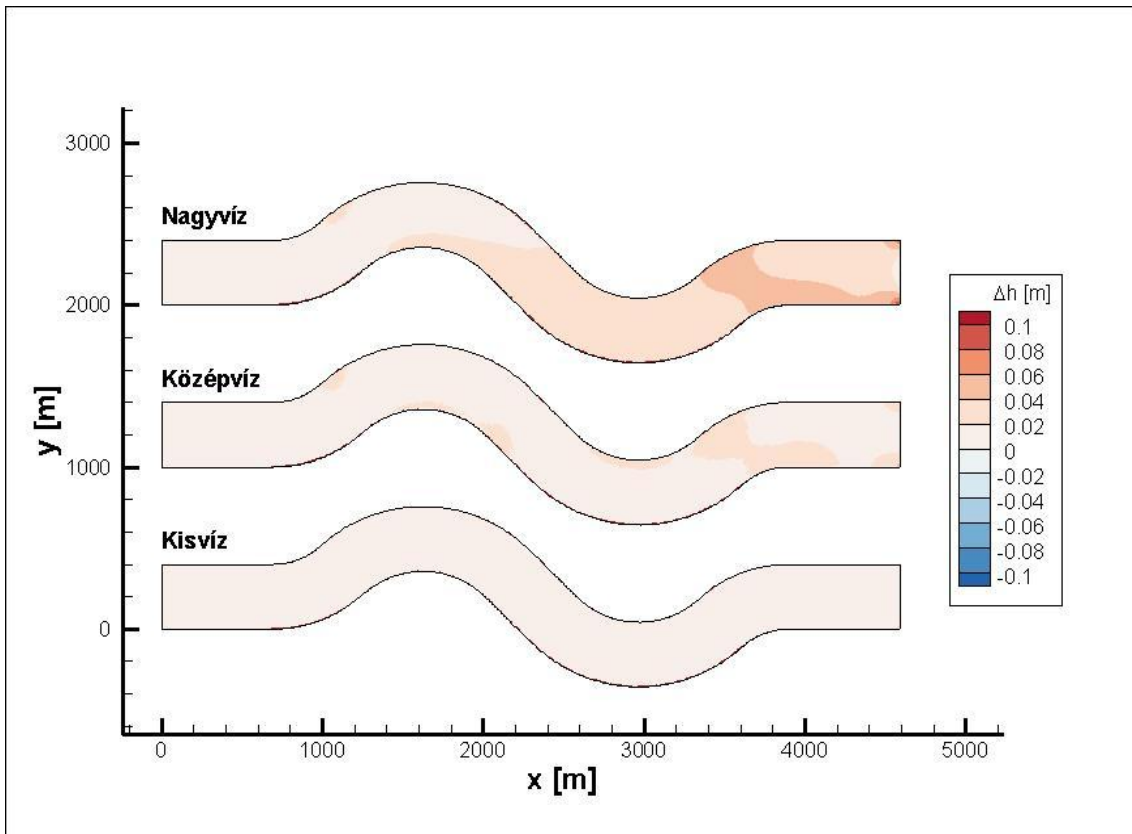
13. ábra: Sebességvektorok a meanderező csatornában, nagyvíznél (fehér: AdH; vörös: SSIIM fenékközeli; fekete: SSIIM felszínközeli)

A **fenék-csúsztató feszültségek** mezői globálisan jól egyeznek a kétféle megközelítésben, viszont erős lokális különbségek figyelhetők meg, főként a homorú partszakaszokat megelőzően, mely a mélységátlagolt sebességmezők jellegére emlékeztet. A be- és kifolyási peremeknél megjelenő nagy eltérések (14. ábra) a numerikus áramlásmodellekre jellemző peremhatással magyarázhatók – a 2D és 3D megközelítés esetén másként kerültek megadásra a peremfeltételek. Bár jelen esetben ezek a hibák lényegében figyelmen kívül hagyhatók, mégis felhívják a figyelmet a megfelelő modellépítés fontosságára.

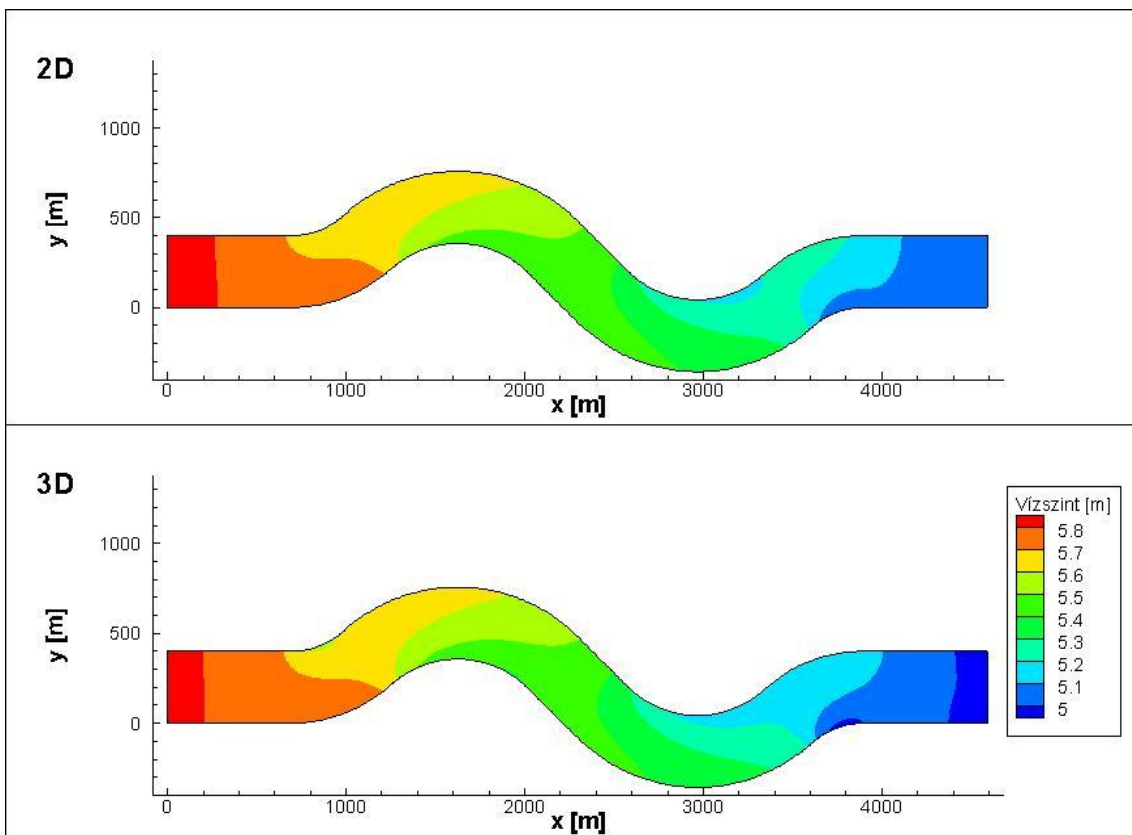


14. ábra: A fenék-csúsztatófeszültségek 2D és 3D futtatásból eredő különbségmezői (meanderező csatorna)

A meanderező csatornánál is a **vízmélységek** (Függelék, 36-38. ábrák) esetében adódott a legkisebb eltérés a két- és háromdimenziós számítás eredményei között, a különbségmezők a 15. ábrán láthatóak. E nem túl nagy eltéréstől arra következtethetünk, hogy a 2D megközelítés a 3D-hez hasonlóan képes lehet kimutatni az ívekben jellemző keresztirányú felszínesést. E feltételezés helyességéről a 16. ábra alapján győződhetünk meg.



15. ábra: A vízmélységek 2D és 3D futtatásból eredő különbségmezői (meanderező csatorna)

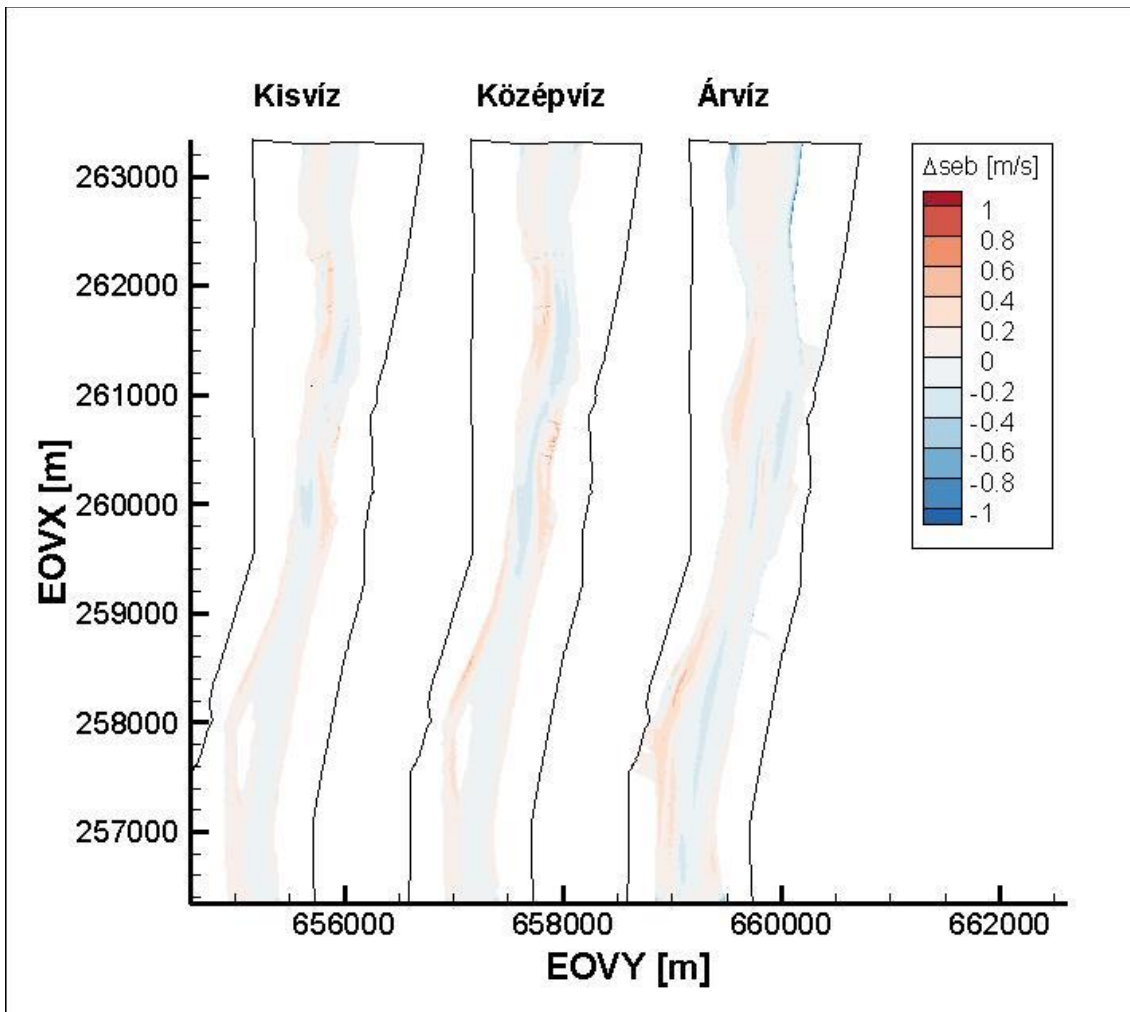


16. ábra: Vízfelszín nagyvíznél, keresztirányú felszíneséssel (meanderező csatorna)

### V.3. Gödi szakasz

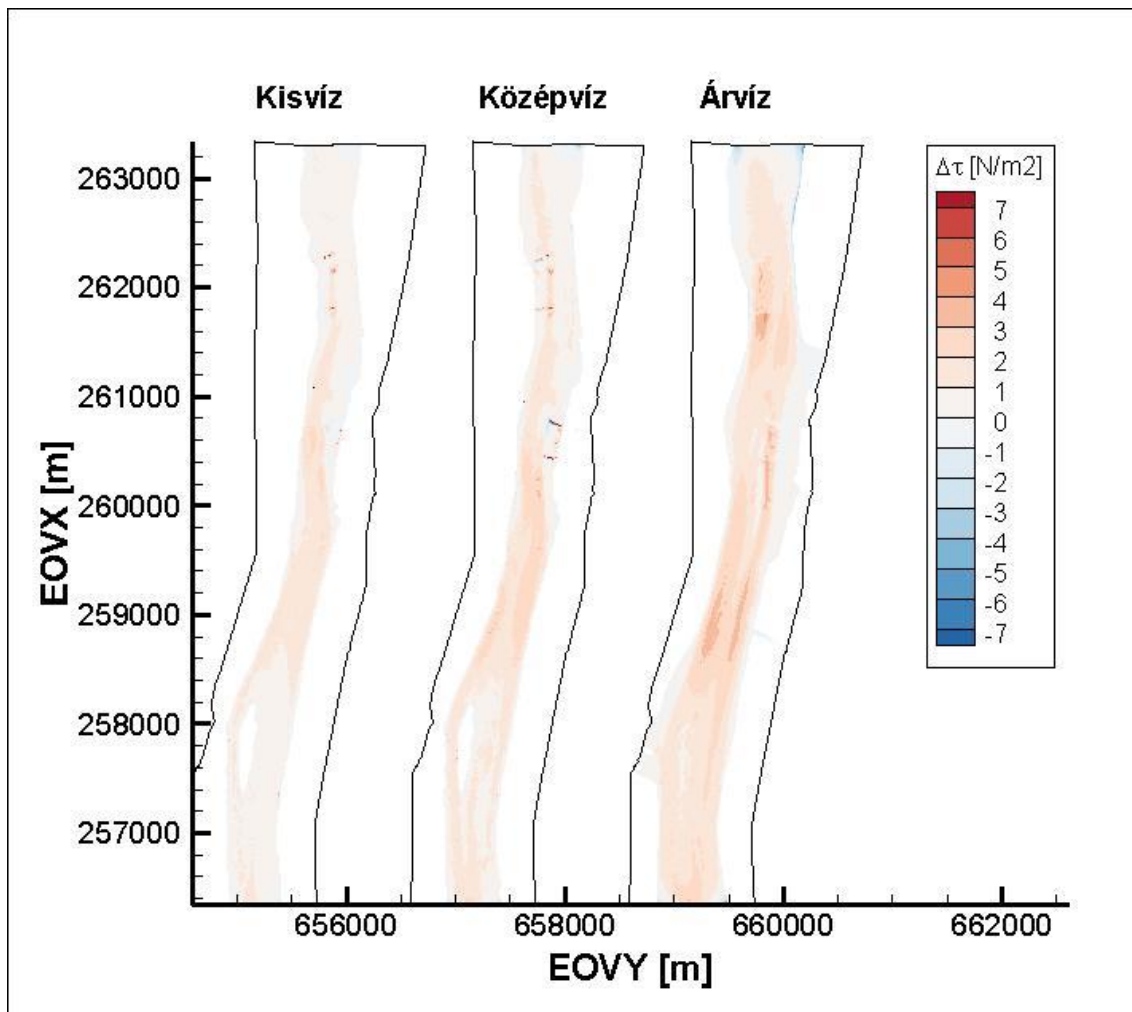
A valós mederben közel sem kaptunk olyan jó egyezéseket, mint a fentiekben, mely feltehetőleg a szakasz hosszabb, bonyolultabb mivoltának köszönhető.

A **mélységátlagolt sebességek** (Függelék, 39-41. ábrák) különbségtérképeit a 17. ábra szemlélteti. Látható, hogy a sarkantyúk okozta áramlási holtterben a 2D modell fölül-, a sodorvonal nagy részén pedig alulbecsli a 3D eredményeket.



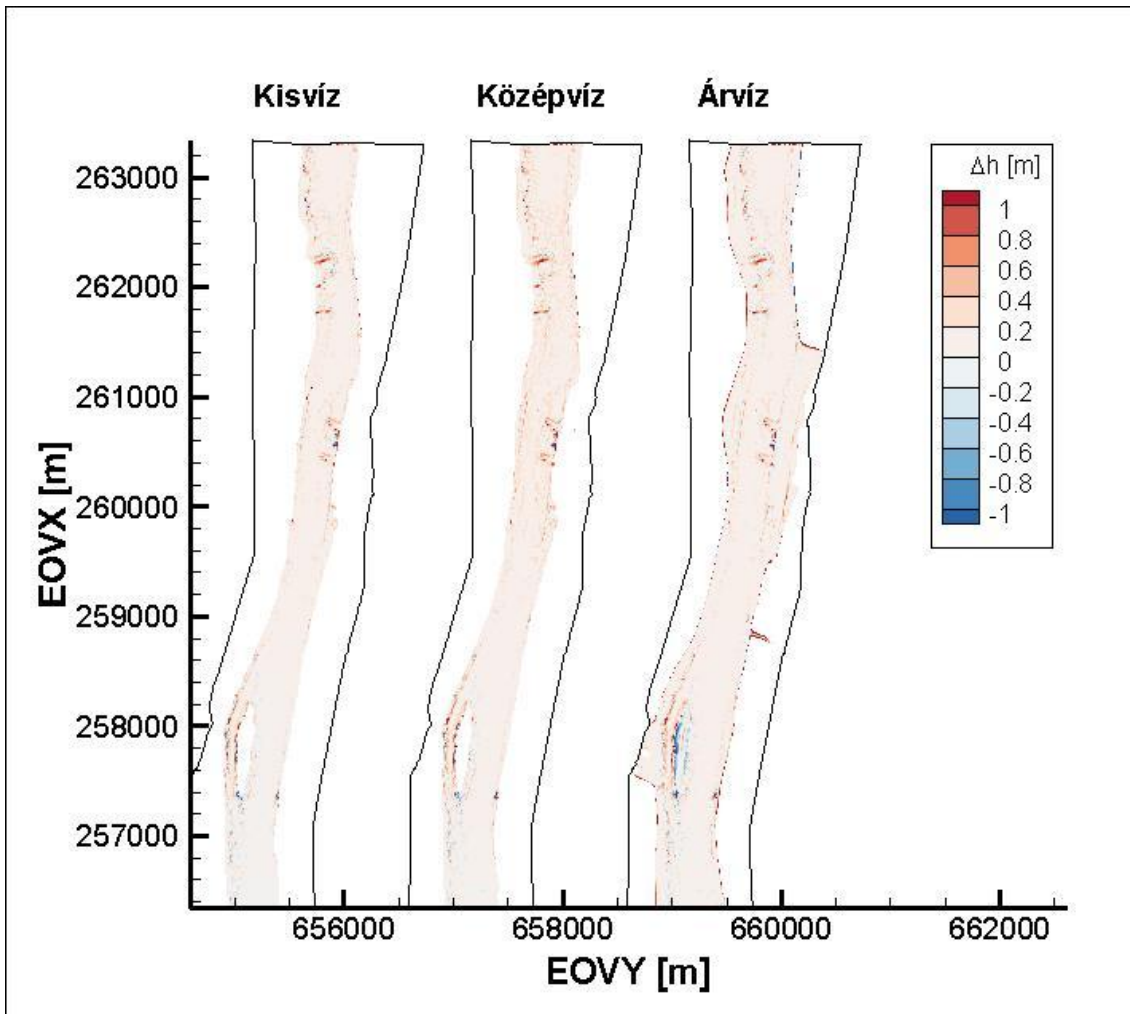
17. ábra: A mélységátlagolt sebességek 2D és 3D futtatásból eredő különbségmezői (gödi szakasz)

A **fenék-csúsztatófeszültségeknél** (Függelék, 42-44. ábrák) üt el egymástól legjobban a 2D és 3D számítások eredménye. Az indok a modelltartomány már korábban említett összetettebb mivolta lehet; bizonyosan több és bonyolultabb (akár függőleges irányú) áramlásforma jellemzi, mint egy fenti erősen egyszerűsített csatornát, amit a 2D modell a fenék-csúsztatófeszültség szintjén nem képes kimutatni. A Manning-képlet ebben az esetben többnyire a valósnál nagyobb feszültségeket eredményezett, ami a különbségtérképen (18. ábra) a három mező jellemzően halvány vörös színezetében nyilvánul meg.



18. ábra: A fenék-csúsztatófeszültségek 2D és 3D futtatásból eredő különbségmezői (gödi szakasz)

Mint a fiktív medreknél, itt is a **vízmélységek** (Függelék, 45-47. ábrák) hibája a legkisebb. A 19. ábrán az látszik, hogy az eltérések az éles geometriai változásokra korlátozódnak, pl. sarkantyú vonala, kimélyülés (a szakasz legészakabbi sarkantyúja mellett), a hullámtér és meder határa (az árvízi ábrarészen), modellhatár.



19. ábra: A vízmélységek 2D és 3D futtatásból eredő különbségmezői (gödi szakasz)

#### V.4. Az átlagos eltérések számszerűsítése

Bár a 2- és 3D megközelítések közötti eltérések szemléltetésére a bemutatott eredménymezők a legkézenfekvőbb opciók, mérnökként mégis igyekeztünk az eltéréseket változatonként és paraméterekként egy számszerű értékkel is jellemezni a könnyebb összevethetőség érdekében.

Az átlagos eltéréseket ( $\Delta$ ) a következőképpen számítottuk:

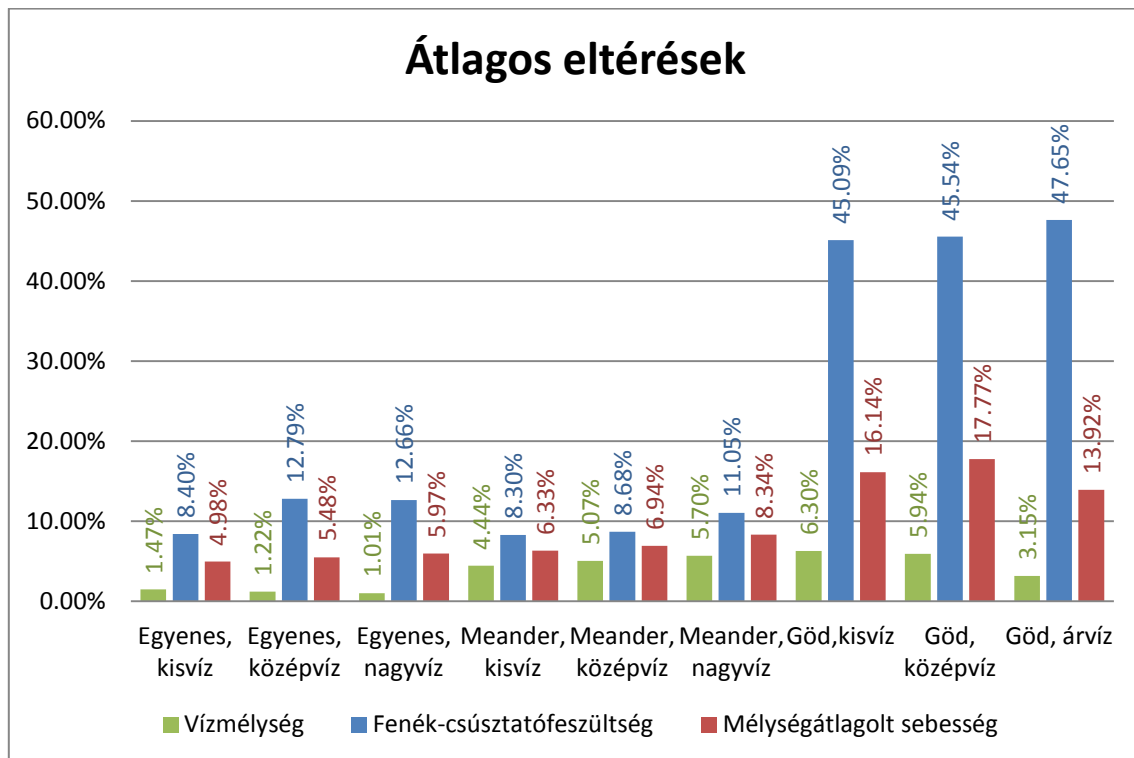
- a különbségtérképekből a három fő paraméterre adott egy-egy különbségmező; egy tetszőleges mező egy rácspontjának értékét jelölje  $dp_i$ , ebből előbb az eltérések négyzetét (mező), majd annak területi átlagát (egy szám az egész mezőre), és ennek négyzetgyökét vettük,
- majd az így kapott értéket normáltuk a 2D számításból adódó területi átlagértékkel.



Képlettel ( $n$  a rácspontok száma):

$$\Delta = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n dp_i^2}{n}}}{\frac{\sum_{i=1}^n p_i}{n}}$$

A fenti eltéréseket a három geometriai változatra, vízjárásokra és a vizsgált paraméterekre külön-külön mutatja a 20. ábra.



20. ábra: Átlagos eltérések a két- és háromdimenziós modellek között

A sematikus csatornák esetén a vízmélység és az áramlási sebesség eltérései minden esetben 10% alatt maradnak, de a fenék-csúsztatófeszültség – mely a 2D modell esetén utólagosan került számításra – hibái sem haladják meg a 13%-ot. A gödi szakasz eltérései azonban rámutatnak, hogy a relatíve kis hibák valószínűleg nagymértékben köszönhetőek a sematizálásnak. A meanderező csatornában minden paraméter eltérése a betáplált vízhozammal nő, míg az egyenes csatornánál ez csak a mélységátlagolt sebességekre igaz, a vízmélység hibája éppen fordítva változik, a fenék-csúsztatófeszültségek különbségének pedig középvíznél van a maximuma (bár éppcsak 0,1%-kal). Előbbi okának a csatorna (sarkantyú ellenére is) áramlástanilag egyszerűbb szerkezetét tartom, míg utóbbi egy, a 2D feszültségek utószámításakor adódó, kiugró értékű cella miatt alakulhatott így (erről részletesebben írtam korábban). A gödi szakasznál teljesen elvész a fenti megfigyelés



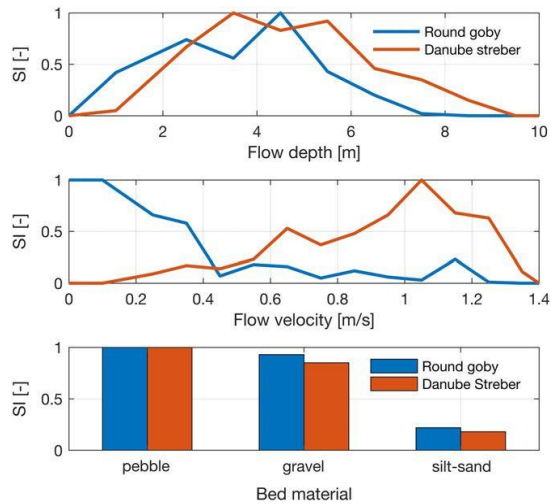
érvényessége, valamint a fenék-csúsztatófeszültségek hibái is igen kiugróak, mely okának a szakasz életszerűbb, azaz morfológiailag komplexebb mivoltát tartom.

### V.5. Élőhelyhidraulikai értékelés

Az előzőekben a két- és háromdimenziós numerikus modellezési megközelítések közötti eltéréseket értékeltük az élőhelymodellezés szempontjából legfontosabbnak vélt hidrodinamikai paramétereken keresztül. Jelentős lokális, többször globális eltéréseket is tapasztaltunk, a vizsgált paraméterek közül a fenék-csúsztató feszültség bizonyult a legérzékenyebbnek. Ezek alapján azonban nem lehet egyértelmű következtetéseket levonni az élőhelymodellezésre vonatkozóan, így ilyen szemszögből is vizsgálatokat végeztünk.

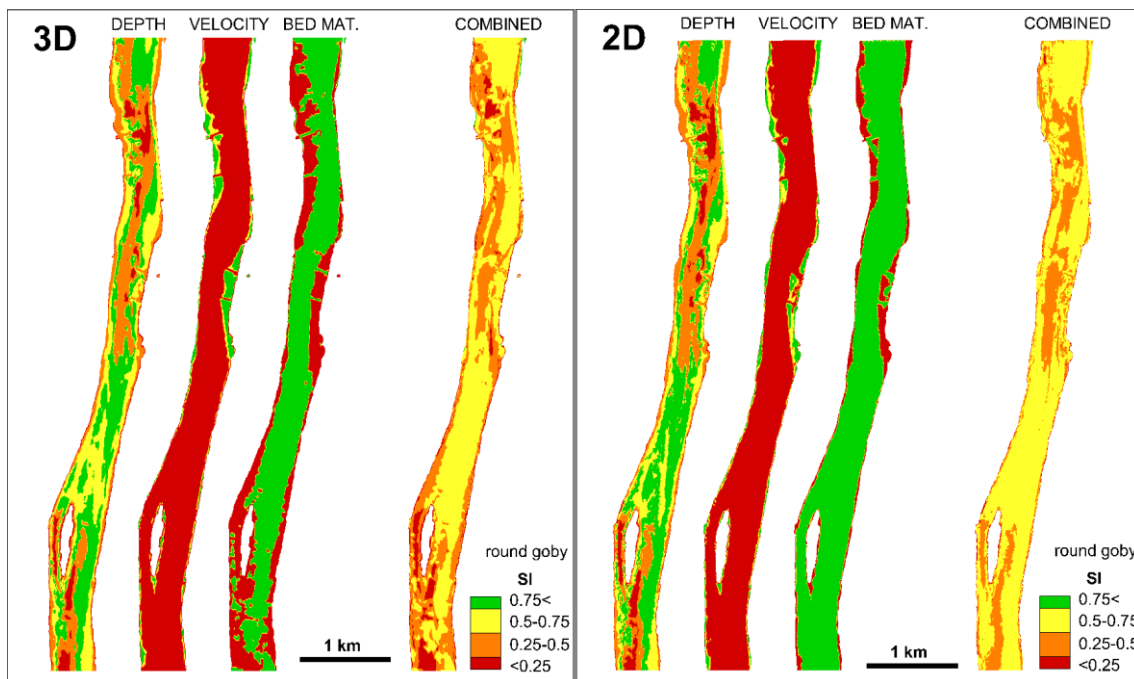
Esetünkben az ökohidraulikai számszerűsítést konzulenseim egy korábbi, az irodalomkutatás során már ismertett cikke alapján (Baranya et al., 2018), az abban leírt módszer mentén végeztük el, és a valós gödi szakaszra előállítottunk egy-egy, középvizes állapothoz tartozó **élőhely-megfelelőségi különbségtérképet** a feketeszájú géb (*round goby*) (22. ábra) és a német bucó (*danube streber*) (23. ábra) számára. Ehhez a cikkben közölt SI-görbék (21. ábra) használtuk, melyek az egyes halfajok preferenciáit mutatják be 0-tól 1-ig terjedő skálán a három legfontosabb hidromorfológiai paraméter esetére (áramlási sebesség, vízmélység, mederanyag). A mederanyag területi eloszlásának meghatározását a fenti tanulmányban ismertett újszerű, hibrid módszerrel végeztük el, mely pontszerű terepi mederanyag-mintavételeken és numerikus áramlásmodellezésen alapul. A mederanyag jellemzésére három kategória került definiálásra (iszap-homok, kavics, kő) ezek területi eloszlását a modellezett fenék-csúsztatófeszültség mezők alapján határoztuk meg.

Mind a 2D, mind a 3D eredményeit mutató részábra bal oldalán külön áll egy-egy megfelelési mező csak az adott paraméterre (rendre vízmélység, mélységátlagolt sebesség és mederanyag), jobb oldalon pedig e mezők számtani átlaga látható, egységes skálával, ahol az érték minél közelebb áll 1-hez, annál jobban megfelel a halfajnak.

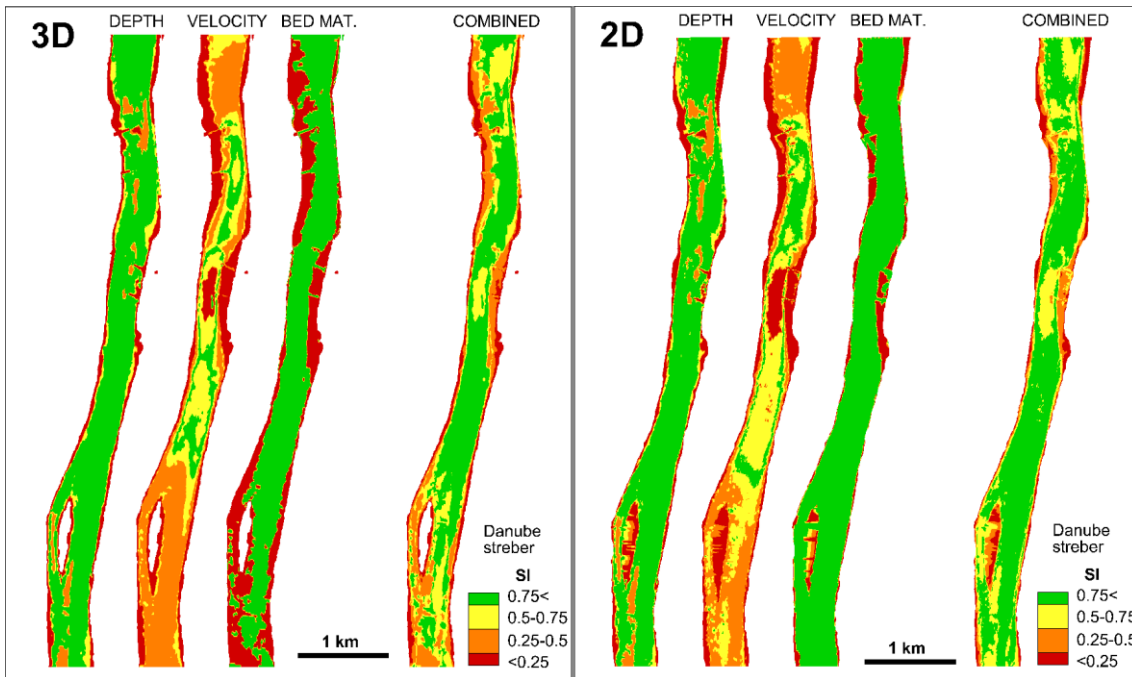


21. ábra: Megfelelőségi görbék a feketeszájú gébre (kék) és a német bucóra (vörös) (forrás: Baranya, et al., 2018)

A vízmélység- és sebességmezőkre számított SI mezők esetén jó egyezést várhatunk a korábbiakban bemutatott összehasonlítások fényében, a hangsúly legfőképpen a mederanyagmezők különbségén van, amik az igencsak nagy differenciát mutató fenékcsúsztatófeszültségekből erednek. A 22. ábrán látszik is, hogy a 2D mezőben jóval nagyobb méretű a feketeszájú gébnek a mederanyag szempontjából kiválóan megfelelő ( $SI > 0,75$ ) terület a 3D-hez képest. Ennek a hatása az összesített térképen is megjelenik: gyakorlatilag eltűnt a nem megfelelő ( $SI < 0,25$ ) minősítés, és a kevésbé megfelelőből ( $0,25 < SI < 0,5$ ) is kevesebb van, főként a szakasz déli határa környékén. A német bucó esetében (23. ábra) hasonló a helyzet – annyi különbséggel, hogy neki a szakasz összességében jobban megfelel, mint a gébnek –, több helyen is hibásan optimistább eredményt ad a 2D megközelítés.



22. ábra: Élőhely-megfelelőségi különbségtérkép a feketeszájú gébre



23. ábra: Élőhely-megfelelőségi különbségtérkép a német bucóra

A fenti mezők összehasonlítása alapján látható tehát, hogy 2- és 3D megközelítéssel számított áramlási sebesség- és vízmélységmezők közti eltérések hatása az élőhelyhidraulikai kiértékelésre minimális. A mederanyag-térképező módszertan alapját képező fenékcsúsztatófeszültség eloszlások már jobban észrevehető eltéréseket eredményeznek, azonban élőhely-modellezési szempontból ezeket az eltéréseket továbbra is elfogadhatónak tartom, különösen, ha figyelembe vesszük a hal-mintavételezés, illetve a megfelelőségi görbék meghatározásában lévő bizonytalanságot is.

## VI. Összefoglalás, következtetések

A fentiekben két fiktív és erősen sematizált, illetve egy valós folyószakaszon két- és háromdimenziós modellezést végezve tártam fel és elemeztem, milyen különbségeket eredményez a kétféle áramlásmodellezési megközelítés. Az összehasonlítás alapjául három olyan paramétert választottam, melyeket korábban több tanulmányban (pl. Baranya et al., 2018) bemutatott élőhely-osztályozási módszer szempontjából fontosnak ítélték, ezek a mélységátlagolt sebesség, a fenék-csúsztatófeszültség, valamint a vízmélység. Az eredmények jó része már a dolgozat során részletes értelmezésre és értékelésre került, a következőkben ismertetem a dolgozat legfontosabb eredményeit, valamint az azokból levonható konklúziókat.

A rácsháló felépítése szempontjából kompromisszum nélkül kevesebb erőfeszítést igényel az alkalmazott 2D modell, ez ugyanis strukturálatlan rácshálón számít, mint a legtöbb elérhető 2D modell. Ez rugalmasabb modellhatárolást tesz lehetővé, mint az alkalmazott 3D modell, melyekhez strukturált háló szükséges a maga korlátaival és megkötéseivel. Természetesen számos olyan 3D modell létezik, melyek rugalmasabb hálózást biztosítanak, azonban a 2D modellekkel ellentétben az ingyenesen elérhető 3D modellek száma igencsak korlátolt.

Számításaim során mindig fix medret feltételeztem, azonban valós körülmények közt ez csak ritkán megengedhető. Mivel az élőhelyhidraulikai vizsgálatokat rendszerint valamilyen folyószabályozási hatásvizsgálatra kívánjuk felhasználni, így a szabályozások konkrét hidromorfológiai hatásainak figyelembevétele is szükségessé válik (medergeometria és áramlási mező kölcsönhatása). A fenékközeli áramlások pontosabb leírása miatt a 3D modellektől jellemzően jobb megoldást várhatunk a mederváltozások becslésére. Fontos azonban hangsúlyozni, hogy bár a hordalékmozgás sokat kutatott téma, az ismereteink igencsak korlátoltak, még a legkorszerűbb hordaléktranszport modellek is nagy bizonytalanságot hordoznak magukban.

A 2- és 3D modellek számítási időigénye közt nagyságrendi eltérést tapasztaltunk. A jelen tanulmányban végzett permanens szimulációk a vizsgált rövid Duna-szakaszra még 3D-ben sem jelentettek elfogadhatatlan számítási igényt, azonban nagyobb lépékű (pl. magyarországi Duna-szakasz) vizsgálatok esetén a cellaszám drasztikus emelkedésével, valamint nempermanens peremfeltételek megadásával könnyen napos, hetes, vagy akár hónapos időigények is előfordulhatnak. Tudjuk tehát, hogy a 3D modellezés eredményei állnak

közelebb a valósághoz, a vizsgált lépték azonban mégis meghatározó a dimenziószám megválasztásánál.

A bemutatott eredmények fényében úgy vélem, hogy egy Duna-léptékű folyó esetén a 2D modell kielégítő eredményeket szolgáltatott. Habár a hibát jelző mutatószámok sok esetben (fenék-csúsztatófeszültség) magasak voltak, a mintázatok döntő többségét (nyírózóna, limány, sodorvonal-eltolódás stb.) jól reprodukálta a mélységátlagolt megközelítés is. Ha a Dunánál komplexebb medrű, nagyobb esésű, természetes vízfolyást vizsgálnánk, ahol gyakoriak a hirtelen mederalak-változások és így leválások, függőleges gyorsulások vagy akár rohanó-áramló átmenetek is előfordulnak, ott a 2D megközelítés vélhetően sokkal kevésbé lenne alkalmas a hidrodinamikai és az élőhelyhidraulikai számítások végzésére.

Dolgozatom végén bemutattam, hogy napjaink korszerű élőhely-térképezési módszertana milyen mértékben függ az azt kiszolgáló numerikus áramlásmodellezési megközelítéstől. A 2- és 3D modelleredmények összevetésekor felmerülő – jellemzően lokális – eltérések az élőhely-megfelelőségi mezők számításánál tovább tompultak: a halmintázási, illetve a megfelelőségi indexek meghatározására használt módszertanok bizonytalanságait figyelembe véve a részletes 3D és a mélységátlagolt 2D numerikus modelleredmények is hasonló minőségben voltak képesek kiszolgálni az alkalmazott mezoskálás élőhelyhidraulikai módszertant.

Az eredmények fényében megfogalmazható, hogy hosszabb folyószakaszok élőhely-hidraulikai vizsgálatainál elfogadható kompromisszum a 2D leírásmód, amivel egy modellterület hossza több száz kilométert is lefedhet, vagyis egy szimulációs modellel nagy kiterjedésű, de mégis mezo-léptékű elemzések hajthatók végre. Tekintettel arra, hogy a közeljövőbeli feladatként a teljes hazai Duna élőhely szempontú elemzése már megfogalmazódott, a dolgozat eredményeinek birtokában kijelenthető, hogy rendelkezésre állnak azok a módszerek, amelyek a hidrodinamikai, mint abiotikus jellemzők szimuláció alapú vizsgálatát lehetővé teszik. Fontosnak tartom megjegyezni, hogy modellvizsgálatokkal végrehajtható élőhelyjellemezés szükségszerű bemeneti adataként a biológiai paraméterek rendelkezésre kell, hogy álljanak, így a dolgozatban példaként bemutatott két halfajra vonatkozó megfelelőségi kapcsolatok más élőlényekre is ki kell, hogy terjedjenek.

Az élőhelyvizsgálatok szimulációs alapra való áthelyezése lehetővé teszi nem csak nagy területi kiterjedésű esettanulmányok egyben való kezelését, de időben és a vizsgált vízjárási állapotok tekintetében is kitágíthatók a vizsgálati határok. Ennek a megközelítésnek az eredményeképpen akár statisztikai alapú elemzésekre is lehetőség nyílik, pl. tartósság-gyakoriság célú vizsgálatokkal, vagy éppen jövőbeli, akár geometriai (pl. új beavatkozások

esetén előálló), akár hidrológiai (pl. klímaváltozás hatására megváltozó) értelemben vett megváltozások hatásának vizsgálatával.

## VII. Köszönetnyilvánítás

Ezúton szeretnék köszönetet mondani mindenkinek, aki a tanulmány elkészítésében bármilyen módon segítségemre volt.

Köszönettel tartozom **Dr. Baranya Sándor** és **Fleit Gábor** konzulenseimnek a témáért, útmutatásukért, forrásanyagokért, a rám szánt rengeteg időért és segítségért, rugalmasságukért és a kellemes hangulatú, de hatékony konzultációkért.

Köszönöm **Erős Tibornak**, hogy segített pontosan megfogalmazni a különbséget bizonyos halászhálók között.

Köszönöm **Tőkési Nikolettának**, hogy az adatait a munkámhoz felhasználhattam.

Köszönöm a Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszéknek a Tecplot 360 2012R1 és az SMS 11.0 szoftverekhez nyújtott licenst.

Végül, de nem utolsósorban köszönöm családom és barátom türelmét, támogatásukat.

## VIII. Ábrák és táblázatok jegyzéke

1. TÁBLÁZAT: AZ ALKALMAZOTT NUMERIKUS MODELLEK JELEN TANULMÁNY SZERINTI LEGFONTOSABB JELLEMZŐINEK ÖSSZEHASONLÍTÁSA.....	10
1. ÁBRA: A SEMATIKUS MEDREK VÁZLATA, FŐBB MÉRETEKKEL .....	13
2. ÁBRA: A GÖDI GÁZLÓ A KDVVIZIG HAJÓÚT KITŰZÉSI 13-AS TÉRKÉPLAPJÁN .....	14
3. ÁBRA: A MEANDEREZŐ CSATORNA HÁROMSZÖGHÁLÓJÁNAK EGY RÉSZLETE.....	16
4. ÁBRA: AZ EGYENES CSATORNA NÉGYSZÖGHÁLÓJÁNAK EGY RÉSZLETE A SARKANTYÚ KÖRNYEZETÉBEN.....	16
2. TÁBLÁZAT: A MODELLEKET MEGHAJTÓ PEREMFELTÉTELEK .....	17
5. ÁBRA: A GÖDI SZAKASZ ÉRDESSÉG-KATEGÓRIÁI (FORRÁS: TÓKÉSI, 2016) .....	17
6. ÁBRA: MÉLYSÉGÁTLAGOLT SEBESSÉGEK ÁRAMVONALAKKAL KISVIZES ÁLLAPOTBAN (EGYENES CSATORNA, SARKANTYÚVAL).....	21
7. ÁBRA: A MÉLYSÉGÁTLAGOLT SEBESSÉGEK 2D ÉS 3D FUTTATÁSBÓL EREDŐ KÜLÖNBségMEZŐI (EGYENES CSATORNA, SARKANTYÚVAL) .....	22
8. ÁBRA: FENÉK-CSÚSZTATÓFESZÜLTSGEK NAGYVÍZI ÁLLAPOTBAN (EGYENES SARKANTYÚVAL) .....	23
9. ÁBRA: A FENÉK-CSÚSZTATÓFESZÜLTSGEK 2D ÉS 3D FUTTATÁSBÓL EREDŐ KÜLÖNBségMEZŐI (EGYENES SARKANTYÚVAL).....	24
10. ÁBRA: A VÍZMÉLYSÉGEK 2D ÉS 3D FUTTATÁSBÓL EREDŐ KÜLÖNBségMEZŐI (EGYENES SARKANTYÚVAL) .....	24
11. ÁBRA: MÉLYSÉGÁTLAGOLT SEBESSÉGEK NAGYVÍZNÉL (MEANDEREZŐ CSATORNA) .....	25
12. ÁBRA: A MÉLYSÉGÁTLAGOLT SEBESSÉGEK 2D ÉS 3D FUTTATÁSBÓL EREDŐ KÜLÖNBségMEZŐI (MEANDEREZŐ CSATORNA).....	26
13. ÁBRA: SEBESSÉGVektorok A MEANDEREZŐ CSATORNÁBAN, NAGYVÍZNÉL (FEHÉR: ADH; VÖRÖS: SSIIM FENÉKKÖZELI; FEKETE: SSIIM FELSZÍNKÖZELI).....	26
14. ÁBRA: A FENÉK-CSÚSZTATÓFESZÜLTSGEK 2D ÉS 3D FUTTATÁSBÓL EREDŐ KÜLÖNBségMEZŐI (MEANDEREZŐ CSATORNA) .....	27
15. ÁBRA: A VÍZMÉLYSÉGEK 2D ÉS 3D FUTTATÁSBÓL EREDŐ KÜLÖNBségMEZŐI (MEANDEREZŐ CSATORNA).....	28
16. ÁBRA: VÍZFELSZÍN NAGYVÍZNÉL, KERESZTIRÁNYÚ FELSZÍNESÉSSEL (MEANDEREZŐ CSATORNA) .....	28
17. ÁBRA: A MÉLYSÉGÁTLAGOLT SEBESSÉGEK 2D ÉS 3D FUTTATÁSBÓL EREDŐ KÜLÖNBségMEZŐI (GÖDI SZAKASZ) .....	29
18. ÁBRA: A FENÉK-CSÚSZTATÓFESZÜLTSGEK 2D ÉS 3D FUTTATÁSBÓL EREDŐ KÜLÖNBségMEZŐI (GÖDI SZAKASZ).....	30
19. ÁBRA: A VÍZMÉLYSÉGEK 2D ÉS 3D FUTTATÁSBÓL EREDŐ KÜLÖNBségMEZŐI (GÖDI SZAKASZ) .....	31
20. ÁBRA: ÁTLAGOS ELTÉRÉSEK A KÉT- ÉS HÁROMDIMENZIÓS MODELLEK KÖZÖTT.....	32
21. ÁBRA: MEGFELELŐSÉGI GÖRBÉK A FEKETESZÁJÚ GÉBRE (KÉK) ÉS A NÉMET BUCÓRA (VÖRÖS) (FORRÁS: BARANYA, ET AL., 2018) 34	
22. ÁBRA: ÉLŐHELY-MEGFELELŐSÉGI KÜLÖNBségTÉRkép A FEKETESZÁJÚ GÉBRE .....	34
23. ÁBRA: ÉLŐHELY-MEGFELELŐSÉGI KÜLÖNBségTÉRkép A NÉMET BUCÓRA.....	35
24. ÁBRA: MÉLYSÉGÁTLAGOLT SEBESSÉGEK ÁRAMVONALAKKAL KÖZÉPVÍZNÉL (EGYENES SARKANTYÚVAL) .....	44
25. ÁBRA: MÉLYSÉGÁTLAGOLT SEBESSÉGEK ÁRAMVONALAKKAL NAGYVÍZNÉL (EGYENES SARKANTYÚVAL) .....	45
26. ÁBRA: FENÉK-CSÚSZTATÓFESZÜLTSGEK KISVIZES ÁLLAPOTBAN (EGYENES SARKANTYÚVAL).....	45
27. ÁBRA: FENÉK-CSÚSZTATÓFESZÜLTSGEK KÖZÉPVIZES ÁLLAPOTBAN (EGYENES SARKANTYÚVAL) .....	46
28. ÁBRA: VÍZMÉLYSÉGEK KISVÍZNÉL (EGYENES SARKANTYÚVAL) .....	46
29. ÁBRA: VÍZMÉLYSÉGEK KÖZÉPVÍZNÉL (EGYENES SARKANTYÚVAL).....	47
30. ÁBRA: VÍZMÉLYSÉGEK NAGYVÍZNÉL (EGYENES SARKANTYÚVAL).....	47
31. ÁBRA: MÉLYSÉGÁTLAGOLT SEBESSÉGEK KISVÍZNÉL (MEANDEREZŐ CSATORNA) .....	48



32. ÁBRA: MÉLYSÉGÁTLAGOLT SEBESSÉGEK KÖZÉPVÍZNÉL (MEANDEREZŐ CSATORNA) .....	48
33. ÁBRA: FENÉK-CSÚSZTATÓFESZÜLTSEGEK KISVÍZNÉL (MEANDEREZŐ CSATORNA) .....	49
34. ÁBRA: FENÉK-CSÚSZTATÓFESZÜLTSEGEK KÖZÉPVÍZNÉL (MEANDEREZŐ CSATORNA) .....	49
35. ÁBRA: FENÉK-CSÚSZTATÓFESZÜLTSEGEK NAGYVÍZNÉL (MEANDEREZŐ CSATORNA) .....	50
36. ÁBRA: VÍZMÉLYSÉGEK KISVÍZNÉL (MEANDEREZŐ CSATORNA) .....	50
37. ÁBRA: VÍZMÉLYSÉGEK KÖZÉPVÍZNÉL (MEANDEREZŐ CSATORNA) .....	51
38. ÁBRA: VÍZMÉLYSÉGEK NAGYVÍZNÉL (MEANDEREZŐ CSATORNA) .....	51
39. ÁBRA: MÉLYSÉGÁTLAGOLT SEBESSÉGEK KISVÍZNÉL (GÖDI SZAKASZ) .....	52
40. ÁBRA: MÉLYSÉGÁTLAGOLT SEBESSÉGEK KÖZÉPVÍZNÉL (GÖDI SZAKASZ) .....	53
41. ÁBRA: MÉLYSÉGÁTLAGOLT SEBESSÉGEK NAGYVÍZNÉL (GÖDI SZAKASZ) .....	53
42. ÁBRA: FENÉK-CSÚSZTATÓFESZÜLTSEGEK KISVÍZNÉL (GÖDI SZAKASZ) .....	54
43. ÁBRA: FENÉK-CSÚSZTATÓFESZÜLTSEGEK KÖZÉPVÍZNÉL (GÖDI SZAKASZ) .....	54
44. ÁBRA: FENÉK-CSÚSZTATÓFESZÜLTSEGEK NAGYVÍZNÉL (GÖDI SZAKASZ) .....	55
45. ÁBRA: VÍZMÉLYSÉGEK KISVÍZNÉL (GÖDI SZAKASZ) .....	55
46. ÁBRA: VÍZMÉLYSÉGEK KÖZÉPVÍZNÉL (GÖDI SZAKASZ) .....	56
47. ÁBRA: VÍZMÉLYSÉGEK NAGYVÍZNÉL (GÖDI SZAKASZ) .....	56

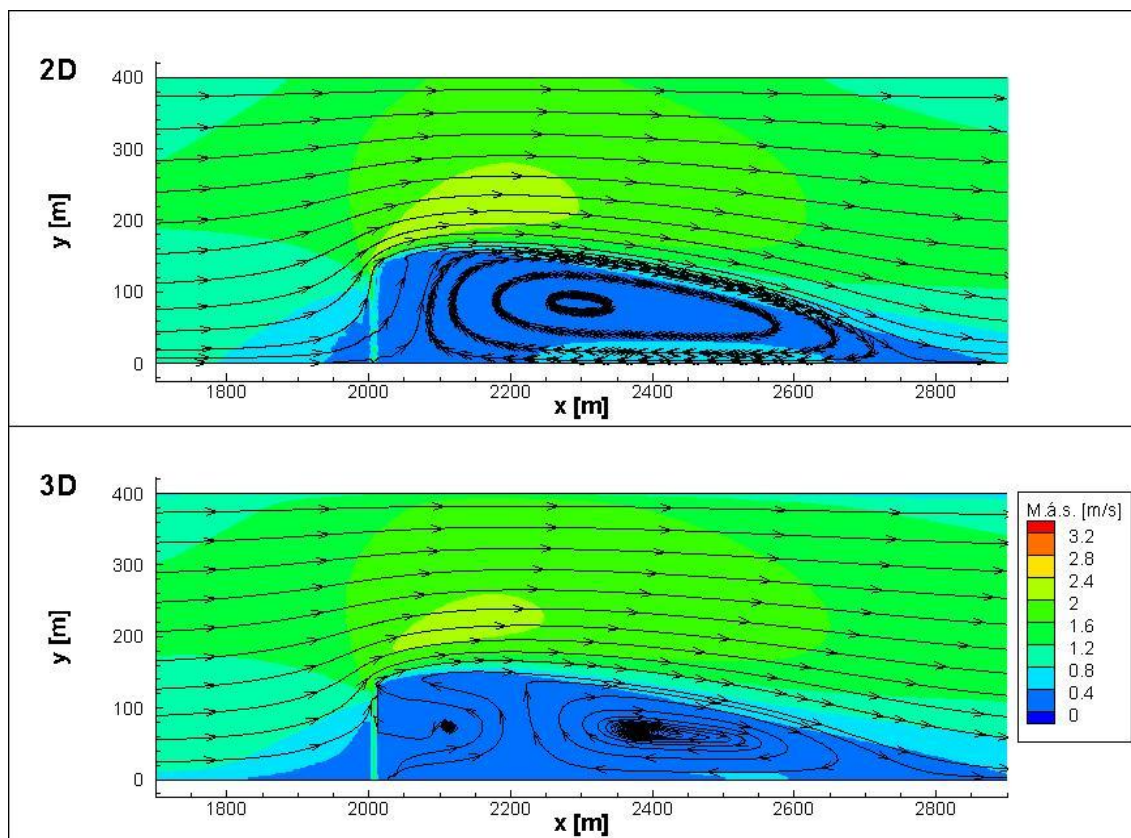
## IX. Irodalomjegyzék

1. Baranya, S. és mtsai., 2018. Habitat mapping of riverine fish by means of hydromorphological tools. *Ecohydrology*, 11. kötet.
2. Berger, R., Tate, J., Brown, G. & Savant, G., 2010. *Adaptive Hydraulics – Users Manual*. hely nélkül: U.S. Army Engineer Research and Development Center (ERDC) Coastal and Hydraulics Laboratory.
3. Borsányi, P., 2006. A classification method for scaling river biotopes for assessing hydropower regulation impacts. *Doktori értekezés*.
4. Capra, H. és mtsai., 2017. Fish habitat selection in a large hydropeaking river: Strong individual and temporal variations revealed by telemetry. *Science of the Total Environment*, 578. kötet, pp. 109-120.
5. Casas-Mulet, R. és mtsai., 2016. Two decades of ecohydraulics: trends of an emerging interdiscipline. *Journal of Ecohydraulics*, 1. kötet, pp. 16-30.
6. Erős, T., Tóth, B. & Sevcsik, A., 2008. A halállomány összetétele és a halfajok élőhely használata a Duna litorális zónájában (1786–1665 fkm) – monitorozás és természetvédelmi javaslatok. *Halászat*, pp. 114-123.
7. Fleit, G., 2014. Élőhely szempontú folyószabályozás támogatása korszerű terepi mérésekkel és számítógépes modellezéssel. *TDK dolgozat*.
8. Füstös, V., 2017. A Duna százhalmattai szakaszának hajózási szempontú modellvizsgálata. *BSc diplomamunka*.
9. Game and Wildlife Conservation Trust – Electro-fishing. URL: <https://www.gwct.org.uk/fishing/advice/electro-fishing/>  
Megtekintés időpontja: 2018. október 1.
10. Gears database – Search. URL: <http://www.seafish.org/geardb/results/>  
Megtekintés időpontja: 2018. október 1.
11. Habersack, H., Tritthart, M., Liedermann, M. & Hauer, C., 2014. Efficiency and uncertainties in micro- and mesoscale habitat modelling in large rivers. *Hydrobiologia*, 729. kötet, pp. 33-48.
12. Hauer, C., Mandlbürger, G. & Habersack, H., 2008. Hydraulically related hydro-morphological units: description based on a new conceptual mesohabitat evaluation model (MEM) using LiDAR data as geometric input. *River Research and Applications*, 25. kötet, pp. 29-47.

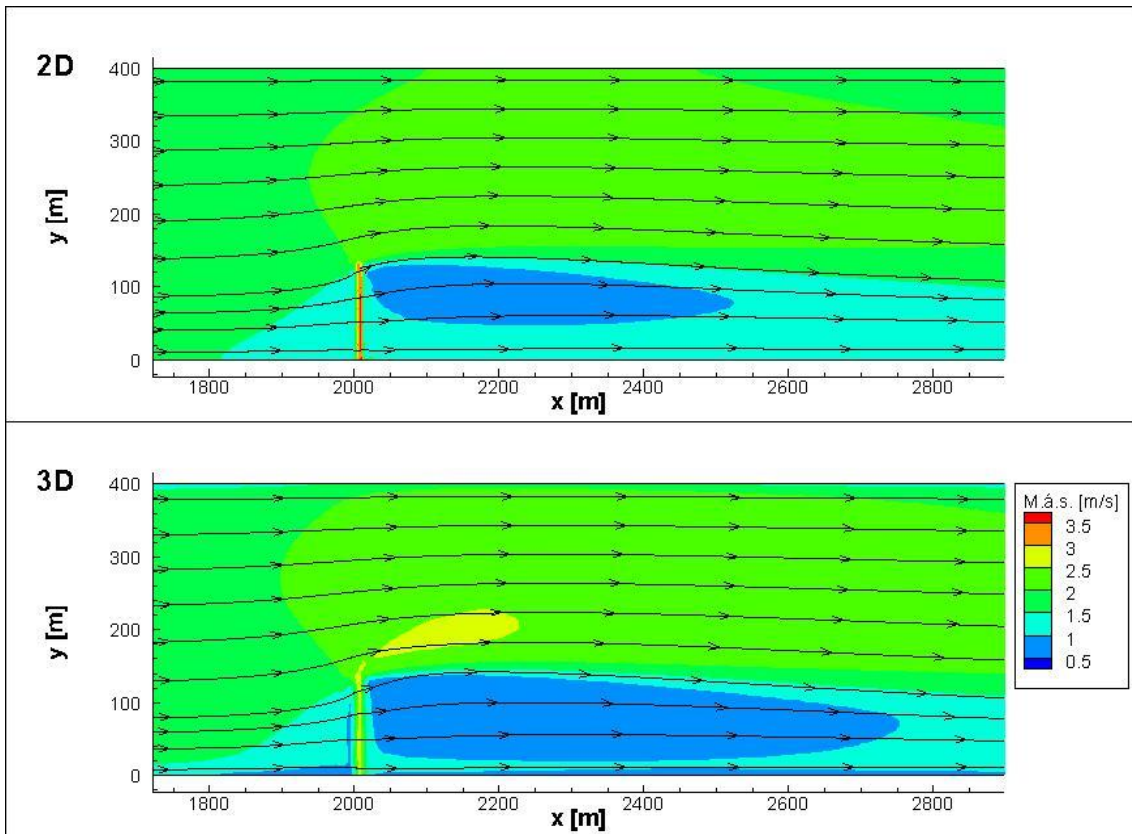
13. Hauer, C. és mtsai., 2011. Variability of mesohabitat characteristics in riffle-pool reaches: Testing an integrative evaluation concept (FGC) for MEM-application.. *River Research and Applications*, 27. kötet, pp. 403-430.
14. Huybrechts, N., Villaret, C. & Hervouet, J.-M., 2010. *Comparison between 2D and 3D modelling of sediment transport: application to the dune evolution*. Braunschweig, Németország, Riverflow Conference.
15. Kasvi, E. és mtsai., 2014. Two-dimensional and three-dimensional computational models in hydrodynamic and morphodynamic reconstructions of a river bend: sensitivity and functionality. *Hydrological Processes*, 29. kötet, pp. 1604-1629.
16. Közép-Duna-völgyi Vízügyi Igazgatóság – Hajóút-kitűzési terv. URL: <http://www.kdvvizig.hu/index.php/hajout-kituzesi-terv> Megtekintés időpontja: 2018. október 19.
17. Lane, S. és mtsai., 1999. The application of computational fluid dynamics to natural river channels: three-dimensional versus two-dimensional approaches. *Geomorphology*, 29. kötet, pp. 1-20.
18. Lauchlan Arrowsmith, C. & Zhu, Y., 2014. *Comparison between 2D and 3D hydraulic modelling approaches for simulation of vertical slot fishways*. Brisbane, Ausztrália, The University of Queensland.
19. Maddock, I., Harby, A., Kemp, P. & Wood, P., 2013. *Ecohydraulics: an integrated approach*. Első kiadás szerk. Chichester: Wiley-Blackwell.
20. Mays, L. W., 2008. A very brief history of hydraulic technology during antiquity. *Environ Fluid Mech*, pp. 471-484.
21. Szalóky, Z. és mtsai., 2014. Application of an electrified benthic frame trawl for sampling fish in a very large European river (the Danube River) – Is offshore monitoring necessary?. *Fisheries Research*, 151. kötet, pp. 12-19.
22. Tőkési, N., 2016. Folyószabályozási beavatkozás vizsgálata a Duna egy hajózási szempontból kritikus szakaszán. *MSc diplomamunka*.
23. Zajicek, P. & Wolter, C., 2018. The gain of additional sampling methods for the fish-based assessment of large rivers. *Fisheries Research*, 197. kötet, pp. 15-24.

## X. Függelék

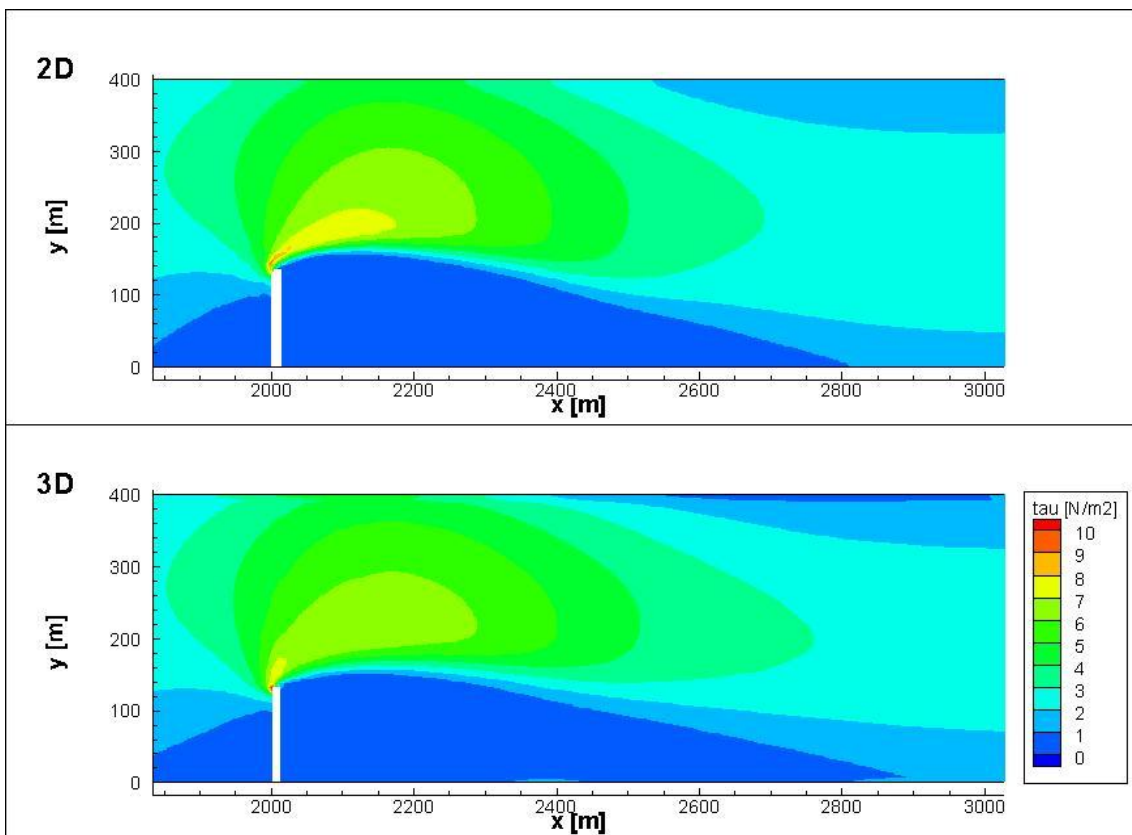
### X.1. Egyenes sarkantyúval



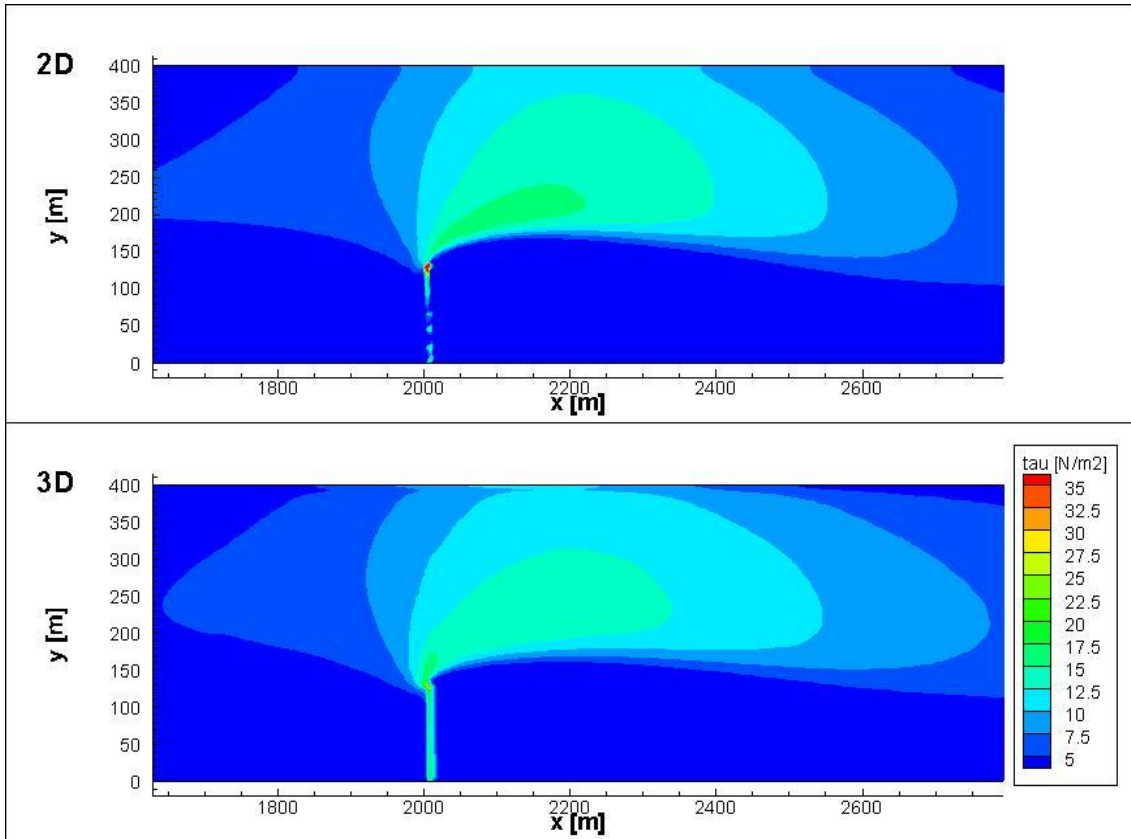
24. ábra: Mélységátlagolt sebességek áramvonalakkal középvíznél (egyenes sarkantyúval)



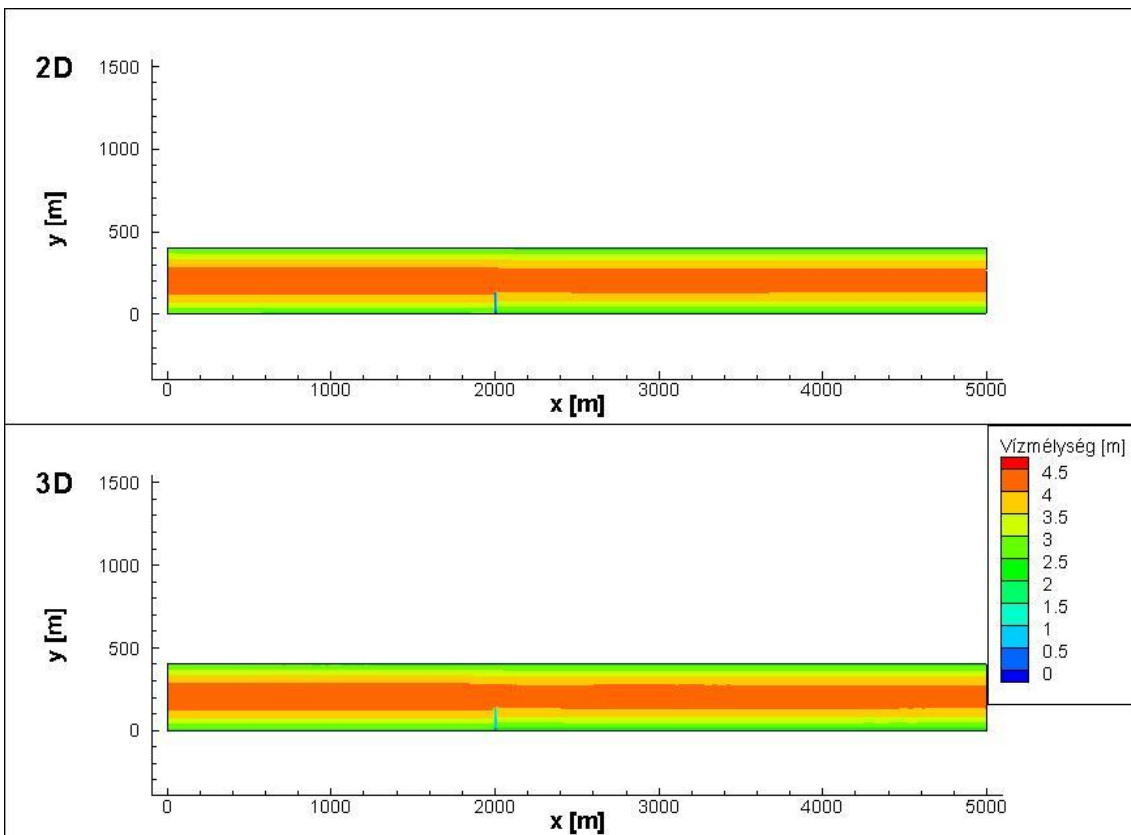
25. ábra: Mélységátlagolt sebességek áramvonalakkal nagyvíznél (egyenes sarkantyúval)



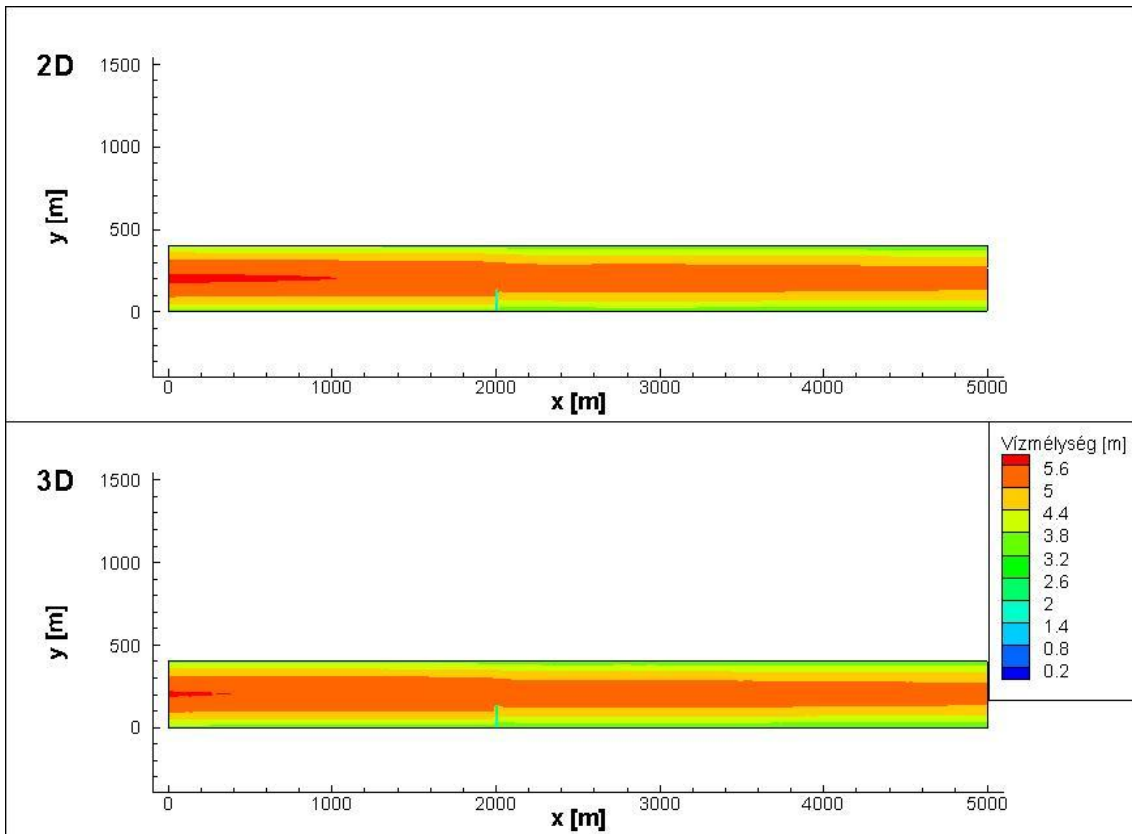
26. ábra: Fenék-csúsztatófeszültségek kisvízes állapotban (egyenes sarkantyúval)



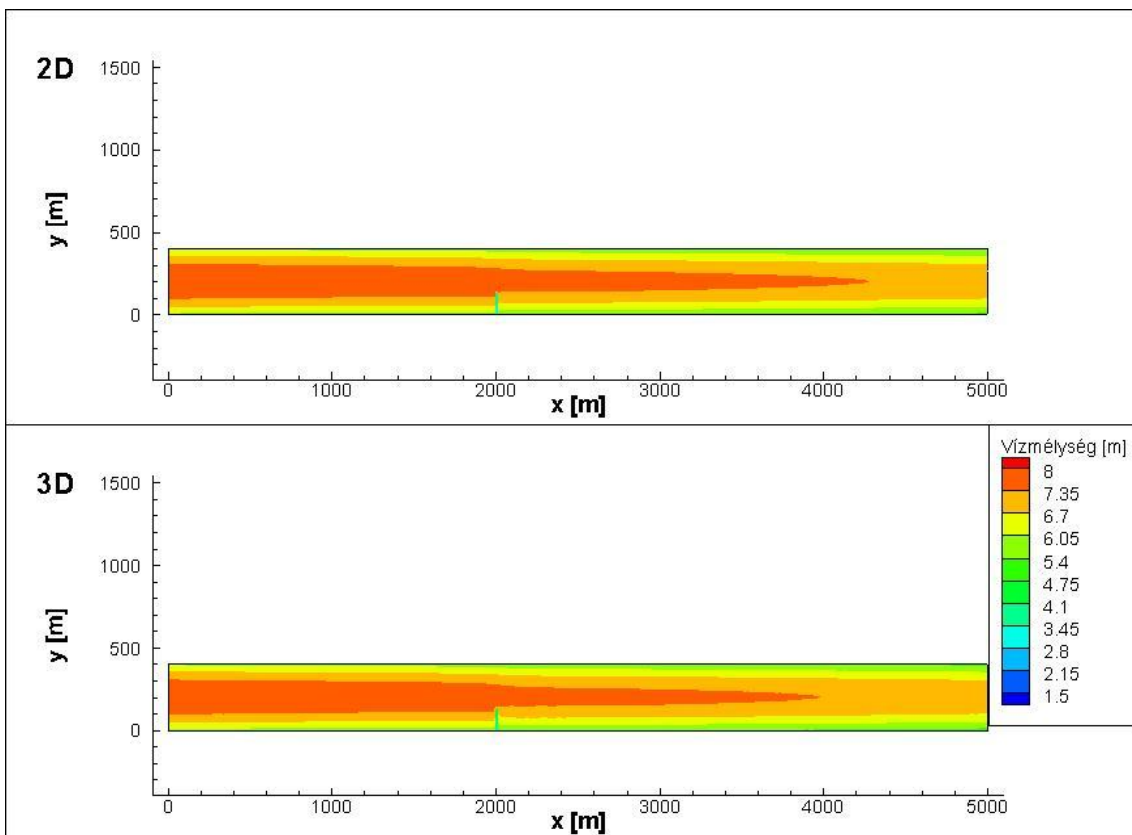
27. ábra: Fenék-csúsztatófeszültségek középvízes állapotban (egyenes sarkantyúval)



28. ábra: Vízmélységek kisvíznél (egyenes sarkantyúval)

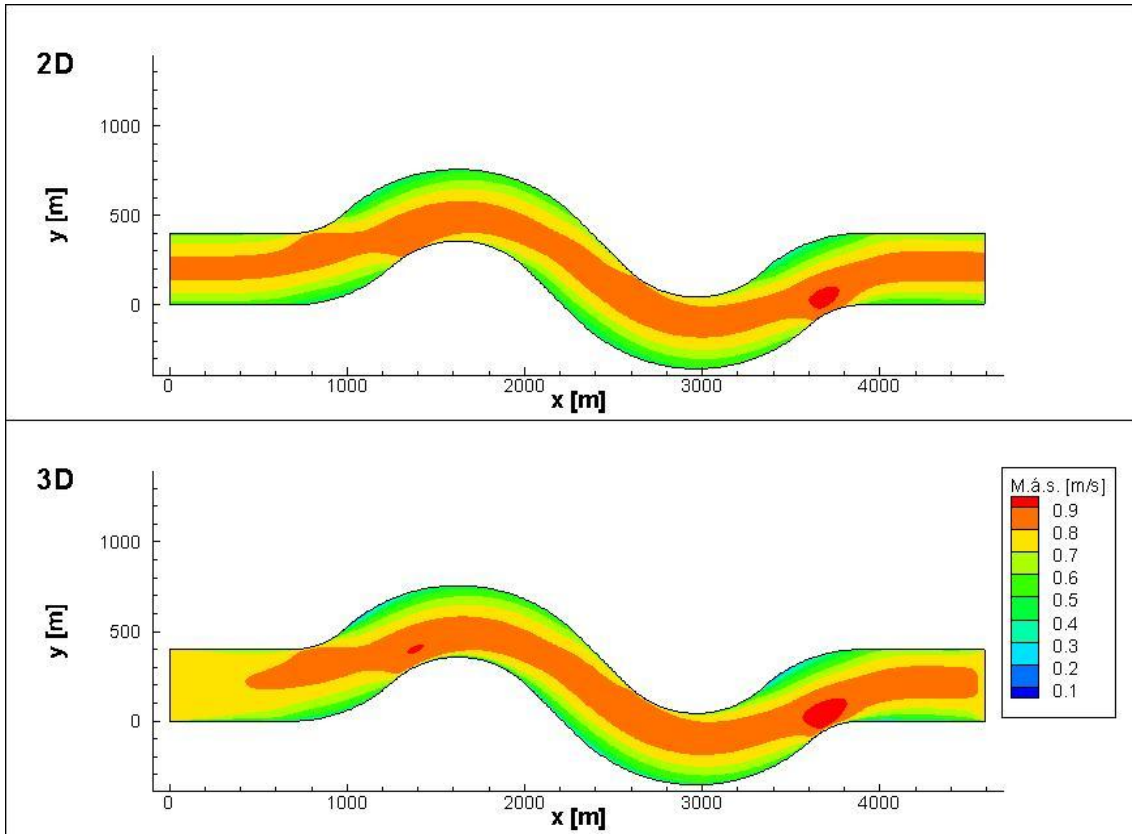


29. ábra: Vízmélységek középvíznél (egyenes sarkantúval)

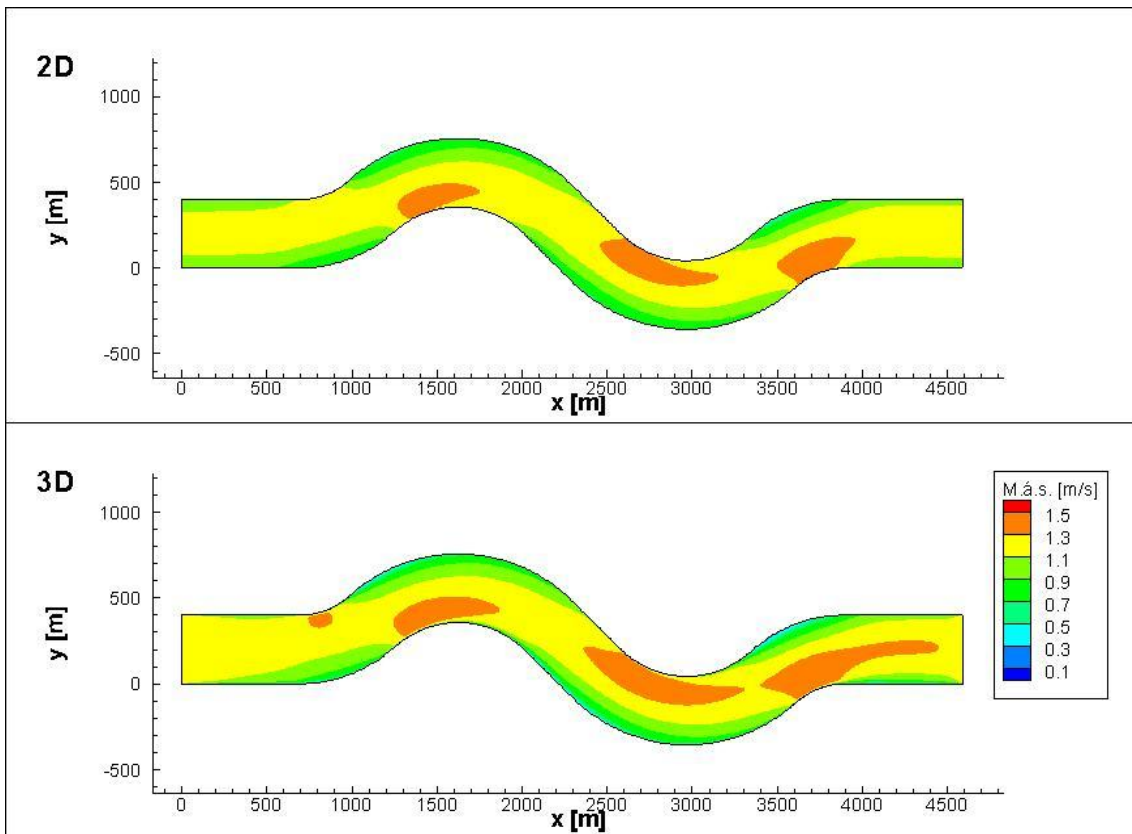


30. ábra: Vízmélységek nagyvíznél (egyenes sarkantúval)

## X.2. Meanderező csatorna

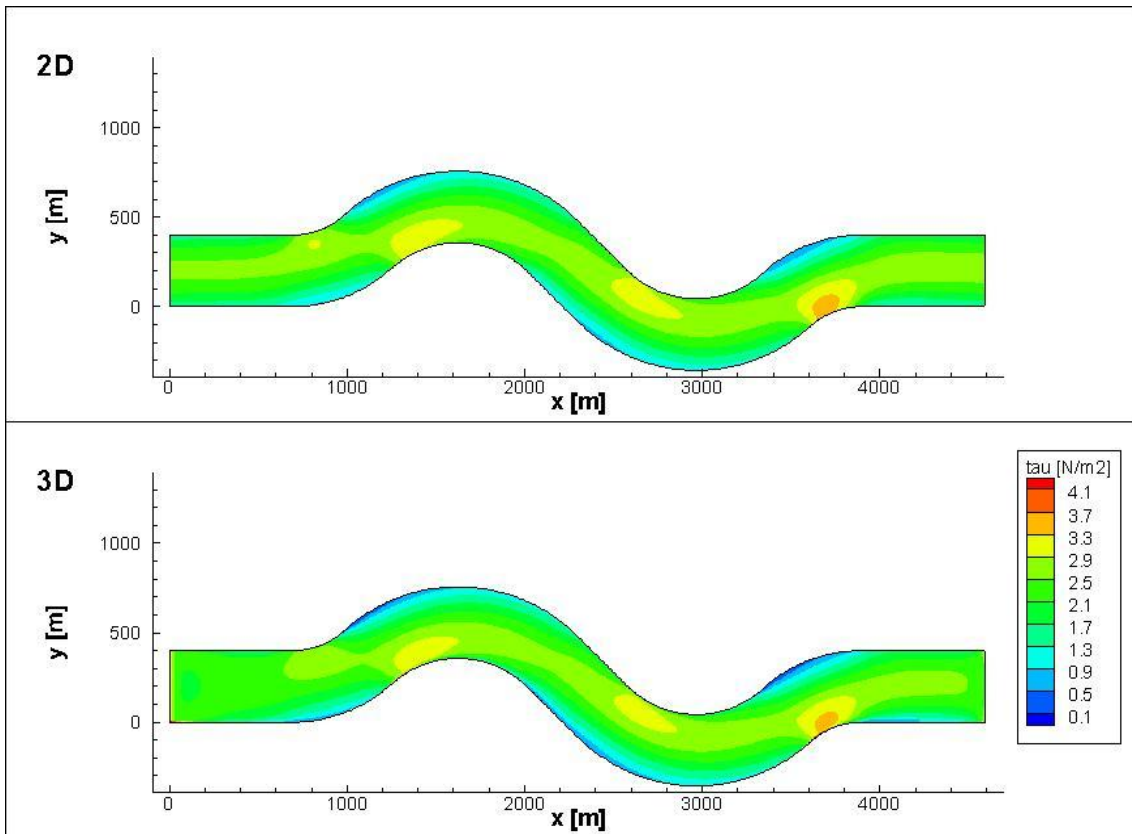


31. ábra: Mélységátlagolt sebességek kisvíznél (meanderező csatorna)

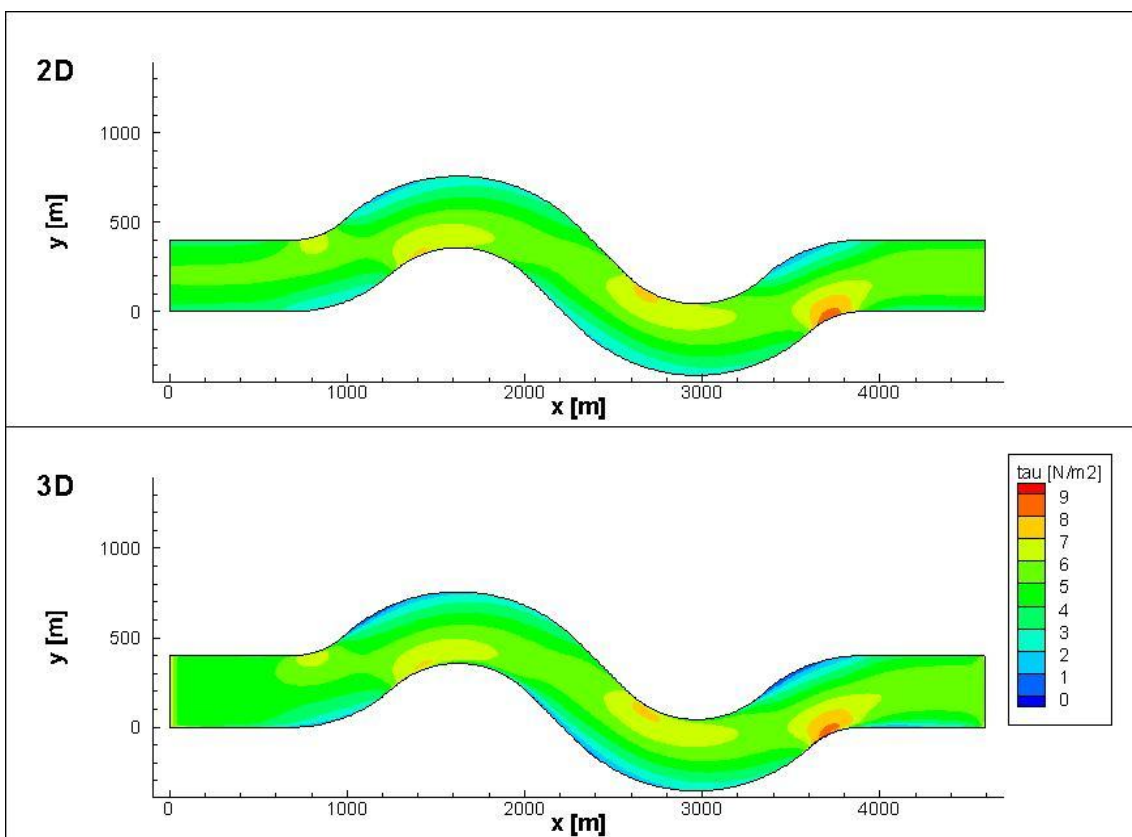


32. ábra: Mélységátlagolt sebességek középvíznél (meanderező csatorna)

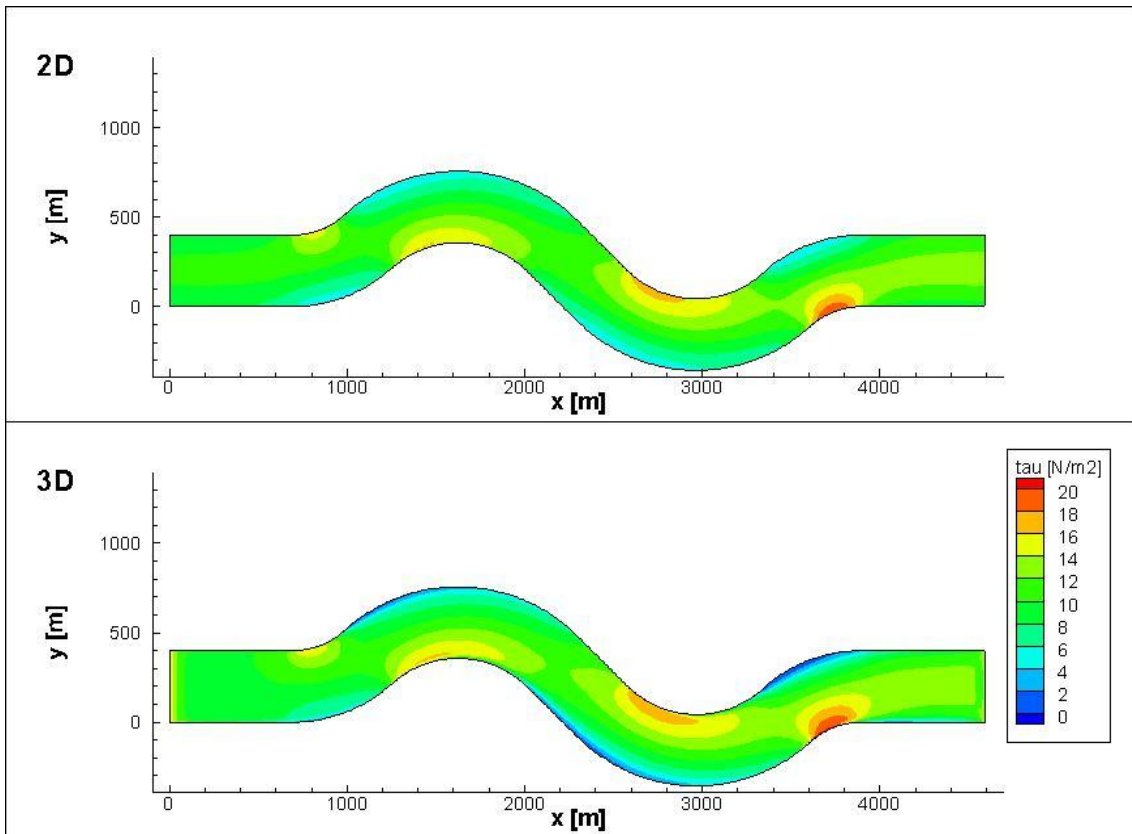




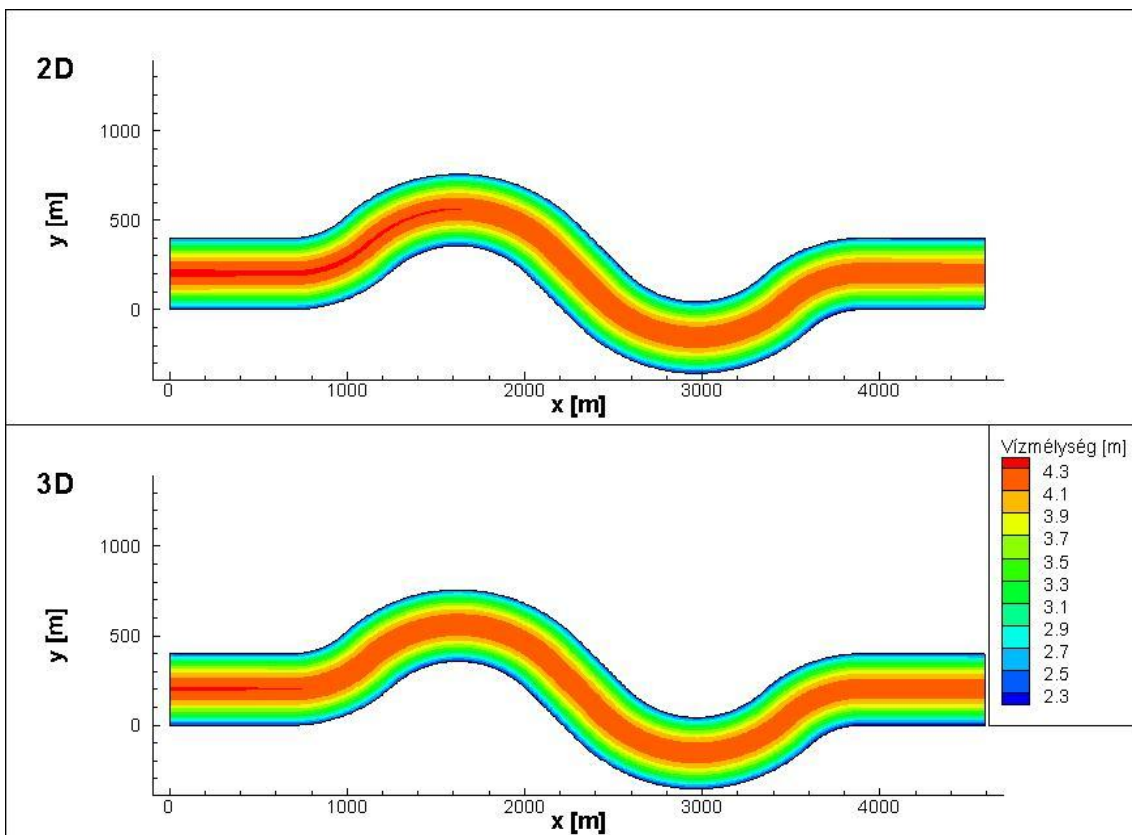
33. ábra: Fenék-csúsztatófeszültségek kisvíznél (meanderező csatorna)



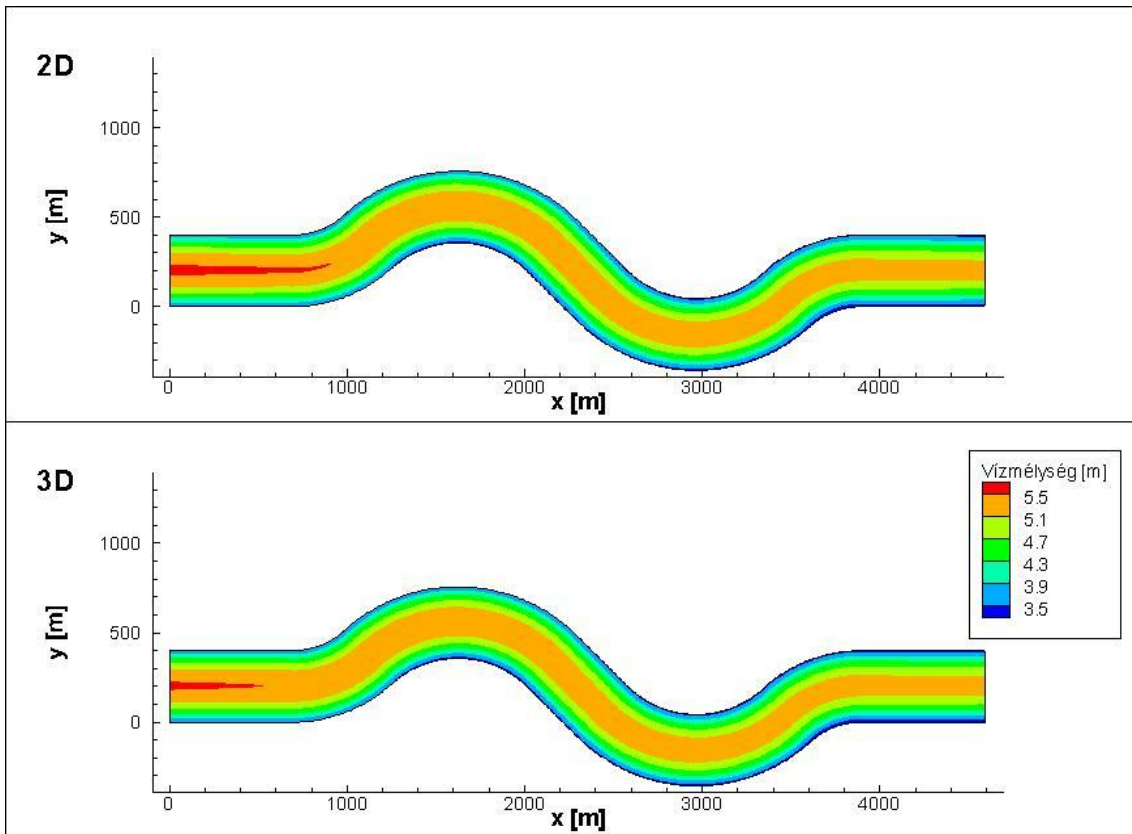
34. ábra: Fenék-csúsztatófeszültségek középvíznél (meanderező csatorna)



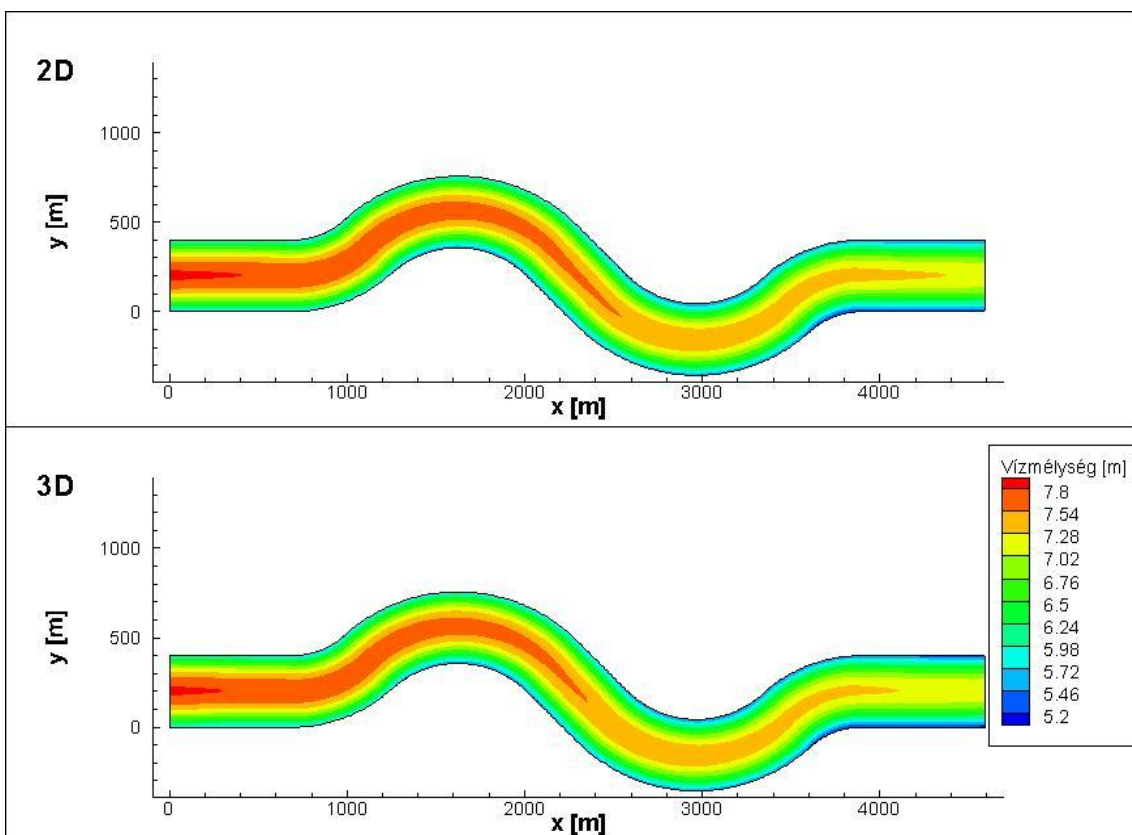
35. ábra: Fenék-csúsztatófeszültségek nagyvíznél (meanderező csatorna)



36. ábra: Vízmélységek kisvíznél (meanderező csatorna)

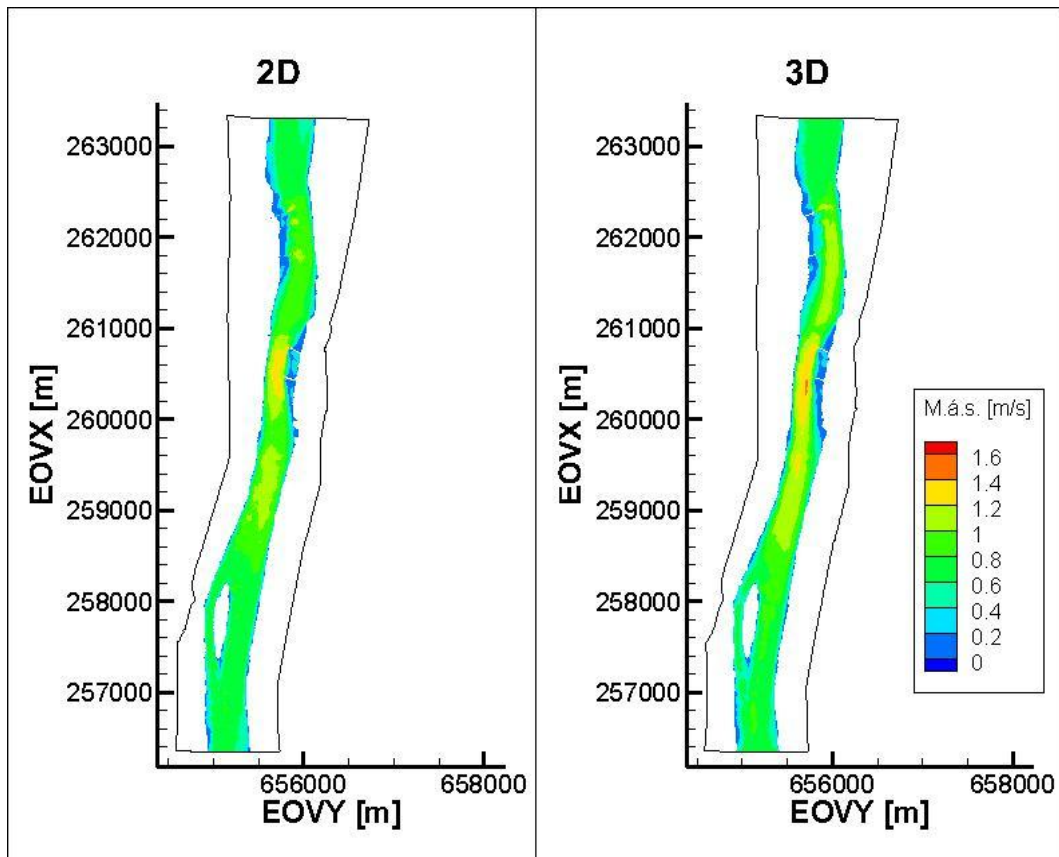


37. ábra: Vízmélységek középvíznél (meanderező csatorna)

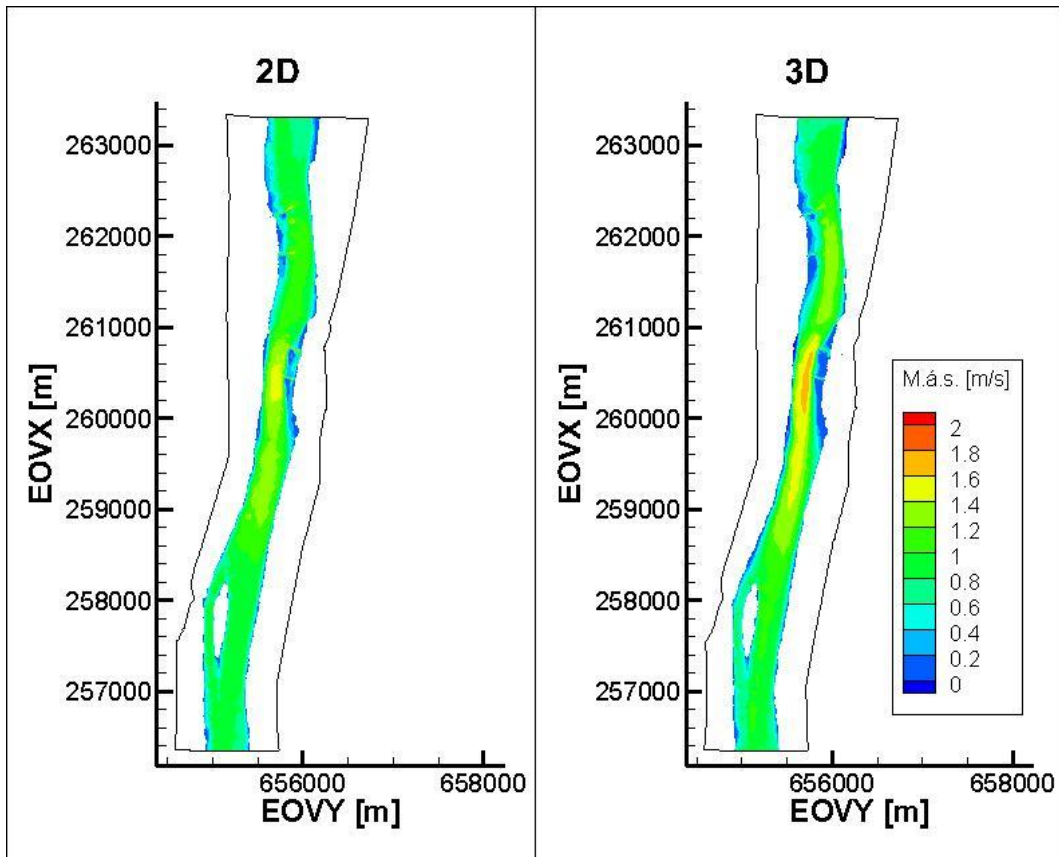


38. ábra: Vízmélységek nagyvíznél (meanderező csatorna)

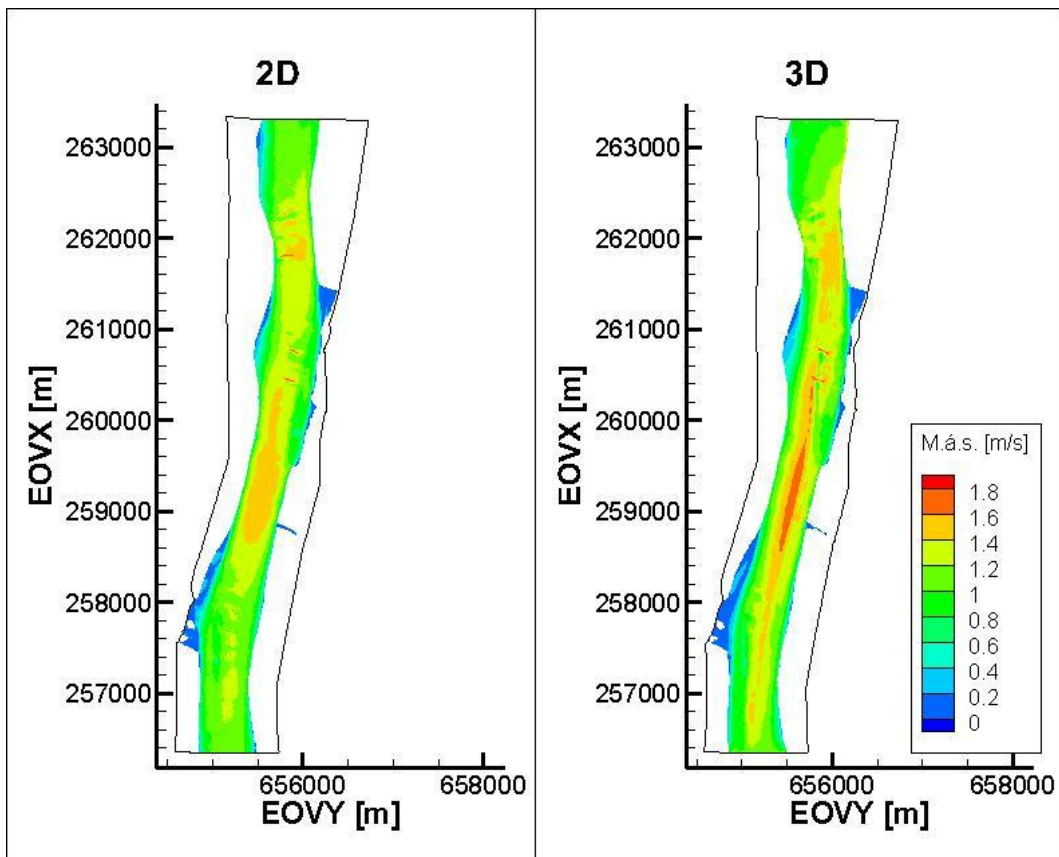
### X.3. A gödi szakasz



39. ábra: Mélységátlagolt sebességek kisvíznél (gödi szakasz)

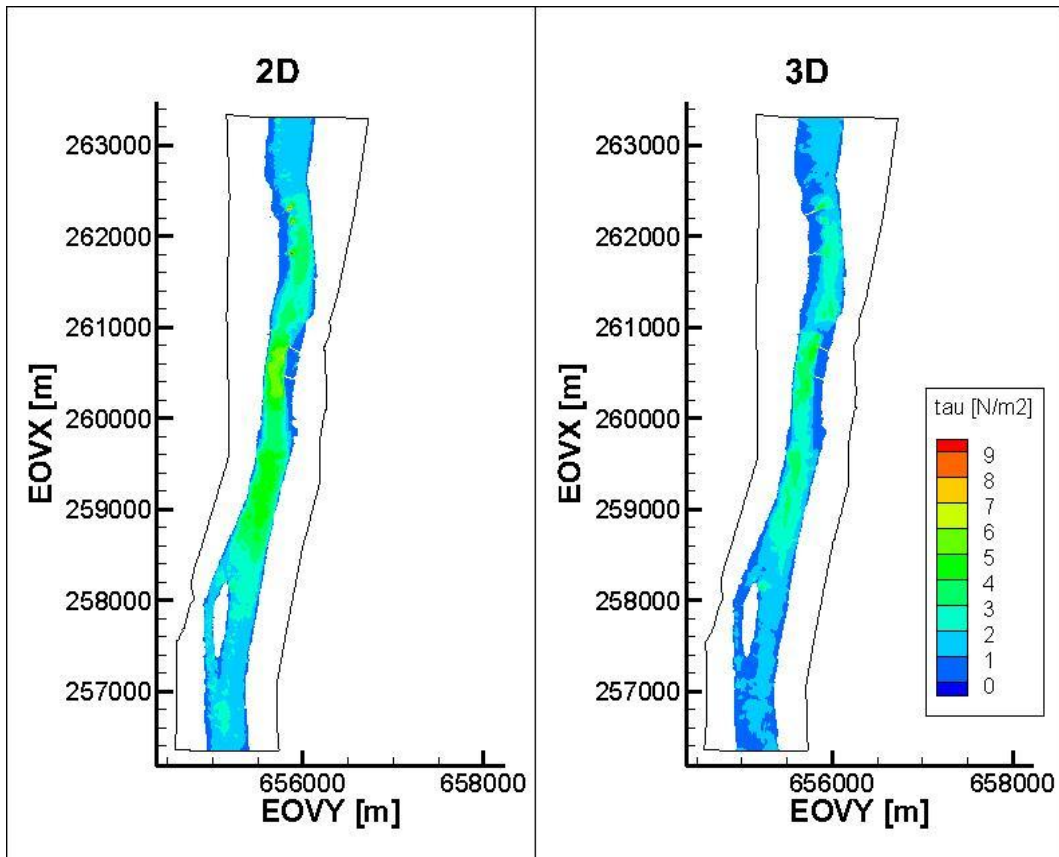


40. ábra: Mélységátlagolt sebességek középvíznél (gödi szakasz)

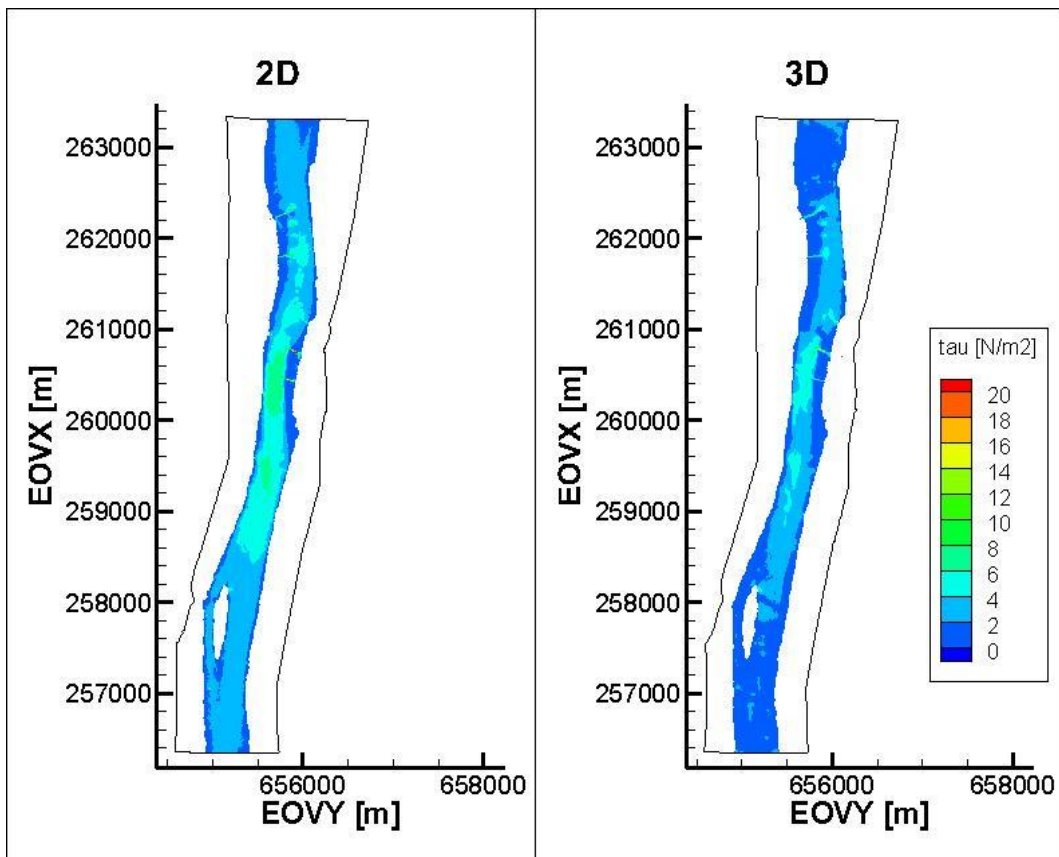


41. ábra: Mélységátlagolt sebességek nagyvíznél (gödi szakasz)

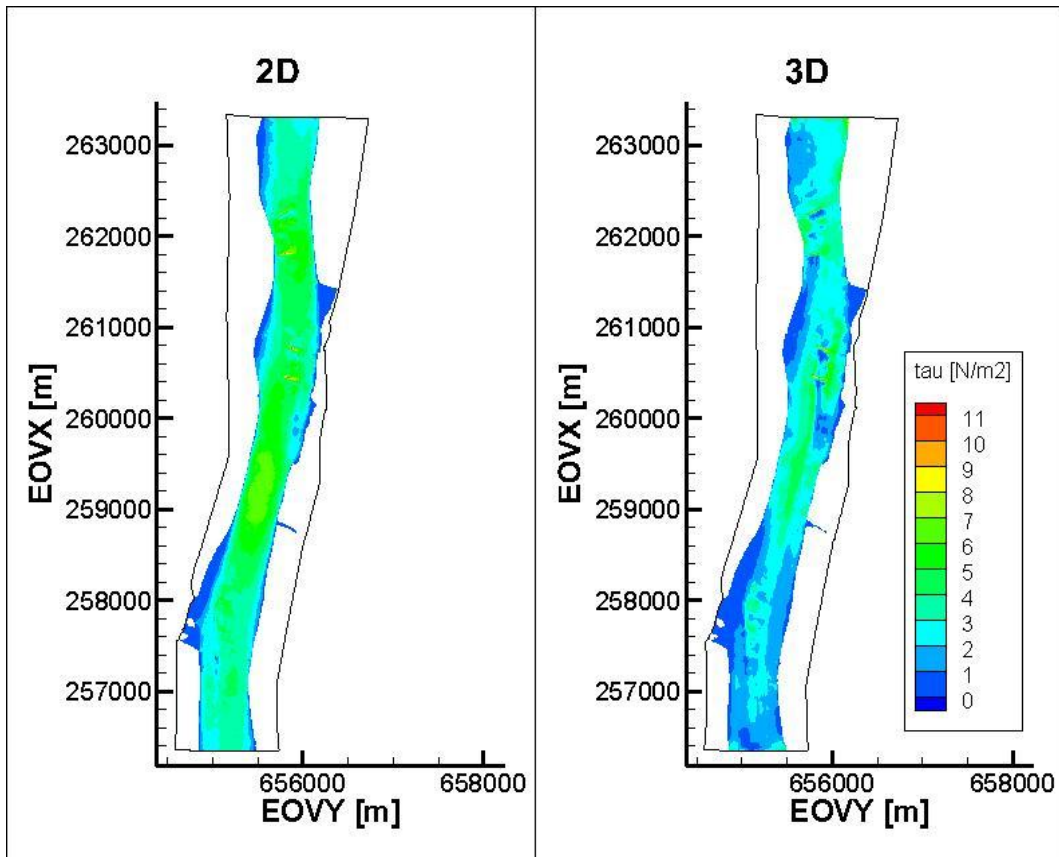




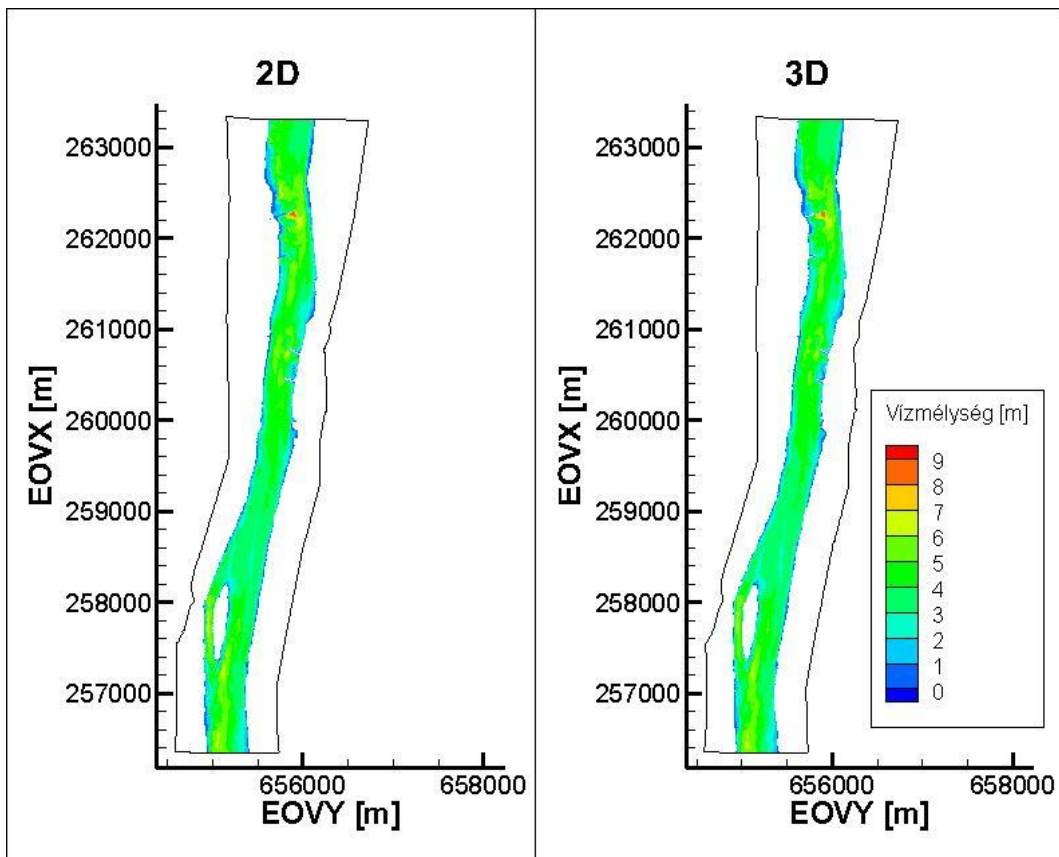
42. ábra: Fenék-csúsztatófeszültségek kisvíznél (gödi szakasz)



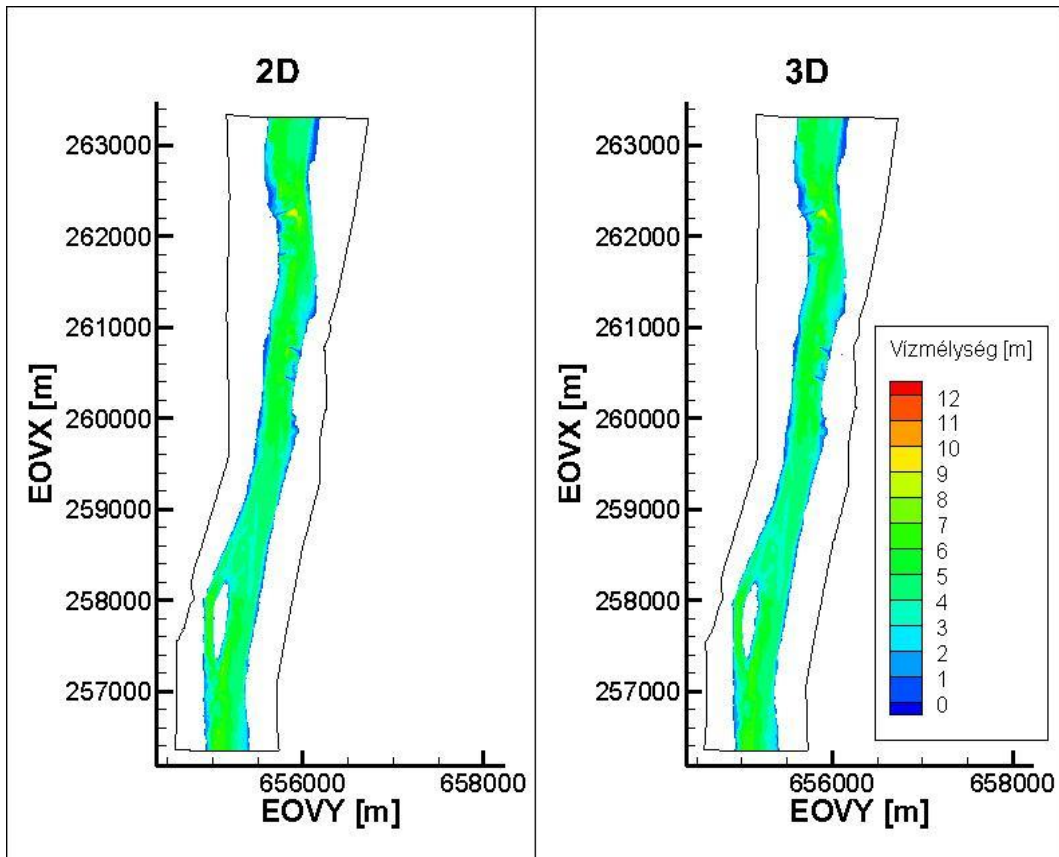
43. ábra: Fenék-csúsztatófeszültségek középvíznél (gödi szakasz)



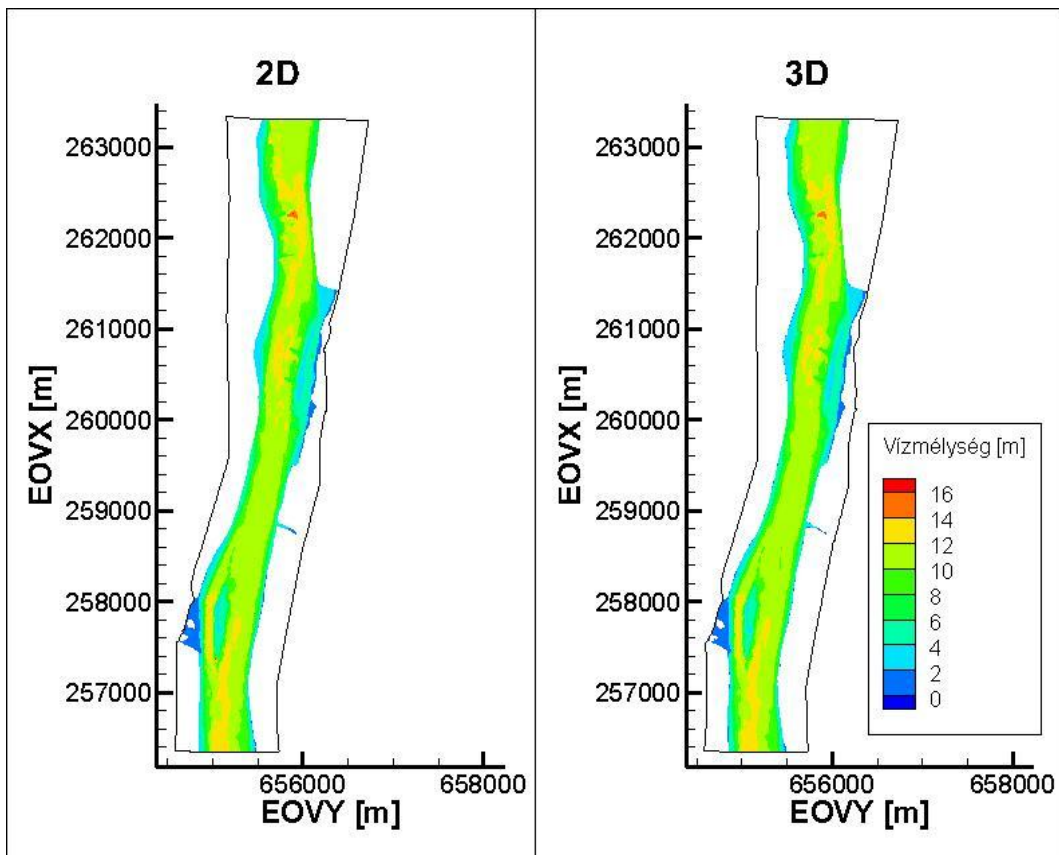
44. ábra: Fenék-csúsztatófeszültségek nagyvíznél (gödi szakasz)



45. ábra: Vízmélységek kisvíznél (gödi szakasz)



46. ábra: Vízmélységek középvíznél (gödi szakasz)



47. ábra: Vízmélységek nagyvíznél (gödi szakasz)