



BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Építőmérnöki Kar

2011. évi Tudományos Diákköri Konferencia

www.vit.bme.hu/tdk/

Vegyes szemösszetételű folyómeder morfodinamikájának numerikus vizsgálata

Szerző:

Török Gergely Tihamér, hatodéves építőmérnök hallgató

Konzulensek:

* Dr. Baranya Sándor, adjunktus

Dr. Rákóczi László, VITUKI, nyugalmazott tudományos tanácsadó

* Dr. Józsa János, egyetemi tanár

* BME Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszék

Budapest, 2011. november 11.

Tartalomjegyzék

1	Bevezetés.....	3
2	A mederpáncélozódás ismertetése, annak jelentősége a magyarországi Dunán	5
2.1	A leárnnyékolási tényező.....	5
2.2	A kritikus sebesség meghatározása inhomogén mederanyag esetén	7
2.3	Meder szemösszetételi görbéjének vizsgálata	10
3	Az alkalmazott numerikus modell bemutatása	14
3.1	Az áramlási modell bemutatása	14
3.1.1	A Navier-Stokes egyenletek.....	14
3.1.2	A $k-\varepsilon$ turbulencia modell	15
3.1.3	Faltörvény	15
3.2	A hordaléktranszport-modell ismertetése	16
3.2.1	Lebegtetett hordaléktranszport	16
3.2.2	A kritikus csúsztatófeszültség meghatározása Shields kísérletei alapján	17
3.2.3	Görgetett hordaléktranszport	18
3.2.4	Görgetett üledéktranszport a Wu formulával.....	19
4	Új, vegyes szemösszetételű hordaléktranszport számítására alkalmas modell implementálása a numerikus modellbe.....	22
4.1	Laboratóriumi vizsgálatok	22
4.2	A modell ismertetése	24
4.2.1	Leárnnyékolás/kitettség figyelembe vétele	26
4.2.2	A dimenziómentes hordalékhozam számítása	27
4.3	A modell számítási menetének lépései	29
4.4	Wilcock és Crowe hordaléktranszport-modelljének beprogramozása	29
5	Wilcock és Crowe hordaléktranszport-modelljének tesztelése	31
5.1	Alkalmazott számítási rácshálók.....	31
5.2	Az újonnan beprogramozott hordaléktranszport-modell tesztelése a sematikus tesztcsatornában	33
5.2.1	Az A jelű árhullám hatásának vizsgálata.....	37
5.2.2	A B jelű árhullám hatásának vizsgálata	39
5.2.3	A C jelű árhullám hatásának vizsgálata	44
5.3	A D jelű árhullám hatásának vizsgálata	49
5.4	Hordaléktranszport-modellek összehasonlító elemzése egy helyszín-rajzi vonalvezetésében természetes folyószakaszon	55

5.5	Szemösszetétel vizsgálatok a beprogramozott hordaléktranszport-moddell	59
6	Összefoglalás. Következtetések	68
7	Előretékités	70
8	Jelölések	71
9	Irodalomjegyzék	72

1 Bevezetés

A folyómedrek geometriai változásának meghatározó kiváltó oka a hordalékmozgás. A mederben áramló víz által a mederfenékről elragadott, majd lebegtetett, vagy görgetett módon elszállított szemcsék helyenként a meder szélesedését illetve mélyülését, más helyeken lerakódásuk a meder keresztszelvény-csökkenését idézik elő. Az így létrejövő geometriai átalakulások további változásokat eredményezhetnek, mint például a sodorvonal áthelyeződését, ami további medereróziók és feltöltések révén ugyancsak hatással lehet a meder térbeli alakulására. A folyókban lejátszódó hordalékmozgás tehát nagyon összetett jelenség, hiszen az egyes, bonyolult részfolyamatok folyamatos *kölcsönhatásban* állnak egymással. A jelenség vizsgálatát megnehezíti, hogy a lebegtetett hordalék és az esetleges oldott szennyeződések jelenléte miatt a görgetett hordalék mozgása a természetben általában nagyon nem látható és nehézkesen fényképezhető. A megbízható becsléséhez viszont elengedhetetlen az egyes részfolyamatok minél mélyebb megismerése.

A 20. században a hidraulikai laboratóriumok üvegfalú csatornáiban tiszta vízzel végzett vizsgálatok kiderítették, hogy a mederfenéken egy szilárd szemcse mozdulatlan marad mindaddig, amíg a fölötte áramló vízből rá ható erők a nyugalmi helyének elhagyására nem készítetik. Ekkortól beszélhetünk hordalékmozgásról. A hordalékszemcsére ható jelentős erők a gravitáció, a vízfolyás turbulenciájából adódó pulzáció, a felhajtóerő, súrlódás és kohézió. Ezek eredője szabja meg azt is, hogy a kimozdított szemcse a víztérben lebegve, vagy a mederfenéken görgetve mozog mindaddig, amíg a mederfenéken egy újabb nyugalmi helyzetbe nem kerül. Mivel a szemcsékre ható erők mértéke függ saját geometriájuktól, vegyes szemösszetételű hordalékok esetén az egyes frakciók mozgáskezdetek és sebessége nem feltétlenül egyezik meg. Megfigyelések szerint, durvább frakciót is tartalmazó, vegyes szemösszetételű meder felszínén olyan fokozatos átalakulás megy végbe, mely során a finomabb frakciók kimosódnak és a mederfeneket egyre durvább szemcsék borítják. A kisebb szemcsék mozgása révén instabil helyzetbe került durvább szemek is mozognak mindaddig, míg újra nyugalmi helyzetbe nem kerülnek. Így végül a medret egy olyan „páncél” borítja, ami változatlan áramlási viszonyok mellett, közel állandó medergeometriát biztosít. Ezt a folyamatot nevezik „mederpáncélozódásnak”. Hazánkban a Duna felső szakaszának kavicsmedrében fordul elő leggyakrabban ez a jelenség.

A SSIIM (**S**imulation Of **S**ediment Movements In Water Intakes With **M**ultiblock Option) egy novát fejlesztésű 3D numerikus hordalékmozgás-modell. A mederüledék mozgásokat a szilárd részecskék fizikai jellemzői, valamint a számított sebesség-, turbulencia- és nyomásmezők alapján becsli a részfolyamatok empirikus, fél-empirikus és elméleti fizikai összefüggései figyelembevételével. TDK kutatásom célja a numerikus modell segítségével a mederpáncélozódás modellezhetőségének vizsgálata. Céloom a szakirodalomból átvett vegyes szemösszetételű hordaléktranszport leírására alkalmas eljárások beépítése a felhasznált áramlási modellbe, a modell tesztelése elsőként egy egyenes, egyetlen sarkantyút tartalmazó egyszerű példán, majd egy valós Duna-szakaszra, különböző mederanyag szemösszetétel és vízjárás állapot esetére. A kutatástól a mederpáncélozódás folyamatának alaposabb megismerését, valamint a mederanyag osztályozódási folyamatának numerikus modellezhetősége felé tett első lépéseket várom.

A mederpáncél kialakulása és felszakadása folyamatának a dolgozatban bemutatásra kerülő részletes időbeli és térbeli számítógépes reprodukálására ez idáig nem nagyon volt példa, mert a hordalékviszonyok többfrakciós leképzése egyrészt meglehetősen nagy számításigényű, másrészt körültekintő paraméterezést igénylő feladat. Azok a részletes terepi és labor kísérletek, melyek a fenék-csúsztatófeszültségből kiindulva és a különböző frakciók kölcsönhatását is figyelembe véve kínálnak a numerikus modellekbe implementálható empirikus összefüggéseket, csak az utóbbi években kerültek publikálásra. Az előzőek tükrében látható, hogy a mederpáncélozódás folyamatának megbízható numerikus leképzése egy aktuális, de nem megoldott feladat.

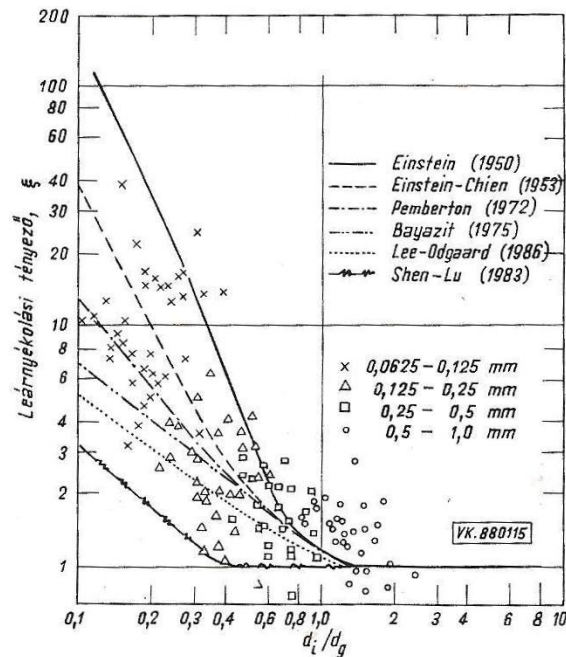
2 A mederpáncélozódás ismertetése, annak jelentősége a magyarországi Dunán

Természetes vízfolyásoknál jellemző, hogy az árvizes időszakokat hosszabb kisvizes időszakok követik. Ilyenkor olyan vízállások figyelhetők meg, amiknél a hordalékmozgató erő a kritikus érték körül mozog, tehát a görgetett hordaléktranszport a kezdeti stádiumában van. A később ismertetendő nyomjelzős laboratóriumi vizsgálatok tanúsága szerint ennél az állapotnál leginkább csak az átlagos méret körüli szemcsék mozognak többé-kevésbé folyamatosan. A náluk jelentősen nagyobbak közül az instabil állapotban lévők mozdulnak ki nyugalmi helyzetükből, de csak addig haladnak, amíg állékonyabb helyzetbe nem jutnak. Nagyobb vízállásnál, nagyobb hordalékmozgató erő hatására már több medret alkotó, viszonylag könnyen mozdítható frakció kerül mozgásba. Az általános hordalékmozgás megindulásáig több ilyen közbenső helyzet alakulhat ki, amiket *szelektív hordalékmozgásnak* nevezünk. Ha ez a jelenség tartósan, akár heteken, hónapokon át fennáll, akkor bizonyos frakciók szinte teljesen kimosódhatnak a meder felszíni rétegéből. A folyamat azt eredményezi, hogy a meder felszínét egyre inkább a legnagyobb szemcsék és az általuk tartósan leárnyékolt kisebbek borítják. Az így kialakuló mederburkolat egyre ellenállóbbá válik a kimosódással (medererózióval) szemben. Ezt nemcsak a nagyobb szemcsék súlya, hanem a hordalékszemek között fellépő és a fenék-közeli áramlási viszonyok hordalékmozgató képességét csökkentő kölcsönhatások is eredményezik. A folyamat legfejlettebb formája az úgynevezett „mederpáncélozódás” (Rákóczi, 1981).

A szelektív eróziós folyamat alapvetően csak azokra a folyószakaszokra jellemző, ahol a mederanyag heterogén, vagyis széles szemcsetartományú, valamint ahol megfelelő a vízjárás, azaz hosszú apadó, illetve kisvizes időszakok állnak elő. Magyarországon ilyen például a Rába középső, vagy a Duna felső (Rajka-Szob közötti) szakasza. Mederpáncélozódás a Duna Budapest alatti, homokban egyre dúsabbá váló szakaszán is fellép, azonban a mederstabilizáló szerepe kisebb, mint a zömmel kavicsmedrű vízfolyásokon. Hazánkban a mederpáncélozódás kutatásának úttörője Dr. Rákóczi László. Laboratóriumi és terepi méréseit az 1960-es években kezdte, kutatási eredményeiből és tapasztalataiból számos publikációja született. Ezek a szakirodalmi cikkek, valamint a kutatóval folytatott személyes konzultációk a TDK dolgozatom fontos pillérét képezik.

2.1 A leárnyékolási tényező

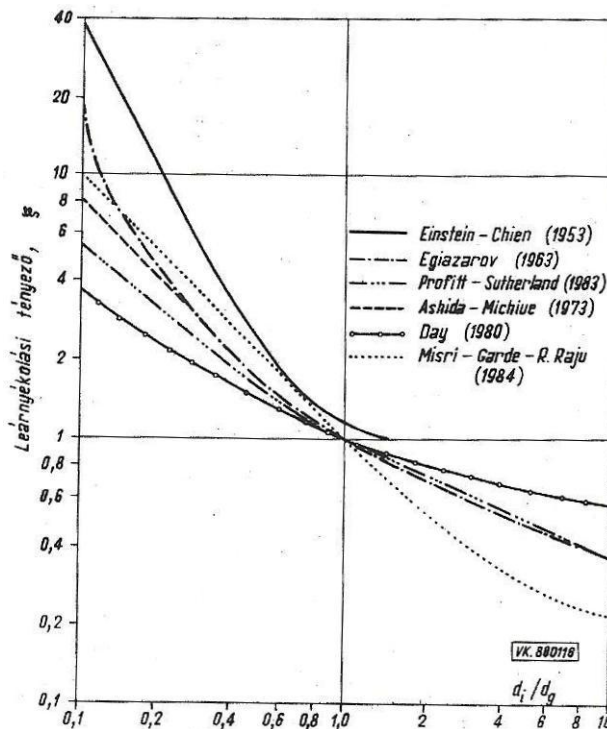
A kutatók a laboratóriumi és terepi méréseik alapján belátták, hogy a meder szemösszetételének térbeli és időbeli változásának minél megbízhatóbb közelítéséhez nélkülözhetetlen a vegyes szemösszetétel és a mederburkolat állékonyság közötti kapcsolat becslése, amit világszerte az ún. leárnyékolási tényezővel próbáltak leírni.



1. ábra – A leárnnyékolási tényező az adott szemcse és az átlagos szemcseátmérő hányadosa függvényében (Rákóczi, 1988)

1950-ben H-A. Einstein (Albert Einstein fia) dolgozta ki az első ilyen jellegű összefüggést. Az eljárása lényege, hogy a mederanyag tetszőleges i -dik frakciójának (d_i) és az átlagos szemcse (d_g) átmérőjének hányadosa függvényében egy grafikonról lehet leolvasni a leárnnyékolási tényezőt. További kutatók azt találták, hogy Einstein görbéje túl meredek, azaz túl nagy jelentőséget tulajdonított a kis szemcsék nagyok általi leárnnyékolásának. A 1. ábra több szerző által megszerkesztett grafikont ismertet. A görbék megegyeznek abban, hogy az átlagos szemcseméret után vízszintessé válnak, ami azt sugallja, hogy a durvább szemek állékonyságát nem befolyásolja a vegyes szemösszetétel.

Ezzel szemben több kutató olyan eljárás kidolgozásán dolgozott, ami figyelembe veszi a vegyes szemösszetétel durvább frakciók kimozdulását elősegítő hatását. Ezeket és az Einstein-Chien féle leárnnyékolási tényezőket a 2. ábra mutatja be.



2. ábra – Leárnýékolási tényező a teljes szemcsetartományra (Rákóczi, 1988)

A grafikonok azt mutatják, hogy a finomabb szemcsék nehezebben indulnak mozgásnak keverékben, mint homogén szemösszetétel esetében. Einstein-Chien görbéjével ellentétben a többi eljárás szerint a vegyes szemösszetétel esetében a durvább frakciók könnyebben mozognak ki nyugalmi helyükről. Erre a durvább szemekhez tartozó, 1-nél kisebb leárnýékolási tényezők utalnak. A tapasztalatok és mérések ezt a jellegű kapcsolatot alátámasztották. Dr. Rákóczi László lumineszcens nyomjelzős laboratóriumi kísérletei is hasonló eredményt mutattak (Rákóczi, 1988).

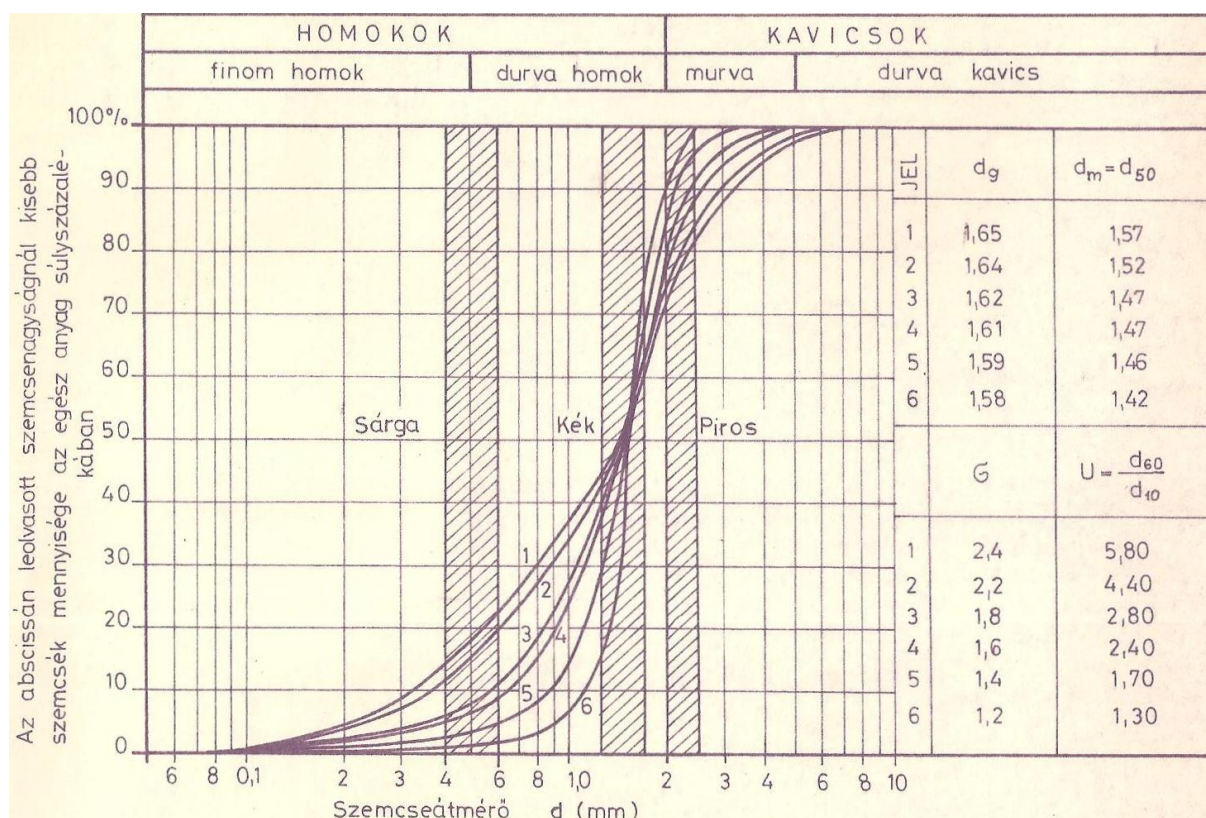
2.2 A kritikus sebesség meghatározása inhomogén mederanyag esetén

Egy adott mederanyag kritikus sebességén a vízfolyásnak azt a középsebességét értjük, aminél a korábban nyugalomban lévő hordalékszemcse kimozdul a helyéről. Becslésére a szakirodalomban több módszertan ismert. Dr. Rákóczi László a Hidrológiai Közöny 1975. novemberi és decemberi számában megjelent cikkében erről a kritikus sebesség becsléséről értekezik (Rákóczi, 1975).

A kezdetben stabil állapotban lévő mederüledék a vízfolyás sebességének növelésével elér egy olyan kritikus egyensúlyi állapotot, amikor a súlyából, illetve kohéziójából származó ellenállása közel megegyezik a kimozdulását okozó erővel. Amint a vízfolyás sebessége meghaladja a kritikus értékét, a szemcse kimozdul nyugalmi helyéről. Rákóczi László cikkében több, laboratóriumi méréseken alapuló összefüggést ismertet a kritikus sebesség számítására. Három, hazánkban ismertebb, *homogén szemcsefrakciónak* az átmérő függvényében kritikus sebességet becslő eljárással (Bogárdi-Yen, Kalmár, Kramer-Indri) számított értékek között jelentős, akár 30-40%-os eltérés is lehetséges. A különbségek részben annak tudható be, hogy a kutatók a kísérleteiket eltérő körülmények között végezték, valamint hogy az általuk kritikusnak vélt mozgásállapotok nem feltétlenül azonosak. Az eltérések azonban arra is utalnak, hogy az *állandó kritikus sebesség* feltételezése még homogén szemcsék esetében sem állja meg a helyét. A későbbiekben kidolgozott összefüggések (pl.: Goncsarov képlete) a vízfolyás hidraulikai paramétereinek, valamint a meder *relatív szemcse-érdességének* (h/d) figyelembe vételével megbízhatóbb becslést adtak.

Vegyes szemösszetételű hordalék esetében a kritikus sebesség meghatározása még összetettebb és nehezebb feladat. A cikkben ismertetett összefüggések általában a vegyes szemösszetétel, valamint a vízfolyás hidraulikai paraméterei függvényében adnak becslést. Több kutató (Hjulström, Shields, Movis-Laushey) mérési eredményeikből elkészített kiegyenlítő görbéi (kritikus középsebességek-átlagos szemcseátmérő) között is jelentős eltérés tapasztalható. Bár a laboratóriumi körülmények és az adatfeldolgozási eljárások nem egyeztek meg, a görbék közti különbség arra is utal, hogy a kritikus sebességet vegyes szemösszetétel esetén nem lehet csupán az átlagos szemcseátmérővel közelíteni.

A vegyes szemösszetételű hordalékok egyes jelzett frakcióinak elkülönített vizsgálatát a jelzőanyagok alkalmazása tette lehetővé. Dr. Rákóczi László az 1960-as évek elején laboratóriumi méréseinél alkalmazta ezt az eljárást. Kísérletének lényege, hogy több, *azonos átlagos szemátmérőjű*, de *különböző szemösszetételű* keveréket állítottak elő. A keverékben az átlagos átmérőt magában foglaló, illetve annál finomabb és durvább frakciókat eltérő színű *lumineszcens* jelzőanyaggal vonták be, így lehetőség nyílt mozgáskezdetük külön vizsgálatára. A 3. ábra a $d_{\text{átl}} = 1,6$ mm-hez tartozó 6 keverék szemeloszlási görbéit mutatja, a három kiválasztott frakciót sraffozással kiemelve.



3. ábra – Jelzőanyagok laboratóriumi kísérletek során vizsgált mederanyagok szemösszetételi görbéi (Rákóczi, 1975)

Az egyes keverékeket egy 50 cm széles és 13 m hosszú kísérleti csatornába helyezték be. A három megjelölt frakció kritikus állapotához tartozó középsebességet és a hozzá tartozó hidraulikai paramétereket mérték. A kísérlet során kétféle mozgásállapothoz tartozó kritikus sebességet különböztettek meg: a mederburkolatot alkotó szemcsék első kimozdulását (1. mozgásállapot), illetve a szaporább, csaknem folyamatos mozgást (2. mozgásállapot). A kiválasztott frakciók kritikus sebességeit kvázi-homogén szemösszetétel esetén, az üvegcsatornába külön-külön beépítve is mérték. Így tudták megállapítani a vegyes szemösszetétel hatását az egyes jelzett frakciók kritikus sebességére.

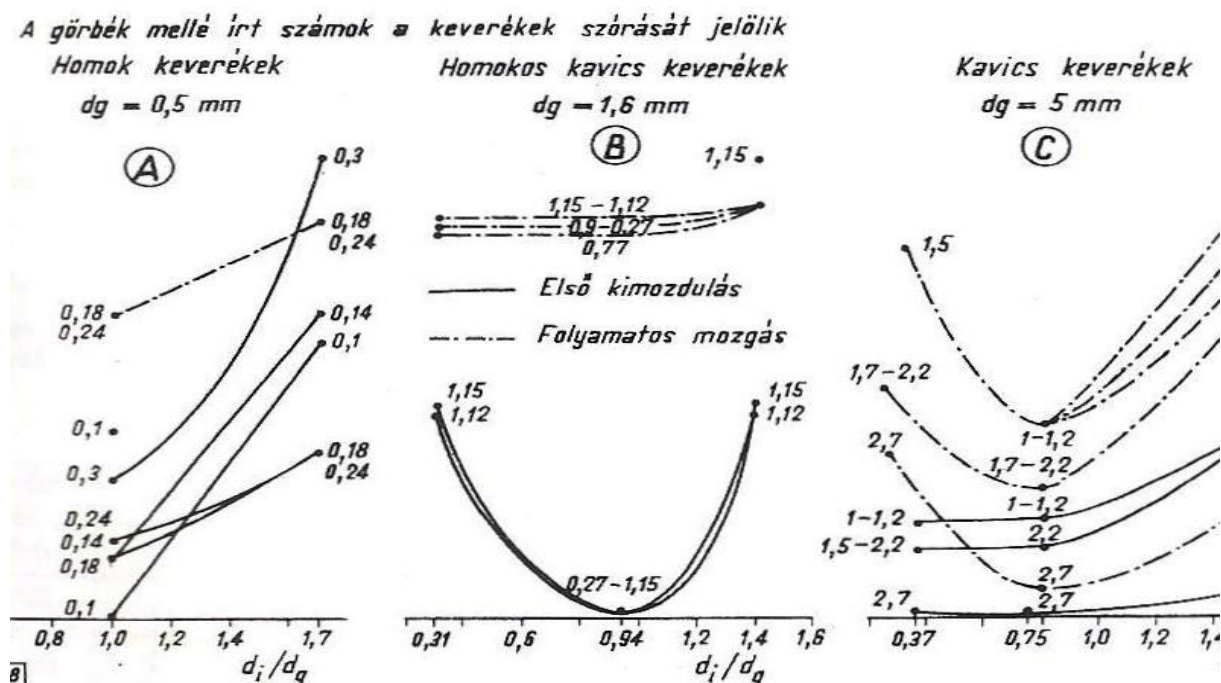
A mért kimozdulási sebességeket az adott frakció homogén mederanyagként mért kritikus sebességéhez viszonyított százalékos arányában a következő, 1. táblázat mutatja be.

1. táblázat - A jelzett szemcsefrakciók keverékbeli kritikus függély-középsességének százalékos változása ugyanazon frakció homogén mederanyagként mért kritikus függély-középsességéhez képest (Rákóczi, 1975)

A jelzett szemcsefrakció	Mozgás- állapot	A keverék átlagos szemcseátmérője, d_g [mm] és jele					
		0,5 A		1,6 B		5,0 C	
		legvegyesebb	legegyöntetűbb	legvegyesebb	legegyöntetűbb	legvegyesebb	legegyöntetűbb
		%					
A keverék d_g -jénél finomabb	1.	—	—	+75	+80	+14	+12
	2.	—	—	+47	+53	+6	-2
A keverék d_g -jét tartalmazza	1.	-2	+17	± 0	± 0	+11	+7
	2.	-5	+16	+13	+15	0	-5
A keverék d_g -jénél durvább	1.	-6	+23	-11	-9	0	-1
	2.	—	—	-3	+2	+2	-8

A mért adatokból kiderül, hogy a vegyes szemösszetétel az első két jelzett frakciónál akadályozza, a durva frakciónál viszont elősegíti a kritikus állapot kialakulását.

A laboratóriumi kísérletek eredményei arra is rávilágítottak, hogy fontos figyelembe venni az egyes frakciók kimozdulásának sorrendjét is. A 4. ábra az egyes keverék-csoportok frakcióinak az első, illetve a második mozgásállapotához tartozó sebességeit mutatja a keverék-csoportok szemcséinek legelső kimozdulási sebességének százalékos arányában.



4. ábra - Az 1. és 2. mozgásállapot eléréséhez szükséges százalékos középsesség-többség kapcsolata az adott szemcse keverékben elfoglalt helyzetével (Rákóczi, 1975)

A B jelű, homokos kavics keveréknél látható, hogy a középső, átlagos szemcseátmérőt tartalmazó frakció szemcséi mozdultak meg először, a másik két frakció ezt követően egyszerre érték el első

mozgásállapotukat. A folyamatos mozgást a legfinomabb és az átlagos frakciók érték el először. Az átlagos frakció a másik két frakcióhoz képest jelentősen nagyobb sebességtöbbletet igényelt az elsőből a második mozgásállapotba kerüléshez.

A C jelű keverék esetén az első mozgásállapotot a finom és átlagos frakciók érték el először, egyszerre. A folyamatos mozgást viszont a legfinomabb és legdurvább frakciók érték el egyszerre, az átlagos frakció már jelentősen korábban.

A három keverék-csoport grafikonjainak összehasonlítása alapján látható, hogy az átlagos frakció első mozgásállapotához szükséges sebességek gyakorlatilag megegyeznek. A másik két frakciónál jól látható a keverékek kettős hatása, miszerint a vegyes szemösszetétel a finomabb frakcióknak megnehezíti, a durvább frakcióknak pedig megkönnyíti a kimozdulást. Az is látható, hogy a legkisebb kritikus sebesség a legvegyesebb, míg a legnagyobb kritikus sebesség a legegyszerűsebb összetételű keverék esetén adódik.

Általánosan megállapítható tehát, hogy a mederpáncélozódás leírása szempontjából nem elégséges csupán az egyes frakciók homogén keverékének hordalékvizsgálata. A mederburkolatban lévő szemcsék között olyan jelentős kölcsönhatások lépnek fel, amik jelentősen megváltoztatják az egyes frakciók inhomogén mederben megfigyelt mozgáskezdését. Mindez azt jelenti, hogy a 20. századi laboratóriumi üvegcsatornás vizsgálatok során meghatározott, vagyis a szakirodalomban található kritikus vízsebesség-értékeket csakis fenntartásokkal szabad elfogadni.

A nyomjelzős kísérlet arra is rámutatott, hogy a vizsgált szemcsetartományokban a kritikus középsebességek általában a 0,25-0,5 m/s körül adódnak. Ezek pedig a természetes vízfolyásokban az év jelentős részében, és számottevő időtartamban fordulnak elő. A szelektív erózió épp ilyen sebességviszonyok között állhat elő, ami pedig a mederpáncél kialakulását idézheti elő.

A mederpáncélozódás megbízható becsléséhez tehát nem elégséges csupán a leárnnyékolási tényező figyelembevétele, mert az nem ad kellő információt a mederanyagok egyes szemcsefrakcióinak egymással szoros kapcsolatban levő kimosódásáról. A laboratóriumi és terepi mérések eredményei azt mutatják, hogy szükséges tekintetbe venni a vegyes szemösszetételű mederanyagok egyes frakcióinak kimozdulási sorrendjét, valamint az azokhoz tartozó kritikus középsebességeket is (Rákóczi, 1975, 1988).

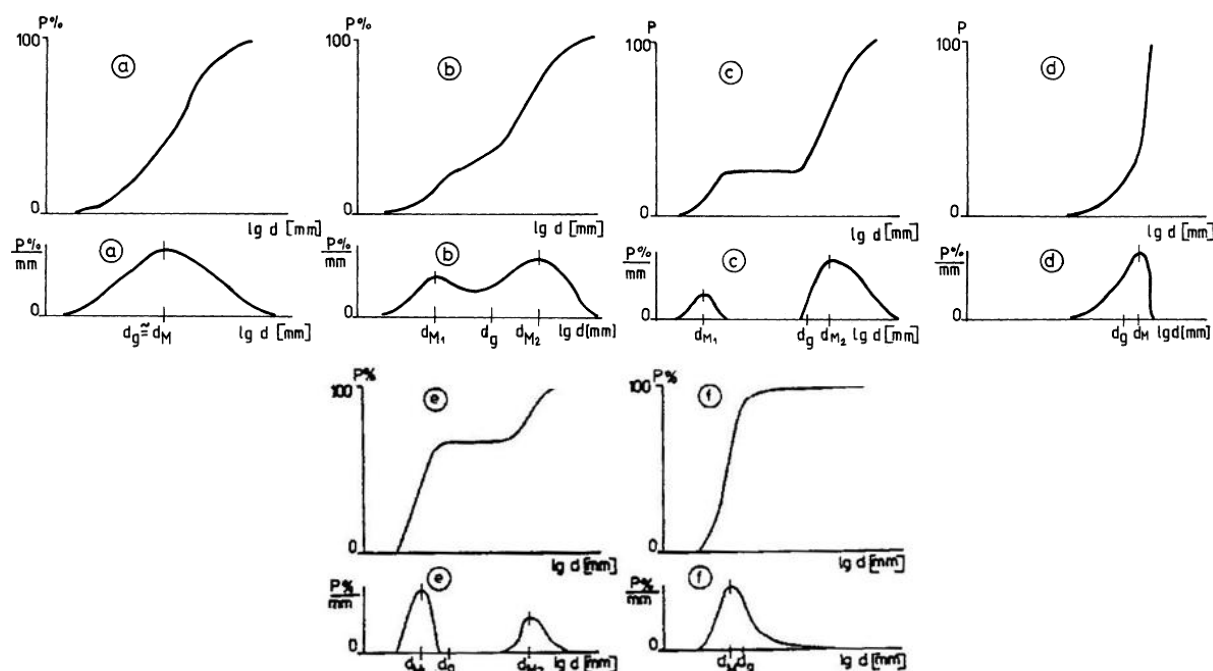
2.3 Meder szemösszetételi görbájének vizsgálata

A mederanyag minták szemösszetételi görbéi nagyon hasznos és értékes információkkal szolgálhatnak a hordalékmozgás vizsgálatában.

A mederpáncélozódás kutatásában egyik legfontosabb kérdés a kialakuláshoz szükséges vízjárási viszonyok és azok időtartama. Egy szelvényben folyamatos mederanyag-mintavételekkel nyomon lehet követni a vízállás/vízhozam változásának a meder szemösszetételére gyakorolt hatását. A jellemző időszakok (árhullámok áradó és apadó ága, tartós kisvizek) figyelembevételével a mederanyag-minták szemösszetételi görbéinek alakjából következtetni lehet a mederpáncélozódás kifejlődéséhez szükséges vízjárási viszonyokra, illetve időtartamra, valamint a páncél felszakadásához szükséges vízállásra/árhullámra.

Az 5. ábra egy általános szelektív eróziós folyamat egy-egy kiragadott állapotából származó mederanyag minták szemátmérő-sűrűségi, valamint az azok integrálásával szerkesztett szemösszetételi eloszlásgörbéit ábrázolja. Az "a" ábrákon a szemösszetételi görbe közel normális eloszlású, minden jellemző szemcseméret megtalálható. Ez a szemeloszlási görbe tipikusan egy úgynevezett *dinamikus egyensúlyban* lévő folyószakasz mederanyagánál mutatható ki, ahol a felvízről érkező görgetett hordalék jelentősebb lerakódás, illetve kimosás nélkül áthalad a mintavétel keresztaszvénnyén. A "b" és "c" ábrái a szelektív eróziós folyamat közbeni állapotait mutatják. Jelen példában az "a" ábrákon a közepesnél finomabb átmérőjű szemcsék fokozatos, végül teljes kimosódásának folyamata figyelhető meg. A "d" ábráról a durvább szemcsék feldúsulása és a finomabb frakciók eltűnése olvasható le. Ezek a mederpáncélozódás kifejtett állapotára utalnak.

Szelektív eróziós folyamatnál a kimosódott finom frakciók alacsony turbulenciájú helyeken, mint például a sarkantyúk mögötti részeken, lerakódnak, ami lokálisan a meder fokozatos feltöltődését okozza. Ennek a folyamatnak a jellemző állapotait mutatja be az utolsó két, "e" és "f" ábra. A finom frakció feldúsulásával a durvább szemcsék részarányának csökkenése figyelhető meg. A mederfeltöltődés egy fejlett állapotát mutatja be az "f" ábra, ahol a szemeloszlási görbén már csak a finom frakciók dominálnak.

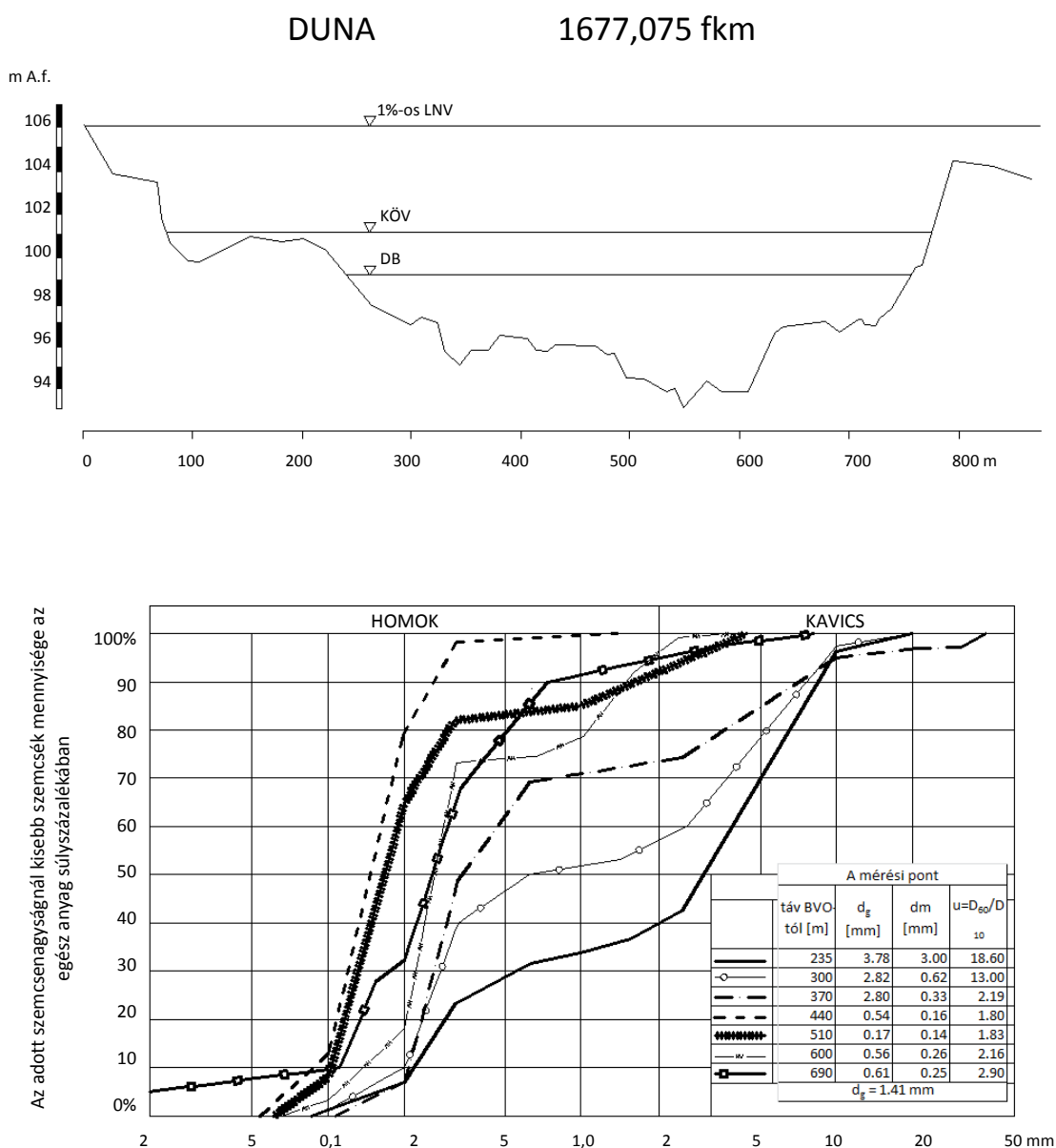


5. ábra – A szelektív erózió és a feltöltődés jellemző állapotainak szemeloszlási görbéi

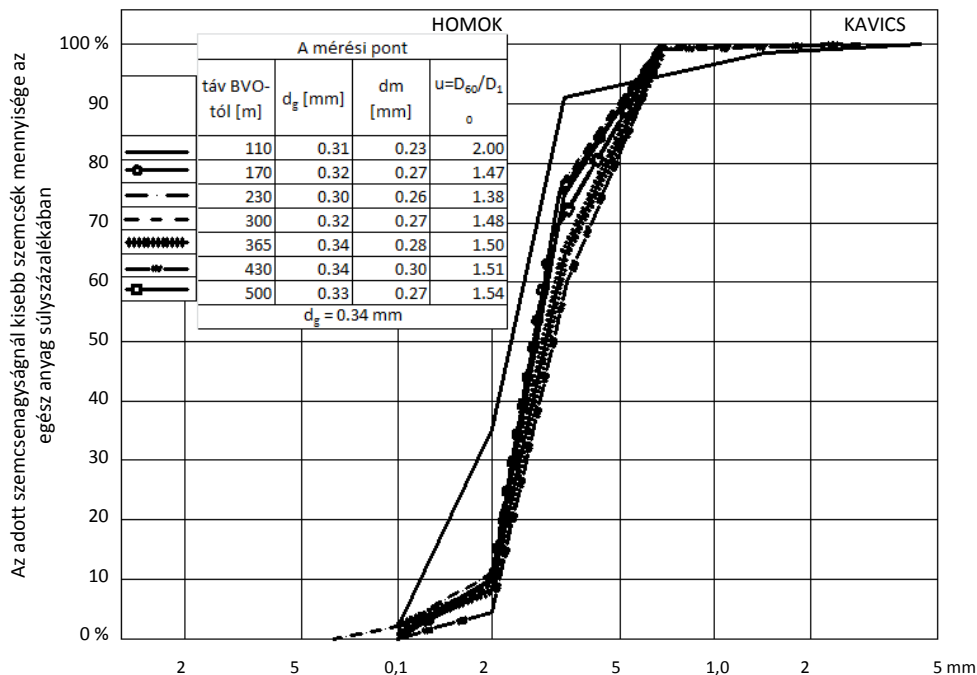
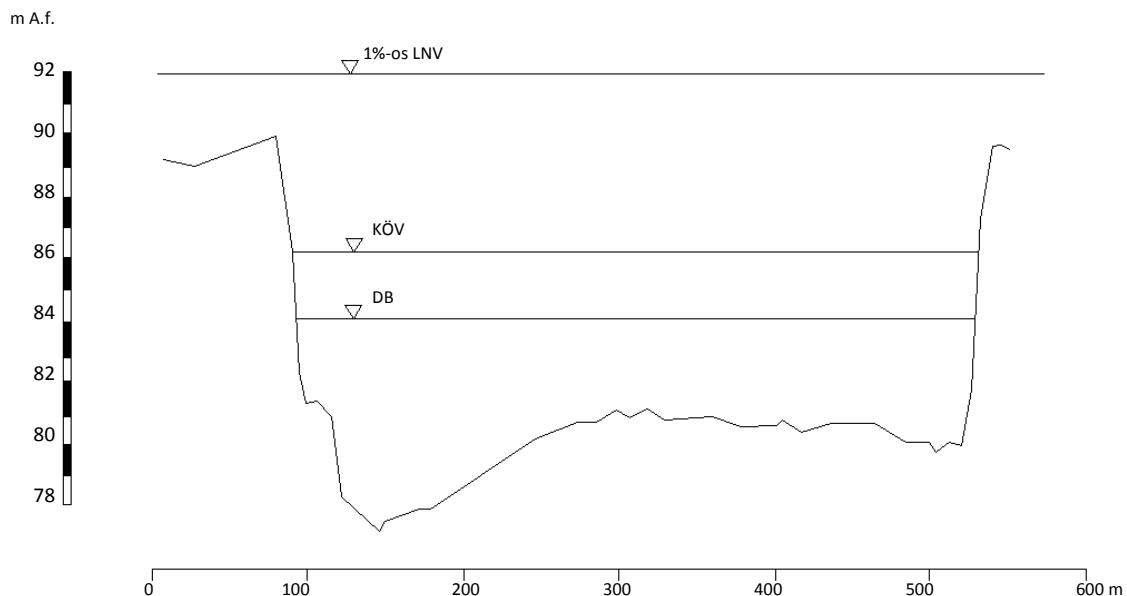
A szemeloszlási görbéknek nem csupán időbeli, hanem térbeli változása is sok hasznos információval szolgálhat. Egy adott keresztaszvénnyel vett mederanyag-minták szemeloszlási görbéit *ugyanazon diagramon* ábrázolva a hordalékmozgató erők és a kimosásra/szállításra rendelkezésre álló mederanyag arányának szelvény menti eloszlásáról kapunk felvilágosítást. Ha a görbék alakja az 5/a ábrán láthatóhoz hasonló és a görbék közel helyezkednek el egymáshoz, vagy egybe esnek, az arány egyenletesen oszlik el. Ilyen esetben a függélyes mélyülése, vagy épülése a szelvény mentén megegyezik. Ha a mélyülés és épülés mértéke közel megegyező, akkor a szelvény dinamikai egyensúlyban van. Amennyiben a szemeloszlási görbék széthúzódnak a szelvény mentén, abban kimosódó és feltöltődő szakaszok egyaránt megtalálhatók és folyószabályozási szempontból a

szelvény túlszélesedettnek tekinthető. Az alábbi két ábra (6. ábra és 7. ábra) mindkét medertípusra mutat példát. Hangsúlyozni kell, hogy a meder jelen és várható alakulására nézve a legtöbb információ akkor nyerhető, ha a mederanyag-minták fent leírt elemzésével egyidejűleg a meder alakját és elhelyezkedését a folyón helyszínrajzilag is figyelembe vesszük.

Az eljárás főleg a folyószabályozás tervezésében jelenthet nagy segítséget. A leggazdaságosabb a dinamikai egyensúlyban lévő szelvény kialakítása, azaz kulcsfontosságú a megfelelő szélesség kialakítása. Ha rendelkezésre állnak mederanyag-minták, akkor azok vizsgálatával könnyebben meghatározható a legelőnyösebb szelvénygeometria (Rákóczi, 1981).



6. ábra – Példa a hordalékmozgató erők és a rendelkezésre álló hordalékok arányának szelvény menti egyenlőtlen eloszlására



7. ábra – Példa a hordalékmozgató erők és a rendelkezésre álló hordalékok arányának szelvény menti egyenletes eloszlására (az adott szemcse nagyságnál kisebb szemcsék mennyisége a teljes anyag súlyszázalékában)

A két szelvény szélessége közötti különbség számottevő. A bal oldali szelvény 450 m körüli szélessége látszik az adott folyószakasz hidraulikai feltételei mellett ideálisnak. Annak ellenére, hogy a szelvény alakja nem teljesen szimmetrikus, a hordalékszállítás a szelvényen keresztül közel áll a dinamikai egyensúlyhoz. A jobb oldali szelvény túlságosan széles (csaknem 800 m), ennek megfelelően a mederanyag-minták szemösszetételi görbéi széthúzódnak: alakjuk öt helyen a meder feltöltődését, két helyen a kimosódását jelzik (Rákóczi, 1979).

3 Az alkalmazott numerikus modell bemutatása

A SSIIM nevű numerikus modell lehetőséget biztosít 3D turbulens áramlás, valamint lebegtetett és görgetett hordaléktranszport szimulációjára. Figyelembe véve, hogy a görgetett hordalékmozgás és a medermorfológiai változások a mederfenék közeli hidrodinamikai jellemzőktől függenek (áramlási sebesség, turbulencia, csúsztatófeszültség) szükségesnek tartottam a térbeli leírás alkalmazását, így a mederpáncélozódási folyamatok modellvizsgálataihoz TDK kutatásomban ezt a számítógépes modellt használtam.

3.1 Az áramlási modell bemutatása

3.1.1 A Navier-Stokes egyenletek

Az áramlási modell a hidrodinamikai jellemzőket a *Navier-Stokes egyenletek Reynolds-átlagolt* alakjának közelítő megoldásával (RANS) számítja. Az egyenletek a víz mozgásának egy végtelen kicsi térfogatra az impulzus-megmaradás törvényét írják le az alábbiak szerint:

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} (-P \delta_{ij} - \rho \overline{u_i u_j}) \quad (1)$$

ahol: P a nyomás, δ_{ij} a Kronecker delta ($\delta_{ij} = 1$, ha $i=j$, egyébként $\delta_{ij} = 0$), U az időátlagolt sebesség, t az idő, x a hossz, ρ a víz sűrűsége, u pedig a pillanatnyi sebesség.

A Reynolds-egyenletek három, egymásra merőleges irányba fölírt, független egyenletet jelentenek, a tömör alakhoz az Einstein-féle szummázást alkalmazva. Ez a három egyenlet azonban négy ismeretlent tartalmaz, a sebesség három főirányú komponensét és a nyomást. Az egyértelmű megoldáshoz szükséges összefüggést a térfogat megmaradás törvényéből levezetett, alábbi egyenlet adja:

$$\frac{\partial \overline{U_i}}{\partial x_i} = 0 \quad (2)$$

A Reynolds egyenletek utolsó tagjára, az ún. Reynolds-feszültségek számítására több eljárás ismert, az itt alkalmazott modell a turbulens elkeveredésre az ún. Boussinesq-féle közelítést alkalmazza:

$$-\rho \overline{u_i u_j} = \rho \nu_T \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \quad (3)$$

ahol: k a turbulens kinetikus energia, ν_T a turbulens örvény viszkozitási együttható.

Ezek alapján a Navier-Stokes egyenletek az alábbi formát öltik:

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} \left[- \left(P + \frac{2}{3} k \right) \delta_{ij} + \rho \nu_T \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \rho \nu_T \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right] \quad (4)$$

Az egyenlet bal oldalának első tagja a sebesség időbeli megváltozását (lokális gyorsulást), második tagja pedig hossz menti változását (advektív gyorsulás) írja le. Az egyenlet jobb oldalán található a nyomás és a kinetikus energia térbeli megváltozását leíró tagok, valamint az impulzusediffúziót és feszültséget becsülő összefüggések (lásd pl. Olsen, 2009a).

3.1.2 A k - ε turbulencia modell

A Navier-Stokes egyenletekben szereplő Reynolds-féle normál- ill. nyírófeszültségek a turbulens áramlásban kialakuló örvények képviselte mozgási energiát, és annak disszipációját jelentik. Mivel ez az energiataralom, ill. veszteség messze nem elhanyagolható, sőt épp az áramlás hordalékmozgató jellegének fő meghatározói, az áramlás e célból való megbízható modellezéséhez fontos annak minél megbízhatóbb becslése. Kisebb örvények modellezéséhez már olyan finom időbeli és térbeli felbontásra lenne szükség, aminek számítási igénye személyi számítógépekkel nem kezelhető. Ezért a Reynolds-féle nyírófeszültségeket az előbb említett Boussinesq-közelítéssel számítja a program. Az egyenletben szereplő ν_T turbulens örvényviszkozitási együttható térbeli és időbeli eloszlását az ún. k - ε turbulencia modell alapján számítjuk, ami az örvényviszkozitást az alábbi összefüggéssel becsli:

$$\nu_T = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (5)$$

ahol: C_μ egy konstans, értéke 0,09.

Az összefüggésben szereplő k és ε értékeit az alábbi transzportegyenletekkel kerülnek számításra:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + U_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\nu_T}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + P_k - \varepsilon \quad (6)$$

ahol: P_k a turbulens kinetikai energia termelődése, ε pedig a turbulens kinetikai energia disszipációs rátája.

P_k -t és ε -t az alábbi összefüggés, ill. transzportegyenlet határozzák meg:

$$P_k = \nu_T \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \left(\frac{\partial U_j}{\partial x_i} + \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \right) \quad (7)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + U_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\nu_T}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} P_k + C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (8)$$

ahol: $C_{\varepsilon 1}$, $C_{\varepsilon 2}$, σ_k és σ_ε konstansok, értékük: $C_{\varepsilon 1} = 1,44$, $C_{\varepsilon 2} = 1,92$, $\sigma_k = 1,0$ és $\sigma_\varepsilon = 1,3$.

Az egyenletek alapján látható, hogy a k - ε turbulencia modellben az örvényviszkozitáció az irányok mentén nem változik, tehát izotróp turbulenciát feltételez. Laboratóriumi mérések azonban kimutatták, hogy az örvényviszkozitáció akár egy nagyságrenddel is nagyobb lehet az áramlás irányában, mint arra merőlegesen. A k - ε turbulencia modell alkalmazásának az izotrópia érvényessége szabhat határt.

3.1.3 Faltörvény

Az áramló folyadékot határoló falak mentén a modell közelítő megoldása numerikus stabilitási problémákba ütközhet a sebességek hirtelen, nagymértékű megváltozása miatt. A probléma egy lehetséges megoldása a térben diszkrét megoldás rácshálójának helyi sűrítése lehetne, ami azonban nagymértékben megnövelné a számítási igényt. Ennek kiküszöbölésére a falak meghatározott környezetében nem az eddig ismertetett alapegyenleteket, hanem az ún. faltörvény összefüggésével számol a modell. A fél-empirikus egyenlet a következő:

$$\frac{U}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \left(\frac{30y}{k_s} \right) \quad (9)$$

ahol: U a mederrel lokálisan párhuzamos sebesség, u_* a fenék-csúsztatósebesség, κ a Kármán féle állandó, $\kappa = 0,4$, y a faltól (itt mederfelszíntől) mért merőleges távolság, k_s pedig a mederanyag szemösszetételre jellemző ún. Nikuradze-féle érdességmagasság.

Ez az összefüggés egy olyan logaritmikus függvényt ír le, aminek az értéke a mederfelszín elérése előtt éri el a nullát.

A modellben beállítható, hogy a faltörvény alapján számítsa a mederfenék, illetve az oldalfalak mentén az első cellák sebesség- és turbulencia-paramétereit is (lásd pl. Hanczár, 2009).

A numerikus modell az előzőekben bemutatott egyenleteket helyszínrájzilag egy strukturált, peremhez illeszkedő, görbevonalú rácshálón oldja meg, az áramlási tartományt függőleges értelemben az ún. szigma-transzformáció elvén diszkrét számítási rétegekre osztva. A numerikus megoldást egy véges-térfogat típusú megoldó szolgáltatja, amely az advekción tagokat másodrendű sémával közelíti. A numerikus megvalósítás részleteit a következőkben mellőzöm, mert számos angol (pl. Olsen, 2009a; Baranya, 2010) és magyar nyelvű (pl. Hanczár, 2009) publikáció már bemutatja azt.

3.2 A hordaléktranszport-modell ismertetése

A vízfolyásokban tapasztalt hordaléktranszport alapvetően két folyamatból tevődik össze: a vízoszlop mentén teljesen átkeveredett lebegtetett- és a meder közelében végbemenő görgetett hordalékmozgásból. Az adott szemcse mérete és a víz turbulenciája határozza meg, hogy a szemcse lebegtetett, vagy görgetett hordalékmozgást végez-e. Fontos, hogy a két folyamat számítását a kéznél lévő modellben megkülönböztethetjük. Emellett, a hordalék transzport folyamatok modellezéséhez többfrakciós leírást alkalmazhatunk, amiket egyenként, egy reprezentatív szemcsemérettel és az ahhoz tartozó ülepedési sebességgel kell definiálnunk.

3.2.1 Lebegtetett hordaléktranszport

A lebegtetett hordalék koncentrációjának tér- és időbeli változása az alábbi advekción-diffúziós egyenlet alapján számítható:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + U_j \frac{\partial c}{\partial x_j} + w \frac{\partial c}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_T \frac{\partial c}{\partial x_j} \right) + S \quad (10)$$

ahol: c a koncentráció, w az ülepedési sebesség, Γ_T a turbulens diffúziós együttható, S a forrástag (a mederfenékről elragadott vagy lerakott hordalék hozama).

Ismert, hogy a turbulens örvénydiffúziós együtthatót a turbulencia modellből kapott örvényviszkózitás és az ún. Schmidt szám hányadosaként kaphatjuk:

$$\Gamma_T = \frac{\nu_T}{Sc} \quad (11)$$

A Schmidt szám alapbeállítás szerint 1,0 (vagyis a turbulens impulzus- és az anyagátvitel együtthatója megegyezik), de ettől eltérő értéket is megadhatunk (Olsen, 2009b).

Lebegtetett hordaléktranszport esetén, a mederfenék közeli cellákban az esetleges mederanyag-felkeveredés vagy a szállított hordalék kiüledésének becslésére egy ún. egyensúlyi koncentráció kerül meghatározásra (van Rijn, 1987):

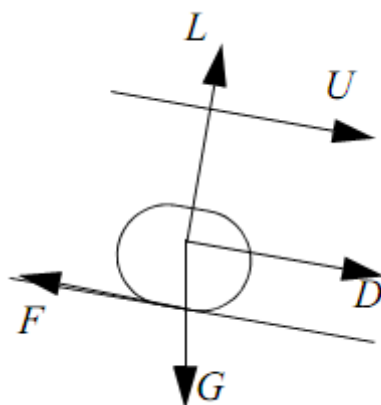
$$c_{bed} = 0,015 \frac{d^{0,3}}{a} \frac{\left[\frac{\tau - \tau_c}{\tau_c}\right]^{1,5}}{\left[\frac{(\rho_s - \rho_w)g}{\rho_w v^2}\right]^{0,1}} \quad (12)$$

ahol: c_{bed} a mederfenék közeli egyensúlyi koncentráció, „a” az érdességmagasság, τ_c a kritikus csúsztató feszültség, ρ_s a hordalék, ρ_w pedig a víz testsűrűsége, d a számított frakcióra jellemző szemcseátmérő, v pedig a víz kinematikai viszkozitása.

3.2.2 A kritikus csúsztatófeszültség meghatározása Shields kísérletei alapján

Mind a lebegtetett hordalék fenék közeli egyensúlyi töménységének meghatározásánál, mind a görgetett hordalék egységnyi szélességre vonatkozó (fajlagos) hozamának számításánál egy sarkalatos kérdés a kritikus csúsztatófeszültségnek a meghatározása. Ez az a feszültségérték a medernél, aminél az adott átmérőjű szemcsét a vízfolyás kiragadja nyugalmi helyzetéből. A keresett feszültség meghatározásának egy lehetséges eljárását Shields dolgozta ki az alábbi módon:

A 8. ábra a tetszőleges mederszemcsére ható erőket mutatja: a nehézségi erő (G), a felhajtóerő (L), a súrlódási (F) és az elragadó (közegellenállási) erő (D).



8. ábra - A szemcsére ható erők

A súrlódási erőt a gravitációval és a felhajtóerővel kifejezve, majd mindezt a fenék esésének irányába felírt egyensúlyi egyenletből az alábbi összefüggést kapjuk:

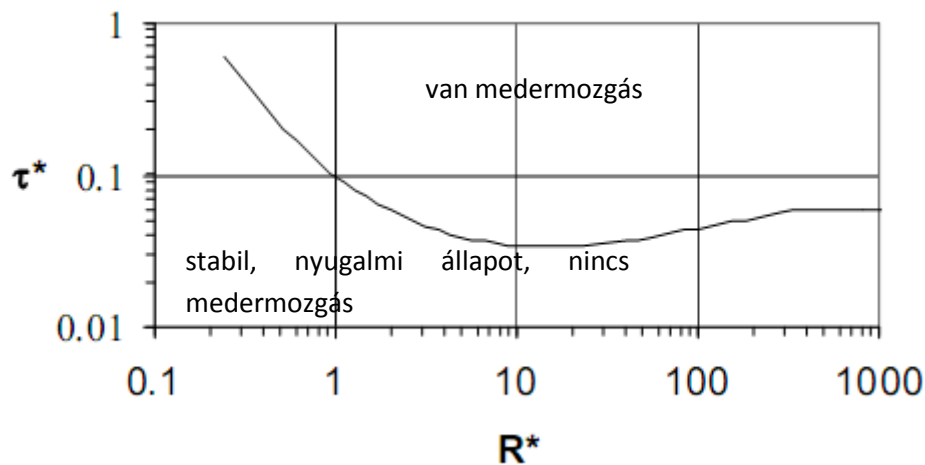
$$d = \frac{\tau_c}{g(\rho_s - \rho_w)\tau^*} \quad (13)$$

ahol: d a szemcse átmérője, g a nehézségi gyorsulás, τ^* dimenziómentes csúsztatófeszültség, a dimenziómentes Shields-féle feszültség.

Az egyenletből a dimenziómentes csúsztatófeszültséget kifejezve kapjuk:

$$\tau^* = \frac{\tau_c}{g(\rho_s - \rho_w)d} \quad (14)$$

Shields kísérletei alapján az alábbi görbét állította föl a kritikus csúsztatófeszültség meghatározására (9. ábra):



9. ábra - Shields görbe

Az abszcisszán az úgynevezett részecske Reynolds-szám szerepel, amit a már definiált paraméterekből a következő módon számolunk:

$$R^* = \frac{u_* d}{\nu} = \frac{d \sqrt{\frac{\tau}{\rho}}}{\nu} \quad (15)$$

Shields görbéje azt mutatja meg, hogy mi az az adott átmérőjű szemcsére jellemző kritikus csúsztatófeszültség, amit ha a fenék-csúsztatófeszültség meghalad, a részecske kimozdul nyugalmi állapotából. A görbe fordított gondolatmenettel arra is felhasználható, hogy ismert fenék-csúsztatófeszültség esetén meghatározzuk annak a szemcsének az átmérőjét, ami még éppen nyugalomban marad (mederstabilizálás feladatok).

A Shields görbe csak a 0,1 mm-nél nagyobb szemcséknél alkalmazható, mert a kisebb hordalékszemcsék esetén a kohéziós erő és a turbulencia már nem elhanyagolható, a felhajtóerő jelentősége viszont elhanyagolhatóvá válik.

A numerikus modell a mederfenék közeli számítási cellákban az ott jellemző turbulens energia alapján határozza meg a fenék-csúsztatófeszültség értékét egy egyensúlyi összefüggést felhasználva ($\tau = 300 \cdot k$). Ennek segítségével R^* számíthatóvá válik az egyes szemcseméretekre, majd a Shields görbe segítségével becsüljük az egyes szemcsékhez tartozó kritikus fenék-csúsztatófeszültség értékeket. A modell így határozza meg, hogy melyik frakció lép be az üledéktranszportba, vagy talál stabil helyet.

3.2.3 Görgetett hordaléktranszport

Alapbeállításban a modell a görgetett hordalék egységnyi szélességre vonatkozó hozamát (q_b) van Rijn (1987) tapasztalati összefüggésével számolja:

$$\frac{q_b}{D_{50}^{1,5} \sqrt{\frac{(\rho_S - \rho_W)g}{\rho_W}}} = 0,053 \frac{\left[\frac{\tau - \tau_c}{\tau_c}\right]^{2,1}}{D_{50}^{0,3} \left[\left(\frac{(\rho_S - \rho_W)g}{\rho_W v^2}\right)\right]^{0,1}} \quad (16)$$

ahol: D_{50} a szemeloszlási görbe 50%-hoz tartozó szemcseátmérő.

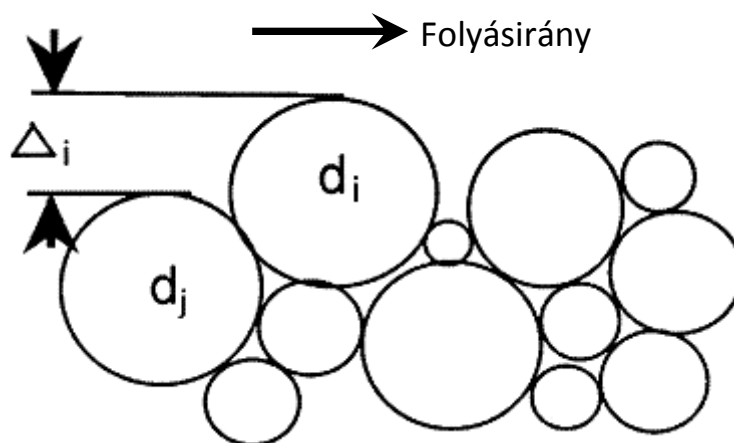
A van Rijn formulát a homogén szemösszetételű medrekre fejlesztették ki. Már most megjegyzem, hogy a leírásából adódóan (nevezetesen, hogy nem veszi figyelembe a finomabb szemcsék nagyobbak közötti rejtőzését, és a durvább szemcsék az áramlásnak való nagyobb kitettségét) a vegyes szemösszetételű hordaléktranszport modellezésekor a valóságosnál nagyobb mederváltozásokat adhat.

3.2.4 Görgetett üledéktranszport a Wu formulával

A numerikus modellben lehetőség van a görgetett hordalékmozgás vizsgálatára Wu et al. (2000) összefüggéseit is használni. A módszertant a vegyes szemösszetételű meder hordaléktranszportjának becslése céljából fejlesztették ki. Az eljárás újdonsága annak idején abban állt, hogy egy korrekciós tényezőt vezettek be, amit a leárnyékolás és a kitettség valószínűségének függvényeként adtak meg. Ennek legfontosabb elemeit mutatom be az alábbiakban.

Leárnyékolási és kitettségi faktor

Egy kiragadott mederszemcsére ható elragadó és azt megakadályozó erők mértéke nagyban függ a szemcse elhelyezkedésétől és a közvetlen környezetében elterülő szemcséktől. Ha a felvízi oldalán nincs mellette egy másik szemcse, akkor teljes mértékben kitett az áramlásnak és ekkor a legnagyobb az ún. kitettségi magassága. A d_i átmérőjű szemcse Δ_i kitettségi magasságát a 10. ábra szemlélteti.



10. ábra - Kitettségi magasság definiálása

Ez alapján, ha $\Delta_i > 0$, a szemcse kitettségét, ha $\Delta_i < 0$, a szemcse leárnyékolását kell figyelembe venni. Mivel a mederszemcsék eloszlása véletlenszerű, Δ_i egy véletlen változó.

Annak a valószínűségét, hogy d_i szemcse d_j szemcse előtt van, a d_j méretű szemcse frakciójának a teljes mederanyag-keverékre számolt p_{bj} arányával közelítik. Ezek alapján egy d_i szemcse leárnyékolási (*hidden*) és kitettségi (*exposed*) valószínűsége:

$$p_{hi,j} = p_{bj} \frac{d_j}{d_i + d_j} \quad (17)$$

$$p_{ei,j} = p_{bj} \frac{d_i}{d_i + d_j} \quad (18)$$

A teljes leárnnyékolási és kitettségi valószínűségek értéke:

$$p_{hi} = \sum_{j=1}^N p_{bj} \frac{d_j}{d_i + d_j} \quad (19)$$

$$p_{ei} = \sum_{j=1}^N p_{bj} \frac{d_i}{d_i + d_j} \quad (20)$$

ahol: N a mederanyag vizsgálatokban megkülönböztetett frakcióinak száma.

A teljes leárnnyékolási és kitettségi faktor a következő:

$$\eta_i = \left(\frac{p_{ei}}{p_{hi}} \right)^m \quad (21)$$

ahol: m empirikus paraméter.

Hordalékhozam számítása

A mederszemcsék leárnnyékolási és kitettségi mértéke a kritikus csúsztatófeszültséget nagymértékben befolyásolják. A modell ezt úgy veszi figyelembe, hogy a kritikus csúsztatófeszültséget nem a Shilds görbe alapján számolja, hanem az alábbi összefüggéssel közelíti:

$$\frac{\tau_c}{(\gamma_s - \gamma)d_i} = \theta_c \left(\frac{p_{ei}}{p_{hi}} \right)^m \quad (22)$$

ahol: τ_c a d_i átmérőjű szemcse kritikus csúsztatófeszültsége, θ_c a homogén, d_i átmérőjű mederanyag szemcséjének dimenziómentes kritikus csúsztatófeszültsége.

Laboratóriumi és terepi mérések alapján $\theta_c = 0,03$ és $m = -0,6$.

A görgetett hordalékhozamot ($q_{b,i}$) a modell az alábbi összefüggéssel számítja:

$$q_{b,i} = \phi_{b,i} p_{b,i} \sqrt{(\gamma_s - \gamma)g d_i^3} \quad (23)$$

ahol: $\phi_{b,i}$ az i -dik frakció dimenziómentes hordalékhozama, $p_{b,i}$ a d_j méretű szemcse frakciójának a teljes mederanyag keverékre számolt aránya, γ_s és γ a hordalék és a víz fajsúlya.

A dimenziómentes hordalékhozamot az alábbi egyenlet adja meg:

$$\phi_{b,i} = 0.0053 \left[\left(\frac{n'}{n} \right)^{1.5} \frac{\tau_b}{\tau_{c,i}} - 1 \right]^{2.2} \quad (24)$$

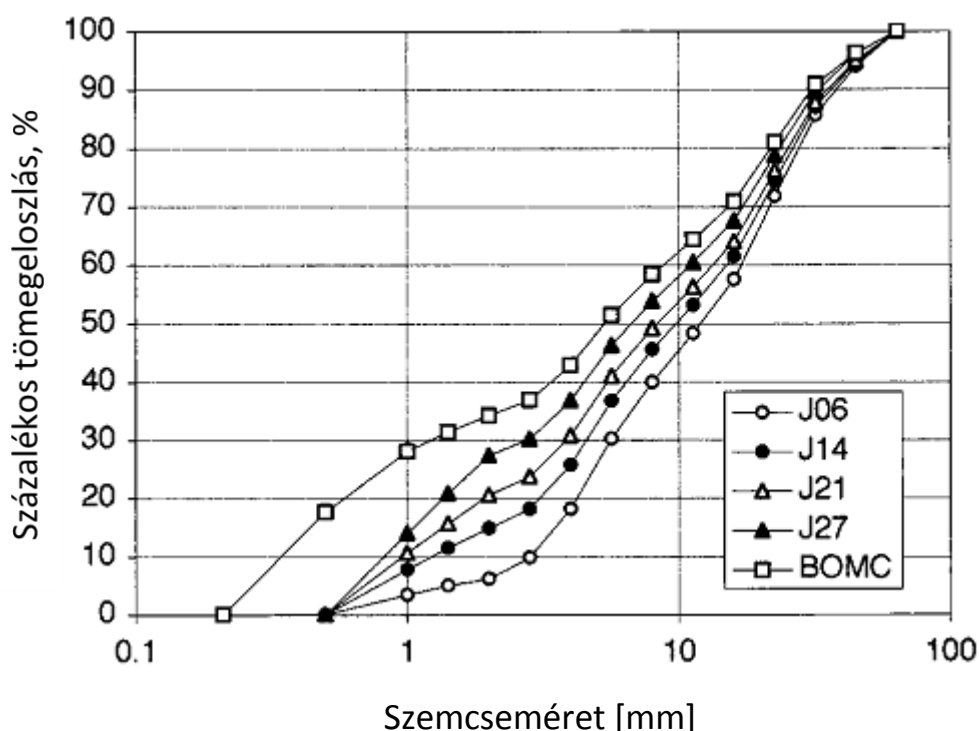
ahol: n a hidradinamikai modellben kalibrált Manning-féle érdességi együttható, n' az i -dik szemcse érdességének megfelelő Manning-féle érdességi együttható, τ_b a szemcse érdessége okozta fenék-csúsztatófeszültség (teljes fenék-csúsztatófeszültség) (Wu et al., 2000).

4 Új, vegyes szemösszetételű hordaléktranszport számítására alkalmas modell implementálása a numerikus modellbe

Peter L. Wilcock és Joanna C. Crowe 2003. februárjában publikáltak a Journal of Hydraulic Engineering című folyóiratban egy cikket, amiben egy kavics és homok vegyes szemösszetételű mederanyagokra vonatkozó hordaléktranszport-modellt ismertetnek. Kutatásuk alapjául saját laboratóriumi kísérleteik szolgáltak. A modell több, korábbi görgetett hordaléktranszport-modell koncepcióját magában foglalja, pl. a leárnýekolást/kitettséget, valamint az úgynevezett hasonlósági összefüggést. Wilcock és Crowe munkája azonban egyedülálló abban, hogy a teljes szemeloszlási görbét figyelembe veszi, valamint hogy számításba veszi a homoktartalom és a szemcsék elragadó képessége között tapasztalt nemlineáris összefüggést. Mivel az alábbiakban ismertetésre kerülő hordaléktranszport-modell több paramétert figyelembe vesz, mint Wu et al. (2000) összefüggése, továbbá nagyobb számú és részletesebb méréseken alapszik, azt várjuk, hogy az inhomogén szemösszetételű medrek morfordinamikai változásának becslésére pontosabb eredményt adnak, mint a korábbi eljárások. Az empirikus modell beprogramozásának ismertetése előtt annak vizsgálati alapjait ismertetem.

4.1 Laboratóriumi vizsgálatok

A kísérletek elvégzéséhez összesen öt keveréket állítottak elő. A keverékek jelölése a következő: J06, J14, J21, J27, valamint az a keverék, amiből az előző négyet előállították, BOMC. A keverékek homoktartalma ($0,5 \text{ mm} < d_{\text{homok}} < 2 \text{ mm}$), ami megjelenik a keverék jelölésében rendre 6,2%, 14,9%, 20,6%, 27%, illetve 34,3%. A keverékek szemeloszlási görbéit az alábbi ábra prezentálja.



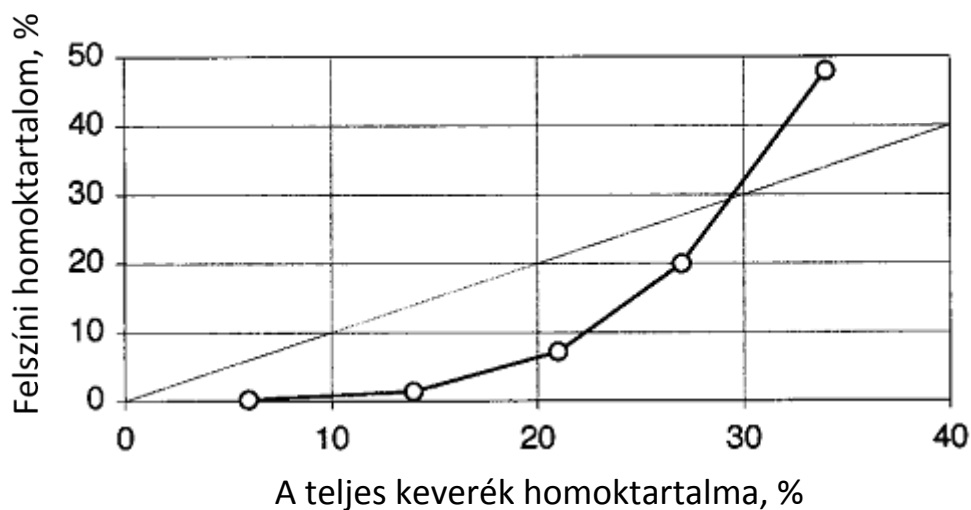
11. ábra – A vizsgált öt keverék szemeloszlási görbéje tömegszázalékban (Wilcock and Crowe, 2003)

Minden keverékkel 9-10 kísérletet végeztek el, összesen 48-at. A szemcséket egy 8 m hosszú és 0,6 m széles csatornába helyezték el. A vízmélységet sekélyen tartották, 0,09 m és 0,12 m között, a kísérletek 85 %-ában 0,10 m és 0,11 m között. A vizet és a mederanyagot is cirkuláltatták

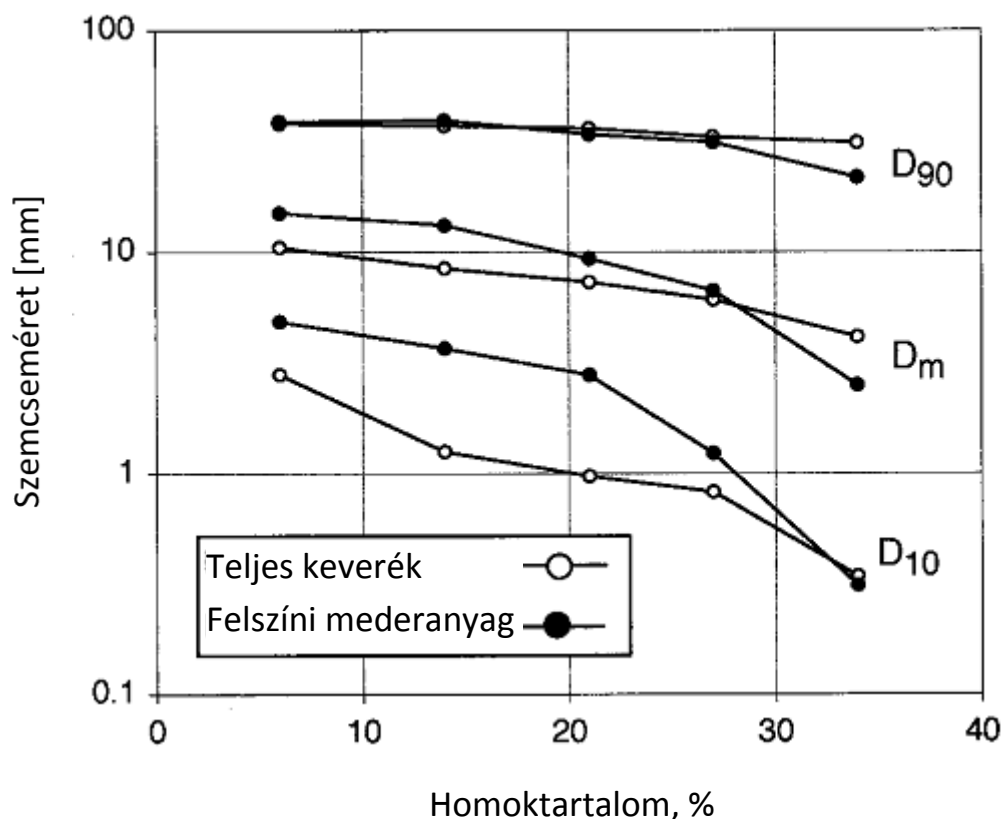
(visszaforgatták) a csatornában. Ilyen módon kialakított laborelrendezésben vizsgálták a különböző szemeloszlású mederanyagok vándorlását. Folyamatosan mérték a vízhozamot, a csatorna hossza mentén a vízfelszínen a vízsebességet, valamint a vízmélységet és a mederanyag vastagságát. Egy mérés addig tartott, amíg ki nem alakult egy dinamikai egyensúly, amit az állandó hordalékhozammal és a változatlan mederanyag-szemeloszlásával állapítottak meg. A fenék-csúsztatófeszültség számításánál figyelembe vették a falak hatását.

Minden szemcsét a méretük szerint eltérő színűre festettek. A csatorna egy pontja fölül készített fénykép alapján, a szemcsék szín szerinti azonosításával meg tudták határozni a fénykép területére eső meder-felszínrész szemeloszlását. A falak 10 cm-es környezetét már nem vették figyelembe.

A következő grafikonok a kísérletek eredményei alapján készültek. A feltüntetett értékek a végső, dinamikus egyensúlyi állapotból származnak. A mederfelszín homoktartalma a kezdeti állapotban megegyezett a teljes keverék homoktartalmával.



12. ábra – A felszíni homoktartalom értéke a teljes keverék homoktartalma függvényében (Wilcock and Crowe, 2003)



13. ábra – A teljes keverék és a felszíni mederanyag D_{90} , D_{50} és D_{10} -es szemcseméretei (Wilcock and Crowe, 2003)

A 12. grafikon azt szemlélteti, hogy a dinamikus egyensúlyi állapot eléréséig a legnagyobb homoktartalmú BOMC-nevű mintán kívül az összes keverékben lecsökkent a homoktartalom. Ez a relatív fogyás a két legkevésbé homokos keverékben, a J06 és J14-ben különösen jelentős, a végső homoktartalom csupán 0,1 és 1,3 %. A 13. ábra a BOMC keveréken kívül az összes esetén a homoktartalom csökkenését bizonyítja. D_{90} görbéi között nincs jelentős különbség. D_{10} értékeinek növekedése viszont egyértelműen a finom frakció csökkenését mutatja. A D_{50} -es görbék az alacsonyabb homoktartalmú mederanyagok durvulására, a kezdetben legmagasabb homoktartalmú keverék finomodására utal.

A tapasztalatok alapján Wilcock és Crowe arra jutottak, hogy transzportmodelljüket úgy fejlesztik, hogy abban a szemcsék dimenziómentes hordalékhozamát a szemeloszlási görbe függvényében becsülik meg.

4.2 A modell ismertetése

Fenti hordaléktranszport-modell alapját tehát a dimenziómentes hordalékhozam empirikusan kidolgozott hasonlósági összefüggése adta. A hasonlósági összefüggés a következő:

$$W_i^* = f(\tau/\tau_{ri}) \quad (25)$$

ahol: W_i^* az i -dik frakció dimenziómentes hordalékhozama, τ a fenék-csúsztatófeszültség, τ_{ri} pedig a referencia fenék-csúsztatófeszültség (hasonlósági paraméter).

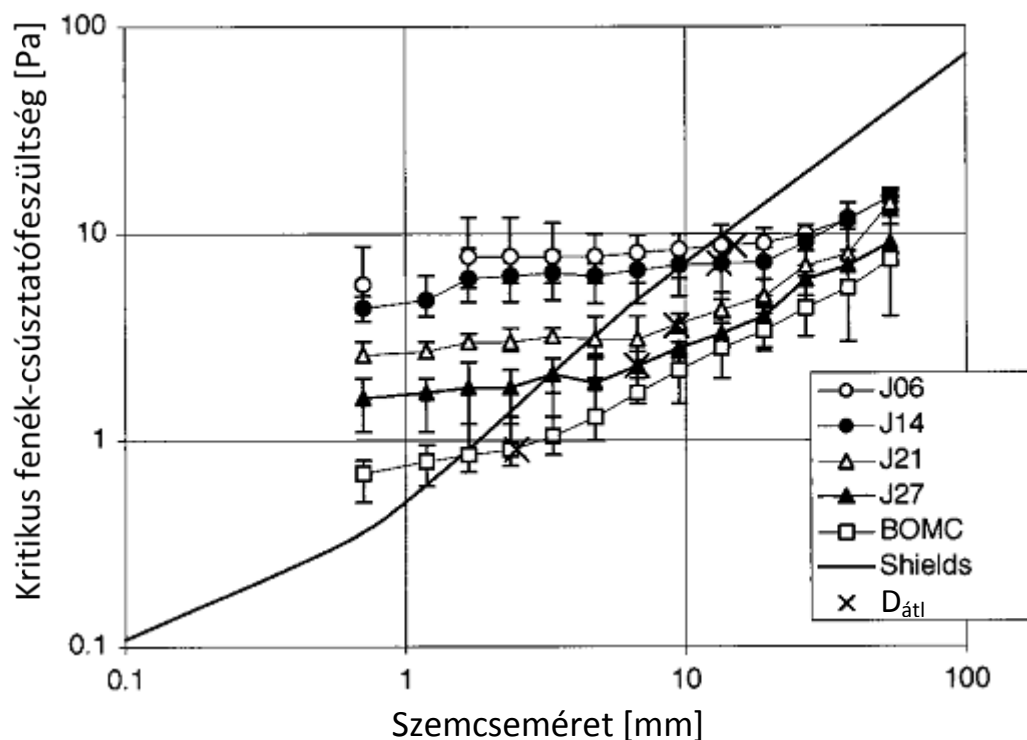
A dimenziómentes hordalékhozam fizikai jelentése a következő:

$$W_i^* = \frac{(s-1)gq_{bi}}{F_i u_*^3} \quad (26)$$

ahol: s a hordalék és víz sűrűségének aránya, q_{bi} az i -dik frakció egységnyi szélességre vett hordalékhozama, F_i az i -dik frakció tömegaránya a mederanyagban, u_* a csúsztató sebesség ($u_* = [\tau/\rho]^{0.5}$), ρ a víz sűrűsége.

A referencia fenék-csúsztatófeszültség τ_{ri} a fenék-csúsztatófeszültségnek az az értéke, aminél W_i^* egy olyan kis referenciaértékkel egyenlő, $W_r^* = 0,002$, aminél a szemcse éppen mozogni kezd. A Shields görbe ismertetésénél ezt a feszültséget kritikus fenék-csúsztatófeszültségnek neveztük.

A Shields görbével történő kritikus fenék-csúsztatófeszültség meghatározási eljárást homogén mederanyagra dolgozták ki, a szemeloszlási görbét ezért nem is veszi figyelembe. Vegyes szemösszetételű mederanyag esetén a módszertan alkalmazásától nem várhatunk megbízható becslést, hiszen nem veszi figyelembe az egyes frakciók között fellépő kölcsönhatásokat, mint pl. a leárnýékoltság/kitettség. Wilcock és Crowe felrajzolta az öt keverék frakcióinak, külön "X"-el jelölve azok átlagainak kritikus meder csúsztatófeszültségét (14. ábra). A grafikonon feltüntették a Shields görbe alapján számított feszültségeket is.

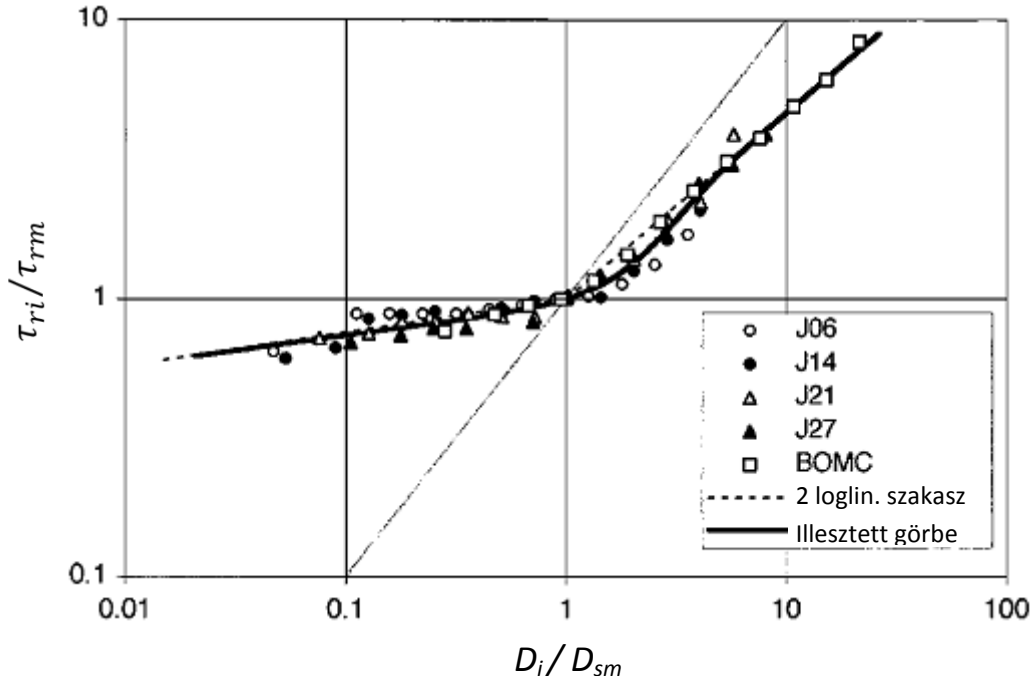


14. ábra – A vizsgált keverékek frakcióinak kritikus fenék-csúsztatófeszültségei laboratóriumi mérések alapján és a Shields görbével becslve (Wilcock and Crowe, 2003)

A grafikonon szembevető a Shields görbével becslő és a mőrt kritikus fenék-csúsztatófeszültségek közötti eltérés. Az átlagos szemcseméretek fenék-csúsztatófeszültségeinek trendjét ugyan jól követi a Shields görbe, de a különbség ott sem elhanyagolható. A Shields görbe alkalmazása tehát nem ad megbízható becslő a vegyes szemösszetételő mederanyag frakcióinak kritikus fenék-csúsztatófeszültségeire.

4.2.1 Leárnýékolás/kitettség figyelembe vétele

Az általános modellek szerint τ_{ri} meghatározásához egy egyszerű összefüggés vezet. A laboratóriumi mérések eredményeiből előállított τ_{ri}/τ_{rm} hányadosokat D_i/D_{sm} függvényében ábrázolva az alábbi pontthalmazt kapták (15. ábra).



15. ábra – A referencia fenék-csúsztatófeszültségek és az átlagos szemcsék referencia fenék-csúsztatófeszültségeinek aránya, azok átmérőinek hányadosa függvényében (Wilcock and Crowe, 2003)

A kettős-logaritmusos ábrázoláson látható, hogy a pontok jól illeszkednek két közel loglineáris és egy átmeneti szakaszra. Az egyszerűbb számolás végett azonban ezt a görbét egy hatványfüggvénnyel célszerűbb leírni, amit Wilcock és Crowe az alábbi szerint vett föl:

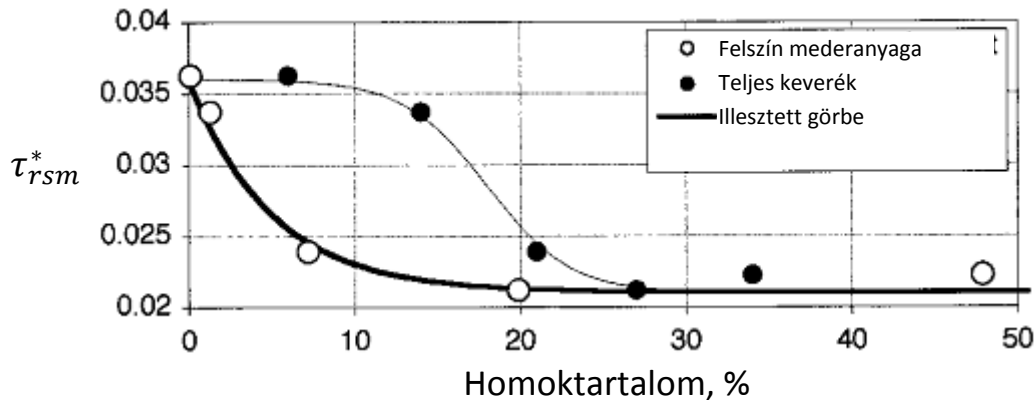
$$\frac{\tau_{ri}}{\tau_{rm}} = \left(\frac{D_i}{D_{sm}} \right)^b \quad (27)$$

$$b = \frac{0,67}{1 + e^{\left(1,5 - \frac{D_i}{D_{sm}}\right)}} \quad (28)$$

Ezek az összefüggések egy olyan leárnýékoltsági/kitettségi viselkedésre utalnak, mint amit az első fejezetben ismertetett leárnýékolási tényezőt becsló eljárások mutatnak (2. ábra). A görbén a $D_i/D_{sm} = 1$ abszcissa-értéknél egy határozott törés figyelhetı meg.

Az ismertetett összefüggés alkalmazásával a referencia fenék-csúsztatófeszültség meghatározásához szükséges az átlagos szemcseméret referencia csúsztatófeszültsége.

A laboratóriumi mérésekből felrajzolták az átlagos szemcsemérethez tartozó dimenziómentes csúsztatófeszültséget (τ_{rsm}^*) a teljes keverék, valamint a dinamikus egyensúlyi állapotnál kialakult felszíni mederanyag homoktartalma függvényében (16. ábra).



16. ábra – Az átlagos szemcsemérethez tartozó dimenziómentes csúsztatófeszültség a mederfelszín homoktartalma függvényében (Wilcock and Crowe, 2003)

Azt találták, hogy a mederfelszín anyagának homoktartalma (F_s) és az átlagos szemcseméret dimenziómentes csúsztatófeszültsége között egy jól illeszkedő görbét lehet meghatározni, amit az alábbi egyenlettel írtak le:

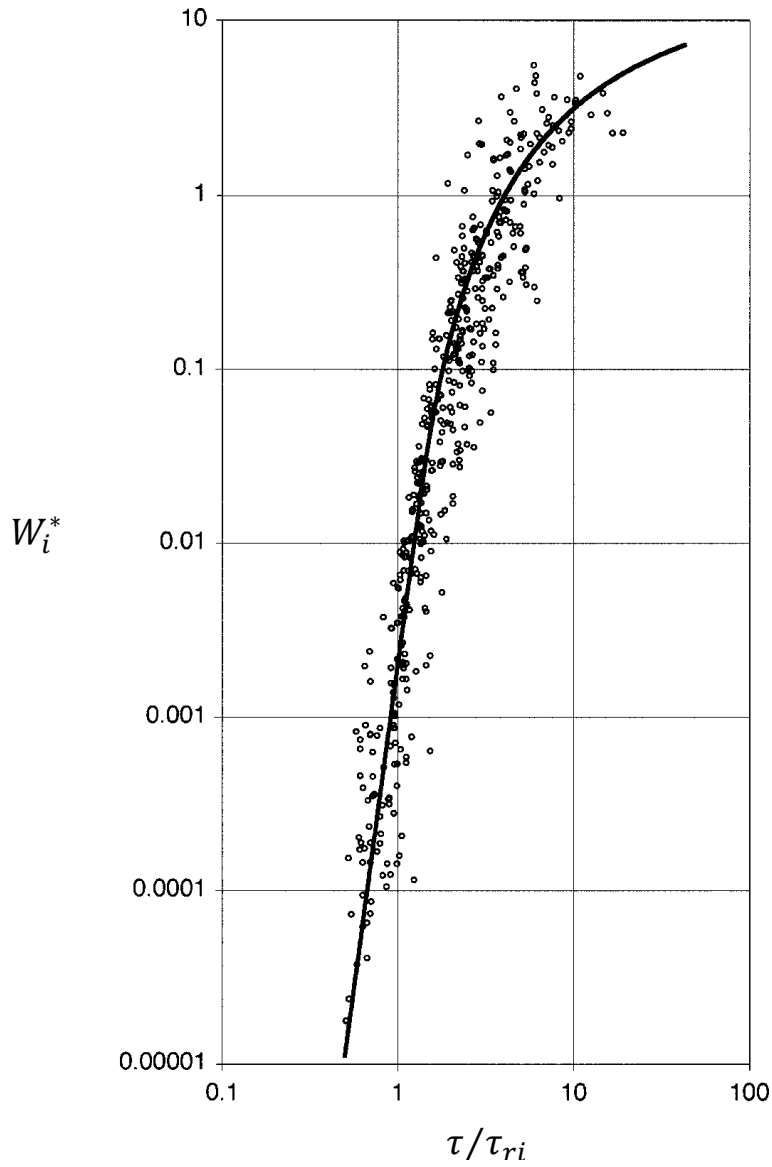
$$\tau_{rm}^* = 0,021 + 0,015e^{-20F_s} \quad (29)$$

A dimenziómentes csúsztatófeszültség ismeretében a referencia fenék-csúsztatófeszültség már számítható:

$$\tau_{rm}^* = \frac{\tau_{rm}}{g(\rho_s - \rho_w)d} \quad (30)$$

4.2.2 A dimenziómentes hordalékhozam számítása

A dimenziómentes hordalékhozam számításához az arányossági összefüggést használták fel. A W_i^* és a τ/τ_{ri} hányadosok között fennálló kapcsolatot leíró összefüggés vizsgálatához felrajzolták a méréseikből származó, két változó pontthalmazát (17. ábra).



17. ábra – A dimenziómentes hordalékhozam a fenékcúsztatófeszültség és a hasonlósági paraméter (τ_{ri}) hányadosának függvényében (Wilcock and Crowe, 2003)

A pontokra illesztett görbével jól közelíthető a két mennyiség közötti összefüggés. A görbe és a pontok között ugyan nem tökéletes az egyezés, a trendet tisztán követi. A két mennyiség között felállított összefüggés az alábbi:

$$W_i^* = \begin{cases} 0,002\theta^{7,5} & \text{ha } \theta < 1,35 \\ 14 \left(1 - \frac{0,894}{\theta^{0,5}}\right)^{4,5} & \text{ha } \theta \geq 1,35 \end{cases} \quad (31)$$

ahol: $\theta = \tau/\tau_{ri}$.

A dimenziómentes hordalékhozamból és a (26) összefüggéssel kifejezett egységnyi szélességre vett hordalékhozamból a koncentrációt az alábbi összefüggéssel lehet meghatározni:

$$c_i = \frac{q_{bi}}{vh\rho_s} \quad (32)$$

ahol: c_i az i -dik frakció koncentrációja, h a vízmélység, v pedig a fenék-közeli áramlási sebesség (Wilcock and Crowe, 2003).

4.3 A modell számítási menetének lépései

1. lépés: Az átlagos szemcsemérethez tartozó dimenziómentes csúsztatófeszültség meghatározása a homoktartalom függvényében (29. összefüggés)
2. lépés: Az átlagos szemcsemérethez tartozó referencia fenék-csúsztatófeszültségének meghatározása a dimenziómentes csúsztatófeszültség függvényében (30. összefüggés)
3. lépés: Az i -dik frakció referencia fenék-csúsztatófeszültségének meghatározása az átlagos szemcsemérethez tartozó referencia fenék-csúsztatófeszültség, valamint az i -dik frakció átmérőjének és az átlagos szemcseméret átmérőjének függvényében (27. és 28. összefüggések)
4. lépés: Az i -dik frakció dimenziómentes hordalékhozamának számítása a referencia fenék-csúsztatófeszültségének és a fenék-csúsztatófeszültségnek az arányából (31. összefüggés)
5. lépés: Az i -dik frakció egységnyi szélességre vett hordalékhozamának számítása a dimenziómentes hordalékhozam, a frakció aránya és a csúsztatósebesség függvényében (26. összefüggés)
6. lépés: Az i -dik frakció koncentrációjának számítása a hordalékhozam, a vízmélység és a vízsebesség függvényében (32. összefüggés)

4.4 Wilcock és Crowe hordaléktranszport-modelljének beprogramozása

A tanulmányomban alkalmazott áramlási és hordaléktranszport-modell egy fő programból és több alprogramból épül fel, továbbá az egyes alprogramokon belül is blokkokra különítjük el a kódot. A főprogramba (ez egy futtatható bináris fájl) programozta a fejlesztő az áramlási megoldót, vagyis a véges térfogat alapú RANS megoldót, ennek forráskódja nem érhető el. Az egyes alprogramokat (pl. fal-törvényt, turbulencia modellt, hordaléktranszport modellt leíró programrészeket) viszont ún. dinamikusan kapcsolt könyvtár (DLL – Dynamic Link Library) formában fejlesztették ki, melyek közül néhánynak a forráskódja is szabadon elérhető. Egy ilyen alprogramot alkot többek között a fenék-csúsztatófeszültség, a kritikus fenék-csúsztatófeszültség, mederfenék közeli egyensúlyi koncentráció, a mederformák, mederfenék érdesség és a mederfenék esés okozta korrekció számítását leíró blokk. Wilcock és Crowe hordaléktranszport-modelljének implementálásához a beddll.dll alprogramban a kritikus fenék-csúsztatófeszültségének és a mederfenék koncentrációjának blokkjait kellett átprogramoznom C nyelven. Az eljárást a fentiekben ismertetett lépéseket követve az alábbi utasításokkal kódoltam be:

```
double DLL_EXPORT computeCriticalShear
    //A kritikus fenék-csúsztatófeszültség számításának blokkja

    (double shieldscoeff, double kinvisc, double density, double shear, int
    isize, int lnumber, double *gsize, double *frac, int i, int j, int CellID, long
    int GlobalIter, int F169Flag, double F169Param, double d50, double d_mean)
    //A modell globális változói
{
```

```

double Fs, b, taursmdimless, taursm, eqshear, s; //A blokk változói
Fs = 0; //Homoktartalom számítása
for (int i=1; i<= lnumber; i++) //Homoktartalom számítása
{
if(gsize[i] < 0.002) Fs = Fs+frac[i]; //Homoktartalom számítása
}
taursmdimless = 0.021+0.015*exp(-20*Fs); //1. lépés
s = 2.65/density;
taursm = taursmdimless*(s-1)*density*9.81*d_mean; //2. lépés
b = 0.67/(1+exp(1.5- gsize[isize]/d_mean)); //3. lépés
eqshear = taursm*pow((gsize[isize]/d_mean),b); //3. lépés
return eqshear;
}

double DLL_EXPORT computeBedConcentration //A mederfenék koncentráció számításának blokkja
(
double shear, double eqshear, double size, int TSCbedrouse, int
BedLoadFlag, double ConcFormCoeff, double ConcFormTstar, double ConcFormDstar,
double kdist, double depth, double dgraininit, double roughness, double HRzmax,
double HRmulmin, double fallvel, double MaxBedConc, double ConcFormBCoeff, double
ConcFormBTstar, double ConcFormBDstar, double ConcFormBD50, double
rijnbedloadcoeff, int FlagRoughness, double velocityX, double velocityY, double
d50, int i, int j, int CellID, long int GlobalIter, double d_mean)
//A program globális változói
{
double fi, wi, u, qbi, konsform; // A blokk változói
if(BedLoadFlag == 4) konsform = 0.0000; //Wilcock és Crowe modelljének bekapcsolása
if(BedLoadFlag == 4) //Wilcock és Crowe modelljének bekapcsolása
{
fi = shear/eqshear; //4. lépés
if (fi < 1.35) wi=0.002*pow(fi,7.5); //4. lépés
else wi=14*pow(((1-0.894)/pow(fi,0.5)),4.5); //4. lépés
u = pow((shear/1),0.5); //5. lépés
qbi = wi*pow(u,3)/((2.65-1)*9.81); //5. lépés
konsform = qbi/(sqrt(velocityY*velocityY+velocityX*velocityX)*2*kdist*2.65); //6. lépés

return konsform;
}
}

```

5 Wilcock és Crowe hordaléktranszport-modelljének tesztelése

A kutatásom egyik fő célja a mederpáncélozódás modellezhetőségének vizsgálata az előbbieken ismertetett, általam módosított modell tesztelésével. A szoftverben eddig meglévő empirikus hordaléktranszport-becslő eljárások a fent ismertetett van Rijn és Wu féle összefüggések voltak. A van Rijn modell bemutatásakor már rámutattam, hogy ez a módszertan egyáltalán nem veszi figyelembe a mederszemcsék közötti kölcsönhatást, tehát nem alkalmas a mederpáncélozódás folyamatának szimulálására. A Wu hordaléktranszport-modell valószínűségi változóval számol a szemcsék kitettséggel, illetve leárnýékoltsággal, ezért ez a módszertan már komoly lépéseket tett a mederpáncélozódás egyes tulajdonságainak megbízható leképzése irányába. A Wilcock és Crowe által kidolgozott hordaléktranszport-modell a mederszemcsék közötti kölcsönhatást a homoktartalom és a teljes szemeloszlási görbe alapján, fizikai tartalommal bíró összefüggésekkel veszi figyelembe. Ez utóbbi eljárást ezért alkalmasnak találtam arra, hogy vizsgálatok alá vessem a mederpáncélozódás modellezhetőségének céljából.

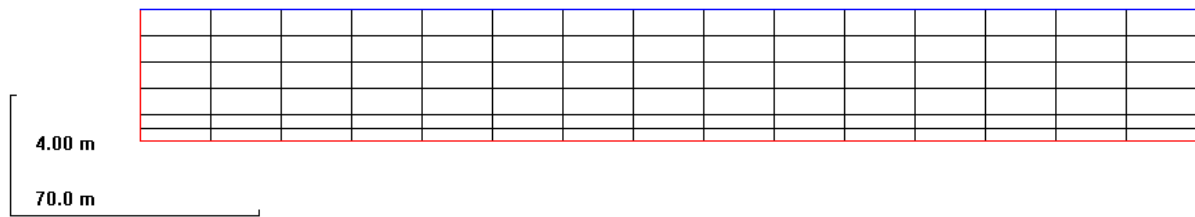
A modell tesztelése a Wu hordaléktranszport-moddellel való összehasonlítására, valamint a mederpáncélozódás folyamatára utaló jelenségek (pl. tartós közepes vízjárási állapotnál a durvább mederszemcsék feldúsulása, nagyobb árhullám érkezésekor a mederfenék hirtelen drasztikus mélyülése stb.) kimutatására, megfigyelésére fókuszál. A Wu formula alkalmazhatóságára a vegyes szemösszetételű mederanyagokra korábbi vizsgálatok már rámutattak (pl. Fischer-Antze, 2005; Baranya, 2009), ezért referenciaként való alkalmazása indokolt a tesztelések során.

5.1 Alkalmazott számítási rácshálók

A modelltesztelést két eltérő medergeometriára végeztem el. Mivel a mederpáncélozódás folyamatának viselkedését elsősorban hazai nagyobb, kavicsmedrű folyók példáján ismerhettem meg, valamint az azokra jellemző hordalékviszonyokról több adat állt rendelkezésemre, alapvetően Duna-léptékű vízfolyás vizsgálatában gondolkodtam. A modell kezdeti teszteléséhez azonban egy valós geometriájú folyószakasz, annak igen változatos mederanyag-összetételével együtt nagy számítási igényt, és így napokban mérhető futtatási időt eredményez, ami jelentősen korlátozza a tesztelés sokoldalúságát. Első lépésben ezért egy Duna szelvényméretű, de egyszerű geometriájú és relatíve durva rácsfelbontású sematikus tesztcatornát alkalmaztam, melynek szélességét 300 méterre, hosszúságát 1400 méterre, kezdeti mélységét pedig egységesen 4 méterre vettem fel.

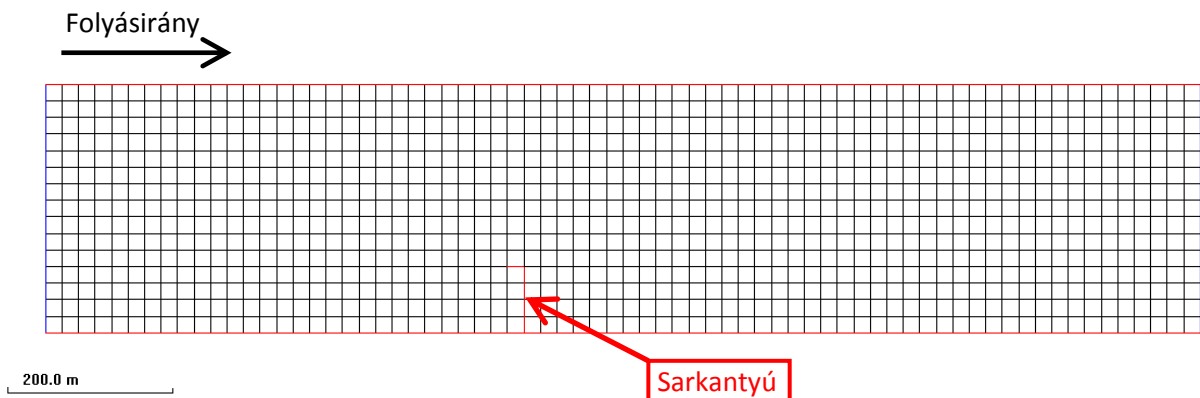
A strukturált rácsháló hosszirányban 71, keresztirányban 16 cellából állt, függőleges értelemben pedig 7 réteget definiáltam, így az összesen 6300 számítási cellát tartalmaz. A tesztcatorna hidraulikai szempontból egyszerűbb kialakítása miatt a modell gyorsabb konvergálására számíthatunk, mint egy valós folyómeder esetén, ezért jelentősen rövidebb futtatási időt vártam.

A tesztcatorna rácshálójából kiragadott keresztshelvényen (18. ábra) megfigyelhető a mederfenék közelében alkalmazott finomabb felbontás, aminek célja a mederfenék közeli áramlási viszonyok pontosabb leképzése volt.



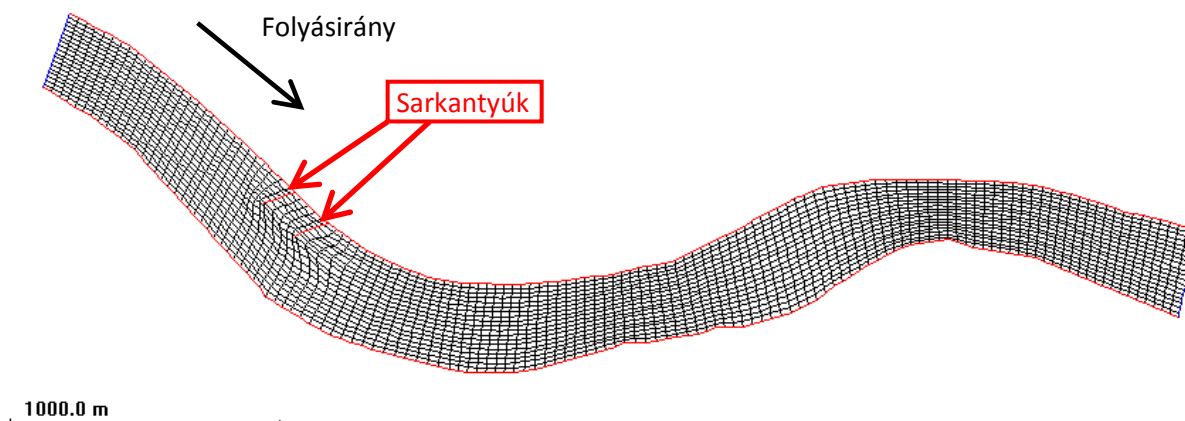
18. ábra - A tesztcsatorna egy keresztmetszelve

Abból a célból, hogy a modelltesztelés során rá tudjak mutatni a hordaléktranszport és medermorfológia térben inhomogén jellegére és annak modellbeli reprodukálhatóságára, a tesztcsatornába beépítettem egy sarkantyút, ahol köztudottan a hidrodinamikai jellemzők lokális, nagymértékű változását várhatjuk.



19. ábra - A tesztcsatorna rácshálója felülnézetben

Korábbi vizsgálatokból rendelkezésemre állt a Duna 1792-1796 fkm közötti szakaszának (Mosoni-Duna torkolatának környéke) számítási rácshálója, így második tesztfeladatnak ezt választottam. A számítási rácsháló a Duna Szap-Gönyű közötti szakaszának áramlástan vizsgálatához készített modellből származik (Baranya, 2005). A rácsháló hosszirányban 131, keresztirányban 20 cellából áll, vertikális értelemben pedig 12 rétegre van felosztva, így összesen megközelítőleg 27 000 számítási cellán oldja meg a modell közelítően a leíró egyenleteket. A fejlesztett hordalékmodellt így egy valós helyszínrajzi vonalvezetésű folyószakaszon is tesztelhettem, igaz a mederfenék szintjét a vizsgálataimhoz a kezdeti állapotban vízszintesnek feltételeztem, eltérve a valós állapottól. Erre céltudatosan azért volt szükség, mert azt is vizsgáltam, hogy a meanderező folyókra jellemző sajátos medergeometria kialakul-e a számítások során.



20. ábra – A Duna 1792-1796 fkm közötti szakaszának számítási rácshálója felülnézetben

A Duna-modell számítási rácshálójába két sarkantyút építettem be. Ezek a műtárgyak a valóságban is megtalálhatóak a mederben. A sarkantyúk a közvetlen környezetük áramlási viszonyait jelentősen befolyásolják. A műtárgy felvízi oldalán a sebességvektorok nagyságának és irányának lokális, hirtelen változása jelentős turbulencia-növekedést okoz, ami elsősorban a finomabb szemcsék elragadása okán a meder kimélyülését eredményezheti. Ezzel szemben az alvízi oldalon, az áramlástól részben leárnyékolt helyeken az alacsony áramlási sebesség, illetve lecsökkenő turbulencia-tartalom miatt jelentős hordalék-lerakódás várható.

Mindkét tesztfeladat esetében legelső lépésben egy permanens áramlási mező számítását végeztem el szilárd mederviszonyokat feltételezve, majd annak eredményeit (sebességmező, örvény viszkozitási mező, vízfelszín-mező) kezdeti feltételként megadva indítottam a hordaléktranszport-modelleket. Ezt azért tettem, hogy az áramlási modell kezdeti lépéseiben kapott valószerűtlen áramlási mező ne eredményezhessen irreális mederváltozásokat.

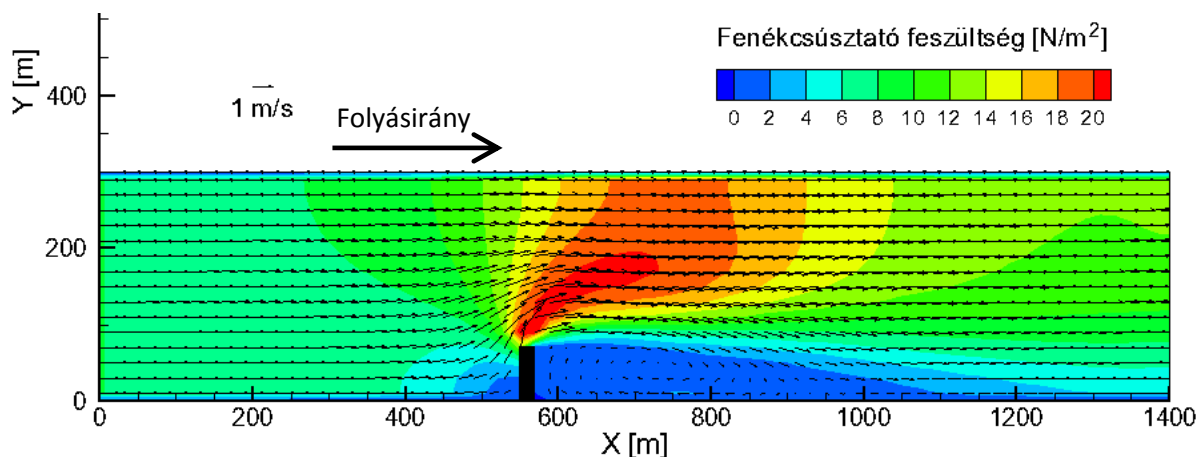
5.2 Az újonnan beprogramozott hordaléktranszport-modell tesztelése a sematikus tesztcsatornában

A sematikus tesztcsatornában végzett számításoktól elsősorban azt vártam, hogy valószerű mederváltozásokat és mederanyag-összetétel változást eredményezzen, azaz a sarkantyú végénél jelentős mélyülést és a durvább frakciók feldúsulását, a mű alvízi oldalán lerakódást és a finomabb frakciók arányának növekedését, valamint a csatorna egészét vizsgálva a mederpáncélozódásra és annak tönkremenetelére utaló jelenségek kialakulását.

A numerikus modell a morfológiai változásokat egy iteratív folyamat lépéseiként számítja. Egy iterációs lépésen belül elsőként az áramlási és turbulencia-mezők kerülnek számításra. Ennek eredményeképpen ismert lesz a turbulens kinetikai energia mederfenék közeli eloszlása, amiből a fenék-csúsztatófeszültség becsülhető, a korábbiakban ismertetett módon. Ennek felhasználásával a hordaléktranszport-modell kiszámítja a pillanatnyi egyensúlyi hordaléktöménységet (ez az az érték, aminél éppen nem ülepedik ki és nem is keveredik fel a mederanyag), majd az érkező hordalék mennyiségének ismeretében egy egyensúlyi egyenlettel meghatározza a mederváltozást az aktuális számítási cellában. Amennyiben a mederváltozás elegendően nagy ahhoz, hogy hatással legyen az áramlási mezőre, egy új iterációs lépés kezdődik. A morfodinamikai számítás így tehát figyelembe veszi az áramlási mező és a medermorfológia kölcsönhatását, vagyis a modellezés a permanens

peremfeltételek ellenére egy nempermanens számítást eredményez, hiszen az áramlási mező – és ezzel egyidejűleg a medergeometria - folyamatosan változik.

Az alábbi ábra a megelőző (szilárd mederben elvégzett) hidrodinamikai számítás során kapott mederfenék közeli sebesség- és fenék-csúsztatófeszültség eloszlását prezentálja a tesztsatornában egy, a Dunára jellemző közepes vízhozam ($2000 \text{ m}^3/\text{s}$) és átlagos vízmélység (4 m) mellett.



21. ábra - Fenék-csúsztatófeszültség mező és sebességvektorok - illusztráció

A sebességvektorok segítségével rá tudunk mutatni a sarkantyú mögött kialakuló köröző áramlásra. Ezen a helyen a sebességek nagyon alacsonyak, és a vártnak megfelelően a fenék-csúsztatófeszültségek is itt adódnak a legkisebbre, ezért a későbbiekben itt a finom frakciók lerakódása várható. A sarkantyú fejnél a hosszabb vektorok a megnövekedett áramlási sebességre mutatnak rá, és az itt – a nagy és kis sebességű zónák határán – kialakuló ún. *nyíróréteg* pedig a turbulencia és közvetett módon a fenék-csúsztatófeszültség növekedését eredményezi. Az ábra színezése is ezt támasztja alá. Az ilyen helyeken a meder mélyülése várható, amennyiben azt a mederanyag szemösszetétele lehetővé teszi.

Ahhoz, hogy megvizsgáljam, a modell alkalmas-e a mederpáncél kialakulásának számítására, először egy 6 hónap időtartamú, konstans $2000 \text{ m}^3/\text{s}$ -os vízhozamú állapotra futtattam le a modellt. A morfordinamikai modell időlépését 15 percre vettem fel, mert korábbi, hasonló jellegű vizsgálatokra (Baranya, 2010) ez az érték igazoltan kellően rövid volt a mederváltozások pontos leképzésére, de elegendően hosszú az elfogadható futtatási sebességhez.

A kifolyási szelvényben a vízmélység egységesen 4 m volt. A mederanyag kezdeti, homogén szemösszetételének egy kétfrakciójú, a Duna magyarországi szakaszára valószínű méretű kavics ($d_{\text{kavics}} = 20 \text{ mm}$) és homok ($d_{\text{homok}} = 0,6 \text{ mm}$) 3/7 arányú keveréket állítottam be.

A modell a mederfenék szerkezetét két, egymás felett elhelyezkedő réteggel tudja leképezni. A felső, ún. aktív réteg azt az állandó vastagságot jelenti, ami egy számítási időlépés alatt megváltozhat. Az aktív réteg szemösszetétele a számítás során folyamatosan változhat az ott végbemenő kiülepedési és felkeveredési folyamatok eredményeként. Az aktív réteg alatt helyezkedik el az ún. inaktív mederréteg, aminek szemösszetétele mindig a kezdeti értékeknek felel meg. Ha egy számítási lépés alatt az aktív réteg teljes vastagságában erodálódik, a következő lépésben az új aktív rétegnek a szemösszetétele így a kezdeti értéknek fog megfelelni. Ez a leképzés a valós mederanyag

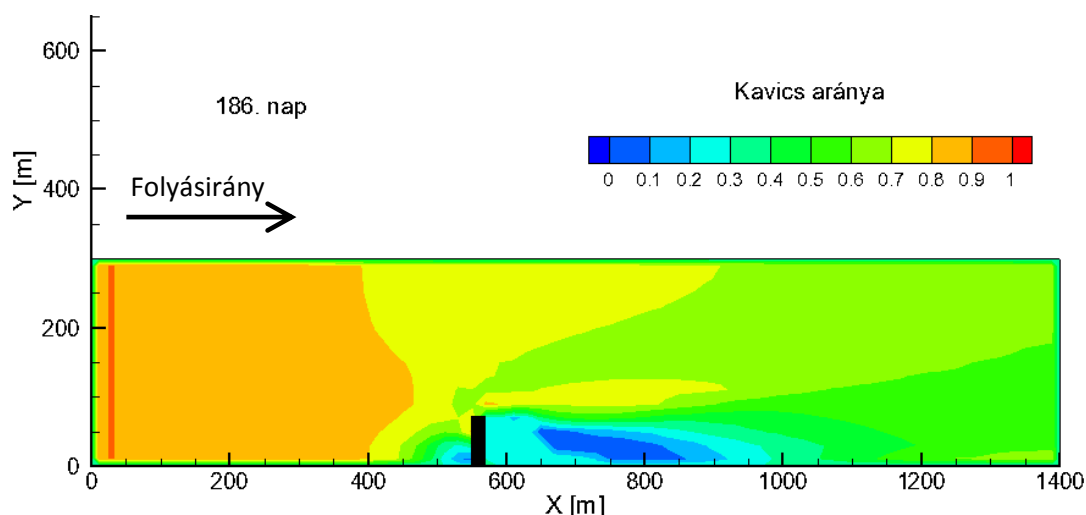
szortírozódási folyamatokhoz igen közel áll, hiszen a medernek csak a legfelső rétege van folyamatos kölcsönhatásban az áramlással. A modellben az aktív réteg vastagságára 5 cm-t állítottam be. A teszteredmények könnyebb értelmezése végett azzal az egyszerűsítéssel éltem, hogy a befolyási szelvényben hordalékhozamot nem definiáltam, vagyis tiszta víz érkezett felvízi irányból. Erre azért volt szükség, hogy a kialakuló morfológiai és mederanyag-változásoknál pusztán a hidrodinamikai változásokból eredő hatásokat szemléltessem.

A meder érdességét többféleképpen meg lehet adni a modellben. Lehetőség van arra, hogy az érdességet egy, a mederanyagra jellemző szemcseméret alapján minden időlépésben, minden egyes fenékcellához a program számítsa, az ott érvényes szemösszetételi görbe alapján. Az érdességet ebben az esetben a Nikuradse-féle érdességmagassággal (k_s) adjuk meg, melynek értéke $k_s = 3d_{90}$ (ahol d_{90} az a szemcseméret, aminél a mederanyag 90 százaléka finomabb).

A sarkantyút úgy építettem be a rácshálóba, hogy az nem erodálódhatott. A mederérdességre és a sarkantyúk erodálhatóságára vonatkozó beállításokat nemcsak ezeknél, hanem a tesztelés folyamán az összes modellnél így alkalmaztam.

A 186 napos futtatástól nem vártam egy új, egyensúlyi medergeometria kialakulását, mert a morfordinamikai változások sebessége egy, a Duna méretű és középvízi vízjárási állapotot reprezentáló időszakban ennél lassabb, pusztán az áramlás szortírozó hatásának eredményeként a mederpáncél megjelenését vártam.

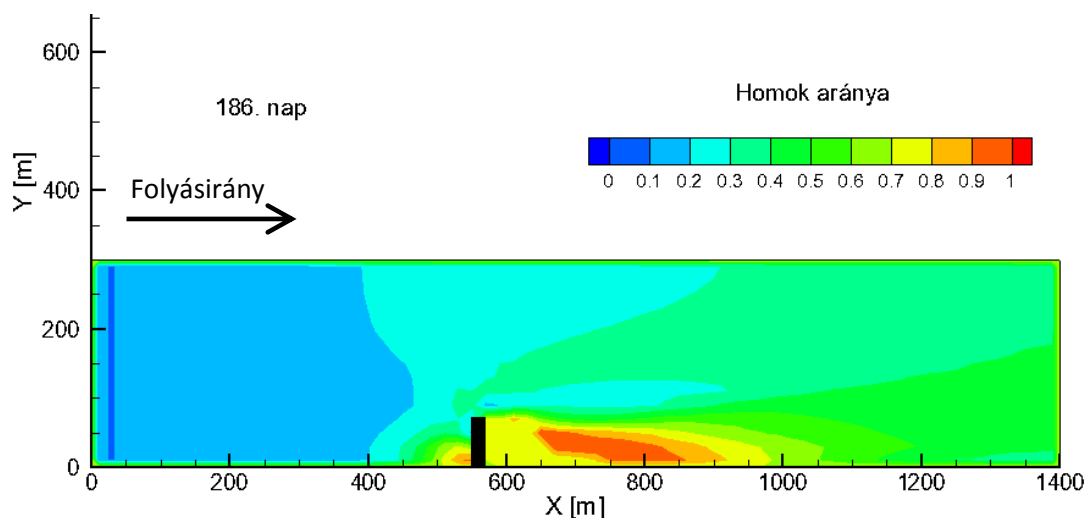
A fél éves futtatás végére kialakult kavics- (futtatás kezdetekor: 0,3) és homok-részarányt (futtatás kezdetekor: 0,7), valamint a mederváltozást az alábbi ábrákon mutatom be.



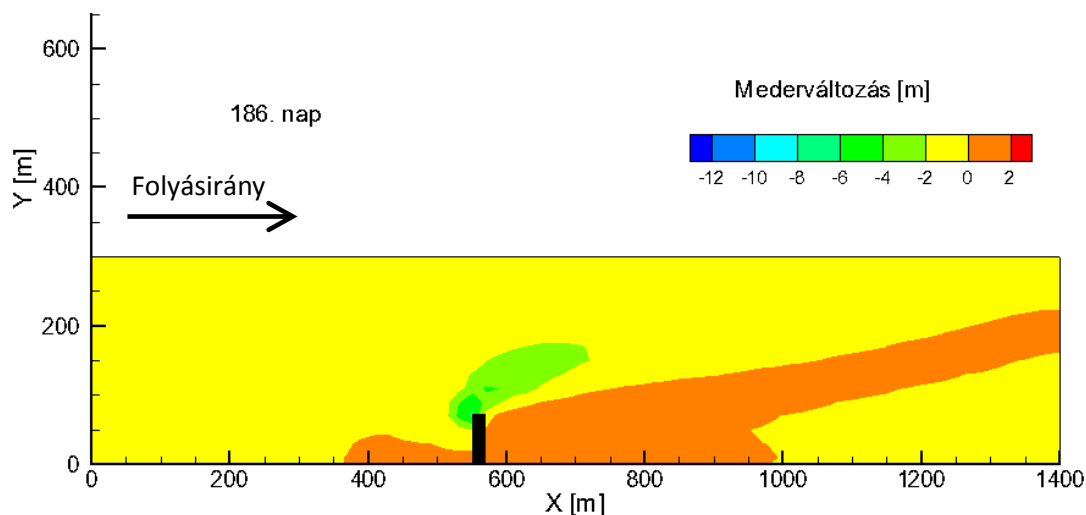
22. ábra – A kavics részaránya az állandó hozamú időszak végén

A modell futtatása közben a mederfenék fokozatos durvulása figyelhető meg, a sarkantyú által áramlástanilag árnyékolt területeket (limány) kivéve. A kavics feldúsulásának folyamata a felső szakaszon előrehaladottabb állapotban van az alsóbb szakaséhoz képest, hiszen bár az alsóbb szakaszon is folyamatos a finomabb frakció kimosódása, a felsőbb szakasról elragadott hordalék az alsóbb szakaszon is megjelenik, miközben felülről utánpótlás nem érkezik.

A vártaknak megfelelően a sarkantyú fejénél a homok kimosódása és a sarkantyú mögött annak lerakódása figyelhető meg.

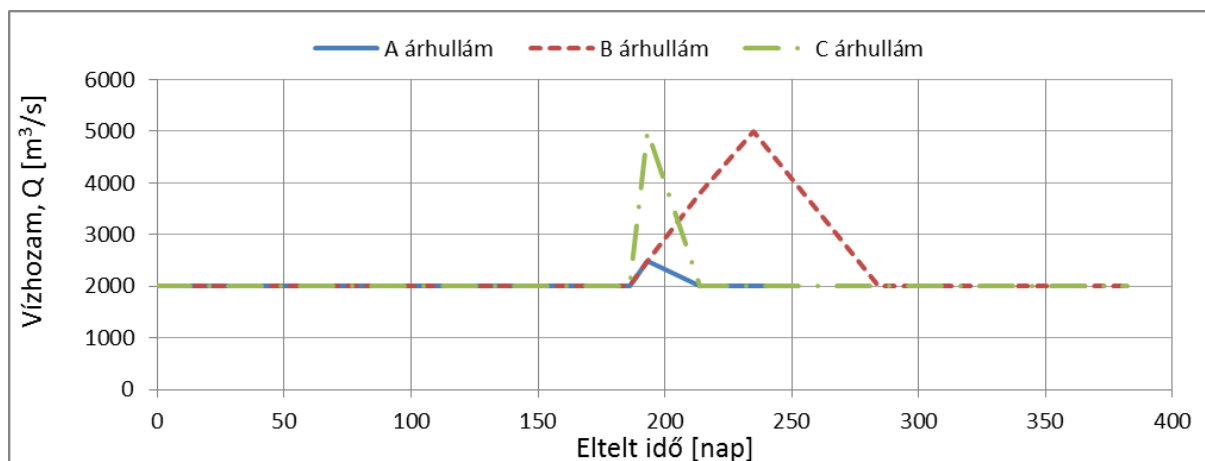


23. ábra – A homok részaránya az állandó hozamú időszak végén



24. ábra – A mederváltozás az állandó vízhozamú időszak végére

A fél éves időszakot háromféle árhullám követett, vagyis miután rendelkezésre állt a fél éves konstans vízhozam mellett futtatott morfordinamikai modellezés eredménye, onnan három új vízjárási állapotot szimuláltam. Ennek a vizsgálati lépésnek a célja az volt, hogy megvizsgáljam a modell alkalmas-e az előzőekben kialakult, meglehetősen stabil és durva szemösszetételű mederpáncél felszakításának reprodukálására, és az ennek következtében (a természetben tapasztalható) nagymértékű medererózió számítására. A nempermanens szimuláció kezdeti feltételeként tehát az előző féléves modellezés eredményeként kapott megváltozott áramlási mező, medergeometria és mederanyag-összetétel szolgált. A féléves állandó vízhozamot is tartalmazó vízhozam idősorokat az alábbi ábra mutatja be.

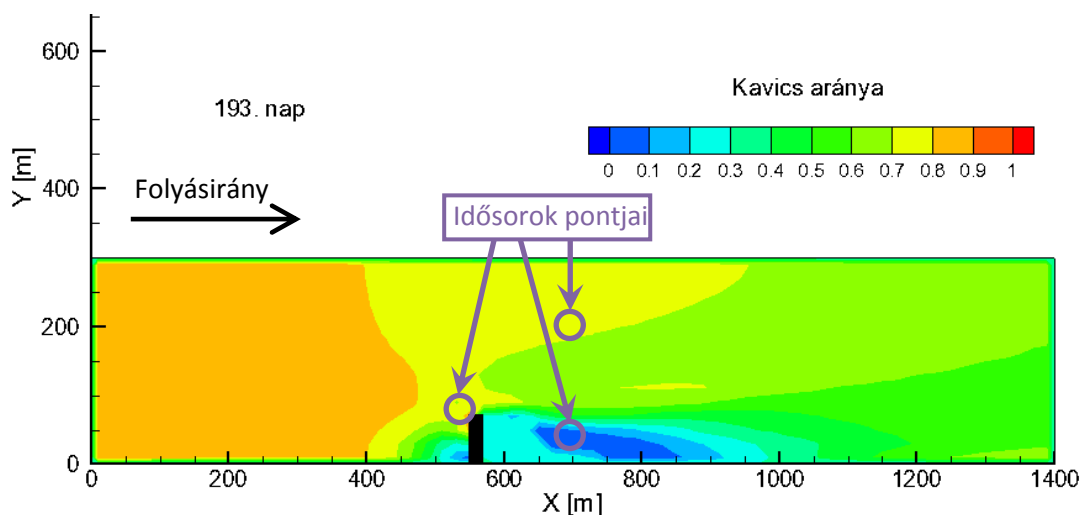


25. ábra - A, B és C jelű árhullámok

Az A jelű árhullám 7 nap alatt éri el a $2500 \text{ m}^3/\text{s}$ -os csúcshozamot és 21 nap alatt apad vissza $2000 \text{ m}^3/\text{s}$ -ra. A B jelű 49 nap alatt fut fel $5000 \text{ m}^3/\text{s}$ -ra, majd újabb 49 nap alatt esik vissza $2000 \text{ m}^3/\text{s}$ -re. A C jelű árhullám a 1 hét alatt fut fel $5000 \text{ m}^3/\text{s}$ -ra és 21 nap alatt apad vissza $2000 \text{ m}^3/\text{s}$ -ra. B közel 100, C jelű árhullám az apadás után még közel 170 napig tartotta a konstans $2000 \text{ m}^3/\text{s}$ -t, így összességében mindhárom változatra egy év hosszú időszakra végeztem szimulációt.

5.2.1 Az A jelű árhullám hatásának vizsgálata

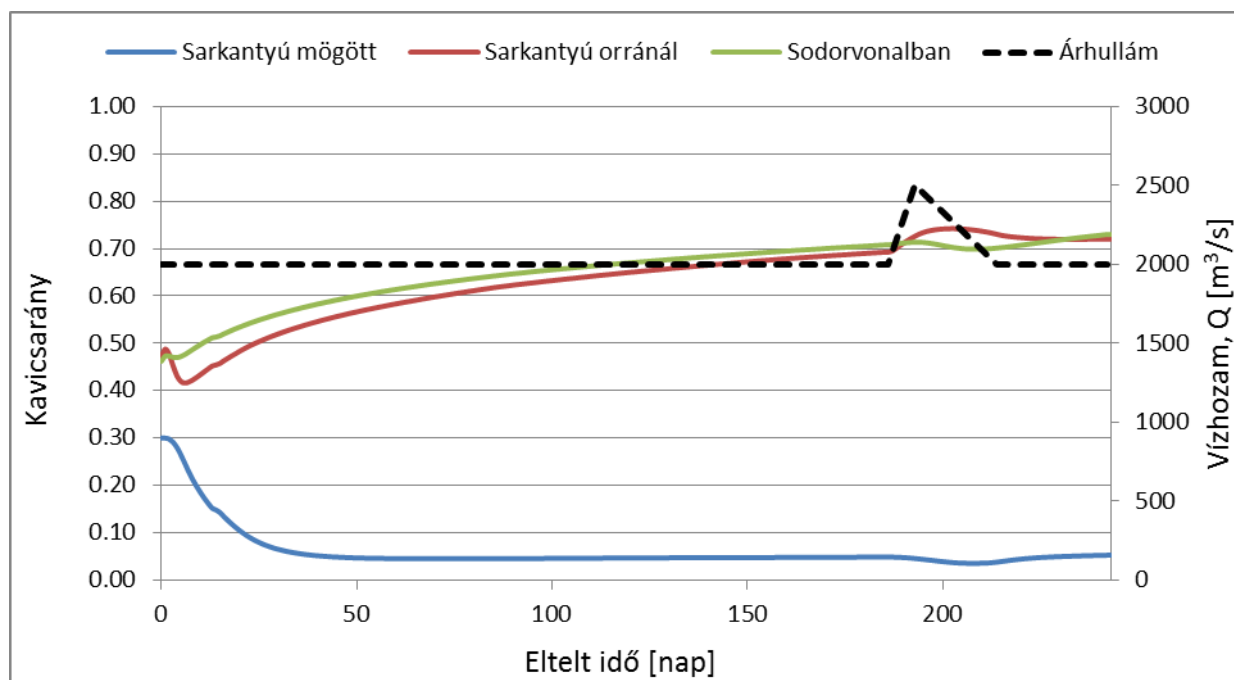
Az A jelű árhullámmal azt vizsgáltam, hogy kisebb árhullám esetén milyen mértékű változások alakulnak ki a mederben, megfigyelhető-e a további mederanyag-szortírozódás és mederstabilizálódás, vagy már a csekély vízhozam-növekedésre is felbomlik-e a mederpáncél. Az árhullám tetőzésekor mederanyag kavics-részarányát a 26. ábra mutatja.



26. ábra - Kavics aránya az A jelű árhullám tetőzésekor

A kezdeti állapottal való összehasonlítás alapján (22. ábra) megállapítható, hogy a mederanyag összetételében jelentős változás sehol sem alakult ki. A csatorna közepén látható, hogy a homok aránya kismértékben ($\sim 10\%$) növekedett. Mivel a befolyási szelvényben nincs hordalékhozam, a tapasztalt kavicsarány-csökkenést a felső szakasról az árhullám hatására kimosódó, nagyobb mennyiségű homok okozhatja.

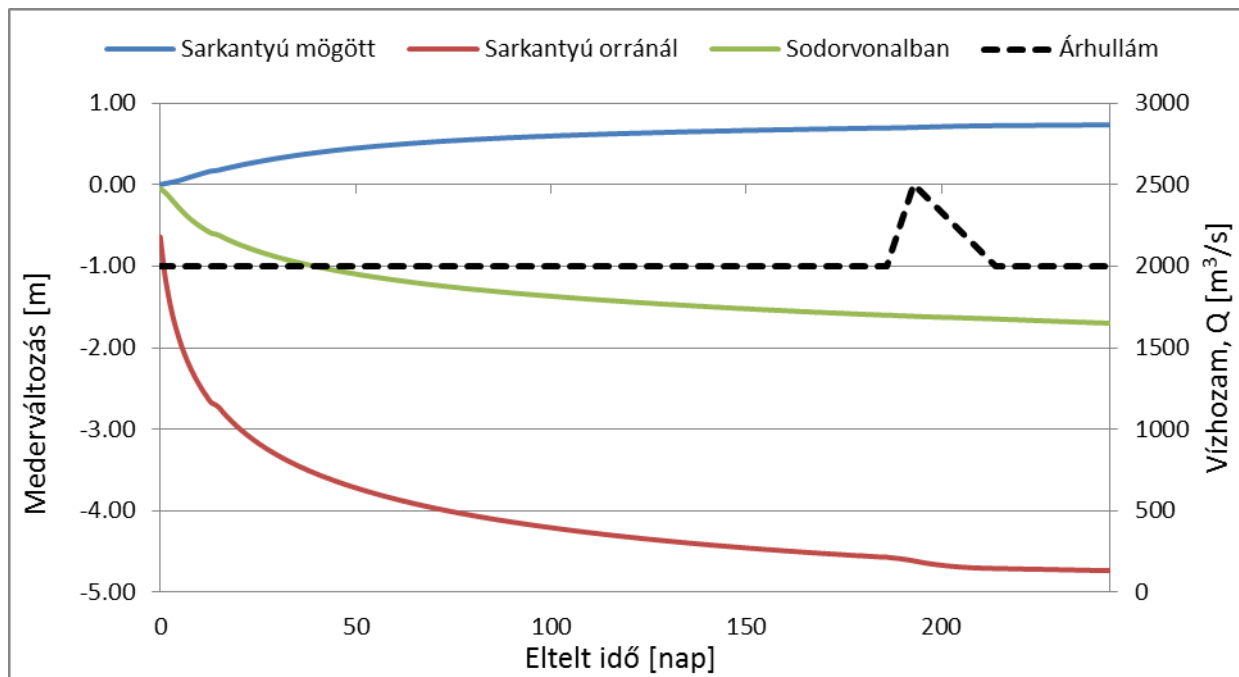
A továbbiakban vizsgáltam a 26. ábrán feltüntetett pontokban a kavicsarány- és a mederváltozás-idősorokat. Így az árhullám köztes időszakában is képet kapunk a medersziszonyokról. A bemutatott idősorokon szerepel az első fél évre vonatkozó állandó vízhozamú időszak is, majd az ezt követő árhullám hatása.



27. ábra - Az árhullámkép és a kavicsarány idősora a jelölt pontokban (A árhullám)

A 27. ábra alapján az látható, hogy a sodorvonalban és a sarkantyúnál a homokfrakció kimosódása miatt az állandó hozamú időszak legelején, az első napokban a zöld és nagyobb mértékben a bordó görbe kissé megugrik. Pár nappal később, amikor a felsőbb szakaszról kimosódott homok eléri a vizsgált pontokat, a kavicsarány visszaesik. Ezután a szemösszetételt a lokális homokkimosódás és a fentről érkező finom frakció együttes hatása határozza meg. A sarkantyú mögötti részen a homok lerakódása miatt a kavicsarány csökkenése tapasztalható kb. az 50. napig. Ezután a lerakódás és az elragadás dinamikus egyensúlyi állapotot idéznek elő, ezért a kavicsarány már nem változik az árhullám érkezéséig.

A sarkantyú fejénél, az árhullám áradó stádiumában a kavicsarány felgyorsult növekedése, a leszálló ágban pedig csökkenése tapasztalható. A sodorvonal kiválasztott pontjában ezzel épp ellentétes folyamat figyelhető meg. A sarkantyú fejénél a nagyobb vízhozam a finomabb frakció további kimosódását okozta, a nagyobb szemcsék azonban továbbra is nyugalomban maradtak. A sodorvonalban is hasonló folyamat zajlott le, oda azonban olyan jelentős mennyiségű homok érkezett a felvízről, ami végül a kavicsarány csökkenését okozta. Ez a jellegű csökkenés figyelhető meg a sarkantyú mögötti pontban is.



28. ábra - Az árhullámkép és a mederváltozás időszora a jelölt pontokban (A árhullám)

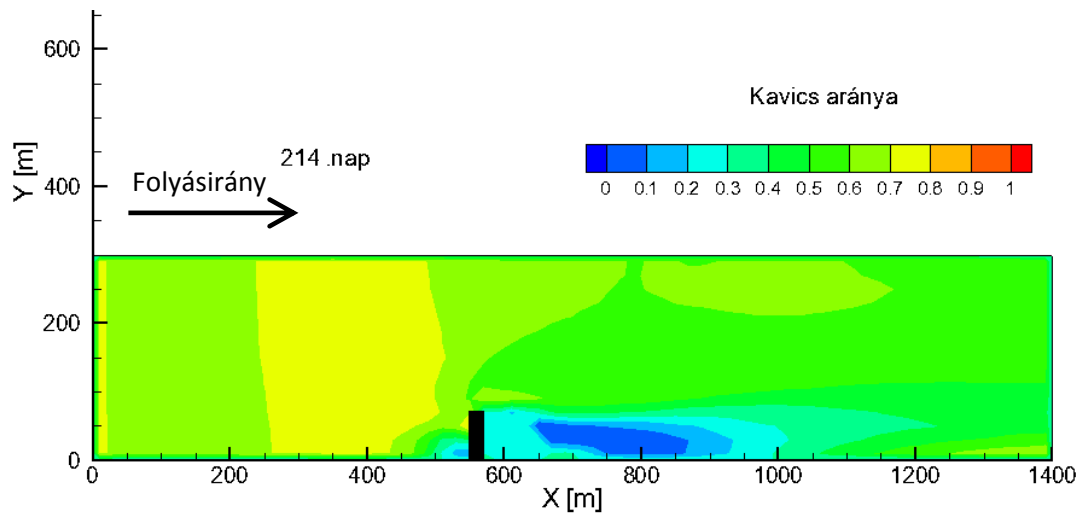
A kiragadott pontokban a mederváltozások a szemösszetételekhez hasonlóan nem változtak jelentősen. A grafikonok alapján csak a sarkantyúnál figyelhető meg az árhullám hatása, ott kimélyülés tapasztalható. Ezt a medermélyülést a homok kimosódása okozza.

Az árhullám apadó ágán, valamint az azt követő időszakban az árhullámot megelőző tendencia figyelhető meg mind a szemösszetételben, mind a mederváltozásban.

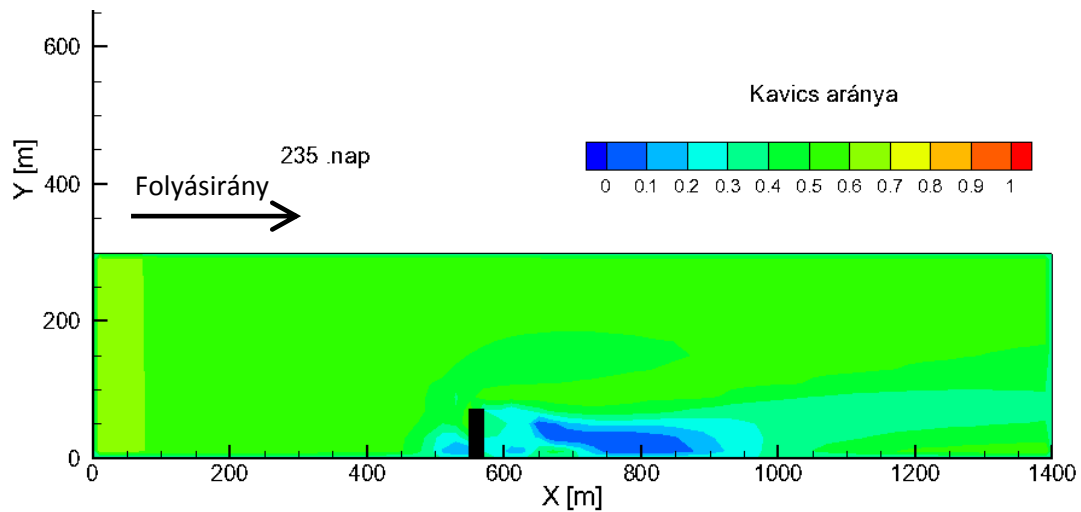
Megállapítható, hogy az A jelű árhullám érkezéséig kialakult egy olyan stabil, erózióknak ellenálló mederfelszín, amiben nem tudott jelentős változást eredményezni az árhullám.

5.2.2 A B jelű árhullám hatásának vizsgálata

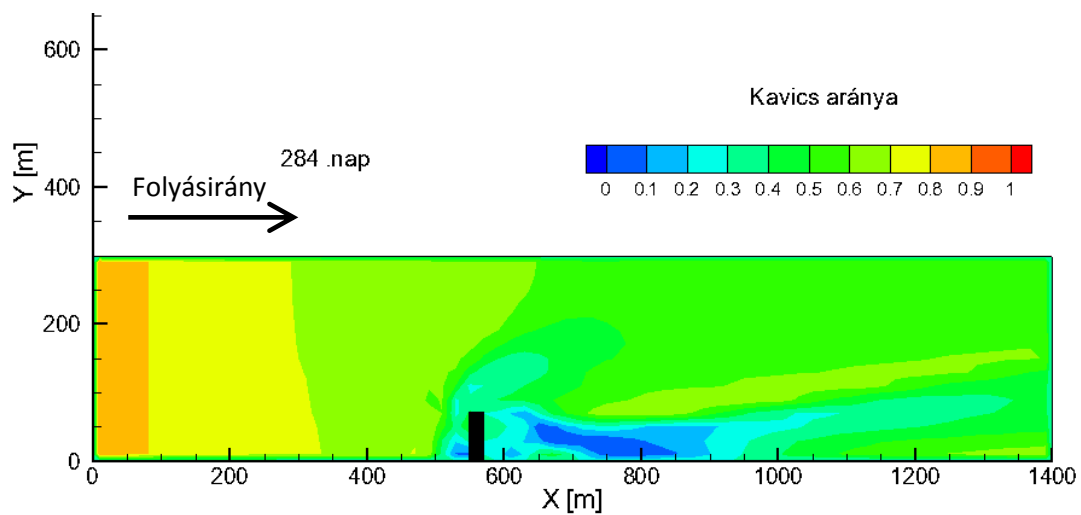
A B jelű árhullám az első 7 napban megegyezik az A-val, a tetőzése azonban 5000 m³/s-nál van. Azt vártam, hogy a mederfelszín ekkora vízhozam már képes lesz megbontani és így jelentős változásokat eredményez mind a medergeometriában, mind a mederanyag összetételében. A mederpáncél felszakadásánál a meder hirtelen jelentős mélyülésének megfigyelése arra engedne következtetni, hogy az alkalmazott hordaléktranszport-modell alkalmas a mederpáncélozódás jellegének vizsgálatára.



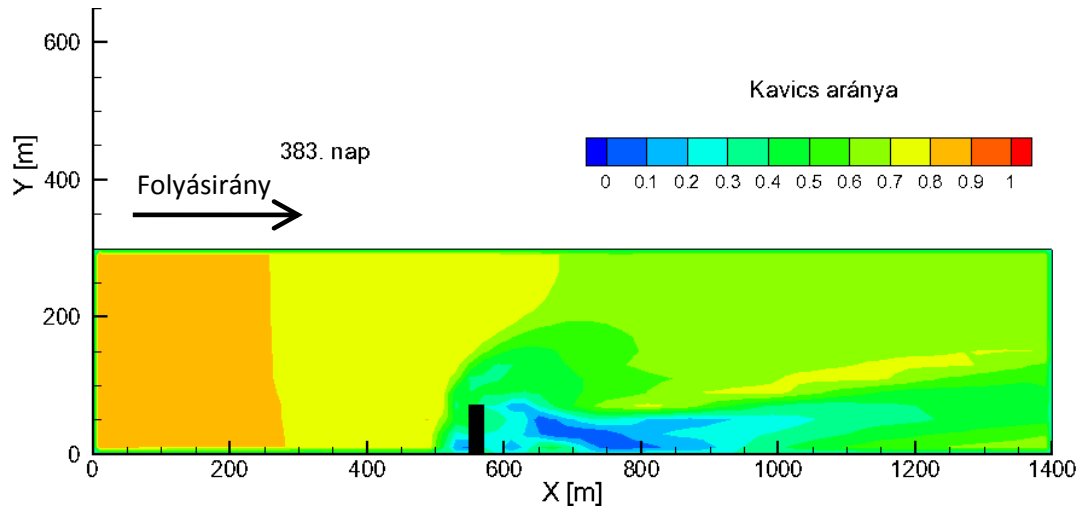
29. ábra - Kavics aránya a B jelű árhullám 214. napján (áradó ág egy köztes pontja)



30. ábra - Kavics aránya a B jelű árhullám 235. napján (tetőzés)



31. ábra - Kavics aránya a B jelű árhullám 284. napján (apadás vége)

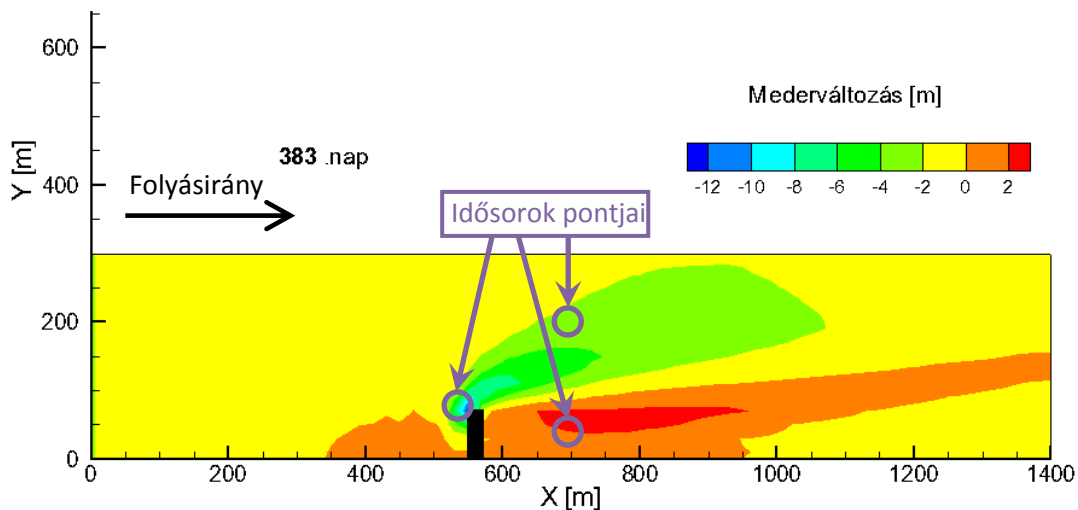


32. ábra - Kavics aránya a B jelű árhullám 383. napján

A kavicsarányt bemutató 29. ábra alapján látható, hogy az áradás egy köztes pillanatáig, a 214. napig a csatorna egészében a homok jelentős feldúsulása ment végbe. A homokfrakció arányának hirtelen megnövekedése és ezzel együtt a kavicsfrakciók hirtelen csökkenése a mederpáncél tönkremenetelére utal. Az árhullám tetőzésekor a sarkantyú által közvetlen befolyásolt területeket kivéve a mederfenék szemösszetétele szinte az egész csatorna mentén megegyezik, de még akkor sem éri el a kezdeti, 3:7-es kavics/homok arányt (30. ábra).

Az apadási és az azt követő állandó hozamú időszak során a teljes csatorna mentén a kavics részarányának növekedése mutatható ki (31. ábra, 32. ábra), tehát a meder újbóli bepáncélozódása megkezdődött.

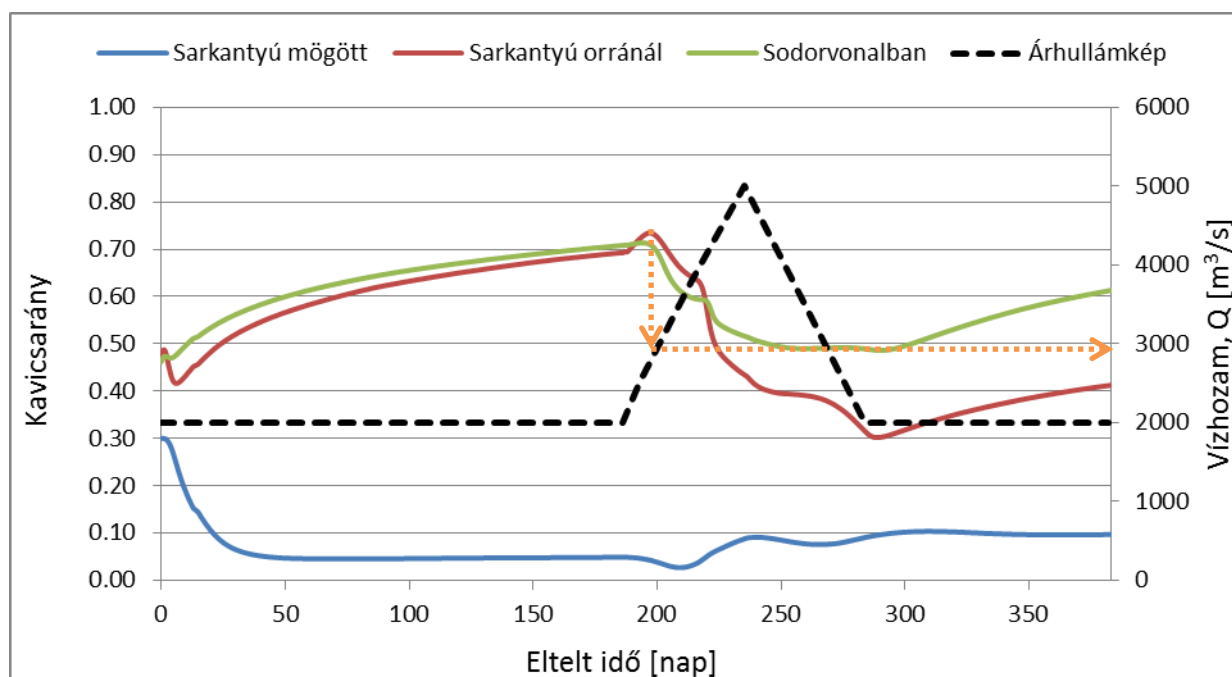
Megvizsgáltam azt is, hogy milyen mederváltozásokat eredményezett a teljes árhullám.



33. ábra - A mederváltozás mértéke a B jelű árhullám 383. napján

Az árhullám érkezése előtti, 186. napi mederváltozás képével összevetve (24. ábra) azt tapasztaltam, hogy a sarkantyú fejének környezetében a kimélyülés, valamint a sarkantyú mögötti lerakódás jelentősen megnőtt.

Megvizsgáltam a kavicsarány- és medermélyülés-idősorokat a 33. ábra bejelölt pontjaiban (a pontok megegyeznek az A jelű árhullámnál vizsgált idősorok pontjaival (34. ábra és 35. ábra).



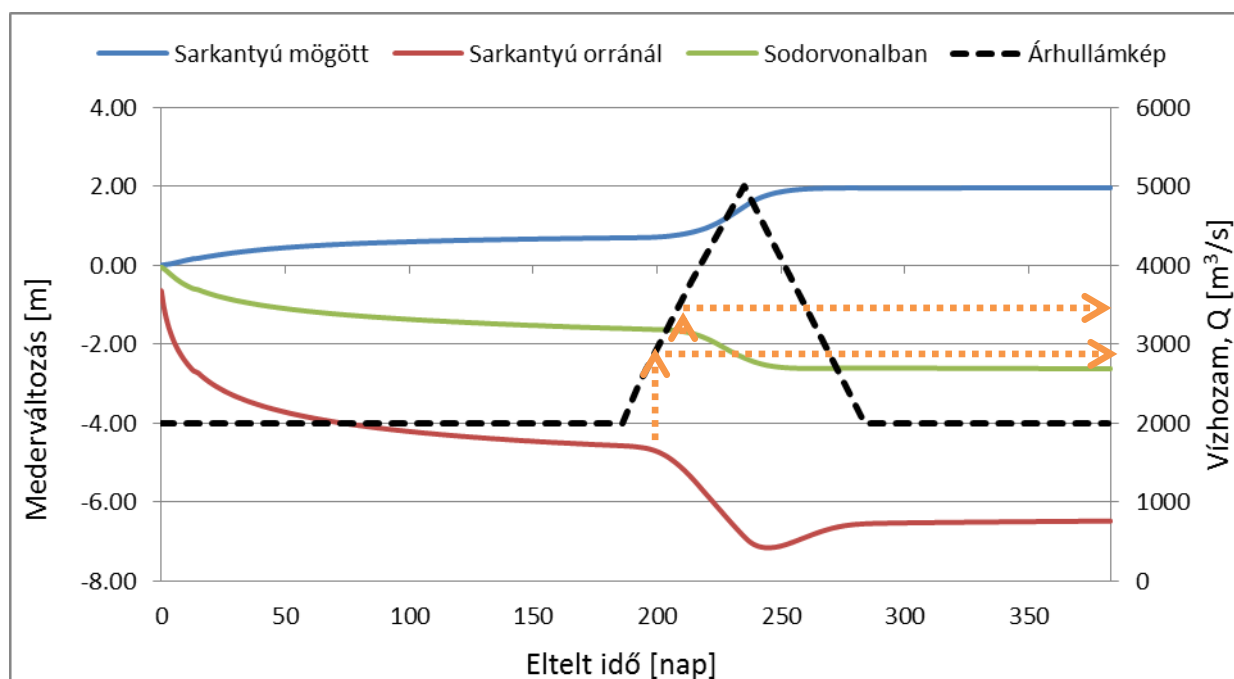
34. ábra - Az árhullámkép és a kavicsarány idősora a jelölt pontokban (B árhullám)

A sarkantyú fejénél azt láthatjuk, hogy az árhullám kezdetekor a homok kimosódása miatt a mederanyag fokozott durvulásba kezd. Ezt tapasztaltam az A jelű árhullámnál is, vagyis a vízhozam növekedésével megnövekszik a hordalékelragadó erő, ami fokozza a finomabb szemcsék kimosódását, de hiába nagyobb a kavicszemcsék áramlásnak való kitettsége, azok eróziója nem megy végbe, mert a kritikus feszültséget még nem éri el az áramlás. A vízhozam további emelkedésénél viszont a kavics részarány-növekedése először megáll a 200. nap környékén, aztán gyors csökkenésbe kezd. Ez a folyamat a mederpáncél felszakadására utal, ami a sodorvonal helyén is megfigyelhető. Elértünk tehát egy olyan határállapotot, amikor a kavicszemcsék is kimosódásra kerülnek. Mivel eddigre egy relatíve homogén kavicsmeder képződött, az aktív mederréteg hirtelen erodálása után a szemeloszlás az eredeti arány felé törekszik, ekkor ugyanis a kezdeti, 3:7-es kavics/homok arányú alsó, inaktív rétegből pótolja a modellt a kimosódott anyagot. Ezután, durván a 220. naptól a szemösszetételt alapvetően a helyi kavicskimosódás és fentről a nagymennyiségű homok érkezése határozza meg. Ez is a mederfelszín homokfeldúsulását segíti elő. Az árhullám levonulása után ismételten a mederanyag durvulása figyelhető meg, vagyis újra elkezdődik a mederpáncél kialakulása a mederanyag szortírozódása révén.

A sarkantyú mögötti zónában megfigyelhető mederanyag-szemeloszlást az egyes frakciókra jellemző felvízi hordalékhozam megváltozásai határozzák meg. Az árhullám kezdetekor a hirtelen kavicsarány-csökkenést a fenti szakasról nagymértékben kimosott homoküledék lerakódása okozza. Az azt követő mederanyag-durvulás pedig a mederpáncél felszakadása után, a felvízről érkező kavics megállásának tulajdonítható. A nagyvízi állapotban ugyanis a nagysebességű sodorvonal és a sarkantyú mögötti áramlási holtter közötti nyírozónában megnövekszik a turbulens elkeveredés és a kis- és középvízi állapottól eltérően a nagyobb hordalékszemcsék is képesek bejutni az áramlási

holttérbe. Az ide bekerülő hordalék ezután itt csapdázódik és nem képes visszajutni a főáramlásba. Ez a sarkantyú mögötti zónában a kavicsfrakció 5 %-ról 10 %-ra való hosszú távú megnövekedését okozza. Ennél a pontnál megjegyezném, hogy a valóságban ettől valamelyest eltérő viselkedést tapasztalnánk, mert a folyamszabályozási művek koronaszintjét általánosan középvízi állapotra építik ki. Ennél magasabb vízállásnál a sarkantyún átbukik a víz és egy, az itt bemutatottól szignifikánsan eltérő áramlási szituáció jön létre. A jelenség modellbeli leképzése ebben a modelltesztelési fázisban szükségtelenül megnehezítette volna a vizsgálatot, így azzal az egyszerűsítéssel éltünk, hogy a sarkantyún átbukás még nagyvízi állapotban sem alakulhat ki. Az árhullám után úgy tűnik, mintha itt a hordalék lerakódása és elragadása megegyezne, dinamikus egyensúlyi állapot alakul ki. A mederváltozás-idősor is ezt támasztja alá.

Az ábrán narancssárga pontozott nyilak segítségével 2900 m³/s-ra becsültem azt a vízhozamot, aminél a mederpáncél felszakadt. Ez az érték a Duna felső-magyarországi szakaszán, ahol a mederanyag összetétele az itt alkalmazottakhoz igen hasonló, reálisnak tekinthető.



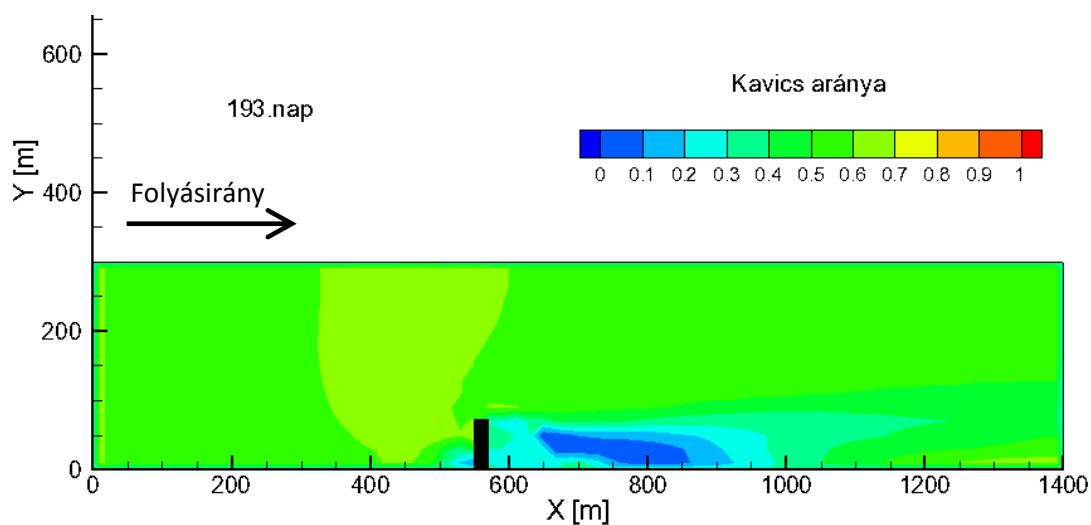
35. ábra - Az árhullám és a mederváltozás időszora a jelölt pontokban (B árhullám)

A mederváltozás-idősorok ábrája is a mederpáncél tönkremenetelét mutatja. A sarkantyú fejénél a meder mintegy 3 métert mélyül 6 hét alatt, míg a sodorvonalban kb. egy métert. A mű fejénél kialakuló *kopolya* a maximális mélység elérését követően (kb. a 245. napnál) töltődni kezd, amit a felvíz irányából ide érkező kimosódott anyag kiülepedése okoz. A sarkantyú mögötti területen jelentős (kb. 1 méteres) lerakódás figyelhető meg, amit a felvízről érkező, valamint a sarkantyú fejénél kimosódott hordalék kiülepedése okoz.

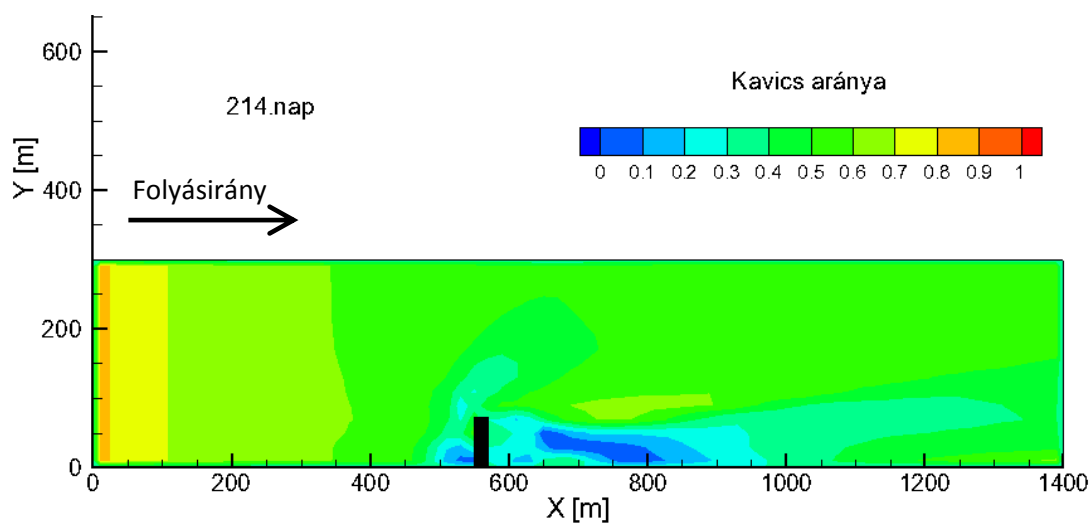
A mederváltozás ábrája alapján is megbecsültem a mederpáncél tönkremenetelét okozó vízhozamot, ami így 3000÷3400 m³/s-ra adódott. A két becslés közötti eltérést az okozhatja, hogy kavicsarány változásából a páncél erodálásának kezdetére, a mederváltozásból pedig a páncél tönkremenetelére lehet következtetni.

5.2.3 A C jelű árhullám hatásának vizsgálata

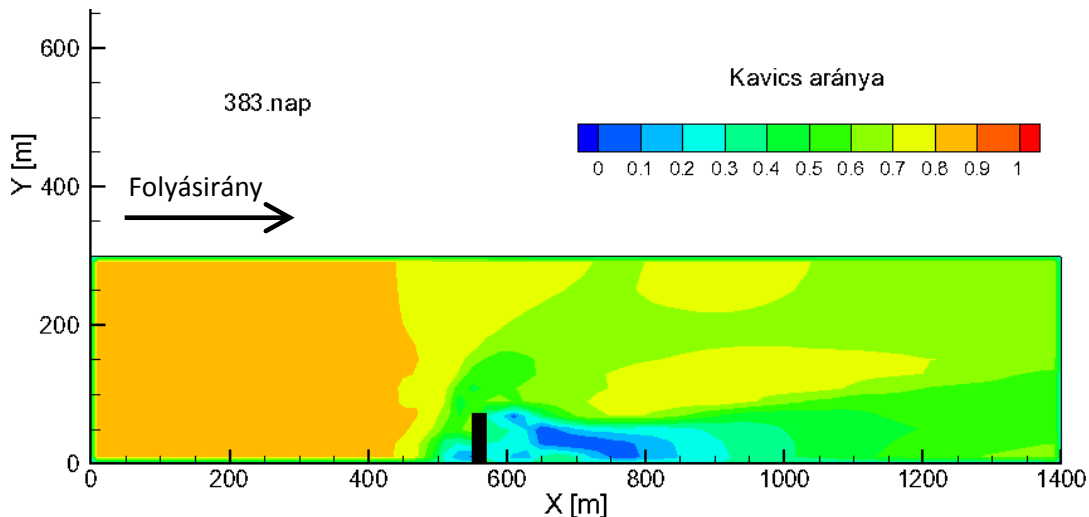
Ennél az árhullámnál azt vizsgáltam, hogy hogyan reagál a korábbiakban kialakult mederpáncél a B jelűvel megegyező tetőző hozamú, de intenzívebb, 1 hetes felfutású árhullám esetén.



36. ábra - Kavics aránya a C jelű árhullám 193. napján (tetőzés)



37. ábra - Kavics aránya a C jelű árhullám 214. napján (apadó ág vége)

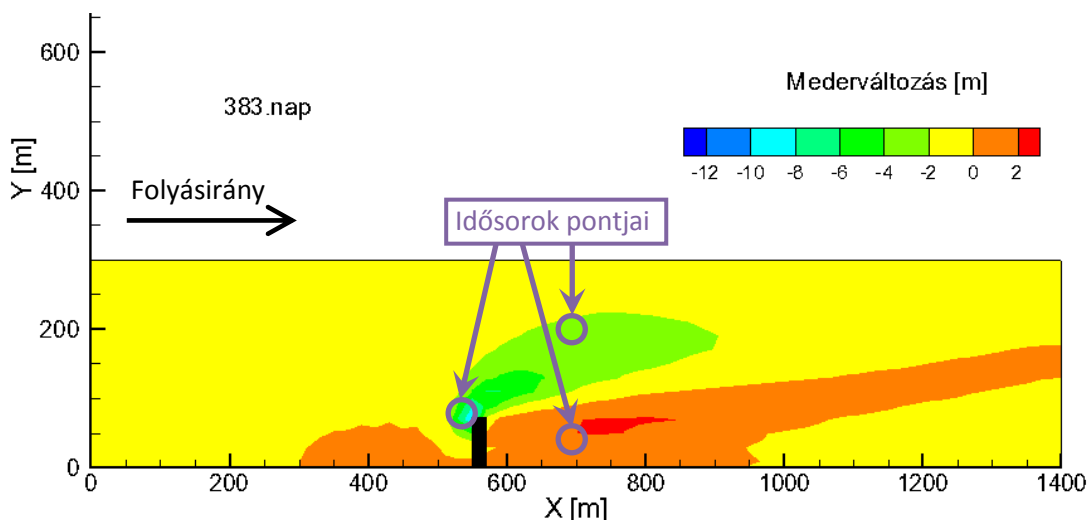


38. ábra - Kavics aránya a C jelű árhullám 383. napján

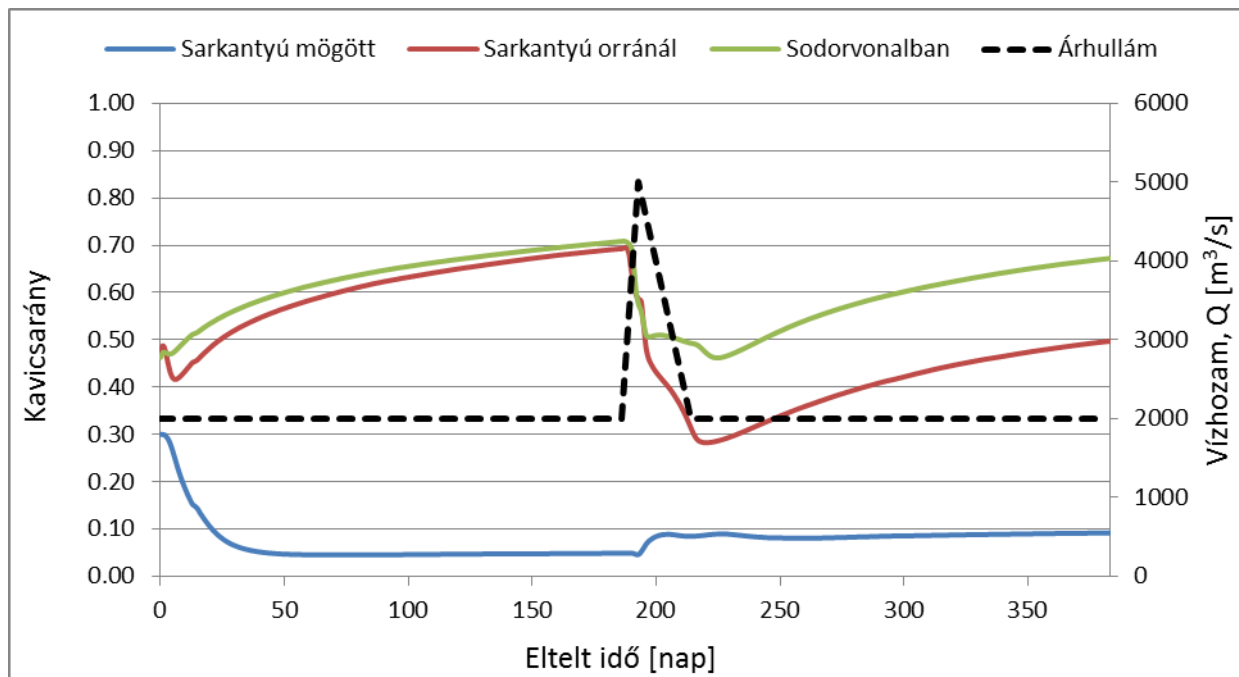
Az árhullám apadó ágának végére kialakult kavicsfrakció arányát ábrázoló mezőt (37. ábra) a B jelű árhullám végével (31. ábra) összehasonlítva látható, hogy a felvízi mederben a gyorsabban apadó árhullám hatására a szelektív erózió az apadás végére kevésbé tudja feldurvítani a mederanyagot, ami egy kevésbé ellenálló mederpáncél kialakulásához vezet.

Ez alapján megállapítható, hogy a mederanyag változásának mértéke nemcsak az árhullám tetőző vízhozamától, hanem az árhullám apadási idejétől is függ, amit a beprogramozott hordaléktranszport-modell képes is figyelembe venni. Ennek a ténynek a jelentősége különösen felértékelődhet vízlépcsők alvízi medermorfológiai viszonyainak numerikus vizsgálatakor, mert az esetleges csúcsra járatás következtében az áramlási viszonyok intenzív változásait le tudjuk képezni, és annak hatása számszerűsíthetővé válik.

További vizsgálatok céljából megjelenítettem a 39. ábrán feltüntetett pontok kavicsarány- és medermélyülés-idősorait (a pontok megegyeznek az A és B árhullámnál vizsgált idősorok pontjaival).



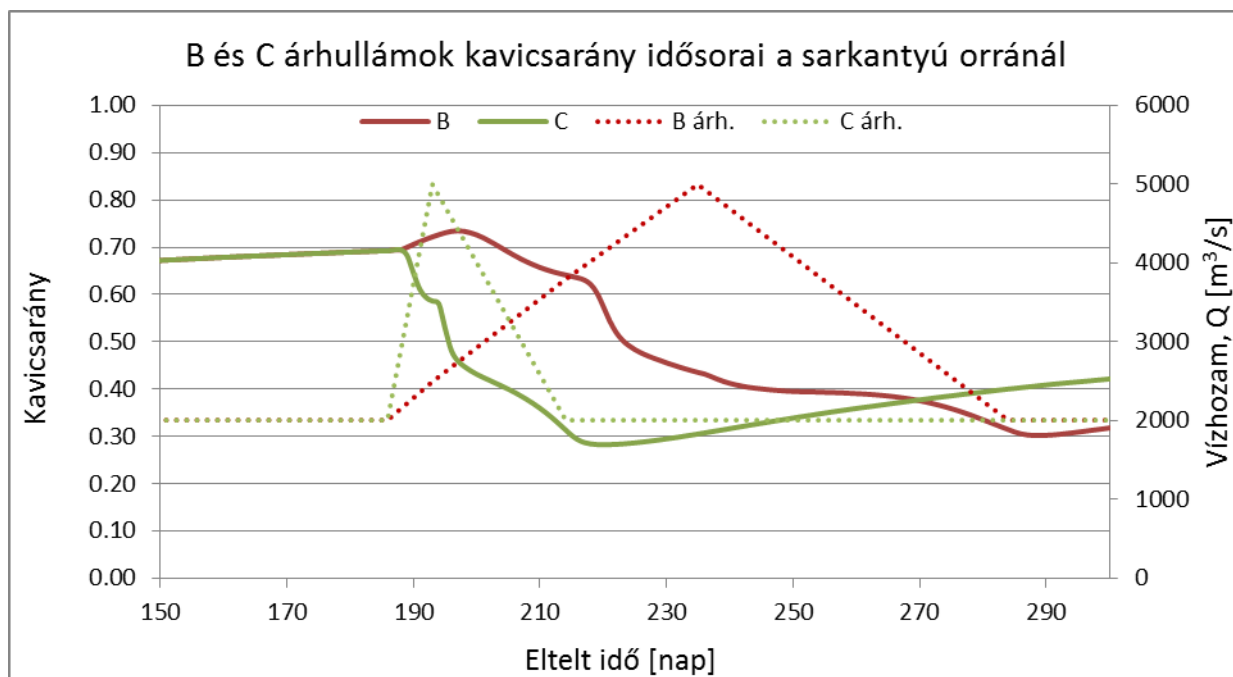
39. ábra - A mederváltozás mértéke a C jelű árhullám 383. napján



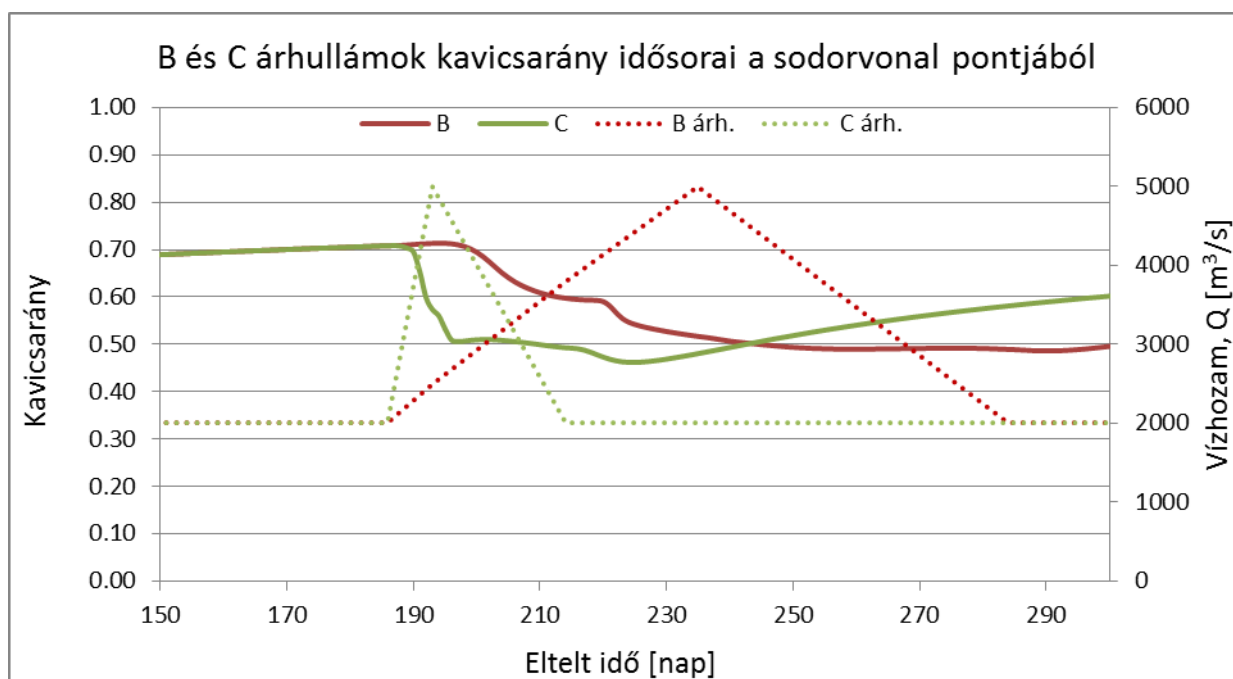
40. ábra - Az árhullámkép és a kavics-résarány idősora a jelölt pontokban (C árhullám)

A kavicsfrakció arányának idősorait elemezve a B jelű árhullámnál tapasztaltakhoz hasonló viselkedést tapasztalhatunk. A görbék követik az árhullám nagyobb meredekségét, de a B árhullámnál tapasztaltakkal megegyező jelleget öltenek. A sarkantyú fejénél és a sodorvonal helyénél a vízhozam idősoráról leolvasható a mederpáncél tönkremeneteli időpontja és a hozzá tartozó vízhozam. Ugyanezekben a pontokban kimutatható a durvább frakció kimosódásának, a kezdeti szemösszetételű alsóbb réteg felszínre kerülésének és a fentről érkező hordaléknak az együttes hatása. A sarkantyú mögötti pontban ugyancsak megfigyelhető az árhullám előtti, dinamikus egyensúlyt megközelítő állapot. Ahogy az előző példánál már illusztráltam, az árhullám hatására a durvább szemcsék is bekerülnek az áramlási holtterbe, ami a mederanyag némi lokális durvulását okozza. Az árhullám utáni időszakban a lassan köröző víz már nem képes a kavics elragadására, a lerakódott és elragadott homok mennyisége pedig az árhullám előtti napokhoz hasonlóan megint megegyezik, ami egy újabb dinamikus egyensúlyi állapot kialakulását idézi elő.

Elkészítettem a sarkantyú fejénél és a sodorvonalban lévő pontokra a B és C árhullámok kavicsarány idősorait (41. és 42. ábra).



41. ábra - B és C jelű árhullámok kavicsarány idősorai a sarkantyú fejénél lévő pontból

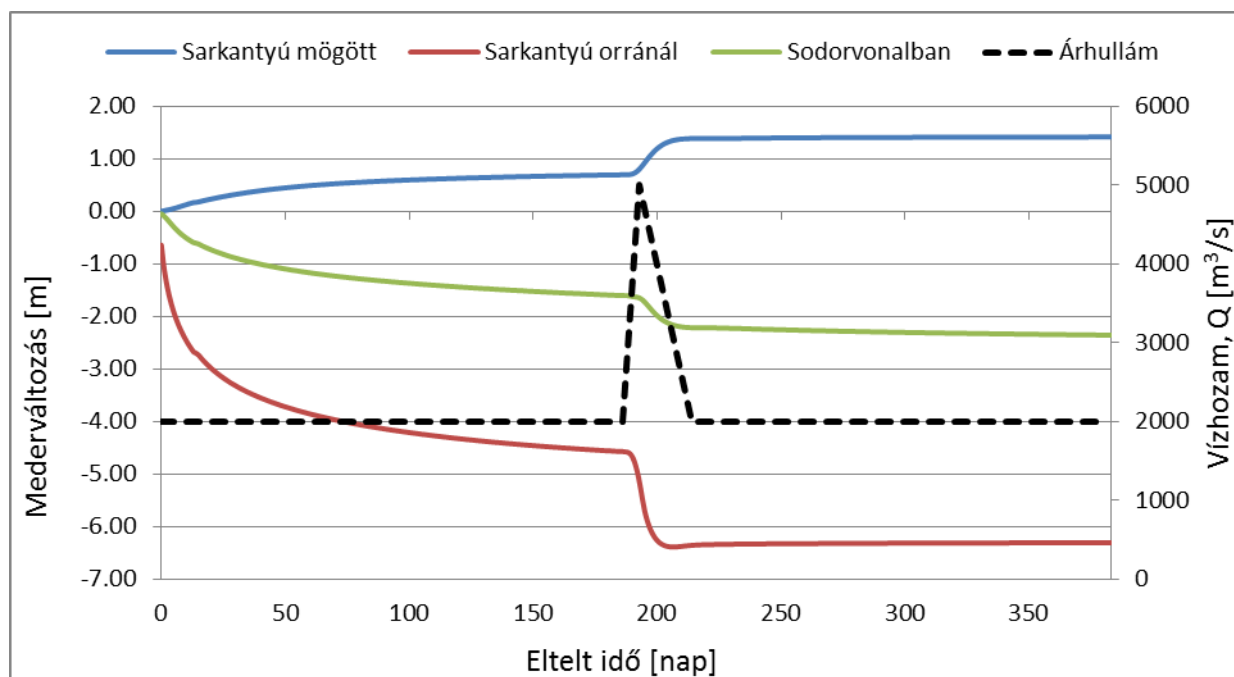


42. ábra- B és C jelű árhullámok kavicsarány-idősorai a sodorvonal pontjából

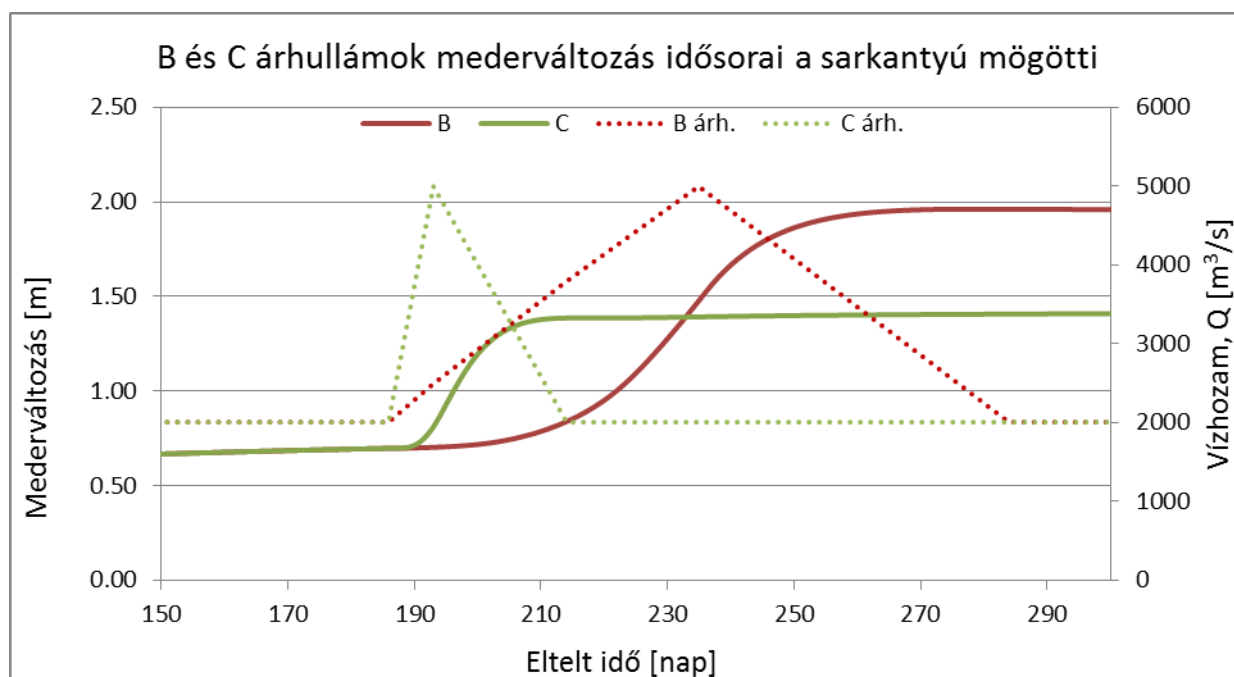
Megfigyelhető, hogy az áradó szakasz elején csak a B jelű árhullámnál van kavicsarány-növekedés. A C árhullám kezdetekor szinte azonnal a szemösszetétel jelentős megváltozása történik. A görbék jellegükben nagyon hasonlóak, különbség csupán az időbeli viselkedésben tapasztalható. Az ábrázolt időszak végén látható, hogy a C jelű árhullám esetén kapott kavicsfrakció-arány értékek meghaladják a B árhullám esetén kapott értékeket. Ez az időbeli eltoltságnak köszönhető, a két görbe a vizsgált időpillanatban eltérő fázisban van: C árhullámnál már a mederanyag durvulása, a mederpáncélozódás zajlik, amikor B árhullám görbéje még az apadó ág végénél kialakuló minimum

közelében van. Ez az árhullám végi minimumpont a B árhullám esetén is megfigyelhető a 220. nap körül.

A mederváltozás idősorai is a B jelű árhullámnál tapasztaltakhoz hasonlóan alakultak. A két árhullám idősorai között legnagyobb különbséget a sarkantyú mögötti pontoknál tapasztaltam. Azok idősorait külön felrajzoltam (43. és 44. ábra).



43. ábra - Az árhullámkép és a mederváltozás idősora a jelölt pontokban (C árhullám)

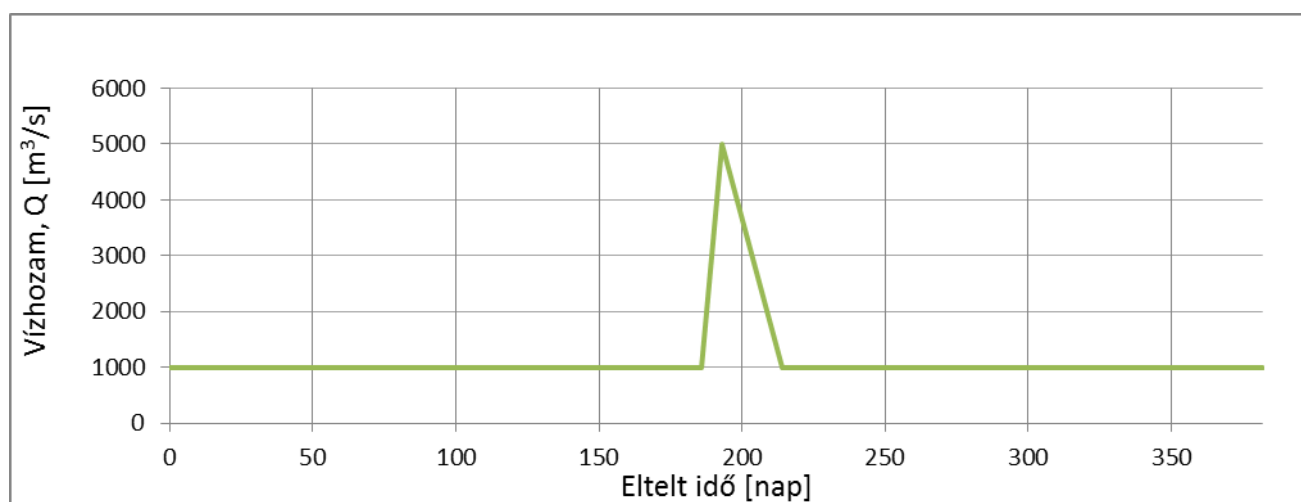


44. ábra - A B és C árhullámok mederváltozás idősorai a sarkantyú mögötti pontban

Látható, hogy a gyorsabban felfutó árhullám esetén kisebb lesz a kiüledés. Ez azért lehetséges, mert a felvízi szakasról elragadott szemcsék kisebb része jutott be a hordalécsapdaként viselkedő áramlási holtterbe annak folytán, hogy a sodorvonal nagy és sarkantyú mögötti alacsony áramlási sebességű tartomány határán, a nagy impulzus-, ezáltal nagy hordalékcserével jellemezhető zóna hosszabb ideig fennáll az elnyújtottabb árhullám esetén.

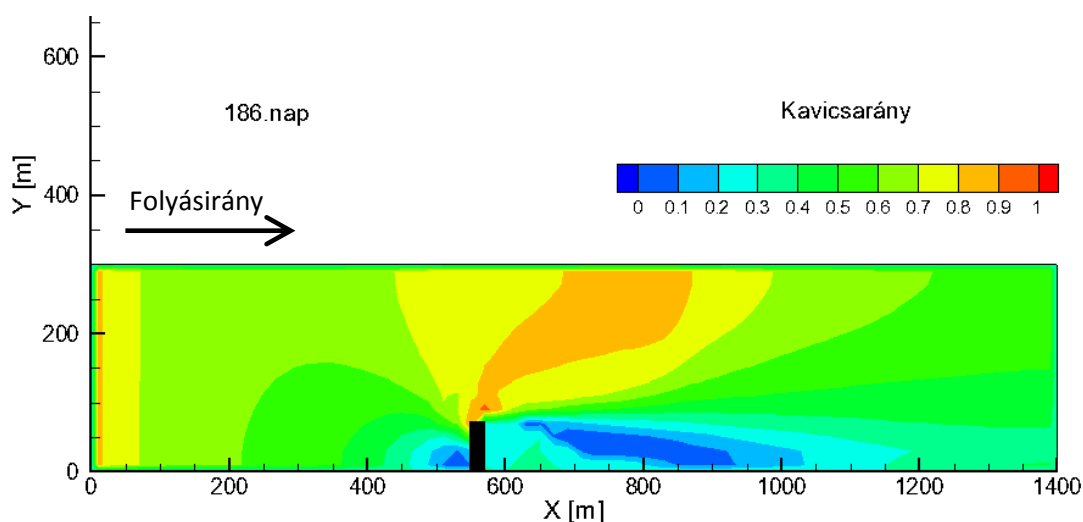
5.3 A D jelű árhullám hatásának vizsgálata

Az eddig vizsgált árhullámokat 2000 m³/s-os konstans vízhozamú állapot előzte meg. A D jelű árhullám azonban egy kisvízes állapotot reprezentáló 1000 m³/s-ról indul, 7 nap alatt éri el az 5000 m³/s-os tetőző hozamot, majd 21 nap alatt apad vissza 1000 m³/s-ra, onnan a 280. napig ismét konstans 1000 m³/s az értéke. Az árhullámképet az alábbi ábra szemlélteti.



45. ábra - A D jelű árhullám időszora

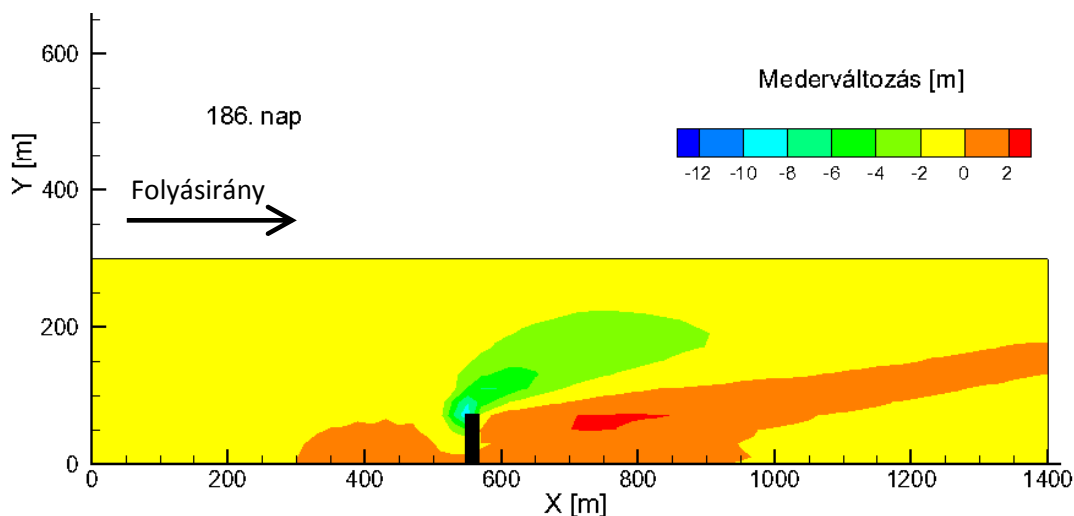
A D jelű árhullámmal lefuttatott modell jellegzetes napjaihoz tartozó kavicsfrakció-arány eloszlását mutatják be a következő ábrák.



46. ábra - Kavics aránya az D jelű árhullám 186. napján (árhullám kezdete előtt)

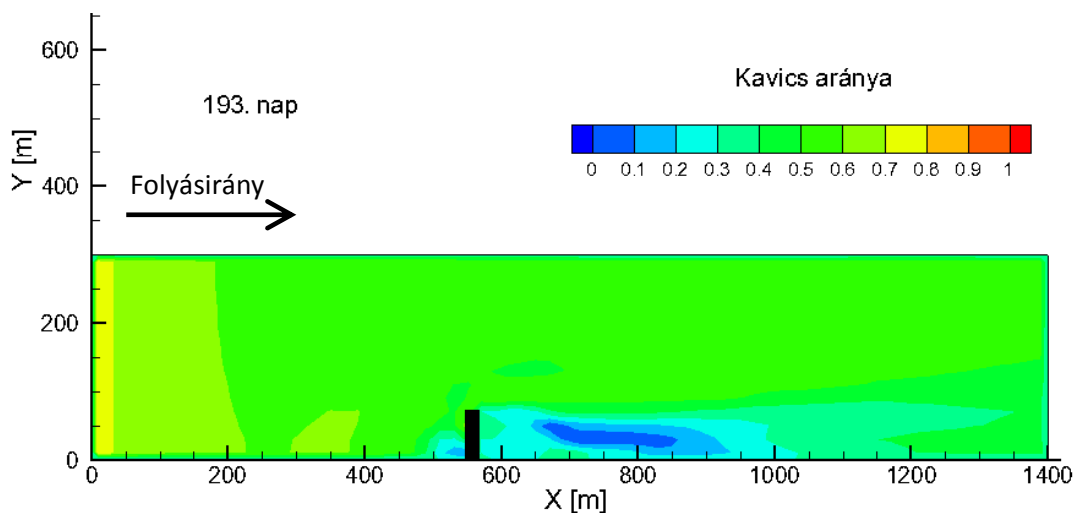
Azt tapasztaljuk, hogy az áradás előtti, 186. napra 1000 m³/s-os állandó vízhozam esetén nem történik akkora kavicsarány-növekedés, mint amekkorát 2000 m³/s-os hozamnál tapasztaltunk.

Továbbá a legdurvább szemeloszlású mederrészek nem a csatorna befolyási szelvényénél, hanem a sarkantyú okozta beszűkülésnél vannak. Ez arra utalhat, hogy ekkora hozamnál egy pontban a szemösszetételt már nagyobb súllyal a helyileg végbemenő kimosódás határozza meg és kisebb mértékben a felvízről érkező hordalék.



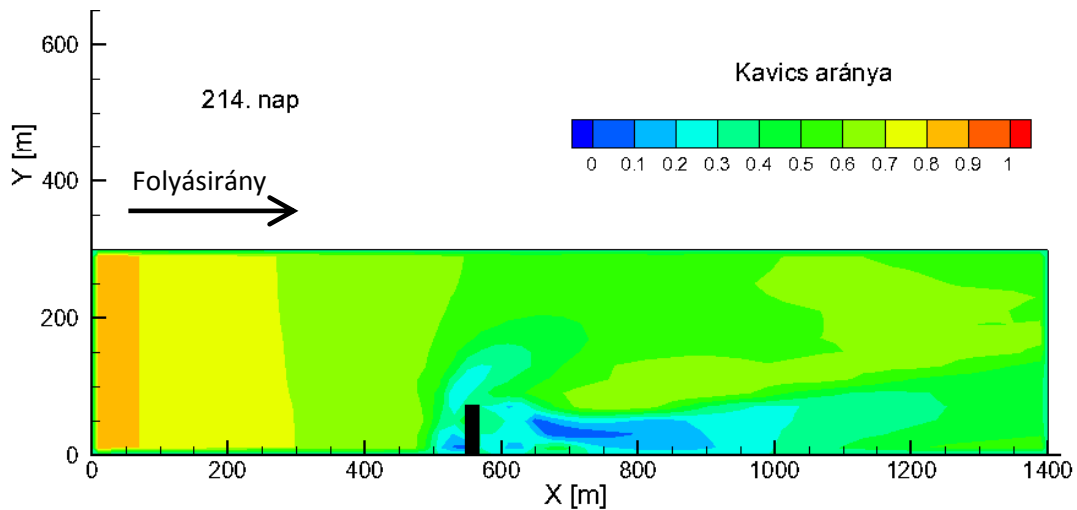
47. ábra - Mederváltozás a D jelű árhullám 186. napján (árhullám kezdete előtt)

A mederváltozás ábrája a C árhullámnál tapasztaltakkal megegyező jelleget mutat, de alacsonyabb értékekkel.

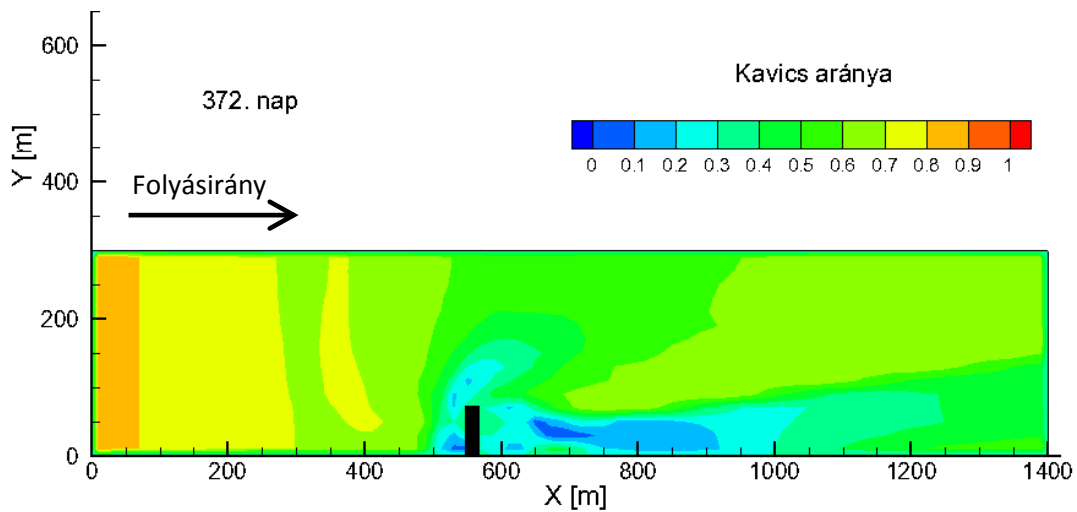


48. ábra - A kavics aránya a D jelű árhullám 193. napján (tetőzés)

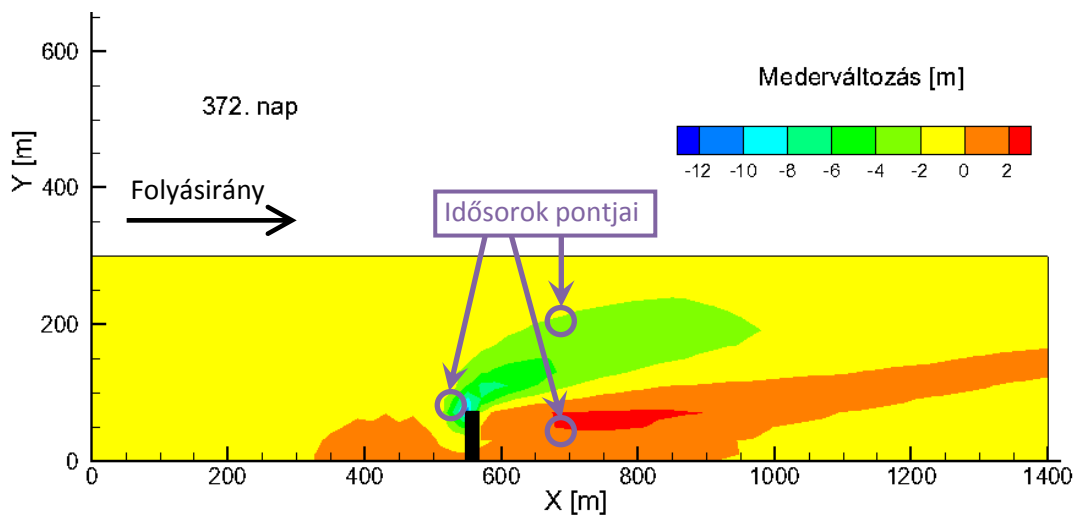
A kavicsarányokat bemutató ábrák alapján azt látjuk, hogy az árhullám érkezésével a mederpáncél felszakad, a tetőzésre jelentősen nagyobb lesz a meder homokaránya. Az apadás alatt kimutatható a szelektív erózió, utána azonban már lényegében nem változik a szemösszetétel.



49. ábra - A kavics aránya a D jelű árhullám 214. napján (apadó ág vége)

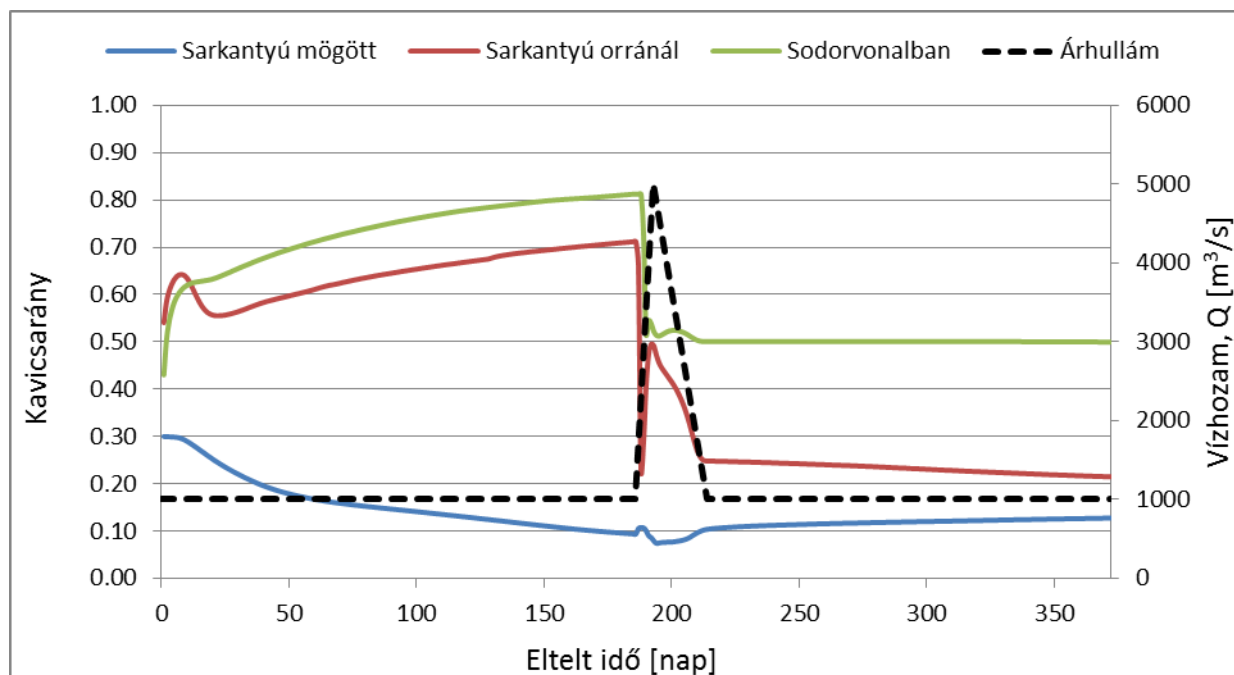


50. ábra - A kavics aránya a D jelű árhullám 372. napján



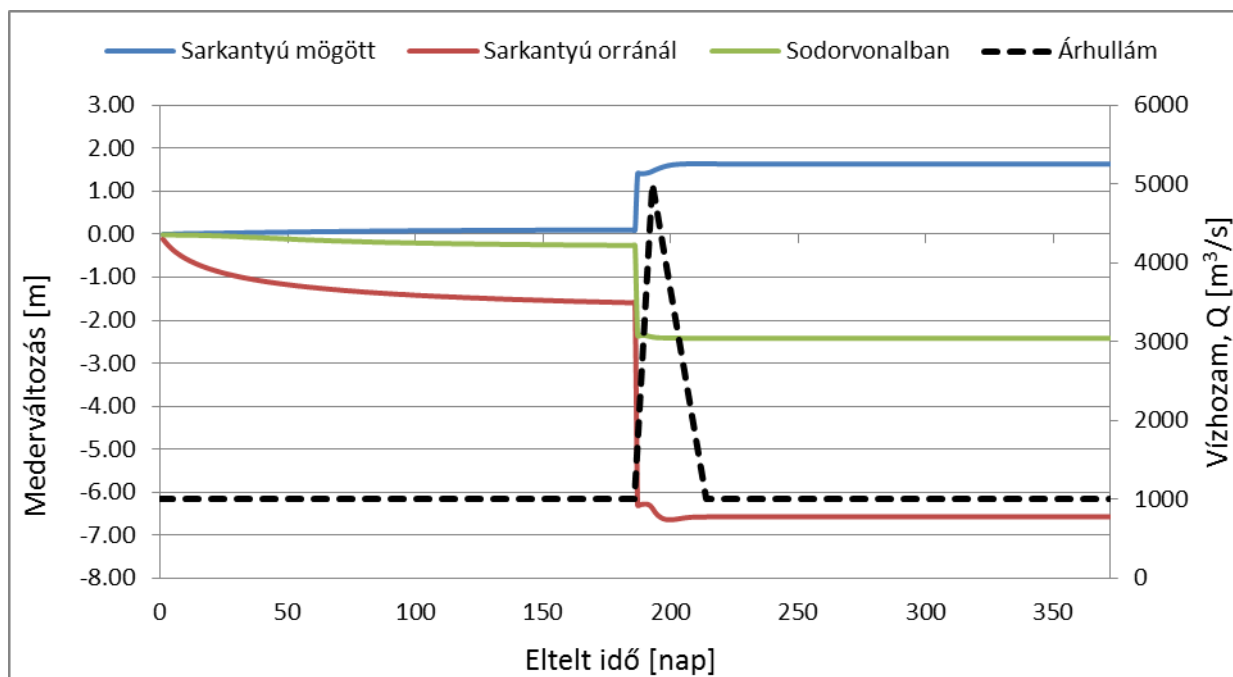
51. ábra - A mederváltozása a D jelű árhullám 372. napján

További vizsgálatok céljából megjelenítettem az 51. ábra jelzett pontjai kavicsarány- és medermélyülés-idősorait (a pontok megegyeznek az A, B és C árhullámnál vizsgált idősorok pontjaival).



52. ábra- Az árhullámkép és a kavicsarány idősora a jelölt pontokban (D árhullám)

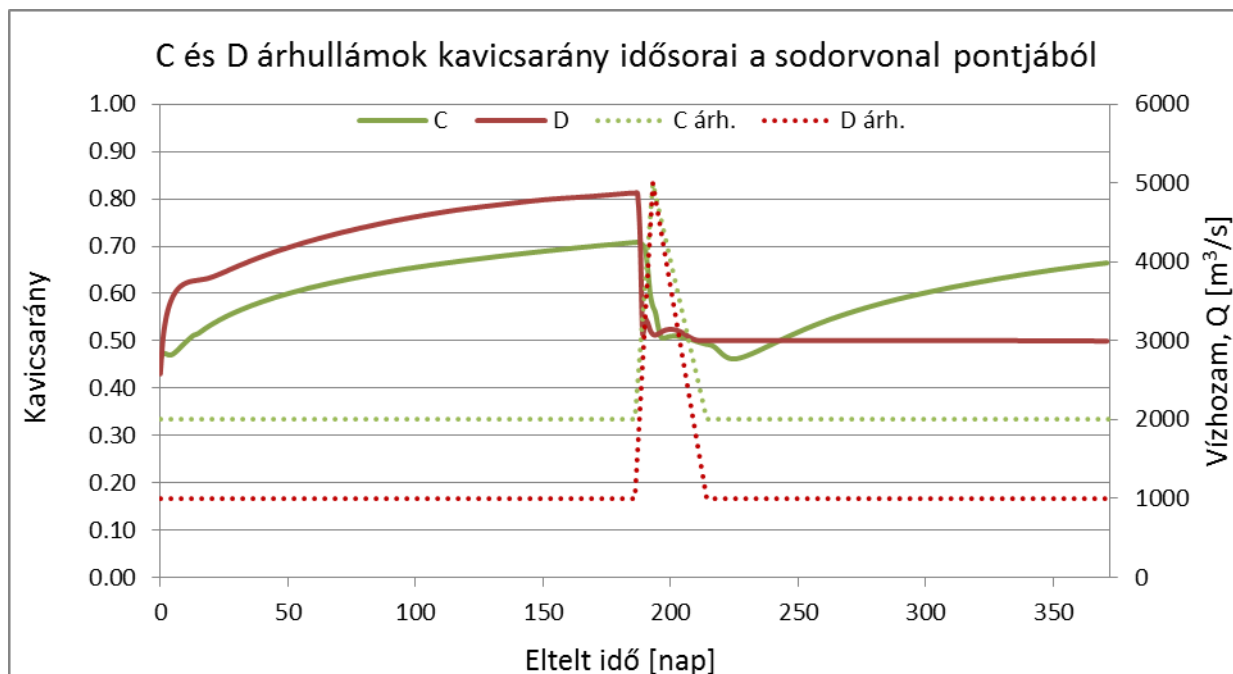
Az 52. ábra jól illusztrálja az áramlás szortírozó hatását és a mederanyag durvulását a sodorvonal mentén és a mű fejenél, továbbá a homok frakció feldúsulását a mű alvízi oldalán az első fél éves állandó vízhozamú időszakra. Aztán árhullám kezdetekor a mederfelszínen rögtön jelentős szemösszetétel változás kezdődik meg. A mederpáncél felszakadási mechanizmusának megfelelően rövid idő alatt ugrásszerűen lecsökken a kavics mennyisége a mederben. Érdekes módon az árhullám levonultával ebben az esetben nem látunk további mederpáncélozódásra utaló jelenséget. Az árhullám levonulása után a kavicsarányok egy közel konstans értékre állnak be. Ezt a jelenséget a későbbiekben magyarázom meg.



53. ábra- Az árhullámkép és a mederváltozás időszora a jelölt pontokban (D árhullám)

A mederváltozás-idősorok a kavicsarány-idősorokhoz hasonló jelleget mutatnak. A szemcsék elragadása és lerakódása közvetlenül az árhullám kezdetekor volt jelentős, és még az árhullám levonulása előtt állandósulni látszik a mederszint.

A 54. ábra a C és D jelű árhullámok kavicsarány-idősorait mutatja be a sodorvonalbeli pontban.

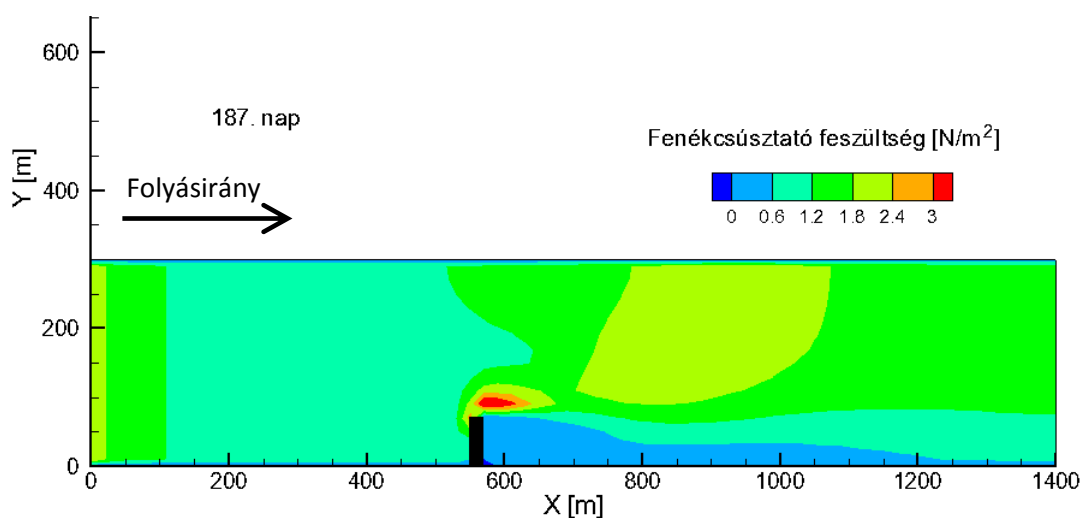


54. ábra - C és D árhullámok kavicsarány idősorai a sodorvonalbeli pontban

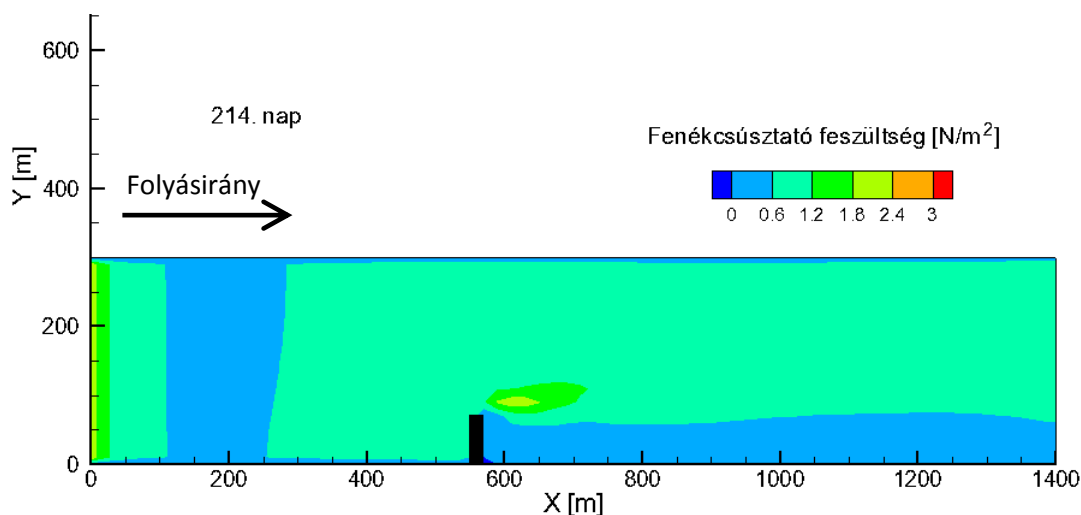
Az ábrán azt látjuk, hogy az árhullám érkezéséig kisebb vízhozam mellett a sodorvonalban jellemző mederanyag nagyobb mértékben durvult. Ennek oka a mederösszetétel leképzésnek numerikus

megvalósításában keresendő. A korábban már leírtak szerint a medret a modell egy aktív és egy inaktív réteggel írja le. Egy modellbeli időlépés alatt az aktív réteg szemösszetétele tud csak megváltozni és a kimélyülés nem haladhatja meg a réteg vastagságát. Amennyiben egy cellán belül a teljes aktív réteg elmosásra kerül, a meder anyaga az inaktív rétegből kerül utánpótlásra, vagyis finomodik, hiszen az inaktív réteg szemösszetétele az eredeti állapotot tükrözi. Jelen esetben a nagyobb vízhozam mellett nagyobb kimélyülések alakultak ki és – noha a mederpáncél nem szakadt fel – lassabb volt a mederanyag durvulása, mint a kisebb vízhozam mellett. Ez a jelenség arra hívja fel a figyelmet, hogy az aktív réteg modellben alkalmazott vastagságát körültekintően kell megválasztani, mert hatással van a kialakuló hordalékjellemzőkre.

Az árhullám levonulása után tapasztalt közel állandó szemösszetétel magyarázatához megjelenítettem a fenék-csúsztatófeszültségek mezőszerű eloszlásait az árhullám előtti és utáni állapotokra.



55. ábra – Fenék-csúsztatófeszültség a D árhullám 187. napján (árhullám kezdete előtt)



56. ábra - Fenék-csúsztatófeszültség a D jelű árhullám 214. napján (apadás végén)

A fenék-csúsztatófeszültségek árhullám előtti eloszlása (55. ábra) azt mutatja, hogy az áradás előtt a csatorna túlnyomó részén a feszültség meghaladta az $1,5 \text{ N/m}^2$ -t. Az árhullám levonulása után

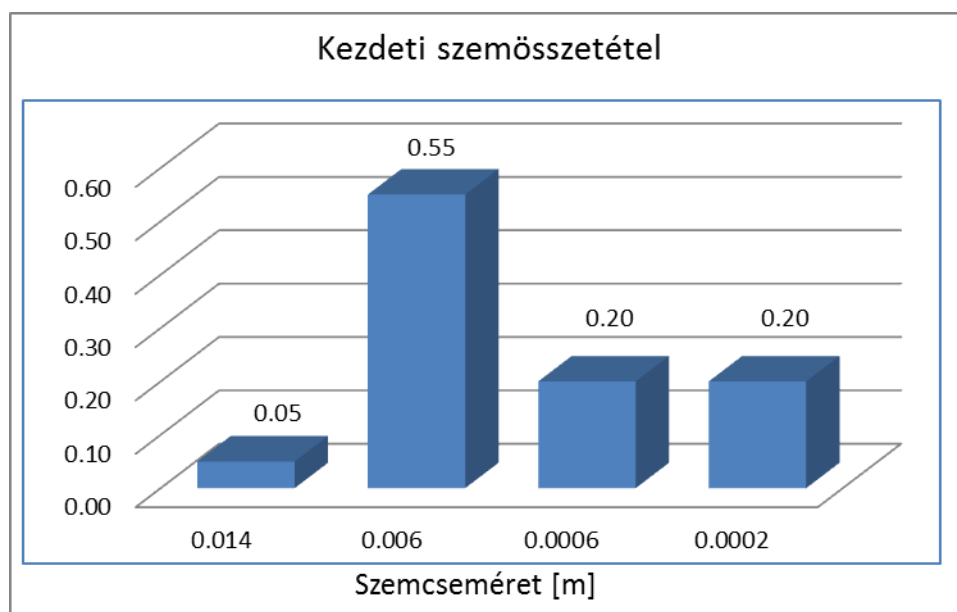
azonban a nyírófeszültség értékei jelentősen lecsökkentek. A jelenséget az magyarázza, hogy a nagy árhullám számottevően átrendezte a medret, a mélységek megugrottak a sodorvonalban, és a kisvízi vízhozam a korábbi szinttel, de jóval nagyobb szelvényterületen áramlott keresztül. Ennek következtében lecsökken a fenék-csúsztatófeszültség is. Jelen esetben a medermélyülés során elértünk egy olyan mélységet, aminél a fenék-csúsztatófeszültség már annyira alacsony lett, hogy a szemcséket nem képes elragadni az áramlás. Ennek megfelelően a szemösszetétel sem változott tovább.

5.4 Hordaléktranszport-modellek összehasonlító elemzése egy helysínrajzi vonalvezetésében természetes folyószakaszon

A tesztcsatornás futtatások eredményei rámutattak arra, hogy a beprogramozott hordaléktranszport-modell valószerű viselkedést mutat a mederpáncélozódási folyamatokra, annak kialakulására és felszakadására. Ezek tudatában tértem rá a hordaléktranszport-modellnek egy természetes vonalvezetésű medren, egy kiragadott Duna-szakaszon történő tesztelésére, melynek csak a helysínrajza felelt meg a valóságnak, mert a kezdeti mederszinteket vízszintesnek feltételeztem.

A vizsgálatok során permanens vízhozam mellett kialakuló morfodinamikai változások modellezésére szorítkoztam, csupán a mederpáncél és egy, a meanderező folyókra jellemző medergeometria kialakulásának vizsgálatára összpontosítva. A meder anyagát négy frakcióval képeztem le, vegyes szemösszetételű mederanyaggal, vagyis homok és kavics frakciók egyaránt megtalálhatók benne. A modellvizsgálatokat mindhárom fent ismertetett hordaléktranszport-moddellel, azokat azonosan felparaméterezve végeztem el. A homogén mederanyagra kidolgozott van Rijn és a vegyes szemösszetételre kifejlesztett Wu hordaléktranszport-modelleket referenciaként véve, a az általam beprogramozott hordaléktranszport-modell viselkedését vizsgáltam.

Kezdeti feltételnek a befolyási szelvényben 2000 m³/s-os vízhozamot, a kifolyási szelvényben 108,5 m.B.f. szintet adtam meg (ez megfelel egy középvízi vízjárási állapotnak a Duna e szakaszán). A mederfenék kezdeti, térben egyenletesen eloszló szemösszetételét az alábbi ábra mutatja.



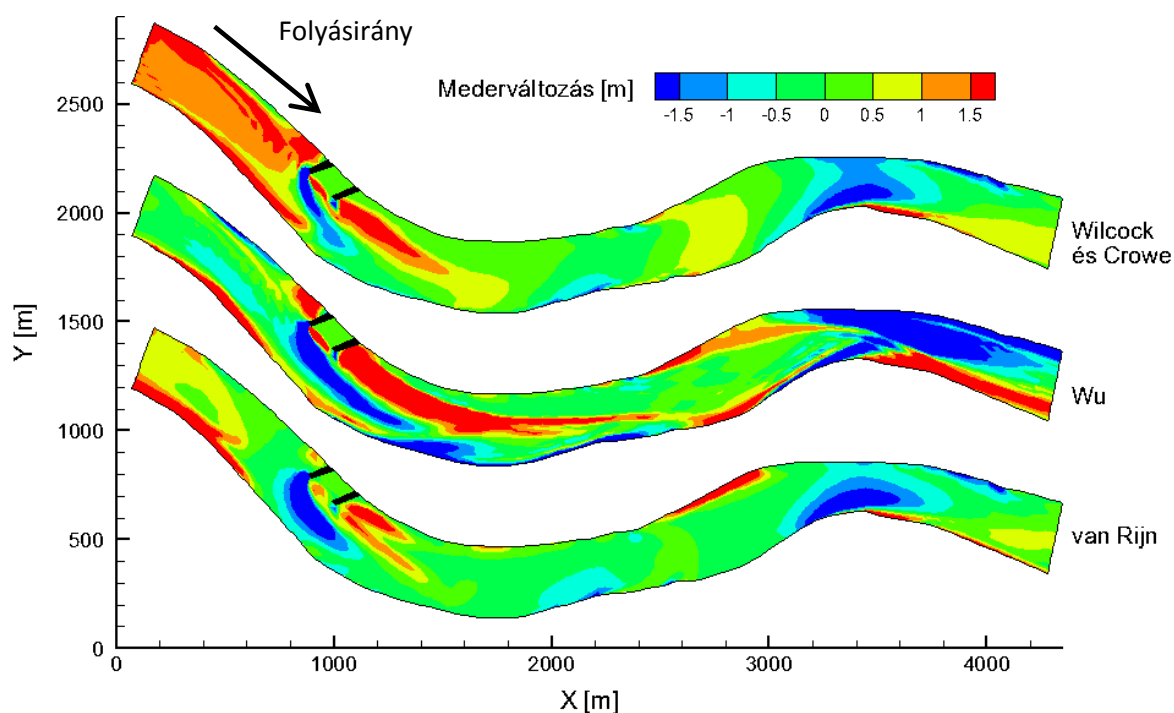
57. ábra - Kezdeti szemeloszlás

A mederanyag kezdeti szemeloszlását úgy szerettem volna megadni, hogy az a Duna magyarországi szakaszára reális legyen. Ezért azt a Duna 1677 fkm-ében vett mintából előállított, a 6. ábrán látható szemeloszlási görbéről olvastam le. Ez az a görbe volt, ami a frakciók egyenletesebb eloszlását mutatta. A görbe függőleges a bal parttól 440 méterre található.

A befolyási szelvényben a hordalékhozamot a Baranya Sándor és Józsa János által publikált cikkből (Baranya and Józsa, 2009) vett vízhozam- és koncentráció-idősorok alapján becsültem meg és a három finomabb frakcióra egyenletesen osztottam el, ami egyenként 20 kg/s-ot jelentett. Ez nyilvánvalóan egy durva közelítés, de a tesztelés szempontjából megengedhető, hiszen összehasonlító mérések hiányában csak kvalitatív jellemzést adhatok.

A morfordinamikai modellezésnél az előzőekhez hasonlóan jártam el, vagyis első lépésben egy fix medret feltételezve lefuttattam az áramlási modellt, majd annak eredményeit adtam meg a hordalék-modellezés kezdeti feltételeként (ún. hotstart).

A három, azonos paraméterekkel előállított modellt fél-fél éves időszakra futtattam. Ez az időtartam egyik modell esetében sem volt elég egy egyensúlyi medergeometria és mederanyag-összetétel eléréséhez, de az alapvető karakterisztikák minden esetben megjelentek. A tesztelés szempontjából ez nem jelentett problémát, hiszen a jellegbeli különbségekre így is rá tudtam mutatni. A három hordaléktranszport-moddellel elvégzett vizsgálatok legfontosabb eredményezőit az alábbi ábrák mutatják. (58. ábra, 59. ábra, 60. ábra, 61. ábra)

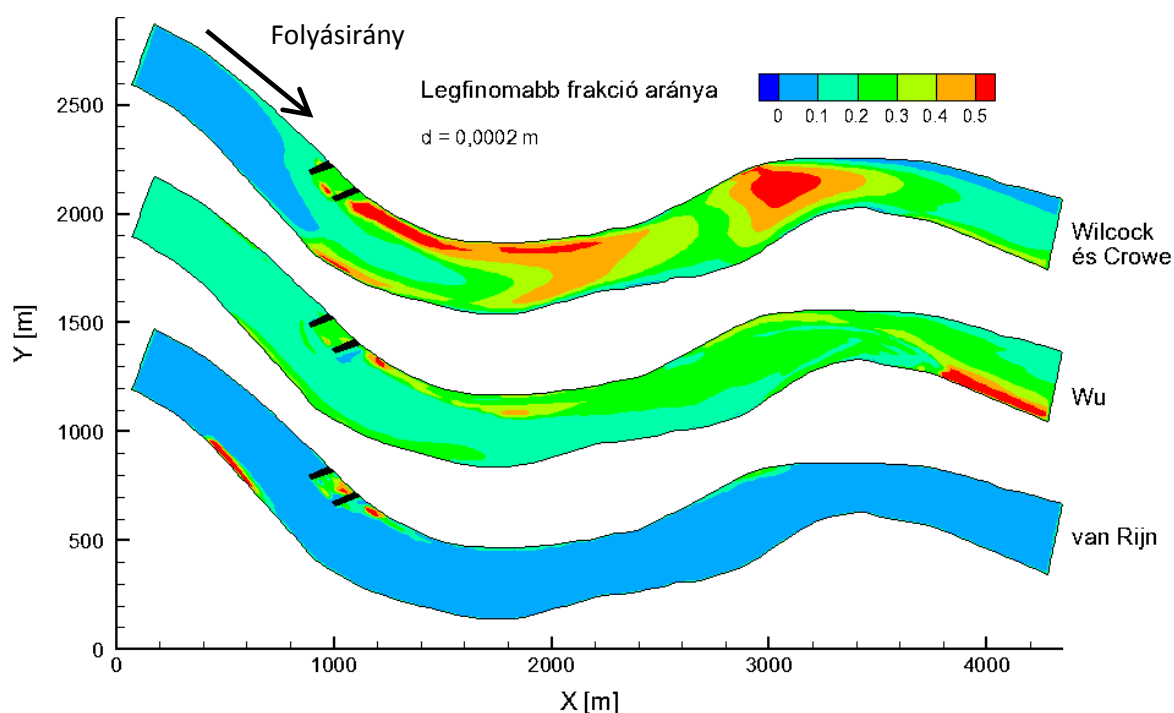


58. ábra - Az azonos paraméterekkel, de különböző hordaléktranszport-modellekkel futtatott modellek végső állapotainak mederváltozásai

A három hordaléktranszport-moddellel számított mederszint-változások mindegyikénél megfigyelhető a sarkantyúk fejeinél a kimosódás, valamint a sarkantyúk mögött kialakuló kiülepedési terek. A befolyási szelvénybe érkező hordalék Wilcock és Crowe modelljénél a többihez képest nagyobb

hordalék-lerakódást okoz. Ez arra enged következtetni, hogy ez a hordaléktranszport-modell kisebb hordaléktranszport-kapacitással számol.

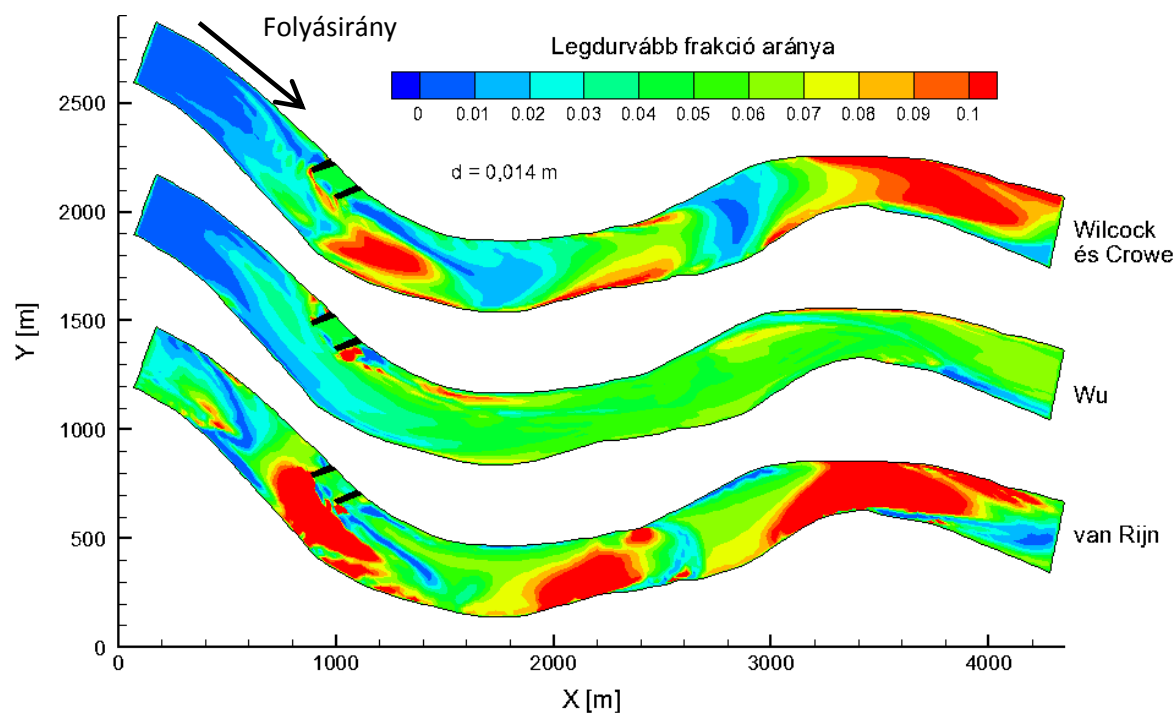
A sarkantyúk körüli lokális hatások mellett a folyó vonalvezetéséből adódó geometriai változások is megjelennek. A vizsgált szakasz közepénél (kb. $X = 2000$ méternél) egy szűkület található. Ennek hatására a meder mélyülésnek indul itt. Hasonló módon, a szűk folyókanyarulatban is ($X = 3400$ m) jelentős mélyülés tapasztalható. Mindkét erodálódó szakasz alvízi oldalán megjelenik az ideiglenes hordalék kiüledés, ami a fentebbről kimosott mederanyagból származik. A mederanyag hosszirányú megváltozása mellett a meanderező vonalvezetéséből adódó keresztirányú mederváltozások is fejlődésnek indulnak, amit jól mutatnak az íves szakaszok alvízi oldalán az értelemszerűen aszimmetrikus változások.



59. ábra - A legfinomabb szemcsefrakció eloszlásai az azonos paraméterekkel, de különböző hordaléktranszport-modellekkel futtatott szimulációk végső állapotaiban

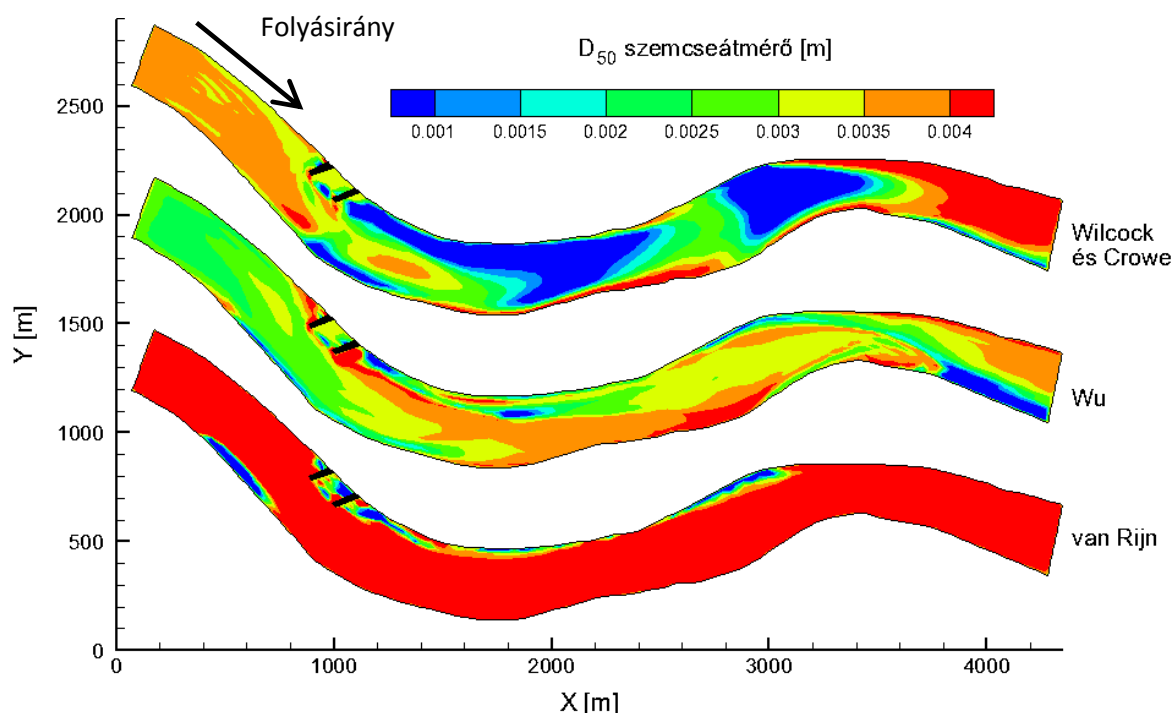
A 59. ábra azt mutatja, hogy a másik két modellel ellentétben a van Rijn hordaléktranszport-modell szerint a legfinomabb frakció a vizsgált folyószakasz szinte teljes területéről kimosódásra kerül, kivéve a sarkantyúk alvízi zónáját. Ennek magyarázata, hogy ez a hordaléktranszport-modell nem veszi figyelembe a kisebb szemcsék nagyobb ártali leárnýékoltságát, vagyis azok teljes mértékben ki vannak téve az áramlásnak, és mivel a fenék-csúsztatófeszültség jelentősen meghaladja a Shields görbe alapján javasolt kritikus értéket, mozgásba jönnek. A legfelső ábrán azt látjuk, hogy jelentős mennyiségű finom frakció van jelen a mederben, a felső szakaszt kivéve. Ennek oka az, hogy a beprogramozott hordaléktranszport-modell kisebb hordalékszallítási kapacitást feltételez, tehát a kimosódott és beérkező finom frakció transzportja lassabban megy végbe. Mivel a másik két modell figyelembe veszi a finom szemcsék leárnýékoltságát, a legfinomabb frakció is megmarad a mederanyagban, sőt eseteként jelentősen feldúsul. Realisztikus viselkedést mutat az újonnan beprogramozott modell, mely jól illusztrálja a sarkantyúk alvízi oldalán kiüledő finom frakciókat és

a szűkület utáni diffúzor-szerű folyószakaszon ($X = 3000$ m környékén) a homokfrakció arányának megnövekedését.



60. ábra – A legdurvább szemcsefrakció eloszlásai az azonos paraméterekkel, de különböző hordaléktranszport-modellekkel végzett számítások végső állapotaiban

A legdurvább (kavics-) frakció eloszlását bemutató 60. ábra alapján is kimutatható, hogy mivel a van Rijn modell nem számol a leárnyékolással, a sarkantyúk fejénél a finomabb frakciók jelentős kimosódása miatt a mederfenék talán túlzó durvulása megy végbe. Feltételezhető, hogy a valósághoz a másik két modell által becsült eredmények állnak közelebb.



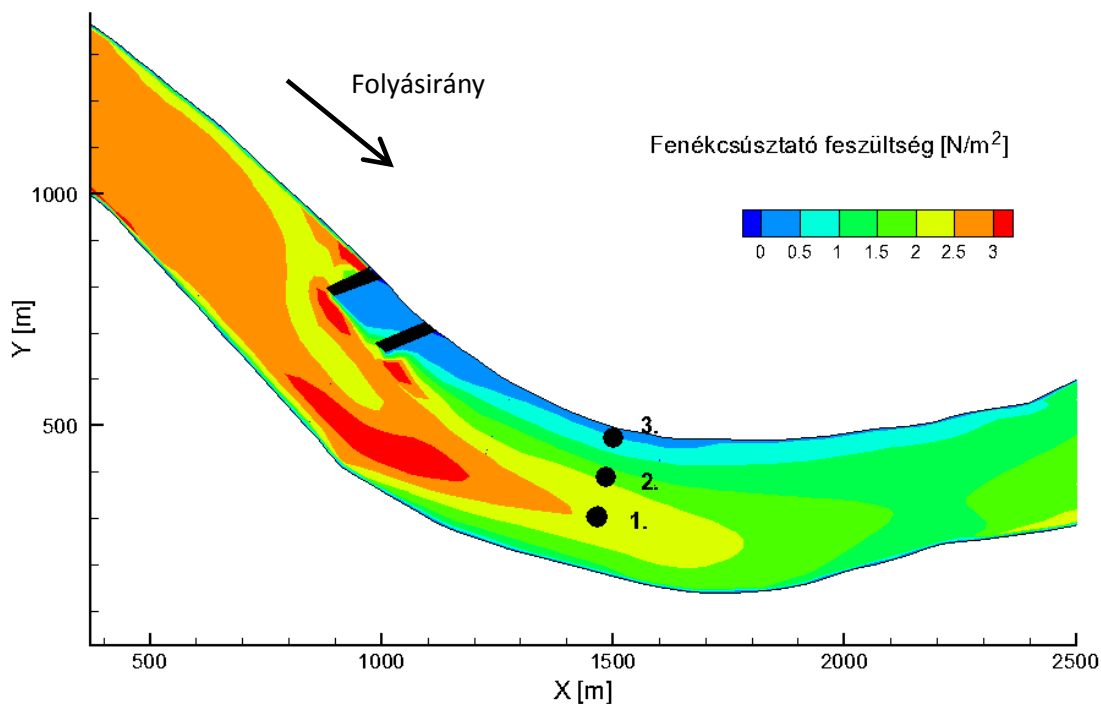
61. ábra - Az azonos paraméterekkel, de különböző hordaléktranszport-modellekkel futtatott modellek végső állapotainak D_{50} szemcseméret eloszlásai

A Wilcock és Crowe hordaléktranszport-modelljének átlagos szemcseátmérő ábráján az látható, hogy a finomabb szemcsék aránya a kifolyási szelvény felé közeledve fokozatosan nő. Ez a tendencia egy olyan köztes állapotra utal, ami a finomabb frakciók kimosódásával egy durvább összetételű mederanyag egyensúlyi állapota felé tart.

5.5 Szemösszetétel vizsgálatok a beprogramozott hordaléktranszport-modellel

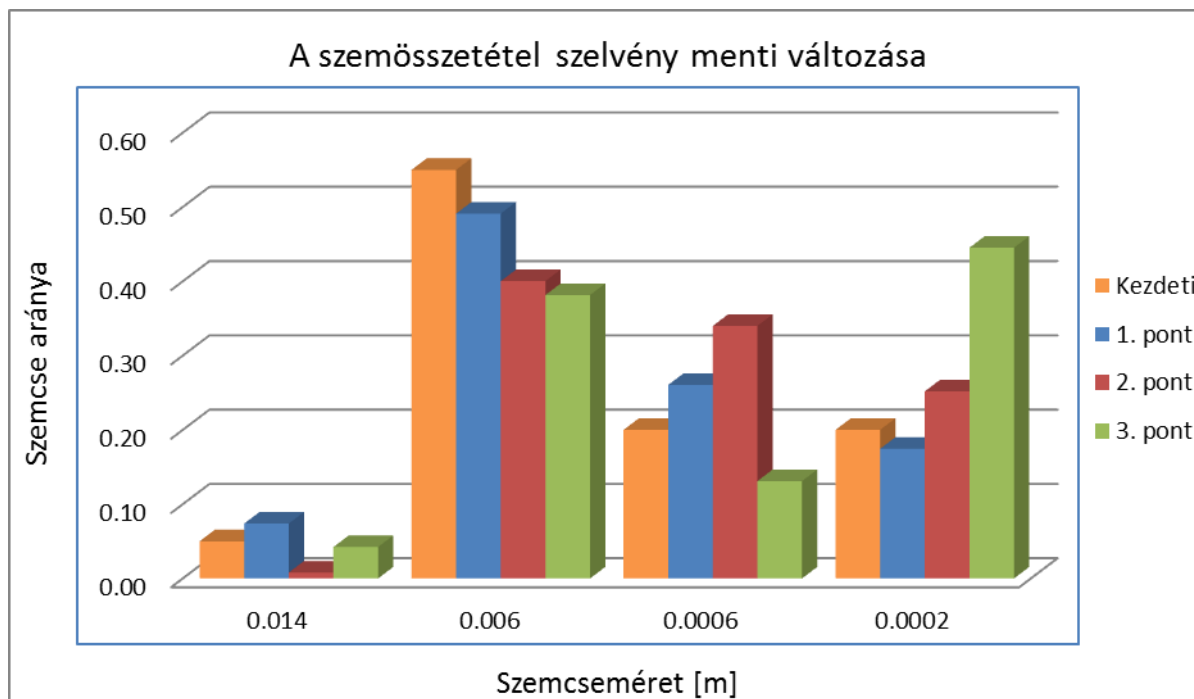
A három hordaléktranszport-modell összehasonlításához lefuttatott Wilcock és Crowe modell eredményeit felhasználva először megvizsgáltam az alábbi, fenék-csúsztatófeszültség ábrán feltüntetett szelvény három pontjában a szemösszetételt. Azt vártam, hogy a kanyar és a sarkantyúk együttes hatására a sodorvonal a jobb part felé tevődik át. Ennek megfelelően a kanyar domború oldalán a finomabb frakciók lerakódását, a homorú part felé eltolódott sodorvonalban pedig a mederfenék feldurvulása lesz kimutatható.

A kiragadott szakasz fenék-csúsztatófeszültségének térbeli eloszlását és az azon feltüntetett sorszámmal azonosított vizsgált pontokat a 62 ábra mutatja be.



62. ábra - Fenékcúsztatófeszültség ábrája és a szelvény menti szemösszetétel-változás vizsgálatának 3 pontja

A 62. ábra feltüntetett pontjainak helyét úgy választottam meg, hogy azok egy szelvény sodorvonalában (1. pont), a feliszapolódó domború parthoz közeli részen (3. pont) és egy köztes helyen (2. pont) legyenek. A pontokban számított mederanyag-szemösszetételt az alábbi ábrán jelenítettem meg.

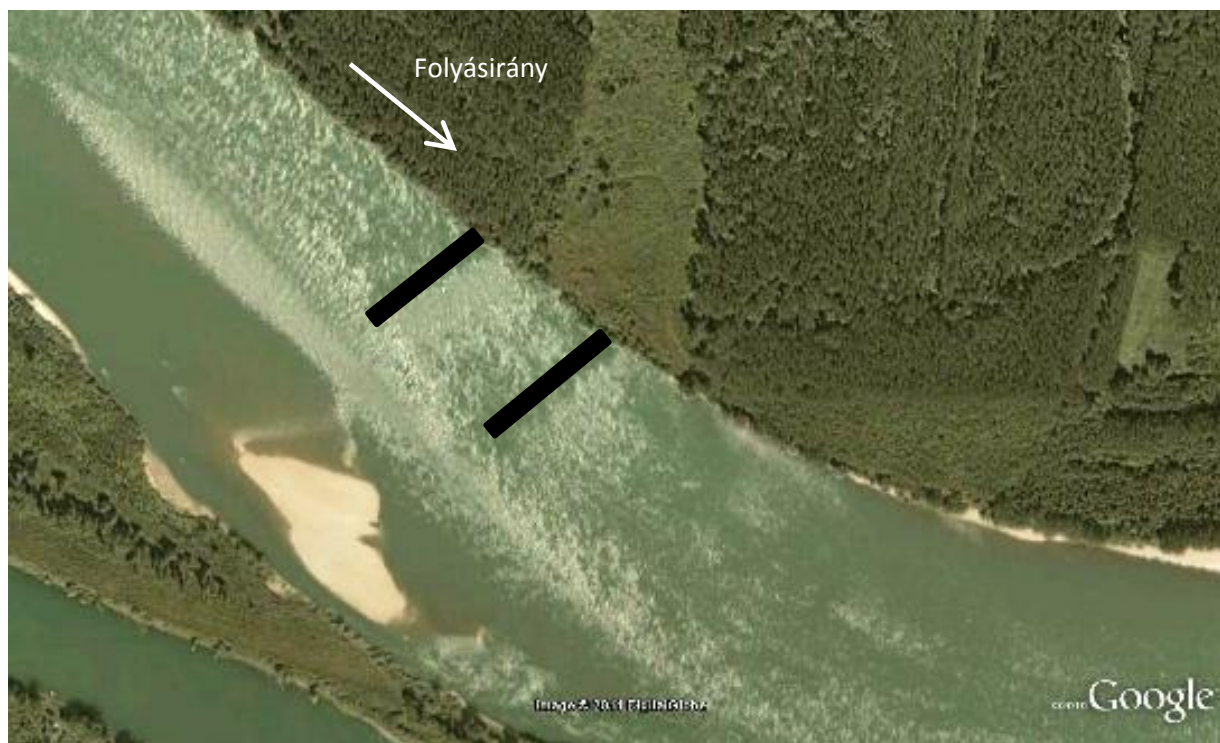


63. ábra - Egy szelvény 3 pontjának kezdeti szemösszetétele

A vártak megfelelően a legdurvább frakció legnagyobb feldúsulása a sodorvonal pontjában (1. pont) történt. A legfinomabb szemcsék aránya a domború partszakasz környezetében (3. pont) nőtt meg leginkább, a legnagyobb szemcse aránya azonban nem itt, hanem a köztes pontban lett a legkisebb. Ennek magyarázata, hogy a 2. pontban a fenék-csúsztatófeszültség még képes kimosni a legnagyobb szemcséket is, a part menti sávban azonban már nem.

A fenék-csúsztatófeszültség ábráján (62. ábra) megfigyelhető az alsó sarkantyú előtt egy lokális fenék-csúsztatófeszültség minimum (sárga folt). Felmerült a kérdés, hogy ez nem eredményezhet-e lokális feltöltődést. A jelenség vizsgálata céljából szemügyre vettem az elemzésre kiválasztott Duna-szakasz műholdas felvételét (64. ábra).

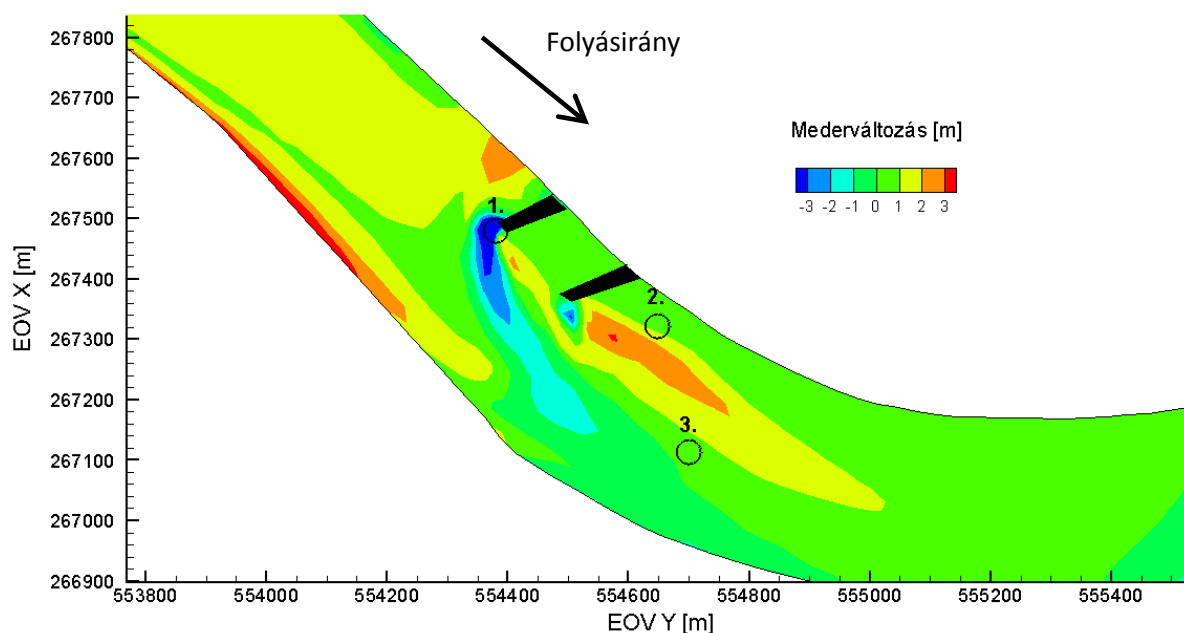
A műholdas felvételen ugyan nem pontosan a lokális fenék-csúsztatófeszültség minimumánál, hanem attól a jobb part felé valóban kimutatható jelentős hordalék-lerakódás. A sarkantyúk beépítésével azonban a túlpártig a teljes meder mélyülését várták volna. Ez a példa egyúttal rámutat arra is, hogy a folyószabályozási műtárgyakkal nem minden esetben sikerül a kívánt állapot elérése. Megbízható morfordinamikai modellek alkalmazásával már a tervezési szakaszban becsülhető lenne a beavatkozások hatékonysága.



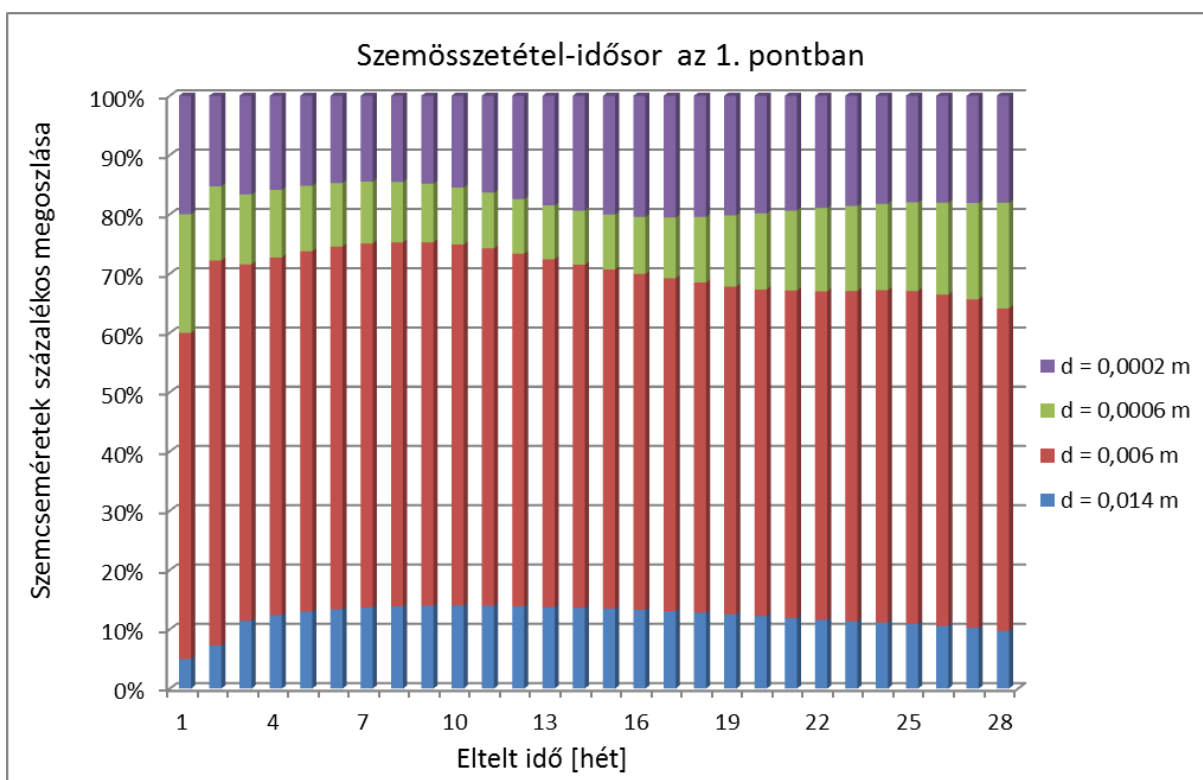
64. ábra - A szelvény menti szemösszetétel változásának vizsgálatához kiragadott mederszakasz (Google Earth)

A hordaléktranszport-modell további teszteléséhez megvizsgáltam három jellegzetes pontban a négy szemcsefrakció százalékos megoszlásának idősorait. A könnyebb értelmezés céljából a négy idősort egy diagramon ábrázoltam. A lejátszódó folyamatok összetettségét a négy frakció kölcsönhatása fokozza. Míg a két hordalék frakcióval vizsgált tesztcsatorna esetében az egyes szemcseméretek arányának időbeli alakulását viszonylag jól előre lehetett becsülni, négy frakció esetében ez már jóval nehezebb feladat.

A vizsgálatra kiválasztott pontokat a 65. ábra tünteti fel. Az 1. és a 3. pontban a mederanyag durvulását, a második pontban a finom frakciók feldúsulását várnám.



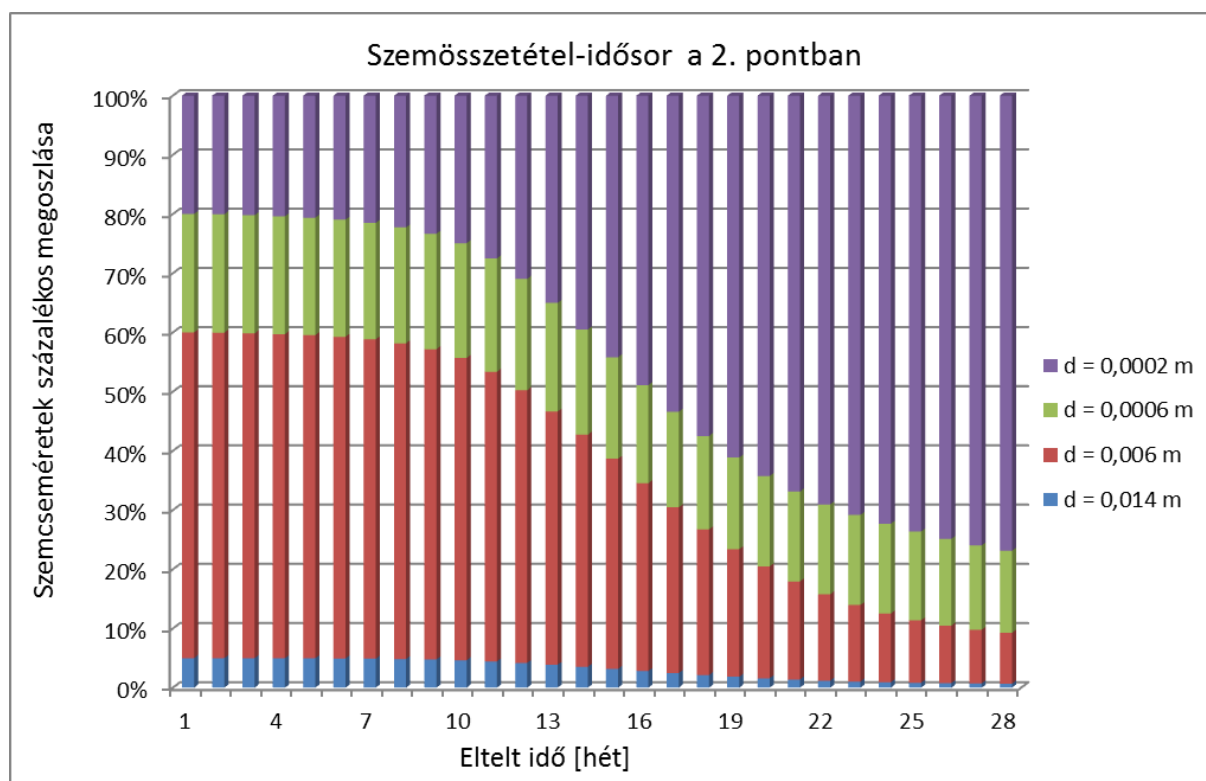
65. ábra – A mederváltozás ábrája és a szemösszetétel változásának vizsgálatára kiválasztott három pont



66. ábra - A frakciók százalékos megoszlásának időszora az 1. pontban

Bár az 1. pontban (66. ábra), a sarkantyú fejénél a mederanyag durvulását vártam, az kismértékben következett csak be. Az idősorok kezdeti és végső értékei között számottevő különbség nem látható.

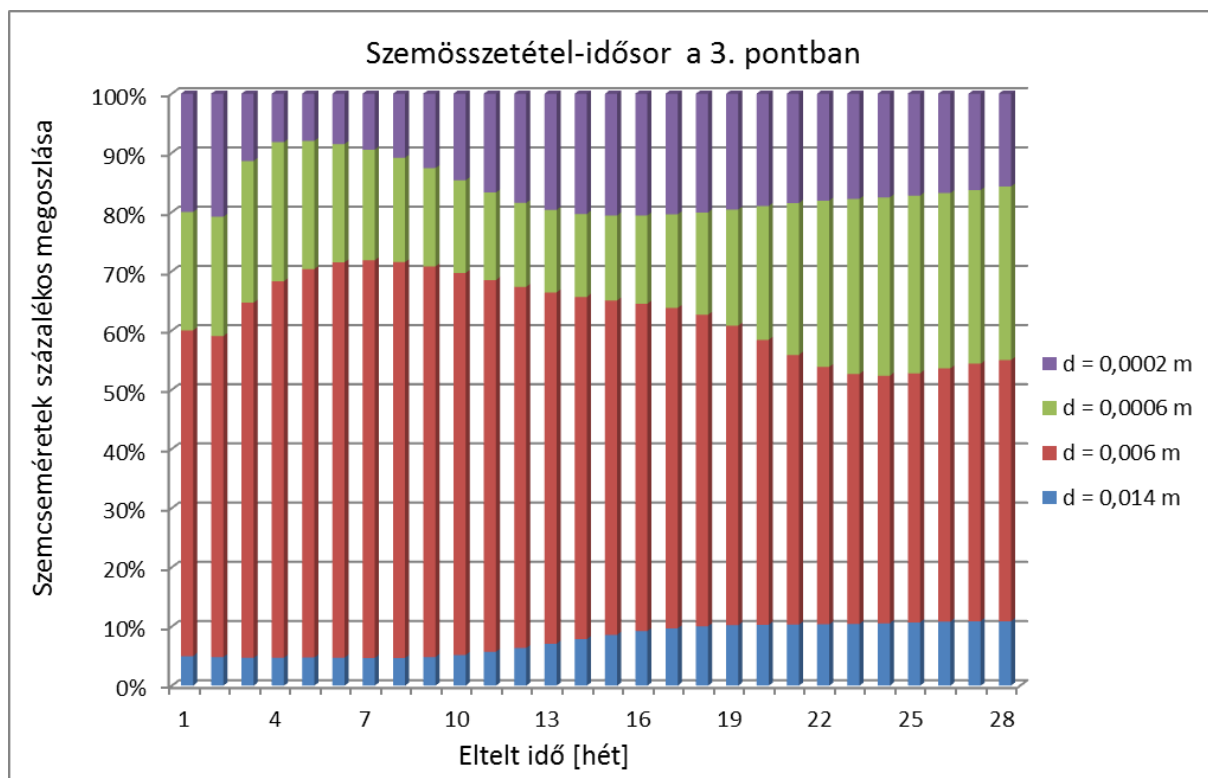
Ez azzal magyarázható, hogy az áramlás a nagyobb frakciókat is elragadja, így a kezdeti eloszlású passzív réteg kerül a felszínre.



67. ábra - A frakciók százalékos megoszlásának időszora a 2. pontban

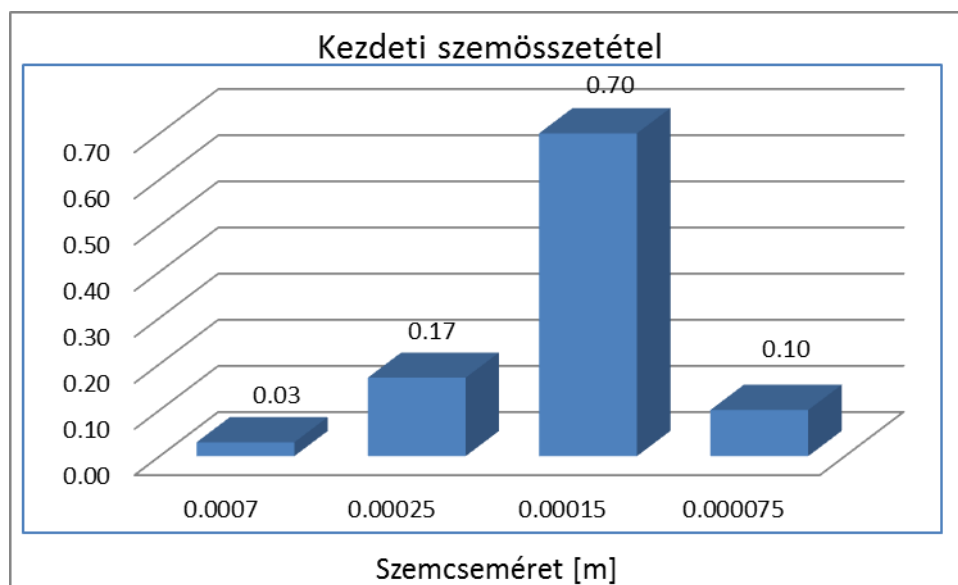
A 2. pont szemcseméretei százalékos megoszlásának idősorát mutatja a 67. ábra. A kezdeti és a végső állapot között jelentős különbség látható. A vártak szerint a legfinomabb frakció közel 80%-ra dúsult fel. Feltételezem, hogy a második legfinomabb frakció lerakódása is végbement, de jóval kisebb mértékben, mint a legfinomabbé. A legdurvább szemcsék arányának csökkenése sem azok elragadásával magyarázható, hanem a homok jelentős feldúsulásával.

A 68. ábra a 3., sodorvonalbeli pont szemcsesarány-idősorát mutatja. Látható, hogy az egyes frakciók idősorai nagyon változatosan alakulnak. Kezdetben a legfinomabb frakciók kimosódása látható. Ez a tendencia azonban az 5. hét alatt megfordul és a szemcsék aránya nőni kezd. Ekkorra érik el ugyanis a felvízről kimosódott szemcsék a vizsgált pontot. Egészen a 15. hétig a legfinomabb frakció feldúsulása látható, majd újra csökkenésbe kezd. Ez azzal magyarázható, hogy a 15. héttől a felsőbb szakaszon a mederfenék finom frakciójának kimosódása javarészt már lezajlott, ezért a vizsgált pontba érkező hordalék mennyisége lecsökken. A legdurvább szemcsék aránya ettől az időpillanattól kezd el növekedni, ami feltehetőleg nem jelenti ennek a frakciónak a helyi mennyiségbeli növekedését is.



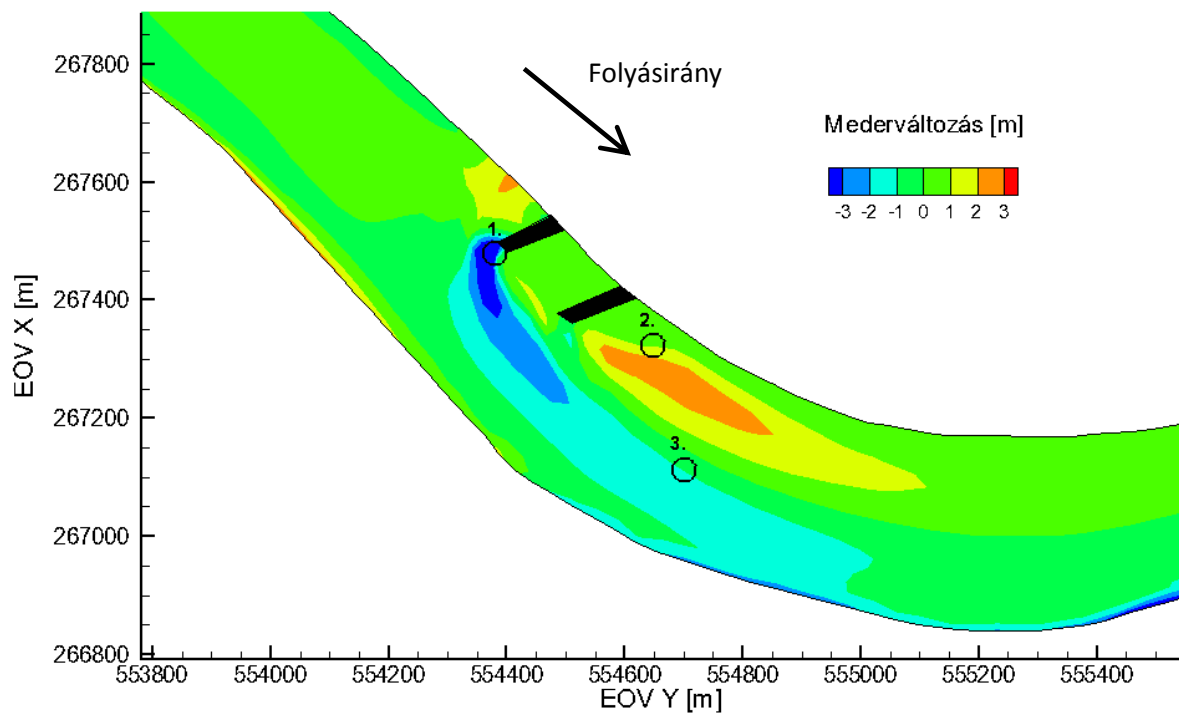
68. ábra - A frakciók százalékos megoszlásának időszora a 3. pontban

Ugyanezekben a pontokban megvizsgáltam, hogy hogyan alakulnak az egyes frakciók százalékos megoszlásának időszorai, ha a kezdeti mederanyag jóval finomabb összetételű. A kezdeti szemösszetételt (69. ábra) a 7. ábra alapján határoztam meg. Látható, hogy a legnagyobb szemcse sem éri el az 1 mm-t.

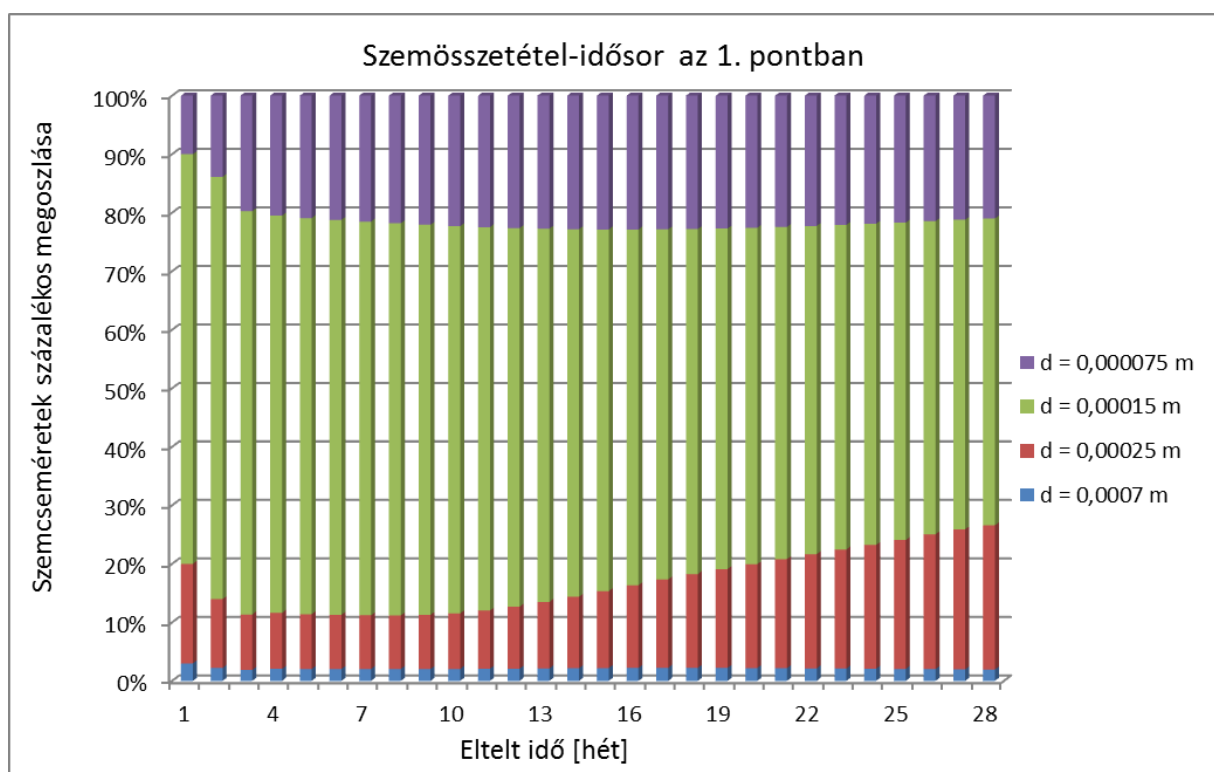


69. ábra - Kezdeti szemösszetétel

A vizsgált pontokat az következőkben bemutatott mederváltozás-ábra ismerteti. A pontok megegyeznek az előző szemösszetétel idősor vizsgálat pontjaival.



70. ábra - A mederváltozás ábrája és a szemösszetétel változásának vizsgálatára kiválasztott 3 pont



71. ábra - A frakciók százalékos megoszlásának időszora az 1. pontban

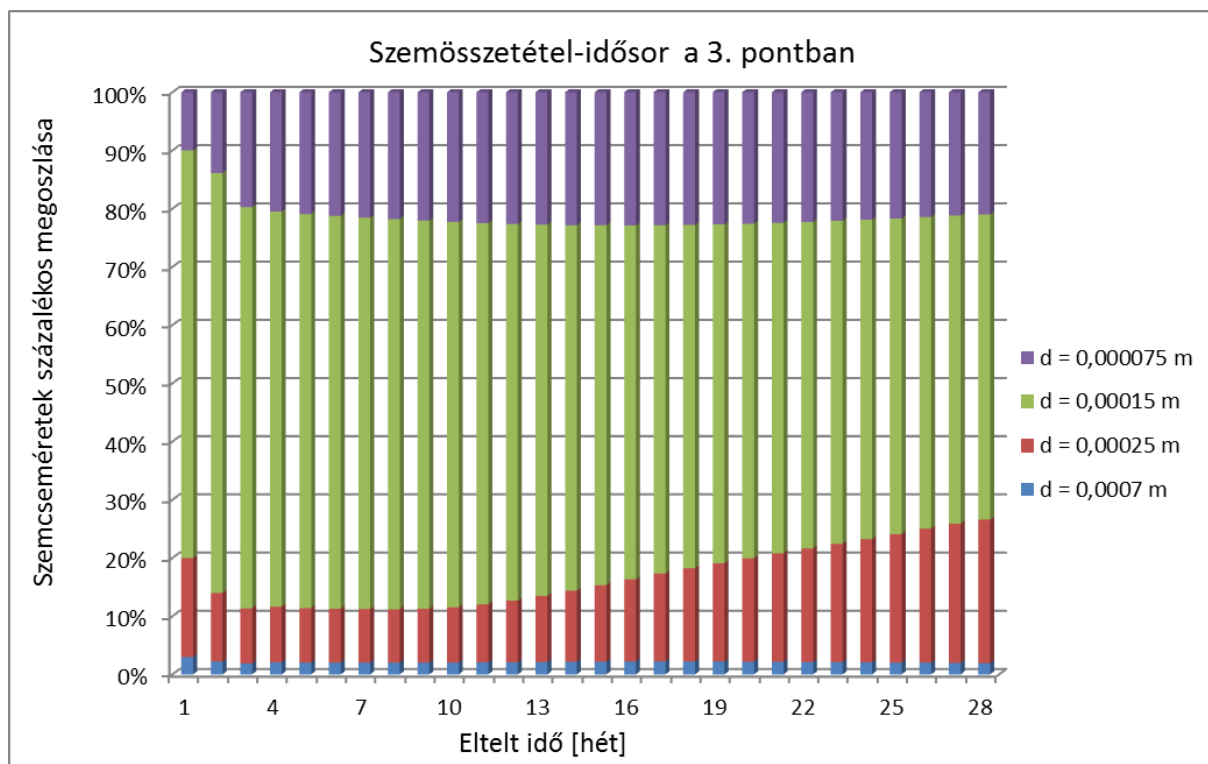
A sarkantyú fejénél lévő 1. pontot vizsgálva azt láthatjuk, hogy a végső állapotban a legkisebb méretű szemcse frakciója a kezdeti állapothoz képest nagyobb arányú, közel állandó értéket vett fel. A pirossal jelölt második legnagyobb szemcsék aránya viszont a kezdeti csökkenés után közel lineáris

növekedést mutat. Ez azzal magyarázható, hogy a felső szakaszból egyre kevesebb finom hordalék érkezik a vizsgált pontba.



72. ábra - A frakciók százalékos megoszlásának idősor a 2. pontban

A sarkantyú mögötti pont idősorai azt mutatják, hogy a legfinomabb frakció aránya fokozatosan nő, a másik háromé pedig csökken. Ez arra utal, hogy ezen a területen a legfinomabb frakció lerakódása zajlik, miközben a szemcsék elragadása nem számottevő.



73. ábra – A frakciók százalékos megoszlásának időszora a 3. pontban

A sodorvonalbeli pontban a sarkantyú fejénél tapasztaltakhoz hasonló jelleget öltenek az idősorok. A legfinomabb frakció egy közel állandó szintre állt be, a második legdurvább szemcsefrakció aránya pedig a 9. héttől kezdve fokozatosan nő az felső szakaszból érkező egyre kevesebb mennyiségű finomabb hordalék miatt.

6 Összefoglalás. Következtetések

A vízfolyások mederszelvényeiben a szállított hordalék kiülepedése és a mederanyag elragadása a medergeometria megváltozását okozza. Mivel a meder alakulása társadalmi, gazdasági és környezetvédelmi érdekeket is érint, megbízható becslése a vízepítési ágazat egy aktuális, de egyelőre még messze nem megoldott feladata. TDK kutatásomban a Duna magyarországi felső viszonyaira jellemző, vegyes szemösszetételű hordaléktranszport numerikus modellezési lehetőségeit vizsgáltam.

A dolgozat elején ismertetem a vegyes szemösszetételű folyómedrekben kialakuló jellegzetes folyamatokat, elsősorban a *mederpáncélozódásra* fókuszálva. A jelenség megértésénél és bemutatásánál főleg Dr. Rákóczi László laboratóriumi és terepi méréseken alapuló szakirodalmi cikkeire és az általa személyes konzultációkon elmondottakra támaszkodom. Kitérek a mederpáncélozódás folyamatának összetettségére és a kialakulásának fázisaira utaló jelenségekre.

Ezután térek rá a vegyes szemösszetételű hordaléktranszport numerikus modellezésének témakörére. Kutatásom során a SSIIIM nevű norvég fejlesztésű áramlási- és hordaléktranszport-modellt alkalmaztam és módosítottam. Ismertetem az áramlási- és hordaléktranszport-modelljének az alapegyenleteit és működését. Rámutatok arra, hogy van Rijn görgetett hordalékhozamot becslő eljárását csak fenntartásokkal alkalmazhatjuk vegyes szemösszetételű medrek esetén, hiszen azt homogén szemösszetételű medrek vizsgálatára dolgozták ki. Bemutatom továbbá a Wu-féle hordaléktranszport-modellt, amit már vegyes szemösszetételre fejlesztettek ki.

Peter L. Wilcock és Joanna C. Crowe 2003-ban publikált hordaléktranszport-modellje laboratóriumi méréseken és korábbi hordaléktranszport-modellek koncepcióin alapszik. A vegyes szemösszetételű mederre kidolgozott empirikus formuláról – a kapcsolódó cikkben ismertetett részletes mérések és elméleti háttér megismerése után – azt feltételeztem, hogy hozzájárulhat a hordaléktranszport numerikus modellezésének fejlődéséhez. Ezért az alkalmazott modell görgetett hordaléktranszport-moduljába C nyelven kódoltam Wilcock és Crowe modelljét.

Végül az utolsó fejezetben mutattam be a beprogramozott hordalékmodell tesztelését. A teszteléssel megmutattam, hogy Wilcock és Crowe hordaléktranszportja a természetben tapasztalható jelenségekkel összeegyeztethető eredményeket ad. Először egy Duna léptékű, 1400 m hosszú, sarkantyút magában foglaló tesztcsatornában kapott modelleredményeket ismertettem. A tesztcsatornára különféle árhullámokat engedtem rá. Az eredmények kiértékeléséhez a sarkantyú fejénél, a sarkantyú mögött és a sodorvonal egy-egy pontjából mederváltozás- és kavicsarány-idősorokat jelenítettem meg. Azokat elemezve egyértelmű, *mederpáncélozódásra* utaló jeleget mutattam ki. Alátámasztottam, hogy a kialakult páncél ellenálló képessége függ az árhullám előtti vízhozamtól, valamint hogy a gyorsabban felfutó árhullám már alacsonyabb vízhozamnál felszakítja a mederpáncélt. Ebből arra következtettem, hogy pl. a vízlépcsők alvívénél tapasztalható medermélyülést nemcsak a vízfolyás lecsökkent hordaléktartalma okozza, hanem a tározók hirtelen nyitása révén meginduló, meredek felfutású árhullámok is.

A fejlesztett hordaléktranszport-modell numerikus vizsgálata a témával foglalkozó nemzetközi irodalom tükrében is újszerű eredménynek tekinthető, bár a hazai folyószakaszok megbízható morfordinamikai vizsgálatához nélkülözhetetlen lesz részletes terepi mérések végrehajtása a modell

megfelelő paraméterezése és validálása céljából. A fejlesztések fontos szerepet játszhatnak majd mind ún. szabad folyású, mind szabályozott, esetleg belépcsőzött folyószakaszok részletes áramlási és morfológiai vizsgálatában, továbbá nagyban hozzájárulhatnak folyami élőhely-vizsgálatokhoz is.

7 Előrettekintés

Mivel hazai szinten ez az első tanulmány, ami a mederpáncélozódási folyamatok numerikus modellezéssel való leképezésével foglalkozik, számos további vizsgálat szükséges és célszerű a modell megbízható alkalmazásához.

A közeljövőben, részletes mérési adatok hiányában szükségesnek tartom a modell érzékenységvizsgálatának végrehajtását numerikus és fizikai paraméterekre egyaránt. Ilyen paraméterek lehetnek: modellbeli számítási időlépés, rácsháló-felbontás, tapasztalati konstansok a hordaléktranszport-modellben, hordalékfrakciók száma, aktív réteg vastagsága, meder érdesség számítása, stb.

Szükségesnek tartom továbbá a nempermanens áramlási szituációk szerteágazóbb vizsgálatát; különböző tartósságú, tetőző vízhozamú, dinamikájú, esetleg több egymást követő árhullám hatásának elemzését.

A modell későbbi megbízható alkalmazásához fontosnak tartom célirányos terepi mérések végrehajtását. Ehhez jó lehetőséget adhat egy már futó magyar-szlovák közös projekt, melyben a Duna és Garam folyók találkozásának környéke lett kijelölve részletesebb vizsgálatra.

A modellparaméterezéshez a mederanyag alapos ismerete elkerülhetetlen, így nagyszámú medermintára van szükség. Emellett a görgetett hordalék mintavételezése is szükséges, habár a számba vehető mérési eljárások maguk már jelentős bizonytalanságot tartalmaznak.

Végül, nagyban hozzájárulna a modell ellenőrzéséhez árhullámok mederátrendező hatásának ismerete, emiatt a minél nagyobb számú medermorfológiai felmérést is fontosnak ítélem meg.

8 Jelölések

Γ_T	a turbulens diffúziós együttható [m^2/s]	C_μ	dimenziómentes állandó, $C_\mu = 0,09$ [-]
γ	a víz fajsúlya [N/m^3]	d	a szemcse átmérője [m]
γ_s	a hordalék fajsúlya [N/m^3]	D	az elragadó erő [N]
η_i	a teljes leárnnyékolási és kitettségi faktor [-]	D_{50}	a szemeloszlási görbe 50%-hoz tartozó szemcseátmérő [m]
θ_c	a homogén, d_i átmérőjű mederanyag szemcséjének dimenziómentes kritikus csúsztatófeszültsége	D_i	az i -dik frakció szemcseátmérője [m]
ϕ_{bi}	az i -dik frakció dimenziómentes hordalékhozama [-]	D_{sm}	a keverék átlagos szemcseátmérője [m]
δ_{ij}	a Kronecker delta ($\delta_{ij} = 1$, ha $i = j$, egyébként $\delta_{ij} = 0$)	F	a súrlódás [N]
ε	a turbulens kinetikai energia disszipációja [m^2/s^2]	F_i	az i -dik frakció részaránya a mederanyagban [-]
κ	a Kármán féle állandó $\kappa = 0,4$ [-]	F_s	a homok részaránya a mederanyagban [-]
ν	a víz kinematikus viszkozitása [m^2/s]	g	a nehézségi gyorsulás [m/s^2]
ν_T	a turbulens örvény viszkozitás [m^2/s]	G	a szemcse súlya [N]
ρ	a víz sűrűsége, $\rho = 1000$ [kg/m^3]	k	a turbulens kinetikus energia [m^2/s^2]
ρ_s	a hordalék sűrűsége, $\rho_s = 2650$ [kg/m^3]	k_s	a mederanyag átmérője [m]
ρ_s	a hordalék sűrűsége [kg/m^3]	L	a felhajtóerő [N]
ρ_w	a víz sűrűsége [kg/m^3]	m	egy exponenciális empirikus paraméter [-]
σ_k	modell konstans, $\sigma_k = 1,0$ [-]	N	a mederanyag frakciószáma [-]
σ_ε	modell konstans, $\sigma_\varepsilon = 1,3$ [-]	n	a hidradinamikai modellben kalibrált Manning-féle érdességi együttható [$\text{s}/\text{m}^{1/3}$]
τ	a csúsztatófeszültség [N/m^2]	n'	az i -dik szemcse érdességének megfelelő Manning-féle érdességi együttható [$\text{s}/\text{m}^{1/3}$]
τ^*	a dimenziómentes csúsztatófeszültség [-]	P	a nyomás [Pa]
τ_b	a szemcse érdessége okozta fenékcúsztató feszültség [N/m^2]	p_{bj}	annak a valószínűsége, hogy d_i szemcse közvetlenül d_j szemcse előtt van [-]
τ_{ci}	a d_i átmérőjű szemcse kritikus csúsztatófeszültsége [N/m^2]	p_{hi}	a leárnnyékolási valószínűség [-]
τ_{ri}	az i -dik frakció referencia fenékcúsztató feszültsége (fizikai értelemben $\tau_{ri} = \tau_c$) [N/m^2]	$p_{hi,j}$	d_j szemcse leárnnyékolási valószínűsége [-]
τ_{rm}	az átlagos szemcseméret referencia fenékcúsztató feszültsége [N/m^2]	P_k	a turbulencia produktuma
τ_{rsm}^*	a keverék átlagos szemcseátmérőjének dimenziómentes csúsztatófeszültsége [-]	p_{si}	a kitettségi valószínűség [-]
W_i^*	az i -dik frakció dimenziómentes hordalékhozama [-]	$p_{si,j}$	d_j szemcse kitettségi valószínűsége [-]
		Q	vízhozam [m^3/s]
		q_{bi}	az i -dik frakció egységnyi szélességre vett hordalékhozama [$\text{kg}/\text{s}/\text{m}$]
a	az érdesség magasság [m]	S	a forrástag (a mederfenékről elragadott hordalék dimenziómentes koncentrációjának időbeli gradiense) [$1/\text{s}$]
b	egy exponenciális empirikus paraméter, $b = 0,12$ [-]	s	a hordalék és víz sűrűségének aránya, $s = 2,65$ [-]
c	a koncentráció [kg/m^3]	S_c	a Schmidt szám [-]
C_{bed}	a mederfenék közeli egyensúlyi koncentráció [kg/m^3]	t	az időlépés [sec]
$C_{\varepsilon 1}$	dimenziómentes állandó, $C_{\varepsilon 1} = 1,44$ [-]	U	az időátlagolt sebesség [m/s]
$C_{\varepsilon 2}$	dimenziómentes állandó, $C_{\varepsilon 2} = 1,92$ [-]	u	a pillanatnyi sebesség [m/s]
		u^*	a fenékcúsztató feszültség [m/s]
		w	az ülepedési sebesség [m/s]
		x	a térlépés [m]
		y	a faltól (mederfelszíntől) mért távolság [m]

9 Irodalomjegyzék

- Baranya S. (2005): A Duna Szap-Gönyü közötti szakaszának áramlástan vizsgálat terepi mérésekkel és numerikus áramlásmódel, Ipari Nyílt Nap, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Budapest.
- Baranya S. (2009): Three-dimensional analysis of river hydrodynamics and morphology. Doktori értekezés, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Budapest.
- Baranya S., Józsa J. (2009): Morphological modelling of a sandbed reach in the Hungarian Danube. In: Proc. XXXIII. IAHR Congress. Vancouver, Kanada, 2009.08.09-14. pp. 3680-3687.
- Fischer-Antze, T. (2005): Assessing river bed changes by morphological and numerical analysis, Ph.D. thesis, TU Wien.
- Hanczár G. (2009): A Mosoni-Duna torkolati kialakításának térbeli hidrodinamikai vizsgálata, TDK dolgozat, BME Építőmérnöki Kar, Budapest.
- Google Earth: earth.google.com/
- Olsen, N. R. B. (2009a): A three-dimensional numerical model for simulation of sediment movements in water intakes with moving option. User's Manual, Department of Hydraulic and Environmental Engineering, The Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norway.
- Olsen, N. R. B. (2009b): Numerical Modelling and Hydraulics, Department of Hydraulic and Environmental Engineering, The Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norway.
- Rákóczi L. (1979): Mederanyag minták információtartalma és hasznosítása a folyószabályozásban. A Magyar Hidrológiai Társaság országos vándorgyűlése, 1979, Keszthely.
- Rákóczi L. (1981): A mederpáncélozódás kutatása a folyószabályozás szolgálatában, VITUKI közlemények 30.
- Rákóczi L. (1988): Szelektív erózió: A mederalakulás numerikus modellezésének egyik kulcskérdés Vízügyi közlemények, 70. évf. 1. sz., pp. 69-82.
- Rákóczi L. (1975): Vegyes szemcseösszetételű hordalék kritikus sebességének meghatározása I. és II. Hidrológiai Közöny, 55. évf., 11. sz., pp. 481-486; 12. sz., pp. 542-550.
- van Rijn, L. (1984): Sediment transport part II: Suspended load transport. *Journal of Hydraulic Engineering*, 110(11):1613–1641.

- Wilcock, P. R., and Crowe, J. C. (2003): Surface-based Transport Model for Mixed Size Sediment, *Journal of Hydraulic Engineering*, 129, 120 (2003); doi:10.1061/(ASCE)0733-9429(2003)129:2(120).
- WU, W., WANG, S. S.Y. and JIA, Y (2000): Nonuniform sediment transport in alluvial rivers, National Center for Computational Hydroscience and Engineering School of Engineering, University of Mississippi, MS 38677, USA.

Köszönetnyilvánítás

Ezúton szeretném megköszönni témavezetőmnek, Dr. Baranya Sándornak a TDK kutatásom szakmai vezetését. Hálával tartozom neki, amiért szakmai fejlődésemet nagymértékben elősegítette. Külföldi tartózkodása ellenére, időt és energiát nem sajnálva teremtett lehetőséget a virtuális konzultációkra, így kérdéseimmel folyamatosan fordulhattam felé.

Köszönöm Dr. Rákóczi Lászlónak a konzultációk lehetőségét. Megtisztelő, hogy a hazai folyami hordalékmozgás kutatás úttörőjétől személyesen kaptam betekintést a témába.

Köszönetemet fejezem ki továbbá Dr. Józsa Jánosnak közreműködéséért.