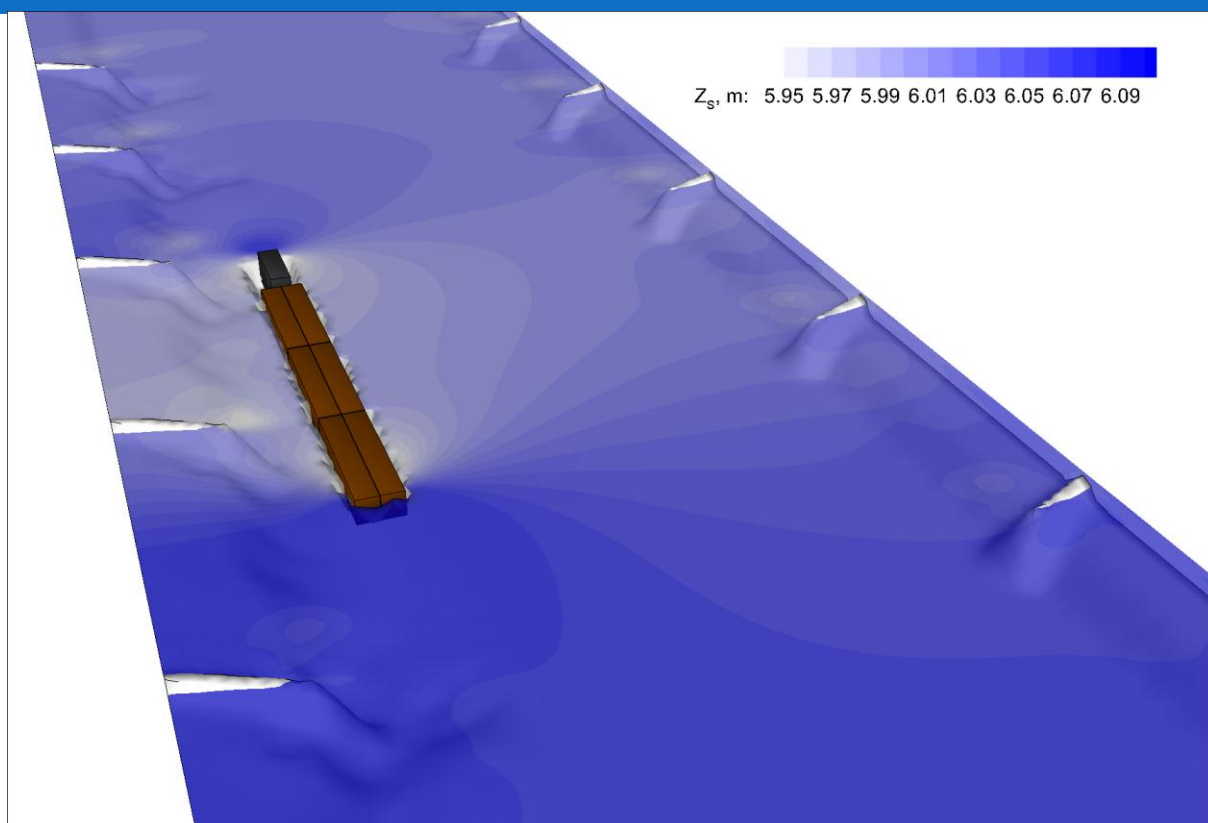


Tudományos Diákköri Konferencia 2012.

Folyami közlekedés hatása szabályozott folyószakaszok áramlási viszonyaira



Szabó-Mészáros Marcell
Konzulens: Dr. Baranya Sándor
Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszék
BME

Tartalomjegyzék

Tartalmi kivonat	4
1. Bevezetés.....	5
2. Magyarország földrajzi helyzete Európában.....	5
2.1. Tenger nélküli hajózás.....	5
2.2. Duna- Majna- Rajna csatorna	5
2.3. Transzeurópai hálózat.....	6
2.4. Hajóutak osztályozása	6
2.5. Folyami fuvarozás.....	8
2.5.1. Belvízi fuvarozás jellemzői.....	8
2.5.2. Folyami fuvarozás előnyei	9
2.5.3. Nemzetgazdasági érvényesülés	9
2.5.4. A belvízi hajózás hátrányai	10
2.5.6. Folyami fuvarozás aktuális helyzete	10
2.6. Magyarországi kilátások	11
2.7. Akadályok a belvízi fuvarozásban	11
3. Duna szabályozásának kérdései	12
3. 1. Jelenlegi helyzet	12
3. 2. Összehasonlítás a teljes Duna szakasszal.....	13
4. TDK dolgozat célkitűzése.....	14
5. Folyószabályozási módok	14
5. 1. Folyószabályozás művei.....	15
5.2. Sarkantyúk általi folyószabályozás	15
5.3. Modellben alkalmazott sarkantyúk.....	15
6. Vizsgálati lépések.....	16
7. Numerikus modell felépítése.....	17
7.1. Szabadszínű áramlások elemzése 2D modellben	18
7.2. Matematikai modell	18
7.3. Diszkrétizálás	19
8. Hajómozgás leírása valós és modellezett környezetben	19
8.1. Hajótest körüli áramlások szabályozott vízi útvonalon.....	20

8.2. Hajótest a modellben	21
8.3. Modellbeli hajódinamika	22
9. Sematizált csatornán végzett modellvizsgálatok	23
9.1. Csatorna és hajó kialakítás	23
9.2. Rácsháló megadása	25
9.3. A numerikus modell igazolása.....	25
10. Duna nagybajcsi szakaszán végzett modellkísérletek.....	30
10.1. Terület leírása	30
10.2. Rácsháló megadása	31
10.3. Peremfeltételek	33
10.4. Áramlási modell ellenőrzése	33
10.5. Eredménykiíratási pontok	35
10.6. Hajóparaméterek megadása.....	37
10.7. Modellváltozatok definiálása	38
11. Eredmények.....	40
12. Eredmények értékelése.....	50
12.1. A hajó merülési mélységének és sebességének hatása, változó vízjárási állapotokban....	51
12.2. Eltérő hajóforgalmak szerint (haladási irány, hajók száma)	52
13. Összefoglalás.....	53
14. Következtetések.....	54
Köszönetnyilvánítás.....	55
Felhasznált irodalom	56

Tartalmi kivonat

A Duna hajózhatóságának kérdése majdhogynem egyidős a modern belvízi fuvarozással. Az utóbbi évtizedekben megnyitott Duna – Majna – Rajna csatorna viszont egy olyan lehetőséget teremtett, melyre egészen mostanáig várni kellett. Az európai kontinens keleti és nyugati kikötői végre összeköttetésben állhatnak egymással. Az Európai Unió által szorgalmazott intézkedés olyan irányokat hivatott képviselni, mely egy gazdaságos tranzit útvonalat kínál interkontinentális szinten. Nem titkolt célja az Uniónak továbbra biztosítani helyét a világ nagy kikötői és vízi forgalmai között. Ehhez új területeket kell elérni a forgalmas tengeri ARA kikötőtől (Amszterdam – Rotterdam – Antwerpen) a kontinens belső területei, és a keleten elhelyezkedő fekete-tengeri kikötők (Constanza) felé. Az új piacok erősítik és biztosabbá teszik gazdasági kapcsolatait Ázsia egyre inkább fejlődő régióival. DMR ma már lehetővé teszi e kapcsolatot, de e vízi út kapacitásának határai messze vannak a jelenleg lezajló áruforgalmakétól. Ennek oka, hogy nem áll rendelkezésre a teljes hosszon megfelelő vízmélység a belvízi fuvarozás számára.

Ma azt kell észrevennünk, hogy sajnos a teljes magyarországi szakasz szűk keresztmetszetűnek mondható hajózási szempontból. Hiába kitűzött cél az EU részéről a folyón történő szállítás erősítése, ha hazánk évtizedek óta elveti a hajózási út kérdésével való foglalkozást. E kérdésben ráadásul nem csak önnön magunkat veszélyeztetjük, és kerülünk versenyhátrányba, hanem a kontinens különböző államait, hajózási vállalatait. Tudni kell azt is, hogy Európa kelet – nyugati kapcsolatát erősítő dunai hajózás feltételeit sorra megteremtették –vagy kivitelezési fázisban van – az érintett országok. A Duna Bizottság jelentése szerint a teljes szakaszon jelen lévő, problémát okozó gátlók közül közel fele (45%) a magyarországi szakaszon található. Ha figyelembe vesszük azt, hogy a folyó teljes hosszának mintegy 15 % - át érinti hazánk , akkor belátható, hogy az évtizedek óta húzódozó helyzet intézkedéseket kíván.

Folyószabályozási kérdésben jelenleg nem támogatott a Duna hazai szakaszán bárminemű duzzasztómű létesítése, mely a legegyszerűbben oldaná meg a tárgyalt helyzetet, sok más előnyével együtt. Hagyományos folyószabályozási módok is rendelkezésre állnak, hogy biztosítani lehessen hosszabb időszakokra a megfelelő hajózási mélységeket, megfelelő szélességben. A korábbi években már számos tervezést megalapozó vizsgálat készült a folyószabályozási művek hatásainak elemzésére kisminta- és numerikus modellek alkalmazásával, de a hajózási sávban elvonuló uszályok, bárkák áramlásra kifejtett hatását eddig nem vizsgálták. Dolgozatom célja, hogy egy arra alkalmas kétdimenziós áramlási modellel megvizsgáljam a mozgó hajók által okozott nempermanens áramlási jelenségeket, elsősorban a folyószabályozási művek közötti terekre koncentrálva. A vizsgálatokat egyfelől egy sematizált csatornában hajtom végre, majd egy szabályozott Duna-szakaszra is végzek számításokat. A modellfuttatások eredményeként a megváltozott áramlási jellemzők és a hajó paraméterek közötti összefüggéseket állítok fel.

1. Bevezetés

2004 óta az Európai Unió tagságunk lehetővé teszi, hogy részt vegyünk a kontinens nyugati és keleti peremvidékei közötti áruforgalomban. A kontinens második legnagyobb vízfolyása, a Duna egyértelmű lehetőséget kínál e kapcsolat meglétében, melyet csak tovább fokozott a Duna-Majna-Rajna csatorna megépítése. Az áruforgalom vízi útra való terelődése a belvízi fuvarozás megerősödését eredményezi az unión belül és hazánkban egyaránt. Ehhez alapvető feltételként egy, az év döntő hányadában igénybe vehető hajózási útvonalat kell biztosítani. A Magyarországon előirányzott tervek hagyományos szabályozási művekkel biztosítanák a kívánt hajózhatósági viszonyokat. Ennek egyik eszköze a sarkantyúk általi folyószabályozás. A műtárgyak áramlásra gyakorolt hatását már számos korábbi tanulmány vizsgálta, de ezek között elvétve foglalkoztak az elhaladó hajó indukálta hidrodinamikai hatásokkal, hazai szinten pedig nem készült még ilyen vizsgálat. A korábbi tanulmányokat is figyelembe véve ez a dolgozat a hajózás folyami áramlásra gyakorolt hatását hivatott numerikus modellezési módszer segítségével feltárni egy sarkantyúkkal övezett csatornában, majd a Duna egy szakaszára. Dolgozatom célja felhívni a figyelmet a hajó forgalom hatásának kutatására folyószabályozást érintő kérdések esetén nemzetközi áruszállítás által igénybe vett folyószakaszokon.

2. Magyarország földrajzi helyzete Európában

2.1. Tenger nélküli hajózás

Közép-Európában elhelyezkedő hazánk lassan 100 éve, hogy tengerparttal nem rendelkezik. A Kárpát-medence jellegéből adódóan vízfolyásaink szinte csakis kizárólag külföldről érkeznek. Fő folyásunk, a Duna, Európa második legnagyobb vízfolyása. A 2860 km-es folyó nyugatról egészen a Fekete-tengerig nyújtózik el, 10 országot érintve útján. Ezért bír kiemelt jelentőséggel, hiszen a belvízi hajózás fő színtere lehet a kontinensen belül. A Dunát a Majnával összekötő csatorna pedig a 20. században lehetővé tette az Északi-tengerrel való hajózási kapcsolatot, kiváló lehetőséget adva ezzel a közép és keleti régiók fejlődésére, a belvízi tranzit forgalomba való bekapcsolódásra.

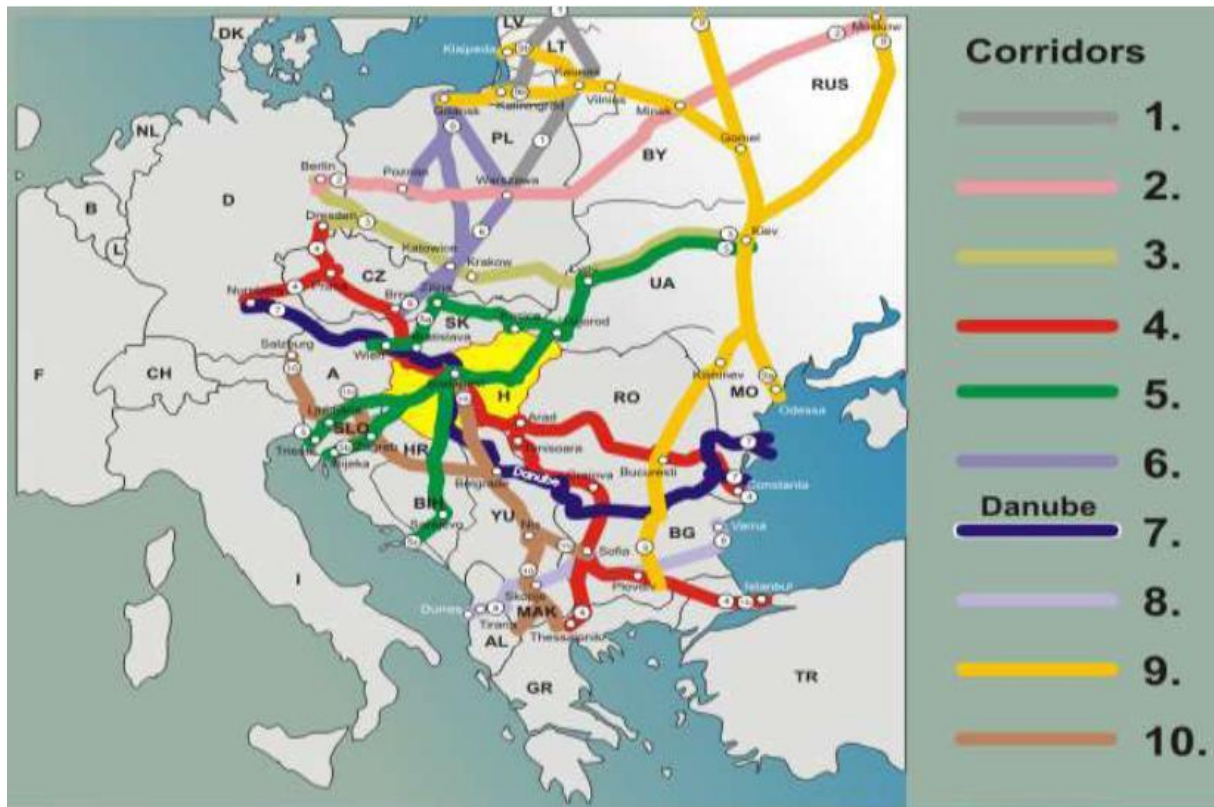
2.2. Duna- Majna- Rajna csatorna

Az 1992-ben átadott csatorna a Dunát a Rajnával együtt a világ leghosszabb belföldi vízi útjává emelte a maga közel 3500 kilométeres hosszával. Lehetővé vált a tényleges és közvetlen áruforgalom a kontinens két szélső tengere között. Viszont az, hogy a Duna integrálódott az észak-nyugat fejlett, és forgalmas kikötőihez, egyben egy fejlődési irányt is magában foglalt. Ugyanis a Rajnán nagyságrendekkel nagyobb az áruforgalom. Ennek megfelelően a kikötők gyakorisága, felszereltsége, és kiépítettsége is alkalmazkodott a kívánt igényeknek. A csatorna megnyitásával a Duna közép és alsó szakaszán hiába indult volna meg a nagyobb mértékű hajóforgalom, nem volt megfelelő sem a hajózhatósági viszony, sem a fogadó/átrakodó épített környezet. Mindezek javításra szorultak, és fejlesztésük ma is tart. Két évtized távlatából sem beszélhetünk igényeknek megfelelő kikötőkről és teljesen hajózható vízi útról a belvízi hajózás tekintetében. A Dunán még ma is 5-7-szer távolabb helyezkednek el a kikötők egymástól, mint a Rajnán, valamint, ha csak a morfológiát tekintjük, akkor meg kell állapítanunk, hogy a teljes magyarországi szakasz szűk keresztmetszetű. Legrosszabb állapotban a Pozsony-Komárom közti rész található. A VITUKI 2007-es jelentése szerint a teljes Duna 2860 km-es szakaszán 49

db szűkület van, melyből a hazai 417 kilométeres szakaszon 22 darab található! Ha be szeretnénk kapcsolódni a transzeurópai hálózatba, akkor ezt mindenképp orvosolnunk kell.

2.3. Transzeurópai hálózat

Ahhoz, hogy az Európai Unió a továbbiakban is fel tudja venni a versenyt a már meglévő (U.S.A.) és ébredésben lévő (Távol-Kelet), jelentős piacot kínáló gazdasági területekkel, új fejlesztési és fejlődési irányokat kellett definiálnia. Egyik eszköze ehhez, hogy a perifériákon található országokat is integrálni kell, egy átfogó, és közvetlen kapcsolatú, hatékony közlekedési rendszerbe. Így került kijelölésre 10 darab korridor (1. ábra), melyek a fejlett magterületekkel együtt alkotják a Transzeurópai Hálózatot (TEN).



1. ábra Transzeurópai hálózatok

A Dunát, mint vízi utat VII. számú korridornak nevezték el, mely 'unimodal' jelzővel is illettek, azaz közvetlenül egy közlekedési ágazat számára válik használhatóvá. A 10 folyosó közül a Dunát méltán említhetjük az egyik legrangosabb korridornak, hiszen mind a hosszát, fuvarozási teljesítményét, és mind az összekötött országok számát tekintve kimagaslik a mezőnyből.

2.4. Hajóutak osztályozása

Az Európai Közlekedési Miniszterek Konferenciája (CEMT) kezdeményezésére először 1962-ben alkotta meg az ENSZ Európai Gazdasági Bizottsága (ENSZ-EGB) a kontinens víziút-osztályozási rendszerét, melyet a modernebb kor igényeinek megfelelően 1992-ben véglegesítettek. Az ENSZ-EGB dokumentum szerint az osztályozás alapja az egységesített méretű Európa típusú hajók, vagy ezekből összeállított kötelékek közlekedésre való alkalmasság. További lényeges pontja pedig a vízfolyás természetes sajátosságaihoz való alkalmazkodás. E főbb jellemzőket szem előtt tartva az az osztályozás alapelvei a következők:

- Nemzetközi jelentőségű vízi hajóutakon 25 dm-es minimális merülést kell biztosítani.

- A megkövetelt vízmélységeknek az év 66 %-ban, azaz 240 nap kell legalább teljesülni.
- Osztályba sorolási tényező az átbocsátható hordképesség is.
- Szabad úrszelvénymagasságra vonatkozó szigorodó követelmények (növekvő konténerszállítások miatt)
- Az egyes víziút-osztályok modulszerű egymásra épülése

A fenti elveket teljességgel figyelembe véve, az ENSZ-EGB '92 hajóút osztályozás szerint a víziutak kategorizálása:

- egyéb vízi közlekedésre alkalmas belvizek (turisztikai, sport és egyéb célt szolgáló vizek)
- kishajózásra alkalmas víziutak (250 tonnánál kisebb hordképességű hajók átbocsátására alkalmas vizek)
- nagyhajózásra alkalmas víziutak (I-VII. osztály), ezen belül:
 - regionális érdekelttségű víziutak (I-III. osztály)
 - nemzetközi jelentőségű víziutak (IV-VII. osztály)

A kialakult osztályok a 1. táblázatban alább láthatóak, feltüntetve a magányos géphajóra, illetve tolt kötelékre vonatkozó fontosabb paraméterekkel:

Vízi út osztály	A közlekedtethető hajók és tolt kötelékek ábrája	Magányos géphajó				Tolt kötelék			
		Hosszúság [m]	Szélesség [m]	Merülés [m]	Hordképesség [tonna]	Hosszúság [m]	Szélesség [m]	Merülés [m]	Hordképesség [tonna]
I		40	5	1,4	200	--	--	--	--
II		57	7,5	1,6	500	--	--	--	--
III		70	8,2	2	650-1000	--	--	--	--
IV		85	9,5	2,5	1000-1500	85	9,5	2,5	1500
V/A		95-110	11,4	2,5	1500-3000	110	11,4	2,5	1600-3000
V/B		110	11,4	2,5	1500-3000	185	11,4	2,5	3200-6000
VI/A		110	15	2,5	3000-3500	110	22,8	2,5	3200-6000
VI/B		140	15	2,5	4000-4500	185	22,8	2,5	6400-12000
VI/C		140	15	2,5	4000-6200	275 190	22,8 34,2	2,5	9600-18000
VII		140	15	2,5	4000-6200	275	34,2	2,5	14500-27000

1. táblázat Európai víziutak ENSZ-EGB szerinti osztályai

A Duna magyarországi szakaszát Szap – Budapest között VI/B, Budapest – Mohács között pedig VI/C osztályba sorolták (2. ábra). Nagyobb hazai vízfolyásaink osztályba sorolása a következő képen látható:



2. ábra Magyarországi vízfolyásainak víziút kategóriái

2.5. Folyami fuvarozás

2.5.1. Belvízi fuvarozás jellemzői

A fejlett társadalmakban világszerte elmondható, hogy a hajózási társaságoknak meg kell küzdeniük a szállítási verseny piacon a közúttal és a vasúttal egyaránt. Míg a közút a háztól-házig történő fuvarozásban egyeduralkodó, addig a vasút a tömegáruk gyors és hatékony szállítását teszi lehetővé. Mégis, ahol lehetőség kínálkozik a hidrogeológiai adottságoknak köszönhetően a folyami fuvarozásra, ott versenyképes ágazattá válik a hajón történő szállítás.

2.5.2. Folyami fuvarozás előnyei

A hajózási ágazatnak a közúti és vasúti közlekedési ágazatokkal szemben elsősorban az aránylag kis energiafelhasználás, és az olcsó tömegáru szállítás adhat előnyt. Ebben egyedül a vasúti ágazat az, mely versenyre kelhet vele. A 2. táblázatban látható hogyan is alakulnak bizonyos jellemzői a 3 ágazatnak világszerte:

	Belvízi fuvarozás	Vasút	Közút
Fuvarozási teljesítmény, azonos energiafelhasználás mellett	25	8	1
Beruházási költségigény (t/km)	1	6	8
Fuvarozási díjbevétel	1	3,5	11,8
Nemzetgazdasági szintű költségek (t/km)	1	3	9
Balesetek fajlagos költségei	1	7	15
Munkaerőigény	1	7	15

2. táblázat Közlekedési ágak költségeinek összehasonlításai (VITUKI, 2007)

Összességében elmondható, hogy ennél az ágazatnál csakis a csővezetékes szállítás az olcsóbb. Egy másik szempontot, a környezetvédelmet vizsgálva is egyértelmű előny mutatkozik. A többi ágazattal összehasonlítva ezen ágazat ró legkevesebb terhet a környezetére. Bizonyos vizsgálatok pedig arra engednek következtetni, hogy a hajócsavarok keltette örvények segítenek növelni a víztest oxigénháztartását, mely jobb ökológiai környezetet generál.

2.5.3. Nemzetgazdasági érvényesülés

Az állam számára meglehetősen sok előnnyel járhat, ha ezt az ágazatot támogatja. A részletesség teljessége nélkül álljon itt egy rövid felsorolás:

- A hajózási fuvarozás támogatásával versenyképesebbé válik ezen közlekedési ágazat is, mely a behajózható térségekre is gazdaságélénkítő hatással bír, azaz a régió fejlődésével együtt az adóbevételek is nőnek.
- Legkörnyezetkímélőbb módja a fuvaroztatásnak, és a lakosságot érintő externáliák is itt a legalacsonyabbak (pl.: zaj-, levegő-, környezetterhelés).
- Fajlagos üzemanyag felhasználás a legkisebb a közút, vasút és még a repülőszállítás között is. Azaz, ha kevesebb üzemanyagra van szükség, úgy kevesebbet kell arra költeni, javulna a külkereskedelmi mérleg.
- A túlszűfoltta váló, és egyre több balesetet regisztrált közúti fuvarozás helyett ideális választás ott, ahol lehetőség van a megszokott szállítási mód kiváltására. A Duna kapacitáskihasználtsága pedig 20 % körüli (VITUKI, 2007), így bőven élhetnénk a lehetőséggel.

Duna hazai szabályozásával elérhető további nemzetgazdasági előnyök:

- Vízvisszatartó műtárgy kiépítése esetén, csökkenne a vízi út használhatóságának kockázata, valamint a műtárgy energiatermeléssel együtt is kivitelezhető, melyre az Euró-

pai Uniótól külön pályázati összeget lehetne elnyerni, hiszen alternatív energiatermelési lehetőségként támogatja az ilyesfajta fejlesztéseket.

- Az előbb említett műtárgy kiépítése az árvízvédelemi, valamint más esetekben is jobban kezelhetővé válnának bizonyos vízkár események.
- A szűk keresztmetszetek felszámolása nagyban csökkentené jégzajlás idején a jégdugó kialakulásának valószínűségét.
- A szabályozás során a holtágak rekreációja is előtérbe kerülhet, és meg is valósulhat. Ez mind ökológiai, mind pedig gazdasági, turisztikai szempontból is igen kedvező hatással bír.
- A vízre épülő iparágak biztosabb jövő elé nézhetnének, már csak azzal, hogy lelassulna, bizonyos részeken megállna a medermélyülés.

2.5.4. A belvízi hajózás hátrányai

Természetesen nem lehet egyetlen oldala az éremnek. Számba kell venni a hátrányokat is, melyek közül a főbb jellegzetességeket számba vetve:

- Kétségtelenül a legnagyobb hátrány, hogy lassú. Sajnos a kikötői átrakodásokkal együtt, és hegymenet, völgymenet közti időbeli különbségek miatt is csak időintervallumokban tervezhető a fuvarozás (megj.: Dunán kevésbé jellemző).
- A természeti erőknél erősen ki van szolgáltatva, klimatikus és hidrológiai jellemzők determinálják az egy évben hajózható napok számát.
- Magas az eszközérték, és drága a kikötői infrastruktúra is.
- Nem érhető el közvetlen fuvarozási kapcsolatok kiépítése, hiszen a háztól-házig való szállítás majdhogynem lehetetlen.
- Fuvarozás közbeni áru igénybevételek jóval nagyobbak lehetnek, mint a közúti vagy vasúti ágazatoknál.
- Egy folyó, mint természetes határvonal két állam között, nemzetközi, és belpolitikai konfliktusokra is érzékenyen reagálhat a rajta való fuvarozás. Gondoljunk itt csak a déli szomszédunk Szerbia függetlenedésére a 90-es években, mikor e szakaszon igen lecsökkent a hajóforgalom.

2.5.6. Folyami fuvarozás aktuális helyzete

Magyarországon jelenleg csak a Dunán, és a Tisza Szegedtől délre eső szakaszán bonyolódik le a nemzetközi árucseré forgalom. Bár több folyónk is alkalmas lenne a nemzetközi árucserébe történő becsatlakozásra, a hidromorfológiai viszonyok nem engedik, hogy az év tartós részében, vagy egyáltalán lehetséges legyen a belvízi fuvarozás.

A Dunán az elmúlt időszakban Magyarországnak szinte csakis a környező országokkal történt bizonyos mértékű kereskedelme, ám a DMR csatorna ma már lehetővé teszi, hogy az észak-nyugati kikötőktől is irányuljon áruforgalom Közép és Kelet-Európa térségein át, első sorban a Fekete-tenger vidékére. Hazánk páratlan helyzet lehetővé teszi, hogy bekapcsolódjon, és kivegye részét a tranzitforgalom lebonyolódásából a kontinens két peremvidéke között.

Mégis azt kell tapasztalnunk, hogy a környező országok sorra hagyják Magyarországot. Hazánkban 1991 óta a leghátrányosabb helyzettel bír a belvízi hajózás, melyet mi sem mutat jobban, hogy azóta egy fejlesztési pályázat sem került kiírásra, melyen magyar hajózási társaság

elindulhatna. Pedig az államnak évente 5-6 milliárd Forintot kellene költenie a kikötők és a hajóflotta karbantartására. Ma ezt -amennyire csak lehet- a hajózási társaságok vállalják magukra.

Európai viszonylatban az látható termelési oldalról, hogy a fejlett ipari országokban a készletre történő gyártásról átálltak a rendelésre történő gyártásra. Az úgynevezett *JIT* (Just in time = csakis időben) elvű rendszerek az elmúlt 20 évben jelentek meg. Ez a fuvarozásban is változást indukált. Azt kell belátni, hogy ez láncreakcióként vonja maga után a szükséges teendőket: a JIT rendszer növeli a szállítások gyakoriságát, ami egyben azt is jelenti, hogy csökken a küldemények nagysága, de ugyanakkor nő annak értéke a magasabb feldolgozottsági szint következtében. Emelkednek az átlagos szállítási távolságok (kevesebb átrakodás, kevesebb költség), és a szállítási szolgáltatásokkal szemben támasztott követelmények. Mindemellett persze a globalizáció és az integráció következtében európai, de globális szinten is nő a fuvarozandó áruk mennyisége összességében (kevesebbet, többször és többfelé). Ahhoz, hogy lépést tartson mind, az Unió, mind Magyarország a fejlődés mértékével, igazodni kell a változó –és részben már megváltozott– igényekhez.

2.6. Magyarországi kilátások

A DMR csatorna megnyitására Magyarországon évtizedek óta készültek. Sokan, mérnökök és közgazdászok, egyaránt azt hitték, hogy megmentője lesz a magyar belvízi fuvarozásnak az egységes európai víziút-hálózat kialakulása. A Duna pedig sok lehetőséget kínál a országnak, és a folyó menti településeknek egyaránt. Lehetővé tesz egy környezetbarát áruszállítási módot, kikötői logisztikai bázisok, és ipari központok telepítését érhetjük el térségi, országos, de akár a régió szintjén is, valamint idegenforgalmi és sport célokat is szolgálta.

Kétségtelen, hogy ma a folyó hazai viszonylataiban nem mindenhol hajózható mélymerüléssű hajókkal. Ennek rendbetételét a teljes magyarországi szakaszon az Európai Unió erőteljesen javasolja a kiszámíthatóbb és a keleti kikötőkkel való egyszerűbb kapcsolat fenntartása érdekében. Sajnálatos módon erről lemondott hazánk, mikor elvetette a vízlépcsők létesítésének kérdését, mely megoldaná e problémát, és több célú működésének előnyei számos gazdasági szektorban jelentkeznének. Ahhoz, hogy mégis növekedjék az vízi áruforgalom, több, egymással harmóniában álló fejlesztésre van szükség. Fontos, hogy a kikötők szolgáltatásai összehangoltak legyenek, és sokat jelentene az is, ha megszüntetnék a kritikus keresztmetszeteket a folyón. Ilyen szempontból sajnos az egész hazai szakasz szűk keresztmetszetűnek mondható, a legsúlyosabb gondok pedig Komárom–Pozsony közti szakaszon jelentkeznek, mely rendbe tétele nem tűr további halasztást.

2.7. Akadályok a belvízi fuvarozásban

Elkerülhetetlen a hosszú távon, több évtizedben való gondolkodás, ha a közlekedésről beszélünk. Ez az utóbbi időkben (15-20 év) hazánkra nem volt jellemző hajózási iparágban. Sokkal inkább a jelenlegi állapot megőrzése, és a további fejlesztések későbbre ütemezése volt/van jelen a közlekedéspolitikában a belvízi hajózás terén, de ugyanúgy a vasút terén is. Ebből következően elsősorban közúti fejlesztések, autópálya építések folytak az utóbbi időkben, mint egyetlen támogatott közlekedési ágazat. A magas és erős kereslet tette ezt szükségessé. A sokkal környezetbarátabb vízi közlekedés fejlesztésére nem került sor, mert arra kicsi, és kevés igény mutatkozott. Ebből kifolyólag számos területen le vagyunk maradva a környező, és más

Uniós országokhoz képest, és ha érdemben szeretnék komoly vetélytársként szerepet vállalni, akkor nagyléptékű beruházásokra lesz szükség e területen. A belvízi fuvarozáshoz a jövőben a következő dolgokra lesz szükségünk:

1. Használható víziút
2. Versenyképes hajópark
3. Képzett vezetés és személyzet
4. Negyedik generációs kikötők
5. Piac és azon eligazodó kereskedők

Mindenekelőtt a hajózást támogató közlekedéspolitikai ad rövid, és hosszútávon megfelelő alapot a kívánt állapot eléréséhez. Erre mutatkoznak jelek, hiszen 2012 szeptemberében Nemzeti Hajózási Stratégia címen vitaanyag jelent meg a kormány hivatalos weboldalán. A dokumentum által felvetett kérdések szakmailag kifogásolhatóak ugyan, de öröndetes maga a tény, hogy sok év után újra a Parlament elé kerülhet a hazai hajózás ügye.

Jelen TDK dolgozat a használható víziút témakörre terjed ki, mely alapfeltétele, egy hosszútávon prognosztizálható, kontinenst átszelő áruszállításnak.

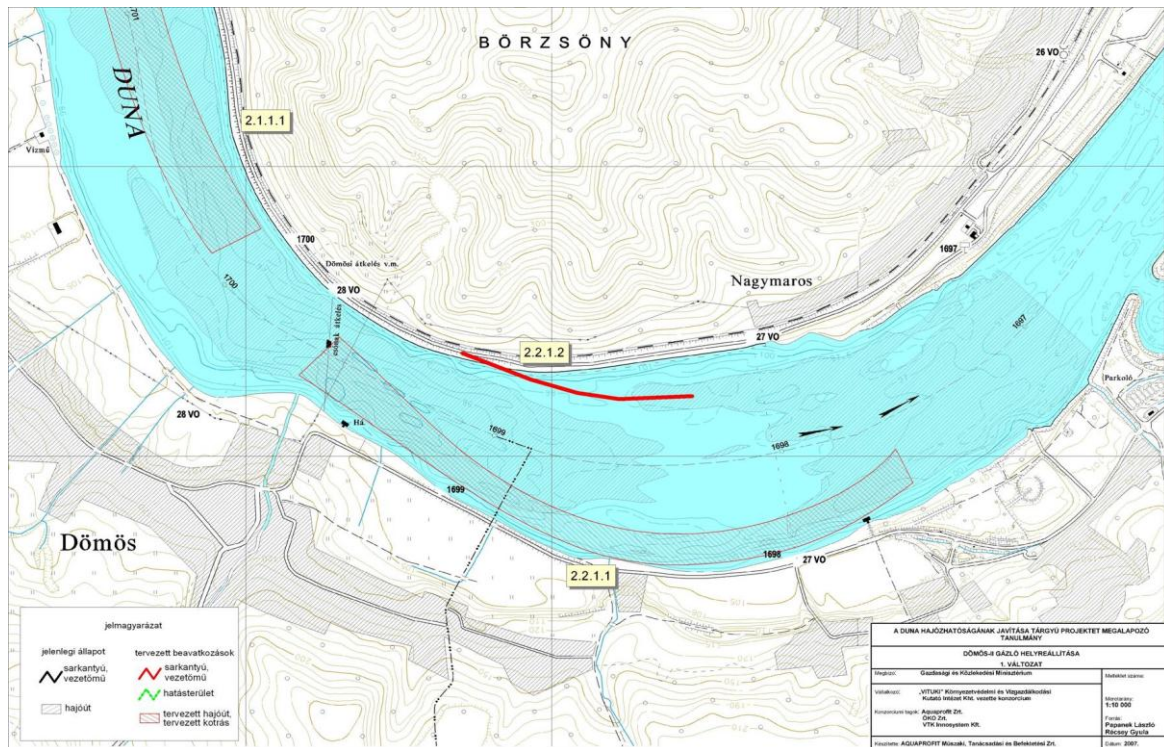
3. Duna szabályozásának kérdései

Az elmúlt évtizedben többször is előfordult, hogy hazánk legnagyobb vízfolyásának a vízállásai kisvízi rekordokat közelítettek, vagy döntöttek meg. A 2003-as alacsony vízállás leginkább a Szigetközt veszélyeztette, de elég csak a tavalyi, 2011-es vízállásjelentésekre gondolnunk itt Budapesten, hogy újratárgyaljuk a Duna szabályozásának kérdését.

3.1. Jelenlegi helyzet

A folyó magyarországi szakasza Rajkánál, az 1+850 fkm-nél kezdődik, és a szerb határnál, az 1+433 fkm-ig tart. A hazai szakasz tehát 417 km hosszú, mely jellegét tekintve középszakaszként sorolható be. Ebből következik, hogy a laza folyami üledékben meanderező vízfolyás morotvákat, holtágakat alakított ki a Kárpát-medencében. Mederágyi vastagsága 10 m-re tehető, mely főként finom homokból, iszapos homokból, és iszapból, agyagból áll össze. Itt a középvízi meder szélessége átlagosan 400-600 m körül változik, míg hullámtere a 450 m szélességű Dunaszekcsői legszűkebb szakasztól egészen a 4-5 km széles Sió-torok, Bata közeli szakasz méretéig változhat. A mederanyagot finom, illetve iszapos homok váltakozása adja. Jelentős vízszintingadozással is bír a Duna, mely a fuvarozásra is hatással van.

A hazai szakaszon több mint 20 gázló található, mely külön gondot jelent a fuvarozási vállalatoknak. Egy évben akár több hónapban is csak korlátozásokkal lehet közlekedni e részekben. Legproblémásabb a helyzet Dunaföldvár, Nyergesújfalu és Dömösi szakaszokon (**3. ábra**).



3. ábra Dömösi gázlónál hajózási célú beavatkozásokat bemutató terv

Az EU prioritásai közé tartozik a hajóút karbantartása, azaz a minimum 25 dm-es merülési mélység biztosítása a teljes útvonalon, évi 310 napos tartóssággal. A Magyar Állam 2006-ban még céljai közt tűzte ki, hogy olyan intézkedéseket hoz, mellyel biztosíthatja a kívánt vízszintet, az év 300 napjában.

3. 2. Összehasonlítás a teljes Duna szakasszal

A Duna Bizottság jelentése szerint (1996) a teljes Duna szakaszon 49 szűkület található. A következő módon oszlanak meg:

- német–osztrák szakasz 6 db
- Szap–Budapest szakasz 16 db
- Budapest–Vaskapu szakasz 9 db (ebből 6 hazai területen)
- Al-Duna 18 db

Ebből is látszik, hogy a teljes mennyiség majdnem a fele (45%) a magyarországi szakaszon található. Ha ehhez feltüntetésre kerül az, hogy az ország által érintett 417 km folyószakasz a Duna teljes 2850 km-nek a 15%-át adja, akkor érezzük igazán a beavatkozások szükségességét. A jelentés kitért a vízállás tartósságok vizsgálatára is. A Bizottság szerint az 1+850-1+641-1+433 fkm közti szakaszon 157-152 nap nem teljesül az előírt minimális hajózási vízszint a vizsgált években (25+2 dm illetve 25+4 dm mederanyagtól függően).

Bizottsági jelentés külön nem tért ki, de meg kell említeni, hogy a kritikus helyzetekhez (Kisvízi állapotok, illetve gázlók, szűkületek) hozzátartozik a jégzajlás tárgyalása is. Ennek tárgyalásától jelenleg eltekint e dolgozat.

4. TDK dolgozat célkitűzése

A fentiekben leírtak szerint jól látható, hogy a magyarországi folyók többcélú folyamszabályozási feladatait a közeljövőben a szabályozási művek alkalmazásával tudjuk csak végrehajtani. Ez elmúlt években számos tanulmány látott napvilágot (pl.: Baranya és Józsa, 2006; Baranya et al., 2008), melyek a sarkantyúzott folyószakaszok áramlási és morfordinamikai feltárását tűzte ki célul, vagyis a szabályozott folyószakaszok ilyen irányú elemzése nem teljesen újszerű. Ezek a vizsgálatok azonban nem terjedtek ki a mozgó hajók áramlásra kifejtett hatására, vagyis a hajók keltette lokálisan és rövidebb időre megváltozott nempermanens áramképek vizsgálatára.

Külföldi példák igazolják, hogy a hajók folyami áramlásra kifejtett hatása sokszor nem elhanyagolható (pl. Verheij 2008), igaz ez számos paramétertől függ (folyó geometriai, hidraulikai jellemzői, mozgó hajók paraméterei, stb.). Ez a hatás főként a sarkantyúk közötti áramlási terekre terjed ki, a tipikus visszaforgó áramlási struktúra megváltoztatásával. Ennek következményeként ideiglenesen megváltoznak az elkeveredési viszonyok, a fenécsúsztatófeszültség térbeli eloszlása, ami mind a hordaléktranszport mind az esetleges szennyezőanyag elkeverési folyamatokra kihat. A hajók hatása környezeti vizsgálatoknál sem elhanyagolható, hiszen az általuk okozott átöblítő jelleg a mederfenék közeli gerinctelenek, sőt a halak élőhelyére is közvetlen hatással van.

Belátható tehát, hogy a hajók áramlásra kifejtett hatása a folyószabályozási tervezésnél szerepet játszhat, ezért fontosnak tartom az ilyen irányú megalapozó vizsgálatokat. A dolgozatban numerikus modell segítségével kívánom elemezni ezt a jelenséget két, eltérő csatorna geometria esetére. A modell igazolását egy kisminta léptékű sematizált csatornán keresztül hajtom végre, korábbi vizsgálatokkal való összehasonlítás keretében. Második lépésként egy folyószabályozási művekkel ellátott Duna-szakasz modelljét építem fel, ahol valós léptékű hidrodinamikai elemzést végzek. Mindkét esetben rámutatok a folyó geometriai és hidraulikai valamint a hajó paraméterek (merülési mélység, hajó geometriai jellemzők, további hajóparaméterek) közötti összefüggésekre, majd következtetéseket vonok le a kölcsönhatások jellegére vonatkozóan.

5. Folyószabályozási módok

Folyószabályozásra akkor kerülhet sor, ha a folyó vízjárása nem megfelelő valamilyen szempontból. Ilyen szempont lehet a folyami fuvarozás, folyó hidraulika, hidrológia, vízgazdálkodás és vízbázisvédelem, árvízvédelem, jégelvezetés, környezetvédelem, ökológia, hidrobiológia, szociológia, rekreáció és turisztika. E szempontokat ajánlott együttesen kezelni, és több változatot is készíteni egy aktuális szabályozási feladatra, melyből kiderül melyik eset felel meg leginkább a vizsgált szempontoknak.

5.1. Folyószabályozás művei

A teljes magyarországi Duna szakasz az év 1/3-ban nem, 1/3 évben pedig csak korlátozó-sokkal hajózható. Mindenféle korlátozás nélküli hajó-forgalom lebonyolódására az évből megmaradt 1/3, azaz közel 120 nap áll rendelkezésre a hajózási társaságoknak, vállalatoknak. Pedig a Duna nemzetközi hajóút, Budapest feletti szakaszon VI/B vízi osztályúnak, a főváros alatti szakaszon pedig VI/C osztályú vízi út paramétereivel kellene rendelkeznie (a két osztály csak a tolt kötelékek méreteiben különbözik). A kívánt követelményeknek hagyományos folyószabályozási eszközökkel is meg lehet felelni, úgymint oldalművekkel, párhuzamművekkel és sarkantyúkkal. Bizonyos esetekben a beavatkozás kiegészülhet kotrasi munkálatokkal is (pl.: sziklás gázló esetében). Tengernyi eszköz áll rendelkezésünkre ahhoz, hogy a vízfolyás adott, vagy teljes szakaszát szabályozhassuk. Csoportosításuk a következő módon történhet:

Hosszirányú művek:

- partburkolat
- partbiztosítás
- terelő és vezetőművek
- átmetszések
- kő depóniák

Keresztirányú művek:

- sarkantyúk
- mederelzárások
- iszapoltató művek
- fenékgátak

5.2. Sarkantyúk általi folyószabályozás

A sarkantyúk keresztirányú művek, melyek a folyókanyarulat görbületétől függően 5 – 10°-kal térnek el a folyó sodorvonalára húzott merőlegestől, felvízi irányban. Legtöbb esetben a domború parton, a jelenlegi mederben épülnek. Anyaguk legtöbb esetben terméskő, metszete trapéz alakú. Céljuk a meder szűkítése, az áramlás terelése a sodorvonal felé, mely következtében megnövekszik a sodorvonalban az áramlási sebesség. A nagyobb sebesség nagyobb hordalék elragadó erőt is jelent, mely a meder mélyülésével járhat, ha arra a meder anyaga hajlamos. Nagyvízi eseményeknél, amikor is a víz átbukik a művön, megváltozik a sarkantyú környezetében az áramlási struktúra. A sarkantyú alvízi oldalán függőleges értelmű leváló áramlások alakulnak ki, amik lokális medereróziót okozhatnak, és a sarkantyúk közötti zónát pedig a nagyobb sebességű áramlás átöblíti, ami a mederanyag felkeveredését eredményezheti. A sarkantyú a szabályozási keresztiszelvényen kívül helyezkedik el, és koronaszintje KÖV állapotra van általában kiépítve, mely fokozatosan emelkedhet is a part felé.

5.3. Modellben alkalmazott sarkantyúk

Mind a sematizált modell esetében, mind pedig a Duna szakasz vizsgálatokor úgynevezett innovatív sarkantyúk kerültek modellezésre.



4. ábra Innovatív sarkantyúk a Rajnán, Düsseldorfnál

Az innovatív jelző azon sarkantyút illeti meg, melynek a parttal vett dőlésszöge a hagyományos sarkantyú 90° -os értékétől eltér. A 4. ábra szerint pár fokos eltérésről van szó, ennek indoklása egyszerű. A sarkantyúk koronaszintjének kiépítése az említettek szerint KÖV állapotokra történik, ezáltal nagyvízi eseményeknél koronáján átbukik a víz. Az átbukó víz iránya merőleges műtárgy hossz tengelyére. Ha felvíz irányba eltér pár fokkal a merőlegetől, akkor az átbukó vízárammal a folyó hossz tengelye felé vezeti az áramlást, ezzel is elősegítve a folyó szabályozását KÖV állapotot meghaladó vízjárás esetén egyaránt.

6. Vizsgálati lépések

Az idei, 2012-es TDK konferenciára készülő dolgozatom vizsgálati lépéseit az alábbiak szerint fogalmaztam meg:

- A vizsgálandó területet, azaz egy sematizált csatorna szakaszt lefedő, az áramlások modellezését megfelelő felbontással biztosító rácsháló felállítása, valamint a rácshálón a digitális medermodell megalkotása.
- A modell ellenőrzése az általam használt programkörnyezettől eltérő numerikus modellek múltbeli eredményei alapján.
- Hajótestek paramétereinek meghatározása, valamint völgy- és hegymeneti elhaladások, azaz a mozgó hajó modellbeli leképezése.
- A modell alkalmazása a mértékadó helyzetekben. A hajózási sávban elvonuló bárkák és uszályok áramlásra kifejtett hatásainak számszerűsítése, úgymint:
 - mozgó hajók által kialakult nempermanens áramlási jelenségek modellezése, koncentrálna a folyószabályozási művek közötti térre
 - modellfuttatások eredményeként a megváltozott hidraulikai jellemzők és a hajó paramétereinek közötti összefüggések vizsgálata
- Az előző pont végrehajtása egyedül valós folyószakaszon, a már korábban felmért nagybajcsi 1+792 - 1+802 közötti Duna szakaszon történik.

7. Numerikus modell felépítése

A kitűzött célok, feladatok elvégzésére ma már elfogadott módszer a numerikus modellek alkalmazása. Egy-egy tervezést megelőzendő vizsgálatnál, a numerikus modellek a vízmozgást leíró fizikai alapegyenletek diszkretizált alakjának megoldására 3 módszer terjedt el. Rövid ismertetésükkel együtt alább olvashatóak:

- Véges Differencia Módszer (VDM): a leíró egyenletekben szereplő differenciálhányadosok közelítése véges differenciákkal. Azaz csak differenciálható megoldásra alkalmazható, strukturált rácsalakban (csomóponti változókkal). Rugalmas hálózást nem tesz lehetővé.
- Véges Térfogat Módszer (VTM): az ismeretlenek cellaátlagait keressük, ahol cella az ellenőrző térfogattal egyenlő. Rohanó és áramló állapot közti átmenetet is tudja kezelni.
- Végeselem Módszer (VEM): az egyes egyenletek maradék tagját, azaz hibáját minimalizáljuk, ahol cellánként különböző bázisfüggvény írja le az állapotváltozók eloszlását. Egy bázisfüggvény így csak egy csomópontban ad érvényes értéket, az összes többiben *nulla* az értéke. Rugalmas, térben változtatható rácsháló felbontást és peremhez illeszthető leképzést tesz lehetővé.

A 6. Vizsgálati lépések fejezetben felsoroltakat figyelembe véve a legmegfelelőbb eszközt egy végeselem leírást alkalmazó numerikus modell adhat. Jelen vizsgálathoz egy kétdimenziós modell tűnik az optimális választásnak, figyelembe véve a kívánt pontosságot, bonyolultságot, számítási és adatigényt. Mindazonáltal fontosnak tartom megjegyezni, hogy részletes morfordinamikai vizsgálatok esetén szükségszerű a térbeli leírás, hiszen a művek környezetében kialakuló lokális áramlási viszonyok erős térbeliséget mutatnak (pl.: Baranya és Józsa, 2004). Mivel a vizsgálat célja itt a hajók hatásának leírása és a rendelkezésre álló numerikus eszköz a mélységátlagolt leírást alkalmazza, eltekintünk a legrészletesebb, háromdimenziós leírástól.

Erre kiválóan alkalmas az úgynevezett SMS (*Surface-Water Modelling System*, SMS Development Team, 2012.) bázisszoftver alkalmazása, mely olyan funkciókkal bír, mint:

- 2D rácsháló generálása
- Modellek felépítése
- Modellfuttatás
- Eredmények megjelenítése

Magában a modellfuttatásban pedig *külső végeselem-megoldó modellt* hív be a program, mely például lehet az RMA2 illetve ADH végeselem-megoldó. A vizsgálatban alkalmazott ADH modellt világszerte használják folyam hidraulikai feladatokra. Így az ADH végeselem program választását a következő szempontok tették egyértelművé:

- 2D modellkörnyezet
- Háromszög rácsháló alkalmazása
- Adaptív rácsháló felállítása
- Mozgó hajó modellbeli leképezése

7.1. Szabadszínű áramlások elemzése 2D modellben

Szemben az 1D vízszintesen is integrált szemléletével már csak függőleges integrált közelítéssel élünk, azaz csakis a vízszintes változásokat képezzük le 2 dimenziós környezetben. További közelítésként elfogadjuk, hogy a víz, mint folyadék összenyomhatatlan, és a víztérben csakis hidrosztatikus nyomásállapotok uralkodnak. A mederellenállást pedig egyszerűen a függőleg menti középsebesség segítségével fejezzük ki, míg a víztér vízszintes irányú impulzus-cseréjét elhanyagoljuk.

A modellbeli vízmozgást a Reynolds-átlagolt sekélyvízi egyenletekkel írjuk le, melynek 3 állapotváltozója a h – vízmélység, valamint a \mathbf{q} (p, q) fajlagos vízhozamvektor két egymásra merőleges komponense. A három ismeretlen meghatározásához a *térfogattmegmaradás*, valamint az *impulzusmegmaradás* x és y irányú komponensek egyenleteinek megoldásával juthatunk.

7.2. Matematikai modell

A Reynolds-átlagolt sekélyvízi egyenletek integrálalakban a következőképpen írhatók fel:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_A \mathbf{u} dA + \oint_S (\mathbf{f}n_x + \mathbf{g}n_y) dS = \int_A \mathbf{s} dA \quad (1)$$

ahol t = idő;

A és S = egy ellenőrző térfogat alapjának területe, illetve a határvonalának kerülete;
 \mathbf{n} : $(\mathbf{n}_x, \mathbf{n}_y)$ = az S határvonal kifelé mutató normálirányú egységvektora az x ill. y irányú komponenseivel kifejezve. A (1) integrál egyenleten alapul maga az ADH vége-selem-megoldó modell is.

A víztér állapota az

$$\mathbf{u} = \begin{bmatrix} h \\ p \\ q \end{bmatrix} \quad (2)$$

vektorral írható le, mely tartalmazza az (1) egyenlet ismeretleneit, azaz a korábban definiált állapotváltozókat.

Az (1) egyenletben szereplő \mathbf{f} és \mathbf{g} vektorok az úgynevezett fluxusvektorok:

$$[\mathbf{f} \quad \mathbf{g}] = \begin{bmatrix} \frac{p^2}{h} + \frac{gh^2}{2} - \frac{h}{\rho} T_{xx} & \frac{pq}{h} - \frac{h}{\rho} T_{xy} \\ \frac{pq}{h} - \frac{h}{\rho} T_{yx} & \frac{q^2}{h} + \frac{gh^2}{2} - \frac{h}{\rho} T_{yy} \end{bmatrix} \quad (3)$$

ahol g = nehézségi gyorsulás ($9,81 \text{ m/s}^2$);

ρ = víz sűrűsége (1000 kg/m^3);

$T_{xx}, T_{xy}, T_{yx}, T_{yy}$ = turbulens feszültségtenzor elemei.

Az s forrástag pedig a következő alakban értelmezendő

$$s = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{\tau_{bx}}{\rho} - gh \frac{\delta z_b}{\delta x} \\ \frac{\tau_{by}}{\rho} - gh \frac{\delta z_b}{\delta y} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

melyben $\tau_b : (\tau_{bx}, \tau_{by})$ fenékcúsztatófeszültséget és mederesés hatását foglaljuk össze ;
 $z_b =$ mederszint [m].

A mélységátlagolt turbulens feszültségek:

$$T_{xx} = 2\rho\nu_e \frac{\delta u}{\delta x}, \quad T_{xy} = T_{yx} = \rho\nu_e \left(\frac{\delta u}{\delta x} + \frac{\delta v}{\delta y} \right), \quad T_{yy} = 2\rho\nu_e \frac{\delta v}{\delta y} \quad (5)$$

ahol $\nu_e =$ mélységátlagolt örvényviszkozitás $\mathbf{v} : (u, v) =$ függély-középsébség x illetve y irányú komponense.

7.3. Diszkretizálás

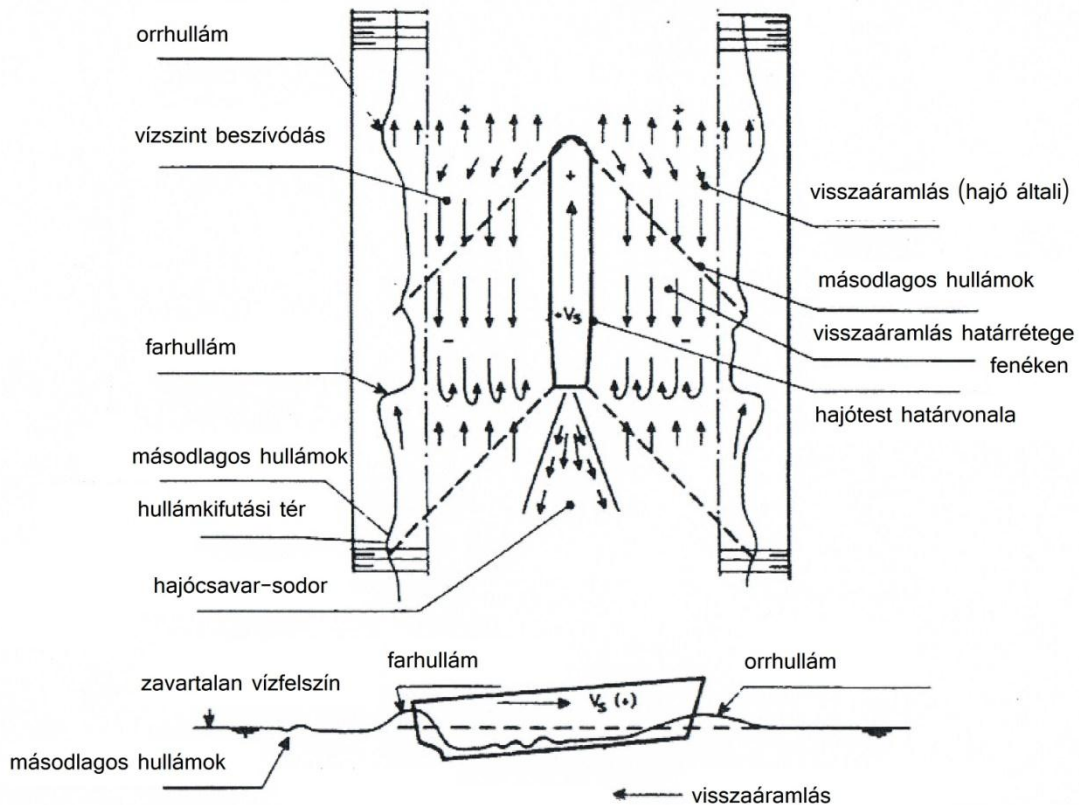
Mivel a numerikus modell a vizsgált tartományt véges számú cellára osztja fel, nem a folytonos megoldást keressük, hanem véges számú ismeretlennel közelítünk, általunk definiált térbeli és időbeli felbontással. Így a rácshálón véges számú h_i, p_i, q_i értékekkel írjuk le az áramlásokat. A hálógenerálásnál meg kell követelnünk, hogy az illeszkedjen a külső peremre, vegye figyelembe a belső jelleghatárokat. Az adaptív felbontással a modell futási ideje csökkenthető. Ezt csakis a strukturálatlan rácsháló tudja biztosítani (szemben a strukturált, könnyen indexelhető, gyorsan számító, ámde rugalmatlan rácshálóval). A rugalmasabb terep lekövetés érdekében háromszög rácshálót alkalmaztam a modelleknél. A diszkretizálás további lépéseként a keresett ismeretlenek a képzett háromszögek illeszkedési csomópontjaiban kerülnek értelmezésre.

8. Hajómozgás leírása valós és modellezett környezetben

Az elhaladó test dinamikai leképezése során a modellben közelítésekkel élünk. Ennek egyik oka, hogy az ADH megoldó nem képes pontosan leírni a hajótest geometriáját. Továbbá pedig maga a vizsgálat célja teszi szükségtelessé az igazán részletes leírást. A nagyobb részletesség már célszerűen háromdimenziós modellvizsgálatot követelne meg. Jelen dolgozat a sarkantyúk közti víztér áramlási viszonyainak, és a meder mentén változó csúsztatófeszültség alakulását hivatott magába foglalni, mélységátlagolt leírással. Ehhez a 2 dimenziós modellkörnyezet elegendőnek bizonyul.

8.1. Hajótest körüli áramlások szabályozott vízi útvonalon

A csatornában elhaladó hajótest a természetes vízmozgást befolyásolja: a hajó orra folyamatosan nyomást fejt ki a víztérre frontális és oldalirányban. Ezáltal a víztér lokálisan az orr előtt megemelkedik, míg a hajótest mellett leszívás jelenik meg, mellyel egyenértékű többlet vízmennyiség közvetlen a hajó után jelenik meg (farhullám ; 5. ábra).



5. ábra Kialakuló vízmozgások hajótest körül

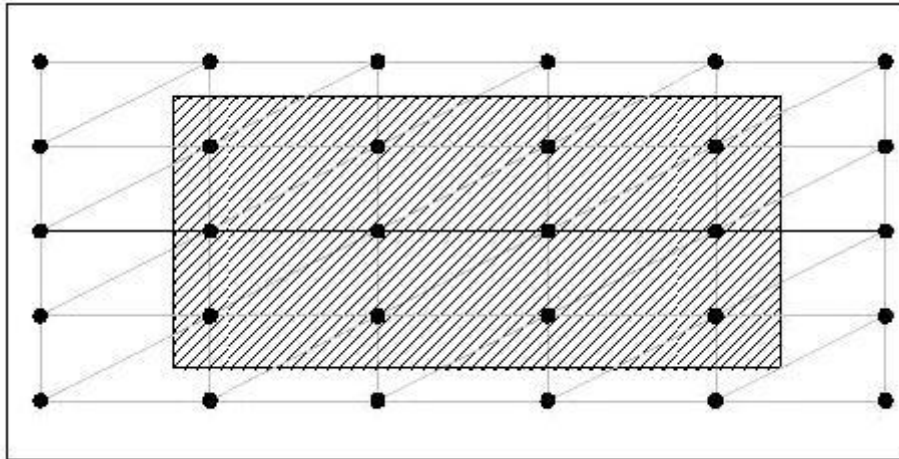
A hajó által keltett vízmozgás hidraulikai jelenségei 3 különböző összetevővel írhatóak le: elsődleges (primer) hullámok, másodlagos (szekunder) hullámok és a propelleres (hajócsavar) meghajtás. Az elsődleges vízmozgás a hajó által okozott víztér megmozdulásával áll kapcsolatban, ami a vízszint süllyedését és a visszaáramlását foglalja magába. A visszaáramlás a hajótest melletti és alatti víztér elmozdulásával egy időben jelenik meg. A kialakuló másodlagos hullámrendszer szintén hajó keltette vízmozgásokból származnak, de ezek rövid hullámok. Amplitúdójuk nagyban függ a hajó sebességétől, valamint a hajótest alakjától és annak méreteitől. Ezért tapasztalható az, hogy a kisebb, de gyorsabb hajók szekunder hullámjai nagyságrendben megközelítik a primer hullámokat. A propelleres, azaz hajócsavaros meghajtás pedig mind fontosabb szempontokat vet fel, ahogy a hajógyártás törekszik a teljesebb kapacitáskihasználtság és a jobb meghajtás kialakításában. Hidrodinamikai jellegét tekintve a víztér sebességének lokális felgyorsulására, ezáltal, a merülés függvényében, a fenék csúsztatófeszültség értékeire is hatást gyakorol.

A dolgozatomban vizsgált tolóhajók méretei, és sebességei miatt elhanyagolhatóak a másodlagos hatások, ezek nem kimutatható hatással bírnak ekkora hajótestek esetében

(Shiereck, 2001). A primer hullámok és a hajócsavar várható hatása megjelenik majd a modell eredményekben.

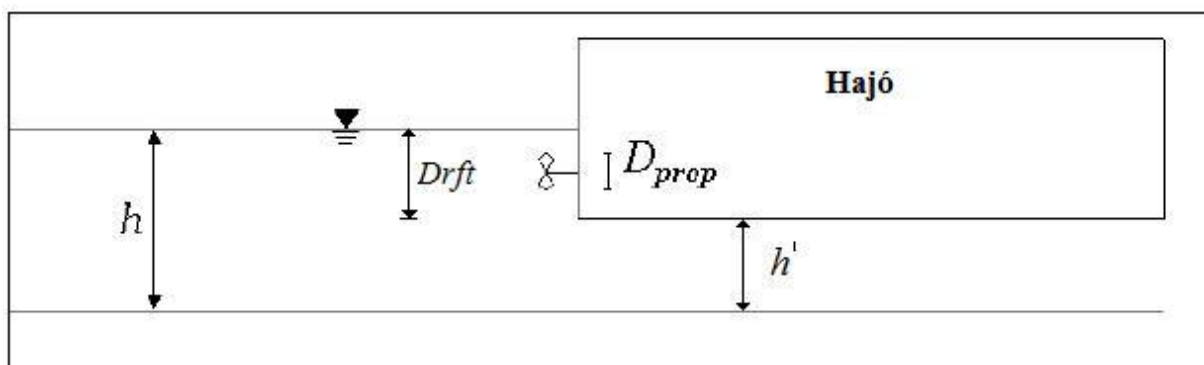
8.2. Hajótest a modellben

A tolóhajó, és a tolatmány (bárkák) modellbeli leképezése egy egyenes hasábként lehetséges (6. ábra).



6. ábra Hajótest leképezése ADH végelem megoldóban, felülnézet

A modell minden egyes időlépésben figyelembe veszi a hajó aktuális helyzetét, és az általa reprezentált cellákban egy lokálisan lecsökkentett vízszintet feltételez (h'), amit a hajó alsó síkját adja meg (7. ábra). Ezt az ún. fix fedőt (angol nyelvű irodalomban *rigid lid*) pedig az előre megadott merülésből tudja a program meghatározni. A lokálisan és időben is változó fix fedő hatására az áramlási megoldás is átmenetileg megváltozik, és tulajdonképpen az így eredményezett nempermanens áramlási szituációt vizsgáljuk.



7. ábra Hajótest leképezése ADH végelem megoldóban, oldalmetszet

8.3. Modellbeli hajódinamika

A hajó alap paraméterein felül, mint a hosszúság, szélesség, merülés és haladási sebesség, további együtthatókat is értelmezni kell. Erre azért van szükség, mert a hasábszerű leképezést tovább tudjuk finomítani a megbízhatóbb eredmények érdekében.

P_{bow} : arányszám, a hajó orrhosszát viszonyítja a hajó teljes hosszához

P_{str} : arányszám, a hajó tatjának hosszát viszonyítja a hajó teljes hosszához

C_{bow} : arányszám, a hajó orrhosszát viszonyítja a merülés értékéhez

C_{str} : arányszám, a hajó tatjának hosszát viszonyítja a merülés értékéhez

Az ADH megoldó képes a fenék csúsztató feszültségek hajómozgás okozta megváltozásainak leképezésére is. Korábbi tanulmányok kimutatták (Maynord 2000 és Garcia et al. 2002), hogy a csúsztató feszültségek hajó általi megváltozása két különböző részre osztható: a hajó orr, és propeller által indukáltakra.

$$\tau_{vessel} = \tau_{bow} + \tau_{prop} \quad (6)$$

A hajó orr által indukált csúsztatófeszültség növekmény függvénye a hajó sebességének, valamint a hajó orr, hajó tat és vízmélység arányainak, melyet a C_{bow} és C_{str} együtthatóban vesz figyelembe. A hajócsavar által generált növekmény pedig függvénye a mederágyzatnak, szabadfelszíni hullámsebességnek, hajócsavar átmérőjének, valamint egyéb hajócsavarra vonatkozó paramétereknek. Ennek részletesebb tárgyalása a Hammack et. al (2008) tanulmányban történik.

A hajóorra vonatkozólag már tárgyalásra került a modellbeli figyelembevétele (C_{bow} együtthatóként). A propeller azaz a hajócsavar esetében is hasonlóképen kell eljárni, de itt már a hajócsavar külön paraméterezendő az ADH programon belül az alábbiak szerint:

- Hajócsavar típusa: nyitott kerekű, vagy Kort gyűrűs
- Hajócsavar átmérője [m]
- Több meghajtás esetén a hajócsavarok tengelye közti távolság [m]
- Tolóhajó hossza [m]
- Hajócsavar távolsága a fartükörtől [m]

Mivel a modell segítségével a végső cél a numerikus eszköz magyarországi Duna-szakaszra való adaptálása egy tesztszatórnán végzett szimulációkon túl valós léptékű vizsgálatokat is végzek, amihez a következő pontok figyelembe vételét irányoztam elő:

Modellbeli megfelelő felbontás (rácsháló): Ott ahol kevésbé van változás a mederben, kisebb felbontást alkalmazható, és azokon a helyeken ahol a meder erősen változhat (pl. sarkantyúk közelében), ott sűrűbben oszthatók ki a cellák. Ezen felül lehetőség van még az adaptív rácsháló alkalmazására is. Ezt a modell maga nem mindig használja, csak akkor kapcsol be, ha a számítási hiba elér egy előre definiált szintet. Ekkor a hajótest körül tovább növekszik a felbontás nagysága.

Hajóparaméterek megválasztása: Érdeemes olyan hajó paraméterek, és tolt kötelékre vonatkozó méretek megadása, mely a hazai Duna szakaszon előfordul. A tolt kötelék hosszától kezdve, egészen a tolóhajó hajócsavarjának fent leírt paramétereinek megadásáig.

Mozgó hajó sebessége és útvonala: A Duna esetében egy nemzetközi hajóforgalom által is igénybe vett folyószakasról beszélhetünk. Ennek megfelelően kell betáplálni a hajózási útvonalat, és a tolt kötelék sebességét. Külön figyelmet igényel a hegymeneti és völgymeneti elhaladások közti különbség, valamint több hajó elhaladásakor a hajózás forgalmi szabályainak figyelembe vétele.

9. Sematizált csatornán végzett modellvizsgálatok

9.1. Csatorna és hajó kialakítás

Későbbi vizsgálatokat megalapozandó először is igazolnunk kell a modellt. Ez egy korábbi mérésorozatot alapul véve tehető meg. Egy korábbi tanulmány (Kéri, 2011) adatait használtam fel ehhez, melyben egy kisminta kísérlet eredményeit ismertetik egy egyenes, sarkantyúkkal ellátott csatornában a hajók által gerjesztett megváltozott áramlási viszonyok elemzésére. A hivatkozott dolgozatban a kisminta adatok felskálázásával emellett egy valós léptékű numerikus modellvizsgálatot is végeztek a FINEL2D, szintén végeelem alapú áramlási modell segítségével. Mivel a dolgozatom célja a Duna egy szakaszán hasonló vizsgálatok végrehajtása, megfelelőnek találtam a valós léptékű modellezést és a felskálázott kisminta adatok alapul vételét. A modelligazolást azért vagyok kénytelen az egyszerű geometriájú csatorna kialakításra megtenni, mert a Duna esetében nem állnak rendelkezésre a hajómozgást figyelembe vevő mérési adatok. A vizsgálati csatorna paraméterei a következő módon alakultak:

- A csatorna teljes hossza $L=6000$ m , míg szélessége $B=400$ m
- Sarokpontok koordinátái

	X	Y
Bal alsó	1275	858
Bal felső	1275	1258
Jobb alsó	7275	858
Jobb felső	7275	1258

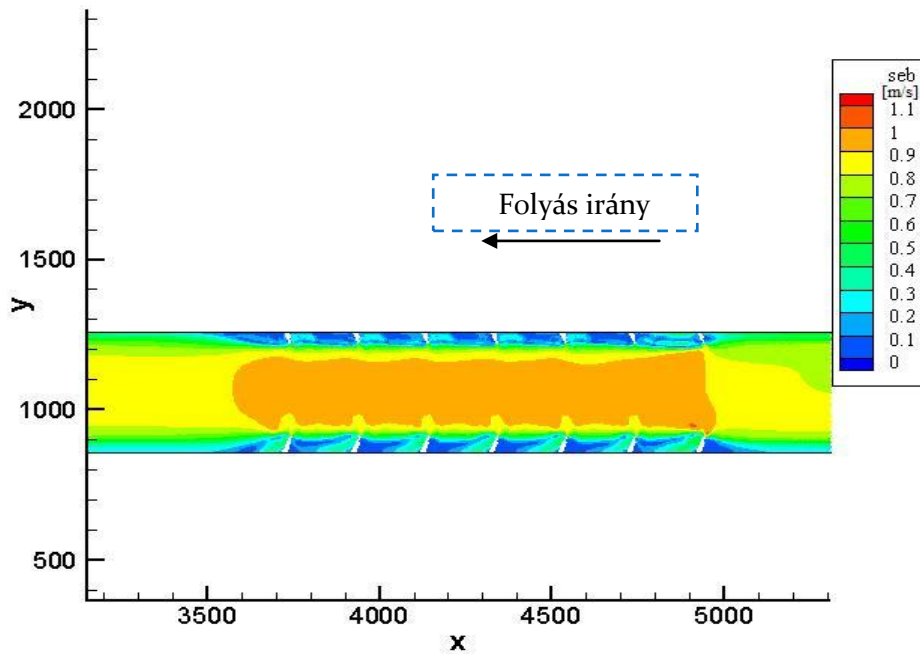
3. táblázat Sematizált csatorna koordinátái

- A sarkantyúk közel 200 méterenként követik egymást, mindkét parton 7-7 darab, a csatorna 3700 és 4900 x irányú szakasza között
- Minden egyes sarkantyú a csatorna partélével $\alpha=67$ fokos szöget zár be, folyással ellentétes irányban, és 50 méterre nyúlik be
- Homogén mederanyag Manning-féle simasági együtthatója: $k=50 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$

Peremfeltételnek pedig a következő értékeket definiáltam:

- Permanens vízhozam $Q= 1450 \text{ m}^3/\text{s}$
 - Kifolyási vízmélység $h= 5,97 \text{ m}$
- } { Peremfeltétel }

A folyószabályozási művek modellbeli kiosztása a **8. ábra** is megtekinthető.



8. ábra Sematizált csatorna sarkantyú kiosztása

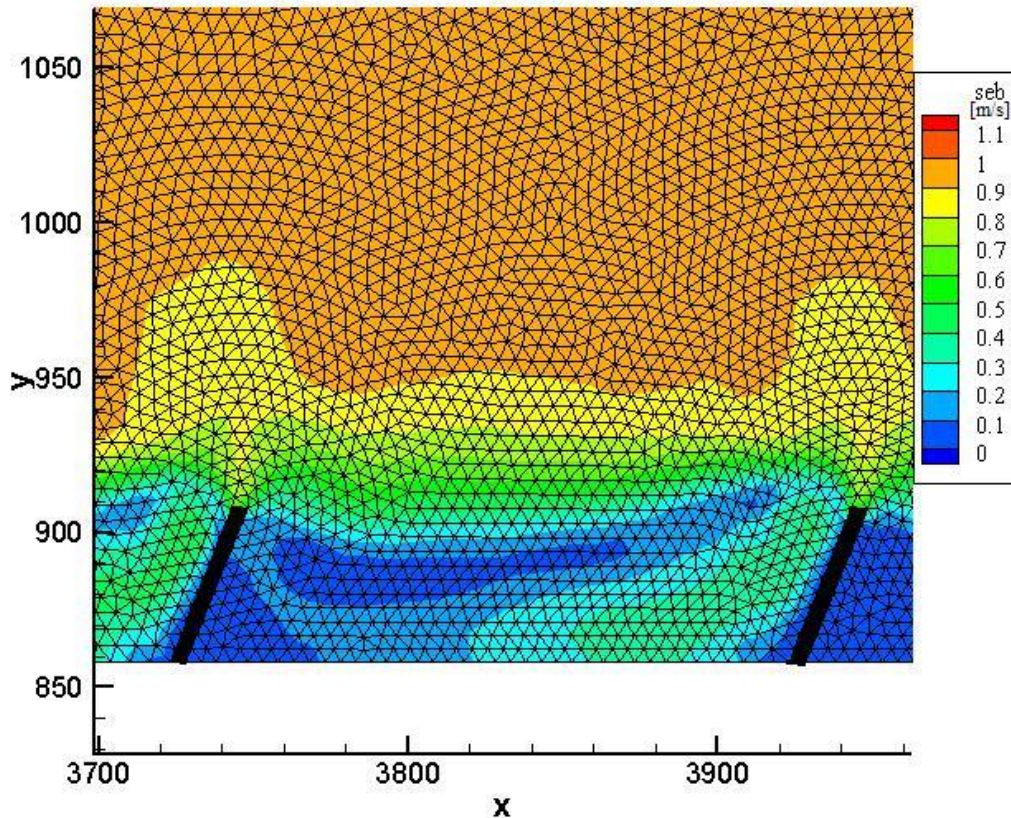
A peremfeltételek definiálását követően az igazoló futtatásokhoz természetesen az elhaladó hajó paramétereinek megadása is szükséges. E művelet csakúgy, mint a csatorna esetében, a korábbi tanulmányban alkalmazott méreteknek megfelelően történt:

- Hajó hossza: 270 m
- Hajó szélessége: 23,0 m
- Merülés: 2,50 m
- Sebessége: 2,50 m/s

Megjegyzésként elmondható, a fenti méretek megegyeznek egy VI/c besorolású hajóút maximális nagyságának, tolt kötelék esetén. Csúsztató feszültségek változásának modellezésére ezek a szimulációk nem terjedtek ki.

9.2. Rácsháló megadása

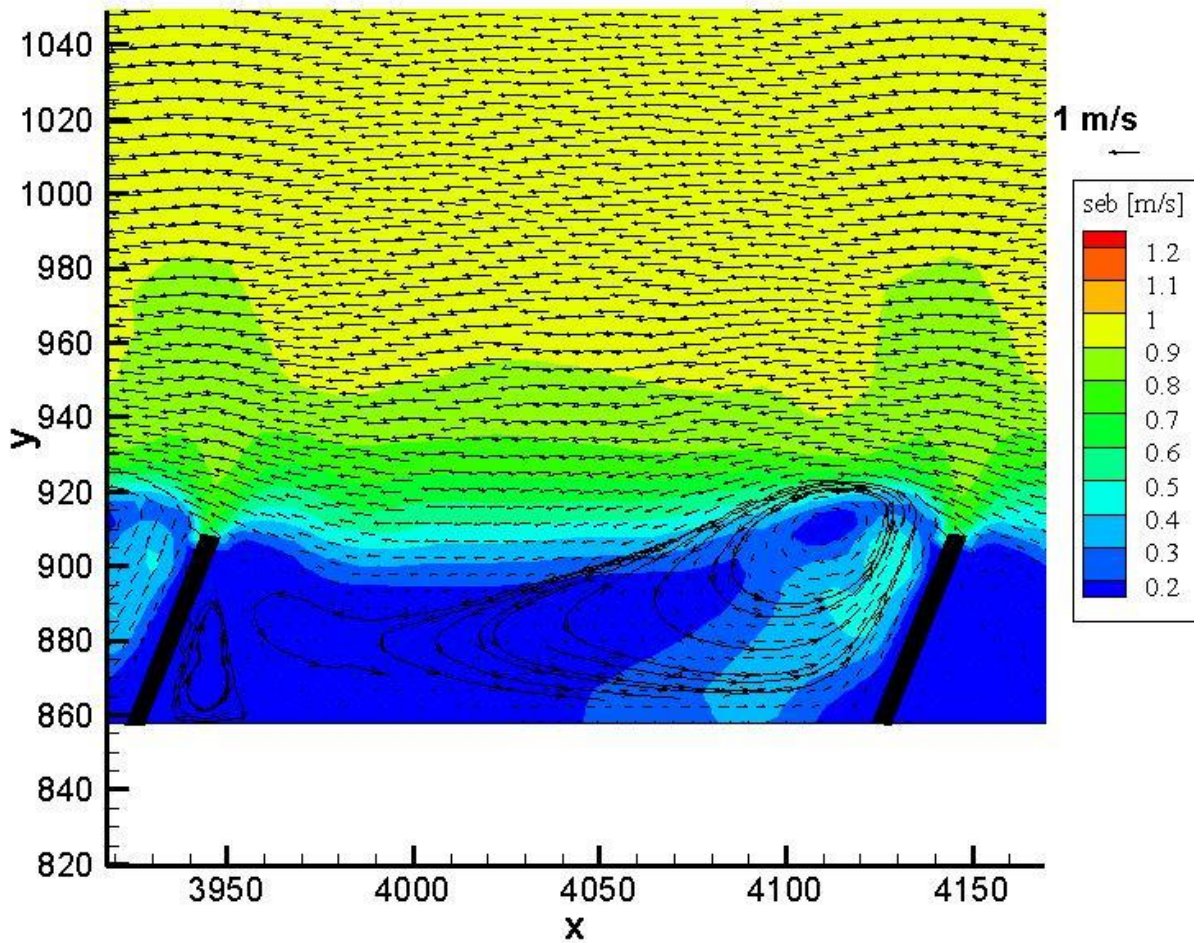
A rácsháló generálásánál a háromszög rácsháló felállítását láttam megfelelőnek, mely további előnyöket is nyújthat majd az adaptív hálókezelésnél, mikor már az elvonuló hajótest is modellezésre kerül. A rácshálót leíró cellák oldalhossza a csatorna két végén átlagosan 20 méter, mely fokozatosan csökken a sarkantyúk közti tér átlag 5 méteres felbontásáig. Ez utóbbi részterület kerül megjelenítésre a **9. ábra**:



9. ábra Sematizált csatorna sarkantyúk közti rácsháló sűrűsége

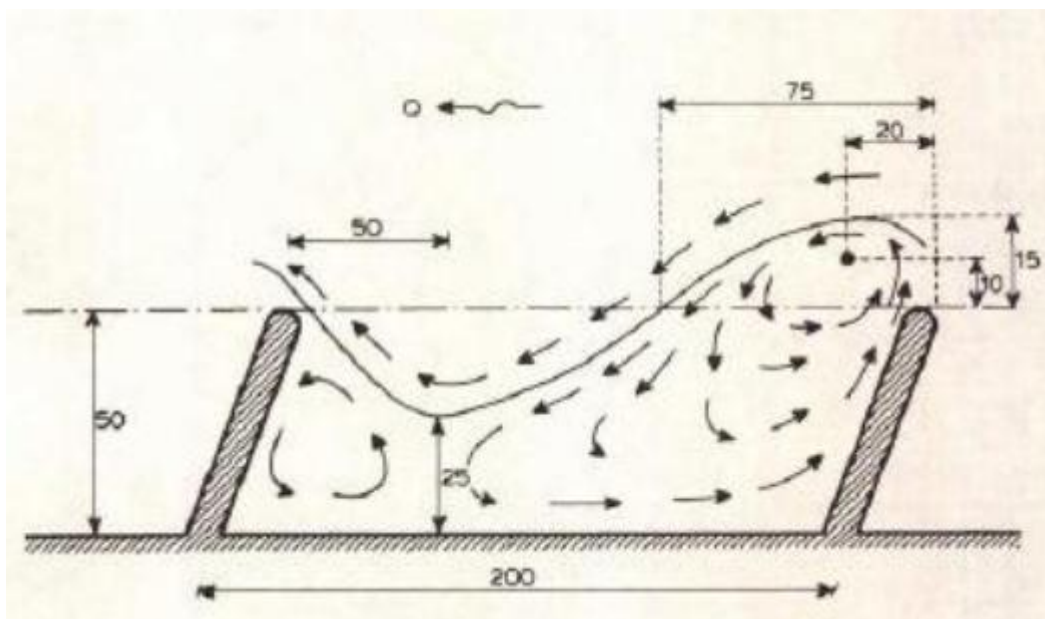
9.3. A numerikus modell igazolása

Első lépésben meghatároztam a hajó nélküli permanens áramlási mezőt, amit aztán a hajó mozgásának modellezésénél kezdeti feltételként (melegindítás vagy hotstart) adtam meg. A **10. ábra** jól látható a sarkantyúk közötti zónákra jellemző visszaforgó áramlási struktúra, melyre a relatíve alacsonyabb áramlási sebességek is jellemzőek. Ez az áramlási kép jól ismert keresztirányú folyószabályozási környezetében és az itt kialakuló alacsony áramlási sebességek jól igazolják a természetben szinte minden hasonló mű környezetében tapasztalható hordalék lerakódást. A modell ezt a tipikus viselkedést tehát jól számítja, vagyis kvalitatív becslésre alkalmas a numerikus eszköz.



10. ábra Sarkantyúk közti modellezett áramkép, sematizált csatornán

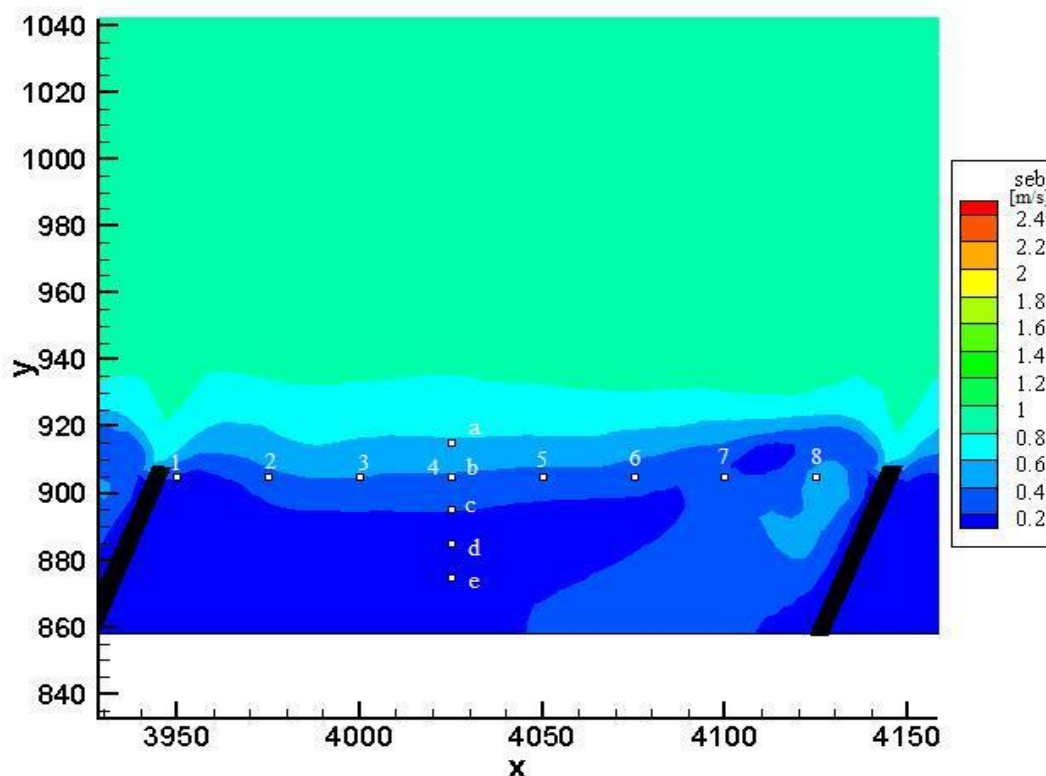
A modellből kapott áramkép összehasonlítható a korábbi kisminta kísérlet eredményeivel.



11. ábra Kisminta kísérlet alapján szerkesztett áramkép sarkantyúk között

A 11. ábra a kisminta modell kísérletek alkalmával megfigyelt áramkép került rögzítésre egyszerűsített formában. A kisminta és numerikus modellek ábráit tekintve hasonló áramlási

struktúráról beszélhetünk. A modell sebességmezőiben is megjelenik a sarkantyú mögött két köröző áramlás, mint az alapul vett kísérlet ábráján.

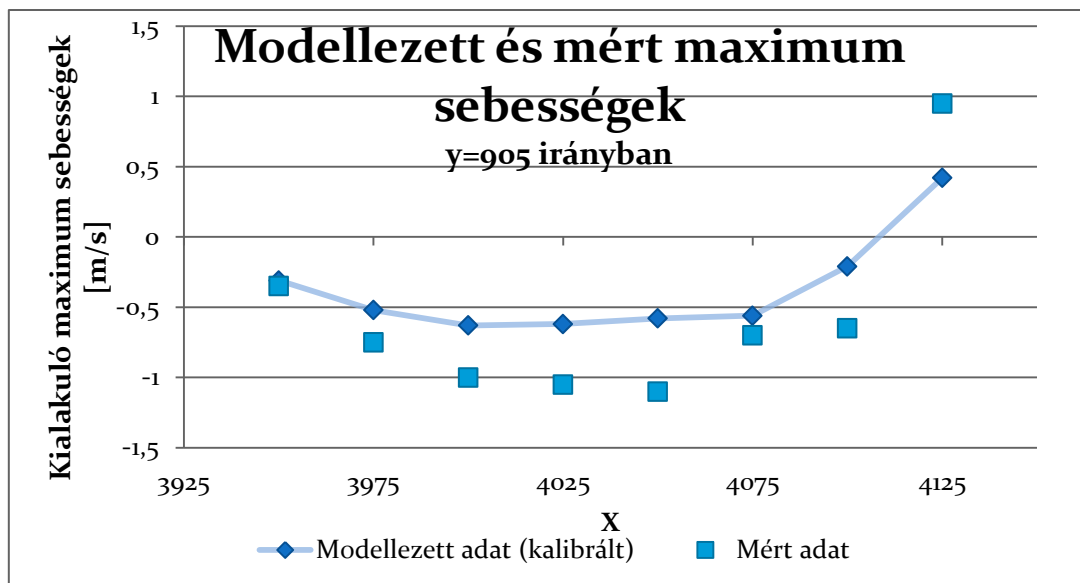


12. ábra Sematizált csatorna futtatási eredmények lekérdezési pontjai

A modell igazolása során a korábbi tanulmányban bemutatott sebességmérési adatokra támaszkodtam. A modell igazolásához a mért sebességadatokat használtam fel, amit a hivatkozott tanulmányban a hajó elhaladása alatt rögzített sebességadatok maximális értékeivel közöltek. Az eredmények lekérdezési pontjai két sarkantyú által határolt térben kerültek definiálásra (12. ábra). A megjelölt 4 és b pont egy és ugyanaz. Csupán a megadást könnyítendő van két megjelöléssel is illetve. A numerikus modellt tehát lefuttattam a kisminta modellnél jellemző geometriai és hidraulikai adatokkal, majd a megjelölt pontokban lekérdeztem a számított sebesség idősorokat és ezek alapján meghatároztam azok maximális értékeit. A(z) 4. táblázat szerint a következő módon alakultak a kismintán mért és az általam modellezett sebességek az $y=905$ által megadott vonal mentén:

y=905		
pont	$v_{\text{modellezett}} [\text{m/s}]$	$v_{\text{mért}} [\text{m/s}]$
1	-0.31	-0.35
2	-0.52	-0.75
3	-0.63	-1
4	-0.62	-1.05
5	-0.58	-1.10
6	-0.56	-0.7
7	-0.21	-0.65
8	0.42	0.95

4. táblázat Csatornán mért és modellezett sebességek összevetése $y=905$ irányban

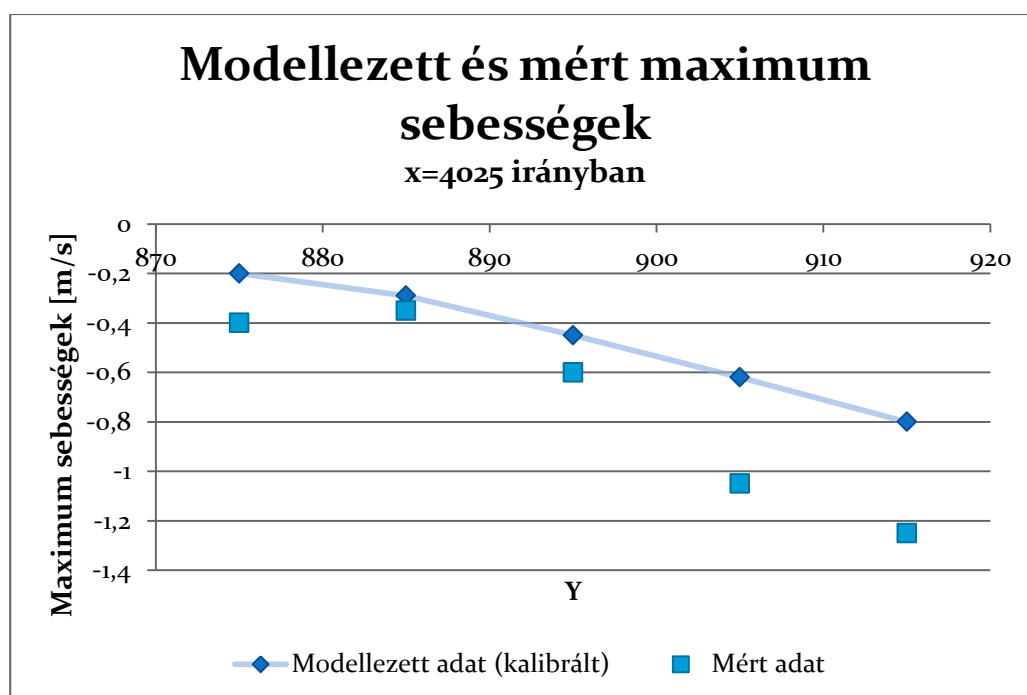


13. ábra Mért és modellezett maximum sebességek $y=905$ irányban

Hasonlóképpen az $x=4025$ koordináta által megadott vonal mentén a maximális sebesség-
adatok:

x = 4025		
pont	$v_{\text{modellezett}} [\text{m/s}]$	$v_{\text{mért}} [\text{m/s}]$
a	-0.8	-1.25
b	-0.62	-1.05
c	-0.45	-0.6
d	-0.29	-0.35
e	-0.2	-0.4

5. táblázat Csatornán mért és modellezett sebességek összevetése $x=4025$ irányban

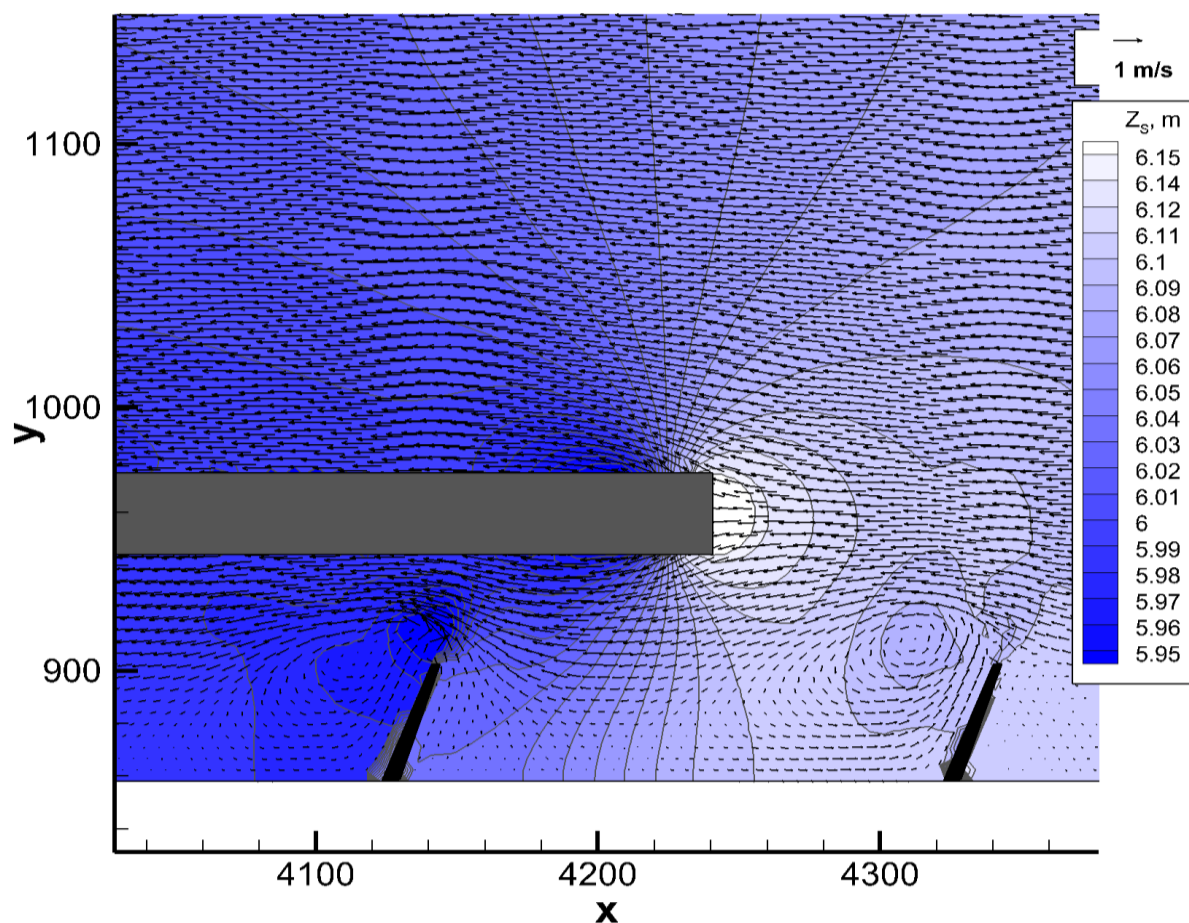


14. ábra Mért és modellezett maximum sebességek $x=4025$ irányban

A 13. ábra és a 14. ábra jól kiolvasható, hogy 10-20 %-os eltérés jelentkezik a mért és modellezett értékek között, de ami fontosabb, hogy az eloszlások jellege igen hasonló. Mivel a fő cél itt nem a sematizált csatornában kialakuló áramlások részletes vizsgálata volt, és a rendelkezésre álló idő is korlátolt, elfogadhatónak tartottam ezt az egyezést és a modellt alkalmasnak véltem a későbbi szimulációk végrehajtására.

A 15. ábra a pillanatnyi vízszint mezőt és a sebességvektorokat jelenítettem meg a hajó sarkantyúkhöz érkezésének pillanatában. Jól látható a sebességvektorok lokális megváltozása a hajó orránál, ami kihat egészen a sarkantyúk közötti területekre is, sőt a vízszint mező átmeneti megváltozása még jobban érzékelteti a hajó hatását. A hajó orránál a megemelkedett vízszint a bárkák orránál jellemző feltorlódást mutatja jól, míg éppen ennek ellenhatásaként egy lokális leszívás érvényesül közvetlenül az orr után a hajó két oldalánál. A modell megfelelően reprodukálja a sarkantyúk orránál kialakuló helyi vízszint csökkenést is, ami tulajdonképpen a lokális sebesség megnövekedés hatásaként jelentkezik, ugyanis a változatlan energiaszint mellett a nagyobb sebességmagasság ($v^2/2g$) a nyomásszint (vagyis a vízfelszín) csökkenést okozza.

A sematizált csatornára elvégzett modellvizsgálatok alapján még számos sajátos, a hajó mozgása okozta jelenséget be lehetne mutatni, de ezt a következő fejezetben, egy Duna-szakaszra elvégzett szimulációk eredményei alapján teszem meg, hiszen ebben a pontban mindössze a modell ellenőrzése volt a cél.



15. ábra Csatorna sarkantyúk közti vízszint és sebességek megváltozása elhaladó hajó hatására

10. Duna nagybajcsi szakaszán végzett modellkísérletek

10.1. Terület leírása

A helyszín a Nagybajcs és Vének közti magyar-szlovák határ Duna szakasza az 1+792 – 1+802 fkm-nél. Az utóbbi években, évtizedekben sokféle hatást és beavatkozást megélt környék e szegletére esett a választás, melyet könnyített az a lehetőség, hogy egy korábbi tanulmány által (Baranya, 2004) rendelkezésre álltak helyszínen mért (pl. keresztszelvényi sebességek, vízhozamok), és a digitális medermodell megalkotásához a szükséges adatok.

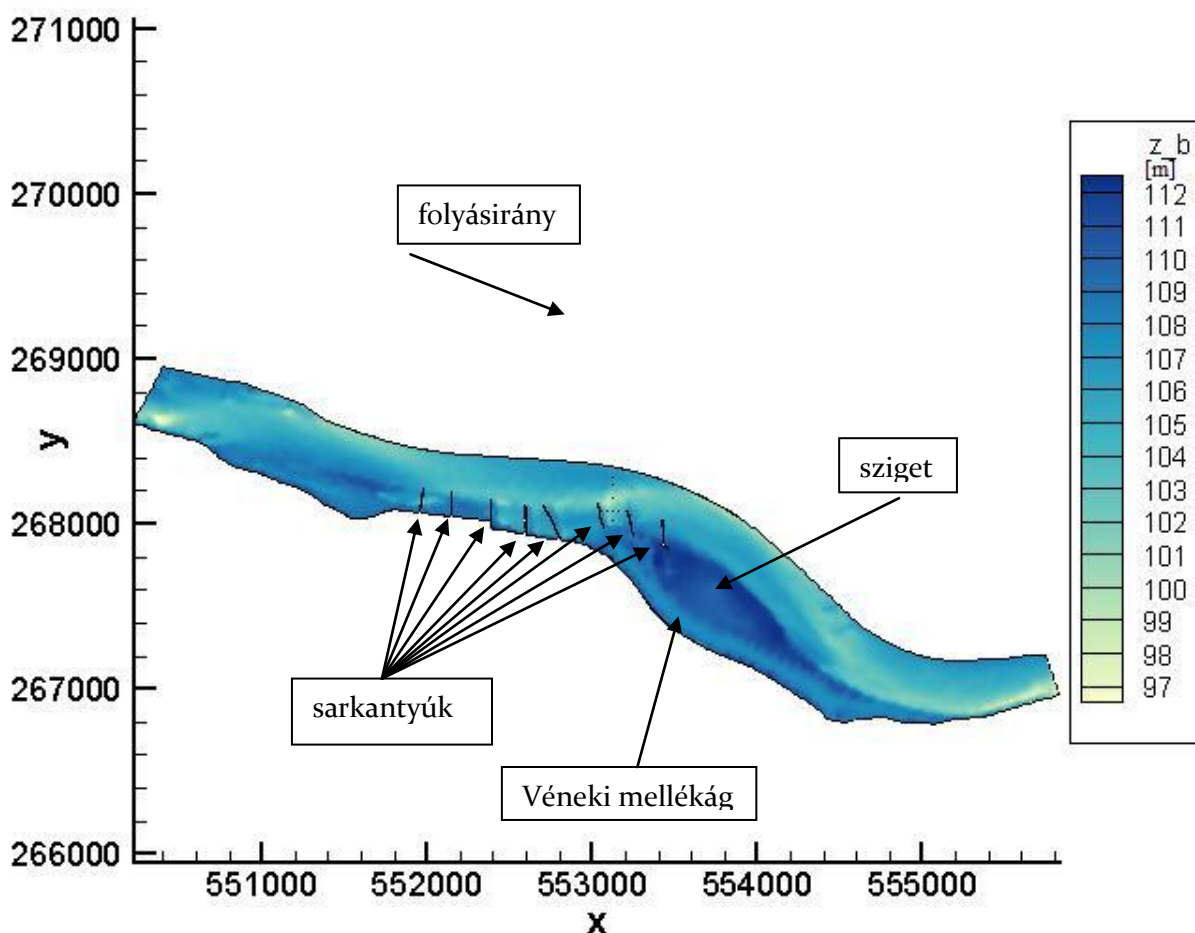


1. kép Kijelölt Duna szakasz műhold felvétele

Az **1. képen** piros vonal jelöli a felvízi és alvízi peremfeltételi szelvényt a Dunán. Az inflexiós pontokban kijelölt keresztmetszetek egy sarkantyúkkal tűzdelt partrészt is tartalmaznak. A folyószakasz változékonysága adhat magyarázatot arra a kérdésre, hogy jobb parton elhelyezkedő 8 darab sarkantyú hosszukat és állásukat (dőlésüket) tekintve miért térnek el egymástól.

A digitális medermodell előállítására a rendelkezésre álló adatoknak köszönhetően valós léptékben történt. Két dimenzióban, x és y irányú méretek feltöltésre kerültek a Balti tengerszint feletti magasságokkal, előállítva így a domborzati viszonyokat leíró 3 változót, ami ezután betáplálásra került.

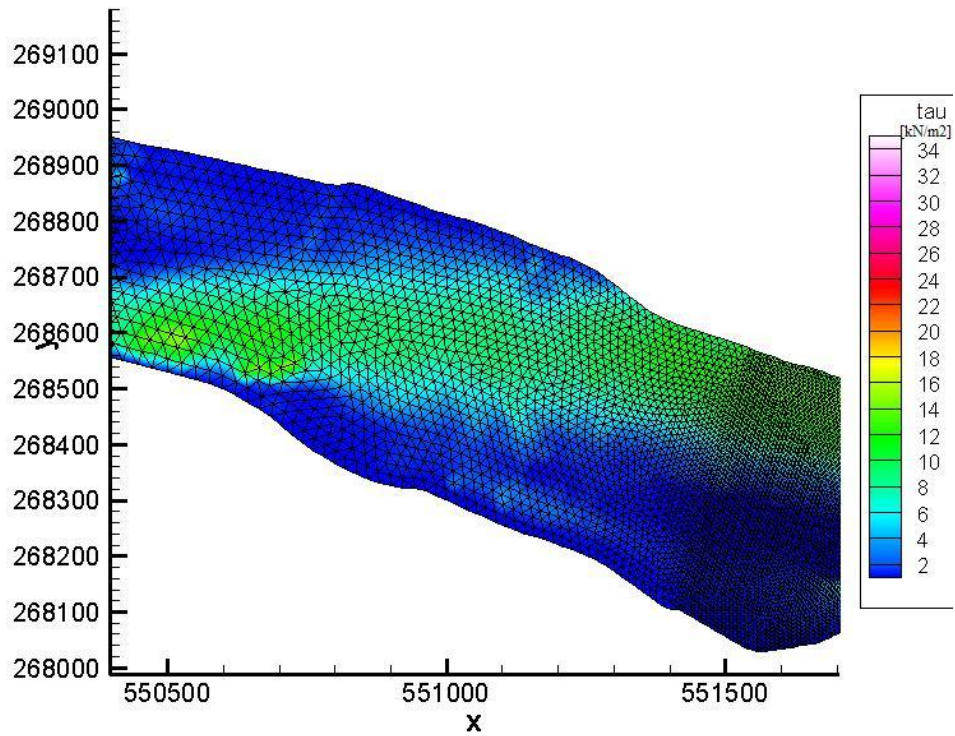
Az EOV koordinátákkal ellátott terep a **16. ábra** látható:



16. ábra Duna szakasz digitális terep modellje

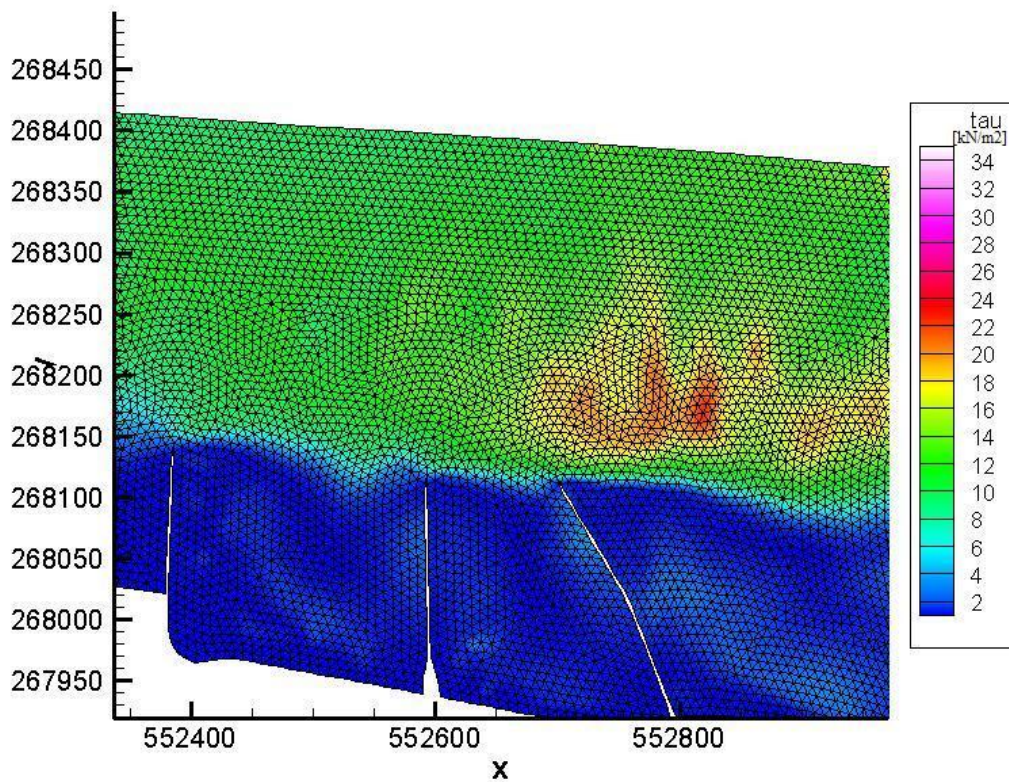
10.2. Rácsháló megadása

Tekintettel a nagyszámú modellvizsgálatra a rácsháló felbontásának meghatározásához meg kell találni azt az optimumot, mely kiválasztásával elegendő számban állnak rendelkezésre eredmények, és jól igazolják a mért áramlási viszonyokat, valamint megfelelő részletességgel írja le az elhaladó hajót. Ugyanakkor a számítási igénye nem eredményez rendkívül hosszú idejű szimulációkat. A megfelelő felbontás megválasztásához, a több kilométer hosszú Duna szakasz esetében, a térben változtatható méretű háromszög cellák nyújtanak segítséget. Azt az előnyt nyújtják, hogy a vizsgálat szempontjából kevésbé lényeges területeken beállíthatam nagy méretű elemeket, míg a fontosabb zónákban ráfinomítást alkalmaztam. A számítási cellák kiosztása az SMS 10.0 program segítségével történt.



17. ábra Rácsháló kiosztás Duna peremfeltételi szelvényéhez közel

A befolyási és kifolyási peremhez közeli szakaszokat érdemes volt ezért 40 méteres (17. ábra), míg a sarkantyúk övezte terület 8 méteres rácshálós felbontással kiosztani (18. ábra). A rácsméret e két szélsőértéke között folyamatos az átmenet.



18. ábra Rácshálókiosztás sarkantyúk közelében

10.3. Peremfeltételek

A digitális medermodell előállítását követően a peremfeltételek megadására kerül a sor. Vízjárési állapottól függetlenül a szimulációkban $n=0,025 \text{ s/m}^{1/3}$ Manning-féle mederérdességi együttható került alkalmazásra (ahol $n = 1/k$ simaság és érdesség együtthatója közti összefüggés).

Peremfeltételként a vízhozam mellett, mely időben nem változik, a kifolyási szelvényben érvényes vízfelszín magasságot is definiálni kell. A vízjárást tekintve így permanens állapotról beszélhetünk. Nem csupán egy vízjárési állapotra készültek szimulációk, hanem hajózási szempontokat figyelembe véve kis, közép és nagyvízi eseményekre. A 3 állapothoz a következő vízhozam és kifolyási szelvény vízszint abszolút magasságai tartoznak:

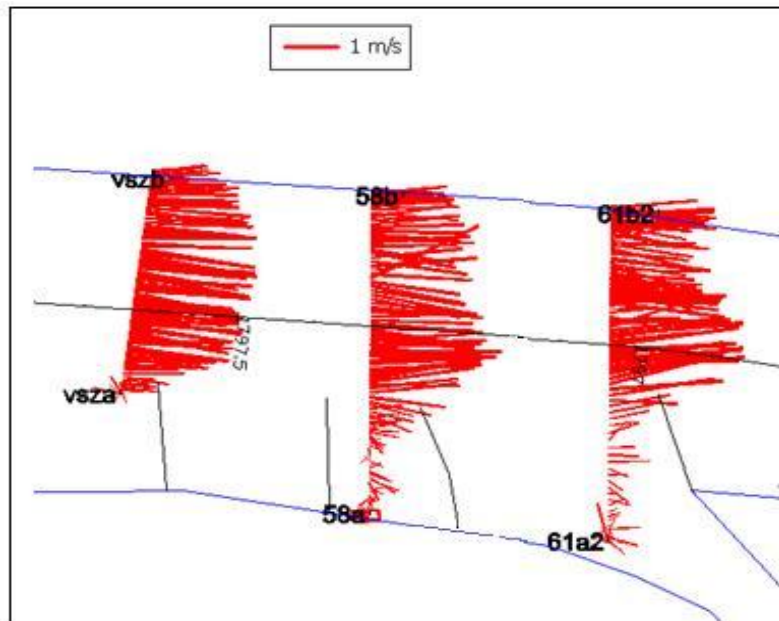
Állapot	Q [m ³ /s]	zki [mBf.]
KQ	1000	106.62
KÖQ	1800	108.10
NQ	3200	109.80

6. táblázat Duna peremfeltételi értékei

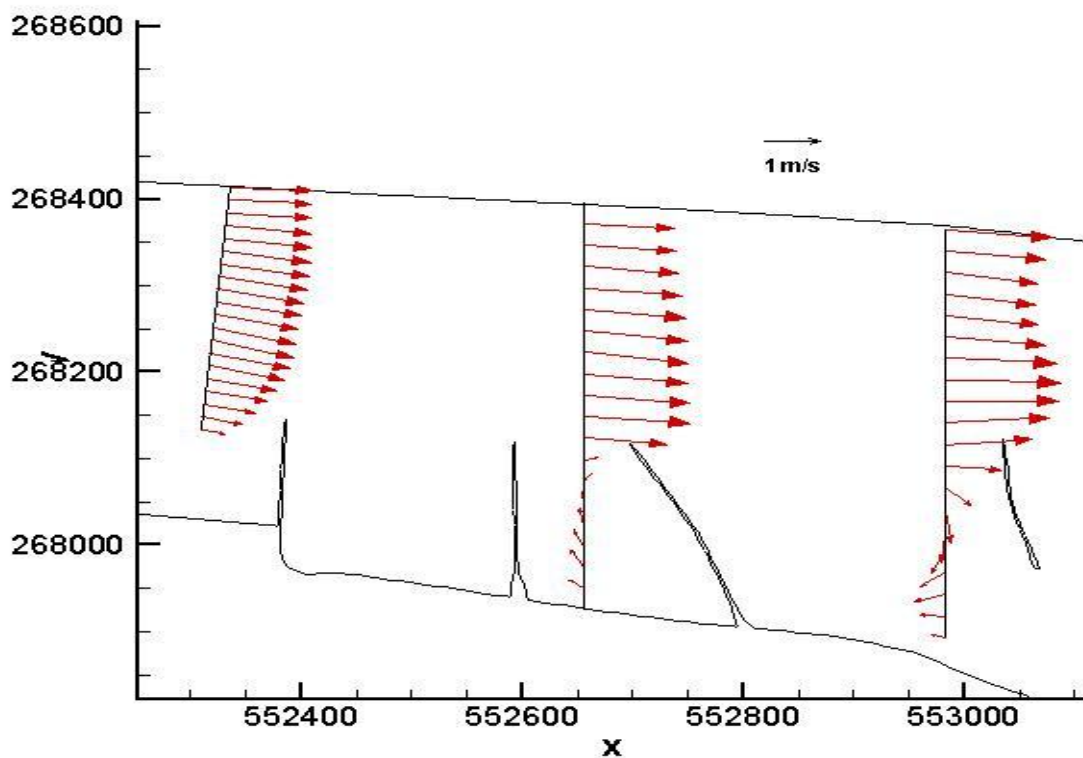
Első lépésben itt is a hajó nélküli áramlási viszonyokat modelleztem, melynek célja egy időben állandósult áramlási mező megléte. Ezek kezdeti feltételként megadhatóak a későbbi futtatások indításakor (melegindítás).

10.4. Áramlási modell ellenőrzése

Mivel korábbi, függély menti mért sebesség adatok rendelkezésre álltak, ezért az általam felállított Duna modell ennek segítségével ellenőrizhető, ami értelemszerűen a hajók hatását nem tartalmazza. Ez utóbbi ellenőrzésére viszont a fenti csatorna modellt mutattam be. A Duna szakasz modelljében homogén mederanyagot feltételezve a meder Manning-féle simasági együtthatója: $k=40 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$. A helyszínről az ADCP műszerrel végzett áramlásmérések közel $Q=1800 \text{ m}^3/\text{s}$ -os vízhozamhoz tartoznak. A megjelenített mélységátlagolt sebességvektorok a mérési szelvényekben, majd a numerikus modellel számított vektorok ugyanazokban a szelvényekben a következő oldalon láthatóak (19. ábra és 20. ábra):



19. ábra ADCP műszerrel mért függélymenti középsebességek



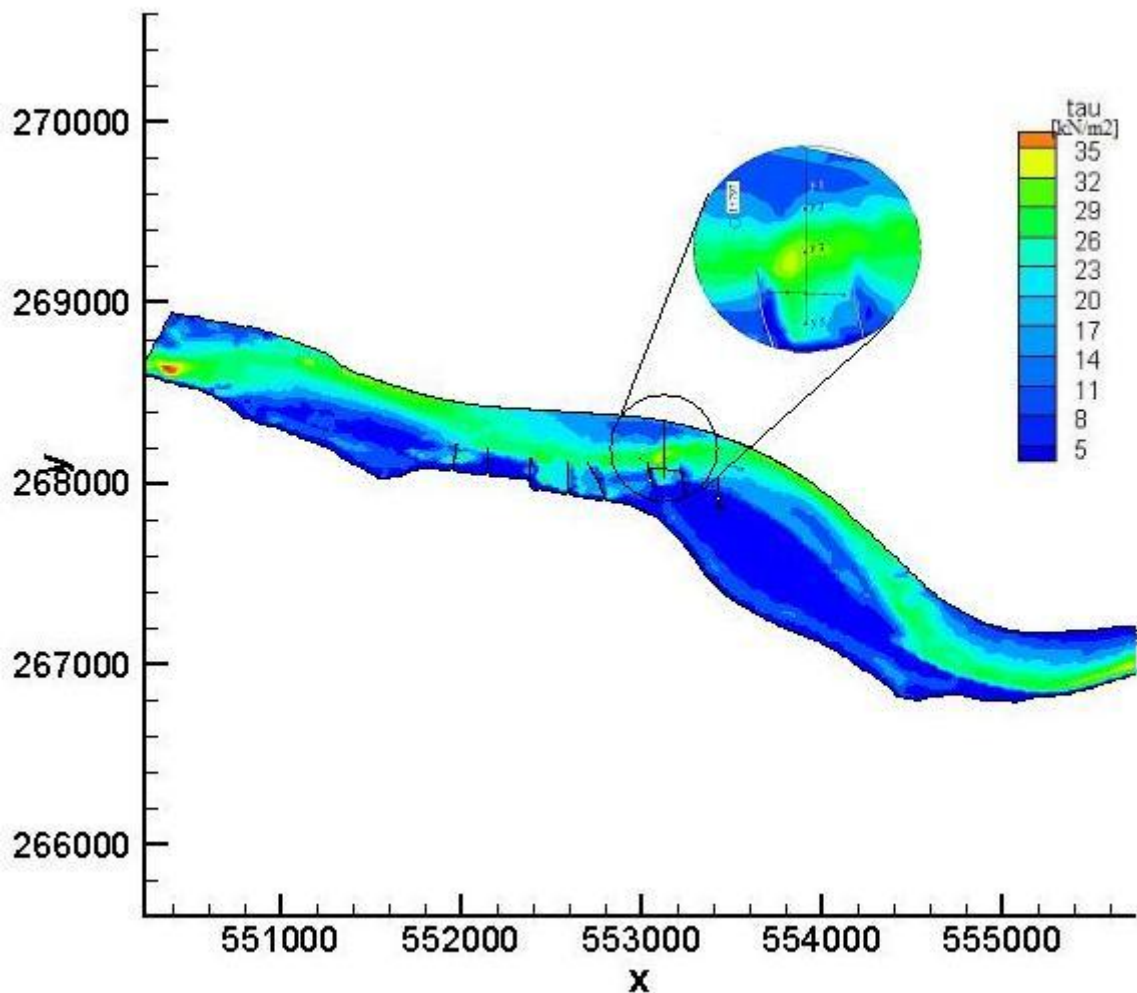
20. ábra Modellezett sebességvektorok ADCP mérési szelvényeiben

Megfigyelhető a térben igen változékony áramkép, ami az összetett mederviszonynak és a folyószabályozási műveknek köszönhető. A modell nagyszerűen reprodukálja (20. ábra) pl. a legalsó szelvény magasabb bal parti és hasonlóképpen a sarkantyú orránál megnövekedő sebességeket és a sarkantyúk közötti lassú, esetenként visszaforgó áramlását. Az ábrákon bemutatott mért és modellezett függély menti középsebességek egyezősége igazolja a permanens áramlási modellt, amit a későbbi, már hajóval ellátott modellek kezdeti feltételeként alkalmaznak majd.

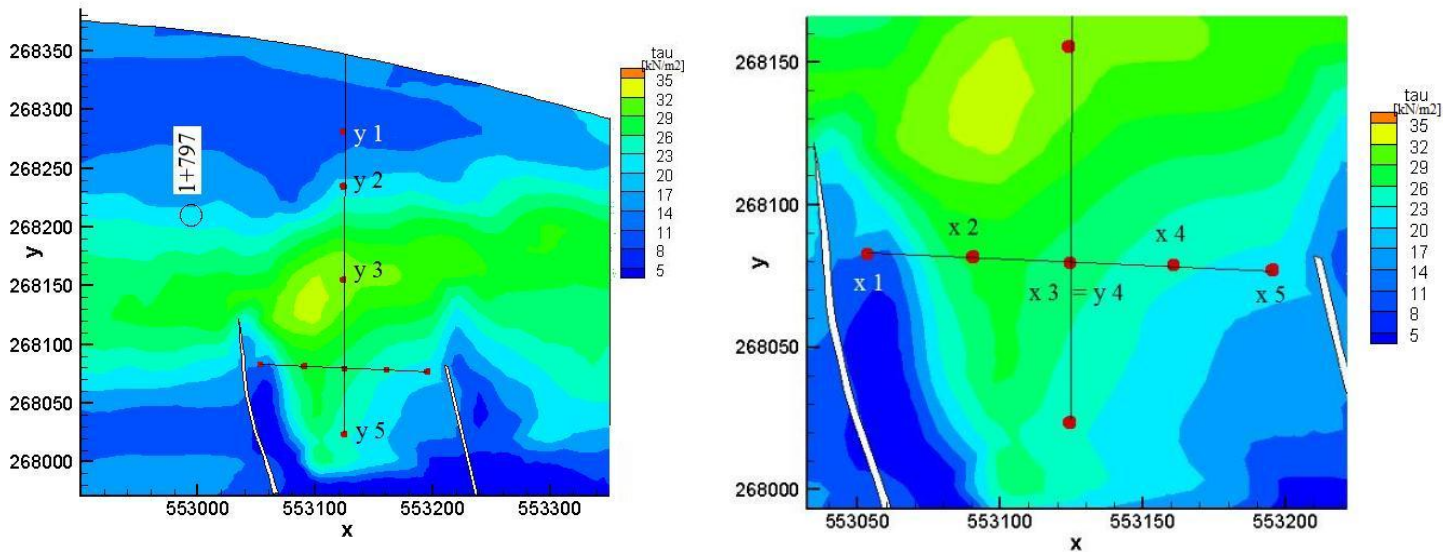
10.5. Eredménykiíratási pontok

Egy víztestben elvonuló hajó dinamikus állapotából adódóan a hajótest környezetében többek között hatással lesz a vízfelszínre, az áramlási sebességekre és a fenék csúsztatófeszültségére. A numerikus modell ezek számítását biztosítani tudja. A különböző futtatások eredményeit célszerűnek találtam e három paraméter változásának tükrében kiértékelni. Ezen eredményeket megjeleníthetőek mind az SMS mind a Tecplot 360 (Tecplot Inc., 2012) szoftverek által, de mivel időben változó kétdimenziós mezőkről van szó, amit ábrákon keresztül nehéz illusztrálni, az érthetőség megkönnyítése miatt jobbnak találtam pontbeli idősorokon keresztül bemutatni azokat. A diszkrét pontok meghatározása után a Tecplot 360 program segítségével könnyen feldolgozhatóvá tehetjük az adatokat. Ezzel kapcsolatban a feladat pedig az, hogy a kijelölt pontok mérnöki szemmel nézve reprezentatív helyen legyenek.

Sarkantyúk közti tér, szűk keresztmetszet, és változókéony paramétermezők, mind-mind szűkítik a kijelölésre érdemes pontok halmazát (21. ábra).



21. ábra Lekérdezési pontok helyzete a vizsgált Duna szakaszon



22. ábra y pontok helyének keresztmetszvényben, és x pontok helyének meghatározása sarkantyúk közti térben

Végül 9 eredmény kiíratási pont került meghatározásra (22. ábra). Jól látható, hogy az x_3 megegyezik az y_4 ponttal, csakúgy, mint a sematizált csatorna esetében, itt is a könnyebb érthetőség miatt lett kétféle módon megnevezve. A választott sarkantyúk által határolt terület elnézve mindig nagyobb változások voltak megfigyelhetőek egy-egy változat esetében. Az y_3 -as pontban elhaladó hajó gerincével párhuzamosan és arra merőlegesen került kirajzolásra az x_i és y_i pontok tengelye. A pontok egymástól való távolsága x irányban 35 méter. Bal parttól mért távolsága y_i pontoknak:

y_i	Balparttól mért távolság [m]
y_1	67
y_2	112
y_3	190
y_4	268
y_5	323

7. táblázat y pontok távolsága bal parttól

10.6. Hajóparaméterek megadása

A vizsgált szakasz VI/b hajózási útkategóriába sorolandó. Ezzel együtt a tolt kötelék méretei adottak. Maximális hossza 185 m, szélessége 23 m, bárkakiosztás 2x2 (elrendezését lásd 1. táblázatban). Maximális merülés 2,50 méter, hordképesség 12000 tonna. Egy ekkora tolatmányhoz már egy nagyobb típusú tolóhajó szükséges, mint pl. a komáromi TR 1000-es sorozat (2. kép).



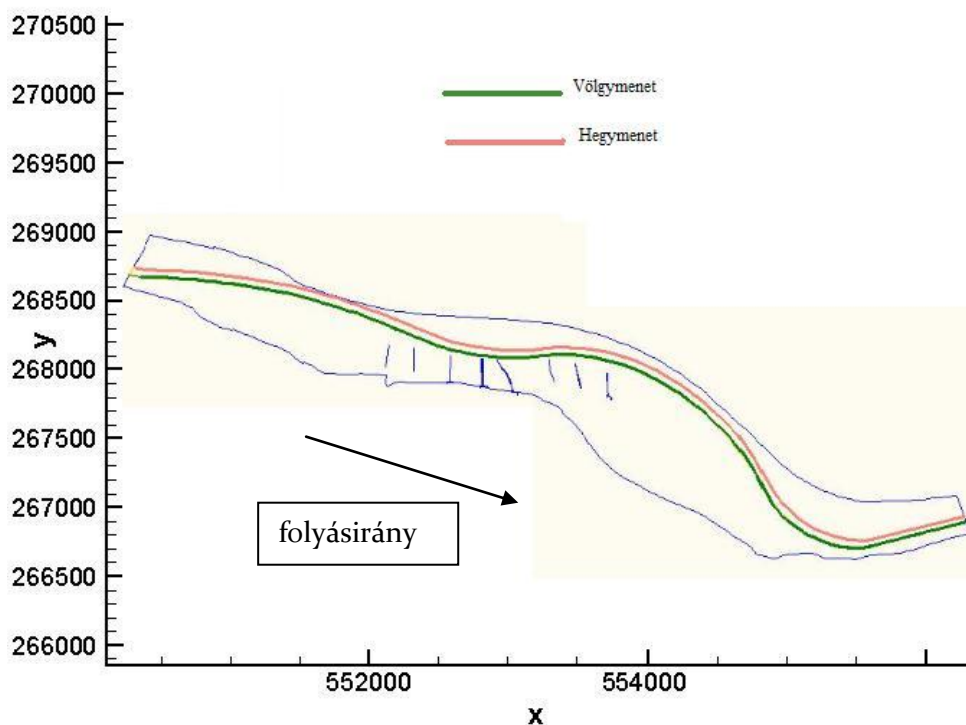
2. kép Komáromi TR 1000-es típusú tolóhajó

A modellfuttatások alatt a fenék-csúsztatófeszültségek alakulását is szeretném vizsgálni, ezért a hajótest és propeller különböző méreteinek megadása is szükségeltetik. A BME Repülőgépek és Hajók Tanszékének szakértőjével, Hargitai Csaba tanársegéddel konzultálva az általam vizsgált modellváltozatokhoz az alábbi hajóparamétereket vettem fel:

Tolt kötelék hossza	185 m
Tolt kötelék szélessége	23 m
Merülés (Drft)	1,92 – 2,50 m
Sebesség (v)	1,60 – 2,60 m/s
P_{bow}	0,1
P_{str}	0,1
C_{bow}	0,95
C_{str}	0,95
Hajócsavar típusa	Kort gyűrűs
Hajócsavar átmérője	1,55 m
Hajócsavarok tengelytávolsága	5,6 m
Tolóhajó hossza	35,92 m
Hajócsavar fartükör távolsága	3 m

8. táblázat Részletes hajóparaméterek

A tolatmányra vonatkozó adatok megadását követően a hajó haladási útvonalát kell definiálni. Az Észak-dunántúli Vízügyi Igazgatóság, mint illetékes vízügyi igazgatóság honlapjáról lehet hozzáférni a közérdekű adatokat képező, hajóút kitűzési tervhez. Ezt alapul véve került megadásra a teljes szakaszt bejáró hegy és völgymenti haladása a hajó(k)nak (23. ábra).



23. ábra Folyószakasz kijelölt hajózási útvonala hegy és völgymentben

10.7. Modellváltozatok definiálása

A 10.3. Peremfeltételek fejezetben már esett szó arról, hogy három különböző vízhozammal történének a futtatások. Viszont ez csak a vízhozam függvényében szolgáltatna eredményeket, a hajó paramétereiben nem. A hajózhatósági viszonyok és a rakomány nagyságának változásával elsősorban a merülés és a sebesség az, mely leggyakrabban változik belvízi teherfuvarozás esetében. Ezeket figyelembe véve az alábbi, mértékadó esetek kerültek megadásra (1 darab tolatmány völgymentben):

		Q=1000m ³ /s			Q=1800m ³ /s			Q=3200m ³ /s		
		Merülés [m]			Merülés [m]			Merülés [m]		
		1.92	2.20	2.50	1.92	2.20	2.50	1.92	2.20	2.50
sebesség [m/s]	1.60									
	2.10									
	2.60									

9. táblázat Szimulációs változatok

A színezett mezők jelölik a különböző modell változatokat, a változó paramétereinek megadásával. Így egy vízjárási állapotra összesen 5 darab változat adódik, a három vízjárási állapotra pedig összesen 15 verzió kerül futtatásra.

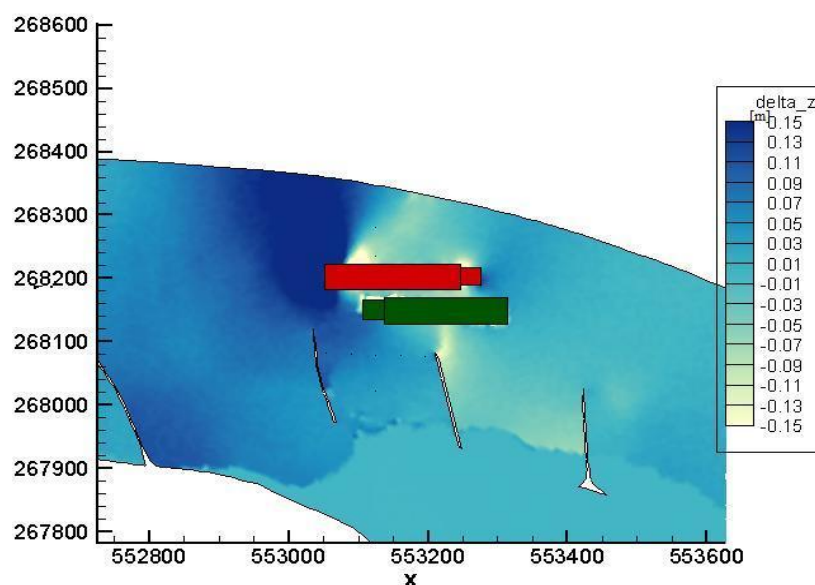
Mivel a hajó elhaladásának szimulációja nagy időbeli felbontást igényel (itt általában 5 mp-es időlépést alkalmaztam) indokolatlanul hosszú időt venne igénybe a teljes modellezett szakaszon végigszámolni a hajó mozgásának hatását. Elég, ha a kijelölt pontok előtt jelenik meg kellő távolságban (kb. 400m), elhalad közöttük, majd tovább vonul egészen addig, míg a vizsgált területen kialakuló változók értékeire már nincs számottevő hatással. Ez, a hajó sebességtől függően 350-550 másodperces modellezett időszakot kíván meg.

A minimális merülés a rakomány nélküli tolóhajó teljes merülésének felel meg, míg maximális merülés e hajóút kategóriában 2,50 m. Feltételeztem, hogy a tolt kötelék legtöbb esetben teljes rakománnyal ($Drft=2,50$ m) és maximális sebességgel ($v=2,60$ m/s) közlekedik. Ezért számos modellváltozatnál ezeket a paraméterek adtam meg. Minden egyes változatra azt a kikötést kell tenni, hogy a tolóhajó típusa nem változik, valamint a tolt kötelék mindig a hajózási kategóriának megfelelő maximális 2x2 bárkás kiosztású (lásd 1. táblázat).

A futtatások egy része tolatmányra vonatkozik, ami völgymenetben halad. Célszerű rámutatni, hogy hegymenetben, illetve több hajó elhaladása esetén milyen hatást váltanak ki a bárkák az áramlási viszonyokra. Erre további három változatot állítottam fel, a következők szerint:

- Tolt kötelék hegymenetben
- Tolt kötelék hegymenetben, és mellette elhaladó tolt kötelék völgymenetben
- Két darab tolt kötelék völgymenetben, követési távolság: 100 m

Mindhárom esetben a merülés és a bárka kiosztás az előzőekben említett hajóút kategóriának megfelelő. A víztest természetes jellegét figyelembe véve a hajók haladási sebességei hegy, és völgymenetben: $v_{hegy}=2,40$ m/s valamint $v_{völgy}=2,60$ m/s. Merülésük minden esetben: $Drft=2,50$ m. Ezeket a vizsgálatokat egy Dunára jellemző középvízi állapot feltételezésével végeztem el, $Q=1800$ m³/s vízhozam mellett. Az egymással szemben haladó hajók esetén igyekeztem úgy meghatározni a modell beállításait, hogy a két hajó a megjelölt pontoknál haladjon el egymás mellett, mint ahogy azt a **24. ábra** is mutatja.



24. ábra Egymás mellett elhaladó hajók vízszint változásainak ábrázolása Tecplotban

A fentiek alapján összesen 18 modellváltozat került vizsgálat alá.

11. Eredmények

A nagyszámú változat összes eredményét nincs értelme részletesen bemutatni a nagy terjedelem miatt, de a dolgozat CD melléklet Függelékében, az alábbiakban bemutatásra kerülő diagramokhoz hasonló formátumban közlöm azokat.

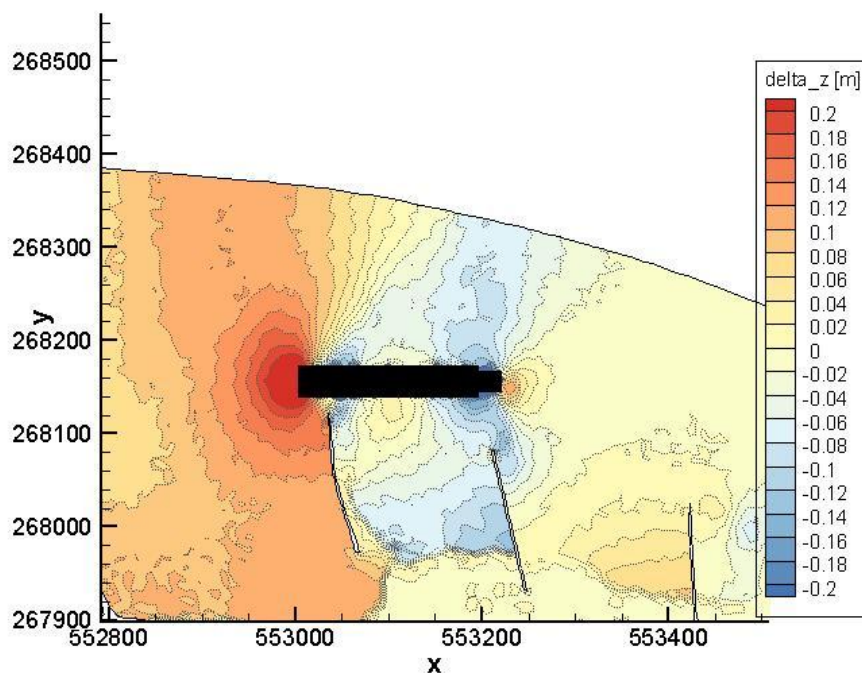
A modellfuttatásokat követően első lépésben az adatok exportálását végeztem el, hogy könnyen feldolgozható formába kerüljenek. Ehhez először a Mesh program segítségével az SMS-ben kapott eredményfájlokat kellett konvertálni Tecplot 360 szoftverben megjeleníthető formátumra. Az így előállt adatfájl már tartalmazza minden számítási cellára az időben változó eredményeket (mederszintek, vízszintek, vízmélység, áramlási sebességek). A szoftver alkalmas arra, hogy a fent bemutatott lekérdezési pontokban ASCII formátumban, táblázatkezelőbe átemelhető módon mentse ki a kiválasztott paraméterek időbeni alakulását. Ezek a paraméterek a korábban tárgyalt vízszint változás (Δz [m]), áramlási sebesség (Seb [m/s]) és csúsztatófe-
szültség (τ [kN/m²]). Mivel a nyers eredményfájlok közvetlenül egyiket sem tartalmazzák, a Tecplot 360 feldolgozó szoftverben előállítottam őket a következő módon:

Vízszint változás (Δz):

Ebben az esetben egyszerű a dolgunk. A szoftver, melyben megjelenítettük a konvertált adatokat alkalmas arra, hogy új változót definiálhassunk a már meglévők segítségével. Mivel a meglévők közt jelen van a vízszint abszolút magassága, a következő módon adható meg a vízszint változása:

$$\Delta z[m] = z_s - z_s(1) \quad (7)$$

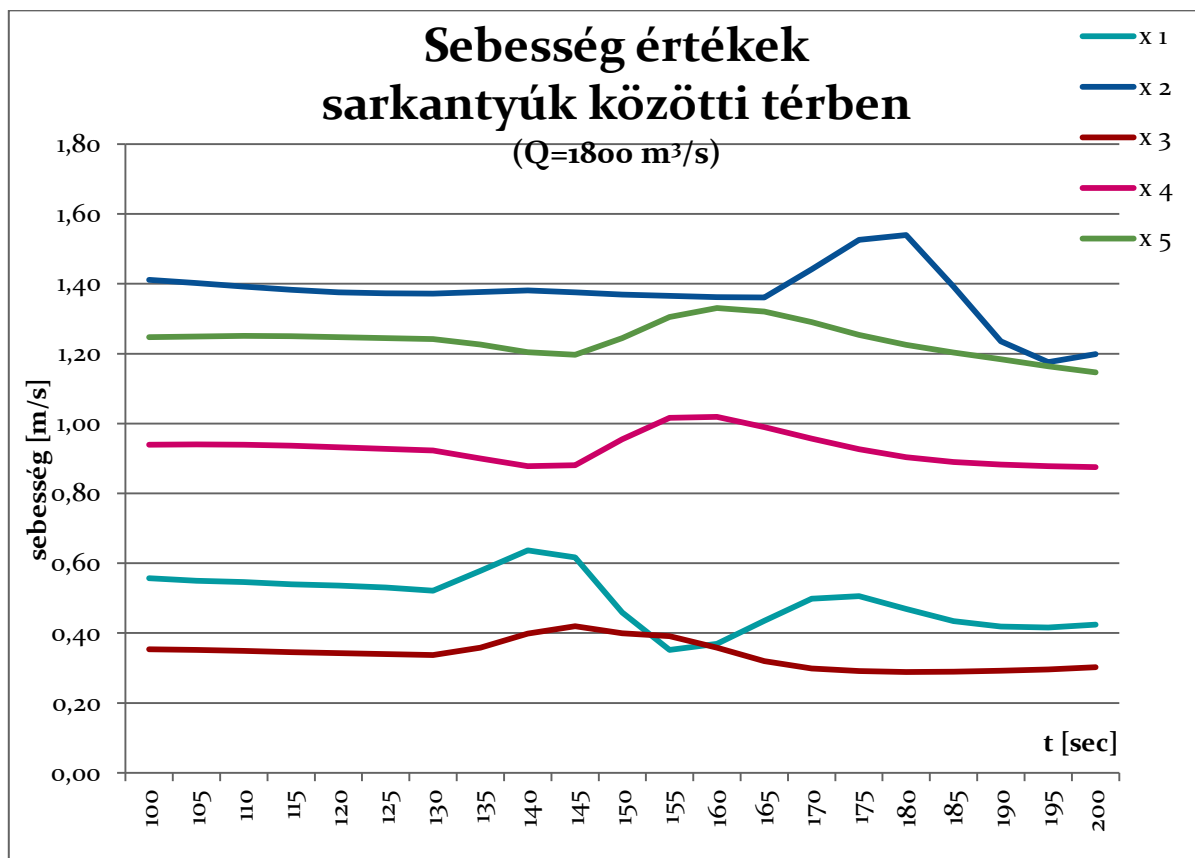
Ahol z_s a vízszint mB feletti magassága, és $z_s(1)$ az első időlépéshez (vagyis a hajó nélküli nyugalmi vízszinthez) tartozó vízszint Balti feletti magassága. Egy példát láthatunk a **25. ábra** segítségével, mely a Tecplot szoftverrel készült.



25. ábra Völgyemenetben haladó hajó keltette vízszint változások

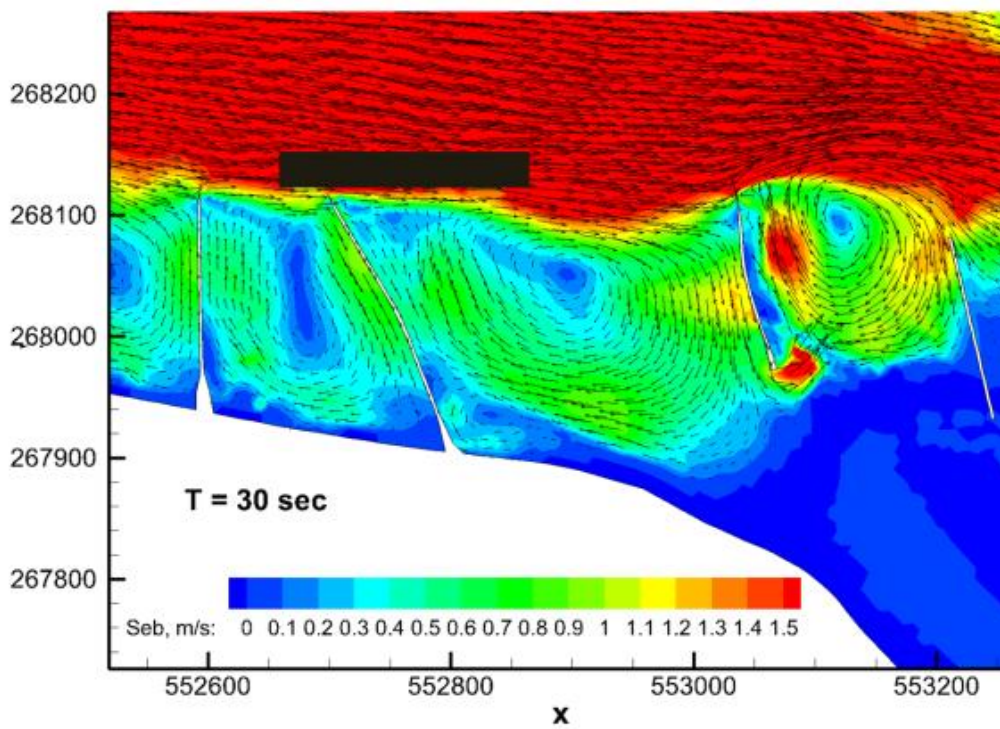
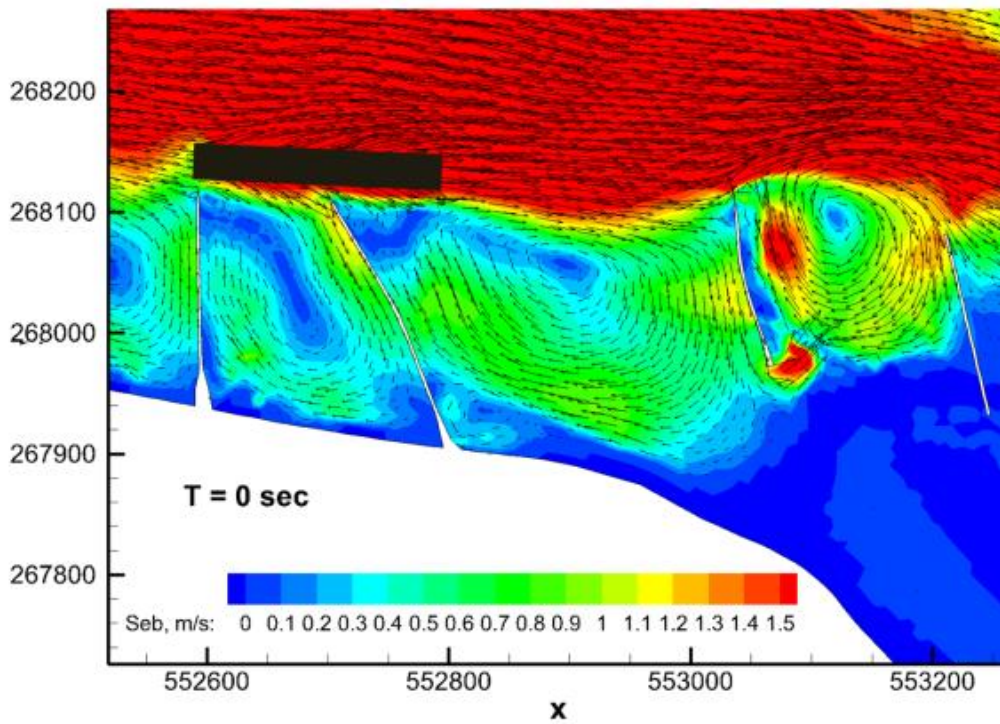
Áramlási sebesség (Seb):

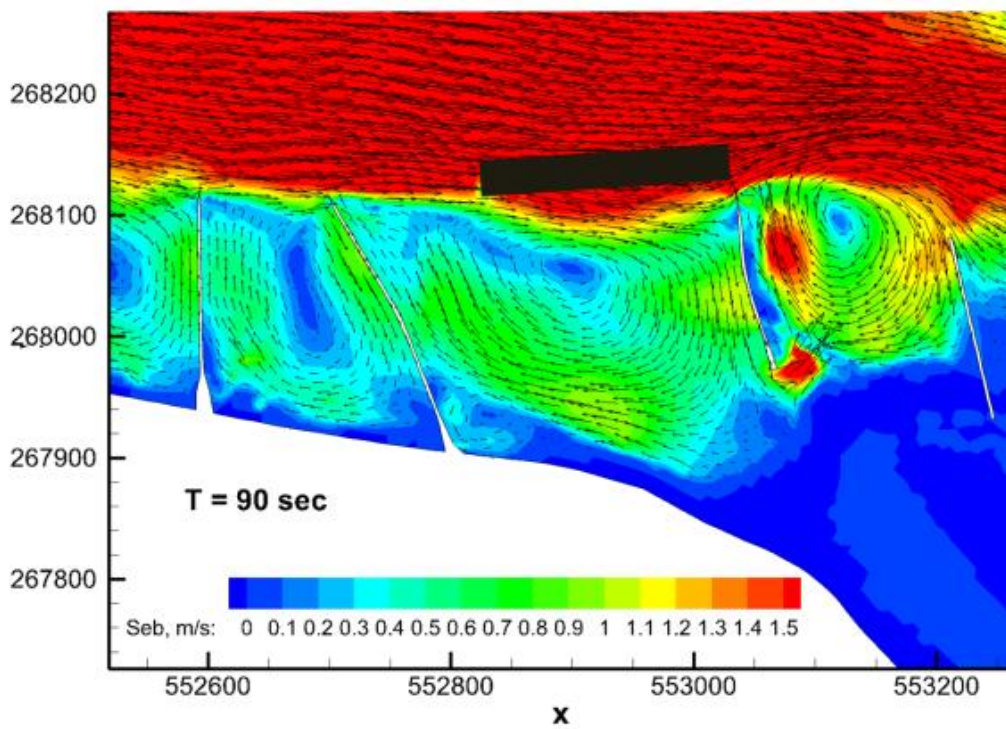
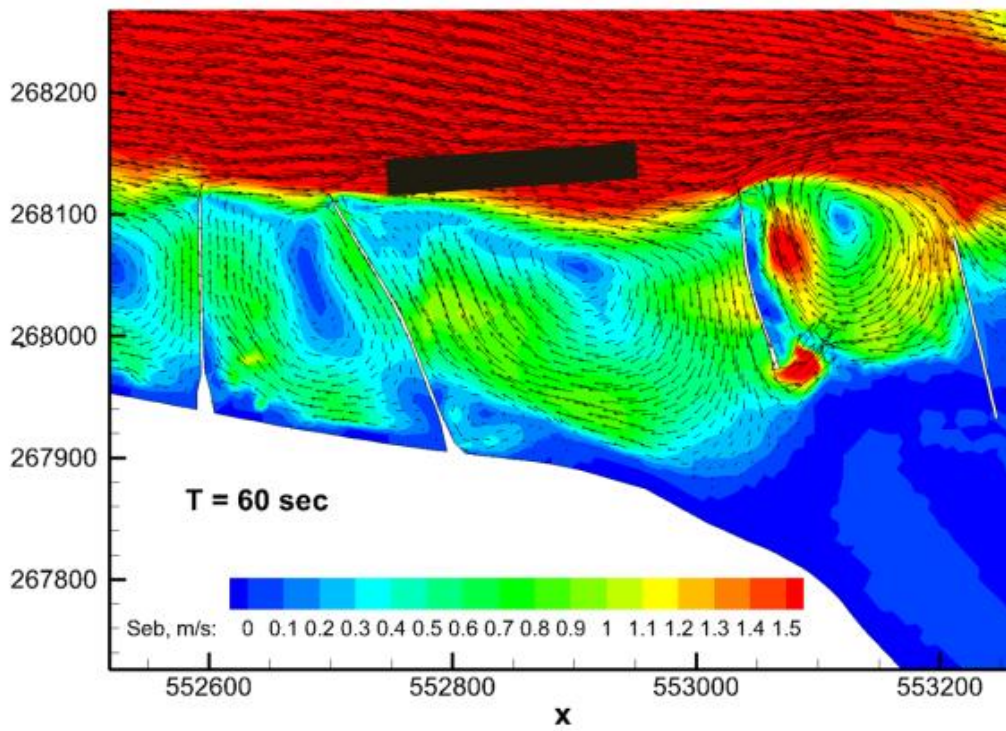
A modell minden egyes cellában kiszámítja az u és v sebesség komponenseket. Ebből könnyen számítható a Tecplot programon belül egy cella áramlási sebessége m/s dimenzióban.

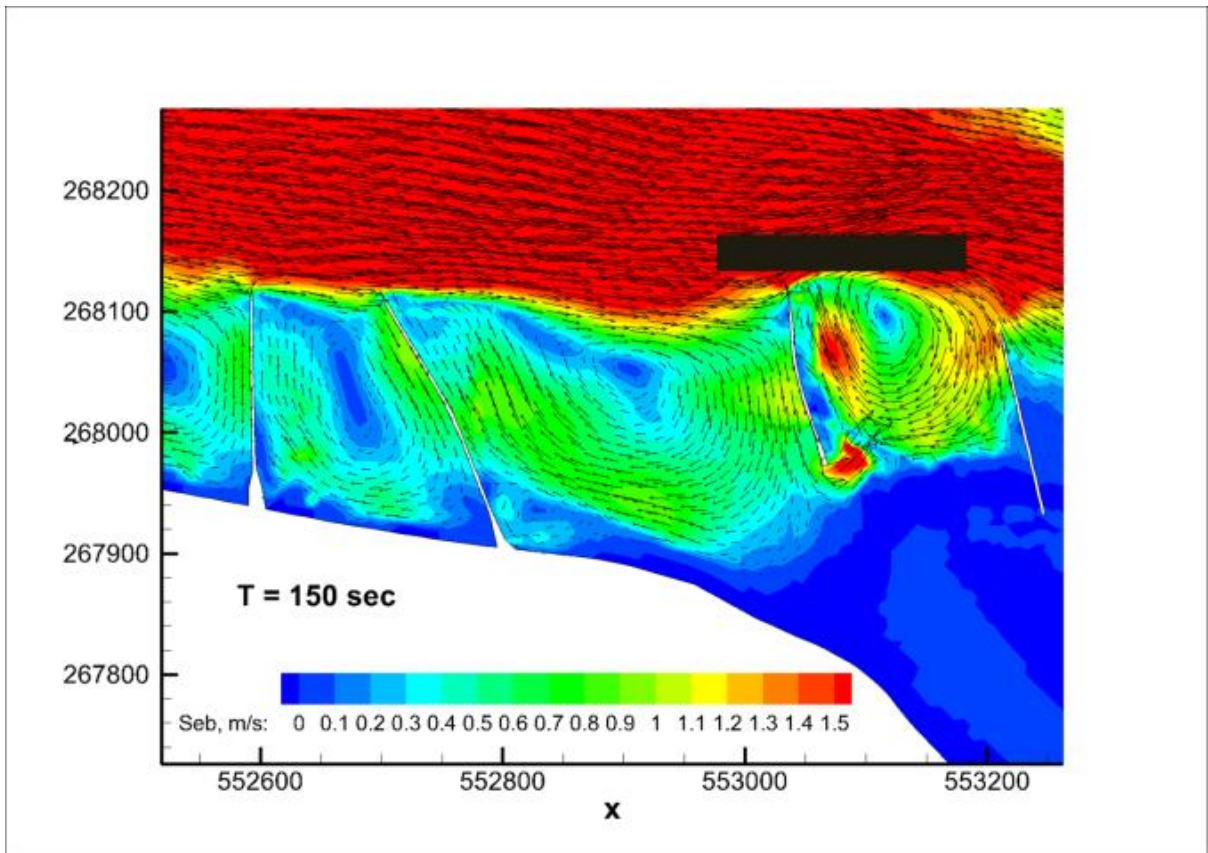
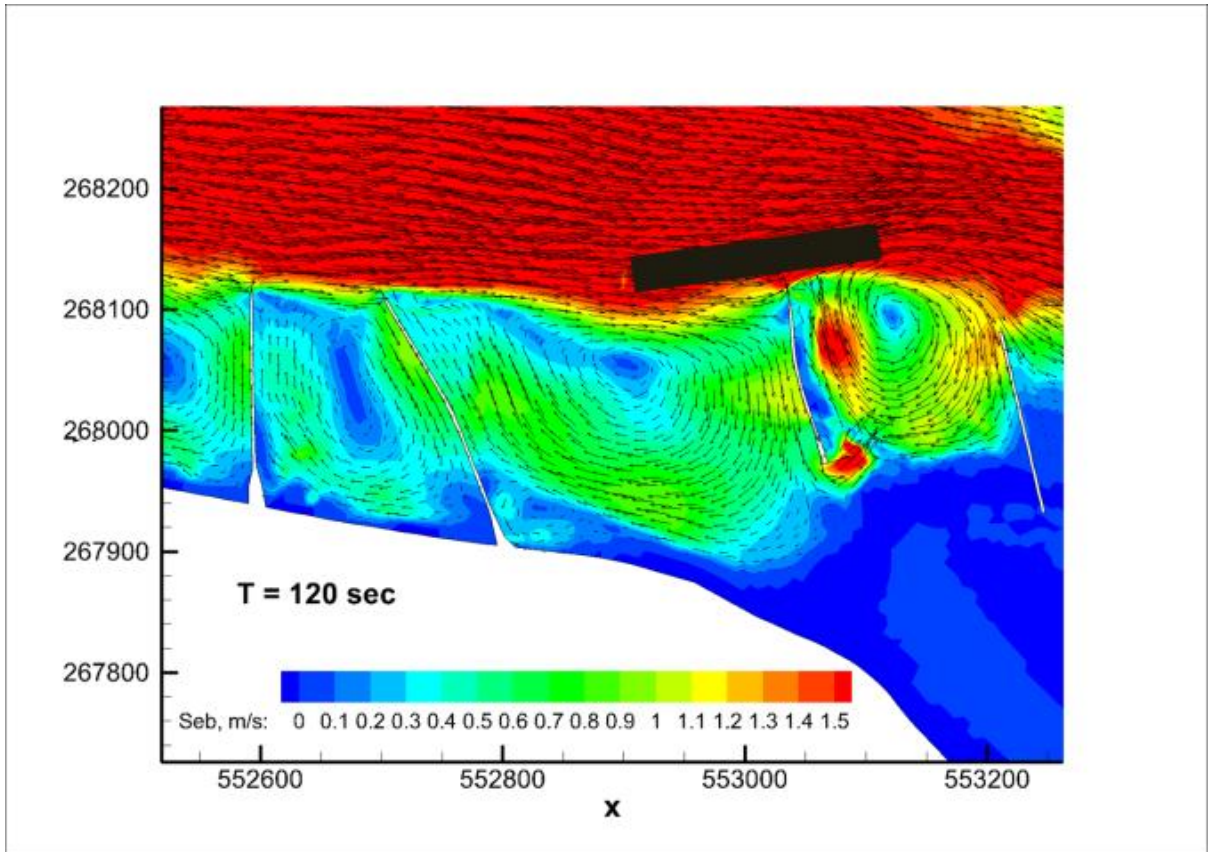


26. ábra Sebesség idősorok sarkantyúk közötti térben, $Drft=2,50m$; $v=2,60m/s$

A sebesség esetében nem feltétlenül pontbeli idősorokkal lehet bemutatni a változásokat (26. ábra). A Tecplot szoftver palettájának segítségével szemléletesebb ábrák mutathatóak be. A kontúros megjelenítés mellett a sebességek vektorokkal is ábrázolhatóak, melyre példát a 27. ábrasorozaton láthatunk.







27. ábra Sebességmezők alakulása tolt kötelék völgymenti elhaladásakor

Fenék-csúsztatófeszültség (τ):

A fenék-csúsztatófeszültséget új változóként definiáltam az általánosított Darcy-Weisbach (vagy Fanning) összefüggés alapján (Yunus és Cengel, 2007):

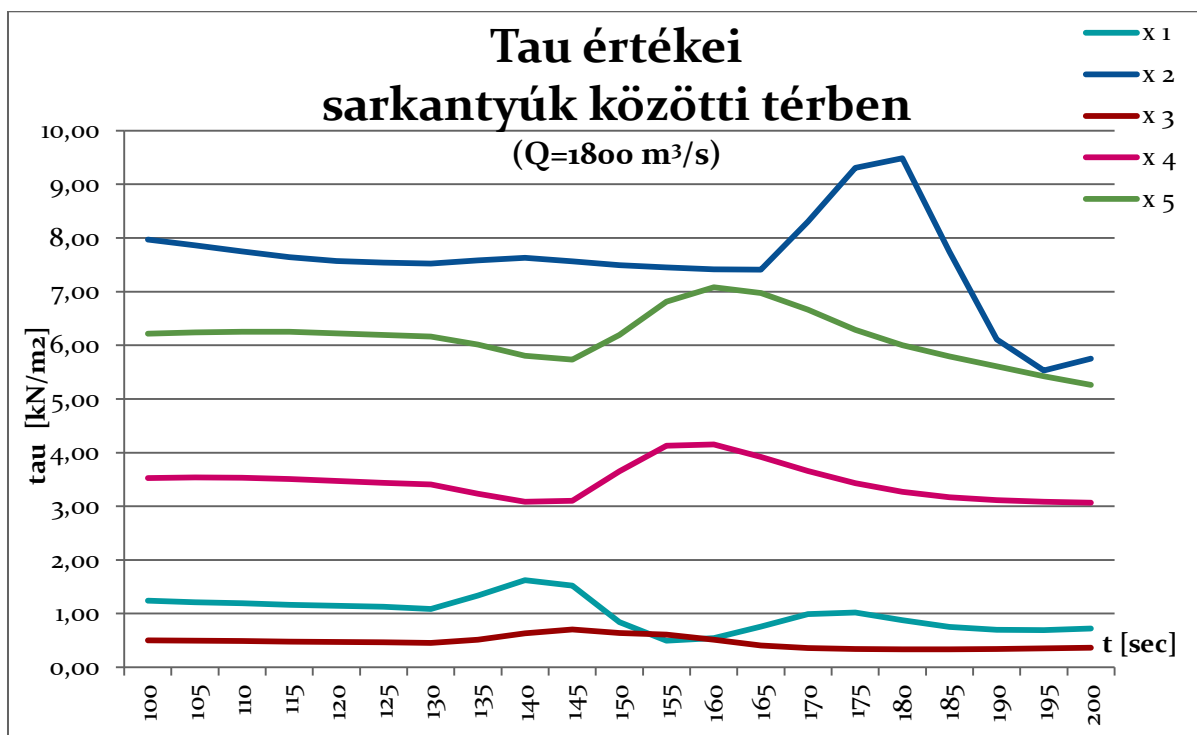
$$\tau \left[\frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \right] = 0.5 * \rho * C * v_a^2 \quad (8)$$

Ahol ρ - a víz sűrűsége (1000 kg/m³)

C - dimenziómentes súrlódási együttható (kavicsos homok esetén 0.008)

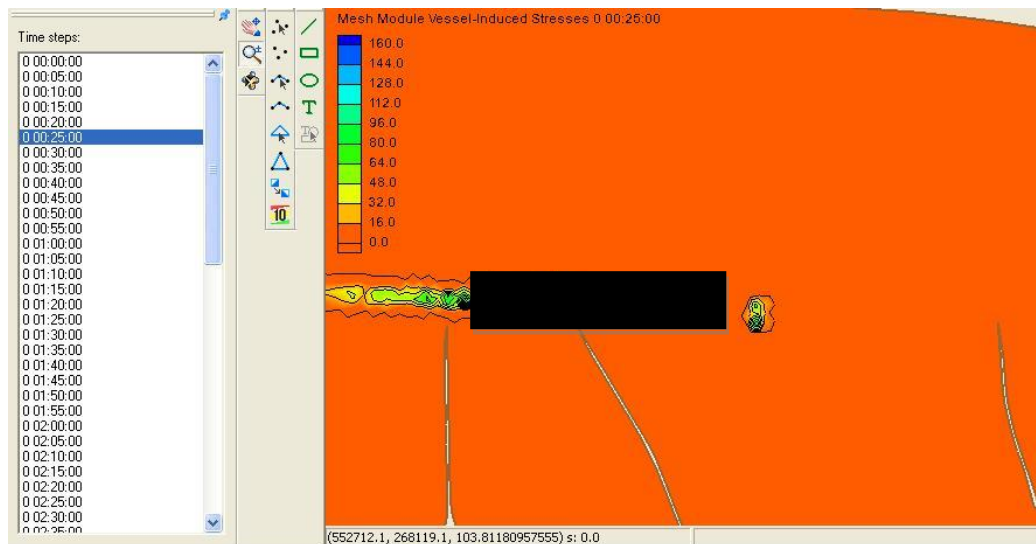
v_a - áramlási sebesség [m/s]

Látható, hogy a feszültség négyzetesen függ az áramlási sebességtől. A **28. ábra** megjelenített feszültség és **26. ábra** látható sebesség idősorok hasonló tendenciákat mutatnak, ezért célszerűbbnek láttam a sebesség helyett a fenék csúsztatófeszültséget elemezni a továbbiakban.



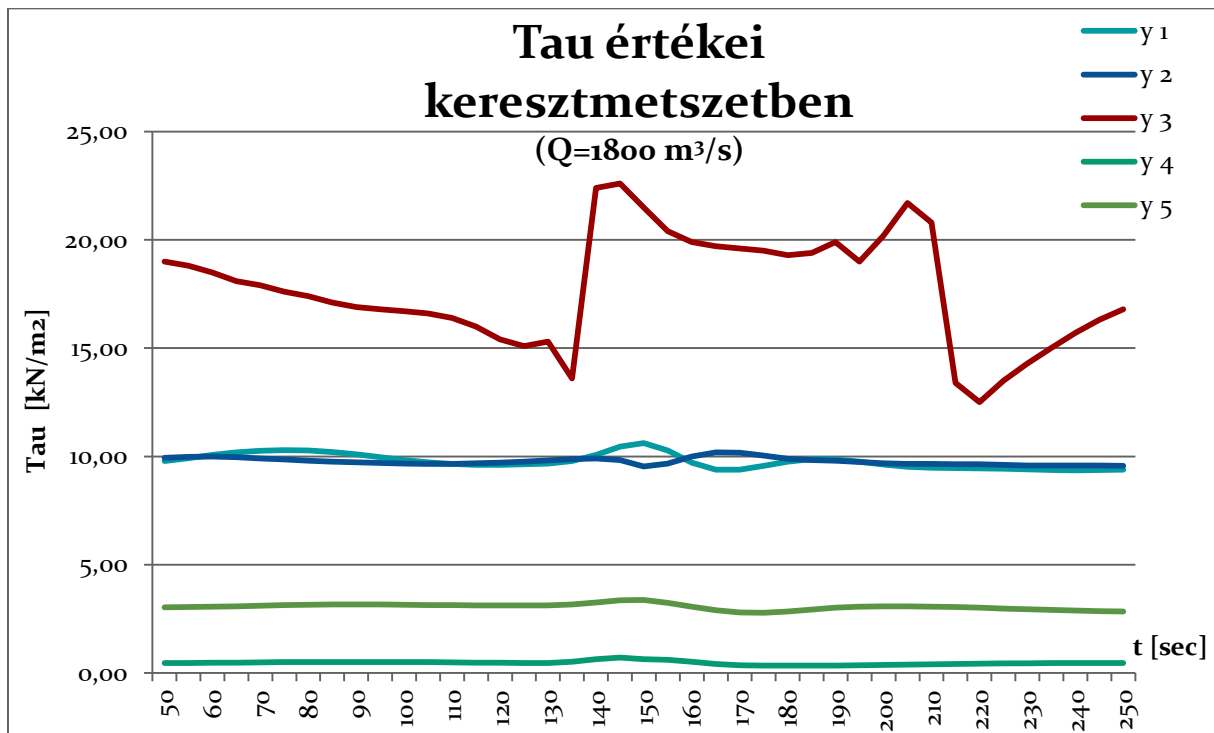
28. ábra Feszültségértékek idősora $Dr_{ft}=2,50\text{m}$ és $v=2,60\text{m/s}$ hajózási paraméterek mellett

A (8) egyenlet alapján megkapható a hajó nélküli állapotban, vagyis a nyugalmi viszonyokhoz tartozó fenék-csúsztatófeszültség területi eloszlása. A numerikus modell emellett képes a hajócsavar és hajóorr által indukált fenék-csúsztatófeszültség növekmény számítására is. Az ily módon lokálisan megváltozott τ mezőhöz további összefüggéseket használ fel a modell, amire itt nem térek ki, de a hivatkozott anyagban megtalálható (Hammack et al., 2008)



29. ábra Hajóorr és csavar okozta feszültség növekmény megjelenítése SMS szoftverben

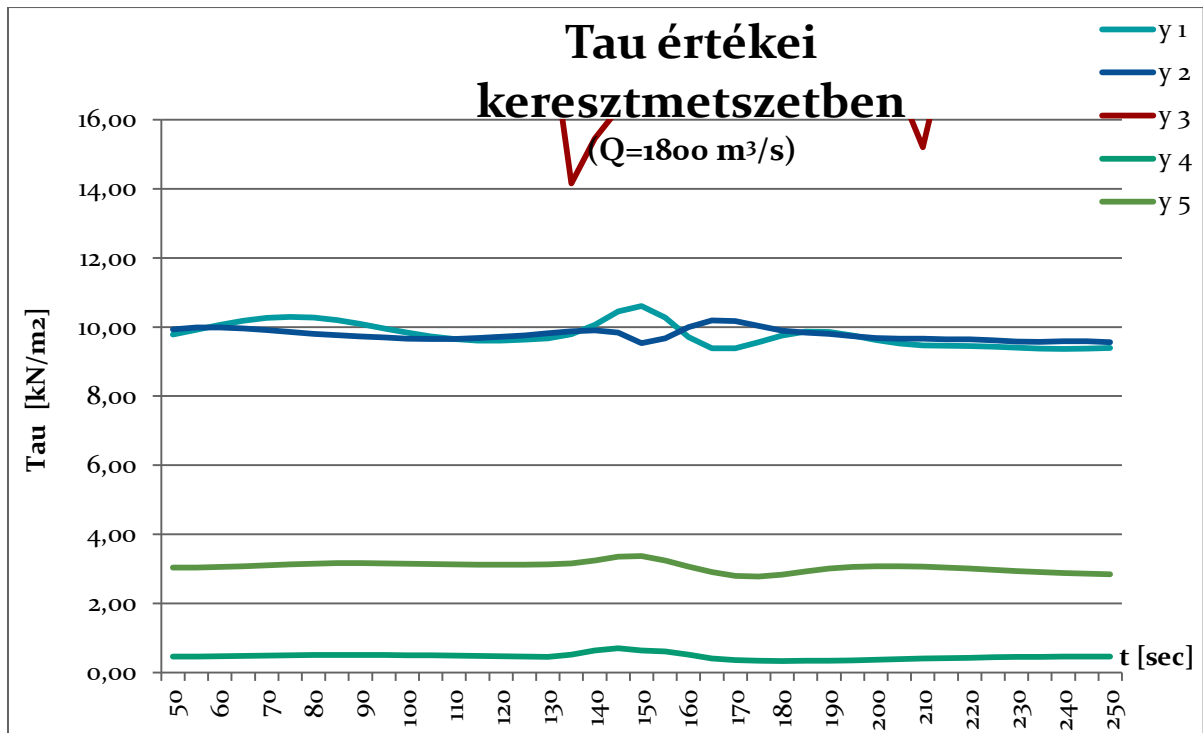
A 29. ábra egy kiragadott példát mutat be a hajócsavar és orr által gerjesztett feszültség változásokra, ahol csak a növekményt ábrázoltam. Megjegyzendő, hogy a megjelenített adatok mértékegysége eltér az SI-től, és 10-zel osztani kell, hogy kN/m^2 -ben kapjuk meg annak értékeit. Jól kirajzolódik mind az orr által mind a hajócsavar által megnövekedett feszültség, ami nagyságrendben a nyugalmi állapothoz tartozó τ -nak felel meg, vagyis a modellszámítás alapján ez a hatás jelentős lehet. Erre mutat egy példát a 30. ábra látható idősor.



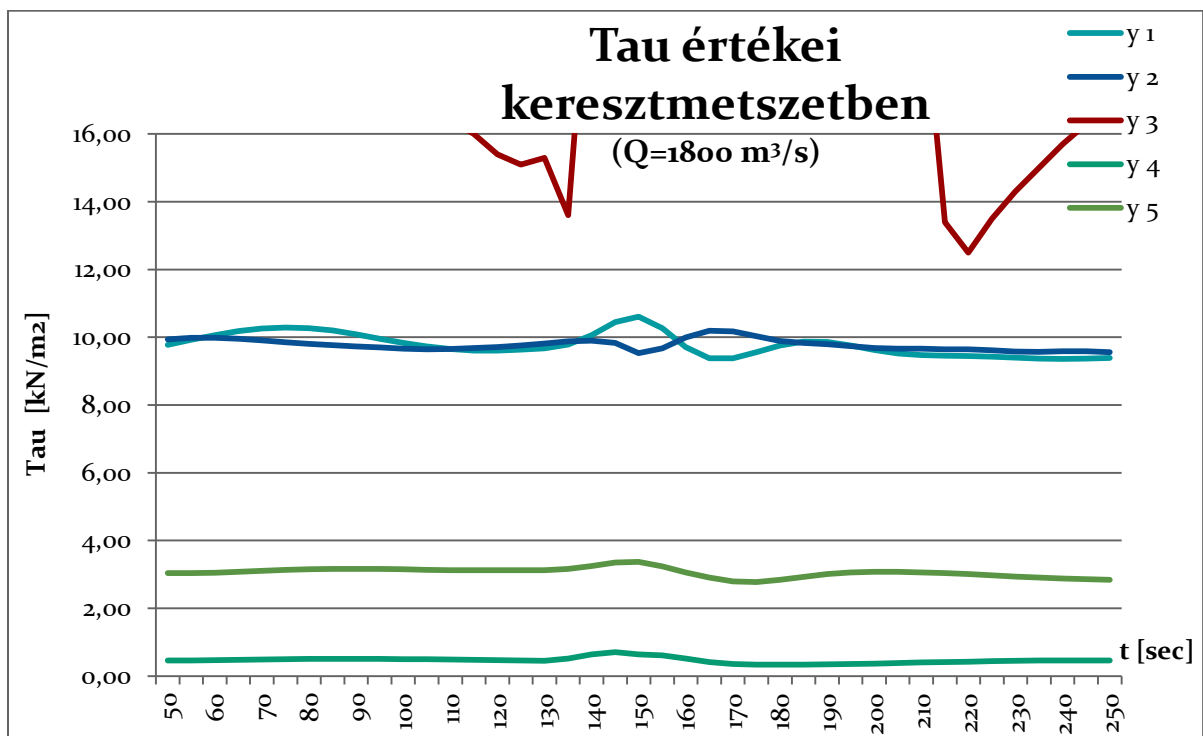
30. ábra Feszültségi értékek alakulása hajóorr és csavar figyelembe vételével ($Dr_{ft}=2,50\text{m}$; $v=2.60\text{m/s}$)

A propeller és a hajóorr hatásának számszerűsítése ASCII formátumban nem olyan egyszerű módon történhet, mint a többi változó esetében. E hatás elsősorban a hajótest alatt jelentkezik. Célszerű a hajózási útvonalban több pontot, és nem egyet (y_3) megjelölni a hidrodinamikai változók idősorának elemzésére. Érdekes megvizsgálni a 31. ábra a 32. ábra együtt,

mely ugyanannak a futtatásnak az eredményeit tartalmazza, azzal az eltéréssel, hogy a 31. ábra esetében figyelembe vettem a hajókialakítás és meghajtás tárgyalt hatását.



31. ábra Feszültség időbeli változása y1, y2, y4 és y5 pontokban (Hajóorr és csavar hatással)



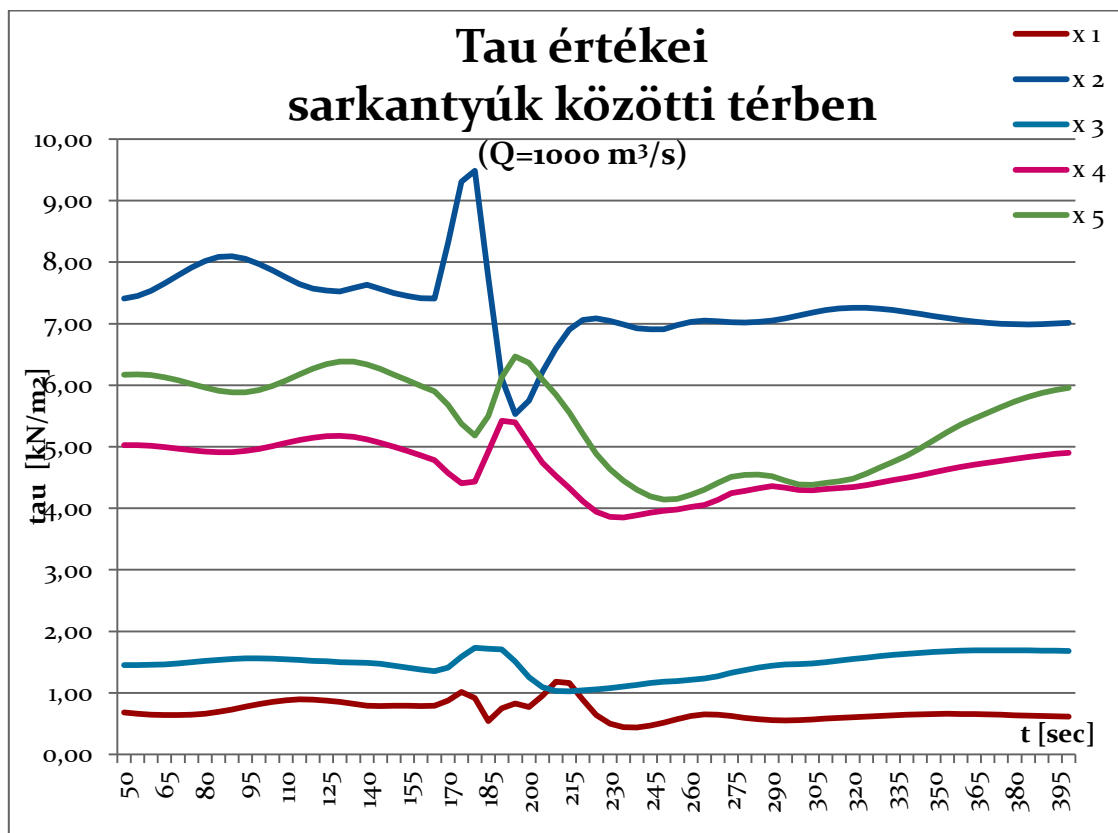
32. ábra Feszültség időbeli változása y1, y2, y4 és y5 pontokban (Hajóorr és csavar hatása nélkül)

Egyedül az y_3 pont τ értékeiben történik változás, melynek csupán völgyelései láthatóak az ábrákon. A skálázás beállítása a további pontok idősorainak megfigyelését segíti. Látható, hogy nincs változás a két ábra ezen pontjainak értékei között. Az eredmények kiértékelésénél ezért az y_3 pontban a feszültség értékeket nem vettem figyelembe. Az ADH modell által számolt

feszültség változás a hajótest alakja és meghajtása által befolyásolt, láthatóan nem jelentkezik sarkantyúk övezte területen. Ezért ennek teljeskörű figyelembe vételére nem terjed ki e dolgozat, meghaladta annak kereteit. Csupán szeretnék rámutatni egy diagramon keresztül (30. ábra), hogy érdemes e kérdéssel foglalkozni, és kihasználni az ADH program lehetőségeit.

A korábban bemutatott lekérdezési pontokhoz tartozó hidrodinamikai jellemzők időbeli változásai a sarkantyúk közötti térben (x_i pontok) és a kijelölt keresztmetszetben (y_i pontok) kerültek lekérdezésre. Az eredmények idősoron való ábrázolása az alábbi szisztematika szerint történt:

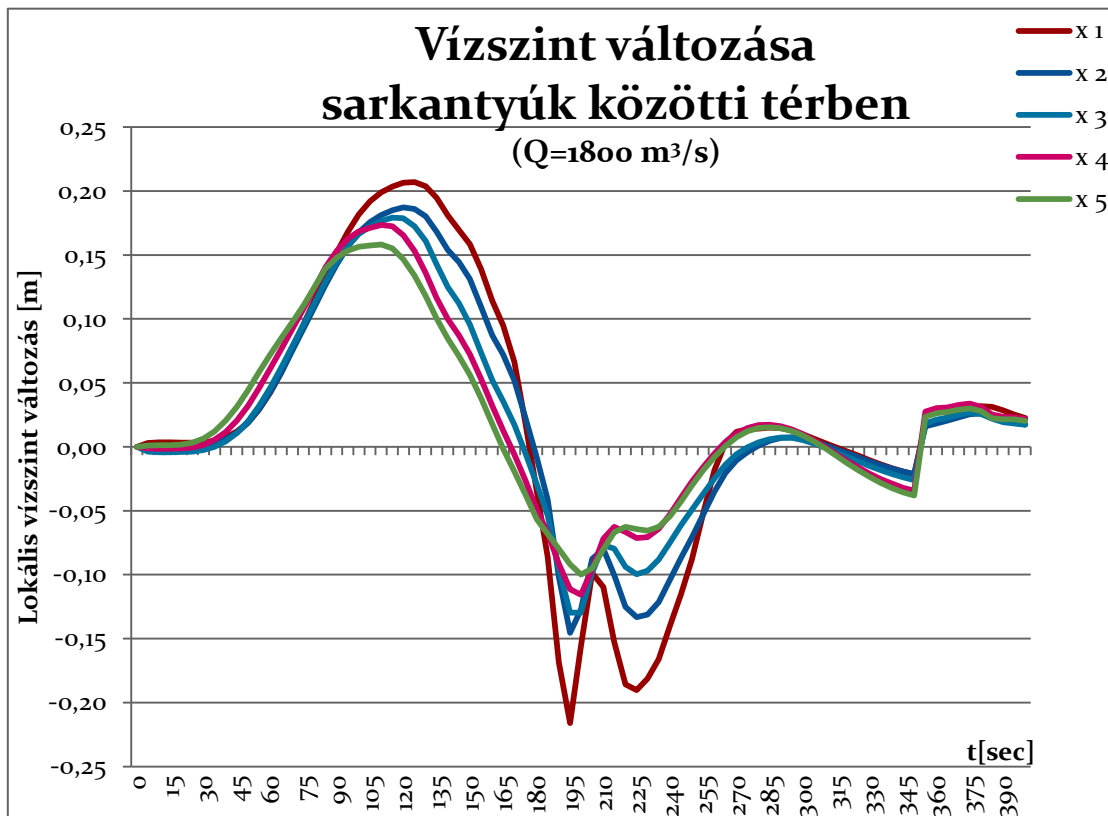
1. Adott vízhozamnál a sarkantyúk övezte tér pontjaiban, és keresztmetszvényben a változók (Δz , τ) alakulása eltérő hajóparaméterek esetén



33. ábra Tau értékei sarkantyúk között, $Dr_{ft}=2,50m$; $v=2,10m/s$

A 33. ábra szerinti megjelenítés a térben való kiterjedését szemlélteti jól egy változat lekérdezett eredményeinek.

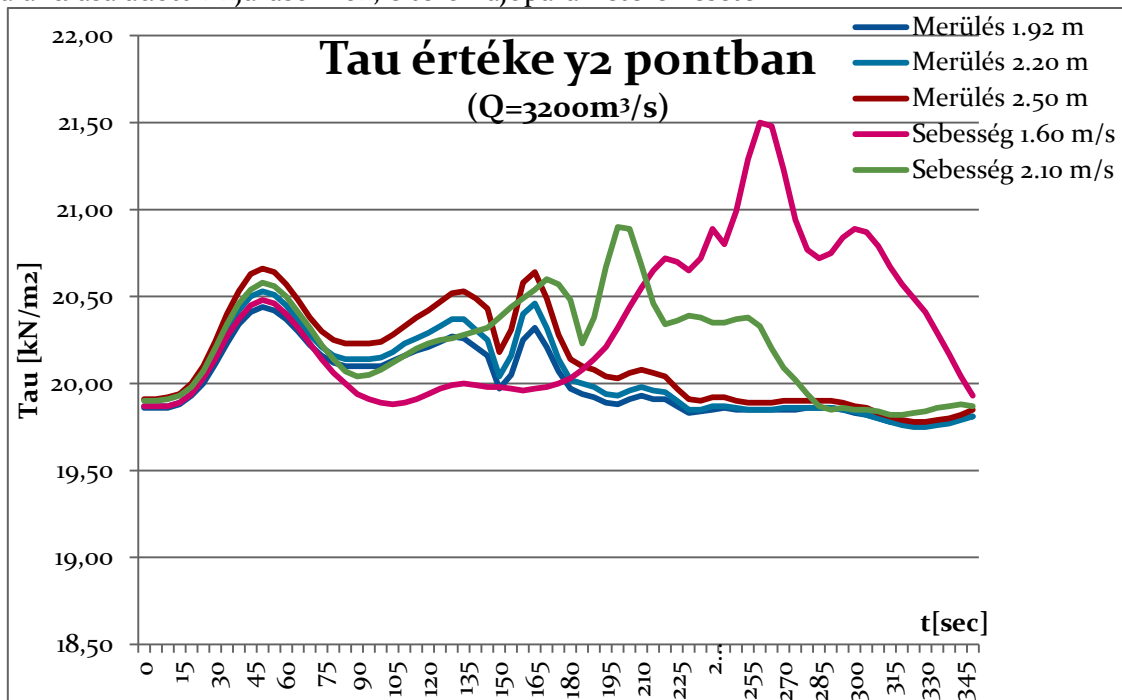
2. Adott vízhozamnál sarkantyúk övezte tér pontjaiban, és keresztaszvényben a változók alakulása eltérő hajózási forgalmak alkalmával



34. ábra Vízszint változás sarkantyúk között, tolt kötelék hegymenetben ($Dr_{ft}=2,50m$; $v=2.60m/s$)

Ahhoz, hogy a változó hajóforgalmak hatása térben hogyan változik, a 34. ábra látható megjelenítés alkalmas.

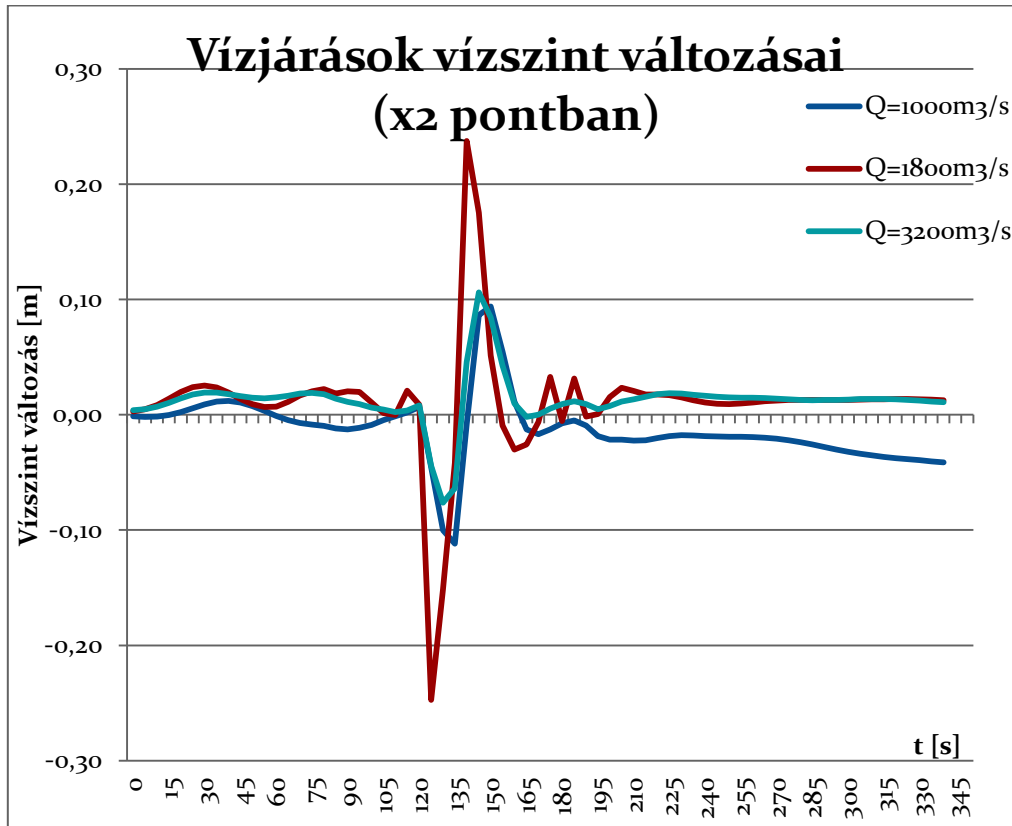
3. Keresztaszvény (y_2) és sarkantyúk által határolt tér (x_2) egy-egy pontjában Δz , τ értékek alakulása adott vízjárásokhoz, eltérő hajóparaméterek esetén



35. ábra Tau értéke y_2 pontban

Egy meghatározott pontban Δz és τ változók hajóparaméterekre való érzékenységének elemzésére alkalmas a 35. ábra példaként bemutatott ábrázolásmód.

4. Keresztszelvény (y_2) és sarkantyúk által határolt tér (x_2) egy-egy pontjában, adott hajóparaméterek esetén különböző vízhozamok alkalmával.



36. ábra Vízjárások vízszint ingadozásai y_2 pontban (Drft 2,50m ; $v=2,60\text{m/s}$)

Elemzésre került a különböző változók érzékenysége eltérő vízjárások esetén, adott hajóparaméterek mellett. Ennek megjelenítésére láthatunk példát az 36. ábra által.

Mint ahogy azt korábban említettem, az értékelésnél alapul vett diagramok a dolgozat CD mellékletén találhatóak meg a Függelékben.

12. Eredmények értékelése

A következőkben a fentiekben és a Függelékben bemutatott eredménymezőkre és idősorokra támaszkodva foglalom össze, hogy a hajózási útvonalon elhaladó hajó milyen hatást gyakorol az áramlási viszonyokra. A könnyebb megértés kedvéért az értékelést pontokba szedve, az egyes paramétereik hatását (hajó merülési mélysége, hajó sebessége, hajók haladási iránya, hajók száma, folyó vízhozama) külön-külön mutatom be, azon belül is elkülönítve a fő áramlási- és sarkantyúk közötti zónákat.

12.1. A hajó merülési mélységének és sebességének hatása, változó vízjárási állapotokban

A modelleredmények alapján megállapítható, hogy a sarkantyúk közti térben a hajó haladási sebességének csökkenésével a vízszint megváltozása (Δz) egyre nagyobb szélső értékek között ingadozik. Ez a viselkedés az x_2 pont idősorain jól látható. Hasonló tendencia figyelhető meg a hajó merülésének növelésével. Ekkor szintén emelkedik Δz értéke 15-30%-kal. Mindkét paraméter megváltozására a lokális vízszint ingadozás közel egyenlő érzékenységet mutat. Vízhozamtól függetlennek mutatkoznak a megfigyelhető legnagyobb vízszintváltozások, melyek rendszerint x_1 pontban alakul ki. Kissé távolabb, az x_2 pontban a vízszint ingadozás nem függetleníthető a vízhozamtól. Kisvíz esetén jóval nagyobb érzékenységet mutat a hajó merülés értékére. A középvízi eset ebben a pontban érdekesen alakult, ez később kerül tárgyalásra.

Hasonló tendenciák figyelhetőek meg a fenék csúsztatófeszültségét vizsgálva (τ [kN/m^2]). A merülés növekedésével egyenes, míg a hajó haladási sebességének csökkenésével fordított arányban áll a τ megváltozása. Ebben az esetben pedig az ábrákat elemezve elmondható, hogy a haladási sebességre érzékenyebben reagál a csúsztatófeszültség. Modellezett vízhozamtól függően 5-15%-os emelkedés állhat elő. Ennek magyarázata további vizsgálatokat igényelne. Kisvíz idején ez az érzékenység jól látható. Növekvő vízhozamok hatására viszont mind a két paraméterre való érzékenység mérséklődik.

Keresztszelvényben megfigyelt változások: a merülést növelve és a haladási sebességet csökkentve Δz értéke nő ugyan, de közel sem olyan arányban, mint a sarkantyúk közti térben. Erre a keresztszelvény pontjainak helyzete adhat magyarázatot. Az elvonuló hajó keltette primer hullámok nem csapdázódnak a nyílt vízfelszínen, egy hullám sokkal hamarabb ellapulhat, mint a folyószabályozó művek által határolt területen. Ha külön megfigyeljük az idősorok tetőző és völgyelő pontjait, akkor látható egyfajta aszimmetria a kilengések között. Kisebb vízhozamok futtatásával Δz pozitív kitérése elmarad a negatív irányban kialakuló értékétől, viszont a vízhozam növekedésével fordul az állás, melyet az y_2 pontban lekérdezett idősorok szemléltetnek jól. Az úszó test elhaladtával pedig a diagramokon nem is látszik, hogy mikor áll be újra a zavartalan vízfelszín, ennek vizsgálatára hosszabb ideig kellene egy-egy változatot futtatni. Az viszont belátható, hogy alacsonyabb vízhozamok esetében lassabban áll vissza.

A hajó merülési mélységével nem mutatható ki közvetlen kapcsolat a fenék-csúsztatófeszültségi értékek vizsgálatakor, a szélsőértékek alig változnak. A hajó sebességét tekintve viszont igen, mert megmutatható e pontokban is, hogy a τ kilengései erősödnek a hajó sebességének csökkenésével. Köztük lévő kapcsolat fordítottan arányos. A feszültségi értékeket szemlélve nem meglepő, hogy vízhozamtól erősen függő kapcsolat áll fenn. A nagyobb vízhozam nagyobb áramlási sebességeket is jelent, mely növeli τ értékét (8. egyenlet). Középvízi, és nagyvízi szimulációk alkalmával egyre nagyobb feszültség értékeket kapunk y_1 és y_2 pontokban, a Duna bal partjához közel. Ilyen események előfordulásakor eltolódik a bal part irányába a sodorvonal. Ez természetesen igazolja, hogy a sarkantyú sorozat betölti funkcióját. A KQ-hoz tartozó $2,5 \text{ kN/m}^2$ fenék csúsztatófeszültség egy nagyságrenddel nagyobb értéket vesz fel az említett pontoknál, $\tau \approx 20 \text{ kN/m}^2$ nagyvízi állapotban. Ekkor a műtárgy koronaszintjén már átbukik a víz. A sarkantyúk által határolt y_4 és y_5 pontokban szintén megnövekednek ekkor a feszültségek. Itt azonban 50-100%-os növekedésről beszélhetünk, a hatás tehát rendki-

vül nagy. A sarkantyún átbukó vízárám egyfajta kimosó hatással is bírhat a műtárgyak övezte területen, melyet érdemes lehet a későbbiekben vizsgálni, további változatok futtatásával. Ez már akár hidro-ökológiai kérdéseket vetethet fel, mellyel e tanulmány külön nem foglalkozik, csak szeretne rámutatni e téma tárgyalásának relevanciájára.

12.2. Eltérő hajóforgalmak szerint (haladási irány, hajók száma)

Sarkantyúk közti tér: Általánosságban elmondható, hogy a modellezett Δz értékei x irányban fokozatosan csökkennek az alvízi sarkantyúhoz közelebb érve. Völgy- és hegymenetben haladó hajók keltette vízszint változás eltér egymástól. A folyó jellegéből is adódik, hogy hegymenetben nagyobb vízszint ingadozások jelennek meg. A hajó és a víztér ellentétes haladási iránya nagyobb torlódást eredményez az orrnál. Több hajó elhaladásakor bonyolultabb helyzettel találkozhatunk. Egymást követő tolatmány esetében a vízszintet érő hatások nem szuperponálódnak ugyan, de erősítik Δz kilengését. Egymással szemben haladó forgalom vizsgálatánál pedig nem lehet egyértelmű következtetéseket levonni, értelemszerűen a kapott eredmények a találkozási pont elhelyezkedésére igen érzékenyek lehetnek. Az látható, hogy a hegymenetben haladó tolatmány hatása jobban érvényesül, a völgymenti hajó hatása az eredeti vízfelszín visszaállásának idejében jelentkezik. Több hajó esetében, melyek egymáshoz viszonylag közel haladnak el, hosszabb idő kell a Δz nullára csökkenéséhez.

A fenék-csúsztatófeszültségi értékeket megfigyelve a haladási irányok között jelentős különbségek adódnak. Két darab, völgymenetben elhaladó tolt kötelék alig változtatja meg az értékeket egy darab hajó völgymenti elvonulásához képest. Hegymenetben sokkal markánsabb kilengések figyelhetők meg az eredményekben. Két, egymással ellentétes irányban haladó tolatmány modellezésekor az olvasható ki a diagramokról, hogy bizonyos pontokban erősítik, máshol pedig csökkentik egymás hatását. A sarkantyú felvízi irányában (x_1 és x_2 pontok) erősödnek a mederfenéket érő hatások, míg az alvízi részen található sarkantyú közelében (x_4 és x_5 pontok) ezek a hatások mérséklik egymást. Mint a sarkantyúk esetében itt sem fogalmazható meg egyértelmű hatás csökkenés, vagy növekedés egyik haladási irányban sem. A sarkantyúk közti tér sajátos áramlási struktúrája ad erre magyarázatot. Ez az eredmény rámutat a numerikus modell alkalmazásának fontosságára, hiszen nem beszélhetünk általánosítható eredményekről.

Keresztszelvényben megfigyelt változások: Hegymenetben való elhaladása tolt köteléknek hasonló hatásokat kelt, mint a sarkantyúk közti térben. Viszont, mikor megjelenik egy szemben haladó hajó, akkor az eredmények szerint a folyó bal partjához közeli pontokban (y_1 és y_2) erősítik egymást a hajók keltette hullámok, nagyobb, 2,5 deciméteres hullámok is keletkezhetnek. Völgymenetben elhaladó két hajó esetében csökken a kilengés nagysága.

Nagyobb változásokat figyeltem meg, amikor a fenék-csúsztatófeszültség értékeket elemeztem. Egymást követő kötelékek esetén már nagyobb ingadozások adódtak, mint a sarkantyúknál, vagy akár egy darab hajó elhaladásának értékénél. Hegymeneti, illetve egymással szemben haladó hajóforgalom szimulálásával a bal parthoz közel 30-60%-os értéknövekedést mutat a modell a hajó nélküli állapothoz képest.

Egyfajta határállapotnak tekinthető az 1800 m³/s-os vízhozam. Az eltérő hajóforgalmak ebben az állapotban kerültek modellezésre. A sarkantyúk koronaszintjei ehhez tartozó vízállás-

okra vannak kiépítve. Ekkor figyelhető meg az az eset, mikor a folyó vízszintje éppen átbukik a mű koronaszintjén, mely átbukást tovább erősít az elhaladó hajóforgalom által keltett hullám. E jelenség magyarázhatja a középvízi eseményhez tartozó nagyobb kilengéseket Δz és τ értékeiben, egyes pontokban, 2,50 méteres merülés és 2,60 m/s sebesség értékek mellett. Ez egyben utalás a hajózási paraméterek fokozottabb érzékenységére e határállapotban.

13. Összefoglalás

Az Európai Unió belüli korridorok közül kiemelkedő Duna, mint vízi út sokféle lehetőséget kínál úgy a környező országoknak, mint hazánknak. Egyik ilyen pont a belvízi fuvarozás kérdése, melyhez alapvető feltételként többek között a kikötők, hajózást támogató közlekedéspolitikai, és a hajózható viszonyok biztosítása szükséges. A Duna magyarországi szakaszának szabályozása évtizedek óta felmerülő kérdés, melynek hatása több tudományterületre is kihat, mint például az árvédekezés, hordalékvándorlás, vagy vízhasznosítási fejezetek. A nemzetközi áruforgalom lebonyolódása érdekében a folyószabályozási művek célja a megfelelő vízi út biztosítása. Erre lehetőséget, keresztirányú művek közül pl. a sarkantyúk szolgáltathatnak. A sarkantyúk közti térnek van egy jellegzetes áramlási struktúrája, mely a folyó vízjárásával, és hajóforgalom hatására egyaránt változik. Hajózás keltette nem permanens áramlások vizsgálataira mindeddig kevés tanulmány készült.

A számítástechnika fejlődésével ma már lehetőség nyílt numerikus modellek igénybe vételére e kérdések megválaszolásában. A valóságot egyszerűsítésekkel leíró szoftverek kalibrációt és igazolást követően megbízható eredményeket szolgáltathatnak.

Vizsgálataimat egy kétdimenziós numerikus áramlási modell segítségével készítettem el. Az ADH nevű megoldó alkalmazásával egy sematizált csatornán végzett vizsgálatok igazolták a modell alkalmasságát a kitűzött feladatra. Az igazolások a sarkantyúk közti tér jellegzetes áramképének kialakulására terjedt ki elhaladó hajó hatására. További futtatásokat végezve a modellt sikerült igazolni egy korábbi tanulmányban (Kéri, 2011) alapul vett kisminta modell kísérlet eredményeihez.

Valós környezetben való használatra egy hajózás által is igénybe vett, sarkantyússal szabályozott folyószakasz került kijelölésre. A nagybajcsi Duna szakasz VI/b hajózási útkategória besorolású, mely szakasz jobb partján 8 darab sarkantyú került kiépítésre az elmúlt évtizedekben. A futtatások igazolása a folyó természetes áramlásához egy megelőző tanulmány alapján (Baranya, 2004) történt. Elsődleges hajózási paraméterek, mint a hajó merülése és haladási sebessége, valamint különböző hajóforgalmi esetek alapján kerültek kijelölésre a különböző változatok. A futtatások kiértékelését illetően 9 darab pont került megjelölésre egy sarkantyúk övezte térben, valamint ugyanazon szakaszon a folyó egy keresztmetszelyében. Az eredmények közül a vízszint lokális változása és fenék-csúsztatófeszültség elemzése tűnt az célszerű választásnak. A csúsztatófeszültség értéke magában foglalja egyúttal a sebesség értékét is (8. egyenlet). Az adatok feldolgozását a Tecplot program tette lehetővé, mely az adatok könnyebb leképezését, és szerkeszthetőségét biztosította. Az így kimentett adatok feldolgozása táblázatkezelőben történt. Az eredmények az alábbi módokon kerültek megjelenítésre:

- Adott vízjárásnál a sarkantyúk övezte tér pontjaiban, és keresztmetszelyben a változók (Δz , τ) alakulása eltérő hajóparaméterek esetén

- Adott vízjárásnál a sarkantyúk övezte tér pontjaiban, és keresztshelvényben a változók alakulása eltérő hajózási forgalmak alkalmával
- Keresztshelvény (y_2) és sarkantyúk által határolt tér (x_2) egy-egy pontjában Δz , τ értékek alakulása adott vízjárásokhoz, eltérő hajóparaméterek esetén
- Keresztshelvény (y_2) és sarkantyúk által határolt tér (x_2) egy-egy pontjában, adott hajóparaméterek esetén különböző vízhozamok alkalmával.

Az elkészült diagramok teljes egésze a dolgozat CD mellékletén található Függelékben érhető el. A kapott eredmények, és diagramok kiértékelés az értékelés fejezetben került ismertetésre.

14. Következtetések

A szimulációk eltérő merülés, hajó sebesség, hajó forgalom és vízjárás tükrében szolgáltatnak eredményeket. A vízszint ingadozások értékei nagyban változnak attól függően, hogy a műtárgyak által határolt, vagy a folyó nyílt áramlási területén vizsgáljuk-e azt. Amennyiben a vízállás elmarad a középvízi értéktől, úgy az elhaladó hajó keltette hullámozás hamarabb ellapul, nyílt szakaszon. Ezzel szemben a sarkantyúk között szinergikusan erősíthetik egymást a hullámok, mely a hullám lassabb ellapulását eredményezi. Így a hajó elvonulását követően hosszabb idő elteltével alakul ki újra a zavartalan vízfelszín. A folyószabályozási mű koronaszintjét meghaladó vízállás esetében, egy elvonuló hajó által keltett hullámozás ugrásszerűen hathat ki a sarkantyúk övezte tér vízszintjeire, hiszen ekkor, a koronaszinten éppen átbukó vízáram műtárgy fölötti vízmélységével megegyező nagyságrendű hullám érkezik a hajó felől, mely halad tovább a korábban elzárt térre. Nagyvízi eseményeknél ez a hatás már nem érzékelhető, hiszen akkor már a sarkantyú koronaszintje fölött is megnövekedett vízmélység arányaiban nagyobb a primer hullám magasságánál. Az érkező hajó hullámai hasonló hatásokat keltenek, mint kisvíz idején.

A feszültség értékek négyzetesen függenek a sebességtől. A növekvő vízhozamok megnövekedett sebességeket eredményeznek. Ennek hatására a fenék csúsztatófeszültségei is megnövekednek, főáram esetén jobban, mint a sarkantyúk közti térben. Az eltérő áramviszonyokkal ez könnyen belátható. Nagyvízi eseményeknél az elvonuló hajó paramétereire, illetve forgalom nagyságára (pl. több hajó, egy hajó) kevésbé érzékeny. Hegy és völgymenti elhaladásokat tekintve a hegymeneti torló hatása miatt nagyobb változásoknak van kitéve a műtárgyak által határolt terület.

Összegezve megállapítható, hogy a merülési paraméter változtatása kevesebb hatást indukál, akár kisvízi, akár nagyvízi eseményeknél, viszont a hajó sebességével érzékenyebb a kapcsolat. Hiszen ekkor a feszültségek kilengés értékei nőnek. Ennek részletesebb elemzése a kutatás további folytatását vetíti előre. A sarkantyúk közti térben a feszültség változások elemzése komolyabb okokat szolgáltat, hiszen akár a hordalék kiüledés, akár az ökológiára tett hatása felvet olyan kérdéseket, melyekkel e tanulmány nem foglalkozik, de a további kutatásokhoz alapot adhat. Eltérő hajóforgalmak alkalmával figyelhető meg, hogy az elvonuló hajók önmagukban keltett hatásai, a tolatmányok találkozásánál nem szuperponálódnak, esetenként még csillapítják is egymást.

Tanulmányomban igyekeztem olyan tárgyterületeket érinteni, melyek nem kaptak hangsúlyt egy folyószabályozási mű tervezésénél, vagy funkcionális működésének elemzésénél. Ezek a vizsgálatok bővíthetik azokat a szempontokat, melyeket figyelembe vesznek egy műtárgy tervezésekor. A jövőben terveim között szerepel a numerikus modellvizsgálatok részletes terepi mérésekkel való igazolása és a modellezés kiterjesztése a morfodinamikai változások számszerűsítésére. A hazai szinten teljesen új vizsgálati terület a hosszabbtávú Dunai fejlesztések során fontos szerepet kaphat, mert a dolgozatban kimutatott hatások a legtöbbször nem elhanyagolhatók, így szerepet a hajók mozgása által keltett áramlások szerepet játszhatnak az áramlási-, szennyezőanyag elkeveredési-, medermorfológiai-, élőhely vizsgálatoknál. Véleményem szerint a vizsgálat akár már a Duna Stratégia Európai Unió keretprogramhoz is hozzájárulhat, a hajózási célú beavatkozásokat érintő feladatok során. A dolgozat számos új kérdést és tárgyalandó pontot vet fel, alapot szolgáltatva későbbi kutatásoknak a fent említett területeken annak érdekében, hogy a folyószabályozás hatékonyabb szolgálatot tegyen az ember és a folyó, mint élőhely számára.

Köszönetnyilvánítás

Szeretném megköszönni Hargitai Csabának, a BME Repülőgépek és Hajók Tanszékének tanársegédjének a segítségét. Áldozatos munkája során észrevételekkel, és ajánlásokkal szolgált olyan kérdéseket illetően, melyek túlmutatnak az építőmérnöki szakmán.

Felhasznált irodalom

Baranya, S., Józsa, J. (2004): „Investigation of flow around a groin with a 3D numerical model”. *Proc. II. Ph.D. CivilExpo. Budapest, Magyarország, 2004.01.29-2004.01.31.*

Baranya, S., Józsa, J. (2006): „Flow Analysis in River Danube by Field Measurement and 3D CFD turbulence modelling”. *Periodica Polytechnica, Civil Engineering, Budapest*

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 Environmental*

Dorottya, S. E. (2006): „A magyar belvízi árufuvarozás a Duna hajózhatóságának tükrében” *Diplomamunka, BGF, Külkereskedelmi Főiskolai Kar, Külgazdasági szak, Budapest*

EDUVIZIG (2011): „A Duna 2011 évi hajóút kitzúzési terve az 1+811-1+708 folyamkilométerek közötti szakaszon” Győr, letölthető formátum:

http://www.edukovizig.hu/files/download/kituzesi_terv_2011.pdf

Garcia, M. H., D. M. Admiraal, J. Rodriguez, and F. Lopez (2002): „Navigation-induced bed shear stresses: Laboratory measurements, data analysis, and application.” *Civil Engineering Studies, Hydraulic Engineering Series No. 56. University of Illinois at Urbana-Champaign.*

Hammack, E. A., David S. Smith, Richard L. S. (2008): Modeling Vessel-Generated Currents and Bed Shear Stresses” *Navigation System Research Program, Vicksburg, MS: U.S. Army Engineer Research and Development Center*

Kéri, B. (2011): „The effect of navigation on the flow in a river trained with groynes” *Master Thesis, TUDelft, Delft*

Maynord, S. T. (2000): „Physical forces near commercial tows” *ENV Report 19. Vicksburg, MS: U.S. Army Engineer Research and Development Center*

Shiereck, G. J. (2001): „Introduction to Bed, Bank and Shore Protection” *Delft*

SMS Development Team (2012): SMS Software Help Manual. Aquaveo, LLC

Tecplot. 360 (2012): User’s Manual, Tecplot Inc. Bellevue, WA

Verheij, H.J., C. Stolker and R. Groenveld (2008): „Inland Waterways (Ports, waterways and inland navigation)” *TU Delft, lecture notes CT 4330, Delft*

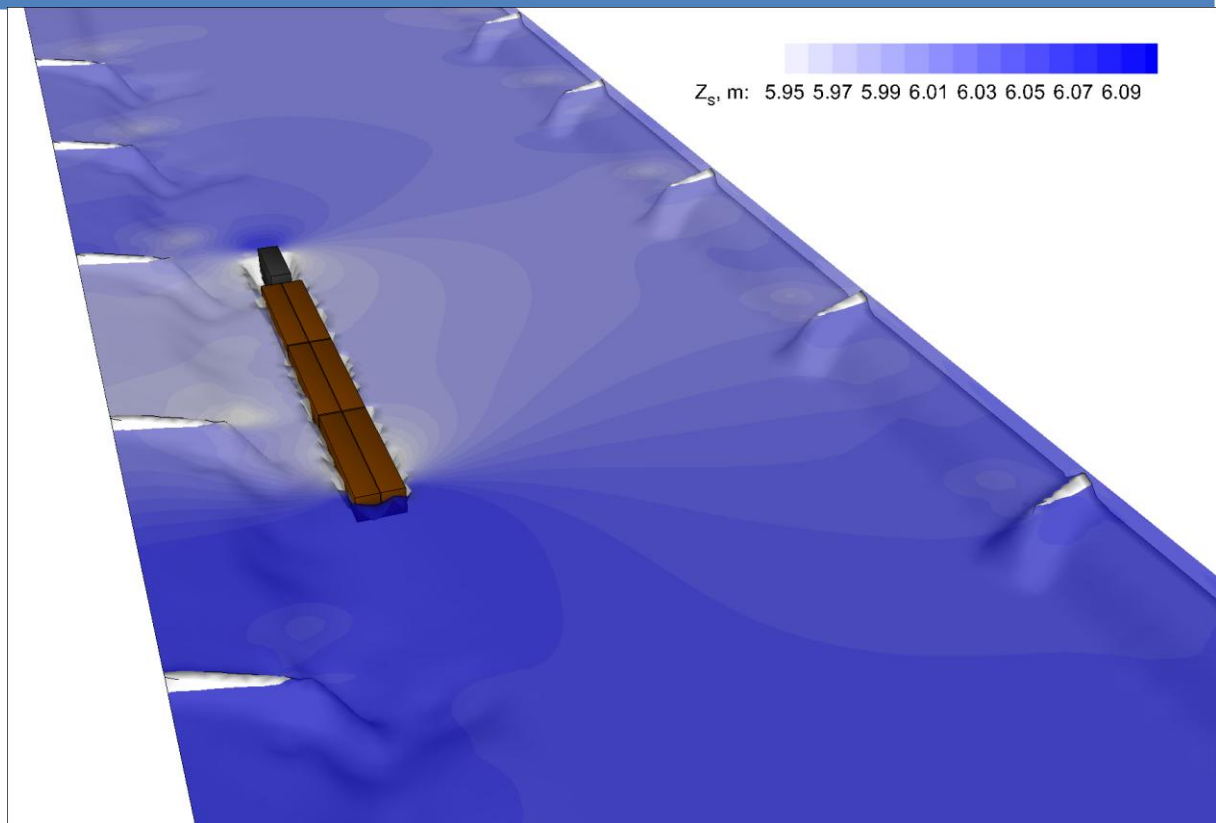
VITUKI (2007): „A Duna hajózhatóságának javításának tárgyú projektet megalapozó tanulmány” *Budapest, letölthető formátum:*

http://www.vituki.hu/files/dunahajozhatosag/new/Project%20Final%20Report%20in%20Hungarian/Duna_hajozhatosag_vegleges.pdf

Yunus, Cengel (2007): „Heat and Mass Transfer” *New York: Mc Graw Hill*

Tudományos Diákköri Konferencia 2012.

Folyami közlekedés hatása szabályozott folyószakaszok áramlási viszonyaira Függelék



Szabó-Mészáros Marcell

Konzulens: Dr. Baranya Sándor

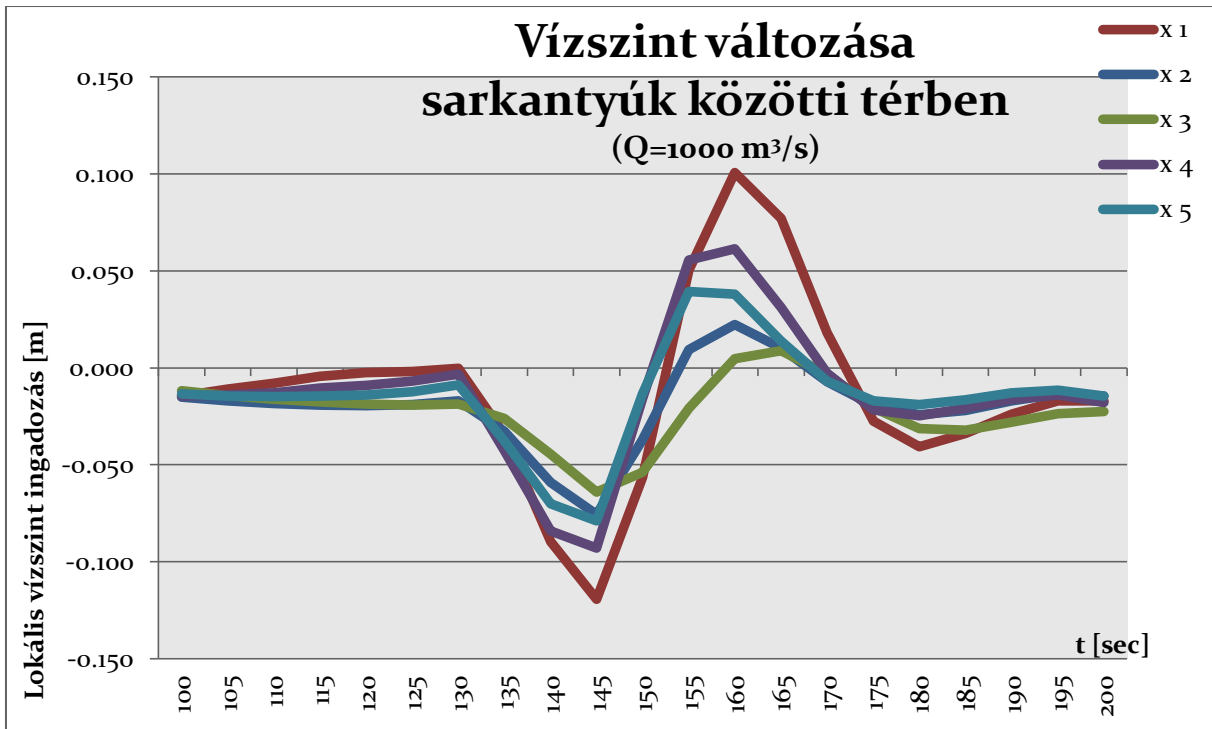
BME Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszék

Tartalomjegyzék

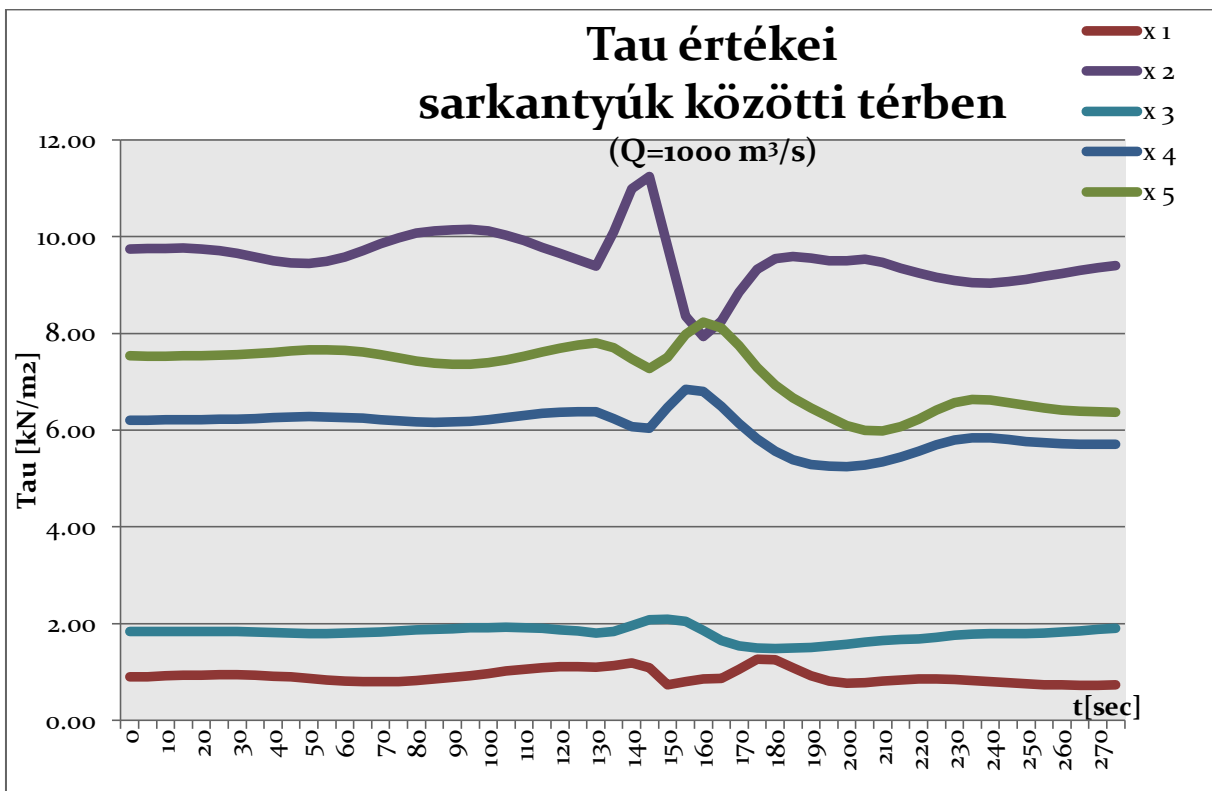
1. Vízhhozam $Q=1000\text{m}^3/\text{s}$ futtatások	3
1. 1. Merülés 1.92m + Sebesség 2.60m/s.....	3
1. 2. Merülés 2.20m + Sebesség 2.60m/s	5
1. 3. Merülés 2.50m + Sebesség 2.60m/s	7
1. 4. Merülés 2.50m + Sebesség 2.10m/s.....	9
1. 5. Merülés 2.50m + Sebesség 1.60m/s	11
2. Vízhhozam $Q=1800\text{m}^3/\text{s}$ futtatások	13
2. 1. Merülés 1.92m + Sebesség 2.60m/s.....	13
2. 2. Merülés 2.20m + Sebesség 2.60m/s.....	15
2. 3. Merülés 2.50m + Sebesség 2.60m/s.....	17
2. 4. Merülés 2.50m + Sebesség 2.10m/s	19
2. 5. Merülés 2.50m + Sebesség 1.60m/s	21
3. Vízhhozam $Q=3200\text{m}^3/\text{s}$ futtatások	23
3. 1. Merülés 1.92m + Sebesség 2.60m/s.....	23
3. 2. Merülés 2.20m + Sebesség 2.60m/s.....	25
3. 3. Merülés 2.50m + Sebesség 2.60m/s.....	27
3. 4. Merülés 2.50m + Sebesség 2.10m/s	29
3. 5. Merülés 2.50m + Sebesség 1.60m/s	31
4. Eltérő hajóforgalom	33
4.1. Hajó hegymenetben, Merülés 2.50m + Sebesség 2.40m/s.....	33
4.2. Tolt kötelék hegymenetben (Sebesség 2.40m/s) és tolt kötelék völgymenetben (Sebesség 2.60m/s) egy időben, Merülés 2.50m.....	35
4.2. Két darab, egymást követő tolt kötelék völgymenetben, Merülés 2.50m + Sebesség 2.60m/s.....	37
5. Eltérő futtatások eredményeinek ábrázolása x_2 és y_2 pontokban.....	39
5.1. $Q=1000\text{m}^3/\text{s}$ vízhozam mellett	39
5.2. $Q=1800\text{m}^3/\text{s}$ vízhozam mellett	41
5.3. $Q=3200\text{m}^3/\text{s}$ vízhozam mellett	43
6. Maximális τ és vízszint ingadozás értékek eltérő vízhozamok esetén x_2 és y_2 pontokban	45
6.1. Merülés 1.92m + Sebesség 2.60m/s.....	45
6.2. Merülés 2.20m + Sebesség 2.60m/s	47
6.3. Merülés 2.50m + Sebesség 2.60m/s.....	49
6.4. Merülés 2.50m + Sebesség 2.10m/s	51
6.5. Merülés 2.50m + Sebesség 1.60m/s	53

1. Vízhözam $Q=1000\text{m}^3/\text{s}$ futtatások

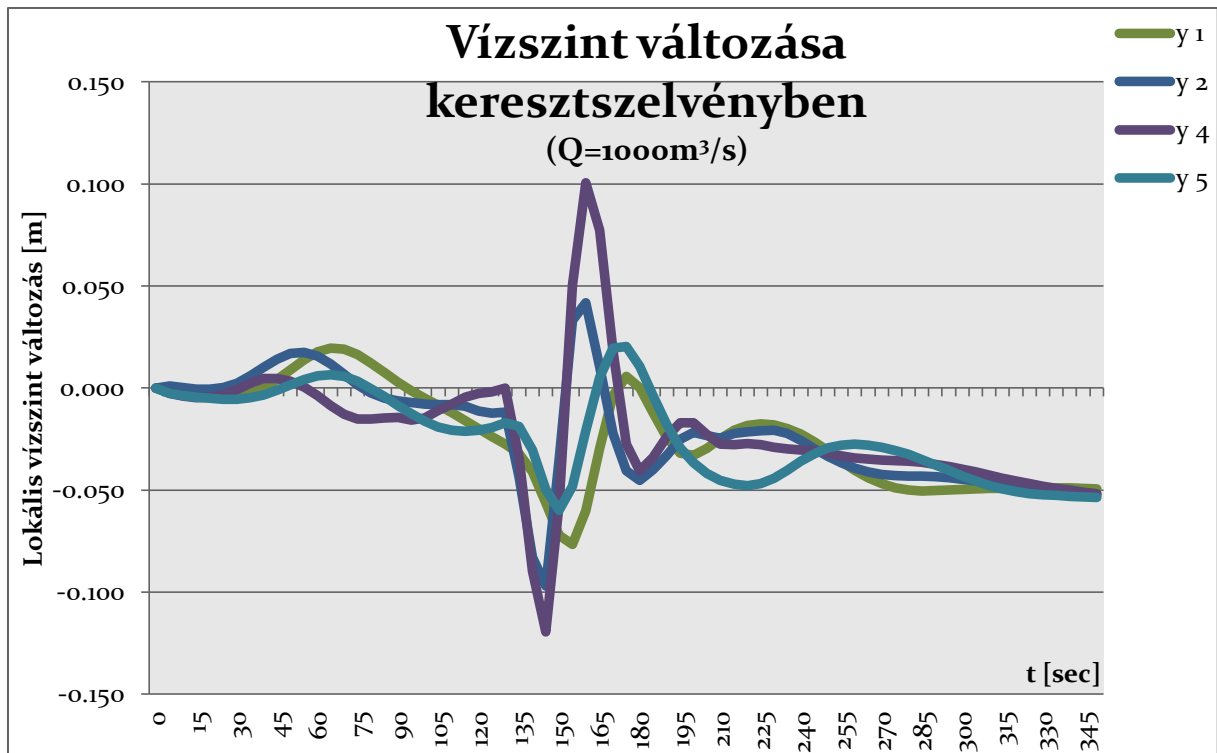
1. 1. Merülés 1.92m + Sebesség $2.60\text{m}/\text{s}$



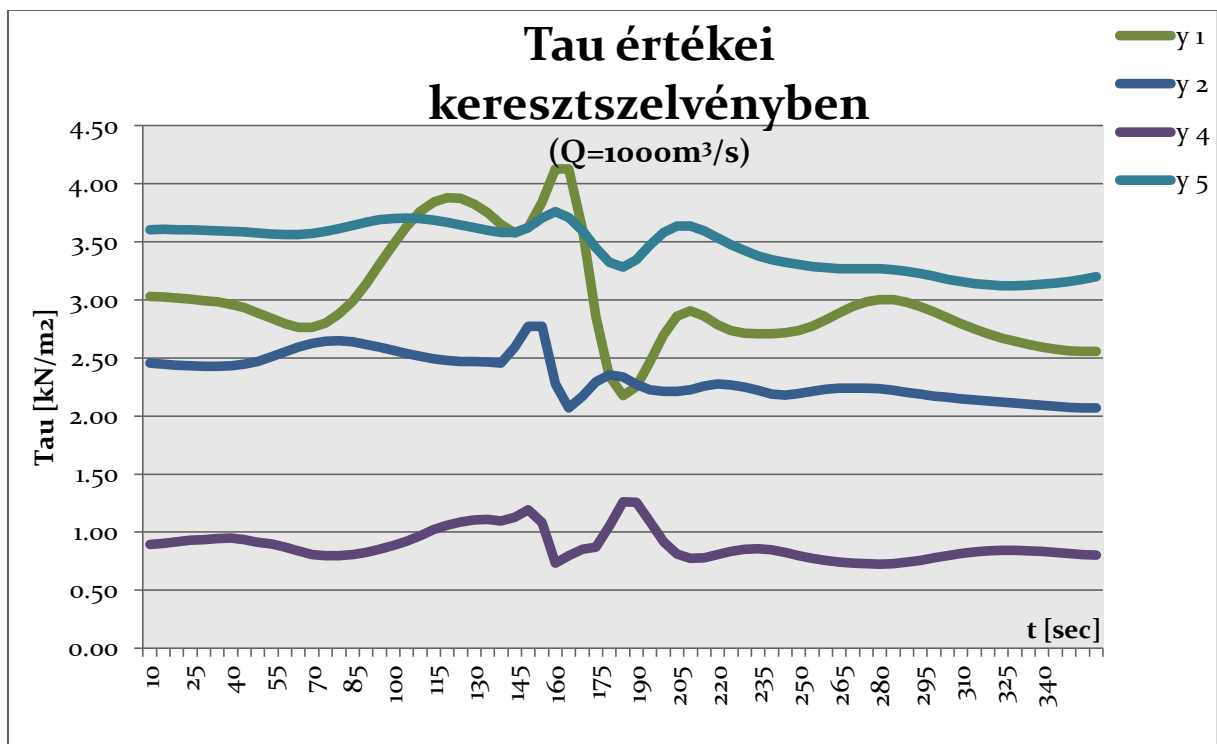
1. ábra Vízszint változás sarkantyúk között, $Drft=1.92\text{m}$; $v=2.60\text{m}/\text{s}$



2. ábra Tau értékei sarkantyúk között, $Drft=1.92\text{m}$; $v=2.60\text{m}/\text{s}$

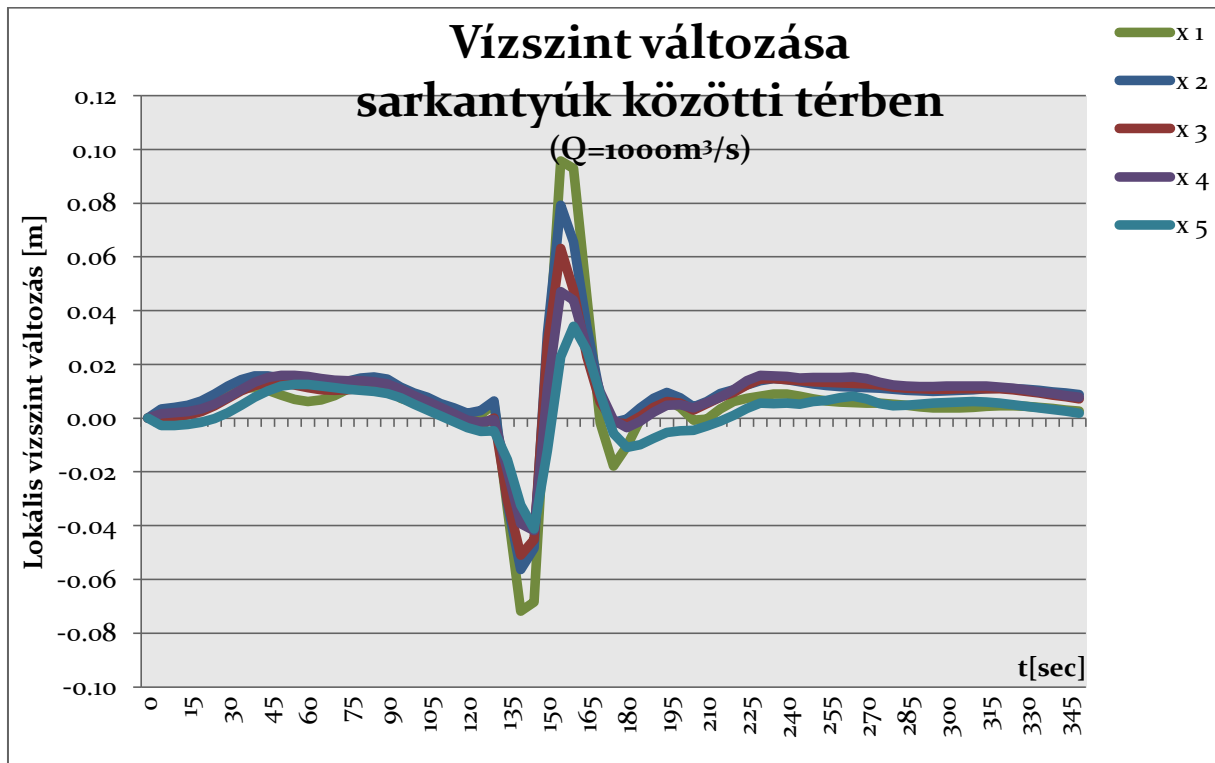


3. ábra Vízszint változás keresztmetszében, $Drft=1.92\text{m}$; $v=2.60\text{m/s}$

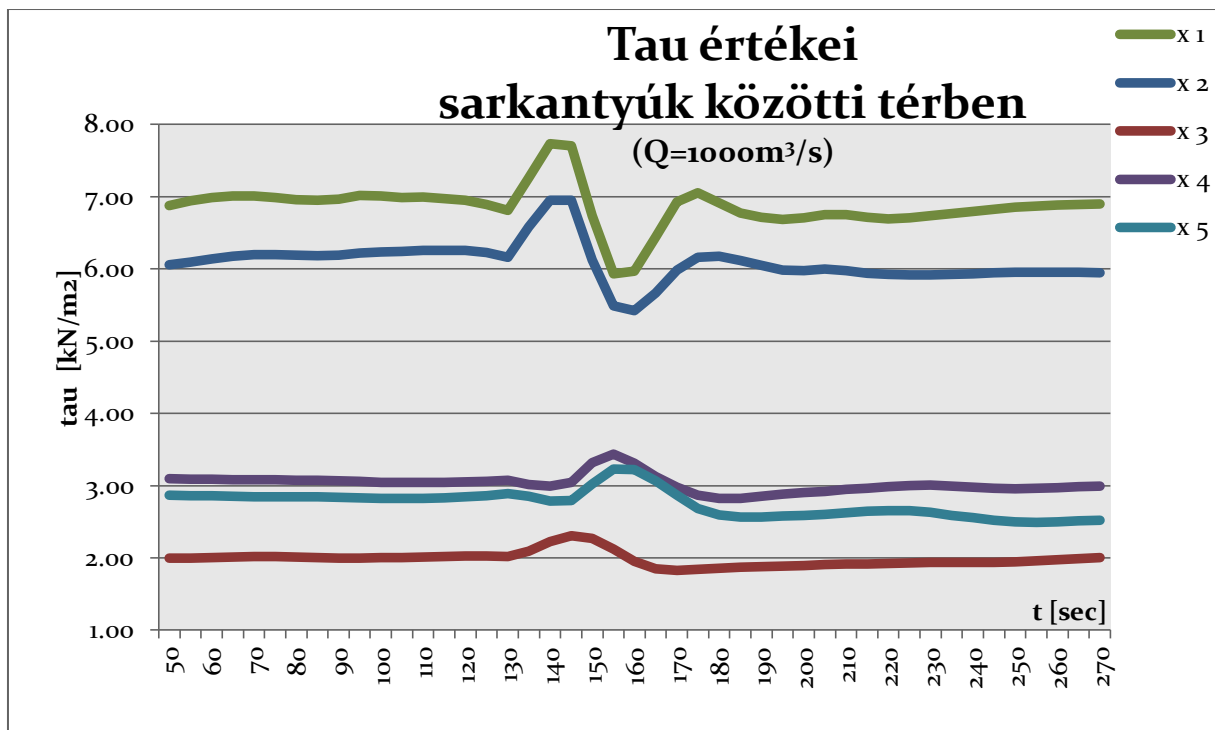


4. ábra Tau értékei keresztmetszében, $Drft=1.92\text{m}$; $v=2.60\text{m/s}$

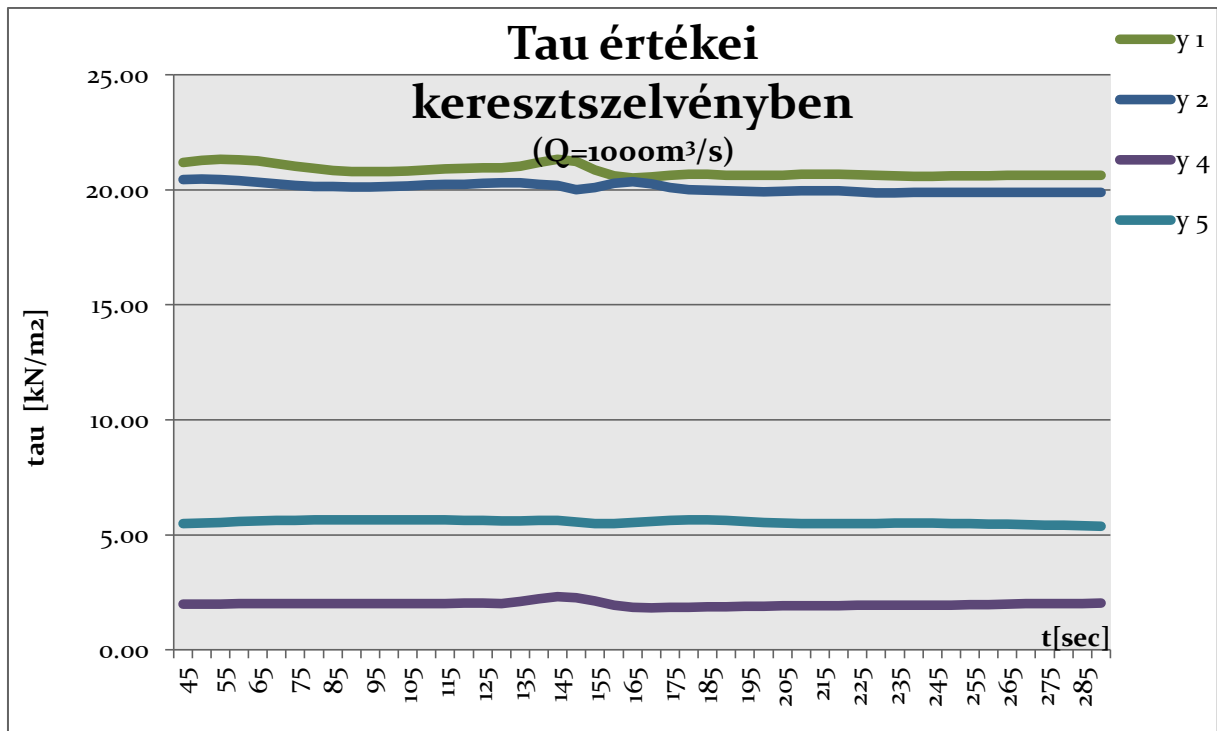
1. 2. Merülés 2.20m + Sebesség 2.60m/s



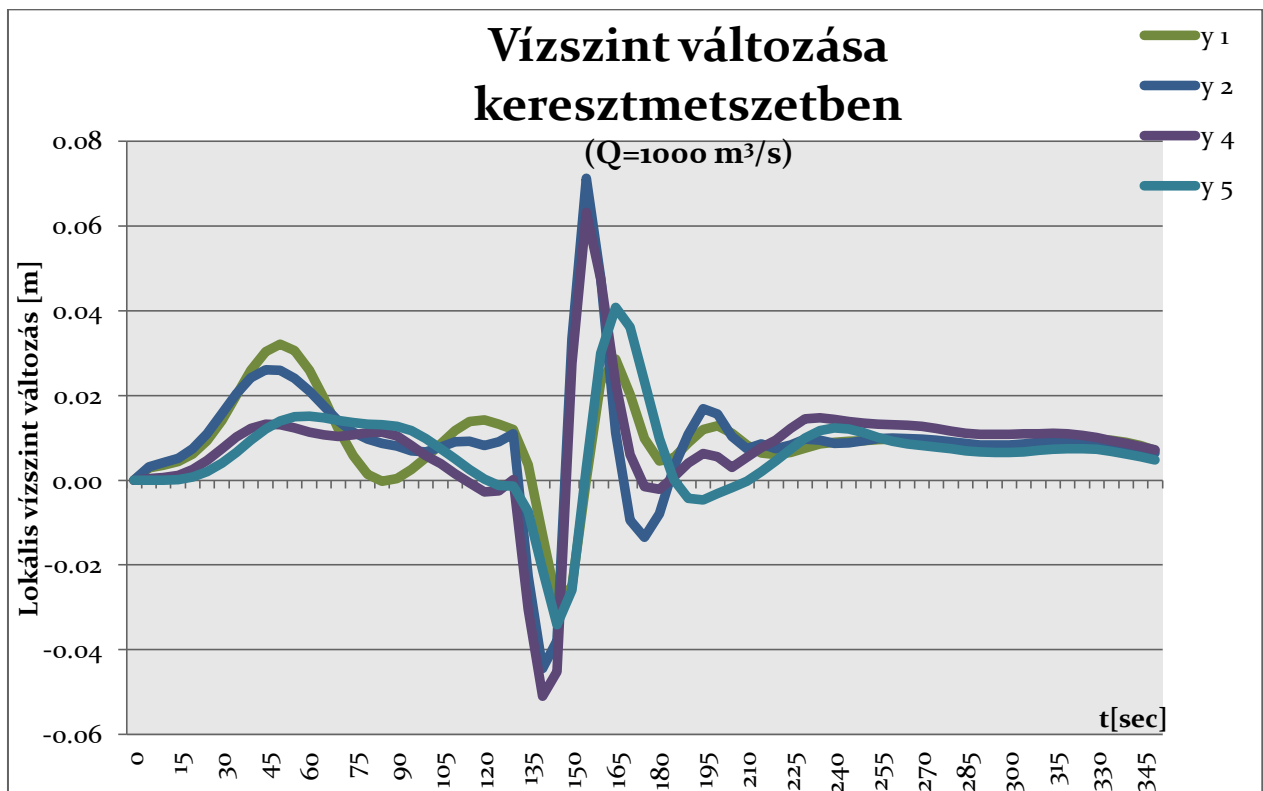
5. ábra Vízszint változás sarkantyúk között, $Drft=2.20\text{m}$; $v=2.60\text{m/s}$



6. ábra Tau értékei sarkantyúk között, $Drft=2.20\text{m}$; $v=2.60\text{m/s}$

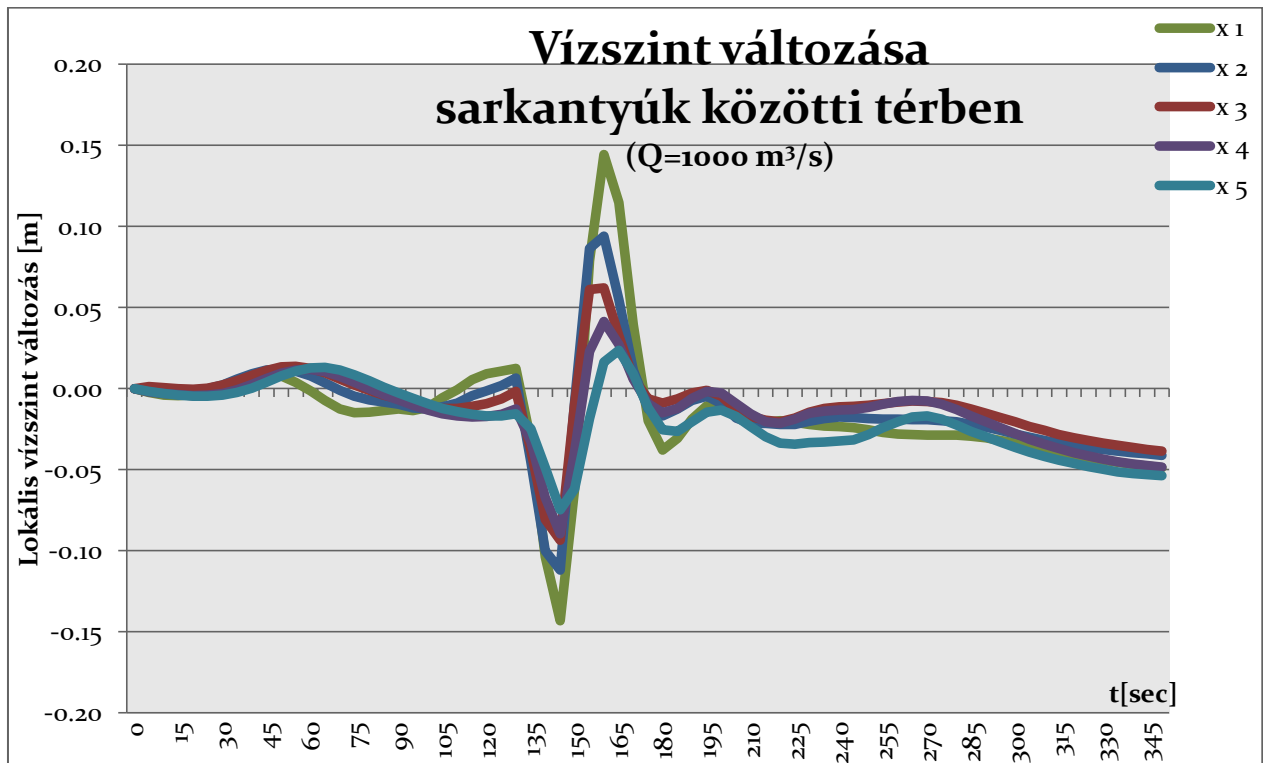


7. ábra Tau értékei keresztmetszében, Drft=2.20m ; v=2.60m/s

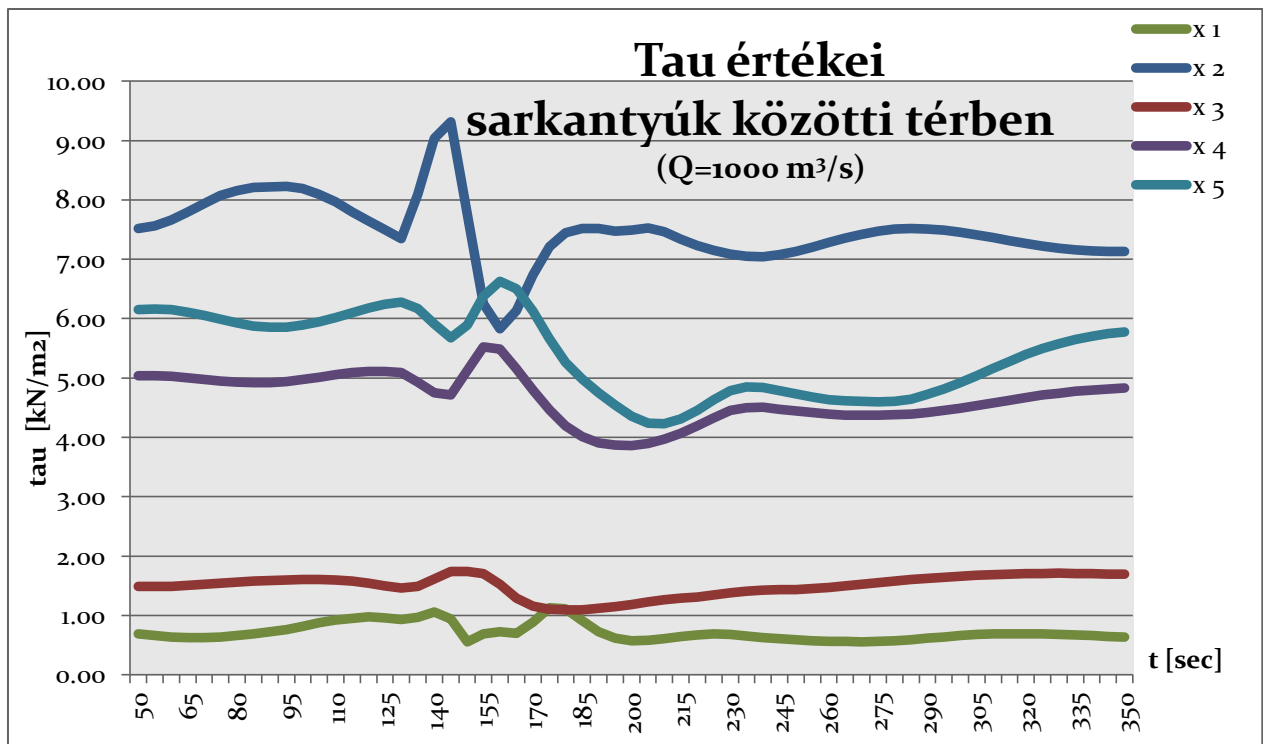


8. ábra Vízszint változás keresztmetszében, Drft=2.20m ; v=2.60m/s

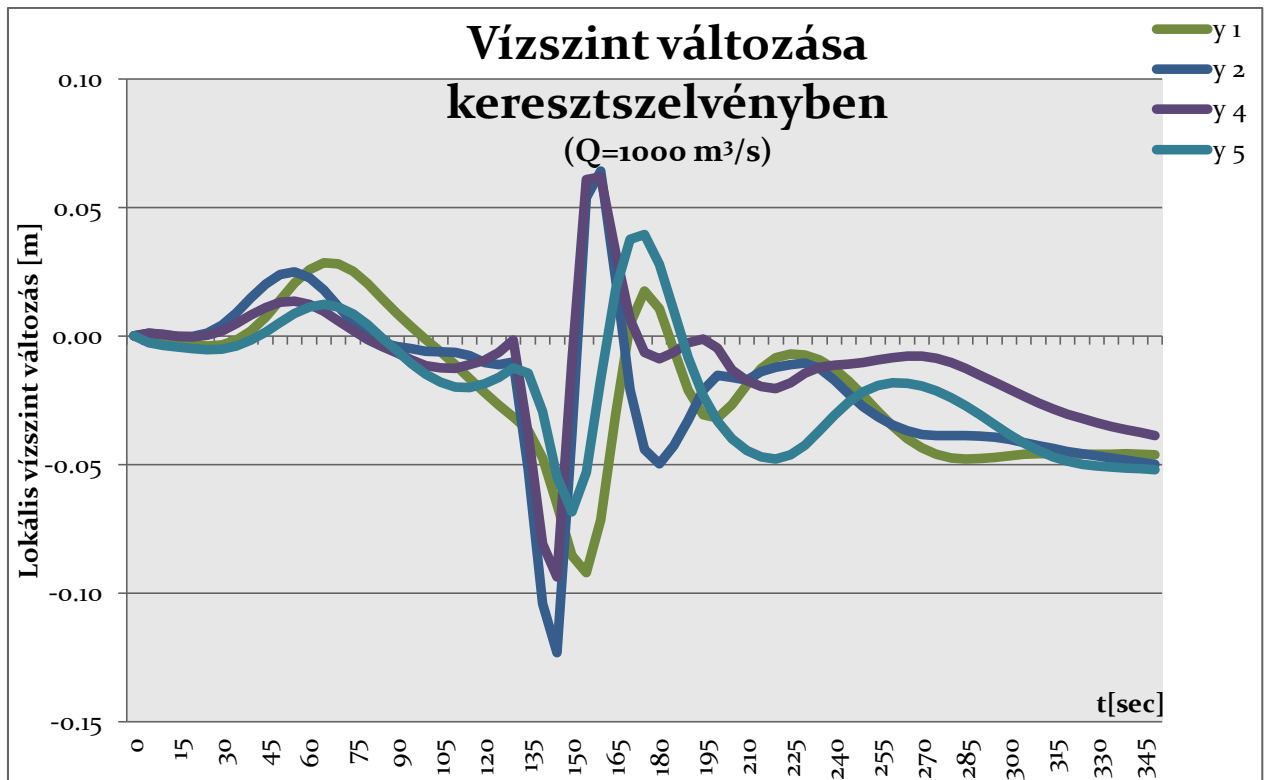
1. 3. Merülés 2.50m + Sebesség 2.60m/s



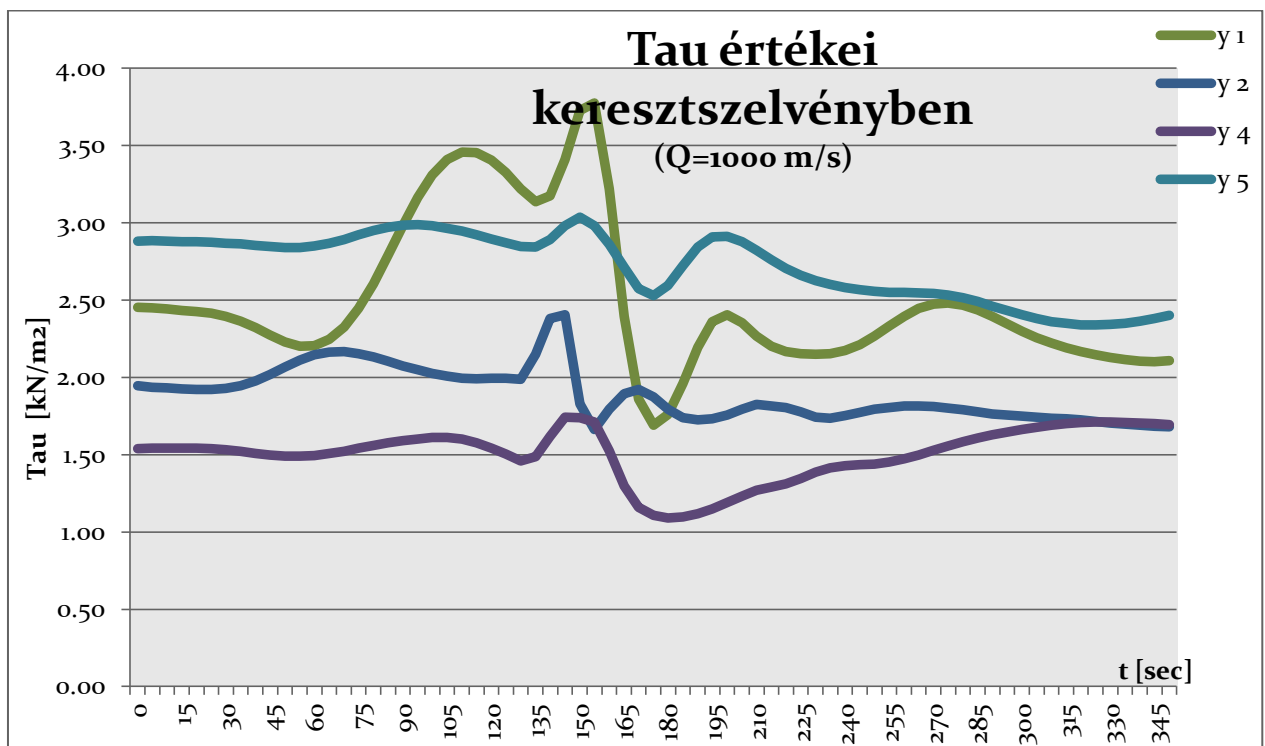
9. ábra Vízszint változás sarkantyúk között, $Drft=2.50\text{m}$; $v=2.60\text{m/s}$



10. ábra Tau értékei sarkantyúk között, $Drft=2.50\text{m}$; $v=2.60\text{m/s}$

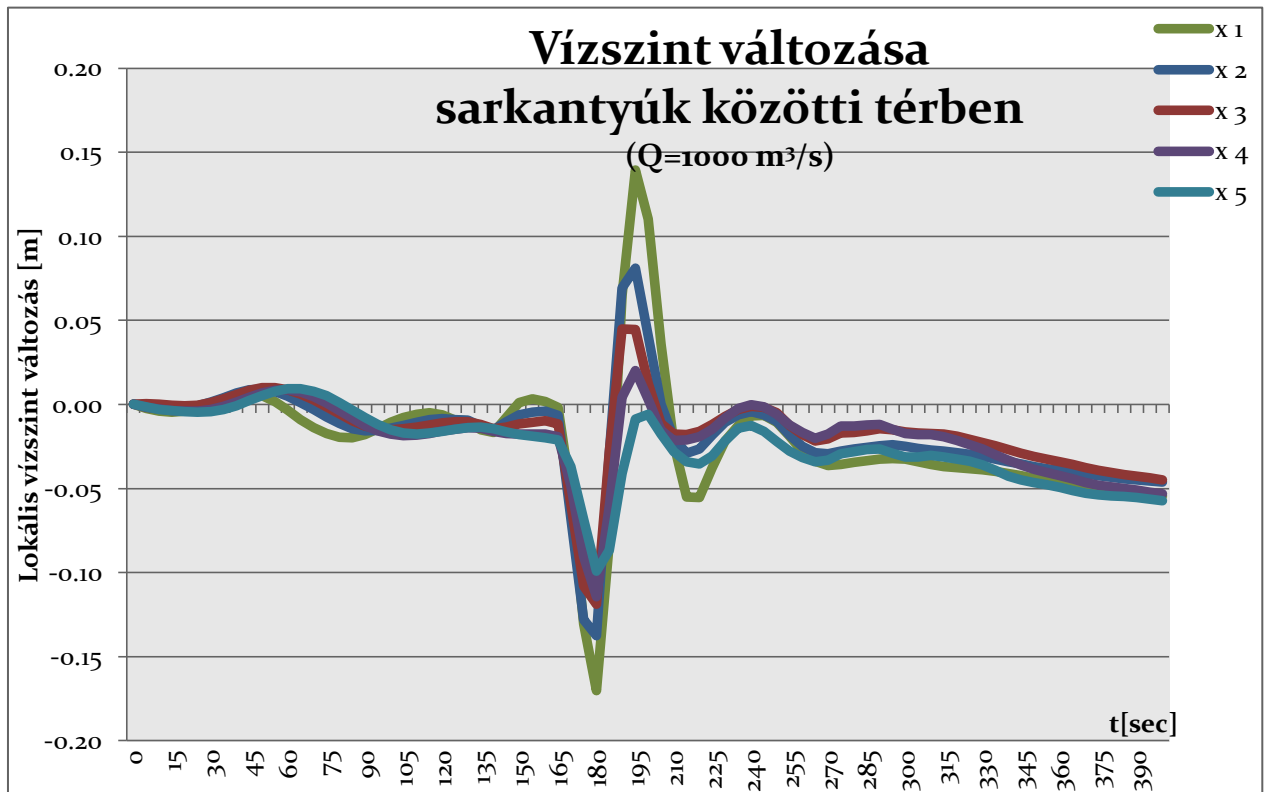


11. ábra Vízszint változás keresztmetszvényben, $Dr_{ft}=2.50\text{m}$; $v=2.60\text{m/s}$

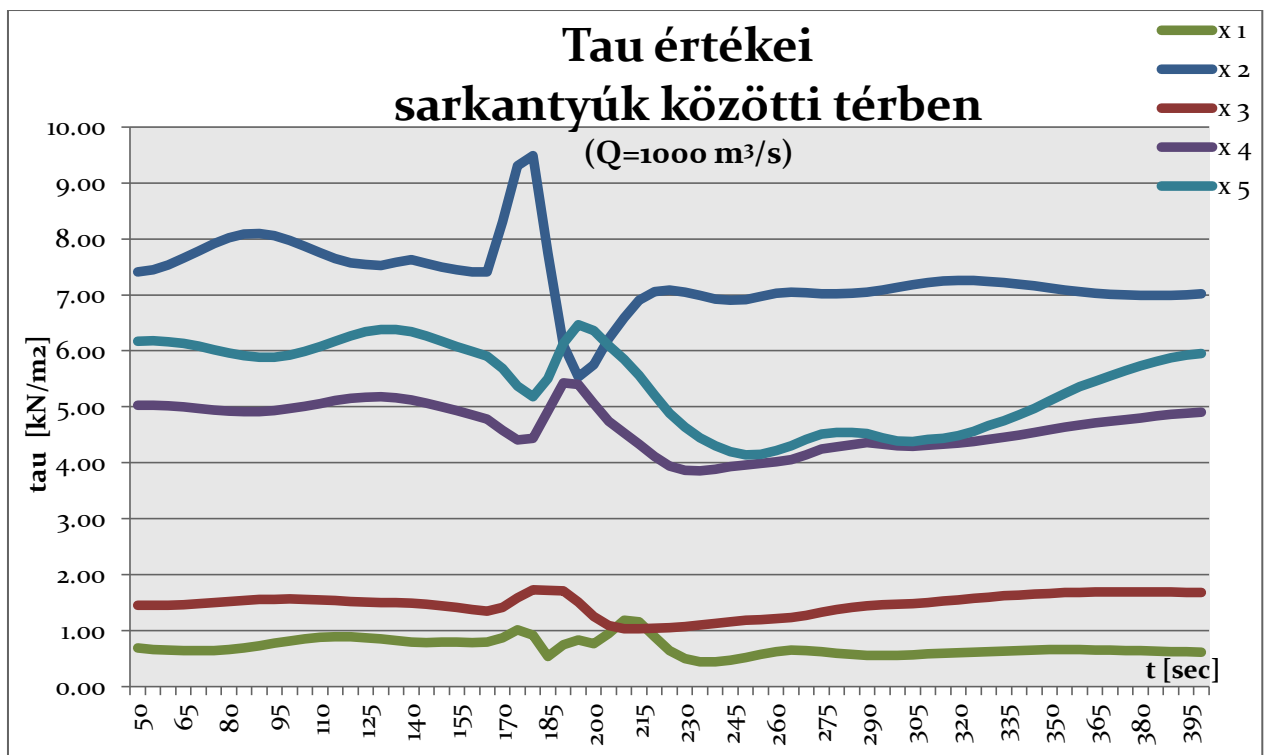


12. ábra Tau értékei keresztmetszvényben, $Dr_{ft}=2.50\text{m}$; $v=2.60\text{m/s}$

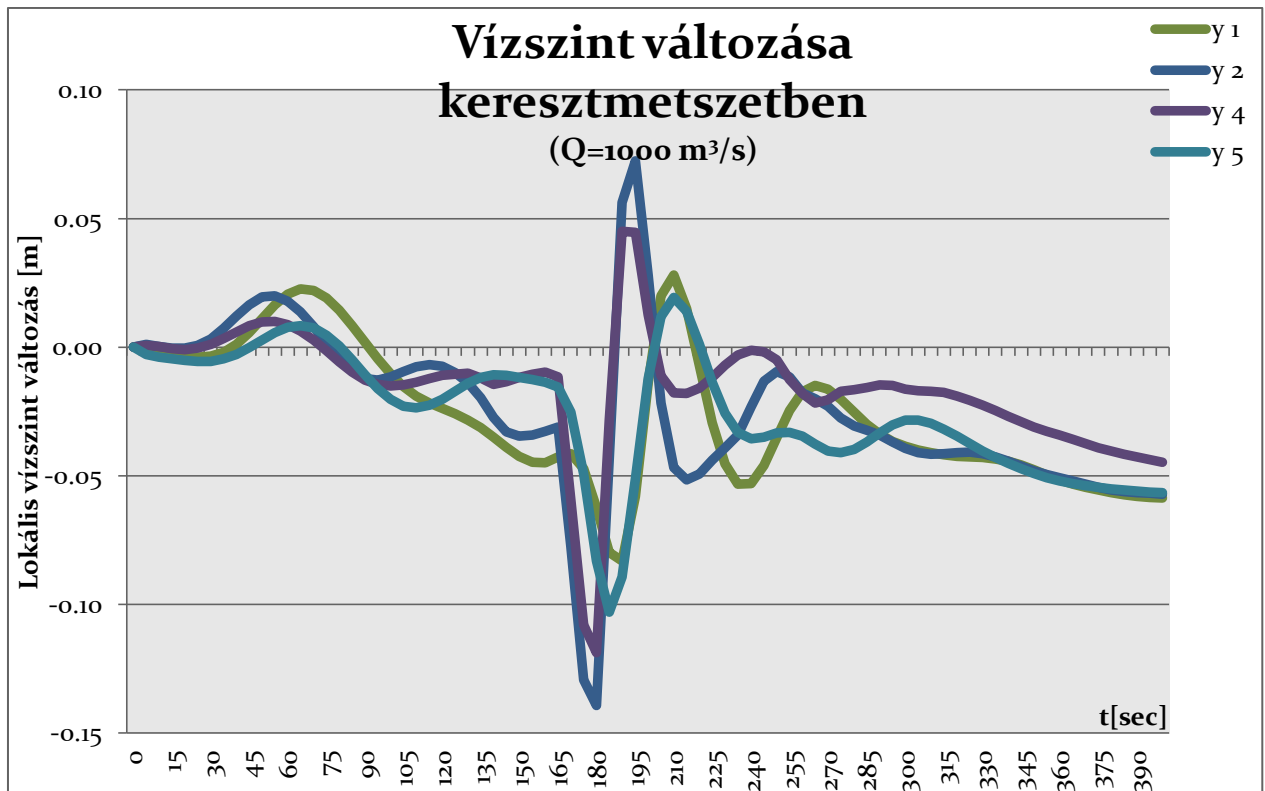
1. 4. Merülés 2.50m + Sebesség 2.10m/s



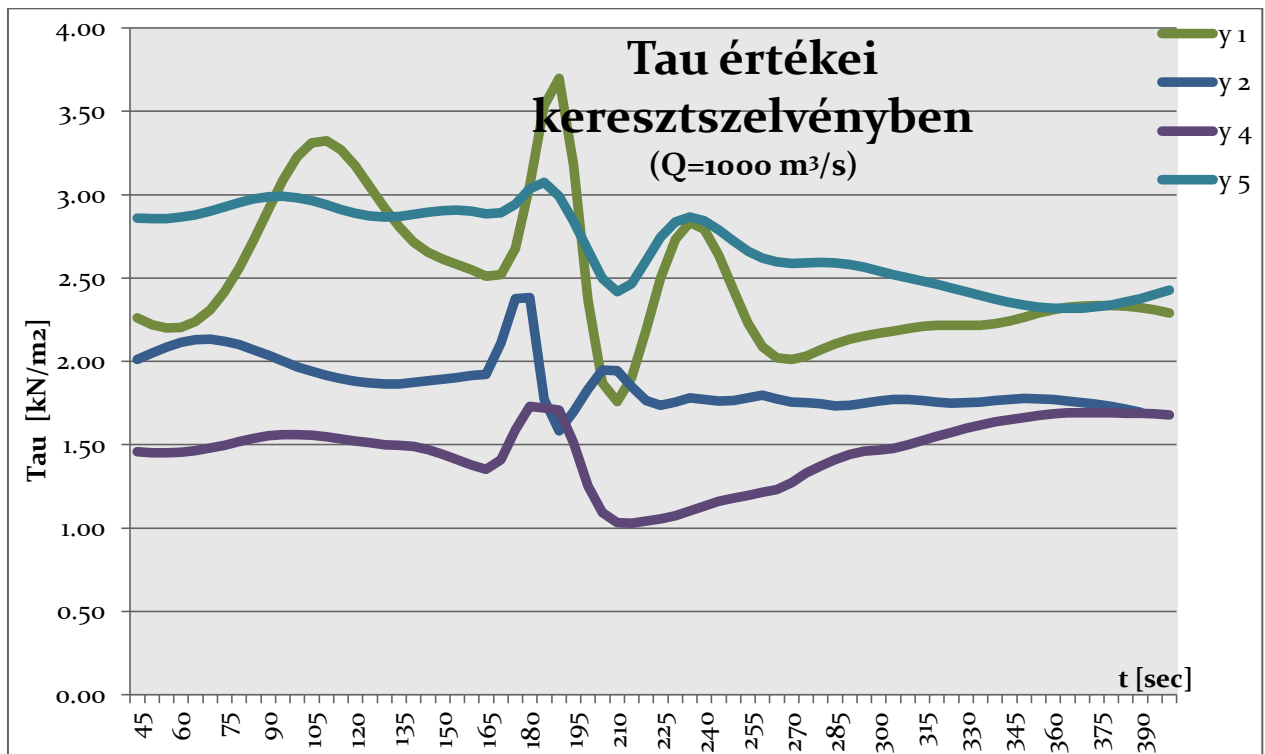
13. ábra Vízszint változás sarkantyúk között, $Drft=2.50\text{m}$; $v=2.10\text{m/s}$



14. ábra Tau értékei sarkantyúk között, $Drft=2.50\text{m}$; $v=2.10\text{m/s}$

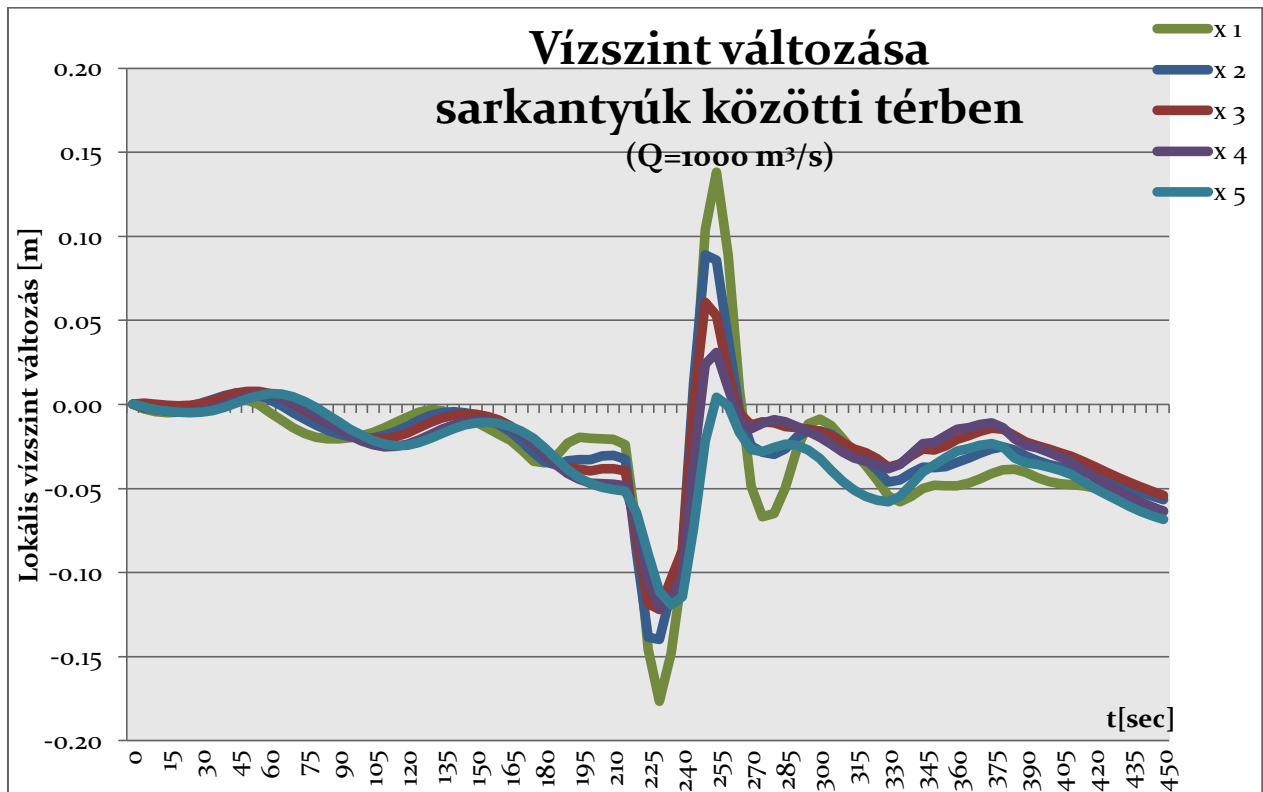


15. ábra Vízszint változás keresztmetszében, $Drft=2.50\text{m}$; $v=2.10\text{m/s}$

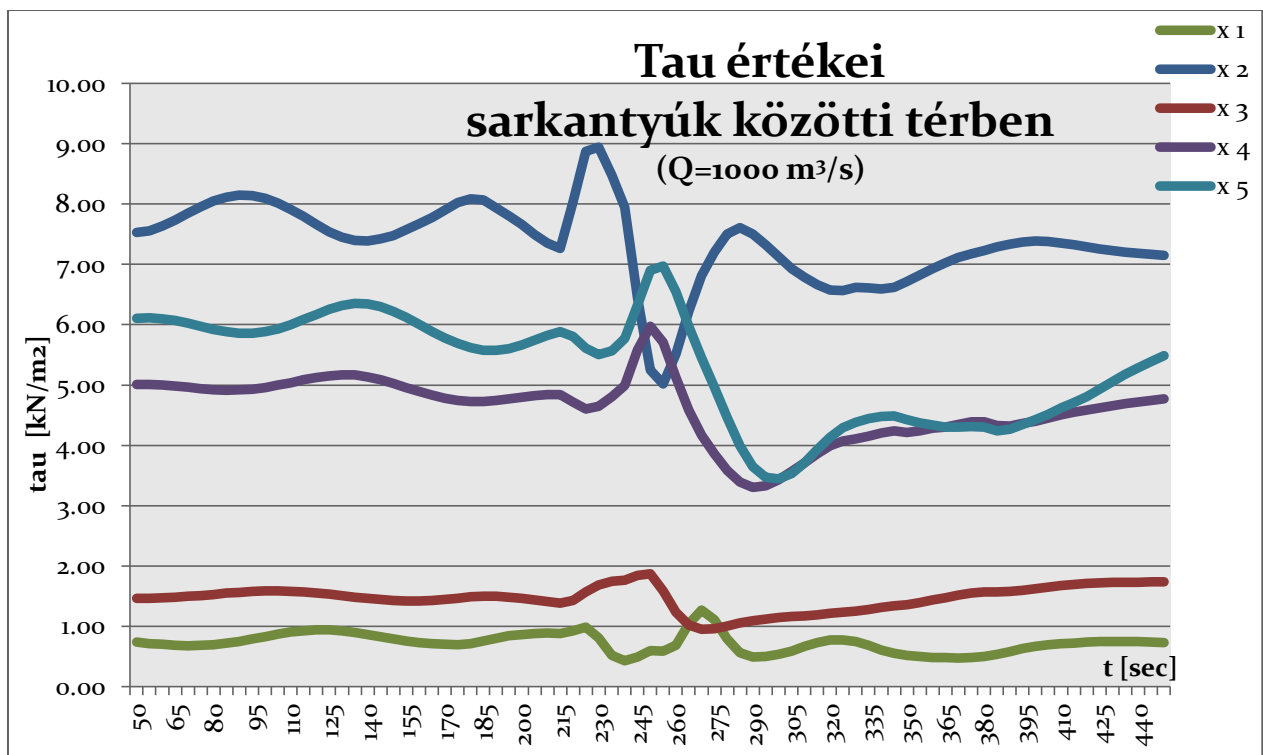


16. ábra Tau értékei keresztmetszében, $Drft=2.50\text{m}$; $v=2.10\text{m/s}$

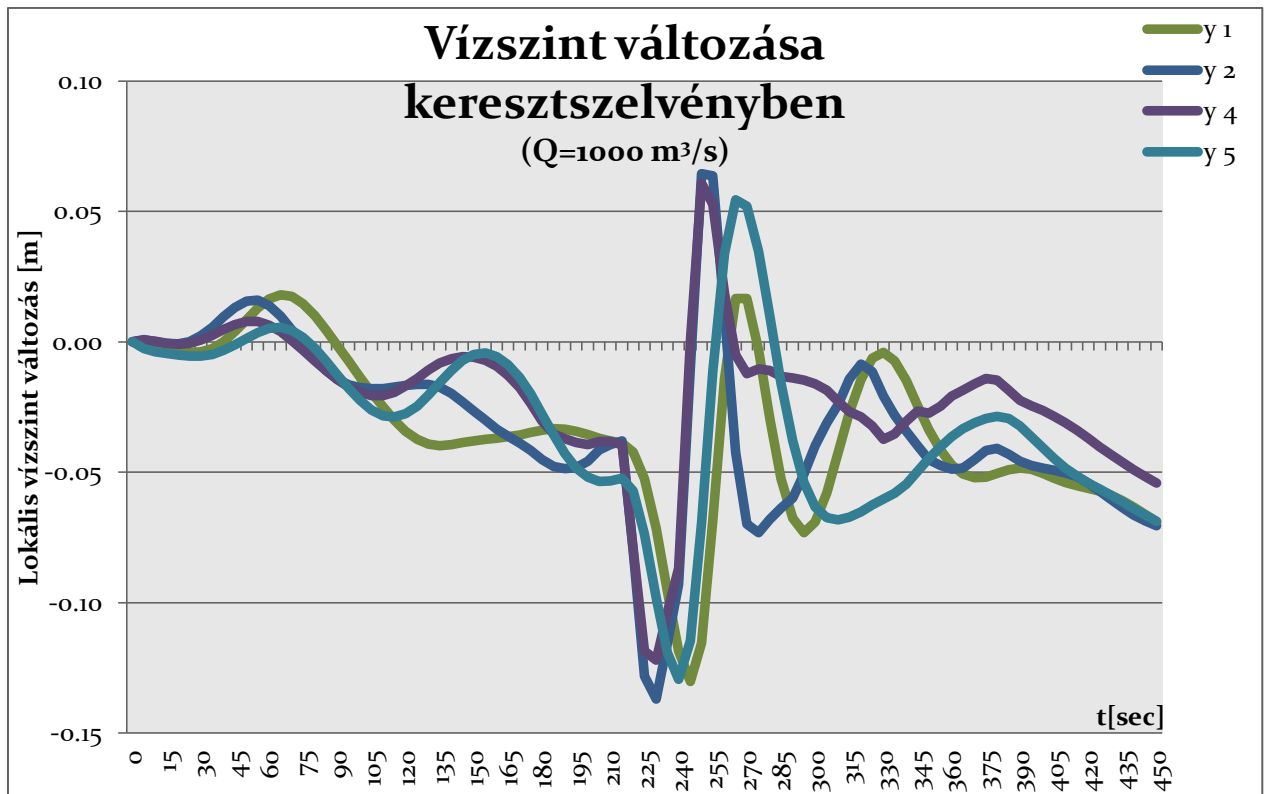
1. 5. Merülés 2.50m + Sebesség 1.60m/s



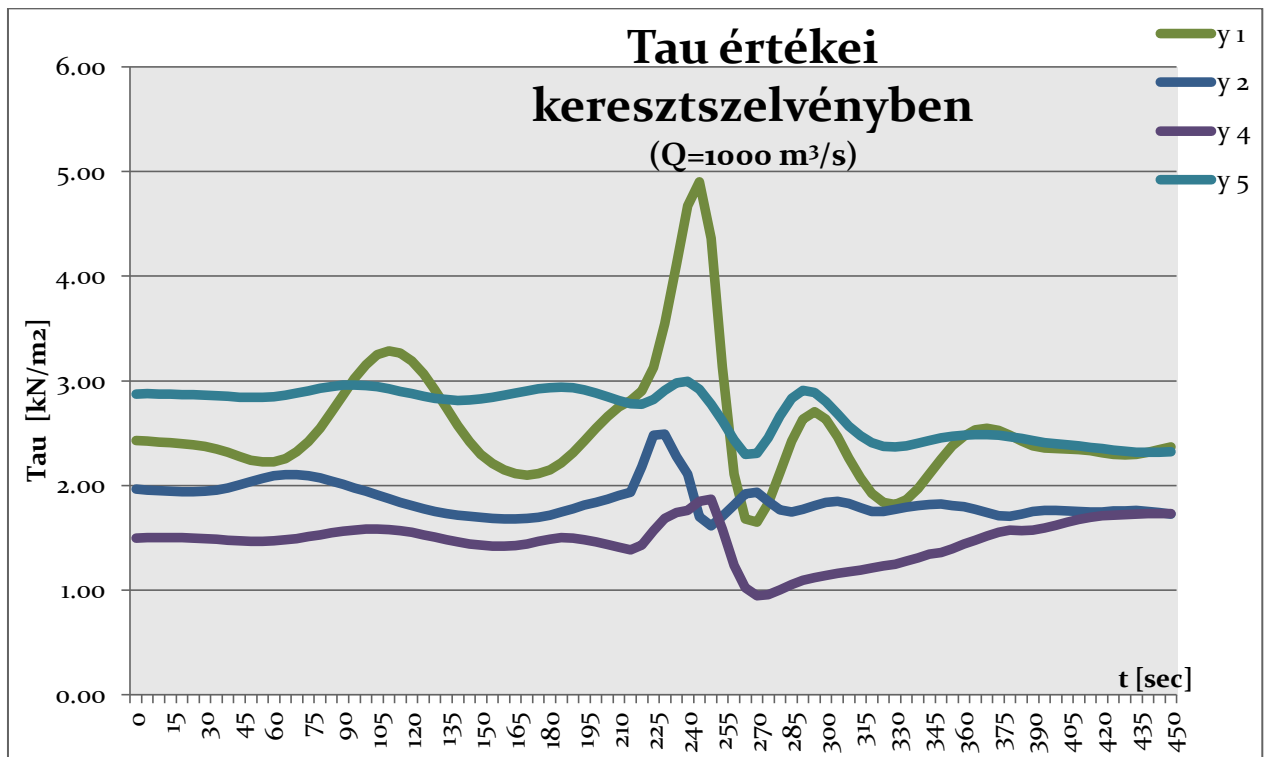
17. ábra Vízszint változás sarkantyúk között, $Drft=2.50\text{m}$; $v=1.60\text{m/s}$



18. ábra Tau értékei sarkantyúk között, $Drft=2.50\text{m}$; $v=1.60\text{m/s}$



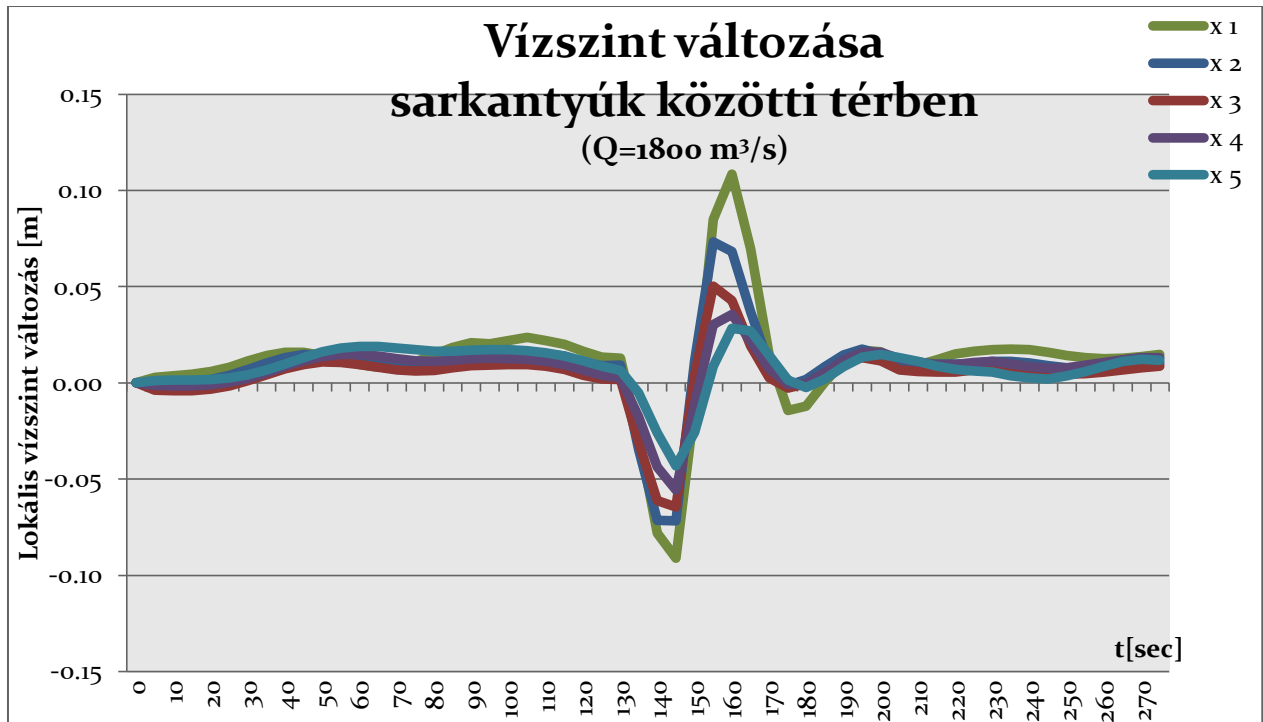
19. ábra Vízszint változás keresztszelvényben, $Dr_{ft}=2.50\text{m}$; $v=1.60\text{m/s}$



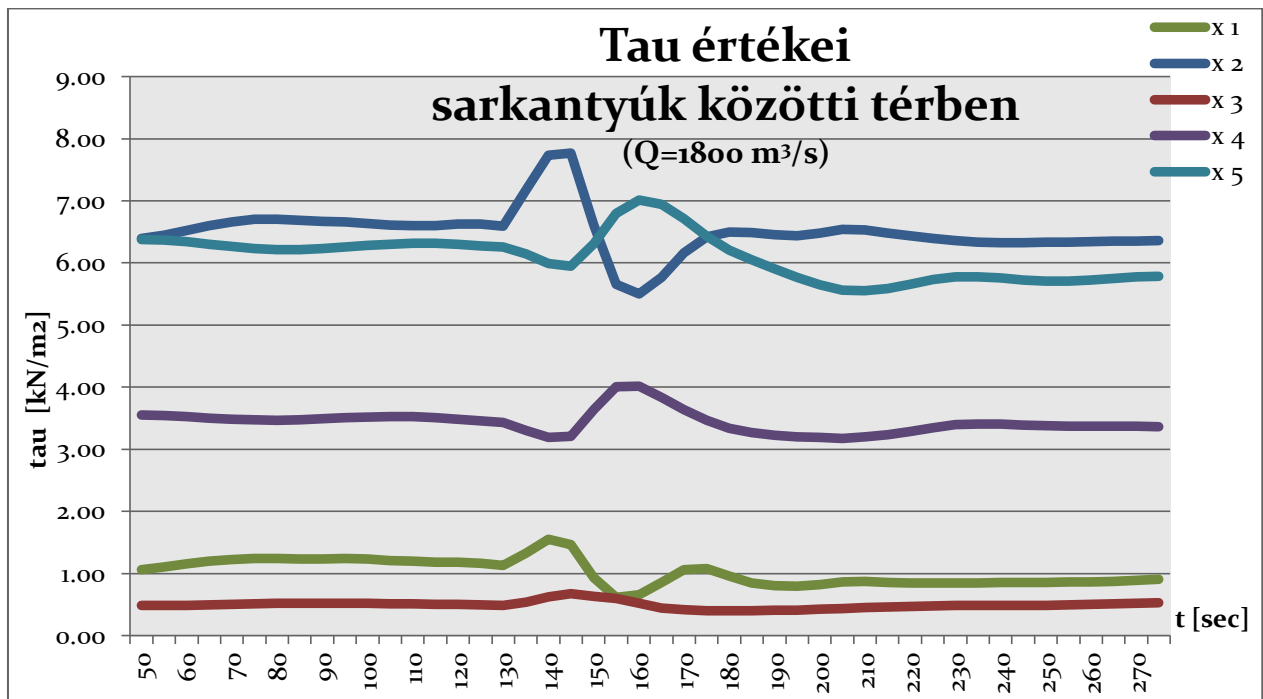
20. ábra Tau értékei keresztszelvényben, $Dr_{ft}=2.50\text{m}$; $v=1.60\text{m/s}$

2. Vízhozam $Q=1800\text{m}^3/\text{s}$ futtatások

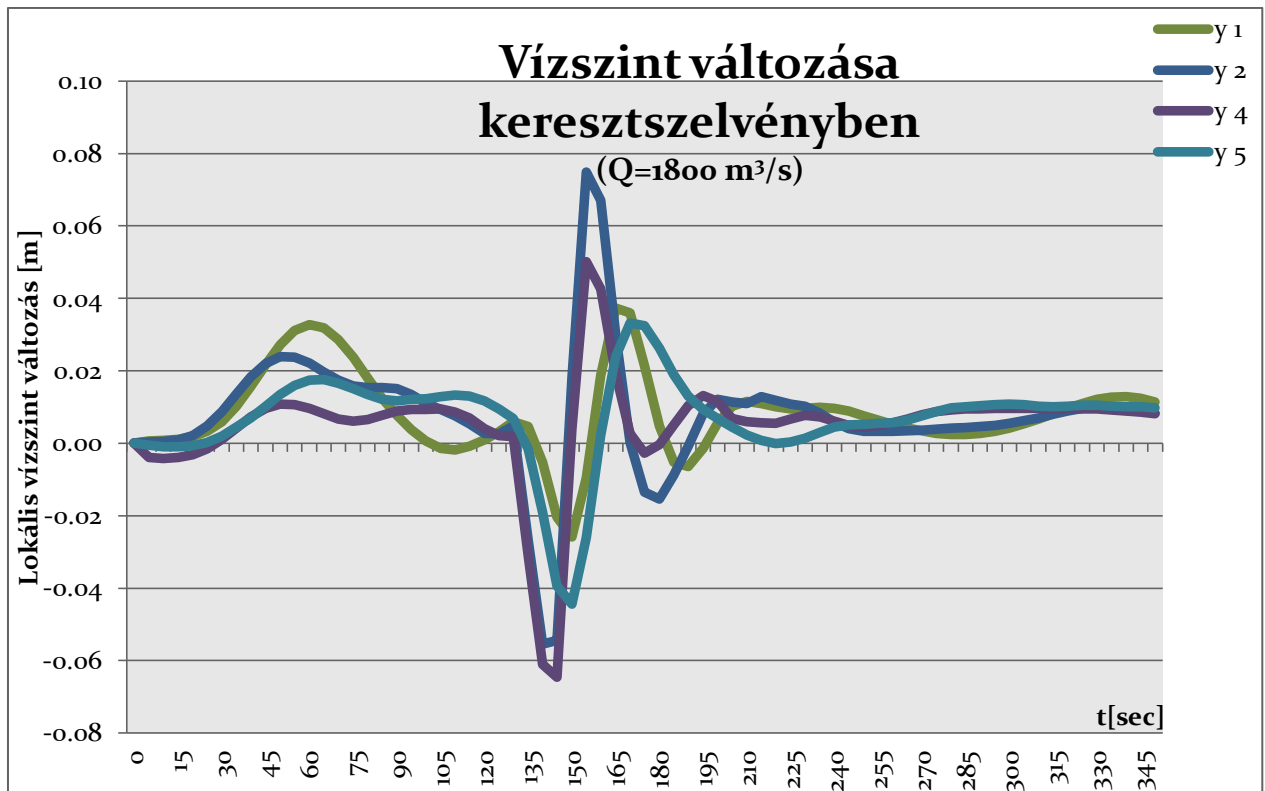
2. 1. Merülés 1.92m + Sebesség 2.60m/s



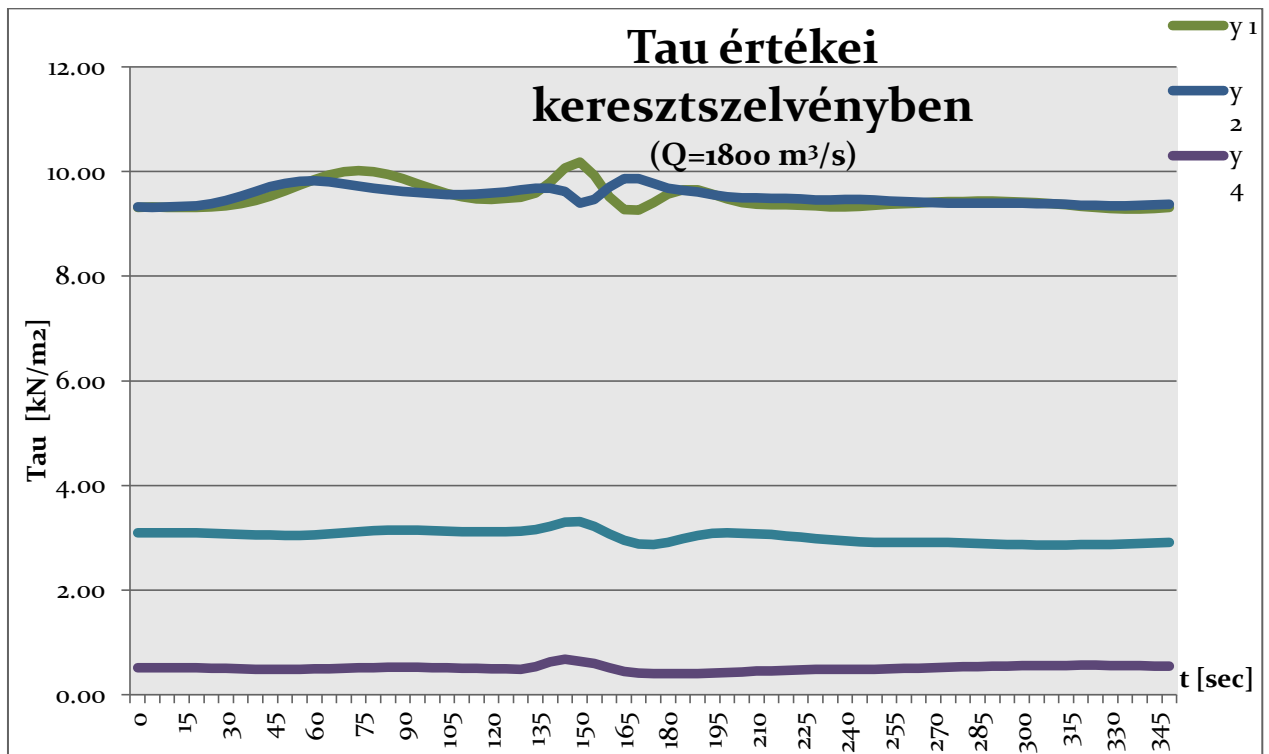
21. ábra Vízszint változás sarkantyúk között, $Dr_{ft}=1.92\text{m}$; $v=2.60\text{m/s}$



22. ábra Tau értékei sarkantyúk között, $Dr_{ft}=1.92\text{m}$; $v=2.60\text{m/s}$

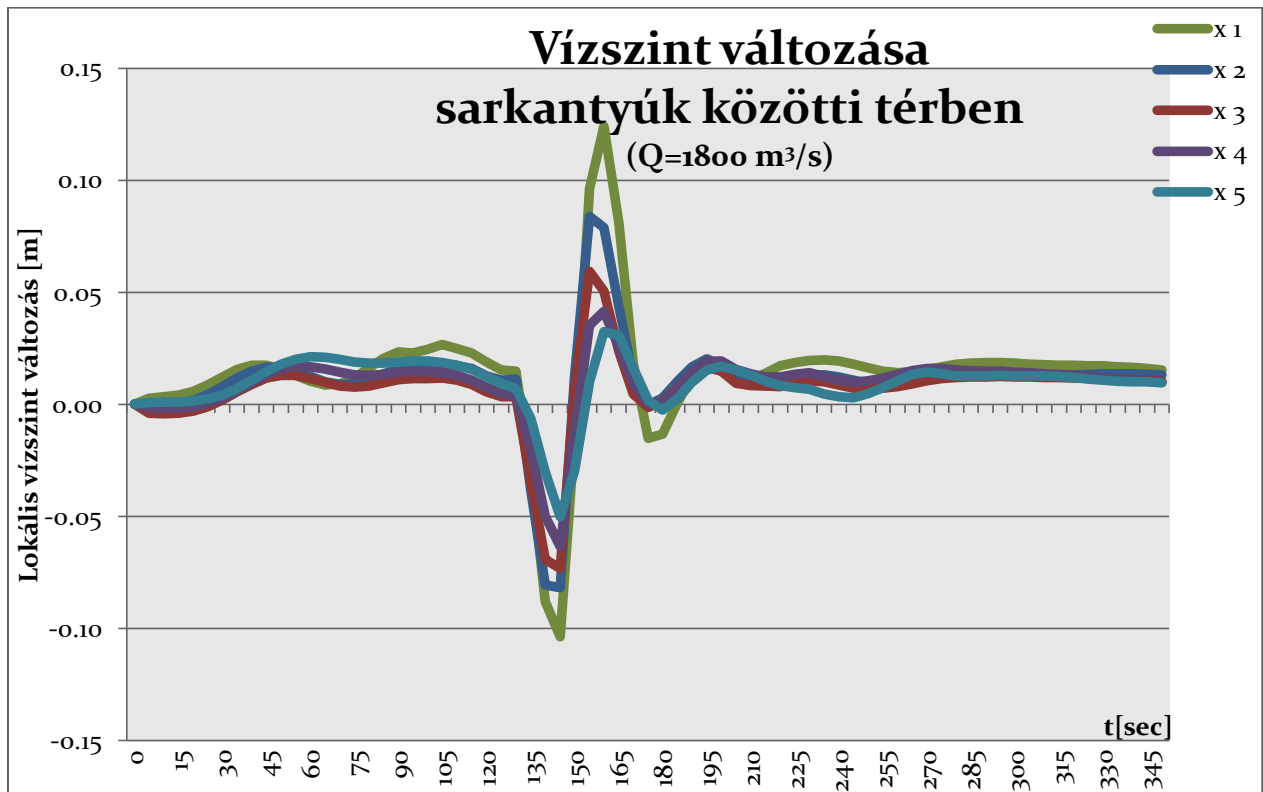


23. ábra Vízszint változás keresztmetszvényben, $Dr_{ft}=1.92m$; $v=2.60m/s$

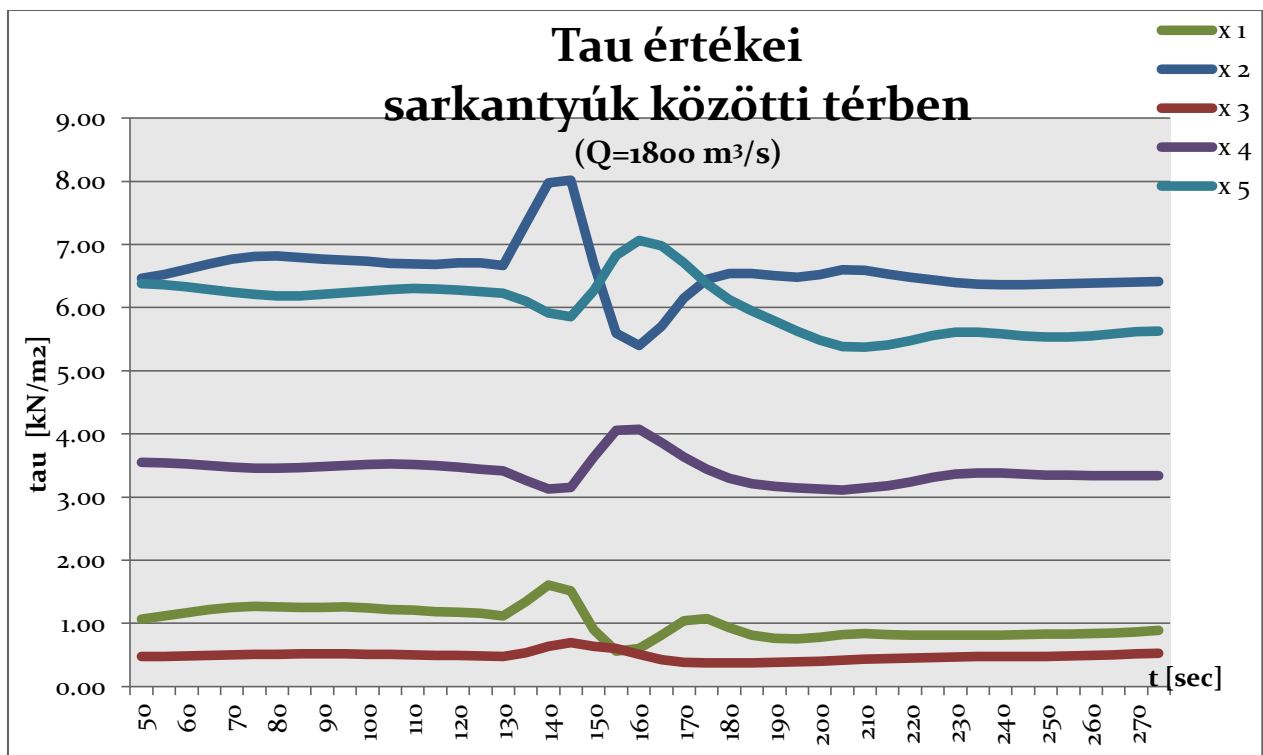


24. ábra Tau értékei keresztmetszvényben, $Dr_{ft}=1.92m$; $v=2.60m/s$

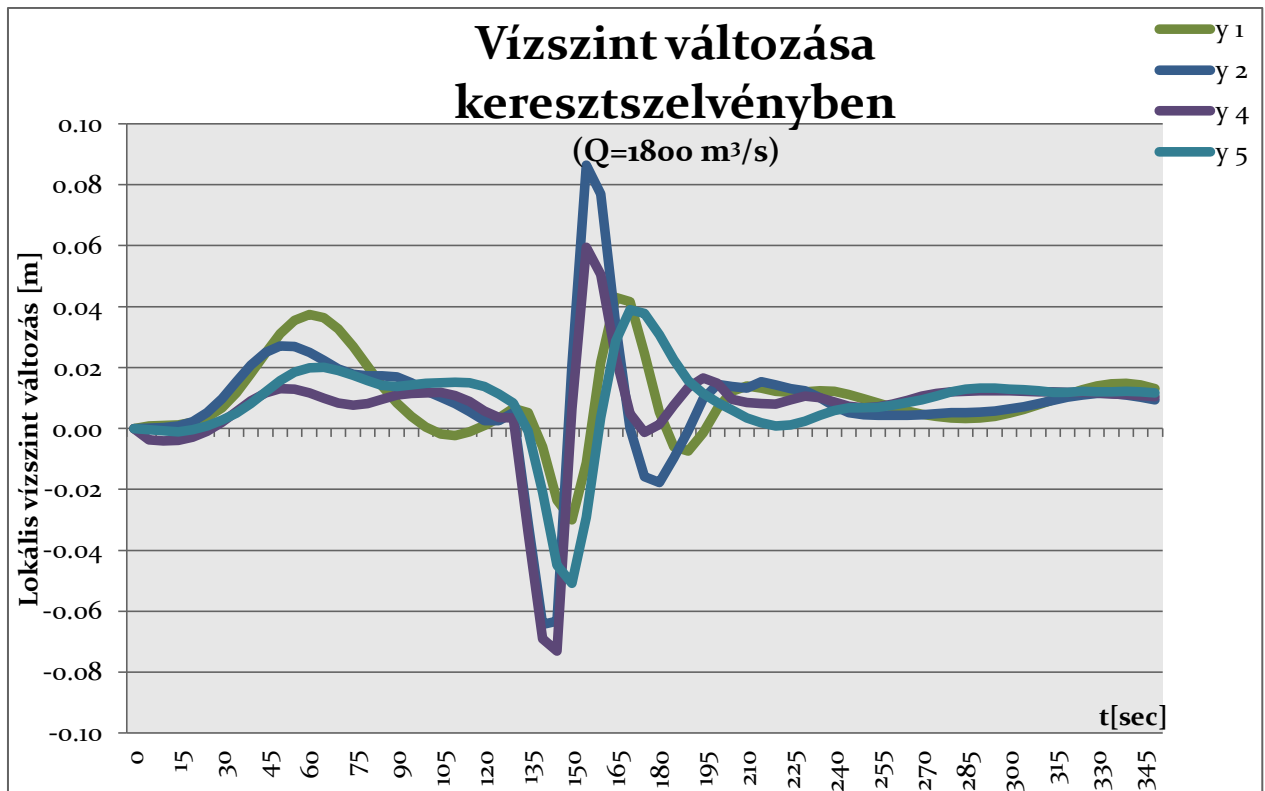
2. 2. Merülés 2.20m + Sebesség 2.60m/s



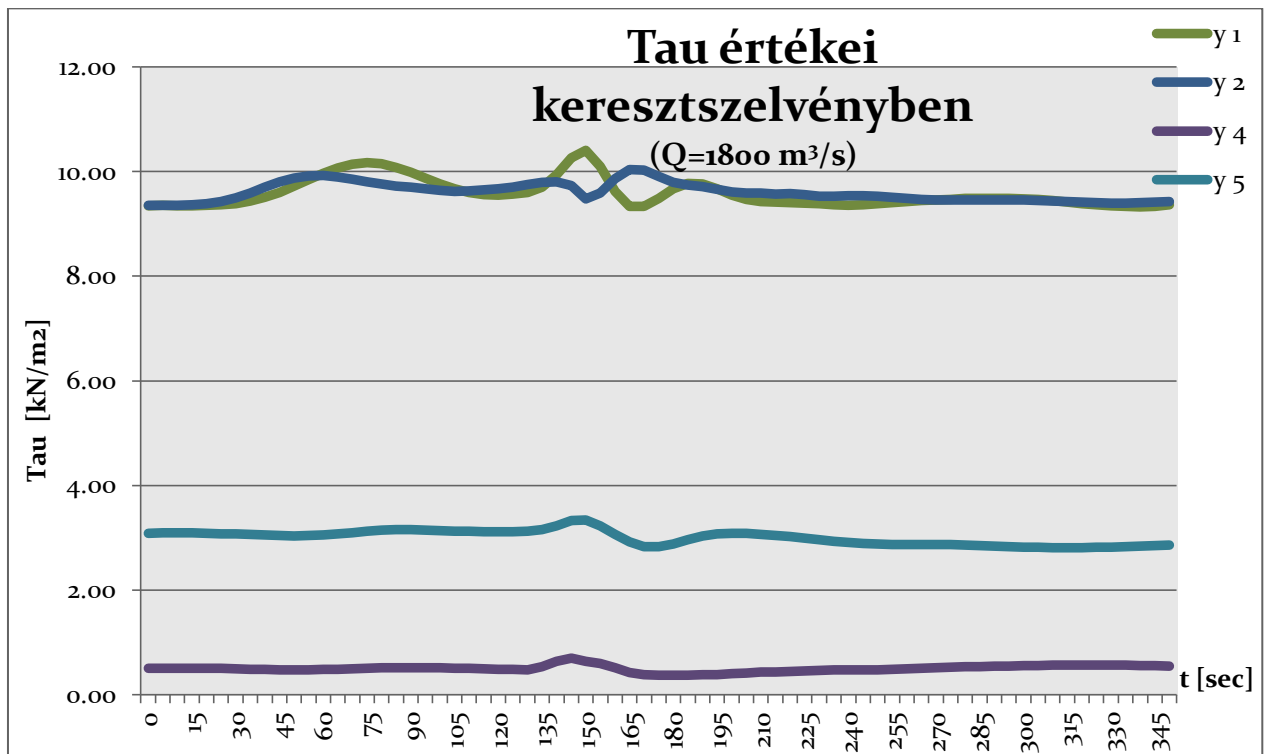
25. ábra Vízszint változás sarkantyúk között, $Dr_{ft}=2.20$; $v=2.60\text{m/s}$



26. ábra Tau értékei sarkantyúk között, $Dr_{ft}=2.20\text{m}$; $v=2.60\text{m/s}$

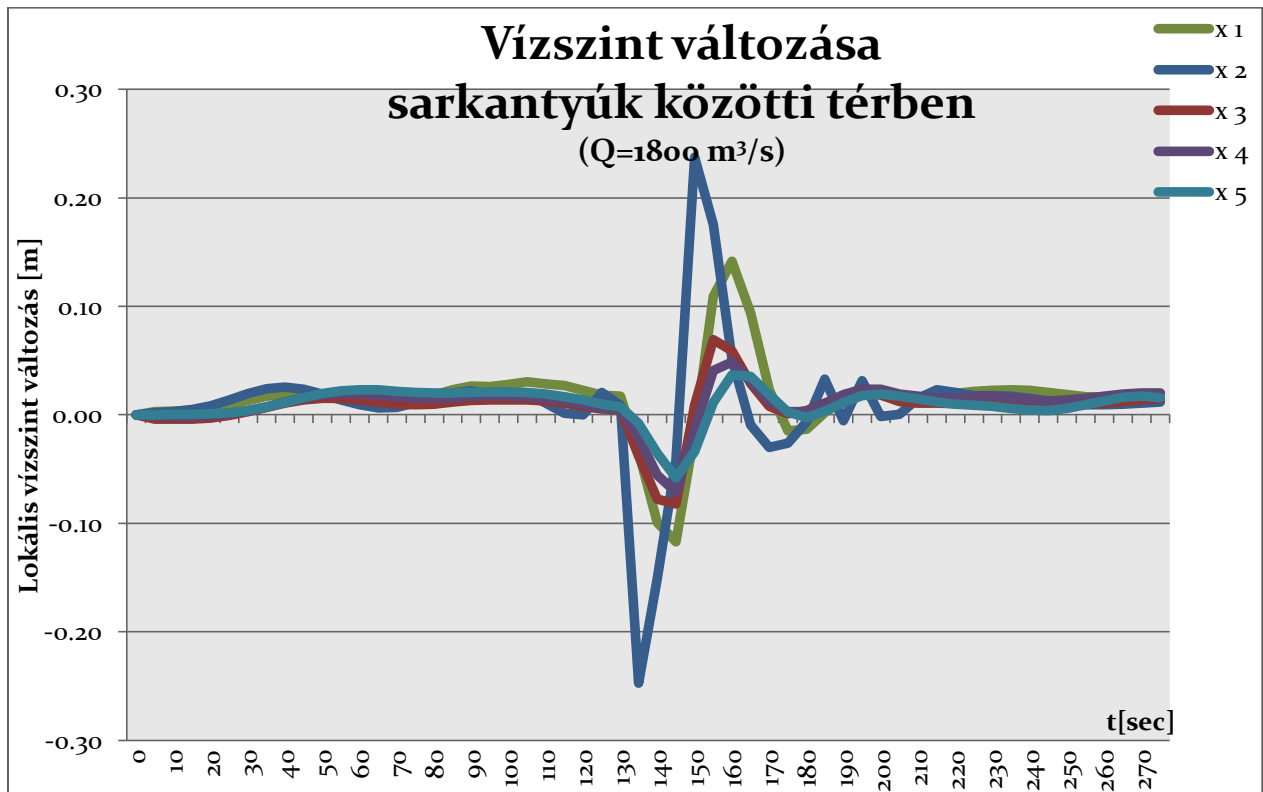


27. ábra Vízszint változás keresztmetszében, Drft=2.20m ; v=2.60m/s

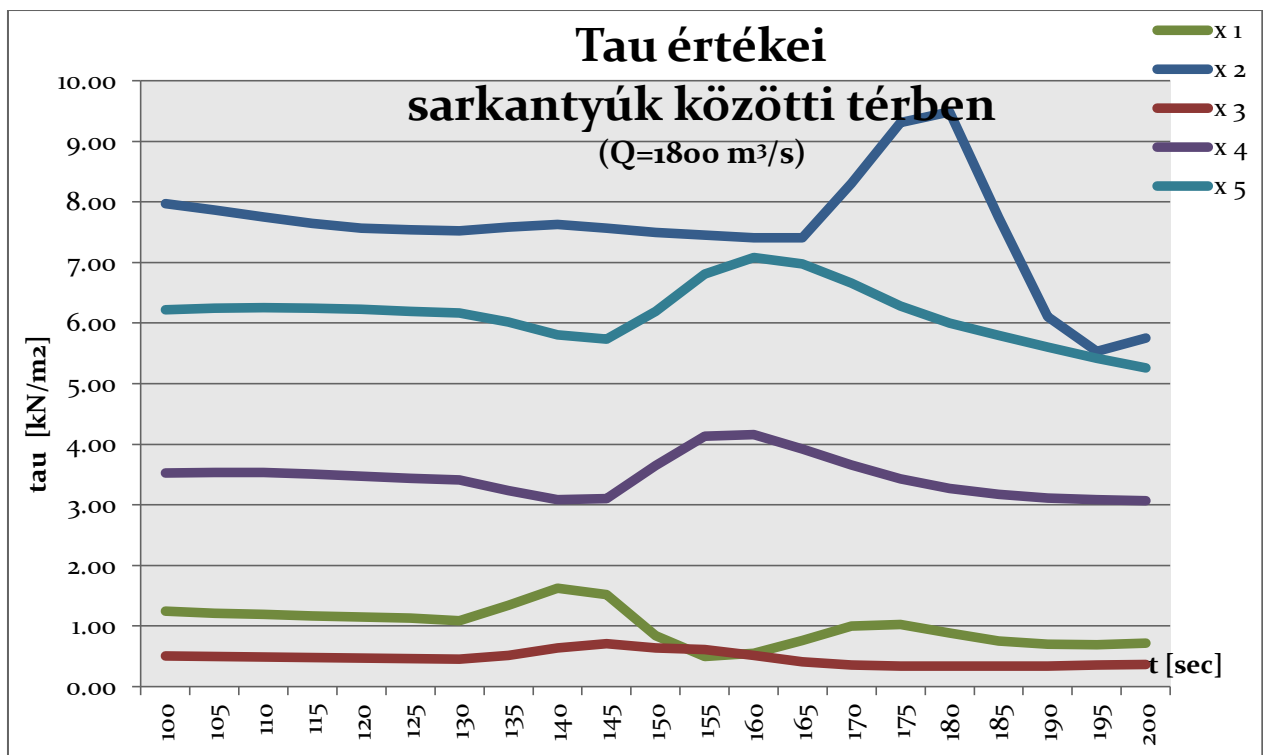


28. ábra Tau értékei keresztmetszében, Drft=2.20m ; v=2.60m/s

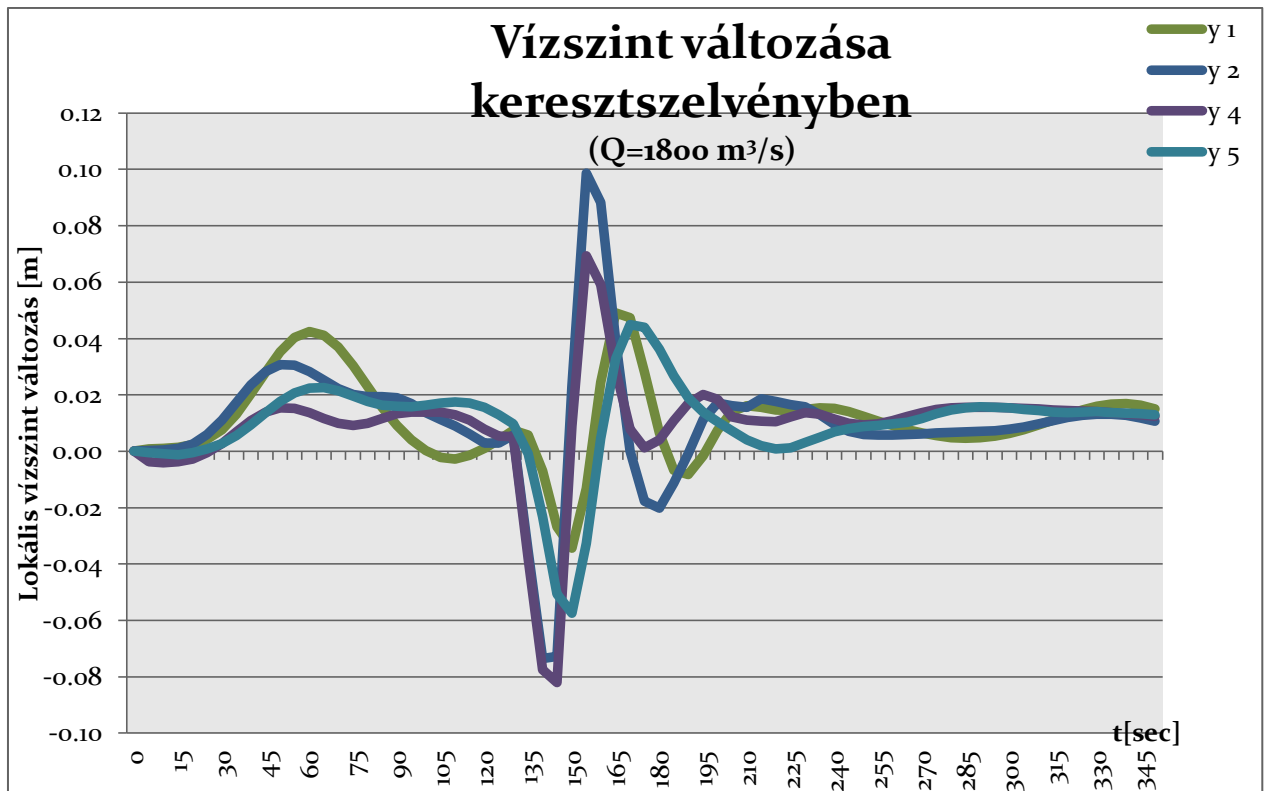
2. 3. Merülés 2.50m + Sebesség 2.60m/s



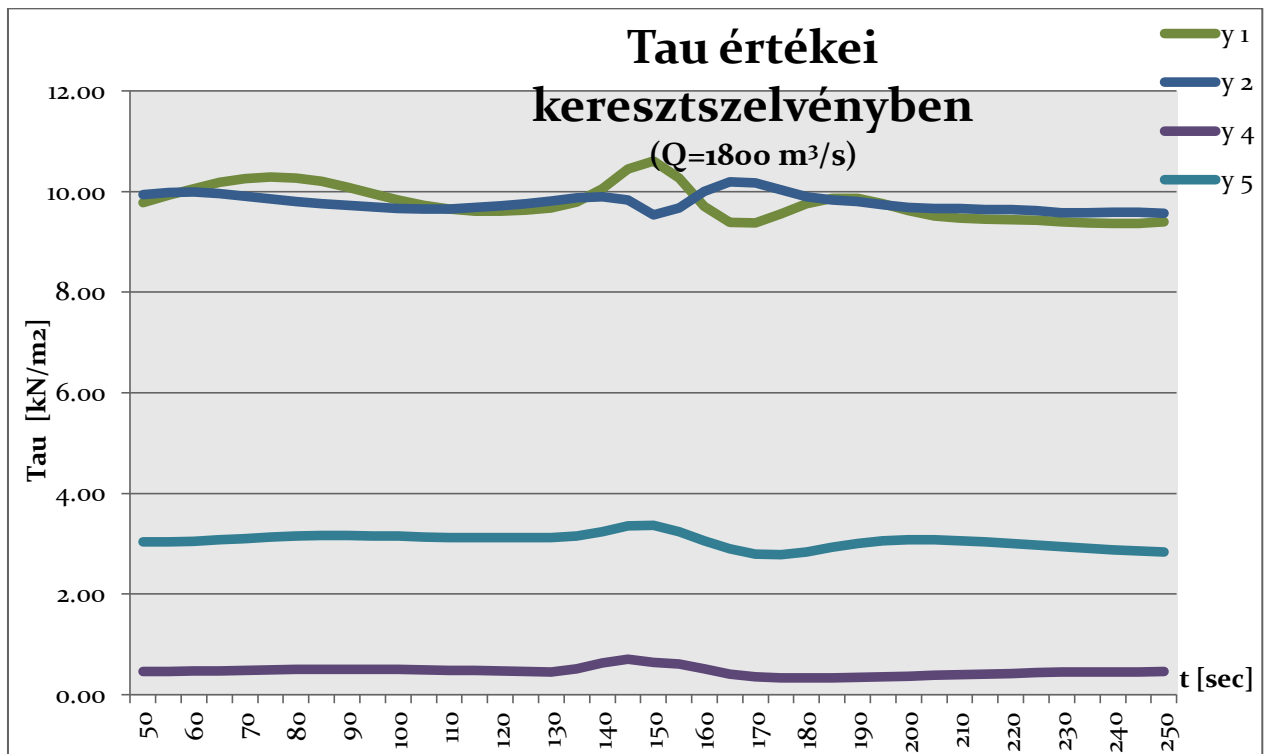
29. ábra Vízszint változás sarkantyúk között, $Dr_{ft}=2.50\text{m}$; $v=2.60\text{m/s}$



30. ábra Tau értékei sarkantyúk között, $Dr_{ft}=2.50\text{m}$; $v=2.60\text{m/s}$

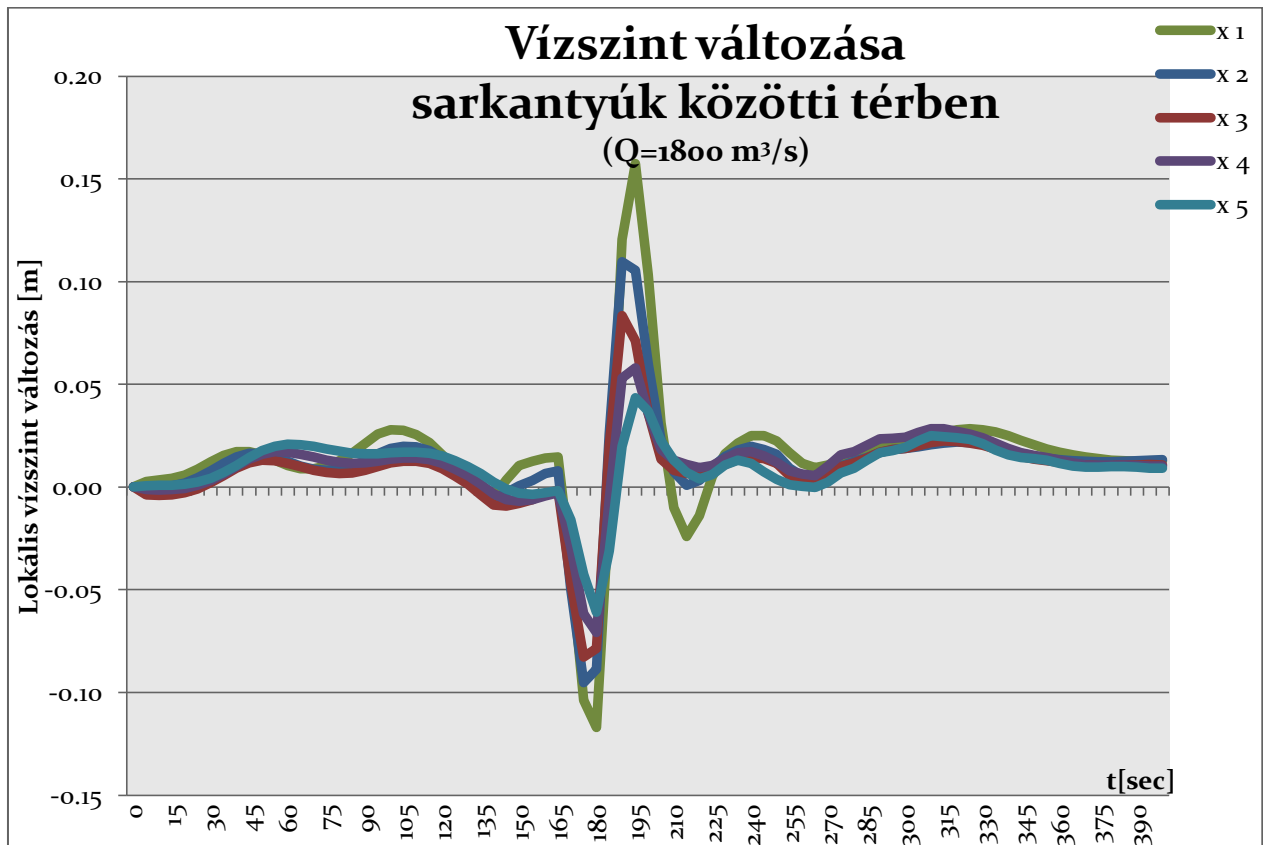


31. ábra Vízszint változás keresztmetszében, $Dr_{ft}=2.50\text{m}$; $v=2.60\text{m/s}$

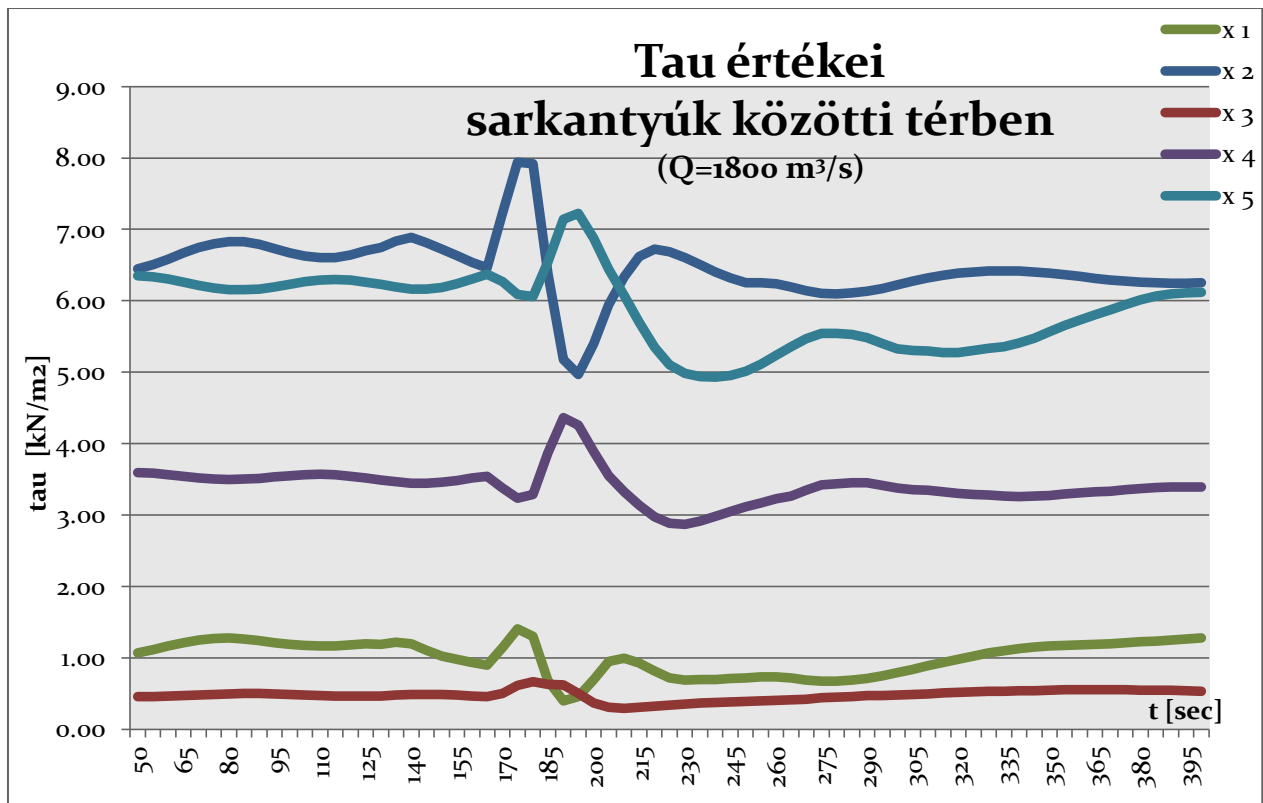


32. ábra Tau értékei keresztmetszében, $Dr_{ft}=2.50\text{m}$; $v=2.60\text{m/s}$

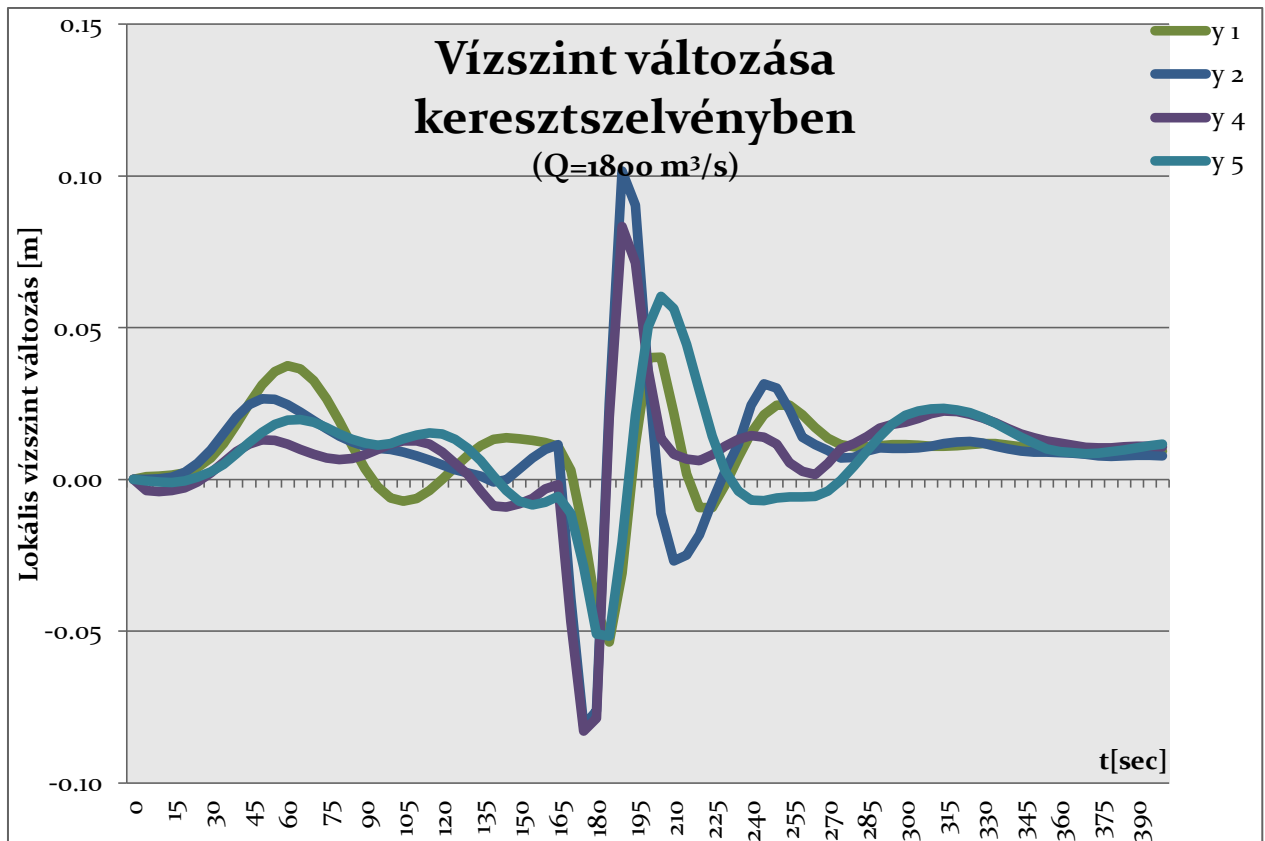
2. 4. Merülés 2.50m + Sebesség 2.10m/s



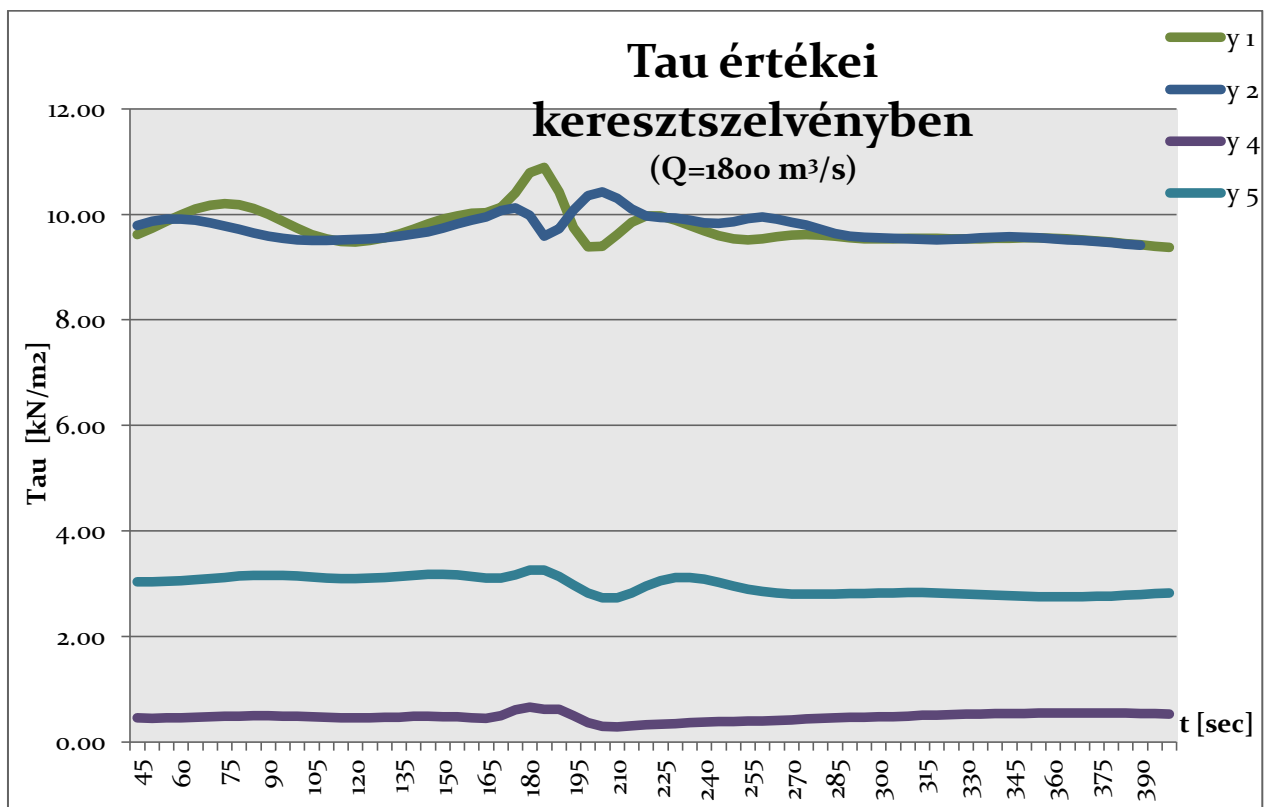
33. ábra Vízszint változás sarkantyúk között, $Dr_{ft}=2.50\text{m}$; $v=2.10\text{m/s}$



34. ábra Tau értékei sarkantyúk között, $Dr_{ft}=2.50\text{m}$; $v=2.10\text{m/s}$

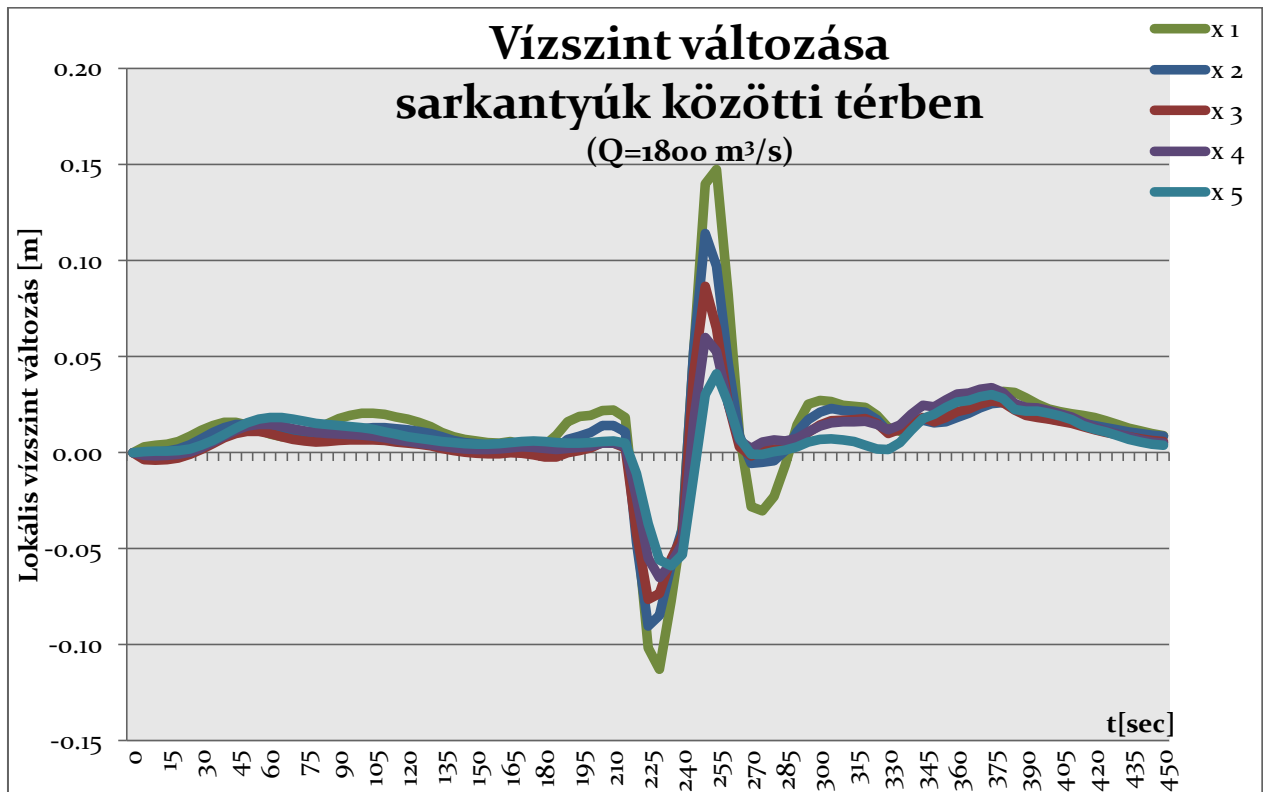


35. ábra Vízszint változás keresztmetszvényben, $Dr_{ft}=2.50\text{m}$; $v=2.10\text{m/s}$

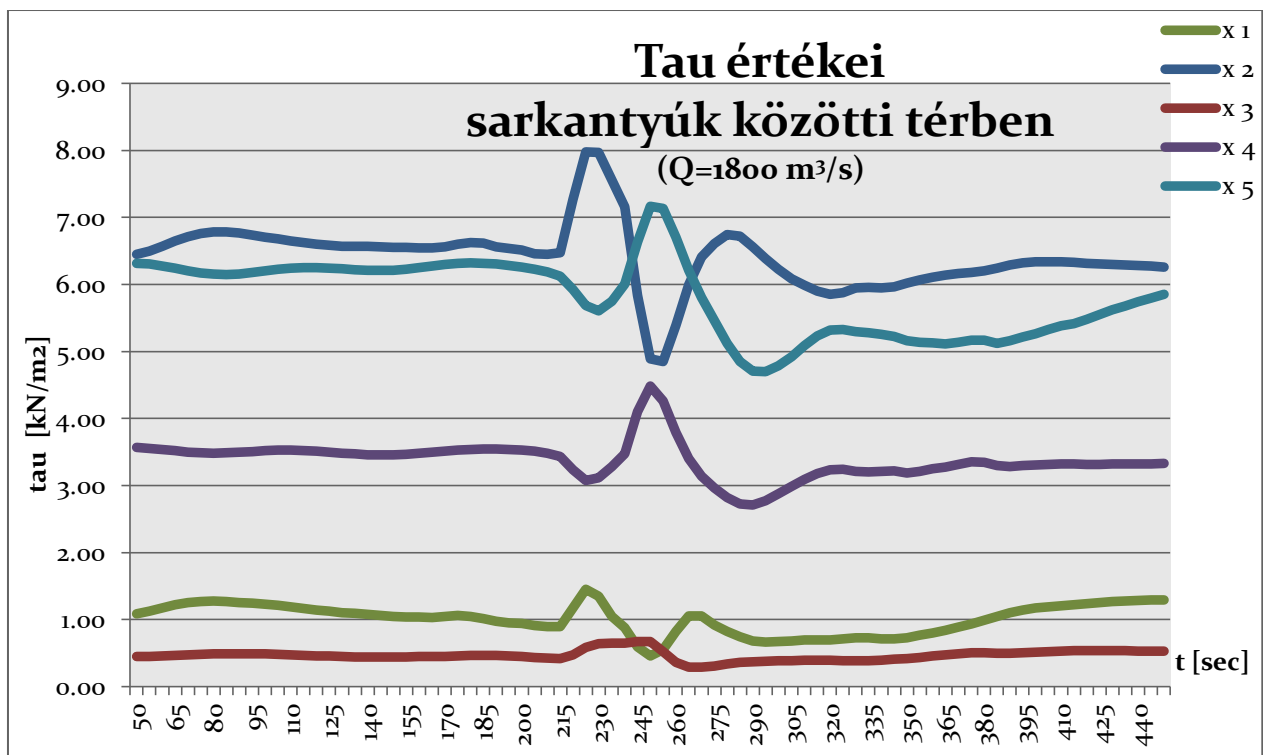


36. ábra Tau értékei keresztmetszvényben, $Dr_{ft}=2.50\text{m}$; $v=2.10\text{m/s}$

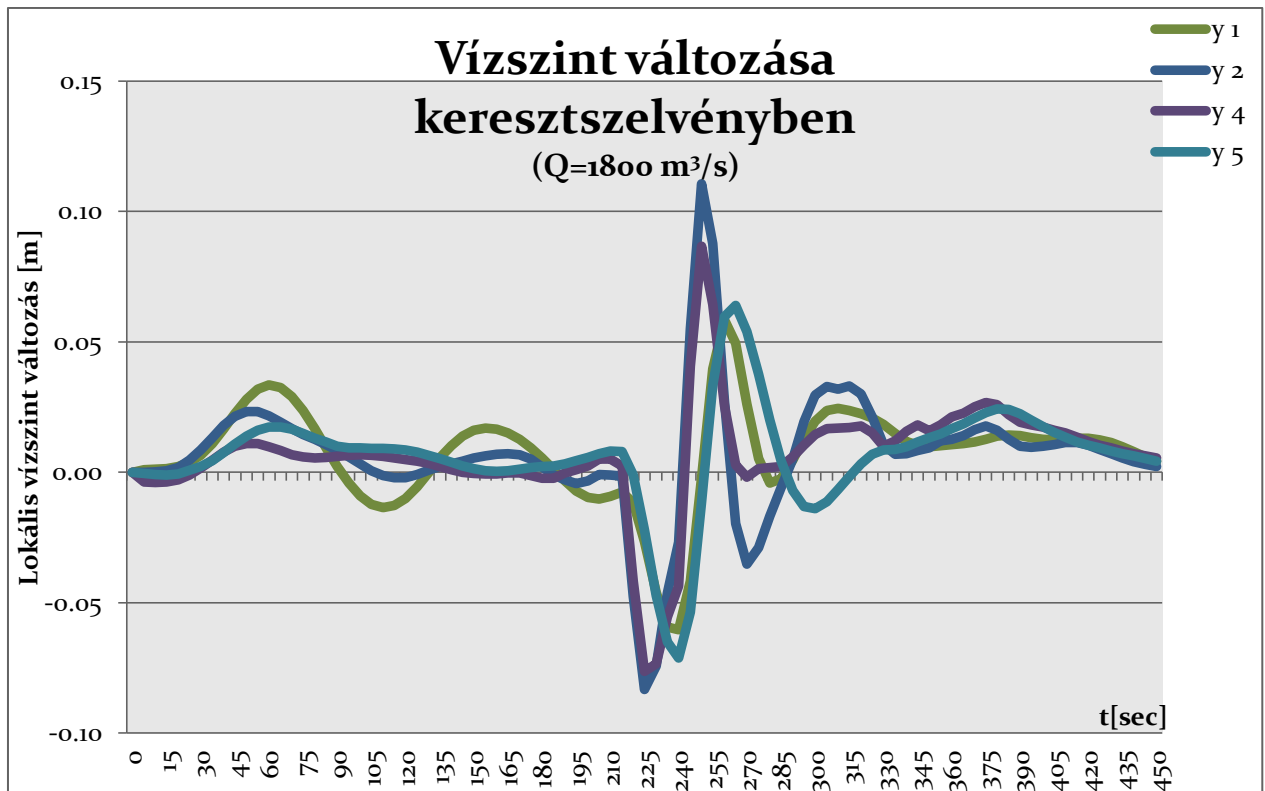
2. 5. Merülés 2.50m + Sebesség 1.60m/s



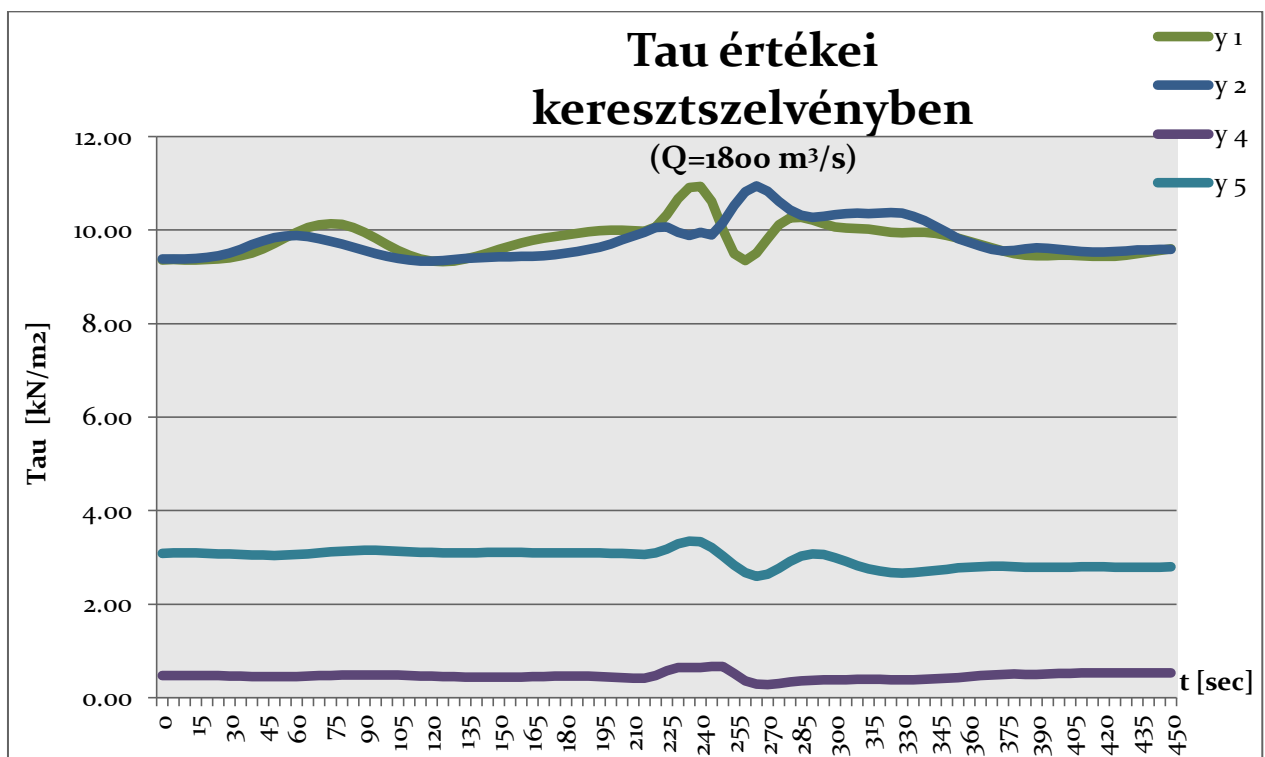
37. ábra Vízszint változás sarkantyúk között, $Dr_{ft}=2.50\text{m}$; $v=1.60\text{m/s}$



38. ábra Tau értékei sarkantyúk között, $Dr_{ft}=2.50\text{m}$; $v=1.60\text{m/s}$



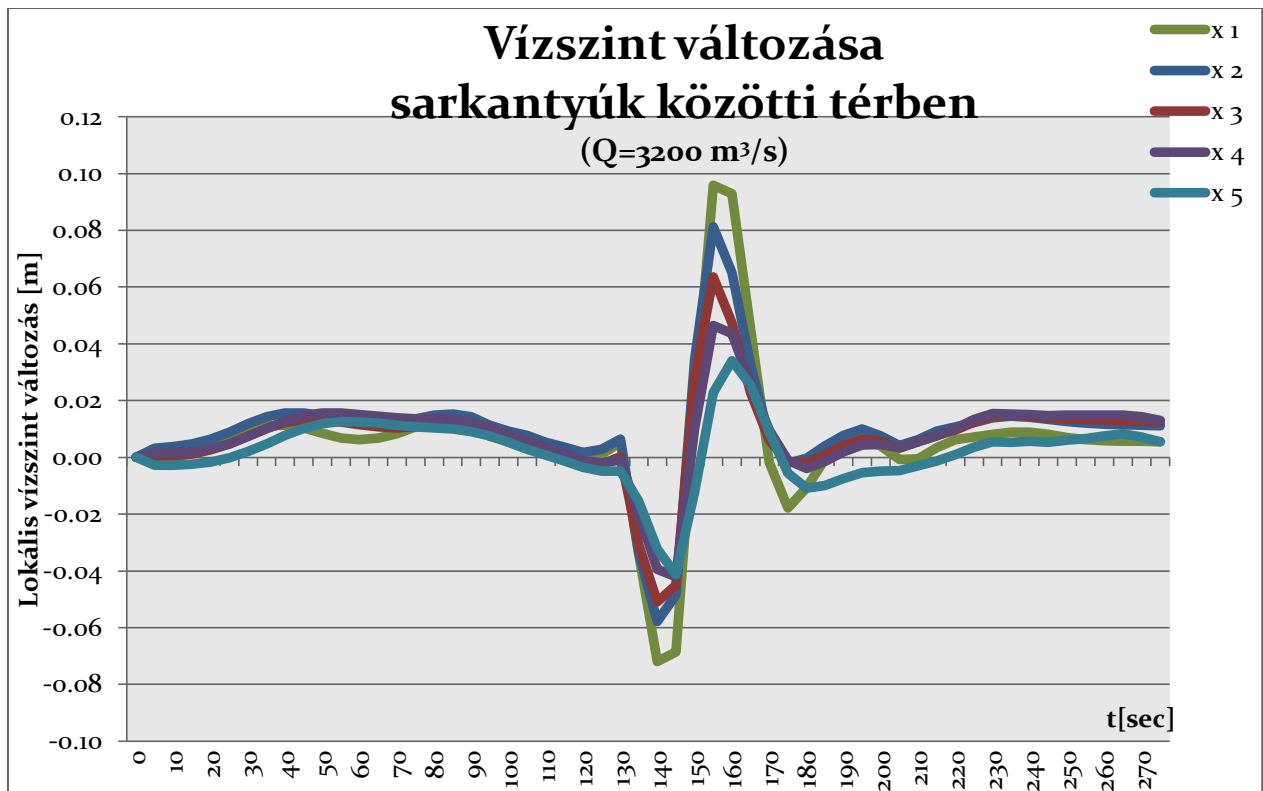
39. ábra Vízszint változás keresztmetszvényben, $Drft=2.50\text{m}$; $v=1.60\text{m/s}$



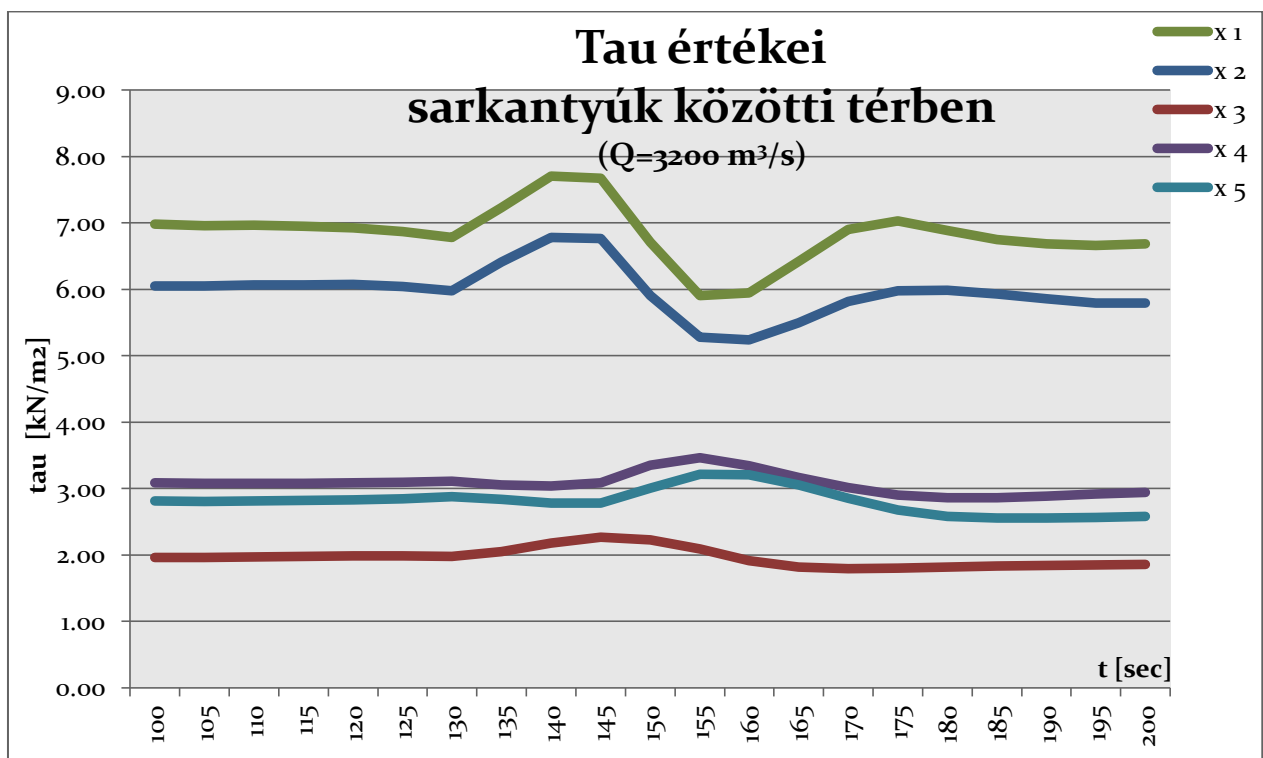
40. ábra Tau értékei keresztmetszvényben, $Drft=2.50\text{m}$; $v=1.60\text{m/s}$

3. Vízhhozam $Q=3200\text{m}^3/\text{s}$ futtatások

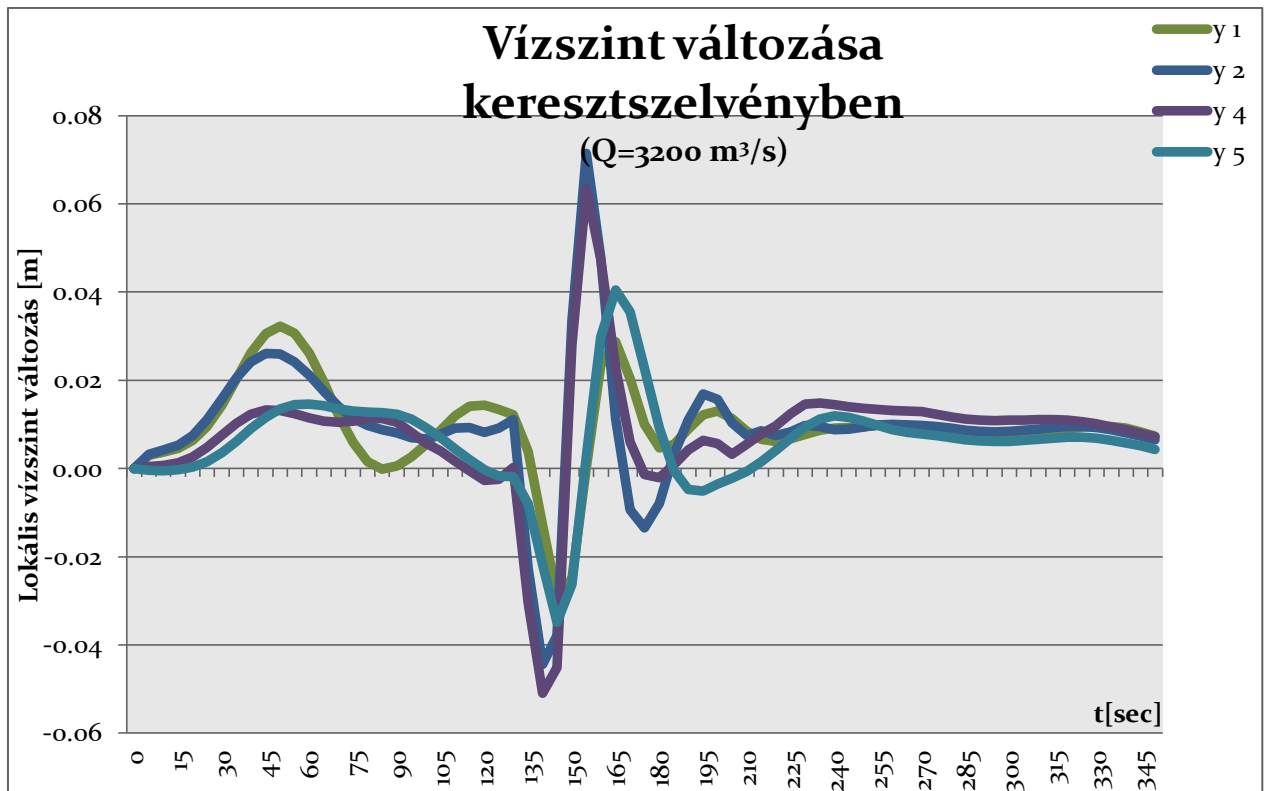
3. 1. Merülés 1.92m + Sebesség $2.60\text{m}/\text{s}$



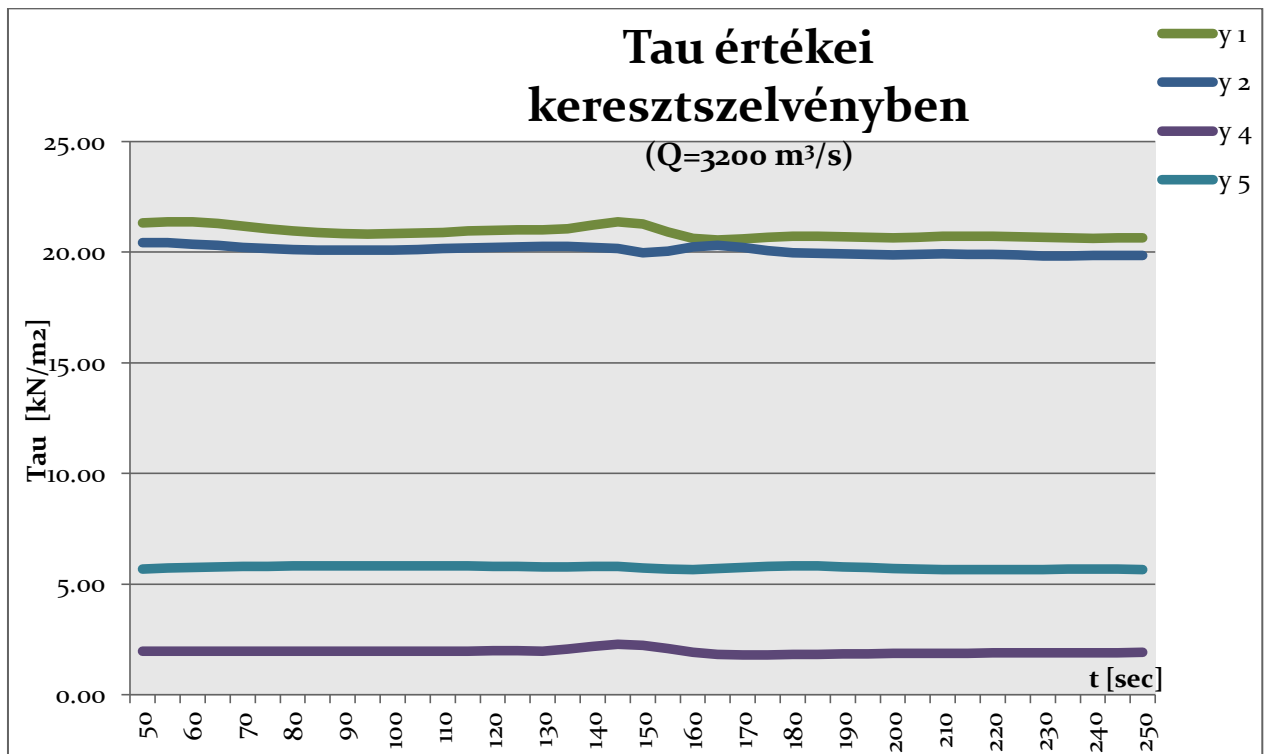
41. ábra Vízszint változás sarkantyúk között, $Drft=1.92\text{m}$; $v=2.60\text{m}/\text{s}$



42. ábra Tau értékei sarkantyúk között, $Drft=1.92\text{m}$; $v=2.60\text{m}/\text{s}$

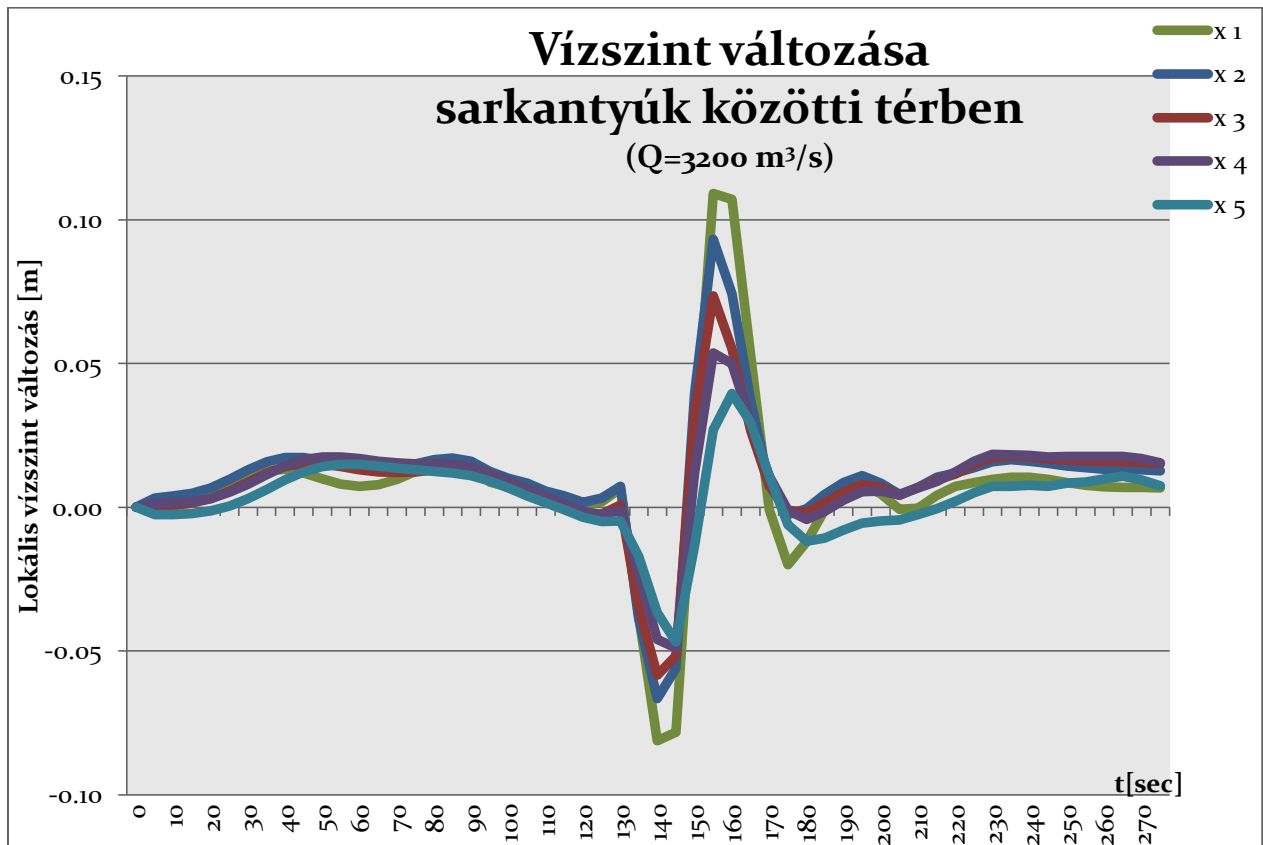


43. ábra Vízszint változás keresztmetszében, Drft=1.92m ; v=2.60m/s

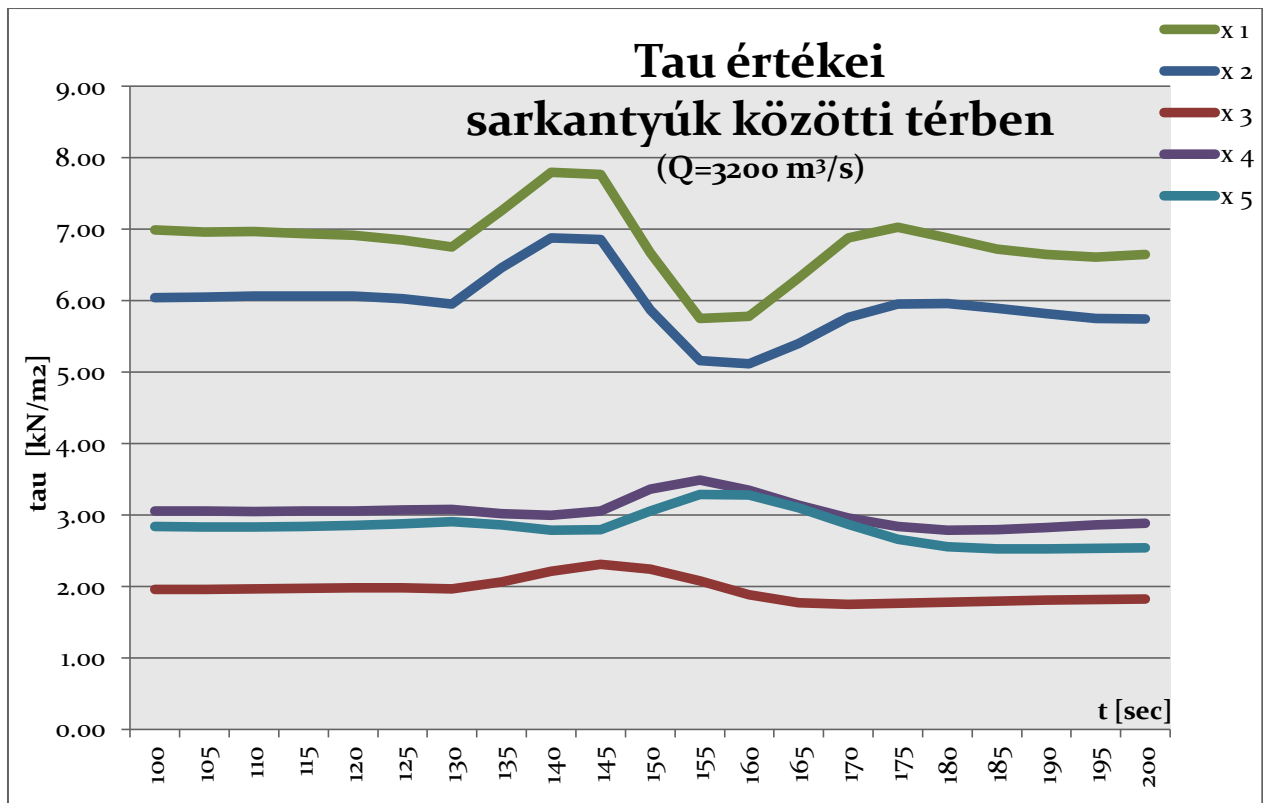


44. ábra Tau értékei keresztmetszében, Drft=1.92m ; v=2.60m/s

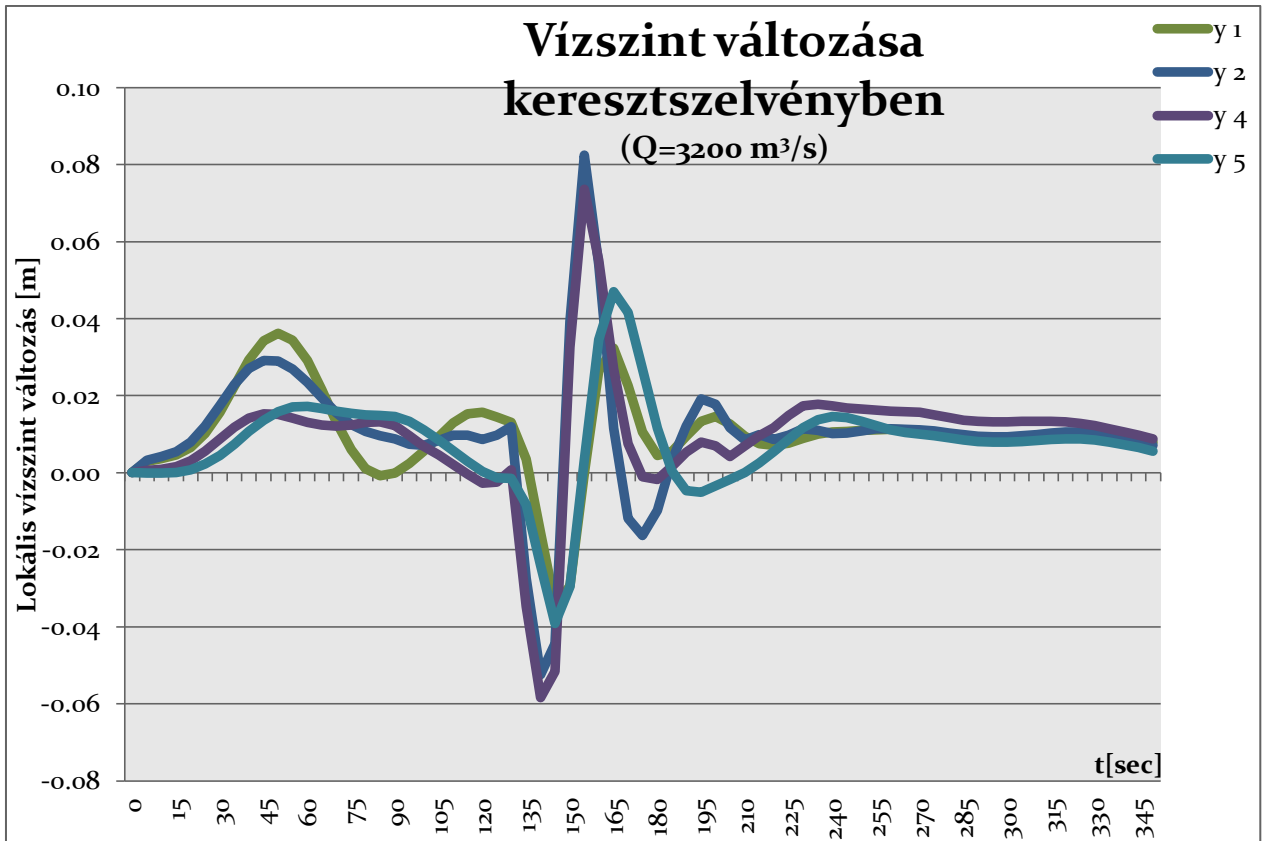
3. 2. Merülés 2.20m + Sebesség 2.60m/s



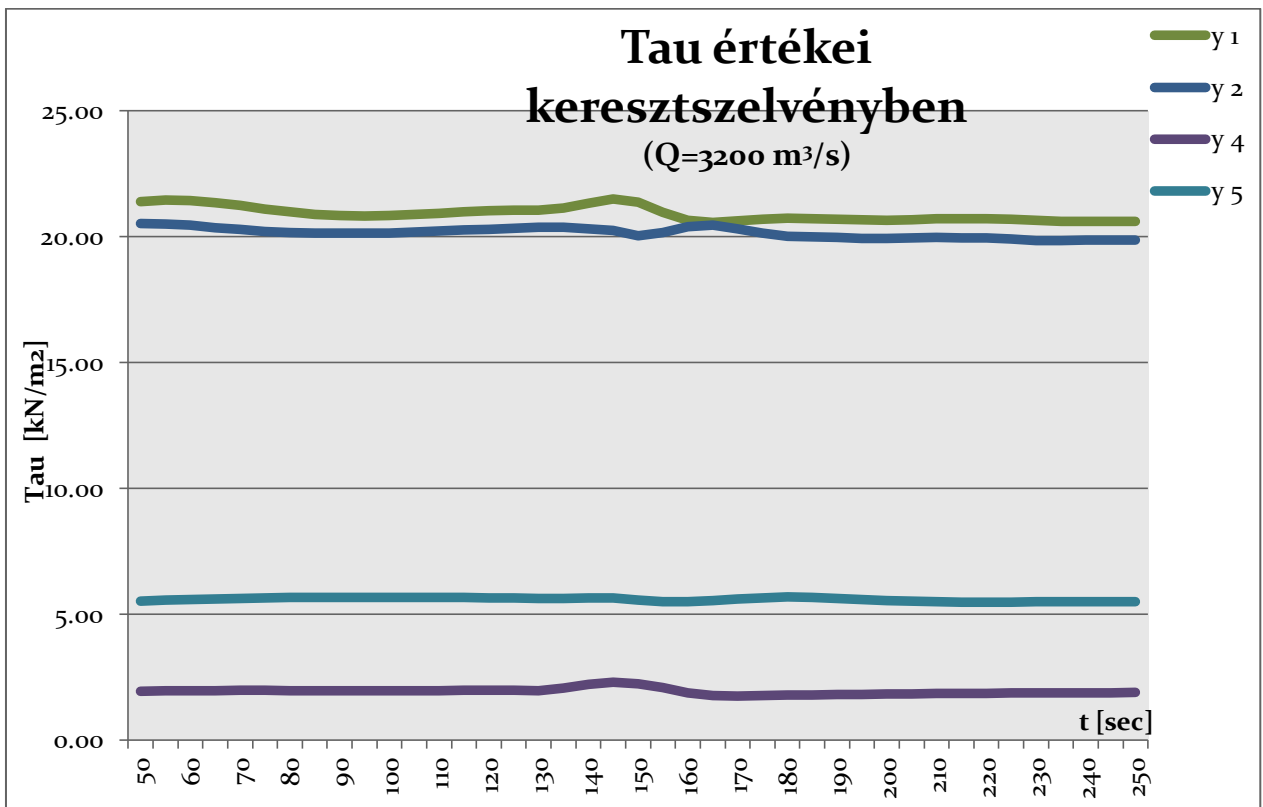
45. ábra Vízszint változás sarkantyúk között, $Drft=2.20\text{m}$; $v=2.60\text{m/s}$



46. ábra Tau értékei sarkantyúk között, $Drft=2.20\text{m}$; $v=2.60\text{m/s}$

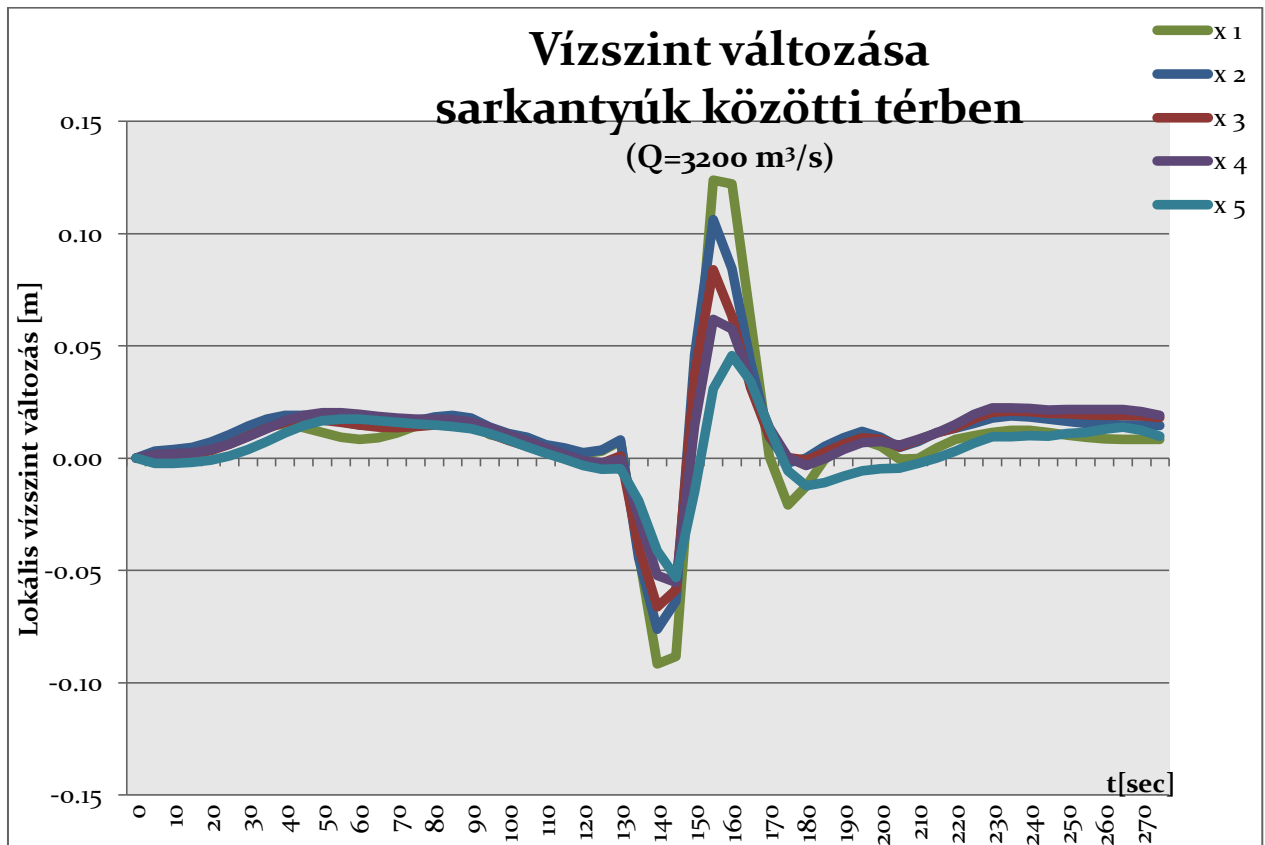


47. ábra Vízszint változás keresztmetszében, Drft=2.20m ; v=2.60m/s

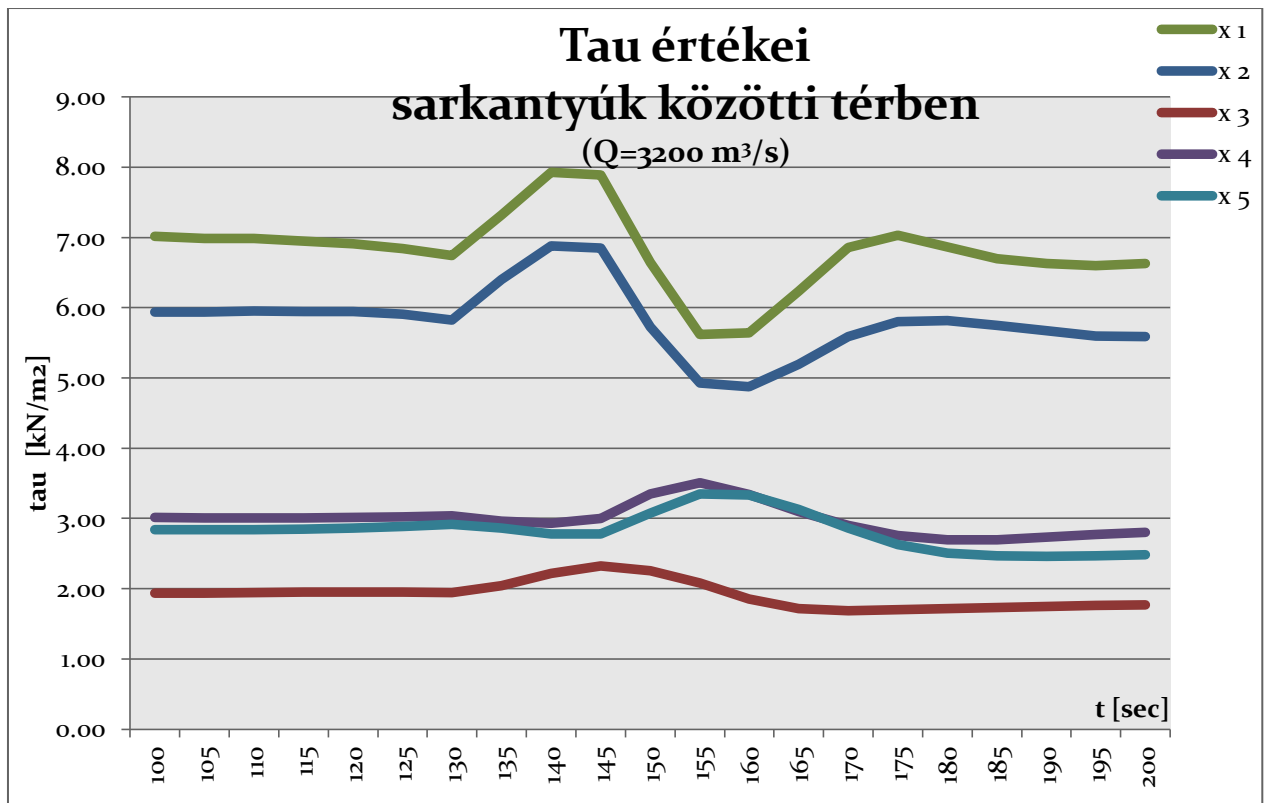


48. ábra Tau értékei keresztmetszében, Drft=2.20m ; v=2.60m/s

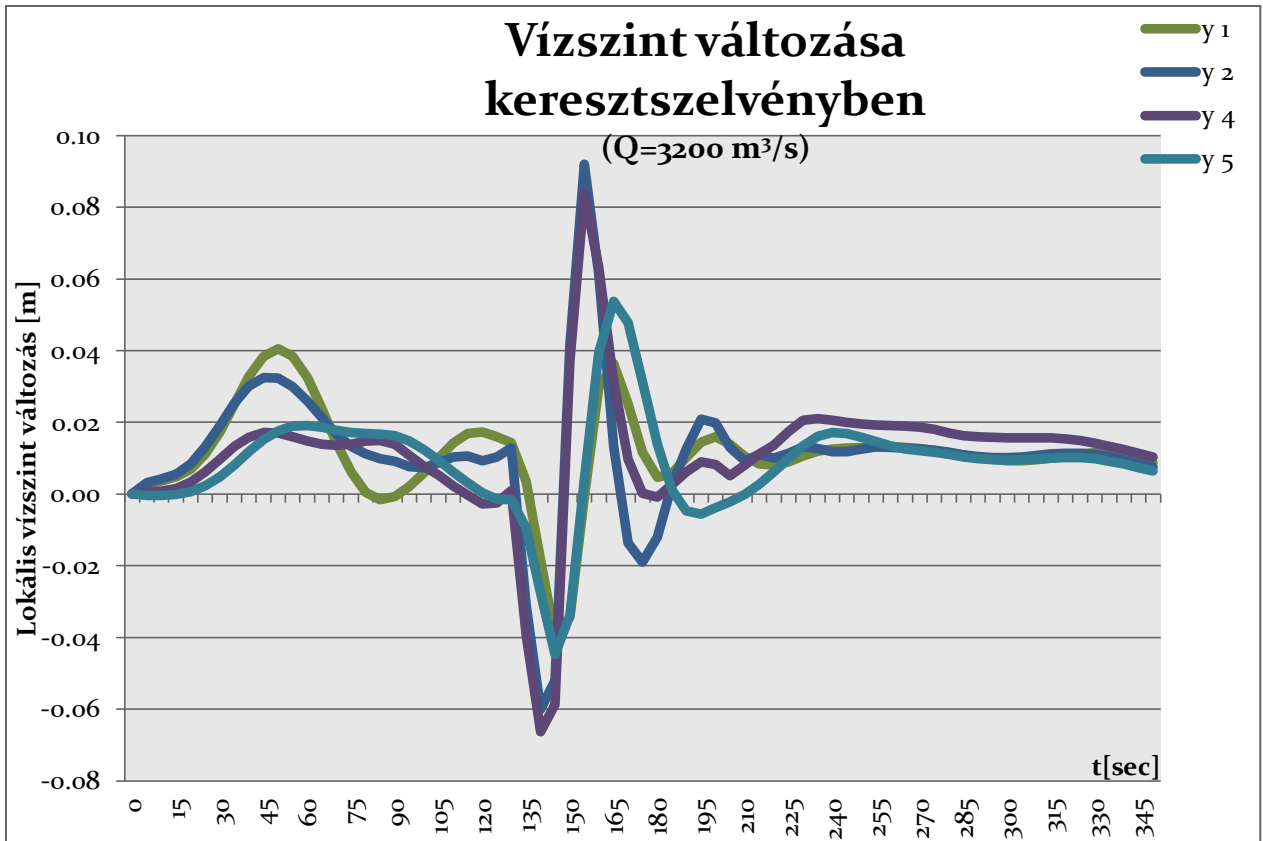
3. 3. Merülés 2.50m + Sebesség 2.60m/s



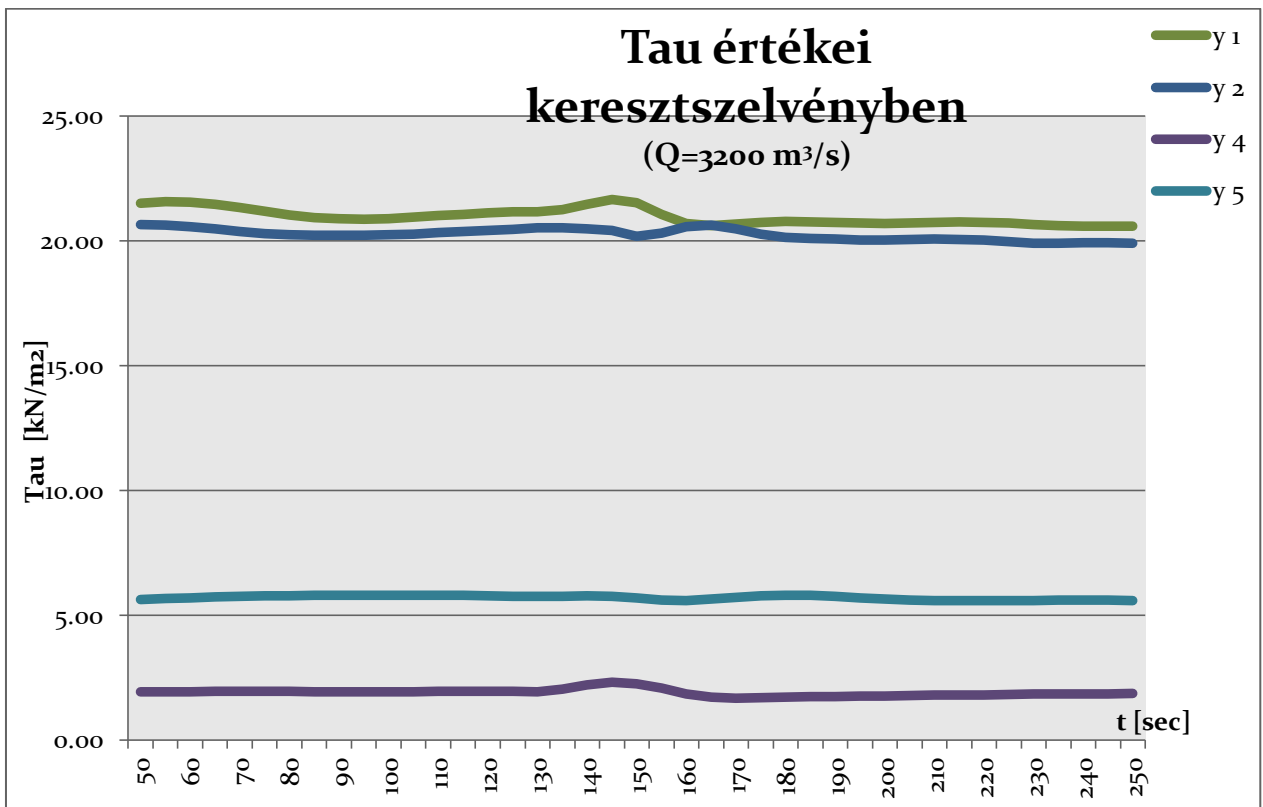
49. ábra 9. ábra Vízszint változás sarkantyúk között, $Dr_{ft}=2.50\text{m}$; $v=2.60\text{m/s}$



50. ábra Tau értékei sarkantyúk között, $Dr_{ft}=2.50\text{m}$; $v=2.60\text{m/s}$

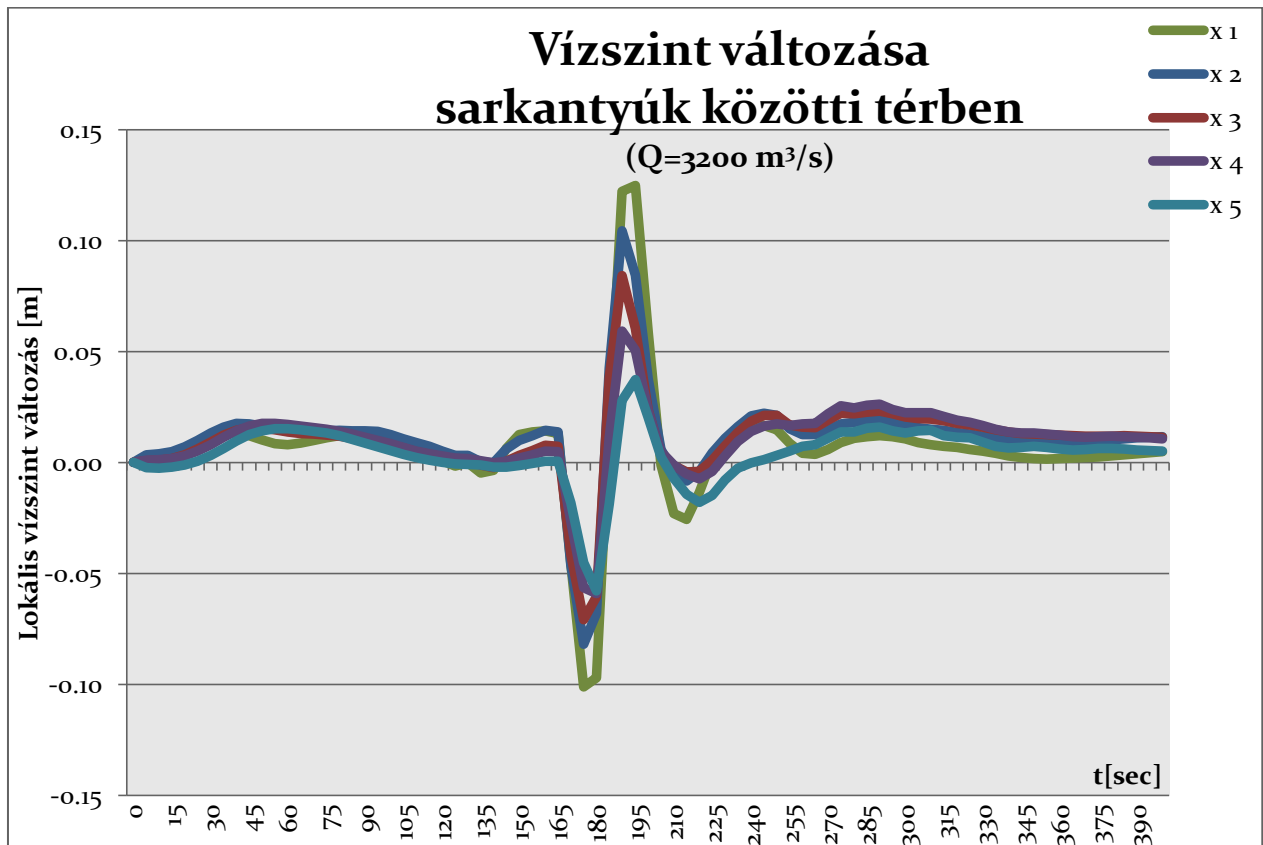


51. ábra Vízszint változás keresztaszelvényben, Drft=2.50m ; v=2.60m/s

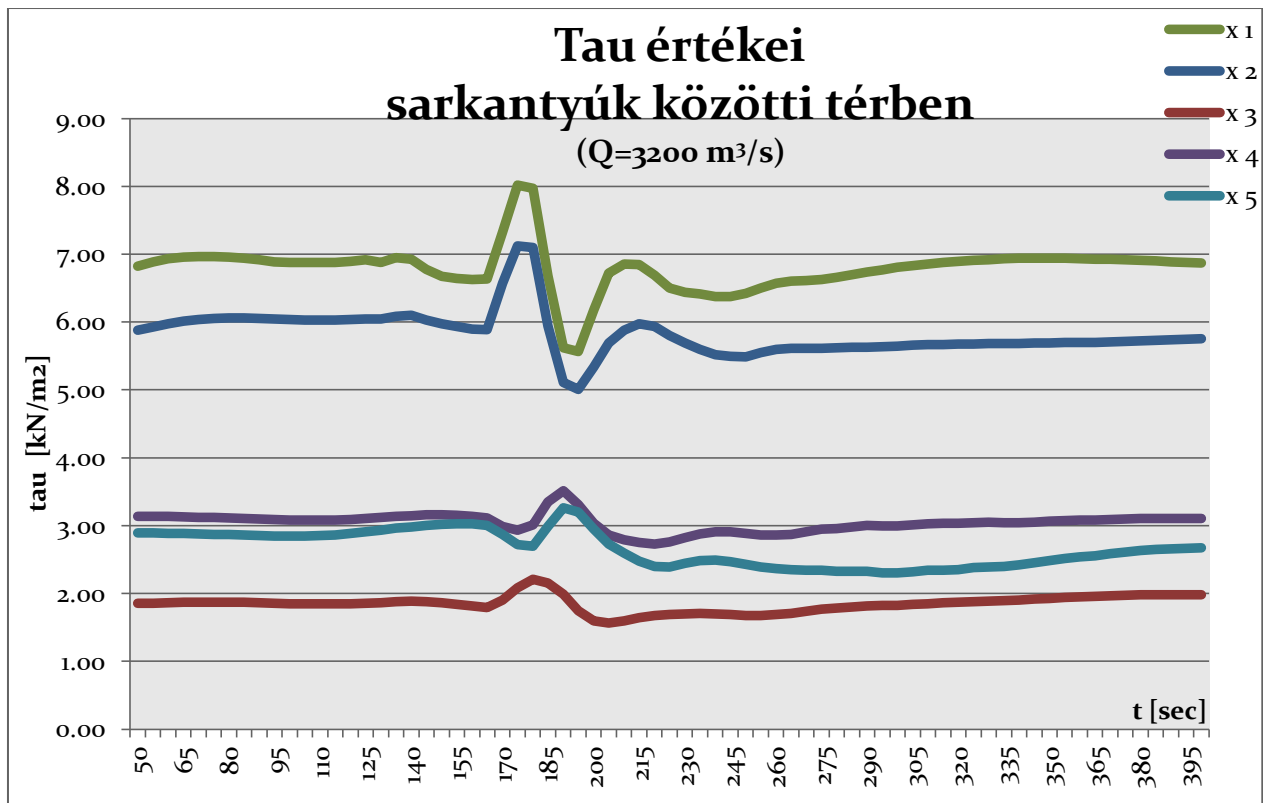


52. ábra Tau értékei keresztaszelvényben, Drft=2.50m ; v=2.60m/s

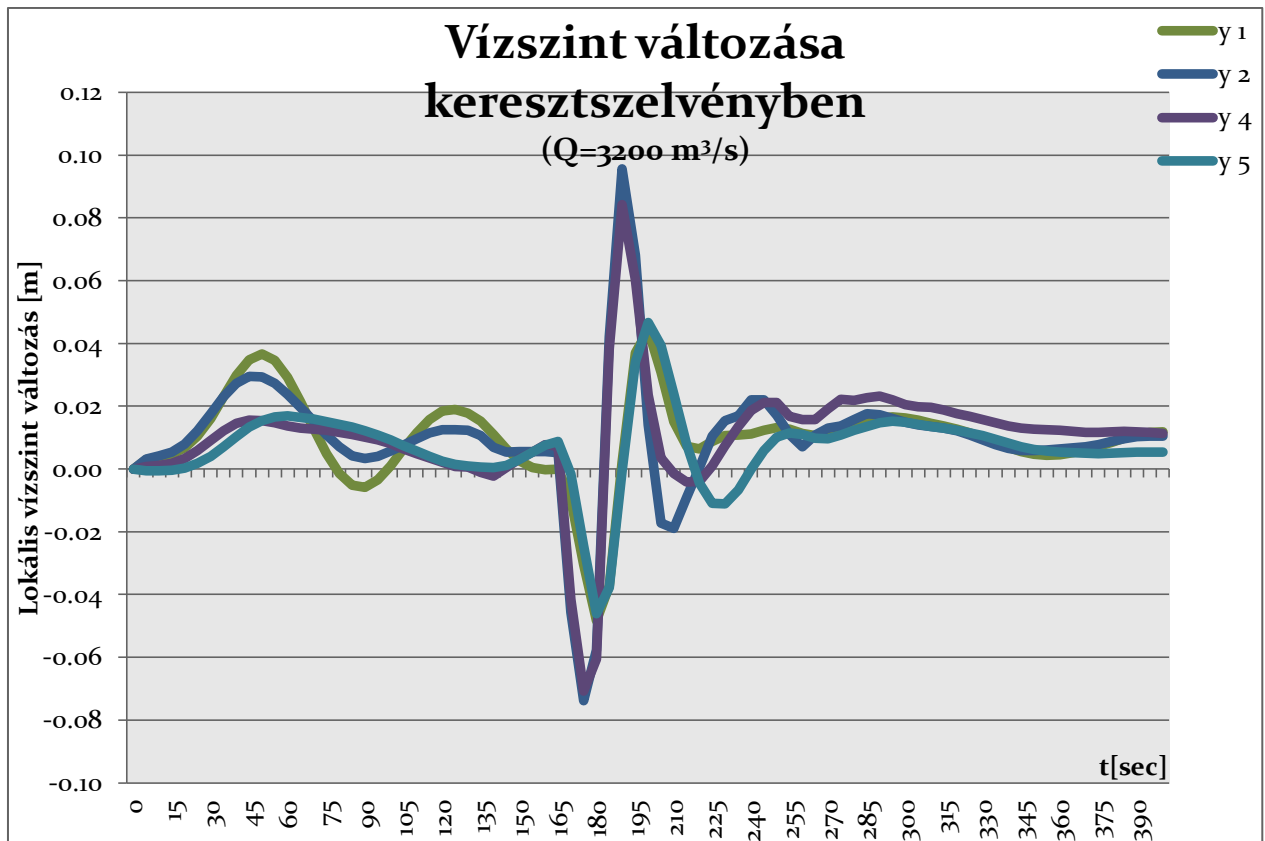
3. 4. Merülés 2.50m + Sebesség 2.10m/s



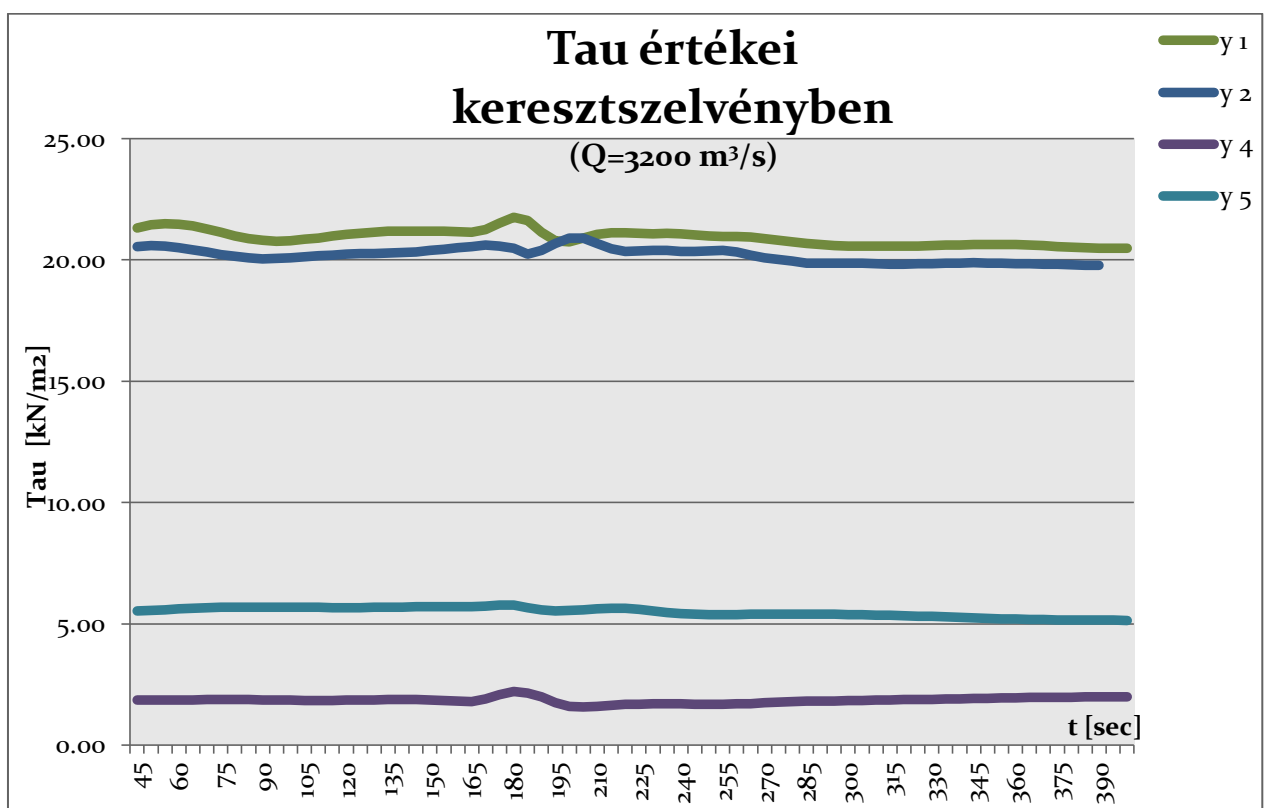
53. ábra Vízszint változás sarkanyúk között, $Dr_{ft}=2.50\text{m} + v=2.10\text{m/s}$



54. ábra Tau értékei sarkanyúk között, $Dr_{ft}=2.50\text{m} ; v=2.10\text{m/s}$

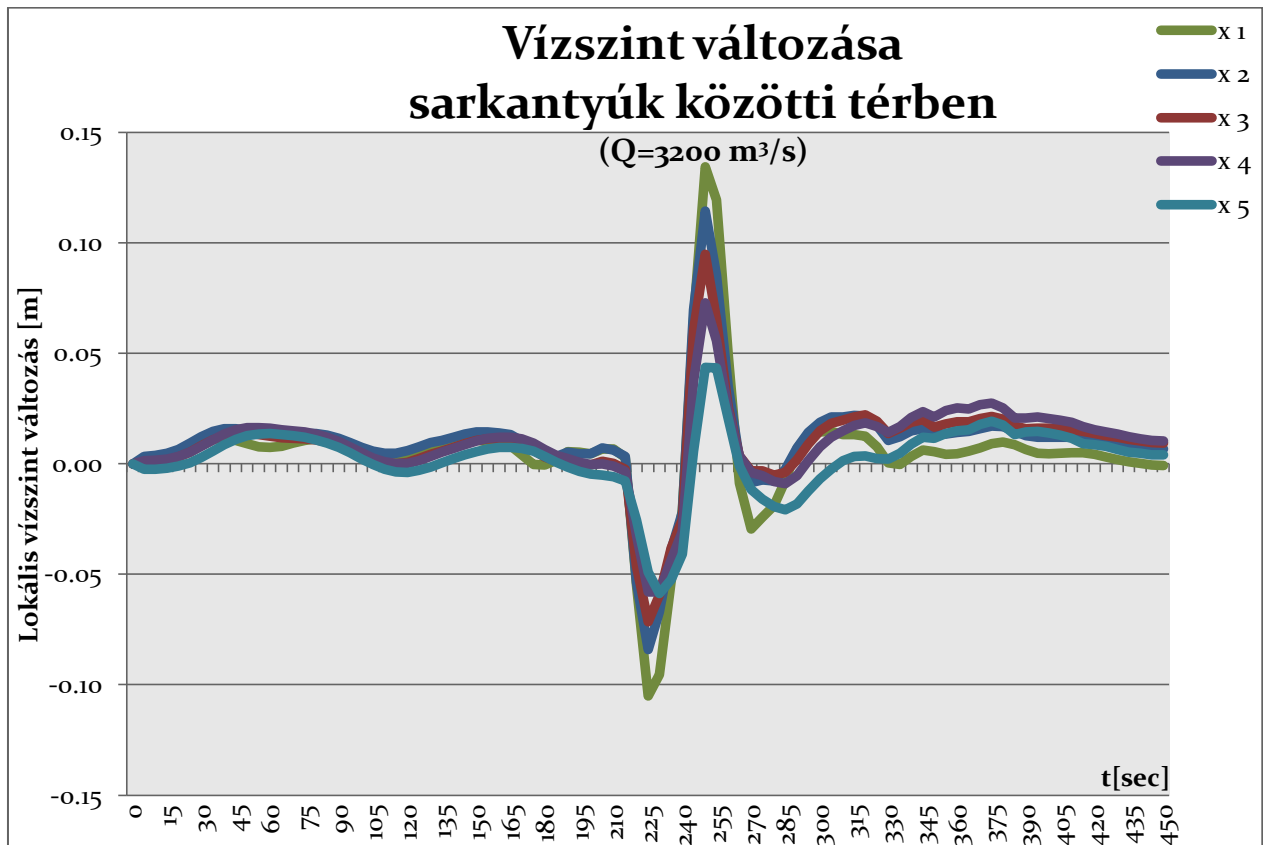


55. ábra Vízszint változás keresztmetszében, Drft=2.50m ; v=2.10m/s



56. ábra Tau értékei keresztmetszében, Drft=2.50m ; v=2.10m/s

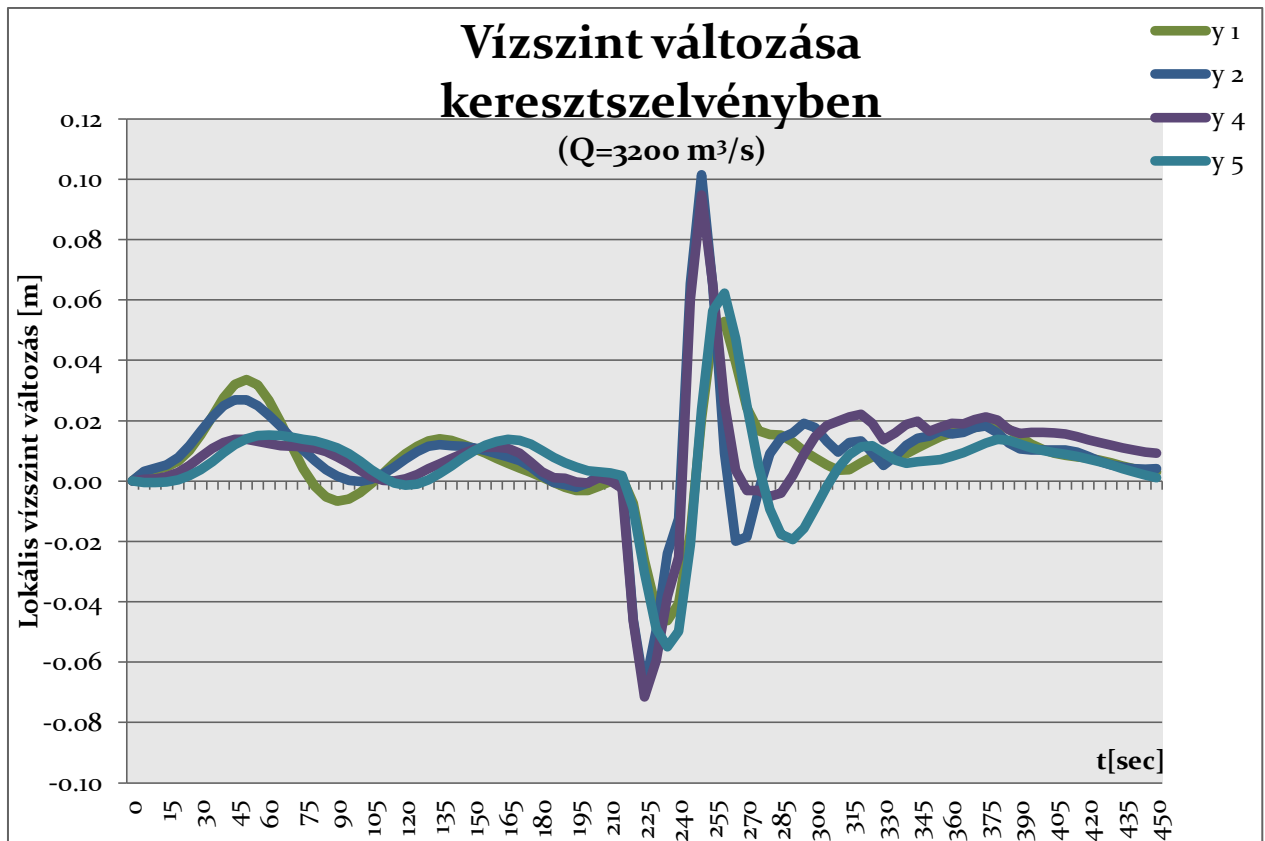
3. 5. Merülés 2.50m + Sebesség 1.60m/s



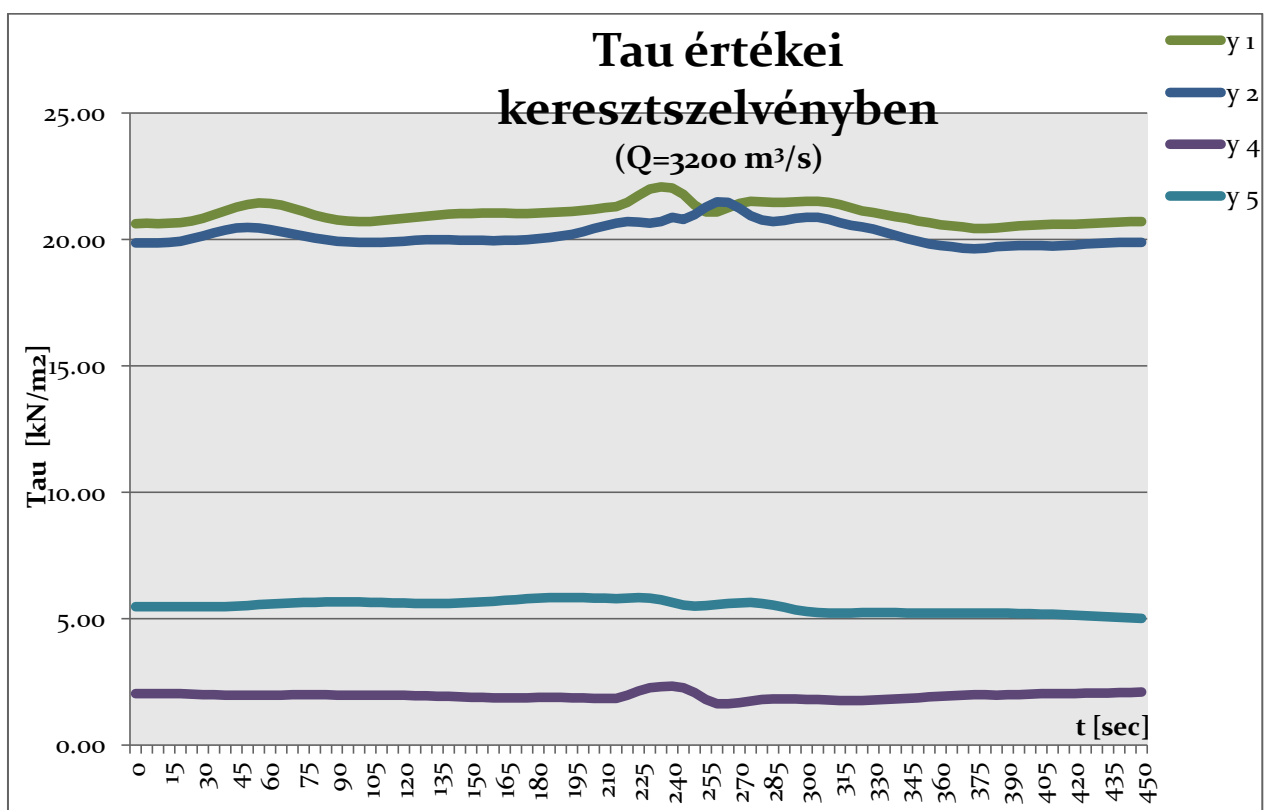
57. ábra Vízszint változás sarkantyúk között, $Dr_{ft}=2.50\text{m} + v=1.60\text{m/s}$



58. ábra Tau értékei sarkantyúk között, $Dr_{ft}=2.50\text{m} ; v=1.60\text{m/s}$



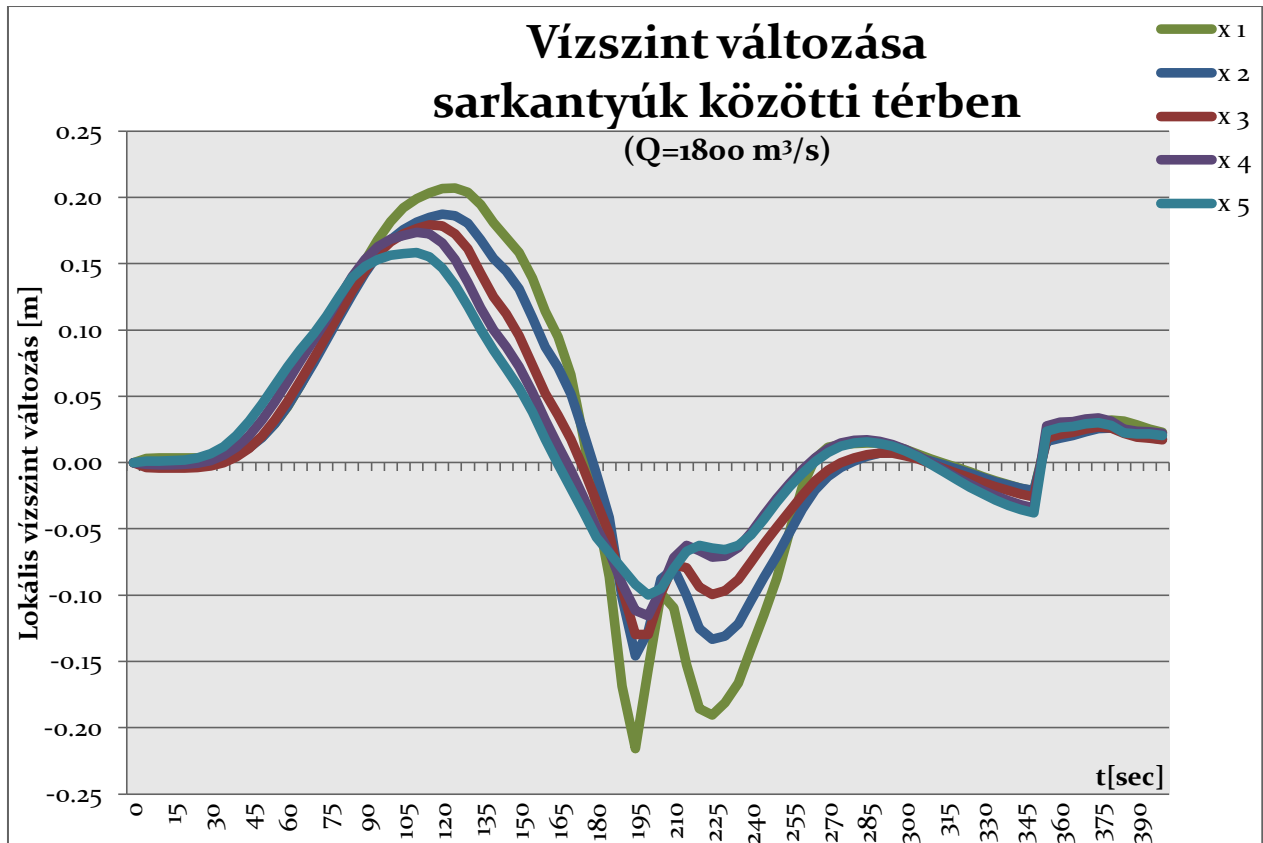
59. ábra Vízszint változás keresztaszelvényben, $Drft=2.50\text{m}$; $v=1.60\text{m/s}$



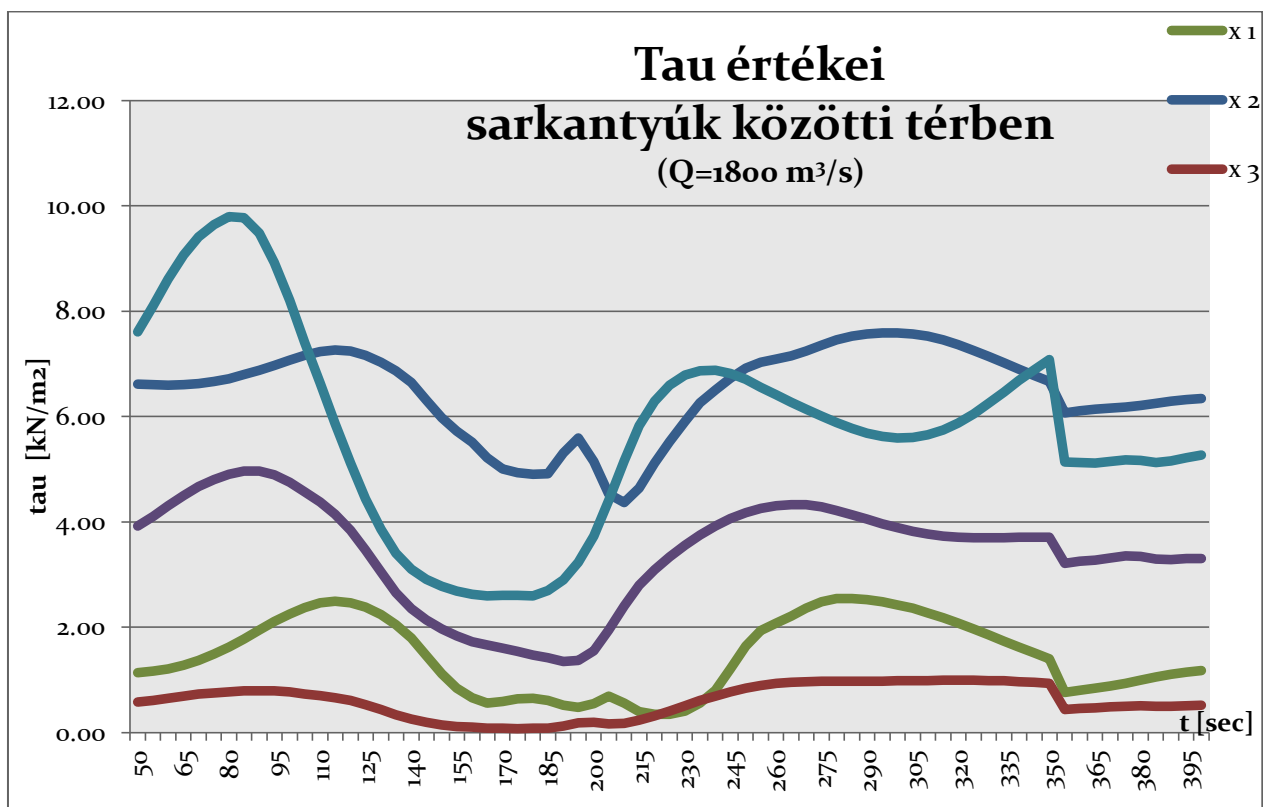
60. ábra Tau értékei keresztaszelvényben, $Drft=2.50\text{m}$; $v=1.60\text{m/s}$

4. Eltérő hajóforgalom

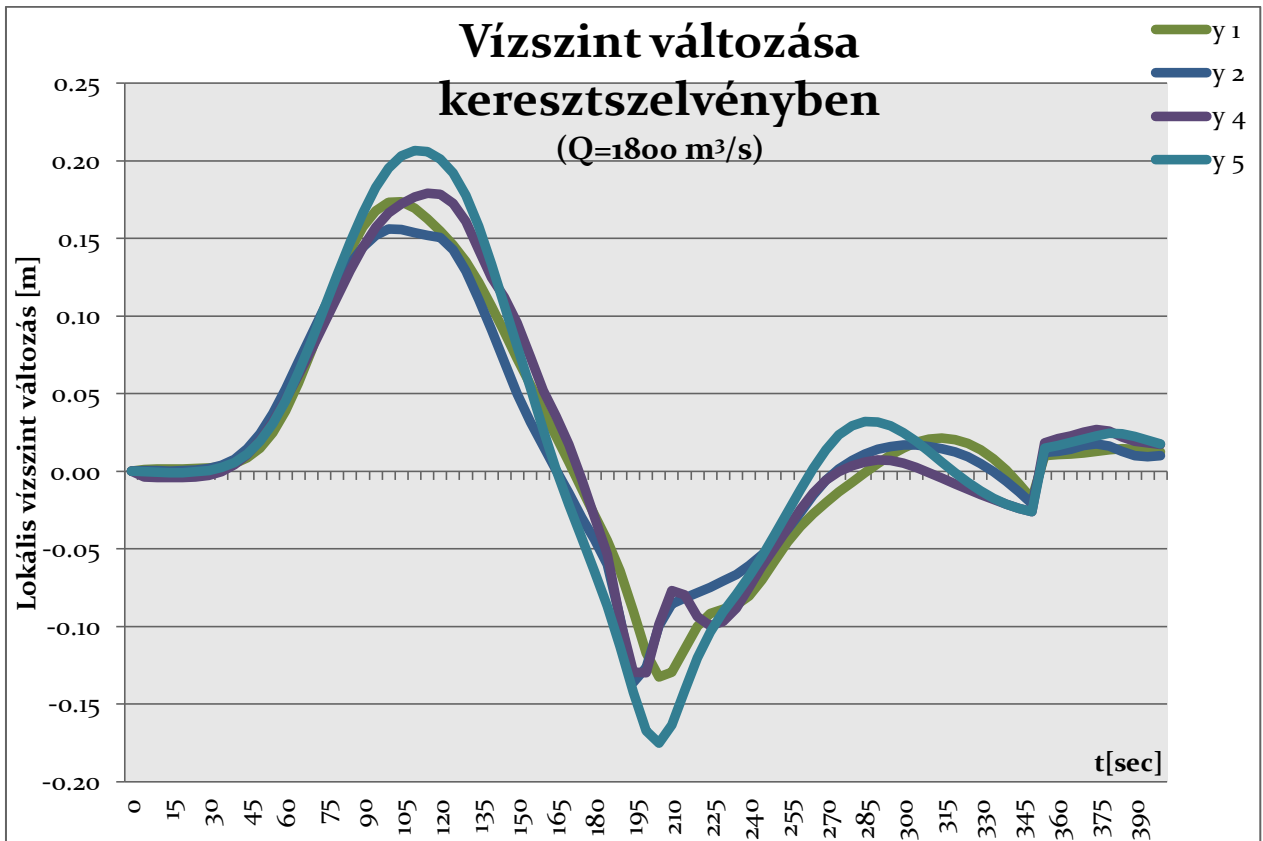
4.1. Hajó hegymenetben, Merülés 2.50m + Sebesség 2.40m/s



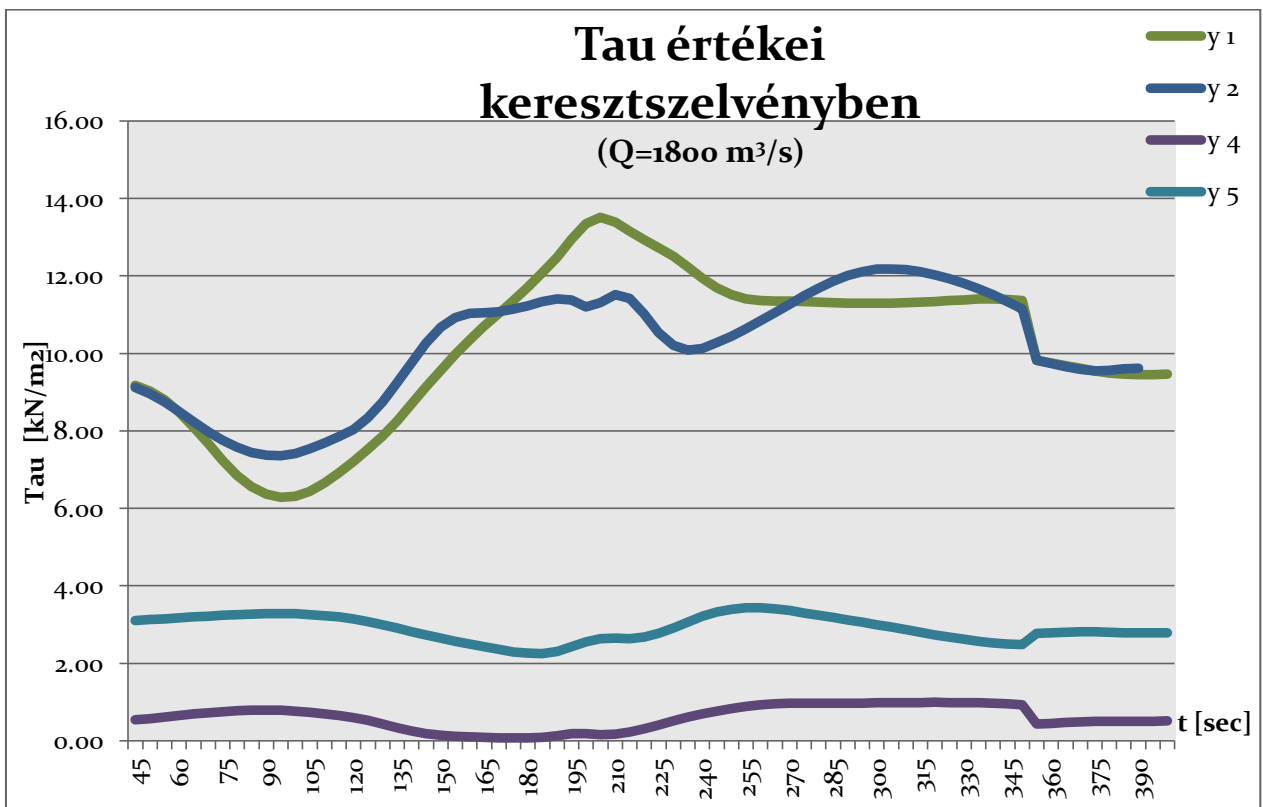
61. ábra Vízszint változás sarkantyúk között, tolt kötelék hegymenetben



62. ábra Tau értékei sarkantyúk között, tolt kötelék hegymenetben

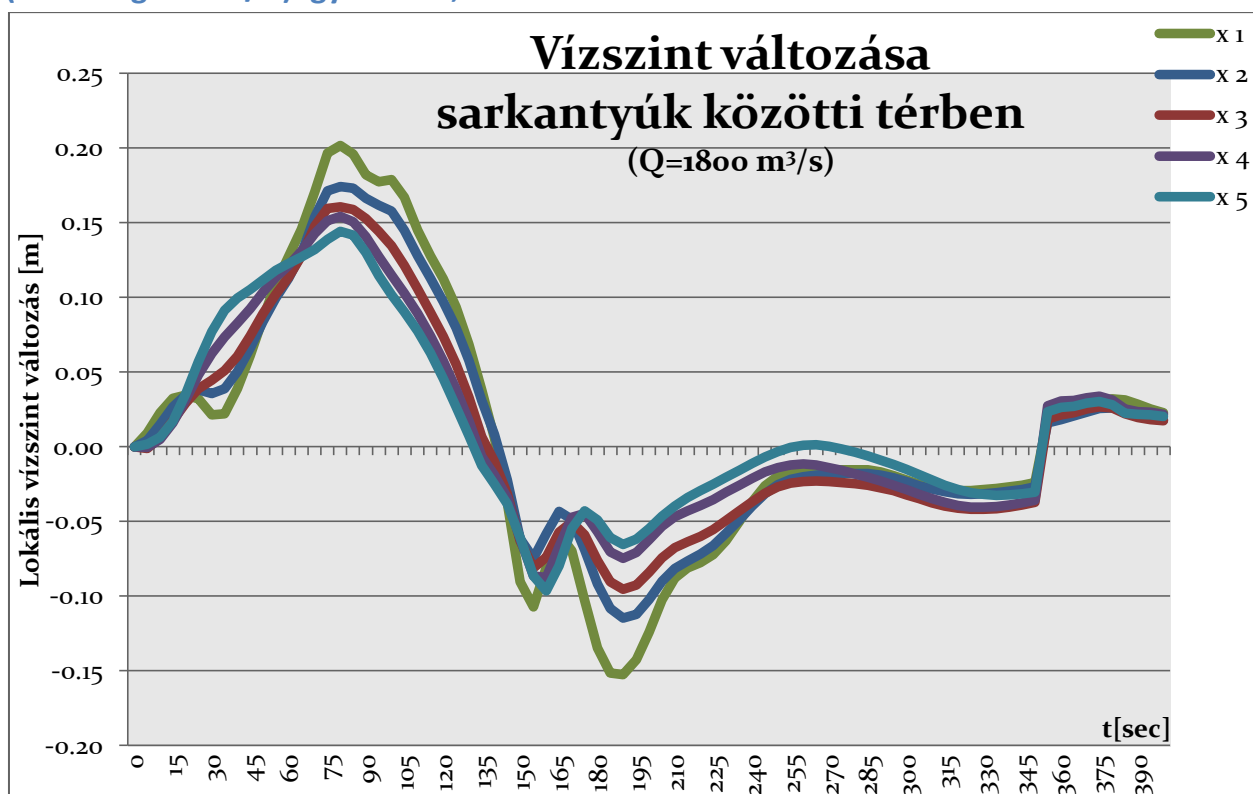


63. ábra Vízszint változás keresztmetszében, telt kötelék hegymenetben

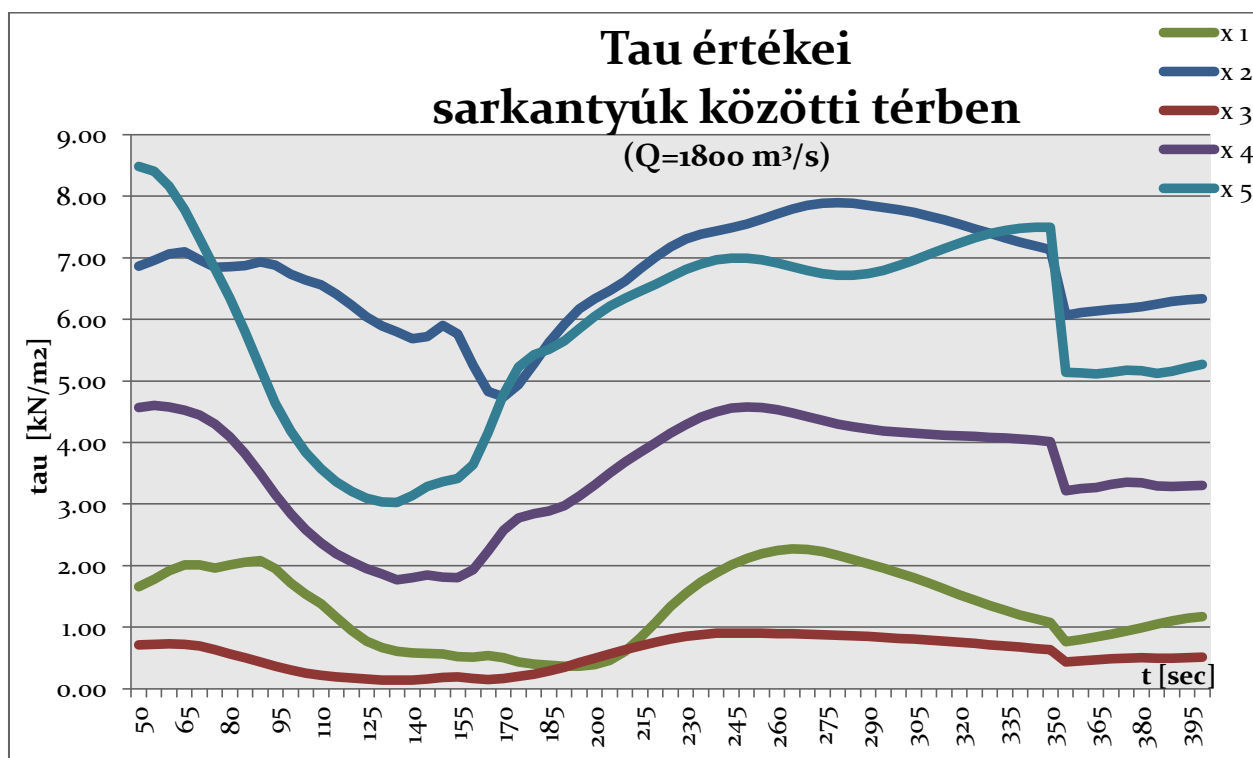


64. ábra Tau értékei keresztmetszében, telt kötelék hegymenetben

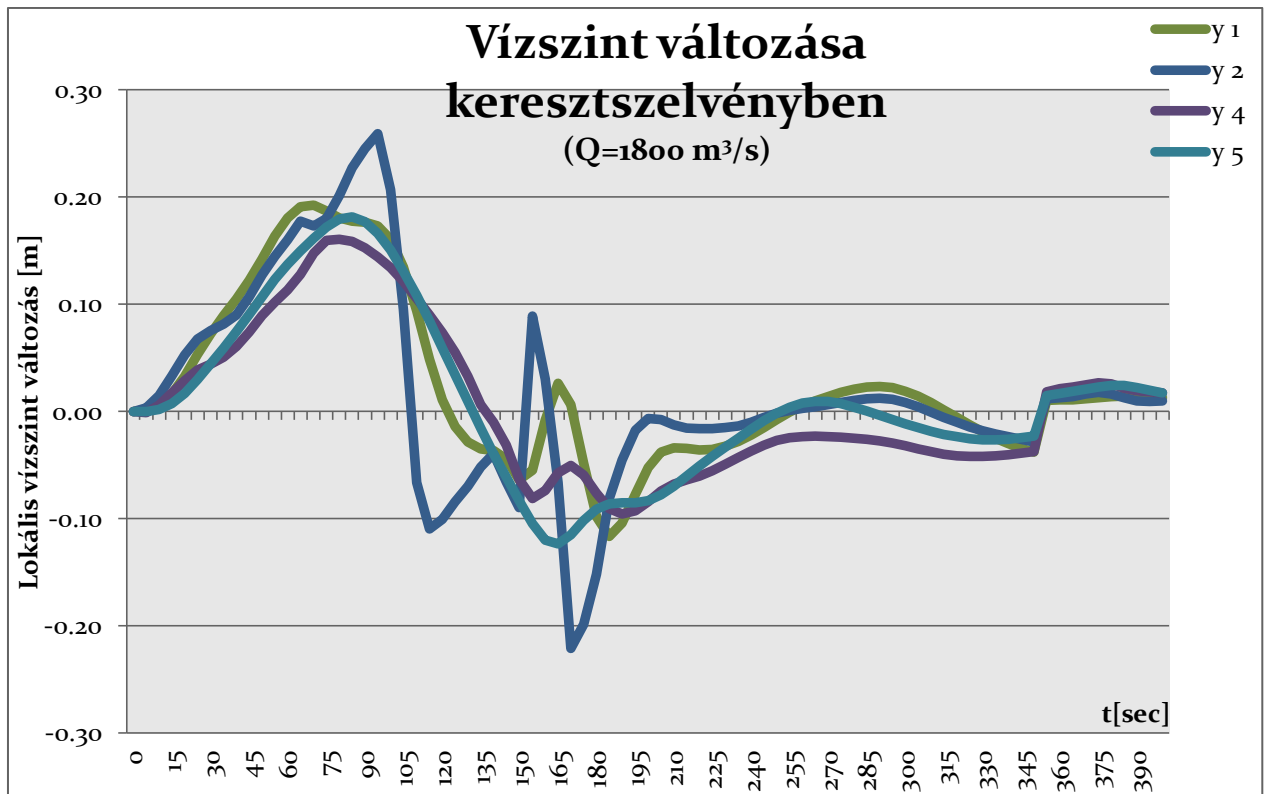
4.2. Tolt kötelék hegymenetben (Sebesség 2.40m/s) és tolt kötelék völgymenetben (Sebesség 2.60m/s) egy időben, Merülés 2.50m



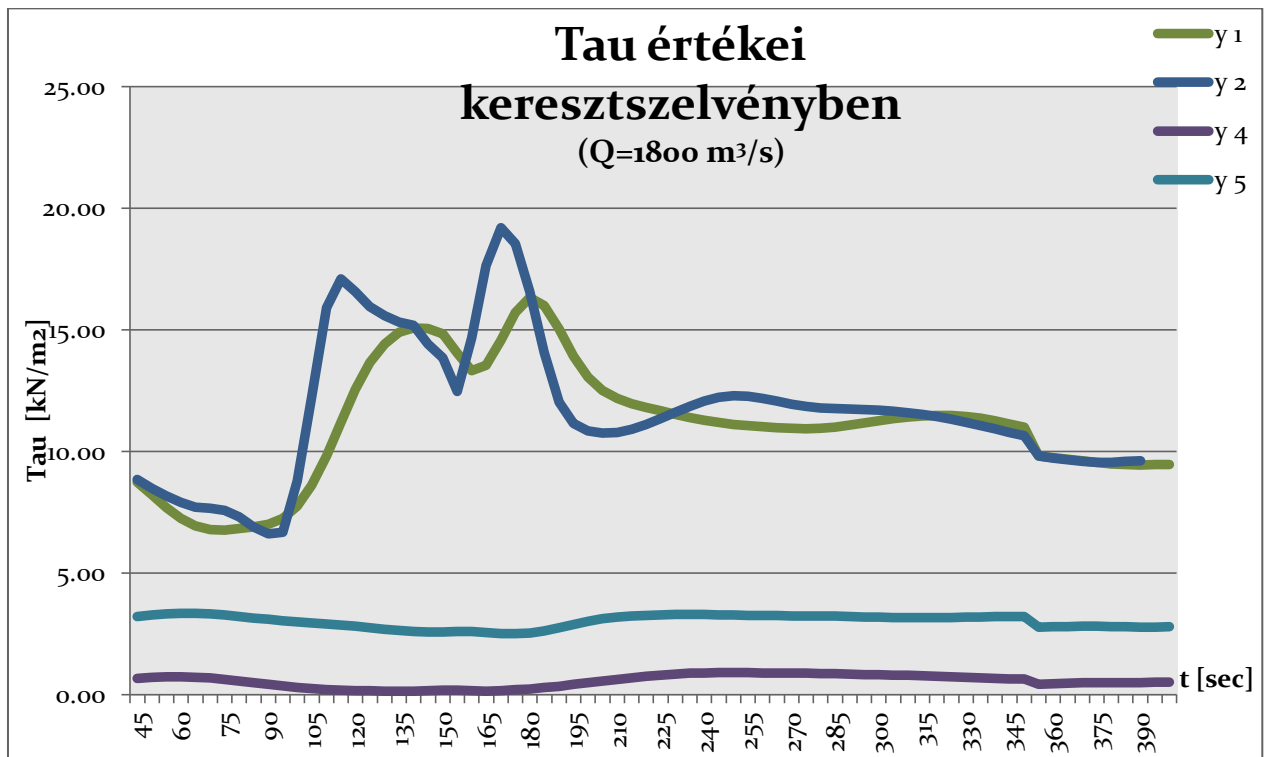
65. ábra Vízszint változás sarkantyúk között, hegy- és völgymeneti forgalom



66. ábra Tau értékei sarkantyúk között, hegy- és völgymeneti forgalom

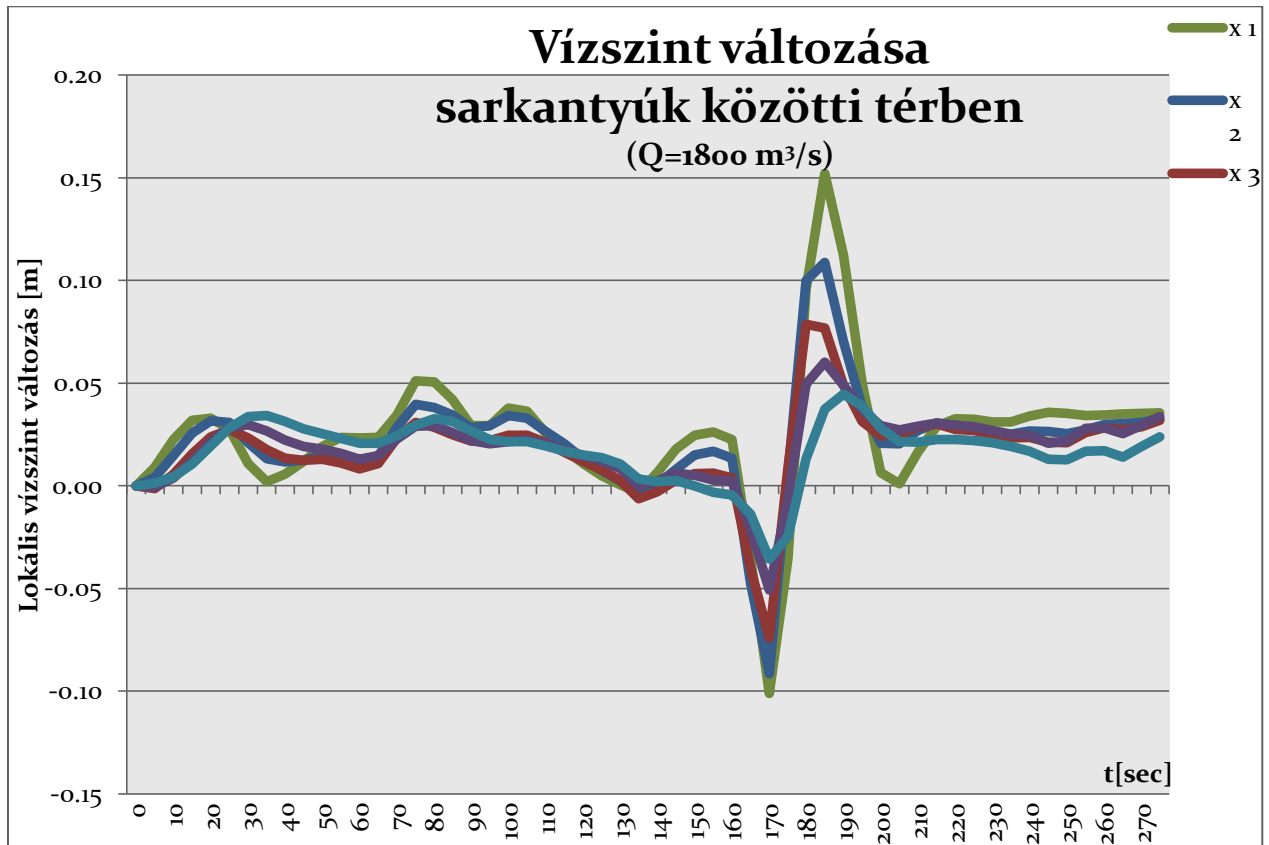


67. ábra Vízszint változás keresztmetszvényben, hegy- és völgymenti forgalom

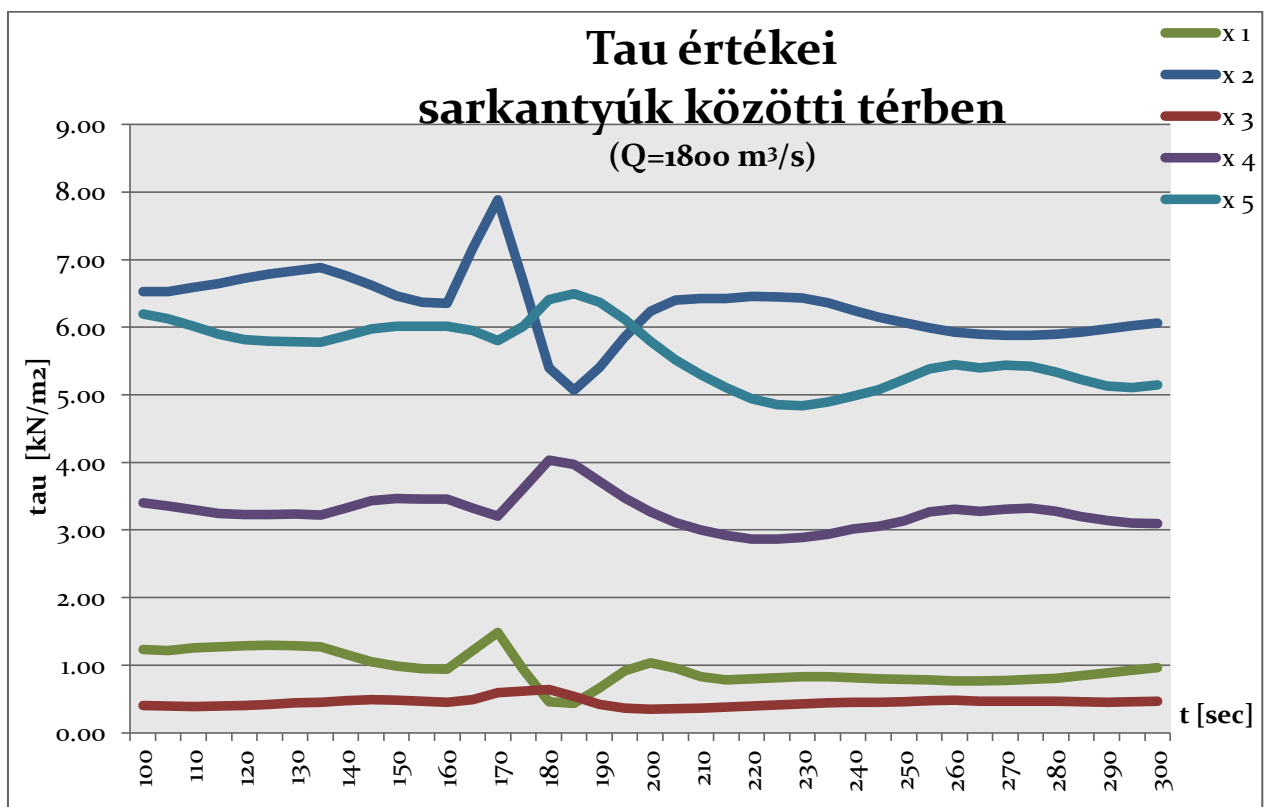


68. ábra Tau értékei keresztmetszvényben, hegy- és völgymenti forgalom

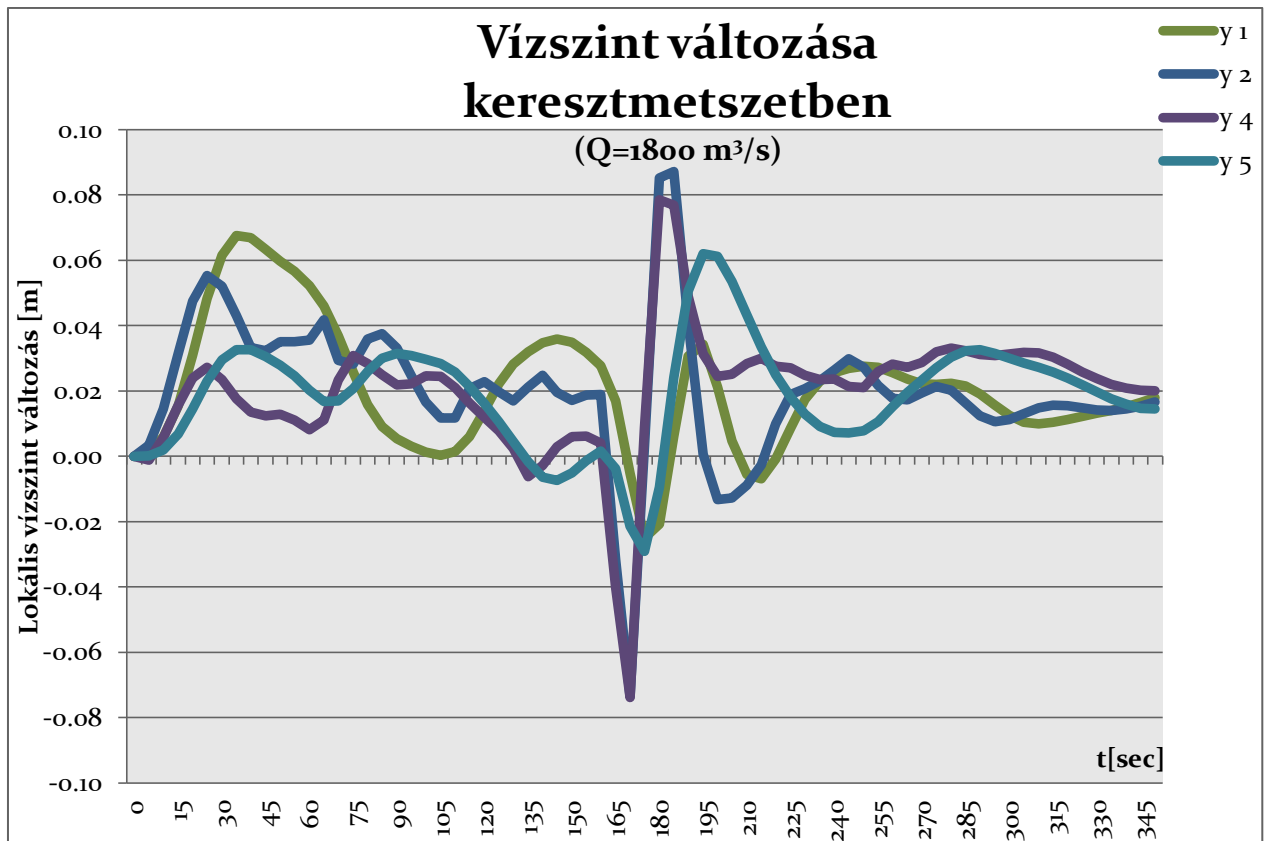
4.2. Két darab, egymást követő tolt kötelék völgyemenetben, Merülés 2.50m +
Sebesség 2.60m/s



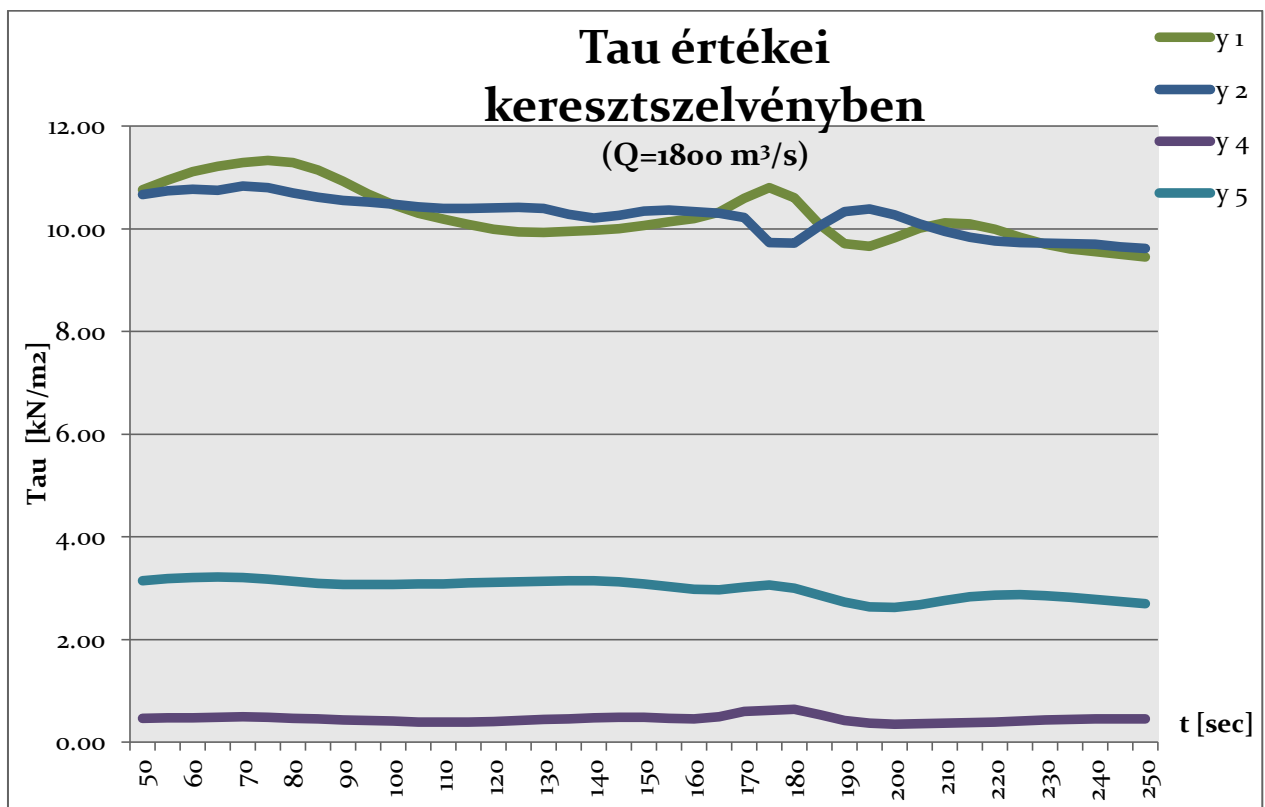
69. ábra Vízszint változás sarkantyúk között, két völgyemeneti tolatmány elhaladásakor



70. ábra Tau értékei sarkantyúk között, két völgyemeneti tolatmány elhaladásakor



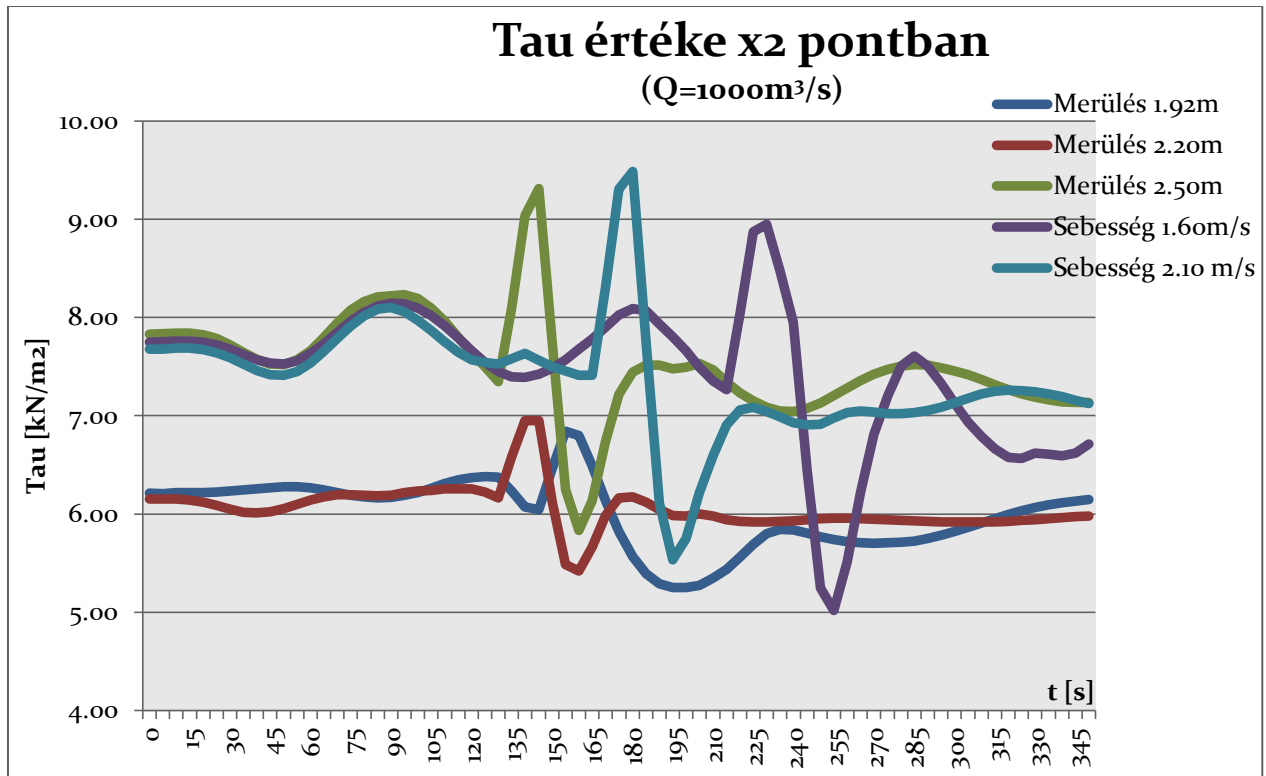
71. ábra Vízszint változás keresztmetszében, két völgyemeneti tolatmány elhaladásakor



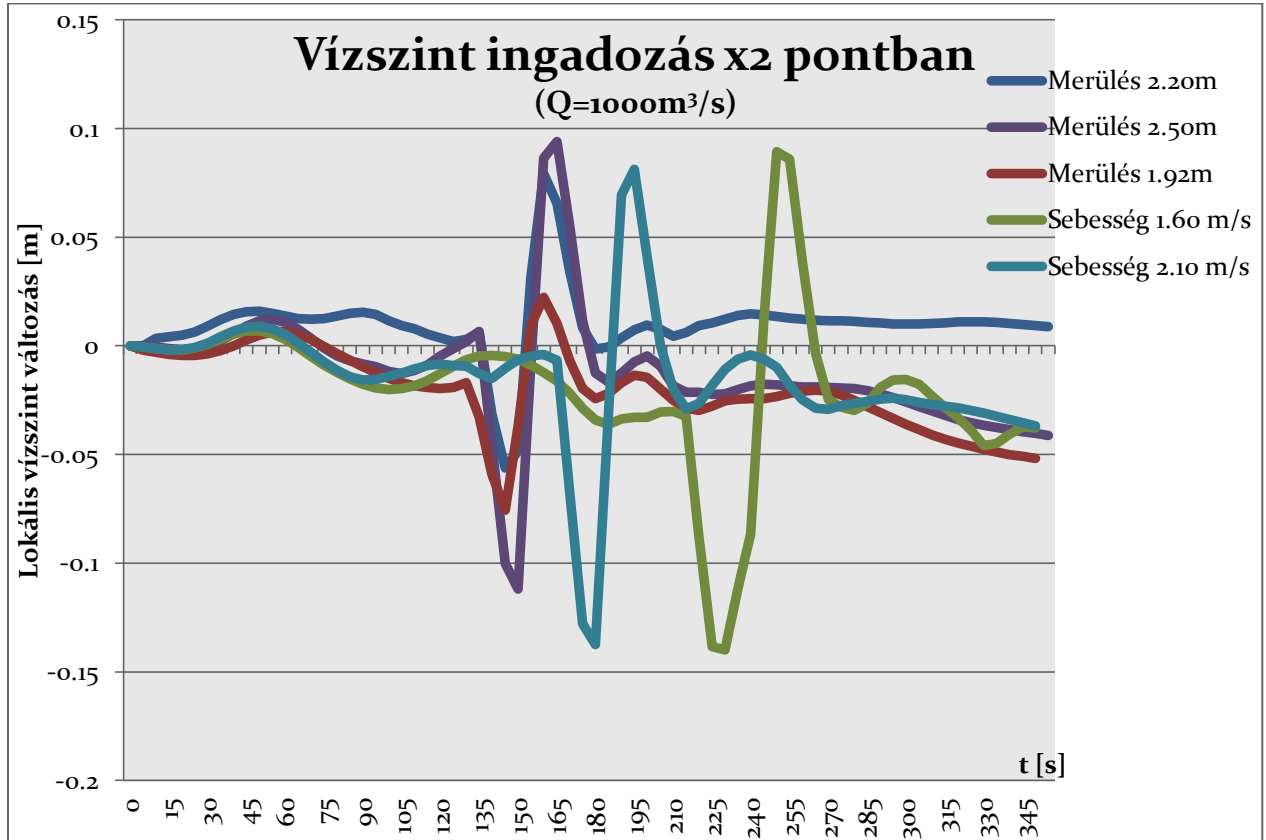
72. ábra Tau értékei keresztmetszében, két völgyemeneti tolatmány elhaladásakor

5. Eltérő futtatások eredményeinek ábrázolása x_2 és y_2 pontokban

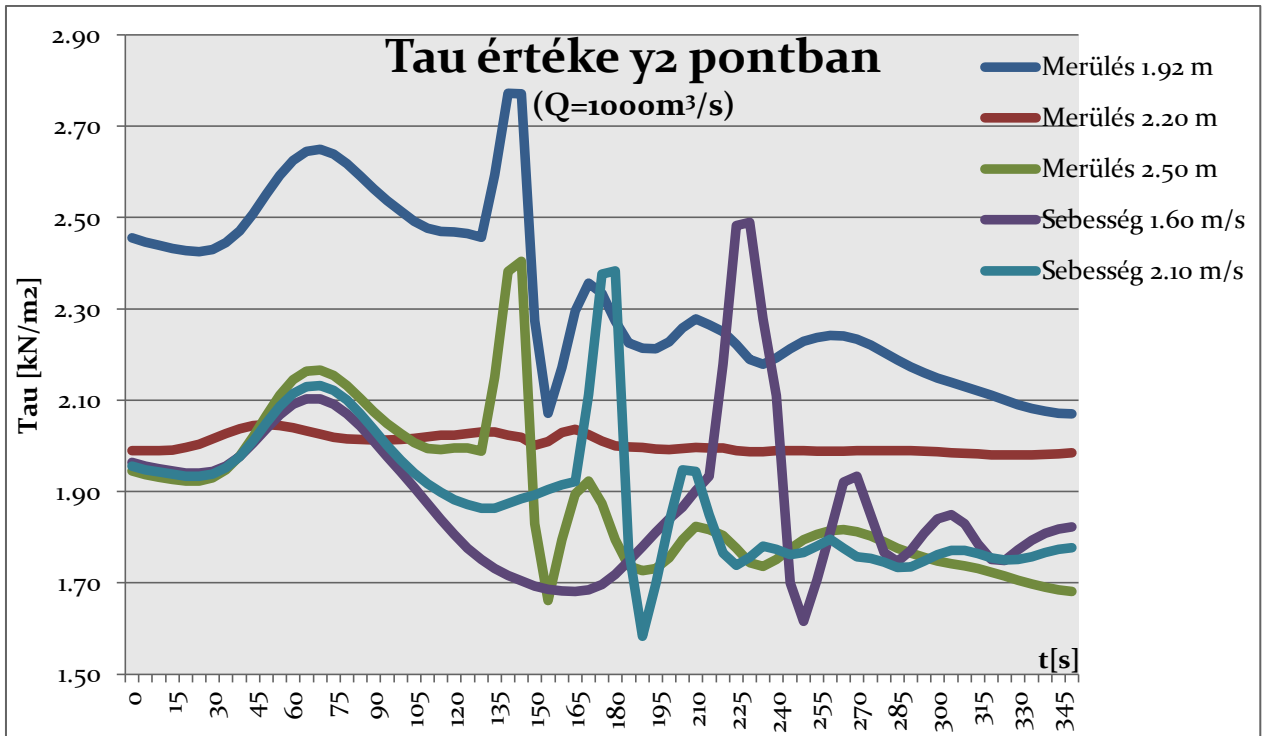
5.1. $Q=1000\text{m}^3/\text{s}$ vízhozam mellett



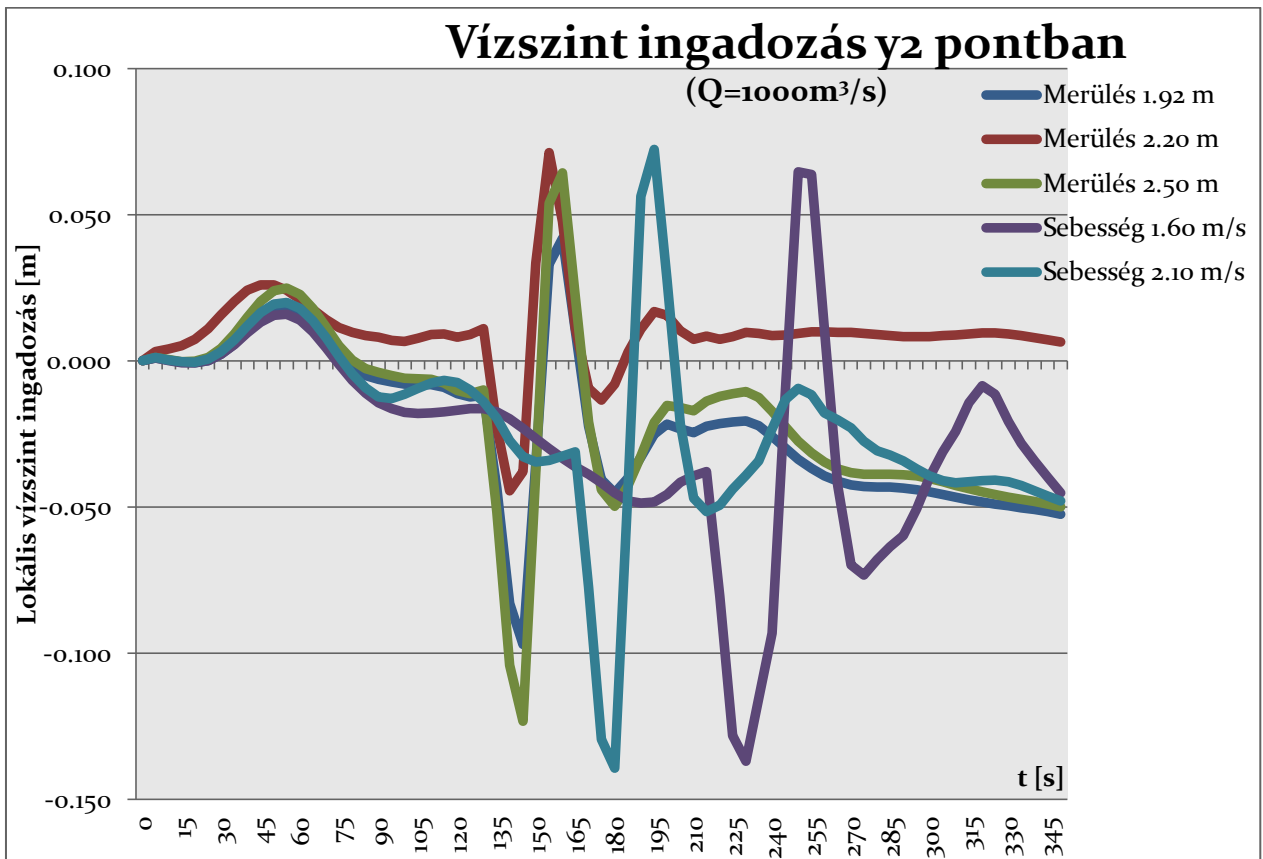
73. ábra Tau értéke x_2 pontban ; $Q=1000\text{m}^3/\text{s}$



74. ábra Vízszint ingadozás x_2 pontban ; $Q=1000\text{m}^3/\text{s}$

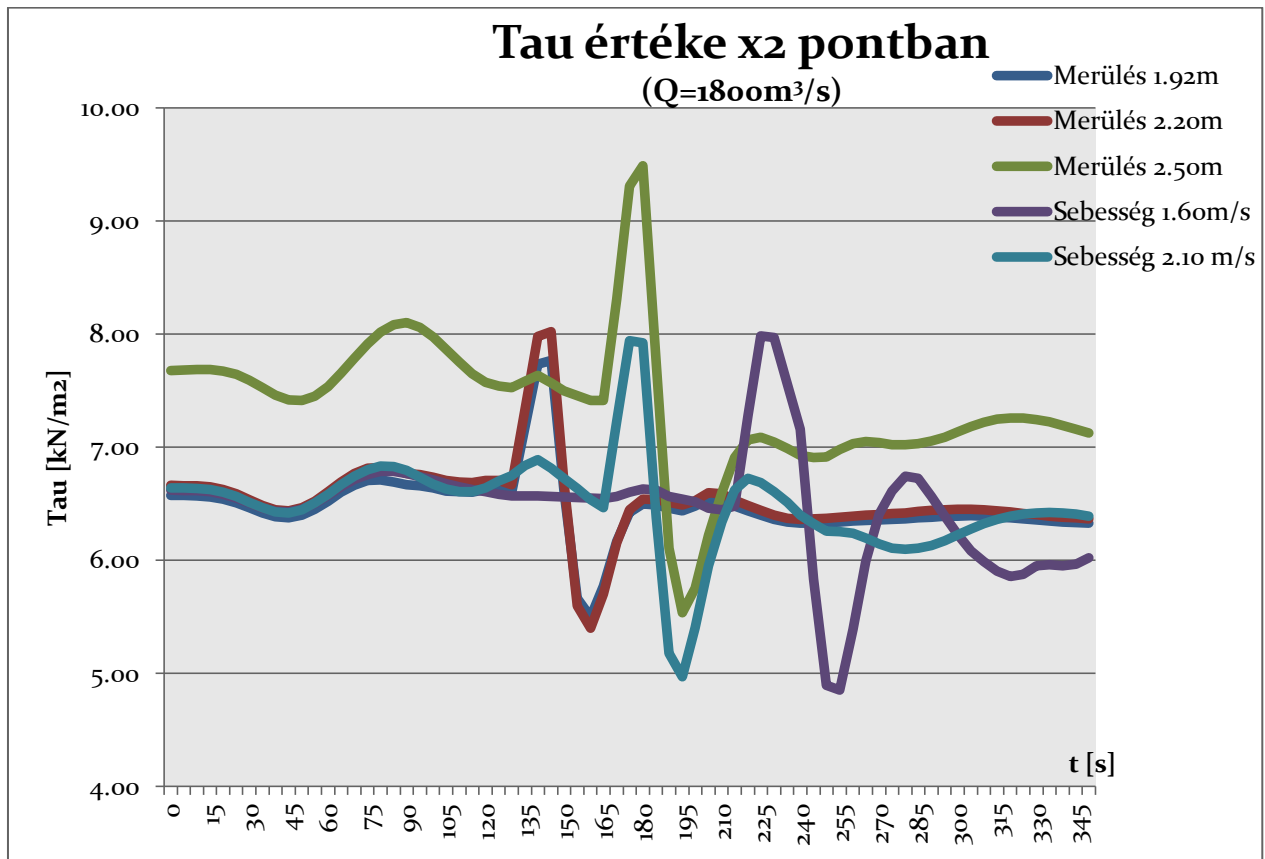


75. ábra Tau értéke y2 pontban ; $Q=1000\text{m}^3/\text{s}$

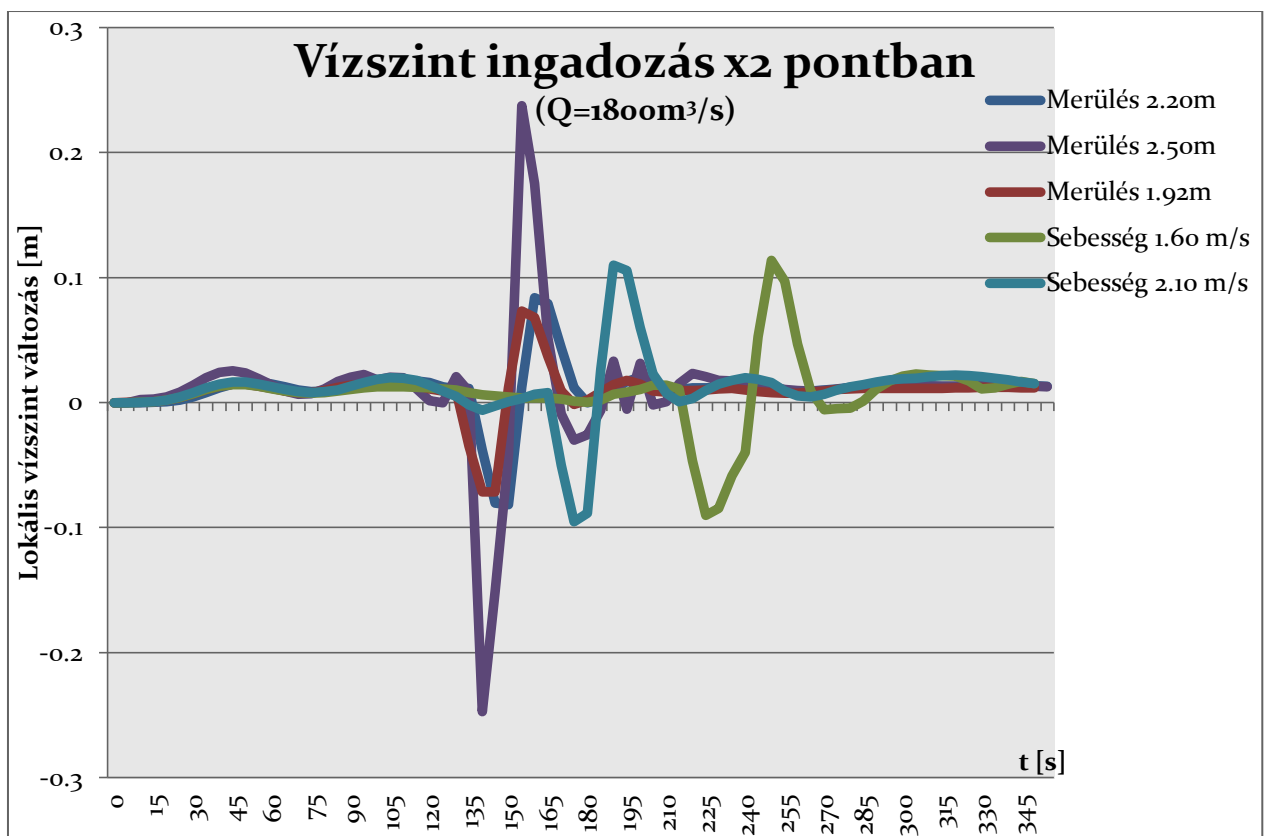


76. ábra Vízszint ingadozás y2 pontban ; $Q=1000\text{m}^3/\text{s}$

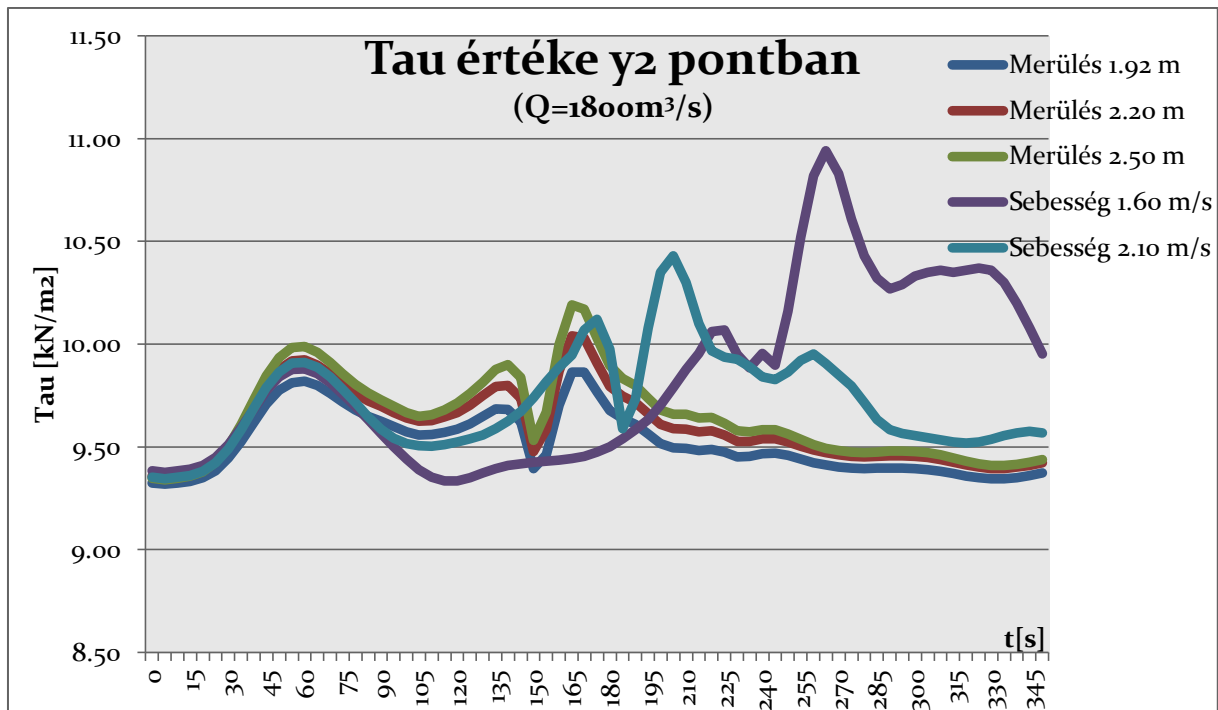
5.2. $Q=1800\text{m}^3/\text{s}$ vízhozam mellett



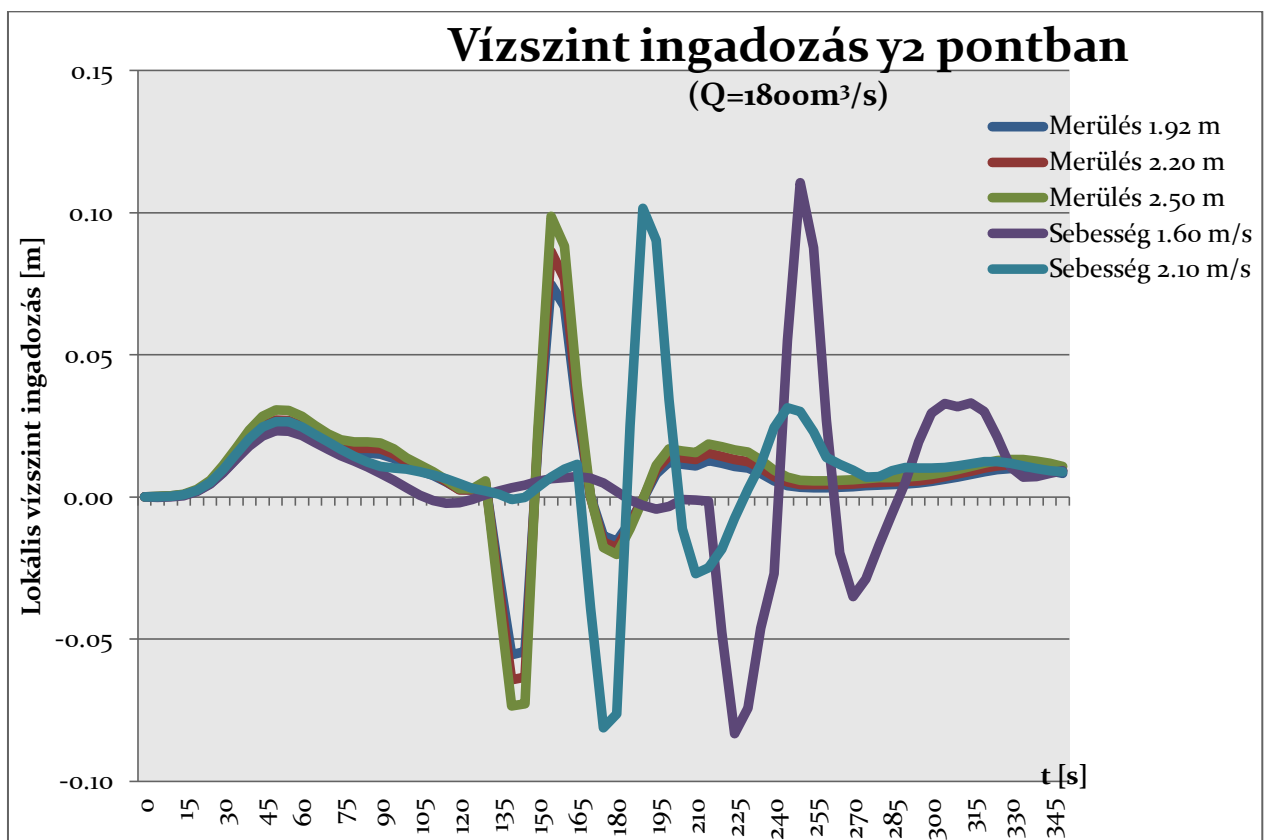
77. ábra Tau értéke x2 pontban ; $Q=1800\text{m}^3/\text{s}$



78. ábra Vízszint ingadozás x2 pontban ; $Q=1800\text{m}^3/\text{s}$

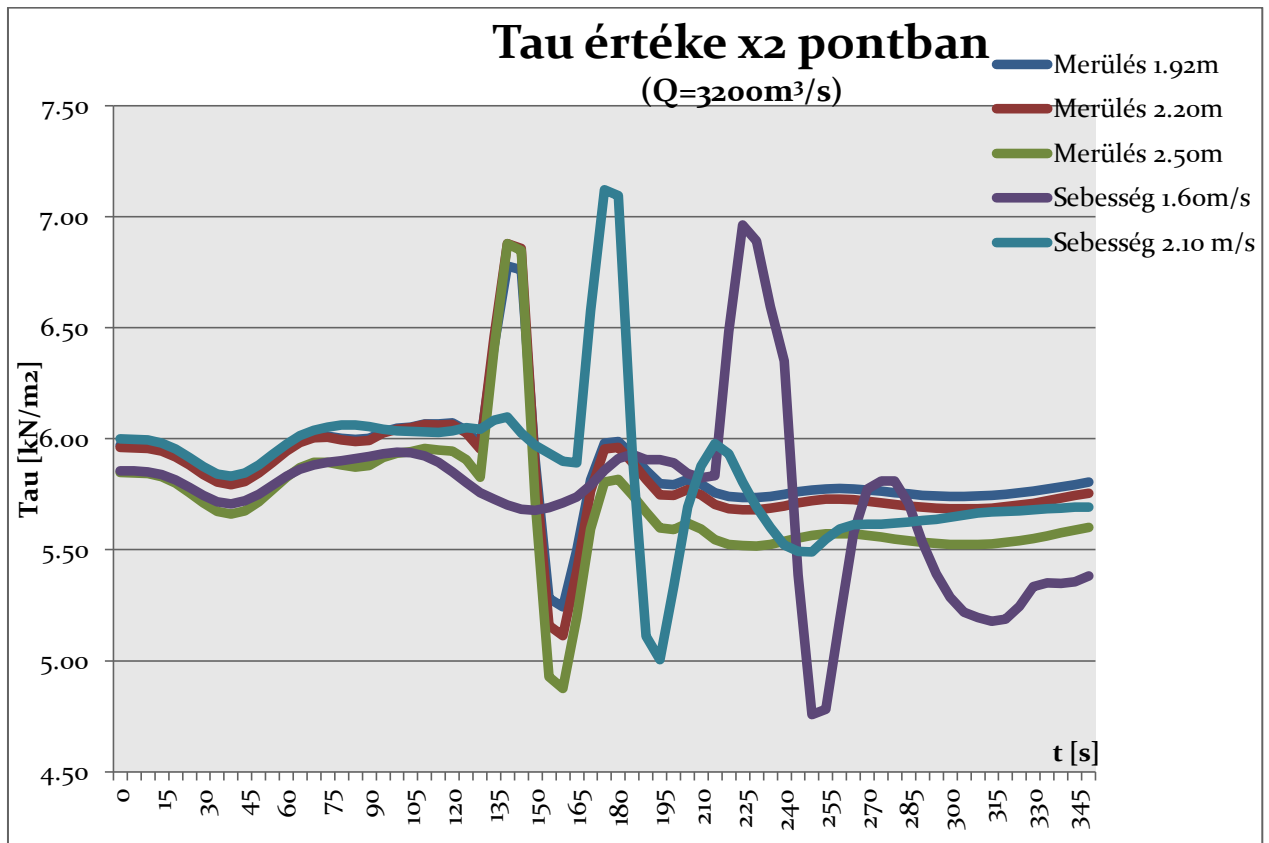


79. ábra Tau értéke y2 pontban ; $Q=1800\text{m}^3/\text{s}$

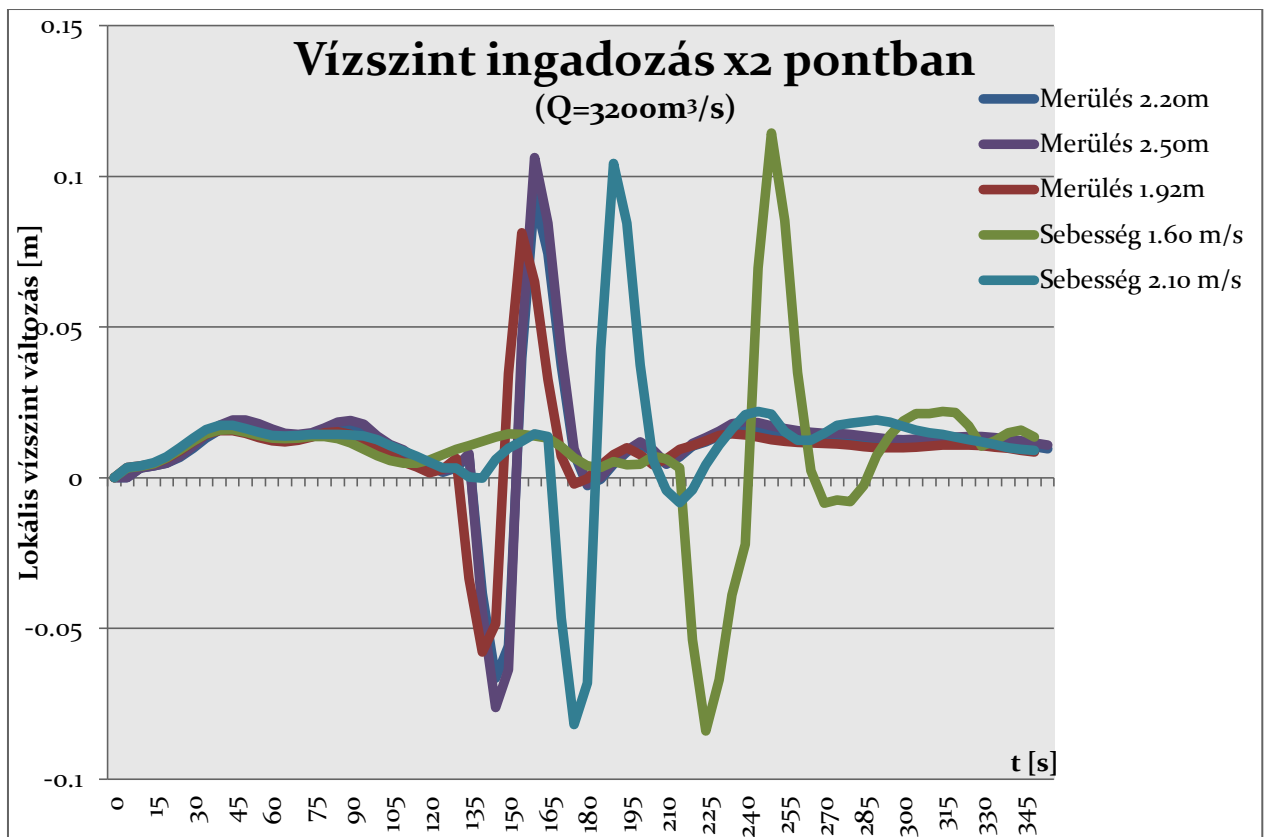


80. ábra Vízszint ingadozás y2 pontban ; $Q=1800\text{m}^3/\text{s}$

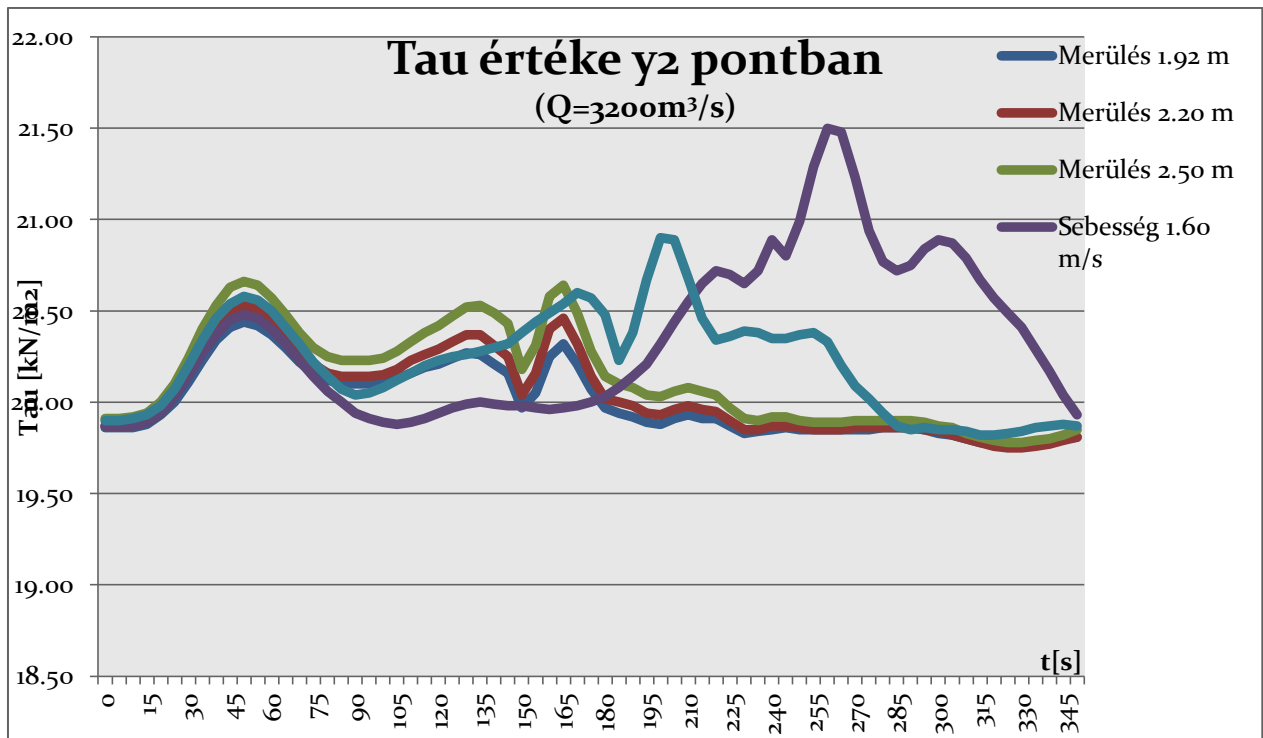
5.3. $Q=3200\text{m}^3/\text{s}$ vízhozam mellett



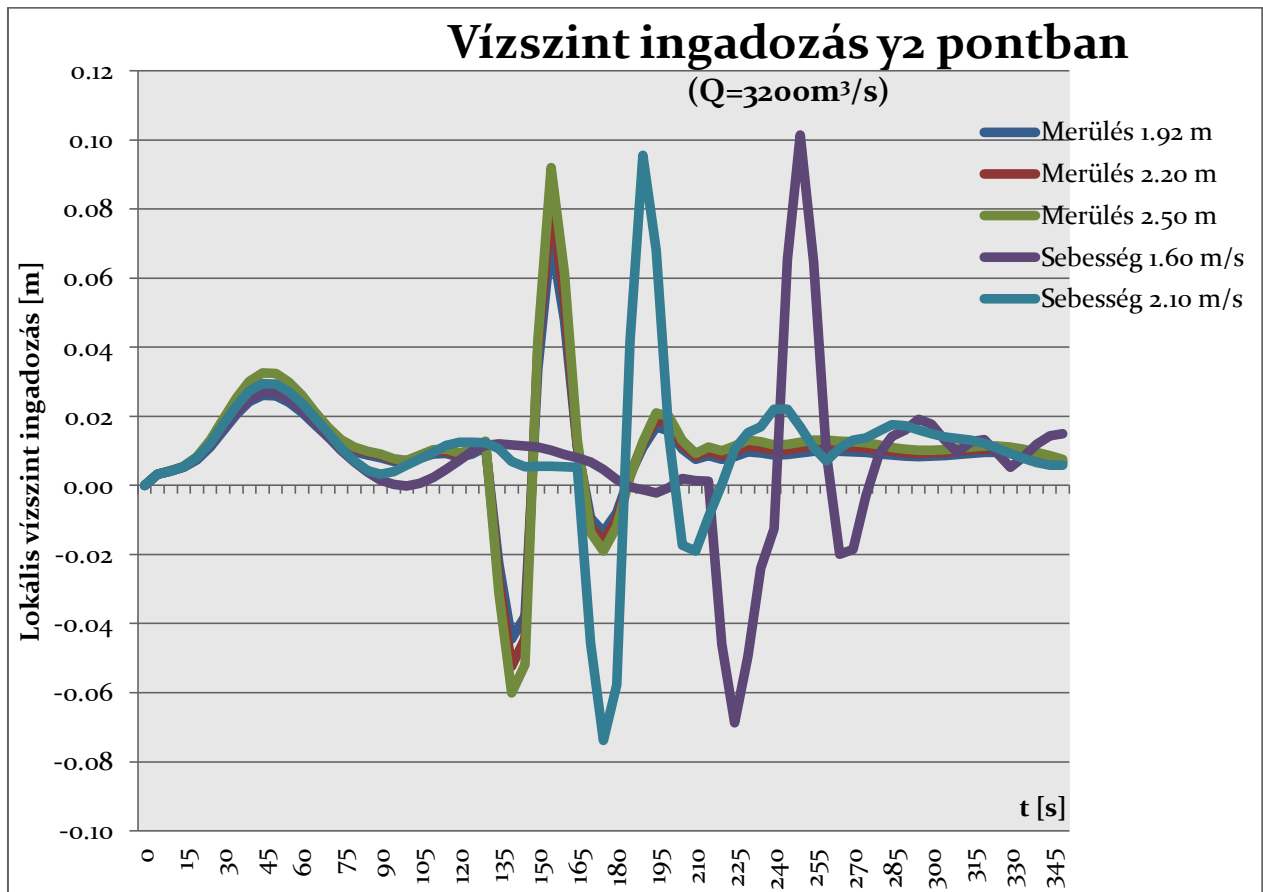
81. ábra Tau értéke x2 pontban ; $Q=3200\text{m}^3/\text{s}$



82. ábra Vízszint ingadozás x2 pontban ; $Q=3200\text{m}^3/\text{s}$



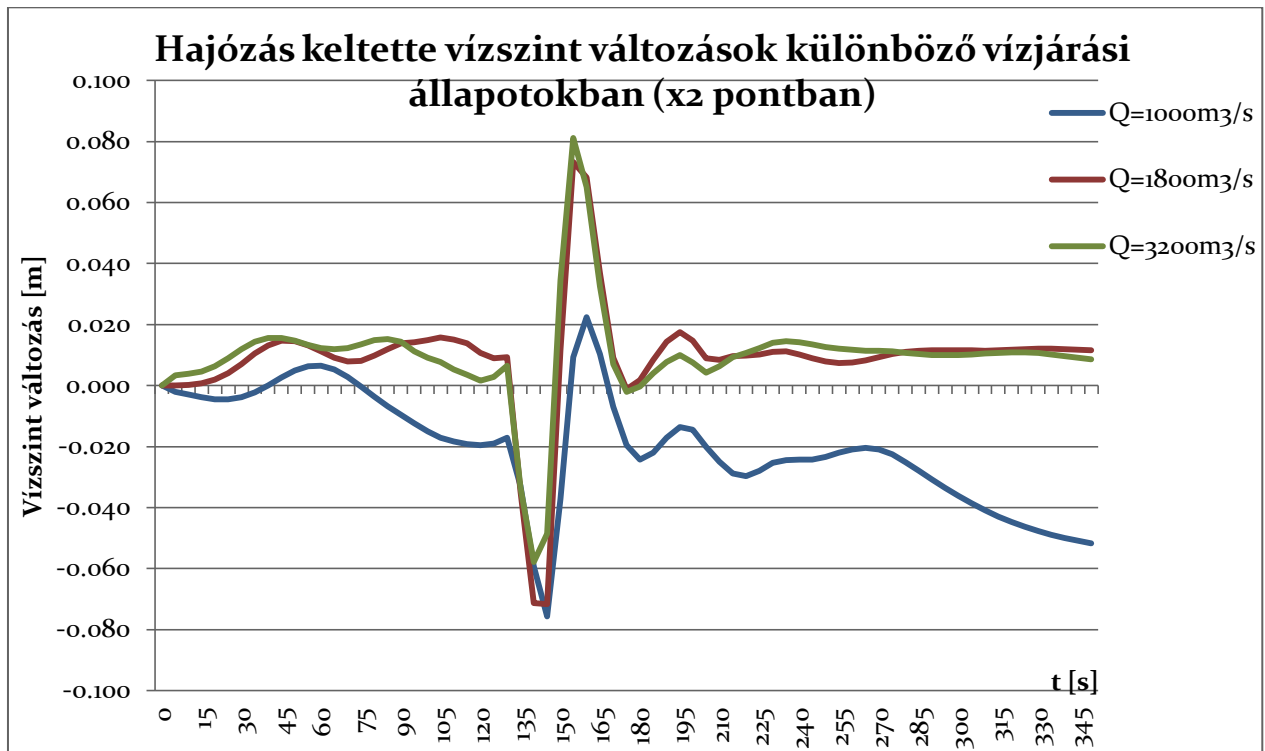
83. ábra Tau értéke y2 pontban ; $Q=3200\text{m}^3/\text{s}$



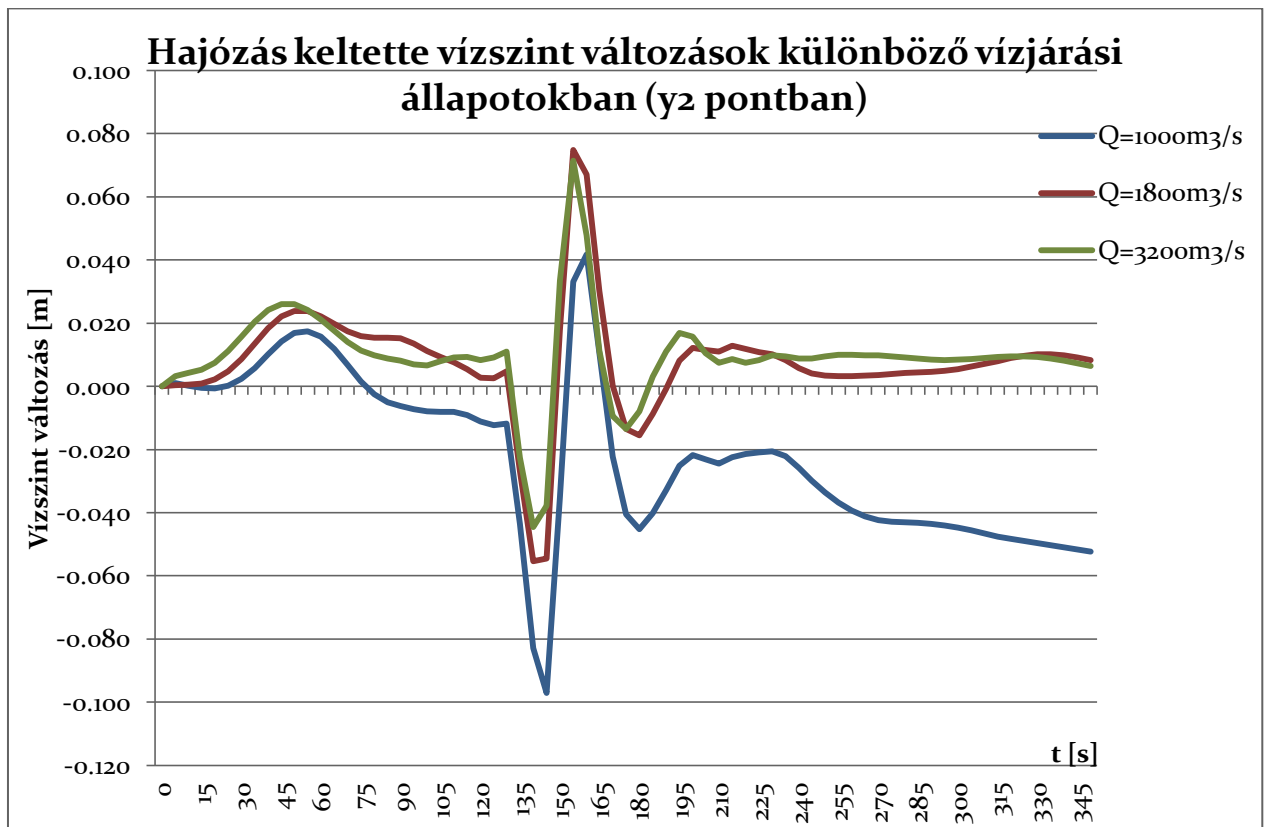
84. ábra Vízszint ingadozás y2 pontban ; $Q=3200\text{m}^3/\text{s}$

6. Maximális τ és vízszint ingadozás értékek eltérő vízhozamok esetén x_2 és y_2 pontokban

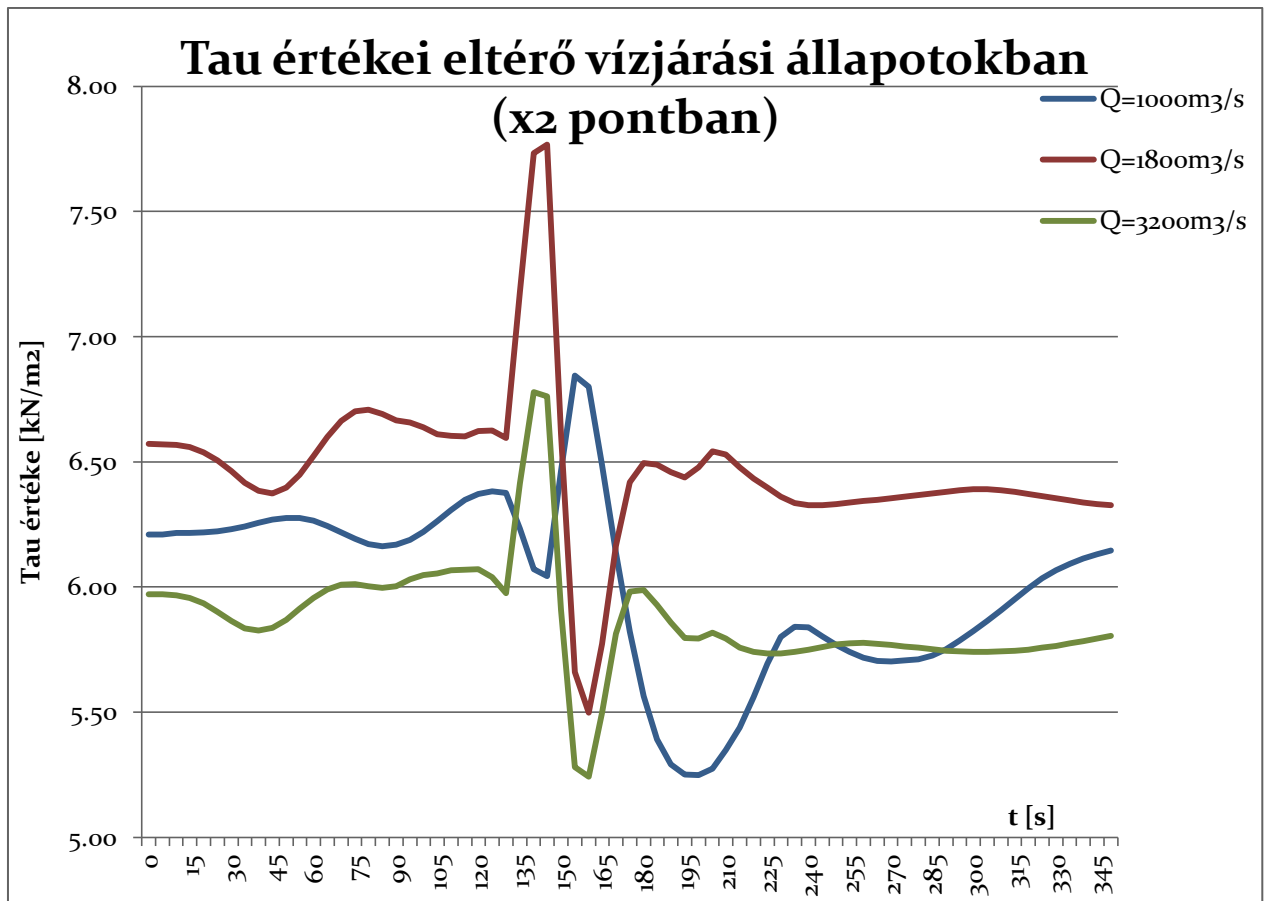
6.1. Merülés 1.92m + Sebesség 2.60m/s



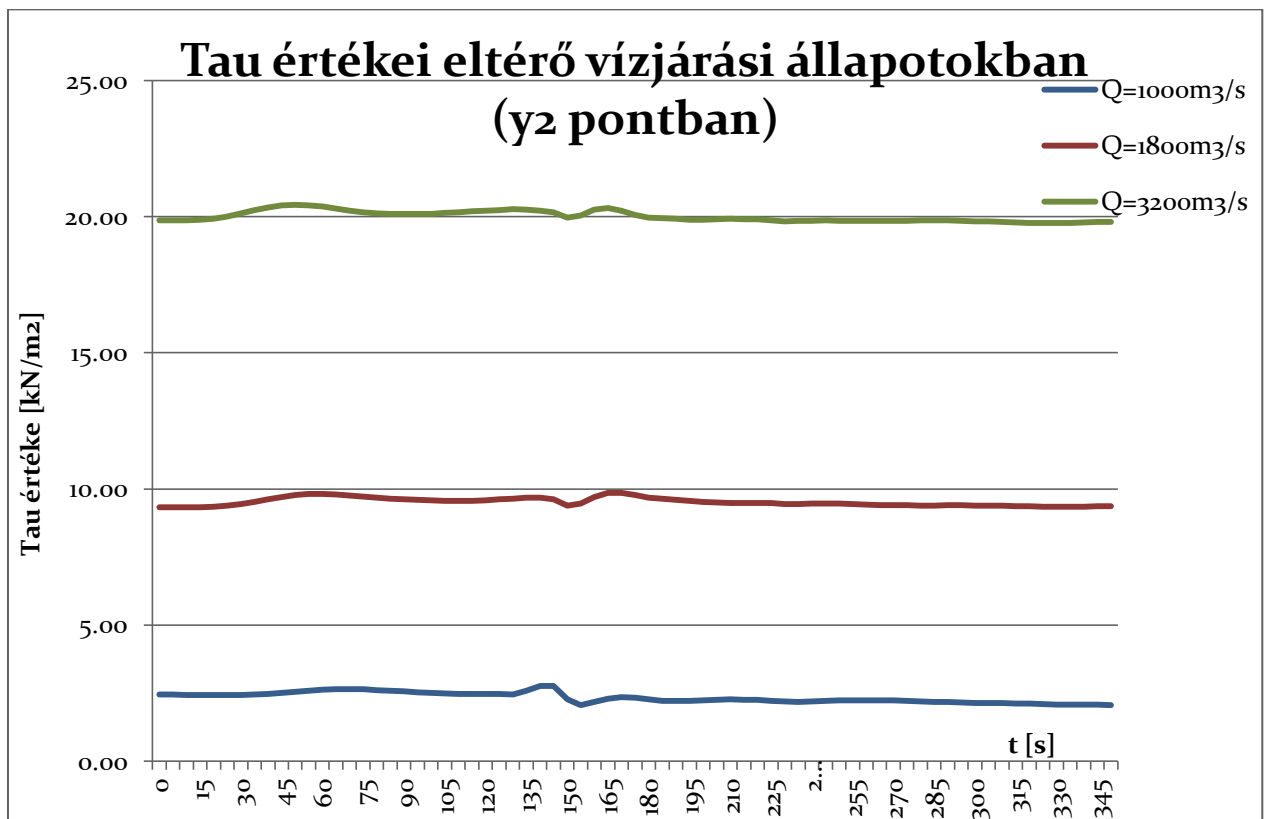
85. ábra Vízjárások vízszint ingadozásai x_2 pontban ; Drft 1.92m + $v=2.60\text{m/s}$



86. ábra Vízjárások vízszint ingadozásai y_2 pontban ; Drft 1.92m + $v=2.60\text{m/s}$

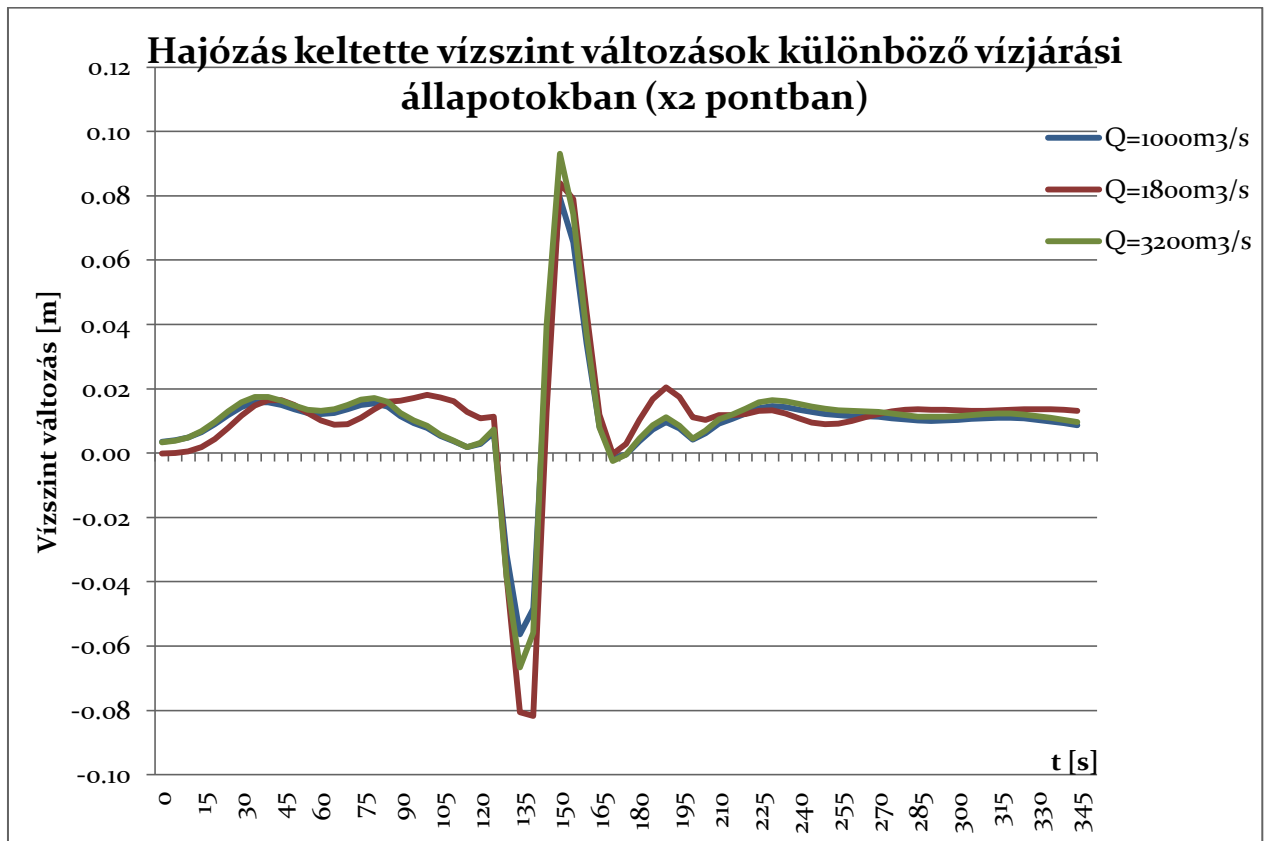


87. ábra Tau értékek ingadozásai x2 pontban ; Drft 1.92m + v=2.60m/s

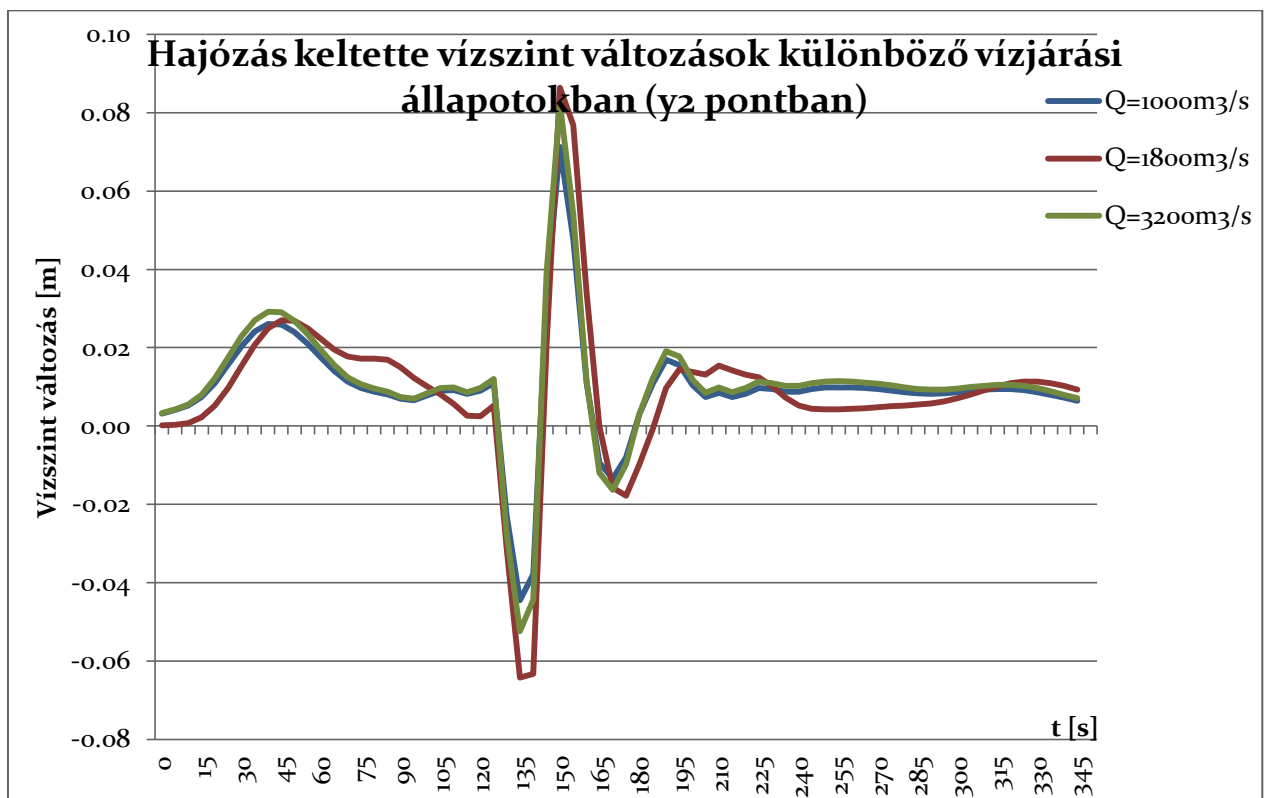


88. ábra Vízjárások vízszint ingadozásai y2 pontban ; Drft 1.92m + v=2.60m/s

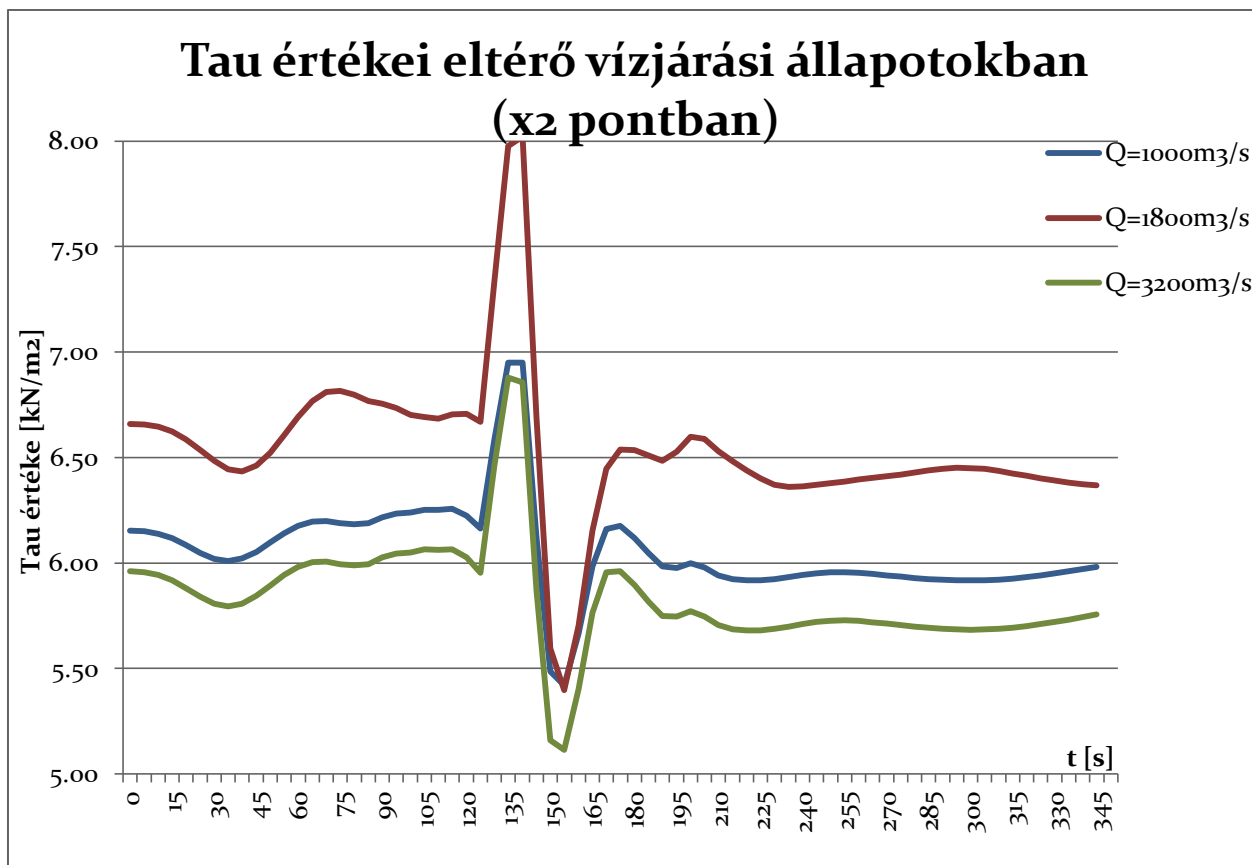
6.2. Merülés 2.20m + Sebesség 2.60m/s



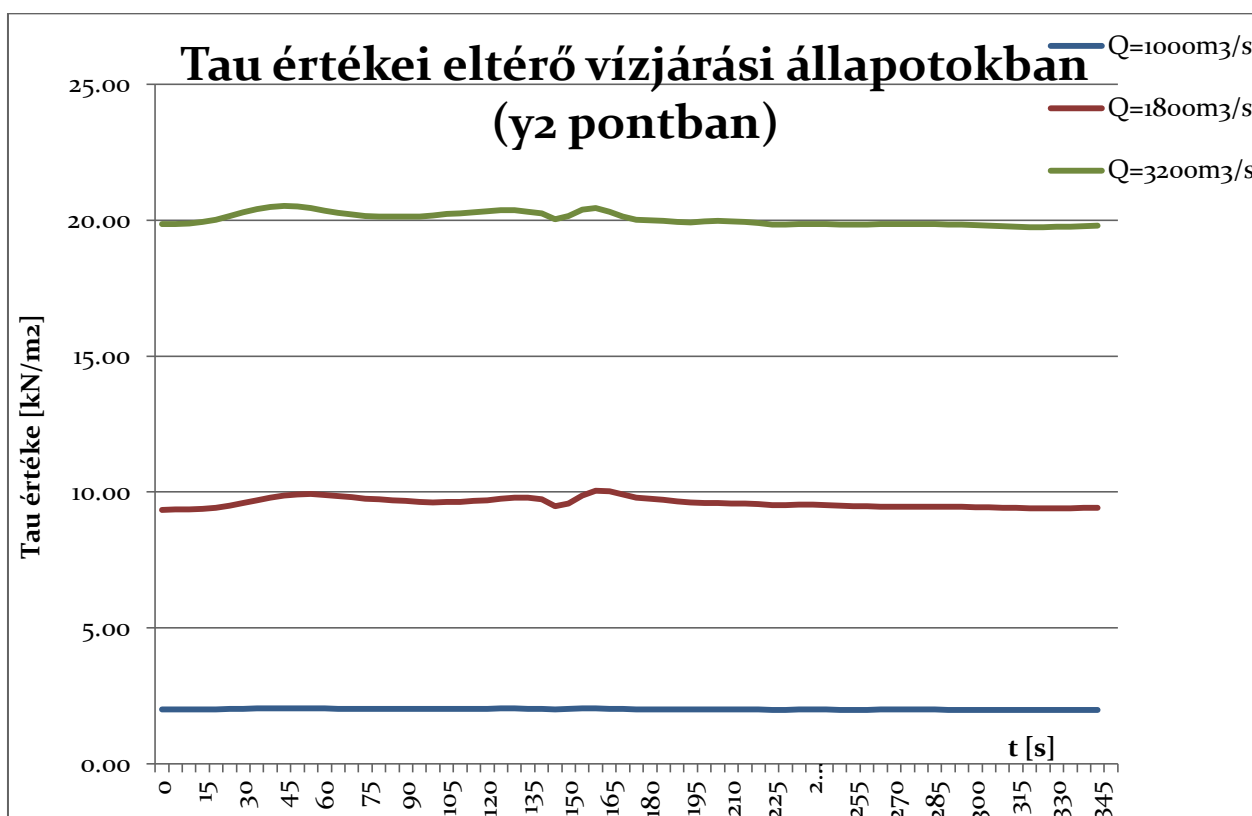
89. ábra Vízjárások vízszint ingadozásai x2 pontban ; Drft 2.20m + v=2.60m/s



90. ábra Vízjárások vízszint ingadozásai y2 pontban ; Drft 2.20m + v=2.60m/s

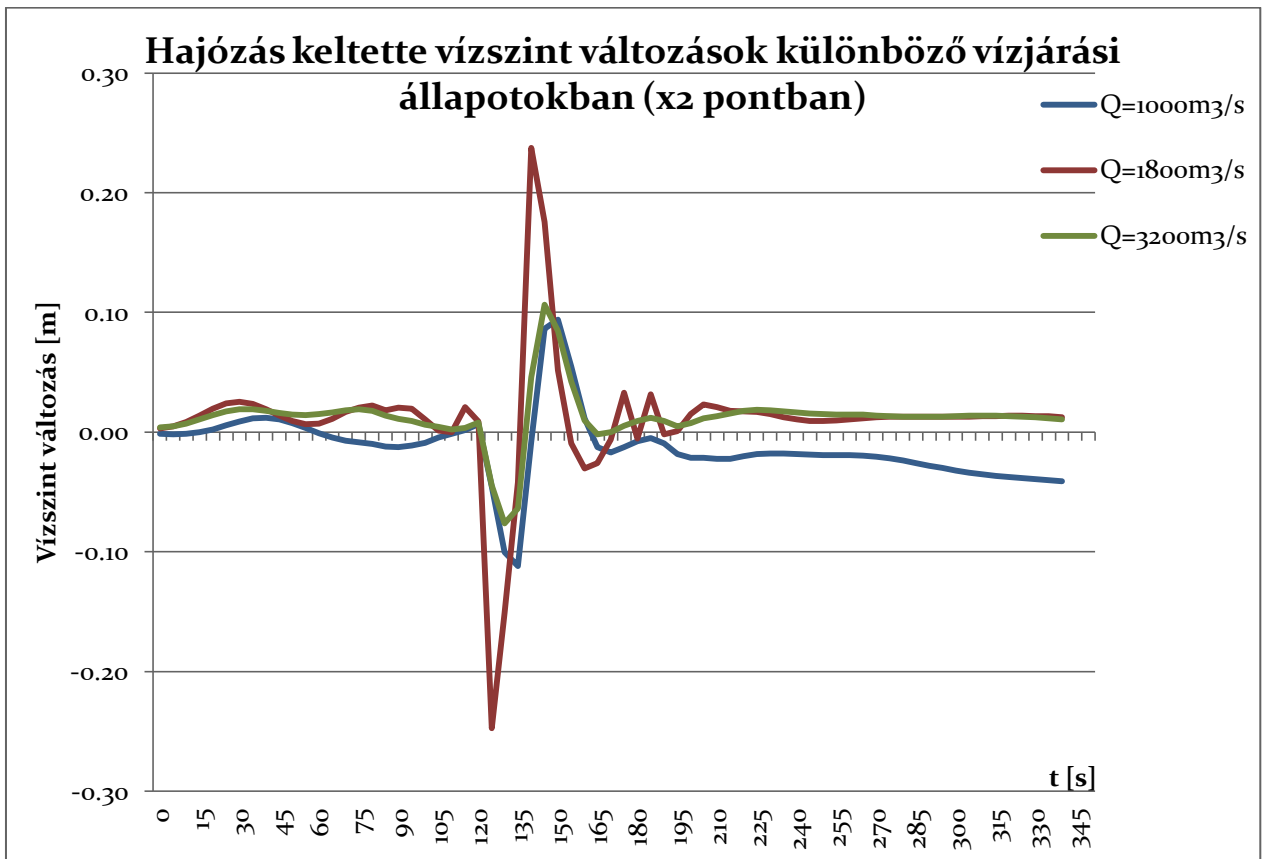


91. ábra Vízjárások vízszint ingadozásai x2 pontban ; Drft 2.20m + v=2.60m/s

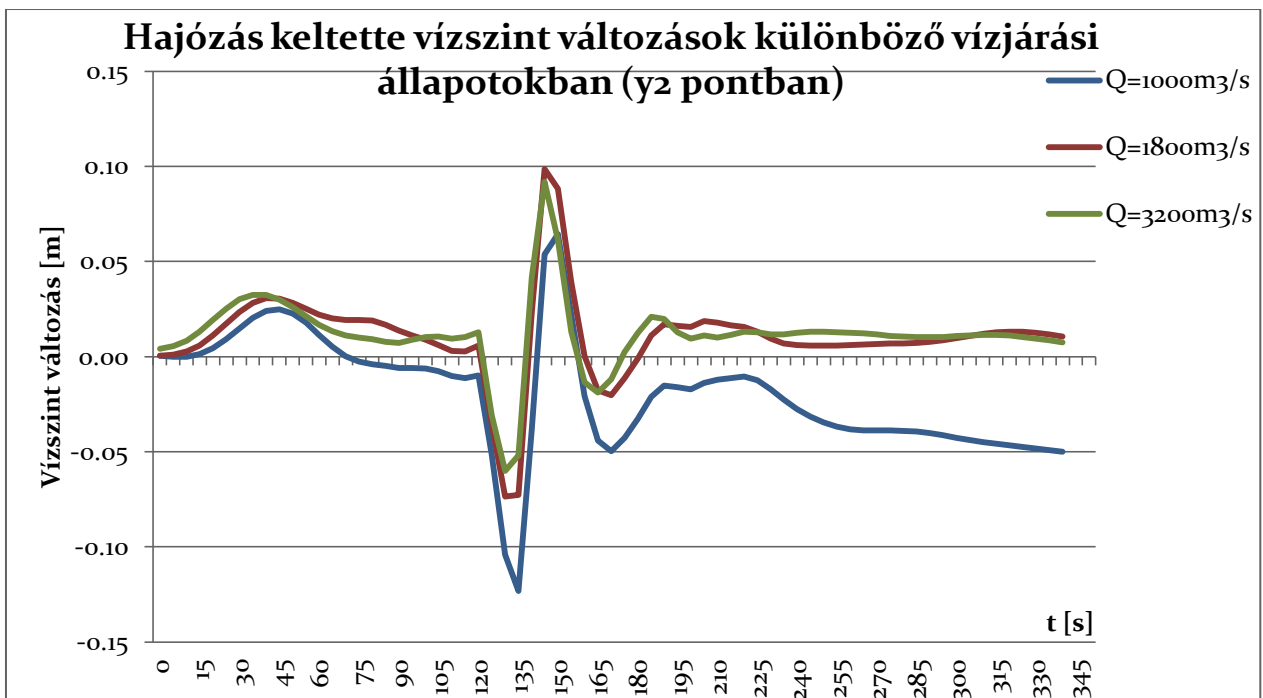


92. ábra Vízjárások vízszint ingadozásai y2 pontban ; Drft 2.20m + v=2.60m/s

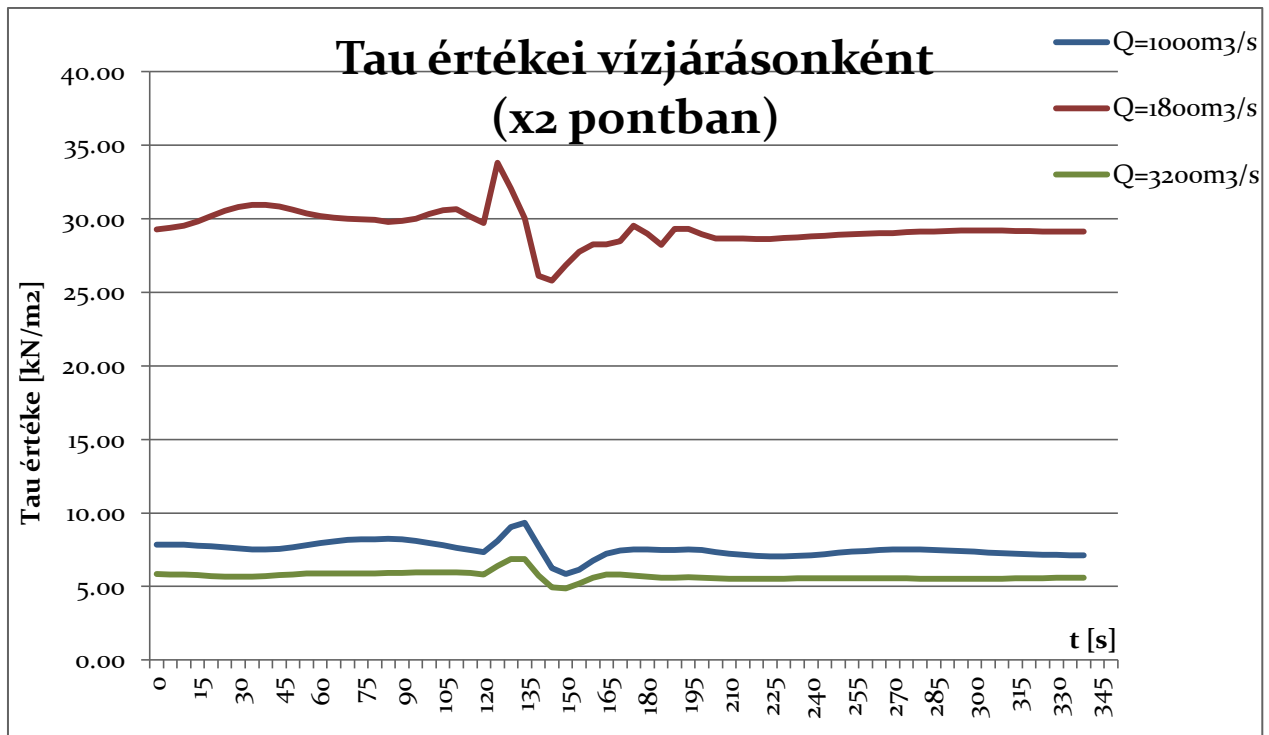
6.3. Merülés 2.50m + Sebesség 2.60m/s



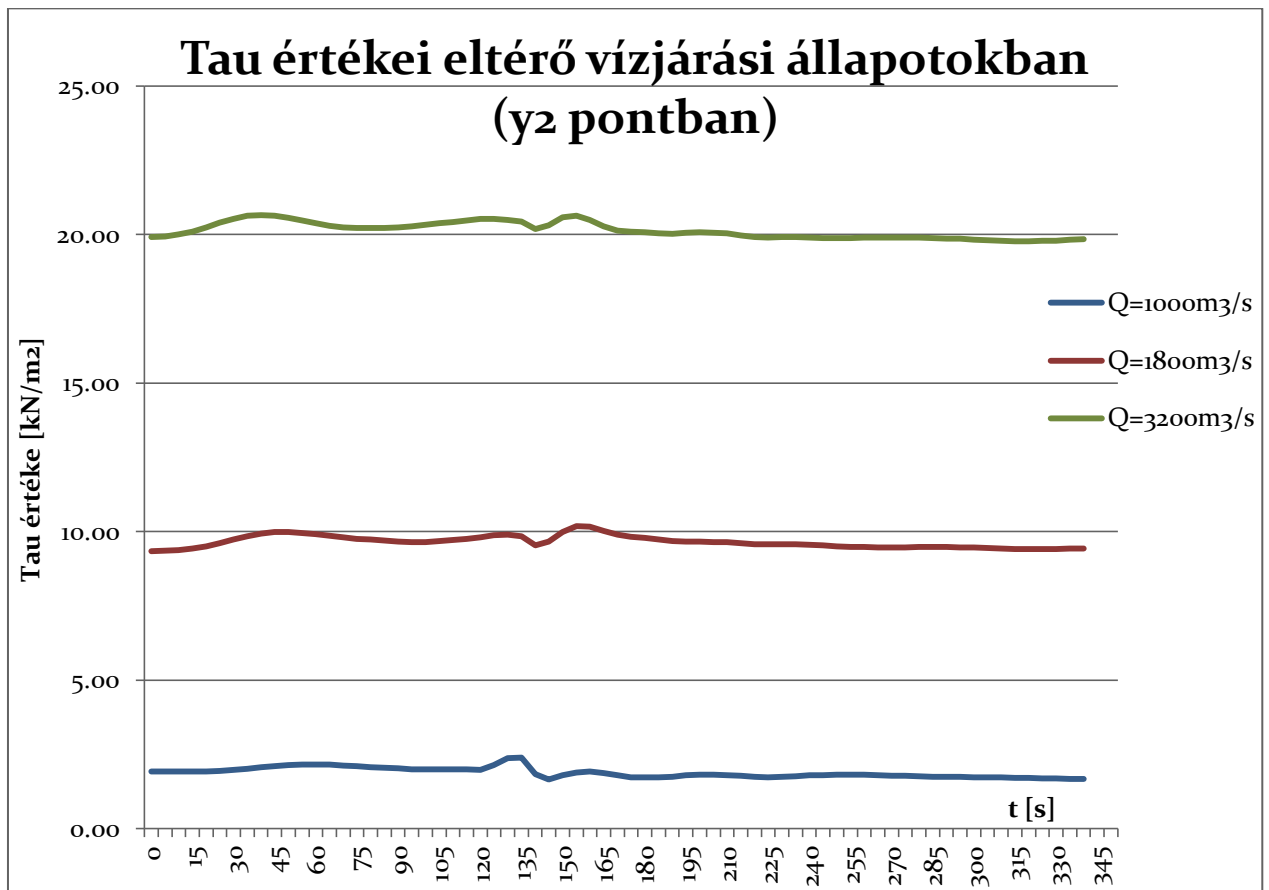
93. ábra Vízjárások vízszint ingadozásai x2 pontban ; Drft 2.50m + v=2.60m/s



94. ábra Vízjárások vízszint ingadozásai y2 pontban ; Drft 2.50m + v=2.60m/s

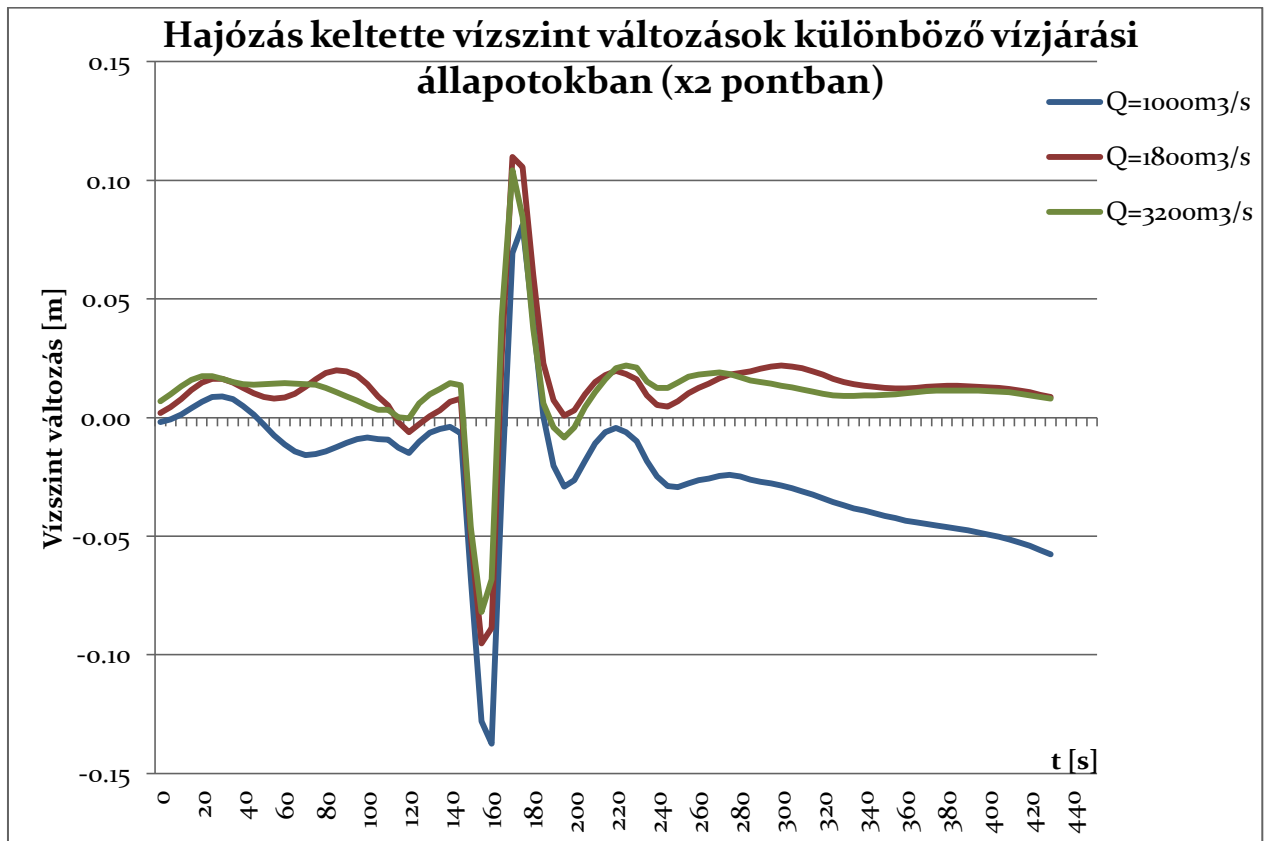


95. ábra Vízjárások vízszint ingadozásai x2 pontban ; Drft 2.50m + v=2.60m/s

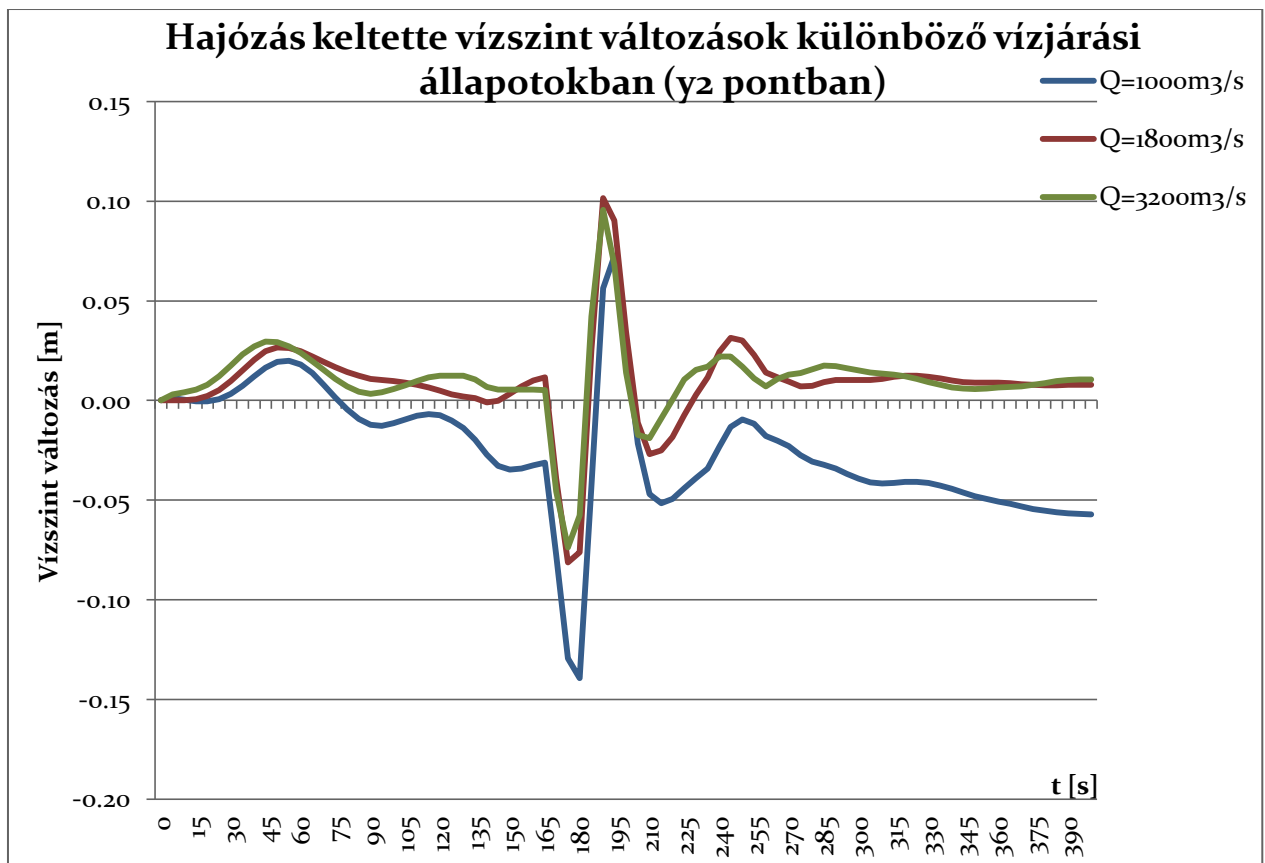


96. ábra Vízjárások vízszint ingadozásai y2 pontban ; Drft 2.50m + v=2.60m/s

6.4. Merülés 2.50m + Sebesség 2.10m/s



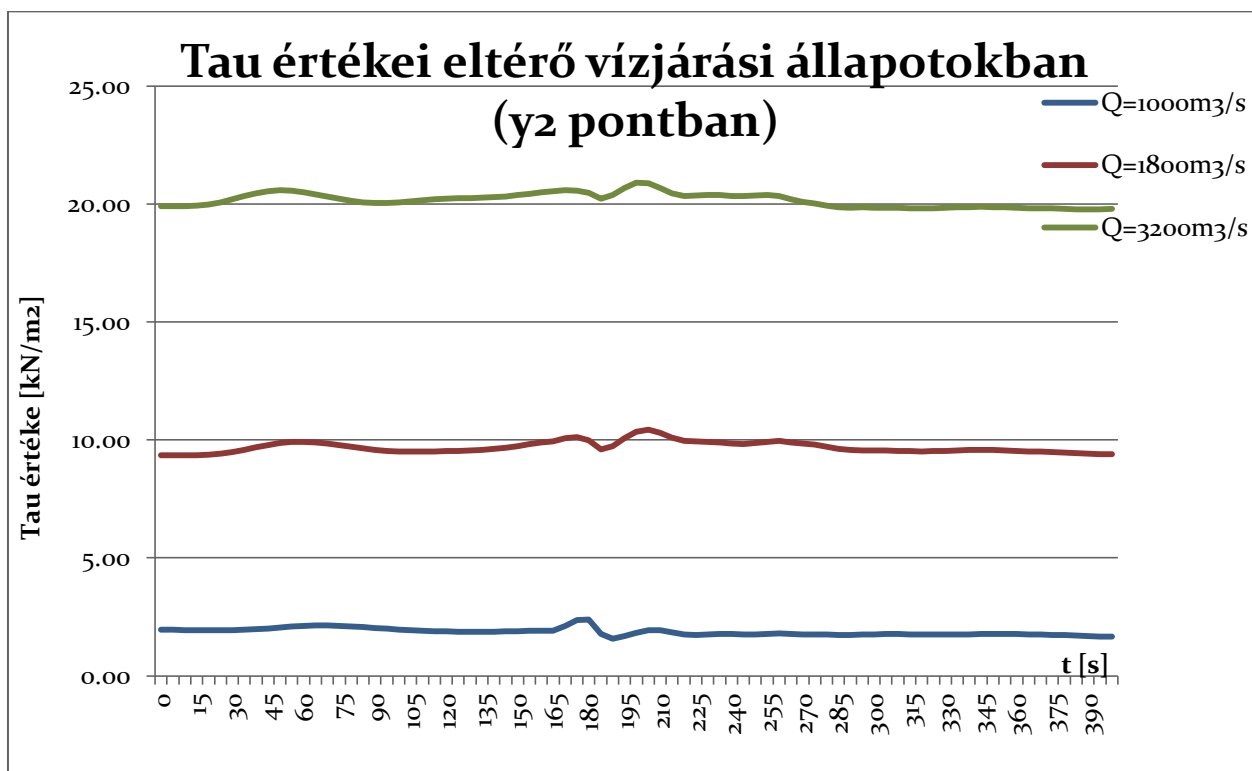
97. ábra Vízjárások vízszint ingadozásai x2 pontban ; Drft 2.50m + $v=2.10\text{m/s}$



98. ábra Vízjárások vízszint ingadozásai y2 pontban ; Drft 2.50m + $v=2.10\text{m/s}$

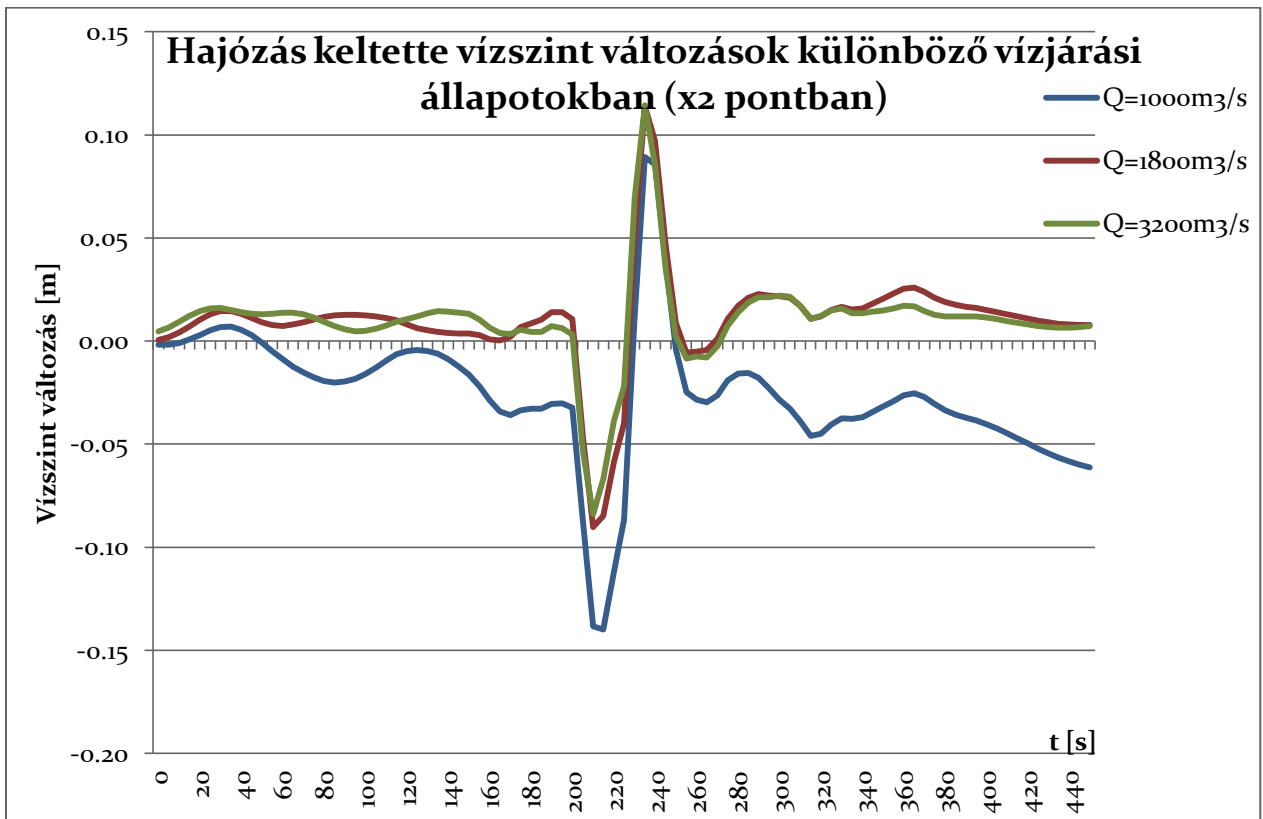


99. ábra Vízjárások vízszint ingadozásai x2 pontban ; Drft 2.50m + v=2.10m/s

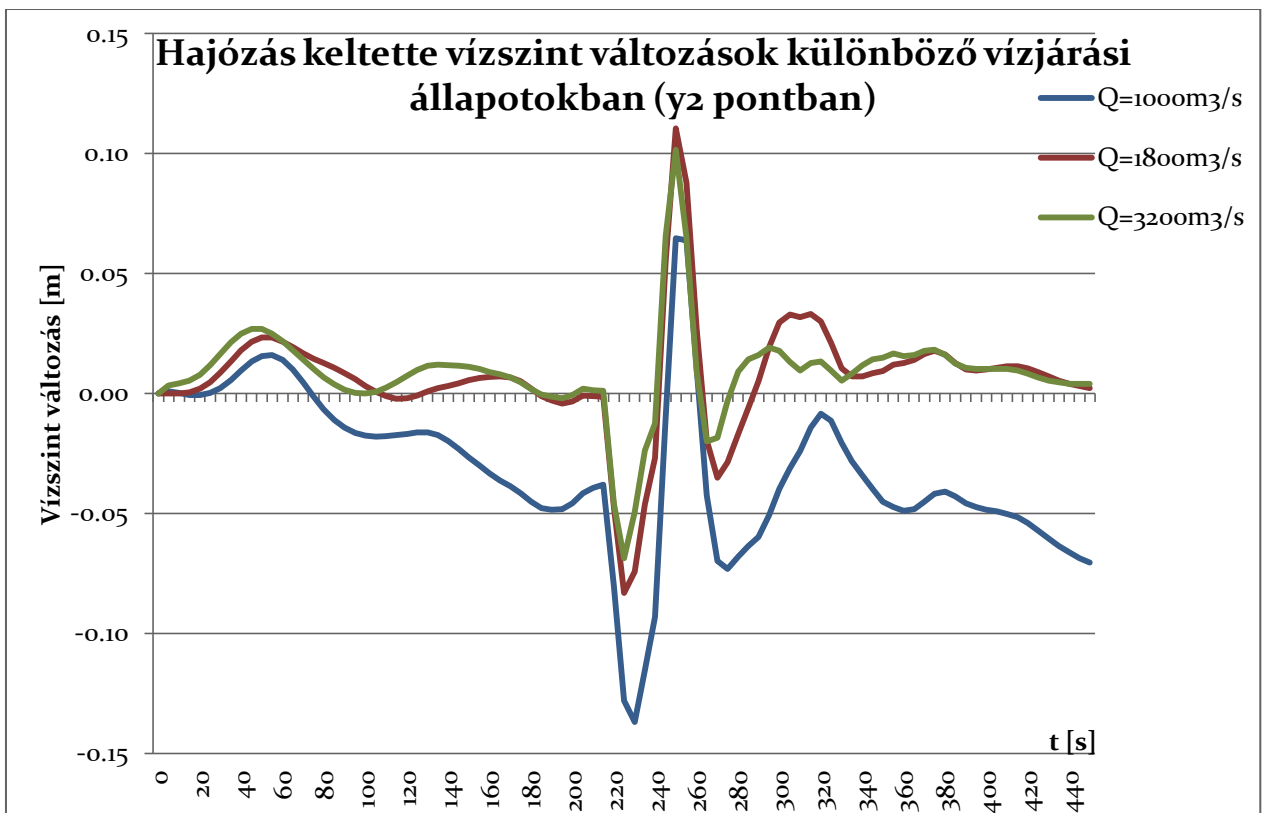


100. ábra Vízjárások vízszint ingadozásai y2 pontban ; Drft 2.50m + v=2.10m/s

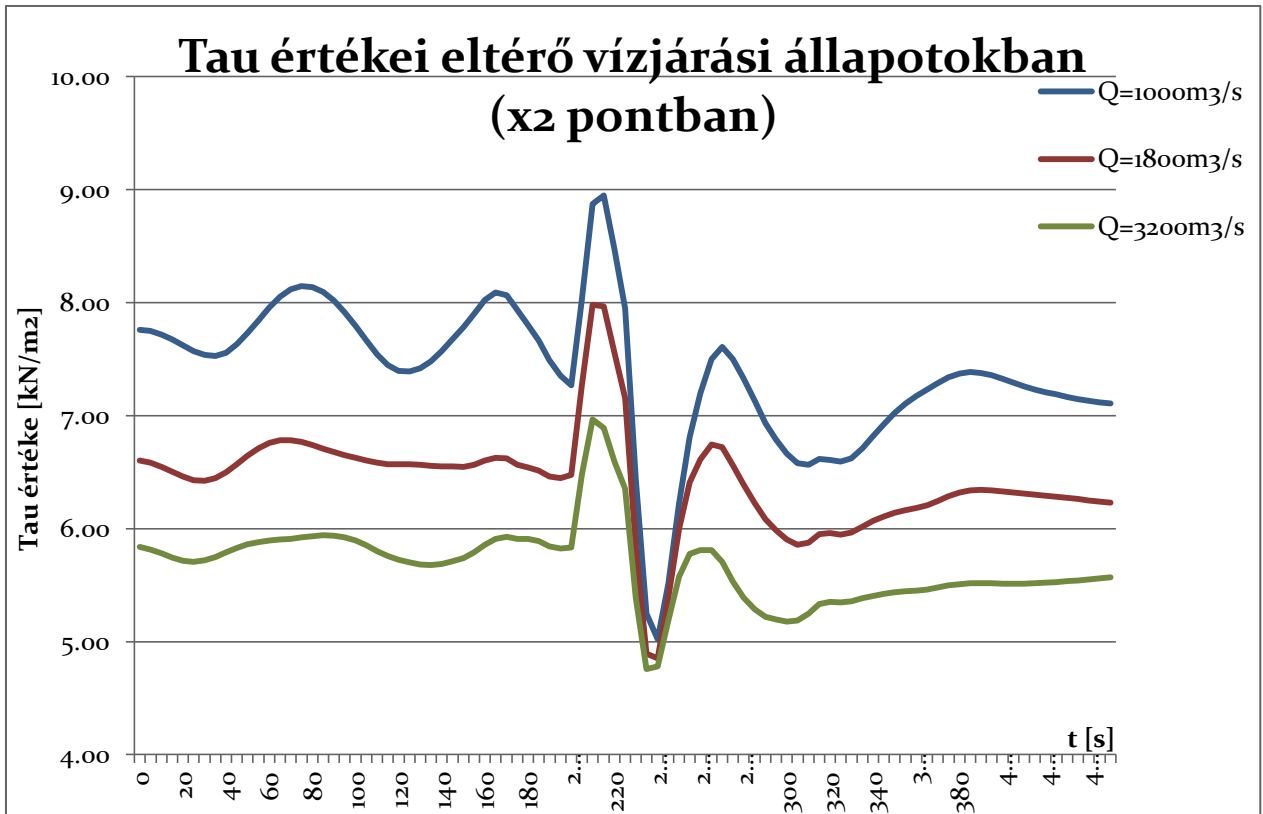
6.5. Merülés 2.50m + Sebesség 1.60m/s



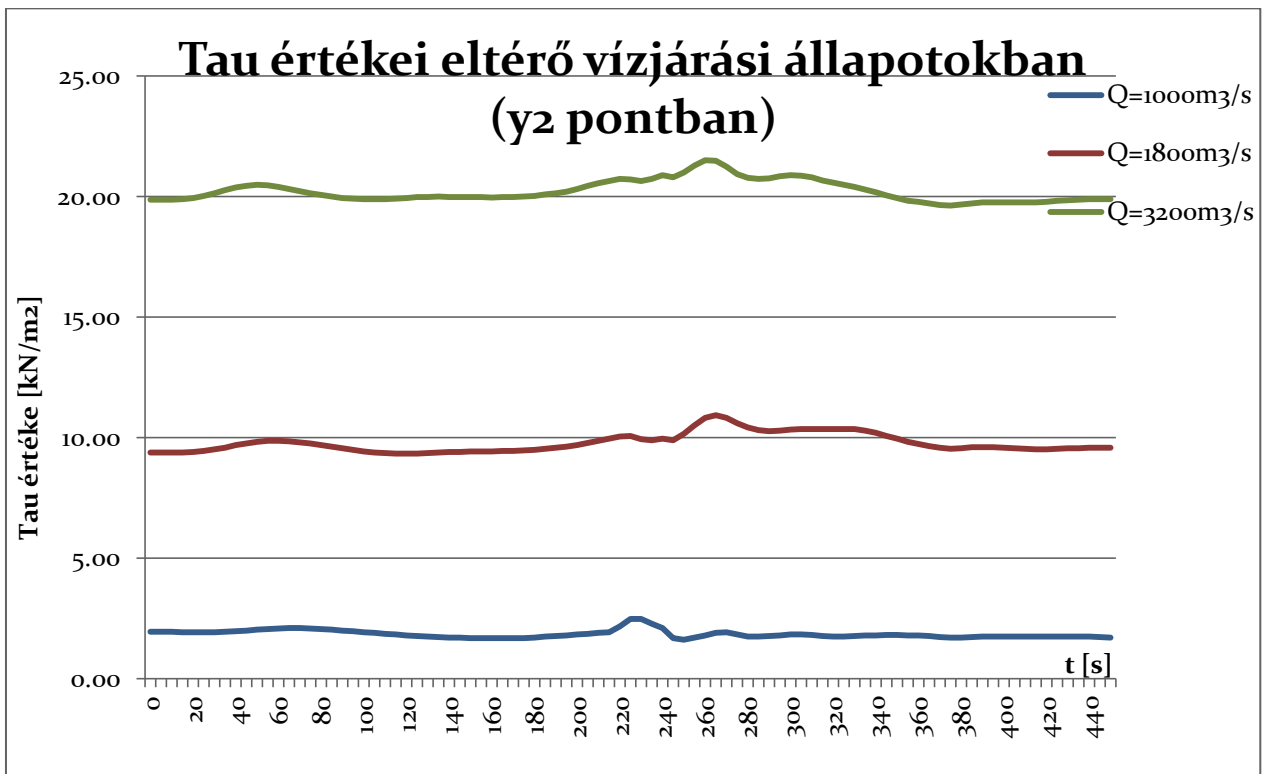
101. ábra Vízjárások vízszint ingadozásai x2 pontban ; Drft 2.50m + v=1.60m/s



102. ábra Vízjárások vízszint ingadozásai y2 pontban ; Drft 2.50m + v=1.60m/s



103. ábra Vízjárások vízszint ingadozásai x2 pontban ; Drift 2.50m + v=1.60m/s



104. ábra Vízjárások vízszint ingadozásai y2 pontban ; Drift 2.50m + v=1.60m/s