A DUNA MEDRÉNEK ÉS PARTFALÁNAK ÁLLAPOTA

Aláírólap

A Duna medrének és partfalának állapota című szakterületi programot a *VITUKI Nonprofit Kft. Hidrológiai Intézet és Hidraulikai Intézet* projektben résztvevő szervezetei, majd a *VITUKI Hungary Kft*., valamint a *Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Vízi Közmű és Környezetmérnöki Tanszéke* dolgozta ki.

Közreműködő szakértők:

Szervezeti egység	*Név*	*Beosztás*	*Aláírás*
VITUKI Nonprofit Kft.			
Hidrológiai Intézet	Szél Sándor	*Intézetvezető, tudományos főmunkatárs*	
Hidraulikai Intézet	Pfenninberger Ákos	*tudományos főmunkatárs*	
	Sass Jenő	*tudományos főmunkatárs*	
	Kalina György		
VITUKI Hungary Kft.			
	Szél Sándor	*ügyvezető, tudományos főmunkatárs*	
	Pfenninberger Ákos	*tudományos főmunkatárs*	
	Kalina György	*tudományos munkatárs*	
	Kránicz Gábor	*tudományos segédmunkatárs*	
Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem			
Vízi Közmű és Környezetmérnöki Tanszék	Dr. Somlyódy László	*egyetemi tanár, az MTA rendes tagja*	
	Dr. Koncsos László	*egyetemi tanár, tanszékvezető*	
	Karches Tamás	*doktorjelölt, tudományos segédmunkatárs*	
	Kardos Máté	*doktorandusz*	

Tartalomjegyzék

8 A DUNA MEDRÉNEK ÉS PARTFALÁNAK ÁLLAPOTA 11
8.1 A vizsgálat céljának és terjedelmének megalapozása 11
8.1.1 A vizsgálatok célja 11
8.1.2 A vizsgálat terjedelme 11
8.2 A vizsgálati területek lehatárolása 12
8.3 A környezeti jellemzők bemutatása 13
8.4 Jogszabályi háttér 14
8.5 Alapadat források, előírások, szabályozások 14
8.5.1 Alapadatok 14
8.5.2 MVM Lévai Projekt által átadott dokumentációk 15
8.5.3 Szakirodalom 15
8.5.4 Térképek 17
8.5.5 Hivatalos statisztikák, adattárak 17
1.1.1 Szoftverek 17
8.5.6 Szabályzatok, tervek 17
8.5.7 Műszaki előírások 17
8.6 A rendelkezésre álló adatok, információk kritikai feldolgozása, értékelése 17
8.6.1 Az alapadatok forrása 17
8.6.2 A felhasznált alapadatok áttekintése 19
8.7 Lebegtetett hordalék és mederanyag mintavétel 24
8.7.1 Kisvízi lebegtetett hordalékmérés 25
8.7.2 Középvízi lebegtetett hordalék és mederanyag mérés 26
8.7.3 Nagyvízi lebegtetett hordalékmérés 27
8.8 Adatszolgáltatás a BME 2D hidrodinamikai modelljéhez 27
8.8.1 A mérés során alkalmazott mérőeszközök 27
8.8.2 Középvízi sebességeloszlás mérés 28
8.8.3 Középvízi esés mérése 30
8.8.4 Nagyvízi sebességeloszlás mérése 30
8.8.5 Nagyvízi esés mérése 32
8.9 Adatszolgáltatás a BME 3D hidrodinamikai modell kalibrálásához és validálásához 33
8.9.1 Kisvízi sebességeloszlás mérés 33
8.9.2 Középvízi sebességeloszlás mérés 35
8.9.3 Nagyvízi sebességeloszlás mérés 36
8.10 A telephely térségét érintő Duna fejlesztési (hajózási útvonal fejlesztése) elképzeléseinek és azok mederre vonatkozó várható hatásának értékelése 38
8.11 Lagrange-i részecskekísérlet a szennyezőanyag követhetősége érdekében 43
8.11.1 Korábbi mérési eredmények bemutatása 43
8.11.2 A kísérlet elméleti háttere és kivitelezésének módszertana 44
8.11.3 Az elvégzett kísérletek bemutatása, értékelése 46
8.11.4 Eredmények összefoglalása: a kísérleti eredményekből számított diszperziós tényező 49
8.12 Morfológiai modell 52
8.12.1 Az alapadatok áttekintése 52
8.12.2 A rendelkezésre álló módszerek kritikai feldolgozása, értékelése 55
8.12.3 A vizsgálat módszertana 56
8.12.4 Az elvégzett számítások bemutatása, értékelése 57

8.12.5 Az eredmények összefoglalása ... 59

8.13 Kétdimenziós hidrodinamikai modell ... 60

8.13.1 A rendelkezésre álló adatok, információk kritikai feldolgozása, értékelése ... 60
8.13.2 Módszertan ... 61
8.13.3 Az elvégzett számítások ... 63
8.13.4 Az eredmények összefoglalása ... 70

8.14 Transzportszámítások ... 70

8.14.1 A rendelkezésre álló adatok, információk kritikai feldolgozása, értékelése ... 70
8.14.2 A vizsgálat módszertana ... 71
8.14.3 Az elvégzett vizsgálatok bemutatása, értékelése ... 72
8.14.4 Az eredmények összefoglalása ... 74

8.15 A melegvíz visszavezetés Duna mederre és áramlási viszonyokra gyakorolt hosszú távú hatásának elemzése (1528 – 1519 fkm) ... 75

8.15.1 A rendelkezésre álló adatok, információk kritikai feldolgozása, értékelése ... 75
8.15.2 A vizsgálat lépései ... 77
8.15.3 Az elvégzett vizsgálatok bemutatása, értékelése ... 77
8.15.4 A melegvíz bevezetés áramlásra gyakorolt hatása ... 110
8.15.5 A melegvíz-bevezetés mederre gyakorolt hatása ... 119
8.15.6 A különböző léptékű hatások együttes értékelése ... 121

8.16 Az eredmények összefoglalása ... 121

Ábrajegyzék

8.2-1. ábra A vizsgált területek lehatárolása....13
8.6-1. ábra A vízmércék paksi „0" vízszintre redukált éves kisvizekre vonatkozó hossz-szelvénye....22
8.6-2. ábra Dunai vízállás- vízhozam kapcsolata Paksnál....23
8.6-3. ábra A hőtranszportot leíró BME VKKT REWARD modell-rendszer felépítése....24
8.8-1. ábra A középsebesség eloszlása a Paksi Atomerőmű térségében Q = 2700 m³/s....29
8.8-2. ábra A nagyvízi középsebesség eloszlása a Paksi Atomerőmű térségében Q = 5100 m³/s....31
8.8-3. ábra Vízszínesés mérése a Paksi Atomerőmű térségében, Q = 5100 m³/s....32
8.10-1. ábra Tervezett hajóút javító beavatkozások a Paksi Atomerőmű környezetében....39
8.10-2. ábra A Paksi szűkület rendezésének tervezett beavatkozásai (hajózhatóság fejlesztése)....40
8.10-3. ábra Barákai gázló rendezésének tervezett beavatkozásai (hajózhatóság fejlesztése)....41
8.10-4. ábra Hajóút a Barákai gázló környezetében (hajózhatóság fejlesztése)....42
8.10-5. ábra A beavatkozások hatása a Paksi Atomerőmű telephelyének környezetében lévő Duna szakaszon, 1180 m³/s és 524 m³/s esetén (hajózhatóság fejlesztése)....43
8.11-1. ábra: Vízre eresztési helyek....47
8.11-2 ábra: Teniszlabdák az 1E csoport indítása közben....48
8.11-3. ábra: Az úsztatási kísérlet eredményei....48
8.11-4. ábra A diszperziós tényező teljes tartományra becsült értéke a bevezetési hely függvényében....49
8.11-5. ábra A diszperziós tényező mérési szelvények közti szakaszokra becsült értéke a bevezetési hely függvényében....50
8.12-1. ábra A közép- és nagyvízi medermodell készítésekor használt völgyszelvények....54
8.12-2. ábra A G ponthoz tartozó magasság meghatározása a j-edik és a j+1-edik keresztszelvény i-edik pontja ismeretében (forrás: Schäppi et al. 2010.)....55
8.12-3. ábra A 2006-os jelentésben bemutatott morfológiai modell (jobbra) és az alapjául szolgáló keresztszelvények (balra)....56
8.12-4. ábra Medermodell „Topo to Raster" (bal), „Natural Neighbour" (közép) illetve BME VKKT (jobbra) interpolációval....57
8.12-5. ábra különbség az 500 m-enkénti ill. 100 m-enkénti keresztszelvényadatokból számolt terepgrid között....58
8.12-6. ábra Az Uszódi-mellékág a medermodellben a kézi korrigálás előtt és után....59
8.12-7. ábra Kisvízi (balra), középvízi (középen) és nagyvízi (jobbra) medermodell....60
8.13-1. ábra: A hidrodinamikai modell véges differencia sémája....62
8.13-2. ábra Felszíngörbék (hossz-szelvények). Kisvíz, 1. szakasz (balra fent) 6. szakasz (jobbra fent), illetve középvíz (balra lent), végül nagyvíz (jobbra lent)....65
8.13-3. ábra A bevezetés környezetében kialakuló sebességviszonyok (kisvízi helyzet)....66
8.13-4. ábra Keresztszelvényen belüli maximális sebességek hossz-szelvénye....66
8.13-5. ábra Mért és számított normalizált sebességprofilok összehasonlítása....67
8.13-6. ábra Számított sebességeloszlás az 1520. (balra) és az 1449. (jobbra) folyamkilométer szelvényekben....68
8.13-7. ábra Sebességmező a 6. szakaszon. Színskála: sebesség (m/s)....68
8.13-8. ábra Az igazolási számítások eredményei. Jobbra az 1522+000 szelvény sebességeloszlása....69
8.14-1. ábra Hőcsóva kisvízi (balra,) középvízi, illetve nagyvízi (jobbra) helyzet esetén....72
8.14-2. ábra Többlethőmérséklet keresztmetszetenként kisvízi (balra fent), középvízi (jobbra fent), nagyvízi (balra lent) helyzet esetén, illetve nagyvízi helyzet esetén a mellékágban....73
8.14-3. ábra Mért és számított többlethőmérséklet-profilok (Q=1180 m³/s)....74
8.15-1. ábra Egymást követő 20 éves vízállás idősorok tartóssági görbéi, 1951-2010....78
8.15-2. ábra Az egyes vízállások tartósságának változása 1951-2010 között....79
8.15-3. ábra Egymást követő 20 éves vízállás idősorok tartóssági görbéi, 2001-2020 és 2010-2030....80
8.15-4. ábra Az éves vízállás idősorok medián és átlagértékeinek alakulása a Duna paksi szelvényében, 1957-2010....81
8.15-5. ábra Sematikus ábra a rétegek definiálására....82
8.15-6. ábra Az 1D modell főbb meder jellemzői....86
8.15-7. ábra Az eredő feltöltődés számítása....88
8.15-8. ábra Az eredő kimosódás számítása....88
8.15-9. ábra Cella sebességek a görgetett hordalék számításokhoz....90
8.15-10. ábra A referencia időszak budapesti vízhozam adatsora (felső peremfeltétel)....92
8.15-11. ábra Kalibrálás a 2008. január 1 - augusztus 31. időszakra: mért és számított vízállások az 1531.3 fkm szelvényben....92
8.15-12. ábra Kalibrálás a 2008. január 1 - augusztus 31. időszakra: mért és számított vízállások az 1560.6 fkm szelvényben....93
8.15-13. ábra Igazolás a 2009. január 1 - december 31. időszakra: mért és számított vízállások az 1531.3 fkm szelvényben....93

8.15-14. ábra Igazolás a 2009. január 1 - december 31. időszakra: mért és számított vízállások az 1560.6 fkm szelvényben 94
8.15-15. Várható vízszintsüllyedés a paksi mérceszelvényben (m), egyensúlyi hordalékszállítás (negatív érték – feltöltődés).....96
8.15-16. Várható vízszintsüllyedés a paksi mérceszelvényben (m), 0 % egyensúlyi hordalékszállítás 96
8.15-17. Várható vízszintsüllyedés a paksi mérceszelvényben (m), 50 % egyensúlyi hordalékszállítás 97
8.15-18. Várható vízszintsüllyedés a paksi mérceszelvényben (m), 50 % egyensúlyi hordalékszállítás és dunaföldvári mederkotrás mellett.....97
8.15-19. Várható vízszintsüllyedés a paksi mérceszelvényben (m), 50 % egyensúlyi hordalékszállítás és a teljes folyószakasz feltételezett mederkotrása (2 millió m3/év) mellett 98
8.15-20. Várható vízszintsüllyedés a paksi mérceszelvényben (m), 50 % egyensúlyi hordalékszállítás és két különböző szemeloszlás mellett 98
8.15-21. Várható vízszintsüllyedés a paksi mérceszelvényben (m), 50 % egyensúlyi hordalékszállítás és két különböző szemeloszlás mellett 99
8.15-22. Várható vízszintsüllyedés a paksi mérceszelvényben (m), 50 % egyensúlyi hordalékszállítás és két különböző szemeloszlás mellett (2000. – 2009. idősor alapján szimulált) 99
8.15-23. Várható vízszintsüllyedés a paksi mérceszelvényben (m), 100 % egyensúlyi hordalékszállítás mellett 100
8.15-24. Várható vízszintsüllyedés a paksi mérceszelvényben (m), 50 % egyensúlyi hordalékszállítás és kotrás mellett (az összehasonlítás érdekében kék - kotrás nélkül, 7. eset) 100
8.15-25. Várható vízszintsüllyedés a paksi mérceszelvényben (m), 50 % egyensúlyi hordalékszállítás és barákai beavatkozás mellett (kék – kotrással, 9. eset) 101
8.15-26. Várható vízszintsüllyedés a paksi mérceszelvényben (m), 50 % egyensúlyi hordalékszállítás és barákai beavatkozás mellett (kék – kotrás nélkül, 7. eset) 101
8.15-27. Várható vízszintsüllyedés a paksi mérceszelvényben (m), a 7., 9. és 10. esetek összehasonlítása - 50 % egyensúlyi hordalékszállítás (kék – 7., lila – 9. és sárga – 10.) 102
8.15-28. Egyensúlyi lebegőanyag szállítás [kg/s] szemcseméretek szerinti összetétele a vízhozam [m3/s] függvényében (a 2008. évre).....102
8.15-29. Egyensúlyi lebegőanyag szállítás [kg/s] a vízhozam [m3/s] függvényében (a 2008. évre).....103
8.15-30. Egyensúlyi görgetett hordalékszállítás [kg/s] a vízhozam [m3/s] függvényében (a 2008. évre), a 8,20,40 mm-es frakciókból számítva.....104
8.15-31. A referencia időszak (2008) várható vízszintsüllyedései a paksi mérceszelvényben a 11. esetben, tíz év hordalékmozgásainak hatását vizsgálva.....105
8.15-32. A referencia időszak (2008) várható vízszintsüllyedései a 12. forgatókönyv feltételezései mellett (Paks), tíz év hordalékmozgásainak hatását vizsgálva.....105
8.15-33. A referencia időszak (2008) várható vízszintsüllyedései a 13. forgatókönyv feltételezései mellett (Paks), tíz év hordalékmozgásainak hatását vizsgálva.....106
8.15-34. Vízszintsüllyedés: 1,1o és 2o év után (Paks, kék – 1 év, lila 10 év, sárga – 20 év).....106
8.15-35. A legdurvább lebegőanyag frakció előfordulási aránya a vizsgált Duna hossz-szelvényében: 1,5,1o,2o év után.....107
8.15-36. ábra Felszíni sebességeloszlás melegvíz bevezetéssel és anélkül, Q=1400 m³/s.....110
8.15-37. ábra Sebességprofilok melegvíz bevezetéssel és anélkül – 1. szelvény, Q=1400 m3/s 111
8.15-38. ábra Sebességprofilok melegvíz bevezetéssel és anélkül – 2. szelvény, Q=1400 m3/s 111
8.15-39. ábra Sebességprofilok melegvíz bevezetéssel és anélkül – 3. szelvény, Q=1400 m3/s 112
8.15-40. ábra Sebességprofilok melegvíz bevezetéssel és anélkül – 4. szelvény, Q=1400 m3/s 112
8.15-41. ábra Sebességprofilok melegvíz bevezetéssel és anélkül – 5. szelvény, Q=1400 m3/s 113
8.15-42. ábra Sebességprofilok melegvíz bevezetéssel és anélkül – 6. szelvény, Q=1400 m3/s 113
8.15-43. ábra Felszíni sebességeloszlás melegvíz bevezetéssel és anélkül Q=2100 m³/s.....114
8.15-44. ábra Sebességprofilok melegvíz bevezetéssel és anélkül – 1. szelvény, Q=2100 m³/s.....114
8.15-45. ábra Sebességprofilok melegvíz bevezetéssel és anélkül – 2. szelvény, Q=2100 m³/s.....115
8.15-46. ábra Sebességprofilok melegvíz bevezetéssel és anélkül – 3. szelvény, Q=2100 m³/s.....115
8.15-47. ábra Sebességprofilok melegvíz bevezetéssel és anélkül – 4. szelvény, Q=2100 m³/s.....116
8.15-48. ábra Sebességprofilok melegvíz bevezetéssel és anélkül – 5. szelvény, Q=2100 m³/s.....116
8.15-49. ábra Sebességprofilok melegvíz bevezetéssel és anélkül – 6. szelvény, Q=2100 m³/s.....117
8.15-50. ábra Átfolyási vízhozamok megoszlása melegvíz-bevezetéssel (balra) és anélkül (jobbra), Q= 1400 m³/s.....118
8.15-51. ábra Átfolyási vízhozamok megoszlása melegvíz-bevezetéssel (balra) és anélkül (jobbra) Q= 2100 m³/s.....118
8.15-52. ábra Kiülepedési hajlandóság Lagrange-i részecskekísérlettel.....120
8.15-53. ábra Átfolyási vízhozamok megoszlása melegvíz-bevezetéssel (balra) és anélkül (jobbra) Q= 2100 m³/s.....120

Táblázatjegyzék

8.5-1. táblázat A Lévai Projekt által átadott dokumentációk 15
8.7-1. táblázat A paksi vízmércéhez tartozó, jellemző hidrológiai paraméterek 25
8.7-2. táblázat A mintavétel és vízhozam mérés eredménye 2012. május 21-20. 26
8.7-3. táblázat A paksi vízmércéhez tartozó, jellemző hidrológiai paraméterek 26
8.7-4. táblázat A mintavétel és vízhozam mérés eredménye 2012. május 21-20. 26
8.8-1. táblázat A paksi vízmércéhez tartozó, jellemző hidrológiai paraméterek 27
8.8-2. táblázat Középvízi hozam és vízszintesés mérése 2012. március 20. 28
8.8-3. táblázat A vízhozam mérés eredménye 2012. március 20. 30
8.8-4. táblázat Nagyvízi mérés, jellemző hidrológiai paraméterek, 2013. február 6. 30
8.8-5. táblázat Nagyvízi vízhozam mérés eredménye. 2013. február 6. 32
8.9-1. táblázat Napi hidrológiai paraméterek 2012. augusztus 21. 33
8.9-2. táblázat Vízhozam mérés 2012. augusztus 21. 34
8.9-3. táblázat Napi hidrológiai paraméterek 2012. október 30. 34
8.9-4. táblázat Vízhozam mérés: 2012. október 30. 34
8.9-5. táblázat Napi hidrológiai paraméterek 2012. május 31. 35
8.9-6. táblázat Középvízi vízhozam mérés eredménye Q =2400 m3/s, 2012. május 31. 35
8.9-7. táblázat Középvízi mérés, napi hidrológiai paraméterek: 2012. aug. 2. 35
8.9-8. táblázat Középvízi vízhozam mérés eredménye, Q=2300 m^3/s, 2012. aug. 2. 36
8.9-9. táblázat Nagyvízi mérés, napi hidrológiai paraméterek 36
8.9-10. táblázat Nagyvízi mérés, napi hidrológiai paraméterek 36
8.9-11 táblázat Nagyvízi vízhozam mérés eredménye, Q = 5400 m3/s, 2013. jan. 9 37
8.9-12. táblázat Nagyvízi vízhozam mérés eredménye, Q = 5700 m^3/s, 2013. jan. 10. 37
8.11-1. táblázat Indítási és érkezési helyek 46
8.11-2. táblázat Folyamkilométer-szelvények különböző források szerint 46
8.12-1. táblázat Mértékadó árvízszintek 52
8.13-1. táblázat Hidrodinamika futtatások peremei 63
8.13-2. táblázat Simasági tényezők szakaszonként (1.-10. szakasz: kisvízi helyzet) 64
8.14-1. táblázat Korábbi projekt keretében folytatott hőcsóva-mérések (z: meder, v: sebesség, T: hőmérséklet) 70
8.15-1. táblázat A hordalékmodell néhány alap-paramétere 94
8.15-2. táblázat Esetek és forgatókönyvek a Dunára 95
8.15-3. táblázat: Hordalékszállítás-becslések a Dunára 103
8.15-4. táblázat Lebegőanyag hozamok összevetése 103

Rövidítésjegyzék

MVM	Magyar Villamos Művek Zrt.
ERBE	MVM ERBE Zrt.
KHTV	Környezeti hatásvizsgálat
KHT	Környezeti hatástanulmány
OMSz	Országos Meteorológiai Szolgálat
ATOMKI	A Magyar Tudományos Akadémia Atommagkutató Intézete
PA	MVM Paksi Atomerőmű Zrt.
VITUKI	VITUKI Hungary Kft. (2012. szeptember 12. előtt VITUKI Nonprofit Kft.)
BME	Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
HÉSZ	Helyi Építési Szabályzat
MTA	Magyar Tudományos Akadémia
EOV	Egységes Országos Vetület
EU	Európai Unió
VO	Nyilvántartási szelvény

8 A DUNA MEDRÉNEK ÉS PARTFALÁNAK ÁLLAPOTA

8.1 A VIZSGÁLAT CÉLJÁNAK ÉS TERJEDELMÉNEK MEGALAPOZÁSA

8.1.1 A VIZSGÁLATOK CÉLJA

A földtani közeg, felszín alatti és felszíni vízi környezet, mint környezeti elemek jellemzésének célja a telephely és környezetének környezeti állapotát, illetve a későbbi hatásfolyamatokat befolyásoló jellemzőinek meghatározása:

- a fennálló állapot értékeléséhez
- a létesítmény környezeti hatásai értékelésének megalapozásához.

A Duna medrének és partfalának állapota szakterületi alprogram négy másik lévő alprogrammal van kapcsolatban:

- ✓ a földtani közeg bemutatása és jellemzése kapcsolatban
- ✓ felszín alatti vízi környezet bemutatása és jellemzése
- ✓ a telephely és környezetének hidrológiai jellemzése
- ✓ Duna állapotának jellemzése

8.1.2 A VIZSGÁLAT TERJEDELME

- ❖ Az üzemidő hosszabbítás telephely jellemzése során 8 szelvényben végzett vízhozam, vízszint, lebegtetett hordalék és mederanyag minták mérési eredményeinek összegyűjtése, jelentés készítése.
- ❖ A telephely térségét érintő Duna fejlesztési (hajózási útvonal fejlesztése) elképzeléseinek és azok mederre vonatkozó várható hatásának értékelése.
- ❖ Az üzemidő hosszabbítás környezetvédelmi engedélyeztetése során kijelölt 5 felső szelvényben és további 3 szelvényben középvízi, és amennyiben a hidrológiai körülmények lehetővé teszik, nagyvízi tartományban kvázi-permanens állapotnál a vízhozam, középsebesség eloszlások, vízszint meghatározása. A mérési eredmények feldolgozása és értékelése. (Mérés ADCP mérővel)
- ❖ A meglévő 2D hidrodinamikai modell mederadatainak aktualizálásához, a modell Barákai gázlót magában foglaló meghosszabbításához, a meglévő mederfelvétel felhasználásával, a Duna 1528-1519 fkm szakaszán térképek segítségével középvízi és nagyvízi meder készítése.

  Lebegtetett hordalék mintavétele és sebességtér mérése a lebegtetett hordalékhozam meghatározásához a Duna 1528+000 és 1519+000 fkm között, a kijelölt 8 szelvényben, kisvízi, középvízi és nagyvízi állapotban, az első 5 kijelölt szelvényben 13 függélyben, a 3 utolsó szelvényben 3 függélyben.

  Mederanyag mintavétele kisvízi hidraulikai állapotban, a fenti függélyekben.

  A hidrodinamikai és transzport, vagy elkeveredési modell feladatainak elvégzéséhez szükség van sebességmérésekre, hogy a 3D hidrodinamikai modellt kalibrálni és validálni tudják. Két alkalommal a Duna 1528+000 és 1519+000 fkm között 8 szelvényben kisvízi, középvízi és nagyvízi állapotban, ADCP mérő alkalmazásával sebességmérésekre van szükség. Az első (összevonva a *-gal jelölt pontban végzett sebességmérésekkel), 3 vízhozamnál végzett mérési sorozat a modell kalibrálásához, a második, ismételt mérési sorozat a modell validálásához nélkülözhetetlen.
- ❖ Az üzemidő hosszabbítás telephely jellemzési program során a Duna paksi szakaszára kidolgozott kétdimenziós hidrodinamikai modell alkalmazhatóságának vizsgálata. A modell kalibrálása, igazolása mérési adatok alapján. Lehatárolás: Paks felvíz (1528+000 fkm) – (1519+000 fkm)

- Hidrodinamikai modell kalibrációja mérések felhasználásával (kis-, közép- és nagyvízi körülményekre)
- Kapcsolt transzportmodell tesztelése (kis-, közép- és nagyvízi körülményekre)

❖ A melegvíz visszavezetés Duna mederre és áramlási viszonyokra gyakorolt hosszú távú hatásának szimulációs elemzése különös tekintettel a sodorvonal és a felszínesés alakulására. Lehatárolás: Paksi vízmérce (1529+000 fkm) – (1519+000 fkm)

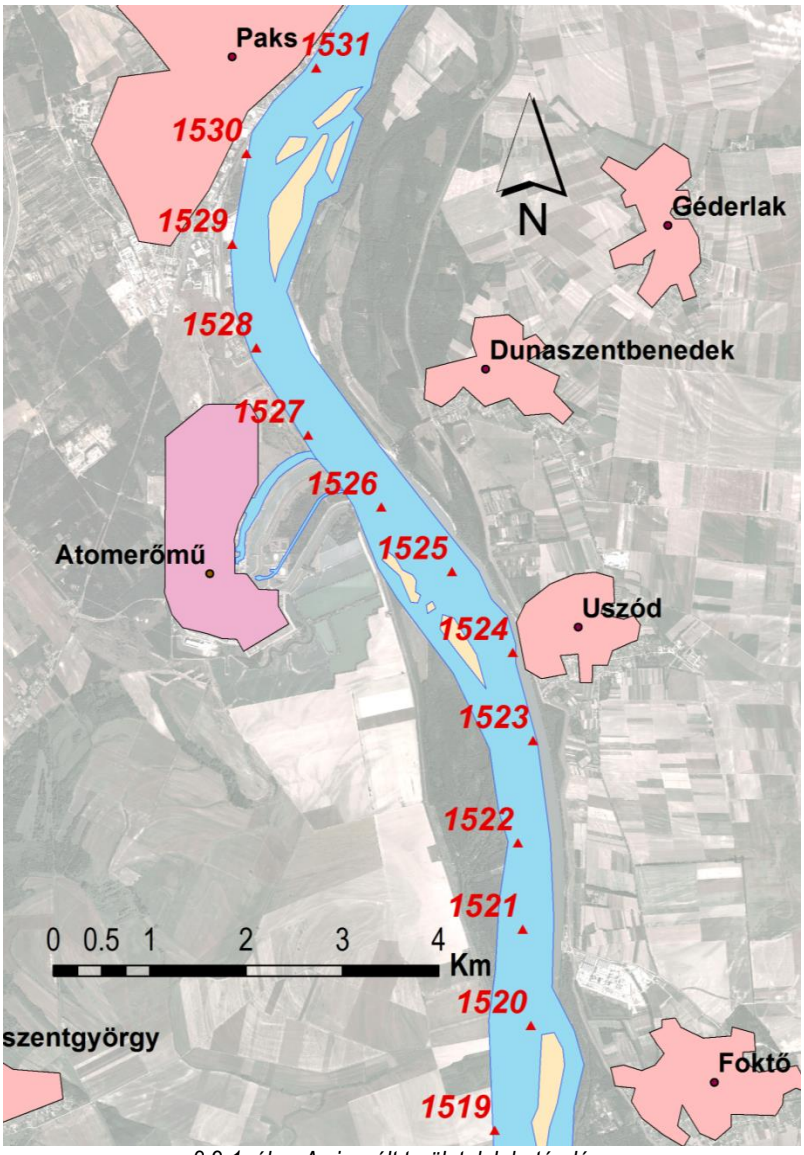
- Kis-, közép- és nagyvízi terepmodell kiterjesztés (1528+000 fkm – 1519+000 fkm)
- Korábbi mederfelmérések feldolgozása. Morfológiai változások térképeinek elemzése. Trend elemzések, prognózisok
- Kvázi-permanens (kis-, közép- és nagy) vizekre 2D-s lokális mederszámítások
- Hidrológiai évek meghatározása és azokhoz tartozó lokális mederváltozások előállítása
- Teljes mederváltozás a trend és a lokális változás összegzése által
- 2D-s modellel sodorvonal és esés számítása

8.2 A VIZSGÁLATI TERÜLETEK LEHATÁROLÁSA

Az adatgyűjtés a 2002-2005 időszak alatt végzett mérésekre vonatkozik.

A Duna hajózhatóságával kapcsolatos értékelés, a paksi térséget érintő, hajózáshoz kapcsolódó folyószabályozás hatására terjed ki, az 1528-1519 fkm közötti szakaszra, a Barákai-gázló térségére vonatkozik.

E szakmai program hidrodinamikai és morfológia szempontból az 1528+000 fkm és 1519+000 fkm közötti Duna szakaszt veszi figyelembe.



8.2-1. ábra A vizsgált területek lehatárolása

8.3 A KÖRNYEZETI JELLEMZŐK BEMUTATÁSA

Hidrológiai szempontból az alábbiak jellemzőek a Duna vizsgált környezetére:

- Nemzetközi vízfolyás
- Lassú elkeveredés
- A kritikusan kis vízhozamok előfordulása nem esik egybe a kritikus (magas) vízhőmérséklettel
- A víz hőmérséklete nyáron elérheti a 25°C-t
- Az átlagos vízhőmérsékletek az elmúlt évtizedekben emelkedő trendet mutatnak
- A felmelegedett hűtővíz hatására a vízhőmérséklet közelítően a Gauss-féle eloszlást követ
- A vízhőmérséklet a bevezetés közelében erős turbulens ingadozást mutat

8.4 JOGSZABÁLYI HÁTTÉR

A Duna meder és partfal állapotának jellemzése vizsgálati programra vonatkozóan *a környezeti hatásvizsgálati és az egységes környezethasználati engedélyezési eljárásról szóló 314/2005. (XII. 25.) Kormányrendelet* az alábbi releváns előírásokat tartalmazza:

6. § (1) A környezeti hatásvizsgálati eljárás a környezeti hatásvizsgálatra kötelezett tevékenységnek

a) a környezeti elemekre (földre, levegőre, vízre, élővilágra, épített környezetre, ez utóbbi részeként a műemlékekre, műemléki területekre és régészeti örökségre is),

b) a környezeti elemek rendszereire, folyamataira, szerkezetére, különösen a tájra, településre, éghajlatra, természeti (ökológiai) rendszerre való hatásainak, továbbá

c) az előbbi hatások következtében az érintett népesség egészségi állapotában, valamint társadalmi, gazdasági helyzetében – különösen életminőségében, területhasználata feltételeiben – várható változásoknak az egyes esetek sajátosságainak figyelembevételével történő meghatározására, valamint a tevékenység ennek alapján történő engedélyezhetőségére terjed ki a 6–16. §-ok rendelkezései szerint.

A környezeti hatásvizsgálatot megalapozó, szakterületi vizsgálati és értékelési programot a 314/2005. (XII.25.) Korm. rendelet mellett az Országhatáron átterjedő környezeti hatások vizsgálatáról szóló Espoo-i Egyezmény (Espoo, Finnország, 1991.), a vonatkozó EU előírások, a releváns és hatályos szakterületi jogszabályok és szabványok figyelembe vételével állítjuk össze és hajtjuk végre.

Európai Uniós joganyagok (Decision, Directive)

2006/44/EK (IX. 6.) Az Európai Parlament és a Tanács Irányelve a halak életének megóvása érdekében védelmet vagy javítást igénylő édesvizek minőségéről

Törvények

1995. évi LIII. törvény a környezet védelmének általános szabályairól

Kormányrendeletek

A környezeti hatásvizsgálati és az egységes környezethasználati engedélyezési eljárásról szóló 314/2005. (XII.25.) Korm. rendelet

A nukleáris létesítmények nukleáris biztonsági követelményeiről és az ezzel összefüggő hatósági tevékenységről szóló 118/2011. (VII. 11.) Korm. rendelet

6/2002. (XI. 5.) KvVM rendelet az ivóvízkivételre használt vagy ivóvízbázisnak kijelölt felszíni víz, valamint a halak életfeltételeinek biztosítására kijelölt felszíni vizek szennyezettségi határértékeiről és azok ellenőrzéséről

8.5 ALAPADAT FORRÁSOK, ELŐÍRÁSOK, SZABÁLYOZÁSOK

A Duna medrének és partfalának jellemzése során az alábbi adatforrásokat vesszük igénybe

8.5.1 ALAPADATOK

A Duna hajózhatóságának javítása tárgyú projektet megalapozó tanulmány, VITUKI 2007

A vizsgált területre vonatkozó kritikus vízszint adatok.

A vizsgált területre vonatkozó mederadatok

8.5.2 MVM LÉVAI PROJEKT ÁLTAL ÁTADOTT DOKUMENTÁCIÓK

Cím	Szerző, kiadó, azonosító, kiadási idő
A Paksi Atomerőmű Üzemidő-hosszabbítása Környezeti Hatástanulmány	ETV-ERŐTERV Rt., 000000K00004ERE/A, 2006. február
A Duna medre és a partfal állapota	VITUKI Kht. 2005. november
A Paksi Atomerőmű Rt. üzemidő hosszabbításával kapcsolatos Részletes Környezeti Hatástanulmány egyes fejezeteinek műszaki tanulmányai 1. A Paksi Atomerőmű Dunára gyakorolt hőterhelő hatásának elemzése és a tanulmány melléklete 2. Az atomerőmű melegvíz kibocsátásainak a dunai vízminőségre gyakorolt hatása 3. A Paksi Atomerőmű hatása a dunai mederváltozásra, illetve az erőmű biztonságos üzemmenete és a hidrológiai problémák összefüggései 4. Vízminőségi monitoring rendszer az EU VKI-nak megfelelő kiépítésben	KARDOS és Társa Mérnöki Iroda Kft., 2005. november
A Paksi Atomerőmű Végleges Biztonsági Jelentése 2. fejezet	Paksi Atomerőmű Rt., 2009.
A globális klímaváltozás prognosztizálható hatásai a Paksi Atomerőmű meghosszabbított üzemi időszakában	BME-Innotech 2010
A Paksi Atomerőmű hőterhelése:A monitorozás és az üzemirányítás fejlesztése	BME VKK 2008
A globális klímaváltozás hatásai a PAE üzemidő hosszabbítására	BME 2010
Összefoglaló a Paksi Atomerőmű vezetése részére a dunai kisvízi medermélyülésről és a vízkivételi mű előtti kisvízszintekről	BME-Innotech 2008
A Duna kisvízi medrének és kisvízszintjének változásai a Paksi Atomerőmű környezetében, a mederkotrás és folyamszabályozás hatásai	BME-Innotech 2010
A Paksi Atomerőmű vízrendszereinek vízgazdálkodási és vízminőségi vizsgálata	BME-Innotech, 2002-2009
A Paksi Atomerőmű Zrt. Önellenőrzési Terve alapján végzett vizsgálatok (felszíni vizekbe történő kibocsátás ellenőrzés, zagytér, kommunális szennyvíztisztító, övcsatorna vízminőségének ellenőrzése	PA Zrt.. 2006-2010 I. félév
A paksi Duna-szakasz mederváltozásának ellenőrzése	VITUKI Zrt. 2003-2009
Jelentés a mederkotrás és folyamszabályozás hatásairól	BME 2010
A paksi Atomerőmű hűtővíz-ellátásának folyamatos biztosítása érdekében a Duna hajózhatóvá tétele nagyprojektjéhez kapcsolódóan IV. munkarész: Kisminta kísérleti vizsgálat	Aquaprofit Műszaki, Tanácsadási és Befektetési Rt.
A Duna hidrológiai változásainak értékelése a Paksi Atomerőmű térségében a 2004-2009 periódusban	BME VKK 2009
Előzetes konzultációs dokumentáció	Pöyry Erőterv Zrt. 6F111121/0002/O, 2012. 01.31.

8.5-1. táblázat A Lévai Projekt által átadott dokumentációk

8.5.3 SZAKIRODALOM

Baranya, S. (2009) Folyószakaszok áramlási és morfológiai viszonyainak térbeli vizsgálata. PhD értekezés, BME

Barákai gázló rendezése, 2009-2011., VITUKI-AQUAPROFIT-TÉR-TEAM-VTK Innosystem cégek alkotta konzorcium

Bogárdi, J. (1971) Vízfolyások hordalékszállítása, Akadémiai Kiadó, Budapest

Bódis Katalin (2008): Digitális domborzatmodellek és alkalmazási lehetőségeik az árvízi kockázatkezelésben – Doktori értekezés – Szegedi Tudományegyetem Természettudományi és Informatikai Kar

Dunai Hajózási és Környezeti Projekt, Megvalósíthatósági Tanulmány, VITUKI, 1995

Fischer H.B. et all: Mixing in Inland and Coastal Waters, Academic Press 1979

Fischer-Antze, T., Olsen, N.R.B. and Gutknecht, D. (2008) Three-dimensional CFD modeling of morphological bed changes in the Danube River, Volume 44, Issue 9, doi:10.1029/2007WR006402

Launder B. E. and Spalding D. B. *Lectures in Mathematical Models of Turbulence*. Academic Press, London, England, 1972

V. Merwade (2002): Development of a methodology for accurate representation of rivers in two and three dimensions. Dissertation Proposal. Presented to the Faculty of the Graduate School of the University of Texas at Austin.

Paksi szűkület rendezése 2009-2011. , VITUKI-AQUAPROFIT-TÉR-TEAM-VTK Innosystem cégek alkotta konzorcium

Van Rijn, L. C. (1984a) Sediment transport, Part 1: Bed load transport. Journal of Hydraulic Engineering, vol. 110, 1431-1456.

Van Rijn, L. C. (1984b) Rijn van, L. C., Sediment transport, Part 2: Suspended sediment transport, Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 110, 1613-1641.

Van Rijn, L. C. (1986) Sedimentation of Dredged Channels by currents and waves. Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, Vol. 112, Issue 5, pp. 541-559.

Rodi W. Turbulence Models and Their Application in Hydraulics IAHR-AIRH, 2000

B. Schäppi, P. Perona, P. Schneider, P. Burlando (2010): Integrating river cross section measurements with digital terrain models for improved flow modelling applications In: Computers & Geosciences, Vol. 36, pp 707–716

Simons T. J. Circulation models of lakes and inland seas, 1980

Somlyódy, L. (1978): Vízfolyásokban végbemenö szennyvízelkeveredés vizsgálata az anyagáramvonal fogalmának bevezetésével. Kandidátusi értekezés (kézirat). MTA, Budapest

Somlyódy, L. (1982): An Approach to the Study of Transverse Mixing in Streams, Journal of Hydraulic Research, Vol. 20, No.2

Somlyódy, L. (1985): A szennyezöanyagok elkeveredésének meghatározása vízfolyásokban Vízügyi Közlemények 1985. év, 2. füzet

Somlyódy, L. and Shanahan, P. (1998) Municipal Wastewater Treatment in Central and Eastern Europe. Present situation and cost-effective development strategies. Report for the Environmental Action Programme for Central and Eastern Europe, The World Bank, Washington D.C.

Somlyódy, L. (2006): A paksi atomerőmű hőterhelése: a monitorozás és az üzemirányítás fejlesztése (Szintézisjelentés 2006, a zárójelentés I. függeléke), BME VKKT, Budapest, 2006. december

Somlyódy, L. (2007): A paksi atomerőmű hőterhelése: a monitorozás és az üzemirányítás fejlesztése (Szintézisjelentés 2007, a zárójelentés II. függeléke), BME VKKT, Budapest, 2007. december

Somlyódy, L. (2008): A paksi atomerőmű hőterhelése: a monitorozás és az üzemirányítás fejlesztése (Zárójelentés), BME VKKT

Thomas HA, Fiering MB (1962) Mathematical synthesis of streamflow sequences for the analysis of river basins by simulation. In: Maass A, Humfschmidt MM, Dorfman R, Thomas Jr HA, Marglin SA, Fair GM (eds) Design of water resource systems. Harvard University Press, Cambridge, Mass. pp. 459-493.

Topolska, J. and Klucovska, J. (1997) River morphology, Gabcikovo part of the hydroelectric power project environmental impact review. p.5.

Di Toro, D. (1984) Probability model of stream quality due to runoff, Journal of Environmental Engineering, Vol. 110. pp. 607-629.

Tritthart, M., Schober, B., Liedermann, M. and Habersack, H. (2010) Numerical modeling of sediment transport in the Danube River: uniform vs. non-uniform formulation, River Flow

Tritthart, M., Schober, B., Liedermann, M. and Habersack, H. (2011) Numerical modelling of sediment transport and morhodynamics in the Danube river, International Conference ont he Status and Future of the World's Large Rivers, 11-14 April 2011, Vienna.

VITUKI (2011) A paksi Duna-szakasz morfológiai változásának előrejelzése matematikai modell fejlesztésével. Zárójelentés

Wu, W.M. (2001), "CCHE2D Sediment Transport Model", Technical Report No. NCCHE-TR-2001-3, National Center for Computational Hydroscience and Engineering, The University of Mississip

Zweimüller, I. (2004) Effects of global change on the hydrology of the Danube, a large European River. Geophysical Research Abstracts, 6. 06186

8.5.4 TÉRKÉPEK

Vízrajzi térképek (Duna Atlaszok)

8.5.5 HIVATALOS STATISZTIKÁK, ADATTÁRAK

VITUKI – Országos Vízrajzi Adattár

Központi Hidrológiai Adattár

8.1.1 SZOFTVEREK

Autodesk – Autocad LT 2000

BME VKKT – REWARD hidrodinamikai és hőtranszport döntéstámogató rendszer

GeneralCOM Mérnöki Kft. – WateRisk DSS

Environmental Systems Research Institute – ArcGIS Desktop 10 SP5

Golden Software Inc – Surfer 9.11

BME VKKT – D2prepare_river

8.5.6 SZABÁLYZATOK, TERVEK

A VITUKI a munkavégzés során az ISO 9001:2009 számú szabvány követelményeire épülő minőségirányítási rendszer ide vonatkozó eljárásait alkalmazza:

- A mintavételezésnél a VITUKI ME-11 „Mintavételezés folyamatszabályozása című minőségirányítási eljárását kell alkalmazni.
- A terepi méréseknél a VITUKI ME-15-2 „Merőeszközök ellenőrzése, kalibrálása”, a VITUKI ME-25 „Helyszíni mérések vizsgálatok elvégzése című minőségirányítási eljárását kell alkalmazni.
- A jelentések készítésénél a VITUKI ME-21 „Tanulmányok, jelentések készítése, megőrzése” című minőségirányítási eljárását kell alkalmazni.

8.5.7 MŰSZAKI ELŐÍRÁSOK

A terepi mérések során a ME-10-231:2009 Vízrajzi mérések végrehajtása gyűjteményben foglalt műszaki eljárásokat fogjuk alkalmazni:

ME-10-231-16:2009 Felszíni vizek vízhozamának mérése szélesség terület alkalmazásával

ME-10-231-17:2009 Felszíni vizek vízhozamának mérése ADCP berendezéssel

ME-10-231-20:2009 Felszíni vizek lebegtetett hordalékának mérése szivattyús mintavevővel

8.6 A RENDELKEZÉSRE ÁLLÓ ADATOK, INFORMÁCIÓK KRITIKAI FELDOLGOZÁSA, ÉRTÉKELÉSE

8.6.1 AZ ALAPADATOK FORRÁSA

Az átadott dokumentumok alapadatokat érintő kérdésekben nagy átfedésben vannak egymással.

A Duna medre és partfal állapota VITUKI Kht. 2002-2005

A jelentésből a 43-54 oldalán található, a különböző dunai szelvényekben felvett mederváltozások ábráit használjuk fel a feladat megoldása során.

A Paksi Atomerőmű Üzemidő-hosszabbítása Környezeti Hatástanulmány ETV-ERŐTERV Rt.,000000K00004ERE/A, 2006. február

A dokumentumból az atomerőmű és legfontosabb tervezési jellemzőit (1. fejezet 7-8. oldal), a vízkivételek módját, mennyiségét (7. fejezet, 7.3.2.1 alfejezet 8-10. oldal) és az 1. mellékletben található helyszínrajzot használjuk fel munkánkhoz.

A Paksi Atomerőmű Rt. üzemidő hosszabbításával kapcsolatos Részletes Környezeti Hatástanulmány egyes fejezeteinek műszaki tanulmányai, *3. A Paksi Atomerőmű hatása a dunai mederváltozásra, illetve az erőmű biztonságos üzemmenete és a hidrológiai problémák összefüggései* (KARDOS és Társa Mérnöki Iroda Kft., 2005. november)

A 8. oldalon a modellépítéshez nélkülözhetetlen vízszinteket tárgyalja az anyag.

A dokumentum leírja a dunai változás folyamatait, a kis vízszintek süllyedését, az erőművi intézkedéseket.

A Duna kisvízi medrének és kisvízszintjeinek változásai a Paksi Atomerőmű környezetében, a mederkotrás és folyamszabályozás hatásai, BME-Innotech 2010. tanulmány.

Ebből a dokumentumból számunkra a Duna vízállás-vízhozam kapcsolatot (9. oldal) használjuk fel.

A Paksi Atomerőmű hőterhelése: a monitorozás és az üzemirányítás fejlesztése, BME VKKT, 2008.

A modellfejlesztésünkhöz alapvetően ezt a dokumentumot használjuk teljes egészében, mely tartalmazza:

- 2D-s hidrodinamikai és hőtranszport modell felépítése, kalibrációja, validációja
- 3D-s modell számítási eredményei
- mérések (Lagrange-i részecskevizsgálat, sebességtér, hőmérséklet mérések)

A paksi Atomerőmű hűtővíz-ellátásának folyamatos biztosítása érdekében a Duna hajózhatóvá tétele nagyprojektjéhez kapcsolódóan IV. munkarész: Kisminta kísérleti vizsgálat, Aquaprofit Műszaki, Tanácsadási és Befektetési Rt.,2007

A tanulmányát felhasználjuk, mert a VO szelvények alapján nézi a medersüllyedést

Előzetes konzultációs dokumentáció, Pöyry Erőterv Zrt. 6F111121/0002/O, 2012. 01.31

Ebből felhasználjuk:

1. fejezet (jelenlegi állapot a telephely térségében) felszíni vizekkel foglalkozó részét (23. oldal),
5. fejezet 25-27.oldal, 29-34. oldalának szöveges értékelését és az 5.2.4.1-1. táblázatot,
6. fejezet 13-15. oldalon található megállapításokat az atomerőmű együttes hatását a felszíni vizekre nézve,
7.5.2-es alfejezet Üzemzavarok és balesetek következményei a felszíni vizekre, mely a 24-27. oldalakon található meg,
9. fejezet Hatásterület, ezen belül a balesetszerű szennyezés hatásterületéről szóló megállapítások (8. oldal)

EKD Háttéranyagok

9. A felszíni és felszín alatti vizek, földtani közeg jellemzése. Hagyományos hulladékkeletkezés vizsgálata

3-24. oldal, ahol a felszíni vizekkel kapcsolatos megállapítások szerepelnek összefoglaló jelleggel, illetve Gauss modellel végzett számításokat mutat be.

18. Olajszennyezés hatásának vizsgálata, vízbevezetések hatásterületének származtatás

E dokumentum is a Gauss modellt veszi alapul és kimutatja, hogy a szennyezések hatásterülete minden esetben 100 m-nél kisebb.

8.6.2 A FELHASZNÁLT ALAPADATOK ÁTTEKINTÉSE

Duna meder és partfal állapota, VITUKI jelentések 2002-2005.

A VITUKI által 2002-2005 között, a Paksi Atomerőmű élettartam és teljesítmény növeléséhez kapcsolódóan végzett vizsgálatok a vízsebesség, a vízhőmérséklet mérésére, a lebegtetett hordalék és mederanyag minták vételére, valamint feldolgozására terjedtek ki.

A vizsgálatok alapvető célja a Dunába vezetett melegvíz csóva elkeveredési folyamatának tisztázása, a csóva dunai térségében a sebességtér, hőmérsékleti mező és a kapcsolódó hidraulikai paraméterek (vízszint, dunai és csóva vízhozam, esés, mederanyag, lebegtetett hordalék) feltárása, és ennek eredményeként adatok szolgáltatása a témában készített 2D hidrodinamika és transzport modell kalibrálásához.

A VITUKI 2004. évi medermérése alapján került sor a morfológiai modell adatainak frissítésére. A mederszelvények összevetése azt mutatta, hogy a két mérés között eltelt 8 évben az 1525+500 fkm-ben lévő keresztgát felett a meder, kismértékű átrendeződés mellett, lényegében nem változott. A keresztgát alatt jellemzően feltöltődés figyelhető meg, a meder szintje 0,5-1 m-t emelkedett. Az áramlás jellegét mutató mélyvonulatok helye és mélysége nem változott.

A vizsgálatok csak a hőcsóva elkeveredési folyamata szempontjából mértékadónak tekintett **kis- és középvízi tartomány**ban folytak. A 13 függélyben, (teljes mederszelvényben) végzett méréseknél határozták meg a vízhozamot, a 6 függélyben végzett mérések a hőcsóva határáig terjedtek ki. A mérések feldolgozása során megadták a függélyekben mért vízsebesség és vízhőmérséklet szelvénybeni eloszlását grafikus és táblázatos formában. A lebegtetett hordalék és mederanyag eloszlását szemeloszlási diagramon szemléltetve ismertették. Az adott időszakban végzett sebességeloszlás mérésekről, mederanyag és lebegtetett hordalék mintavételekről egységes feldolgozásban jelentés készült, melyet a csatolt „osszefogl_jel.docx", „Q1140_sebabr.docx", „Q1140_sebtbl.xlsx", „Q1254_sebtbl.xlsx", „Q1611_sebabr.docx", „Q1611_sebtbl.xlsx", „Q2171_sebabr.docx", „Q2171_sebtbl.xlsx", „Q2752_sebabr.docx", „Q2752_sebtbl.xls", „medervalt_abr.doc", „kisviz.xls", „hidegvizcsat_szelv.xls", „dunameder.xlsx", „lebhord_medera_2001.docx", „lebhord_2001nov.docx", „lebhord_medera_2002.docx" fájlok tartalmazzák.
Az erőmű közvetlen környezetében vizsgált mederváltozások azt mutatták, hogy 1996-2004 közötti időszakban az 1525+500 fkm szelvény felett kismértékű mederátrendeződés, alatta 0,5 m körüli feltöltődés figyelhető meg. A VITUKI 2000-2004. éves időszakban végzett medermérései szerint, az 1987. évi nagyobb kimélyülést követően az összegzett mederváltozás 2000-ig alig módosult. 2000-2003 között jelentős kimélyülést, 2004-ben visszatöltődést figyelhettünk meg. A kisvízi mérések szerint a kisvízi vízhozamok 1400 m^3/s vízhozam alatti tartományban alacsonyabb (~20-40 cm) szinten vonulnak le, mint a korábbi időszakokban. A VITUKI monitor vizsgálatai alapján megállapítható, hogy a kotrások tiltásával a vizsgált 1535-1510 fkm szakaszon a hidegvíz csatorna térségében tekinthető a meder a legstabilabbnak és ebben fontos szerepe van a Barákai gázlónak. Az utolsó időszak mérései alapján medermélyülési, kisvizek szintjének csökkenését jelző tendenciákat figyelhettünk meg, azt azonban csak elkövetkező évek vizsgálatai dönthetik el, hogy ezek a trendek mennyire válnak tartósakká.

A telephely térségét érintő Duna fejlesztési (hajózási útvonal fejlesztése) elképzelések, azok várható hatása a mederre

A dunai hajózhatósághoz kapcsolódó folyószabályozással két rendelkezésünkre bocsátott munkaanyag foglalkozik:

a) Kisminta kísérleti vizsgálat. 2007, Aquaprofit Kft
b) A Duna kisvízi medrének és kisvízszintjének változásai a Paksi Atomerőmű környezetében, a mederkotrás és folyamszabályozás hatásai 2010, BME Innotech Kft

Alapvető forrásanyagként szerepel még „A Duna hajózhatóságának javítása" projekt keretein belül, a VITUKI irányításával készült tanulmány, ami a Duna Dunaföldvár-déli országhatár folyószakasz általános érékelése mellett taglalja a morfológiai viszonyokat, az elvégzett folyószabályozási munkálatokat és azok hatását. Kiemelten foglalkozik a mederváltozásokkal és a kisvizek alakulásával. A tanulmányban a Paksi Atomerőmű dunai térségét érintően, a hajózhatóság javítására kettő szakaszon terveznek folyószabályozási beavatkozást.

A Paksi szűkületben 1530,5-1529,5 fkm folyószakaszon, az 54 VO szelvény környezetében és az 1522-1521,5 fkm szakaszon, a Barákai gázló térségében sarkantyúk beépítésével, meghosszabbításával és kotrással kívánják biztosítani a hajózáshoz előírt medermélységet, annak ellenére, hogy a teljes paksi folyószakasz és a Barákai gázló térsége kotrási tilalom alatt áll.

Kisminta kísérleti vizsgálat. 2007, Aquaprofit Kft

A kisminta kísérlet egy hosszabb, 1530,5-1517,6 fkm közötti, két kanyarulatot tartalmazó folyószakasz szabályozási megoldásait vizsgálja, két beépítési tervváltozat esetén és javaslatot tesz a Barákai gázló közvetlen környezetében a folyószakasz szabályozására.

A jelentés ismerteti a VITUKI kisvízszintekre vonatkozó mérési eredményeit, mely alapján megállapítható, hogy az 1990-2004 közötti időszakban a kisvízszintek csak az atomerőmű térségében nem csökkentek, az 1528 fkm felett és a Barákai gázló alatt vízszintsüllyedés észlelhető. Vizsgálták az 57-53 VO szelvényeiben 1970, 1997, 2003, és 2005. évben végzett mederfelmérések alapján az 1970-2005 közötti mederváltozásokat. Megállapították, hogy az 56 VO kivételével a VO szelvényekben a meder süllyedése figyelhető meg.

Megjegyzendő, a vizsgált időszak alatt végbement mederváltozások több hatást összegeznek. A 70-es 80-as évek elején az 1967-1976 közötti, a Paksi sziget térségében beépített balparti szabályzóművek, valamint a kotrások hatására végbemenő részben tervezett medermélyülést, mederátrendeződést láthatjuk. A szabályozás hatására végbemenő mederváltozások még jelenleg sem zárultak le teljesen. A Barákai gázló felvízi és alvízi környezetében lévő VO szelvényekben a mederváltozások vizsgálatánál jól megfigyelhetjük a sarkantyúkkal történő mederszűkítés hatását. A beépített sarkantyúk hatására a sarkantyúk vonalában mindkét parton megindult a meder átrendeződése és a szűkítés a meder mélyüléshez vezetett. Ezen nem javít a művek számának növelése, mivel nagyobb vízhozamoknál a szabályozáson belüli mederrészek terhelése a sebesség növekedése miatt, az áramlásból kizárt felületek arányában tovább növekszik.

A modellkísérleteket mozgó medrű (homok, danamid őrlemény keverék), torzított méretarányú kismintán végezték.

A modell bearányosítása után az első tervezési változat 380 m-es szabályozási szélesség mellett megvalósított szabályozást vizsgálta.

A második tervváltozat a melegvíz-csatorna kitorkolása utáni szakaszon a folyó stabilabb megvezetésével (sűrűbben elhelyezett szabályzó művekkel), 400 m-es szabályozási szélességű beépítéssel keresett kedvező szabályozási megoldást. A modellvizsgálat mindkét esetben a változatok elvetését javasolta.

A harmadik, a javasolt szabályozási változat a Barákai gázló alvízi és felvízi térségében létesítendő szabályozási változatot taglalta, ahol a szabályozási szélesség 400 m, és a holt terek, az áramlásból kizáródó víztestek leválasztásával valósítja meg a szabályozást, oly módon, hogy a sarkantyúk számát, esetenként a meglévő sarkantyúk hosszát megnövelve stabilizálja az áramlást. A harmadik változat mérései szerint a sarkantyúvégeknél nem alakul ki kimosódás, a korábbi változatokhoz képest a sebességcsúcsok csökkennek.

A modellkísérlet javasolt szabályozási változata a korábbi tervezetekhez képest kedvezőbb áramlási viszonyokat alakít ki, de a hajózás szempontjából kedvező kialakítás következménye a meder szűkítése, duzzasztás, az áramlási sebességek növekedése.

A jelentés esetenként vízszinteket, vízszintváltozásokat számszerűsít, annak ellenére, hogy a kismintával csak a vízszintváltozási tendenciák mutathatók ki.

A Barákai gázló térségében tervezett új szabályozás eredményeként a sarkantyúk meghosszabbítása, a sarkantyúk számának növelése további mederrészeknek a vízszállításból való kizárásához vezetnek.

A jelentés nem taglalja ennek várható következményét: a hajózás szempontjából kedvezőbb állapot kialakulása mellett a mederátrendeződés, a vízsebességek, a medermélységek növekedését, amely a paksi vízkivételre hosszabb távon kedvezőtlen hatású.

A leírtak alapján megállapítható, hogy a Dunaföldvár alatti Duna-szakaszon minden tekintetben alapvető szempont a kisvízszint-süllyedési folyamat megállítása.

Ennek elérése érdekében már több intézkedés történt. Ebből a szempontból jelentős a Duna projekt keretében folyó tervezési-modellezési tevékenység, valamint a Paks környéki Duna-szakaszra elkészült mozgómedrű fizikai modellvizsgálat is. A Barákai gázló helyzete az Atomerőmű biztonságos hűtővíz-ellátása és a Duna hajózhatóságának javítása szempontjából egyaránt fontos kérdést jelent.

A fizikai modellvizsgálat más módszerrel mutatja be a Barákai gázló és az Atomerőmű hűtővíz-ellátásának helyzetét, a lehetséges beavatkozások kisvízszintekre gyakorolt hatását, valamint a Dunába visszavezetett melegvíz jobb elkeveredésének lehetőségeit. A fizikai kisminták modellkísérletei a valóságot leképező módon, bizonyos arányszámok megtartásával alkalmasak a melegvíz elkeveredést vizsgálni.

A paksi Atomerőmű hűtővíz-ellátásának folyamatos biztosítása érdekében a Duna hajózhatóvá tétele nagyprojektjéhez kapcsolódóan IV. munkarész: Kisminta kísérleti vizsgálat, Aquaprofit Műszaki, Tanácsadási és Befektetési Rt.

A munka az 53-59 VO szelvények alapján való vízszintsüllyedést vizsgálta és arra jutott, hogy 1984-1990 között a kisvízszint-csökkenés mérséklődött, a süllyedés az egész szakaszon egyenletes.

1990-2004 között még a redukált vízszintek csak az atomerőmű térségében nem süllyedtek, az 1528 fkm szelvény felett további 10 cm, az 1520-1517 fkm szelvények között további 15-18 cm-es vízszintsüllyedés tapasztalható.

A vizsgált időszakban a mederfenék is süllyedt.

Már 1974-ben nagy mélységeket észleltek az uszódi partbiztosítás alatt az 56 VO szelvényben (1523,728 fkm) és 80 mBf szint alatti fenékvonal volt az 59 VO szelvényben (1517,709 fkm), szintén egy partbiztosítás alatt. 1974-97 között az uszódi partbiztosítás fenékvonala további 80 cm-t süllyedt, de az 59 VO szelvény süllyedése ennél jelentősebb, közel 2 m.

Az 55 VO szelvény mederfenék-süllyedése egyenletes, évi 12-13 cm-re tehető, jelenleg ez a szakasz legmélyebb pontja. Ugyanakkor figyelemre méltó az 57 VO szelvény (1521,831 fkm) süllyedése, ez gyorsuló tendenciát mutat.

A Duna kisvízi medrének és kisvízszintjének változásai a Paksi Atomerőmű környezetében, a mederkotrás és folyamszabályozás hatásai, 2010, BME Innotech Kft.

A tanulmány áttekinti a dunai kisvízi meder, gázlók kialakulását, változását előidéző folyamatokat, elsősorban a német-osztrák szakaszon megépített vízlépcsők hatására, a hordalékviszonyokban bekövetkező változásokat, és a szabályozás érdekében végzett mederkotrások, későbbi időszakban a megnövekedett ipari kotrások hatását.

Megállapítja, hogy a hordalékhozamban beállt jelentős csökkenés miatt a kikotort mederanyag nem pótlódik, a kisvízi meder beágyazódik, mélyül, a kisvizek alacsonyabb szinten vonulnak le. Ismertetik a Paksi Atomerőmű környezetében a vízkivételhez kapcsolódó történéseket és a mederváltozások időbeni szakaszait és a 1983-as évi kritikus vízállást követő intézkedés sorozatot, melyekkel a paksi vízkivétel biztonsága jelentős mértékben javult.

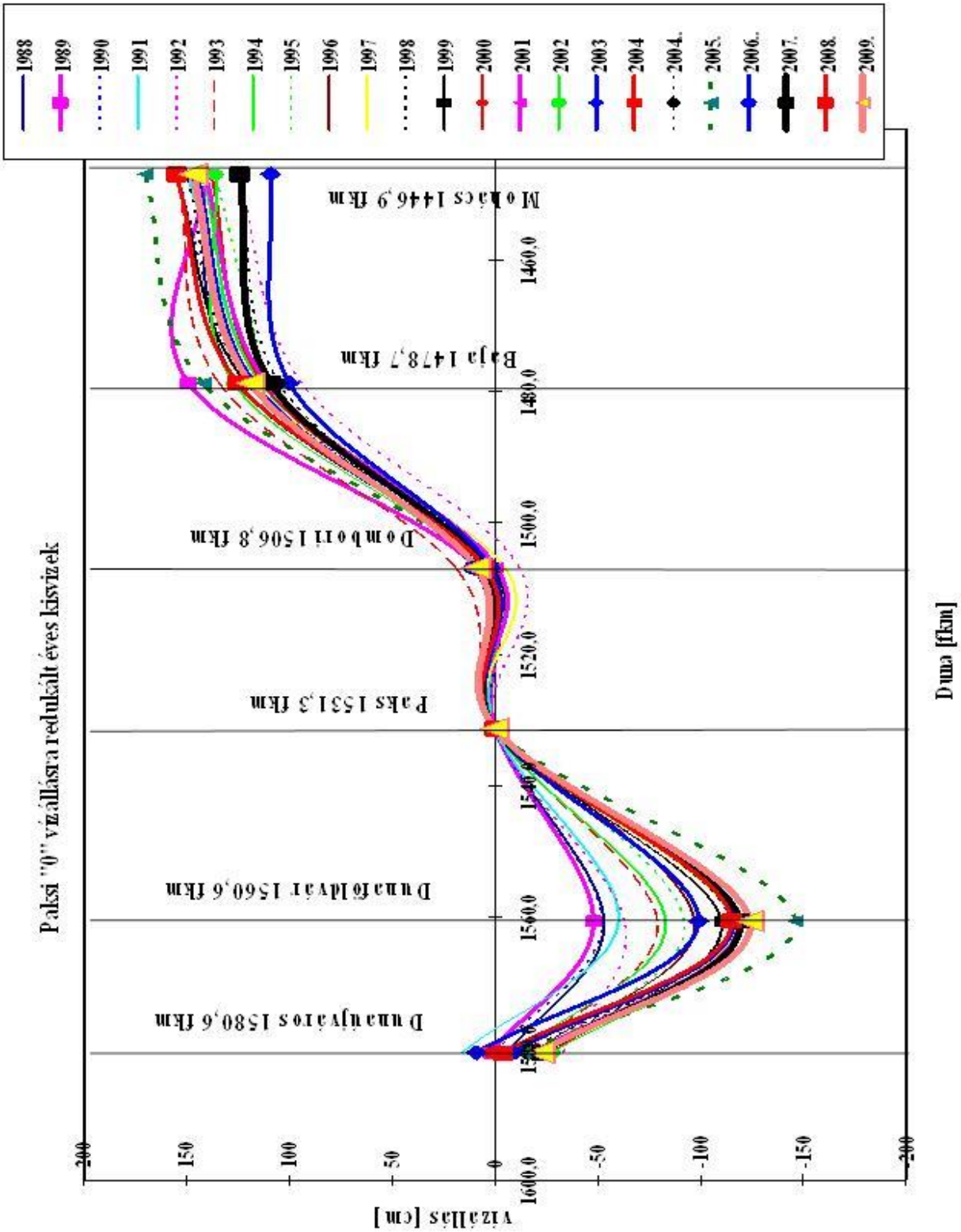
Áttekintve ezen időszakokat, egy hosszabb stabilként jellemezhető időszakasz után, jelentős változást eredményezett a 2003-2004-ben kialakult tartós kisvízi helyzet.

Felhívták a figyelmet a további medermélyülést megállító intézkedések fontosságára és javasolták a medervizsgálatok felvízi irányban történő kiterjesztését.

Az Innotech ellenőrző mérései, vizsgálatai alapján, a Duna mederváltozásainak trendjét szemlélteti a vízmércék paksi „0” vízszintre redukált éves kisvizekre vonatkozó hossz-szelvénye, mely szerint a Paks feletti szakaszon a kisvízi meder mélyül, alatta jellemzően töltődik.

A kisvízszintek paksi „0” szintre redukált süllyedése hasonló tendenciát jelez.

A VITUKI kisvízi Q-H görbéi is ugyanezt mutatják, de a 2003 évi jelentősebb mederváltozás óta az összetartozó Q-H pontok nem utalnak további mélyülésre.



8.6-1. ábra A vízmércék paksi „0” vízszintre redukált éves kisvizekre vonatkozó hossz-szelvénye

A folyómeder általában tapasztalható mélyülésének fő okait a lefolyási viszonyokban bekövetkező változásokban, a hajózás érdekében évtizedek óta végzett kisvízi szabályozásban és a megnövekedett kotrásban látják. Véleményük szerint,

mivel a szabályozás nem vagy nehezen elkerülhető, arra kell törekedni, hogy a beavatkozások ne veszélyeztessék a paksi vízkivétel biztonságát. Javasolják a kotrási tilalom módosítását, oly módon, hogy a paksi kotrási tilalom határát a jelenlegi Ordás-Gerjen folyószakaszról eltolják a paksi felvíz irányába, a Madocsa-Gerjen térségbe, így a kotrási tilalom alatt álló folyószakasz hossza nem növekszik, de a felvízi kotrások tiltása a Paks környezetében is megjelenő medermélyülést lassíthatja, megállíthatja. A tanulmányban részletesen ismertetik a paksi térségben végzett dunai kotrások szabályozása kapcsán született dokumentumokat.

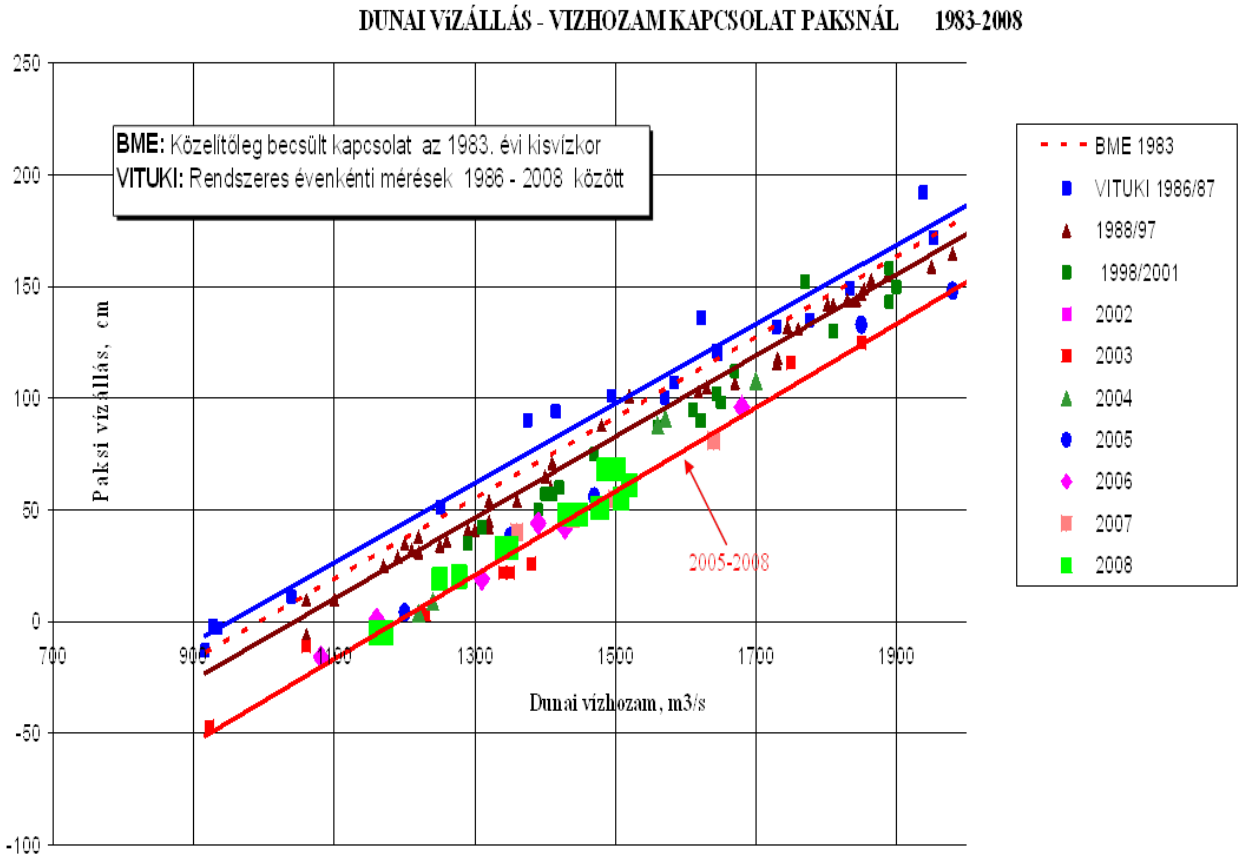
A tanulmány összefoglalóan ismerteti „A Duna hajózhatóságának javítása" című projekt céljait és a hajózást akadályozó gázlók, szűkületek megszüntetésére vonatkozó javaslatait és a tervezett beavatkozásokat.

A tervezett mederkotrásokat a vízbázisok sérülékenysége miatt károsnak tartják.

A tanulmány kifogásolja azt, hogy a hajózhatósági tanulmányban elhanyagolhatónak tekintik a részleges kotrások kisvízszintekre gyakorolt hatását.

A tervezett szabályzások, beavatkozások csak hajózhatóság érdekeit veszik számba, és nincsenek tekintettel az Atomerőmű biztonsági szempontjaira.

A tanulmány alapján a Duna paksi vízállás-vízhozam kapcsolatát az alábbi ábra mutatja:

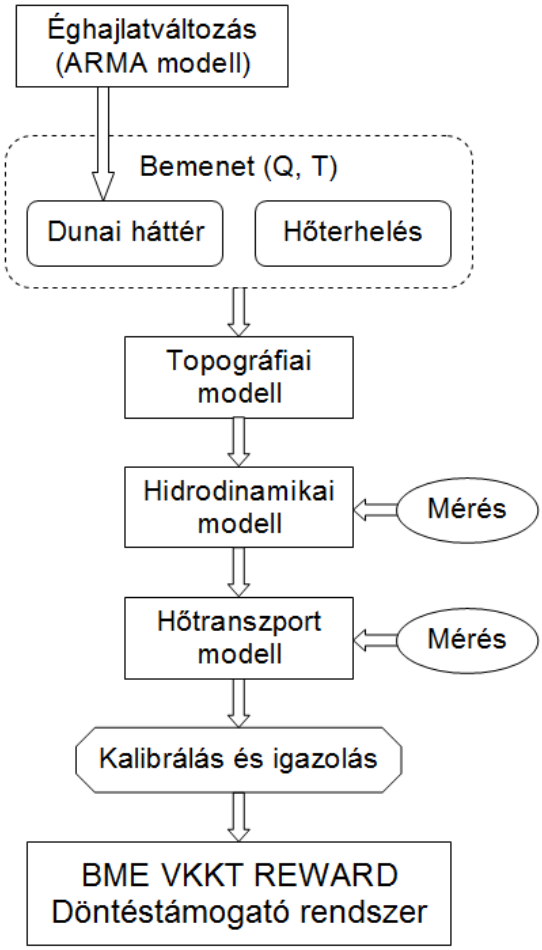


8.6-2. ábra Dunai vízállás- vízhozam kapcsolata Paksnál

A Paksi Atomerőmű hőterhelése: a monitorozás és az üzemirányítás fejlesztése, BME VKKT, 2008.

E tanulmányban bemutattuk a 2D hidrodinamikai és hőtranszport modellt, melyet a mostani munkafázisban ki fogunk terjeszteni.

Összefoglalásképpen a modell-rendszert a következő ábrán láthatjuk:



8.6-3. ábra A hőtranszportot leíró BME VKKT REWARD modell-rendszer felépítése

A paksi Atomerőmű hűtővíz-ellátásának folyamatos biztosítása érdekében a Duna hajózhatóvá tétele nagyprojektjéhez kapcsolódóan IV. munkarész: Kisminta kísérleti vizsgálat, Aquaprofit Műszaki, Tanácsadási és Befektetési Rt.

A munka az 53-59 VO szelvények alapján való vízszintsüllyedést vizsgálta és arra jutott, hogy 1984-1990 között a kisvízszint-csökkenés mérséklődött, a süllyedés az egész szakaszon egyenletes. 1990-2004 között még a redukált vízszintek csak az atomerőmű térségében nem süllyedtek, az 1528 fkm szelvény felett további 10 cm, az 1520-1517 fkm szelvények között további 15-18 cm-es vízszintsüllyedés tapasztalható. A vizsgált időszakban a mederfenék is süllyedt. Már 1974-ben nagy mélységeket észleltek az uszódi partbiztosítás alatt az 56 VO szelvényben (1523,728 fkm) és 80 mBf szint alatti fenékvonal volt az 59 VO szelvényben (1517,709 fkm), szintén egy partbiztosítás alatt. 1974-97 között az uszódi partbiztosítás fenékvonala további 80 cm-t süllyedt, de az 59 VO szelvény süllyedése ennél jelentősebb, közel 2 m.

Az 55 VO szelvény mederfenék-süllyedése egyenletes, évi 12-13 cm-re tehető, jelenleg ez a szakasz legmélyebb pontja. Ugyanakkor figyelemre méltó az 57 VO szelvény (1521,831 fkm) süllyedése, ez gyorsuló tendenciát mutat.

8.7 LEBEGTETETT HORDALÉK ÉS MEDERANYAG MINTAVÉTEL

Lebegtetett hordalék mintavétele 8 korábban kijelölt szelvényben, 3 egymástól eltérő vízállásnál, kisvízi, középvízi, nagyvízi állapotban, a vízhozam és függély középsebességek meghatározásával történik.

A sebességmérést Delphin forgószárnyas sebesség- és iránymérővel végezzük az ME-10-231-14:2009 műszaki előírás figyelembevételével. A lebegtetett hordalék mintavétele az első 5 kijelölt szelvényben 13 függélyben, a 3 utolsó szelvényben 3 függélyben történik. A mintát függélyenként egyesített mintából nyerjük, a mintavétel szivattyús mintavevővel történik az ME-10-231-20:2009 műszaki előírás szerint. A mérési függélyek helyét GPS mérővel határozzuk meg.

Mederanyag mintavétel a kijelölt 8 szelvényben, kisvízi hidraulikai állapotban történik, a minta vételét, harangos mintavevővel végezzük, a mintavételi függélyek száma, a helymeghatározás megegyezik a lebegtetett hordaléknál megjelölttel. A lebegtetett hordalékminták laboratóriumi elemzése azok szárazanyag-tartalmának, azaz a lebegtetett hordalék töménységének, valamint minta-sorozatok szemösszetételének meghatározásával történik. (A hosszú mérési idő miatt a kvázi-permanens állapot nem biztosítható).

A lebegtetett hordalék hozama a hidegvíz csatorna kotrási szükséglete, és a dobszűrök terhelése szempontjából alapadatnak tekinthető. A mederanyag szemösszetételének meghatározása, a szemeloszlási adatok a medermozgások szempontjából kritikus hidraulikai állapotok meghatározásához szükségesek.

8.7.1 KISVÍZI LEBEGTETETT HORDALÉKMÉRÉS

A lebegtetett hordalék, áramlási sebesség kisvízi mérésére 2012. november 27-28. között került sor, enyhén apadó vízszintek mellett. A sebességmérés és mintavétel idején jellemző hidrológia paraméterek:

	Paks		Dombori		
Dátum	h	H	h	H	Q
	[cm]	[mBf]	[cm]	[mBf]	[m3/s]
2012.11.27	37	86.17	63	84.15	1450
2012.11.28	22	86.02	48	84.00	1380

8.7-1. táblázat A paksi vízmércéhez tartozó, jellemző hidrológiai paraméterek

A lebegtetett hordalékminta vételénél a forgószárnyas sebességmérőre szerelt szivattyús mintavevővel függély pontonként 1 l-es mintát vettünk, a mintát gyűjtőtartályba töltöttük, egyben meghatároztuk a mintavételi pontban az áramlási sebességet. Függélyenként 10 pontban végeztünk sebességméréssel egybekötött mintavételt, a szelvényben a függélyek koordinátáit GPS-szel rögzítettük. A kisvízi minták feldolgozása folyamatban van.

A mintákat az FTV Talajmechanikai Laboratóriuma dolgozta fel, oly módon, hogy a munkát ugyanazok a munkatársak végezték, akik a középvízi hordalékmérés feldolgozásában is résztvettek. A feldolgozás során meghatározták szelvényenként 13 függélypontban, 74 mintában a lebegtetett hordalék koncentrációját (C_{ss}) és az előírások szerint, szelvényenként 7 pontban, azaz minden második függélyben a minták szemcseeloszlását. A sebességmérések szelvényenkénti feldolgozása során meghatároztuk a függélyek középsebességét (v_{ki}), fajlagos vízhozamát (Q_i), a fajlagos hordalékszállítását (Q_{ssi}), a szelvényben mért vízhozamot (Q), a lebegtetett hordalék koncentrációját C_{ss}, a hordalékszállítást (Q_{ss}) és megadjuk a mérési átlagtól való eltéréseket (h %). A vízhozammérést a Duna vízhozama folyamatosan csökkenése mellet végeztük, a mérések átlagtól való eltérése < 5%-nál. A lebegtetett hordalék koncentrációja a középvízi méréshez képest több mint harmadára lecsökkent. Az 1525+800 fkm szelvényben mért koncentráció értékei a melegvízcsóva környeztében fellépő nagy turbulencia miatt a sodorvonalban megnövekednek és a sodorvonal környezetében ez a magasabb koncentráció az 1525, 1524 fkm szelvényekben is kimutatható. A feldolgozott mérési eredményeket a csatolt „Q1400_lebhord.xlsx", „Q1400_seb_lebhord_szam.xls", „Q1400_lebhord_FTV_jegyzkonyv.doc" fájlok tartalmazzák.

A szelvényekben meghatározott jellemző paraméterek:

szelvény helye	$Q_{mért}$ [m3/s]	$Q_{Dombori}$ [m3/s]	$h_{Qmért-QDomb.}$ [%]	$C_{függ}$ [mg/l]	$h_{függ-átl}$ [%]	Q_s [kg/s]	$h_{Qs-átl}$ [%]
1527+000	1419	1450	-2.12	12.9	-19.2	18.398	-23.4
1525+800	1427	1450	-1.61	20.5	28.9	30.602	27.5
1525+500	1442	1450	-0.55	15.9	-0.2	22.127	-7.8
1525+000	1391	1380	0.81	14.4	-9.3	23.328	-2.8
1524+000	1312	1380	-4.93	15.9	-0.3	25.584	6.6
mérési átlagok	**1398**	**1422**	**-1.67**	**15.9**		**24008**	

8.7-2. táblázat A mintavétel és vízhozam mérés eredménye 2012. május 21-20.

8.7.2 KÖZÉPVÍZI LEBEGTETETT HORDALÉK ÉS MEDERANYAG MÉRÉS

A lebegtetett hordalék, áramlási sebesség középvízi mérésére 2012. május 21-24. között került sor, közel permanensnek tekinthető állapotban, egy időben a mederminták vételével. A sebességmérés és mintavétel idején jellemző hidrológia paraméterek:

Vízmérce	Dátum	H_{Paks} [cm]	H_{Paks} [mBf]	$Q_{Dombori}$ [m³/s]
Paks	2012.05.21	158	86.96	2148
1531.3 fkm	2012.05.22	144	86.82	2101
"0"	2012.05.23	135	86.73	2057
85.38 mBf	2012.05.24	144	86.82	2101

8.7-3. táblázat A paksi vízmércéhez tartozó, jellemző hidrológiai paraméterek

A mederanyag mintavételénél a lebegtetett mintavétel során rögzített függélypontokban harangos mintavevővel a meder felszíni rétegéből mederanyag mintát vettünk.

A mintákat a VITUKI Talajmechanikai Laboratóriuma dolgozta fel, oly módon, hogy meghatározták szelvényenként 13 függélypontban, összesen 74 mintában a lebegtetett hordalék koncentrációját (C_{ss}) és az előírások szerint, szelvényenként 7 pontban, azaz minden második függélyben a minták szemeloszlását.

A mederanyag mintáknál szelvényenként mind a 13 függélyben megadták a mederanyag szemeloszlását és a jellemző paramétereket.

A sebességmérések szelvényenkénti feldolgozását excel táblázatban végeztük, melynek során meghatároztuk a függélyek középsebességét (v_{ki}), fajlagos vízhozamát (Q_i), a fajlagos hordalékszállítását (Q_{ssi}), a szelvényben mért vízhozamot (Q), a lebegtetett hordalék koncentrációját C_{ss}, a hordalékszállítást (Q_{ss}) és a mérési átlagtól való eltérést (h %). A szelvényekben meghatározott jellemző paraméterek:

mérési szelvény	$Q_{mért}$ [m3/s]	$Q_{Dombori}$ [m3/s]	$h_{Qmért-QDom.}$ [%]	C_{ss} [mg/l]	$h_{Css-Cátl}$ [%]	Q_{ss} [kg/s]	$h_{Qss-Qss-átl}$ [%]
1527+000	2156	2148	0.37	50.9	3.9	110.33	3.7
1525+800	2157	2148	0.43	52.4	6.9	117.20	10.2
1525+500	2125	2057	3.30	49.4	0.7	102.14	-4.0
1525+000	2040	2057	-0.84	49.6	1.2	104.02	-2.2
1524+000	2100	2101	-0.04	42.7	-12.8	98.26	-7.6
mérési átlagok	**2116**	**2102**	**0.64**	**49.0**		**106.39**	

8.7-4. táblázat A mintavétel és vízhozam mérés eredménye 2012. május 21-20.

A 1524+000 fkm szelvényben mért koncentráció értékei a szelvény közepén indokolatlanul lecsökkennek, ez az átlagot ~ 15 %-kal csökkenti. A jelentős eltérést vélhetően a mintavételi vagy feldolgozási hiba okozza. A feldolgozott mérési

eredményeket a csatolt „Q2000_lebhord.xlsx", „Q2000_seb_hord_szam.xls", „Q2000_medera.xlsx", „Q2000_lebhord_jegyzkony.doc", „Q2000_meder_jegyzkonyv.doc" fájlok tartalmazzák.

8.7.3 NAGYVÍZI LEBEGTETETT HORDALÉKMÉRÉS

Az elmaradt zöldár a nagyvízi mérést nem tette lehetővé, így az előzetes egyeztetés szerint a nagyvízi mérés a szükséges vízállás kialakulásáig eltolódik.

8.8 ADATSZOLGÁLTATÁS A BME 2D HIDRODINAMIKAI MODELLJÉHEZ

A BME 2D modelljének kalibráláshoz kapcsolódó mérésekre, vízhozam, középsebesség eloszlások, vízszint meghatározása, középvízi, nagyvízi tartományban kerül sor, kvázi-permanens állapotnál.

A mérésekhez ADCP berendezést alkalmazunk, a mérési szelvények kijelölése GPS segítségével történik. Meghatározzuk az adott folyószakasz vízszintesését.

A méréseknél az ME-10-231-17-2009 sz. műszaki előírás követelményeit alkalmazzuk, mérési adatok kiértékelése, feldolgozása saját feldolgozó szoftver segítségével történik.

A nagyvízi mérés elvégzéséhez meg kellett határozni, hogy mit tekintünk középvízi és nagyvízi mérésnek. A paksi vízmércéhez tartozó, jellemző hidrológia paraméterek:

	vízállás [cm]	**vízhozam [m³/s]**
Kisvíz	H < 80	Q < 1500
Középvíz	80 < H < 530	1500 < Q < 4500
Nagyvíz	H > 530	Q > 4500

8.8-1. táblázat A paksi vízmércéhez tartozó, jellemző hidrológiai paraméterek

Kisvízi mérésnél a vízhozam tartomány Q<1500 m³/s, a meder mélyvonulatának környezetében, a kisvízi mederben aktív az áramlás, zátonyokon minimális a vízborítás, esetlegesen a zátonyok szárazra kerülnek, partközelben pangó, álló víztestek alakulnak ki.

Középvíz mérésnek Q~1800-3200 m³/s tartományt tekintettük, amikor az áramló víz a középvízi (partok vonaláig terjedő) medret kitölti, illetve a partokon a kis vízborítás miatt, a vízszállítás csak minimális.

Nagyvízi mérésnél, Q>4500 m³/s, az árterületen is jelentős a vízmélység, így kialakulhat áramlás, az árterület vízszállítása is számottevő lehet. A mérések elvégezhetősége vízjárásfüggő. A 2012 év márciusától, a paksi vízállástábla szerint az eltelt időszakban a vízállás jellemzően a középvízi tartományban mozgott:

H_{min} = 115 cm	Q_{min} = 1685 m³/s	2012. május 23.
H_{max} = 485 cm	Q_{max} = 4133 m³/s	2012. június 18.

8.8.1 A MÉRÉS SORÁN ALKALMAZOTT MÉRŐESZKÖZÖK

A mérési szelvények kijelölése partközeli végpontok meghatározásával történt, a végpontok EOV koordinátáit GARMIN GPSMAP60 típusú helymeghatározóval rögzítettük, a helymeghatározás jellemző pontossága a Duna vonalában ±2 m, függ a látható műholdak számától.

A vízszint rögzítése LEICA VIVA mérőállomás segítségével történt, a vízszintes koordináták meghatározása cm pontosságú, a függőleges koordináta pontossága 0.5 cm. Az alkalmazott műszer differenciál GPS segítségével határozza meg a mérőpont helyzetét, és on-line kapcsolattal, földi állomás közreműködésével, korrekciós számítással éri el a koordináták elvárt 1 cm-es mérési pontosságát.

A vízhozam és középsebesség-eloszlás mérésére RDI-1200MHz ADCP mérő berendezést alkalmaztunk. Az ADCP (Acoustic Doppler Current Profájlr) mérő a vízhozam meghatározása szolgál, emellett az áramlási sebesség irányának és nagyságának, a pillanatnyi középsebesség eloszlásának mérésére is alkalmas. A csónak orrán helyezkedik el az adó-vevő kristályt és az elektronikát tartalmazó mérőszonda, a csónak és az áramlás irányának meghatározása kompasz segítségével történik.

A műszer működési elve a következő: a szonda ultrahang impulzust bocsát ki, mely az áramló közeggel együtt mozgó lebegtetett részecskékről visszaverődik az érzékelőhöz. A visszaverődő ultrahangimpulzus frekvenciája, a Doppler-elvnek megfelelően, a mozgási sebességtől függően eltolódik, így a csónak és az áramló víz sebessége a kibocsátott-visszavert jel különbségi frekvenciájának mérésével meghatározható. Az elektronika a visszavert jel időbeli szakaszolásával a vízmélységet sávokra (cellákra) bontja. A vízhozamot Simpson, Oltman és Gordon szerint, a részletes számítást mellőzve az alábbi módon számíthatjuk:

$$Q = \sum_{0}^{H_z} \sum_{0}^{T} \left(v_x u_y - v_y u_x \right) \Delta t \, \Delta z$$

ahol Q a folyó teljes vízhozama
v_x, v_y a víz sebességkomponensei
u_x, u_y a hajó sebességkomponensei
Δz cellamagasság
Δt két mérési ciklus közötti idő

Mivel az adó és a vevő kristálya azonos, az adó - lecsengés miatt - egy holtidő eltelte után alkalmas vevőként a visszaérkező jel fogadására. Az ADCP mérő csak a holtidőnek megfelelő távolságnál (~ 1 m) kezd mérni és a zavarként fellépő interferencia miatt a fenékközeli sávban sincs mérés, ezért a felszín- és fenékközelben a sebességeket a feldolgozó program számítja. Szelvényenként 2-4 vízhozam mérés eredményének közel azonossága esetén a vízhozam a mérések átlagaként adható meg, a mérések pontossága < ± 2 %.

8.8.2 KÖZÉPVÍZI SEBESSÉGELOSZLÁS MÉRÉS

A középvízi vízhozam és vízszínesés mérésére 2012. március 20-án került sor, a dunai vízszintek emelkedésénél, a jellemző hidrológiai adatok az alábbiak:

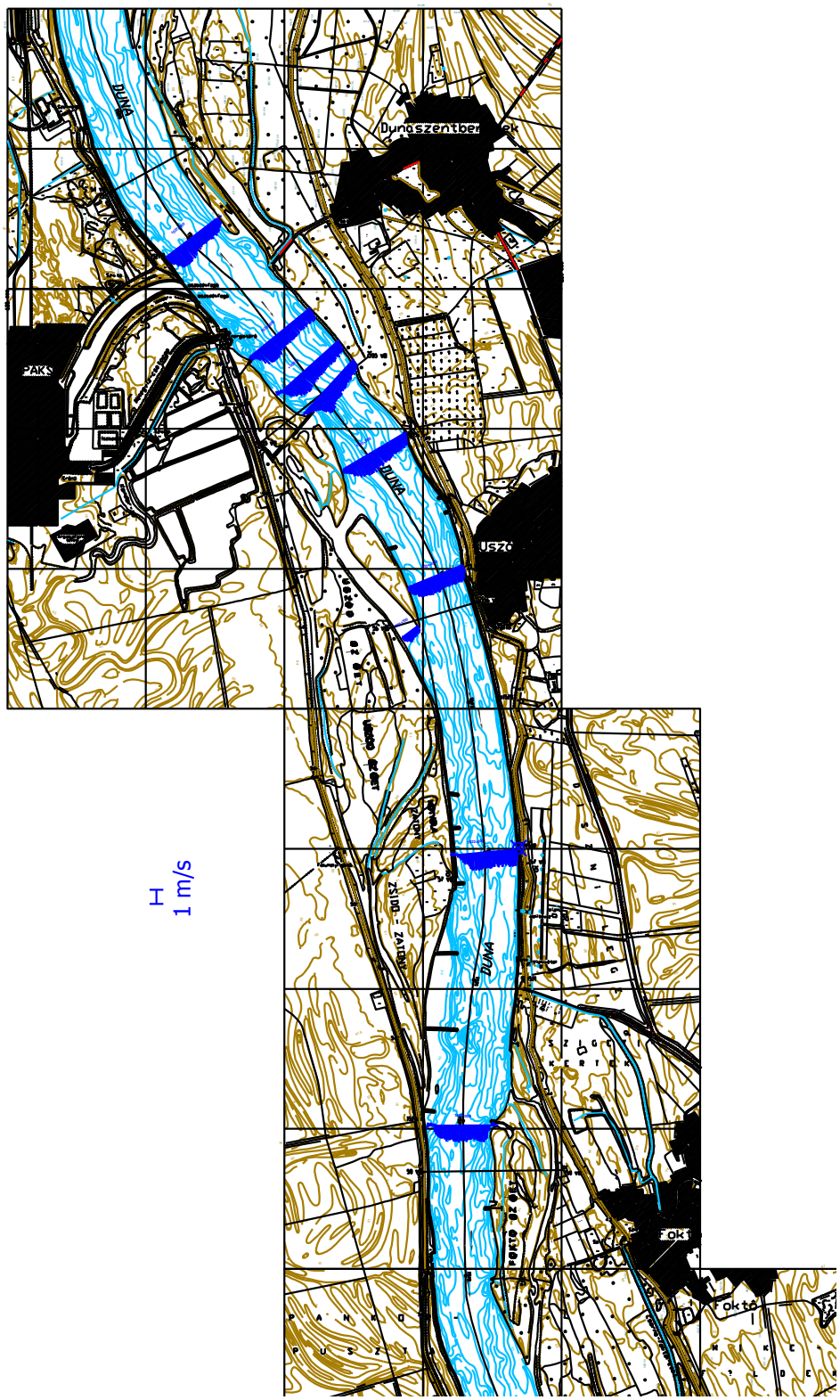
Vízmérce	dátum	időpont	H [cm]	H [mBf]	esés [cm]
Paks vm.	2012.03.20	7:00	258	**87.96**	**6.00**
		17:00	268	**88.06**	**5.92**
1531.3 fkm	"0"			85.38	**Q [m³/s]**
Dombori vm.	2012.03.20	7:00	297	86.49	**2640**
		19:00	309	86.61	**2705**
1506.8 fkm	"0"			83.52	

8.8-2. táblázat Középvízi hozam és vízszinesés mérése 2012. március 20.

A méréseket az élettartam hosszabbításhoz kapcsolódó vizsgálatok alkalmával kijelölt és a Barákai-gázló környezetében lévő szelvényekben végeztük. A 8.8-3. táblázatban ismertetjük a vízhozam mérés eredményét, az utolsó két sorban az Uszodi zátonysziget főági és mellékági hozammérés eredményét bontásban is megadjuk:

A 8 szelvény mérési átlaga **$Q_{átl}$ = 2746 m³/s ±1.8 %.** A feldolgozás során a „Paks-2Dközépvíz-sebességmérés-vízszintrögzítés.xlsx" nevű, elektronikusan csatolt excel fájlban táblázatos formában minden szelvényben megadjuk a mérési pontok EOV koordinátáit, a balparttól indulva a mérőpontok távolságát, a vízmélységet és a középsebesség vektor nagyságát és irányát.

Grafikusan közöljük a középsebesség vektorokat a Paksi Atomerőmű térségének EOV térképén.



8.8-1. ábra A középsebesség eloszlása a Paksi Atomerőmű térségében Q = 2700 m³/s.

A 2012. március 20-i vízhozam mérés eredménye:

fkm	Q_1 [m³/s]	Q_2 [m³/s]	Q_3 [m³/s]	Q_4 [m³/s]	$Q_{átlag}$ [m³/s]	szórás [%]
1527+000	2766.9	2794.3	2791.5	2785.3	2784.5	0.4
1525+800	2784.4	2840.4	2786.7	2760.5	2793.0	1.2
+500 m	2773.1	2811.4	2782.5	2803.5	2792.6	0.6
1525+500	2723.7	2813.1	2741.5	2772.5	2762.7	1.4
1525+000	2703.7	2767.0	2705.5	2737.4	2728.4	1.1
1524+000	2725.1	2725.2	2735.2	2738.5	2731.0	0.3
1522+000	2727.4	2744.3	2709.7	2749.7	2732.8	0.7
1520+000	2636.8	2629.5	2683.8	2629.0	2644.8	1.0
1524+000 főág	2564.0	2561.0	2568.2	2569.0	2565.6	0.1
1523+700 m.ág	161.1	164.2	167.0	169.5	165.5	2.2

8.8-3. táblázat A vízhozam mérés eredménye 2012. március 20.

8.8.3 KÖZÉPVÍZI ESÉS MÉRÉSE

A vízhozam mérésével egyidőben elvégeztük az 1528-1519 fkm dunai folyószakaszon a vízfelszín 500 m-kénti rögzítését. A mérés pontosságát befolyásolta a vízfelszín szél okozta hullámzása, amely a mérés kései szakaszában elérte a ±4-5 cm-t, ezért a mért vízfelszín görbéjét ki kellett egyenlíteni. A mérés kezdete és befejezése közötti vízszintváltozás értékével a kiegyenlített vízszinteket korrigáltuk. A középvízi mérések eredményét a „2D_sebmeres_vizszint_Q2700.xlsx" nevű, elektronikusan mellékelt excel fájlban grafikusan és táblázatosan is ismertetjük.

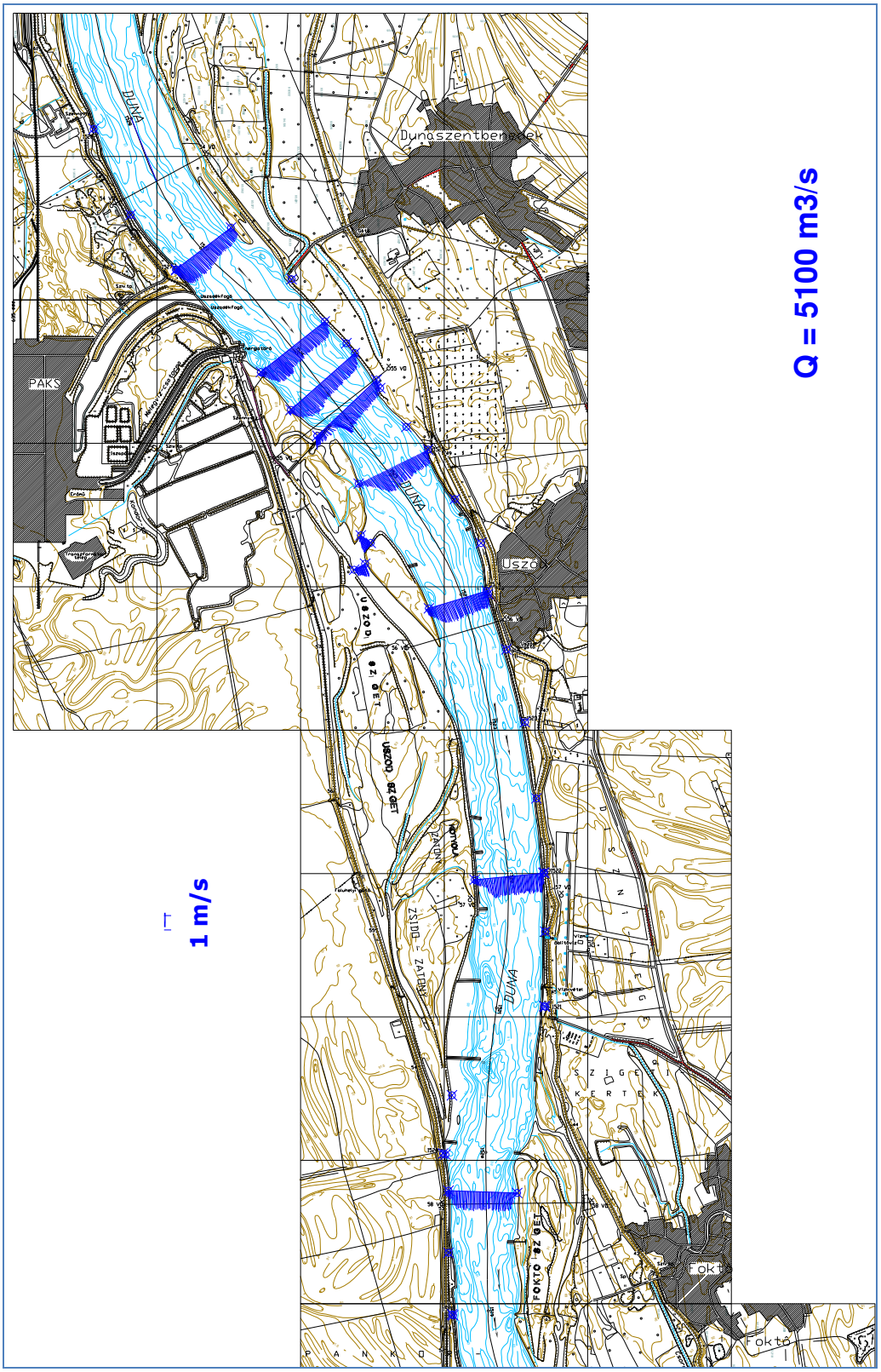
8.8.4 NAGYVÍZI SEBESSÉGELOSZLÁS MÉRÉSE

A nagyvízi vízhozam mérésére 2013. február 6-án került sor, közel permanens dunai vízállásnál, a jellemző hidrológiai adatok az alábbiak:

Vízmérce	dátum	időpont	vízállás [cm]	vízállás [mBf]	esésé [cm/km]
Paks	2013.02.06	7:00	**502**	90.40	4.84
		17:00	**499**	90.37	
	"0"	1531.3		85.38	vízhozam [m³/s]
Dombori	2013.02.06	7:00	**568**	89.20	**4520**
		19:00	**568**	89.20	**4520**
	"0"	1506.8		83.52	

8.8-4. táblázat Nagyvízi mérés, jellemző hidrológiai paraméterek, 2013. február 6.

A méréseket középvízi mérések során kijelölt dunai mederszelvényekben végeztük. Az Uszodi-zátonysziget mellékágában a korábbi méréstől eltérően a mellékági vízhozameloszlás tisztázása érdekében a felvízi részen vettünk fel mérési szelvényeket. A mérés a kapcsolódó modellekhez mellékági mederadatokat is szolgáltatott. A 8 szelvény mérési átlaga **$Q_{átl}$ = 5087 m³/s ±1.8 %.** A feldolgozás során a „2D_sebmeres_vizszint_Q5100.xlsx" nevű, csatolt excel fájlban táblázatos formában minden szelvényben megadjuk a mérési pontok EOV koordinátáit, a balparttól indulva a mérőpontok távolságát, a vízmélységet és a középsebesség vektor nagyságát és irányát. A középsebesség eloszlását a 8.5.2. EOV térképen közöljük.



8.8-2. ábra A nagyvízi középsebesség eloszlása a Paksi Atomerőmű térségében Q = 5100 m³/s.

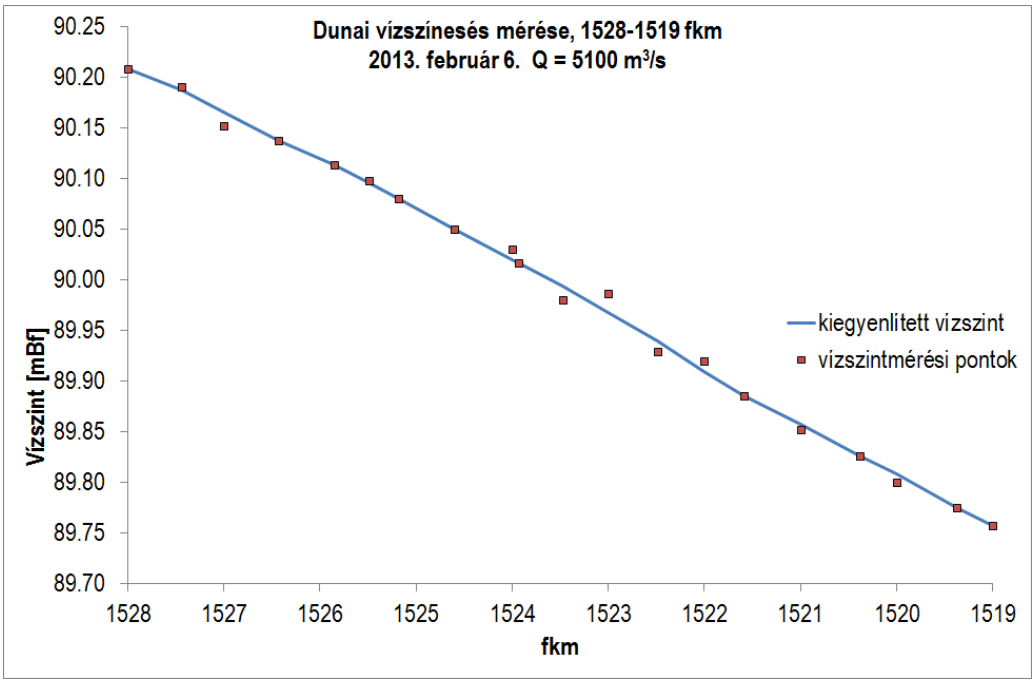
A 8.8-5. táblázatban ismertetjük a vízhozam mérés eredményét, a mérési szelvényben a számított vízszintekkel, és az utolsó három sorban az Uszodi zátonysziget főági és mellékági hozammérés eredményét bontásban is megadjuk.

fkm	Q_1	Q_2	$Q_{átlag}$	H
	[m3/s]	[m3/s]	[m3/s]	[mBf]
1527+000	5150.0	5192.0	5171.0	90.17
1525+800	5171.0	5206.0	5188.5	90.12
+500 m	5173.0	5176.0	5174.5	90.10
1525+500	4991.0	4990.0	4990.5	90.10
1525+000	4955.0	4989.0	4972.0	90.08
1524+000	4944.0	5002.0	4973.0	90.03
1522+000	5145.0	5115.0	5130.0	89.93
1520+000	5110.0	5085.0	5097.5	89.83
1524+000 főág	4583.0	4654.0	4618.5	90.03
1524+800 m.ág			258.0	90.07
1524+500 m.ág	348.0	361.0	354.5	90.05

8.8-5. táblázat Nagyvízi vízhozam mérés eredménye. 2013. február 6.

8.8.5 NAGYVÍZI ESÉS MÉRÉSE

A nagyvízi vízszínesés mérésére permanensnek tekinthető állapotban a vízhozam méréssel egyidőben került sor, a mérés ideje alatt a vízszint változása nem haladta meg az egy cm-t. A méréseket az 1528-1519 fkm folyószakaszon végeztük, de a mérési pontok egyenletes kiosztására nem volt lehetőség, mivel a GPS-es helymeghatározással működő mérőállomást a galériaerdő fái esetenként leárnyékolták. A mért vízszinteket és a kiegyenlített vízszínesést a 8.8-3. ábran ismertetjük.



8.8-3. ábra Vízszínesés mérése a Paksi Atomerőmű térségében, Q = 5100 m³/s.

A mérés bizonytalanságát növelte az hogy a part megközelítése sok esetben nehézségekbe ütközött, ezért a kiegyenlítés pontosságának javítása érdekében a mérési pontok számát megnöveltük. A mérési eredményeket a csatolt „2D_sebmeres_vizszint_Q5100.xlsx" excel fájl tartalmazza.

8.9 ADATSZOLGÁLTATÁS A BME 3D HIDRODINAMIKAI MODELL KALIBRÁLÁSÁHOZ ÉS VALIDÁLÁSÁHOZ

A vízhozam és sebességeloszlás méréseket az 1527-1525 fkm folyószakaszon, kisvízi, középvízi és nagyvízi állapotban, ADCP mérővel végezzük, a modell kalibrálásához és validálásához, két alkalommal.

A mérésekhez ADCP berendezést alkalmazunk. Az ADCP mérő mérési elvéből az következik, hogy az *áramlási kép egy pillanatnyi mozgásállapotot rögzít*. Az időben változó makroturbulens jelenségek, áramlási zavarok miatt a középsebesség vektorok ingadozása esetenként jelentős, de a nagyszámú függélypont (mérés 2-3 m-ként, 80-120 függélypont) következtében a középsebességek együttesen jól értékelhetők.

Tekintettel arra, hogy a hajó mozgása eltér az egyenestől, ezért a mérési szelvényeket az EOV koordinátával megadott végpontok jelölik ki és a mért értékeket a végpontok által kijelölt egyenesre vetítjük. A mérési szelvény végpontjainak kijelölése GPS segítségével történt, az élettartam hosszabbítás során kijelölt, a műtárgy közeli 6 felső szelvényben 1527+000, 1525+800 fkm, +500m, 1525+500, 1525+000, 1524+000 fkm, az Uszodi zátonysziget mellékágában 1523+700 fkm, és az Barákai-gázló környezetében lévő két alsó 1522+000 és 1520+000 fkm szelvényekben. A mérési szelvények helyét a BME-vel egyeztettük.

Minden szelvényben két mérést végeztünk és a vízhozam mérést akkor tekintettük eredményesnek, ha a két mérés közel azonos eredményt szolgáltatott. Mivel ez összesítve 16 mérést jelentett, a vízhozam meghatározása nagy biztonsággal történt. A szelvényekben a koordináták a balparttól indulnak, a medermélység koordinátát a két vízmérce (Paks, Dombori) vízszintjéből az esés figyelembevételével balti szintben [mBf] határoztuk meg, de a meder vonalát a vízszíntől mért távolságként is megadjuk. A mérési szelvények kijelölése GPS segítségével történt.

A méréseknél az ME-10-231-17-2009 sz. műszaki előírás követelményeit alkalmaztuk, a mérési adatok kiértékelése, feldolgozása saját feldolgozó szoftver segítségével történt.

A mérések vízjáráshoz kapcsolódó feltételeit, a mérések során alkalmazott mérőeszközöket és azok rövid ismertetését az „Adatszolgáltatás a BME 2D hidrodinamikai modelljéhez" feladatrészben ismertettük. Ez év decemberéig két-két kisvízi és középvízi (kalibrálási és validálási) mérésre került sor. A nagyvízi mérések a szükséges hidraulikai állapot kialakulásáig eltolódnak.

8.9.1 KISVÍZI SEBESSÉGELOSZLÁS MÉRÉS

Az első, kalibráláshoz kapcsolódó kisvízi ADCP mérésre 2012. augusztus 21.-én került sor a Duna lassuló apadásánál. A mérést jellemző vízmérce hidrológiai paramétereket az alábbi táblázat ismerteti:

Vízmérce	időpont	cm	mBf	
Paks	**2012.08.21**	**33**	**85.71**	**esés**
1531.3	"0"	85.38		**6.90**
Dombori	2012.08.21	50	84.02	**Q**
1506.8	"0"	83.52		**1390**

8.9-1. táblázat Napi hidrológiai paraméterek 2012. augusztus 21.

A mérések alapján a mért vízhozam átlagos értéke $Q_{átl}$ = 1364 m^3/s–ra, a mért vízhozamok szórása 1.95 %-ra adódott. A vízhozammérés részletezett eredményeit a mérési szelvények végpontjaival, a szelvénybeli vízhozamátlaggal és szelvényátlagoknak a mérés vízhozamátlagától való százalékos eltérésével az alábbi táblázat mutatja:

Hely	$EOVX_{bal}$	$EOVY_{bal}$	$EOVX_{jobb}$	$EOVY_{jobb}$	$Q_{szelvény-átl}$	$h_{Qátl}$
	[m]	[m]	[m]	[m]	[m³/s]	[%]
1527+000	636498	138484	636142	138220	1369	0.09
1525+800	637018	137816	636739	137514	1366	-0.08
+500	637303	137548	636933	137275	1356	-0.85
1525+500	637508	137441	637185	137136	1374	0.51
1525+000	637861	136949	637444	136700	1374	0.48
1524+000	638286	135965	637902	135858	1313	-4.01
1522+000	638680	134008	638216	134018	1400	2.38
1520+000	638471	131954	638063	132004	1388	1.50

8.9-2. táblázat Vízhozam mérés 2012. augusztus 21.

Az Uszodi zátonysziget mellékágában a kis vízmélység miatt (mérés feltétele, hogy a vízmélység, H>1 m) nem tudtunk mérni, ezért az adott szelvényben a mért vízhozam átlagtól való eltérése megnövekedett.

A második, validáláshoz szükséges kisvízi mérésre 2012. október 30.-án került sor. A vízrajzi előrejelzés Q ~1500 m³/s várható vízhozamot jelzett, de a mérés idején egy kisebb árhullám alakult ki, így a mért szakaszon a vízhozam már emelkedett, míg a legközelebb lévő Dombori vízmérce az előre jelzett vízhozamot mutatta. A napi jellemző hidrológiai paramétereket az alábbi táblázat tartalmazza:

Vízmérce	időpont	cm	mBf	
Paks	**2012.10.30**	**64**	**86.02**	**esés**
1531.3	"0"	85.38		**6.86**
Dombori	2012.10.30	82	84.34	**Q**
1506.8	"0"	83.52		**1540**

8.9-3. táblázat Napi hidrológiai paraméterek 2012. október 30.

Az ADCP mérések alapján a mért vízhozamok átlagos értéke $Q_{átl}$ = 1711 m³/s–ra, szórása 1.91 %-ra adódott.

A következő táblázatban a részletezett mérési eredményeket közöljük:

Hely	**$EOVX_{bal}$**	**$EOVY_{bal}$**	**$EOVX_{jobb}$**	**$EOVY_{jobb}$**	**$Q_{szelv-átl}$**	**h_Q %**
	[m]	[m]	[m]	[m]	[m³/s]	[%]
1527+000	636536	138454	636194	138160	1745	2.00
1525+800	637116	137892	636743	137508	1686	-1.44
+500	637373	137616	636941	137261	1734	1.33
1525+500	637509	137443	637169	137129	1717	0.33
1525+000	637869	136948	637426	136698	1706	-0.31
1524+000	638289	135966	637904	135859	1644	-3.89
1522+000	638678	133994	638220	134020	1734	1.36
1520+000	638472	131960	638056	132002	1721	0.61

8.9-4. táblázat Vízhozam mérés: 2012. október 30.

A feldolgozott mérési eredményeket a „3Dkisviz_Q1400.xlsx” és a ”3Dkisviz_Q1700.xlsx" csatolt excel táblázatokban ismertetjük.

8.9.2 KÖZÉPVÍZI SEBESSÉGELOSZLÁS MÉRÉS

Az első, a 3D modell kalibrálásához kapcsolódó középvízi vízhozam mérésére 2012. május 31-én került sor, a dunai vízszintek enyhe apadásánál. A jellemző vízállás adatokat a Paksi vízmércén, a vízhozamot a Dombori vízmércén olvashattuk le, mindkét vízmérce-leolvasás a mérést megelőzően, reggel 7 órakor történt. A napi hidrológiai paramétereket az alábbi táblázat tartalmazza:

Vízmérce	dátum	cm	mBf	esés
Paks vm.	2012.05.31	200	**87.38**	**5.55 cm/km**
1531.3 fkm	"0"		85.38	**Q**
Dombori vm.	2012.05.20	250	86.02	**2443 m³/s**
1506.8 fkm	"0"		83.52	

8.9-5. táblázat Napi hidrológiai paraméterek 2012. május 31.

Az ADCP mérések alapján a vízhozam átlagos értéke $Q_{átl}$ = 2389 m³/s–ra, a mérési eredmény szórása 1.2 %-ra adódott.

Az alábbi táblázatban a mérési szelvények végpontjait, a két mérés átlagából számított szelvényben mért vízhozamot és a mérési átlagtól való eltérést (jelölése: H %) ismertetjük:

Hely	EOV X balpart	EOV Y balpart	EOV X jobbpart	EOV Y jobbpart	$Q_{átl}$ [m³/s]	H [%]
1527+000	636514.0	138508.0	636141.0	138217.0	2421	1.32
1525+800	637118.0	137902.0	636732.1	137491.6	2404	0.60
+500	637489.0	137484.0	637152.6	137103.6	2412	0.94
1525+500	637489.0	137484.0	637152.6	137103.6	2391	0.06
1525+000	637872.0	136957.0	637426.0	136681.0	2383	-0.25
1524+000 főág	638289.0	135968.0	637896.2	135849.5	2236	
1523+700 mellékág	637954.0	135583.0	637841.0	135514.0	112	
1524+000 teljes	638289.0	135968.0	637841.0	135514.0	2348	-1.76
1522+000	638683.0	133998.0	638216.5	133978.9	2383	-0.25
1520+000	638480.0	131947.0	638015.2	131975.1	2384	-0.65

8.9-6. táblázat Középvízi vízhozam mérés eredménye Q =2400 m3/s, 2012. május 31.

A mért vízhozam kismértékű, folyamatos csökkenése a napközbeni lassú apadással magyarázható.

A második, a 3D modell validálásához kapcsolódó középvízi vízhozam- és sebességeloszlás mérésre 2012. augusztus 2-án került sor a Duna apadó ágában. A vízrajzi előrejelzés ~ 2000 m³/s várható vízhozamot jelzett, de a mérés idejére az apadás lelassult. A napi jellemző hidrológiai paramétereket az alábbi táblázat tartalmazza:

Vízmérce	dátum	cm	mBf	esés
Paks vm.	2012.08.02	195	**87.38**	**5.80 cm/km**
1531.3 fkm	"0"		85.38	**Q**
Dombori vm.	2012.08.02	239	86.02	**2320 m³/s**
1506.8 fkm	"0"		83.52	

8.9-7. táblázat Középvízi mérés, napi hidrológiai paraméterek: 2012. aug. 2.

A mért vízhozam átlagos értéke Qátl = 2318 m³/s –ra, jó egyezést mutat a névleges értékkel, a mérési eredmény szórása 0.63 %-ra adódott.

A következői táblázatban a korábbiakhoz hasonlóan a mérési szelvények végpontjait, a két mérés átlagából számított szelvényben mért vízhozamot és a mérési átlagtól való eltérést (jelölése: H %) ismertetjük:

Hely	EOVX balpart	EOVY balpart	EOVX jobbpart	EOVY jobbpart	$Q_{átl}$ [m³/s]	H [%]
1527+000	636513.00	138492.00	636141.68	138215.76	2331	0.56
1525+800	637114.00	137910.00	636733.00	137499.00	2324	0.26
+500	637373.00	137617.00	636933.00	137251.00	2328	0.43
1525+500	637517.00	137438.00	637146.00	137104.00	2326	0.35
1525+000	637874.00	136950.00	637426.00	136684.00	2309	-0.39
1524+000 főág	638292.00	135967.00	637897.00	135852.00	2291	0.43
1523+700 mellékág	637928.00	135630.00	637803.00	135573.00	99	-1.16
1524+000 teljes	638292.00	135967.00	637803.00	135573.00	2328	0.43
1522+000	638682.00	133999.00	638219.00	133996.00	2307	-0.47
1520+000	638487.00	131950.00	638009.00	132008.00	2193	-0.84

8.9-8. táblázat Középvízi vízhozam mérés eredménye, Q=2300 m³/s, 2012. aug. 2.

A feldolgozott mérési eredményeket a „3Dkozepviz_Q2300.xlsx" és „3Dkozepviz_Q2400.xlsx" nevű excel táblázatokban ismertetjük.

8.9.3 NAGYVÍZI SEBESSÉGELOSZLÁS MÉRÉS

Az első kalibráláshoz kapcsolódó nagyvízi mérésre 2013. január 9. került sor, a vízszint növekvő, áradó ágában. A jellemző hidrológiai paramétereket a 8.6.9. táblázat ismerteti.

Vízmérce	időpont	H [cm]	H [mBf]	esés [cm/km]
Paks	2013. 1. 9. 11:00	512	90.5	5.92
1531.3	"0"	85.38		
Dombori	2013. 1. 9. 11:00	553	89.05	Q [m³/s]
1506.8	"0"	83.52		**4300**

8.9-9. táblázat Nagyvízi mérés, napi hidrológiai paraméterek

Az ADCP mérések vízhozamának átlagértéke **$Q_{átl}$ = 5446 m³/s,** 1.58 % -ra adódott. A meredek, rövid idejű árvízi felfutás miatt a mért és a Dombori-vízmérce által mutatott vízhozam jelentős eltérést mutat.

A második, validáláshoz kapcsolódó nagyvízi mérésre 2013. január 10. került sor, a vízszint növekvő, áradó ágában. A jellemző hidrológiai paramétereket a 8.6.10. táblázat ismerteti.

Vízmérce	időpont	H [cm]	H [mBf]	esés [cm/km]
Paks	2013. 1. 10. 11:00	556	90.94	5.55
1531.3	"0"	85.38		
Dombori	2013. 1. 10. 11:00	606	89.58	Q [m³/s]
1506.8	"0"	83.52		**4780**

8.9-10. táblázat Nagyvízi mérés, napi hidrológiai paraméterek

A validálási mérésekre közel permanens állapotban az árvízi tetőzés környezetében került sor, a mért vízhozamok átlagértéke **$Q_{átl}$ = 5687 m³/s,** szórása 1.51 % -ra adódott.

Mindkét nagyvízi mérésnél, az 1525.0 és az 1520.0 fkm mérések eredményét az átlagolás során nem szerepeltettük, mivel az 1525 fkm -ben a jobbparti, az 1520 fkm-ben a balparti árterületen 100 m^3/s-ot meghaladó vízhozam folyik, melyek a galériaerdők miatt nem megközelíthetőek.

A következő 2 táblázatban a mérési eredményeket közöljük: a 8.9-11 táblázat a kalibrálási, a 8.9-12 táblázat a validálási méréshez tartozó feldolgozott mérési eredményeket ismerteti.

Hely	Balpart		Jobbpart		Q_1	Q_2	$Q_{átl}$	Δh_Q	H_i
	EOVx	EOVy	EOVx	EOVy					
[fkm]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m^3/s]	[m^3/s]	[m^3/s]	[%]	[mBf]
1527+000	636519	138493	636136	138211	5380	5358	5369	-0.15	90.25
1525+800	637118	137914	636731	137500	5442	5572	5507	2.42	90.18
+500	637380	137627	636935	137243	5495	5550	5522	2.70	90.17
1525+500	637509	137463	637121	137040	5313	5309	5311	-1.23	90.16
1525+000	637885	136960	637421	136697	5282	5164	5223	-2.86	90.13
1524+000	638295	135966	637892	135838	5402	5401	5401	2.70	90.07
1522+000	638694	134010	638219	133970	5466	5448	5457	1.48	89.95
1520+000	638489	131955	638016	131972	5231	5219	5225	-2.83	89.83
1524+000	638295	135966	637892	135838	4968	4959	4963	-1.74	90.07
1523+700	637906	135660	637791	135577	435	442	438	0.46	90.05

8.9-11 táblázat Nagyvízi vízhozam mérés eredménye, Q = 5400 m3/s, 2013. jan. 9

Hely	Balpart		Jobbpart		Q_1	Q_2	$Q_{átl}$	$\Delta h_{Qátl}$	H_i
	EOVx	EOVy	EOVx	EOVy					
[fkm]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m^3/s]	[m^3/s]	[m^3/s]	[%]	[mBf]
1527+000	636510	138504	636132	138211	5636	5699	5668	0.45	90.70
1525+800	637116	137903	636723	137499	5637	5720	5678	1.42	90.64
+500	637384	137624	636952	137215	5783	5807	5795	3.50	90.63
1525+500	637516	137452	637122	137048	5526	5561	5544	-0.98	90.62
1525+000	637883	136962	637422	136694	5540	5555	5547	-0.92	90.59
1524+000	638296	135973	637902	135832	5621	5678	5650	3.50	90.53
1522+000	638702	134013	638222	133957	5627	5665	5646	0.84	90.42
1520+000	638490	131912	638025	131937	5360	5167	5264	-5.99	90.31
1524+000	638296	135973	637902	135832	5162	5216	5189	-0.20	90.53
1523+700	637910	135659	637799	135579	459	462	461	0.91	90.52

8.9-12. táblázat Nagyvízi vízhozam mérés eredménye, Q = 5700 m^3/s, 2013. jan. 10.

A sebességmérést a „3Dnagyviz_Q5400.xlsx" és „3Dnagyviz_Q5700.xlsx" nevű excel fájlokban ismertetjük.

A kisvízi, középvízi és nagyvízi mérések eredményét grafikusan is feldolgoztuk és a Paksi térség vízrajzi térképén a középsebesség vektorok eloszlását a „3Dkisviz_sebeloszlas_abr.docx", „3Dkozepviz_sebeloszlas_abr.docx" és a „3Dnagyviz_sebeloszlas_abr.docx" fájlban mellékeljük.

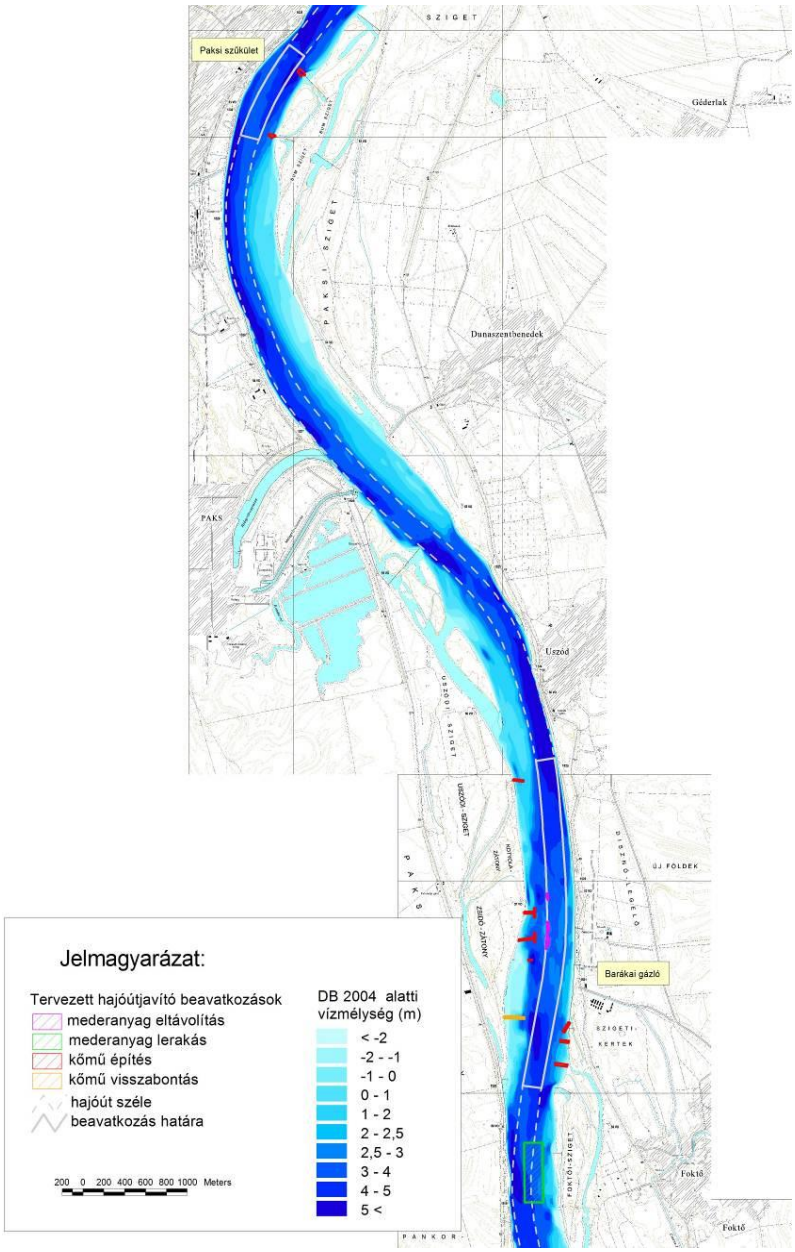
8.10 A TELEPHELY TÉRSÉGÉT ÉRINTŐ DUNA FEJLESZTÉSI (HAJÓZÁSI ÚTVONAL FEJLESZTÉSE) ELKÉPZELÉSEINEK ÉS AZOK MEDERRE VONATKOZÓ VÁRHATÓ HATÁSÁNAK ÉRTÉKELÉSE

A Duna Szob-Déli országhatár szakaszán 31 helyen nincs meg a nemzetközi egyezményekben rögzített hajóút mélység és/vagy szélesség. Ennek biztosítása érdekében az Európai Bizottság TEN-T* (The Trans-European Transport Networks, „Tanulmányok a Duna hajózhatóságának javításáról Program") projektje támogatásával ezekre a szakaszokra a Duna hajózhatóságát javító beavatkozásokat, kisvízi mederszabályozást tervezett, megvizsgálva a tervezett beavatkozások környezeti hatásait is. A tervezett beavatkozások kivitelezése után a Duna Szob-Déli országhatár szakaszán a 2,5 méter merülési mélységű hajókaravánok az év 300-310 napján akadálymentesen közlekedhetnek.

*Irodalmi hivatkozások „Tanulmányok a Duna hajózhatóságának javításáról Program" részeként:

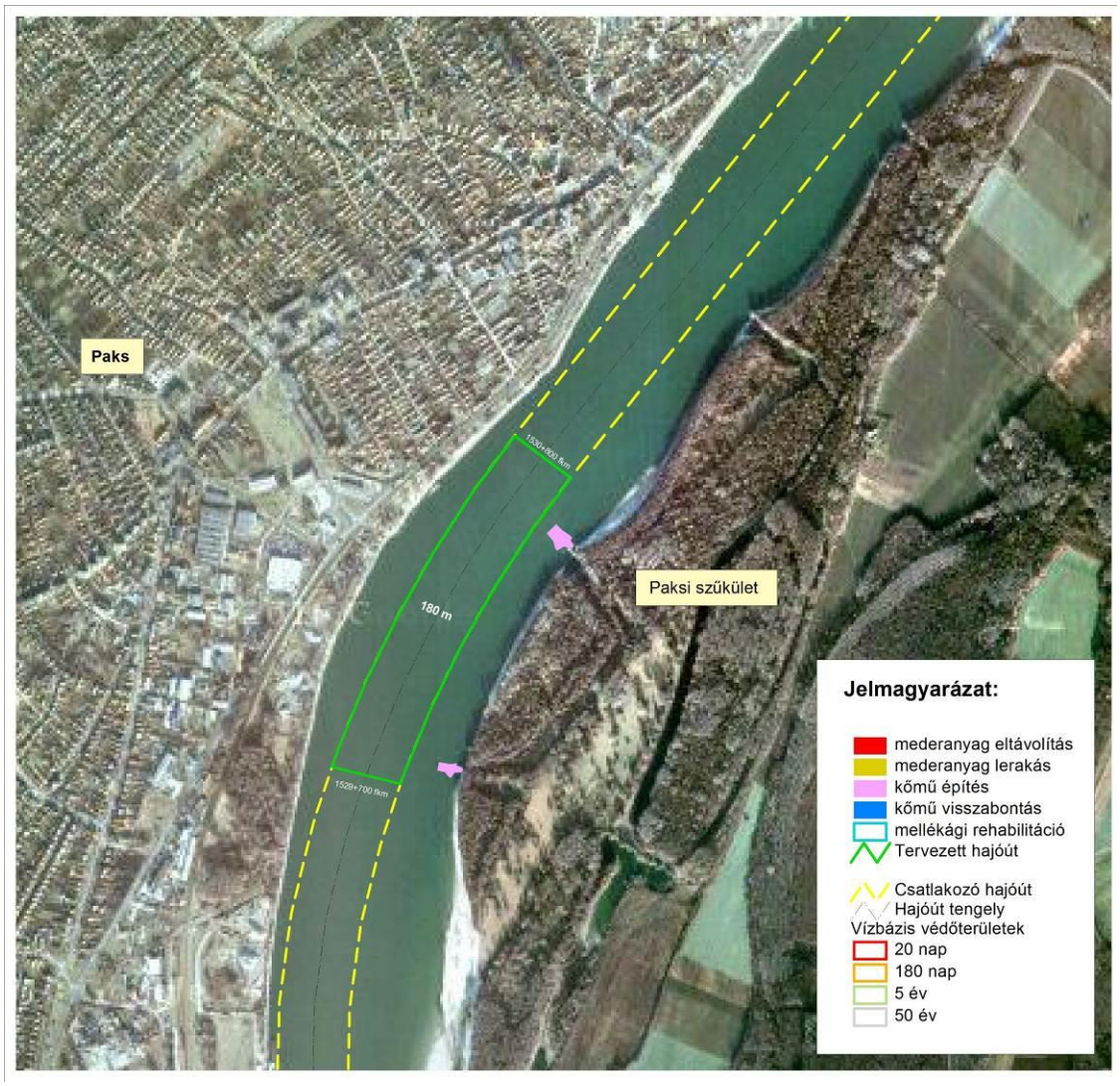
- A Szob-Déli országhatár közötti Duna szakasz hajózhatóságának javítása keretében tervezett beavatkozások környezeti vizsgálata - ***Barákai gázló rendezése környezeti hatástanulmány; Paksi szűkület rendezése környezeti hatástanulmány*** -, 2009-2011., Kidolgozó: VITUKI-AQUAPROFIT-TÉR-TEAM-VTK Innosystem cégek alkotta konzorcium, Megrendelő: Közlekedésfejlesztési Koordinációs Központ (KKK).
- A Szob-Déli országhatár közötti Duna szakasz hajózhatóságának javítása keretében tervezett beavatkozások vízjogi létesítési engedélyeztetési tervdokumentációjának kidolgozása - ***Barákai gázló rendezése; Paksi szűkület rendezése*** -, 2009-2011., Kidolgozó: VITUKI-AQUAPROFIT-TÉR-TEAM-VTK Innosystem cégek alkotta konzorcium, Megrendelő: Közlekedésfejlesztési Koordinációs Központ (KKK).

A Paksi Atomerőmű hűtővíz biztosítására a Paksi szűkület és a Barákai gázló területén tervezett beavatkozások gyakorolhatnak értékelhető hatást (lásd**:** 8.10-1. ábra). Ennek meghatározása céljából számba vették a hajózási akadályok kiváltására tervezett vízépítési beavatkozásokat és becsülték azoknak a medermorfológiai, hidraulikai hatását. A Paksi Atomerőmű telephelyének jelenlegi és a tervezett bővítéssel (a felvonulási területekkel együtt) érintett környezetére gyakorolt mederrendezési hatás kisvízkor 2-5 cm duzzasztást, azaz vízszintemelkedést okoz, nagyvízkor a hatás elenyészővé (centiméternyinél kisebbé) válik.

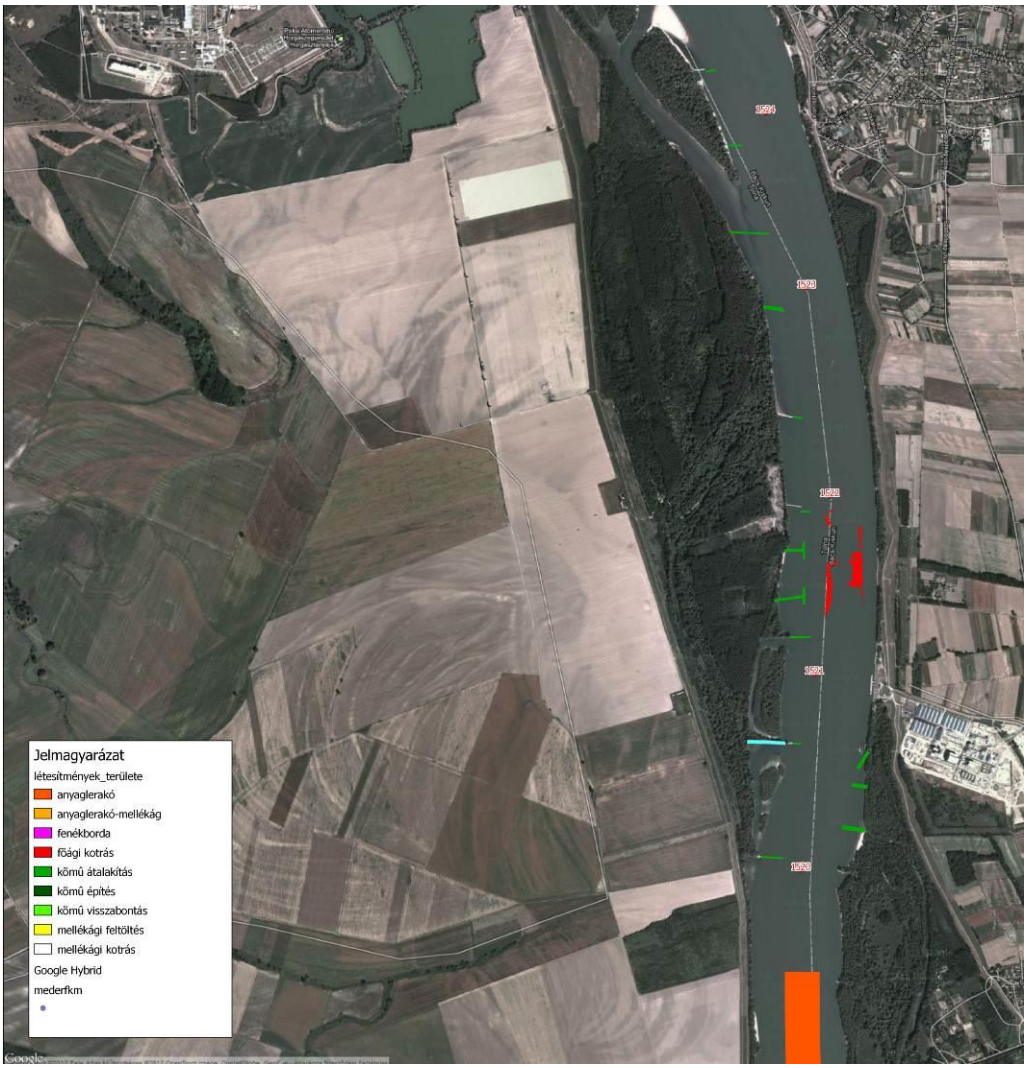


8.10-1. ábra Tervezett hajóút javító beavatkozások a Paksi Atomerőmű környezetében

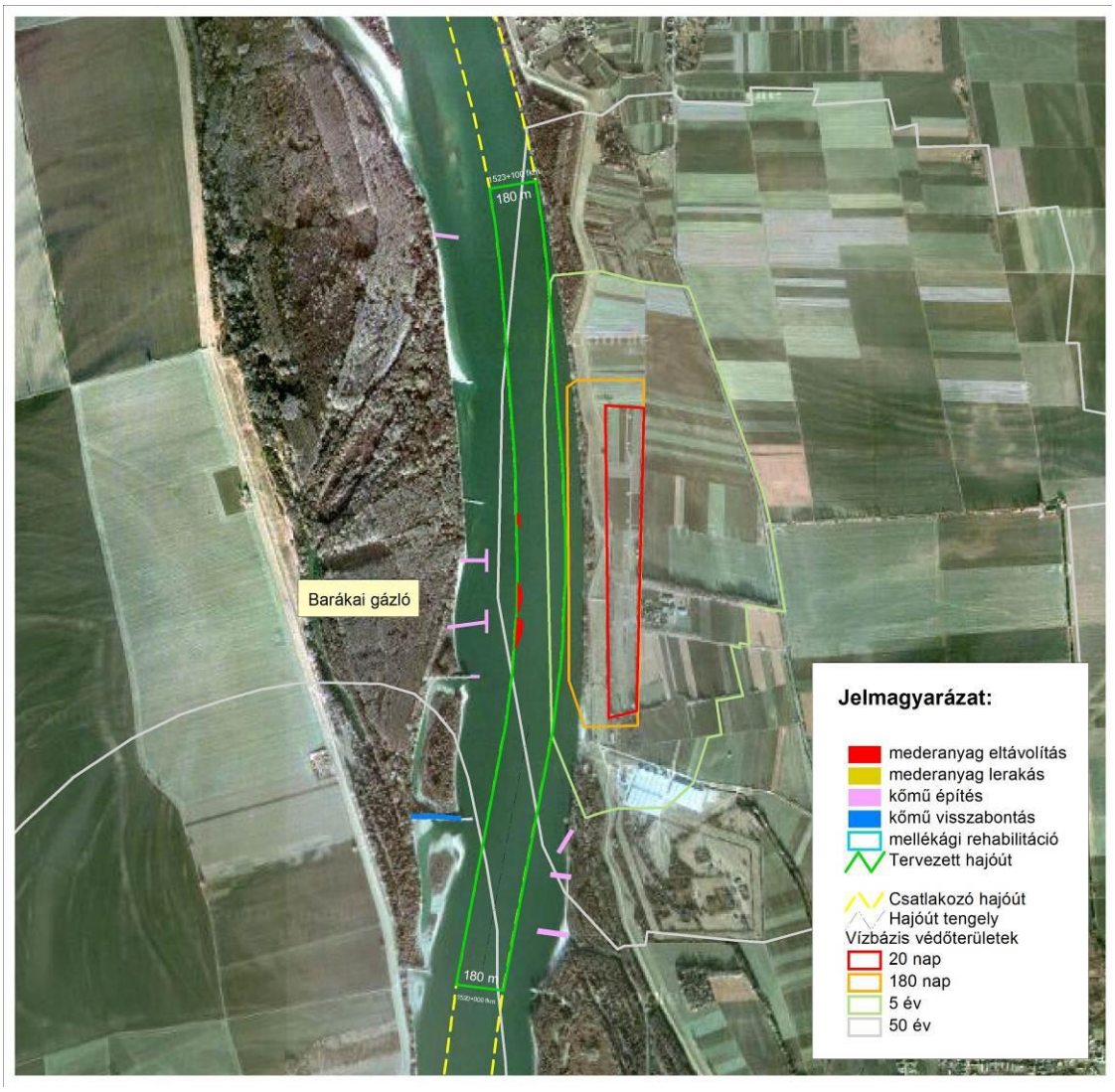
A tervezett hajózhatósági beavatkozások környezeti hatásainak vizsgálata keretében megállapították, hogy a hajózhatóság érdekében a Paksi Atomerőmű környezetében tervezett két beavatkozási hely mederrendezési hatásai lokálisan a beavatkozási helyek közvetlen környezetében fejtik ki csak vízszintmódosító hatásaikat, így a Szob-D-i országhatár Duna mederszakaszon az összes tervezett mederrendezési beavatkozások hatásai lokális kiterjedésűek így a beavatkozási helyek egymástól való távolsága miatt, akkumulálódó hatásokra nem számíthatunk. Emiatt a következőkben a Paksi Atomerőmű telephelyének (vízkivételének) környezetében a Paksi szűkület és Barákai gázló területén tervezett mederrendezési beavatkozások (lásd az alábbi ábrákat: 8.10-2. ábra, 8.10-3. ábra és 8.10-4. ábra) figyelembevételével végzünk modellvizsgálatot - a hajózási kisvízhozamra (1180 m^3/s), az 1%-os valószínűségű kisvízhozamra (524 m^3/s) és az elmúlt 20 év legkisebb vízhozamára: Q =972 m^3/s (Duna, Paks, 2011.12.03.), amely utóbbi vízhozamot az Alsó-Duna-völgyi Vízügyi Igazgatóság, 2013.04.16-án közölt –, a tervezett beavatkozások vízszintváltozási hatásának értékelésére.



8.10-2. ábra A Paksi szűkület rendezésének tervezett beavatkozásai (hajózhatóság fejlesztése)



8.10-3. ábra Barákai gázló rendezésének tervezett beavatkozásai (hajózhatóság fejlesztése)



8.10-4. ábra Hajóút a Barákai gázló környezetében (hajózhatóság fejlesztése)

A tervezett mederrendezési beavatkozások (szabályozási művek építése) hatásukat csak az érintett Duna-szakaszon fejtik ki, a folyam más szakaszán (nevezetesen az Erőmű hidegvíz csatornáját közrefogó környezetben) az áramlási viszonyokra, vízszintekre, meder-fejlődési, meder-alakulási folyamatokra gyakorolt hatás nem jelentkezik, az akkumulálódó hatásukkal nem kell számolni.

A Paksi hűtővíz csatornára közrefogó két beavatkozási hely közül a Paksi szűkület kiváltása vízszintemelő keresztirányú művekkel történik, két meglevő sarkantyú 50-50 méteres meghosszabbításával. A beavatkozás célja a folyam jobb partja közelében áramlási árnyékban időnként kialakuló hajóút szűkület kiváltása a vízfelszín megemelésével. A Barákai gázlóban nyolc új sarkantyú megépítését, egy régi keresztgát visszabontását, továbbá öt régi keresztgát hosszabbítását tervezték. A hajóút szélén a tervek szerint kb. 700 m^3 kotrásra kerül sor, mintegy 5000 m^2 területen. A fajlagos kotrási mélység 10-15 cm. A tervezett minimális mértékű kotrást a beépítésre kerülő sarkantyúk kompenzálják, a kisvízi vízjárási helyzet felszíngörbéjét megtartják, kissé emelik. Így bizonyosan megállapítható, hogy a hajózhatóság javítása érdekében tervezett beavatkozások a hűtővíz kivétele szempontjából negatív hatással nem járnak.

A tervezett hajóút felszíni vízre gyakorolt hatásainak kimutatása érdekében valamennyi beavatkozási helyen tervezett beavatkozásait beépítettük egy 1 dimenziós (1D) kalibrált hidrodinamikai modellbe. A modellt kisvizes és nagyvizes mérésekre egyaránt kalibráltuk, a Budapest-Mohács Duna szakaszra alkalmazva. Ezután elvégeztük a felszíngörbe számításokat, mind az eredeti állapotra, mind a tervezett beavatkozások utáni állapotra. A két felszíngörbe különbsége mutatja a beavatkozások vízszintekre gyakorolt hatását, a hajózási kisvízhozam (1180 m^3/s) és a 100 évente visszatérő

(1%-os) valószínűségű kisvízek esetén (**lásd:** 8.10-5. ábra). Megállapítható, hogy a Paksi szűkületnél és a Barákai gázlónál tervezett beavatkozások a Paksi Atomerőmű jelenlegi és tervezett bővítésének telephelye környezetében, mintegy +2 - +3 cm-es lokális vízszintemelést, duzzasztást eredményeznek. A Paksi Atomerőmű környezete felett a Duna kisvízkor legfeljebb 10 cm-nyi vízszintemelkedés várható, míg a telephely környezete alatti Duna szakaszon általában minimális duzzasztás várható, kivételt képez a 1522-1523 fkm szelvények környezete, ahol a hajózási kisvízhozamnál kisebb Duna vízhozam esetén legfeljebb 3 cm-es lokális vízszintsüllyedés állhat elő.

8.10-5. ábra A beavatkozások hatása a Paksi Atomerőmű telephelyének környezetében lévő Duna szakaszon, 1180 m³/s, 972 m³/s és 524 m³/s esetén (hajózhatóság fejlesztése)

A Dunaföldvár alatti Duna mederkotrások 1965. év után okoztak intenzívebb medersüllyedést. Az ipari kotrások az utóbbi időszakban nagymértékben lecsökkentek, viszont a hatásuk továbbra is érvényesül, mivel az áramlás dinamikája következtében a mederbe kotort mélyület felfelé- és lefelé rágódása a közeljövőben továbbra is várható lassú hatásfolyamat.

Vizsgálataink igazolták, hogy a Duna tervezett hajózhatósági beavatkozásai, a Duna kisvízszintjeinek tartományában kismértékű pozitív hatást gyakorol a vízkivételi biztonságra, míg nagyobb vízhozamok esetén a vízszintemelő hatás, a vízhozamok emelkedésével fordított arányban csökken, ami árvízvédelmi szempontból kedvezőnek mondható.

Fenti vizsgálatok nem tartalmaznak meder-morfodinamikai vizsgálatokat, így a mederváltozásokból adódó hosszú távú hatást nem vizsgáltuk, azonban a beavatkozás megvalósulása előtt a meder-morfodinamikai vizsgálatok elvégzését indokoltnak tartjuk.

8.11 LAGRANGE-I RÉSZECSKEKÍSÉRLET A SZENNYEZŐANYAG KÖVETHETŐSÉGE ÉRDEKÉBEN

8.11.1 KORÁBBI MÉRÉSI EREDMÉNYEK BEMUTATÁSA

Korábbi projekt keretében 2008. novemberben került sor nyomjelzős kísérletek elvégzésére. Egyrészt műanyag dobozba helyezett GPS készülékkel folyamatos pályavonalat rögzítettek, másrészt teniszlabdákkal a diszperziós tényező becslésére alkalmas szóródást mérték föl.

A mérési adatok és a számítások eredményei kapcsán a következőket állapították meg:

A labdaszórásos kísérletek tapasztalatai nagyon hasonlóak a nyomvonal rögzítés esetében tett megfigyelésekhez:

> Az úszók csóván belüli, keresztirányú eloszlása nagyban függ a bebocsátás helyétől. Míg az északi és középső sorozatban indított nyomjelzők döntően a csóvahatár – és egyben a sodorvonal – közelében található, 50-70

méteres sávban mozognak, addig a déli pontban bebocsátott úszók közel egyenletesen megtalálhatóak a csóva teljes tartományában.

A keresztgát áramlásra gyakorolt domináns hatása mindkét nyomjelző esetében egyértelműen kimutatható.

A diszperzió mértékére tett különböző becslések abszolút értékben a 10^{-1}-10^{0} m²/s tartományban mozognak (3.10 ábra), ami ugyan egy nagyságrenddel meghaladja a Duna hazai, zavartalan szakaszaira vonatkozó megfigyeléseket (0.05-0.2 m²/s), mindenképpen reálisnak tekinthető. A szelvényenkénti többlet hőáramok segítségével korábban elvégzett (BME VKKT 2006. Szintézisjelentés, 5.3 alfejezet), kevésbé részletes becslések eredményei (3,31 és 4,45 m²/s) és a 2008. évi nyomjelzős kísérletek alapján számított értékek viszonylag jó egyezést mutatnak.

A tényező becsült értéke, illetve annak hosszirányú változása nagymértékben függ a nyomjelzők bebocsátási helyétől. Az északi és déli sorozatok lényegesen érzékenyebbnek bizonyulnak a hossz menti pozícióra, mint középső, vagy az összevont minta. Ez különösen a 1525+500 fkm szelvény esetében mutatkozik meg, ahol az egyes sorozatokhoz tartozó értékek többszörösen meghaladhatják egymást.

A keresztgát transzportra gyakorolt hatása magyarázza a diszperziós tényező értékének jelentős mértékű hosszirányú változását. A műtárgy környezetében a becslések alapján igen jelentős negatív diszperzióval kell számolni, melynek – abszolút – nagysága az északi és a déli sorozat esetében is meghaladja a csóva többi részére jellemző értékeket. Bár ez a korábbi vizsgálatok alapján már valószínűsíthető volt, a feltevés egyértelmű igazolását a Lagrange-i nyomjelzős kísérletek adják.

8.11.2 A KÍSÉRLET ELMÉLETI HÁTTERE ÉS KIVITELEZÉSÉNEK MÓDSZERTANA

8.11.2.1 Elméleti háttér

A diszperziós tényező becslésére az 5. fejezetben már bemutattunk két módszert és azok eredményeit. Itt az előzőkben felvázolt harmadik lehetőség, a Lagrange-i alapú kísérlet értékelésével foglalkozunk.

A kísérletből származó adatokat a diszperziós tényező értékének becslésére használtuk fel. Ehhez a momentumok módszerét alkalmaztuk. Az eljárás alapjául a terjedést leíró transzport-egyenlet szolgál. Ennek második (keresztirányú) momentumát képezve a megfelelő diszperziós tényezőre közönséges differenciálegyenlet nyerhető, ami a koncentráció-, sebesség- és mélységmező ismeretében megoldható. Jelen vizsgálat során a mélység mentén integrált koncentrációmezőt az úszók térbeli eloszlása helyettesíti.

A számítási módszer megegyezik a Somlyódy (2008) által ismertetett eljárással.

Mivel csak a mérési keresztszelvényekre vonatkozóan állt rendelkezésre információ, ezért elsőként szükséges volt a térben szórtan elhelyezkedő észlelési pontoknak ezen egyenesekre elvégzett vetítése. Eredményül mindhárom szelvényre a különböző pontokból indított úszó-sorozatok diszkrét eloszlásai adódtak.

A második lépést a keresztirányú momentumok felírása és a diszperziós tényező becslése jelentette.

Utóbbit a momentum szelvényenkénti változása alapján becsültük az alábbi egyenlet alapján:

$$D_y = \frac{1}{2}\frac{d\sigma_y^2}{d\tau}, \qquad (8.11\text{-}1)$$

ahol D_y – a keresztirányú diszperziós tényező [m²/s]
σ^2_y – a második keresztirányú momentum [m²]
τ – levonulási idő [s]

A momentumok számításához diszkrét eloszlások esetén, valamint az egyes koncentráció-értékeket az adott függélyhez rendelt szelvénydarabon észlelt úszók számával helyettesítve az alábbi összefüggés használható:

$$\sigma^2_{y(i)} = \frac{\sum_{j=1}^{n} h_j \cdot v_j \cdot n_j \cdot \Delta y_j \cdot (y - y_0)^2}{\sum_{j=1}^{n} h_j \cdot v_j \cdot n_j \cdot \Delta y_j} \qquad (8.11\text{-}2)$$

ahol	σ^2_y	–	a második keresztirányú momentum	[m²]
	h	–	vízmélység	[m]
	v	–	sebesség	[m/s]
	n	–	függélyhez rendelt szelvénydarabon észlelt úszók száma	[-]
	Δy	–	a függélyhez rendelt szelvénydarab szélessége	[m]
	y	–	az úszó parttól mért távolsága	[m]
	y_0	–	az úszók parttól mért átlagos távolsága az első szelvényben	[m]
	i	–	szelvény sorszáma	[-]
	j	–	függély sorszáma	[-]

Az egyenletben szereplő y_0 tag alkalmazása kényszerűségből szükséges, segítségével vesszük figyelembe a melegvíz bevezetés nem pontszerű jellegéből és a kezdeti impulzus-kiegyenlítődésből adódó sajátosságokat. Az ADCP mérő hibája miatt hiányzó sebesség- és vízmélység-adatokat korábbi, azonos vízállásnál történt mérésből helyettesítettük.

A levonulási időket az indulási és érkezési időpontok különbségéből számítottuk. Ez lehetővé tette, hogy a diszperzió mértékét hosszirányban

(a) szakaszosan, az egyes szelvények közti távokra, és

(b) a bevezetéstől kezdve aggregáltan is becsülhessük.

Utóbbi leírásmód átfogó képet nyújt a csóva vizsgált részén tapasztalható keveredési folyamatok mértékéről, míg az (a) megközelítés a diszperziós viszonyok rövid szakaszokon előálló változásaira irányítja rá a figyelmet. Emellett a momentum szelvényekre vonatkozó értékeit az északi, középső és déli pontokból indított sorozatokra egymástól elkülönítve és összesítve is meghatároztuk. Így a diszperziós tényezőt nem csak a hosszirányú távolság, hanem a bevezetési hely függvényében is meg tudtuk határozni (ez a csóva keresztirányú tagozódásáról nyújt információt).

A könnyen, nagy mennyiségben beszerezhető használt teniszlabdák alkalmazásával elsősorban a folyóbeli anyag transzport mennyiségi jellemzésére nyílik mód. Az eljárással a diszperziós jelenségek kitűnően szemléltethetők és számszerűsíthetők. A teniszlabdák pályája megfelelő adagolás mellett jól nyomon követhető. Így az úszók indítási és észlelési helyének módszeres kombinálása révén a diszperzió mértéke és változása nem csak hossz-, hanem keresztirányban is meghatározható.

A nyomjelzők kapcsán fontos megjegyezni, hogy azok csak a felszíni jelenségek vizsgálatára alkalmasak. Ez felveti a kérdést, hogy a diszperzió becslése során hogyan érdemes eljárni:

(1) mélység mentén integrált megközelítést alkalmazva, amivel feltételezzük, hogy a felszíni észlelések megfelelően reprezentálják az egész vízoszlopot; vagy

(2) síkáramlással számolva, ami csak a felszínről nyújt információt.

Technikailag ez a transzportegyenlet megoldása során jelent különbséget. Az (1) esetben az egyenlet formája változatlan, a sebességek függély menti átlagok. Ezzel szemben a (2) esetben a vízmélység nincs figyelembe véve, továbbá a sebességek felszíni értékek. Feltételezzük, hogy a két megközelítés közötti különbség lényegesen kisebb, mint a diszperziós tényező okozta bizonytalanság.

A kísérlet végrehajtását az alábbiak szerint terveztük.

Kis vízállás (Q<1500 m³/s) mellett szerettük volna az úsztatásos kísérletet végrehajtani, ugyanis a korábbi tapasztalatok alapján - a visszavezetett melegvíz elkeveredése szempontjából - a kisvizes időszak kritikus. Terveink szerint a mérés két részből állt volna: a teniszlabdák úsztatásából (Lagrange-i részecskekísérlet), illetve ADCP műszerrel történő sebességmérésből.

8.11.2.2 Részecskekísérlet

A teniszlabdák indítása a melegvízcsatorna Dunába való betorkollásánal található energiatörő műtárgy három különböző pontjáról történik.

A teniszlabdák úsztatásának tervét a 8.11-1. táblázatban szemléltetjük.

indítási hely: / érkezési hely:	Csóva fölső (északi) széle („E" – 1526,3 Fkm)	Csóva közepe („K" – 1526,3 Fkm)	Csóva alsó (déli) széle („D" – 1526,3 Fkm)
Az indítási helytől ~250m-re (sarkantyú, 1525+800 fkm)	1E: 1-30. labda	1K: 31-60. labda	1D: 61-90. labda
Az indítási helytől ~500 m-re (1525+600 fkm)	2E: 1-30. labda	2K: 31-60. labda	2D: 61-90. labda
Az indítási helytől ~800 m-re (keresztgát,1525+500 fkm)	3E: 1-30. labda	3K: 31-60. labda	3D: 61-90. labda

8.11-1. táblázat Indítási és érkezési helyek

A terv szerint legalább 90 db labdára van szükség, amelyek közül az elveszőket tartalékokkal kell pótolni. A labdák indítása fél percenként történik. A labdák sorszámozva vannak; az első indításának időpontja rögzítésre kerül; az első harminc nyomjelző indítása az „E" helyről történik. A második harminc darab indítása a „K" helyről, a harmadik adag pedig a „D" helyről indul. A labdák észlelése („kifogása") csónakkal történik, és a kifogás pillanatában GPS-szel rögzítésre kerül a csónak aktuális helye és az idő, valamint a kifogott labda sorszáma.

90 db labda érkezése után az összes kifogott labdát visszahozzák az energiatörő műtárgyhoz, és indul a második sorozat (újra 3 x 30 db), amelyet valamivel lejjebb, az „500 m-es szelvény"-ben fognak ki. Az indítási, érkezési helyek és időpontok ismét rögzítésre kerülnek. Azonos módon indul a harmadik sorozat, melyet a keresztgát vonalában fognak ki.

A 8.11-1. táblázathoz is kapcsolódóan megjegyezzük, hogy egymásnak egészen ellentmondó adatokat találtunk a keresztszelvények elnevezését, számozását illetően. A részletek ismertetése és megvitatása helyett fogadjuk el a fenti szelvényezést olyan értelemben, hogy a jelölt szelvények egyszerűen elnevezésként, azonosításként szolgálnak, de nem alkalmasak távolságszámításra. A 8.11-1. táblázatban alkalmazott szelvényelnevezések megegyeznek a Somlyódy, (2008) dokumentum jelöléseivel. Tájékoztatásul közlünk egy másik megrendelői adatszolgáltatással való összevetést is.

Észlelési hely száma	Szelvényt jelölő műtárgy, szokásos elnevezés	Somlyódy, 2008	Aquaprofit, 2007
vízre eresztés	energiatörő műtárgy	-	1526,30
1	sarkantyú	1525,80	1526,10
2	„500 m-es szelvény"	1525,60	1525,70
3	keresztgát	1525,50	1525,55

8.11-2. táblázat Folyamkilométer-szelvények különböző források szerint

8.11.2.3 Sebességmérés

A sebességmérés a tervek szerint a három kifogási-észlelési szelvényben történik, felszínközeli sebességet mérünk a csóva terjedelmében.

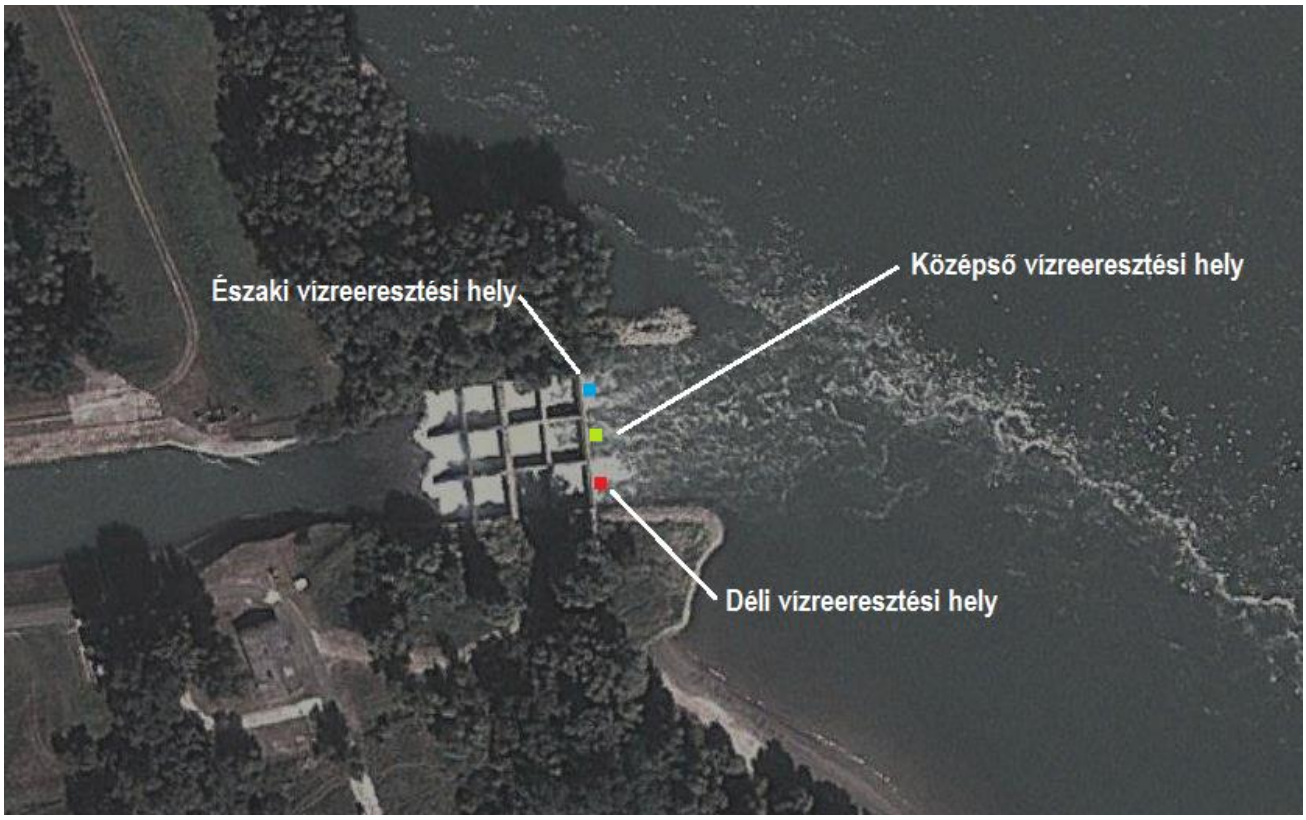
8.11.3 AZ ELVÉGZETT KÍSÉRLETEK BEMUTATÁSA, ÉRTÉKELÉSE

A kísérletre a viszonylag kedvező vízállás, és a közeledő rossz idő miatt 2012. szeptember 26-án kerítettünk sort. Vízállás a Paksi mércén ezen a napon reggel hétkor 95 cm, apad; a Q-H-görbe alapján megállapított vízhozam ~1500 m^3/s. A kísérleti hajót a VITUKI szolgáltatta, akárcsak annak személyzetét (2 fő). A BME részéről további két személy vett részt a kísérletben. A hajót Budapestről utánfutón szállítottuk Paksig, ott pedig a 1530.5 fkm szelvényben található vízre eresztési helyen tettük vízre. Innen hajóztunk le a melegvízcsatorna torkolatához.

8.11.3.1 Részecskekísérlet

A labdák vízre eresztését egy személy (Kardos Máté, BME) végezte. A kísérlet megkezdése előtt a nála lévő óra a GPS órájával egyeztetésre került.

Az energiatörő műtárgy kazettás szerkezetű: a melegvízcsatorna tengelyének irányában 4, keresztirányban 3 kazettából áll (összesen 12 kazettából). Egy kazetta szélessége ~12 méter. A labdák vízre engedése az utolsó kazettasor Duna felőli végéről történt, mindegyik kazettának a közepéből, tehát az energiatörő műtárgy alatt közvetlenül történt a labdák vízre eresztése. A vízre engedés tehát nem a csóva közepén és két szélén, hanem a csóva 1/6-odánál, 3/6-odánál (azaz közepén) valamint 5/6-odánál történt. A megértést a 8.11-1. ábra segíti.



8.11-1. ábra: Vízre eresztési helyek

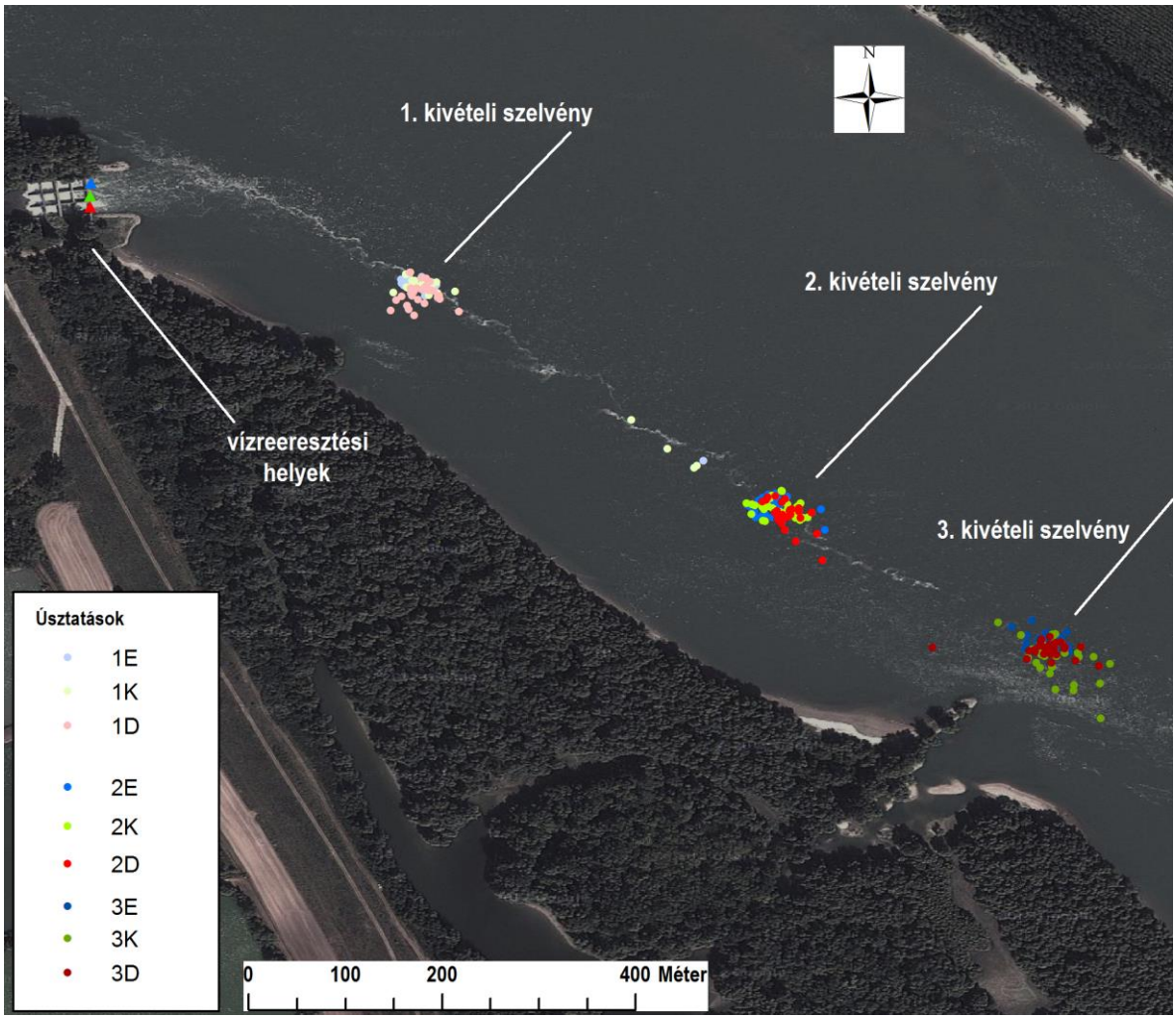
A labdák kifogását a csónakban maradt három munkatárs: Bor Anikó (BME), Pfenninberger Ákos (VITUKI) és Kalina György (VITUKI) végezték.

Az észlelés a következőképpen történt: a csónak az észlelési szelvényben várakozott, és egy-egy labdának a szelvénybe történő érkezésekor azt a csónakkal megközelítettük, majd a GPS készülék „Mark" gombjának megnyomásával rögzítettük a csónak helyét, a kifogás idejét; valamint analóg módon (papír, toll) a GPS által a ponthoz rendelt számot és a labda sorszámát. A rögzítéshez Garmin GPSmap 60 CSx típusú készüléket használtunk.

A labdákat az első indításkor sorszámoztuk. Minden labda indítási és érkezési helyét és idejét az elektronikusan mellékelt Excel táblázatban közöljük. Két labda indítása nem sikerült, és 5 labdát nem találtak meg a lejjebb fekvő szelvényekben. Minden sorozat után az esetlegesen elveszett labdákat pótoltuk.

Az első sorozat második indítási helyéről történő indításokat (1K csoport) rendőrök zavarták meg, így itt időkihagyással történt az indítás. A rendőrökkel való kommunikáció érdekében a csónaknak is föl kellett jönnie az első érkezési szelvényből, ez alatt 5 labda (egy az 1E csoportból és négy az 1K csoportból) tovább úszott a tervezettnél, csaknem a második észlelési szelvényig (lásd: 8.11-3. ábra).

8.11-2 ábra: Teniszlabdák az 1E csoport indítása közben



8.11-3. ábra: Az úsztatási kísérlet eredményei

8.11.3.2 Sebességmérés

Az ADCP-s mérés az adattovábbító kábel hibája miatt nem sikerült. Sajnos a hibát már a teniszlabdás kísérlet végrehajtása után vettük észre, így a mérés elhalasztásáról már nem lehetett szó.

A hiányzó sebességet becsülhetjük egyrészt a teniszlabdák indítási, észlelési helyének és –idejének ismeretében. Útvonaluk ismeretének hiányában egyenes vonalú mozgást feltételeztünk.

8.11.4 EREDMÉNYEK ÖSSZEFOGLALÁSA: A KÍSÉRLETI EREDMÉNYEKBŐL SZÁMÍTOTT DISZPERZIÓS TÉNYEZŐ

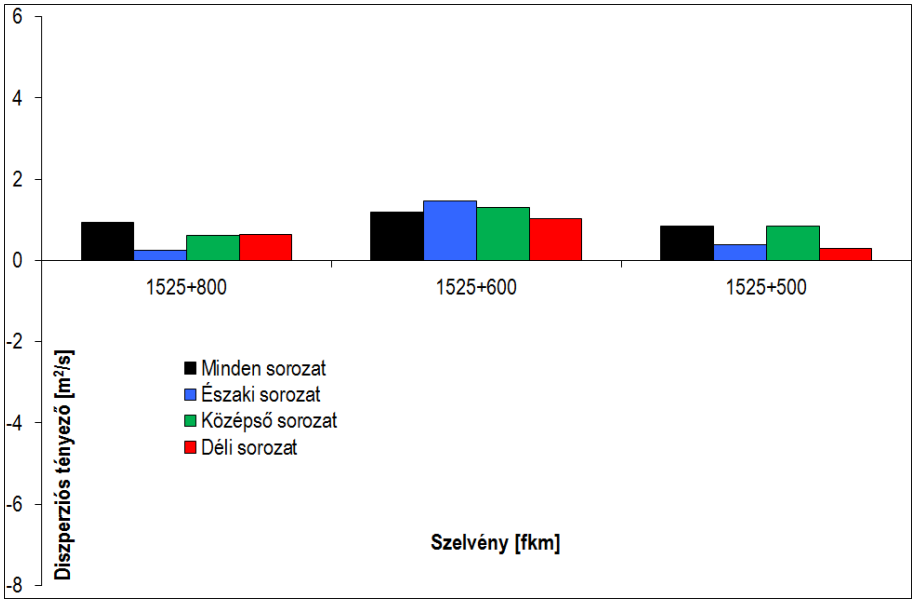
Az észlelési pontok ábrázolása alapján a következő megfigyeléseket tehetjük.

Az első észlelési szelvény a vízbeeresztési hely alatti első sarkantyú vonalában, megközelítőleg az 1525+800 fkm szelvényben található. Az úsztatott teniszlabdák a csóva belső 4/6-odát jelképezik. A csóvának ez a belső része ~300 m megtétele után mintegy kétszeresére (~45 m) terjed ki. Az északi illetve a középső indítási pontról indított jelzők a csóva középső és északi részén találhatók. A déli pontról indított jelzők a csóva teljes terjedelmében megtalálhatók. Világosan látható, hogy a part menti mintegy 60 m-s sávot a csóva nem érinti.

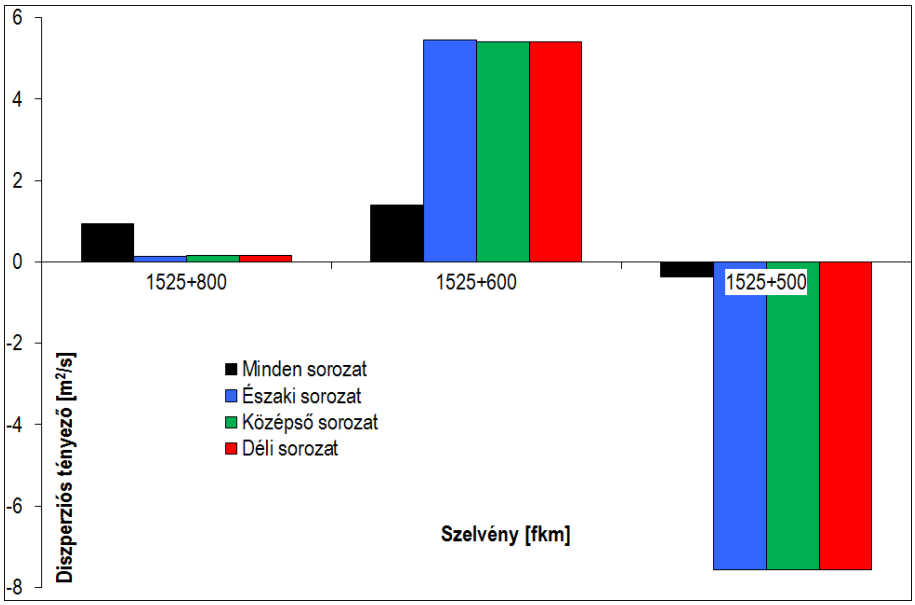
A második észlelési szelvényre a csóva még jobban eltávolodik a parttól – ez a part geometriájából is adódik. A csóva szélessége a megfigyeléseink szerint nem növekszik, viszont a csóván belül már teljes az átkeveredés: mindhárom vízbeeresztési helyről indított labdák megjelennek a csóva teljes szélességében.

A harmadik észlelési szelvényhez érve valamelyest megnövekszik a csóva szélessége, és tovább nő az átkeveredés.

A diszperziós tényező becslési eljárás eredményeit a 8.11-4. ábra és a 8.11-5. ábra szemlélteti (rendre a hossz mentén aggregált, illetve szakaszosan számolt értékekre vonatkozóan). Mindkét ábrán a „Minden sorozat" jelöli a szelvényeken belüli összes észlelésre, indítási helytől függetlenül elvégzett becslések eredményeit.



8.11-4. ábra A diszperziós tényező teljes tartományra becsült értéke a bevezetési hely függvényében



8.11-5. ábra A diszperziós tényező mérési szelvények közti szakaszokra becsült értéke a bevezetési hely függvényében

A mérési adatok és a számítások eredményei kapcsán a következők állapíthatók meg:

1. A labdaszórásos kísérletek azt mutatják, hogy
   a. Az úszók csóván belüli, keresztirányú eloszlása alig függ a bebocsátás helyétől. Míg az első észlelési szelvényben még föllelhető a bebocsátás helyére utaló elhelyezkedés („északi labdák" a csóva jobb part felé eső szélén, „déli labdák" a csóva bal part felé eső részén), addig ez a második és harmadik észlelési szelvényről már nem mondható el. Utóbbiakban ugyanis bármelyik pontról indított labdák a csóva teljes tartományában egyenletesen helyezkednek el.
   b. A keresztgát áramlásra gyakorolt domináns hatása egyértelműen kimutatható.
2. A diszperzió mértékére tett különböző becslések a 10^{-1}-10^{0} m²/s tartományban mozognak, de lokálisan előfordulnak negatív értékek is (lásd később, illetve a 8.11-4. ábran). A pozitív tartomány nagyságrenddel meghaladja a Duna hazai, zavartalan szakaszaira vonatkozó megfigyeléseket (0.05-0.2 m²/s), azonban hasonló változékonyságot mutat a 3D modellből kapottakkal. Mindkettő a lokális változások hatásait fejezik ki.
3. A tényező becsült értéke, illetve annak hosszirányú változása nagymértékben függ a nyomjelzők bebocsátási helyétől. Az északi és déli sorozatok lényegesen érzékenyebbnek bizonyulnak a hossz menti pozícióra, mint középső, vagy az összevont minta. Ez különösen a 1525+500 fkm szelvény esetében mutatkozik meg, ahol az egyes sorozatokhoz tartozó értékek egymás többszörösei is lehetnek (8.11-5. ábra; fontos megjegyezni, hogy az összevont adatok alapján számított diszperziós tényező nem adódik az egyes sorozatokra vonatkozó értékek súlyozott átlagának).
4. A keresztgát transzportra gyakorolt hatása magyarázza a diszperziós tényező értékének jelentős mértékű hosszirányú változását (8.11-5. ábra). A műtárgy környezetében a becslések alapján igen jelentős negatív diszperzióval kell számolni (ami azt jelenti, hogy a Fick féle gradiens feltevés nem teljesül), melynek – abszolút – nagysága mindhárom sorozat esetében meghaladja a csóva többi részére jellemző értékeket (azaz a területi átlag becslése roppant bizonytalan). Bár ez elméleti megfontolások alapján is valószínűsíthető volt, a Lagrange-i nyomjelzős kísérletek egyértelmű igazolást adnak.
5. Összefoglalóan, a Paks környéki, behatóan kutatott folyószakaszra rendelkezünk részletes vizsgálatokkal (amelyek nagyban elősegítik megértésünket), azonban, az erőmű alatti kevéssé vizsgált hosszabb szakaszra nem tudunk mást tenni, mint a bevált empirikus összefüggéseket alkalmazni (lásd az 5. fejezetet is).

A hossz - és keresztirányú diszperziós tényezők (D^*_x és D^*_y) a turbulencia és a térbeli (2D tárgyalásmód esetében a függély menti) egyenlőtlenségek hatását tartalmazzák, Fick típusú transzportot feltételezve. D^*_x alapvetően befolyásolja valamely szennyező hullám levonulását és ellapulását, D^*_y pedig a hőmérséklet eloszlását és a mértékadó +500 m szelvényben a maximális érték kialakulását.

A diszperziós tényezők többféleképpen becsülhetők: (i) a vízben oldódó nyomjelző adagolásával, a koncentrációk mérésével, majd a 2D transzport egyenlet D^*_x és D^*_y-ra történő megoldásával; (ii) a vízfelszínen úsztatott, nagy számú szilárd részecskék (esetünkben tenisz labdák) adagolásával, a pályák nyomon követésével és a momentumok módszerével történő kiértékelésével; (iii) az áramlás számításával turbulencia modellel kiegészített 3D hidrodinamikai modellből, majd a mélység menti inhomogenitások származtatásával.

(i) A nyomjelzős mérések alapján a Duna középső szakaszára D^*_y = 0,1 m^2/s körüli értékek adódtak (Somlyódy, 1985). Ezek a csóvára vonatkozó átlagok, a keresztszelvény jellemzői ezeknél minden bizonnyal nagyobbak.

(ii) Labdás kísérletet ((ii) módszer) kétszer végeztünk: 2008-ban és a jelen projekt keretei között. Lényege az, hogy a σ^2_y második keresztirányú momentumot a labdák szóródásából becsüljük, majd D^*_y-t ebből nyerjük. A két kísérletsorozat eredményei összhangban voltak egymással. Elemzésük alapján a következő megállapítások tehetők:
- Lokális hatások (például a keresztgát) hossz- és keresztirányban is erősen befolyásolják D^*_y értékét. Jellemző, hogy D^*_y helyenként felvesz néhány m^2/s körüli értéket, majd negatívvá válik. Ez utóbbi arra utal, hogy a Fick típusú transzport feltevése nem mindenütt teljesül, a konvektív jellegű hatások nem írhatók le gradiens típusú feltevéssel.
- Az átlag 1 m^2/s körüli (azaz nagyságrenddel nagyobb, mint az (i) módszerrel adódott), de kérdéses, hogy a „meglepő" változások mellett szabad-e egyáltalán átlagolni (negatív diszperzió fizikailag aligha értelmezhető).

(iii) A 3D hidrodinamikai modell sebességteréből a diszperziós tényezők hármas integrál segítségével számíthatók, amiben az egyes sebességkomponensek (v_x és v_y) mélység menti átlagértéktől való eltérései (v_x'' és v_y'') szerepelnek (Fisher et al, 1979). A módszer előnye, hogy az lehetővé teszi a turbulens diffúziós- és diszperziós tényezők kiértékelését (x, y) függvényében. Ezek alapján a következők mondhatók:
- A diffúziós tényező a vizsgált folyószakaszon rendkívül inhomogén, a sodorvonal mentén nagy (0,1 - 0,14 m2/s), míg a két part közvetlen közelében változó, akár egy nagyságrenddel kisebb értékek (0,008 - 0,04 m2/s) is kialakulhatnak.
- Ezt jól tükrözik a diszperziós tényezők is. D^*_y=0.01 és 0.6 m^2/s között változik, miközben az átlag 0.2 m^2/s körüli, azaz közel áll az (i) becsléshez.
- A hosszirányú diszperziós tényező lokálisan szintén erősen változik, értéke lényegesen meghaladja D^*_y értékét (akár két nagyságrenddel is).

A leggyakrabban használt empirikus összefüggés-pár szerint az x és y irányú diszperziós tényezők a következőképpen fejezhetők ki:

$$D_x^* = d_x (gRI)^{0,5} R$$

$$D_y^* = d_y (gRI)^{0,5} R$$

ahol

I: meder esése [m/m],

R: a hidraulikus sugár [m],

d_x: hosszirányú diszperzió együttható, melynek értéke logaritmikus sebességprofilt és rendezett áramlást feltételezve 6 [-] körüli érték,

d_y: keresztirányú diszperziós együttható, mely a Dunára 0,6 körüli értéket vesz fel.

A fenti összefüggésekkel számolt diszperziós tényezők (D_x*=1,3 m^2/s és D_y*=0,13 m^2/s) némileg a 3D modellből nyert tartomány alá esnek. Ezt célszerű figyelembe venni a számításoknál és ennek megfelelően érzékenységvizsgálatot végezni.

8.12 MORFOLÓGIAI MODELL

Szerződésünk értelmében a kisvízi medermodellt az 1527.0 fkm – országhatár (1433.2 fkm) szakaszra, a közép- és nagyvízi medermodellt az atomerőmű-környéki 9 km-es szakaszra (1527-1518 fkm) kellett előállítanunk.

8.12.1 AZ ALAPADATOK ÁTTEKINTÉSE

A kisvízi medermodell bemenő adatait a VITUKI-tól kapott 500 m-enkénti mederfelmérések (keresztszelvények) adják. A kisvízi medermodell előállításához az 1433.2 – 1527.0 folyamkilométer szakaszon tehát 189 darab keresztszelvény állt rendelkezésünkre, melyek felmérése 2007. 04. 26. és 2008. 10. 30. között történt. A VITUKI e célra kialakított *Dr. Csoma János mérőhajó*jával szelvényenként 60 – 450 db pontban rögzítették a mederfenék szintjét. A hajó helyének meghatározása a parton elhelyezett Geodimeter segítségével +/- 5 cm pontossággal, a mélység meghatározása ultrahangos készülék segítségével történt.

A közép- és nagyvízi medermodell előállításához a hullámteret és a Barákai gázlót is magukba foglaló 100m-enkénti keresztszelvényeket, korábbi mederfelvételek és térképek felhasználásával, a VITUKI biztosította.

A Duna medrét és az árterületet magába foglaló, az árvédelmi töltésekig terjedő völgyszelvények készítésénél az alábbi forrásokra támaszkodtak:

1. A VITUKI 2010 év őszén felvett, középvízi medret tartalmazó szelvényei,
2. A Duna 1999-ben kiadott 29/3 számú vízrajzi atlasza,
3. A középvízi partvonal és árvédelmi töltés szintjei (1970-es aktualizált vízrajzi térkép),
4. A 11/2010. (IV.28.) KvVM rendelet a folyók mértékadó árvízszintjeiről.

A VITUKI 2010. évi mederfelvétele 100 m-es kiosztással készült, a terepadottságoktól függően folyamkilométerenként 8-10 mederszelvényt tartalmaz, ahol a meder-mérőrendszer kimenő adata a mérési pont vízszintes x, y koordinátája Budapesti sztereografikus vetületi rendszerben, és a függőleges z koordináta balti magassági alaprendszerben. Mivel jelenleg a vízrajzi térképek EOV (egységes országos vetület) rendszerben készülnek, a mérőhajó mérési adatait átkonvertáltuk EOV rendszerbe. A szelvények helyét a 8.12-1. ábran adjuk meg.

A mérések alapján kapott mederszelvények végpontjait meghosszabbítottuk a jobb- és a balparti árvédelmi töltésig. Az utolsó (1999. évi) vízrajzi atlasz térképét felhasználva a dunai medret az új (2010. évi) mederfelvétel alapján frissítettük.

A 11/2010. (IV.28.) KvVM rendelet szerinti mértékadó árvízszinteket az adott folyószakaszon az alábbi táblázat tartalmazza:

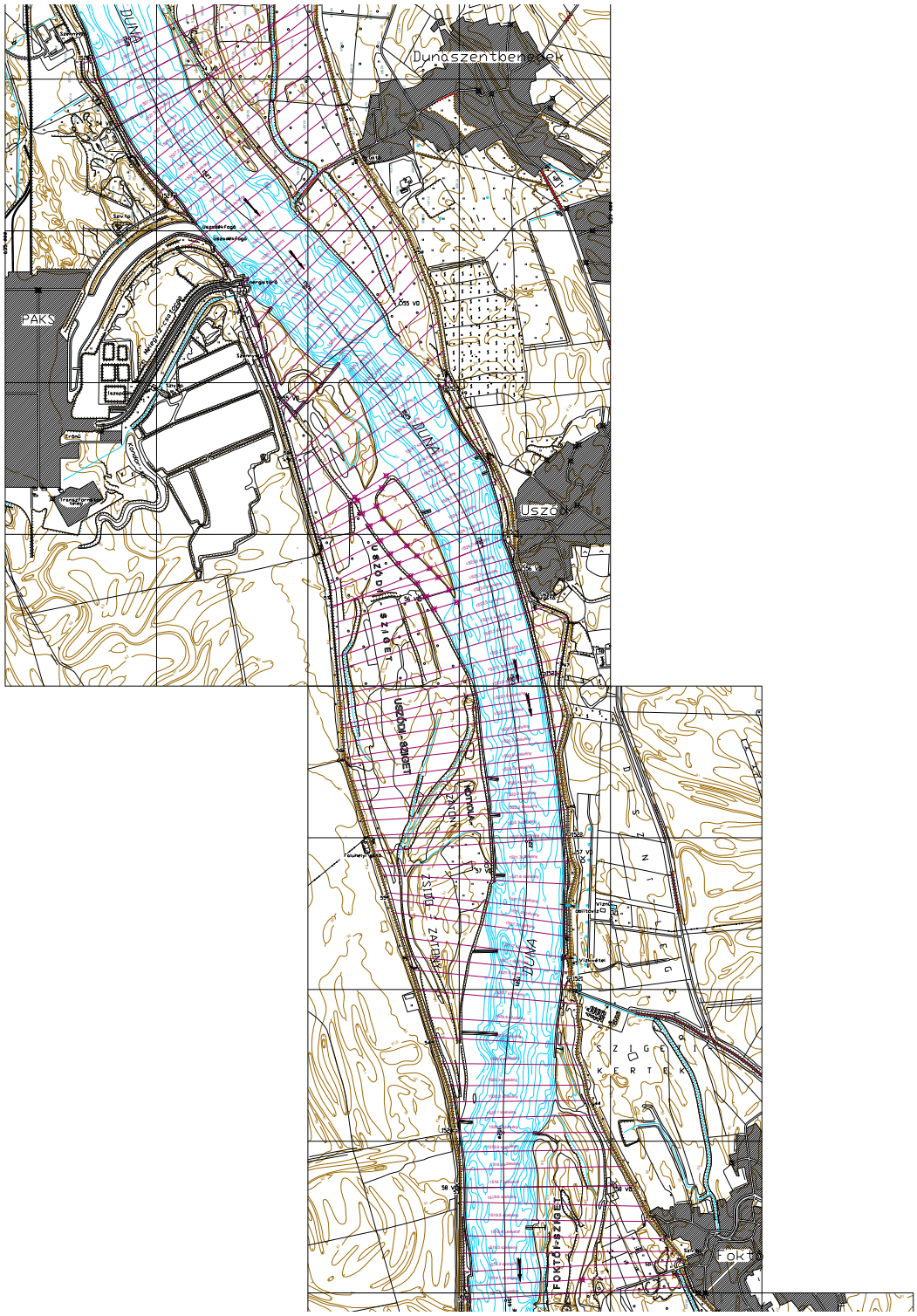
fkm	1514	1520	1521	1529	1531.3 Paksi vízmérce
MÁSz (mBf.)	93.19	93.59	94.18	94.18	94.33

8.12-1. táblázat Mértékadó árvízszintek

A rendelet 2. melléklete az adott folyószakaszon 1 m biztonsági magasságot ír elő. Mivel az árvédelmi töltések magassága nem ismert, a töltések szintjét MÁSZ+1.5 m szintre vettük fel, és ahol a part szintje ezt a szintet meghaladta, ott a magaspart szintjét adtuk meg. A megadott fkm közötti szintek magasságát lineáris interpolációval határoztuk meg.

Az árvédelmi töltések között, a kijelölt mederszelvények vonalában 1 m-es osztásközzel tereppontokat vettünk fel a 2010. évi mederfelvétellel aktualizált vízrajzi domborzati térképen és így alakítottuk ki a medret és árterületet is tartalmazó völgyszelvényeket.

Sem a dunai mederfelvétel, sem a vízrajzi térkép nem ad meg mederadatokat az uszodi zátonysziget mellékágában, ezért a szigetág 1523.8 fkm mederszelvényét a 2012. márciusi ADCP mérés mederfenék adataival adtuk meg. A mellékág partjait a vízrajzi térképről vettük le. A belépő és az azt követő szelvények szintjét sem ismerjük, de a 2004-ben végzett helyszíni mérések szerint a mellékág 1170 m^3/s vízhozamnál nem szállít vizet, már lezáródott. Ez a vízhozam közel megegyezik a Duna-bizottság (DB) 2004 vízhozamával (1180 m^3/s). A DB 2004 vízszintjét figyelembe véve a belépő szelvény (1524.8 fkm) fenékszintje magasabb, mint 84.93 mBf, így jó közelítésként ezt fogadjuk el a belépő mederszelvény legalacsonyabb pontjának.



8.12-1. ábra A közép- és nagyvízi medermodell készítésekor használt völgyszelvények

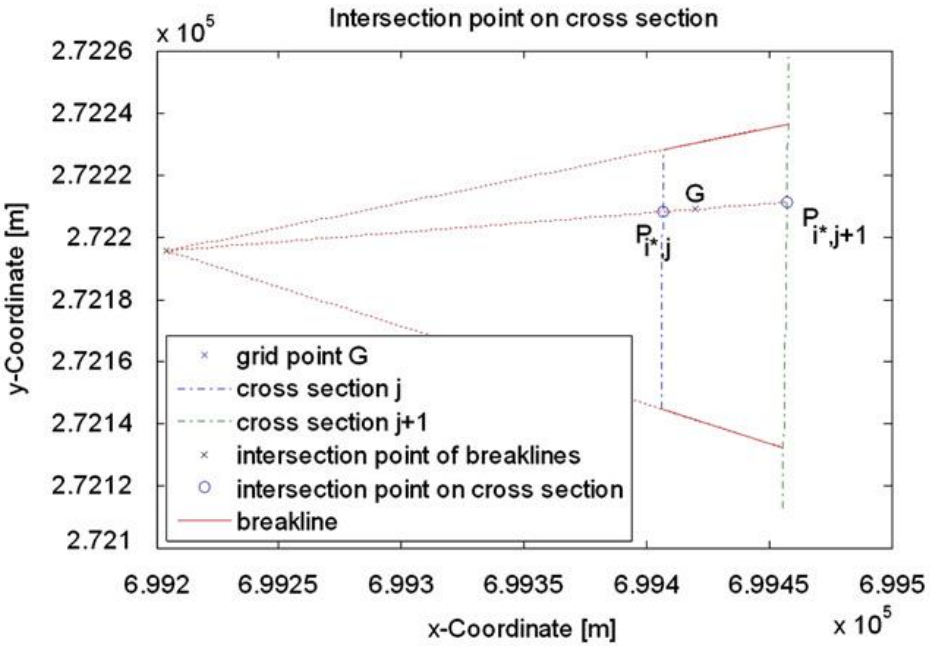
8.12.2 A RENDELKEZÉSRE ÁLLÓ MÓDSZEREK KRITIKAI FELDOLGOZÁSA, ÉRTÉKELÉSE

A feladat esetünkben tehát az, hogy ezekből a keresztszelvényekből interpoláljunk adott cellaméretű, ekvidisztáns tereprácshálót. A probléma nyilván nem új keletű, a hidrodinamikai modellek létezése óta sokan foglalkoztak vele.

Bódis Katalin (2008) doktori értekezésében hidrológiai modellezési szempontból (ám nem kifezetten medermodell-előállítási céllal) tekinti át a domborzatmodellezésben leggyakrabban alkalmazott interpolációs algoritmusokat és módszereket. Értékelése szerint az ESRI ArcGIS szoftver által TOPOGRID illetve az újabb verziókban „Topo to Raster" néven használt, az ausztráliai Hutchinson által hidrológiai modellezéshez fejlesztett domborzat-alkotó algoritmus a legmegfelelőbb. Ám még ez sem alkalmas hirtelen változó térszínek (pl. árvédelmi töltés) vagy meredek letörések (pl. magaspart) megfelelő leírására. A 8.12-4. ábra mutatja a fenti módszerrel kapott meder-rácshálót.

Merwade (2002) doktori értekezésében áttekinti a már említett ArcGIS szoftver akkori legfrisebb verziója (8.1) által felkínált módszereket. Ezek közül a legösszetettebb a Krigelés, melyet a bányászatban fejlesztettek ki. Az értekezés felhívja a figyelmet a hossz- és keresztirányban tapasztalható eltérő léptékre, és *koordináta transzformáció*t javasol a folyó középvonala mentén. Egy adott pont (és a hozzá tartozó magasság) lokalizálható derékszögű koordináták alapján (pl. Egységes Országos Vetületi rendszer (EOV) szerinti y és x koordináták), de – amennyiben a folyó középvonala ismert – úgy azt megadhatjuk, mint a folyó adott szelvényében (fkm) a középvonaltól jobbra vagy balra (+ / -) adott távolságra található pontot. Az így definiált koordinátarendszerben a folyó „kiegyenesedik", és a magasságok a már ismert módszerekkel meghatározhatók.

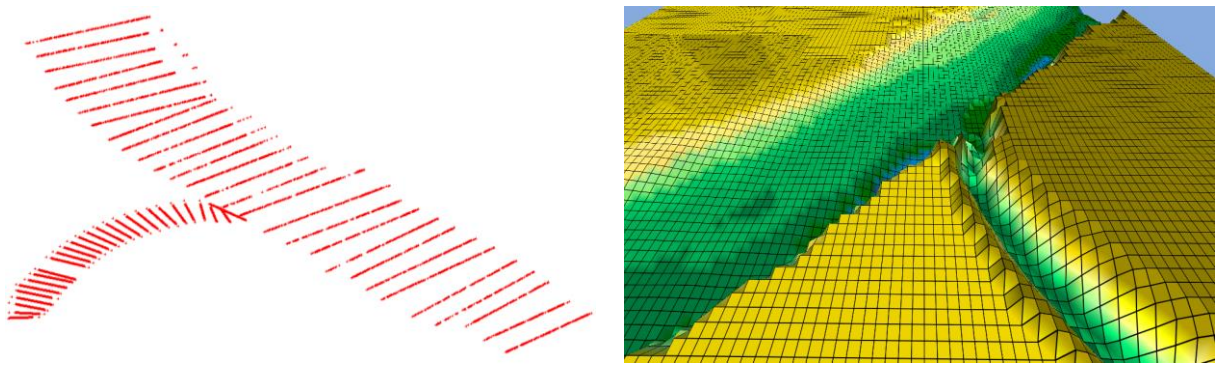
Schäppi et al. (2010) a szárazföldi domborzat modelljét kapcsolták össze a folyóvízi medermodellel. Azt találták, hogy kulcsfontosságú a partélek definiálása. Az interpoláció először egy keresztszelvényben történik, majd két keresztszelvény között a vetítési pont definiálásával végzik a számítást. Háromféle interpolációs módszer közül (lineáris, spline illetve köbös) az eltérések szórása, és szélső értékei alapján is a lineáris interpolációt találták optimálisnak mindkét (hossz- és kereszt-) irányban is. Ez a módszer – mint látni fogjuk – csaknem megegyezik az általunk már korábban kifejlesztett eljárással, azzal a különbséggel, hogy míg itt lineáris interpoláció történik, addig mi a távolság reciprokával súlyozva interpolálunk (IDW – inverse distance weighting).



8.12-2. ábra A G ponthoz tartozó magasság meghatározása a j-edik és a j+1-edik keresztszelvény i-edik pontja ismeretében (forrás: Schäppi et al. 2010.)

„A Paksi Atomerőmű hőterhelése: a monitorozás és az üzemirányítás fejlesztése" című, 2006–2008. között zajlott kutatás-fejlesztési projekt keretében BME VKKT az 1523.5 – 1527.0 fkm szakaszra állította elő a medret 100 m-enkénti

keresztszelvény-adatokból, 10 m-es cellamérettel. A számítást egyszerű gravitációs interpolációval végezték, és az előállított mederben Q<2000 m3/s Dunai vízhozammal végeztek számításokat (kisvíz). A modell implicit tartalmazta a melegvízcsatornát: annak morfológiája cellánként, mintegy oldalág szerepelt, valós geodéziai magasságokkal. Az akkori értékelés szerint a modell gyengeségeit éppen a sebesség és transzport szempontjából is kritikus pontok (torkolati helyek, sarkantyúk) jelentették: a 100 m-enkénti felmérés, de még a 10 m-es cellaméret is túl durvának bizonyult ugyanis ezek megfelelő megjelenítéséhez. (Fontoljuk meg: a melegvízcsatorna Dunába való torkollásánál néhány köbméteres energiatörő betontömbök találhatók; egy-egy sarkantyú (kőszórás) jellemző szélessége 5-10 m. Ezek megjelenítése 10 m-es cellaméret esetén nem lehetséges, pedig az áramlásra való jelentős hatásuk kétségbe vonhatatlan. Bármilyen közelítés (lokálisan durvább medersúrlódás, stb.) adathiány miatt csak spekuláció szintjén végezhető el.) Két ábrával szemléltetjük a 6-7 évvel ezelőtti morfológiai modellt (Somlyódy, 2006).



8.12-3. ábra A 2006-os jelentésben bemutatott morfológiai modell (jobbra) és az alapjául szolgáló keresztszelvények (balra)

A 2006-os jelentés javasolja más interpolációs módszerek kipróbálását.

8.12.3 A VIZSGÁLAT MÓDSZERTANA

Ahhoz, hogy az 500m-enkénti felmért keresztszelvényekből terepgridet készítsünk, elsőként kereskedelmi szoftverekbe épített interpolációs algoritmusokat használtunk Az ESRI ArcGIS szoftver több beépített modulját is kipróbáltuk (Legközelbbi Szomszéd, Krigelés, IDW, Spline, Topo to Raster), melyek eredményeit a 8.12.4. fejezetben mutatjuk be. Majd, – mivel ezek nem vezettek megfelelő eredményre – az interpolációt saját fejlesztésű szoftverrel végeztük el.

A 2D-s hidrodinamikai számítások bemenő adataként egy korábbi projekt keretében elkészítettük a bevezetés alatti 10 km-es szakasz terepmodelljét. Az alapadatok akkor az adott projekt keretében készült 100 m-enkénti keresztszelvények voltak, melyekből 10 m x 10 m-es cellákra számoltuk a „z" medermagasságot, saját fejlesztésű eljárással, amit kivonatosan az alábbiakban ismertetünk.

A morfológiai modell a topográfiai mérési információk szabályos rácsháló́ra történő interpolálásával jön létre. Az eljárás I. lépésében az inputot jelentő mederszelvény mérések alapján segédrácsot készítünk. Ez a segédrács szolgál majd a tényleges interpoláció (II. lépés) alapjául.

A rácsháló előállítása két lépésben történik.

I.1. A keresztszelvények kimérése során alkalmazott véletlen elhelyezkedésű mérési függélyek alapján új felosztás levezetése, melynek eredményeként minden szelvényben azonos számú, és relatív osztásközű pontkiosztás jön létre.
I.2. A mérési szelvények közé eső segédszelvények meghatározása az 1. lépésben kijelölt szelvény-felosztás összetartozó pont-párjai között elvégzett egyenletes relatív felosztású, lineáris interpoláció segítségével.

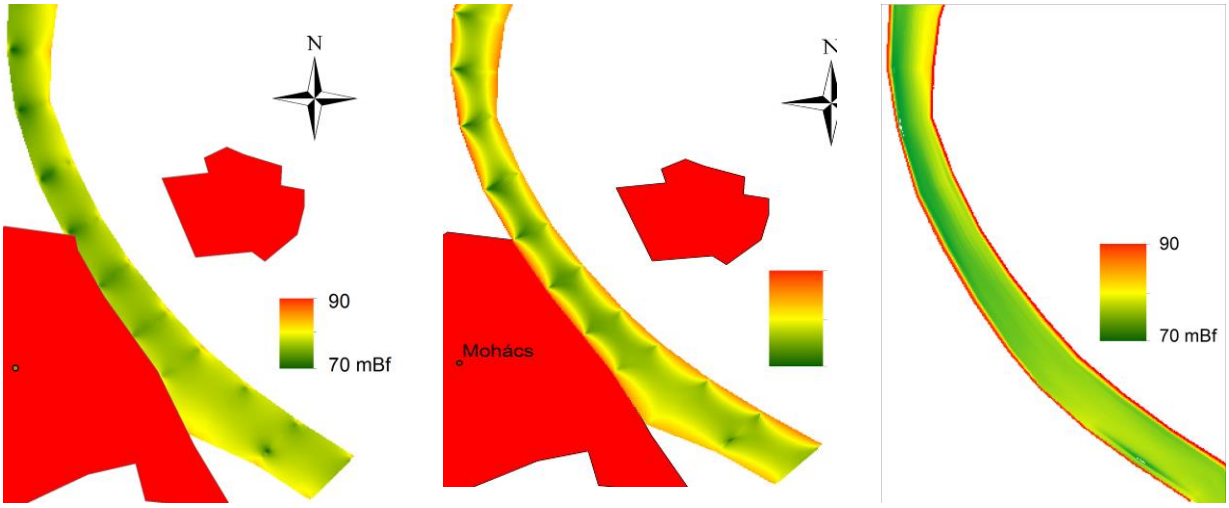
Az így létrehozott ponthálózat nem derékszögű, az x, y irányokban nem ekvidisztáns, de szabályos cellaméret jellemzi. Az algoritmus ezek után meghatározza, hogy a keresett – ortogonális, x, y irányokban azonos osztásközű – rácsháló egy-egy pontja a segédrács mely cellájába esik. A cella sarokpontjaiban érvényes geodetikus magasságok távolság-alapú súlyozással előállított átlaga adja a keresett ponthoz tartozó interpolált magasságot.

Az eljárás eredményeként előálló morfológiai modell a valóság korábbinál pontosabb közelítését adja, ezért alkalmazásával a számítási eredmények javulása várható. (Somlyódy, 2008)

8.12.4 AZ ELVÉGZETT SZÁMÍTÁSOK BEMUTATÁSA, ÉRTÉKELÉSE

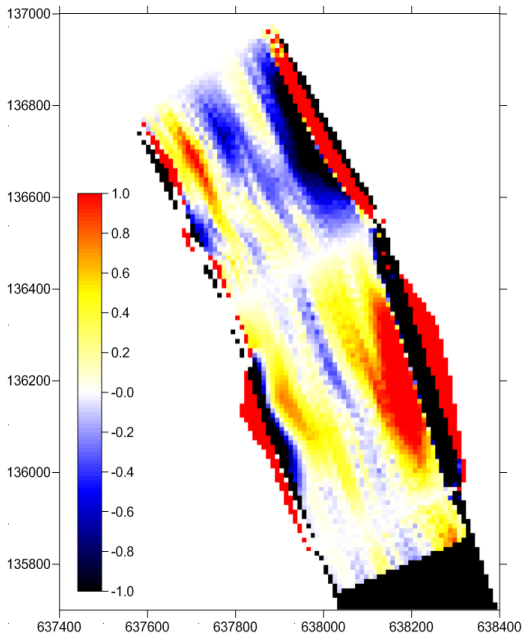
Elsőként az ESRI ArcGIS program Spatial Analyst csomagjának beépített moduljaival próbálkoztunk. Itt több módszer is található arra, hogyan lehet néhány pontban meghatározott magassági adatokból egy adott terület domborzatát meghatározni. A módszerek között van a már részletesen tárgyalt „Topo to Raster" parancs, a bányászati eljárások során fejlesztett Krigelés, a távolsággal fordítottan súlyozó interpolálás (IDW – inverse distance weighted), a „Legközelebbi Szomszéd" (Natural Neighbour), stb. A legnagyobb probléma ezekkel a módszerekkel az, hogy nem veszik figyelembe a folyómeder fő sajátosságát: a hossz- és keresztirányú változások között nagyságrendi eltérés van.

A fenti modulok közül a leghasználhatóbb eredményre a „Natural Neighbour" módszer vezetett, de ezt is inkább, mint negatív példát mutatjuk be. A 8.12-4. ábran balra és középen is látható, hogy a program nem tudja kezelni a keresztszelvényekben jelentkező mélypontokat, amelyek a sodorvonal helyét jelölik; a sodorvonalnak természetesen végig kellene vonulnia a meder hosszában (jobb oldali ábra).



8.12-4. ábra Medermodell „Topo to Raster" (bal), „Natural Neighbour" (közép) illetve BME VKKT (jobbra) interpolációval

Fölvetődik a kérdés, hogy mekkora hibához vezet, ha 100 m-enkénti adatok helyett 500 m-enként fölvett keresztszelvényekkel dolgozunk. Az a modell, ami elegendően jó adatot szolgáltatott a 100 m-enkénti keresztszelvények (bemenő adatok) esetén, vajon megfelelő eredményre vezet-e, ha csak 500 m-enként kap inputot. Ennek érdekében előállítottuk a terepgridet az 1524.0 – 1525.0 fkm szakaszra először a 100 m-enkénti adatokból (11 db keresztszelvény – VITUKI adatszolgáltatás korábbi projekt keretében); majd úgy, hogy ezek közül csak a két szélsőt és a középsőt használtuk. Végül képeztük a két grid különbségét: az eredmény a 8.12-5. ábran látható.



8.12-5. ábra különbség az 500 m-enkénti ill. 100 m-enkénti keresztszelvényadatokból számolt terepgrid között. skála: különbség [m]; tengelyek: EOV koordináták

Az ábra szerint viszonylag kisebbek az eltérések a meder közepén, a sodorvonal közelében. Nagyot tévedhetünk viszont a partok helyét illetően. Látható az is, ahogy a különbség-grid a három – mindkét számításban szereplő – keresztszelvény közelében kifehéredik, ott a különbségek eltűnnek (a cellaméret a fenti ábrán 10 m.) Mindent összevetve arra a következtetésre juthatunk, hogy – bár a csak 500 m-enkénti adat helyenként méteres vagy nagyobb eltéréshez vezet – még mindig a korábban kidolgozott eljárás adja a terep leginkább hihető leképzését. Szükséges tehát a bemenő adatok lehetőség szerinti sűrítése, de ezek hiányában is a fent részletezett, saját fejlesztésű eljárással kell a medermodellt előállítani.

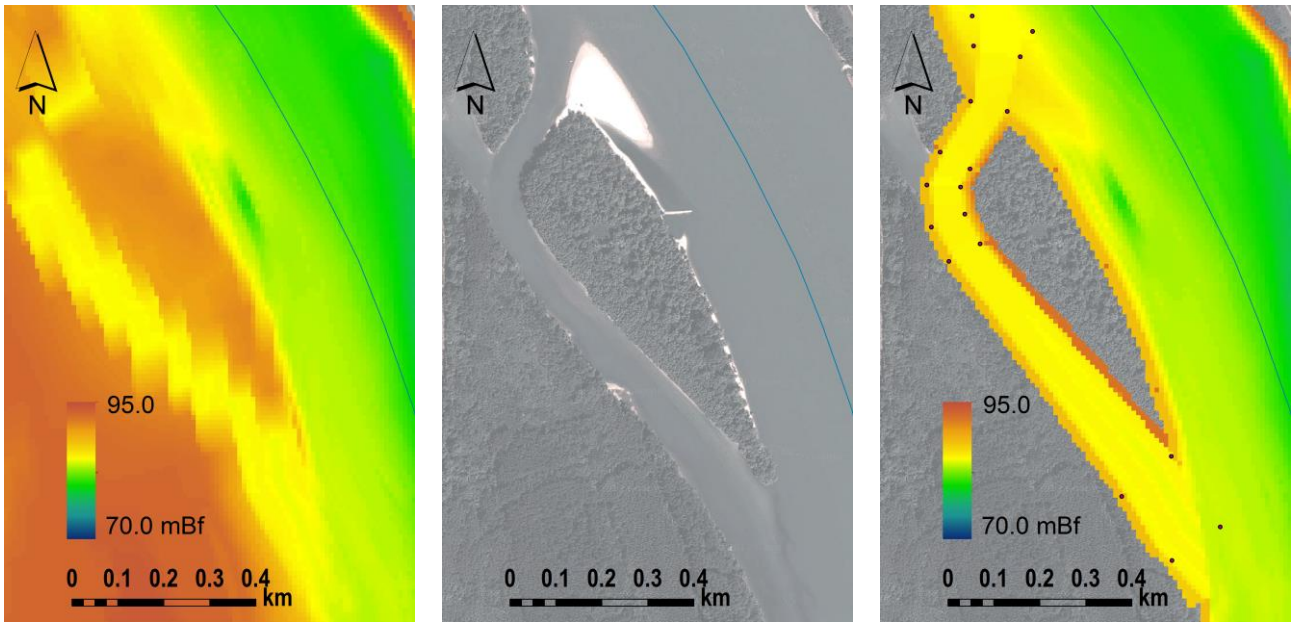
A közép- és nagyvízi medermodell előállítása során is fölmerült, hogy milyen módszerrel képezzünk a hossz mentén átlagosan 100 m-enként (de közel sem ekvidisztánsan) adott keresztszelvényadatokból ortogonális, ekvidisztáns rácsot úgy, hogy a folyónak az a speciális tulajdonsága, mely szerint a hossz menti szintváltozások nagyságrenddel kisebbek, mint a keresztszelvény mentiek, megmaradjon.

Ismét kísérletet tettünk kereskedelmi szoftverekbe épített algoritmusok alkalmazására, az ezekből kapott eredmények azonban már az első vizsgálatkor használhatatlannak bizonyultak, így bemutatásukat itt mellőzzük. Sajnos azonban első körben a korábban kisvízi medermodell előállítására fejlesztett eljárás is az ottaninál kevésbé látványos és hasznos eredményre vezetett itt. Az ok – a keresztszelvényi adatszolgáltatás hiányosságai mellett – a nagyvízi meder sajátossága, mely szerint a kisvízi meder – amely még nagyvízkor is legalább 80%-ot szállít – hol egyik, hol másik parthoz van közelebb, és így a *keresztszelvények* nem lehetnek egyszerre merőlegesek a kisvízi és a nagyvízi sodorvonalra / középvonalra is.

A látványos hibák kis részét sikerült a partvonal enyhe módosításával (pl. kiugró részek levágásával) kiküszöbölni, más hibákon azonban „kézzel", esetspecifikus beavatkozással kellett segíteni. Végül a VITUKI adatszolgáltatásként kapott keresztszelvényeket jobbról is, balról is megcsonkítottuk oly módon, hogy a 88,0 mBf feletti részeket töröltük belőlük. Így a keresztszelvények széle követi a középvízi meder partvonalát. A partvonal enyhe módosítása az árvédelmi töltés vonalnak módosítását jelenti. Ennek kizárólag nagyvízi eseménykor van jelentősége, de a változtatásoknak az áramlásra gyakorolt hatása elhanyagolható.

Még az így elkészült modellnek is gyenge pontja a mellékágak morfológiája. Az adott szakaszon egyetlen jelentősebb mellékág az Uszódi. Ennek vízszállítása – mérési adatok alapján – még nagyvíznél is legföljebb 15%. Az első körben eredményként kapott meder az uszódi mellékág területére szinte kizárólag a középvízi vízszintet meghaladó szinteket tartalmazott, tehát a mellékág szárazon maradt volna. A hiba kiküszöbölésére – részben önkényesen fölvett trapéz-

keresztszelvény alapján – külön legyártottuk az Uszódi-mellékág morfológiáját, és az adott helyen ennek értékeit helyettesítettük be a teljes medermodellbe.



8.12-6. ábra Az Uszódi-mellékág a medermodellben a kézi korrigálás előtt és után

A 8.12-6. ábra mutatja be az Uszódi-mellékág térségét. A bal oldali ábrából kitűnik, hogy a bemenő adatként kapott keresztszelvények nem csak, hogy nem voltak merőlegesek a mellékágra, hanem hibás adatokat tartalmaztak: rossz helyen jelölték a medret. A tájékozódást segítendő a két terep raszter között elhelyeztünk egy 2011. szeptember 11-én készült légifelvételt. A vízállás ekkor 83 cm volt a paksi mércén, ami kisvíz – közepes kisvíznek felel meg. A középvízi számítást ennél nagyobb vízhozamnál, 2750 m3/s-nál (~260 cm a paksi vízmércén) végezzük. A jobb oldali ábrán a fekete pöttyök a fölvett trapézkeresztszelvény két végpontját jelölik.

A fölvett trapéz szelvény az uszódi mellékágra vonatkozik. A mellékágnak szintén csak nagyvízkor van számottevő szerepe, a vízhozam 5-10%-a erejéig. Tehát az „önkényesen" fölvett kereszszelvények csak ezt a mennyiséget érintik. Azonban a mederinterpoláció alapjául itt is a felmért keresztszelvények szolgáltak, tehát döntően ezek határozták meg a meder alakulását. Ehhez igazítottuk a sűrűbben fölvett keresztszelvényeket is. Így összességében a hatásuk a teljes áramlás (illetve a teljes csóva tekintetében) szintén elhanyagolható.

Mindhárom medermodell esetében az interpolációt a folyamszabályozási művek (sarkantyúk) kézi, cellánkénti beépítése követte VITUKI adatszolgáltatás, illetve műholdfelvételek alapján.

8.12.5 AZ EREDMÉNYEK ÖSSZEFOGLALÁSA

A végleges medermodelleket a 8.12-7. ábran mutatjuk be.

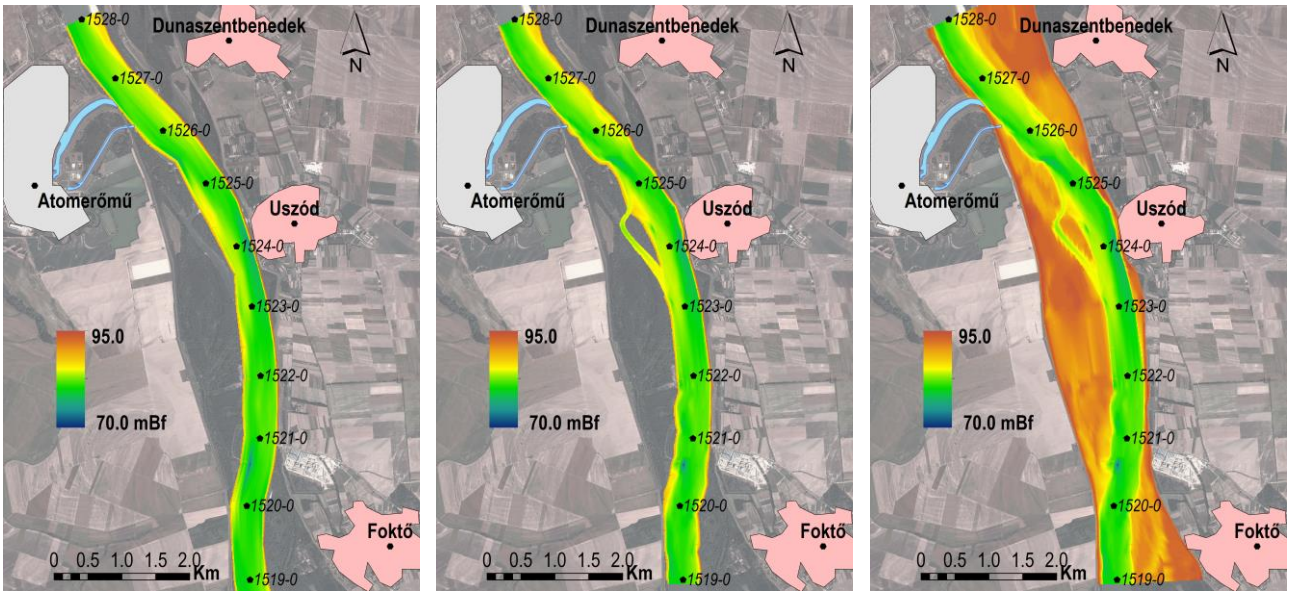
A kisvízi medermodell 500 méterenkénti keresztszelvényekből állítottuk elő 10 szakaszban. Egy szakasz hossza 9-9,5 km. A felmért keresztszelvények közötti interpolációt a korábban a BME-VKKT által fejlesztett eljárással végeztük. A meder ugyan kis mértékben „szögletes", tehát a partvonal inkább sokszögvonal mintsem görbe (ld. pl. 8.13-4. ábra jobb oldala), de az eredmények kilégítőek. A kapott meder-raszter a várakozásoknak megfelelően visszaadja, hogy a hosszirányú változások kisebb nagyságrendűek, mint a keresztirányúak.

A középvízi medermodell előállításakor 100m-enkénti nagyvízi keresztszelvényekből indultunk ki. A nagyvízi keresztszelvények árvédelmi töltéstől árvédelmi töltésig tartanak, tehát a hullámteret is magukba foglalják. Íly módon a keresztszelvények közötti távolság egy nagyságrenddel kisebb, mint egy-egy keresztszelvény hossza. Annak érdekében hogy a kisvízi medermodell előállításakor alkalmazott eljárás itt is kielégítő eredményre vezessen, a keresztszelvényből kiválogattuk a középvízi szintnél nem nagyobb adatokat (középvíznél még nem lép ki a víz a kisvízi mederből). Az így

„lenyesett” keresztszelvényekből állítottuk elő a már ismert eljárással a középvízi medermodellt. Olyan helyen, ahol csak a főmederben áramlik víz, ez kielégítő eredményre vezetett. Az uszódi mellékágra külön végeztük el az interpolációt, majd a két gridet összeillesztettük. Az így kapott medermodell kielégítően adta vissza a valóságot.

Nagyvízi medermodell előállítására első alkalommal került sor. Az előző két esetben alkalmazott célszerűsítésekre itt nem volt lehetőség, hiszen a hullámteret is reprodukálni kellet. Az interpolációs eljárás azonban igen „szögletesen” kezelte a két szomszédos keresztszelvény által meghatározott párhuzamos és merőleges irányokhoz nem illeszkedő (azzal szöget bezáró) változásokat – márpedig a főmeder gyakran esett ez utóbbi kategóriába. Jobb megoldás híján a nagyvízi medret előállítottuk a már bejáratott interpolációs eljárással, majd ráfektettük a középvízi medret, és ahol az utóbbi tartalmazott adatot, ott azt vettük figyelembe – egyéb helyeken (hullámtérben) pedig a nagyvízi medret. Az így kapott medermodell már szintén megfelelő pontosságú, hiszen a víz döntő része nagyvízkor is a főmederben áramlik.

Mindhárom esetben az interpoláció (és javítások) után kézzel, cellánként építettük be a folyószabályozási műveket (sarkantyúkat).



8.12-7. ábra Kisvízi (balra), középvízi (középen) és nagyvízi (jobbra) medermodell

8.13 KÉTDIMENZIÓS HIDRODINAMIKAI MODELL

8.13.1 A RENDELKEZÉSRE ÁLLÓ ADATOK, INFORMÁCIÓK KRITIKAI FELDOLGOZÁSA, ÉRTÉKELÉSE

„A Paksi Atomerőmű hőterhelése: a monitorozás és üzemirányítás fejlesztése” című, 2006-2008 között zajlott projekt keretében BME VKKT kisvízi helyzetekre kalibrálta a hidrodinamikai modellt. A kalibráció több szelvényben fölvett sebességeloszlás alapján készült. A kalibrálandó paraméter a 8.13-5. egyenlet k tényezője, más néven Manning-tényező volt, melyet első körben homogénnek feltételeztek, később egy összefüggéssel a melegvíz és nagyobb mélységek „irányában” növekvő meder-símaságot vezettek be. Az így kapott eredmények már csak a jobb parthoz közeli sávban becsülték túl a kialakuló sebességeket, így következő lépésben erre a sávra kisebb Manning-tényezőt definiáltak. A végeredményként kapott Manning-eloszlással számított sebességmezők jól reprodukálták a méréseket nem csak a kalibráció, hanem több validációs futtatás során is. A validációs számítások egyike középvízi (Q=2800 m^3/s) helyzetre készült. Erre vonatkozóan azt találták, hogy a modell változatlan Manning-tényező eloszlás mellett a bevezetés alatti szelvényben jól közelíti a méréseket, a keresztgát felett azonban túlbecsül.

Fenti projekt keretében tehát gondos munkával jutottak egy jól kalibrált modellhez – meg kell azonban jegyeznünk, hogy a jelenleginél kevesebb mérési szelvény állt akkor rendelkezésre. A sebességeket általában három szelvényben

rögzítették – jelen projekt keretében hidrológiai állapotonként 7 mérési szelvényben van lehetőségünk a sebességmezők összehasonlítására.

8.13.2 MÓDSZERTAN

A modell elméleti és numerikus alapjait Somlyódy (2008) alapján foglaljuk össze.

A hő- és szennyezőanyag transzport szempontjából meghatározó advekciót (vagy konvekciót) kétdimenziós hidrodinamikai modellel írjuk le, amelyet a jól ismert háromdimenziós kontinuitási- és a Navier-Stokes (Reynolds) egyenletek határoznak meg:

$$\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}+\frac{\partial w}{\partial z}=0 \qquad (8.13\text{-}1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t}+u\frac{\partial u}{\partial x}+v\frac{\partial u}{\partial y}+w\frac{\partial u}{\partial z}=vf-\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x}+A_h\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 u}{\partial y^2}\right)+A_v\frac{\partial^2 u}{\partial z^2}$$

$$\frac{\partial v}{\partial t}+u\frac{\partial v}{\partial x}+v\frac{\partial v}{\partial y}+w\frac{\partial v}{\partial z}=uf-\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial y}+A_h\left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 v}{\partial y^2}\right)+A_v\frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \qquad (8.13\text{-}2)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t}+u\frac{\partial w}{\partial x}+v\frac{\partial w}{\partial y}+w\frac{\partial w}{\partial z}=-g-\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial z}+A_h\left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}\right)+A_v\frac{\partial^2 w}{\partial z^2},$$

ahol t – idő, x, y és z – két horizontális illetve függőleges koordináta, *u, v, w* - turbulens áramlás átlagsebessége (a turbulencia időléptékére vonatkoztatott ún. Reynolds átlag); a megfelelő irányokba *f* - Coriolis tényező; A_h, A_v - örvényviszkozitási tényező (horizontális illetve függőleges irányú); *p* - nyomás, ρ - sűrűség, *g* - nehézségi gyorsulás.

Figyelembe véve, hogy a *p* nyomás horizontális gradiense sekély vizekre kicsiny, ez a két irányban az alábbi módon írható fel:

$$-\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x}=-g\frac{\partial \eta}{\partial x}$$

$$-\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial y}=-g\frac{\partial \eta}{\partial y}, \qquad (8.13\text{-}3)$$

ahol η a vízfelszín emelkedése/süllyedése a nyugalmi szinthez képest.

A 2D modell egyenleteit (8.13-1) és (8.13-2) mélység menti integrálásával és (8.13-3) felhasználásával nyerjük. Ezekben az integrálás eredményeként a függőleges örvényviszkozitási tényezőt tartalmazó tagok helyett a határfelületi csúsztató feszültségek jelennek meg:

$$A_V\int_{-h}^{\eta}\frac{\partial^2 u}{\partial z^2}dz=\frac{1}{\rho}\left(\tau_{sx}-\tau_{bx}\right)$$

$$A_V\int_{-h}^{\eta}\frac{\partial^2 v}{\partial z^2}dz=\frac{1}{\rho}\left(\tau_{sy}-\tau_{by}\right), \qquad (8.13\text{-}4)$$

ahol τ_{sx}, τ_{sy}, τ_{bx}, τ_{by} - a felszíni (*s* index), és fenékcsúsztató (*b* index) feszültség *x* illetve *y* (folyás- illetve kereszt) irányú komponensei.

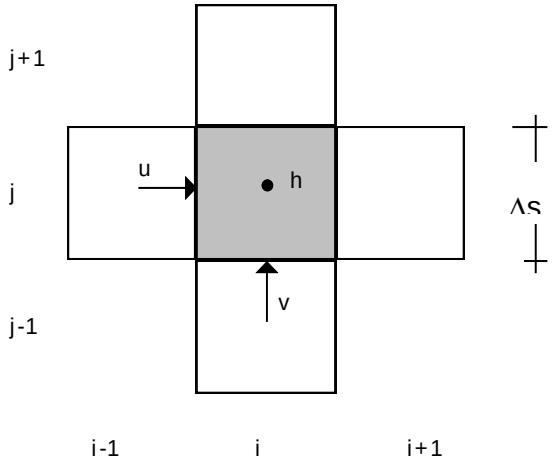
A feszültségek számításának többféle módszere ismeretes, mi az alábbi kvadratikus formulát alkalmazzuk:

$$\tau_{bx} = \frac{\rho}{k} \cdot u \cdot \sqrt{u^2 + v^2}\,, \qquad (8.13\text{-}5)$$

ahol ρ_w a víz sűrűsége, u a sebességvektor, u^2 négyzetes sebesség (pozitív skalár), k a simasági tényező (kalibrálandó paraméter), τ_b pedig továbbra is a fenék csúsztatófeszültség, dimenziója N/m².

Ily módon a sekély vizekre érvényes, függély menti integrálátlagokat tartalmazó kétdimenziós egyenletrendszert nyerjük, amiből a sebességvektor két komponense és a vízszint helyzete (és/vagy a vízmélység) a kezdeti- és peremfeltételek ismeretében meghatározható (lásd a következőkben).

Az egyenletrendszert (kontinuitás és két mozgásegyenlet) a véges differenciák eltolt hálós explicit módszerével oldottuk meg (8.13-1. ábra). A sémában a vizsgált tartományt $\Delta s \cdot \Delta s$ (ekvidisztáns, esetünkben 10 m x 10 m) méretű cellákra osztjuk fel, a sebességkomponenseket (*u, v*) a cellák peremén, a vízszinteket (*h*) pedig a cella középpontjában határozzuk meg.



8.13-1. ábra: A hidrodinamikai modell véges differencia sémája

A megoldás a kezdeti és határfeltételek ismeretében történik. Utóbbiakat egyrészt a szilárd, másrészt pedig a nyitott peremen szükséges megfogalmazni. Szilárd peremen a sebességek merőleges komponensei zérus értékűek. A nyitott peremen a tartományba áramló, illetve onnan kilépő folyadék térfogatáramát, vagy a vízszint magasságát (több nyitott perem esetében esetleg ezek kombinációját) kell megadni. A kezdeti feltételeket a sebességmező komponenseinek, illetve a vízfelszín cellánkénti értékeinek t = 0 időpontbeli horizontális eloszlása adja.

Jelen problémában a permanens megoldást keressük, ezért a nyitott peremeken időben állandósult térfogatáramot (felső határoló szelvény), illetve vízszintet (alsó perem) adunk meg. A kezdeti érték felvételében viszonylag nagy szabadságunk van. Az egyszerűség kedvéért a t=0 időpontban az alsó peremmel megegyező vízszintet és 0 sebességet vettünk fel a teljes szakaszon, ami néhány óra leforgása alatt beáll a permanens állapotra.

A számítási kapacitás miatt a kisvízi számításoknál a Paks-országhatár szakaszt 10 rövidebb szakaszra osztottuk (lásd 8.13-1. táblázat). A szakaszok egymás alatt következnek, és mivel a felső és az alsó peremet eltérő módon adjuk meg (vízhozam, illetve vízszint), a kontinuitást oly módon biztosítjuk, hogy a simasági tényező segítségével a felvízi peremen az előző szakasz alvízi peremével azonos vízszintet állítunk be. Ez tehát a kontinuitási feltétel. A kalibrációval részletesen a 8.13.3. fejezetben foglalkozunk.

A számítás aktív celláit („vizes cellákat”) úgy jelöltük ki, hogy a morfológiai modellt (lásd 8.11 fejezet) elmetszettük az alsó perem által meghatározott vízszintes síkkal. Így a fölső szakaszon némileg alulbecsültük az áramlásban szerepet játszó keresztmetszetet, azonban a hibásan kikerült cellák jelentősége a teljes keresztszelvény áramlásához képest – a kis vízmélység miatt – elhanyagolható. Megemlítjük, hogy egy-egy szakasz aljánál a partok közelében előfordulhat, hogy olyan cellákon számolunk, amelyekben nagyon kicsi a vízmélység. Ezek a részek a legkisebb vízszintcsökkenés (-ingás) hatására szárazra kerülnek, ami numerikus problémához vezet. Ennek kezelése érdekében az érintett szakaszokon az aktív cellákat az alsó peremi vízszinthez képest 10-20 cm-rel lejjebb kijelölt vízszintes sík segítségével választottuk ki a

kisvízi morfológiai modellből. Ezáltal kis mértékben ugyan „leszűkítettük” a medret, de ismét csak a kis vízmélységű, és a teljes keresztszelvény áramlásában relatív kis részt vállaló területekről van szó. Ugyanakkor a megmaradt cellákon szárazra kerülésről és numerikus problémától nem kell tartani.

8.13.3 AZ ELVÉGZETT SZÁMÍTÁSOK

8.13.3.1 Kalibráció

A 2D modell kalibrálást igényel. A bearányosítandó paraméter a (8.11-5) egyenlet k simasági tényezője. A nagyobb simasági tényező simább medret – azonos körülmények esetén kisebb felszínesést jelent. Feltételezzük, hogy egy-egy vizsgált szakaszon a főmederben a súrlódási tényező eloszlása homogén (azaz x és y mentén állandó). A simasági tényező csak szakaszhatáron változhat és így a modell valóságot tükröző működésének feltétele a simasági tényező szakaszonként megfelelő beállítása.

A kisvízi esetben a 2D modell kalibrálását mintegy 100 km hosszú szakaszra kell elvégezni. Ilyen összetett feladatra példát és kifejlett módszert nem ismerünk. Alapos megfontolásokat követően a következőképpen jártunk el. Számítási megfontolásokból – mint már említettük – a Paks – országhatár közötti Dunát 10, nagyjából egyenlő hosszúságú szakaszra osztottuk föl. Ezekre a szakaszokra generáltuk a korábban ismertetett módon a morfológiát és határoztuk meg a peremfeltételeket.

A szakaszok kiterjedését, a felvízi- és alvízi peremeket a 8.13-1. táblázat mutatja.

Hidrológiai helyzet	Számítás célja	Felső szelvény fkm	Alsó szelvény fkm	Távolság (km)	Belépő hozam	Kilépő szint	Adatforrás
Kisvíz 1. szakasz	kalibráció	1527.0	1518.0	9.0	1180 m³/s	84.35 mBf	DB2004
2. szakasz	kalibráció	1518.0	1509.0	9.0	1180 m³/s	83.68 mBf	DB2004
3. szakasz	kalibráció	1509.0	1500.0	9.0	1180 m³/s	83.18 mBf	DB2004
4. szakasz	kalibráció	1500.0	1490.5	9.5	1198 m³/s	82.71 mBf	DB2004
5. szakasz	kalibráció	1490.5	1481.0	9.5	1223 m³/s	82.24 mBf	DB2004
6. szakasz	kalibráció	1481.0	1471.5	9.5	1248 m³/s	81.66 mBf	DB2004
7. szakasz	kalibráció	1471.5	1462.0	9.5	1243 m³/s	81.29 mBf	DB2004
8. szakasz	kalibráció	1462.0	1452.5	9.5	1229 m³/s	80.75 mBf	DB2004
9. szakasz	kalibráció	1452.5	1443.0	9.5	1214 m³/s	80.20 mBf	DB2004
10. szakasz	kalibráció	1443.0	1433.2	9.8	1206 m³/s	79.80 mBf	DB2004
Kisvíz, 1. szakasz	validáció	1527.0	1520.0	7.0	1370 m³/s	84.93 mBf	VITUKI mérés 2012. aug. 21.
Középvíz	kalibáricó	1527.0	1520.0	7.0	2750 m³/s	87.27 mBf	VITUKI mérés 2012. márc. 20.
Nagyvíz	kalibráció	1527.0	1520.0	7.0	5100 m³/s	89.83 mBf	VITUKI mérés 2013. febr. 6.

8.13-1. táblázat Hidrodinamika futtatások peremei

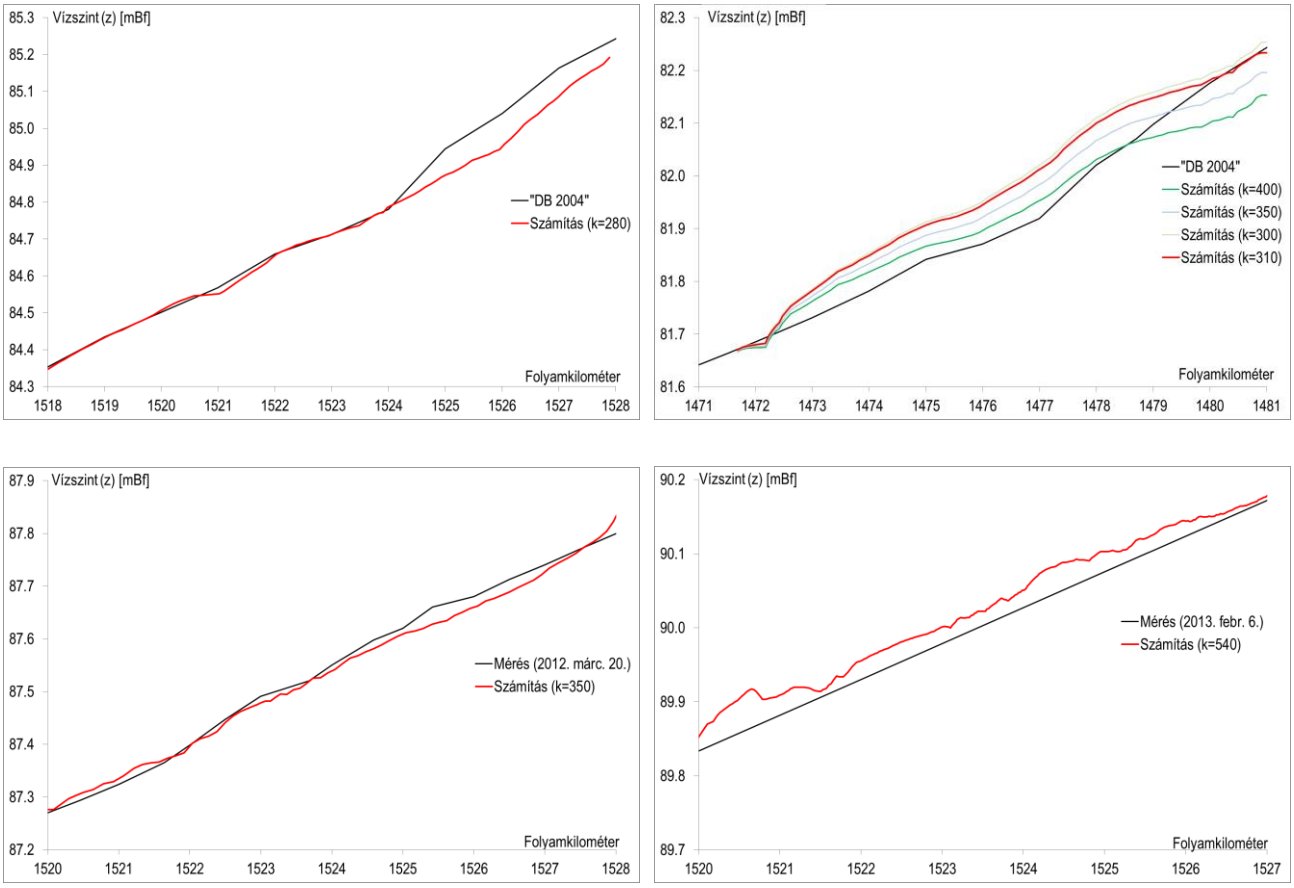
A (hő-) szennyezés szempontjából első közelítésben mértékadónak tekintett állapot a kisvíz, ezért a Duna-bizottság által 2004-ben meghatározott hajózási kisvízszintekből és a hozzájuk rendelt vízhozamokból indultunk ki. Tudjuk, hogy ez hipotetikus, és nem pedig valós hidrológiai, hidraulikai állapot, ezért a kialakuló felszíngörbétől nem várjuk el, hogy minden pontjában visszaadja a DB2004 szinteket. A simasági tényezőt úgy kell beállítanunk, hogy a felvízi peremen visszaadja azt a vízszintet, amelyhez tartozó vízhozamot felső peremnek megadtuk. Erre egyébként a folyószakaszok összekapcsolhatósága érdekében is szükség van. A kalibrálás eredményeként kapott simasági tényezőket a 8.13-2. táblázatban közöljük.

Szakasz	Felső határoló szelvény folyamkilométer	Alsó határoló szelvény folyamkilométer	k simasági tényező
1. szakasz	1527.0	1518.0	280
2. szakasz	1518.0	1509.0	400
3. szakasz	1509.0	1500.0	800
4. szakasz	1500.0	1490.5	600
5. szakasz	1490.5	1481.0	650
6. szakasz	1481.0	1471.5	310
7. szakasz	1471.5	1462.0	1200
8. szakasz	1462.0	1452.5	380
9. szakasz	1452.5	1443.0	400
10. szakasz	1443.0	1433.2	560
Középvíz	1527.0	1520.0	350
Nagyvíz	1527.0	1520.0	540

8.13-2. táblázat Simasági tényezők szakaszonként (1.-10. szakasz: kisvízi helyzet)

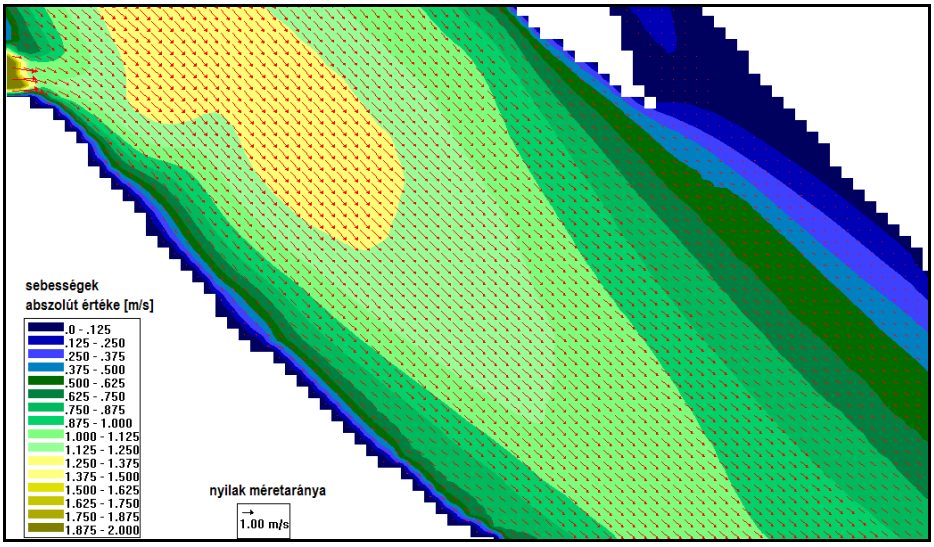
Látható, hogy a simasági tényezők többnyire a 300-600 közötti tartományban mozognak. A 7. szakasz kiugróan magas értéke vélhetően elsősorban annak tudható be, hogy az adott szakaszon nem található nagyobb kanyarulat. Másrészt a cellák koordinátarendszere közel esik a folyó hossz- és keresztiránya által meghatározott derékszögű rendszerhez, azaz relatív kicsi áramlás történik a cellákhoz képest átlós irányban.

A 8.13-2. ábran többek közt bemutatjuk a 6. szakasz (1471.5 – 1481 fkm) kalibrálási folyamatát is. A simasági tényezőt 400-tól kezdve 50-enként csökkentettük, majd a 310-es értéknél már megfelelő egyezés alakult ki az 1481. fkm szelvényre számított és a Duna-bizottság által meghatározott vízszint tekintetében. Ezzel egyúttal a probléma érzékenységébe is bepillantást nyerünk: 50 egység változás a simasági tényezőben kb. 5 cm vízszintváltozást jelent a 9,5 km hosszú szakaszon.



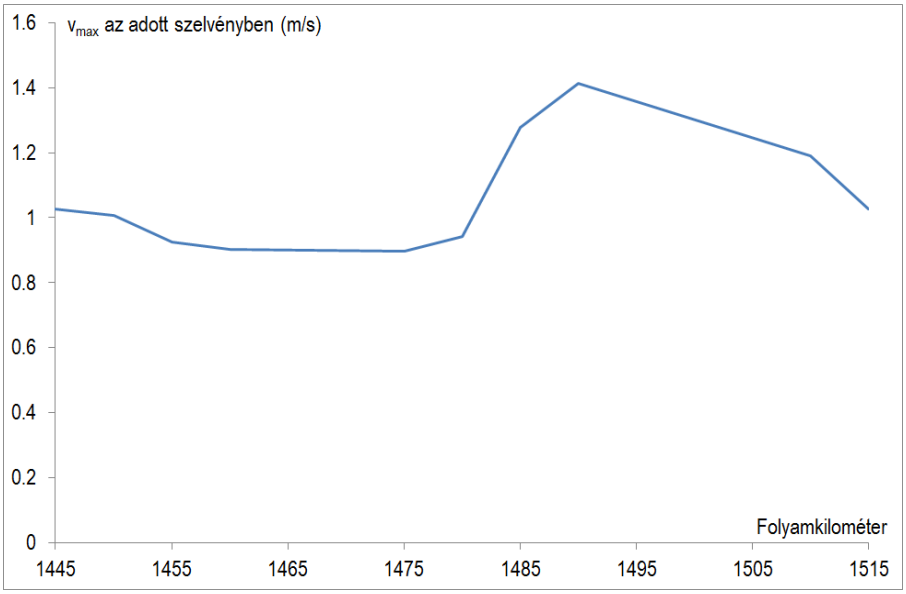
8.13-2. ábra Felszíngörbék (hossz-szelvények). Kisvíz, 1. szakasz (balra fent) 6. szakasz (jobbra fent), illetve középvíz (balra lent), végül nagyvíz (jobbra lent)

Elsőként a melegvíz-visszavezetés környezetében kialakuló sebességeket mutatjuk be (8.13-3. ábra). Noha a kétdimenziós modell csak elnagyoltan alkalmas a közeltérben lejátszódó folyamatok szemléltetésére, azért így is láthatjuk, hogy a bevezetésnél a mederben megszokottnál jóval nagyobb sebességek alakulnak ki; illetve megfigyelhető, ahogyan a csóva viszonylag gyorsan „befordul” a folyó áramlásának irányába. Indokolt tehát a háromdimenziós modell használata a közeltér leírására.



8.13-3. ábra A bevezetés környezetében kialakuló sebességviszonyok (kisvízi helyzet)

A szelvényeken belül kialakuló maximális sebességek hossz-szelvényét a 8.13-4. ábra mutatja. A számítási eredményekből való „mintavételt" öt kilométerenként végeztük. A Paks – országhatár szakaszon az esés közel állandó, nagy kanyarulatok nincsenek. A hosszmetszet – ennek megfelelően – nem mutat semmilyen tendenciát. A kialakuló (maximális) sebességeket a szűkületek – bővületek illetve gázlók – mély szakaszok váltakozása határozza meg, azonban ezek sem okoznak jelentős különbségeket. A kisebb mértékű ingadozás ezeknek a lokális hatásoknak tudható be.

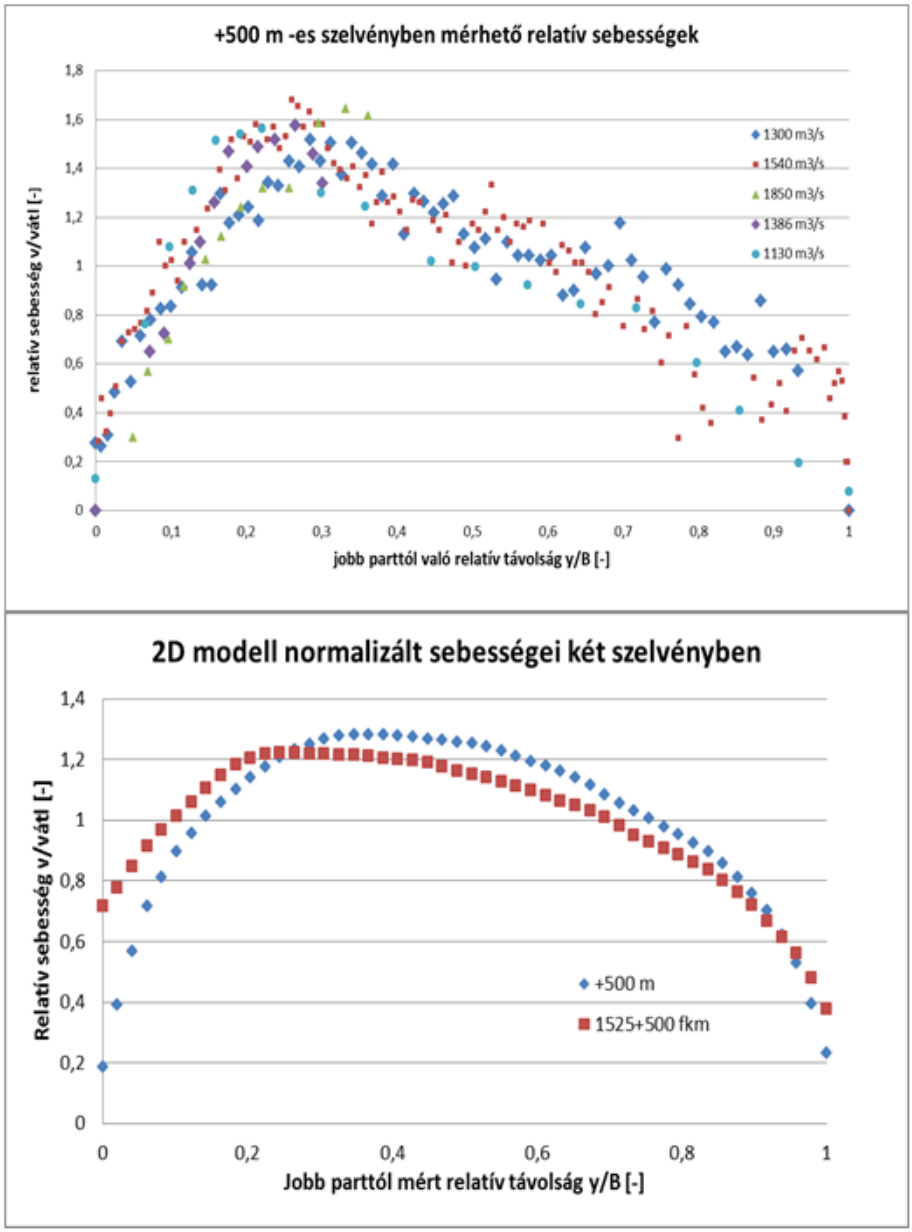


8.13-4. ábra Keresztszelvényen belüli maximális sebességek hossz-szelvénye

A 8.13-5. ábran összehasonlítottuk a 2D hidrodinamikai modellből és a mérésekből származó, különböző szelvényekben kialakuló relatív sebességeket. A felső ábra a +500 m-en mért relatív sebességet mutatja 1300 – 1850 m^3/s-os dunai vízhozam tartomány mellett (lásd az 5. fejezetet). Látható, hogy a jobb part közvetlen közelében pangó tér alakul ki, majd a parttól távolodva elérjük a csóvát, ahol jelentősen megnőnek a sebességek. Ezek az értékek a bal parthoz közeledve ismét csökkenést mutatnak. A fölső ábrán a különböző vízhozamok mellett gyakorlatilag azonos sebességmező alakult ki.

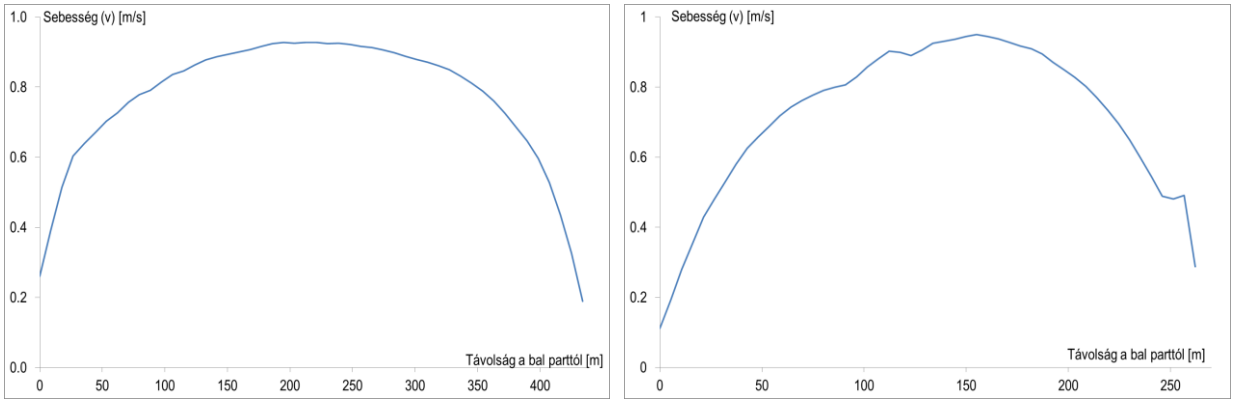
A 2D modell eredményeit az alsó ábra mutatja a +500 m-es szelvényben és a keresztgát vonalában (a vízhozam 1180 m^3/s). A profilt a mérések eredményeivel összehasonlítva megállapítható, hogy a modell a profilt – más esetekhez

hasonlóan - „elsimította”, a mérések nagyobb szabálytalanságokat mutatnak. A görbék jellegre hasonlóak, az egyes sebességértékek különbözősége abból ered, hogy egyrészt eltérő vízhozamnál előállt viszonyokat hasonlítunk össze, másrészt pedig a 2D hidrodinamikai felbontása viszonylag durva. Alkalmazása nem lokális problémák kezelését, hanem a mintegy 100 km Duna szakasz elemzését célozza.



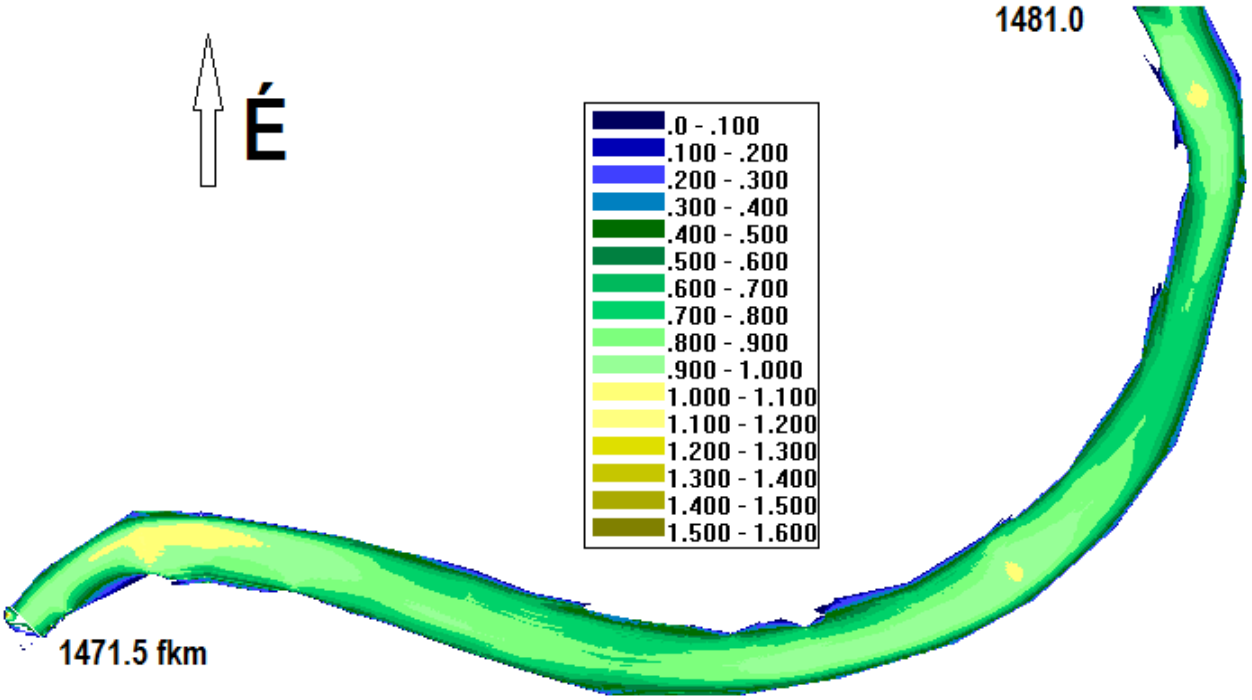
8.13-5. ábra Mért és számított normalizált sebességprofilok összehasonlítása

A következőkben szemléltetésképpen egy egyenes szakaszon és egy kanyarulatban kialakuló sebességeloszlást mutatunk be. A kiválasztott egyenes rész rögtön a 2. számítási szakaszon található, körülbelül az 1520. folyamkilométerben. A 8.13-6. ábra bal oldala egyenes szakaszra jellemző dunai sebességképet szemléltet: a folyó középső 70 %-ában a sebesség alig változik. Ez a jelleg a kanyar hatására megváltozik, a magasabb sebességű rész és a sodorvonal eltolódik, ebben az esetben a bal part felé. A kanyarulatban kialakuló sebességmező szemléltetésére a Mohács fölötti kanyarulatot választottuk: a 8.13-6. ábra jobb oldala az 1449. folyamkilométer szelvényben a főmederben kialakuló sebességeloszlást mutatja.



8.13-6. ábra Számított sebességeloszlás az 1520. (balra) és az 1449. (jobbra) folyamkilométer szelvényekben

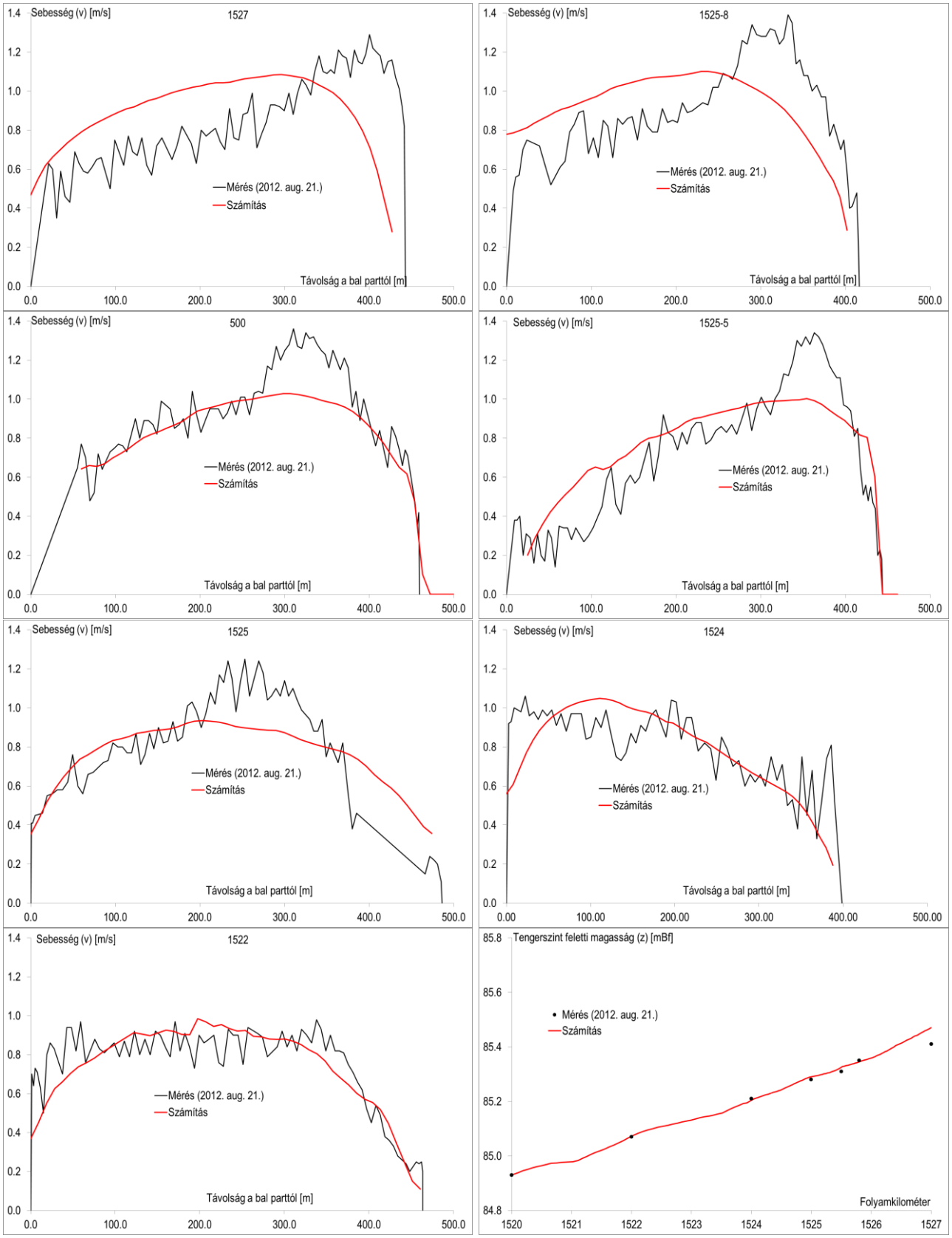
Hasonló következtetés vonható le a 8.13-7. ábra sebességmezőjéből is (az ábrát az abszolút értékek szerint színeztük). Látható, ahogy a kanyarulatok hatására egyik parttól a másik közelébe helyeződik át a magasabb sebességű rész, azaz a sodorvonal.



8.13-7. ábra Sebességmező a 6. szakaszon. Színskála: sebesség (m/s)

8.13.3.2 Igazolás

A kisvízi modell igazolását a VITUKI által 2012. augusztus 21-én mért helyzetre végeztük el. A mérést részletesen a 8.9.1. fejezet ismerteti. A vízhozam ~1370 m3/s volt. Tekintettel arra, hogy a méréseket az 1520-1527 fkm közötti szakaszon végezték, így a validációs számításokat is erre a szakaszra szűkítettük. Amint az ábrákon látható, a mért és a számított vízfelszín igen jó egyezést mutat, akárcsak a példaképp bemutatott 1522+000 fkm szelvénybeli sebességeloszlás. A többi hét felmért keresztszelvény számított sebességeloszlása is jól egyezik a méréssel.



8.13-8. ábra Az igazolási számítások eredményei: sebességprofilok, illetve jobbra lent: vízszint-hossz-szelvény

8.13.4 AZ EREDMÉNYEK ÖSSZEFOGLALÁSA

A hidrodinamikai modellt kisvízi feltételekre – a medermodellhez hasonlóan – 10 szakaszra futtattuk. A kalibrálandó paraméter a medersimasági tényező volt, a célfüggvény pedig a felvízi vízszint, melynek célértéke a Duna Bizottság által 2004-ben meghatározott hajózási kisvízszint. Mind a 10 szakaszra sikeresen elvégeztük a kalibrációt. A kalibrált felszíngörbék DB2004 szinttől való eltérésének oka, hogy a DB2004 felszíngörbe nem valós (pillanatnyi) hidrológiai helyzetet jelenít meg, hanem egyfajta burkológörbének tekintendő.

A kisvízi hidrodinamikai modell validációját – a rendelkezésre álló mérési adatoknak megfelelően – csak az első szakaszra végeztük el. Az eredmények a vízszint-hossz-szelvény tekintetében várakozáson felüliek. A validált sebesség-keresztszelvény kielégítőnek mondható, noha a modell a finomabb sebességváltozásokat nem adja vissza.

A középvízi számított felszíngörbe (hossz-szelvény) kalibrálás után igen jó egyezést mutat a mért hossz-szelvénnyel (8.13-2. ábra bal alul). A sebesség-keresztmetszetek is megfelelőnek mondhatók. Itt nem jelentkezik a kisvíznél tapasztalt eltérés, hiszen itt valós, pillanatnyi hidrológiai helyzetre végeztük a kalibrációt.

A nagyvízi kalibráció után a nagyvízi mért és számított felszíngörbe között legfeljebb néhány (<10) cm-es eltérést tapasztaltunk. A hiba oka a nagyvízi medermodell pontatlanságaiban keresendő (ld. 8.12.5. fejezet). A hidrodinamikai modell azonban ezzel együtt elfogadható eredményre vezetett.

Előrelépési lehetőség a nagyvízi medermodell fejlesztésében rejlik. Ehhez új interpolációs algoritmus kidolgozását látjuk szükségesnek, amely több adott vonal (sodorvonal, kisvízi partvonal, nagyvízi partvonal) mentén végzi a keresztszelvények közötti interpolációt. Megjegyezzük azonban, hogy hő- és szennyezés terjedése szempontjából kritikus állapotok nem a nagyvízhez köthetők.

8.14 TRANSZPORTSZÁMÍTÁSOK

8.14.1 A RENDELKEZÉSRE ÁLLÓ ADATOK, INFORMÁCIÓK KRITIKAI FELDOLGOZÁSA, ÉRTÉKELÉSE

A 8.12.2. fejezetben már említettük „A Paksi Atomerőmű hőterhelése: a monitorozás és az üzemirányítás fejlesztése” című, 2006-2008 között zajlott kutatás-fejlesztési projektet. BME VKKT akkori feladata sokban hasonlít a mostanihoz. A fő különbség, hogy míg a hangsúly akkor a módszertani fejlesztéseken és az ezeket megalapozó sokrétű méréseken volt, addig jelen projekt keretében az akkurátus gyakorlati alkalmazás a cél. Az említett projekt keretében 2006-2008-ban összesen öt alkalommal történt kis- illetve középvízi meder-, sebesség- és hőmérsékletmérés. A mérések azonban csak az atomerőmű alatti három kilométeres szakaszra terjedtek ki. Az alábbi táblázatban összefoglaljuk a lezajlott hőcsóva-méréseket.

	Q [m³/s]	1527.0	1525.8	500-as	1525.5	1525.0	1524.0	1523.2	
2006. szept. 11.-14.	1900	z, v, T	z, v, T		z, v, T	z, v, T	z, v, T	z, v, T	teljes kszv.
2006. okt. 24.-31.	1100	z, v, T	z, v, T		z, v, T	z, v, T	z, v, T	z, v, T	teljes kszv.
2007. júli 31. – aug. 2.	1500		z, v, T		z, v, T	z, v, T	z, v, T	z, v, T	csak csóva
2007. nov. 5.-7.	2700		z, v, T	z, v, T	z, v, T				csak csóva
2008. szept. 25.	1400		z, v, T	z, v, T	z, v, T				csak csóva

8.14-1. táblázat Korábbi projekt keretében folytatott hőcsóva-mérések (z: meder, v: sebesség, T: hőmérséklet)

Jelen projekt nem tartalmaz hőmérsékletméréseket, így nincs lehetőségünk mostani mérések alapján kalibrálni, validálni a transzportmodellt. A korábban kalibrált diszperziós tényezőket fogadjuk el, és ezek alapján végezzük a számításokat.

Az akkori tapasztalatok alapján a diszperziós tényezőt 0-ra célszerű állítani, ugyanis a numerikus diffúzió hatása nagyságrendileg hasonló, vagy felül is múlja a diszperziójét. A számításokat tehát 0 m2/s diszperziós tényezővel végeztük, a csóva „szétterítését" a numerikus modell természetes „hibája" biztosította.

A korábbi projekt kalibrációs, validációs számításából levont következtetések szerint a modellszámítások jó eredményre vezettek. Ez a transzport advekció-dominanciája miatt van így. A bevezetés környezetében kialakuló „platós" hőmérsékleti kereszt-szelvényeket ugyanakkor a kétdimenziós modell nem képes visszaadni. A Zárójelentés (Somlyódy, 2008) megállapítása szerint a kétdimenziós hidrodinamikai modellre épülő transzportmodell tovább már nem pontosítható; a jelenségek még jobb leírásához háromdimenziós modell szükséges. A 3D modell alkalmazása a korábbi projektben csak kísérleti jelleggel történt (egy számítás, különösebben részletes vizsgálat nélkül).

8.14.2 A VIZSGÁLAT MÓDSZERTANA

A transzportmodell elméleti és numerikus alapjait Somlyódy (2006) alapján ismertetjük.

A hidrodinamikai modell a Reynolds féle időátlagolt, mélységintegrált sebességvektor- és víz felszíneloszlást adja meg a kérdéses tartomány diszkrét helyein. A transzportfolyamat modellezéséhez azonban fontos a turbulens ingadozásokból adódó turbulens diffúzió figyelembevétele is. Itt a szokásos feltételezéssel éltünk, mely szerint az oldott szennyezőanyag- és a hőtranszport diffúziós tulajdonságai megegyeznek.

A hő-transzportot a turbulens diffúzió 3D egyenlete írja le, amelyben a tömegkoncentrációt a vízhőfok (növekmény) - T - helyettesíti (Somlyódy, 1985):

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -u\frac{\partial T}{\partial x} - v\frac{\partial T}{\partial y} + \frac{1}{h}\frac{\partial}{\partial x}(h \cdot D_{xx}\frac{\partial T}{\partial x}) + \frac{1}{h}\frac{\partial}{\partial x}(h \cdot D_{xy}\frac{\partial T}{\partial y}) + \frac{1}{h}\frac{\partial}{\partial y}(h \cdot D_{yx}\frac{\partial T}{\partial x}) + \frac{1}{h}\frac{\partial}{\partial y}(h \cdot D_{yy}\frac{\partial T}{\partial y}) + \frac{1}{h}S \qquad (8.14\text{-}1)$$

Itt D a diffúziós tényező a jelölt irányokban, S a forrástag (utóbbit elhanyagoljuk, azaz, miután a csóva felülete a bevezetéshez közeli vizsgált tartományban kicsiny, konzervatív anyagot tételezünk fel).

Sekély vizekre a fenti egyenlet mélység mentén integrált 2D alakját alkalmazzák (Somlyódy, 1978 és 1985). Ebben megjelenik a turbulens diffúzió mértékét lényegesen meghaladó úgynevezett diszperziós tényező, amely a függély menti egyenlőtlenségek hatását fejezi ki. Esetünkben időben állandósult megoldást keresünk (azaz alapfeltétel az áramlás permanens jellege és az állandó intenzitással bevezetett hő-áram), így a hő-csóva alakulásában - az advekció mellett - az y keresztirányú diszperziós tényező (D_y) nagysága a meghatározó. Erről első közelítésben feltételezzük, hogy a vizsgált tartományban nem változik.

A számításokat descartes-i véges differencia rácshálón végezzük. Az advekció és diszperzió közelítésére az operator splitting eljárást használjuk. Az advekció modellezésére időben és térben egyaránt másodrendű, oszcilláció-mentes eljárást alkalmazunk. Az első lépés az áramlási karakterisztika dt időlépéshez tartozó ún. talppontjának meghatározása. A második a talpponti koncentráció számítása, melyre Bessel-féle interpolációt használunk. Az eljárás biztosítja az egyetlen rácspontra koncentrálódó forrástag hatásának helyes figyelembevételét (egy rácspont itt természetesen cellányi teret reprezentál).

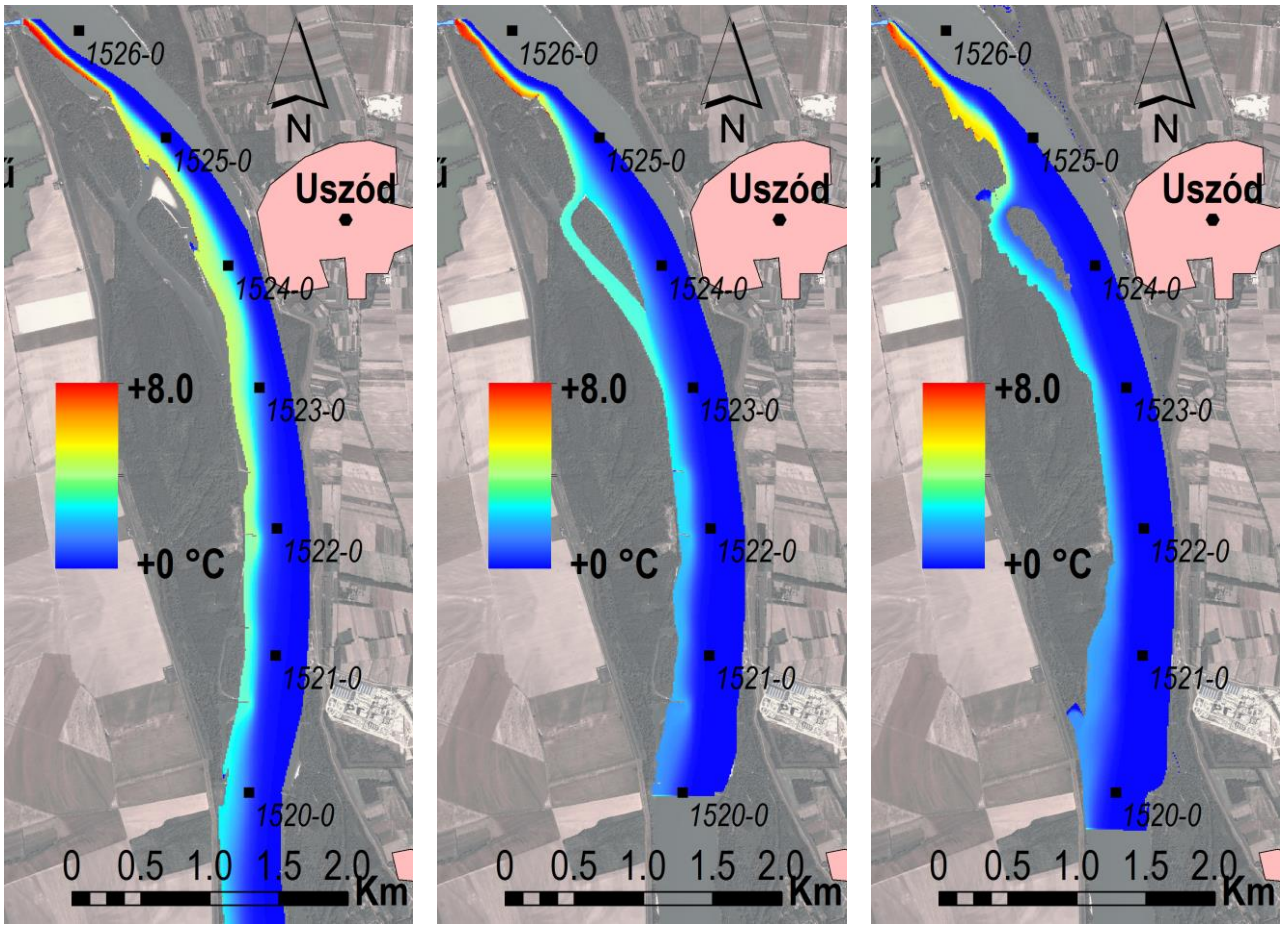
A diszperzió számítására a centrális differencia-séma kétdimenziós megfelelőjét alkalmazzuk. A diszperziós anyagáramokat a váltakozó irányok implicit módszerével határozzuk meg. Az adódó algebrai egyenletrendszert a Hamming-féle módosított prediktor-korrektor eljárás és negyedrendű Runge-Kutta módszer kombinációjával (Ralston and Wilf, 1960, Ralston, 1962) oldjuk meg. A tartomány alsó peremén a számítások során a diszperziós lépést elhagyva gyakorlatilag a szabad (reflexiómentes) kiáramlást tettünk lehetővé. Felső peremfeltételként a Duna vízhőfokát (keresztmetszetben állandó) írtuk elő. Az oldalsó peremeken a gradiens zérus volta a feltétel (hő nem távozik).

8.14.3 AZ ELVÉGZETT VIZSGÁLATOK BEMUTATÁSA, ÉRTÉKELÉSE

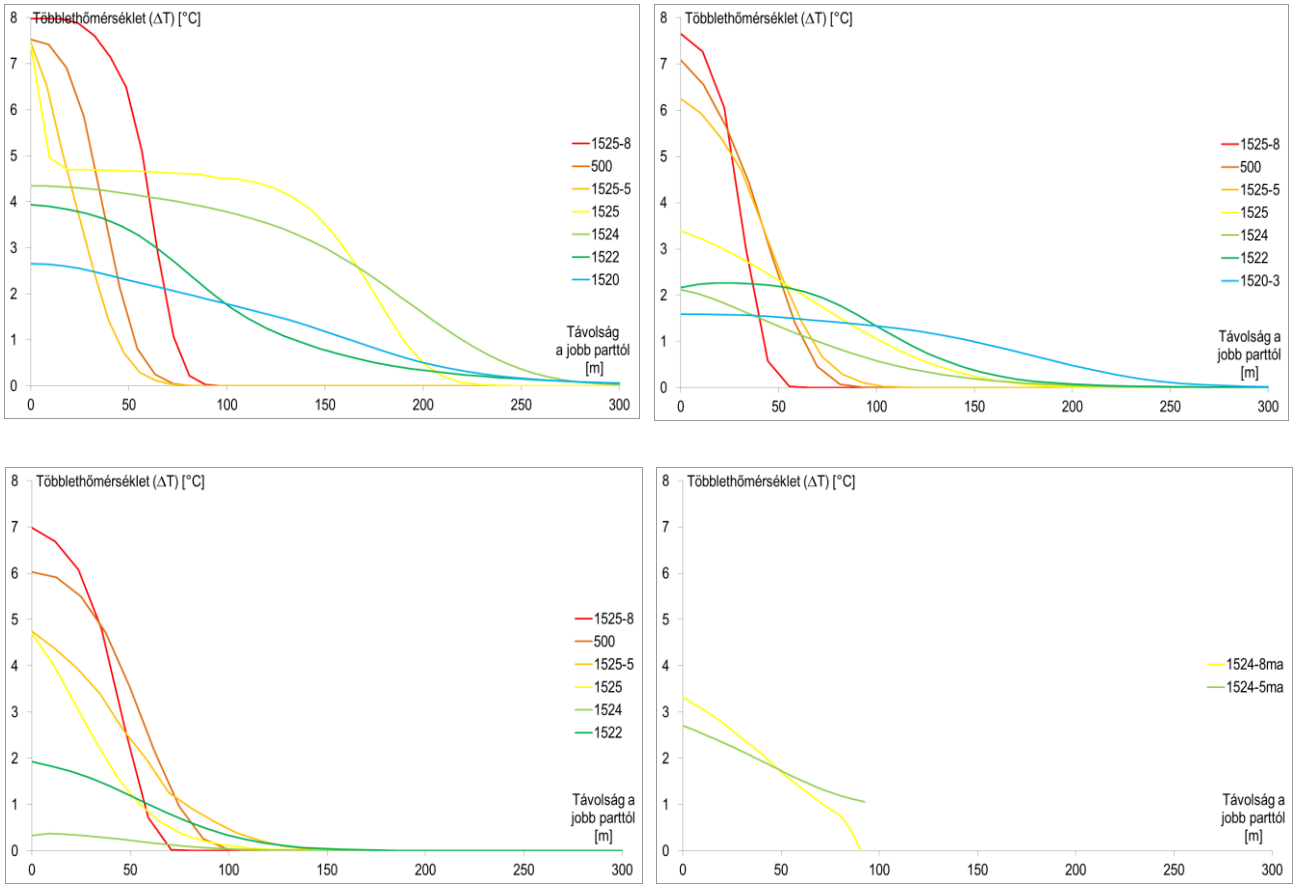
8.14.3.1 Modellfuttatások

Az 8.13. fejezetben bemutatott hidrodinamikai számítások eredményei alapján elvégeztük a transzportszámításokat is mindhárom (kis-, közép- és nagyvízi) hidrológiai helyzetre. A számítások jól mutatják, hogy még kisvíz esetén is a csóva legföljebb a középvonalig húzódik be, nem alakul ki *hődugó*. Szintén megfigyelhetjük, hogy az igen magas (6-7 °C) többlethőmérséklet csak az 1527+500 szelvényben található keresztgátig jelentkezik; az alatt legfeljebb 4,5-5 °C többlethőmérséklet figyelhető meg szorosan a jobb part mellett.

A kisvízi és a középvízi helyzet összehasonlításából megállapíthatjuk, hogy a középvíz esetén gyorsabb az elkeveredés. A kisvíznél megfigyelhető az uszódi zátony fölött kialakuló pangó víztér (8.14-2. ábra, bal oldal, sárga görbe).



8.14-1. ábra Hőcsóva kisvízi (balra,) középvízi, illetve nagyvízi (jobbra) helyzet esetén



8.14-2. ábra Többlethőmérséklet keresztmetszetenként kisvízi (balra fent), középvízi (jobbra fent), nagyvízi (balra lent) helyzet esetén, illetve nagyvízi helyzet esetén a mellékágban

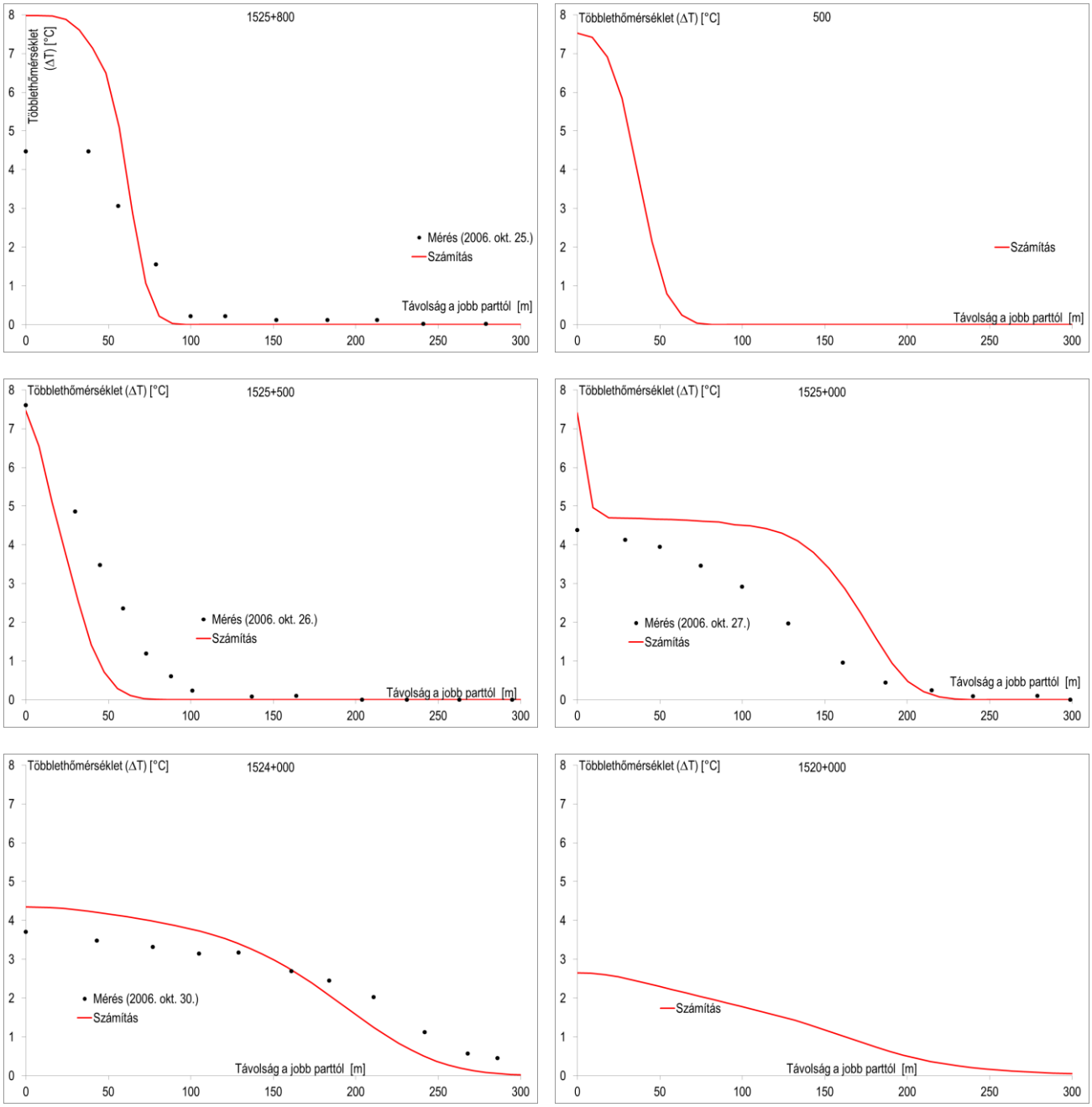
A kisvízi és a középvízi helyzet összehasonlításából megállapíthatjuk, hogy a középvíz esetén gyorsabb az elkeveredés. A kisvíznél megfigyelhető az uszódi zátony fölött kialakuló pangó víztér (8.14-2. ábra, balra fent, sárga görbe).

8.14.3.2 Igazolás

Mivel jelent projekt keretében nem történt hőmérsékletmérés a Dunán, ezért az igazolást korábbi (2006. októberi) megfigyelések alapján végeztük. A VITUKI akkor egy nap/keresztszelvény időtartamban végzett teljes keresztszelvényre meder-, sebesség- és hőmérséklet-méréseket, keresztszelvényenként 13-16 függélyben, függélyenként több pontban. A mérések azonban csak a közel-térre (near-field) terjedtek ki, a bevezetéstől legtávolabbi felmért keresztszelvény az 1523+200 fkm-ben található. A mért hozam a mérési napokon 1030 és 1180 m^3/s között változott. Mivel utóbbira rendelkezésre álltak futtatások, ezért nem volt szükség újabb hidrodinamikai számításra a transzportmodell részére. A kapott hőmérséklet-keresztszelvényeket a 8.14-3. ábra mutatja.

Az ábrák tanulsága szerint a számítás alapvetően jól követi a kimért tendenciákat. Azonban már a mérési eredmények önmagukban való értelmezése is nehézkes. Az 1525+500 szelvényben a feljebbi mért szelvénynél három fokkal magasabban tetőző csúcshőmérséklet csakis mérési hibával / pontatlansággal; esetleg részben pulzációval magyarázható. Az 1525+500 szelvényben a számítás jól adta vissza a csúcshőmérésékletet, de közel 50 m-t tévedett a csóva szélének meghatározásában. Az 1525+000 szelvényben mind a csúcshőmérséklet, mind a csóva szélének számítása megfelelő, a csóván belüli hőmérsékletekben azonban legfeljebb 2,0 °C tévedés tapasztalható. Ezek vélhető magyarázata a számított hőmérsékletmező különbségei. Az 1524+000 szelvényben kimért ellapult csóvát a számítás minden szempontból jól (legfeljebb 0,5°C eltéréssel) adta vissza. Az 500 m-es illetve az 1520+000 fkm szelvényre nem állt rendelkezésre mérési adat, így ezekre a szelvényekre csak a számítás eredményeit mutatjuk be.

A 8.13-8. ábra második sorában látható, hogy a modellszámítás nem adta vissza a bevezetett víztömeg többletimpulzusából fakadó csóvaszerűen megnövekedett sebességeket. A megnövekedett sebességek a hőmérséklet-terjedést is befolyásolják, így a tévedés a transzportmodell torzulását is eredményezi. Minél távolabb vagyunk azonban a bevezetéstől, a modell annál pontosabban adja vissza a mért eredményeket. A bevezetés-közeli részen pedig 3D modellel is végeztünk számításokat (lásd az 5. főfejezetet), így ott a 3D számítások figyelembe vétele javasolt.



8.14-3. ábra Mért és számított többlethőmérséklet-profilok (Q=1180 m³/s)

8.14.4 AZ EREDMÉNYEK ÖSSZEFOGLALÁSA

A transzportmodell esetében kalibrációs, validációs lehetőségeink – részben a rendelkezésre álló mérések hiánya miatt – szűkösek voltak. A keresztirányú diszperziós tényező értékét – figyelembe véve a numerikus diszperziót – korábbi projektek keretében végzett elemzések alapján nullának vettük fel. A számított hőmérséklet-keresztszelvények

elfogadható pontossággal reprodukálják a csóva szélét, azonban – 3D hatások miatt – a part közelében felülbecslik a többlethőmérsékletet. A modell meglepően jól adja vissza az uszódi-sziget fölső csúcsánál található platót (magasabb hőmérsékletű pangó vízrészt).

A modell pontosítása további méréseket igényel a bevezetés közelében és az attól távolabb eső részeken egyaránt, de valójában az eredmények azt igazolják, hogy a 3D modell alkalmazása – ahogyan azt tettük is – elkerülhetetlen.

8.15 A MELEGVÍZ VISSZAVEZETÉS DUNA MEDERRE ÉS ÁRAMLÁSI VISZONYOKRA GYAKOROLT HOSSZÚ TÁVÚ HATÁSÁNAK ELEMZÉSE (1528 – 1519 FKM)

A címben megfogalmazott, meglehetősen összetett problémát lépésenként fogjuk elemezni, hiszen a meder hosszú távú változása igen sok tényezőtől függ. Elsőként az elmúlt 60 év vízszint adatait vizsgáljuk statisztikai módszerekkel. Ez egyszerű és robosztus eljárás a várható jövőbeni mederváltozások becslésére, ugyan az ok-okozati kapcsolatokat nem veszi figyelembe, mivel azok - a bonyolult modellekhez hasonlóan - múltbeli adatok alapján aligha kalibrálhatók. Így hipotézisekkel vagyunk kénytelenek dolgozni. A trendek elemzését követően a melegvíz bevezetés áramlásra és mederre gyakorolt lokális hatását vizsgáljuk, oly módon, hogy a hidrodinamikai számításokat elvégezzük a jelen projekt keretei között már folyamatosan alkalmazott 3D modellel, melegvíz visszavezetéssel és a nélkül. A meder vonatkozásában nem alkalmazunk külön hordalék/meder modellt, pusztán a két eset összehasonlításában azt vizsgáljuk indikátorok révén, hogy a kiülepedés és felkeveredés jellemzői és zónái hogyan módosulnak. Ezt követően tárgyaljuk a kidolgozott, cellára vonatkozó hordalék/meder modellt, amit 1D illetve 2D numerikus hidraulikai környezetbe illesztve nyerjük az 1D illetve 2D kapcsolt modellt. Alkalmazásuk révén elsősorban a hosszabb távú, évtizedes hatásokat elemezzük. Végezetül átfogóan értékeljük a kapott eredményeket.

8.15.1 A RENDELKEZÉSRE ÁLLÓ ADATOK, INFORMÁCIÓK KRITIKAI FELDOLGOZÁSA, ÉRTÉKELÉSE

Az elmúlt, mintegy fél évszázad során, a különböző jellegű emberi beavatkozások és az éghajlatváltozás következtében a Duna folyómedrének egésze, a forrástól a Fekete tengerig sokoldalú morfológiai változásokon megy keresztül. A hordalék- és mederviszonyok feltárására a Dunán és a nagyobb hazai folyókon az ötvenes években indultak mérési programok (Bogárdi, 1971). Paks jelentőségét szem előtt tartva, a VITUKI 1984 óta évente felmérte a Duna 1520-1536 fkm közötti „paksi" szakaszát (1993-ig 300 m, utána 100 m szelvénytávolságokkal). Minden VO szelvényben 5-6 mederanyag mintát is vettek a mederszélességtől függően. Megállapították a paksi hűtővízkivétel (1526,7 fkm) feletti és alatti mértékadó fenékszintek mBf magasságát. Kiszámították az 1984-es hajózási kisvízszint alatti medertérfogatokból adódó átlagos mendermélységeket, majd ezek évenkénti változását. Kiemelt figyelmet fordítottak a különösen száraz (kisvizes) évek: 1983, 1992, 1996, 2003 alatti és utáni mederszint-változásokra. A vizsgálatok a számos közelítő feltételezés ellenére kimutattak 5-7 cm-es átlagos fajlagos medersüllyedéseket a tartós kisvizes időszakokban és 0-7 cm-es mederemelkedéseket a nagyvizek levonulása után. Az utóbbi átmeneti feltöltődésekhez szükséges mederanyag mennyiséget *feltehetően* a Dunaföldvár környékén és a sarkantyúközökben az 1536. fkm alatt, a tilalom ellenére a 90-es években is folytatott kotrásokkal megbolygatott mederszakaszokról mosták ki a nagyvizek (lásd később is). A medersüllyedéseket a kotráson túl valószínűen a kisvízi gázlótető-koptatások okozták, de belejátszott a Dunacsúnyig belépcsőzött Duna-szakaszról érkező letisztult folyóvíz megnövekedett eróziója, aminek 1-2 cm/év nagyságrendű mendermélyítő hatása a déli országhatárig kimutatható.

Paks estében az egyik alapvető kérdés az, hosszabb távon milyen morfológiai változások várhatók és ezek hogyan befolyásolják a jövőben a paksi vízkivételt. Vegyük sorra, milyen tényezőktől és jelenségektől is függ a válaszadás.

- A mederváltozás jelensége igen összetett. Igényli a lebegtetett és görgetett hordalékszállítás-, a hordalék utánpótlódás-, a kiülepedés és felkeveredés-, az osztályozódás- (szortírozódás-), az eltemetődés- stb. megértését és leírását. Mindez függvénye a medergeometriának, a részecske méreteloszlásnak és a hidraulikának oly módon, hogy a mederváltozás visszahat a hidraulikai viszonyokra. A kérdést bonyolítják olyan sajátos jelenségek, mint a Dunára jellemző *páncélozódás* (kis vizek mellett a finom frakciók kimosódnak, a felszíni réteget egyre inkább durva szemek borítják, és a keletkezett „páncélt" csak nagyobb árhullámok tudják felrobbantani).

- A paksi vízkivétel szempontjából kiemelt fontosságú Barákai gázló (1521.3 fkm) felett a 90-es években 1m feletti kimélyülés következett be (ez jellemző a Dunaföldvár – Mohács szakaszra). Ezzel szemben a gázló felett a kimélyülés 2000 után lelassult (VITUKI, 2011), 2010-ben pedig némileg visszatöltődött: a 2010. évi nagy árvíz több hordalékot hozott, mint amit elvitt (mindezek mellett, a gázló környéki szelvényeket a kiülepedés és a felkeveredés lokális hatásai jellemzik – 0,1-0,2 m; a gázló felett a jövő kisvizei minden bizonnyal ismét a berágódás érvényesülését fogják magukkal hozni). Összességében a gázló fontos küszöb-hatással bír a paksi kisvízszintek megemelésében és tartásában (valójában a paksi vízállás és a barákai gázlómélység szoros kapcsolatot sugall, VITUKI, 2011). A gázló azonban akadályt jelent a hajózás szempontjából, ezért a vizsgálatok mederkotrást irányoznak elő. A 2,5 m előírt hajózási mélység eléréséhez mintegy 0,8 m-t kellene lekotorni a gázló tetőszintjéből. Ezt a küszöbszint változást viszont a paksi vízkivétel bizonyára nem viselné el (a kérdést jelen fejezet keretei között vizsgáljuk).
- A medersüllyedés egyik lehetséges kiváltó oka, tehát ami válaszra vár, a Dunaföldvár-környéki ipari kavics kitermelés (Dunai Hajózási és Környezeti Projekt, 1995). A hiányos adatok alapján, a becslések szerint az 1637-1586 fkm között folyószakaszon, 1971 és 1985 között mintegy 13 millió m³ kavics (250 000 m³/km) nyert kitermelést. Ennek 500 m szélesség mellett fél méteres (!) folyamatos erózió felel meg. Az 1560-1510 fkm szakaszon (Dunaföldvár – Fajsz), az 1984-et követő évtizedben kb. 8 millió m³ volt a kitermelés. Összességében valószínű, hogy a kotrás csökkentette a Paks közeli hordalékkészletet.
- A hordalék- és morfológiai problémát a területi és időbeli változékonyság és a lokális hatások jellemzik, ezért a jelenség leírása átfogó mérési programot és 3D tárgyalásmódot igényel, ami kiterjed a hidrodinamikára, a lebegtetett és görgetett hordalék transzportra, a peremfeltételre a mederfeneken, az aktív mederrétegre, az eltemetődésre stb. és a morfológiára. Elvileg ez tenné lehetővé a rövidtávú és lokális hatásoktól kezdve az évtizedes múltbeli változások leírását és megértését (szükségszerűen a Pakstól a főváros felé meghosszabbított folyószakaszra, azért, hogy a felvízi hatások megalapozottan figyelembe vehetők legyenek). Ugyan modellek alkalmazására, mérésekkel együtt a Duna különböző, rövidebb szakaszaira elvétve vannak példák (Fischer et al, 2008, Baranya, 2009, Tritthart et al 2010, Tritthart et al, 2011), azonban az igények sem az adatok oldaláról, sem pedig a 3D (vagy 2D) modellek gépidő igénye szempontjából nem kielégíthetők: a Dunaföldvár alatti hazai folyószakaszt kellene kezelni és a számításokat - az ok-okozati kapcsolatok feltárását követően, az előrejelzés érdekében - évtizedekre elvégezni, például forgatókönyvek alapján.
- Számos fontos részletkérdés is felmerül. Hogyan történjék a modell bearányosítása, figyelembe véve a hiányos adatokat? Meder-, mederanyag változás, térfogatváltozás, vízmélység változás (lásd VITUKI, 2011)? Milyen hidrológiai feltételekre? Egy-egy nagyobb árhullámra?
- Közismert, hogy elméleti tudásunk „vékony" volta miatt, a hordalékmozgás területe erősen empirikus jellegű. Ennek megfelelően, a lebegtetett és a görgetett hordalék mennyiségének számítására, különböző jellegű és mélységű, laboratóriumi és helyszíni mérésekre alapozott közelítő, gyakorlati összefüggések állnak rendelkezésre. Ezek alkalmazási korlátai többnyire nem ismertek. A VITUKI (2011) átfogó vizsgálata szerint a kijelölt öt potenciális hordalék-szállítást becslő módszer (Ackers and White, Engelund_Hansen, Laursen-Copeland, Meyer-Peter and Müller és Toffaleti) közül három használhatatlan volt a Duna esetében. Az egyes eljárások között a 200-300 %-os eltérés már „jónak" tekinthető. Még a 2D alkalmazások esetén is előfordulnak 100 % feletti különbségek (Wu, 2001).
- A két „elfogadható" módszerrel végzett részletes vizsgálatok azt mutatták (VITUKI, 2011), hogy (i) homogén hordalékszemek feltételezése durva közelítést jelent (a szemösszetétel hossz- és keresztirányban is erősen változik), a középvíz feletti vízhozam tartományban akár nagyságrendi hiba is előfordulhat; (ii) a vizsgált szakasz 1990 és 1999 közötti, számított medertérfogat változása jelentősen eltér a mérésből levezetett értéktől, annak ellenére, hogy modell-kalibrálásról volt szó; (iii) a hidraulikus középmélységek változásán alapuló bearányosítás hasonlóan nem volt sikeres; (iv) a „gyenge" modell eredményeket elsősorban a 3D hatások elhanyagolása és a szemösszetétel egyszerűsített leírása magyarázza. Megjegyezzük, hogy a Pozsony és Komárom közötti folyószakaszra Topolska és Klucovska (1997) kedvezőbb tapasztalatokat kapott. Az alkalmazott hordalék-transzport modellek többségére azonban az jellemző, hogy egy-egy kiragadott folyamat nem kellően alátámasztott empirikus egyenleteire alapoznak és ezért azután az „eredmények sem egymással, sem a mérésekkel" nem egyeznek.

- A jövőt alapvetően befolyásolják az egyelőre ismeretlen hajózási és folyószabályozási beavatkozások, amelyek történhetnek duzzasztással és a nélkül. Ez forgatókönyvek kidolgozása révén elemezhető, ami messze meghaladja a jelen vállalkozás kereteit. Itt pusztán a fennálló konfliktusokra hívjuk fel a figyelmet (egyszerű példa a Barákai gázló: a hajózás és Paks vízmélység/vízállás érdeke erősen eltérő).

8.15.2 A VIZSGÁLAT LÉPÉSEI

Az összetett problémát első lépésként részekre bontjuk, dekomponáljuk. A főbb elemek a következők:

- Első lépésként, vízszint adatok alapján trend vizsgálatokat végzünk. Felhasználjuk a mások által nyert eredményeket is, majd a meder lehetséges jövőbeni alakulásával foglalkozunk, amennyire azt a „fekete doboz" jellegű elemzések lehetővé teszik.
- A melegvíz visszavezetés mintegy 2 km-es környezetében - ahogyan arra már utaltunk, a 3D turbulencia modellel kiegészített hidrodinamikai modellel számítjuk az áramképet bevezetéssel és a nélkül. Az összehasonlítást különböző indikátorok segítségével végezzük el. Ilyen jellemző például a fenékcsúsztató feszültség, a sodorvonal helyzete vagy a 2D-ben értelmezett áramvonalak stb.).
- A hordalék felkeveredési potenciált a kritikus fenék csúsztató feszültségtől mért eltéréssel jellemezzük (($\tau - \tau cr$)/τcr). A kiülepedésre való hajlandóságot részecske Monte Carlo szimulációval tanulmányozzuk.
- A mederváltozás vizsgálatára van Rijn (1984a, 1984b) munkájára alapozva, amelyet több vizsgálat is a legalkalmasabbnak minősített a Dunára (lásd például Baranya, 2009) hordalék-transzport részmodellt fejlesztünk, ami fizikai alapokra támaszkodva - többek között - kezelni tudja a görgetett és lebegtetett hordalékot, a felkeveredést és kiülepedést, az osztályozódást és szemeloszlási görbével dolgozik. A rutint oly módon fejlesztjük, hogy az 1D és 2D hidrodinamikai modell keretbe ültetve egyaránt alkalmazható legyen. Az 1D változat segítségével elemezzük a hosszabb távú változásokat a Dunaföldvár – Mohács szakaszra. Az 1D tárgyalásmód alkalmazása a VITUKI (2011) tapasztalatai ismeretében részben kényszer (még a 2D nem-permanens modell gépidő igénye is irreálisan nagy), részben azonban bízunk abban, hogy az általunk alkalmazott, fizikailag elfogadhatóan alátámasztott hordalék - meder részmodell jobban működik, mint az irodalomból ismert módszerek többsége és a korábban a Dunára tesztelt változatok.
- Utolsó lépésként a részeredményeket aggregáljuk és megkíséreljük a gyakorlati következtetések levonását.

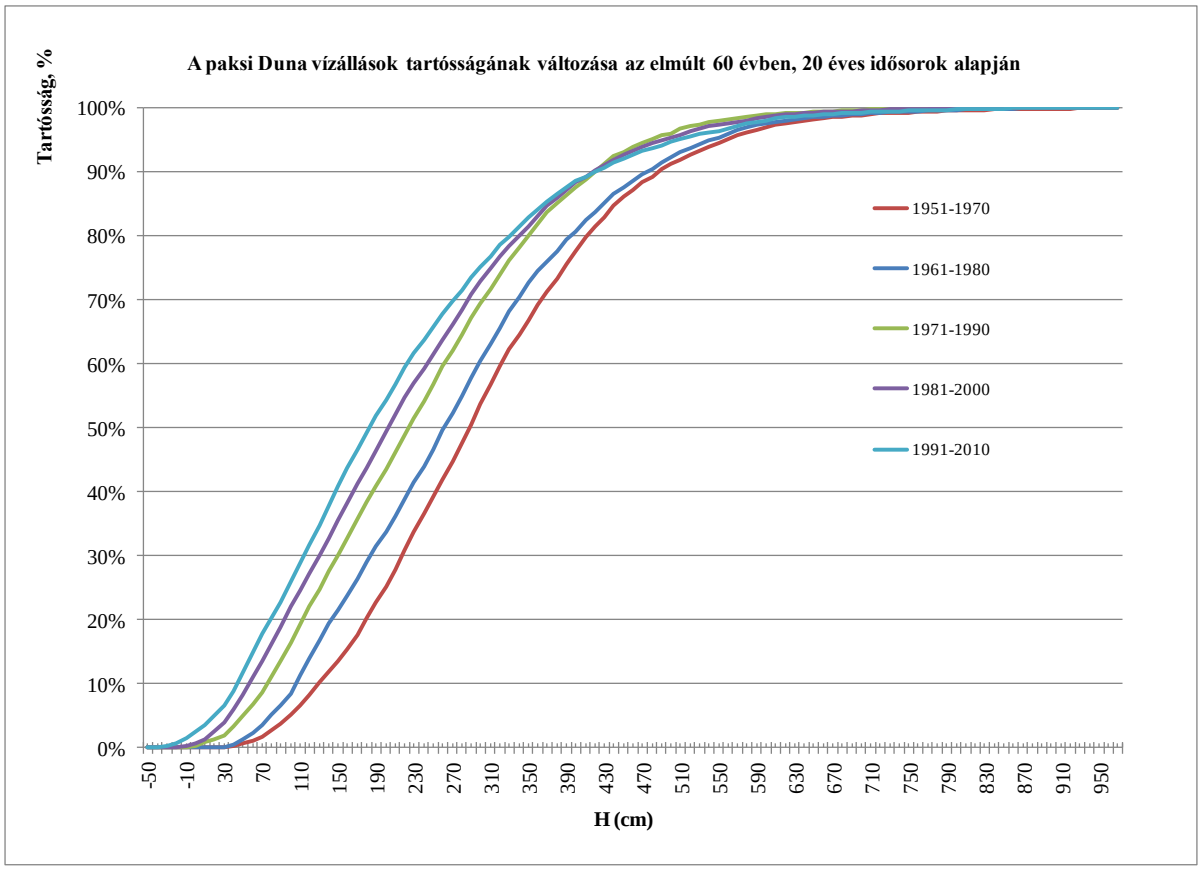
8.15.3 AZ ELVÉGZETT VIZSGÁLATOK BEMUTATÁSA, ÉRTÉKELÉSE

8.15.3.1 A vízállás tartóssági görbék értékelése

A medernek (nem csak) a paksi szelvényben való mélyülése ismert jelenség, erre már többször utaltunk is. Azt is említettük, hogy megalapozott ok-okozati kapcsolat nem ismeretes. Az okok között szerepel a Duna felvízi szakaszán megépült (átfolyásos) vízlépcsők tározótereinek és a vízgyűjtőn bekövetkezett változások hordalék visszatartó hatása (amelyek megszüntetése nem várható, ezért a jelenség folytatódásával számolni kell) és a korábbi Dunaföldvár környéki nagy léptékű ipari kavics kitermelés. A mélyülés következtében már a jelenleg üzemelő erőműnek is növekedtek a veszteségei azáltal, hogy a folyamattal együtt járt a kisvizek előfordulási gyakoriságának növekedése, ami az átemelőnél éves viszonylatban nagyobb összes emelési magasságot és a szivattyúk romló hatásfokát eredményezte.

A megfigyelt változások igen kedvezőtlenül befolyásolhatják a bővítés tervezett külső hűtővízellátását és az erőmű biztonságos jövőbeni üzemvitelét. Utóbbinak előfeltétele az, hogy a Duna vízszintje a hidegvíz-csatornában lévő vízmércén ne essék a 84,42 mBf illetve 83,6 mBf érték alá. Előbbi esetén a szivattyúkban káros kavitáció léphet fel, míg utóbbi az egész erőmű számára kritikus. A VITUKI (2011) tanulmány alapos statisztikai elemzések alapján arra a következtetésre jutott, hogy (i) *a kisvizek* süllyedő tendenciát mutatnak, aminek a mértéke 2-3cm/év (1965 - 2009, azaz az adatsor hossza 44 év); (ii) amennyiben nem történik komoly beavatkozás, a jelenlegi (lineáris) trend folytatódik, a 84,42 mBf szint elérése 2030-tól, száraz években szinte biztosra vehető, míg a 83,6 mBf szint előfordulási valószínűsége 20 % közeli.

Annak érdekében, hogy a mélyülés időbeni alakulásáról, a folyamat sebességéről információt szerezzünk, értékeltük a paksi szelvényre rendelkezésre álló 60 éves vízállás idősort, mint a legmegbízhatóbb információt. Előállítottuk a 10 éves átfedésekkel készült 20 éves idősorokra vonatkozó vízállás tartóssági görbéket (8.15-1. ábra).

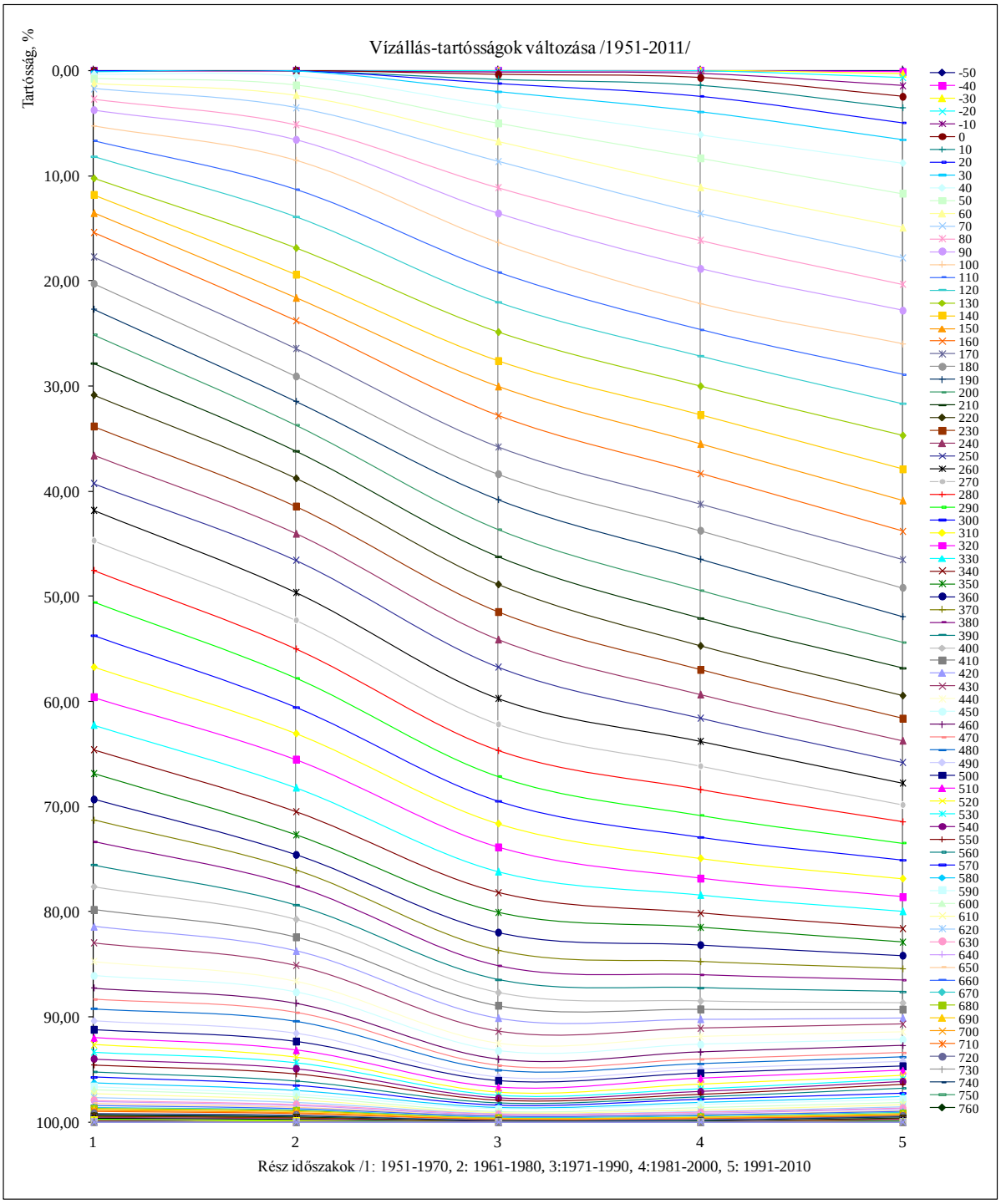


8.15-1. ábra Egymást követő 20 éves vízállás idősorok tartóssági görbéi, 1951-2010

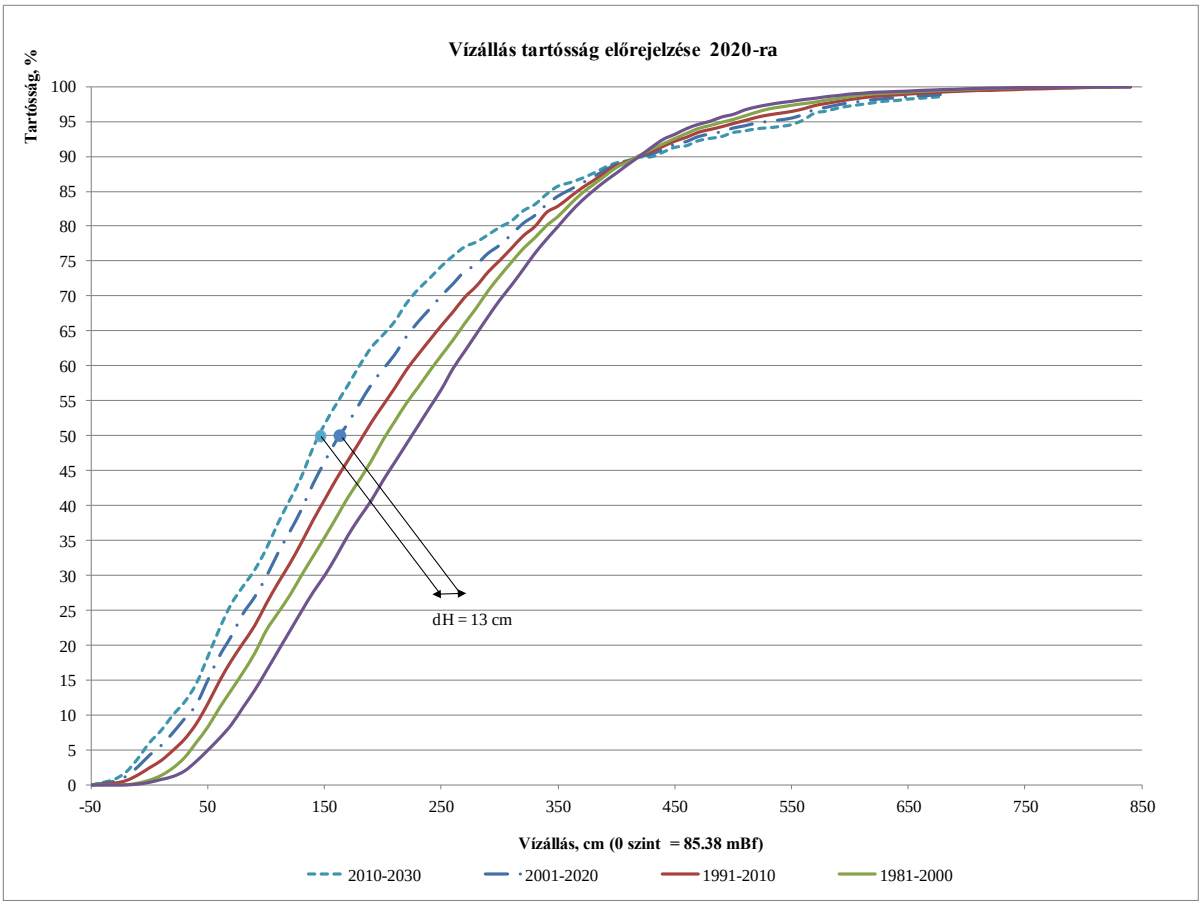
Látható, hogy az 1951-1970-es évek 50 %-os tartósságú (medián) 295 cm-es paksi vízállás értéke az 1991-2010-es időszakban már csak 188 cm-es értéket ért el (a változás mértéke a 20 % - 80 % tartományban közel állandó). *60 év* alatt a medián csökkenése tehát valamivel meghaladta az 1 métert. A csökkenés üteme nem teljesen egyenletes (lásd később), *átlaga* 1,8 cm/év.

Annak érdekében, hogy az új erőmű üzembe helyezési és üzemelésének kezdeti időszakában várható állapotot becsülhessük, a tartóssági görbékből előállítottuk az egyes vízállások tartósságainak változását ugyanezen időszakra (8.15-2. ábra). Az ábrán látszik, hogy (i) a VITUKI (2011) elemzéseivel összhangban, elsősorban a kis és középvizek tartóssága növekszik a nagyvizeké rovására és (ii) az utolsó két évtizedben a változás közel lineáris.

Ez a feldolgozás, a változások jellege miatt lehetőséget adott arra, hogy extrapoláljunk a jövőbe. Feltételeztük, hogy a változások jellege megegyezik az értékelt időszak utolsó 20 évében tapasztalttal, tehát lineáris (8.15-2. ábra). A két utolsó 20 éves időszak (1981-2000 és 1991-2010) vízállásonként ismert tartóssági értékeire (a 8.15-2. ábra X tengelyén a 4-hez és 5-höz tartozó tartósságok) illesztett egyenesek egyenleteivel az extrapolációt a két következő 20 éves időtartamra, 2030-ig elvégeztünk és ezzel két jövőbeni tartóssági görbéhez jutottunk (8.15-3. ábra). Ez a medián értékben további csökkenést mutat, miközben a 60 év adatai alapján a 2030-ra előrejelzett 149 cm-es medián értékhez 175 cm-es éves átlag vízállást kapunk.

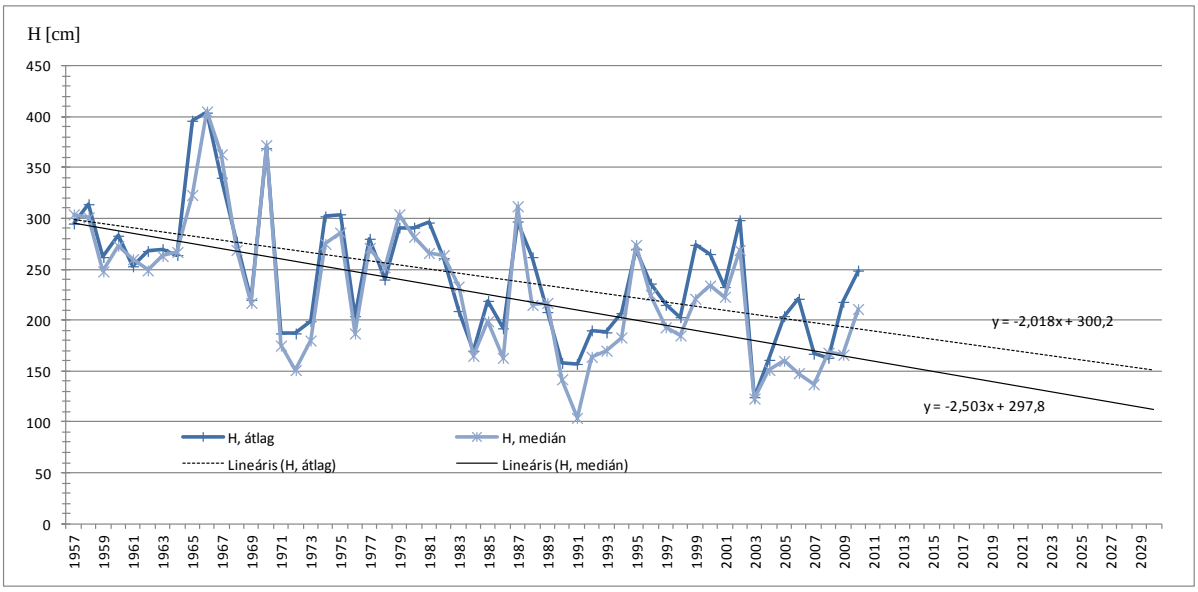


8.15-2. ábra Az egyes vízállások tartósságának változása 1951-2010 között.



8.15-3. ábra Egymást követő 20 éves vízállás idősorok tartóssági görbéi, 2001-2020 és 2010-2030

Az üzemeltetés során szükség lehet a medián értéken túl az átlagértékre is. Nem bizonyos, hogy a két paraméter megegyezik egymással (ugyan nem kizárt). Ezért megvizsgáltuk az adatsorok medián és átlagértékei közötti kapcsolatot. Míg ezek a múlt század ’50-es éveiben csaknem egyenlők voltak, a medián meredekebb regressziós egyenese (8.15-4. ábra) napjainkra már 40 cm-rel kisebb értéket ér el, mint az átlagé. Mindez ugyancsak a kisvizek tartósságának növekedését mutatja.



8.15-4. ábra Az éves vízállás idősorok medián és átlagértékeinek alakulása a Duna paksi szelvényében, 1957-2010

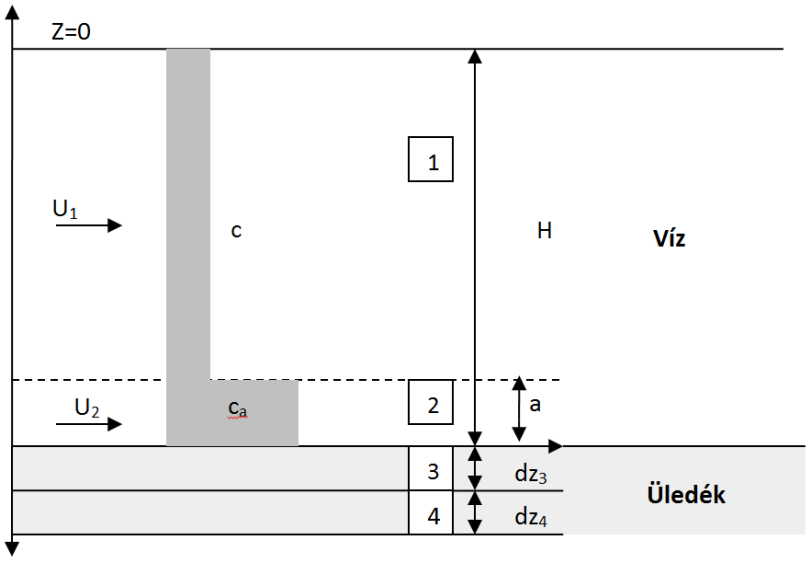
A 8.15-2. ábra azt mutatja, hogy a legmarkánsabb vízszintváltozások a hetvenes-nyolcvanas években következtek be. Ez összhangban van azzal a hipotézissel, hogy a Dunaföldvár környéki ipari kavics kitermelés fontos szerepet játszott a meder süllyedésében. A pesszimista forgatókönyv most már a legnagyobb trenddel történő extrapolációból adódik és a kitermelés nagyságrendi folytatását feltételezi. Optimista szcenáriót a mélyülés megállása jelent, ez egyelőre nem túl valószínű.

Hangsúlyozzuk, hogy az eredmények nagyjából a jelenlegi folyami „struktúra" fennmaradása esetén érvényesek. A megállapítás vonatkozik a hordalék-készlet változatlan jellegű rendelkezésre állására is.

8.15.3.2 A hordalék-transzport modell: 1D és 2D változatok

A modell célja adott folyószakaszra a lebegtetett és görgetett hordalék hozamának és a folyómeder változásának a becslése. Ehhez a sebességteret 1, 2 vagy 3D hidrodinamikai modellből nyerhetjük, ami bemenetként szolgál a kibővített transzport egyenlethez. Ez utóbbi egyaránt tartalmazza a lebegtetett és a görgetett hordalékot, mindegyiket több frakció által jellemezve.

Feltételezésünk szerint a modellben négy réteget különböztetünk meg (lásd a 8.13.5 ábrát): 1. a (H-a) vastagságú folyóvizet, 2. az „a" meder-érdességi (állandó) vastagságú, fenék közeli, lassan mozgó víz-hordalék keveréket, 3. a vízszintes irányban nem mozgó felső, aktív üledék réteget (dz_3), ami kölcsönhatásban van 2.-vel és végül 4. legalul az inaktív alsó üledék réteget (dz_4).



8.15-5. ábra Sematikus ábra a rétegek definiálására

Az 1. és 2. rétegekben zajlik a vízszintes transzport. A 3. és 4. rétegeket a függőleges irányú kölcsönhatás jellemzi: ezek forrásai illetve tárolói a felkeveredett (erodálódott) vagy kiülepedett anyagnak. Amennyiben a vizsgált cellában az i-ik frakció kiülepedése dominál, az üledék a kontinuitásnak megfelelően tovább mozog a 4. rétegbe és megemeli a medret. Nettó erózió esetében a folyamat kimélyüléshez vezetve, fordítva játszódik le (van Rijn, 1986, Baranya, 2009). Az 1. és 2. rétegekben a koncentráció a mélység mentén állandónak feltételezett (c és c_a). A számítás egymást követő lépései az alábbiak szerint foglalható össze.

8.15.3.2.1 A lebegőanyag transzportja

Mindegyik rétegre anyagmérleg egyenletet írunk fel. A szemcsefrakciók száma: r, így a továbbiakban j=1,…,r egyenletünk lesz, a j index az aktuális frakciót jelöli. A számításokat frakciónként léptetve végezzük el, a hatásokat összesítjük és cellánként számoljuk függőleges irányú fluxust, majd a mederváltozást. A mérlegegyenlet különböző hidrodinamikai modellekkel párosítható (lásd korábban is). A következőkben ezeket mutatjuk be a négy rétegre, 1D és 2D esetre.

(a) 1. réteg, 2D tárgyalásmód

Alapul a H mélység mentén integrált (8.15-1) transzport egyenlet szolgál. A koncentráció megváltozásáért az x és y irányú konvekció, a függőleges (z) irányú ülepedés/felkeveredés és a szintén mélységfüggő turbulens diffúzió felelős (a horizontális diffúziót elhanyagoljuk a konvekcióhoz képest):

$$\frac{\partial Hc_j}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(u_1 Hc_j) + \frac{\partial}{\partial y}(v_1 Hc_j) = \Phi_{E,j}^{(H-a)} - \Phi_{D,j}^{(H-a)} = \Phi_j^{(H-a)} \qquad (8.15\text{-}1)$$

Itt $\Phi_{E,j}^{(H-a)}$, $\Phi_{D,j}^{(H-a)}$ a felkeveredés és a kiülepedés fluxusai, $\Phi_j^{(H-a)}$ az eredő érték (H-a) mélységben [g/s/m²] a j. frakcióra, u_1,v_1 mélységbeli átlagsebesség az 1. rétegben (x,y irányban). Fennáll az $u_1 \approx \bar{u}$ és a $v_1 \approx \bar{v}$ összefüggés, mivel a<<H, ahol $\bar{u}$, $\bar{v}$ … sebesség mélység átlaga (x,y irányban).

Az ülepedési fluxus a H-a mélységben:

$$\Phi_{D,j}^{(H-a)} = \omega_j \cdot c_j \text{, ahol} \qquad (8.15\text{-}2)$$

a j-ik frakció ω_j ülepedési sebessége a Stokes f. törvényből származtatható

$$\omega_j = \frac{\frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w} g \cdot d_j^2}{18\nu}, \; 1 \le d_j \le 100\mu m$$

$$\omega_j = \frac{10\nu}{d_j}\left(\sqrt{1 + \frac{0.01\frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w} g d_j^3}{\nu^2}} - 1\right), \; 100 \le d_j \le 1000\mu m$$

$$\omega_j = 1.1\sqrt{\frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w} g d_j}, \qquad d_j \ge 1000\mu m$$

ahol ν a kinematikai viszkozitás, ρ_s, ρ_w az üledék illetve víz sűrűsége.

A felkeveredés fluxusa:

Feltesszük, hogy a meder-érdességi rétegben (2. réteg) a lebegtetett hordalék $c_{a,j}$ koncentrációja minden pillanatban a van Rijn (1984b) féle egyensúlyi koncentrációval egyenlő (($c_{a,j} = f(\tau, \tau_{kr}, d_j)$, lásd később és Baranya, 2009 is).

Feltesszük továbbá, hogy az 1. rétegben a lebegtetett hordalék koncentráció közelítően egyenletes ($c^{(0)} - c^{(H-a)} \approx 0$), azaz a koncentráció kiegyenlítődése az 1. víztérben pillanatszerűen játszódik. Ekkor, a kiegyenlítődés fluxusára az alábbi közelítés adható:

$$\Phi_{E,j}^{(H-a)} = D_z^{(H-a)} \frac{c_{a,j} - c_j}{\frac{H}{2}}, \qquad (8.15\text{-}3)$$

ahol $D_z^{(H-a)}$ a vertikális turbulens diffúziós tényező a H-a mélységben. Élhetünk a szokásos összefüggéssel:

$$D_z^{(H-a)} = \kappa \cdot u_* a\left(1 - \frac{a}{H}\right),$$

ahol κ = 0,4, u_* súrlódási sebesség ($u_* = \sqrt{\frac{\tau}{\rho_w}}$), τ csúsztató feszültség, ρ_w a víz sűrűsége.

A fluxusok eredője:

$$\Phi_j^{(H-a)} = 2D_z^{(H-a)} \frac{c_{a,j}}{H} - c_j\left(\omega_j + \frac{2D_z^{(H-a)}}{H}\right) \qquad (8.15\text{-}4)$$

majd a kiindulási mélység-integrált egyenletbe behelyettesítve:

$$\frac{\partial H c_j}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(u_1 H c_j) + \frac{\partial}{\partial y}(v_1 H c_j) = -\omega_j \cdot c_j + D_z^{(H-a)} \frac{c_{a,j} - c_j}{\frac{H}{2}} \qquad (8.15\text{-}5)$$

A számítás indítása c(x,0) kezdeti értékről történik, amely zérus is lehet (mivel hosszabb időszakot számolunk, bízhatunk abban, hogy a modell „elfelejti" a kezdeti értéket). Valójában azonban a számítás lassúsága miatt csak stacionárius esetek sorozatával dolgozhatunk. Ekkor a (8.15-5) egyenlet első tagja zérus és a véges differenciák módszerét alkalmazva a

$$c_j = \frac{L_{1i,j} + \frac{2D_z^{(H-a)} \cdot c_{a,j}}{H} \Delta x \Delta y}{u_1^{(-)}(H-a)\Delta y + v_1^{(-)}(H-a)\Delta x + (\omega_j + \frac{2D_z^{(H-a)}}{H})\Delta x \Delta y} \qquad (8.15\text{-}6)$$

összefüggést kapjuk, ahol $L_{1i,j}$ az 1. réteg aktuális cellájának bemenő horizontális anyagárama, a j. frakcióban, $u_1^{(-)}, v_1^{(-)}$ a cellából kifelé mutató 1. rétegbeli átlagsebességek. A (8.15-6) egyenlet – frakciónként - a teljes cellamezőre iteratív módon megoldható lineáris egyenletrendszert jelent. Megjegyezzük, ez alapján az eredő vertikális anyagáram is felírható – lásd a (8.15-4) egyenletet.

(b) 1. réteg, 1D tárgyalásmód

Permanens, 1D esetben nincsen szükség iterációra, mert az alvízi cellák (Δx távolságban fekvő szelvények közötti folyószakaszok) nem befolyásolják a felvízi cellák állapotát. Felülről lefelé haladva számítjuk az egyensúlyi koncentrációt. A cella $L_{1i,j}$ horizontális terhelése a felvízi cella kimeneti anyagáramával egyezik. A megoldás:

$$c_j = \frac{L_{1i,j} + \frac{2D_z^{(H-a)} \cdot c_{a,j}}{H} \Delta x \cdot B}{Q + (\omega_j + \frac{2D_z^{(H-a)}}{H})\Delta x \cdot B}. \qquad (8.15\text{-}7)$$

Itt B a folyó cella szélessége, Δx az adott cella folyásirányú hossza, $c_{a,j}$ a hidrodinamikai modellből származtatott csúsztató-feszültség alapján számítható, H a keresztmetszeti átlagmélység: $H = \frac{1}{B}\int H_{(y)} dy$, Q stacionér vízhozam. A peremi anyagáram a koncentráció ismeretében ismét a (8.15-4) egyenletből nyerhető.

Nem permanens esetben, az anyagmérleg a k-ik cellára és a j-ik frakcióra hasonlóan írható fel, mint korábban. Az eredmény:

$$\frac{\partial c_j^k}{\partial t} = \frac{Q^{k-1}c_j^{k-1} - Q^k c_j^k}{\overline{A}_k \Delta x} - \frac{c_j^k}{\overline{A}} \frac{\partial \overline{A}_k}{\partial t} - (\omega_j \cdot c_j^k - D_z^{(H-a)} \frac{c_{a,j}^k - c_j^k}{\frac{H}{2}}) \cdot \frac{\overline{B}_k}{\overline{A}_k}. \qquad (8.15\text{-}8)$$

$\overline{A}_k, \overline{B}_k$ pedig a k-ik szakasz átlagos keresztmetszeti területe és szélessége (az adott időlépésben). A (6c) m ismeretlenes közönséges differenciál egyenletet numerikusan oldjuk meg. $\overline{A}_k, \overline{B}_k, \frac{\partial \overline{A}_k}{\partial t}$ és u^k az 1D hidrodinamikai modellből (a Saint-Venant egyenlet megoldásából) adódik, időlépésenként felújítva. A megoldás ismeretében a (8.15-4) egyenlet segítségével a peremi fluxus is felírható (minden időlépésben):

$$\Phi_j^{(H-a)} = 2D_z^{(H-a)} \frac{c_{a,j}}{H} - c_j(\omega_j + \frac{2D_z^{(H-a)}}{H}). \qquad (8.15\text{-}9)$$

(c) 2. réteg, 2D tárgyalásmód

Feltételezzük, hogy az a vastagságú érdességi rétegben az egyensúlyi koncentráció adott hidraulikai viszonyok között pillanatszerűen (nagyon gyorsan) beáll, tehát az anyagáram szempontjából csak közvetítő szerepet tölt be:

$$\frac{\partial c_{a,j}}{\partial t} = 0$$

azaz $c_{a,j} = f(\tau, d_j) = c_{a,j(\tau)}$, ami van Rijn (1984b) alapján számolható (Baranya, 2009):

$$c_{a,j} = 0{,}015\rho_s \frac{d_j}{a} \frac{\left[\frac{\tau - \tau_{c,j}}{\tau_{c,j}}\right]^{1,5}}{\left\{d_j \left[\frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w \nu^2}\right]^{\frac{1}{3}}\right\}^{0,3}}$$

ahol $c_{a,j}$ az egyensúlyi koncentráció, ν a kinematikai viszkozitás, ρ_s, ρ_w az üledék illetve víz sűrűsége, *a* a második réteg vastagsága, τ a csúsztató feszültség, ahol a *c* index a kritikus értékre utal.

A $c_{a,j}$ egyensúlyi koncentráció τ kialakulásakor, feltételezésünk szerint, azonnal megjelenik a 2. rétegben.

A 2. rétegre az anyagmérleg cellaszinten:

$$L_{2i,j} - u_2^{(-)} \cdot a \cdot c_{a,j(\tau)} \cdot \Delta y - v_2^{(-)} \cdot a \cdot c_{a,j(\tau)} \cdot \Delta x - \Phi_j^{(H-a)} \cdot \Delta x \cdot \Delta y + \Phi_j^{(H)} \cdot \Delta x \cdot \Delta y = 0,$$

ahol a az érdességi réteg vastagsága ($a = 3d_{90}$, d - szemátmérő), $L_{2i,j}$ a cellába, a szomszédos cellából a 2. rétegben belépő horizontális anyagáram, a j-ik frakcióra értelmezve, $\Delta x, \Delta y$ a cella méretek, $u_2^{(-)}, v_2^{(-)}$ a cellából kifelé mutató 2. rétegbeli átlagsebességek. Innen:

$$\Phi_j^{(H)} = \frac{-L_{2i,j}}{\Delta x \cdot \Delta y} + \frac{u_2^{(-)} \cdot a \cdot c_{a,j}}{\Delta x} + \frac{v_2^{(-)} \cdot a \cdot c_{a,j}}{\Delta y} + \Phi_j^{(H-a)} \qquad (8.15\text{-}10)$$

Visszahelyettesítve az (H-a) mélységben kialakuló függőleges anyagáram összefüggését, az eredő fluxus:

$$\Phi_j^{(H)} = \frac{-L_{2i,j}}{\Delta x \cdot \Delta y} + \frac{u_2^{(-)} \cdot a \cdot c_{a,j}}{\Delta x} + \frac{v_2^{(-)} \cdot a \cdot c_{a,j}}{\Delta y} - \omega_j \cdot \frac{L_{1i,j} + \frac{2D_z^{(H-a)} \cdot c_{a,j}}{H}\Delta x \Delta y}{u_1^{(-)}(H-a)\Delta y + v_1^{(-)}(H-a)\Delta x + (\omega_j - \frac{2D_z^{(H-a)}}{H})\Delta x \Delta y} + D_z^{(H-a)} \frac{c_{a,j} - \frac{L_{1i,j} + \frac{2D_z^{(H-a)} \cdot c_{a,j}}{H}\Delta x \Delta y}{u_1^{(-)}(H-a)\Delta y + v_1^{(-)}(H-a)\Delta x + (\omega_j - \frac{2D_z^{(H-a)}}{H})\Delta x \Delta y}}{\frac{H}{2}}$$

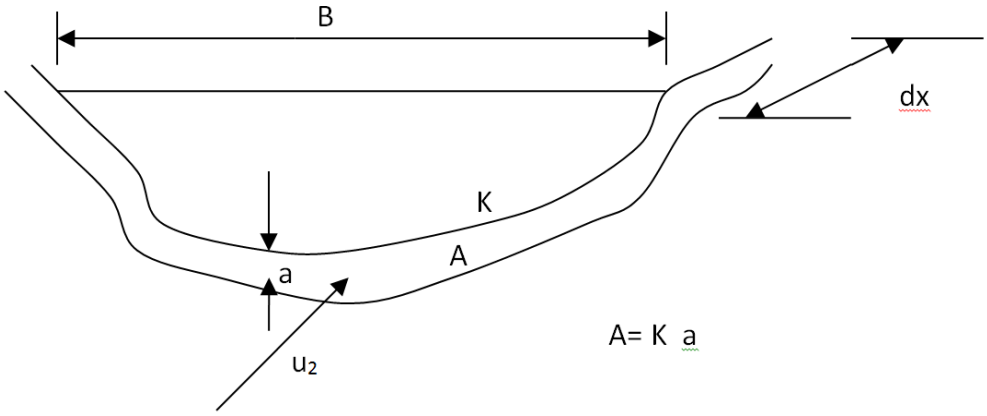
A 2. réteg esetében két feladatot kell végrehajtani: (i) C_a számítását és $\Phi^{(H)}$ meghatározását (a 3. réteg felé irányuló vagy onnan érkező eredő anyagáram), majd (ii) ezt továbbgördítve a morfológiai változások számítását. A (8.15-10) egyenletben megjelenő u_2 sebesség számítása a logaritmikus sebességeloszlás alapján lehetséges, aminek az „a" vastagságú rétegre vett átlaga u_2.

(d) 2. réteg, 1D tárgyalásmód

Permanens esetben a 2. rétegre az anyagmérleg egyenlet cellaszinten:

$$L_{2i,j} - u_2^{(-)} \cdot K \cdot a \cdot c_{a,j(\tau)} - \Phi_j^{(H-a)} \cdot \Delta x \cdot B + \Phi_j^{(H)} \cdot \Delta x \cdot B = 0,$$

ahol K a nedvesített kerület, B a meder szélesség, Δx a szelvény távolság (lásd a 8.15-6. ábrat).



8.15-6. ábra Az 1D modell főbb meder jellemzői

Az eredő fluxus

$$\Phi_j^{(H)} = \frac{-L_{2i,j}}{\Delta x \cdot B} + \frac{u_2^{(-)} \cdot a \cdot K \cdot c_{a,j}}{\Delta x \cdot B} + \Phi_j^{(H-a)}$$

majd a korábbihoz hasonló visszahelyettesítést követően:

$$\Phi_j^{(H)} = \frac{-L_{2i,j}}{\Delta x \cdot B} + \frac{u_2^{(-)} \cdot a \cdot c_{a,j} \cdot K}{\Delta x \cdot B} - \omega_j \cdot \frac{L_{1i,j} + \frac{2D_z^{(H-a)} \cdot c_{a,j}}{H} \Delta x \cdot B}{Q + (\omega_j - \frac{2D_z^{(H-a)}}{H}) \Delta x \cdot B} + D_z^{(H-a)} \frac{c_{a,j} - \frac{L_{1i,j} + \frac{2D_z^{(H-a)} \cdot c_{a,j}}{H} \Delta x \cdot B}{Q + (\omega_j - \frac{2D_z^{(H-a)}}{H}) \Delta x \cdot B}}{\frac{H}{2}}$$

Nem-permanens esetben

$$\Phi_j^{(H-a)} = 2D_z^{(H-a)} \frac{c_{a,j}}{H} - c_j(\omega_j + \frac{2D_z^{(H-a)}}{H}),$$

azaz a réteg felső peremén - c változása miatt - a fluxus időben változik, viszont a réteg horizontális transzportja állandó, így:

$$\Phi_j^{(H)} = \frac{-L_{2i,j}}{\Delta x \cdot B} + \frac{u_2^{(-)} \cdot a \cdot c_{a,j} \cdot K}{\Delta x \cdot B} - 2D_z^{(H-a)} \frac{c_{a,j}}{H} + c_j(\omega_j + \frac{2D_z^{(H-a)}}{H}).$$

(e) 3. réteg

Az aktív (3.) rétegben könyveljük el a morfológiai változásokat. Miután feltevésünk szerint a rétegvastagság (dz_3) állandó, a réteg fel- vagy lefelé tolódik attól függően, hogy feltöltődés vagy erózió adódik a cellában. A morfológia két lépésben változik:

(i) a csúsztató feszültségnek időlépésenkénti lépcsős változását feltételezzük, azért a 2. rétegben is lépcsősen változik a $c_{a,j} = f(\tau)$ koncentráció (az időlépés elején), és módosítja a meder magasságát Δz_0 mértékben:

$$\Delta z_{0,j} = \frac{(c_{a,j(0)} - c_{a,j}) \cdot a \cdot \Delta x \cdot \Delta y}{(1-\varepsilon) \cdot \rho_s \Delta x \cdot \Delta y} = \frac{(c_{a,j(0)} - c_{a,j}) \cdot a}{(1-\varepsilon) \cdot \rho_s}, \qquad (8.15\text{-}11)$$

ahol ε az üledék porozitása, ρ_s az üledék sűrűsége, $c_{a,j(0)}$ a 2. rétegben a megelőző időlépés egyensúlyi koncentrációja, $c_{a,j}$ az aktuális időlépés egyensúlyi koncentrációja (a j. frakcióra).

(ii) Ehhez adódik az 1. és 2. rétegből az időlépés alatt érkező függőleges anyagáramból származó változás

$$\Delta z_{t,j} = \frac{-\Phi_j^{(H)} \cdot \Delta x \cdot \Delta y}{(1-\varepsilon) \cdot \rho_s \Delta x \cdot \Delta y} \cdot \Delta t = \frac{-\Phi_j^{(H)}}{(1-\varepsilon) \cdot \rho_s} \cdot \Delta t \,. \qquad (8.15\text{-}12)$$

A teljes morfológiai változás egy időlépésben a kettő összege:

$$\Delta z_j = \frac{(c_{a,j(0)} - c_{a,j}) \cdot a}{(1-\varepsilon) \cdot \rho_s} - \frac{\Phi_j^{(H)}}{(1-\varepsilon) \cdot \rho_s} \cdot \Delta t \,. \qquad (8.15\text{-}13)$$

<u>Szemeloszlás változása</u>

Ahogyan említettük, a 3. réteg vastagsága állandó: feltöltődésnél és/vagy eróziónál a szemeloszlás módosul az időlépés alatt. Két eset fordulhat elő:

Ha $dz_{sum} = \sum_{j=1}^{j=r} \Delta z_j \geq 0$ akkor feltöltődés van,

(ii) Ha $dz_{sum} = \sum_{j=1}^{j=r} \Delta z_j \leq 0$ akkor erózió van.

Bármelyiket nézzük, az egyes j frakciók ellentétes folyamatban is részt vehetnek. Például, a j. frakció erodálódik, de összességében a cella feltöltődik (itt dz_{sum} az összes frakció elemzése alapján számított morfológiai változás). Bevezetjük a következő mennyiségeket:

Ülepedési vastagság:

$$dz_{DEP} = \sum_{j=1}^{r} \Delta z_j^{(+)} \text{, ahol } \Delta z_j^{(+)} = \Delta z_j \text{, ha } \Delta z_j \geq 0 \text{, egyébként } \Delta z_j^{(+)} = 0 \ \ (j=1,\ldots,r)$$

Eróziós vastagság:

$$dz_{ER} = \sum_{j=1}^{r} \Delta z_j^{(-)} \text{, ahol } \Delta z_j^{(-)} = |\Delta z_j| \text{, ha } \Delta z_j \leq 0 \text{, egyébként } \Delta z_j^{(-)} = 0 \ \ (j=1,\ldots,r)$$

Ezekkel fennáll, hogy

$$dz_{sum} = dz_{DEP} - dz_{ER} \,.$$

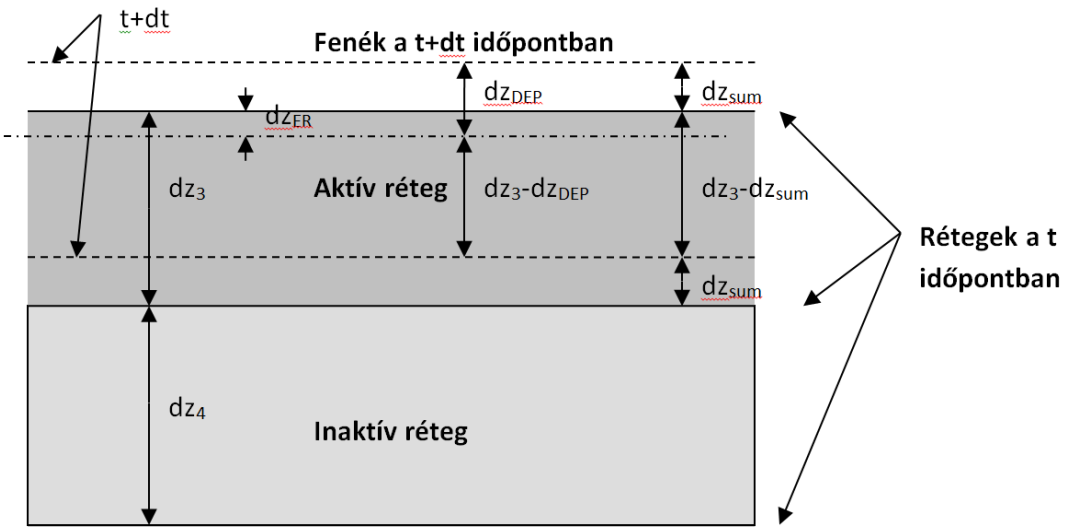
Az ülepedő (feltöltődést okozó) frakcióarány:

$$f_d^j = \frac{\Delta z_j^{(+)}}{dz_{DEP}} \text{, } j=1,\ldots,r \qquad (8.15\text{-}14)$$

Az erodálódó frakcióarány:

$$f_e^j = \frac{\Delta z_j^{(-)}}{dz_{ER}} \text{, } j=1,\ldots,r \qquad (8.15\text{-}15)$$

(i) Eset: $dz_{sum} \geq 0$ akkor (összességében) feltöltődés van

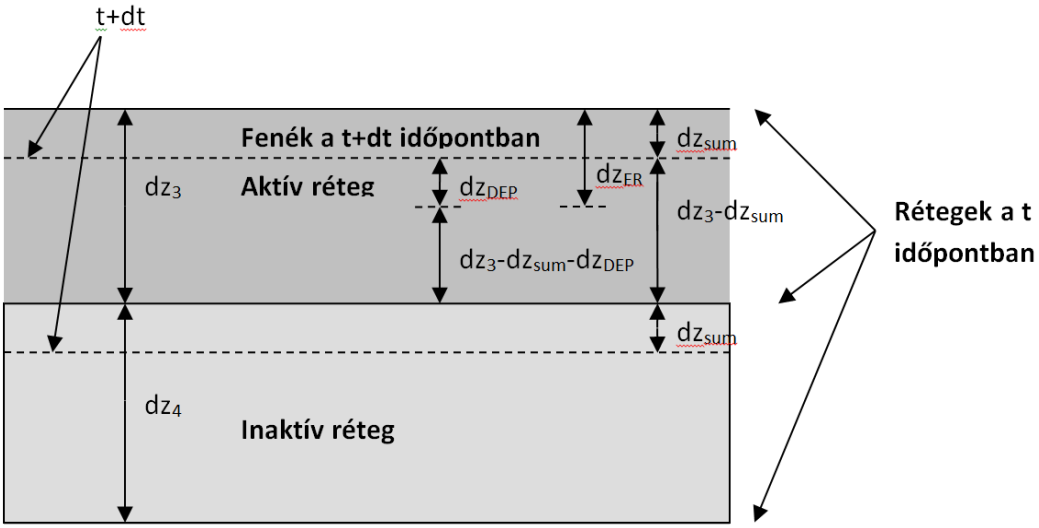


8.15-7. ábra Az eredő feltöltődés számítása

A 3. rétegben, az időlépés végén a j. frakció mérhető aránya:

$$f_3^j = f_{3(0)}^j\left(1-\frac{\Delta z_{DEP}}{dz_3}\right) + f_d^j\frac{\Delta z_{DEP}}{dz_3},\ j=1,\ldots,r \qquad (8.15\text{-}16)$$

(ii) Eset: $\Delta z_{sum} \le 0$ akkor (összességében) erózió van. Ekkor



8.15-8. ábra Az eredő kimosódás számítása

$$f_3^j = f_{3(0)}^j\left(1-\frac{\Delta z_{DEP}+|\Delta z_{sum}|}{dz_3}\right) + f_d^j\frac{\Delta z_{DEP}}{dz_3} + f_4^j\frac{\Delta z_{sum}}{dz_3}, \qquad (8.15\text{-}17)$$

ahol f_4^j… a j. frakció aránya a 4. (inaktív) rétegben.

Minden frakcióra ellenőrizni kell, hogy a $f_3^j \geq 0$ reláció fennáll-e. Ennek ellentéte akkor következhet be, ha $\Delta z_j^{(-)}$>0, azaz a frakció erodálódik, de ennek üledék forrása nem áll fenn. Ekkor vissza kell térni a c_a számításához - annak értékét redukálni kell oly módon, hogy a (8.15-10), (8.15-13) és a (8.15-17) egyenletek által követhetően ne csökkenjen negatívra a frakció-arány.

(f) 4. réteg

Itt is állandó rétegvastagságot feltételezünk (dz_4) és könyveljük a réteg szemeloszlásának változását

(i) Eset: $dz_{sum} \geq 0$ akkor (összességében) feltöltődés van. A 4. rétegben, az időlépés végén a j. frakció detektálható aránya:

$$f_4^j = f_{4(0)}^j (1 - \frac{\Delta z_{sum}}{dz_4}) + f_3^j \frac{\Delta z_{sum}}{dz_4}, \; j=1,\ldots,r \qquad (8.15\text{-}18)$$

(ii) Eset: $\Delta z_{sum} \leq 0$ akkor (összességében) erózió van. Ekkor az inaktív réteg lefelé tolódik, változás nincs a szemeloszlásban

$$f_4^j = f_{4(0)}^j, \; j=1,\ldots,r. \qquad (8.15\text{-}19)$$

8.15.3.2.2 Görgetett hordalék transzportja

(a) 2D eset, 2. réteg

A számítás alapja a van Rijn (1984 (a, b) féle dimenziótlan hordalékszállítás $q^{(-)}$ és a mechanikai igénybevétel kapcsolata, amit frakciónként felírhatunk:

$$q_j^{(-)} = \frac{q_{bl(j)}}{d_j^{1.5}\sqrt{(s-1)g}},$$

ahol $s = \frac{\rho_s}{\rho_w}$, és $q_{bl(j)}$ az egységnyi áramlási szélességben szállított (görgetett) hordalék térfogat a j. frakcióra vonatkoztatva ($q_{bl(j)}$ dimenziója [$\frac{m^3/s}{m} = \frac{m^2}{s}$]). Van Rijn empirikus összefüggése szerint:

$$\frac{q_{bl(j)}}{d_j^{1.5}\sqrt{(s-1)g}} = 0.053 \frac{(\frac{\tau - \tau_{cr,j}}{\tau_{cr,j}})^{2.1}}{d_j^{0..3}((s-1)\frac{g}{\nu^2})^{0.1}}. \qquad (8.15\text{-}20)$$

Cellaszinten ebből következően a (cellából(!)) görgetett hordalék tömegárama:

- X irányban:

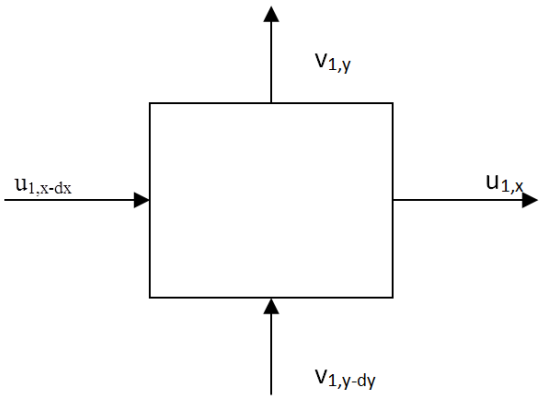
$$L^{(-)}{}_{bl_j,x} = \rho_s \cdot 0.053 d_j^{1.5}\sqrt{(s-1)g} \frac{(\frac{\tau_{b,x} - \tau_{cr,j}}{\tau_{cr,j}})^{2.1}}{d_j^{0..3}((s-1)\frac{g}{\nu^2})^{0.1}} \Delta y \; [kg/s] \qquad (8.15\text{-}21)$$

- Y irányban:

$$L^{(-)}{}_{bl_j,y} = \rho_s \cdot 0.053 d_j^{1.5} \sqrt{(s-1)g} \frac{\left(\frac{\tau_{b,y} - \tau_{cr,j}}{\tau_{cr,j}}\right)^{2.1}}{d_j^{0..3}\left((s-1)\frac{g}{\nu^2}\right)^{0.1}} \Delta x \text{ kg/s]} \qquad (8.15\text{-}22)$$

itt $\tau_{b,x}, \tau_{b,y}$ a csúsztató feszültség x,y irányban.

Legyen a cellába érkező görgetett tömegáram $L^{+}_{bl} = L^{(+)}{}_{bl,x} + L^{(+)}{}_{bl,y}$. Ezt algoritmikusan, cellánként kell meghatározni, annak vizsgálatával, hogy van-e a cellába irányuló áramlás.



8.15-9. ábra Cella sebességek a görgetett hordalék számításokhoz

Az ábra szerinti sebességtér alapján pl.: $L^{+}_{bl,x-dx} > 0$, $L^{+}_{bl,y-dy} > 0$, $L^{+}_{bl,x} = 0$, $L^{+}_{bl,y} = 0$, és

$$L^{-}_{bl,x-dx} = 0,\ L^{-}_{bl,y-dy} = 0,\ L^{-}_{bl,x} > 0,\ L^{-}_{bl,y} > 0.$$

(b) 2D modell, 3. réteg

Az aktív (3.) rétegben könyveljük a görgetett hordalékszállításból eredő morfológiai változásokat (ebben az alprogramban az 1. és a 2. rétegek nem fordulnak elő). Az időlépés alatti morfológiai változás:

$$\Delta z_j = \frac{(L^{+}_{bl_j} - L^{-}_{bl_j})}{(1-\varepsilon)\cdot \rho_s \Delta x \cdot \Delta y} \cdot \Delta t\,, \qquad (8.15\text{-}23)$$

ahol ε az üledék porozitása, ρ_s az üledék sűrűsége.

(c) 1D eset, 3. réteg

(X) folyásirányban:

$$L^{(-)}{}_{bl_j,x} = \rho_s \cdot 0.053 d_j^{1.5} \sqrt{(s-1)g} \frac{\left(\frac{\tau_{b,x} - \tau_{cr,j}}{\tau_{cr,j}}\right)^{2.1}}{d_j^{0..3}\left((s-1)\frac{g}{\nu^2}\right)^{0.1}} K\,[\text{kg/s}], \qquad (8.15\text{-}24)$$

itt $\tau_{b,x}$ a csúsztató feszültség x (folyás)irányban, K a nedvesített kerület. Legyen a cellába érkező görgetett tömegáram $L^{+}_{bl} = L^{(+)}{}_{bl,x}$. Ezt algoritmikusan, cellánként (két szelvény között) meg kell határozni. A k. szakasz esetében (felülről lefelé haladva):

$$L^{+(k)}_{bl_j} = L^{-(k-1)}_{bl_j}.$$

A fenti lépéseket frakciónként ismételjük. A 3. és 4. rétegek szemeloszlásának módosulására vonatkozóan, a lebegtetett hordalék modellnél leírtak az érvényesek.

8.15.3.2.3 1D hordalékmodell alkalmazása: hosszútávú hatások

A kidolgozott 1D hidrodinamika - hordaléktranszport modellt, az előkészítést is beleértve, több lépésben alkalmaztuk. Ezek a teszteléstől a Dunára történő esetek vagy „forgatókönyvek” elemzéséig terjedtek. A következőkben a fontosabb eredményeket foglaljuk össze.

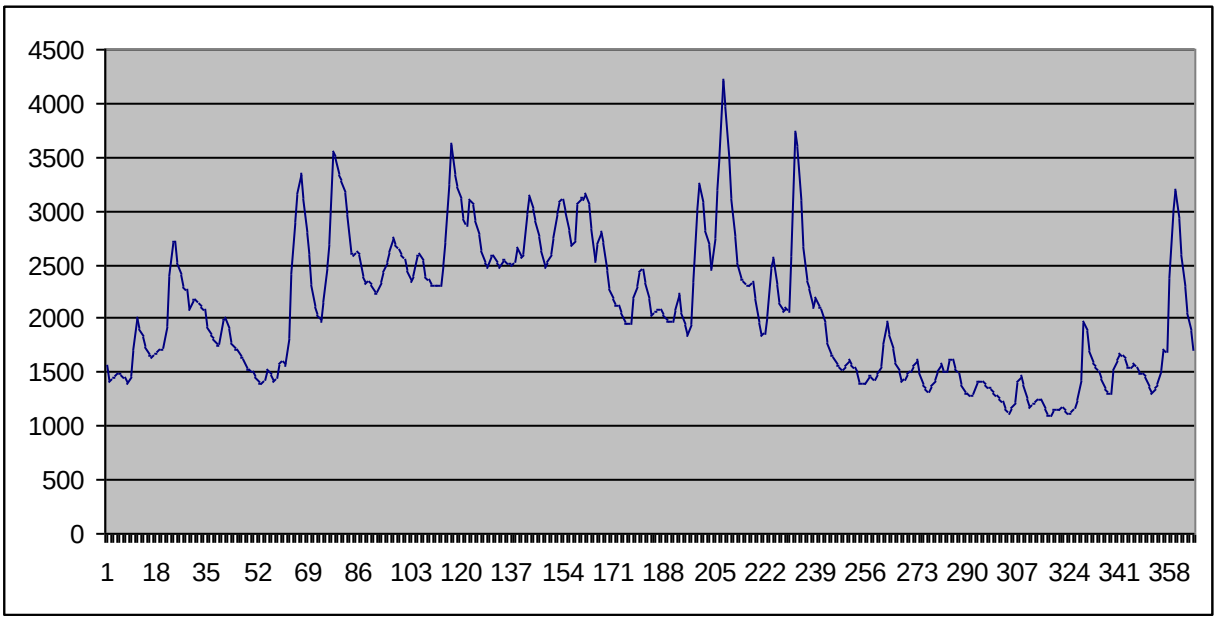
(i) Tesztelés

Az elvégzett sokoldalú tesztelés célja annak megítélése volt, hogy a kifejlesztett módszer (és annak kódja) a fizikai folyamatoknak megfelelően, helytállóan viselkedik-e? A számításokat Duna jellegű hipotetikus folyóra végeztük el. A teljesség igénye nélkül vizsgáltuk az 1. és 2. réteg egyensúlyi koncentrációját a Manning féle simasági tényező, a rétegvastagságok és a diffúziós tényező függvényében, a 2. réteg hordalékszállítását különböző rétegvastagságokra, tanulmányoztuk az évi medersüllyedést a felvízi koncentráció és az „a” érték függvényében. Szintén a teszt fázisban vizsgáltuk hirtelen mederváltozások „sorsát”, 100 szelvényre a permanens, fokozatosan változó víz és hordalékmozgás esetét, majd áttértünk a Duna beható elemzésére.

(ii) Alkalmazás a Dunára

Ugyan a Paks környéki mederváltozások vizsgálata volt a feladatunk, azonban ez - a felvízi (és alvízi) hatások fontossága miatt - nem végezhető el anélkül, hogy ne tekintsünk lényegesen hosszabb folyószakaszt. Alapos megfontolást követően a mintegy 160 km hosszú Budapest - Baja szakasz mellett döntöttünk (1645.5 - 1478.8 fkm), ami lehetővé teszi például a Dunaföldvár térségében elvégzett kavics kitermelés vagy a Barákai gázló jövőbeni lehetséges szabályozási következményeinek az elemzését. Az a kérdés is feltehető, várható-e a medermélyülés megállítása vagy sem.

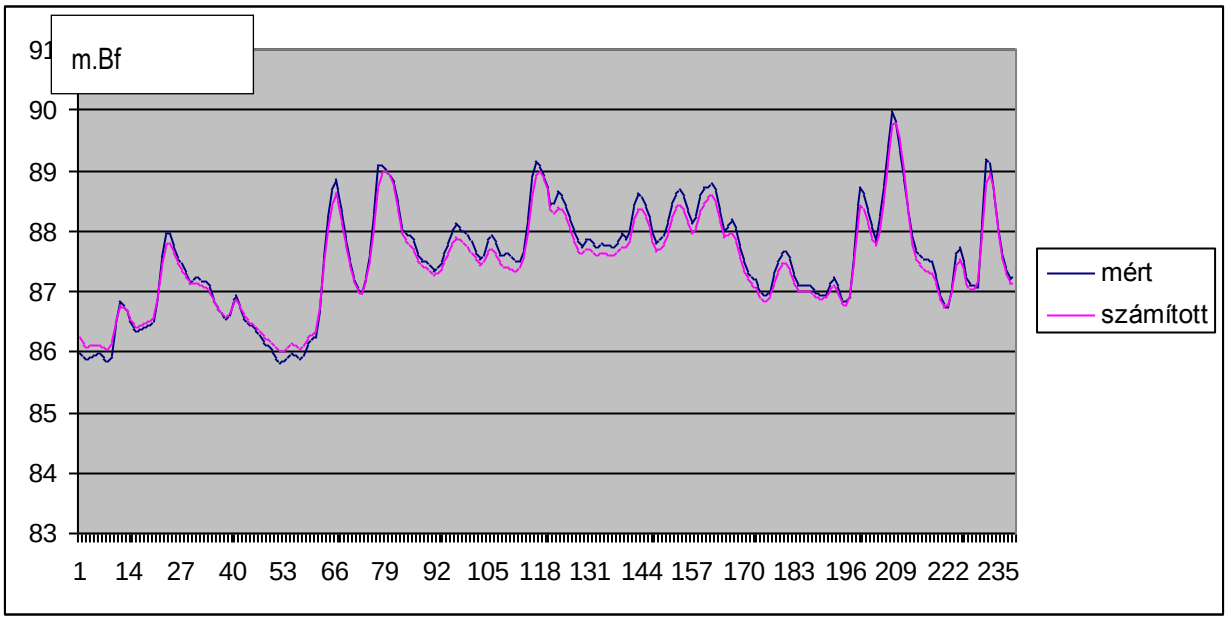
A mederadatok 2008-ra álltak rendelkezésre, ezért a precizitás érdekében, a számításokhoz időben közeli idősorokat választottunk (2008 és 2009), de szimuláltunk 10 éves összefüggő idősort is (2000 – 2009, lásd később)). A hidraulikai modell felső peremfeltétele Q(H) görbéből számított vízhozam (8.15-10. ábra), az alsó pedig a bajai vízállás volt. Vízmérce adatokkal, a kalibrálás és igazolás céljaira öt mérőhelyen (Baja – 1478.8 fkm, Dunaföldvár – 1560.6 fkm, Paks – 1531.3 fkm, Dombori – 1506.8 fkm és Dunaújváros – 1580.6 fkm), mérőhelyen rendelkeztünk.



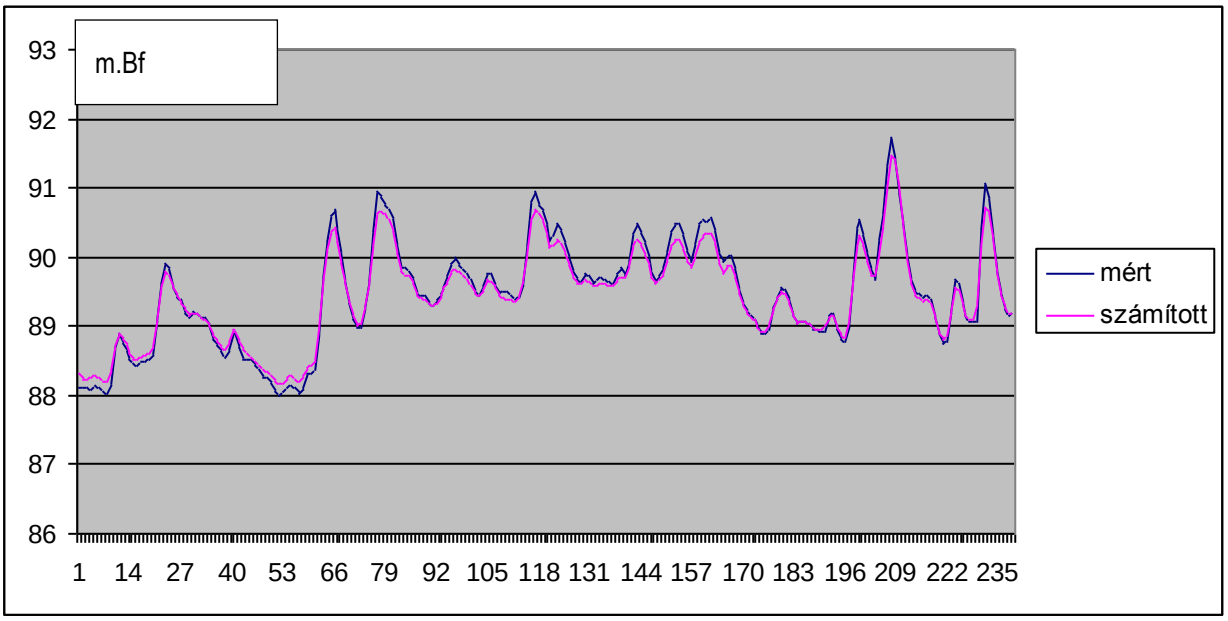
8.15-10. ábra A referencia időszak budapesti vízhozam adatsora (felső peremfeltétel)

(iii) Az 1D hidrodinamikai modell kalibrálása és igazolása

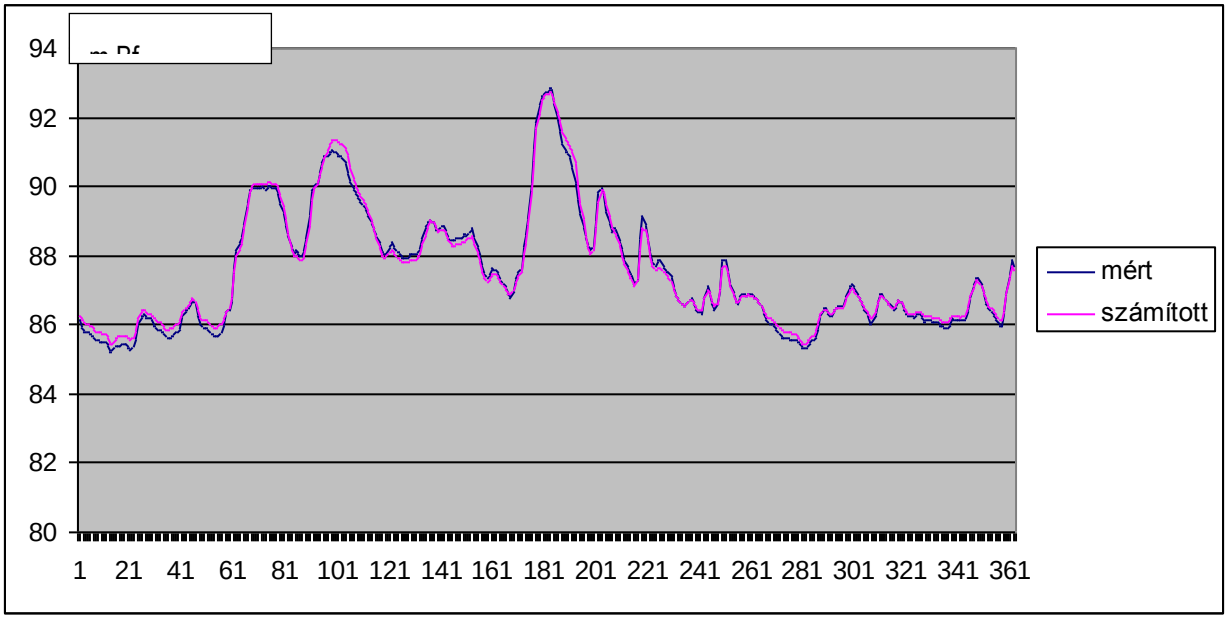
A kalibrálás, majd a változatlan paraméterekkel, független időszakra elvégzett igazolás eredményeit a következő négy ábra tartalmazza (8.15-11. ábra, 8.15-12. ábra, 8.15-13. ábra, 8.15-14. ábra).



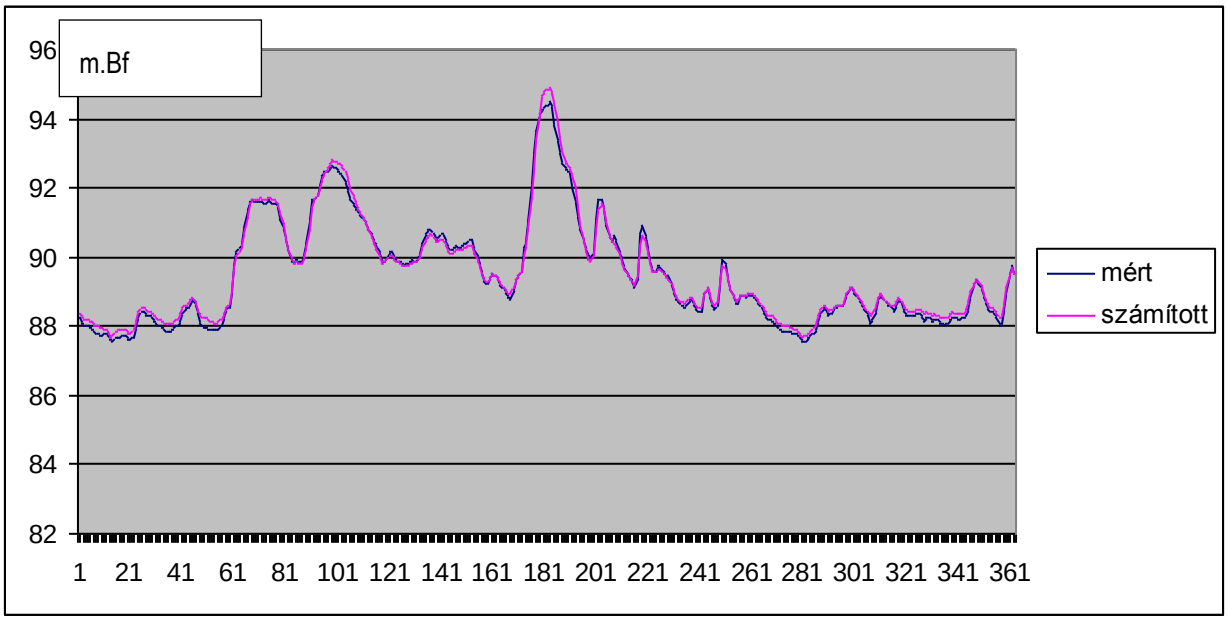
8.15-11. ábra Kalibrálás a 2008. január 1 - augusztus 31. időszakra: mért és számított vízállások az 1531.3 fkm szelvényben



8.15-12. ábra Kalibrálás a 2008. január 1 - augusztus 31. időszakra: mért és számított vízállások az 1560.6 fkm szelvényben



8.15-13. ábra Igazolás a 2009. január 1 - december 31. időszakra: mért és számított vízállások az 1531.3 fkm szelvényben



8.15-14. ábra Igazolás a 2009. január 1 - december 31. időszakra: mért és számított vízállások az 1560.6 fkm szelvényben

Az ábrákról különösebb magyarázat nélkül látható, hogy mind a kalibrálás, mind pedig a validálás kiválóan sikerült. A Duna ilyen szempontból jó alany, mérete és „lustasága" miatt a változások viszonylag lassúak.

(iv) A hidrodinamikai - hordalék transzport modell alkalmazása

A számítások induló frakcióit, az egész vizsgált szakaszra állandónak feltételezve, dunai adatokra alapozva a 8.15-1. táblázat tartalmazza. Beállítását oly módon korrigáltuk, hogy a 2008. év ismétlésével a modellel 10 évet szimuláltunk, majd a végállapothoz tartozó értékeket fogadtuk el. A későbbi tapasztalatok birtokában finomításokat végeztünk, amelyek közül hármat a 8.15-1. táblázatban szintén feltüntettünk. A 2. réteg vastagságát 0,2 m-re vettük fel, a másik két réteg megfelelő jellemzői 0,2 és 0,8 m.

	Induló		Finomított1		Finomított2		Finomított4	
D [mm]	3.réteg %	4.réteg %	3.réteg %	4.réteg %	3.réteg %	4.réteg %	3. réteg %	4. réteg %
1	0,2	0	0,2	0,2	0,1	0,1	0,05	0,05
2	0,2	0	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1
3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,6	0,6
8	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,05	0,05
20	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,1	0,1
40	0,1	0.6	0,1	0,1	0,2	0,2	0,1	0,1

8.15-1. táblázat A hordalékmodell néhány alap-paramétere

A hordalékszámítást (bemenetként egyensúlyi szállítás különböző arányait: 0, 25, 50 és 100% feltételezve; lásd később) oly módon végeztük el a változások helyes értékelése érdekében, hogy 2008. évet ismételve összesen 10 évet szimuláltunk és a mozgómeder feltevésnek megfelelően a medret minden évben korrigáltuk (megemeltük vagy lesüllyesztettük). A 10. év végén, a megváltozott mederrel a 2008. évet ismét lefuttattuk, majd képeztük a különbséget a

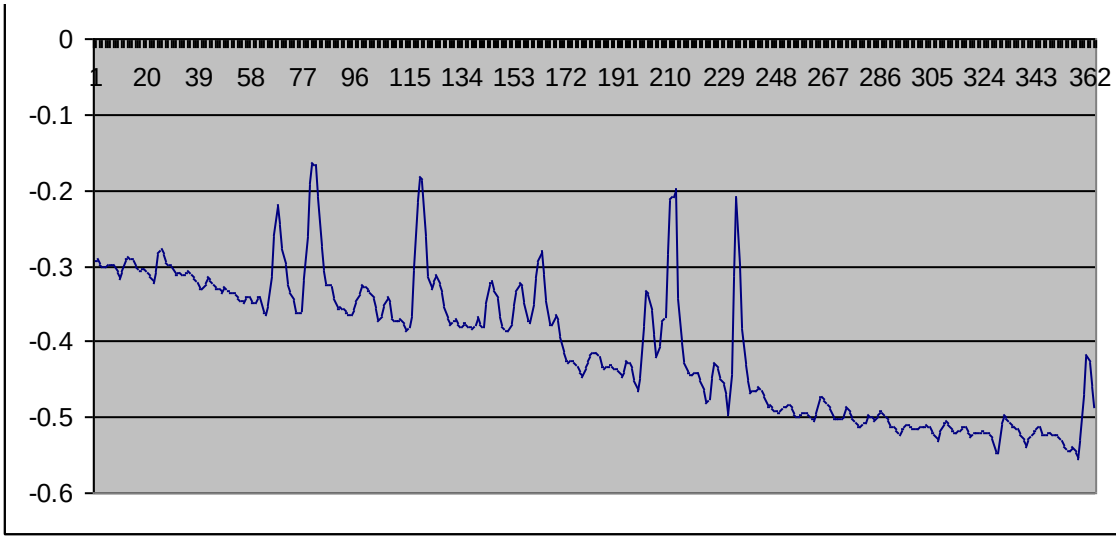
mérceszelvényekre a kalibrálás vízállásaihoz viszonyítva. Pozitív értékek süllyedést, míg negatívok feltöltődést jelentenek. A közelítést ellenőrizendő a fontosabb eseteket végigszámoltuk a 2000. - 2009. hidrológiai idősorral is.

A szimulációk elvégzésére kísérleti tervet készítettünk. A tervet összefoglaló táblázat sorainak esetek vagy forgatókönyvek felelnek meg, attól függően, milyen mértékű a feltételezett input hordalékszállítás (0-100 %), volt-e kotrás és hol, lesz-e beavatkozás a Barákai-gázlónál, milyen a szemeloszlás stb. Ez utóbbi forgatókönyv jellemzők a táblázat oszlopait képezik (8.15-2. táblázat). Itt az utolsó oszlopban, fő jellemzőként feltüntettük az eredményként adódott átlagos mederváltozást, az elsőben pedig a hivatkozást a részleteket tartalmazó ábrára.

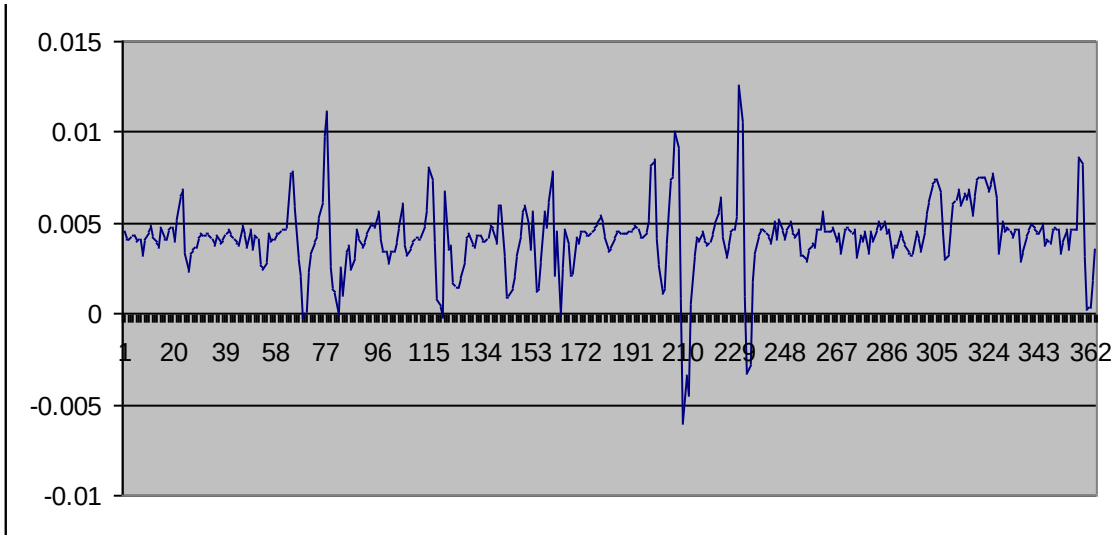
Eset	Ábraszám	Hordalék-szállítás (%)	Kotrás 1. (1637-1586 fkm)	Kotrás 2. (teljes szakaszon)	Barákai-gázló	Frakció	Átl. meder-változás (cm/10 év)
1.	8.15-15	100	0	0	0	Korrigált	40, feltöltődés
2.	8.15-16	0	0	0	0	Korrigált	0.4-0.5, erózió
3.	8.15-17	50	0	0	0	Korrigált	0.4-0.5 erózió
4.	8.15-18	50	4 M m³/év	0	0	Korrigált	0
5.	8.15-19	50	0	2M m³/év	0	Korrigált	0.15-0.2 erózió
6.	8.15-20	50	0	0	0	Finomított 1	0.2-0.25 erózió
7.	8.15-21	50	0	0	0	Finomított 2	0.10-0.11 erózió
8.	8.15-23	100	0	0	0	Finomított 2	0.5 feltöltődés
9.	8.15-24	50	4 M m³/év	0	0	Finomított 3	0.10 erózió
10.	8.15-25	50	0	0	Kotrás-hajózás	Finomított 3	0,11-0,12 erózió
11.		25	0	0	0	Finomított 3	0.11-0.13 erózió
12.		25	4 M m³/év	0	0	Finomított 3	0.11-0.13 erózió
13.		25	0	0	Kotrás-hajózás	Finomított 3	0.11-0.13 erózió

8.15-2. táblázat Esetek és forgatókönyvek a Dunára

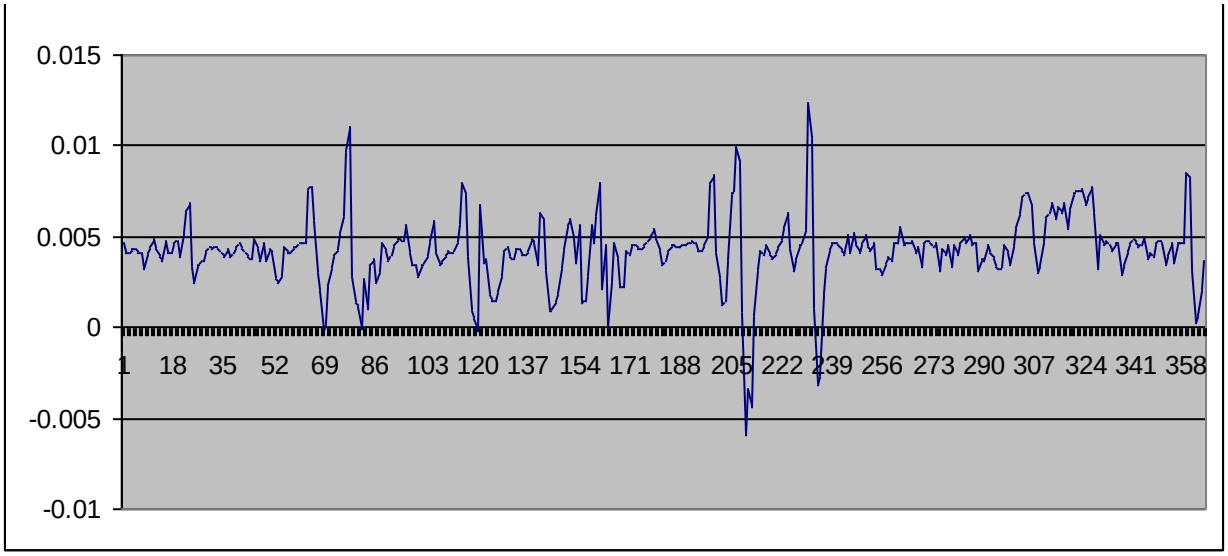
A következő ábrasor a *belépő hordalék anyagáram* szerepét szemlélteti.



8.15-15. Várható vízszintsüllyedés a paksi mérceszelvényben (m), egyensúlyi hordalékszállítás (negatív érték – feltöltődés)



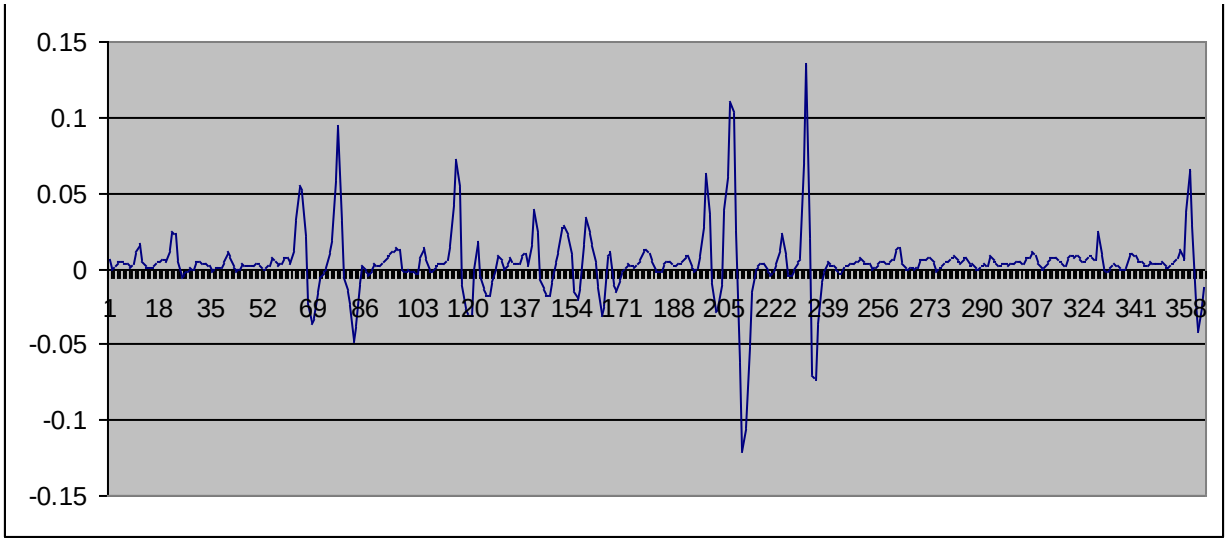
8.15-16. Várható vízszintsüllyedés a paksi mérceszelvényben (m), 0 % egyensúlyi hordalékszállítás



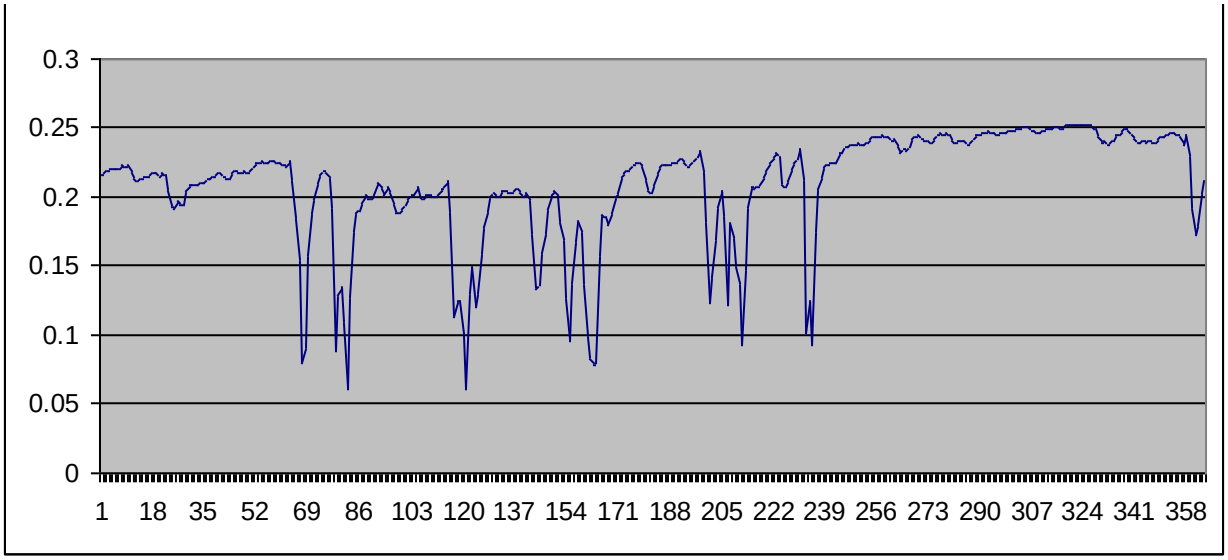
8.15-17. Várható vízszintsüllyedés a paksi mérceszelvényben (m), 50 % egyensúlyi hordalékszállítás

Ahogyan látható, a felső peremi anyagáramnak a teljes szakaszra markáns hatása van: Paksnál egyensúlyi anyagáram esetében feltöltődés van, ha csökken a készlet (pl. 5o %-ra), akkor a feltöltődés megáll, sőt átfordul erózióba. A megfigyelés mindegyik kipróbált meder frakció-eloszlás mellett fennáll. Az ábrákon látható, gyakran „zaj" jellegű napi változások és ingadozások a vízhozam alakulásának a következményeit szemlélteti.

A *mederkotrás szerepét* a 8.15-18 és a 8.15-19 ábrák szemléltetik.



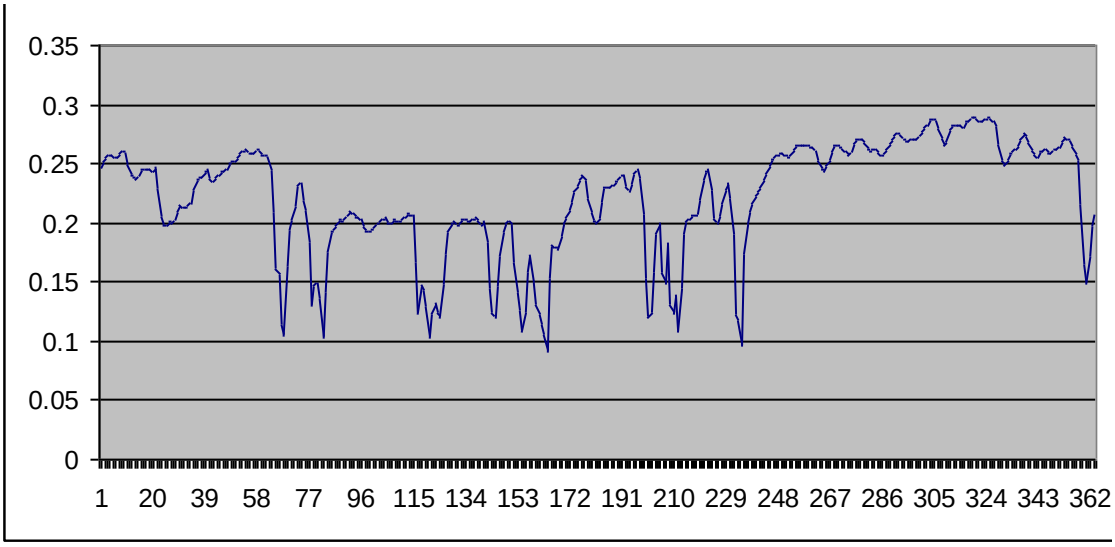
8.15-18. Várható vízszintsüllyedés a paksi mérceszelvényben (m), 50 % egyensúlyi hordalékszállítás és dunaföldvári mederkotrás mellett



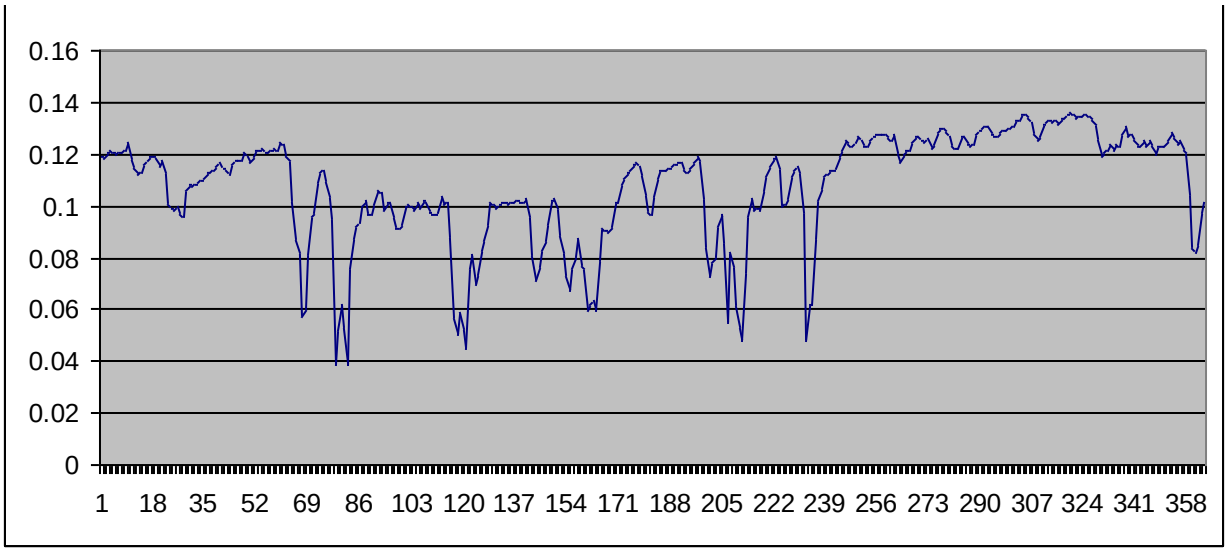
8.15-19. Várható vízszintsüllyedés a paksi mérceszelvényben (m), 50 % egyensúlyi hordalékszállítás és a teljes folyószakasz feltételezett mederkotrása (2 millió m3/év) mellett

Itt az látható, hogy a dunaföldvári kotrásnak nincs hatása Paksnál, sőt inkább a Budafok alatti esés növelésével még csekély mértékben emeli a vízszintet, egyensúlyozva ezzel a mederkopást. Ezzel szemben a kotrás kiterjesztése számottevő változást idéz elő.

Ezután a *szemeloszlás szerepét* vizsgáltuk. A 8.15-1. táblázatnak megfelelően két finomítást hajtottunk végre és ahogyan látható a 8.15-21. ábrán látható esetben a kimosódás szinte feleződik, a durvább szemcsék kimosására nem áll elég energia rendelkezésre. A két ábra összehasonlítása a szemeloszlás fontosságát húzza alá.

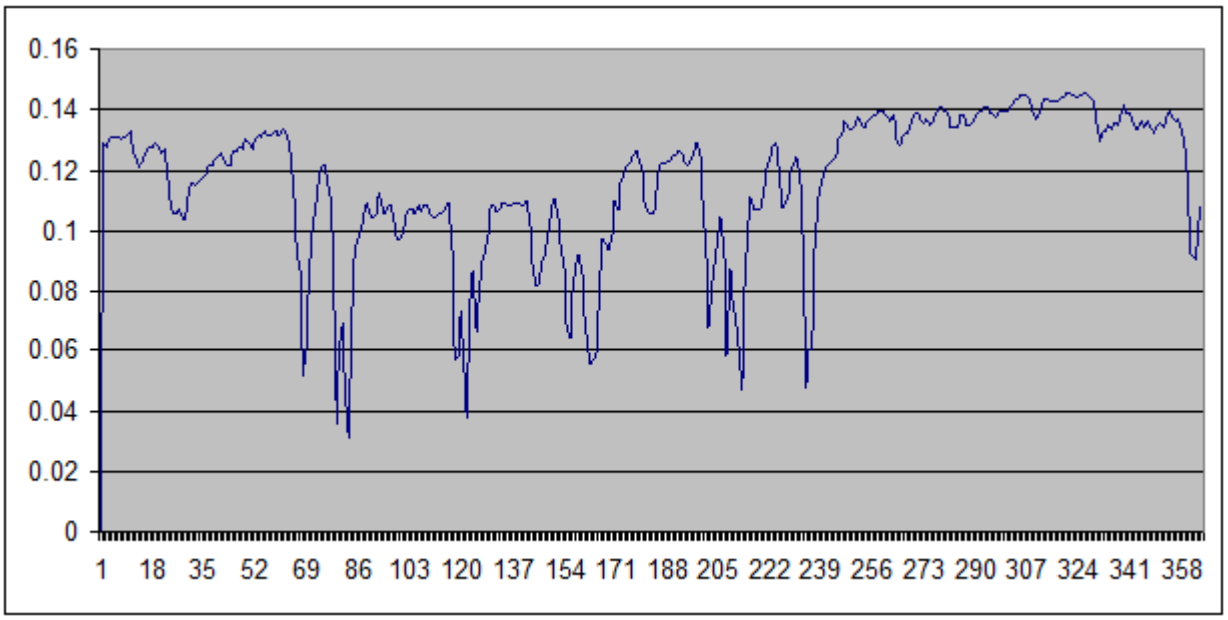


8.15-20. Várható vízszintsüllyedés a paksi mérceszelvényben (m), 50 % egyensúlyi hordalékszállítás és két különböző szemeloszlás mellett



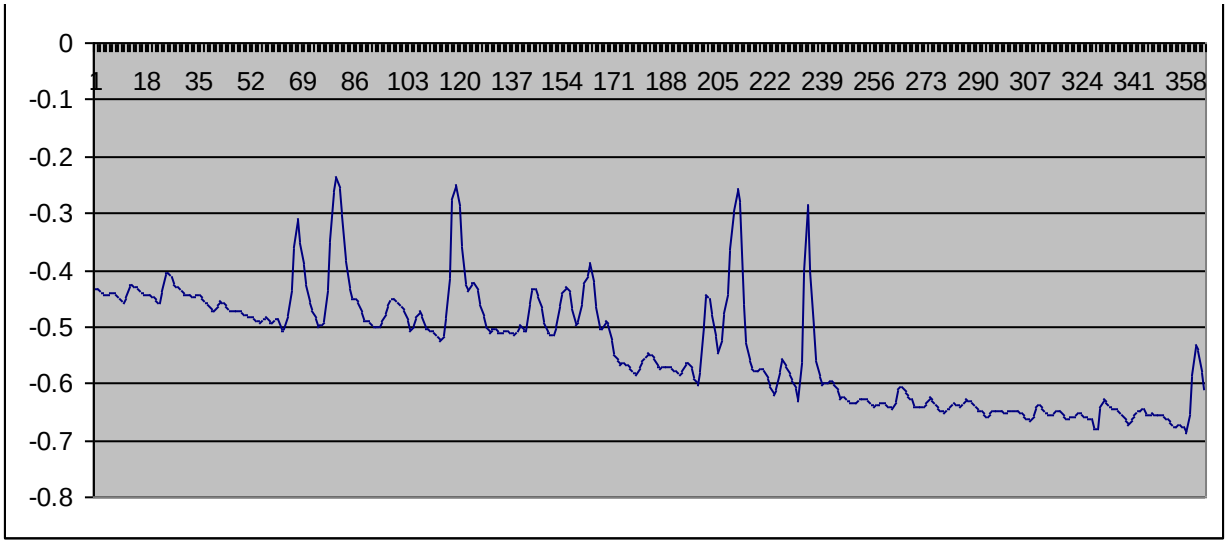
8.15-21. Várható vízszintsüllyedés a paksi mérceszelvényben (m), 50 % egyensúlyi hordalékszállítás és két különböző szemeloszlás mellett

A 7. számú esetet (8.15-21. ábra) végigszámoltuk a 2000. – 2009. időszak valós, napi hidrológiai adataival is (8.15-21.b. ábra). Mint látható, a 2008. év tízszeri ismétlésével adódott mederváltozás nem áll távol a 2000. – 2009. időszakra vonatkozó hatásoktól; ez az alkalmazott közelítés helyes voltát igazolja.



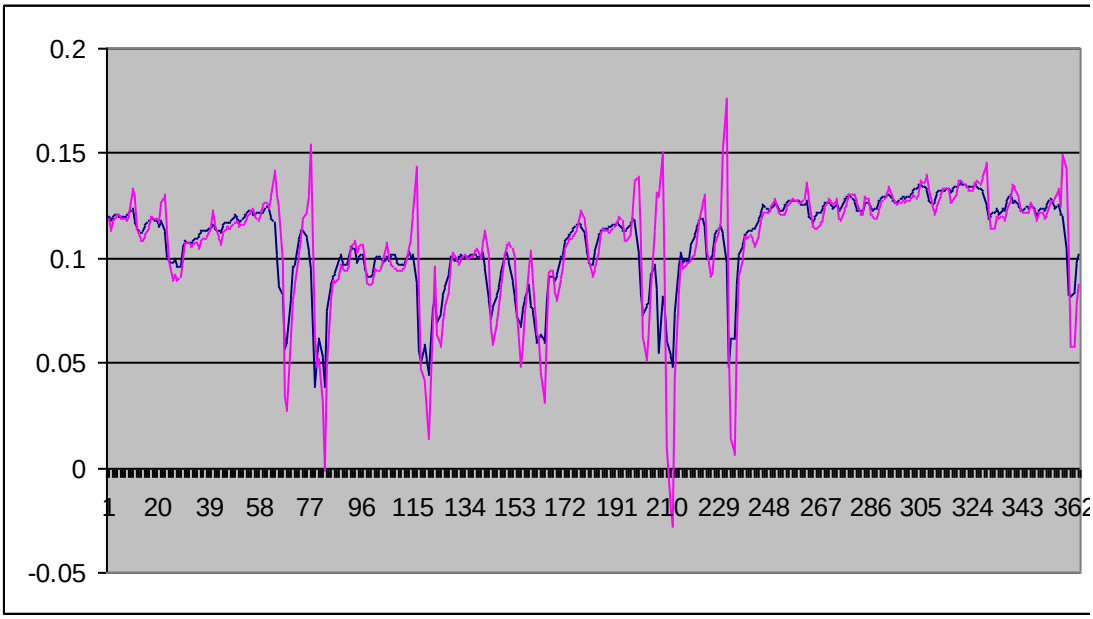
8.15-22. Várható vízszintsüllyedés a paksi mérceszelvényben (m), 50 % egyensúlyi hordalékszállítás és két különböző szemeloszlás mellett (2000. – 2009. idősor alapján szimulált)

Amennyiben a hordalékszállítás a felső peremen 100%-ra nő, akkor ismét a kiülepedés dominál, a folyó a fölös készletét lerakja (8.15-23. ábra).

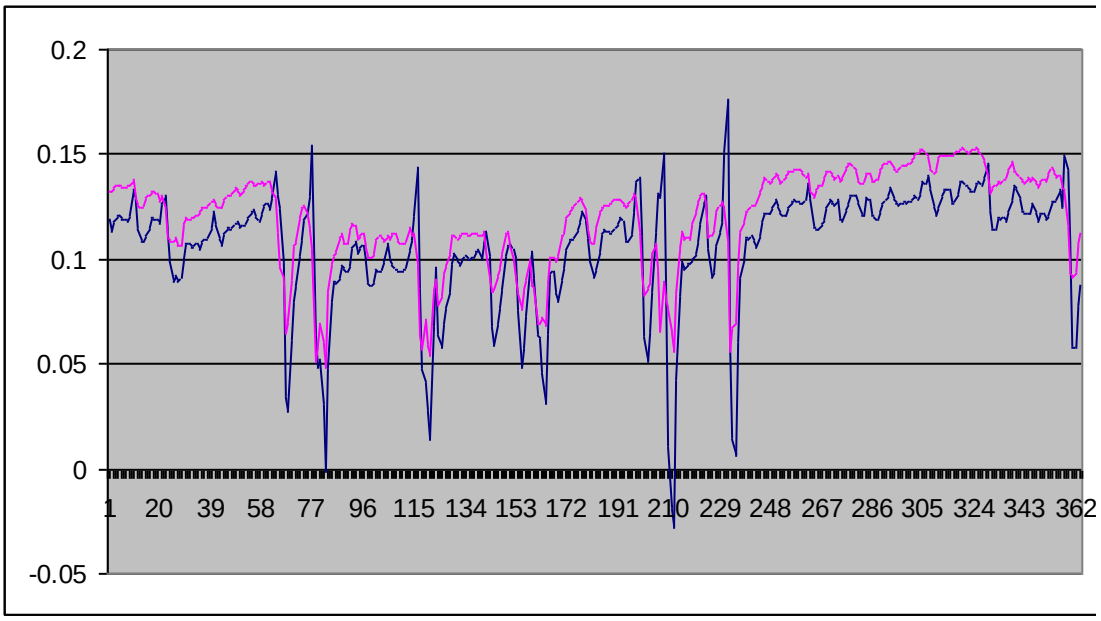


8.15-23. Várható vízszintsüllyedés a paksi mérceszelvényben (m), 100 % egyensúlyi hordalékszállítás mellett

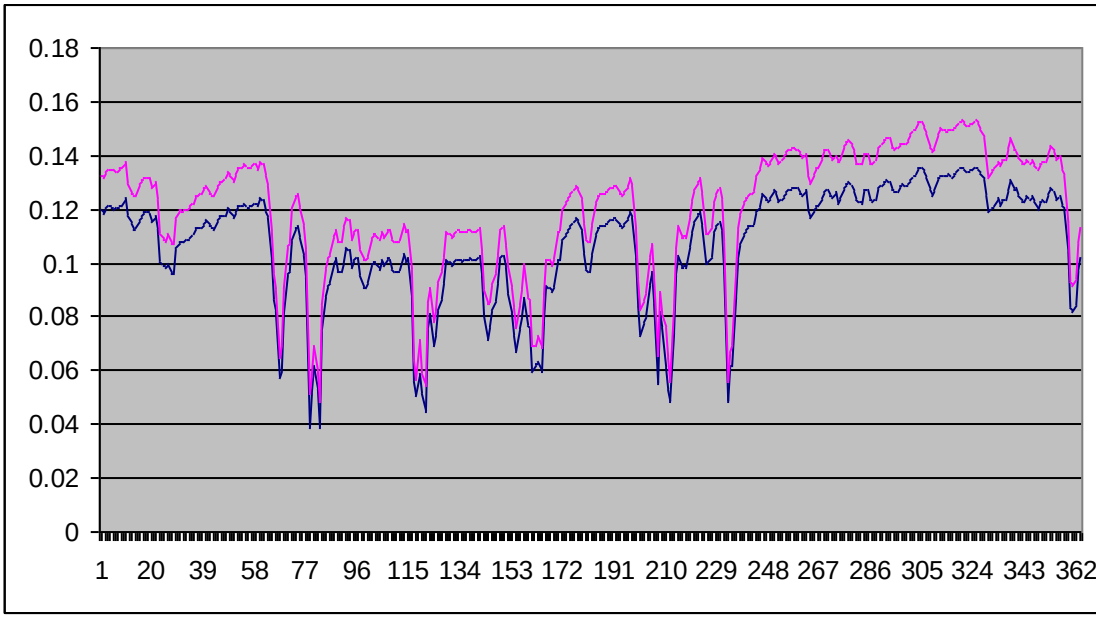
A következő két esetben (8.15-24. és 8.15-25. ábrák) a *felvízi és alvízi kotrás*t (Dunaföldvár illetve a Barákai-gázló mélyítése 0,8 m-rel a hajózás érdekében) hasonlítjuk össze (ismét finomított szemeloszlás mellett, az előző eset végállapotát megőrizve). Ahogyan látható egy esetleges barákai beavatkozás lényegesen komolyabb medersüllyedést idéz elő, mint a múltbeli kotrás. . Elvégeztük a hidraulikai számításokat a 2000. – 2009. adatsorra és összehasonlítottuk a vízállás idősort a kalibrációs időszak megfigyeléseivel. A különbségek (a vízszintváltozás) itt is jól egyeztek a 2008. év tízszeri megismétlése révén adódottal, azaz az egyszerűsítés megengedhető.



8.15-24. Várható vízszintsüllyedés a paksi mérceszelvényben (m), 50 % egyensúlyi hordalékszállítás és kotrás mellett (az összehasonlítás érdekében kék - kotrás nélkül, 7. eset)

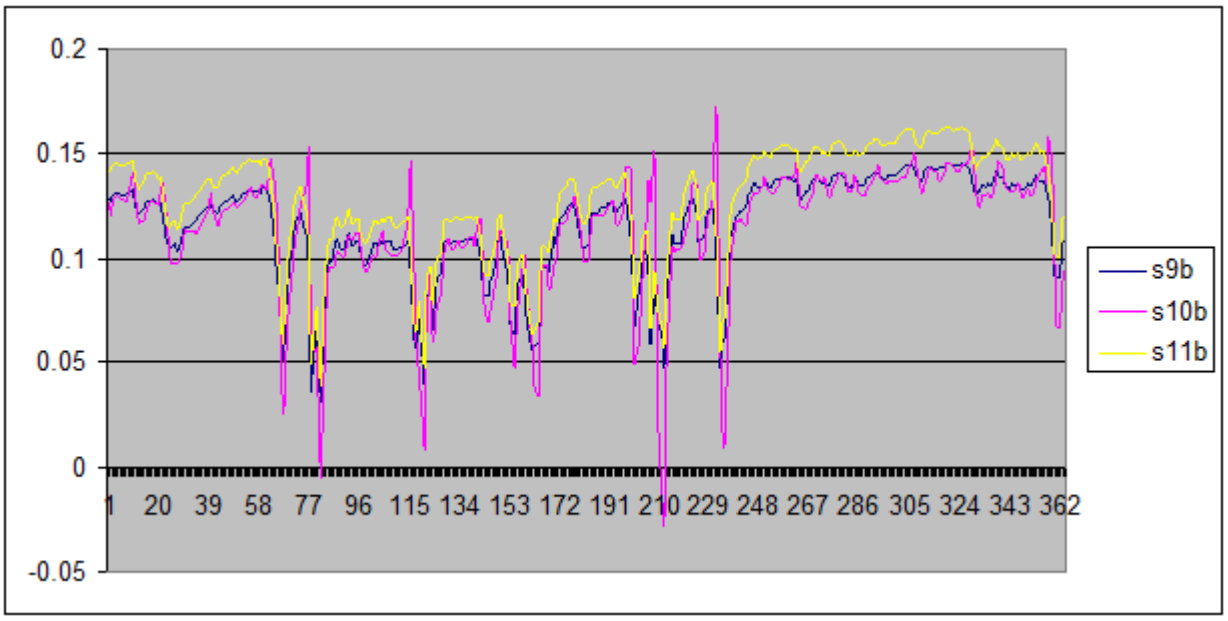


8.15-25. Várható vízszintsüllyedés a paksi mérceszelvényben (m), 50 % egyensúlyi hordalékszállítás és barákai beavatkozás mellett (kék – kotrással, 9. eset)



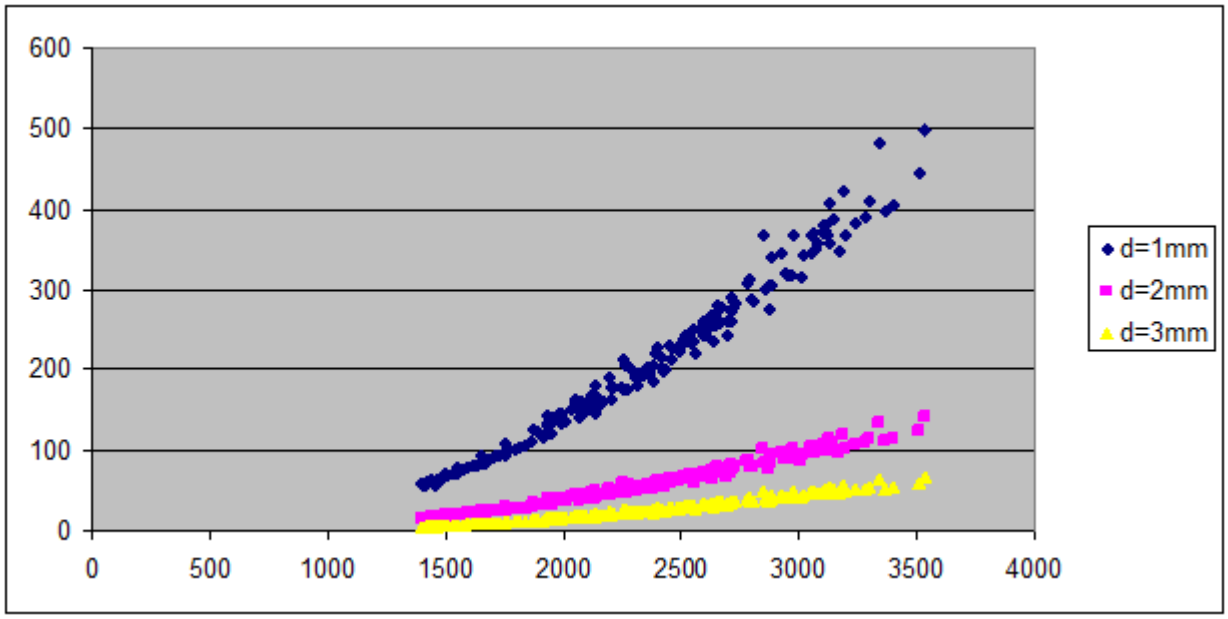
8.15-26. Várható vízszintsüllyedés a paksi mérceszelvényben (m), 50 % egyensúlyi hordalékszállítás és barákai beavatkozás mellett (kék – kotrás nélkül, 7. eset)

A 7., 9. és 10. esetekhez tartozó vízszintváltozásokat a 8.15-27. ábra hasonlítja össze. Az ábra azt mutatja, ha a budapesti felső peremen az egyensúlyi koncentráció 50 %-a érkezik, akkor 10 év kimélyülési folyamatai következtében a 2008-as év vízállásai átlagosan 11,5 cm-el alacsonyabb értékeket vennének fel. Ehhez képest a Dunaföldvár térségében folytatott kotrásoknak Paksnál nincsenek észlelhető hatásai. A barákai gázló kotrása mintegy 1,5 cm süllyedést okoz.



8.15-27. Várható vízszintsüllyedés a paksi mérceszelvényben (m), a 7., 9. és 10. esetek összehasonlítása - 50 % egyensúlyi hordalékszállítás (kék – 7., lila – 9. és sárga – 10.)

Az elmondottakból érzékelhető, hogy a *felvízen belépő hordalékhozam* milyen nagy szerepet játszik a mederváltozás szempontjából. A kérdéskör részletesebb elemzése érdekében, a 2008. évre, három szemátmérőre számítottuk a különböző vízhozamokhoz tartozó, van Rijn féle egyensúlyi koncentrációt és abból a lebegőanyag szállítást (kg/s). A kapott értékeket a vízhozam függvényében a 8.15-28. ábra tartalmazza, a 8.15-3. táblázat pedig közepes vízhozamnál hasonlítja össze a levezetett hozamokat a state-of-the-art modell elemzések eredményeivel (VITUKI, 2011).

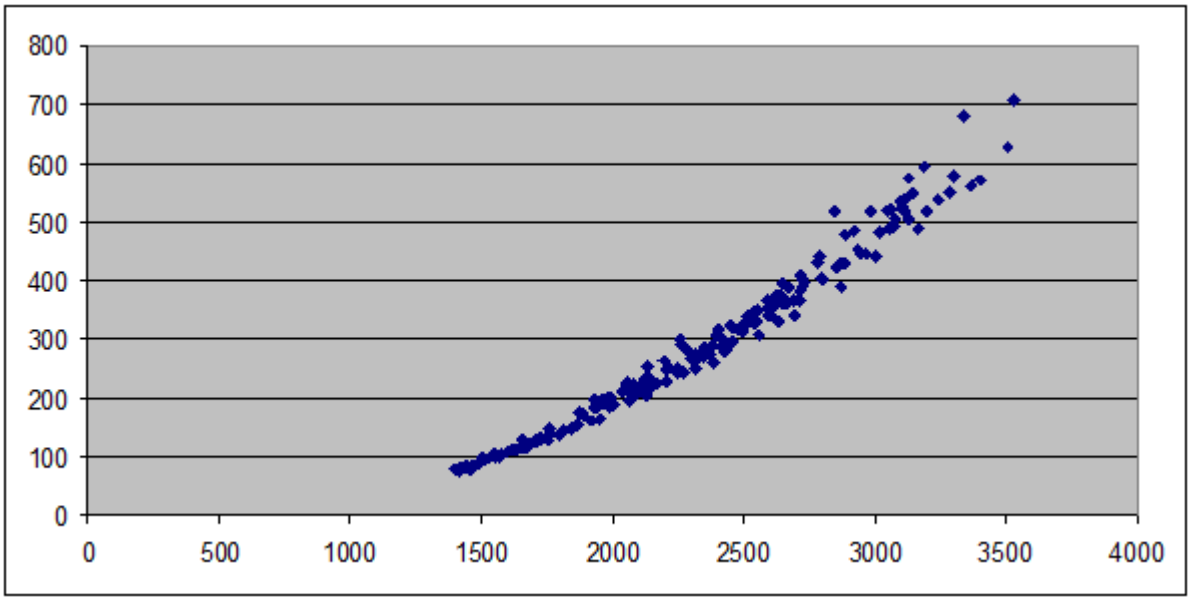


8.15-28. Egyensúlyi lebegőanyag szállítás [kg/s] szemcseméretek szerinti összetétele a vízhozam [m3/s] függvényében (a 2008. évre)

d [mm]	Hordalékszállítás: ismert modellek [kg/s] (VITUKI 2011) Q=2500 m3/s	Hordalékszállítás: jelen fejlesztés [kg/s] Q=2500 m3/s
1	40-120	220
2	25-75	70
3	20-60	25

8.15-3. táblázat: Hordalékszállítás-becslések a Dunára

Összegezve a frakciónkénti hordalékszállítást, a lebegőanyag-transzport vízhozam-függését nyerjük (a számításban az 1 mm, 2 mm és 3 mm-es frakciókat használtuk). Ezt a 8.15-29. ábra szemlélteti.



8.15-29. Egyensúlyi lebegőanyag szállítás [kg/s] a vízhozam [m3/s] függvényében (a 2008. évre)

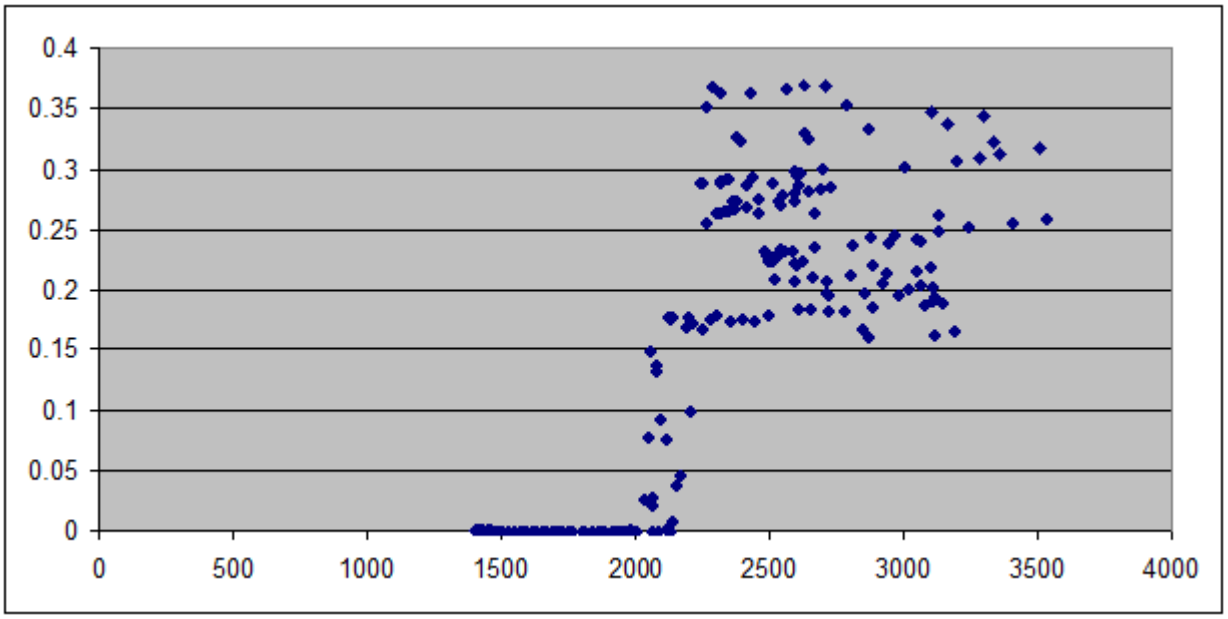
Összevetve a modell eredményeit a különböző időszakokra vonatkozó mérésekkel, fontos különbségek jelentkeznek (8.15-4. táblázat).

	L [kg/s]				
Q [m3/s]	1500	2000	2500	3000	3500
VITUKI 1950-60	50	75	135	220	350
VITUKI 2000-08	35	50	65	95	130
L [kg/s] jelen munka	100	200	310	490	650

8.15-4. táblázat Lebegőanyag hozamok összevetése

Bogárdi (1971) 2500 m³/s mellett 150-188 kg/s hozamot mért. Ugyanakkor ez az érték és a VITUKI későbbi kiegyenlítő számításai is különböznek. Mindenesetre az látható, hogy a modellünk egyensúlyi értékei az 1500-3500 m3/s vízhozam tartományban fölötte vannak az 1950-es értékeknek is. Az egyensúlyi hordalékszállítás azt jelenti, hogy a folyadék mobilizáló energiáihoz tartozó lebegtetett szemcsefrakciók korlátlanul rendelkezésre állnak az üledékben, a lebegőanyag koncentrációt az üledék nem limitálja (ezt csak és kizárólag a folyó mozgási energiája teszi). Úgy tűnik, ez a helyzet már az ötvenes években sem állt fenn és a limitáló tényező mintegy 20-25%-ra tehető.

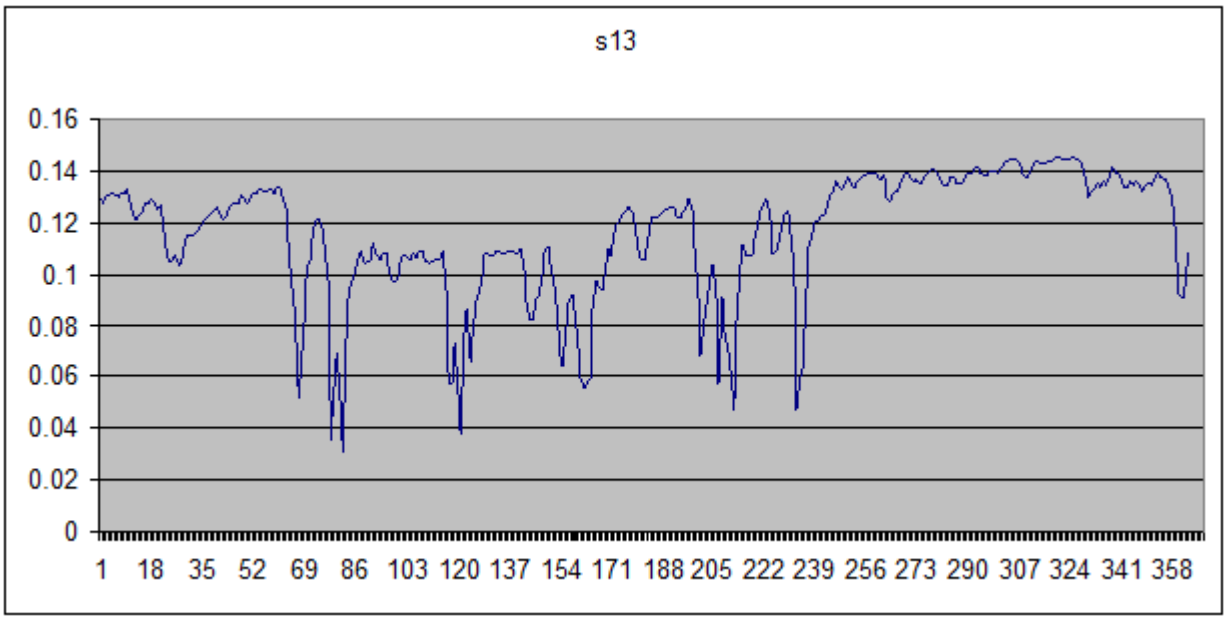
A lebegőanyag szállításhoz képest a *görgetett hordalékszállítás* mértéke jóval (három nagyságrenddel) kisebb (8.15-30. ábra); utóbbi 2000 m³/s felett kezd „beindulni".



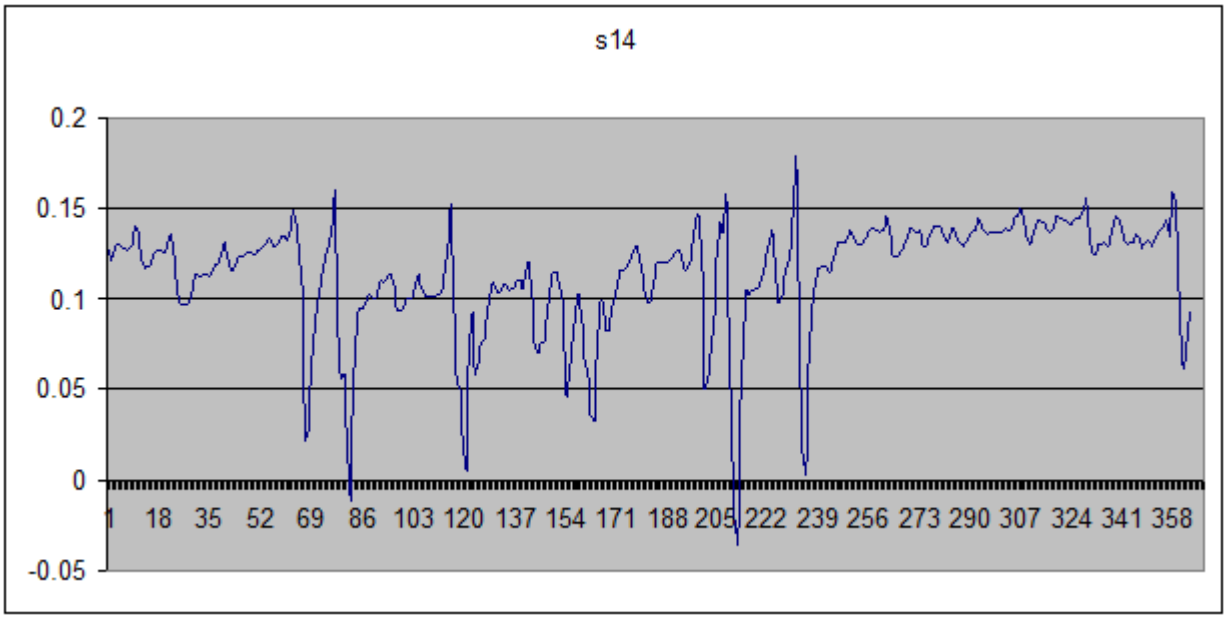
8.15-30. Egyensúlyi görgetett hordalékszállítás [kg/s] a vízhozam [m3/s] függvényében (a 2008. évre), a 8,20,40 mm-es frakciókból számítva

A modell jól egyezik Bogárdi (1971) megfigyeléseivel.

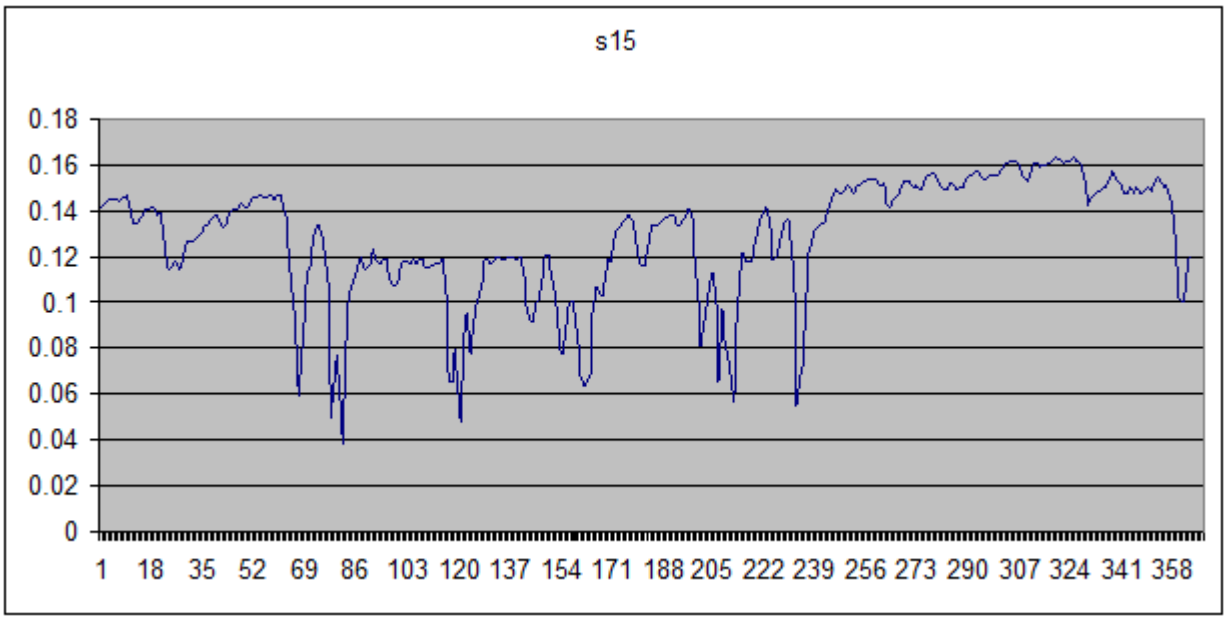
A fenti megfigyelések tükrében született a 8.15-2. táblázat 11. - 13. esete (forgatókönyve). A felső peremi bemeneti anyagáram az egyensúlyi érték 25%-a, a hordalékszámítást a finomabban beállított üledékfrakciókkal végezzük (8.15-1. táblázat, kezdeti feltétel). A frakció-eloszlás – kezdetben – a szakasz mentén egyenletes. A számításokat a tíz éves hidrológiai adatsorra végeztük el. A 11. eset beavatkozás nélküli, a 12.-ben kotrás történik Dunaföldvár térségében, a 13.-ban pedig a Barákai-gázló környékén. Az eredményeket a következő ábrák tartalmazzák (8.15-31 – 8.15-33. ábrák).



8.15-31. A referencia időszak (2008) várható vízszintsüllyedései a paksi mérceszelvényben a 11. esetben, tíz év hordalékmozgásainak hatását vizsgálva

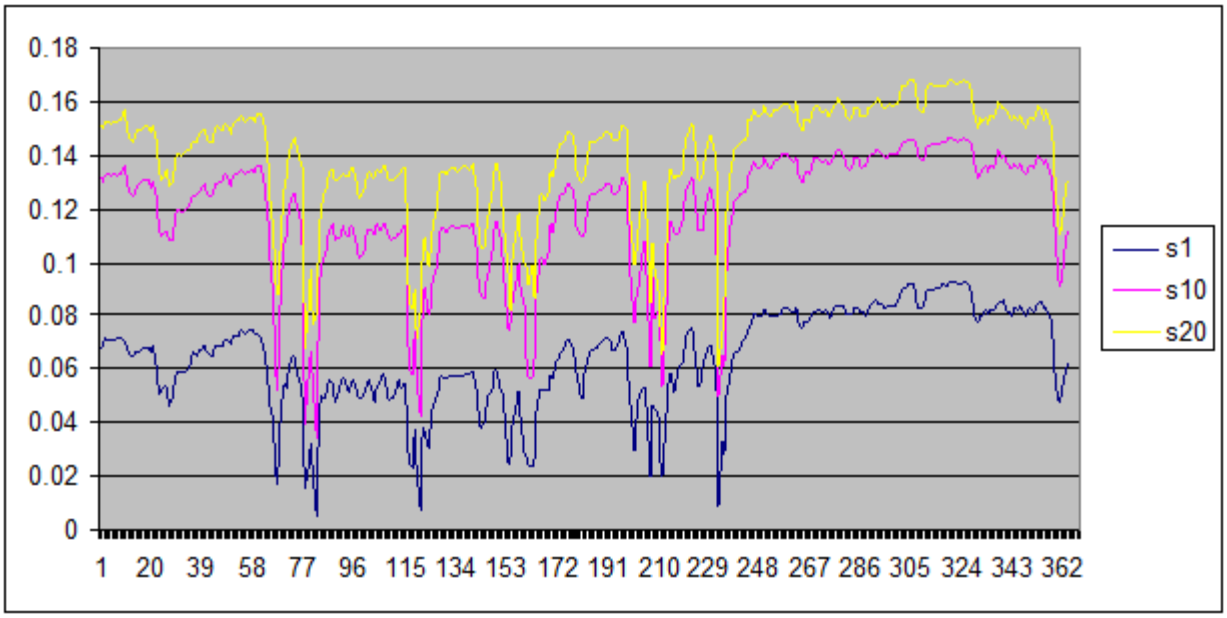


8.15-32. A referencia időszak (2008) várható vízszintsüllyedései a 12. forgatókönyv feltételezései mellett (Paks), tíz év hordalékmozgásainak hatását vizsgálva



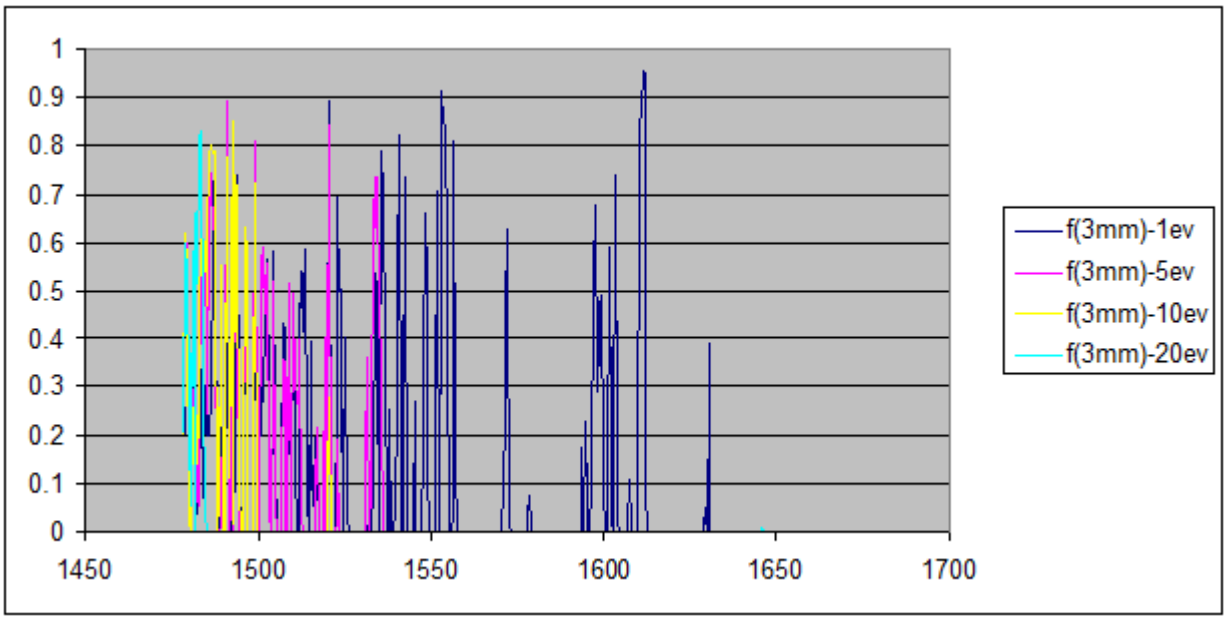
8.15-33. A referencia időszak (2008) várható vízszintsüllyedései a 13. forgatókönyv feltételezései mellett (Paks), tíz év hordalékmozgásainak hatását vizsgálva

A 7., 9. és 10. illetve 11., 12 és 13. esetek összehasonlítása (lásd a vonatkozó ábrákat, 8.15-2. táblázat) azért célszerű mert csak a peremi anyagáramokban van közöttük különbség. Megállapíthatjuk, hogy a *bemeneti anyagáram* 50%-os egyensúlyiról 25%-os értékre csökkentése szinte semmilyen hatással sincs a süllyedés mértékére (az átlagosan a 0,11 – 0,13 cm tartományban marad). Ezt azzal magyarázhatjuk, hogy a folyó bizonyos peremi anyagáram alatt erózió által domináltté válik, így egy küszöbérték alatt az érkező anyagot képes elszállítani. A mederváltozás időbeliségének vizsgálata céljából számításokat végeztünk 1, 10 és 20 évre, és kimutattuk a vízszintsüllyedést. Látható, hogy az *lassuló trend*et követ.



8.15-34. Vízszintsüllyedés: 1,1o és 2o év után (Paks, kék – 1 év, lila 10 év, sárga – 20 év)

A megfigyelt trend okát a 8.15-35. ábra magyarázza.

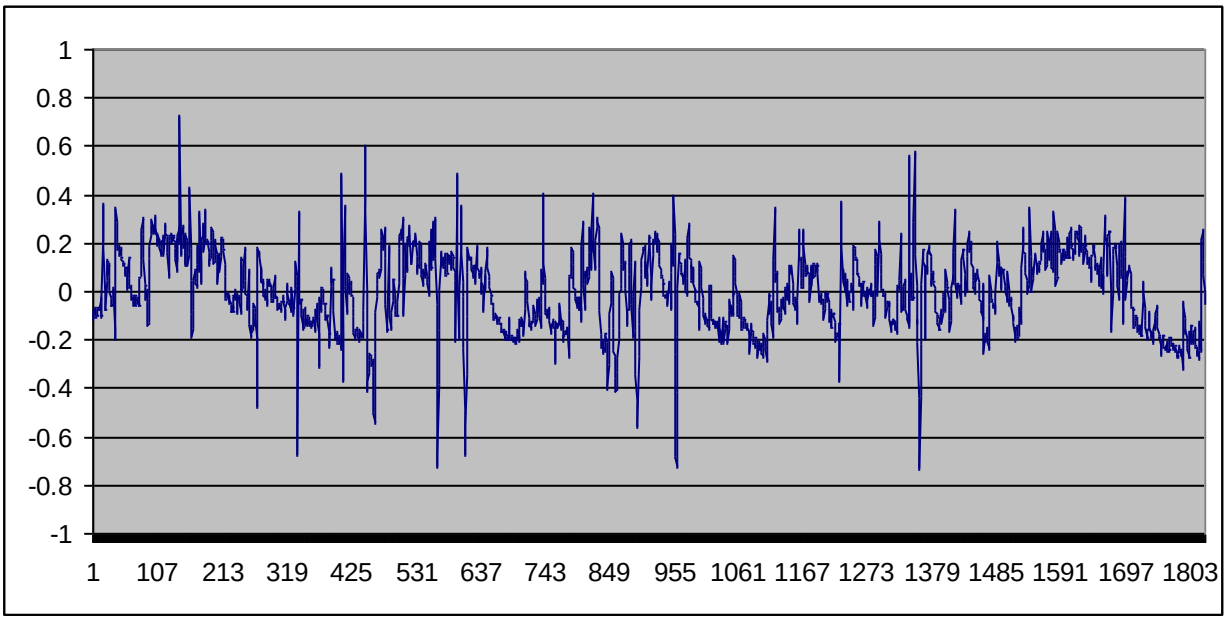


8.15-35. A legdurvább lebegőanyag frakció előfordulási aránya a vizsgált Duna hossz-szelvényében: 1,5,1o,2o év után

Megfigyelhető, hogy a lebegőanyag az időben szinte teljesen kimosódik az üledékből. A 3 mm-es frakció (a finomabb frakciókra még inkább érvényes ez a megállapítás) egyre lejjebb fordul elő. A finom frakciók eltűnésének az a következménye, hogy a lassú görgetési mechanizmus veszi át a mederváltoztatás szerepét. Ennek a lassulásnak a nyomon követése, azaz a trendek vizsgálata a modell igazolásának fontos kérdése. A mederváltozási- és a vízszintsüllyedési trendszámításokat gyakran autokorrelált, statisztikailag nem független adatsorokkal végzik. Korrekt módon csak valószínűségi változók analízise jöhet szóba, hiszen a szignifikancia tartományok összefüggései csak ezek esetében érvényesek. Módszerünk ezért a következő:

(a) Kalibrált hidrodinamikai modellel statisztikai értelemben hosszabb időszakot vizsgálunk (meghatározzuk a vízszinteket), mégpedig rögzített mederrel (a hordalékmodell „kikapcsolásával"), és képezzük a számított és mért vízszintek különbségét. Elemzési időszaknak a 2004. - 2008. közötti öt évet választottuk (több mint 1800 adattal).

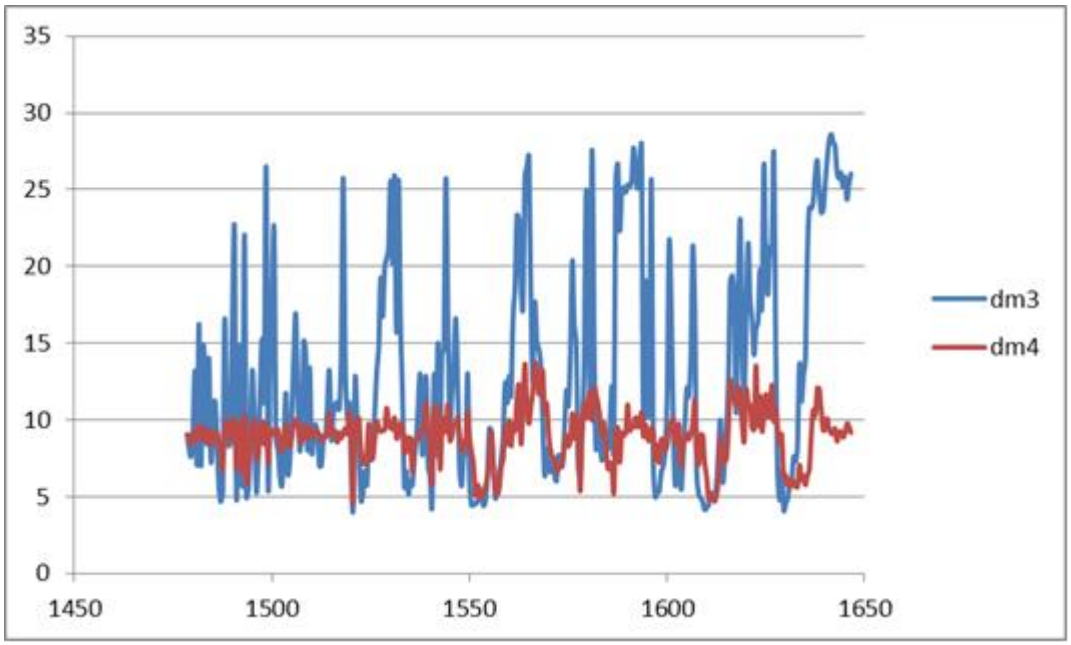
(b) Vizsgáljuk a különbség adatsor véletlen jellegét és Mann-Whitney teszttel a trend szignifikanciáját, majd a trend meredekségét (valamint szórását). Az adatsornak a trendje már független a peremi hidrológiai adatoktól, annak forrása csak a medermorfológia változása. Az eredmények közül a paksi szelvényre vonatkozót a 8.15-36. ábra szemlélteti. A trend mindenütt szignifikáns, értéke Paksnál 2,2 cm/év (így a Dunaújvárosnál és Dunaföldvárnál nagyobb).



8.15-36. ábra Paksi modellezett és mért vízszint különbsége (2004-2008). A trend szignifikáns: 2,20 cm/év süllyedés (95%-os megbízhatóság mellett)

(c) Ezt követően elvégezzük a hordalékmodell „bekapcsolásával" a mozgómedrű hidrodinamikai számításokat (2004 – 2008). Azt várjuk, hogy a rögzített és a valóságnak megfelelő mozgómedrű vízszint számítások különbsége közelítően azonos trendet eredményez, mint a rögzített medrű számítások és a mérések különbség-adatsora (azaz, a rögzített medrű számítások okozta hibát ily módon korrigáljuk).

A két trendvonal egyezése csak akkor teljesül, ha a meder szemösszetételét helyesen vettük fel. Megállapítottuk, hogy a 7. eset szemeloszlása nem eredményez megfelelő trendeket: a finom frakciók viszonylag gyorsan eltűnnek a felső fenékrétegből, majd alig történik változás. A felismerést követően – feltevésünknek megfelelően - korrigáltuk (durvítottuk) a 3. és 4. réteg eloszlását. Ezt a 8.15-1. táblázat utolsó két oszlopa tartalmazza. A feltüntetett eloszlással a medersüllyedés üteme a korábbi elemzéssel közel megegyező vízszintsüllyedési trendet idéz elő (Paksnál 1.90 cm/év, míg Dunaújvárosnál és Dunaföldvárnál 4.60 cm/év illetve 4.80 cm/év a vizsgált időszakra). Az elemzett öt éves időszak végén, a számított átlagos szemátmérőt a 3. és 4. rétegben, a folyó hossz szelvényében, Budapest és Mohács között a 8.15-37. ábra szemlélteti.



8.15-37. ábra Átlagos szemátmérő (mm) öt év után a Duna hossz-szelvényében a 3. és 4. rétegben (dm3 illetve dm4)

8.15.3.2.4 2D hordalékmodell alkalmazása

Ahogyan arra már utaltunk az 1D és 2D módszer hordalék rész-modellje megegyezik, pusztán a morfológiai-, hidrodinamikai- és transzport-modell környezet változik. Fontos különbség azonban az (lásd korábban is), hogy a részleteket jobban leíró 2D modell a tetemes számítási gépidő igény miatt elsősorban rövid folyószakaszra és permanens állapotra használható. A jelen munka keretében a frissen kifejlesztett 2D modellel elsősorban ellenőrző számításokat végeztünk, a 3D modell birtokában fontosabbnak ítéltük meg az 1D modell említett tetemes kiterjesztését (beleértve a morfológiát, a hidrodinamikát és a hordaléktranszportot) hosszban (160 km) és időben (10 év) egyaránt. A modellel nyert első tapasztalatok a paksi melegvíz bevezetés környezetében hasonló (de elnagyoltabb) változásokat sugallnak, mint a 3D modell (lásd később).

8.15.3.3 Az eredmények összefoglalása

A hosszú-távú mederváltozások leírására fizikailag megalapozott, a víz-üledék rendszerben négy réteget feltételező hordaléktranszport modellt fejlesztettünk ki, ami 1D és 2D környezetben egyaránt használható. Az 1D változatot alkalmaztuk a Duna Budapest és Baja közötti, mintegy 160 km hosszú szakaszára. A feladat kiírásban szereplő, Paks környéki 10 km szakasz kiterjesztésére a fel- és alvízi hatások figyelembe vétele miatt volt szükség.

A modell igen gyors és így az lehetővé teszi valós hidrológiai adatok alapján évtizedek szimulálását. Felépítése és használata rugalmas, viselkedése robosztus és alkalmas a lejátszódó folyamatok kielégítő hosszú-távú, a lokális hatásokat aggregáló leírására

A hidrodinamikai modellt sikeresen kalibráltuk, majd validáltuk.

Az összekapcsolt modellt különböző esetekre és forgatókönyvekre, 10 éves időszakra futtattuk. Vizsgáltuk a szemeloszlás, a felvízről belépő anyagáram, a réteg vastagságok és számos további tényező szerepét.

A Dunára végzett szimulációk segítségével elsősorban azt kívántuk feltárni, hogy (i) a kérdéses folyószakaszt az erózió vagy a kiülepedés jellemzi, (ii) mi lehetett az ipari kavicskitermelés hatása, (iii) mi lehet a Barákai-gázló kikotrásának (amit a hajózás igényei tehetnek szükségessé) a hatása és végül (iv) milyen változások várhatók a jövőben?

Az eredmények alapján a feltett kérdésekre az alábbi válaszok adhatók: (i) a folyószakaszt az erózió jellemzi; (ii) a Dunaföldvári szakaszon folyt kitermelés legfeljebb kismértékben járhatott hozzá a megfigyelt medermélyüléshez; (iii) egy

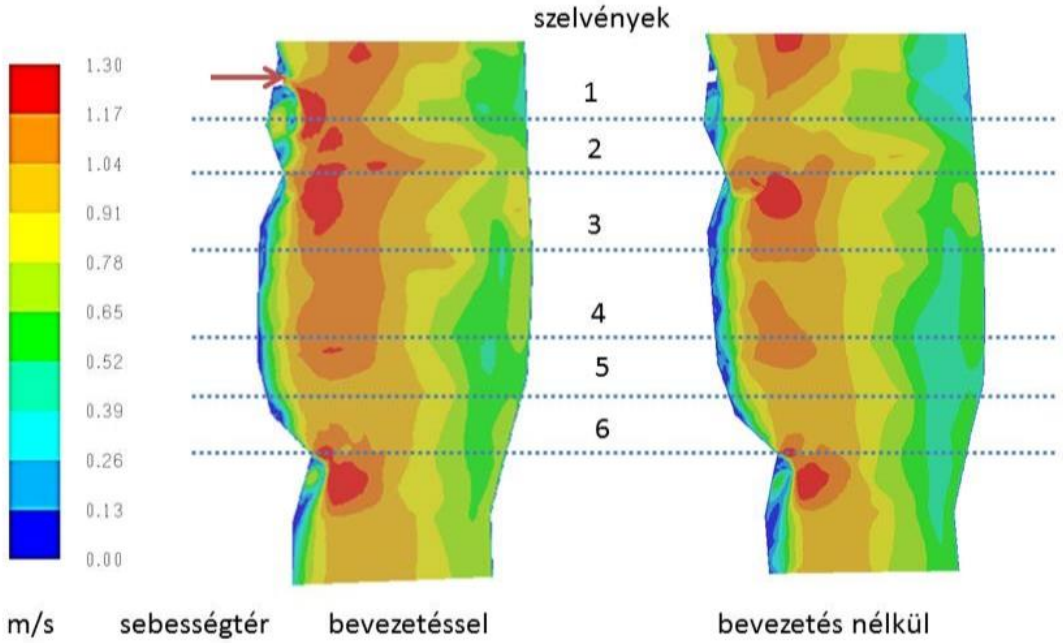
estleges Barákai-gázló szabályozás ennél nagyobb szerepet játszhat és (iv) összhangban az első válasszal, nem valószínű a mélyülés megállása, elemzéseink szerint az csökkenő mértékben, de folytatódik.

A fenti válaszok bizonytalanok. Látni kell, hogy eltérő tér- és időléptékeket tartalmazó, rendkívül összetett problémáról van szó, aminek a feltárása a modellezéshez kapcsolódóan gondosan megtervezett méréseket igényel. Ennek részletessége, az átfogó modellezési szemlélet átfogó adatigénye miatt kisebb, mint az általában feltételezett.

8.15.4 A MELEGVÍZ BEVEZETÉS ÁRAMLÁSRA GYAKOROLT HATÁSA

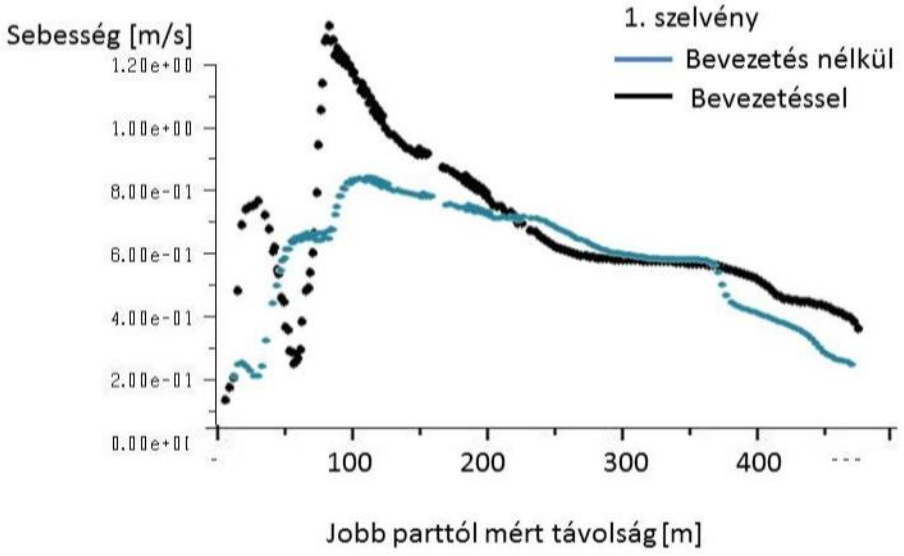
A jelenlegi melegvíz bevezetés áramlásra gyakorolt hatását úgy vizsgálhatjuk, hogy képzeletben megszüntetjük a paksi hűtővíz Dunába történő bevezetését, majd összehasonlítjuk az így kialakult áramképet a jelenlegivel. A 3D hidrodinamikai modellben ez azt jelenti, hogy a melegvíz belépési peremfeltételén zérus hozzáfolyást írunk elő. A medermodellen és ebből kifolyólag a numerikus felbontáson nem változtatunk. A szimulációhoz a kisvizet jellemző Q= 1400 m^3/s-os, és a középvízi Q= 2100 m^3/s-os Duna vízhozammal számoltunk. A számítás eredményeként a bevezetés közvetlen környezetében felülnézeti képpel (8.15-38. ábra) és 6 különböző metszetben hasonlítottuk össze a kialakult sebességeket (8.15-39. ábra - 8.15-44. ábra).

8.15.4.1 Kisvízi helyzet (Q=1400 m^3/s)

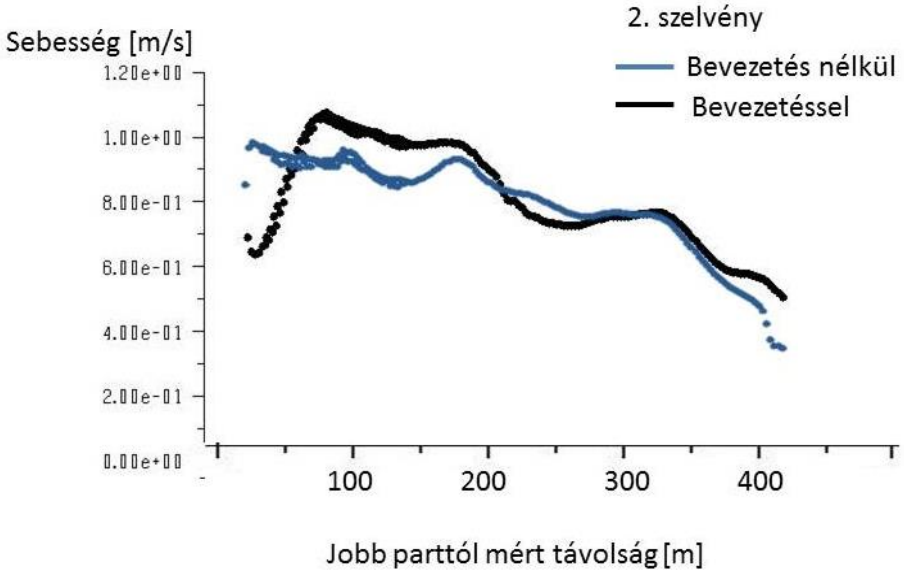


8.15-38. ábra Felszíni sebességeloszlás melegvíz bevezetéssel és anélkül, Q=1400 m^3/s

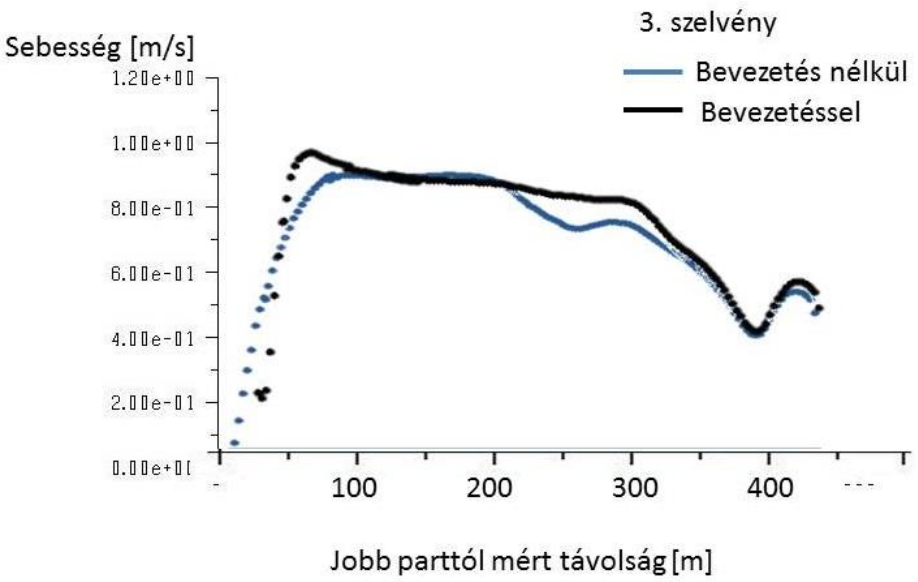
A két változat közötti legnagyobb különbségeket természetesen a bevezetés közelében találjuk. Itt a jobb parton jelentős az impulzus többlet, ami miatt nagyobb sebességek is előfordulnak. A 8.15-39. ábran az is megfigyelhető, hogy a sebességcsúcs előtt a jobb part közelében a csóva mögött kis sebességű pangó zóna alakul ki (különösen a bevezetés esetében). A 2. és 3. szelvényben még érzékelhető a melegvíz visszavezetés sebesség növelő hatása a jobb part környezetében, a 4. és 5. szelvényben azonban a két-két sebességprofil már jó egyezést mutat. Az észlelhető kisebb eltérések oka a numerikus módszer bizonytalanságaiból származik (pl. a turbulencia nem permanens jellege).



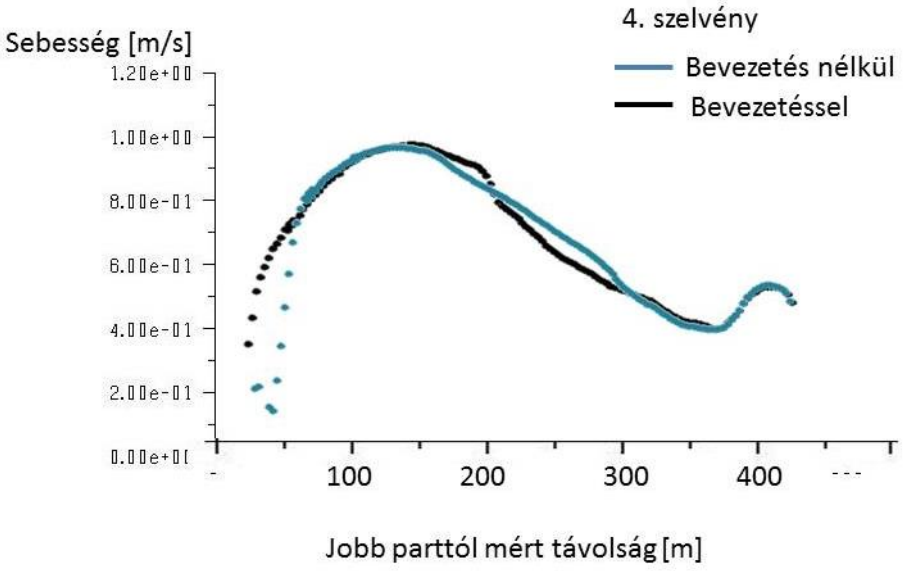
8.15-39. ábra Sebességprofilok melegvíz bevezetéssel és anélkül – 1. szelvény, Q=1400 m3/s



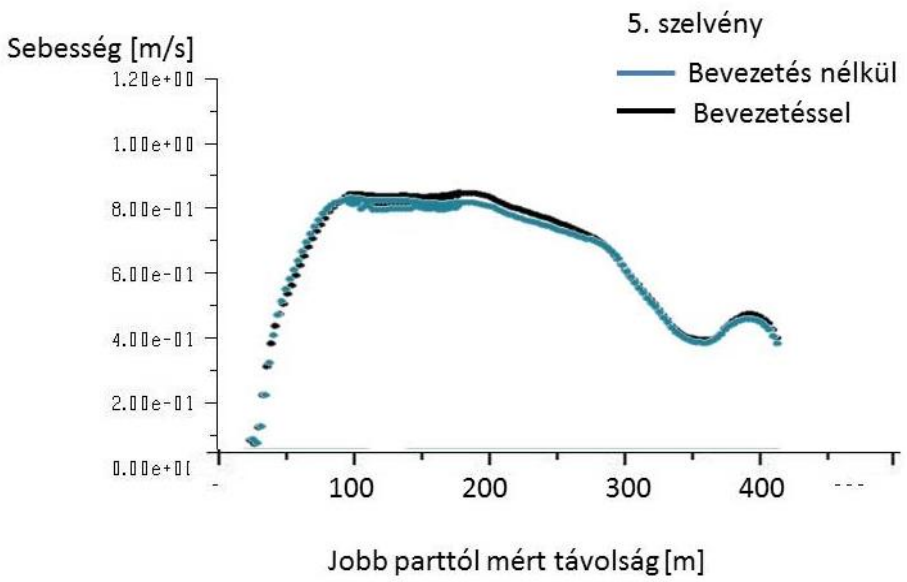
8.15-40. ábra Sebességprofilok melegvíz bevezetéssel és anélkül – 2. szelvény, Q=1400 m3/s



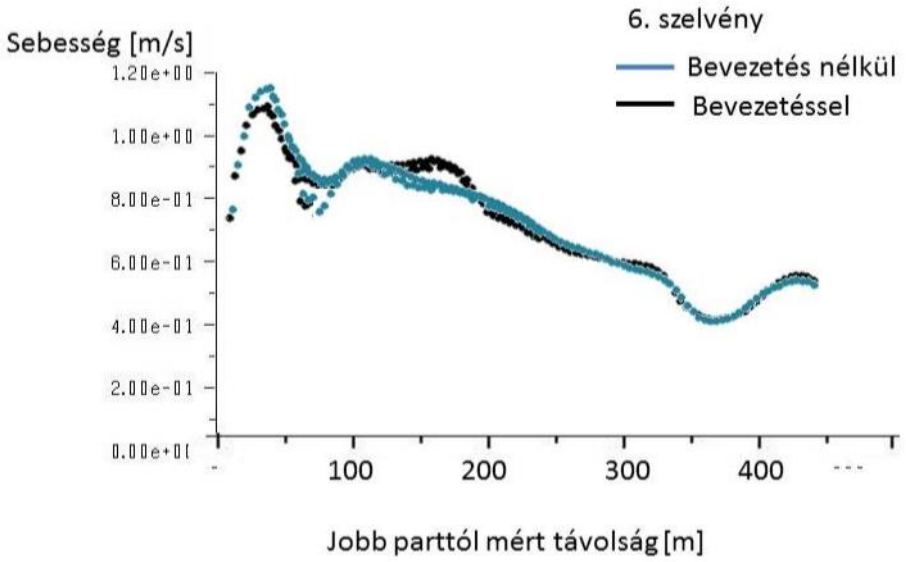
8.15-41. ábra Sebességprofilok melegvíz bevezetéssel és anélkül – 3. szelvény, Q=1400 m3/s



8.15-42. ábra Sebességprofilok melegvíz bevezetéssel és anélkül – 4. szelvény, Q=1400 m3/s



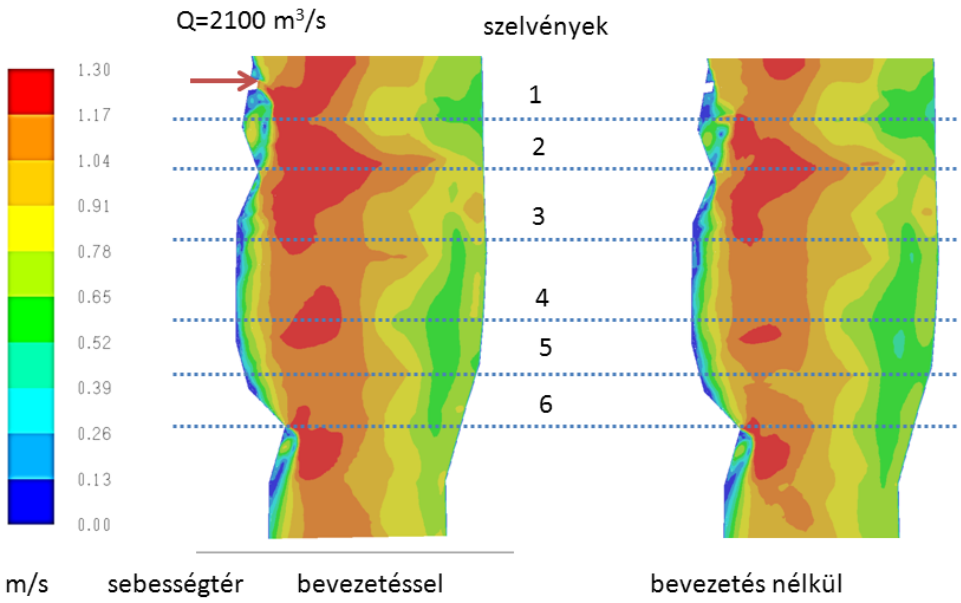
8.15-43. ábra Sebességprofilok melegvíz bevezetéssel és anélkül – 5. szelvény, Q=1400 m3/s



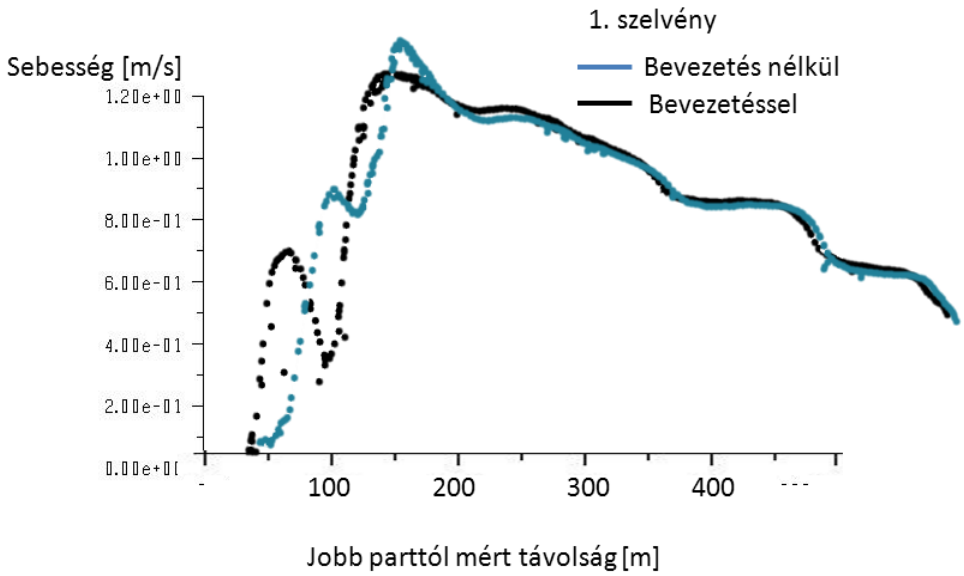
8.15-44. ábra Sebességprofilok melegvíz bevezetéssel és anélkül – 6. szelvény, Q=1400 m3/s

8.15.4.2 Középvízi helyzet (Q=2100 m³/s)

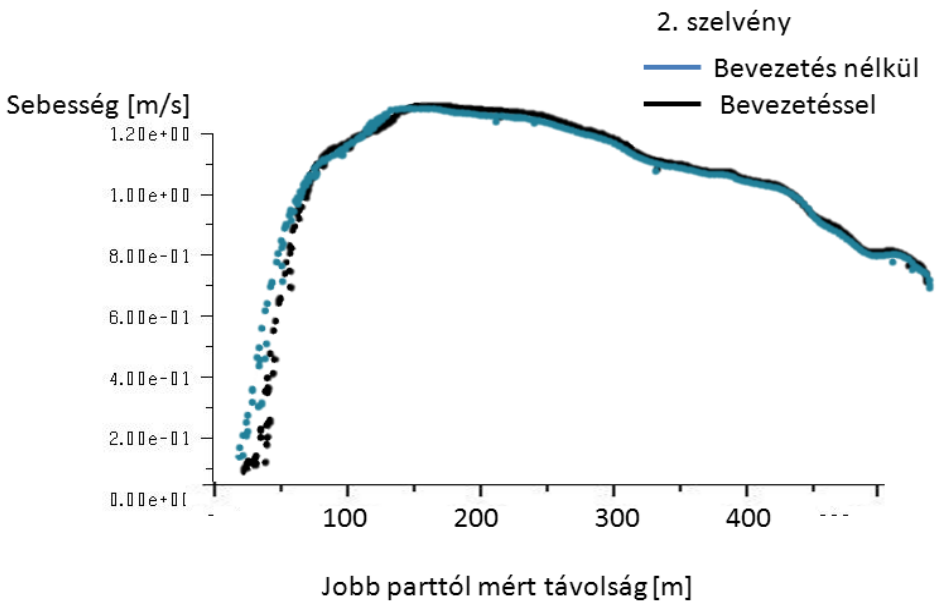
A Q= 2100 m³/s-os középvízi Duna hozamnál is hasonló trendek figyelhetőek meg. Az 1. szelvényben látszik a bevezetés hatására kialakuló sebességnövekmény a jobb part közvetlen környezetében. A további szelvényekben viszont a két-két sebességprofil jó egyezést mutat. Megállapítható, hogy a nagyobb Duna hozamnál a sebességtér eltérései kisebb mértékűek és a bevezetés áramképre gyakorolt hatásának területe is kisebb. Ennek oka, hogy a bevezetett hűtővízhozam a Duna hozamához képest kisebb részarányt képvisel.



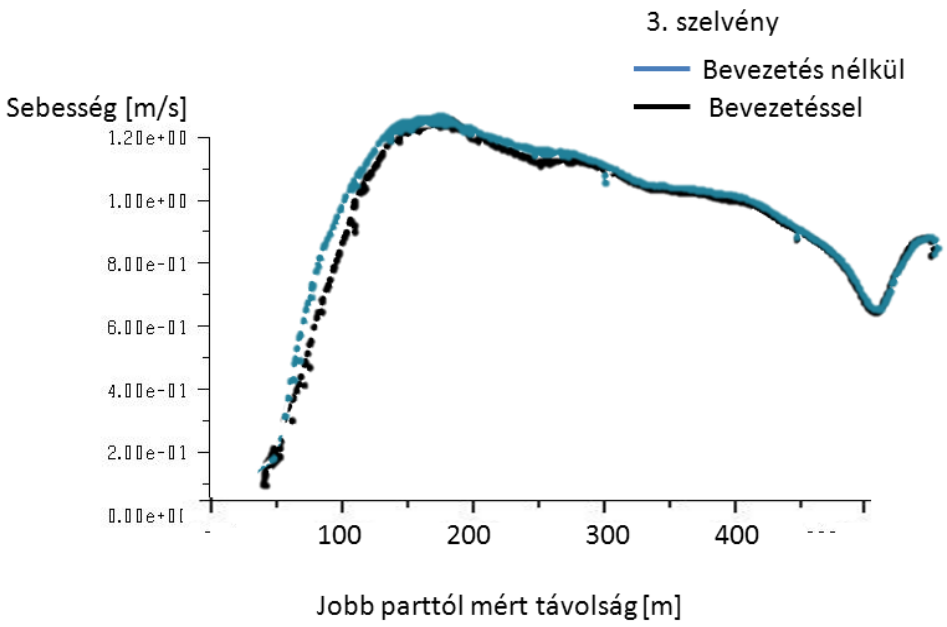
8.15-45. ábra Felszíni sebességeloszlás melegvíz bevezetéssel és anélkül Q=2100 m³/s



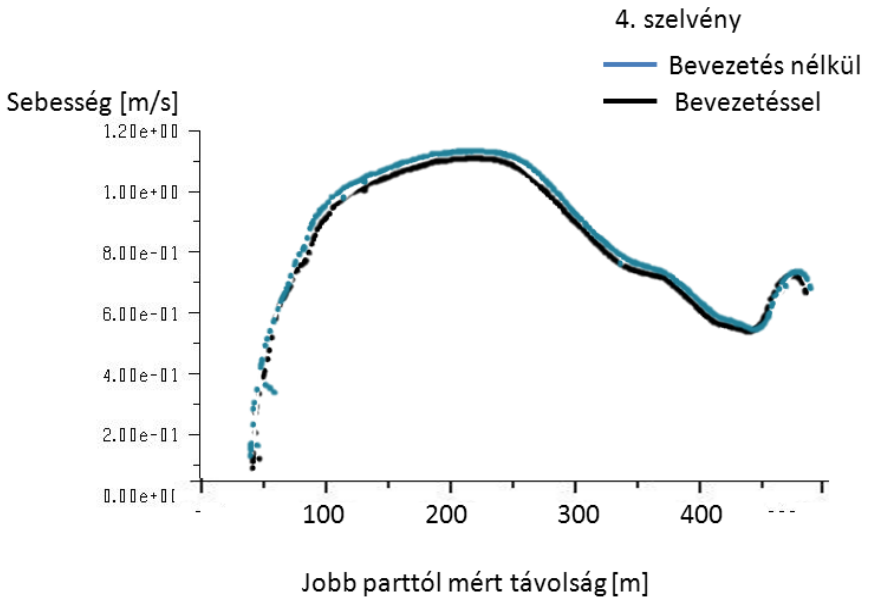
8.15-46. ábra Sebességprofilok melegvíz bevezetéssel és anélkül – 1. szelvény, Q=2100 m³/s



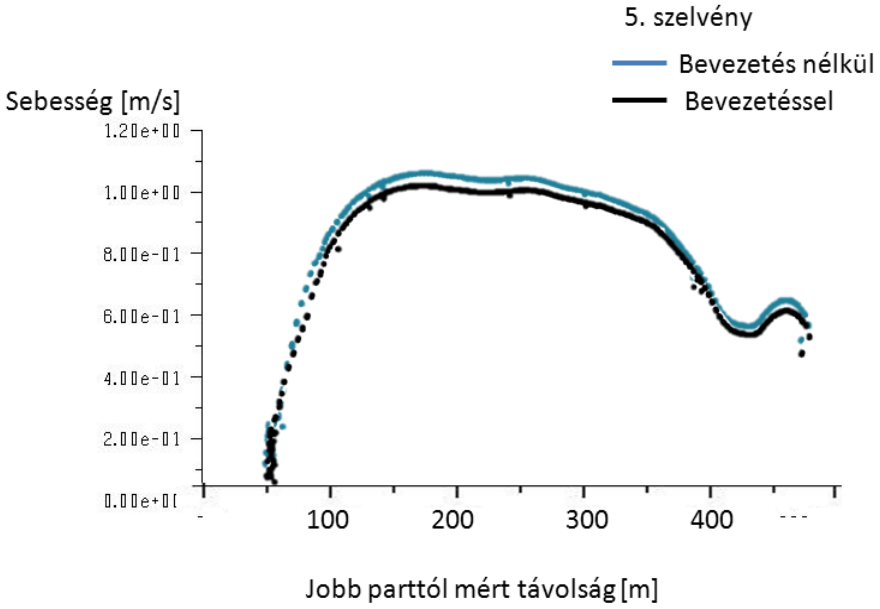
8.15-47. ábra Sebességprofilok melegvíz bevezetéssel és anélkül – 2. szelvény, Q=2100 m³/s



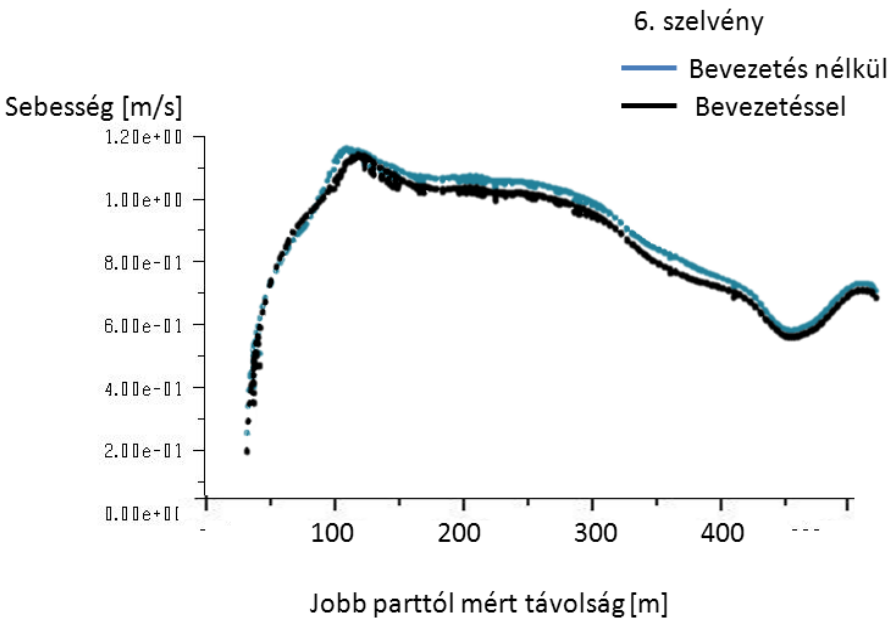
8.15-48. ábra Sebességprofilok melegvíz bevezetéssel és anélkül – 3. szelvény, Q=2100 m³/s



8.15-49. ábra Sebességprofilok melegvíz bevezetéssel és anélkül – 4. szelvény, Q=2100 m³/s



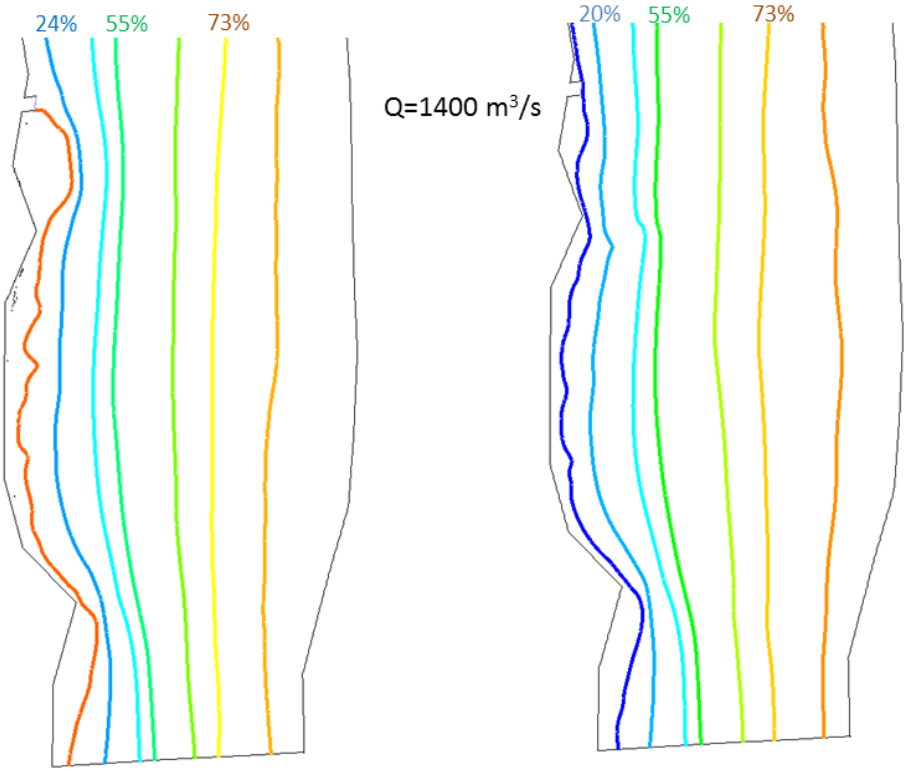
8.15-50. ábra Sebességprofilok melegvíz bevezetéssel és anélkül – 5. szelvény, Q=2100 m³/s



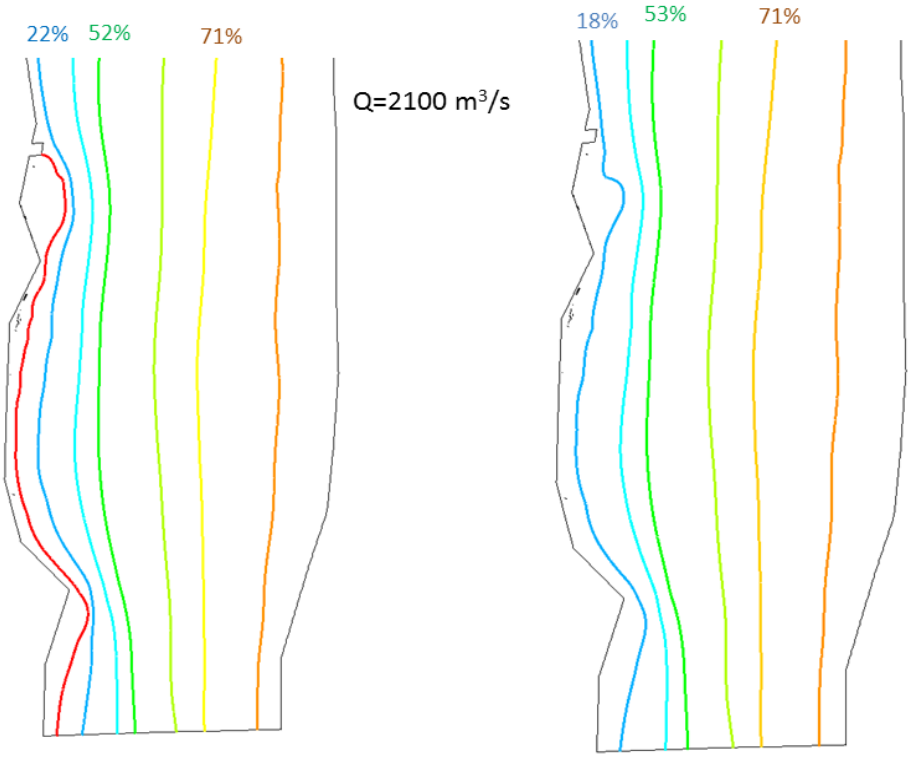
8.15-51. ábra Sebességprofilok melegvíz bevezetéssel és anélkül – 6. szelvény, Q=2100 m³/s

8.15.4.3 Vízhozam-arányok

A melegvíz dunai áramképre gyakorolt hatásának kiértékeléséhez érdemes megvizsgálni, hogy a meder egyes részein mekkora vízhozamok távoznak, azaz a függély mentén átlagolt sebességek áramvonalai – amelyekhez a vízhozam x %-a tartozik - hogyan alakulnak.



8.15-52. ábra Átfolyási vízhozamok megoszlása melegvíz-bevezetéssel (balra) és anélkül (jobbra), Q= 1400 m³/s



8.15-53. ábra Átfolyási vízhozamok megoszlása melegvíz-bevezetéssel (balra) és anélkül (jobbra) Q= 2100 m³/s

Itt ismét azt látjuk, hogy eltérések a jobb part közelében találhatók, de a sodorvonal helyzete – amit közelítően az 55% áramvonal szemléltet – gyakorlatilag változatlan, a megállapítás pedig még helytállóbb a nagyobb vízhozamra.

8.15.4.4 Az eredmények összefoglalása

Összefoglalva elmondhatjuk, hogy a melegvíz-bevezetés áramlásra gyakorolt hatását úgy vizsgáltuk, hogy a 3D hidrodinamikai modellben a jelenlegi bevezetési helyen a belépő vízhozamot zérussal tettük egyenlővé, és a két változat (jelenlegi bevezetés és a bevezetés nélküli) áramképét összehasonlítottuk. Az összehasonlítást különböző szelvényekben felvett sebességprofil alapján és a keresztirányban vett vízhozamok megoszlása alapján végeztük el. Megállapítottuk, hogy a melegvíz-bevezetés hatása a sebességtérre lokális jellegű, azaz a profilokban eltérés csak a bevezetés közvetlen közelében, mintegy az első sarkantyúig terjed. A bevezetett hűtővíz a jobb part mentén vízhozam-többletet jelent, melynek hatása a melegvízcsóva bal széléig terjed. Ezen hatások csökkennek nagyobb dunai háttérhozamnál.

8.15.5 A MELEGVÍZ-BEVEZETÉS MEDERRE GYAKOROLT HATÁSA

A 3D-s hidrodinamikai modell segítségével a melegvíz-bevezetés mederre gyakorolt hatása két lépésben vizsgálható:

kiülepedés vizsgálata Lagrange-i részecskeszimulációval

felkeveredés lehetőségének vizsgálata a fenékcsúsztató-feszültség segítségével.

A részecskeszimuláció a 3D-s áramképet bemeneti adatként használja fel. Erre az áramképre adott mérettel és sűrűséggel rendelkező részecskéket helyezünk és a modell felvízi szakaszáról elindítunk. A részecskékre a Dunán való haladásuk során hat a gravitációs, a közegellenállási és felhajtóerő. Ha a mederfenékre ér, akkor ott maradhat vagy visszaverődhet a becsapódási szög, a fenék közeli áramlási sebesség és az ott levő egyensúlyi üledékkoncentráció függvényében.

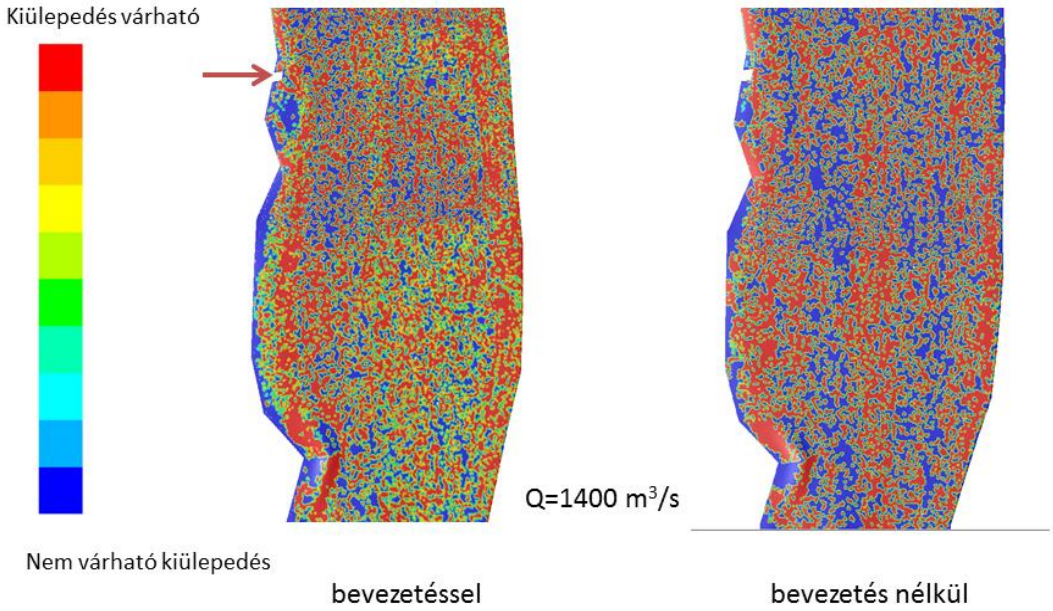
Ez utóbbit a Lagrange-i szimuláció nem veszi figyelembe, ezért szükséges egy indikátor paraméter bevezetése, mely arányos az egyensúlyi üledékkoncentrációval. Van Rijn (1984) szerint erre alkalmas a fenékcsúsztató-feszültség és a kritikus csúsztatófeszültség hányadosa, $((\tau-\tau_{cr})/\tau_{cr} = \tau/\tau_{cr}-1)$. Vagyis, ahol a kritikus fenékcsúsztató feszültségnél nagyobb feszültségek lépnek fel, ott felkeveredés várható.

A számítás alapadataihoz a VITUKI medermorfológiával foglalkozó tanulmányából indultunk ki (VITUKI, 2011). A részecskék sűrűsége 2650 kg/m^3 volt, a homogén hordalék átmérő 0,707 mm – 5,66 mm közé esett. A számításhoz az 1400 m^3/s kisvízi Duna hozamot használtuk, amelyhez a G=25 kg/s-os hordalékhozam tartozott. A vizsgált szemcseméret tartományban a Shields diagramm (van Rijn, 1984) alapján megállapított dimenziómentes kritikus csúsztatófeszültség a 0,047-0,0495 tartományba esett.

A Lagrange-i szimuláció eredményét a 8.15-54. ábra mutatja. A felső peremfeltételen bejuttatott részecskék (mintegy 10 000 részecske) pályájának alapján a modell a mederfenék minden egyes pontjára a kiülepedési hajlandóságot kiátlagolja, vagyis lokális jellemzőt kapunk. Ennek ellenére globális következtetés is levonható:

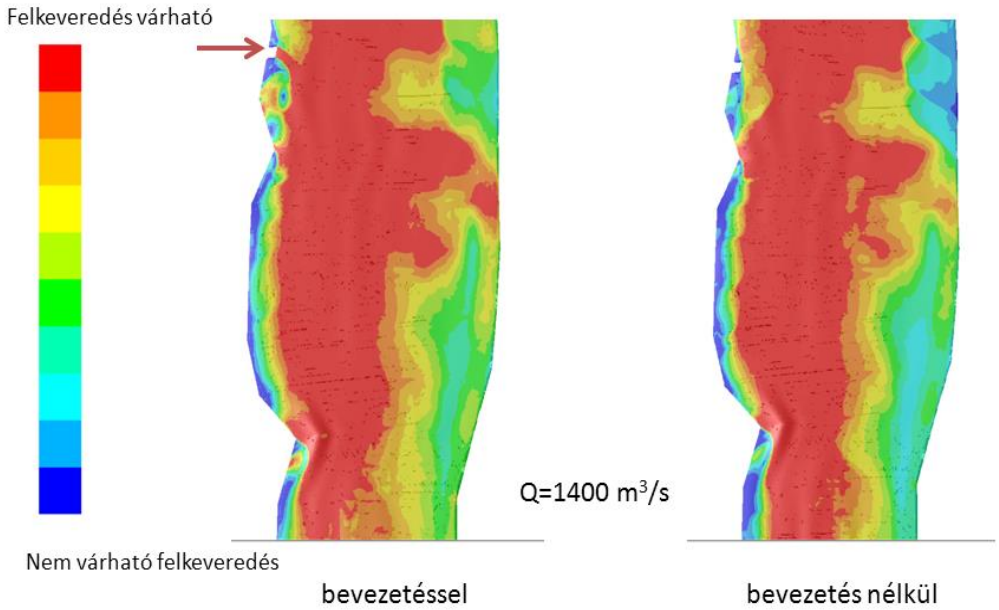
a két sarkantyú előtt kiülepedés várható,

a jobb part mellett erős a kiülepedési hajlandóság.



8.15-54. ábra Kiülepedési hajlandóság Lagrange-i részecskekísérlettel

A 8.15-55. ábra a fenékcsúsztató sebességek arányát mutatja, vagyis pirossal azokat a területeket, ahol erőteljes felkeveredésével kell számolni. A kék, zöld szín a kiülepedés dominálta területeket szemlélteti. A melegvíz-bevezetés hatására ezen területek kiterjedése alapvetően nem változik meg. A jobb part közvetlen közelében és a bal parton várható kiülepedés, a sodorvonal és a melegvízcsóva környezetében felkeveredés várható.



8.15-55. ábra Átfolyási vízhozamok megoszlása melegvíz-bevezetéssel (balra) és anélkül (jobbra) Q= 2100 m³/s

A 3D hidrodinamikai modellből kiindulva a lokális hatások jellegét különféle indikátorparaméterekkel becsülhetjük. Egyrészt a modell belépési peremén a hordalékot reprezentáló részecskéket juttathatunk a rendszerbe, és sorsukat

követhetjük. A részecskék kiülepedési hajlandóságát a rájuk ható erőkből, a meder közelében kialakuló sebességviszonyokból, a becsapódási szögből stb. határozhatjuk meg. A felkeveredési hajlandóságot a fenékcsúsztató-feszültség alapján közelítettük. Az előzetesnek tekinthető részecske szimulációk alapján a sarkantyúk mögött és a bal part közvetlen közelében várható kiülepedés, a sodorvonal és a melegvízcsóva környezetében pedig felkeveredés. A melegvíz bevezetés hatására ezek a zónák csak kis mértékben módosulnak.

8.15.6 A KÜLÖNBÖZŐ LÉPTÉKŰ HATÁSOK EGYÜTTES ÉRTÉKELÉSE

A Duna paksi melegvíz bevezetésének és mederváltozásának problémáját a különböző léptékű hatások jelenléte jellemzi. Így például a visszavezetett, felmelegedett hűtővíz néhány perc alatt eléri a +500 m szelvényt, de a túlsó part eléréséhez már több nap szükséges. A bevezetés áramképre gyakorolt (csekély) módosító hatása két kilométeren belül lejátszódik, egy-egy árvíz egy-két hét alatt átrendezheti lokálisan a medret, de a mélyülés jellemző idő- és térbeli léptéke évtized illetve 100 km nagyságrendű. Ezek a különböző léptékű folyamatok együttesen játszódnak le és befolyásolják a meder módosulásait. A vizsgálatok szempontjából szerencse, hogy a lokális és „regionális" léptékek számottevően eltérnek, így azok – dimenzióanalízis által is igazolva –szétválaszthatók.

Az elvégzett vizsgálatok alapján - első közelítésben - kijelölhetők Paks közvetlen környezetében azok a meder zónák, amelyeket a kiülepedés illetve az erózió jellemez (lásd korábban). Ugyanakkor az elmúlt hatvan év mérései és az 1D hordaléktranszport modellel a Budapest – Baja szakaszra elvégzett elemzések alapján egymást megerősítő megállapítások tehetők. Eszerint a vizsgált folyószakaszt és Paks közvetlen környezetét az erózió jellemzi. Ennek elsődleges oka az, hogy nem áll rendelkezésre elegendő mennyiségű lebegőanyag utánpótlódás (a görgetett hordalék transzport elhanyagolható). Becsléseink szerint az utánpótlódás az egyensúlyi érték 25 %-a körüli, de ha 50 % lenne, akkor is a vízszintsüllyedés maradna domináns. A Duna medermélyülése nem új jelenség, az a megfigyelések szerint az elmúlt hatvan évet jellemzi. Mértéke átlagosan 1-3 cm/év, attól függően, milyen indikátort és vizsgálati módszert alkalmazunk. A felvízi folyószakaszon és a vízgyűjtőn, illetve a meder összetételében nem várhatók olyan változások, amelyek az eróziós jelleget megváltoztatnák. Ugyanakkor, a múltbeli mérések és tíz éves modell szimulációk, valamint azok statisztikai értékelése egyaránt azt sugallják, hogy a mélyülés mértéke a jövőben mérséklődik.

8.16 AZ EREDMÉNYEK ÖSSZEFOGLALÁSA

A *medermodell* előállításának módszertani kulcskérdése a felmért keresztszelvények közötti pontok magasságának meghatározására alkalmazott interpolációs eljárás. A BME-VKKT által kifejlesztett eljárás kisvízi és középvízi helyzetre jól működött, azonban összetett meder (főmeder + hullámtér) interpolációjára már kevésbé alkalmas. Tekintettel azonban arra, hogy egyrészt nagyvízkor relatív kicsi a medermodell hatása az áramlásokra, másrészt a kritikus helyzetek nem nagyvízkor várhatók – az alkalmazott eljárással mindhárom hidrológiai helyzetre megfelelő pontosságú medermodellt állítottunk elő.

A *hidrodinamikai modell* kalibrálásának, igazolásának alapjául a Duna-Bizottság által meghatározott hajózási kisvízszintek, illetve a VITUKI által jelen projekt keretében elvégzett kis-, közép- és nagyvízi meder- és sebességmérések voltak. A sajátságok (hajózási kisvízszint burkológörbe volta, nagyvízi medermodell fent említett pontatlansága) figyelembe vétele mellett a számítási eredmények több-szempontú ellenőrzést követően (vízszint-hossz-szelvény, sebesség-keresztszelvények) pontosnak mondhatók.

A *transzportmodell* örökli a medermodellben és a hidrodinamikai modellben megtalálható hibákat, pontatlanságokat. Ennek ellenére csak kisebb eltéréseket találunk a hőcsóva szélének számításában, nagyobbakat az – elsősorban part- és bevezetésközeli – hőmérsékletcsúcsokban. Indokolt tehát – ahogyan tettük is – a 3D modell alkalmazása a közel-tér (near-field) leírására, ld. az 5. főfejezetet.

A melegvíz-bevezetés *áramlásra* gyakorolt hatását 3D hidrodinamikai modellel vizsgáltuk, a bevezetéssel és a bevezetés nélkül adódott áramképek összehasonlítása révén. A különböző szelvényekben felvett sebességprofilok és az áramvonalak módosulása alapján megállapítható, hogy a melegvíz-bevezetés hatása a sebességtérre lokális jellegű, a profilokban eltérés csak a bevezetés közvetlen közelében, mintegy az első sarkantyúig terjed. A bevezetett hűtővíz a

jobb part mentén vízhozam-többletet jelent, melynek hatása a melegvízcsóva bal széléig terjed. A változások a dunai háttérhozammal csökkennek.

A *lokális mederváltozást* a 3D hidrodinamikai modellből kiindulva, részecske szimulációk alapján, különféle indikátorokkal becsülhetjük. A hordalékot reprezentáló részecskék kiülepedési hajlandóságát a rájuk ható erőkből, a meder közelében kialakuló sebességviszonyokból, a becsapódási szögből stb. határozhatjuk meg. A felkeveredési hajlandóság a fenékcsúsztató-feszültség alapján közelíthető. Az előzetesnek tekinthető szimulációk alapján a sarkantyúk mögött és a bal part közvetlen közelében várható kiülepedés, a sodorvonal és a melegvízcsóva környezetében pedig felkeveredés. A melegvíz bevezetés hatására ezek a zónák csak kis mértékben módosulnak.

A sokoldalú statisztikai, áramlási és hordalékmodell szimulációs vizsgálatok alapján *a meder hosszú-távú változására* a következő megállapítások tehetők: (i) A Duna Budapest - Baja szakaszát – megfelelő szintű hordalék utánpótlás - hiányában az erózió jellemzi. A szimulációk szerint ez a jelleg - ami az elmúlt hatvan évben megfigyelhető volt - fennmarad, ugyan a mértéke csökkenni látszik; (ii) A mért adatok szerint hatvan év alatt az 50 % tartósságú vízállás átlagosan 1,8 cm/év (a kisvizek 2-3 cm/év) mértékben csökkent (a számítások szerint is hasonló eredmény adódott). A kis és középvizek tartóssága nőtt (a nagyvizek rovására). A mederváltozás trendje nagyjából lineáris, az utóbbi két évtizedben enyhén csökkenő; (iii) a Dunaföldvári szakaszon folyt kavicskitermelés hatása aligha járult hozzá a Paksnál megfigyelt medermélyüléshez; (iv) egy esetleges Barákai-gázló szabályozás komolyabb szerepet játszhat. (v) Paks térségében a mederváltozást - a jelen vizsgálatok alapján - alapvetően a folyó hordaléktranszportjának jellemzői határozzák meg, a melegvíz bevezetés hozzájárulása ehhez viszonyítva lényegesen kisebb. Határozottabb megállapítás csak részletes mérési programra épített modellszámítások alapján tehetők.