A DUNA MEDERMORFOLÓGIÁJÁNAK ÉS HŐTERHELÉSÉNEK MODELLEZÉSE

TARTALOMJEGYZÉK

11 A DUNA MEDERMORFOLÓGIÁJÁNAK ÉS A DUNA HŐTERHELÉSÉNEK MODELLEZÉSE 15

11.1 Jogszabályi háttér 15
11.2 A Duna általános vízrajzi jellemzői 15
11.3 A modellezett állapotok, az alkalmazott modellek 16
11.4 A dunai modellezések szempontjából mértékadó üzemállapotok és időpontok 16
11.5 A modellterületek lehatárolása az alkalmazott modellek megnevezésével 17
11.5.1 Szélsőséges kis- és nagyvízi események, valamint a mederváltozások 2D modellterülete 17
11.5.2 Extrém természeti- és művi körülmények hatásainak vizsgálata a telephely árvízi érintettségére és a hűtővízkivételi biztonságra - 1D modellterület 17
11.5.2.1 Extrém természeti- és művi körülmények hatásainak vizsgálata a telephely árvízi érintettségére 18
11.5.2.2 Extrém természeti- és művi körülmények hatásainak vizsgálata a hűtővízkivételi biztonságra 18
11.5.3 A Dunába vezetett felmelegedett hűtővíz vizsgálata - 3D modellterület 18
11.6 A mértékadó terhelési állapotok vizsgálatának módszertana, a modellek bearányosítása 18
11.6.1 Szélsőséges dunai kis- és nagyvízi események mértékadó terhelési állapotainak felvétele - 2D áramlási modell bearányosítása 18
11.6.1.1 Szélsőséges dunai kis- és nagyvízi események mértékadó terhelési állapotai 18
11.6.1.1.1 Szélsőséges dunai kisvízi esetek 19
11.6.1.1.2 Szélsőséges dunai nagyvízi (árvíz) esetek 19
11.6.1.2 Az alkalmazott (2D) hidrodinamikai modell kalibrációjának bemutatása kisvízi- és nagyvízi esetre 20
11.6.1.2.1 Kis- és nagyvízi mederfenékszint és területhasználat alakulása 20
11.6.1.2.1.1 A Duna főmedrének és hullámterének kidolgozott morfológiai modellje 21
11.6.1.2.1.2 A Dunai modellterület területhasználatainak bemutatása - mederérdességek területi elkülönítése 25
11.6.1.2.2 Nagyvízre vonatkozó kalibráció 28
11.6.1.2.3 Kisvízre vonatkozó kalibráció 35
11.6.2 Extrém természeti- és művi körülmények hatásainak vizsgálata - 1D áramlási modell bearányosítása 36
11.6.2.1 Extrém természeti- és művi körülmények hatásainak vizsgálata a telephely árvízi érintettségére 37
11.6.2.1.1 A felvízoldali vízszabályozó szerkezetek meghibásodásának hatása 37
11.6.2.1.2 A Duna meder változását előidéző magaspart csuszamlások hatásainak vizsgálata 38
11.6.2.1.3 Jégdugó kialakulásának prognosztizálása, nagyvízi hatásának vizsgálata 40
11.6.2.2 Extrém természeti- és művi körülmények hatásainak vizsgálata a hűtővízkivételi biztonságra 41
11.6.2.2.1 Felvízszint-szabályozó műtárgy sérülésének, nem üzemszerű működésének hatása (1D) 41
11.6.2.2.2 Jégtorlasz, jégdugó hatására előálló helyzet hatásai 43
11.6.2.2.3 Partfalomlások, partfalcsuszamlások hatásainak vizsgálata 43
11.6.3 Hőcsóva modellezés - 3D hidrodinamikai és transzport modell bearányosítása 43
11.6.3.1 A jelenlegi mértékadó hőterhelési állapot, illetve a fejlesztés elmaradásának esete 43
11.6.3.2 A tervezett fejlesztés megvalósulása esetén mértékadó hőterhelési állapotok felvétele 44
11.6.3.1 A hőcsóva számításánál alkalmazott 3D hidrodinamikai és hőtranszport modellek bemutatása 46
11.6.3.2 Az áramlási és hőtranszport modell bearányosítása 48
11.6.3.2.1 A 3D áramlási és hőtranszport (OpenFOAM) modell bearányosítása 48
11.6.3.2.2 A "semi" 3D hőtranszport (CORMIX) modell bearányosítása 50
11.6.4 A Duna medrének morfodinamikai modellvizsgálata 51
11.6.4.1 Lebegtetett és görgetett hordalékmozgás egydimenziós (1D) modellvizsgálata 51
11.6.4.2 A Duna meder morfodinamikai folyamatainak kétdimenziós (2D) modellvizsgálata 58
11.6.4.2.1 Az alkalmazott 2D hidrodinamikai és hordaléktranszport modell ismertetése 59
11.6.4.2.2 Mértékadó morfodinamikai terhelési állapotok meghatározása 61
11.6.4.3 Lokális morfodinamikai folyamatok elemzése a tervezett fejlesztéssel érintett szakaszon 63
11.6.4.3.1 Lokális morfodinamikai hatások és hatásterületek vizsgálatának módszere 63
11.6.4.3.2 Lokális morfodinamikai folyamatok elemzésének módszere 63
11.6.4.3.3 Mederváltozások trendje 63
11.6.4.3.4 A Duna meder morfodinamikai folyamatait leíró kétdimenziós (2D) modell bearányosítása 64
11.7 A Duna vizsgált szakaszának alapállapota 66

11.7.1 A vizsgált Duna szakasz vízjárásának jellemzése 66
11.7.1.1 Általános vízrajzi jellemzők 66
11.7.1.1.1 Gázlók és szűkületek 68
11.7.1.1.2 A Paksi vízmérce (Duna 1531,3 fkm) és a meglévő telephely öblözeti vízmércéje (hidegvíz-csatorna, vízkivételi mű előtere) közötti mércekapcsolat 70
11.7.1.1.3 Vízhozam- és vízállás tartósság jellemzés (1965-2012) 71
11.7.1.2 A Duna nagyvizeinek statisztikai vizsgálata 74
11.7.1.2.1 Mértékadó árvízszint meghaladási valószínűségi értékének indoklása 75
11.7.1.2.2 A telephely árvédelemhez kapcsolódóan jellemző szintjei 75
11.7.1.2.3 Jégjelenséggel befolyásolt nagyvízszintek a tervezett fejlesztés területén 76
11.7.1.2.4 Mértékadó jégmentes nagyvízszintek számítása 77
11.7.1.2.5 Mértékadó árvízszintek a tervezett fejlesztés környezetében 79
11.7.1.2.6 Történelmi árvizek eddig előfordult szélsőségei 81
11.7.1.2.7 Mértékadó jégmentes nagyvízi hozamok számítása 81
11.7.1.2.8 Várható nagyvízi hozamok előrejelzése a tervezett bővítés üzemidejének időtartamára 83
11.7.1.3 A Duna kisvizeinek statisztikai vizsgálata 85
11.7.1.3.1 Történeti kisvizek 85
11.7.1.3.2 Kisvízszintek statisztikai vizsgálata 86
11.7.1.3.3 Várható kisvízszintek előrebecslése 87
11.7.1.3.4 A Duna mértékadó kisvízi vízhozamainak meghatározása 89
11.7.1.3.5 Várható kisvízhozamok előrebecslése a tervezett bővítés üzemidejének időtartamára: 94
11.7.2 A vizsgált Duna szakasz áramlási- és mederviszonyainak jellemzése 97
11.7.2.1 A vizsgált Duna szakasz mederviszonyainak általános jellemzése 97
11.7.2.2 A vizsgált Duna szakasz morfológiai változásának megfigyelése 1982-től napjainkig 100
11.7.2.2.1 Mederváltozások vizsgálata 2011-ig 100
11.7.2.2.2 Mederváltozások értékelése 2011 után 101
11.7.2.3 A Duna meder terepmodellje Dunaföldvár-Fajsz között (Duna 1560,6 - 1500 fkm), valamint a Duna 1519-1529 fkm szelvényei között, a lokális 2D áramlási modell bearányosítása és igazolása 102
11.7.2.3.1 A Duna meder domborzatmodellje és felszínborítottsági jellemzői 102
11.7.2.3.2 2D áramlási modell kalibrálása (bearányosítása) 104
11.7.2.3.3 A 2D áramlási modell validálása (igazolása) 105
11.7.2.4 A Duna víz- és hordalékjárásának vizsgálatához használt észlelési és mérési adatok a Dunaföldvár-Gerjen szakaszon 106
11.7.2.5 A hajózhatóság javítása céljából tervezett folyószabályozási művek építésének és/vagy a kotrások hatásának vizsgálata és minősítése az erőmű hűtővízének biztosítása szempontjából 106
11.7.3 A vizsgált Duna szakasz áramlási és hordalékviszonyainak jellemzése 111
11.7.3.1 Helyszíni áramlási- és hordalék felmérések eredményeinek összegzése 111
11.7.3.1.1 Vízhozam és sebességeloszlás mérések 111
11.7.3.1.2 Lebegtetett hordalék mintavétele és jellemzőinek feldolgozása 123
11.7.3.1.3 Mederanyag mintavétel és jellemzőinek feldolgozása 124
11.7.3.1.4 Vízállás-vízhozam kapcsolat vizsgálata a Duna paksi vízmérce szelvényében 126
11.7.4 A Duna vízhőmérsékletének jelenlegi és várható alakulása 129
11.7.4.1 A Paksi Atomerőmű üzemének mértékadó állapota 129
11.7.4.2 Az éghajlatváltozás várható alakulása 130
11.7.4.3 Az éghajlatváltozás hatása a Duna vízhőmérsékletére 131
11.7.4.3.1 Prognosztizált Duna vízhőmérséklet tartósság-növekedés, a tervezett fejlesztés üzemideje alatt 135
11.7.4.4 A mértékadó hőterhelési állapot meghatározása 137
11.7.4.4.1 Mérési adatok feldolgozása 137
11.7.4.4.2 A tervezett fejlesztés megvalósulása esetén az elkeveredés szempontjából mértékadó állapotok meghatározása 139
11.7.4.4.3 Mértékadó helyzet meghatározása a fejlesztés elmaradása esetén (az üzemidő-hosszabbítás üteme szerint) 140
11.7.4.5 A kiegészítő hűtés évenként átlagosan szükséges időtartamának számítása 140
11.7.4.5.1 Duna vízhőmérséklet meghaladási tartósságok számítása, klimatológiai modell alapján 140
11.7.4.5.2 Kiegészítő hűtés alkalmazása a tervezett fejlesztés megvalósítása esetén 141
11.7.4.5.3 Kiegészítő intézkedési lehetőségek 141
11.7.4.5.4 Jelenlegi helyzet fennmaradása esetén szükséges kiegészítő hűtés 141
11.7.4.5.5 A tervezett fejlesztés megvalósulása esetén szükséges kiegészítő hűtés 141
11.8 Paks II. létesítésének hatása a Dunára 142
11.8.1 Paks II. létesítésének hatása a Duna medrére, a víztest áramlási, valamint hőmérsékleteloszlási jellemzőire 142

11.8.1.1 Paks II. létesítésének általános értékelése 142
11.8.1.2 Paks II. létesítésének hatása a Duna áramlási terére és mederváltozási folyamataira 142
11.8.2 Tisztított kommunális szennyvízkibocsátás 144
11.8.2.1 Az alkalmazott analitikus elkeveredési modell ismertetése 144
11.8.2.2 A felszíni vizekbe történő szennyezőanyag-kibocsátás, figyelembe veendő kibocsátási határértékei és a tisztítatlan (haváriás) szennyvízterhelések felvétele 146
11.8.2.3 Felszín alatti vizek védelme érdekében figyelembe veendő vízminőségi határértékek 146
11.8.2.4 A szennyvíztisztító telep normál üzemelésének elkeveredés-vizsgálata 147
11.8.2.4.1 Elkeveredés-vizsgálat szélsőséges dunai kisvízhozam esetén 147
11.8.2.4.2 Elkeveredés-vizsgálat, a Duna sokéves átlagos vízhozama esetén 150
11.8.2.5 A szennyvíztisztító telep haváriás üzemelésének elkeveredés-vizsgálata 151
11.9 Paks II. üzemelésének hatásai a Dunára 153
11.9.1 A normál üzemelés 153
11.9.1.1 Várható változások leírása az áramlási sebességmező elemzése alapján 153
11.9.1.2 Szélsőséges dunai kis- és nagyvízi áramlási esetek 2D modellvizsgálata a Duna 1500-1530 fkm szakaszán 153
11.9.1.2.1 Szélsőséges nagyvízi 2D áramlási esetek vizsgálati eredményeinek bemutatása a mértékadó üzemi helyzetekben, földcsuszamlással 154
11.9.1.2.1.1 Mértékadó normál üzemelés – Paksi Atomerőmű 154
11.9.1.2.1.2 Mértékadó normál üzemelés, felvízi töltésszakadással – Paksi Atomerőmű 158
11.9.1.2.1.3 Mértékadó normál üzemelés – Paksi Atomerőmű és Paks II. együttes üzeme 161
11.9.1.2.1.4 Mértékadó normál üzemelés, földcsuszamlással – Paksi Atomerőmű és Paks II. együttes üzeme - Havária esemény 162
11.9.1.2.2 Szélsőséges kisvízi esetek 2D modellvizsgálati eredményei 164
11.9.1.2.2.1 Jelen állapot, mértékadó normál üzemelés - Paksi Atomerőmű 164
11.9.1.2.2.2 2030-2032. évek közötti mértékadó normál üzemelés – Paksi Atomerőmű és Paks II. együttesen 168
11.9.1.2.2.3 Mértékadó normál üzemelés földcsuszamlással - Paksi Atomerőmű és Paks II. együttesen - Havária esemény . 169
11.9.1.2.3 Szélsőséges kisvízi és nagyvízi esetek 2D hidrodinamikai hatásainak összefoglaló értékelése (Duna 1500 - 1530 fkm) 170
11.9.1.3 A Duna várható áramlási- és morfodinamikai hatásainak jellemzése 171
11.9.1.3.1 Lokális morfodinamikai hatások és hatásterületek meghatározása, morfodinamikai folyamatok elemzése 171
11.9.1.3.1.1 Mélységintegrált áramlási sebességváltozásra gyakorolt hatások vizsgálata, hatásterületek lehatárolása 171
11.9.1.3.1.2 A Duna sodorvonalának nyomvonal-változására gyakorolt hatások vizsgálata, hatásterületek lehatárolása 175
11.9.1.3.1.3 A Duna vízszinteloszlás-változására gyakorolt hatások vizsgálata, hatásterületek lehatárolása 178
11.9.1.3.1.4 Lokális Duna mederváltozások várható alakulása, a tervezett fejlesztés üzembelépésének hatására 181
11.9.1.3.1.5 Lokális morfodinamikai hatások és hatásterületek meghatározása, morfodinamikai folyamatok értékelése 191
11.9.1.4 A felmelegedett hűtővíz bevezetése a Dunába 192
11.9.1.4.1 Hőcsóvaszámítás eredményei a Duna mértékadó 1 500 m³/s vízhozama esetében 192
11.9.1.4.1.1 A 2014. évi mértékadó állapot bemutatása (Paksi Atomerőmű önállóan) 192
11.9.1.4.1.2 A 2032. évi mértékadó állapot jellemzése (Paksi Atomerőmű + Paks II. együttesen) 195
11.9.1.4.1.3 A 2085. évi mértékadó állapot jellemzése (Paks II. önállóan) 198
11.9.1.4.2 A 30 °C feletti Duna vízhőmérséklettel érintett hatásterület meghatározása, a Duna 1 500 m³/s vízhozama esetén 201
11.9.1.4.3 A számított hőcsóva szintvonalas eloszlása a Déli országhatárig (Duna 1 500 m³/s, Melegvíz 33 °C) 204
11.9.1.4.4 Hőmérséklet eloszlás a Déli országhatár Duna szelvényében (Duna 1433 fkm), a Duna 1 500 m³/s vízhozama esetén 209
11.9.1.4.5 A Duna keresztszelvényeiben számított maximális vízhőmérsékletek hossz-szelvényei, a melegvíz bevezetésétől a déli országhatárig (Duna 1433 fkm), a Duna 1500 m³/s vízhozama esetén 211
11.9.1.4.5.1 Paksi Atomerőmű üzeme - 2014. évi mértékadó állapot 211
11.9.1.4.5.2 Paksi Atomerőmű és Paks II. együttes üzeme - 2032. évi mértékadó állapot 212
11.9.1.4.5.3 Paks II. önálló üzeme - 2085. évi mértékadó állapot 212
11.9.1.5 Tisztított kommunális szennyvíz kibocsátás 213
11.9.2 Üzemzavarok, balesetek, havériák 213
11.9.2.1 Üzemzavarok, balesetek, havériák szélsőséges dunai nagyvízkor 213
11.9.2.1.1 A felvízoldali vízszintszabályozó szerkezetek, extrém földcsuszamlások és jégjelenségek hatásának vizsgálata (1D) 213
11.9.2.1.1.1 A felvízoldali vízszabályozó szerkezetek meghibásodásának hatása 213
11.9.2.1.1.2 A Duna meder változását előidéző magaspart csuszamlások hatásainak vizsgálata 215
11.9.2.1.1.3 Jégdugó kialakulásának prognosztizálása, nagyvízi hatásának vizsgálata áramlási modell alkalmazásával 216
11.9.2.2 Üzemzavarok, balesetek, havériák szélsőséges dunai kisvízkor 218
11.9.2.2.1 Felvízszint-szabályozó műtárgy sérülésének, nem üzemszerű működésének hatása (1D) 218

11.9.2.2.2 Jégtorlasz, jégdugó hatására előálló helyzet hatásai ... 219
11.9.2.2.3 Partfalomlások, partfalcsuszamlások hatásainak értékelésére ... 223
11.10 Paks II. felhagyásakor várható hatások a Dunára ... 224
11.11 Irodalomjegyzék ... 224

ÁBRAJEGYZÉK

11.6.1-1. ábra: A Duna 1519-1530 fkm szakaszának morfológiai modellje - fenékszintek [mBf] – EOV koordinátákkal ... 21
11.6.1-2. ábra: A Duna 1519-1530 fkm szakaszának morfológiai modellje - földcsuszamlást feltételező változat - fenékszintek [mBf] – EOV koordinátákkal ... 22
11.6.1-3. ábra: A Duna 1509-1519 fkm szakaszának morfológiai modellje - fenékszintek [mBf] – EOV koordinátákkal ... 23
11.6.1-4. ábra: A Duna 1500-1509 fkm szakaszának morfológiai modellje - fenékszintek [mBf] – EOV koordinátákkal ... 24
11.6.1-5. ábra: A Duna 1519-1530 fkm szakaszának területhasználati kategóriái – EOV koordinátákkal ... 25
11.6.1-6. ábra: A Duna 1509-1519 fkm szakaszának területhasználati kategóriái – EOV koordinátákkal ... 26
11.6.1-7. ábra: A Duna 1500-1509 fkm szakaszának területhasználati kategóriái – EOV koordinátákkal ... 27
11.6.1-8. ábra: A Duna 1519-1530 fkm szakaszának statikus vízmélységei – nagyvíz (2013. évi árvízi tetőzés) – EOV koordinátákkal ... 29
11.6.1-9. ábra: Az -1509-1519 fkm szakasz statikus vízmélységei – nagyvíz (2013. évi árvízi tetőzés) – EOV koordinátákkal ... 30
11.6.1-10. ábra: A Duna 1500-1509 fkm szakaszának statikus vízmélységei - nagyvíz (2013. évi árvízi tetőzés) – EOV koordinátákkal ... 31
11.6.1-11. ábra: A Duna 1519-1530 fkm szakaszán az áramlási sebességek abszolút értékei eloszlása, kalibráció után, [m/s] dimenzióban (Duna vízhozam: 8 790 m³/s – 2013. évi LNV) – EOV koordinátákkal ... 32
11.6.1-12. ábra: A Duna 1509-1519 fkm szakaszán az áramlási sebességek abszolút értékei eloszlása, kalibráció után, [m/s] dimenzióban (Duna vízhozam: 8 790 m³/s – 2013. évi LNV) – EOV koordinátákkal ... 33
11.6.1-13. ábra: A Duna 1500-1509 fkm szakaszán az áramlási sebességek abszolút értékei eloszlása, kalibráció után, [m/s] dimenzióban (Duna vízhozam: 8 790 m³/s – 2013. évi LNV) – EOV koordinátákkal ... 34
11.6.1-14. ábra: Számított- és mért vízszint hossz-szelvények, a nagyvízi kalibráció után az 1500-1530 fkm Duna szakaszon - a 2013. évi árvízi tetőzés (LNV) mérési adatai alapján ... 35
11.6.1-15. ábra: Számított és mért vízszint hossz-szelvények összehasonlítása a kalibráció után, az 1500-1530 fkm Duna szakaszon - a Duna Bizottsági vízfelszín adatok alapján ... 36
11.6.2-1. ábra: Az elmúlt évtizedek partfal mentén dokumentált csuszamlásos esetei [11-30] ... 39
11.6.3-1. ábra: Felszín közelében kialakuló sebességeloszlás (Duna mért vízhozama 1540 m³/s; hőlépcső 8 °C) – 2014. évi mértékadó állapot ($T_{Duna,max}$=25,61 °C) ... 48
11.6.3-2. ábra: A +500 m-es referencia szelvényben mért és számított relatív áramlási sebességek, a relatív távolság (y/B [-]) függvényében - ahol: B [m] a Duna keresztszelvényének szélessége, $Q_{Duna, mért}$ = 1540 m³/s) ... 49
11.6.3-3. ábra: Hőcsóva, 8°C-os hőlépcső (Duna mért vízhozama 1540 m³/s) – 2014. évi mértékadó állapot ($T_{Duna,max}$=25,61°C) ... 50
11.6.3-4. ábra: A CORMIX modell kalibrálásának eredménye (+500 m; 2013. augusztus) ... 51
11.6.4-1. ábra: A Duna Dunaújvárosnál mért lebegtetett hordalék hozama (1950-2008) és az adatok dekádonkénti kiegyenlítő vonalai ... 55
11.6.4-2. ábra: Az 50. VO szelvényben mért és a teljes keresztszelvényre jellemző számított, átlagos szemeloszlás ... 56
11.6.4-3. ábra: Különböző összefüggésekkel számított egyensúlyi lebegtetett hordalékhozamok a szelvény középsebesség függvényében, dg = 0,64 mm átlagos szemátmérő esetén ... 57
11.6.4-4. ábra: Különböző összefüggésekkel számított egyensúlyi lebegtetett hordalékhozamok a szelvény középsebesség függvényében, dg = 1,86 mm átlagos szemátmérő esetén ... 57
11.6.4-5. ábra: Különböző összefüggésekkel számított egyensúlyi lebegtetett hordalékhozamok a szelvény középsebesség függvényében, dg = 3,79 mm átlagos szemátmérő esetén ... 58
11.6.4-6. ábra: A Delft3D morfodinamikai modell kalibrációja, a Duna 1527 fkm kereszt-szelvényében, 2 700 m³/s Duna vízhozamra ... 65
11.6.4-7. ábra: A Delft3D morfodinamikai modell validációja, a Duna 1527 fkm kereszt-szelvényében, 5 100 m³/s Dunavízhozamra ... 65
11.6.4-8. ábra: A Delft3D morfodinamikai modell kalibrációja, a Duna 1525-1527 fkm hossz-szelvényr mentén, 2 700 m³/s-ra kalibrálva és 5 100 m³/s vízhozamra validálva. ... 66
11.7.1-1. ábra: Duna éves kis-, közép- és nagy-vízhozamok alakulása Domborinál ... 67

11.7.1-2. ábra: Duna éves kis-, közép- és nagy vízszintjeinek alakulása a Duna 1531,3 fkm (Paksi vízmérce) 68
11.7.1-3. ábra: Duna vízhozamok tartóssági diagramja, a Duna Dombori vízmérce szelvényében (Duna 1506,8 fkm)....72
11.7.1-4. ábra: Duna vízszintek tartóssági diagramja, a Duna erőművi szelvényében (1527 fkm) 73
11.7.1-5. ábra: Duna 1531,3 fkm (paksi vízmérce) vízszinttartósságainak jellemzése és a 10 évenkénti változások bemutatása 74
11.7.1-6. ábra: Duna 1531,3 fkm (paksi vízmérce) nagyvízszintjeinek homogenitásvizsgálata és trendje az 1987-2012. évek időszakának éves nagyvízi adatainak feldolgozásával 75
11.7.1-7. ábra: Jégjelenséggel befolyásolt nagyvízszintek (JNV) eloszlásfüggvénye (1968-2012) – Duna 1531,3 fkm....76
11.7.1-8. ábra: Jégmentes nagyvízszintek (NV) eloszlásfüggvénye (1965-2012) – Duna 1531,3 fkm 78
11.7.1-9. ábra: Jégmentes (NV) és jégjelenséggel befolyásolt nagyvízszintek (JNV) éves maximális vízállás idősora és trendje 1876-2013., valamint 1965-2013. évek között – Duna 1531,3 fkm - Paks....79
11.7.1-10. ábra: Duna 1580,6 fkm - Dunaújváros NV (nagy-vízhozam) 1965 - 2012 előrejelzés 2120-ig 83
11.7.1-11. ábra: Duna 1508,6 fkm - Dombori NV (nagy-vízhozam) 1965 - 2012 előrejelzés 2120-ig 84
11.7.1-12. ábra: Duna 1478,7 fkm - Baja NV (nagy-vízhozam) 1965 - 2012 előrejelzés 2120-ig 84
11.7.1-13. ábra: Duna 1531,3 fkm (paksi vízmérce) kisvízszintjeinek homogenitásvizsgálata és trendje az 1987-2012. évek időszakának éves nagyvízi adatainak feldolgozásával 86
11.7.1-14. ábra: Kisvízszintek (KV) eloszlásfüggvénye (1965-2012) – Duna 1531,3 fkm (Paksi vízmérce) 87
11.7.1-15. ábra: Kisvízszintek előrebecslése 2120-ig a Duna Paksi vízmérce szelvényében – logaritmikus kiegyenlítéssel....88
11.7.1-16. ábra: Kisvízszintek előrebecslése 2120-ig a Duna Paksi vízmérce szelvényében – ineáris kiegyenlítéssel 89
11.7.1-17. ábra: Duna 1580,6 fkm - Dunaújvárosi éves kisvízhozam adatok: 1924 – 2012....90
11.7.1-18. ábra: Duna 1506,8 fkm - Dombori éves kisvízhozam adatok: 1936 – 2012. 90
11.7.1-19. ábra: Duna 1478,7 fkm - Bajai éves kisvízhozam adatok: 1930 – 2012....91
11.7.1-20. ábra: Duna 1580,6 fkm - Dunaújváros KV (vízhozam) eloszlásai 1965 - 2012 92
11.7.1-21. ábra: Duna 1506,8 fkm - Dombori KV (vízhozam) eloszlásai 1965 - 2012....92
11.7.1-22. ábra: Duna 1478,7 fkm - Bajai KV (vízhozam) eloszlásai 1965 - 2012 93
11.7.1-23. ábra: Duna 1580,6 fkm - Dunaújváros KV (vízhozam) 1965 - 2012 előrejelzés 2120-ig....95
11.7.1-24. ábra: Duna 1506,8 fkm - Dombori KV (vízhozam) 1965 - 2012 előrejelzés 2120-ig 96
11.7.1-25. ábra: Duna 1478,7 fkm - Baja KV (vízhozam) 1965 - 2012 előrejelzés 2120-ig....96
11.7.2-1. ábra: A Duna 1636 – 1557 fkm szakaszán összesen kotort térfogatok évenkénti alakulását 1997-2013. közötti időszakban 99
11.7.2-2. ábra: Az 1997-2013. időszakra összesített, folyam-kilométerenkénti kotort térfogatok alakulása, 1636 – 1557 fkm között....99
11.7.2-3. ábra: Fajlagos mederváltozás a szelvényekben (1537-1512 fkm) 101
11.7.2-4. ábra: A Duna nagyvízi medrének digitális terepmodellje (részlet)....103
11.7.2-5. ábra: A Duna paksi nagyvízi medrének egyszerűsített borítottság-térképe 103
11.7.2-6. ábra: A River2D modell kalibrálása 1 242 m³/s-os dunai vízhozamnál 104
11.7.2-7. ábra: A River2D modell által számított vízsebességek az atomerőmű hűtővíz-kivételi és bevezetési csatornáinak torkolatai közelében, 1242 m³/s-os dunai vízhozam és 100 m³/s-os hűtővízkivétel és bevezetés mellett....104
11.7.2-8. ábra: A River2D modell validálása 1 400 m³/s-os dunai vízhozamra 105
11.7.2-9. ábra: A River2D modell által számított vízsebességek az atomerőmű hűtővíz-kivételi és melegvíz-bevezetési csatornáinak torkolatai közelében, 1 400 m³/s-os dunai vízhozam és 100 m³/s-os hűtővízkivétel és bevezetés mellett. 105
11.7.2-10. ábra: Tervezett hajóút javító beavatkozások a Paksi Atomerőmű környezetében 107
11.7.2-11. ábra: A Paksi szűkület rendezésének tervezett beavatkozásai 108
11.7.2-12. ábra: Barákai gázló rendezésének tervezett beavatkozásai 109
11.7.2-13. ábra: A tervezett hajózhatósági beavatkozások hatására bekövetkező vízszintváltozások....110
11.7.3-1. ábra: Kis-, közép- és nagyvízi vízfelszín esés mérési eredményei az erőmű térségében - 2012. és 2013. évi helyszíni mérések a Duna 1528 – 1519 fkm szakszán 112
11.7.3-2. ábra: Szelvény-középsebességek alakulása a Duna 1527 fkm szelvényében, kis-, közép- és nagyvízkor - 2012. és 2013. évi helyszíni mérések 114
11.7.3-3. ábra: Szelvény-középsebességek alakulása a Duna 1526 fkm szelvényében, kis-, közép- és nagyvízkor - 2012. és 2013. évi helyszíni mérések 115
11.7.3-4. ábra: Szelvény-középsebességek alakulása a Duna 1525+750 fkm (+500 m-es) referencia szelvényében, kis-, közép- és nagyvízkor - 2012. és 2013. évi helyszíni mérések....115

11.7.3-5. ábra: Szelvény-középsebességek alakulása a Duna 1525+500 fkm szelvényében, kis-, közép- és nagyvízkor - 2012. és 2013. évi helyszíni mérések 116
11.7.3-6. ábra: Szelvény-középsebességek alakulása a Duna 1525+000 fkm szelvényében, kis-, közép- és nagyvízkor - 2012. és 2013. évi helyszíni mérések 116
11.7.3-7. ábra: Szelvény-középsebességek alakulása a Duna 1524+000 fkm szelvényében, kis-, közép- és nagyvízkor - 2012. és 2013. évi helyszíni mérések 117
11.7.3-8. ábra: Szelvény-középsebességek alakulása a Duna 1522+000 fkm szelvényében, kis-, közép- és nagyvízkor - 2012. és 2013. évi helyszíni mérések 118
11.7.3-9. ábra: Szelvény-középsebességek alakulása a Duna 1520+000 fkm szelvényében, kis-, közép- és nagyvízkor - 2012. és 2013. évi helyszíni mérések 119
11.7.3-10. ábra: Áramlási sebességvektorok szelvényenkénti eloszlása a Duna 1528-1519 fkm szakaszán, Q = 1400 m³/s. 120
11.7.3-11. ábra: Áramlási sebességvektorok szelvényenkénti eloszlása a Duna 1528-1519 fkm szakaszán, Q = 2700 m³/s. 121
11.7.3-12. ábra: Áramlási sebességvektorok szelvényenkénti eloszlása a Duna 1528-1519 fkm szakaszán, Q = 5100 m³/s. 122
11.7.3-13. ábra: A Duna mederanyagának és lebegtetett hordalékának összesített szemeloszlási diagrammja, a Duna 1524-1527 fkm szakaszán 125
11.7.3-14. ábra: A jelenleg érvényes vízhozamgörbe a Duna paksi szelvényére az utóbbi évek mérési adataival 127
11.7.3-15. ábra: Vízhozamgörbe sorozat a Duna paksi vízmérce szelvényében 128
11.7.3-16. ábra: Vízhozamgörbe sorozat a Duna paksi vízmérce szelvényében, a Duna kisvízi tartományában 128
11.7.4-1. ábra: A levegő- és a vízhőmérséklet havi átlagainak kapcsolata a Dunára [11-39] 131
11.7.4-2. ábra: A 23 ˚C-ot meghaladó vízhőmérsékletű napok átlagos, éves száma adott érték alatti Duna-vízhozamoknál, 2032-ben – DMI (B2 PRODUCE, $\Delta T_{Föld}$ = 1,8 °C/100 év) és OMSZ (Aladin, $\Delta T_{Föld}$ = 1 °C/100 év) forgatókönyvek 135
11.7.4-3. ábra: A 25 ˚C-ot meghaladó vízhőmérsékletű napok átlagos, éves száma adott érték alatti Duna-vízhozamoknál, 2085-ben – DMI (B2 PRODUCE, $\Delta T_{Föld}$ = 1,8 °C/100 év) és OMSZ (Aladin, $\Delta T_{Föld}$ = 1 °C/100 év) forgatókönyvek 136
11.7.4-4. ábra: A Duna éves legnagyobb és átlagos vízhőmérséklet idősorainak trendvonalai, a Duna 1531,3 fkm szelvényében (1970-2013. évek napi Duna vízhőmérséklet adatai alapján) 137
11.7.4-5. ábra: Lineáris összefüggés a Duna Paksi (1531,3 fkm) és az erőmű (1527 fkm) szelvényben mért vízhőmérsékletek között 138
11.7.4-6. ábra: A Duna vízhőmérsékletének (tD [°C]) évenként várható legnagyobb értéke, a tervezett üzemidő alatt, az erőmű szelvényében 139
11.8.1-1. ábra: Számított mélységintegrált sebességmező a hidegvíz és melegvíz-csatornák torkolatainak környezetében, 2 300 m³/s-os, sokéves átlagos Duna vízhozam és 100 m³/s-os hűtővíz-kivétel esetén – Paksi Atomerőmű önállóan 143
11.8.1-2. ábra: Számított mélységintegrált sebességmező a hidegvíz és melegvíz-csatornák torkolatainak környezetében, 2 300 m³/s-os, sokéves átlagos Duna vízhozam és 100 m³/s-os hűtővíz-kivétel esetén (Paksi Atomerőmű – Paks II. építés alatti állapota) 143
11.9.1-1. ábra: A Duna 1519-1530 fkm szakaszának abszolút áramlási sebesség-eloszlása [m/s] – Paksi Atomerőmű, szélsőséges nagyvíz ($Q_{20\,000év}$ = 14 799 m³/s, vízkivétel 100 m³/s) – Paksi Atomerőmű önállóan – EOV koordinátákkal 155
11.9.1-2. ábra: A Duna 1509-1519 fkm szakaszának abszolút áramlási sebesség-eloszlása [m/s] – Paksi Atomerőmű, szélsőséges nagyvíz ($Q_{20\,000év}$ = 14 799 m³/s, vízkivétel 100 m³/s) – Paksi Atomerőmű önállóan – EOV koordinátákkal 156
11.9.1-3. ábra: A Duna 1500-1509 fkm szakaszának abszolút áramlási sebesség-eloszlása [m/s] – Paksi Atomerőmű, szélsőséges nagyvíz ($Q_{20\,000év}$ = 14 799 m³/s, vízkivétel 100 m³/s) – Paksi Atomerőmű önállóan – EOV koordinátákkal 157
11.9.1-4. ábra: A Duna 1519-1530 fkm szakaszának abszolút áramlási sebesség-eloszlása [m/s] – Paksi Atomerőmű, felvízi töltésszakadással, a kifolyó térfogatáram 1 200 m³/s, szélsőséges nagyvíz ($Q_{20\,000év}$ = 14 799 m³/s, vízkivétel 100 m³/s) – EOV koordinátákkal 158
11.9.1-5. ábra: A Duna 1509-1519 fkm szakaszának abszolút áramlási sebesség-eloszlása [m/s] – Paksi Atomerőmű, felvízi töltésszakadással, a kifolyó térfogatáram 1 200 m³/s, szélsőséges nagyvíz ($Q_{20\,000év}$ = 14 799 m³/s, vízkivétel 100 m³/s) – EOV koordinátákkal 159
11.9.1-6. ábra: A Duna 1500-1509 fkm szakaszának abszolút áramlási sebesség-eloszlása [m/s] – Paksi Atomerőmű, felvízi töltésszakadással, a kifolyó térfogatáram 1 200 m³/s ($Q_{20\,000év}$ = 14 799 m³/s, vízkivétel 100 m³/s) – EOV koordinátákkal 160
11.9.1-7. ábra: A Duna 1519-1530 fkm szakaszának abszolút áramlási sebesség-eloszlása [m/s] – mértékadó normál üzemelés, szélsőséges nagyvíz ($Q_{20\,000év}$ = 14 799 m³/s, vízkivétel 232 m³/s) – Paksi Atomerőmű és Paks II. együttesen – EOV koordinátákkal 161

11.9.1-8. ábra: A Duna 1519-1530 fkm szakaszának abszolút áramlási sebesség-eloszlása [m/s] –mértékadó normál üzemelés földcsuszamlással, szélsőséges nagyvíz ($Q_{20\ 000év}$ = 14 799 m³/s, vízkivétel 232 m³/s) – Paksi Atomerőmű és Paks II. együttesen – EOV koordinátákkal 162
11.9.1-9. ábra: Számított vízfelszín felületek sodorvonali metszeteinek (egydimenziós felszíngörbe a sodor mentén) összehasonlítása (Duna 1500-1530 fkm), a vizsgált szélsőséges (Q = 14799 m³/s) árvízi esetekben (Paksi Atomerőmű üzeme, Paksi Atomerőmű üzeme töltésszakadással, Paksi Atomerőmű és Paks II. együttesen: mértékadó üzemi állapot és havária) 163
11.9.1-10. ábra: A Duna 96,90 mBf esetén kialakuló statikus elöntési képe....163
11.9.1-11. ábra: A Duna 96,30 mBf esetén kialakuló statikus elöntési képe....164
11.9.1-12. ábra: A Duna 1519-1530 fkm szakaszának abszolút áramlási sebesség-eloszlása [m/s] – Paksi Atomerőmű önállóan, szélsőséges kisvíz ($Q_{20\ 000év}$ = 579 m³/s, vízkivétel 100 m³/s) – EOV koordinátákkal 165
11.9.1-13. ábra: A Duna 1509-1519 fkm szakaszának abszolút áramlási sebesség-eloszlása [m/s] – Paksi Atomerőmű önállóan, szélsőséges kisvíz ($Q_{20\ 000év}$ = 579 m³/s, vízkivétel 100 m³/s) – EOV koordinátákkal 166
11.9.1-14. ábra: A Duna 1500-1509 fkm szakaszának abszolút áramlási sebesség-eloszlása [m/s] – Paksi Atomerőmű önállóan, szélsőséges kisvíz ($Q_{20\ 000év}$ = 579 m³/s, vízkivétel 100 m³/s) – EOV koordinátákkal....167
11.9.1-15. ábra: A Duna 1519-1530 fkm szakaszának abszolút áramlási sebesség-eloszlása [m/s] – mértékadó üzemi állapot, szélsőséges kisvíz ($Q_{20\ 000év}$ = 579 m³/s, vízkivétel 232 m³/s) – Paksi Atomerőmű és Paks II. együttesen – EOV koordinátákkal 168
11.9.1-16. ábra: A Duna 1519-1530 fkm szakaszának abszolút áramlási sebesség-eloszlása [m/s] –mértékadó üzemi állapot földcsuszamlással, szélsőséges kisvíz ($Q_{20\ 000év}$ = 579 m³/s, vízkivétel 232 m³/s) – Paksi Atomerőmű és Paks II. együttesen – EOV koordinátákkal....169
11.9.1-17. ábra: Számított vízfelszín felületek sodorvonali metszeteinek (egydimenziós felszíngörbe a sodor mentén) összehasonlítása (Duna 1500-1530 fkm), a vizsgált szélsőséges kisvízi (Q = 579 m³/s) esetekben (Paksi Atomerőmű üzeme, Paksi Atomerőmű és Paks II. együttes üzeme: mértékadó üzemi állapot és havária) 170
11.9.1-18. ábra: Számított Duna sebességváltozási hatásterület (± 0,2 m/s sebességváltozás feletti terület), Paksi Atomerőmű üzeméhez viszonyított vízsebesség eltérések, az üzemelés kezdetén, 2 300 m³/s-os dunai hozam (átlagos hidrológiai év) esetén (2030-2032.), Paksi Atomerőmű és Paks II. együttesen – (minusz Paksi Atomerőmű)...172
11.9.1-19. ábra: Számított Duna sebességváltozási hatásterület (± 0,2 m/s sebességváltozás feletti terület), Paksi Atomerőmű üzeméhez viszonyított vízsebesség eltérések, az üzemelés kezdetén, 3 000 m³/s-os dunai hozam (nedves hidrológiai év) esetén (2030-2032.), Paksi Atomerőmű és Paks II. együttesen - (minusz) Paksi Atomerőmű ...173
11.9.1-20. ábra: Számított Duna sebességváltozási hatásterület (± 0,2 m/s sebességváltozás feletti terület), Paksi Atomerőmű üzeméhez viszonyított vízsebességeltérések, az üzemelés kezdetén, 2 300 m³/s-os dunai hozam (átlagos hidrológiai év) esetén (2030-2032.), Paks II. önállóan - (minusz) Paksi Atomerőmű....174
11.9.1-21. ábra: Számított Duna sebességváltozási hatásterület (± 0,2 m/s sebességváltozás feletti terület), a Paksi Atomerőmű üzeméhez viszonyított vízsebesség eltérések, az üzemelés kezdetén, 3 000 m³/s-os dunai hozam (nedves hidrológiai év) esetén (2030-2032.), Paks II. önállóan - (minusz) Paksi Atomerőmű....175
11.9.1-22. ábra: Számított Duna sodorvonalak alakulása az üzemelés kezdetén, 2 300 m³/s-os dunai hozam (átlagos hidrológiai év) esetén (2030-2032.), három üzemi időszakban: Paksi Atomerőmű önállóan, Paksi Atomerőmű és Paks II. együtt, Paks II. önállóan....176
11.9.1-23. ábra: Számított Duna sodorvonalak alakulása az üzemelés kezdetén, 3 000 m³/s-os dunai hozam (nedves hidrológiai év) esetén (2030-2032.), három üzemi időszakban: Paksi Atomerőmű önállóan, Paksi Atomerőmű és Paks II. együtt, Paks II. önállóan....177
11.9.1-24. ábra: Számított Duna vízszint változási hatásterület (± 2 cm vízszintváltozás feletti terület), Paksi Atomerőmű üzeméhez (2014. évhez) viszonyított vízszintelt érések, az üzemelés kezdetén, 2 300 m³/s-os dunai hozam (átlagos hidrológiai év) esetén (2030-2032.), Paksi Atomerőmű. és Paks II. együttesen - (minusz) Paksi Atomerőmű....179
11.9.1-25. ábra: Számított Duna vízszint változási hatásterület (± 2 cm vízszintváltozás feletti terület), Paksi Atomerőmű üzeméhez (2014. évhez) viszonyított vízszint eltérések, az üzemelés kezdetén, 2 300 m³/s-os dunai hozam (átlagos hidrológiai év) esetén (2030-2032.), Paks II. önállóan - (minusz) Paksi Atomerőmű....180
11.9.1-26. ábra: Számított Duna mederváltozások 5 év üzemelés után, 2 300 m³/s-os dunai hozam (átlagos hidrológiai év) és 100 m³/s-os hűtővíz-kivétel esetén (2014-2025. év közötti állapot) – Paksi Atomerőmű önállóan 182
11.9.1-27. ábra: Számított Duna mederváltozások 5 év üzemelés után, 3 000 m³/s-os dunai hozam (átlagosnál lényegesen nedvesebb hidrológiai év) és 100 m³/s-os hűtővíz-kivétel esetén (2014-2025. év közötti állapot) – Paksi Atomerőmű önállóan....183
11.9.1-28. ábra: Számított Duna mederváltozások 5 év üzemelés után, 2 300 m³/s-os dunai hozam (átlagos hidrológiai év) és 100 m³/s-os hűtővíz-kivétel esetén (2030-2032. év közötti állapot) – Paksi Atomerőmű és Paks II. együttesen.....184

11.9.1-29. ábra: Számított Duna mederváltozások 5 év üzemelés után, 3 000 m³/s-os dunai hozam (átlagosnál lényegesen nedvesebb hidrológiai év) és 100 m³/s-os hűtővíz-kivétel esetén (2030-2032. év közötti állapot) – Paksi Atomerőmű és Paks II. együttesen 185
11.9.1-30. ábra: Számított Duna mederváltozások 5 év üzemelés után, 2 300 m³/s-os dunai hozam (átlagos hidrológiai év) és 100 m³/s-os hűtővíz-kivétel esetén (2037-2085. év közötti állapot) – Paks II. önállóan 186
11.9.1-31. ábra: Számított Duna mederváltozások 5 év üzemelés után, 3 000 m³/s-os dunai hozam (átlagosnál lényegesen nedvesebb hidrológiai év) és 100 m³/s-os hűtővíz-kivétel esetén (2037-2085. év közötti állapot) – Paks II. önállóan 187
11.9.1-32. ábra: Számított Duna mederfenékszint-változás az (A) ponban 5 év üzemelés után, átlagos és az álagosnál lényegesen nedvesebb hidrológiai év esetén, 100 m³/s-os hűtővíz-kivétellel (2014-2025) – Paksi Atomerőmű önállóan 188
11.9.1-33. ábra: Számított Duna mederfenékszint-változás a (B) ponban 5 év üzemelés után, átlagos és az álagosnál lényegesen nedvesebb hidrológiai év esetén, 100 m³/s-os hűtővíz-kivétellel (2014-2025) – Paksi Atomerőmű önállóan 188
11.9.1-34. ábra: Számított Duna mederfenékszint-változás az (A) ponban 5 év üzemelés után, átlagos és az álagosnál lényegesen nedvesebb hidrológiai év esetén, 232 m³/s-os hűtővíz-kivétellel (2030-2032) – Paksi Atomerőmű.és Paks II. együttesen 189
11.9.1-35. ábra: Számított Duna mederfenékszint-változás a (B) ponban 5 év üzemelés után, átlagos és az álagosnál lényegesen nedvesebb hidrológiai év esetén, 232 m³/s-os hűtővíz-kivétellel (2030-2032) – Paksi Atomerőmű és Paks II. együttesen 189
11.9.1-36. ábra: Számított Duna mederfenékszint-változás az (A) ponban 5 év üzemelés után, átlagos és az álagosnál lényegesen nedvesebb hidrológiai év esetén, 132 m³/s-os hűtővíz-kivétellel (2037-2085) – Paks II. önállóan 190
11.9.1-37. ábra: Számított Duna mederfenékszint-változás az (A) ponban 5 év üzemelés után, átlagos és az álagosnál lényegesen nedvesebb hidrológiai év esetén, 132 m³/s-os hűtővíz-kivétellel (2037-2085) – Paks II. önállóan 190
11.9.1-38. ábra: A felszín közelében kialakuló sebességeloszlás (hőlépcső 8 °C) – 2014. évi mértékadó állapot ($T_{Duna,max}$=25,61 °C) – Paksi Atomerőmű önállóan 192
11.9.1-39. ábra: Hőcsóva, 8°C-os hőlépcső – 2014. évi mértékadó állapot ($T_{Duna,max}$=25,61 °C) – Paksi Atomerőmű önállóan 193
11.9.1-40. ábra: Hőmérséklet eloszlás áramvonalakkal (8°C-os hőlépcső) – 2014. évi mértékadó állapot ($T_{Duna,max}$=25,61 °C) – Paksi Atomerőmű önállóan 194
11.9.1-41. ábra: Hőmérséklet változása kereszt- és hosszirányban – 2014. évi mértékadó állapot ($T_{Duna,max}$=25,61 °C; Duna vízhozam 1 500 m³/s) – Paksi Atomerőmű önállóan 194
11.9.1-42. ábra: Felszín közelében kialakuló sebességeloszlás (melegvíz 33 °C) –2032. évi mértékadó állapot ($T_{Duna,max}$=26,38 °C, Duna vízhozam = 1 500 m³/s) – Paksi Atomerőmű + Paks II. együttesen 195
11.9.1-43. ábra: Hőcsóva, 33 °C-os melegvízkibocsátás esetén –2032. évi mértékadó állapot ($T_{Duna,max}$=26,38 °C, Duna vízhozam = 1 500 m³/s) – Paksi Atomerőmű + Paks II. együttesen 196
11.9.1-44. ábra: Hőcsóva áramlási viszonyai, áramvonalak és hőmérséklet (melegvíz: 33°C) –2032. évi mértékadó állapot ($T_{Duna,max}$=26,38 °C, Duna vízhozam = 1 500 m³/s) – Paksi Atomerőmű + Paks II. együttesen 196
11.9.1-45. ábra: Hőmérséklet változása kereszt- és hosszirányban - 2032-es mértékadó állapot ($T_{Duna,max}$=26,38 °C) – Paksi Atomerőmű + Paks II. együttesen 197
11.9.1-46. ábra: Felszín közelében kialakuló sebesség eloszlás (melegvíz 33 °C) – 2085. évi mértékadó állapot ($T_{Duna,max}$=28,64 °C, Duna vízhozam 1 500 m³/s) – Paks II. önállóan 199
11.9.1-47. ábra: Hőcsóva, 33°C-os melegvízkibocsátás esetén – 2085. évi mértékadó állapot ($T_{Duna,max}$=28,64 °C, Duna vízhozam = 1 500 m³/s) – Paks II. önállóan 200
11.9.1-48. ábra: Hőcsóva áramlási viszonyai, sebességirányok és hőmérséklet (melegvíz: 33 °C) – 2085-ös mértékadó állapot ($T_{Duna,max}$=28,64 °C, Duna vízhozam = 1 500 m³/s) – Paks II. önállóan 200
11.9.1-49. ábra: Hőmérséklet változása hosszirányban – 2085-ös mértékadó állapot ($T_{Duna,max}$ =28,64 °C, Duna vízhozam = 1 500 m³/s) – Paks II. önállóan 201
11.9.1-50. ábra: A hőcsóva számított, 30 °C feletti hatásterülete – 2014. évi mértékadó állapot ($T_{Duna,max}$=25,61 °C, Q_{Duna}= 1 500 m³/s, melegvíz hozam: 100 m³/s) – Paksi Atomerőmű önállóan 202
11.9.1-51. ábra: A hőcsóva számított, 30 °C feletti hatásterülete – 2032. évi mértékadó állapot ($T_{Duna,max}$=26,38 °C, Q_{Duna}= 1 500 m³/s, melegvíz hozam: 100 ³/s + 132 m³/s) – Paksi Atomerőmű + Paks II. együttesen 203
11.9.1-52. ábra: A hőcsóva számított, 30 °C feletti hatásterülete – 2085. évi mértékadó állapot ($T_{Duna,max}$=28,64 °C, Q_{Duna}= 1 500 m³/s, melegvíz hozam: 132 m³/s) – Paks II. önállóan 204
11.9.1-53. ábra: A 2014., a 2032. és 2085. évi mértékadó helyzetekben a hőcsóva szintvonalas eloszlása (Duna 1507 – 1526 fkm között) – Paksi Atomerőmű; Paksi Atomerőmű + Paks II. együttesen; Paks II. önállóan 205
11.9.1-54. ábra: A 2014., a 2032. és 2085. évi mértékadó helyzetekben a hőcsóva szintvonalas eloszlása (Duna 1488 – 1507 fkm között) – Paksi Atomerőmű; Paksi Atomerőmű + Paks II. együttesen; Paks II. önállóan 206

11.9.1-55. ábra: A 2014., a 2032. és 2085. évi mértékadó helyzetekben a hőcsóva szintvonalas eloszlása (Duna 1488 – 1461 fkm között) – Paksi Atomerőmű; Paksi Atomerőmű + Paks II. együttesen; Paks II. önállóan 207
11.9.1-56. ábra: A 2014., a 2032. és 2085. évi mértékadó helyzetekben a hőcsóva szintvonalas eloszlása (Duna 1436 – 1461 fkm között – Paksi Atomerőmű; Paksi Atomerőmű + Paks II. együttesen; Paks II. önállóan 208
11.9.1-57. ábra: Hőmérséklet-eloszlás a Duna Déli országhatár szelvényében (Duna 1433 fkm), $T_{Melegvíz}$ = 33 °C (2014., 2032. és 2085. évi mértékadó állapot) 209
11.9.1-58. ábra: Hőmérséklet-eloszlás a Duna Déli országhatár szelvényében (Duna 1433 fkm), $\Delta T_{Hőlépcső}$ = 8 °C (Paksi Atomerőmű, Paksi Atomerőmű és Paks II. együtt, Paks II. önállóan(2014., 2032. és 2085. évi mértékadó állapot) 210
11.9.1-59. ábra: A hőcsóva hőmérsékleti maximumainak hossz-szelvénye (Duna 1525,75 – 1433,00 fkm, Q_{Duna} = 1 500 m³/s), $T_{Melegvíz}$ = 33°C és 8°C-os hőlépcső (2014. évi mértékadó állapot) – Paksi Atomerőmű önállóan 211
11.9.1-60. ábra: A hőcsóva hőmérsékleti maximumainak hossz-szelvénye (Duna 1525,75 – 1433,00 fkm, Q_{Duna} = 1 500 m³/s), $T_{Melegvíz}$ = 33 °C (2032. évi mértékadó állapot) – Paksi Atomerőmű és Paks II. együttesen 212
11.9.1-61. ábra: A hőcsóva hőmérsékleti maximumainak hossz-szelvénye (Duna 1525,75 – 1433,00 fkm, Q_{Duna} = 1 500 m³/s), $T_{Melegvíz}$ = 33°C (2085. évi mértékadó állapot) – Paks II. önállóan 212
11.9.2-1. ábra: Az 1954-es árhullám levonulásának hatására a Paksi Atomerőmű környezetében (Duna, 1526,5 fkm) kialakuló vízszintek időbeli alakulása 214
11.9.2-2. ábra: Az 1965-ös árhullám levonulásának hatására a Paksi Atomerőmű környezetében (Duna, 1526,5 fkm) kialakuló vízszintek időbeli alakulása 214
11.9.2-3. ábra: A felszorzott budapesti 1926-os árhullám paksi levonulási vízszintjei földcsuszamlások esetén 216
11.9.2-4. ábra: A legkedvezőtlenebb jeges nagyvízszintek alakulása a Paksi Atomerőmű környezetében (Duna, 1526,5 fkm), az 1956-os mértékadó helyzethez képesti extra jégdugóval a melegvíz-csatorna alatti Duna szakaszon 217
11.9.2-5. ábra: A Dunacsúnyi / Bősi duzzasztómű 20 000 évente visszatérő kisvízi időszakban történő, alternatívákkal jellemzett vízvisszatartásának hatása a Paksi Atomerőmű vízkivételének biztonságára (Duna, 1526,5 fkm) 218
11.9.2-6. ábra: Vízszint- és vízhozam változás a 93,0 mBf magas torlasz felvízén 220
11.9.2-7. ábra: Vízszint- és vízhozam változás a 93,0 mBf magas torlasz alvízén 220
11.9.2-8. ábra: Vízszintek tartóssága a 93,0 mBf magas torlasz alvízén 221
11.9.2-9. ábra: Vízszint- és vízhozam változás a 88,0 mBf magas torlasz felvízén 221
11.9.2-10. ábra: Vízszint- és vízhozam változás a 88,0 mBf magas torlasz alvízén 222
11.9.2-11. ábra: Vízszint- és vízhozam változás a 88,0 mBf magas torlasz alvízén 222
11.9.2-12. ábra: 579 m³/s vízhozam vízfelszín-görbéje partfalomlás esetén 223

TÁBLÁZATJEGYZÉK

11.4-1. táblázat: A dunai modellezések szempontjából mértékadó üzemállapotok és időpontok 16
11.6.1-1. táblázat: Modellezett folyószakasz – a Duna mért felszíngörbéje, a 2013. évi júniusi, eddig előfordult legnagyobb jégmentes árvíz (LNV) idején 28
11.6.1-2. táblázat: Területhasználati kategóriák medersimasági tényezőinek tartománya és kalibrált értékei tartományai 29
11.6.1-3. táblázat: Modellezett folyószakasz – DB hossz-szelvény: modellezési alapadatok 36
11.6.2-1. táblázat: Mért és a bearányosítás során számított vízszintek 41
11.6.2-2. táblázat: Manning féle simasági együttható 41
11.6.2-3. táblázat: A dunacsúnyi duzzasztómű nem-üzemszerű működtetése esetén vizsgált depressziós hullámok jellemzői, különböző vízvisszatartási (tározótöltési) stratégiák mellett 42
11.6.3-1. táblázat: Melegvíz kibocsátás alakulása a jelen állapot fennmaradása esetén 44
11.6.3-2. táblázat: Melegvíz kibocsátás (Q m³/s) alakulása a tervezett fejlesztés megvalósulása esetén, a Duna várható évi legnagyobb vízhőmérsékletével (T_{Duna}, °C) a mértékadó üzemi időpontokban 45
11.6.4-1. táblázat: A hordalék anyagának szemcseméret osztályozása (Amerikai Geofizikai Unió alapján) 53
11.6.4-2. táblázat: A Duna mederanyagának és lebegtetett hordalékának összesített szemeloszlása, a Duna 1524-1527 fkm szakaszán, a Duna vízhozamának függvényében 55
11.6.4-3. táblázat: Éves kisvízszintjeinek várható időbeli alakulása, a trend hosszabbítása alapján (Paksi vízmérce - Duna 1531,3 fkm) 64
11.7.1-1. táblázat: Az éves kis-, közép- és nagy-vízszintek éves átlagos változása 67
11.7.1-2. táblázat: A Duna vízhozamainak tartóssági adatai (1965–2012), a Duna 1506,8 fkm, Dombori vízmérce szelvényében 71
11.7.1-3. táblázat: A Duna vízszint tartóssági adatai (1965–2012), a Duna erőművi szelvényében (1527 fkm) 72

11.7.1-4. táblázat: Árvízvédelmi fokozatok elrendelési vízállásai a Duna bajai és paksi vízmércéin 73
11.7.1-5. táblázat: Árvízvédelmi fokozatok jellemző vízszintjei a Paksi- és az Erőművi vízmércén 75
11.7.1-6. táblázat: A 2013. évi legmagasabban tetőző jégmentes árhullám és a mértékadó árvízszintek (MÁSZ) alakulása az erőmű és a tervezett fejlesztés környezetében 80
11.7.1-7. táblázat: Árvízi elöntéssel veszélyeztetett, főbb objektumok, árvízvédelmi fokozatok a Paksi Atomerőmű területén 80
11.7.1-8. táblázat: Jellemző szintek a Paksi Atomerőmű környezetében és az árvízvédelmi elrendelési fokozatok 81
11.7.1-9. táblázat: Mértékadó jégmentes nagyvízi Duna vízhozamok (Dunaújváros) 81
11.7.1-10. táblázat: Mértékadó jégmentes nagyvízi Duna vízhozamok (Dombori) 82
11.7.1-11. táblázat: Mértékadó jégmentes nagyvízi Duna vízhozamok (Baja) 82
11.7.1-12. táblázat: Mértékadó jégmentes nagyvízi Duna vízhozamok (Pozsony) 82
11.7.1-13. táblázat: Mértékadó jégmentes nagyvízi Duna vízhozamok (Budapest) 83
11.7.1-14. táblázat: Dunai nagyvízhozamok előrejelzése 2120-ig (Dunaújváros, Dombori és Baja) 85
11.7.1-15. táblázat: A hűtővízkivétel környezetében vizsgált vízrajzi mérőállomások számított mértékadó kisvízhozamai, eloszlásfüggvények illesztésével 94
11.7.1-16. táblázat: A hidrodinamikai modellvizsgálatokhoz meghatározott mértékadó kisvízhozamok, eloszlásfüggvények illesztésével 94
11.7.1-17. táblázat: Dunai kisvízhozamok előrejelzése 2120-ig (Dunaújváros, Dombori és Baja) 97
11.7.2-1. táblázat: A kotrási térfogatok időbeli (évenkénti) és Duna folyam kilóméterenkénti (fkm) alakulása 1997-től napjainkig [ezer m³/fkm] 98
11.7.2-2. táblázat: A Duna Budapest-déli országhatár közötti főállomások adatai 106
11.7.3-1. táblázat: A 2012. és 2013. évi helyszíni, kis-, közép- és nagyvízi vízhozammérések eredményei a Paksi vízmérce szelvényben (Duna 1531,3 fkm) 112
11.7.3-2. táblázat: Kis-, közép- és nagyvízi átlagos vízfelszín esés - 2012. és 2013. évi helyszíni mérések a Duna 1528 – 1519 fkm szakaszán 113
11.7.3-3. táblázat: Kis-, közép- és nagyvízi mérések alapján számított jellemző hidraulikai paraméterek - 2012. és 2013. évi helyszíni mérések 113
11.7.3-4. táblázat: Hidraulikai jellemzők alakulása a 2012-2013. évi lebegtetett hordalékmintavételezéskor, kis-, közép- és nagyvízi helyzetben, a Duna 1531,3 fkm (paksi vízmérce) szelvényében 123
11.7.3-5. táblázat: Kisvízi lebegtetett hordalék koncentráció és hordalékhozamok, a Duna 1524-1527 fkm szelvényeiben 123
11.7.3-6. táblázat: Középvízi lebegtetett hordalék koncentráció és hordalékhozamok, a Duna 1524-1527 fkm szelvényeiben 123
11.7.3-7. táblázat: Nagyvízi lebegtetett hordalék koncentráció és hordalékhozamok, a Duna 1524-1527 fkm szelvényeiben 124
11.7.3-8. táblázat: A Duna mederanyagának és lebegtetett hordalékának összesített szemeloszlása, a Duna 1524-1527 fkm szakaszán 126
11.7.4-1. táblázat: Melegvíz kibocsátás (Q m³/s) alakulása a jelen állapot fennmaradása esetén 129
11.7.4-2. táblázat: Adott (T) hőmérsékletet meghaladó és adott (Q) Duna vízhozamot alulmúló napok átlagos száma évenként (és %-osan), 2032. és 2085. évben 130
11.7.4-3. táblázat: Adott (T) hőmérsékletet meghaladó és adott (Q) Duna vízhozamot alulmúló napok átlagos száma évenként, 2032. évben – DMI (B2 PRODUCE, $\Delta T_{Föld}$ = 1,8 °C, 2000 és 2100 között) 132
11.7.4-4. táblázat: Adott (T) hőmérsékletet meghaladó és adott (Q) Duna vízhozamot alulmúló napok átlagos száma évenként, 2085. évben – DMI (B2 PRODUCE, $\Delta T_{Föld}$ = 1,8 °C, 2000 és 2100 között) 133
11.7.4-5. táblázat: Átlagos havi vízhőfokok változása a jelenhez képest (átlag: éves átlagos változás, max: éves maximális változás) – DMI (B2 PRODUCE, $\Delta T_{Föld}$ = 1,8 °C, 2000 és 2100 között) 134
11.7.4-6. táblázat: Átlagos havi vízhőfokok változása a jelenhez képest (átlag: éves átlagos változás, max: éves maximális változás) – OMSZ(Aladin, $\Delta T_{Föld}$ = 1 °C, 2000 és 2100 között) 134
11.7.4-7. táblázat: A Duna 23 és 25 °C vízhőmérsékletét meghaladó évenkénti napok száma (tartóssága [nap/év]) alakulása – DMI (B2 PRODUCE projekt) forgatókönyv szerint 136
11.7.4-8. táblázat: Melegvíz kibocsátás (Q m³/s) alakulása a tervezett fejlesztés megvalósulása esetén, a Duna várható évi legnagyobb vízhőmérsékletével (T_{Duna}, °C) a mértékadó időpontokban 140
11.7.4-9. táblázat: Melegvíz kibocsátás (Q m³/s) alakulása a tervezett fejlesztés elmaradása esetén, a Duna várható évi legnagyobb vízhőmérsékletével (T_{Duna}, °C) a mértékadó időpontokban 140
11.7.4-10. táblázat: A Duna adott vízhőmérséklet feletti vízhőmérséklet tartományának tartóssága (egész napokra kerekített értéke) a mértékadó hatású időpontokban – DMI (B2 PRODUCE projekt) forgatókönyv szerint 141
11.8.2-1. táblázat: Nyers és tisztított szennyvíz minőségi paraméterei 146
11.8.2-2. táblázat: Felszín alatti vízre figyelembe veendő vízminőségi határértékek a 6/2009 (IV. 14) KvVM-EüM-FVM együttes rendelet szerint 147

11.8.2-3. táblázat: Az elvezetett tisztított szennyvízre előírt vízminőségi határértékek....148
11.8.2-4. táblázat: Számított koncentráció növekmény normál üzemmód esetén a V4 szelvényben....148
11.8.2-5. táblázat: Számított hosszmenti koncentráció növekmény normál üzemmód esetén, Duna vízhozam 579 m^3/s (20 000 évente visszatérő szélsőséges kisvízhozam)....149
11.8.2-6. táblázat: Számított hosszmenti koncentráció növekmény normál üzemmód esetén, Duna vízhozam 579 m^3/s (20 000 évente visszatérő szélsőséges kisvízhozam)....149
11.8.2-7. táblázat: Számított hosszmenti koncentráció növekmény normál üzemmód esetén, Duna vízhozam 2300 m^3/s (sokéves átlagos Duna vízhozam)....150
11.8.2-8. táblázat: Számított hosszmenti koncentráció növekmény normál üzemmód esetén, Duna vízhozam 2300 m^3/s (sokéves átlagos Duna vízhozam)....150
11.8.2-9. táblázat: Hosszmenti koncentráció növekmény havária esetén, Duna vízhozam 579 m^3/s....151
11.8.2-10. táblázat: Hosszmenti koncentráció növekmény havária esetén, Duna vízhozam 579 m^3/s....151
11.8.2-11. táblázat: Hosszmenti koncentráció növekmény havária esetén, Duna vízhozam 2 300 m^3/s....152
11.8.2-12. táblázat: Hosszmenti koncentráció növekmény havária esetén, Duna vízhozam 2 300 m^3/s....152
11.9.1-1. táblázat: Mederváltozási hatások összefoglalása, a Dunameder (A) és (B) pontjában számított mederfenékszintek időbeli alakulása, jelen állapothoz visznyított változása alapján, a mértékadó üzemállapotok időszakában....191
11.9.1-2. táblázat: Morfodinamikai- és áramlási hatásterület meghatározása, a tervezett fejlesztés megvalósulása esetén, a jelen állapothoz képest....191
11.9.1-3. táblázat: Jelentősebb morfodinamikai- és áramlási hatásterület lehatárolása, a tervezett fejlesztés megvalósulása esetén, a jelen állapothoz képest....192
11.9.1-4. táblázat: A határértéktúllépés időtartama, tartóssága (2032.) – Paksi Atomerőmű + Paks II. 198
11.9.1-5. táblázat: A határérték túllépés időtartama, tartóssága (2085) – Paks II. önállóan 198
11.9.1-6. táblázat: A legnagyobb hőmérséklet-változás mértéke a Duna Déli országhatár szelvényében, $T_{Melegvíz}$ = 33 °C (2014., 2032. és 2085. évi mértékadó állapot)....210
11.9.1-7. táblázat: A legnagyobb hőmérséklet-változás mértéke a Duna Déli országhatár szelvényében, $\Delta T_{Hőlépcső}$ = 8 °C (2014., 2032. és 2085. évi mértékadó állapot)....211
11.9.2-1. táblázat: Az erőmű környezetének legkedvezőtlenebb szintű (96,30 mBf) árvízi elöntése esetén meghatározott, néhány fontosabb védelmi szint túllépésének várható időtartama....215

RÖVIDÍTÉSJEGYZÉK

Rövid név	Teljes név
BM	Belügyminisztérium
BME	Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
DB 2004.	Duna Bizottság által elfogadott hajózási kisvízszint (Duna, 2004.)
DDT-KTVF	Dél-dunántúli Környezetvédelmi, Természetvédelmi és Vízügyi Felügyelőség
DDNPI	Duna-Dráva Nemzeti Park Igazgatóság
DMI	Dán Meteorológiai Intézet
EKD	Előzetes Konzultációs Dokumentum
ERBE	MVM ERBE ENERGETIKA Mérnökiroda Zártkörűen Működő Részvénytársaság MVM ERBE Zrt.
fkm	folyamkilométer
HEC	Amerikai Hadmérnöki Kar és az Amerikai Vízkészletgazdálkodási Intézet mérnökeiből létrehozott Hidrológiai Mérnöki Központ
HEC-RAS	A HEC által fejlesztett egydimenziós (1D) numerikus hidrodinamikai és morfodinamikai modell
JKV	Jégjelenséggel befolyásolt éves kisvízszintek, illetve éves kisízi vízállások
JNV	Jégjelenséggel befolyásolt éves nagyvízszintek, illetve éves nagyvízi vízállások
KHV - KHT	Környezeti hatásvizsgálat - Környezeti hatástanulmány
KHVM	Közlekedési, Hírközlési és Vízügyi Minisztérium
KöM	Környezetvédelmi Minisztérium
KPM	Közlekedési és Postaügyi Minisztérium
KV	Jégjelenséggel nem befolyásolt éves kisvízszintek, illetve éves kisvízi vízállások
KvVM	Környezetvédelmi és Vízügyi Minisztérium
LKV	Legkisebb vízállás, illetve vízszint
LNV	Legnagyobb vízállás, illetve vízszint
MÁSZ	Mértékadó árvízszint
MBFH	Magyar Bányászati és Földtani Hivatal
MVM	MVM Magyar Villamos Művek Zártkörűen Működő Részvénytársaság
MVM Paks II. Zrt.	MVM Paks II. Atomerőműfejlesztő Zártkörűen Működő Részvénytársaság
MVSZ'84	1984. évben elfogadott mértékadó kisvízszintek
NBSz	Nukleáris Biztonsági Szabályzatok
NV	Jégjelenséggel nem befolyásolt éves nagyvízszintek, illetve éves nagyvízi vízállások
OMSz	Országos Meteorológiai Szolgálat
OVF	Országos Vízügyi Főigazgatóság
OVH	Országos Vízügyi Hivatal
ÖTM	Önkormányzati és Területfejlesztési Minisztérium
Paksi Atomerőmű	MVM Paksi Atomerőmű Zártkörűen Működő Részvénytársaság MVM Paksi Atomerőmű Zrt.
TIR	Természetvédelmi Információs Rendszer
VÁTI	VÁTI Magyar Regionális Fejlesztési és Urbanisztikai Nonprofit Kft
VBJ	Végleges Biztonsági Jelentés
VM	Vidékfejlesztési Minisztérium
VO	vízrajzi osztály

11 A DUNA MEDERMORFOLÓGIÁJÁNAK ÉS A DUNA HŐTERHELÉSÉNEK MODELLEZÉSE

11.1 JOGSZABÁLYI HÁTTÉR

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

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

220/004. (VII. 21.) Korm. rendelet a felszíni vizek minősége védelmének szabályairól

221/2004. (VII. 21.) Korm. rendelet a vízgyűjtő-gazdálkodás egyes szabályairól

123/1997. (VII. 18.) Korm. rendelet a vízbázisok, a távlati vízbázisok, valamint az ivóvízellátást szolgáló vízilétesítmények védelméről

21/2006. (I. 31.) Korm. rendelet a nagyvízi medrek, a parti sávok, a vízjárta, valamint a fakadó vizek által veszélyeztetett területek használatáról és hasznosításáról, valamint a nyári gátak által védett területek értékének csökkenésével kapcsolatos eljárásról

147/2010. (IV. 29.) Korm. rendelet a vizek hasznosítását, védelmét és kártételeinek elhárítását szolgáló tevékenységekre és létesítményekre vonatkozó általános szabályokról

100/2014. (III. 25.) Korm. rendelet a vízpolitika terén a közösségi fellépés kereteinek meghatározásáról szóló, 2000. október 23-i 2000/60/EK európai parlamenti és tanácsi irányelv környezeti célkitűzéseinek teljes körű átültetésével összefüggésben egyes kormányrendeletek módosításáról

Miniszteri rendeletek

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

6/2009. (IV. 14.) KvVM-EüM-FVM együttes rendelet a földtani közeg és a felszín alatti vízszennyezéssel szembeni védelméhez szükséges határértékekről és a szennyezések méréséről

10/2010. (VIII. 18.) VM rendelet a felszíni víz vízszennyezettségi határértékeiről és azok alkalmazásának szabályairól

11/2010. (IV. 28.) KvVM rendelet a folyók mértékadó árvízszintjeiről

15/2001. (VI. 6.) KöM rendelet az atomenergia alkalmazása során a levegőbe és vízbe történő radioaktív kibocsátásokról és azok ellenőrzéséről

28/2004. (XII. 25.) KvVM rendelet a vízszennyező anyagok kibocsátásaira vonatkozó határértékekről és alkalmazásuk egyes szabályairól

31/2004. (XII. 30.) KvVM rendelet a felszíni vizek megfigyelésének és állapotértékelésének egyes szabályairól

11.2 A DUNA ÁLTALÁNOS VÍZRAJZI JELLEMZŐI

A Duna Európa második legnagyobb folyója, hossza 2 857 km. Vízgyűjtő területe 817 000 km^2. Három jellegzetes szakasza van: a bajor és osztrák medencét magába foglaló, nagyesésű Felső-Duna, a Kárpátok koszorúján belül lévő Közép-Duna és a Havasalföldet átszelő Alsó-Duna.

Hazánkba Rajkánál, az 1 850 fkm (folyam km) szelvényben lép be és Mohácstól délre, az 1 433 fkm-nél hagyja el az országot. A 127 km hosszúságú Dunaföldvár-déli országhatár közötti Duna-szakaszt 32 kanyar alkotja. A kanyarok változó görbületűek, a legveszélyesebb a Sáros-parti kanyar, ahol a görbületi sugár mindössze 1 000 m. A folyó átlagos szélessége 400-600 m, esése Fajszig 6-8 cm/km, az alatt pedig 4-5 cm/km.

Az árvízi meder szélessége Dunafalvánál mindössze 450 m (ez az ország egyik legkisebb árvízi keresztmetszete), de a gemenci és a Béda-karapancsai tájegység területén eléri a 3-5 km-t.

A meder anyaga a Foktő feletti szakaszon durvább szemcséjű kavics és homok, az alatta húzódó szakaszon pedig finom szemcséjű homok és iszap.

A Paksi Atomerőmű (az erőmű szelvénye a torkolattól 1527 fkm) telephelyének környezetében a Duna enyhén alsószakasz jellegű. A Duna átlagos vízhozama Dunaújvárostól Mohácsig alig változik, mindenütt 2 300-2 330 m³/s között van.

11.3 A MODELLEZETT ÁLLAPOTOK, AZ ALKALMAZOTT MODELLEK

Paks II. környezeti hatásvizsgálatának keretében végzett dunai modell vizsgálatok célja az, hogy meghatározza a legkedvezőtlenebbnek ítélt extrém és szélsőséges körülmények előfordulása esetén a Paksi Atomerőmű területének érintettségét, a különböző hidrológiai események hatására kialakuló dunai morfodinamika változásait, valamint megvizsgálja a Dunába visszavezetett, felmelegedett hűtővíz dunai hőcsóvájának jellemző paramétereit.

A dunai modellezések részletesen vizsgálták és elemezték az alábbiakat:

- Extrém természeti- és művi körülmények hatásainak egydimenziós (1D) modellvizsgálata
  - *a telephely árvízi érintettségére*
  - *a hűtővízkivételi biztonságra*
- Szélsőséges kis- és nagyvízi események kétdimenziós (2D) modellvizsgálata
- Mederváltozások, morfodinamika
  - Lebegtetett és görgetett hordalékmozgás egydimenziós (1D) modellvizsgálata
  - A Duna meder morfodinamikai folyamatainak kétdimenziós (2D) modellvizsgálata
- A Dunába vezetett felmelegedett hűtővíz hatása - Hőcsóva háromdimenziós (3D) modellvizsgálata

11.4 A DUNAI MODELLEZÉSEK SZEMPONTJÁBÓL MÉRTÉKADÓ ÜZEMÁLLAPOTOK ÉS IDŐPONTOK

A Paksi Atomerőmű jelenleg üzemelő blokkjainak teljes kapacitású üzemi hűtővízigénye 25 m³/s blokkonként (4 blokk összesen: 100 m³/s). A tervezett 2 x 1 200 MW-os új blokkok maximális üzemi hűtővízigénye blokkonként 66 m³/s (2 új blokk összesen: 132 m³/s). A dunai modellezések szempontjából figyelembe veendő maximális hűtővíz kivételeket és a visszaadott melegvizeket - a Paksi Atomerőmű üzemidő-hosszabbítását és Paks II. tervezett üzemelését is figyelembe véve - a 11.4-1. táblázatban összegezzük.

Időszak [évek]	**Üzemelő blokkok száma [db]**	**Hűtővíz kivétel és melegvízhozam maximuma [m³/s]**
2014. (Jelen)	Paksi Atomerőmű 4 meglévő blokk	100
2014-től – 2025-ig	Paksi Atomerőmű 4 meglévő blokk	100
2025-től – 2030-ig	Paksi Atomerőmű 4 meglévő blokk + Paks II. 1. blokk	166
2030-től – 2032-ig	Paksi Atomerőmű 4 meglévő blokk + Paks II. 1-2 blokk	232
2032-től – 2034-ig	Paksi Atomerőmű 3 meglévő blokk + Paks II. 1-2 blokk	207
2034-től – 2036-ig	Paksi Atomerőmű 2 meglévő blokk + Paks II. 1-2 blokk	182
2036-től – 2037-ig	Paksi Atomerőmű 1 meglévő blokk + Paks II. 1-2 blokk	157
2037-től – 2085-ig	Paks II. 1-2 blokk	132
2085-től – 2090-ig	Paks II. 2. blokk	66
2090-től	-	0

11.4-1. táblázat: A dunai modellezések szempontjából mértékadó üzemállapotok és időpontok

11.5 A MODELLTERÜLETEK LEHATÁROLÁSA AZ ALKALMAZOTT MODELLEK MEGNEVEZÉSÉVEL

A Duna meder vizsgált területe tágabb értelemben a Dunaföldvár (Duna 1560,6 fkm) – déli országhatár (Duna 1433 fkm) közötti 128 km hosszúságú folyószakaszra terjed ki, a Duna középvízi- és nagyvízi mederterületére egyaránt.

A Bősi (Dunacsúnyi) vízlépcső, mint felvízi vízszintszabályozó létesítmény, kis- és nagyvízi haváriás hatásának vizsgálata érdekében a tartományt Dunaföldvártól Vámosszabadiig (Duna 1805,6 fkm) meghosszabbítottuk. Ezt a nagy területi kiterjedésű feladatot egydimenziós (1D) modellel (HEC-RAS) vizsgáltuk.

A tervezett fejlesztés hatásának részletesebb vizsgálatát, a tervezett telephely környezetére kétdimenziós (2D) és háromdimenziós (3D) modellvizsgálatokkal végeztük, a feladat függvényében történt Duna mederterületi lehatárolással.

11.5.1 SZÉLSŐSÉGES KIS- ÉS NAGYVÍZI ESEMÉNYEK, VALAMINT A MEDERVÁLTOZÁSOK 2D MODELLTERÜLETE

Szélsőséges dunai kis- és nagyvízi események

A Duna középvízi- és nagyvízi medrének részletes domborzat modelljét a **Dunaföldvár - Fajsz (Duna 1560,6 - 1500,0 fkm**) - mintegy 60 km hosszúságú - Duna szakaszra készítettük el. A 20 000 évente visszatérő szélsőséges kis- és nagyvízi Duna vízhozamok és az ilyenkor nem kívánt események (földcsuszamlás, partfalomlás, töltésszakadás) hatásának vizsgálatára a domborzatmodell 30 km hosszúságú Duna mederszakaszát (Duna 1500 fkm – 1530 fkm) vettük alapul.

A tervezett fejlesztés várható mederváltozásokra gyakorolt hatásának vizsgálatára a múltbeli folyamatok és az áramlási sebességtér számításán keresztül következtettünk, a telephely környezetében, mintegy 10 km hosszúságú Duna szakasz 2D áramlásmodellezési eredményeinek felhasználásával.

Mederváltozások, morfodinamika

Ezen Duna mederszakaszra végeztük el a morfodinamikai vizsgálatokat a tervezett fejlesztés hatására, Delft3D-Flow (továbbiakban: Delft3D) modell alkalmazásával, kétdimenziós változatban (Delft3D-Flow, 2013). A modellvizsgálatok eredményeképpen megállapítható, hogy a morfodinamikai hatásterület a modellezett területnél lényegesen kisebb területi kiterjedésű. Ezért a hosszabb időtávú (néhány átlagos és nedves hidrológiai év eseteire vonatkozó) morfodinamikai számításokat, a morfodinamikai hatásterülettel legfeljebb érintett, mintegy 3 km hosszúságú (Duna 1524,75 - 1527,75 fkm szelvények közötti) Duna mederszakszra végeztük el a tervezett telephely környezetében. [11-17]

11.5.2 EXTRÉM TERMÉSZETI- ÉS MŰVI KÖRÜLMÉNYEK HATÁSAINAK VIZSGÁLATA A TELEPHELY ÁRVÍZI ÉRINTETTSÉGÉRE ÉS A HŰTŐVÍZKIVÉTELI BIZTONSÁGRA - 1D MODELLTERÜLET

Baleseti, illetve havária eseményként a Duna természeti (partfalomlás, földcsuszamlás, jégtorlasz képződés) és művi (felvízi vízszintszabályozó mű) adottságaiban szélsőséges (extrém) esetben fellépő, illetve nem üzemszerűen előforduló jelenségek hatásait vizsgáljuk a hűtővízkivételi biztonságra és az árvízvédelmi, illetve elöntési veszélyeztetettségére.

Felvízoldali vízszintszabályozó szerkezetek, extrém földcsuszamlások és jégjelenségek hatásának vizsgálatát - mint üzemzavart, balesetet, illetve haváriát -, egydimenziós (1D) modellel (HEC-RAS) vizsgáltuk. Ezek a változatok a szélsőséges árvízi és hűtővízkivételi biztonságot érintő, szélsőséges kisvízi események hatásainak vizsgálatára vonatkoznak.

11.5.2.1 Extrém természeti- és művi körülmények hatásainak vizsgálata a telephely árvízi érintettségére

A vizsgált esetek a következők:

- Felvízoldali vízszintszabályozó szerkezetek, extrém földcsuszamlások és jégjelenségek hatásának modellvizsgálata - modellterület: **Vámosszabadi - Mohács Duna szakasz**.
- Alvízoldali földcsuszamlás, jégdugó kialakulásának prognosztizálása, hatásának vizsgálata áramlási modell alkalmazásával - modellterület: **Budapest - Mohács Duna szakasz**.
- Jégdugó kialakulásának prognosztizálása, nagyvízi hatásának vizsgálata áramlási modell alkalmazásával - modellterület: **Dunaújváros - Mohács Duna szakasz**.

11.5.2.2 Extrém természeti- és művi körülmények hatásainak vizsgálata a hűtővízkivételi biztonságra

A vizsgált esetek a következők:

- Felvízszint-szabályozó műtárgy sérülésének, nem üzemszerű működésének hatása - modellterület: **Vámosszabadi - Mohács Duna szakasz**.
- Felvízoldali jégtorlasz, jégdugó hatására előálló helyzet hatásai a vízkivételi biztonságra - modellterület: **Dunaújváros - Mohács Duna szakasz**.
- Partfalomlások, partfalcsuszamlások hatásainak vizsgálata - modellterület: **Dunaújváros - Mohács Duna szakasz**.

11.5.3 A DUNÁBA VEZETETT FELMELEGEDETT HŰTŐVÍZ VIZSGÁLATA - 3D MODELLTERÜLET

A hőterhelés hatásának vizsgálata elsősorban a kis- és középvízi Duna vízhozamok eseteiben mértékadó, ezért a Duna középvízi medrét érinti a tervezett melegvíz kibocsátás alatti Duna szakaszon, a déli országhatárig terjedően, a déli országhatáron átterjedő mértékadó hatás meghatározásával.

3D modellvizsgálattal a telephely környezetében a Duna mintegy 3 km hosszúságú szakaszát vizsgáltuk - a **Duna 1527 - 1524 fkm szelvényei közötti mederszakasz**on -, az OpenFOAM nevű, szabadfelhasználású szoftver alkalmazásával. Ehhez egy 10 km hosszúságú Duna szakaszra vonatkozóan kalibráltunk egy 2D (River2D és Delft3D szabadfelhasználású szoftverekkel kétdimenzióban) áramlási (hidrodinamikai) modellt, a peremfeltételek 3D modellnek történő, peremzavar nélküli átadása érdekében.

A hőterhelés hatásterületét és a déli országhatár szelvényében megjelenő mértékadó hatást kvázi ("semi") háromdimenziós szabadfelhasználású transzport modellel (CORMIX) határoztuk meg - a 3D (OpenFOAM) modellhez való illesztésével -, a tervezett melegvíz kibocsátás és a Duna déli országhatár szakaszára, azaz minegy ~93 km hosszúságú - a **Duna 1526,25 – 1433 fkm szelvények közé eső - Duna szakasz**ra.

11.6 A MÉRTÉKADÓ TERHELÉSI ÁLLAPOTOK VIZSGÁLATÁNAK MÓDSZERTANA, A MODELLEK BEARÁNYOSÍTÁSA

11.6.1 SZÉLSŐSÉGES DUNAI KIS- ÉS NAGYVÍZI ESEMÉNYEK MÉRTÉKADÓ TERHELÉSI ÁLLAPOTAINAK FELVÉTELE - 2D ÁRAMLÁSI MODELL BEARÁNYOSÍTÁSA

11.6.1.1 Szélsőséges dunai kis- és nagyvízi események mértékadó terhelési állapotai

A modellváltozatok számításai nagy-, és kisvízi esetben a 20 000 évente átlagosan egyszer előforduló vízhozamokra történtek, a Duna 1500 – 1530 fkm (Fajsz - Paks) szakaszára.

11.6.1.1.1 Szélsőséges dunai kisvízi esetek

Szélsőséges kisvízi helyzetben – a jelenlegi ismeretek szerinti medermorfológiai viszonyok mellett - vizsgáltuk a tervezett mértékadó hűtővízkivételi állapot, mint mértékadó normál üzemi állapot hűtővíz-kivételi biztonságra gyakorolt hatását, a jelen állapottal (Paksi Atomerőmű jelenlegi legnagyobb vízkivétele 100 m³/s) történő összevetés alapján.

Havária eseményként a hidegvíz-csatorna Dunai torkolata felett, szélsőséges kisvízi viszonyok mellett a jobb parton tételeztünk fel földcsuszamlást, ugyanis ebben az esetben várható a Duna hidegvíz-csatorna szelvényének (hűtővíz kivételi hely) környezetében a vízfelszín csökkenése, amely a hűtővízkivételi biztonságot befolyásolhatja.

Az alábbi esetek vizsgálatát mutatjuk be a következőkben:

Jelen állapot

Szélsőséges, 20 000 évente visszatérő, permanens dunai kisvízhozammal, **Q_{Duna} = 579 m³/s** (1965-2011. évek dunai kisvizeinek statisztikai feldolgozásának eredménye - a 2012. év figyelembe vételével kismértékben nagyobb vízhozam adódik) és a maximális 100 m³/s hűtővízkivétellel (meglévő hidegvíz-csatornán keresztüli), visszavezetéssel az energiatörő műtárgyon keresztül.

Mértékadó normál üzemelés

Szélsőséges, 20 000 évente visszatérő, permanens dunai kisvízhozammal, **Q_{Duna} = 579 m³/s** és a maximum 232 m³/s (a meglévő hidegvíz-csatorna tervezett bővítésével kialakítandó, Duna torkolati keresztszelvényen keresztüli) hűtővízkivétellel. A vízvisszavezetés egyrészt a meglévő melegvíz-csatornán keresztül, az energiatörő műtárgyon át történik a Dunába (jobb parti bevezetésként) maximum 100 m³/s meleg vízhozammal, másrészt ~200 méterrel az e felett tervezett, rekuperációs műtárgyon keresztül a Dunába történő (Duna jobb parti bevezetésként) maximum 132 m³/s melegvíz-hozammal.

Havária esemény

Mértékadó normál üzemelés vizsgálata, egy lehetséges kedvezőtlen földcsuszamlás, partfalomlás figyelembe vételével.

11.6.1.1.2 Szélsőséges dunai nagyvízi (árvíz) esetek

Szélsőséges nagyvízi helyzetben – a jelenlegi ismeretek szerinti medermorfológiai viszonyok mellett - vizsgáltuk a tervezett mértékadó hűtővízkivételi helyzetet, mint mértékadó normál üzemi állapot esetén a meglévő- és tervezett telephely árvízvédelmi biztonságára gyakorolt hatást, a jelen állapottal (Paksi Atomerőmű jelenlegi legnagyobb vízkivétele 100 m³/s) történő összevetés alapján.

A jelen állapot vizsgálata keretében modelleztük, szélsőséges árvízi helyzetben, a hidegvíz-csatorna torkolata feletti Duna szakaszon kialakuló töltésszakadás (vagy mesterséges töltésátvágás) hatását is, a meglévő- és tervezett telephely környezetének árvízvédelmi biztonságára tekintettel.

Havária eseményként, a melegvíz-csatorna torkolata alatt a bal parton, szélsőséges árvízi helyzetben, tételeztünk fel földcsuszamlást, ugyanis ebben az esetben várható a meglévő- és tervezett telephely környezetében, a normál üzemhez képest kedvezőtlen árvízvédelmi érintettség, a földcsuszamlásnak a Duna vízfelszínére gyakorolt duzzasztó hatása miatt.

Jelen állapot

Szélsőséges, 20 000 évente visszatérő, permanens dunai nagy-vízhozammal, **Q_{Duna}=14 799 m³/s** és a maximális 100 m³/s hűtővízkivétellel (meglévő hidegvíz-csatornán keresztüli), visszavezetéssel az energiatörő műtárgyon keresztül.

Jelen állapot felvízi töltésszakadással

A dunai vízkivétel feletti, Duna bal parti töltésszakadásának (vagy töltésátvágásának) hatásvizsgálata - szélsőséges (20 000 évente visszatérő vízhozam, **Q_{Duna}=14 799 m³/s**) árvízi vízhozam esetén, az árvízvédelmi biztonság alakulására, a telephely környezetében.

Mértékadó normál üzemelés

Szélsőséges, 20 000 évente visszatérő, permanens dunai árvízhozammal, **Q_{Duna}=14 799 m³/s** és a maximális 232 m³/s (a meglévő hidegvíz-csatorna tervezett bővítésével kialakítandó, Duna torkolati keresztszelvényen keresztüli) hűtővízkivétellel. A vízvisszavezetés egyrészt a meglévő melegvíz-csatornán keresztül, az energiatörő műtárgyon át történik a Dunába (jobb parti bevezetésként) maximum 100 m³/s meleg-vízhozammal, másrészt 200 méterrel az e felett tervezett, rekuperációs műtárgyon keresztül történő Dunába történő jobb parti bevezetésként, maximum 132 m³/s melegvíz-hozammal.

Havária esemény

Mértékadó normál üzemelés vizsgálata, egy lehetséges kedvezőtlen földcsuszamlás, partfalomlás figyelembe vételével.

11.6.1.2 Az alkalmazott (2D) hidrodinamikai modell kalibrációjának bemutatása kisvízi- és nagyvízi esetre

11.6.1.2.1 Kis- és nagyvízi mederfenékszint és területhasználat alakulása

A Dunában történő mederbeli lefolyás, fenti permanens kisvízi- és árvízi modellvizsgálatait a Delft3D hidrodinamikai modell alkalmazásával, annak kétdimenziós (2D) mélységintegrált moduljával végeztük, a Duna szélsőséges - 20 000 évente visszatérő -, kis- és nagyvízi áramlási viszonyai mellett, a Duna 1500-1530 fkm mederszakaszára.

A vizsgált Duna-szakasz magába foglalja a meglévő és tervezett erőművi telephely felvízi- és alvízi szakaszait.

A számítási eredményeket az alábbiakban ismertetjük, az alábbi területi (Duna szakasz) bontásban:

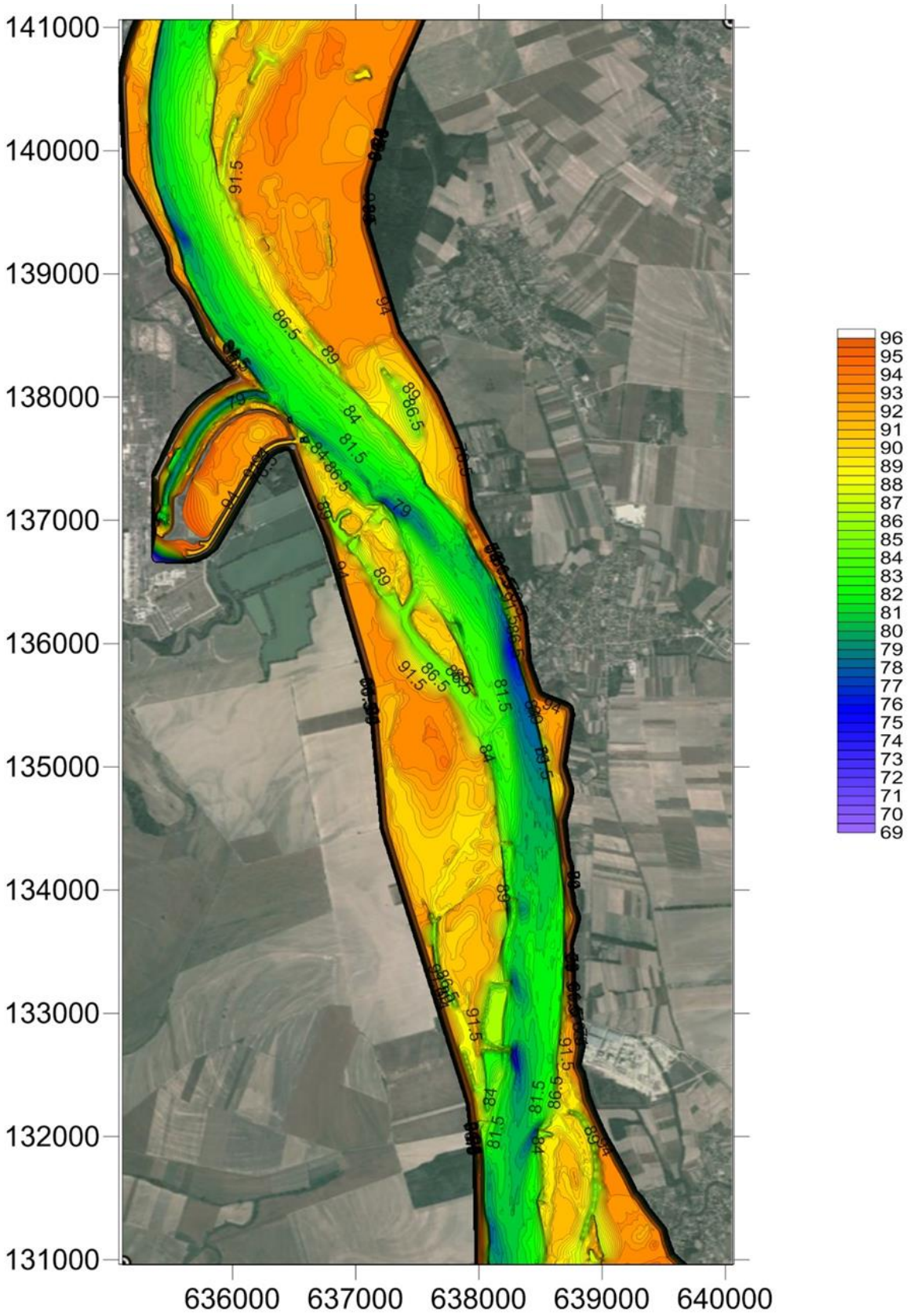
a) Duna 1519-1530 fkm (a számításokban: 1. szakasz)
b) Duna 1509-1519 fkm (a számításokban: 2. szakasz)
c) Duna 1500-1509 fkm (a számításokban: 3. szakasz)

Kidolgoztuk az érintett terület (Duna főmedri és hullámtéri mederszakasza) terepmodelljét, morfológiai térképét 2 x 2 m-es felbontásban. A modellezést 6 x 6 m-es felbontású rácsháló részletességével elfogadhatónak ítéltük.

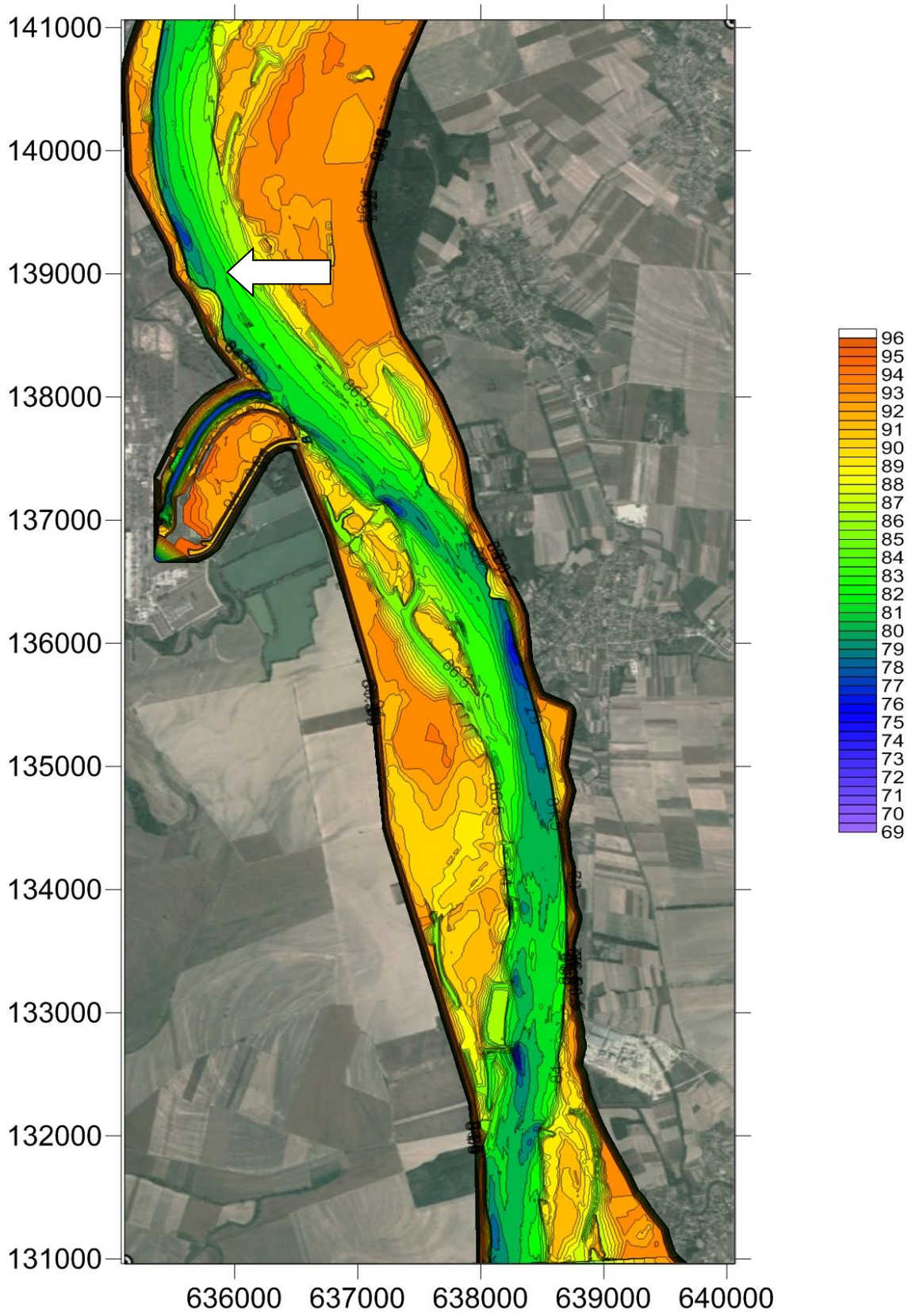
Az alábbi ábrákon a Duna főmedrének és hullámterének, kidolgozott morfológiai modelljét szemléltetjük (lásd 11.6.1-1. ábra; 11.6.1-2. ábra; 11.6.1-3. ábra és 11.6.1-4. ábra).

A vizsgált földcsuszamlásos (suvadásos) helyzetben alkalmazott Duna morfológiai modellt, a Duna medrének terepviszonyait a 11.6.1-1. ábra mutatja be.

11.6.1.2.1.1 A Duna főmedrének és hullámterének kidolgozott morfológiai modellje

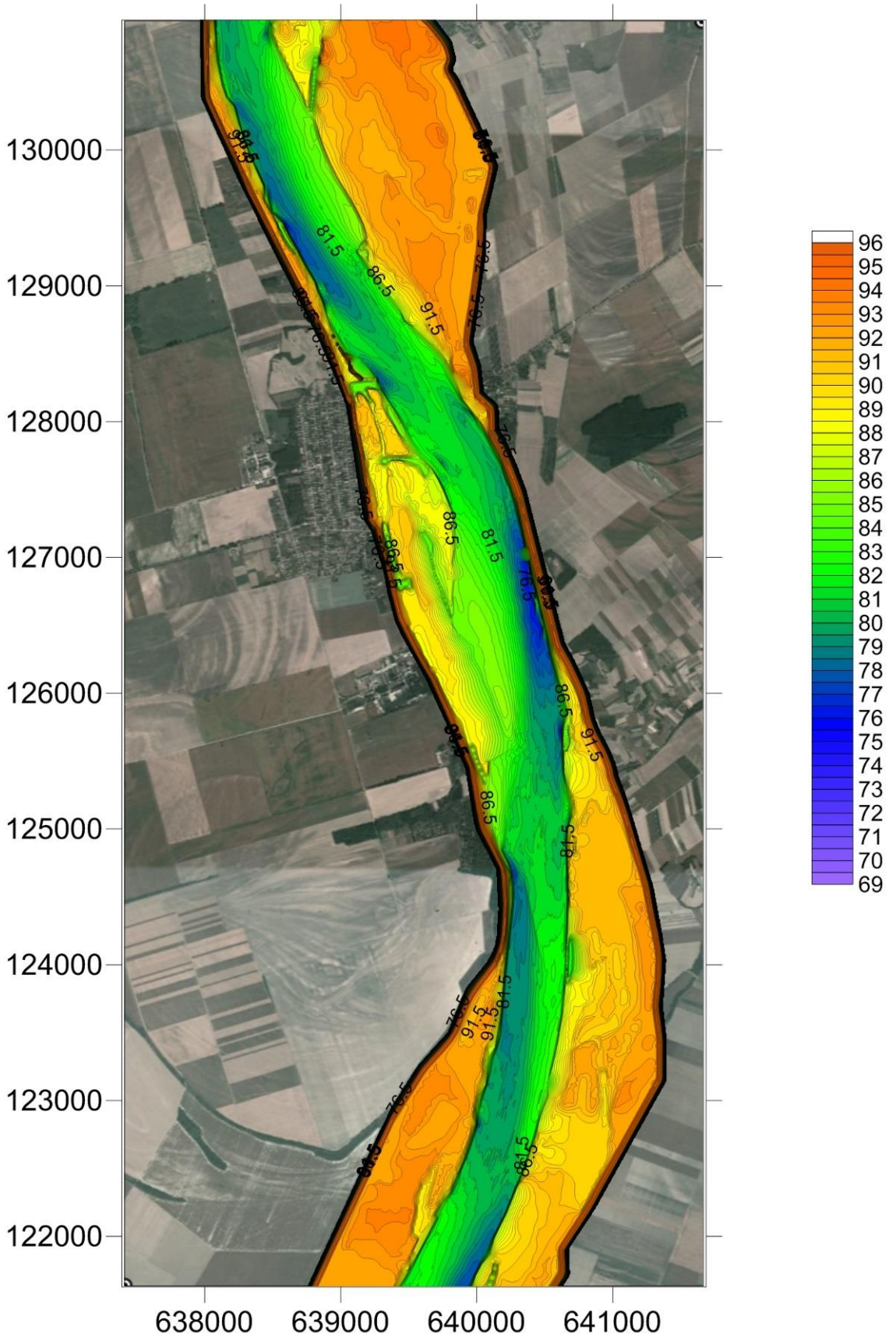


11.6.1-1. ábra: A Duna 1519-1530 fkm szakaszának morfológiai modellje - fenékszintek [mBf] – EOV koordinátákkal

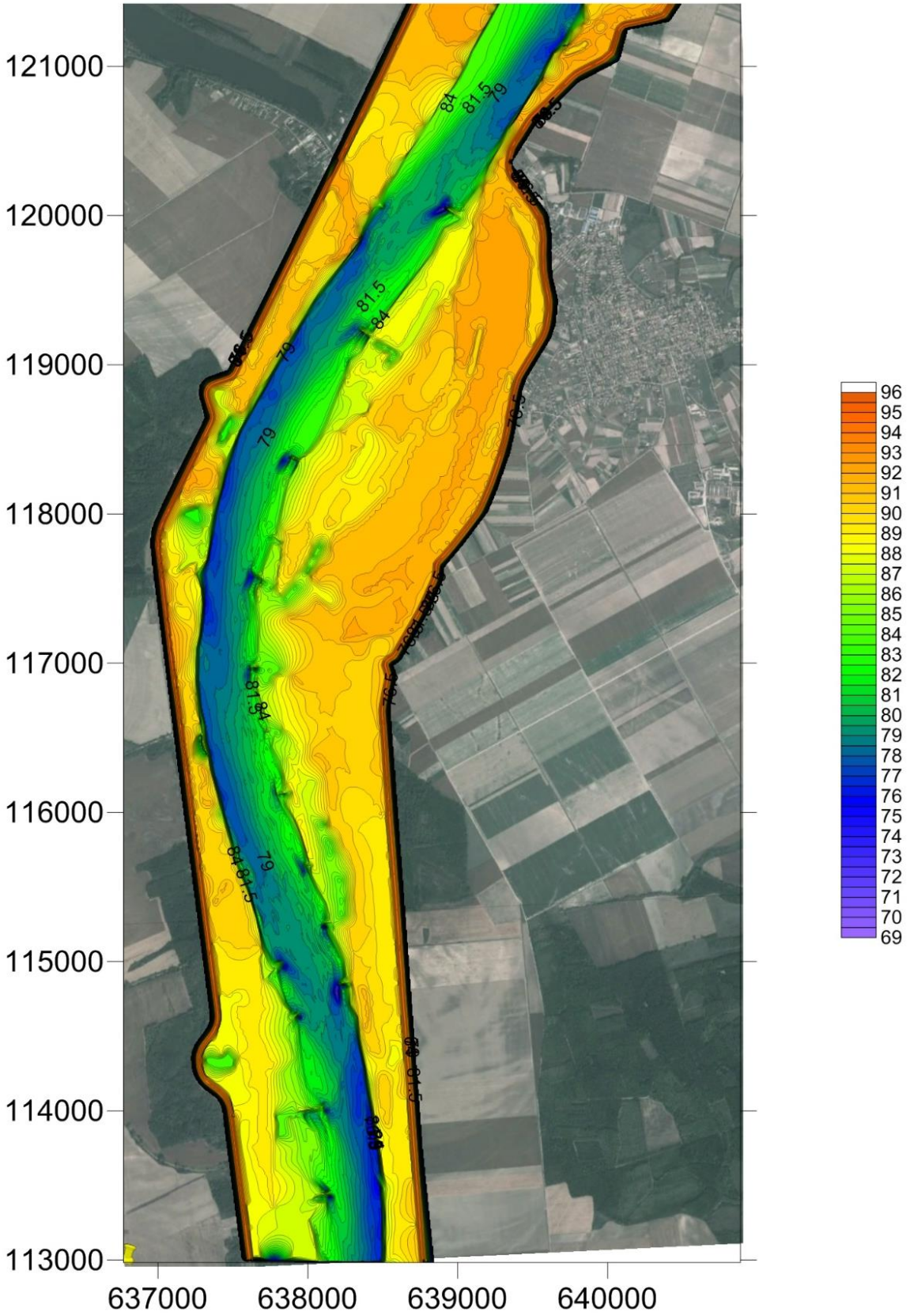


Megjegyzés:
(a nyíl a földcsuszamlás helyét mutatja)

11.6.1-2. ábra: A Duna 1519-1530 fkm szakaszának morfológiai modellje - földcsuszamlást feltételező változat - fenékszintek [mBf] – EOV koordinátákkal

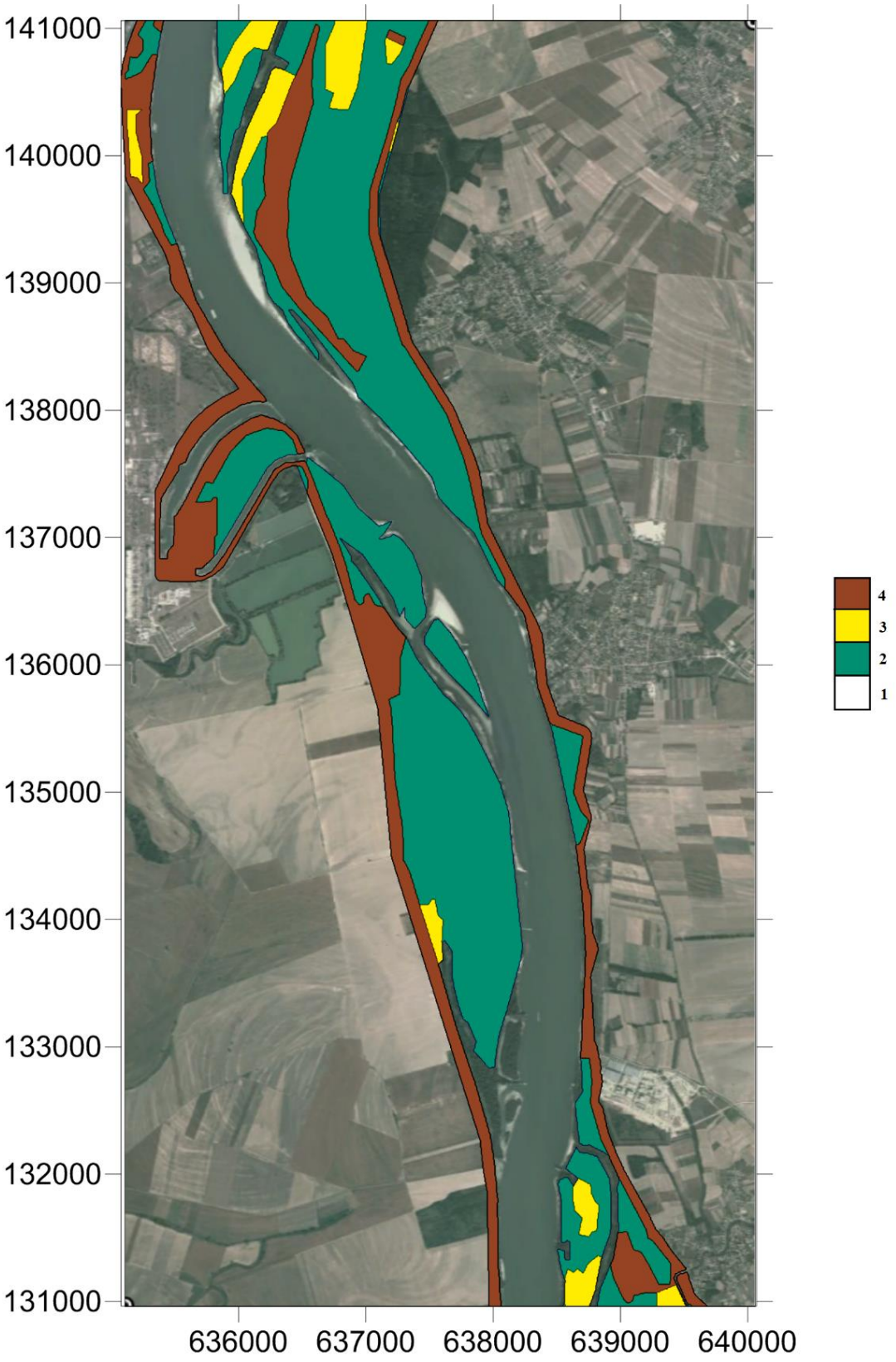


11.6.1-3. ábra: A Duna 1509-1519 fkm szakaszának morfológiai modellje - fenékszintek [mBf] – EOV koordinátákkal

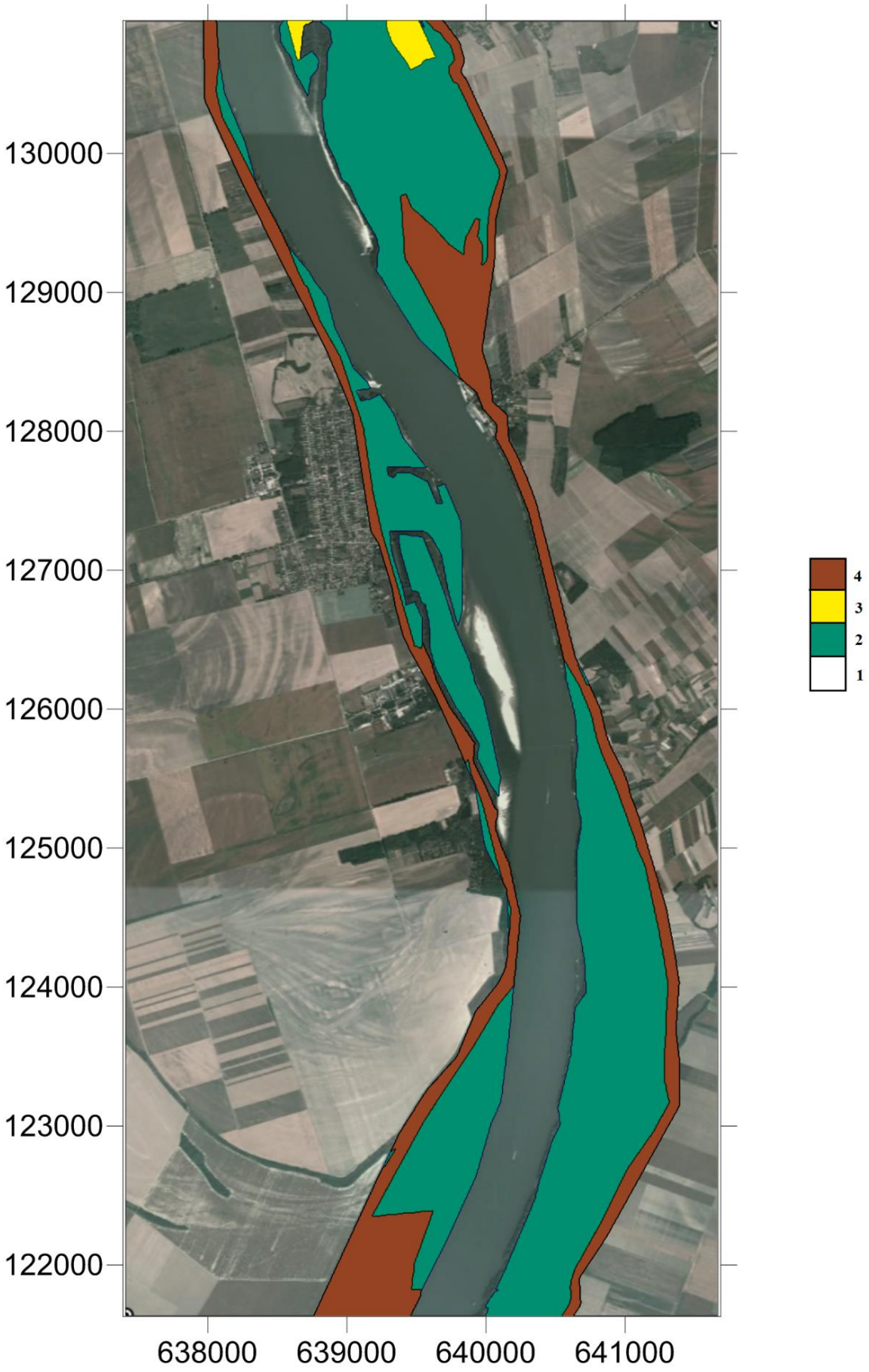


11.6.1-4. ábra: A Duna 1500-1509 fkm szakaszának morfológiai modellje - fenékszintek [mBf] – EOV koordinátákkal

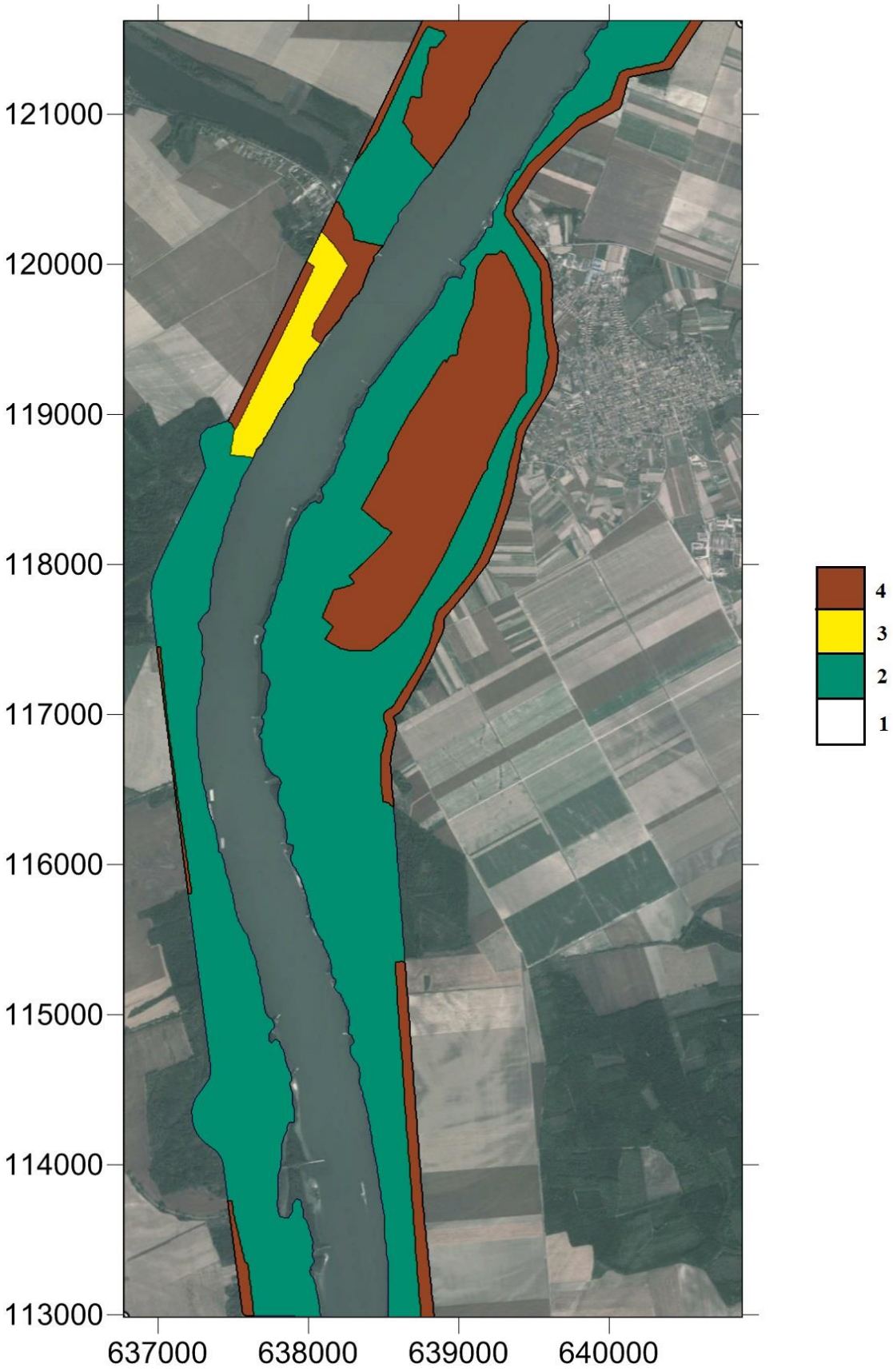
11.6.1.2.1.2 A Dunai modellterület területhasználatainak bemutatása - mederérdességek területi elkülönítése



11.6.1-5. ábra: A Duna 1519-1530 fkm szakaszának területhasználati kategóriái – EOV koordinátákkal



11.6.1-6. ábra: A Duna 1509-1519 fkm szakaszának területhasználati kategóriái – EOV koordinátákkal



11.6.1-7. ábra: A Duna 1500-1509 fkm szakaszának területhasználati kategóriái – EOV koordinátákkal

11.6.1.2.2 Nagyvízre vonatkozó kalibráció

A nagyvízi kalibráció céljára a Duna Q = 8 790 m³/s vízhozamnál (2013. évi legnagyobb történelmi jégmentes árvíz) mért, árvízi tetőző vízszintek szolgáltak alapadatként. Mindhárom modellvizsgálati részszakasz mért alvízi vízszintjének figyelembe vételével, síkmetszéssel előállítottuk azokat a medertartományokat, amelyben az áramlási jelenség lezajlik (modellezett folyószakasz). A metszési sík magassága: Z0_sík (lásd az alábbi 11.6.1-1. táblázatot).

Duna [fkm]	Z (mért vízfelszín) [mBf]	Alapadatok
1499.882	92.16	
1500.920	92.24	3. Duna-szakasz
1501.847	92.28	Duna 1500 – 1509 fkm
1502.842	92.34	Q = 8790 m³/s
1503.071	92.36	
1503.819	92.42	
1504.806	92.55	Z0_sík = 92.00 mBf
1505.794	92.64	Z_alvíz =92.16 mBf
1506.781	92.71	
1507.316	92.75	
1507.768	92.82	
1508.756	92.91	
1509.743	92.94	
1510.641	93.00	2. Duna-szakasz
1511.539	93.03	Duna 1509-1519fkm
1511.579	93.05	Q = 8790 m³/s
1512.437	93.10	
1513.335	93.21	
1514.233	93.23	Z0_sík = 92.70 mBf
1515.170	93.32	Za_lvíz = 92.92 mBf
1515.418	93.32	
1515.838	93.34	
1516.072	93.35	
1517.291	93.37	
1518.245	93.48	
1519.022	93.49	
1519.196	93.48	
1520.199	93.62	1. Duna-szakasz
1521.184	93.69	Duna 1519-1530 fkm
1521.303	93.70	Q = 8790 m³/s
1522.193	93.77	
1523.100	93.83	
1523.550	93.84	
1524.000	93.89	Z0_sík = 93.00 mBf
1525.131	93.93	Za_lvíz = 93.49 mBf
1525.714	93.99	
1526.287	94.01	
1526.706	94.04	
1527.707	94.14	Felszínesés: 6.7 [cm/km]
1529.528	94.21	
1529.710	94.22	

11.6.1-1. táblázat: Modellezett folyószakasz – a Duna mért felszíngörbéje, a 2013. évi júniusi, eddig előfordult legnagyobb jégmentes árvíz (LNV) idején

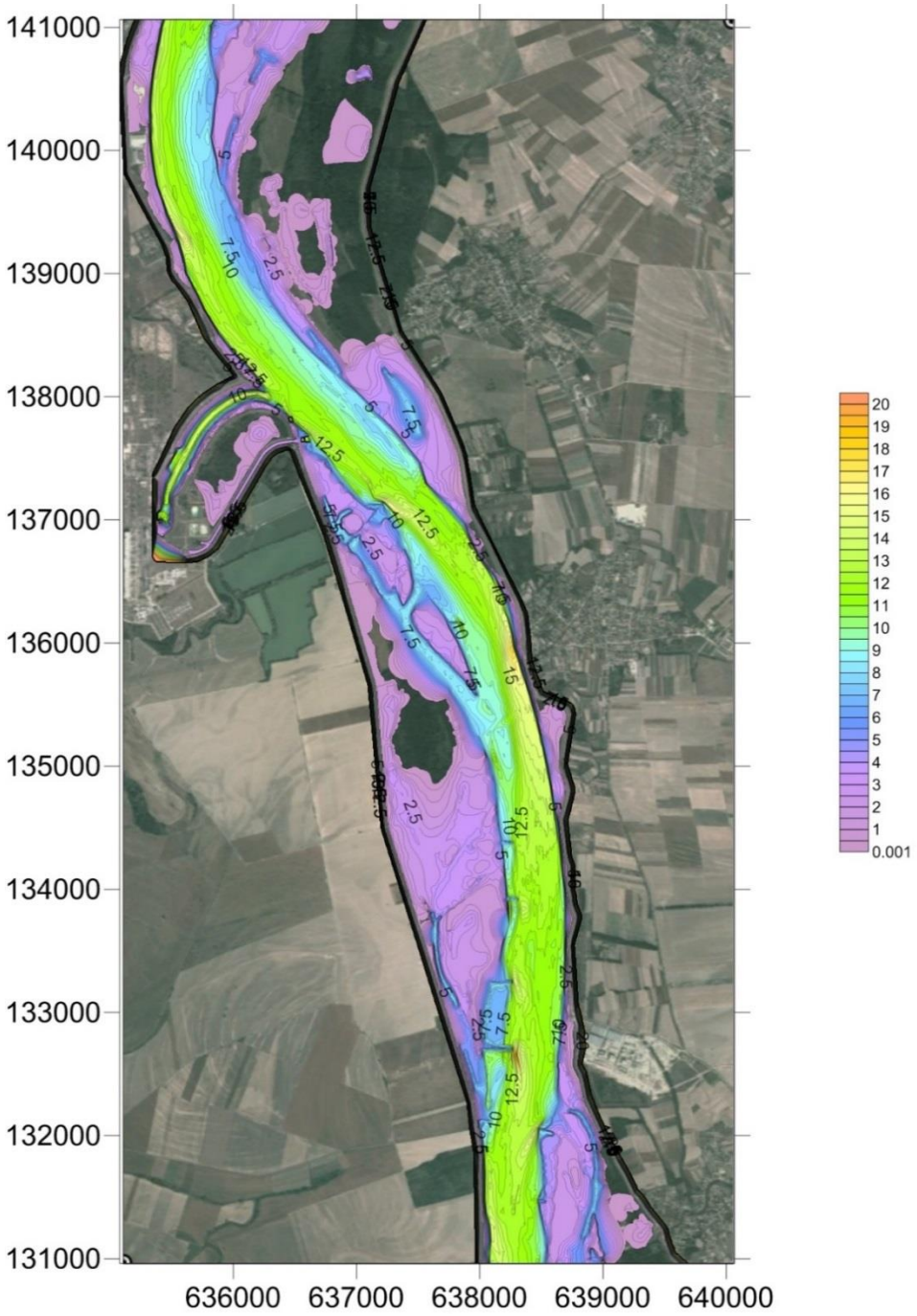
A kalibráció célja a területhasználattól függő meder-érdességi, illetve meder-simasági tényező beállítása, amelynek alkalmazása mellett biztosítható, hogy a mért és számított vízszint hossz-szelvények a lehető legközelebb kerüljenek egymáshoz.

A Duna főmedri és hullámtéri (Duna 1500-1530 fkm) mederszakasza medersimasági jellemzőinek tartományait és a kalibrált medersimasági együtthatók értékeit a 11.6.1-2. táblázat mutatja be.

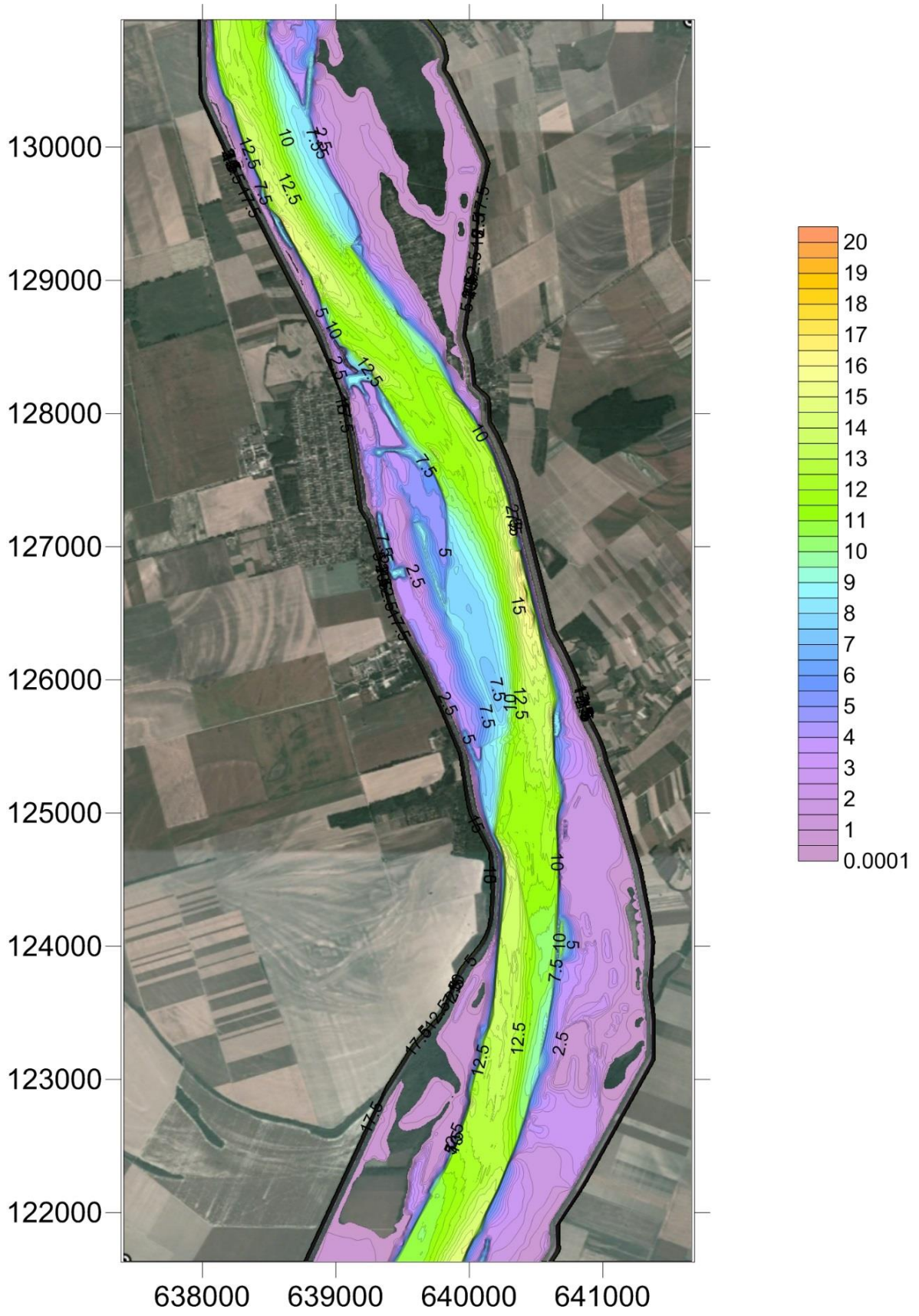
Területhasználat	Területhasználat sorszáma	Simasági tényező tartománya	Kalibrált Manning-féle simasági tényező [$m^{1/3}/s$]
Vízfelület, illetve főmeder	1	40 - 50	45
Erdő	2	5 - 20	11
Bokor, liget	3	15 - 25	17
Nyílt terület (hullámtér)	4	20 - 40	26

11.6.1-2. táblázat: Területhasználati kategóriák medersimasági tényezőinek tartománya és kalibrált értékei tartományai

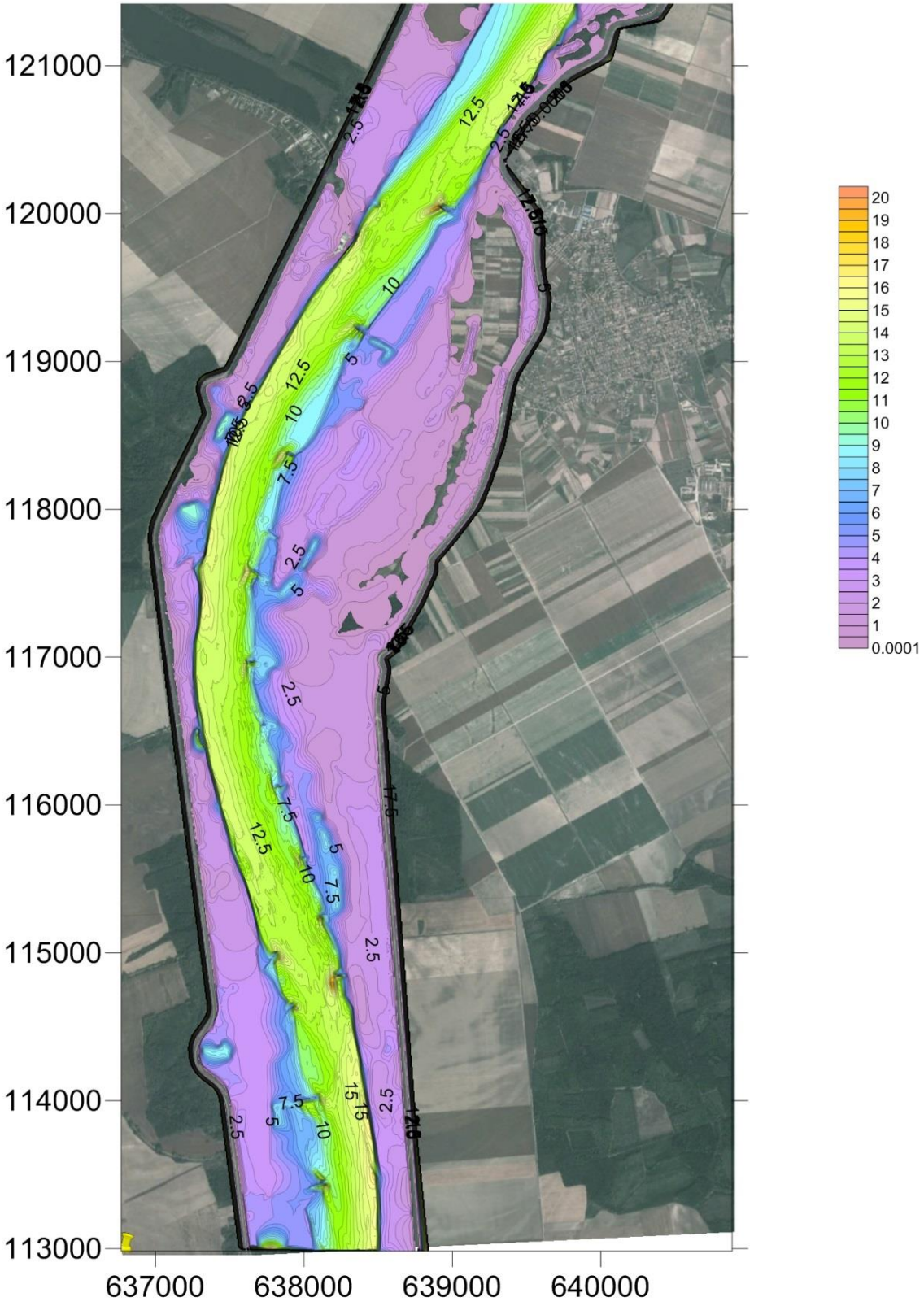
Modellszámítási eredményül a statikus vízmélységek térképeit kaptuk, amelyeket az alábbi ábrákon szemléltetünk (11.6.1-8. ábra, 11.6.1-9. ábra és 11.6.1-10. ábra).



11.6.1-8. ábra: A Duna 1519-1530 fkm szakaszának statikus vízmélységei – nagyvíz (2013. évi árvízi tetőzés) – EOV koordinátákkal

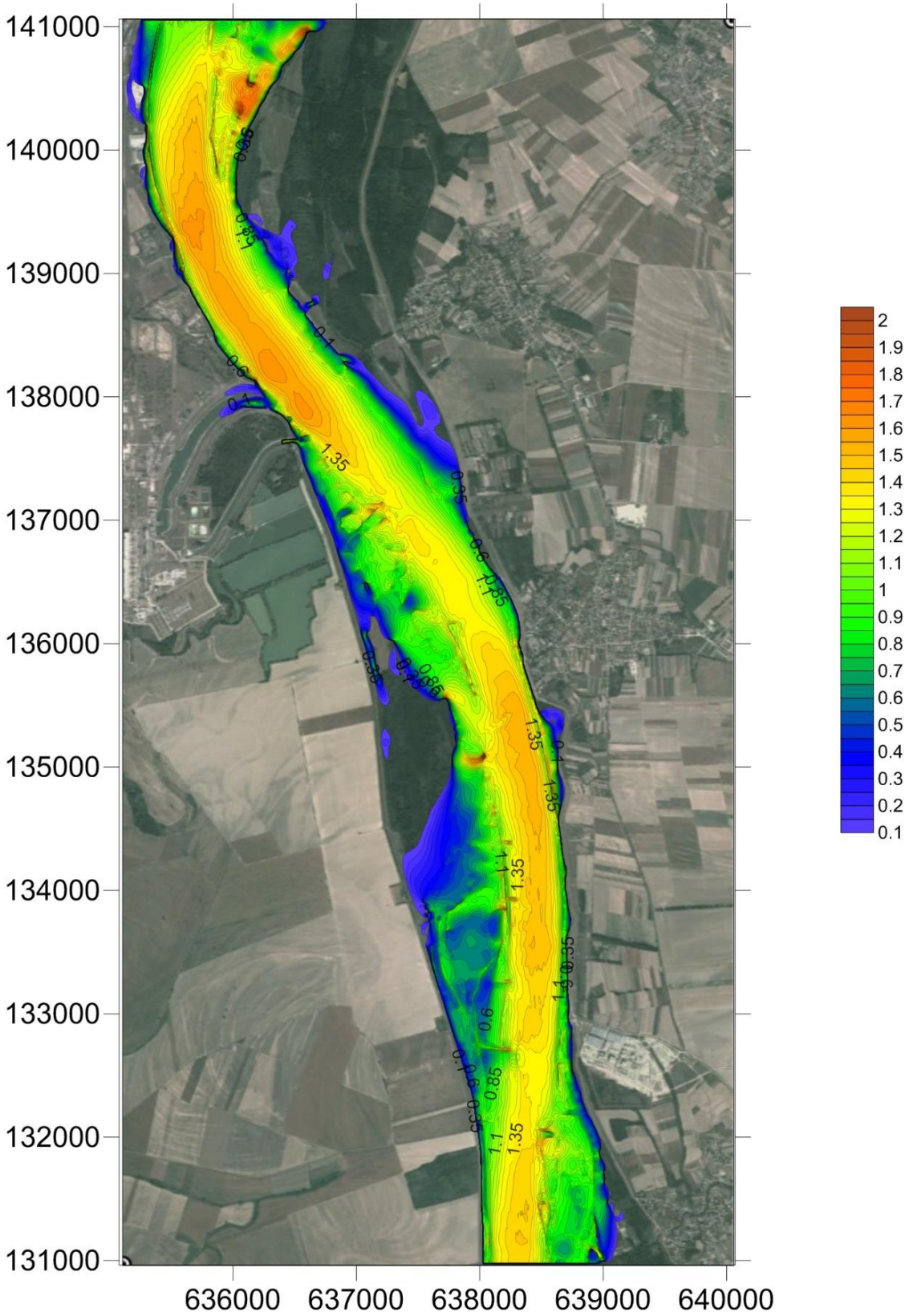


11.6.1-9. ábra: Az -1509-1519 fkm szakasz statikus vízmélységei – nagyvíz (2013. évi árvízi tetőzés) – EOV koordinátákkal

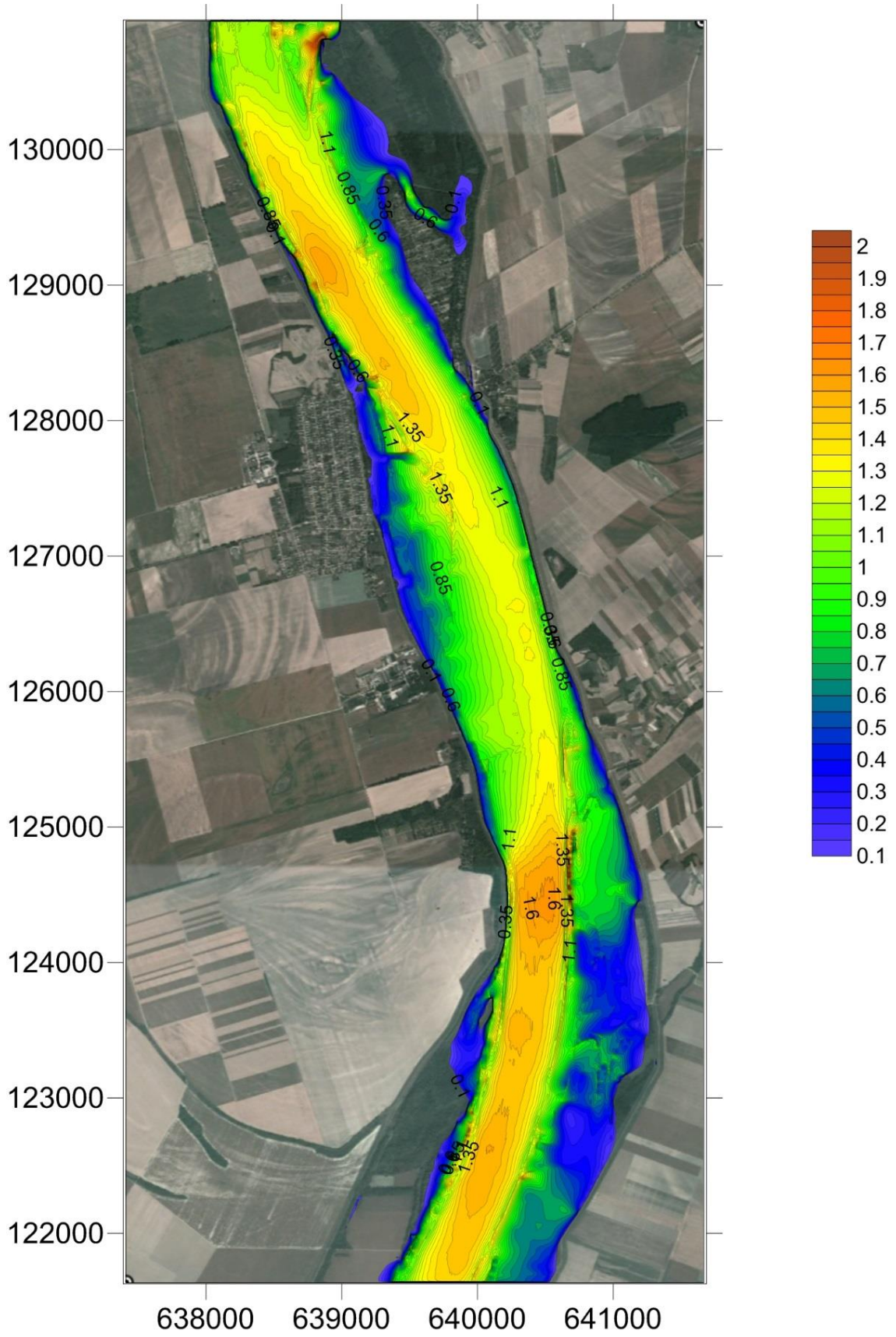


11.6.1-10. ábra: A Duna 1500-1509 fkm szakaszának statikus vízmélységei - nagyvíz (2013. évi árvízi tetőzés) – EOV koordinátákkal

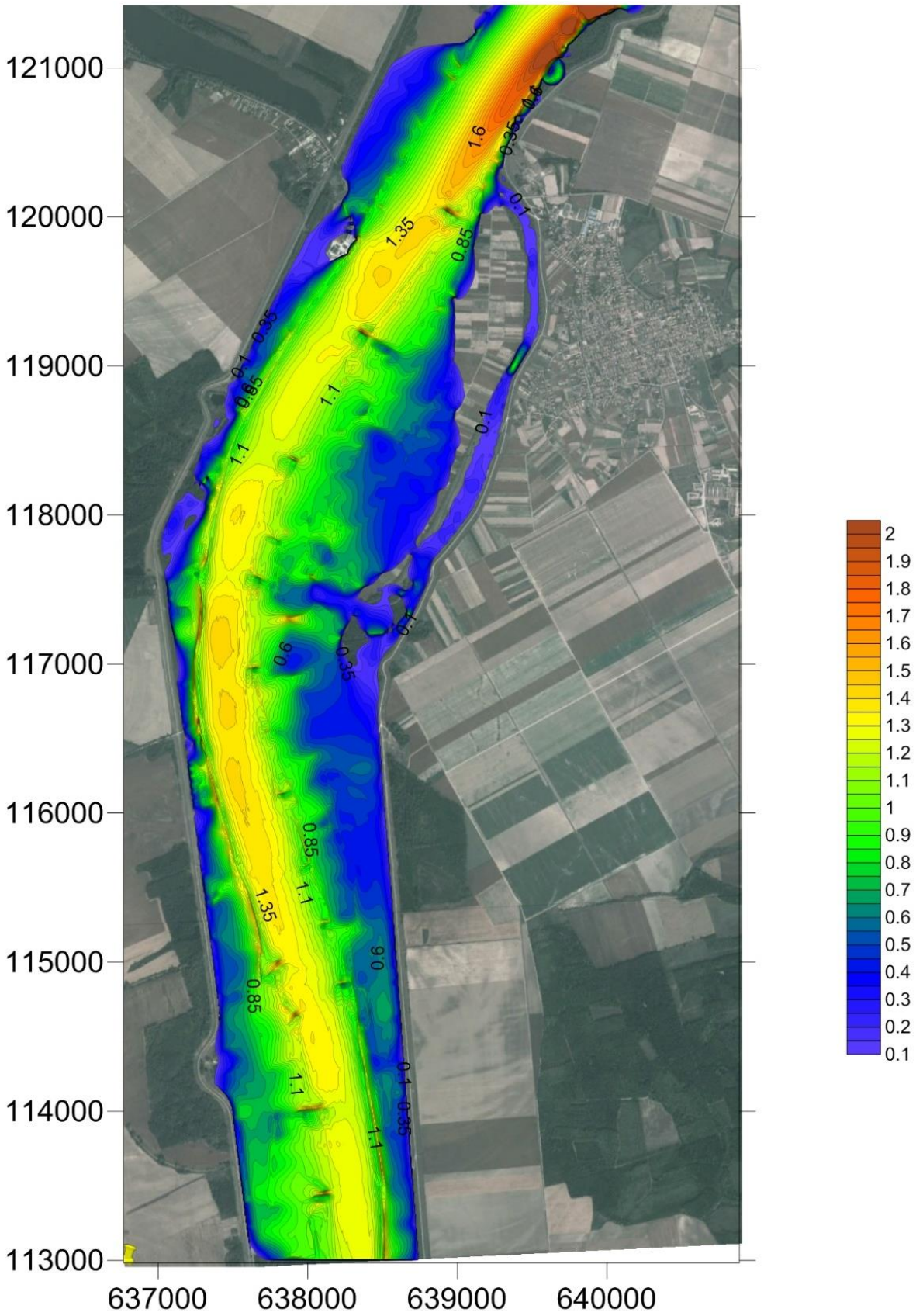
A kalibrált medersimasági tényezőkkel számított (2D) sebesség-eloszlási eredményeket az alábbi ábrák mutatják be (11.6.1-11. ábra, 11.6.1-12. ábra és 11.6.1-13. ábra).



11.6.1-11. ábra: A Duna 1519-1530 fkm szakaszán az áramlási sebességek abszolút értékei eloszlása, kalibráció után, [m/s] dimenzióban (Duna vízhozam: 8 790 m³/s – 2013. évi LNV) – EOV koordinátákkal

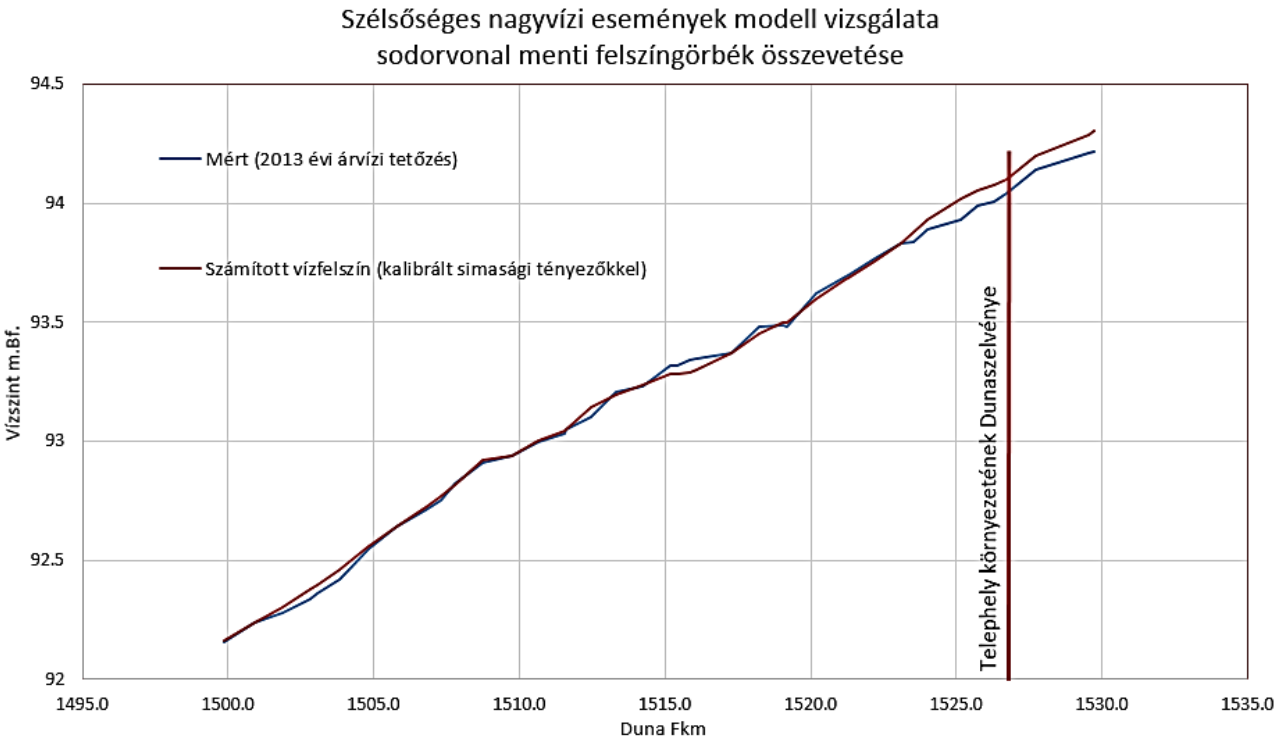


11.6.1-12. ábra: A Duna 1509-1519 fkm szakaszán az áramlási sebességek abszolút értékei eloszlása, kalibráció után, [m/s] dimenzióban (Duna vízhozam: 8 790 m³/s – 2013. évi LNV) – EOV koordinátákkal



11.6.1-13. ábra: A Duna 1500-1509 fkm szakaszán az áramlási sebességek abszolút értékei eloszlása, kalibráció után, [m/s] dimenzióban (Duna vízhozam: 8 790 m³/s – 2013. évi LNV) – EOV koordinátákkal

A 2013. év júniusi árvízi tetőzéskor mért és számított Duna vízfelszínek hossz-szelvényeit a 11.6.1-14. ábra szemlélteti.



11.6.1-14. ábra: Számított- és mért vízszint hossz-szelvények, a nagyvízi kalibráció után az 1500-1530 fkm Duna szakaszon - a 2013. évi árvízi tetőzés (LNV) mérési adatai alapján

11.6.1.2.3 Kisvízre vonatkozó kalibráció

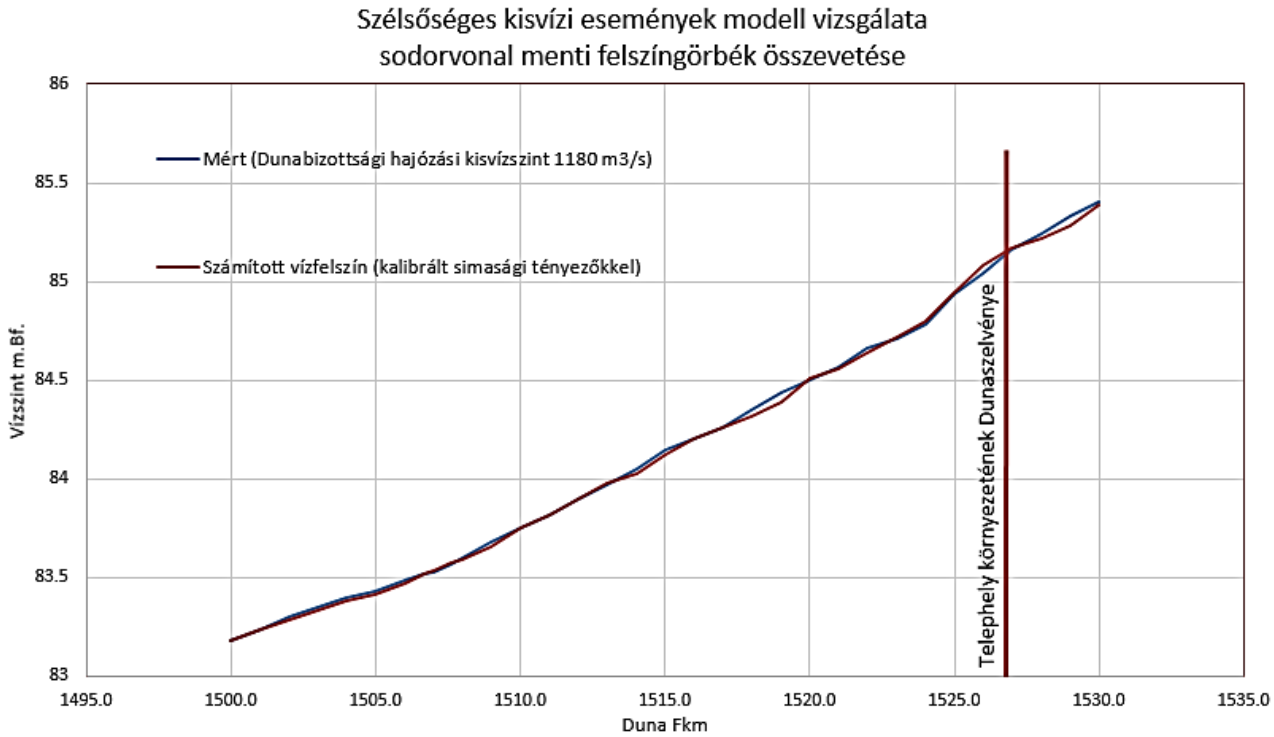
A vizsgált Duna-szakasz, Duna Bizottsági (DB) 1180 m³/s Duna vízhozamhoz tartozó hajózási kisvízszint (HKV) hossz-szelvényét, a kisvízi kalibráció segítségével arányosítottuk, a medersimasági tényező bearányosításával. A Duna szelvényre vonatkozó szakasz-információkat a 11.6.1-3. táblázat tartalmazza.

Duna [fkm]	Z (mért vízfelszín) [mBf]	Alapadatok
1499+000	83,12	
1500+000	83,18	3. Duna-szakasz
1501+000	83,24	Duna 1500 – 1509 fkm
1502+000	83,30	Q = 1180 m³/s
1503+000	83,35	
1504+000	83,40	
1505+000	83,43	
1506+000	83,49	Z0_sík = 83.00 mBf
1506+700	83,52	Z_alvíz = = 83.18 mBf
1507+000	83,53	
1507+600	83,57	
1508+000	83,60	
1509+000	83,68	
1510+000	83,75	2. Duna-szakasz
1511+000	83,82	Duna 1509-1519 fkm
1512+000	83,90	Q = 1180 m³/s
1513+000	83,97	
1514+000	84,05	
1515+000	84,15	Z0_sík = 83.50 mBf
1516+000	84,20	Z_alvíz = 83.68 mBf
1517+000	84,26	
1518+000	84,35	
1519+000	84,44	
1520+000	84,50	1. Duna-szakasz

Duna [fkm]	Z (mért vízfelszín) [mBf]	Alapadatok
1521+000	84,57	Duna 1519-1530 fkm Q = 1180 m³/s Z0_sík = 84.30 mBf Z_alvíz = 84.44 mBf
1522+000	84,66	
1523+000	84,71	
1524+000	84,78	
1525+000	84,94	
1526+000	85,04	
1527+000	85,16	
1528+000	85,24	
1529+000	85,33	
1530+000	85,40	
1531+300	85,45	

11.6.1-3. táblázat: Modellezett folyószakasz – DB hossz-szelvény: modellezési alapadatok

A számított és a Duna Bizottsági vízszintek egyezését kalibrálás után a 11.6.1-15. ábra)mutatja be – az egyezés nagyon jónak tekinthető. A kalibrált medersimasági tényező a nagyvízi kalibrálásnál meghatározottak szerint alakult.



11.6.1-15. ábra: Számított és mért vízszint hossz-szelvények összehasonlítása a kalibráció után, az 1500-1530 fkm Duna szakaszon - a Duna Bizottsági vízfelszín adatok alapján

11.6.2 EXTRÉM TERMÉSZETI- ÉS MŰVI KÖRÜLMÉNYEK HATÁSAINAK VIZSGÁLATA - 1D ÁRAMLÁSI MODELL BEARÁNYOSÍTÁSA

Az alábbiakban a felvízoldali vízszintszabályozó szerkezetek, extrém földcsuszamlások és jégjelenségek hatásának, (1D) modellvizsgálatának módszertanát foglaljuk össze.

11.6.2.1 Extrém természeti- és művi körülmények hatásainak vizsgálata a telephely árvízi érintettségére

11.6.2.1.1 A felvízoldali vízszabályozó szerkezetek meghibásodásának hatása

Jelen vizsgálat célja, hogy meghatározza az erőművi terület nagyvízi érintettségét, a lehetséges legkedvezőtlenebb árvízi esemény bekövetkezése esetén, a dunacsúnyi duzzasztómű átszakadásából, tönkremeneteléből adódó, többlet vízszintemelkedés figyelembe vételével. A legkedvezőtlenebb árvízi esemény alapjául, a múltban kialakult legkedvezőtlenebb tartós nagyvízi helyzet, a Duna pozsonyi szelvényében 1954 és 1965-ben levonult árhullám sorozat szolgált.

Az alapul vett árhullámok vízhozamait úgy módosítottuk, hogy az árhullám csúcs-vízhozama (máig még egyszer sem előforduló) legfeljebb 1 ‰-es valószínűségű (1 000 évente legfeljebb egyszer várható) vízhozamú legyen. (Megjegyezzük, hogy a rendszeresen észlelt napi adat a vízállás, amelyhez vízszintet rendelünk, míg a napi vízhozam adatok az ehhez tartozó, permanens esetben pontosabb, expedíciószerű mérések számításos feldolgozásával pontosított Q-H görbék alapján adódnak.) Mivel az 1 ‰-es valószínűségű árvízhozam, az árvízvédelmi töltések koronaszintje alatt maradt, lineárisan tovább növeltük a vízhozamokat úgy, hogy az árhullám vízhozam csúcsa, az árvízvédelmi töltés koronaszintjével színeljen, így az 1 ‰-esnél is kisebb valószínűségű terhelést kaptunk.

A Duna egész vízgyűjtőjét figyelembe véve, előzetes számítások, becslések alapján, a paksi Duna szakaszra legalább 20 000 m³/s árvízcsúcs adódna. Ez a becslés nem veszi figyelembe a tényleges összegyülekezési és levonulási folyamatokat szélsőséges, az árvízvédelmi műveket meghágó, tönkretevő szélsőséges árhullámok esetén. Ilyen helyzetekben a Duna folyam tározók sorozatává alakul, ahol a kiömlő alvízi szűkületek vízemésztése befolyásolja a tényleges árhullám levonulás menetét. Ez az eredmény megerősítette azt az empirikus következtetést is, hogy a paksi szakaszon a szélsőséges árvízszintek kialakulásához több egymásra torlódó árhullám együttes hatására, szélsőségesen nagy víztömegek hosszantartó levonulása idején kell számítanunk. Az észlelési idősorból az ilyen jelenségekre analóg példaként leginkább az 1954 és 1965-ös tavaszi-nyár eleji árvízi helyzet adódott, amely egyben a vizsgált szakaszon a valaha észlelt legmagasabb vízállásokat (LNV) is eredményezte.

A valós határfeltételeket figyelembe vevő szélsőséges forgatókönyv kialakításához a teljes vízrendszer vizsgálata helyett csak a Duna Kárpát-medencei szakaszával foglalkoztunk. A vizsgált szcenárió a Dévény-Pozsony szakaszon töltésszakadás nélkül átbocsátott árvízi vízhozamot veszi figyelembe. Az árvízi csúcs-vízhozamok statisztikai vizsgálatát az általánosított extrém érték eloszlás (GEV) és az általánosított Pareto eloszlás illesztésével vizsgáltuk. A szimulációs vizsgálatban figyelembe vettük a pozsonyi szakaszra kapott 1 000 éves árvizet, amelynek tetőzése 13 400 m³/s. Jelenleg a szlovák főváros árvízvédelmi rendszerét erre a szintre építik ki. Feltételezve az aktív védekezésből adódó többletet, illetve a biztonság oldalára felülbecsülve, a Bős alatti Vámosszabadi (Medve) szelvényre egy 14 000 m³/s csúcs-vízhozammal levonuló árhullámot tekintettünk bemenő értéknek. Az esetek többségében Pozsony / Bős alatt az árhullámok ellapulnak. Szélsőséges esetben (amire 2006-ban észlelési példával is találkoztunk) a tetőző vízhozamok lefelé haladva növekedhetnek. Az adott konstrukcióban a Duna árhulláma találkozik a mellékfolyók: Rába (Mosoni-Duna), Vág, Garam és Ipoly 1 %-os, megközelítőleg 100 éves visszatérési idejű árhullámával. A korábban végzett szimulációs vizsgálatok alapján ez nagyon ritka jelenségnek tekinthető, hiszen a csökkenő tetőző vízhozam nagy árhullámok esetén az esetek 80-90 %-ában érvényesül a Pozsony-Nagymaros szakaszon. Összességében az adott árhullám 10 000 évesnél ritkábbnak tekinthető.

A biztonság fokozására, az árhullám Vámosszabadiig való eljutása közbeni ellapulását figyelmen kívül hagyva vettük fel a hidrodinamikai modell felső peremfeltételéül ezt az árhullámot Vámosszabadinál. Majd ezt az árhullámot terheltük meg a Dunacsúnyi duzzasztómű lehetséges legkedvezőtlenebb (alvízi additív hullámot eredményező) módon történő tönkremenetelének figyelembe vételével, azaz a dunacsúnyi duzzasztótér teljes (az üzemi felső és alsó duzzasztási szint közötti) hasznos térfogata (110 millió m³) az üzemvíz-csatorna térfogatával együtt (190 millió m³), továbbá a kiömlés közbeni hozzáfolyással növelt, mindösszesen 293 millió m³ víztérfogat (VITUKI, 1992-1993), 2 nap alatt történő kiömlésével.

11.6.2.1.2 A Duna meder változását előidéző magaspart csuszamlások hatásainak vizsgálata

A partfalomlások, csuszamlások kiváltó okai

A Duna Budapest alatti magyarországi szakasza jórészt egy É-D irányú szerkezeti vonal mentén folyik. A folyó a jobb parton húzódó magaspart alámosásával geológiai időlépcsőben továbbra is nyugat felé vándorol. Ez a folyamat az alapvető oka a magaspart peremén kialakuló csuszamlásoknak, omlásoknak.

A második tényező maga a partfalat felépítő kőzet: a lösz. Ezek a tulajdonságok teszik lehetővé, hogy a folyó a vizsgált szakaszon 20-60 méter magas partfalakat alkosson, illetve hogy megfelelő körülmények esetén, viszonylag gyakran le is omoljon.

A Duna medréhez közeli partfal szakaszokra az ún. szeletes csuszamlás (suvadás) jellemző. Ez a tömegmozgási forma olyan lejtőkön, meredek falakon jön létre, ahol a lejtő stabilitása valamilyen oknál fogva megszűnik és egy csúszópálya mentén a partfal anyaga szeletekben lecsúszik, egészen addig, amíg a fal újra stabil, egyensúlyi helyzetbe nem kerül.

A Duna menti csuszamlások esetében az eseményt megelőző néhány hónapban rendszerint az átlagosnál több csapadék volt tapasztalható, ami felülről átáztatta a lösz réteget. Ezentúl jellemző volt a Duna hosszan tartó, magas vízállása, amit gyors apadás követett. Utóbbi tény oda vezet, hogy a jelenségek kisvízi, de nem szélsőségesen alacsony vízjárási helyzetben következnek be, hiszen nem több hónapos száraz időszakot követően fordulnak elő.

Több szerző megemlíti a csuszamlások kapcsán a földrengések szerepét. A földrengések azonban általában nem közvetlen kiváltó okai a csuszamlásoknak, inkább egyfajta előkészítő szerepük van a kőzettestben létrehozott repedésrendszerek révén.

Az egyes partfal szakaszok jelenlegi állapota és a dokumentált csuszamlások

Irodalmi források alapján 65 dokumentált csuszamlást lehetett detektálni 1862-ig visszamenőleg a Kulcstól Dunaszekcsőig húzódó szakaszon (lásd 11.6.2-1. ábra).

Vizsgálatunk szempontjából azok a falszakaszok fontosak, amelyek közel húzódnak a Duna medréhez, így egy esetleges omlás, vagy csuszamlás megváltoztathatja a mederkeresztmetszetet.

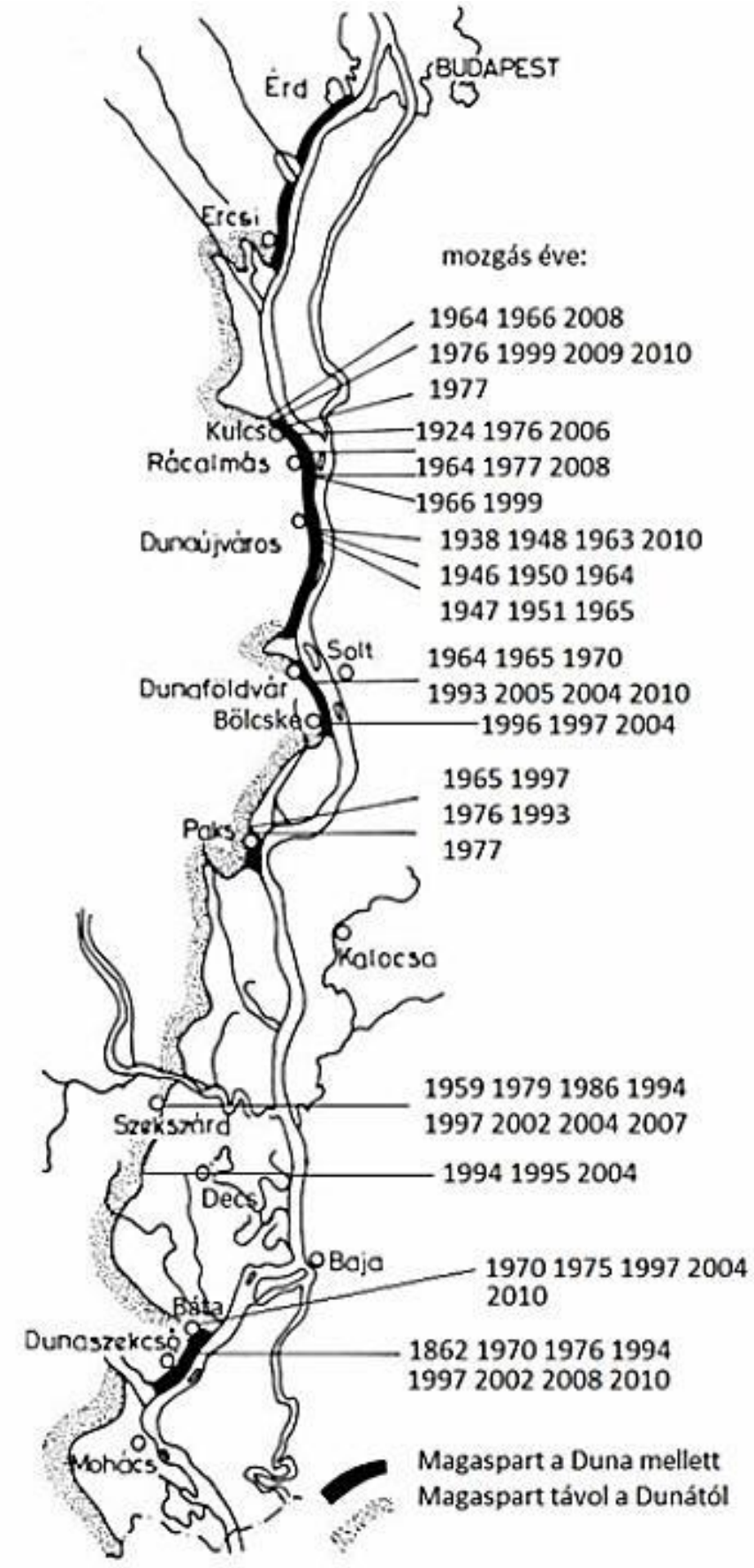
Az *érdi magaspart* 30-50 méter magas, közel függőleges falszakasz. A Duna közvetlenül rombolja a partfal lábát. Ezen a szakaszon több kisebb méretű omlást jegyzett fel a szakirodalom. Itt tehát a nagy tömegű csuszamlások nem jellemzőek.

Az *ercsi szakasz* általában 30-40 fokos lejtővel kapcsolódik a Dunához. A Duna medréhez közeli szakasz az 1618,3 fkm-től az 1613,4 fkm-ig húzódik. Itt a nagytömegű csuszamlás veszélye viszonylag csekély, részben a partvédelmi intézkedéseknek köszönhetően.

A *Kulcs-dunaújvárosi szakasz* mintegy 20 km hosszú. Az elmúlt évtizedekben itt voltak a legjelentősebb károkat okozó földmozgások. Kulcs község területén ma is több területet - mintegy három kilométer hosszan - omlásveszélyesnek minősítettek, melynek több mint egyharmada különösen veszélyes, már mozgásban lévő szakasz.

A *dunaföldvári szakasz* két részre osztható. A dunaföldvári hídtól északra alacsonyabb (kb. 20 méter) a partfal. Itt az omlás a jellemző tömegmozgás. A hídtól délre a magaspart magasabbra, 30-50 méterre emelkedik a Duna fölé. Itt már a szeletes csuszamlás az uralkodó. Itt, a hídhoz közel történt 1970. szeptember 15-én a mintegy 700 méter hosszú, 100-120 méter széles csuszamlás. A kimozdult kőzettest becsült térfogata kb. 1 millió m³ volt. A dunaújvárosi eseményhez hasonlóan a Duna medre itt is több száz méter hosszan deformálódott, de a dunaföldvári és paksi napi két vízállás észlelésből az omlás vízállásokra gyakorolt hatása nem állapítható meg egyértelműen.

A *dunaszekcsői szakasz* az egyetlen, Pakstól délre található, közvetlenül a Duna mellett magasodó partszakasz. Ez a szakasz is különösen instabil. Itt volt az utolsó nagyobb méretű csuszamlás 2008. február 12-én. 550 000 m³-nyi kőzettest kb. 520 méter hosszon és maximum 240 méter szélességben mozdult meg. Ennél az esetnél ismertek a Duna medrében beállt változásra vonatkozó adatok is. Eszerint legalább 37 000 m³ kőzet csúszott bele a mederbe, de nem több, mint 45 000 m³. Az arány a megmozdult összes kőzettömeg, illetve a mederbe jutó rész között feltehetően hasonló lehet a többi csuszamlásos esetben is. Ennek a csuszamlásnak egyébként sem a bajai, sem a mohácsi mércén kimutatható hatása nem volt.



11.6.2-1. ábra: Az elmúlt évtizedek partfal mentén dokumentált csuszamlásos esetei [11-30]

Jelenleg három olyan szakasz van a Duna mellett, ahol komoly csuszamlásveszély áll fenn. Ezek közül a kulcsi közvetlenül a főmeder mellett található. Itt elképzelhető egy mederdeformációval járó földcsuszamlás is, de tekintettel a Pakstól való távolságra, komolyabb hatással semmiképpen sem kell számolni. A Dunaújváros-táborállási szakasz távolabb esik a főmedertől, és bár itt is bármikor bekövetkezhet egy csuszamlás, a főmedret ez valószínűleg nem fogja érinteni. A harmadik, már jóval Paks alatt lévő dunaszekcsői veszélyzónában is számolni kell további csuszamlásokkal, de a közelmúltban bekövetkezettnél csak nagyságrenddel nagyobb tömegmozgás okozhat komolyabb mederelzáródást.

Mivel a legtöbb veszélyes szakaszt folyamatosan monitorozzák, illetve számos helyen jelenleg is partvédelmi munkák folynak, a paksi szakaszon érzékelhető vízhozam-csökkenést okozó, mederelzáródást okozó csuszamlás esélye rendkívül csekély, szélsőséges kisvízi helyzetben gyakorlatilag kizárható.

11.6.2.1.3 Jégdugó kialakulásának prognosztizálása, nagyvízi hatásának vizsgálata

Jelen modellvizsgálat célja, hogy meghatározza a Paksi Atomerőmű területének jeges nagyvízi érintettségét, az Erőmű alatt kialakuló jégdugó hatására, a lehető legkedvezőtlenebbnek ítélt jeges nagyvízi, illetve jégtorlasz vagy jégdugó által előidézett nagy vízszintemelkedés hatására kialakuló helyzetben (amely általában a téli időszak kis- és középvíz hozamú időszakában történt meg).

A ma már hatályon kívüli, „A folyók mértékadó árvízszintjeiről" szóló, 15/1997 (IX. 19.) KHVM rendeletben közzétett mértékadó árvízszinteket (MÁSZ) a Duna Esztergom alatti szakaszán, az addigi mérési adatok alapján megismert jeges nagyvízi helyzetek, míg az Esztergom feletti Duna szakaszon a nem jeges nagyvízi események determinálták. A Paksi Atomerőmű környezetében a Dunában kialakult mértékadó árvízszinteket, így tehát nem a jégmentes, hanem a jeges nagyvízszintek (gyakorlatilag az 1956-os jégtorlaszos időszak) határozták meg. A $MÁSZ_{1997}$ (95,31 mBf, a Duna 1526,5 fkm szelvényében) szintek határozták meg a kiépített árvédelmi művek koronaszintjeit is, az Atomerőmű környezetében az egy (1) méteres biztonság ($MÁSZ_{1997}$ + 1 m) tartásával.

2010. május 6-tól hatályba lépett „A folyók mértékadó árvízszintjéről" szóló 11/2010. (IV. 28.) KvVM rendelet, amely hatályon kívül helyezte a korábbi, 15/1997. (IX.19) KHVM rendeletet. Az új rendeletben, az elmúlt időszak tapasztalatai alapján megszűntették a jeges nagyvizek Esztergom alatti mértékadó szerepét, ezzel a jégmentes árvízszintek lettek a Paksi Atomerőmű térségében a mértékadó árvízszintek: $MÁSZ_{2010}$ (94,01 mBf, a Duna 1526,5 fkm szelvényében).

A feladat megoldására egydimenziós hidrodinamikai modellt kalibráltunk eredményesen a Duna Dunaújváros (1580,6 fkm) – Mohács (1446,9 fkm) szakaszára, az eddigi legkedvezőtlenebb, 1956. március 5-6-án kialakult jeges nagyvízszintek meghatározása érdekében (a Duna dunaújvárosi szelvényében 2 nap alatt 3,68 métert emelkedett az alvízen kialakult jégdugók miatt a jégfelszín).

A vizsgált Duna szakaszon mértékadó, az 1956-os jeges árvíz idején jégmegállásos helyek az alábbiak voltak:

Dunaföldvár	*1560,6 – 1558,0 fkm*
Harta	*1548,0 – 1546,0 fkm*
Siótorok	*1510,0 – 1489,0 fkm*
Baja (híd)	*1485,0 – 1480,0 fkm*
Sárospart	*1475,0 – 1470,0 fkm*

A modell hidraulikai beárányosítása jégmentes árhullám esetére:

Felső határfeltételként a dunaújvárosi szelvényben (Duna 1580,6 fkm) az 2006. április 1 - 20. közötti levonult árhullámnál kialakuló maximális vízhozamot vettük permanens állapotként. $Q_{Dunaújváros}$ = 8 460 m³/s. Alsó határfeltételként a mohácsi szelvényben (1446,9 fkm) adtunk meg vízszintet a rendelkezésre álló napi vízállás adatok alapján.

Egy, a természetben lejátszódó háromdimenziós, időben és térben is változó, turbulens hidraulikai folyamat 1D permanens numerikus modellezése csak közelítése a valóságnak. Gyakorlatban és a probléma kezelésére elfogadható pontossággal végezhetünk számításokat, ha a modellt beárányosítjuk.

A beárányosítás a vízmérce szelvényekben mért vízszintekre történt a főmeder, a bal- és jobb oldali hullámterek simasági együtthatóinak meghatározásával.

Az észlelt és a bearányosítás során számított vízszinteket az alábbi táblázatban adjuk meg (11.6.2-1. táblázat):

Vízmérce (Duna)	Duna [fkm]	$Z_{számított}$	$Z_{mért}$	ΔZ
		[mBf]	[mBf]	[cm]
Dunaújváros	1580,6	97,47	97,49	-2,0
Dunaföldvár	1560,6	95,75	95,79	-4,4
Paks	1531,3	93,95	93,98	-3,0
Dombori	1506,8	92,42	92,37	4,6
Baja	1478,7	90,52	90,50	2,4
Mohács	1446,9	88,50	88,50	0

11.6.2-1. táblázat: Mért és a bearányosítás során számított vízszintek

Bearányosítás az 1956-os jeges árvízre:

Az alkalmazott 1D hidraulikai modell jégdugó és zajló jég kialakulása esetén is használható. Mivel a jégdugó megadásánál több adat ismerete szükséges (jégdugó helye, vastagsága, kiterjedése, simasági együtthatója), a modell bearányosítása az 1956-os jeges árvízi eseményre történt.

Hasonlóan a hidraulikai bearányosításhoz itt is a simasági együtthatók meghatározásával történt a bearányosítás. A jégdugó vastagságának függvényében az alábbi simasági együtthatók (11.6.2-2. táblázat) felvételét ajánlja a program.

Jégdugó vastagság	Manning félesimasági együttható
[m]	[$m^{1/3}/s$]
0,1	0,015
0,3	0,04
0,5	0,05
0,7	0,06
1,0	0,08
1,5	0,09
2,0	0,09
3,0	0,10

11.6.2-2. táblázat: Manning féle simasági együttható

A bearányosítás során arra törekedtünk, hogy a Duna 1510 és 1565 fkm szelvények közötti szakaszán a vízszintek jó egyezést mutassanak. Az alsó és felső határfeltételek bizonytalansága miatt, a többi szakaszon nagyobb hibát is elfogadtunk.

11.6.2.2 Extrém természeti- és művi körülmények hatásainak vizsgálata a hűtővízkivételi biztonságra

11.6.2.2.1 Felvízszint-szabályozó műtárgy sérülésének, nem üzemszerű működésének hatása (1D)

A hűtővízkivételi biztonságra szélsőséges körülmények között hatással lehet a dunacsúnyi duzzasztómű nem-üzemszerű működése (havária események), amikor is a Duna kisvízi időszakában az előre leürített, mintegy 110 millió m³ (VITUKI, 1992-1993) térfogatú (a felső ás alsó duzzsasztási szint közötti) hasznos tározóteret folyamatosan tölteni kezdenék. Ez a nem-kívánatos folyamat csak szélsőséges kisvízi időszakban okozhat hűtővízellátási gondokat, illetve szükséges beavatkozásokat.

A tározó feltöltésére irányuló vízvisszatartás apadási, vagy depressziós hullámot indít el, amely a hűtővízkivétel területén érvényesíti vízszintsüllyesztő hatását. Minél kisebb vízhozammal történik a tározótér töltése, annál hosszabb az apadási hullám időtartama, egyben annál kisebb a vízszintsüllyedés mértéke. A tározó jelentősebb, a Duna kisvízhozamát megközelítő nagyságrendű vízhozammal történő feltöltése esetén, a kialakuló, majd levonuló apadási hullám vízszintsüllyesztésének mértéke is annál jelentősebb, míg az apadási hullám időtartama annál rövidebb.

Nem vizsgáljuk a bősi duzzasztómű és a rendkívüli kisvízi esemény együttes valószínűségének várható alakulását, ugyanis a bősi duzzasztómű kisvízi időszakban üzemszerű működésének időszakában, 1 000 m³/s Duna vízhozam alatt nem tarthat vissza vizet, a teljes érkező hozamot visszatartás nélkül engedik a Dunába folyni, elsősorban a Duna meder megfelelő élővíz-ellátásának, állékonyságának biztosítása érdekében. A rendkívüli dunai kisvízi eseményt, „A nukleáris létesítmények nukleáris biztonsági követelményeiről és az ezzel összefüggő hatósági tevékenységről” szóló 118/2011. (VII. 11.) Korm. rendelet előírásai alapján határoztuk meg.

A nukleáris biztonság fenntartása érdekében a tartós hűtés biztosításához szükséges hűtővíz akkor áll megfelelő biztonsági szinten rendelkezésre frissvízhűtés esetén, ha a minimális vízszint mellett a minimális vízhozam is rendelkezésre áll. A fenti kritérium teljesülését $5x10^{-5}$/év gyakorisági szinten (20 000 évenként visszatérő eseményként) vizsgáljuk, ahogyan a meteorológiai jellemzőkre előírtak is megkövetelik ($p = 5 \times 10^{-5}$ / év = 5×10^{-3} / 100 év).

Áramlási (1D hidrodinamikai HEC-RAS) modell alkalmazásával történő vizsgálat készült a dunacsúnyi (bősi) duzzasztómű nem-üzemszerű működtetése esetére, a Duna tartósan szélsőségesen kisvizes időszaka alatt, az Atomerőmű hűtővízkivételére gyakorolt nem-kívánt hatás kimutatása érdekében.

A legkedvezőtlenebb állapotot az idézi elő, amikor a valamilyen rendkívüli okból - amely nem üzemszerűnek tekintendő külső, nem tervezett tényezőktől függő haváriahelyzet -, a 110 millió m³ tározótér teljesen kiürült, és a Duna érkező hozama szélsőségesen kicsi. Ezek együttes előfordulási gyakorisága a Dunacsúnyi duzzasztómű üzemrend szerinti működése mellett zérus, a nem üzemrend szerinti üzemeltetés gyakorisága nem becsülhető.

Nem üzemrend szerinti (nem az üzemeltetési engedélyben engedélyezett üzemelési utasítás szerinti) a Dunacsúnyi duzzasztómű 1000 m³/s-nál kisebb vízhozammal történő vízeresztése, de haváriaeseményként megvizsgáljuk szélsőséges dunai kisvízkor a vízvisszatartás hatását. A Vízügyi Szolgálat a Medvei Duna szelvényben érzékeli a nemkívánt depressziós hullámok elindulását, így 1,5 - 2 napos időelőnnyel előre tudja jelezni annak Paksra érkezését is. Ebben az időtartamban javasolt, hogy a Paksi Atomerőmű és a tervezett Paks II. Atomerőmű üzemeltetője egyeztessen a Dunacsúnyi duzzasztómű üzemeltetőjével, az alkalmazott és a jövőben várható vízeresztési politika okáról, tájékoztatva egymást annak várható hatásairól. Az egyeztetésen az erőmű üzemeltetője ellenőrizheti az energiatermelési korlátozásokhoz vezető, rendkívüli vízeresztési üzemrend megalapozottságát és informűcióhoz juthat a rendkívüli üzemi állapotban szükséges intézkedéseket megalapozó döntések meghozatala tekintetében. Ha az egyeztetés eredménytelen és a Dunacsúnyi duzzasztómű nem üzemrend szerinti vízvisszatartásból adódó depressziós hullám a hűtővízkivételt veszélyezteti, akkor az Atomerőműnek a blokkok leállítását és a biztonsági hűtővízellátást kell operatívan megoldania. Vizsgáljuk tehát a dunacsúnyi duzzasztómű feltöltésének hatását rendkívüli helyzetben, szélsőségesen kicsi, érkező Duna vízhozam és teljesen leürült tározótér esetén, különböző vízvisszatartási stratégiák mellett. A Duna felvízi, tározó felé érkező, szélsőséges kisvízhozamát, az NBSZ szerint előírt szélsőséges hűtővízkivételi, illetve meteorológiai viszonyokra előírt valószínűségű eseményként határoztuk meg, a Duna 1868,7 fkm, pozsonyi vízmérce szelvényére: $Q_{érkező}$ =556 m³/s - Q(p=$5x10^{-5}$/év) valószínűségű, 20 000 évente visszatérő esemény. A kisvízi időszakban végrehajtott tározótöltés, a visszatartott vízhozam arányában változó mélységű, és változó időtartamú apadási hullámot idéz elő a tervezett telephely, Duna 1526,5 fkm szelvényének környezetére vonatkozóan.

Visszatartott vízhozam m³/s	**Depresszió időtartama nap**	**Apadási hullám vízszintsüllyesztésének mértéke cm**
10	127	~2
50	24	~12
80	13	~22
100	10	~25
150	8	~38
200	6	~50
250	4	~62

11.6.2-3. táblázat: A dunacsúnyi duzzasztómű nem-üzemszerű működtetése esetén vizsgált depressziós hullámok jellemzői, különböző vízvisszatartási (tározótöltési) stratégiák mellett

Vizsgáltuk a paksi vízmérce (Duna 1531,3 fkm) és a vízkivételi öblözeti (Duna 1527 fkm + hidegvíz-csatorna) vízmérce, összetartozó mért vízszintadatainak regressziós mércekapcsolatát, a teljes Duna vízjárás tartományában, a közép- és kisvízi tartományban, valamint a nagyvízi tartományban.

A vizsgálat eredményeként az alábbi összefüggések adódtak (Z [mBf]: vízszint):

- *Duna kisvízi (és középvízi) tartományában:* $Z_{Duna,\ 1531,3\ fkm} = Z_{Öblözeti} + 38$ *cm,*
- *Duna nagyvízi tartományában:* $Z_{Duna,\ 1531,3\ fkm} = Z_{Öblözeti} + 30$ *cm,*

A Duna átlagos felszínesése a Duna 1531,3 fkm és a Duna 1527 fkm szelvénye (hidegvízcsatorna Dunai torkolata) között átlagosan ~27 cm alakul (nagyvízkor ennél kisebb, kisvízkor ennél nagyobb, ugyanis a hullámtéri érdesség nagyobb, mint a főmedri). Megállapíthatjuk, hogy a ~27 cm Duna vízfelszineséshez nagyvízkor ~3 cm hidegvíz-csatorna

felszínesés szükséges (27+3=30), míg kisvízkor ~11 cm hidegvíz-csatorna felszínesés (27+11=38). A továbbiakban közelítésként ezt alkalmazzuk.

Az erőmű öblözeti vízmércéje és a Duna paksi vízmérce szelvénye (Duna 1531,3 fkm) között a vízfelszín ~38 cm-t esik. A hidegvíz-csatorna ellenállása a dunai torkolattól (a hidegvíz-csatorna medre mentén medersúrlódási-, és helyi veszteségek, pl. uszadékfogó) a vízkivételi műig, a Duna kisvízi időszakaiban ~11 cm.

Az Atomerőmű vízkivételi (hidegvíz-csatorna torkolat) Duna szelvényében (1526,5 fkm) a vízfelszín ~27 cm-t esik a paksi vízmérce szelvénynél (Duna 1531,3 fkm) mérthez képest, a Duna kisvizei idején.

A Dunacsúnyi duzzasztómű 1D hidrodinamikai modellvizsgálati eredményeit, a „Felvízszint-szabályozó műtárgy sérülésének, nem üzemszerű működésének hatása (1D)" című (11.9.2.2.1 számú) alfejezet tartalmazza.

11.6.2.2.2 Jégtorlasz, jégdugó hatására előálló helyzet hatásai

Jelen vizsgálat célja, hogy meghatározza az erőmű területének jeges, extrém kisvízi érintettségét, az erőmű vízkivétele felett kialakuló jégdugó hatására, a hűtővíz-kivételi biztonság alakulásának jellemzése érdekében

A jégdugó a jégtorlódás legextrémebb változata, mely a teljes vízfolyás keresztszelvényt elzárja. Ilyen esetben (legalábbis elméletben) az átfolyás egy időre megszűnik, az átfolyó vízhozam nullára csökken. Mindez az állapot addig áll fenn, amíg a jégdugó feletti folyószakaszon feltorlódó víz szintje eléri a jégtorlasz koronaszintjét és a víz át nem tud bukni a torlaszon. Ezután az alvízi szakasz vízhozama fokozatosan nő, majd eléri a kiindulási vízhozamot.

A célzott biztonsági felülvizsgálat keretében [11-68] is ezt az egyszerűsített modellt alkalmaztuk és nem foglalkoztunk a meder részleges elzárásával, a jégtorlasz felszakadásával, a jégtorlasz megkerülésével stb., melyek az alvízszintek gyorsabb, elzárást megelőző szintjeinek helyreállását eredményeznék. A vizsgálatok során – a jégtorlasz, illetve jégdugó modellezése érdekében – egy billenőtáblás duzzasztóművet helyeztünk el az 1527+025 fkm szelvényben, melynek a fenékszintje megegyezett a meder legmélyebb pontjával, szélessége pedig a keresztszelvény szélességével a bukó koronaszintjének magasságában. A jégdugót helyettesítő billenőtábla mozgatásával (felállításával) tudtuk modellezni a jégdugó mederelzáró hatását.

11.6.2.2.3 Partfalomlások, partfalcsuszamlások hatásainak vizsgálata

Mivel a legtöbb veszélyes Duna szakaszt folyamatosan monitorozzák, illetve számos helyen jelenleg is partvédelmi munkák folynak, ezért a paksi szakaszon érzékelhető vízhozam-csökkenést és mederelzáródást okozó csuszamlás esélye rendkívül csekély, szélsőséges kisvízi helyzetben gyakorlatilag kizárható. Még szélsőséges körülmények között sem várható a Duna kisvízi medrének a modellezettnél jelentősebb mértékű elzáródása.

Ennek ellenére modellvizsgálatunknál egy helyen történő földcsuszamlást feltételeztünk, amely a Paksi Atomerőmű vízkivétele felett alakulna ki.

11.6.3 HŐCSÓVA MODELLEZÉS - 3D HIDRODINAMIKAI ÉS TRANSZPORT MODELL BEARÁNYOSÍTÁSA

11.6.3.1 A jelenlegi mértékadó hőterhelési állapot, illetve a fejlesztés elmaradásának esete

A Paksi Atomerőmű a felmelegedett technológiai hűtővizét a jelenlegi állapot szerint a meglévő melegvíz-csatornán keresztül vezeti a Dunába (1526+250 fkm jobb part).

A Paksi Atomerőmű teljes kapacitású üzemi hűtővízigénye 25 m³/s blokkonként (4 blokk összesen legfeljebb: 100 m³/s).

A Paksi Atomerőmű üzemidő hosszabbítási engedéllyel 2037-ig üzemel, a blokkok az üzemidő hosszabbítás ütemezése szerint 2032-től 2037-ig állnak le. A jelenlegi állapot fennmaradása, vagyis a tervezett fejlesztés elmaradása esetén, az alábbi blokk kilépési ütemezéssel és melegvízhozam kibocsátással lehet számolni:

Időszak [évek]	Kibocsátandó legnagyobb melegvíz hozam Q [m³/s]	Üzemelő blokkok száma [db]
2013-tól – 2032-ig	100	4 meglévő blokk
2032-től – 2034-ig	75	3 meglévő blokk
2034-től – 2036-ig	50	2 meglévő blokk
2036-től – 2037-ig	25	1 meglévő blokk
2037-től	0	-

11.6.3-1. táblázat: Melegvíz kibocsátás alakulása a jelen állapot fennmaradása esetén

A jelenleg hatályos, „az atomenergia alkalmazása során a levegőbe és vízbe történő radioaktív kibocsátásokról és azok ellenőrzéséről” szóló 15/2001. (VI. 6.) KöM rendelet szerint a melegvíz kibocsátás szelvénye alatt 500 méterrel folyásirányban elhelyezkedő Duna szelvény, 1525+750 fkm a referencia szelvény (elnevezése: +500 m).

Meghatározó az üzemelés szempontjából, hogy a Duna háttérhőmérséklete (T_{Duna} [°C]) mekkora és hogyan alakul a kibocsátás alatti +500 m-es referenciaszelvényben:

$$T_{Duna} + \Delta T_{Hőlépcső} - \Delta T_{Elkeveredés} \leq T_{Határérték},$$

ahol:

$T_{Határérték}$: 30 °C,

$\Delta T_{Hőlépcső}$: 8 °C (a 6. fejezetben van részletesen ismertetve, a 15/2001. (VI. 6.) KöM rendelet szerint),

$\Delta T_{Elkeveredés}$: A hőterhelés Dunában történő elkeveredése által okozott lehűlés mértéke a hivatkozott jogszabályban előírt +500 m-es Duna referenciaszelvényében. A hőterhelés hatására a Duna referenciaszelvényében kialakuló hőmérséklet-eloszlásnak, a Duna vízhőmérséklethez viszonyított maximális hőmérsékletnövekménye.

A fenti egyenlőtlenséget átrendezve, T_{Duna} dunai vízhőfokoknál teljesülnek a környezetvédelmi előírások:

$$T_{Duna} \leq T_{Határérték} - \Delta T_{Hőlépcső} + \Delta T_{Elkeveredés},$$

Ebben az egyenlőtlenségben $\Delta T_{Elkeveredés} = \Delta T_{Elkeveredés}$ (Q_{Duna}), azaz a lehűlés mértéke a Duna vízhozamának függvénye. A modell és a mérések azt mutatják, hogy ez az érték a sebességtér változásai miatt – a Duna kis, illetve középvízközeli (2300 m³/s) kisvízhozamok tartományában, azaz 1850 m³/s alatt - viszonylag független a vízhozamtól, ezért mértékadóként az 1500 m³/s Duna vízhozammal számolunk.

Hidrodinamikai- és hőtranszport-számítások szerint, Paksi Atomerőmű mértékadó, négyblokkos üzeme esetén (mértékadó melegvízhozam: 100 m³/s), a $\Delta T_{Elkeveredés}$ értéke sok tényezőtől függően kismértékben változik. A 2014. évi mértékadó helyzeben, 8 °C-os hőlépcső esetén, a melegvíz kibocsátás alatt 500 méterrel ~4 °C-kal csökken. Ez azt jelenti, hogy a Duna 26 °C vízhőmérséklete esetén, a melegvízkibocsátás 34 °C-os értéke, a Dunában 30 °C-ra csökken, a kialakuló hőcsóva maximális hőmérsékletének vonalában (máshol kisebb a vízhőmérséklet, 26 és 30 °C közötti).

A Duna vízhőmérsékletének időbeli emelkedése miatt, a fejlesztés elmaradása esetén 2032. évben mutatkozik egy hőterhelés tekintetében mértékadó helyzet, amikor a melegvízhozam 100 m³/s és a Duna mértékadó vízhőmérséklete 26,38 °C. Későbbiekben – 2032-től 2037-ig -, a blokkok kb. 2 évenkénti ütemezett kilépése miatt, a hőterhelés már nem lesz mértékadó. Mivel a Duna mértékadó vízhőmérséklete a 26 °C-ot meghaladja az üzemidő hosszabbítás végéig, így az 500 méteres referenciaszelvényben a 30 °C túllépése lenne várható, intézkedés nélkül.

A biztonság javára ezért mértékadóként előzetesen, a Duna 25 °C vízhőmérsékletét vesszük alapul, a várható évenkénti intézkedési időtartam meghatározásában.

11.6.3.2 A tervezett fejlesztés megvalósulása esetén mértékadó hőterhelési állapotok felvétele

A tervezett új blokkok felmelegedett technológiai hűtővizét a Duna 1526+450 fkm szelvényének jobb partján, a jelenlegi bebocsátási hely felvízi oldalán, a meglévő melegvíz-csatornától északra, ~200 méterre kialakítandó új bevezetési ponton keresztül vezetik majd a Dunába, rekuperációs műtárgyon keresztül.

A tervezett 2 x 1200 MW-os új blokkok maximális üzemi hűtővízigénye blokkonként 66 m³/s (2 új blokk összesen: 132 m³/s).

A Paksi Atomerőmű és a tervezett fejlesztés üzemelésének ütemezését a 11.6.3-2. táblázatban összegezzük.

Időszak [évek]	Melegvízhozam maximuma [m³/s]	Üzemelő blokkok száma [db]	Mértékadó időpontok [év]	Duna becsült legnagyobb éves vízhőmérséklete [°C]
2014. (Jelen)	100	Paksi Atomerőmű 4 meglévő blokk	2014. év	25,61 [°C]
2014-től – 2025-ig	100	Paksi Atomerőmű 4 meglévő blokk		26,10 [°C]
2025-től – 2030-ig	166	Paksi Atomerőmű 4 meglévő blokk + 1 új blokk		
2030-től – 2032-ig	232	Paksi Atomerőmű 4 meglévő blokk + 2 új blokk	2032. év	26,38 [°C]
2032-től – 2034-ig	207	Paksi Atomerőmű 3 meglévő blokk + 2 új blokk		
2034-től – 2036-ig	182	Paksi Atomerőmű 2 meglévő blokk + 2 új blokk		
2036-től – 2037-ig	157	Paksi Atomerőmű 1 meglévő blokk + 2 új blokk		
2037-től – 2085-ig	132	2 új blokk	2085. év	28,64 [°C]
2085-től – 2090-ig	66	1 új blokk		
2090-től	0	-		

11.6.3-2. táblázat: Melegvíz kibocsátás (Q m³/s) alakulása a tervezett fejlesztés megvalósulása esetén, a Duna várható évi legnagyobb vízhőmérsékletével (T_{Duna}, °C) a mértékadó üzemi időpontokban

A Duna erőmű szelvénybeli maximális vízhőmérsékletére 2014. évi induló értékként, a trendanalízis eredményeként (+1,2°C) 25,6 °C-ot vettünk fel, lineáris trendjének meredekségét pedig a klímamodellekből kapott 0,04 °C/év-re, 2120-ig kiterjesztve.

A felmelegedett technológiai hűtővíz a bevezetést követően a Duna vizével elkeveredik. Az elkeveredés többlépcsős folyamat, térbelisége alapján megkülönböztetünk mélység menti, kereszt- és hosszirányú elkeveredést, melyet alapvetően befolyásolnak a Duna áramlási és hőmérsékleti viszonyai. Eszerint a kritikus, mértékadó állapotot az alacsony vízhozam és a Duna háttérhőmérséklete, illetve ezek egybeesése határozza meg. Korábbi tapasztalatok és elvégzett méréseink alapján elmondható, hogy a kritikus vízhozam és a nagy háttérhőmérsékletek előfordulása jellemzően nem esik egybe, a kritikus hőmérsékletek a kis-közép vízhozamoknál (1 500 – 1 850 m³/s között) fordulnak elő, ezért a jelen, illetve a jövőbeli mértékadó hőterhelési állapotok leírásához Duna vízhozamként, az 1 500 m³/s–ot választottuk.

A tervezett fejlesztés megvalósulása esetén, a jövőben 2032. és 2085. években várhatók a Duna mértékadó terhelési állapotai, ugyanis 2032. év után a meglévő blokkok ütemezetten kilépnek, a melegvízterhelés térfogatáramát jelentősen lecsökkentve (2 évente 25 m³/s-mal csökken). 2085. évet követően szintén jelentősen lecsökken a melegvízterhelés vízhozama (132 m³/s-ról 66 m³/s-ra). A melegvízterhelések térfogatárama jelentősebb mértékben csökken, mint ahogy a Duna háttérvízhőmérséklete növekszik, ezért lesz mértékadó a 2032. és 2085. év.

A 2032. és 2085. évi mértékadó hőterhelési helyzetekben, a Duna vízhőmérsékletének időbeli növekedése és a Paksi Atomerőmű jelenlegi mértékadó vízhozamának (100 m³/s) meghaladása miatt, az elkeveredés hatékonysága, illetve a hőmérséklet csökkenés mértéke várhatóan ~4 °C-ról, kb. 2 °C-ra csökken. A 30 °C-os határérték tartása - az 500 méteres Duna referenciaszelvénynél -, tehát 8 °C hőlépcső esetén ~26 °C, míg a 2032. és 2085. évi mértékadó terhelési állapotokban ~24 °C Duna vízhőmérséklet alatt lehetséges.

Az intézkedést (helyszíni monitoring mérések indítása, majd a szükséges döntés meghozatala az esetleges beavatkozásra) igénylő Duna vízhőmérsékleteket a fentiek miatt, előzetesen 23 °C-ra (Paksi Atomerőmű + Paks II. együttes és Paks II. önálló üzemekor) és 25 °C-ra (Paksi Atomerőmű) vesszük fel, a biztonság javára.

Megvizsgáljuk későbbiekben, az adott Duna vízhőmérséklet túllépésének évente átlagosan várható, napokban kifejezett időtartamait, vagyis a túllépési tartósságokat, a jelen állapotban és a jövőbeli mértékadó hőterhelési állapotokra, a klimatológiai forgatókönyvek alapján. A vizsgálat kiterjed a Duna vízhőmérséklet 20 °C – 30 °C közötti tartományára (1°C-onként), és a Duna 800 m³/s – 3500 m³/s közötti vízhozam tartománya (100 m³/s-onként).

A hőterhelés szempontjából kritikus elkeveredési állapotok (amely figyelembe veszi a klímaváltozás következtében előforduló magasabb háttérhőmérsékleteket is) a következő paraméterekkel jellemezhetők:

2014-es mértékadó állapot

- a Duna háttérhőmérséklete (T_{Duna}) T_{Duna} = 25,61 °C,
- A Paksi Atomerőmű hűtővíz hozama (q) 100 m³/s,
- a felmelegedett hűtővíz a jelenlegi bevezetési helyen ömlik a Dunába,
- hőmérséklete (i) ($T_{melegvíz}$)=33 °C, illetve (ii) külön megvizsgáltuk a 8 °C hőlépcsőt alkalmazó bebocsátást ($T_{melegvíz}$=T_{Duna}+8 °C = 33,61 °C),

2032-es mértékadó állapot

- T_{Duna} = 26,38 °C,
- A Paksi Atomerőmű és Paks II. egyidejű működése folytán $q_{jelenlegi}$=100 m³/s a jelenlegi bebocsátási helyen és $q_{jövőbeli}$=132 m³/s a jövőbeli, jelenlegi bebocsátási hely felvízi oldalára tervezett bebocsátási helyen ömlik a Dunába, rekuperációs műtárgyon keresztül: (i) $T_{melegvíz}$ = 33 °C, illetve (ii) $T_{melegvíz}$ = 34,38 °C,

2085-ös állapot

- T_{Duna} = 28,64 °C,
- $q_{jövőbel\ i}$= 132 m³/s a jövőbeli, jelenlegi bebocsátási hely felvízi oldalára tervezett bebocsátási helyen ömlik a Dunába, rekuperációs műtárgyon keresztül: (i) $T_{melegvíz}$ = 33 °C, illetve (ii) $T_{melegvíz}$ = 36,64 °C.

Duna hőmérsékleti határértékének betartása érdekében alkalmazható kiegészítő intézkedések

Kiegészítő intézkedések:

- Duna hőmérsékletének rendkívüli monitoringja (hidegvíz-csatorna felett, a melegvíz kibocsátás környezetében és a referenciaszelvényben),
- a blokkok visszaterhelése,
- vagy kiegészítő hűtési lehetőségek,
- vagy blokk leállások

válhatnak szükségessé, a nem-kívánt esemény bekövetkezésének várható időtartama alatt.

Kiegészítő hűtési lehetőségek:

- kiegészítő dunai vízkivétel hűtési céllal,
- utóhűtés, utóhűtő rendszer kiépítésével.

Az új blokkok kiegészítő hűtési lehetőségeinek hőtechnikai elemzése is megtörtént. A jelenleg ismert feltéterendszer alapján a kiegészítő intézkedésekre vonatkozóan elvégzett elemzések szerint a blokkok visszaterhelése a leggazdaságosabb megoldás, így a továbbiakban a kiegészítő hűtési lehetőségek vizsgálatával nem foglalkozunk.

A továbbiakban, klimatológiai modelleredményekre támaszkodva megvizsgáljuk a Duna 500 méteres referenciaszelvényében előírt 30 °C hőmérsékleti határérték betartásához szükséges, jövőben várható intézkedési időtartamok hosszát (évente, napokban).

11.6.3.1 A hőcsóva számításánál alkalmazott 3D hidrodinamikai és hőtranszport modellek bemutatása

A hőterhelés számítások elvégzéséhez kétféle modellt alkalmaztunk:

I. a kibocsátáshoz közeli elkeveredési zónában egy permanens (időben állandósult) 3D hidrodinamikai és hőtranszport modellt hoztunk létre (OpenFOAM) a Duna 1528 – 1526 fkm szelvényei közötti Duna mederterületen,

II. a távolabbi elkeveredési zónában, melynek alsó határa egybeesik a déli országhatárral (Duna 1433 fkm) pedig egy kvázi 3D transzport modellt (CORMIX) alkalmaztunk, egydimenziós hidrodinamikával.

Közeli elkeveredési zóna 3D (OpenFOAM) modell

Az **OpenFOAM** (Open Field Operation and Manipulation) egy ingyenes, nyílt forráskód hozzáférésű CFD szoftver. A szoftver rendkívül széles körű modellezési jellemzőkkel rendelkezik, melyek alkalmassá teszik komplex áramlástani folyamatok modellezésére. Ezek a jellemzők tulajdonképpen megegyeznek a Fluent és az ANSYS szoftverek jellemzőivel. Szolgáltatásai azonosak az igen költséges szoftverek által nyújtott szolgáltatásokkal, szükség esetén könnyedén továbbfejleszthetők a C++ nyelven megírt, véges térfogaton alapuló permanens és nem-permanens modellek.

A szoftvert a kibocsátástól számított 3 km-es szakaszt modellezésére alkalmaztuk.

A modellszámítási feladatok összefoglalása

- mederfelmérésből kiindulva geometriai modellt építése a Dunába történő bebocsátás környezetében mintegy 3 km-es Duna szakaszon, (2012. évi Duna mederfelmérés)
- a számítási terület végeselem cellarendszerének meghatározása a numerikus számításokhoz,
- a modell bemeneti értékeinek meghatározása a peremfeltételek és kezdeti értékek megadásával, (a felső peremfeltételi sebességeloszlás meghatározása érdekében 2D áramlási modellel számítottuk a Duna 1531,3-1519 fkm szakaszának permanens áramlási mezőjét, a River2D szabadfelhasználású modellel)
- a modell kalibrálása mérési eredmények felhasználásával,
- a modell alkalmazása a kitűzött feladatok megoldásához,
- modellszimulációs eredmények feldolgozása.

Távoli elkeveredési zóna "semi" 3D (CORMIX) modell

CORMIX (Cornell Mixing Zone Expert System) ingyenes, az USEPA-CEAM által fejlesztett hidrodinamikai elkeveredési modell és döntés-előkészítő rendszer. A szoftver lehetővé teszi a szennyező anyag elkeveredésének szimulációját, elemzését és a vízminőségi előírásokat kielégítő kibocsátási paraméterek tervezését. Elterjedten használják ipari és kommunális szennyvizek, hőszennyező kibocsátók hatósági engedélyezési eljárásában. A szoftver analitikusan számolja a csóva jellemzőit 3D-ben és szöveges segítséget ad a kialakult elkeveredési folyamat leírásában és elemzéséhez. A rendszer három alrendszerből áll, melyek különböző kibocsátási típusokat kezelnek, továbbá adat előkészítő és elemző alrendszerekkel egészül ki.

A szoftvert a hőkibocsátás és az országhatár által lehatárolt területen kialakuló hőcsóva jellemzőinek a számítására alkalmaztuk.

A modellszámítási feladatok összefoglalása

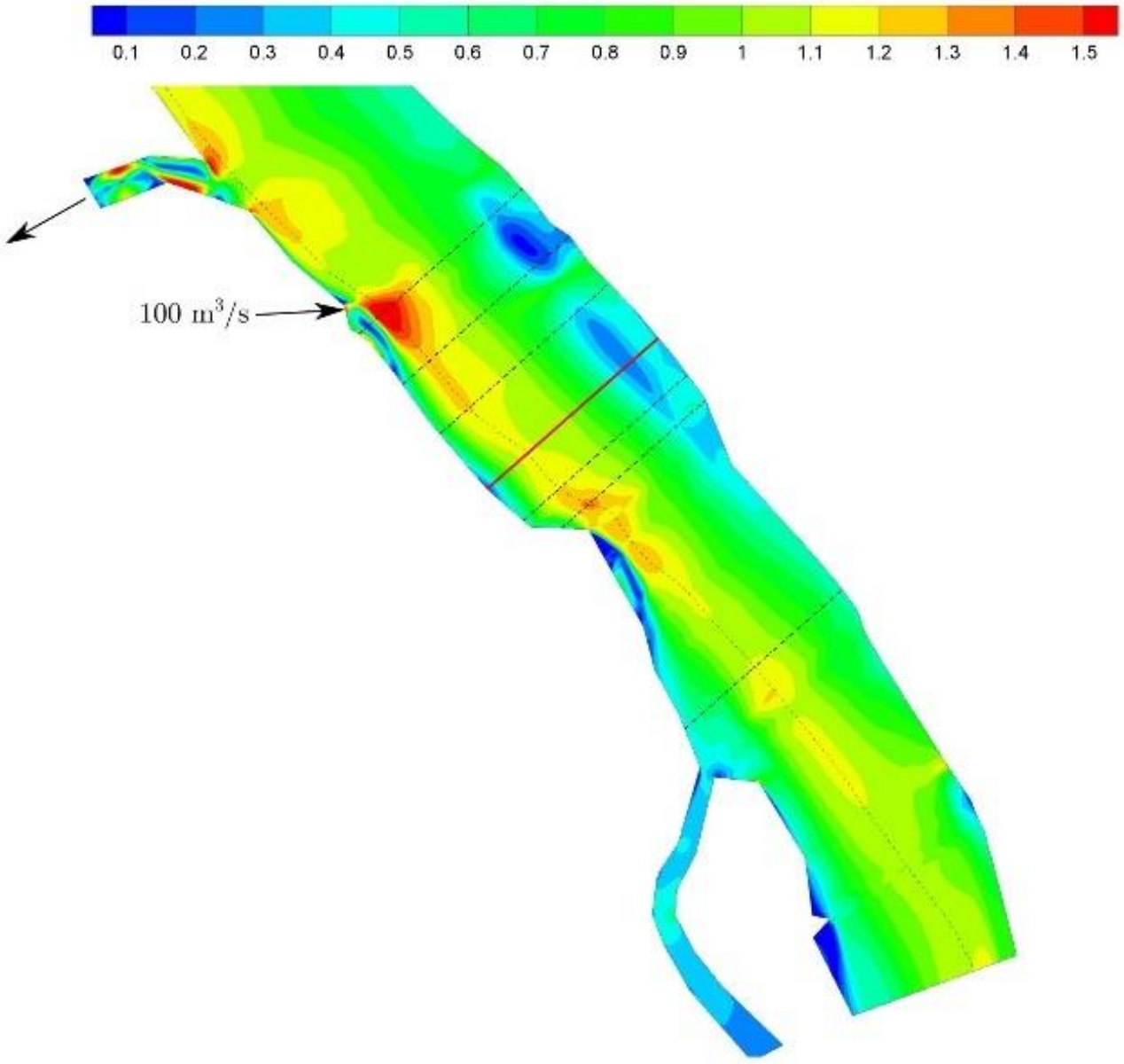
- mederfelmérések felhasználásával geometriai modell építése a Dunába történő bebocsátás és a déli országhatár által lehatárolt Duna szakaszra,
- a modell bemeneti értékeinek meghatározása a peremfeltételek és kezdeti értékek megadásával,
- a modell kalibrálása, mérési eredmények és a 3D-s (OpenFOAM) szimuláció eredményeinek felhasználásával,
- kibocsátási esetek modellszámítása,
- modellszimulációs eredmények feldolgozása.

Megjegyezzük, hogy a melegvíz a dunai bevezetésének helyétől (Duna 1526,25 fkm) a déli országhatár szelvényéig (Duna 1433 fkm), mintegy ~93 km utat tesz meg a Duna mederben, átlagosan 24 nap alatt - a Duna középvíz hozamánál (2300 m³/s) kisebb Duna vízhozamoknál az utazási idő növekszik. A melegvíz Dunába történő bevezetését déli 12 órára vettük fel (a paksi vízmérce napi hőmérséklet adatainak éves maximumaira illeszkedő trendjét 1,2 °C fokkal megnöveltük a hidegvíz-csatorna szelvényében, a déli órákra), így a melegvíz 12 óra körül lép ki az országból. Az éjszakai napsugárzás hiányának és a léghőmérséklet csökkenésnek a hűtő hatását figyelembe vettük a számítások során.

11.6.3.2 Az áramlási és hőtranszport modell bearányosítása

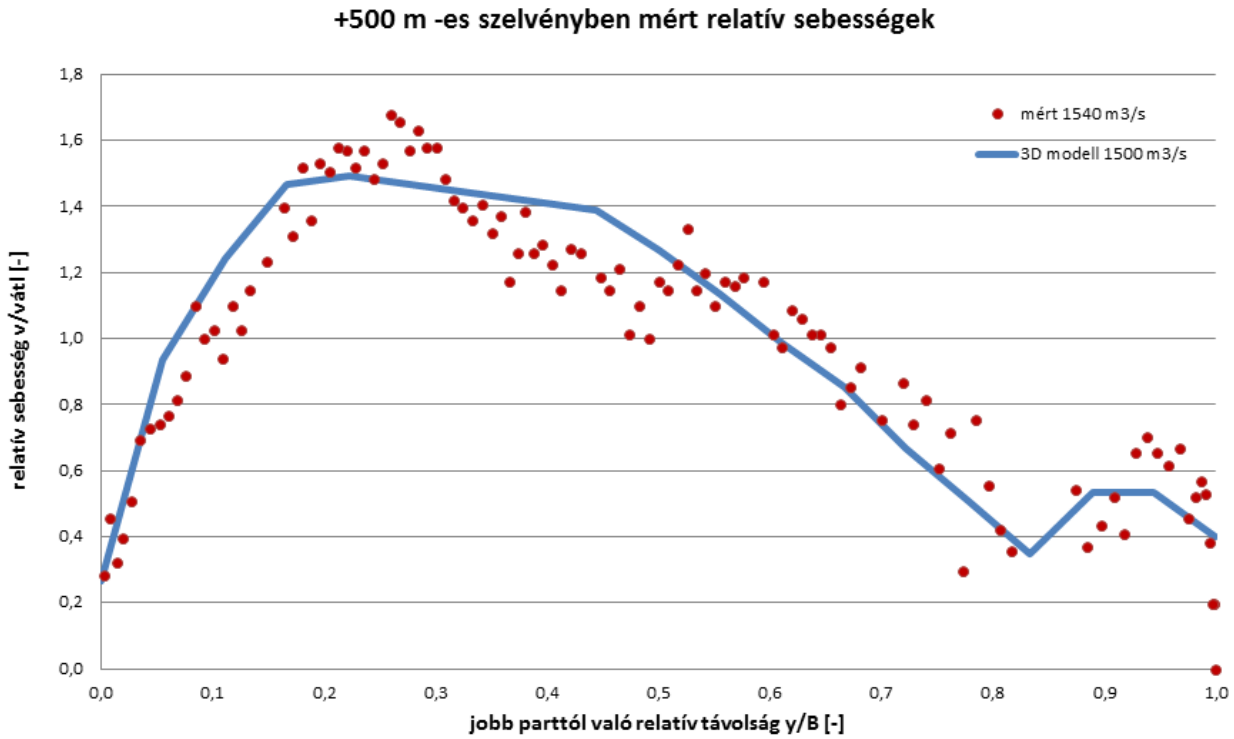
11.6.3.2.1 A 3D áramlási és hőtranszport (OpenFOAM) modell bearányosítása

A jelen állapotra elvégzett hidrodinamikai számítások alapján megállapítható, hogy a 100 m³/s-os hűtővíz mennyiség bevezetése lokálisan impulzustöbbletet jelent (*11.6.3-1. ábra*), mely az elkeveredésre nézve kedvező hatást gyakorol. A Duna és a bevezetés sebességkülönbsége a turbulens diffúziót növeli. Az eltérő irányú sebességvektorok az örvények keletkezésének kedveznek. A Duna sodorvonala a hűtővíz bevezetésének helyénél a jobb part felé húzódott, amely azt jelenti, hogy a Duna által szállított víztömeg nagy része is itt található. Az elkeveredés számára kritikus, hogy a melegvízcsóva a Duna vízhozamának minél nagyobb részével keveredjen, ezért fontos, hogy a hűtővíz olyan szögben érkezzen a Dunába, hogy ott keresztirányban minél jobban be tudjon hatolni. Ez a kezdeti szakasz a csóva későbbi sorsát alapvetően befolyásolja.



11.6.3-1. ábra: Felszín közelében kialakuló sebességeloszlás (Duna mért vízhozama 1540 m³/s; hőlépcső 8 °C) – 2014. évi mértékadó állapot ($T_{Duna,max}$=25,61 °C)

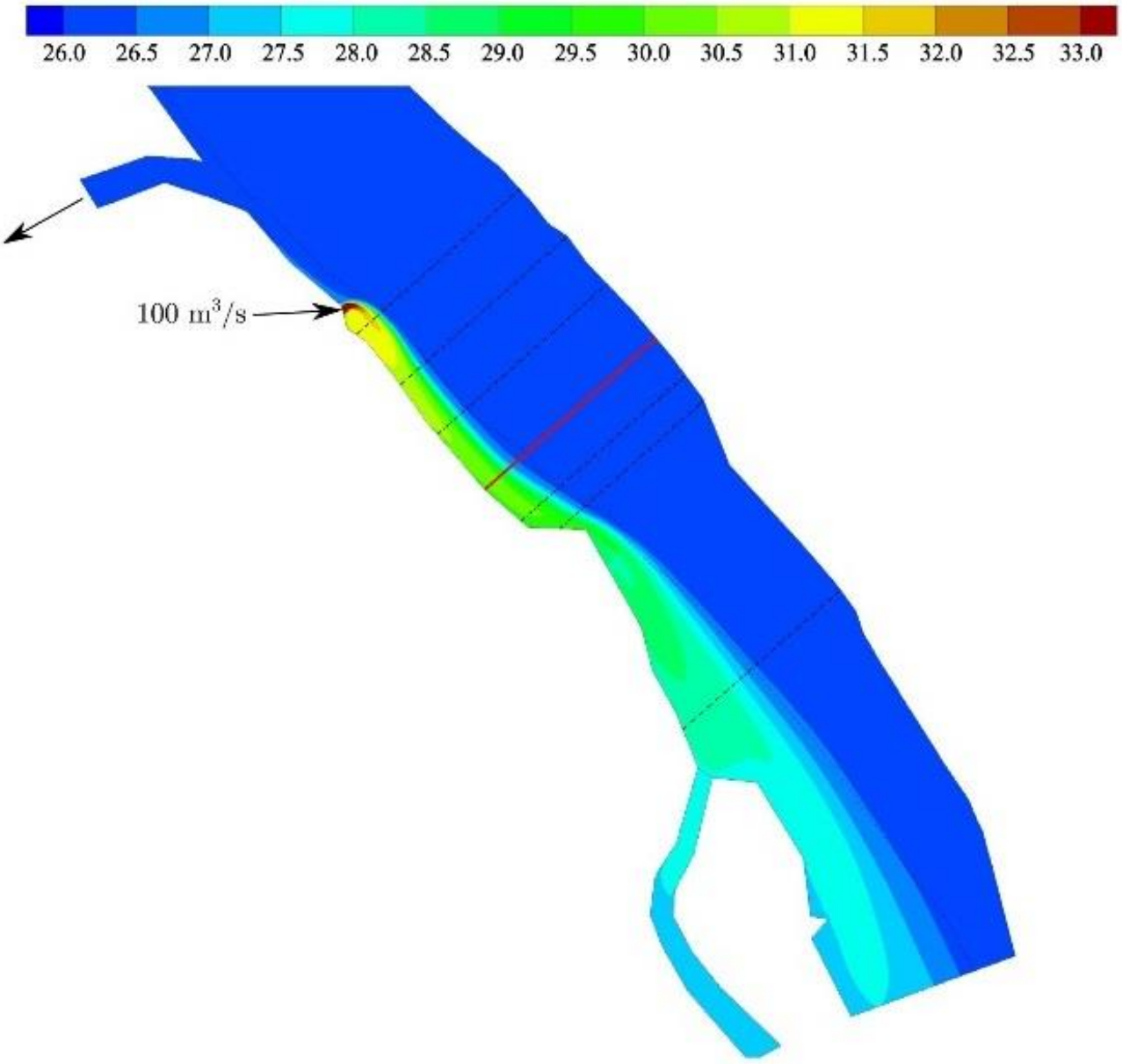
Az elkeveredést segítő szakaszok a bevezetés alatt a sarkantyúnál és keresztgátnál találhatók. Ezzel szemben a sarkantyú és a keresztgát között a sekélyebb részeken pangó zónák jönnek létre. Ezekben a régiókban a kis sebesség mellett az elkeveredést az is gátolja, hogy a hűtővíz, mintegy falat képezve a Duna vízzel szemben, nem engedi azt behatolni ide. A +500 m-es szelvényben mérhető sebesség-eloszlás alapján is elmondható, hogy a jobb parton a hűtővíz belépése és a keresztgát között kisebb sebességek alakulnak ki (11.6.3-2. ábra). A modell- és a mérési eredmények összehasonlításához relatív sebességeket képeztünk, mivel azok ugyan közeli, de mégsem teljesen ugyanazon vízhozamhoz tartoznak. A relatív sebességek képzéséhez az adott sebességkomponenst osztottuk a középsebességgel. Megfigyelhető a mérési pontok szórása és a modell „simasága", de mindemellett megállapítható a jó egyezés.



11.6.3-2. ábra: A +500 m-es referencia szelvényben mért és számított relatív áramlási sebességek, a relatív távolság (y/B [-]) függvényében - ahol: B [m] a Duna keresztszelvényének szélessége, $Q_{Duna,\ mért}$ = 1540 m³/s)

A 8°C-os hőlépcsővel számoló változat hőcsóváját a 11.6.3-3. ábra mutatja, ahol jól látható, hogy a csóva a jobb parthoz simul. Továbbá megfigyelhető, hogy jelentős hőmérsékletcsökkenés az előbb tárgyalt jelenségek miatt, a belépésnél és a keresztgátnál következik be.

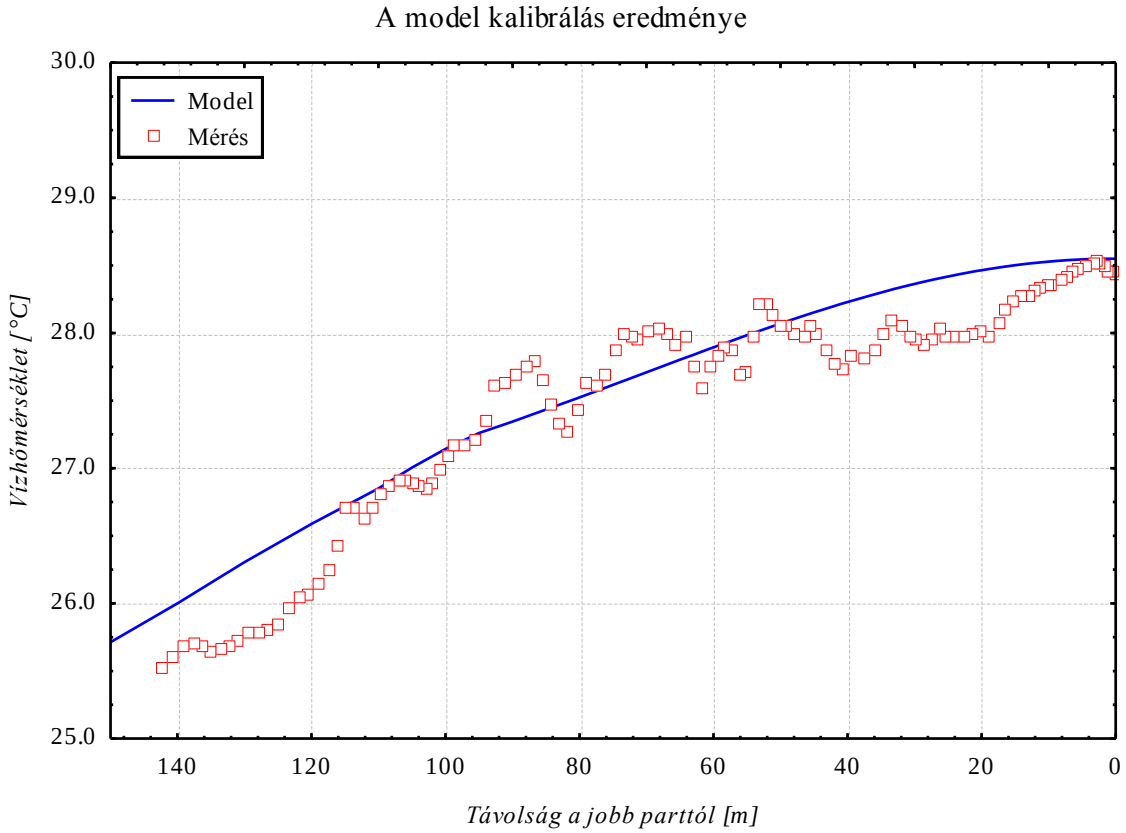
A hőcsóva Duna referencia szelvénybeni (kibocsátási szelvény + 500 m) maximális hőmérsékletét, a korábbi mérések alapján ellenőriztük. A kibocsátásnál mért vízhőmérséklethez képest ~4 °C csökkenést mértek az ellenőrző mérések során, a dunai háttér 25 °C feletti vízhőmérsékleténél. A mért és számított eredmények jó egyezése miatt a hőtranszport modellt kalibráltnak tekintjük.



11.6.3-3. ábra: Hőcsóva, 8°C-os hőlépcső (Duna mért vízhozama 1540 m³/s) – 2014. évi mértékadó állapot ($T_{Duna,max}$=25,61°C)

11.6.3.2.2 A "semi" 3D hőtranszport (CORMIX) modell bearányosítása

A +500 m-es szelvénytől az országhatárig terjedő Duna szakaszon (Duna 1525,75 - 1433 fkm) a hőcsóva jellemzőinek számítására az analitikus kvázi 3D CORMIX modellt alkalmaztuk. Első lépésben a megépített modellt kalibráltuk a rendelkezésre álló keresztszelvény irányú mérési adatokhoz. A kalibrálás eredményességét mutatja, hogy a modellezett eredmények kielégítően egyeztek a mérési eredményekkel. A 11.6.3-4. ábra a modellezett értéknek, a 2013. év augusztusi mérésekkel történő összehasonlítását mutatja. A hossz-szelvény irányú kalibrálást a 3D-s (OpenFOAM) modell eredményeinek felhasználásával végeztük el.



11.6.3-4. ábra: A CORMIX modell kalibrálásának eredménye (+500 m; 2013. augusztus)

11.6.4 A DUNA MEDRÉNEK MORFODINAMIKAI MODELLVIZSGÁLATA

11.6.4.1 Lebegtetett és görgetett hordalékmozgás egydimenziós (1D) modellvizsgálata

Korábban részletesen vizsgálták (VITUKI Nonprofit Kft., 2011.), hogy a Duna érintett szakaszának egyensúlyi hordalékhozama milyen morfodinamikai modell alkalmazásával jellemezhető egydimenziós modellel.

Általánosságban nagyon sok paraméter játszik szerepet a hordalékszállítás mértékének meghatározásában:

- a vízfolyás mélysége,
- a vízfolyás szélessége
- a középsebesség,
- az energiavonal esése,
- a jellemző szemcseátmérő,
- a víz sűrűsége,
- a hordalék anyagának a sűrűsége
- a hordalékszemcse alakja,
- a hordalék összetétele (szemeloszlása),
- a víz hőmérséklete.

Az Amerikai Hadmérnöki Kar és az Amerikai Vízkészletgazdálkodási Intézet mérnökeiből létrehozott Hidrológiai Mérnöki Központ (HEC) által kifejlesztett HEC-RAS egydimenziós hidrodinamikai program hordalékszállítás számítására létrehozott modulját használták a modellezési feladatok elvégzéséhez. A hordalékszállító képesség számítása a hordalék szemösszetétele alapján történik, ezáltal lehetőség nyílik a szállítás alatti osztályozódás és a mederpáncélozódás szimulálására is. A modell felépítéséből adódóan alkalmas teljes folyóhálózatok modellezésére, a nagy árvízi események által okozott maximális kimélyülések becslésére, a mederkotrások hatásának előrejelzésére, a

zátonyképződések vizsgálatára. A hordalékszállítás számításához a szakirodalomban található különböző egyenletek felhasználására volt lehetőség.

A HEC-RAS számítási módszer a hordalékszállító képesség meghatározására az ismert hidraulikai paraméterek és hordalék tulajdonságok esetén alkalmazható. A kapott hordalékszállítás mind a görgetett, mind a lebegtetett hordalék mennyiségét tartalmazta.

A görgetett hordalék a mederfenéken csúszva, gördülve mozog. Az érintkezés a mederfenékkel állandónak mondható. Előfordul, hogy a fenéken csúszó, gördülő hordalékszem egy-egy nagyobb hordalékszemen vagy más akadályon átugrik, ilyenkor a mederfenékkel való érintkezés rövid időre és távolságra megszakad. A görgetett hordalék mozgásánál egyik legfontosabb kérdés annak a határállapotnak a meghatározása, amelynél a fenéken nyugvó hordalékszem éppen megindul, valamint a görgetve szállított hordalék mennyiségének ismerete. A görgetett hordalék mozgása történhet sima mederben, de homokos mederanyag esetén homokhullámok, dűnék vagy antidűnék kialakulása kíséri mozgását.

A Duna folyam magyarországi szakaszán, a tartós kis- és középvízi időszakokban a mederanyag un. „páncélozódásra", tömörödésre, a hordalékszemeket összetartó kohéziós erők megnövekedésére képes, a kritikus fenékcsúsztató feszültség nagyságának növekedését idézve elő, ami a nagyvízi időszakokban is ellen tud állni a medereróziós folyamatok dominálásának. Szélsőséges nagyvízi, árvízi helyzet esetén a páncélozódott meder is képes fellazulásra, felszakadásra, ezzel komolyabb medermélyülési, átrendeződési folyamatokat elindítva.

A lebegtetett hordalék mozgását a görgetettel szemben az jellemzi, hogy a hordalékanyag a vízben lebegve, a vízsebességgel közel azonos sebességgel mozog. A lebegtetett hordalékmozgás folyamatosabb, mint a görgetett hordalékmozgás, azonban a hordalékot lebegésben tartó erő állandóan változik, ezért a lebegtetve szállított hordalék szemcseösszetétele és mennyisége állandó változásnak van kitéve.

Az amerikai értelmezés szerint a hordalék kétféle meghatározása ismert a származási helye és a szállítás módja alapján:

- bed material load: a hordaléknak az a része, amely főleg a turbulencia következtében marad lebegésben, annak csökkenésekor kiülepszik és anyaga elsősorban a folyó saját medréből és partjaiból származik.
- wash load: a lebegtetett hordaléknak a mederanyagnál jóval finomabb szemcséjű része, amely a duzzasztás nélküli folyószakaszokon állandó mozgásban van, és kiülepedés nélkül átmegy a vizsgált szakaszon. A mennyiségét elsősorban a folyó vízgyűjtőterületéről származó kimosott hordalék határozza meg. Ennek a hordalékfrakciónak a szemátmérője függ az áramlás turbulencia jellemzőitől, az áramlási sebességek nagyságától.

Amennyiben a felülről érkező hordalék mennyisége nem haladja meg a folyó hordalékszállító képességét, a lebegtetett hordalék a meder változtatása, feltöltődése nélkül vonul le. Ezzel szemben a mederfenékre rakódó, vagy onnan kimosódó hordalék megváltoztatja a meder alakját.

A hordalékszállítás modellezésének alapegyenlete (Exner folytonossági egyenlet):

$$\left(1-\lambda_p\right)B\frac{\partial \eta}{\partial t}=\frac{\partial Q_s}{\partial x}$$

ahol:

B	mederszélesség,
η	medermélység,
λp	aktív réteg porozitása,
t	idő,
x	távolság,
Q_s	hordalékhozam.

Az egyenlet szerint a meder keresztmetszeti változása a vizsgált szakaszon a beáramló és kiáramló hordalékhozam különbségével egyenlő.

A hordalék folytonossági egyenlet a hordalékszállító képesség meghatározása segítségével oldható meg. Abban az esetben, ha a hordalékszállító képesség nagyobb, mint a bejövő terhelés (a hordalék utánpótlás mértéke), akkor hordalékhiány jelentkezik, amely a meder eróziójához, kimélyüléséhez vezet, amennyiben azt természetes

páncélozódás, vagy mesterséges burkolat nem védi. Ha a hordalék utánpótlódás nagyobb, mint a hordalékszállító képesség, azaz a készlet meghaladja a kapacitást, akkor hordaléktöbblet jelentkezik és az a meder feltöltődését okozza.

A folytonossági egyenlet szerint tehát a vizsgált mederkeresztszelvények környezetében a bemenő és a kimenő terhelés összehasonlításra kerül. A bejövő hordalék mennyiségét a hordalék utánpótlódásának mértéke határozza meg (görgetett hordalék, lebegtetett hordalék). A kimenő hordalék mennyisége az a hordaléktömeg, amit a víz a vizsgált szakaszon mozgásba hozni, illetve szállítani képes. A hordalékhozam különbsége arányos a mederváltozással, amely a vizsgált szakasz minden egyes keresztszelvényének környezetében meghatározásra kerül.

A hordalék szállítását a vízfolyás és a hordalék számos mérhető és nem mérhető fizikai tényezője befolyásolja. A vízfolyás hordalékszállító képességének folytonosságát meghatározó tényezők:

- a hordalék szemösszetétele,
- a hordalékszállítási potenciál,
- feltöltődési képesség: ülepedési sebességgel és hatékony szállítási mélységgel van összefüggésben
- eróziós képesség: a kimozdító erővel, a szemcseosztályozódási és a mederpáncélozódási hajlammal van összefüggésben.

A hordalékszállítás mértékét a hidraulikai paraméterek és a hordalék tulajdonságai határozzák meg. A szállítási kapacitás minden egyes szemcseméret esetében meghatározásra kerül. A teljes hordalékszállítás:

$$g_s = \sum_{i=1}^{n} g_{si} \cdot p_i$$

ahol:

g_s a teljes hordalékszállítás,
g_{si} az i-edik frakció hordalékszállítása,
p_i az i-edik frakció szemcsemérete,
n a szemcseosztályok száma az összetételben.

A hordalék anyagának szemcseméret osztályozása (Amerikai Geofizikai Unió alapján):

A hordalék anyaga	Szemcseátmérő [mm]	Közepes geometriai szemcseátmérő [mm]
Agyag (clay)	0,002 – 0,004	0,003
Nagyon finom iszap (very fine silt)	0,004 – 0,008	0,006
Finom iszap (fine silt)	0,008 – 0,016	0,011
Közepes méretű iszap (medium silt)	0,016 – 0,032	0,023
Durva iszap (coarse silt)	0,032 – 0,0625	0,045
Nagyon finom homok (very fine sand)	0,0625 – 0,125	0,088
Finom homok (fine sand)	0,125 – 0,250	0,177
Közepes méretű homok (medium sand)	0,250 – 0,5	0,354
Durva homok (coarse sand)	0,5 – 1,0	0,707
Nagyon durva homok (very coarse sand)	1,0 – 2,0	1,41
Nagyon finom kavics (very fine gravel)	2,0 – 4,0	2,83
Finom kavics (fine gravel)	4,0 – 8,0	5,66
Közepes méretű kavics (medium gravel)	8,0 – 16,0	11,3
Durva kavics (coarse gravel)	16,0 – 32,0	22,6
Nagyon durva kavics (very coarse gravel)	32,0 – 64,0	45,3
Kicsi görgeteg (small cobbles)	64 – 128	90,5
Nagy görgeteg (large cobbles)	128 – 256	181
Kicsi kőgörgeteg (small boulders)	256 – 512	362
Közepes kőgörgeteg (medium boulders)	512 – 1024	724
Nagy kőgörgeteg (large boulders)	1024 – 2048	1448

11.6.4-1. táblázat: A hordalék anyagának szemcseméret osztályozása (Amerikai Geofizikai Unió alapján)

A Duna hordalékszállító képességének érzékenység vizsgálata:

Prizmatikus mederben, permanens vízmozgás esetén számolták az egyensúlyi hordalékhozamot, a potenciális hordalékszállító-képességet, Gt, [kg/s]. A vizsgálatok a lebegtetett hordalékhozam számítására terjedt ki.

A Duna vizsgált szakaszán előforduló geometriai és hidraulikai, valamint fenékanyag paraméterek jellemző értékei változásának hatását vizsgálták (VITUKI Hungary Kft., 2011.) a potenciális (egyensúlyi) teljes hordalékszállító-képességre.

A vizsgált jellemzők és azok intervallumai:

- Q, vízhozam [1 000 m³/s – 6 000 m³/s] között, 4 diszkrét értékkel,
- B, víztükör szélesség [456 m – 800 m] között, 8 diszkrét értékkel,
- azonos (homogén) hordalék
- d, hordalék szemátmérő [0,707 mm – 5,66 mm] között, 4 diszkrét értékkel,
- szemeloszlással jellemezhető (inhomogén) hordalék
- dg, jellemző átmérő [0,64 mm – 3,79 mm]között, 3 féle eloszlás,
- So, mederfenék esés [4 cm/km – 10 cm/km] között, 5 diszkrét értékkel,

A fenti jellemzők felvétele után már származtatott értékek voltak a következők:

- H, hidraulikus középmélység [2,44 m – 7,57 m]között, 8 diszkrét értékkel,
- v, szelvény középsebesség [0,60 m/s – 1,59 m/s] között, 8 diszkrét értékkel.

Prizmatikus medret feltételezve, a fenti paraméterekből a Duna vizsgált szakaszára jellemző kombinációkat állítottak össze. Mindegyik kombinációra 5 féle hordalékszállítási összefüggéssel lefutatták a felépített morfológiai modellt.

A vizsgált hordaléktranszport egyenletek (ezek a 2D és 3D modellekben is alkalmazott egyenletek):

d) Ackers-White (AW-vel jelölve az alábbi ábrákon),

e) Engelund-Hansen (E–H),

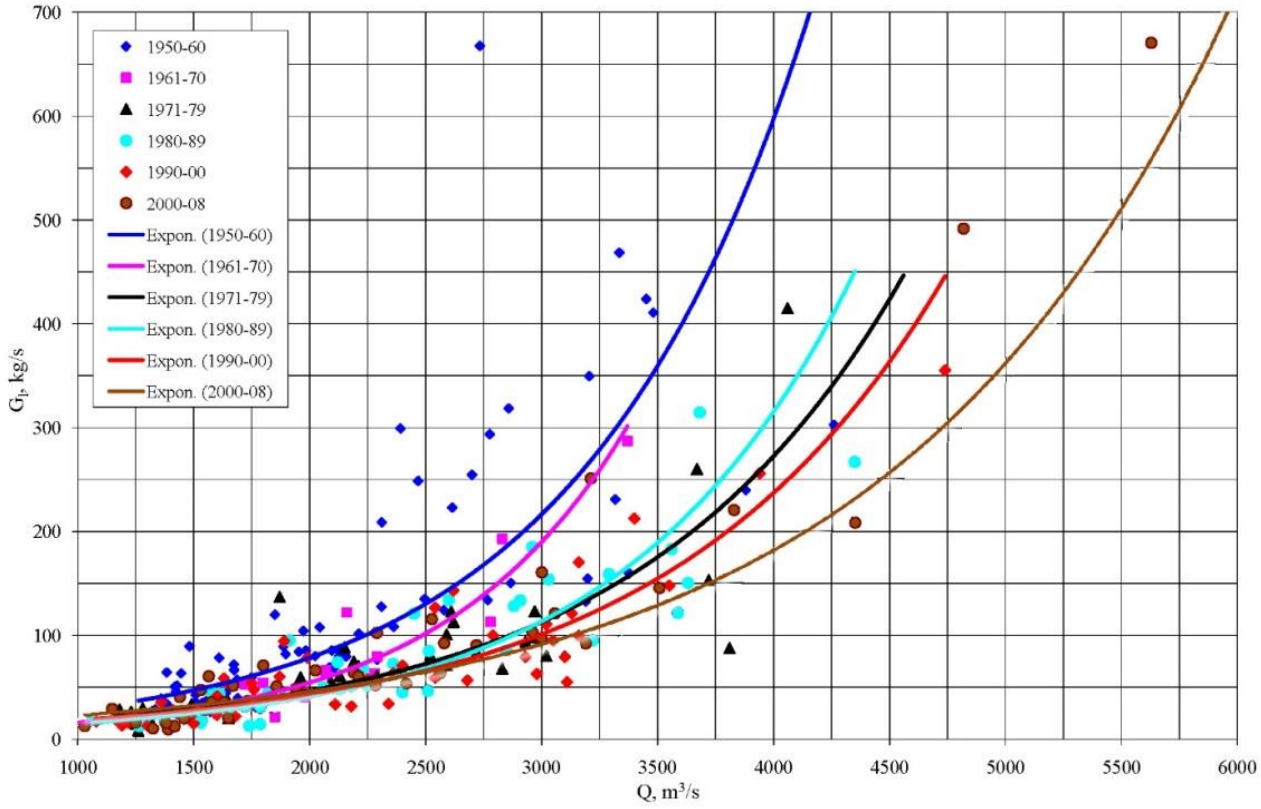
f) Laursen-Copeland (L–C),

g) Toffaleti (Tof) és

h) Yang-féle (Yang) transzport egyenletek.

A Duna dunaújvárosi szelvényére rendelkezésre álló, az 1950-2008 évek közötti lebegtetett hordalékhozam mérések:

A 267 db mérés alapján dekádokra meghatározták a hordalékhozam-vízhozam kapcsolatokat. A 11.6.4-1. ábra jól mutatja a lebegtetett hordalékhozam folyamatos csökkenését. Az egyes dekádok mért pontjaira az összehasonlítás érdekében mindig azonos, exponenciális függvény kapcsolatot illesztettek. Az általános tendenciától eltérő, fordított tendencia csak 1971-1979 és 1980-1989 években a nagyobb vízhozam tartományokban fordult elő. A kis Q-k tartományában a kapcsolati görbék nagyon bizonytalanok, a mért pontok nagy relatív szórása miatt.



11.6.4-1. ábra: A Duna Dunaújvárosnál mért lebegtetett hordalék hozama (1950-2008) és az adatok dekádonkénti kiegyenlítő vonalai

A 2000-2008 évekre meghatározott függvénykapcsolatból (exponenciális és hatvány görbéből) számították a különböző vízhozamokhoz tartozó 'mért' hordalékhozamokat. Ugyanakkor, a dunaújvárosi szelvényre Bogárdi J. (1955, 1971) adatközlése (VITUKI mérései) alapján vízállás-lebegtetett hordalékhozam (Gs) grafikus kiegyenlítő görbéje alapján is meghatározták a hordalékhozamokat (11.6.4-2. táblázat):

Duna Q [m³/s]	1000 m³/s	2500 m³/s	4000 m³/s	6000 m³/s	Megjegyzés:
Hordalékhozam Gs [kg/s]	~7 kg/s	150 kg/s	800 kg/s	7000 kg/s	1931-40. (Bogárdi, 1955)
	~7 kg/s	188 kg/s	1019 kg/s	4365 kg/s	1950-53. (Bogárdi, 1971)
	~23 kg/s	65 kg/s	182 kg/s	722 kg/s	2000-2008 exponenciális
	~10 kg/s	87 kg/s	263 kg/s	682 kg/s	2000-2008 hatvány görbéről.

11.6.4-2. táblázat: A Duna mederanyagának és lebegtetett hordalékának összesített szemeloszlása, a Duna 1524-1527 fkm szakaszán, a Duna vízhozamának függvényében

Megjegyezzük, hogy az igen nagy szórást mutató mérési pontok között még az elmúlt 60 év alatt sem volt 2000 kg/s-nál nagyobb mért érték, (pedig $Q_{Duna,\ max}$ > 8500 m³/s is előfordult). Ez kérdésessé teszi Bogárdi J. alapján [11-10] 6000 m³/s-ra adott – kiegyenlítő görbékről leolvasott – értékek mai érvényességét, ugyanis 1950 óta lényegesen lecsökkent a hordalékhozam.

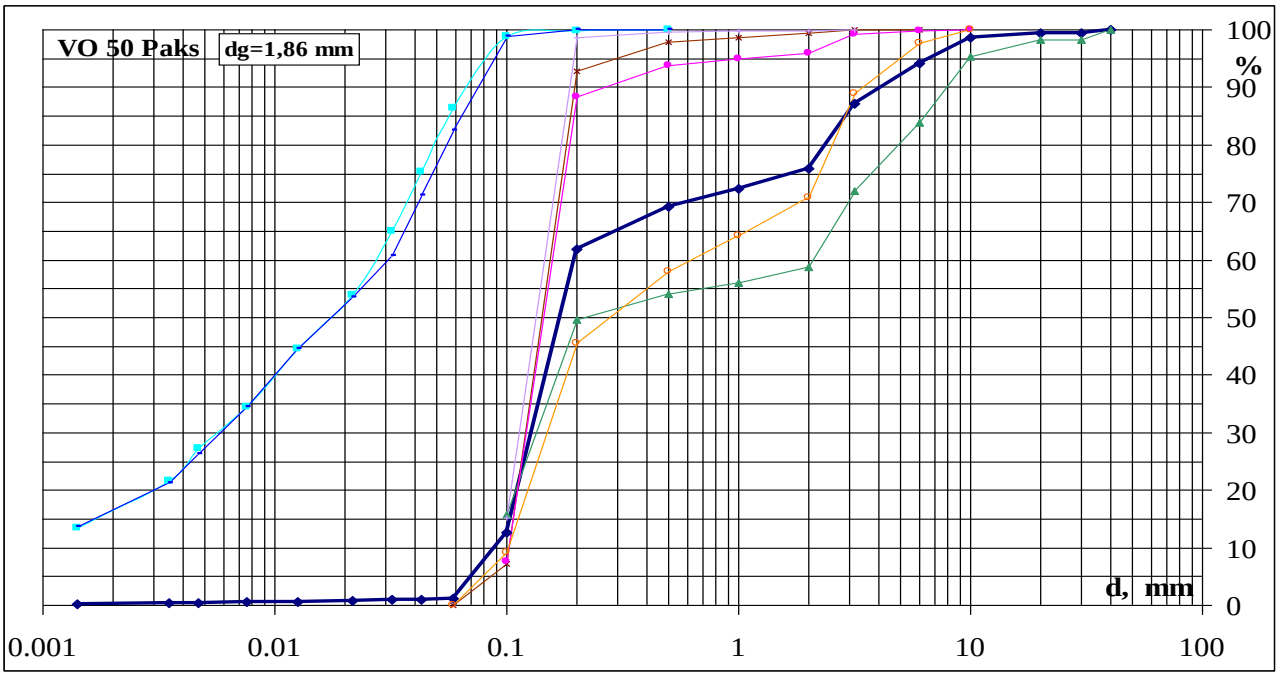
A szelvény középsebesség változásának hatása a hordalékhozamra:

Az érzékenység vizsgálathoz a Duna 50-61. VO (vízrajzi osztály) szelvényeiben (1513,88–1536,35 fkm) a 2009. évben vett mederanyag minták adatait használták. Kidolgoztak egy módszert, amellyel keresztszelvényenként az adott, több eloszlási görbéből elő lehet állítani a keresztszelvényre átlagosan jellemző – közelítő – egyetlen eloszlást. Három keresztszelvény (az 50., 51. és 60. VO) mért szemeloszlási görbéit használták a vizsgálatokhoz, belőlük előállították a teljes szelvényre jellemzőnek elfogadott átlagos szemeloszlást.

Ezek:

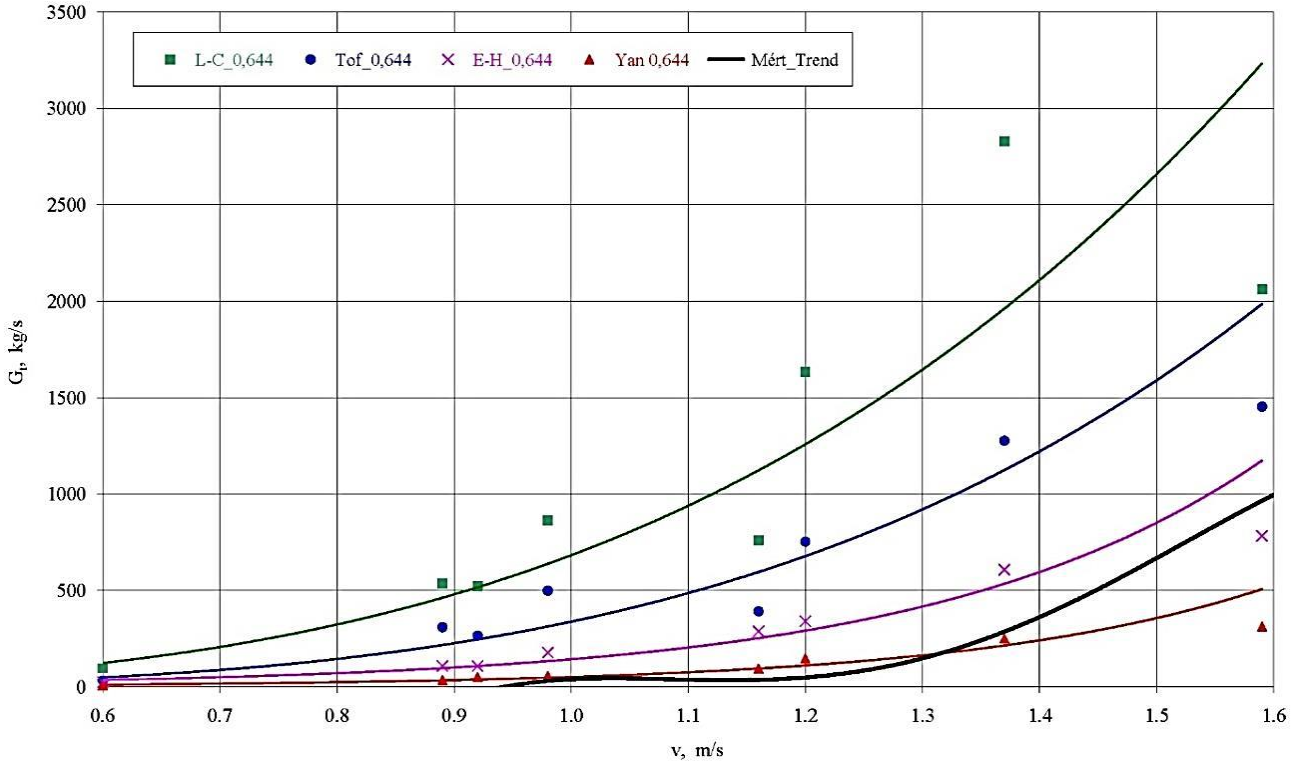
- 60. VO benne 7 db szemeloszlás dg-jének átlaga 0,588 mm, átlagos szemeloszlás dg-je 0,644 mm,
- 50. VO benne 7 db szemeloszlás dg-jének átlaga 1,28 mm, átlagos szemeloszlás dg-je 1,86 mm,
- 51. VO benne 6 db szemeloszlás dg-jének átlaga 4,15 mm, átlagos szemeloszlás dg-je 3,79 mm.

Példaként az 50. VO szelvényben mért és az általunk számított átlagos szemeloszlást a 11.6.4-2. ábra mutatja be.

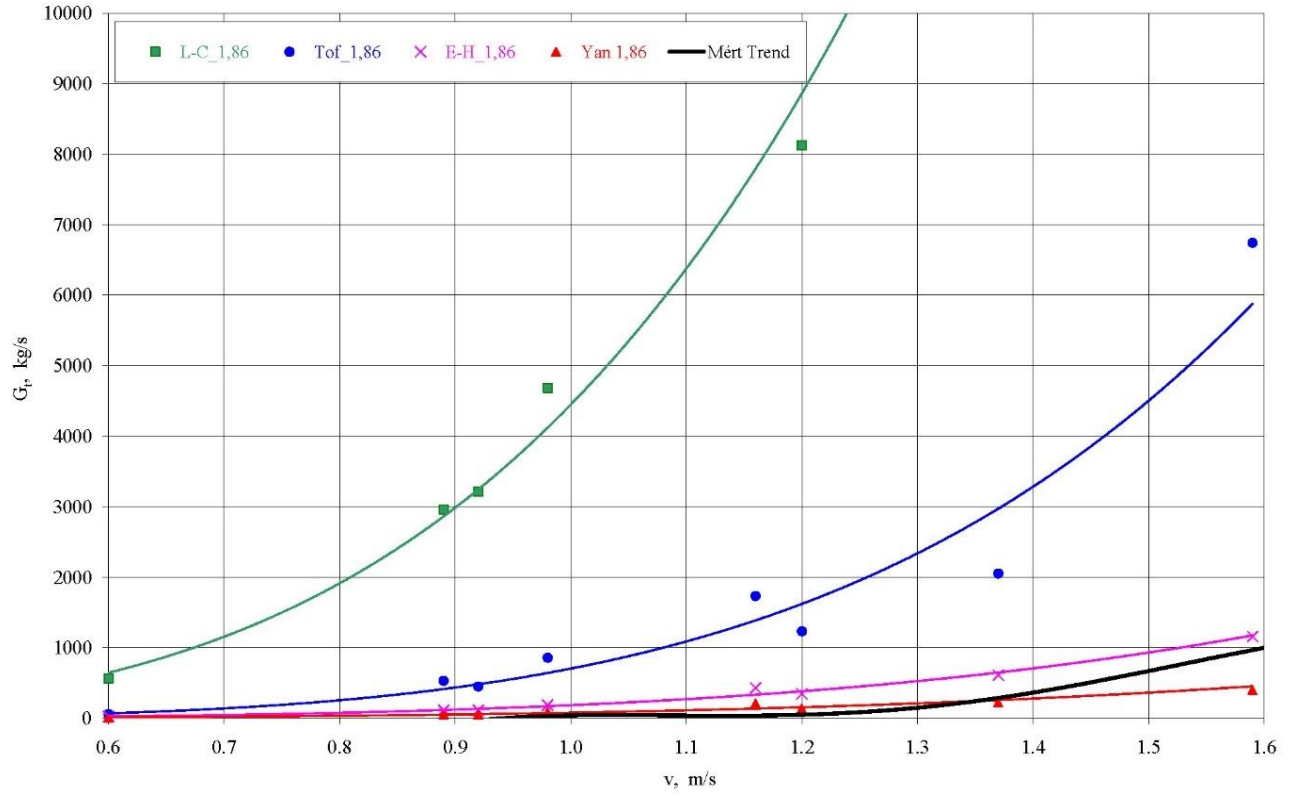


11.6.4-2. ábra: Az 50. VO szelvényben mért és a teljes keresztszelvényre jellemző számított, átlagos szemeloszlás

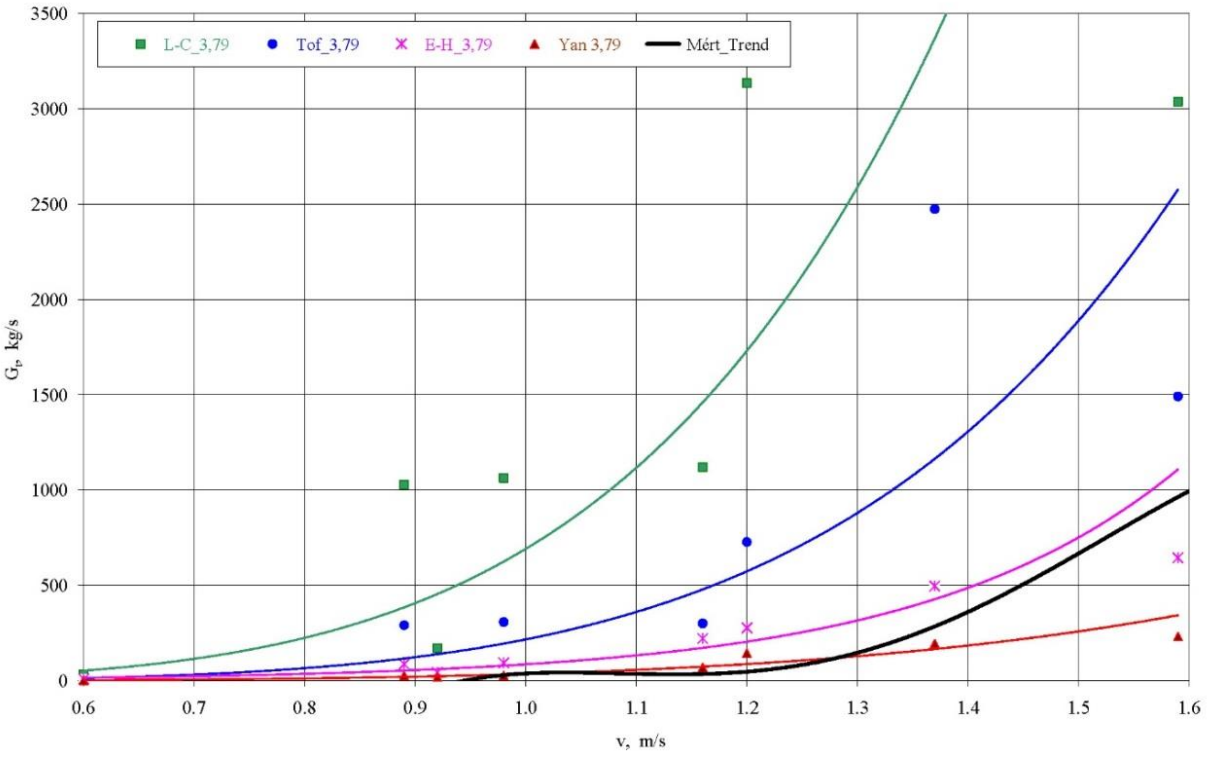
Most független változó a szelvény középsebesség és függő változó megint a teljes hordalékhozam. A három választott szemeloszlásnak megfelelően három alábbi ábrát készítették (11.6.4-3. ábra; 11.6.4-4. ábra; 11.6.4-5. ábra). A grafikonokon nincs megkülönböztetve a „keskeny” vagy „széles” meder típus, azok együtt szerepelnek a középsebességeknek megfelelően. A szelvény-középsebesség impliciten magába sűríti a leglényegesebb hidraulikai és geometriai jellemzőket (Q, B, H, S). Ezért kicsit szóródnak a számított pontok, hiszen pl. egy adott vízhozam egyszer egy széles és egyszer egy „keskeny” mederben vonul le. (A Gt(Q,B) típusú ábrákon, kis táblázatokban adták meg az egyes mederszélességeknél számított középsebességeket.)



11.6.4-3. ábra: Különböző összefüggésekkel számított egyensúlyi lebegtetett hordalékhozamok a szelvény középsebesség függvényében, dg = 0,64 mm átlagos szemátmérő esetén



11.6.4-4. ábra: Különböző összefüggésekkel számított egyensúlyi lebegtetett hordalékhozamok a szelvény középsebesség függvényében, dg = 1,86 mm átlagos szemátmérő esetén



11.6.4-5. ábra: Különböző összefüggésekkel számított egyensúlyi lebegtetett hordalékhozamok a szelvény középsebesség függvényében, dg = 3,79 mm átlagos szemátmérő esetén

A trendvonalak jól mutatják az egyes transzport számítási módszerek közötti különbséget. Összhangban az eddig megállapítottakkal, a Laursen-Copeland által ajánlott számítási módszer adja a legnagyobb értékeket és a Yang-formulával kapható a legkisebbeket.

Dunaújvárosnál 1985-tól kezdődően a lebegtetett hordalékhozam mérésekor meghatározták a szelvény-középsebességeket is. Az ábrákon feltüntették a 2000-2008. évek mérései alapján szerkesztett trendvonalat is. 49 db adatból kapták a legjobban illeszkedő kiegyenlítő „Mért Trend" vonalat. Látható, hogy a mérések trendvonala az Engelund-Hansen és a Yang-féle számítási formulából kapott Gt-k kiegyenlítő trendvonalai között helyezkedik el.

Megállapításra került, hogy az Engelund-Hansen-féle hordalékhozam számítási képlet mutatkozik a legjobban alkalmazhatónak a Duna érintett szakasza morfodinamikájának vizsgálatához.

A tervezett fejlesztés Duna mederváltozásra gyakorolt hatásának vizsgálatára ezért a későbbiekben alkalmazott kétdimenziós (2D) morfodinamikai modellt, a River2D (szabadfelhasználású) modellt alkalmazzuk, az Engelund-Hansen-féle hordalékhozam számítási almodullal.

11.6.4.2 A Duna meder morfodinamikai folyamatainak kétdimenziós (2D) modellvizsgálata

Feladatunk kétdimenziós (2D) morfodinamikai (áramlási és medermozgási) modellvizsgálat végrehajtása a Duna paksi vízmérce szelvénye (Duna 1531,3 fkm) és a Duna 1519,0 fkm szelvénye közötti szakaszán.

A modellvizsgálat adatigénye:

- A Duna várható medermorfológiai változásait 1965-től 2012. év végéig terjedő vízállás-, vízhozam és mederanyag (lebegtetett hordalék koncentráció és szemeloszlási, valamint mederanyag minták szemeloszlási) adatok felhasználásával vizsgáljuk.
- Duna kis- és középvízi mederadatok és azok időbeni alakulása, változása a morfodinamikai modell kalibráláshoz.
- Dunai kis- és középvízi meder változására utaló vízszintcsökkenési trend múltbeli analízise és jövőbeli előrebecslése.

A modellvizsgálat módszere:

- Az áramlási sebességek és a medermorfológiai változások kölcsönös hatással vannak egymásra. A sebességmező és a hordalékmozgás közötti dinamikus kapcsolat leírása közelítően, egymást követő időszakokra vonatkozó kvázi-permanens 2D morfológiai modell segítségével lehetséges, ugyanis a nem-permanens vizsgálat időigénye nagyon nagy és nem jár mérhetően pontosabb eredménnyel.
- Különböző hidrológiai évekre végzünk kvázi-permanens számításokat és becsüljük hosszabb időszakra a lokális mederváltozásokat. A teljes mederváltozást a becsült trend és a lokális változás összege adja. A 2D hidrodinamikai modell alklamazásával a sodorvonal és a felszínesés számítható.

Modellvizsgálati feladatok:

A morfodinamikai modellt az elmúlt időszakra vonatkozó medermérések és hordalékvizsgálatok eredményei alapján kalibráljuk, majd alkalmazzuk az alábbi esetek alapulvételével.

1.) Várható mederváltozások és az áramlási viszonyokban bekövetkező változások meghatározása 2014-től 2120-ig, a négy meglévő blokk ütemezett kilépésével, az alábbi hidegvíz-kivétel és egyben melegvíz kibocsátás figyelembe vételével:

- 2014-2032: 100 m³/s (4 blokk x 25 m³/s);
- 2032-2034: 75 m³/s (3 blokk x 25 m³/s);
- 2034-2036: 50 m³/s (2 blokk x 25 m³/s);
- 2036-2037: 25 m³/s (1 blokk x 25 m³/s);
- 2037-2120: 0 m³/s.

2.) Várható mederváltozások és az áramlási viszonyokban bekövetkező változások meghatározása, a két új blokk (2 x 1 200 MW) ütemezett belépésével, majd kilépésével, 2014-től 2120-ig, az alább részletezett hidegvíz-kivétel és egyben melegvíz kibocsátás figyelembe vételével:

- 2014-2025: 100 m³/s (4 meglévő blokk x 25 m³/s);
- 2025-2030: 166 m³/s (4 meglévő blokk x 25 m³/s + 1 új x 66 m³/s);
- 2030-2032: 232 m³/s (4 meglévő blokk x 25 m³/s + 2 új x 66 m³/s);
- 2032-2034: 207 m³/s (3 meglévő blokk x 25 m³/s + 2 új x 66 m³/s);
- 2034-2036: 182 m³/s (2 meglévő blokk x 25 m³/s + 2 új x 66 m³/s);
- 2036-2037: 157 m³/s (1 meglévő blokk x 25 m³/s + 2 új x 66 m³/s);
- 2037-2085: 132 m³/s (2 új x 66 m³/s);
- 2085-2090: 66 m³/s (1 új x 66 m³/s);
- 2090-2120: 0 m³/s (2 új x 66 m³/s);

3.) A mederváltozások és az áramlási viszonyokban bekövetkező változások hatásterületének meghatározása a fenti két feladat eredményeinek felhasználása alapján (sodorvonal elmozdulás, felszínesés változás).

Az alábbiakban az alkalmazott 2D morfodinamikai modellt mutatjuk be, a Duna és a hidegvíz-csatorna torkolatközeli (a melegvíz-csatorna burkolt és magas vezetésű, ezért az nem képezi a vizsgálat tárgyát) várható mederváltozásainak részletes vizsgálatát később, „A Duna várható áramlási- és morfodinamikai hatásainak jellemzése” című (11.9.1.3 számú) fejezetben tárgyaljuk.

11.6.4.2.1 Az alkalmazott 2D hidrodinamikai és hordaléktranszport modell ismertetése

A morfodinamikai folyamatok vizsgálatára Delft3D-Flow hidrodinamikai és morfodinamikai modellt alkalmaztunk (Delft3D-Flow, 2013), kétdimenziós hidrodinamikai moduljának felhasználásával.

A Delft3D egy modulos felépítésű, többdimenziós (2D, 3D) hidrodinamikai- és transzport modellrendszer. Az alkalmazott 2D mélységintegrált és a 3D nem-permanens áramlási- és transzportmodell képes figyelembe venni a sűrűség különbség, a hőmérséklet különbség valamint a meteorológia elemek hatását a kialakuló áramlásra. A modell áramlási modulja a sekélyvízi egyenletek véges differenciákkal való megoldását alkalmazza az elcsúsztatott típusú számítási hálón. A számítási háló esetében a modell három lehetőséget kínál: ortogonális háló, görbe vonalú háló, illetve a kettő kombinációja. A modellrendszer adat előkészítő- és a számítási eredmények megjelenítését, kiértékelést lehetővé tevő modulokat is tartalmaz.

A hordalék mozgás modellezésére a legelterjedtebb eljárás a hidrodinamikai és hordalékfolytonossági folyamatokat leíró egyenletek összekapcsolása. A hidrodinamikai folyamatokat a sekélyvízi (mélységintegrált folyadék- és impulzusmérleg) egyenletekkel míg a morfológiai folyamatokat az Exner-féle hordalékfolytonossági egyenlettel szokás leírni. A morfodinamikai folyamat matematikai modellrendszerét, a Navier-Stokes és az Exner egyenletek összekapcsolásával kapjuk.

A hordalékmozgás – ami alatt most és a későbbiekben is a hordalékfelvétel (mederváltozás szempontjából erózió, vagy kimélyülés), szállítás és lerakódás (leülepedés, depozició, vagy feltöltődés) összetett folyamatát értjük –, eredménye a meder morfológia megváltozása, morfodinamikája. A számítás pontosságát legnagyobb mértékben az befolyásolja, hogy milyen pontosan tudjuk leírni a szállítási részfolyamatot. Annak ellenére, hogy az utóbbi 50-60 évben egyre több összefüggés jelent meg a hordalékszállítás – a hordalék térfogatáram, hordalékhozam – számítására, még mindig igaz az a közel fél évszázados kijelentés, hogy „A hordalék hozamok megállapítására, …, alig találunk általánosítható módszert.” [11-9]. A gyakorlatban alkalmazható számítások döntően még mindig laboratóriumi kísérletekből kapott, "fél-empirikus" összefüggéseken alapulnak. A "fél-empirikus"-ság azt jelenti, hogy a keresett összefüggések formáját dimenzió analízis és/vagy elméleti megfontolások, statisztikai módszerek alapján állapították meg.

Az igazsághoz hozzátartozik, hogy elvétve találhatók természetbeni mérések is, de ezek száma nagyon kevés, ezekből összefüggéseket nem származtattak, maximum csak a meglévők ellenőrzésére alkalmazták ezeket (Pl.: Tsubaki-Shinohara, Einstein, Hansen in van Rijn, 1984/a, 1984/b; [11-52]). Ezen túlmenően a természetbeni mérések körülményeinek pontos leírása is hiányos.

Hordalékszállítás matematikai leírása:

A megfelelő módszer kiválasztása

A Delft3D modellrendszer a hordalékmozgás számításához többféle hordalék szállítási formulát ajánl. Ezek közül – szerencsés esetben –, természetbeni transzport- vagy morfológiai mérési eredményekre alapozott bearányosítás segítségével lehetne választani. Most a morfológiai modell bearányosításához szükséges megfelelő pontosságú, térbeli sűrűségű mérési adat nem állt rendelkezésünkre. Ezért a vizsgálandó folyó és jelenség, meder morfológiai szempontból legmeghatározóbb jellemzői alapján választottuk ki a kilenc (9) féle ajánlott módszer közül a "van Rijn (1984)" [11-59] jelű hordalék szállítási formulát.

Megemlítjük, hogy a modellrendszer default-ként (modell paraméterezések alapértelmezett értékeiként) a van Rijn (1993) [11-59], [11-60]módszerét ajánlja, de ennél, reális paraméterekkel irreálisan nagy hordalékmozgásokat kaptunk. Több számítást végeztünk Engelund-Hansen (1967) módszerével is. Ezzel próbálkoztunk először, hiszen egy korábbi tanulmányunkban (VITUKI, 2011), az 1D-s (HEC-RAS) modellel kapcsolatban, a hordalékszállító-képességet számító összefüggések érzékenység vizsgálata után megállapítottuk: „Az eredmények alapján valószínű, hogy a Yang- vagy az Engelund-Hansen-féle potenciális hordalékszállítás számítási módszerek valamelyike bearányosítás után alkalmas lesz a hosszú-távú morfológiai változások becslésére.” A Delft3D-Flow modellrendszer a Yang-féle transzport formulát nem tartalmazza. Most az is bebizonyosodott, hogy 2D-s modellezésnél bearányosítás nélkül az Engelund-Hansen (E-H) formula sem alkalmazható. Ez talán nem meglepő, ha a következőket figyelembe vesszük:

- A (VITUKI, 2011) tanulmányban 1D módszereket vizsgáltunk.
- Az akkori következtetéseinkhez a dunaújvárosi lebegtetett hordalékmérés (dg≈0,060 mm) eredményeit használtuk.
- E-H az egyensúlyi teljes (totál) hordalékhozamot csak a szemátmérő, a függélyközépsebesség és a Chèzy-féle érdesség segítségével számítja, így természetesen könnyű egy szűk érvényességi intervallumra bearányosítani.
- Nem veszi figyelembe a lebegtetett- és görgetett hordalék természetéből adódó, ezek különböző törvényszerűségeken alapuló mozgásfolyamataiban rejlő különbséget.

A van Rijn (1984)-féle hordalékszállítás számításának leírása

A van Rijn (1984) (röviden vR'84) módszere a teljes hordalékszállítást ('total transport'-ot) a fenékanyag szemátmérőjétől és a fenék formájától, valamint az áramlási feltételektől függően görgetett- és lebegtetett hordalék összegeként számítja.

E két hordalékszállítási formulát, az egyensúlyi hordalékhozamokat két dimenziótlan paraméter függvénye segítségével fejezte ki.

Az alkalmazott Delft3D-Flow többdimenziós hidrodinamikai és transzportfolyamatokat számító modellrendszer részletes leírását a Delft3D-Flow modell kézikönyvei alapján állítottuk össze (Version: 3.15.és 3.15.30932; Delft3D-Flow, 2011, 2013).

A fenti rövid ismertetésből nem nagyon tűnik ki, hogy a számítási módszernél leírtak mögött igen komoly elméleti háttér van. A modell kidolgozója, van Rijn az alkalmazhatóság igazolására összességében több száz természetbeni és laboratóriumi mérési eredményt használt fel (van Rijn 1984/a, 1984/b). Görgetett hordaléknál 580, teljes (totál) hordalékhozamnál ($S_t = S_b + S_s$) 783, különböző szerzők által mért hozamokat hasonlított össze az általa ajánlott és más szerzők által ajánlott számítási módszerrel kapott értékekkel. Az összehasonlításhoz használt számítási módszerek irodalma: Mayer-Peter-Müller (1948), Engelund-Hansen (1967), Ackers-White (1973) és Yang (1973). A különböző számítási módszerek hordalékhozam eredményei és a különböző mérések (természet, laboratórium) arányából képzett r tényezők ($r = S_{számított}/S_{mért}$) alapján részletesen, százalékosan megadta az eltéréseket. Általánosan megállapította, hogy a hordalékszállítást biztonsággal „aligha lehetséges" $r < 2$ hibával számítani. Az adott eredményekből az is látszik, hogy a görgetett hordalékhozam számításánál az általa ajánlott (vR'84) módszer mellett, Ackers-White (1973) módszere is hasonló pontosságú, míg a teljes hordalékhozamnál, minden vizsgált r intervallumban, az általa ajánlott módszer adta a legpontosabb eredményt. Ezért választottuk a Duna morfológiai változásának becsléséhez szükséges görgetett- és lebegtetett hordalékhozamok számítására van Rijn (1984) által kidolgozott módszert. Ugyanakkor nem szabad elfelejteni – több szerző által hangsúlyozott körülményt –, hogy a medermorfológia leglényegesebb részfolyamatát leíró hordalékhozam, ugyanazon hidraulikai körülmények mellett, különböző összefüggésekből számítva nagyságrend mértékű eltéréseket is adhat [11-28], [11-71].

A medermorfológiai változás matematikai modellje

Miután egy cellára ismert a pillanatnyi hidraulikai feltételektől és hordalék jellemzőktől függő egyensúlyi (potenciális) hordalékhozam a modell egy tömeg megmaradási (folytonossági) egyenletet ír fel minden egyes cellára. Ez elviekben megegyezik egy korábbi tanulmányunkban (VITUKI, 2011) 1D állapotra megadott Exner-féle folytonossági egyenlettel.

A hordalékszállításban, potenciálisan a mozgásban részt vevő kezdeti mederfenék-vastagság, a felhasználó által adott érték. A tömegváltozás és a fenékanyag vízalatti sűrűségének ismeretében, már könnyen számítható a fenékvastagság megváltozása.

11.6.4.2.2 Mértékadó morfodinamikai terhelési állapotok meghatározása

A fent ismertetett feladatokat, a meglévő erőművi üzem- és a tervezett fejlesztés mértékadó állapotainak kiválasztásán, majd 2D morfodinamikai modellszámításokon alapuló eredmények részletes elemzésén és értékelésén keresztül oldjuk meg.

A tervezett fejlesztés hatására várható, a Duna középvízi medrét érintő lokális mederváltozásokat, mértékadó terhelési helyzetekben vizsgáljuk. A Duna középvízi medrének integrális alakulásáért elsősorban, a hidrodinamikai folyamatok (vízjárás) sokéves átlaga, azaz a sokéves átlag vízhozam, mint mederképző vízhozam felel. Ezért az átlagos hidrológiai évként a Duna kvázi permanens 2 300 m³/s vízhozamát tekintjük.

A statisztikai vizsgálatok szerint, a Dunán szélsőségesen nedves hidrológiai évként tekinthetjük a sokévi átlag vízhozam (2 300 m³/s) 1,3-szorosát (1965-ös év napi vízhozamainak átlaga ás a sokéves napi vízhozamátlag viszonya), felfelé kerekítve 3 000 m³/s dunai vízhozamot.

A tervezett fejlesztés mértékadó morfodinamikai állapotai, a mértékadó vízkivétel- és vízvisszavezetés mértékétől, vízhozamától függ alapvetően.

Modellvizsgálati eredmények alapján megállapítható, hogy a morfodinamikai változások fő hajtóerejét a Duna sokéves átlagos vízhozama adja, a kisebb tartósságú árhullámok (nem-permanens folyamatok) ezt csak kismértékben

perturbálják. Ezért a Duna kvázi permanens hidrodinamikai állapotában végezzük a mederváltozási folyamatok modellvizsálatait, a sokéves átlagos vízhozamra, a 2 300 m³/s vízhozamra. Vizsgáljuk még több egymást követő nedves hidrológiai év mederváltozási folyamatait is, a Duna 3 000 m³/s átlagos éves vízhozamára, a hatásnövekmények elemzése érdekében.

Fentiek értelmében, a mértékadó morfodinamikai állapotokat az alábbiakban foglaljuk össze:

A.) Jelen állapot (2014-2025) – a Paksi Atomerőmű üzemelése

Jelen állapot, illetve annak fennmaradása, az üzemidő hosszabbítás (2014-2037) ütemterve szerint

Hidegvízkivétel: 100 m³/s, a meglévő hidegvíz-csatornán keresztül,

Melegvízkibocsátás: 100 m³/s a meglévő melegvíz-csatornából, az energiatörő műtárgyon keresztül,

A1) Átlagos hidrológiai év esetén: a Duna vízhozama 2 300 m³/s

A2) Nedves hidrológiai év esetén: a Duna vízhozama 3 000 m³/s

B.) Együttes mértékadó üzemi állapot (2030-2032) - a Paksi Atomerőmű és Paks II. együttes üzemelése

Mértékadó üzemi állapot a két új blokk belépésével

Hidegvízkivétel: 232 m³/s, a meglévő hidegvíz-csatorna mederszelvényének bővített szelvényén keresztül,

Melegvízkibocsátás (232 m³/s):

- 100 m³/s a meglévő energiatörő műtárgyon keresztül,
- 132 m³/s a tervezett rekuperációs művön keresztül, 200 m-rel a jelenlegi kibocsátás felett.

B1) Átlagos hidrológiai év: a Duna vízhozama 2 300 m³/s

B2) Nedves hidrológiai év: a Duna vízhozama 3 000 m³/s

C.) Paks II. önálló üzemelése (2037-2085) - csak Paks II. üzemel

A Paksi Atomerőmű meglévő blokkjainak kilépését követően

Hidegvízkivétel: 132 m³/s,

Melegvízkibocsátás (132 m³/s):

- 132 m³/s a tervezett rekuperációs művön keresztül, 200 m-rel a jelenlegi kibocsátás felett.

C1) Átlagos hidrológiai év esetén: a Duna vízhozama 2 300 m³/s

11.6.4.3 Lokális morfodinamikai folyamatok elemzése a tervezett fejlesztéssel érintett szakaszon

11.6.4.3.1 Lokális morfodinamikai hatások és hatásterületek vizsgálatának módszere

A mértékadó terhelési állapotok lokális morfodinamikai hatásait és hatásterületeinek lehatárolását az alábbi részletességgel vizsgáljuk:

- az okozott mederváltozások, illetve szedimentáció (feltöltődés, kimélyülés) összehasonlítása alapján (Z_{meder} (x,y) [mBf]),
- a Duna vízterében kialakuló mélységintegrált sebességeloszlások (abszolút értéke) különbségeinek elemzésén keresztül: (V a mélységintegrált sebességvektor abszolút értékének területi eloszlása V=V(x,y) [m/s]):
    - $\Delta V_{B1-A1}(x,y) = V_{B1}(x,y) - V_{A1}(x,y)$ és $\Delta V_{C1-A1}(x,y) = V_{C1}(x,y) - V_{A1}(x,y)$ (átlagos év),
    - $\Delta V_{B2-A2}(x,y) = V_{B2}(x,y) - V_{A2}(x,y)$ és $\Delta V_{C2-A2}(x,y) = V_{C2}(x,y) - V_{A2}(x,y)$ (nedves év),
    - hatásterületként a ±0,2 m/s-nál nagyobb mértékű sebeségváltozás területét tekintjük.
- a sodorvonal áthelyeződésének vizsgálata alapján (a Duna maximális áramlási sebességeinek, mély medervonulatának a vonala, amely a középvízi meder területén kanyarog),
- a Duna vízfelszínében előálló különbségek elemzésével (Z a vízfelszín területi eloszlása Z = Z(x,y) [mBf]):
    - $\Delta Z_{B1-A1}(x,y) = Z_{B1}(x,y) - Z_{A1}(x,y)$ és $\Delta Z_{C1-A1}(x,y) = Z_{C1}(x,y) - Z_{A1}(x,y)$ (átlagos év),
    - a nedves évet a sebességváltozásokban okozott hatás alapján értékeljük,
    - hatásterületként a ±2cm-nél nagyobb mértékű vízszintváltozás területét tekintjük.

A Duna jelenlegi áramlási állapotban (Paksi Atomerőmű. üzemelése alatt) a meghatározható sodorvonal - a középvízi meder területének áramlási irányú mélyvonulatának, a legnagyobb áramlási sebességek pályájának - helyzete a telephely környezetében, a Duna főmedrének jobb partja közelében található. Ennek helyzete a Duna vízhozamának függvényében kis mértékben módosulhat, az áramlási sebességek alakulása függvényében.

11.6.4.3.2 Lokális morfodinamikai folyamatok elemzésének módszere

A lokális morfodinamikai változások időbeli alakulásának vizsgálata érdekében, a mértékadó terhelési állapotokra hosszabb idejű, permanens morfodinamikai modellszámításokat végeztünk.

A vizsgálati eredmények szerint a tervezett fejlesztés üzemelésének megkezdésétől várhatóan ~2 éven belül jelentősen csillapodnak, míg ~3-5 év múlva asszimptotikusan megállnak a további medermélyülési, medertöltődési folyamatok.

Ezt az időbeli morfodinamikai folyamatot a melegvízkibocsátások alatti környezetben lévő helyszíneken, a Duna mederváltozása 5 éves idősorának ábrázolásával szemléltetjük (A, B: kontrollpontok mederváltozási idősora).

11.6.4.3.3 Mederváltozások trendje

A mederváltozások várható trendje a Duna kisvízszintjeinek statisztikai vizsgálata alapján:

A mederváltozások trendjére, az éves kisvízszintek hidrológiai statisztikai vizsgálata alapján szokás következtetni.

A Duna kisvizeinek statisztikai vizsgálatánál részletezett, 2120. évig terjedő előrebecslés eredményeit, az alábbi táblázatban (11.6.4-3. táblázat) összegezzük, a Duna paksi vízmérce szelvényére (Duna 1531,3 fkm):

A tervezett fejlesztés és az üzemidő-hosszabbítás időszaka		***Várható kisvízszintek (évi legkisebb) időbeli alakulása Z [mBf]***			***Kisvízszintek várható időbeli süllyedése ΔZ [m]***		
Év	**Blokk üzemelési ütemtev**	**Lineáris trend**	**Logaritmikus trend**	**Átlag trend**	**Lineáris trend**	**Logaritmikus trend**	**Átlag trend**
2013.	-	83,78	83,78	83,78	0,00	0,00	0,00
2025.	I. új blokk belép	83,51	83,74	83,62	-0,27	-0,04	-0,16
2030.	II. új blokk belép	83,39	83,72	83,55	-0,39	-0,06	-0,23
2032.	I. meglévő blokk kilép	83,34	83,71	83,53	-0,44	-0,07	-0,25
2034.	II. meglévő blokk kilép	83,30	83,70	83,50	-0,48	-0,08	-0,28
2036.	III. meglévő blokk kilép	83,25	83,70	83,48	-0,53	-0,08	-0,30
2037.	IV. meglévő blokk kilép	83,23	83,69	83,46	-0,55	-0,09	-0,32
2085.	I. új blokk kilép	82,13	83,52	82,83	-1,65	-0,26	-0,95
2090.	II. új blokk kilép	82,02	83,50	82,76	***-1,76***	***-0,28***	***-1,02***
2100.	-	81,79	83,47	82,63	-1,99	-0,31	-1,15
2120.	-	81,33	83,39	82,36	-2,45	-0,39	-1,42

11.6.4-3. táblázat: Éves kisvízszintjeinek várható időbeli alakulása, a trend hosszabbítása alapján (Paksi vízmérce - Duna 1531,3 fkm)

A kisvízszintek logaritmikus trend illesztése optimista becslés, amely az ipari kotrások teljes leállását, hatásainak lecsengő tendenciáját feltételezi, míg a lineáris trend illesztése konzervatív becslésnek tekinthető.

Fenti táblázat alapján összegezve megállapítható, hogy 2090. évre, amikor a tervezett Paks II. erőmű második új blokkja is kilép, az éves kisvízszintek, illetve a becsült medersüllyedés mértéke:

- Lineáris trend meghosszabbítása esetén ~1,8 [m] süllyedést (-2,29 [cm/év]),
- Logaritmikus trend meghosszabbítása esetén ~0,3 [m] süllyedést (átlagosan: -0,36 [cm/év]),
- A Lineáris és a Logaritmikus trend átlagértékével számolva ~1,0 [m] süllyedést mutat (átlagosan: -1,33 [cm/év]).

Mederváltozások várható trendje a Duna középvízi medrének évenkénti felmérése alapján:

Az Alsó-Duna-völgyi Vízügyi Igazgatóság (ADU-VIZIG) által végzett 2013. évi mederszelvény felmérés a Duna 1537,3-1512 fkm között 100 méteres szelvénysűrűséggel, a Madocsakörnyéki két (2) fkm-es szakasz felmérése pedig 50 m-enkénti szelvényezéssel történt az MVM Paksi Atomerőmű Zrt. megrendelésére (ADU-VIZIG, 2013).

Az ADU-VIZIG jelentésének [11-2] összefoglalójában ez olvasható:

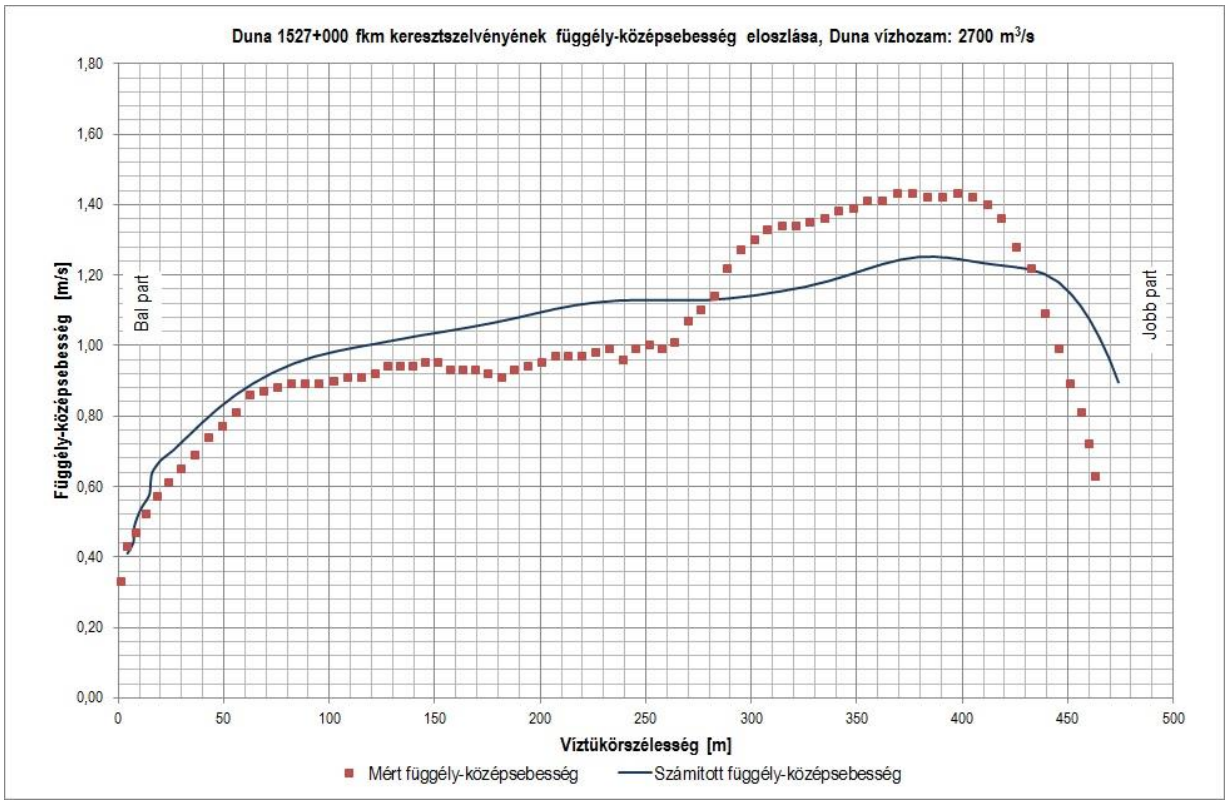
"Az eredmények értékelése a korábbiakhoz hasonlóan 2 cm/év körüli értékű vízszintsüllyedést igazolt. 2013-ban a Duna 1560-1510 fkm közötti szakaszán nem volt mederkotrás. 2013-ban az éves fajlagos (teljes szelvényszélességre terített) mederváltozás a felső szakaszon -0.0 cm/év mélyülés, a hidegvíz-csatorna alatt 2.0 cm/év mélyülés volt. Kiemelendő, hogy az 1537-1527 fkm közötti szakasz medre a hidegvíz-csatorna felett 2006- tól különböző mértékben, de folyamatosan mélyült. Az 1527-1512 fkm között 2006-2008-ban mélyülés volt, az utána következő három évet - ingadozásokkal - közelítő mederegyensúly jellemezte, majd 2013-ben ismét mélyülés volt tapasztalható."

Az éves kotrási mennyiségek 2008-tól, a korábbiaknak (1997-2007) mintegy felére csökkentek, 2011-től pedig megszűntek a Duna 1536-1557 fkm szakaszán, a telephely feletti Duna szakaszon.

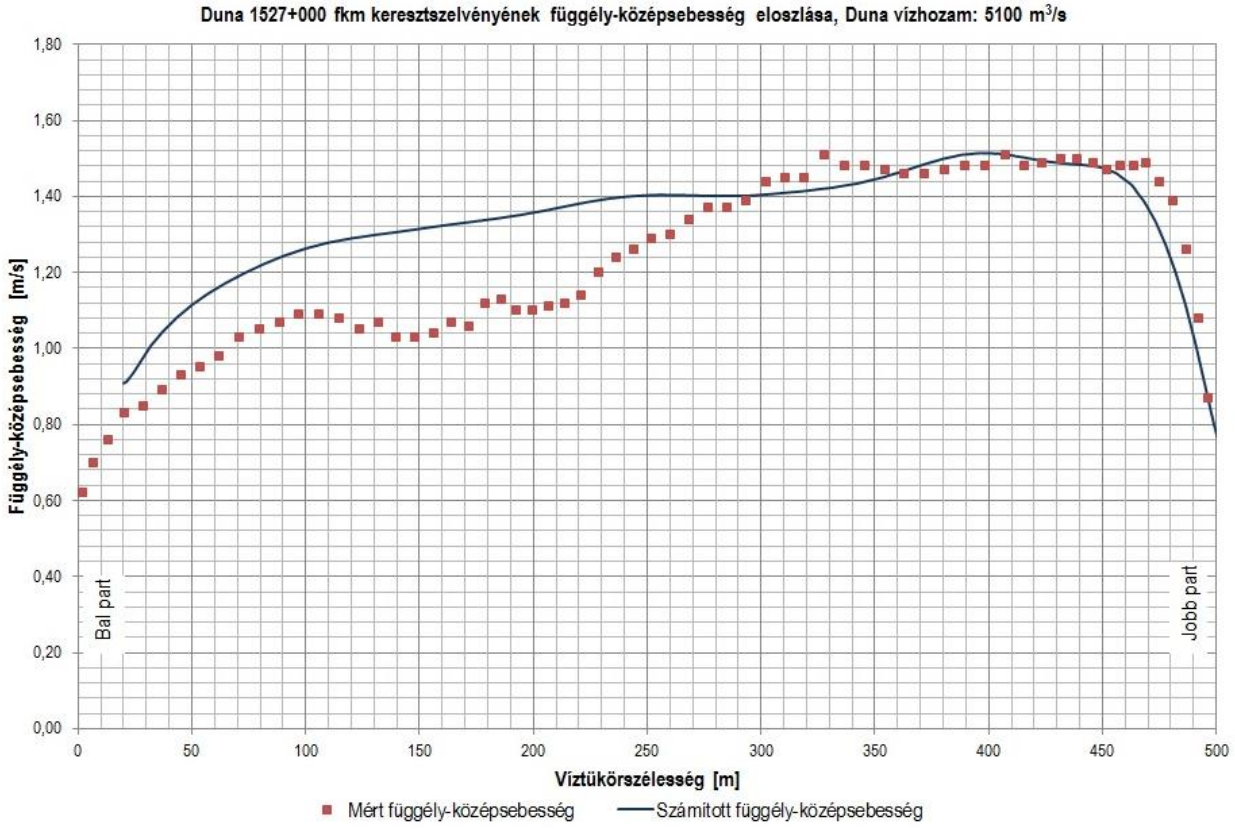
11.6.4.3.4 A Duna meder morfodinamikai folyamatait leíró kétdimenziós (2D) modell bearányosítása

A kétdimenziós (2D) morfodinamikai modell hidrodinamikai almodelljének kalibrációjára volt lehetőségünk, ugyanakkor a mederváltozás (kimélyülés, feltöltődés) számításához pontosan adminisztrált méréssorozat nem állt rendelkezésre a vizsgált Duna mederszakaszon.

A 2012. és 2013. évi közép- és nagyvízi (Duna vízhozamok rendre: 2700, 5100 m³/s) vízjáráskori áramlásmérésekhez arányosítottuk be és igazoltuk a modellparamétereket. A bearányosítás eredményét az alábbi ábrákon (11.6.4-6. ábra, 11.6.4-7. ábra és 11.6.4-8. ábra) szemléltetjük:



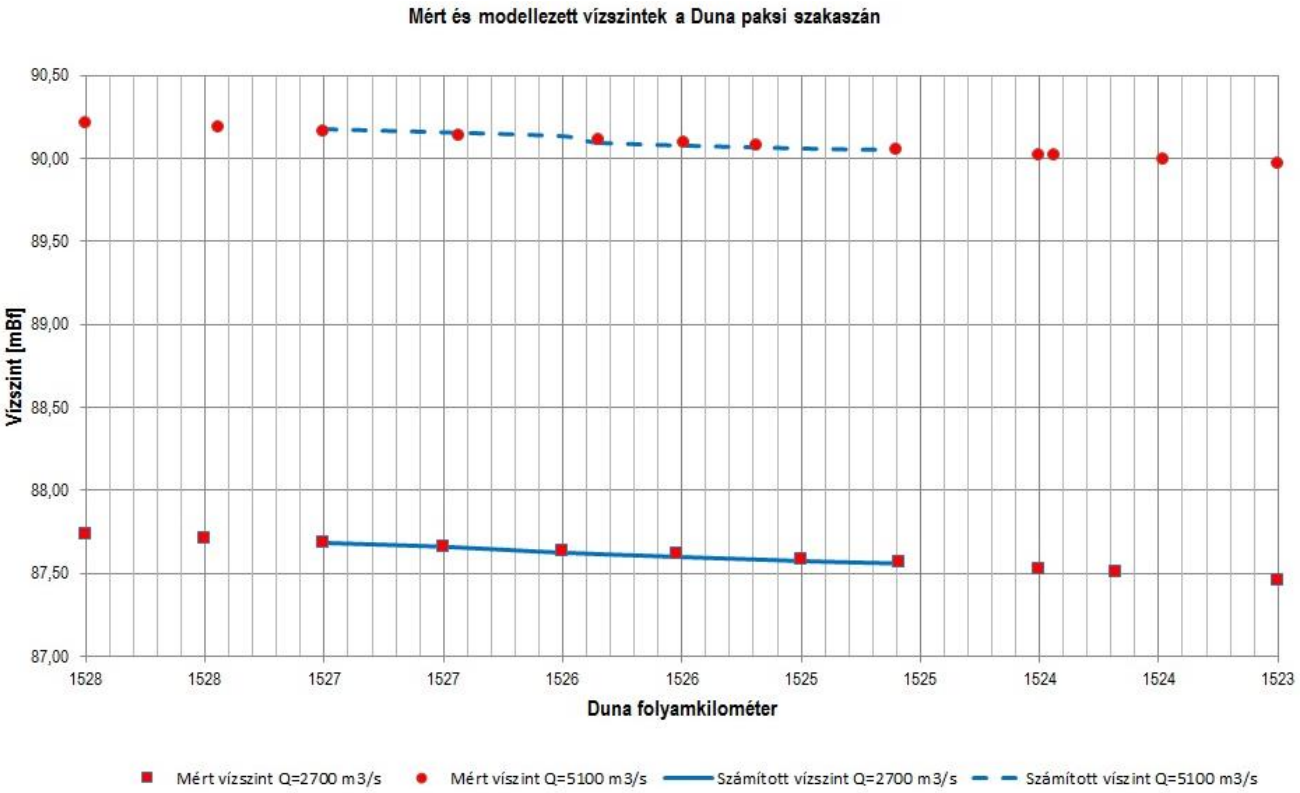
11.6.4-6. ábra: A Delft3D morfodinamikai modell kalibrációja, a Duna 1527 fkm kereszt-szelvényében, 2 700 m³/s Duna vízhozamra



11.6.4-7. ábra: A Delft3D morfodinamikai modell validációja, a Duna 1527 fkm kereszt-szelvényében, 5 100 m³/s Dunavízhozamra

Az áramlási sebességmérés megengedett hibáját is figyelembe véve megállapítható, hogy a számított mélységintegrált áramlási sebességeket megfelelően reprezentálja az áramlási modell.

A mért vízfelszín, Duna hossz-szelvényekre való illeszkedését az alábbi ábrán szemléltetjük:



11.6.4-8. ábra: A Delft3D morfodinamikai modell kalibrációja, a Duna 1525-1527 fkm hossz-szelvényr mentén, 2 700 m³/s-ra kalibrálva és 5 100 m³/s vízhozamra validálva.

11.7 A DUNA VIZSGÁLT SZAKASZÁNAK ALAPÁLLAPOTA

11.7.1 A VIZSGÁLT DUNA SZAKASZ VÍZJÁRÁSÁNAK JELLEMZÉSE

11.7.1.1 Általános vízrajzi jellemzők

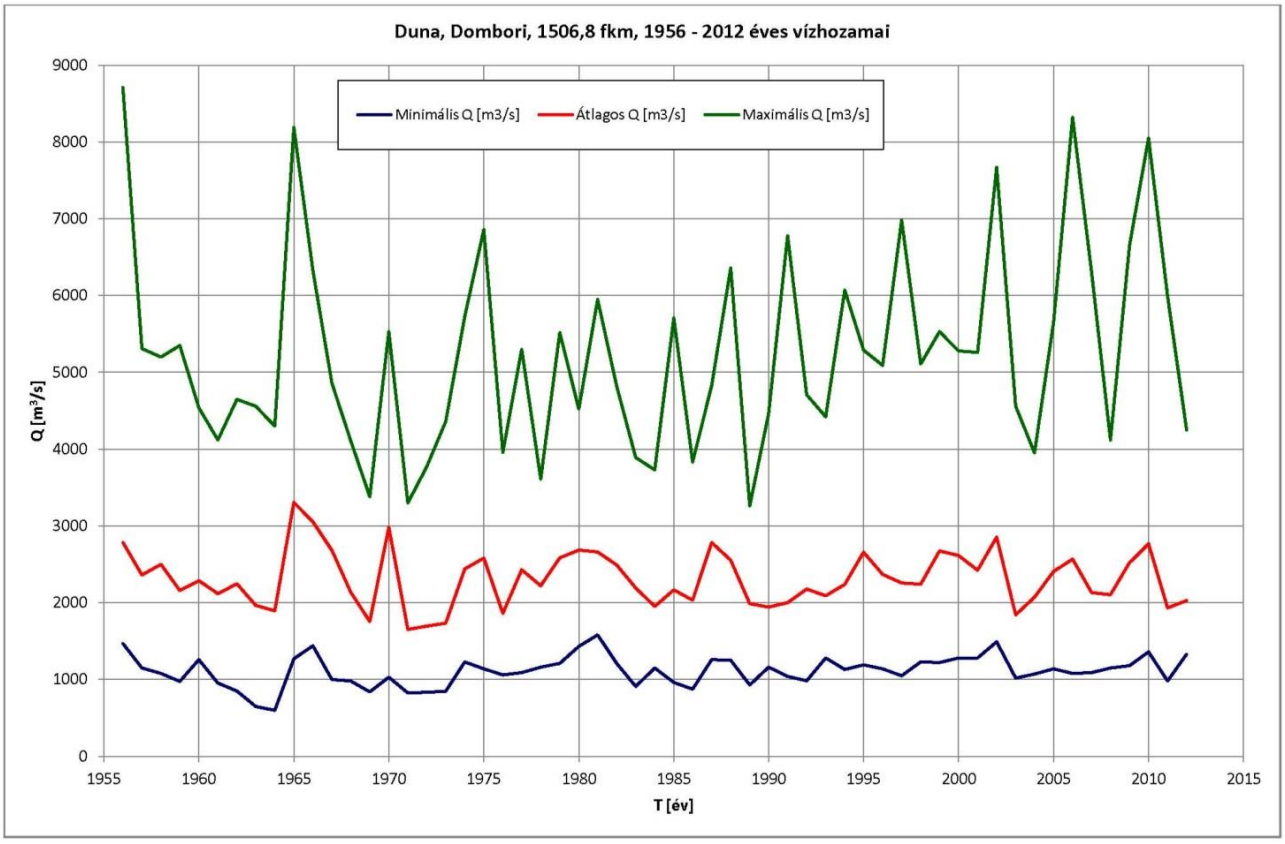
A Duna Európa második legnagyobb folyója, hossza 2 857 km. Vízgyűjtő területe 817 000 km^2. Három jellegzetes szakasza van: a bajor és osztrák medencét magába foglaló, nagyesésű Felső-Duna, a Kárpátok koszorúján belül lévő Közép-Duna és a Havasalföldet átszelő Alsó-Duna.

Hazánkba Rajkánál, az 1 850 fkm (folyam km) szelvényben lép be és Mohácstól délre, az 1 433 fkm-nél hagyja el az országot. A 127 km hosszúságú Dunaföldvár-déli országhatár közötti Duna-szakaszt 32 kanyar alkotja. A kanyarok változó görbületűek, a legveszélyesebb a Sáros-parti kanyar, ahol a görbületi sugár mindössze 1 000 m. A folyó átlagos szélessége 400-600 m, esése Fajszig 6-8 cm/km, az alatt pedig 4-5 cm/km.

Az árvízi meder szélessége Dunafalvánál mindössze 450 m (ez az ország egyik legkisebb árvízi keresztmetszete), de a gemenci és a Béda-karapancsai tájegység területén eléri a 3-5 km-t.

A meder anyaga a Foktő feletti szakaszon durvább szemcséjű kavics és homok, az alatta húzódó szakaszon pedig finom szemcséjű homok és iszap.

A Paksi Atomerőmű (az erőmű szelvénye a torkolattól 1527 fkm) telephelyének környezetében a Duna enyhén alsószakasz jellegű. A Duna átlagos vízhozama Dunaújvárostól Mohácsig alig változik, mindenütt 2 300-2 330 m³/s között van.



11.7.1-1. ábra: Duna éves kis-, közép- és nagy-vízhozamok alakulása Domborinál

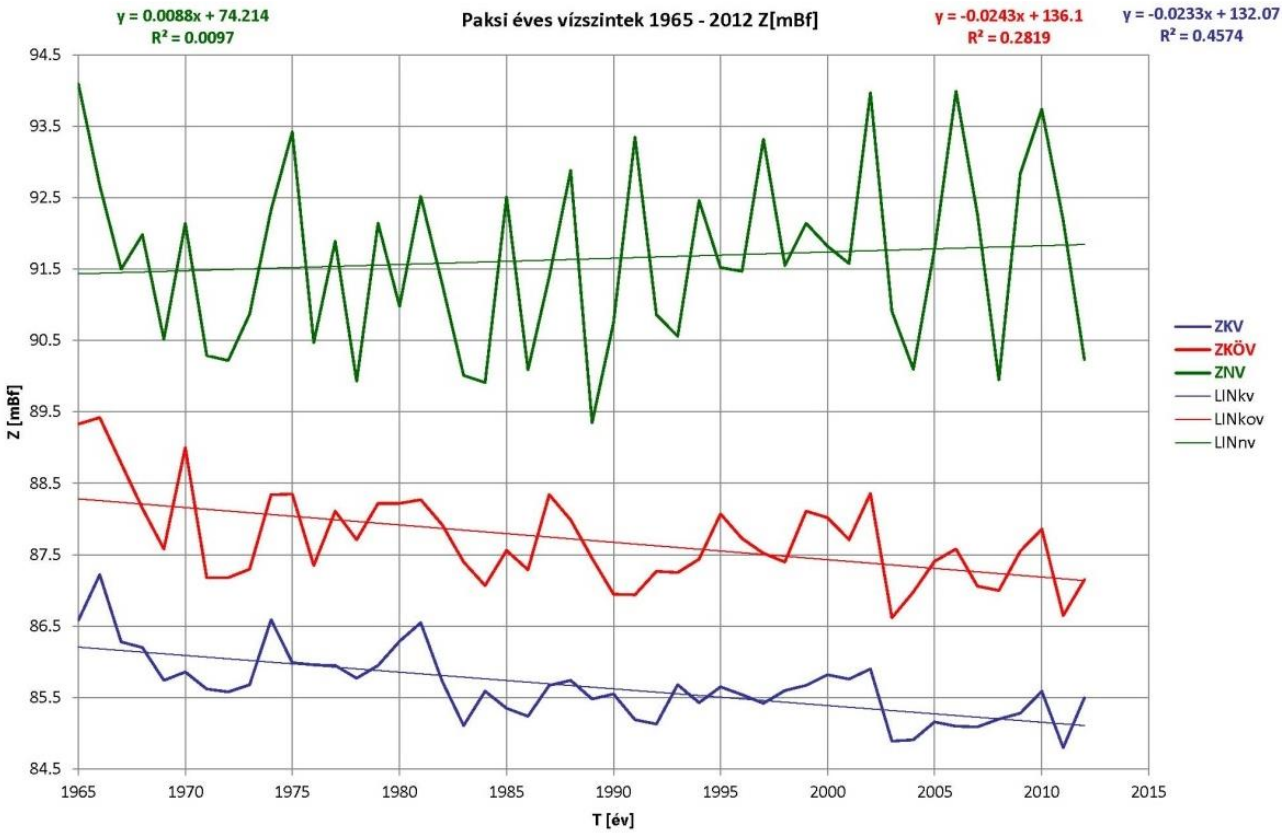
A telephely környezetében (Duna 1527 fkm) a Duna vízhozama ~600 m³/s és 8 785 m³/s között változott, míg a vízszintek 84,6 – 94,06 mBf (jégmentes LNV 2013. június 11. Duna 1531,3 fkm paksi vízmérce 891 cm vízállás, 94,29 mBf) között 2013. év végéig.

A fejlesztés térségében jellemző éves nagy-, közepes-, és kisvízi vízhozamokat a 11.7.1-1. ábra szemlélteti. A tervezett telephelyhez legközelebbi Duna 1506,8 fkm szelvényében (Dombori vízmérce) 1965-2012. évek között mért napi adatok alapján, évenként kiválasztottuk a legnagyobb, legkisebb vízhozam értéket és számítottuk az éves átlag vízhozamot. Látható, hogy a nagyvízi Duna vízhozamok növekedő tendenciát mutatnak, míg a kis- és középvízi vízhozamok egy állandó érték körül ingadoznak (11.7.1-1).

A Duna Paksi vízmérce szelvényében (Duna 1531,3 fkm) az 1965-2012. évek nagy-, közepes-, és kisvízi vízszintjeinek lineáris kiegyenlítését az alábbi ábrán (lásd: 11.7.1-2 ábra) összegeztük. A kisvízszint (KV), középvízszint (KÖV) és nagyvízszintek trendjei, átlagos éves vízszintváltozásai a 11.7.1-1. táblázat szerint alakulnak:

KV	KÖV	NV
[cm/év]	[cm/év]	[cm/év]
-2,33	-2,43	+0,88

11.7.1-1. táblázat: Az éves kis-, közép- és nagy-vízszintek éves átlagos változása



11.7.1-2. ábra: Duna éves kis-, közép- és nagy vízszintjeinek alakulása a Duna 1531,3 fkm (Paksi vízmérce)

11.7.1.1.1 Gázlók és szűkületek

A *gázló* a folyómeder domborzatának jellegzetes eleme, amely a hordalék lerakódásából képződik, a medret a folyás irányához képest ferdeszög alatt keresztező kiemelkedés formájában.

Genetikai szempontból a gázló egy magányos homokpadnak tekinthető, amely a meanderező folyókon az egymást követő kanyarulatok közötti átmeneti szakaszon épül ki az áramlással ellentétes irányban.

A gázlókban kisvíz és közepes kisvíz idején viszonylag nagyobb az esés és a középsebesség, mint a kanyarulatok tetőpontjai közelében.

- Jó gázló akkor alakul ki, amikor az átmeneti szakaszban az egymást követő kanyarulatok medencéi (üst) nem érnek túl egymáson, hanem fokozatosan, hirtelen irányváltozás nélkül hajlanak egymás felé.
- Rossz gázló esetében az említett medencék az átmeneti szakaszban alaprajzilag eltolódva túlérnek egymáson, a két medence között hordalékból küszöb alakul ki.

A *szűkület* a folyómeder átlagos szélességéhez, illetve a mederszabályozási szélességéhez képest keskeny mederszakasz. Rendszerint a víz elsodró erejének nagyobb mértékben ellenálló, kötöttebb anyagú mederszakaszokon alakul ki. A parti zátonyok összeépülése a partokkal, továbbá a magaspartok suvadása is elősegítheti a szűkületek kialakulását. Az árvizek levonulását és a hajózást a szűkületek akadályozzák.

A mederdomborzat elemei a meder és a benne mozgó víz- és hordaléktömeg kölcsönhatásának eredményeként alakulnak ki, képződésük, változásuk és megszűnésük szoros kapcsolatban van a vízjárással.

Mind a gázlók, mind a szűkületek vizsgálatát jelentős mértékben korlátozza az a körülmény, hogy a megfigyelésük elsősorban arra az időszakra terjed ki, amikor hajózási akadályt jelentenek. Ezek alapján az alábbi megállapítások tehetők:

- fix küszöbű gázlókon a vízállás csökkenése magával hozza a gázlómélység csökkenését is,
- a kavicsos-homokos mederanyagú gázlóknál a helyi tényezőktől (mederszélesség, esés, mellékágak, stb.) függően az alábbi esetek lehetségesek:
    - a vízállás és ezzel egy időben a nedvesített keresztszelvény csökkenése magával hozza a helyi érdesség növekedését, ami elindíthatja a gázló erózióját, hosszantartó kisvízi időszak esetén a gázlómélység növekedés is megfigyelhető,
    - a széles és sekély medrekben az árhullám apadó ágában jelentős mennyiségű hordalék rakodik le, fokozódik a gázló felépülése, a gázló mélység jelentősen csökken, a növekvő érdesség miatt a sodorvonal mind távolabb kerül a gázlótól és áthelyeződik a meder – esetleg egy sziget, vagy hídpillér – másik oldalára.

Az említett folyamatok részben a szűkületeknél is megfigyelhetők, ám itt jelentősebb szerephez jut a szakasz hordalékmérlege, továbbá a mederanyag cementálódásra való hajlama.

Az egyes folyószakaszok gázlóviszonyainak alakulása elsősorban az adott évek vízjárásától függ. Vízben gazdag, viszonylag kiegyenlített vízjárású években kevés számú és elhanyagolható hatású gázló keletkezik, míg az egymást követő árhullámok, vagy a tartós kisvízi állapot egyaránt a gázlók sokaságát eredményezhetik.

A vizsgált időszak vízjárását általában a véletlen jellegű változások jellemezték, esetenként azonban nedvesebb-szárazabb évek csoportosulása is előfordult. A 60-as évek elejét az éves vízszállítás csökkenő tendenciája jellemezte, ezt az időszakot az 1965. évi nagy árvíz és több bővizű év követett. A hetvenes évek első harmada ismét szárazabb, majd erre egy nedvesebb időszak következett. A nyolcvanas évekre a vízjárás váltakozó jellege volt jellemző. A múlt század kilencvenes éveitől a száraz és a nedves évcsoportok 1-3 évenként váltották egymást, nemegyszer a vízben legbővebb évet a legszárazabb év követte. Ezek a körülmények természetesen megmutatkoztak a gázlóviszonyok alakulásában is.

A vizsgált időszak alatt megfigyelhető volt a kisvízi időszak tartamának jelentős növekedése, különösen a múlt század utolsó harmadában. A növekedés okai között megtaláljuk:

- az időjárási tényezőket,
- a vízlépcsők hatását,
- a szűk keresztmetszetek bővülését,
- a meder érdesség csökkenését,
- az ipari kotrás hatását.

A gázlós napok éven belüli előfordulása természetes viszonyok között általában jól követi a folyó vízjárását. A kisvizek járásának megfelelően a gázlók és a szűkületek hajózási akadályként való jelentkezése augusztusban várható, szeptemberben már erőteljesebb a kisvízi vízjárás, de október a legkritikusabb hónap. Ezt követően a téli és a kora tavaszi hónapok részesedése a gázlós időszakban folyamatosan csökken, márciusra a hajózási akadály általában megszűnik.

Az erőmű tágabb környezete gázlóit és szűkületeit a Duna Dunaföldvár – Gerjen szakaszán az alábbiak szerint jellemezhetjük:

- ❖ Dunaföldvári /felső/gázló (1561,0-1560,0 fkm). A márgás, homokköves altalajú gázlót először 2001-ben észlelték. A széles mederben a vízmélység 18 dm. 2006-ban kotrási munkákat végeztek LKHV-27 dm szintre, ennek eredménye csak foltokban mutatkozott. A jobb magaspart csúszásveszélye miatt a további kotrás helyett a középvízi meder szűkítését tervezik.
- ❖ Dunaföldvári /alsó/gázló (1559,8 - 1558,5 fkm). A hatvanas évek első felében rendszeresen jelentkező, majd a nyolcvanas években ismét feltűnő gázlón a gázlós napok éves összege gyakran 100 fölé emelkedett, miközben a gázlómélység 13-20 dm tartományba süllyedt. A kotrás eredményeként a mélységhiány megszűnt, a szűkület viszont megmaradt. Jelenleg megfigyelhető a gázló újbóli felépülése.
- ❖ Solti /felső/gázló (1558,5 - 1557,5 fkm). A múlt század nyolcvanas éveitől rendszeresen jelentkező gázló egyértelműen a szakaszon végrehajtott kotrás okozta medermélyülés terméke. A gázlós napok száma 50-

150 között változik, esetenként 5-10 dm-es mélységhiánnyal. A túl széles mederben középzátony képződött.

- ❖ Solti /alsó/gázló (1555,8 – 1554,8 fkm). A gázló kialakulásának körülményei megegyeznek a felső gázlónál leírtakkal. Az ott említett középzátony miatt ezen a szakaszon kettős meder alakult ki. Az 5-10 dm-es mélységhiányt szűkítéssel létrehozott helyi duzzasztással kívánják mérsékelni.
- ❖ Bölcskei szűkület (1551,5 - 1551,4 fkm). A kedvezőtlen kanyarulatban kialakult 130 m széles szűkület hajózási viszonyait terelőművekkel kívánják javítani.
- ❖ Hartai gázló (1548,5 - 1547,0 fkm). A gázló a hatvanas évek második felétől kezdődően kisebb megszakításokkal a kilencvenes évek elejéig volt megfigyelhető. A gázlón észlelt mélységek ritkán csökkentek 20 dm alá, a gázlós napok száma sem volt jelentős. A gázló megszűnésében közrejátszott a hartai kanyar szabályozása.
- ❖ Madocsai gázló (1541,1 - 1540,4 fkm). A nyolcvanas évek első felében három évig volt megfigyelhető a gázló, ezt követően megszűnt.
- ❖ Ordasi gázló (1540,0 - 1539,1 fkm). A hatvanas években rendszeresen észlelt gázlót az átlagosan évi 30-40 napon mért 25-18 dm-es gázlómélység jellemezte.
- ❖ Felhágó-pusztai gázló (1537,5 - 1536,0 fkm). Az 1970-1985 között észlelt gázló kellemetlen adottságai /minimálisan 12 dm gázlómélység, 50-70 gázlós nap/ miatt több alkalommal is a magyar szakasz csúcsgázlója volt. A kotrás eredményeként a gázló megszűnt.
- ❖ Zádori gázló (1535,0 - 1533,7 fkm). A folyam kanyarulatában képződött gázlót néhány év múlva a kotrási munkák eredményeként megszüntették.
- ❖ Paksi szűkület (1530,5 - 1529,5 fkm). A kedvezőtlen kanyar és a zátonyképződés miatt a hajóút szélessége csak 150 m. A szűkület megszüntetésére terelőmű építését tervezik.
- ❖ Barákai gázló (1522,0 - 1521,5 fkm). A gázló a felette levő folyószakasz helyi erózióbázisa, megszűnése vagy akár részleges eróziója a csatlakozó szakasz további mélyülését eredményezné. A hatvanas-hetvenes években időszakosan jelentkező gázló a kilencvenes évektől szinte folyamatosan megfigyelhető volt, a gázlós napok évi átlagos száma 45 nap, a minimális gázlómélység 15 dm volt.
- ❖ Kovácspusztai gázló (1512,5 - 1511,8 fkm). A medersüllyedési folyamat következtében a gázló jelenleg is fennáll, elsősorban a szabályozási művek hiánya és a gerjeni szűk mederszakasz alatt kialakult túl széles, zátonyképződésre hajlamos meder idézi elő.

2013-ban a Paks környéki Duna-szakaszon az 1 512,5-1 511,8 fkm közötti folyamszakaszon lévő Kovácspusztai gázlónál jelentettek hajóútszűkületet (méretei: szélessége 160 m, hossza 700 m). Paks környékén 2013. évben nem volt mélységhiány a hajózási útvonalon.

11.7.1.1.2 A Paksi vízmérce (Duna 1531,3 fkm) és a meglévő telephely öblözeti vízmércéje (hidegvíz-csatorna, vízkivételi mű előtere) közötti mércekapcsolat

Az erőmű szelvényéhez (Duna 1527 fkm) legközelebbi, hosszú időtartamra vonatkozó észlelési adatsorral rendelkező vízállásmérő állomás a paksi vízmérce.

Ennek főbb jellemzői:

- a Duna Paks felszíni vízrajzi állomást 1868. január 1-én létesítették, az állomáson rendszeres vízállás észlelést 1876 óta végeznek,
- vízhozam mérési adatok csak szórványosan állnak rendelkezésre,
- a szelvényhez tartozó vízgyűjtő terület nagysága 189 092 km²,
- a vízmérce ”0” pontjának magassága 85,38 mBf.

A paksi vízmércén rendelkezésre álló adatsorokat transzformálni szükséges az erőmű hidegvíz-csatorna Duna torkolati szelvényére (1527 fkm), amelyhez felhasználtuk a hidegvíz-csatorna öblözeti vízmérce szelvényét (a hűtővíz-kivételi szivattyúk előtere). A szelvények közötti mércekapcsolatot számítások alapján határoztuk meg.

Mércekapcsolati számítások alapján megállapítható, hogy a Duna kis- és középvízi tartományában 38 cm-rel lejjebb van a vízszint az erőmű hidegvíz-csatornája öblözetében (hűtővíz-kivételi szivattyúk előterében), mint a Duna paksi (1531,3 fkm) vízmérce szelvényében, míg a Duna nagyvízi tartományában mintegy 30 cm-rel. Ennek az eltérésnek (8 cm) az okozója a Duna nagyvízi medrének nagyobb érdessége és a hidegvíz-csatorna mederellenállása.

Dunai kisvíznél a hidegvíz-csatorna felszínesése ~11 cm-re, nagyvíznél ~3 cm-re becsülhető, ezért a Duna jégjelenséggel nem befolyásolt nagyvízi felszínesésére – a paksi vízmérce és a hidegvíz-csatorna dunai torkolata (Duna 1527 fkm) között - a paksi vízmérce közelsége miatt, a kis- és középvízi felszínesést elfogadjuk (~27 cm). Így az erőmű Duna szelvénye (Duna 1527 fkm), azaz a hidegvíz-csatorna dunai torkolati vízszintje gyakorlatilag mindenkor ~27 cm-rel van alacsonanyabban a paksi vízmércén (1531,3 fkm) mérhető vízszinttől. Emiatt az erőmű dunai szelvényére ezt a vízszínesést alkalmaztuk a további számítások során.

Az öblözeti vízmérce „0” pontja 85,00 mBf szintre lett kiépítve, ezért kis- és középvízi időszakban a leolvasott vízállás értéke megegyezik a Paksi vízmérce (vízmérce „0” pontja 85,38 mBf) vízállás leolvasásának értékével.

11.7.1.1.3 Vízhozam- és vízállás tartósság jellemzés (1965-2012)

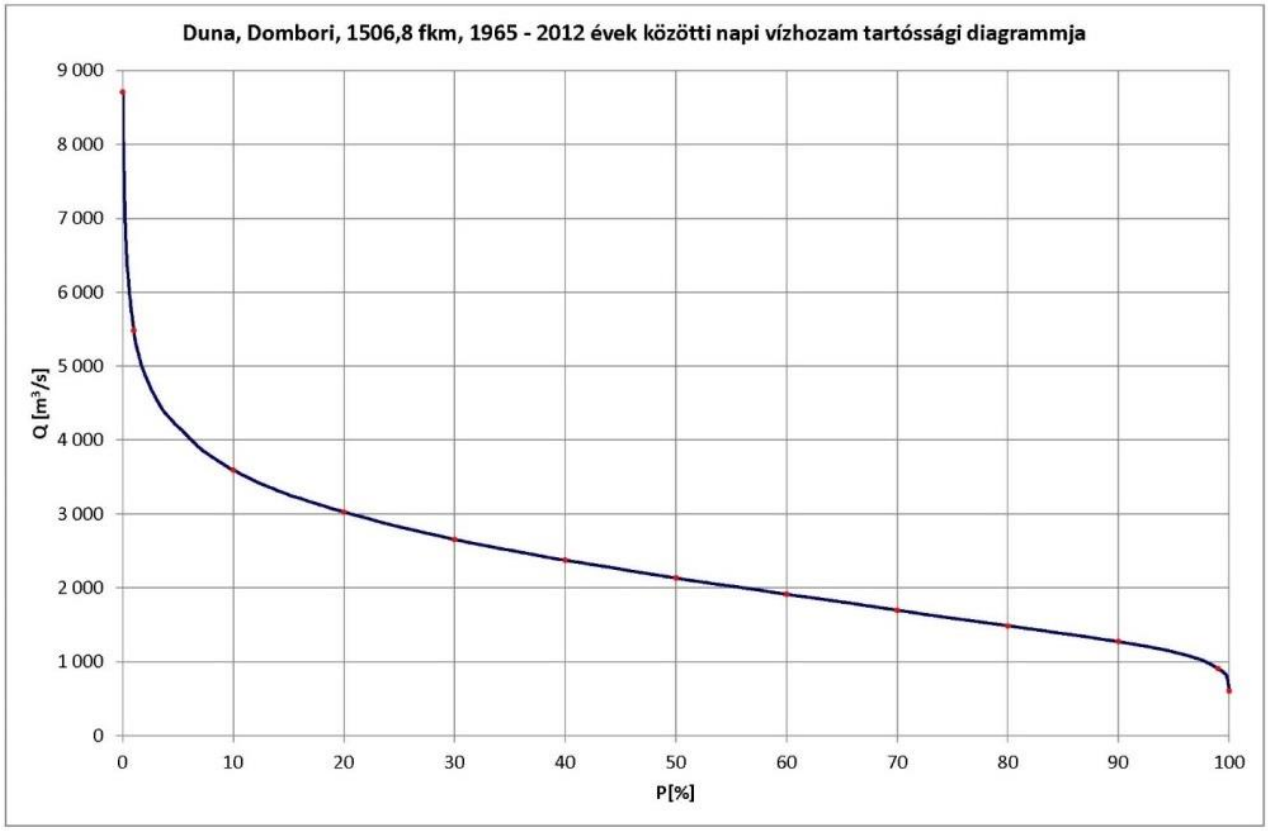
Vízhozam tartósságok a telephely környezetében (Duna 1506,8 fkm, Dombori vízmérce):

A Duna Dombori (Duna 1506,8 fkm) szelvényre az 1965-2012 közötti (homogén) időszakra meghatározott vízhozam - tartósági értékeket a 11.7.1-2. táblázat tartalmazza, és a 11.7.1-3. ábra szemlélteti.

Duna, Dombori Vízhozam (Q) tartósság (1965 – 2012)		
Vízhozam, Q [m³/s]	**Vízhozam tartósság [nap]**	**Vízhozam tartósság [%]**
8320	0.02	0.01
5625	3.65	1.00
3635	36.35	9.98
3045	72.73	19.96
2655	109.27	29.98
2375	145.52	39.93
2125	181.96	49.93
1905	219.27	60.16
1695	255.67	70.15
1495	291.79	80.06
1295	327.06	89.74
941	360.81	99.00
825	365.23	100.00

11.7.1-2. táblázat: A Duna vízhozamainak tartósági adatai (1965–2012), a Duna 1506,8 fkm, Dombori vízmérce szelvényében

A hullámtér elöntése 5 000-6 000 m³/s nagyvízhozam esetén kezdődik el. Áradás, azaz a teljes hullámtér elöntése, 7 000-8 000 m³/s esetén fordul elő. Az áradás kezdete mintegy 93,30 mBf értékre adódik. A 11.7.1-2. táblázatból megállapítható, hogy ennek az árvíztartósági értéke az 1965-2012 közötti évek adataiból, nem éri el az évi 1 napot sem.



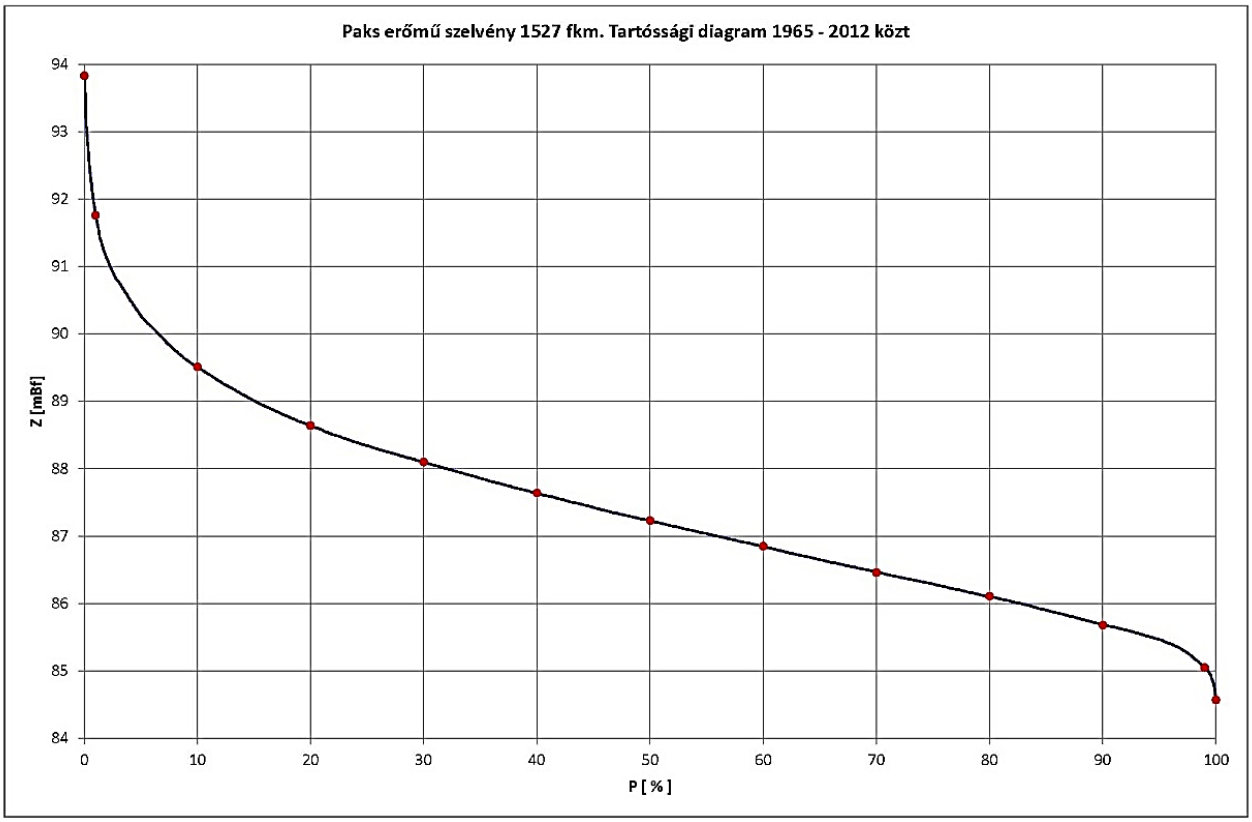
11.7.1-3. ábra: Duna vízhozamok tartóssági diagramja, a Duna Dombori vízmérce szelvényében (Duna 1506,8 fkm)

Vízszint tartósságok a meglévő erőművi telephely Duna szelvényében:

A vízállás, illetve a vízszint tartósági feldolgozásának eredményeit a hidegvíz-csatorna Duna erőművi szelvényére (Duna 1527 fkm) transzformált formában a 11.7.1-3. táblázatban és a 11.7.1-4. ábran közöljük.

Duna, Dombori Vízszint (Z) tartósság (1965 – 2012)		
Vízszint Q [m³/s]	**Vízszint tartósság [nap]**	**Vízszint tartósság [%]**
93.83	0.02	0.01
93.29	0.52	0.14
91.76	3.67	1.00
89.51	36.60	10.02
88.64	72.85	19.95
88.10	109.60	30.01
87.64	146.25	40.04
87.23	182.90	50.08
86.85	219.15	60.00
86.46	255.92	70.07
86.11	291.94	79.93
85.68	328.94	90.06
85.05	361.50	98.98
84.57	365.23	100.00

11.7.1-3. táblázat: A Duna vízszint tartósági adatai (1965–2012), a Duna erőművi szelvényében (1527 fkm)



11.7.1-4. ábra: Duna vízszintek tartóssági diagramja, a Duna erőművi szelvényében (1527 fkm)

A 2013. évi dunai árvizek az alábbi vízállással és vízszinttel tetőztek, a környező vízmércéken:

- Paksi vízmérce szelvényében (1531,3 fkm) 891 cm-rel 94,29 mBf-i vízszinttel („0" 85,38 mBf),
- Dombori vízmérce szelvényében (1506,8 fkm) 918 cm-rel 92,70 mBf-i vízszinttel („0" 83,52 mBf),
- Bajai vízmérce szelvényében (1478,7 fkm) 984 cm-rel, 90,83 mBf-i vízszinttel („0" 80,99 mBf).

Az árvízvédelmi készenlét szempontjából mértékadó bajai (Duna 1478,7 fkm) és paksi vízmérce (Duna 1531,3 fkm) készültségi szintjeit a 11.7.1-4. táblázatban szemléltetjük:

Védelmi fokozatok	Bajai vízmérce (cm)	Paksi vízmérce (cm)
I. fok	700	650
II. fok	800	800
III. fok	900	900

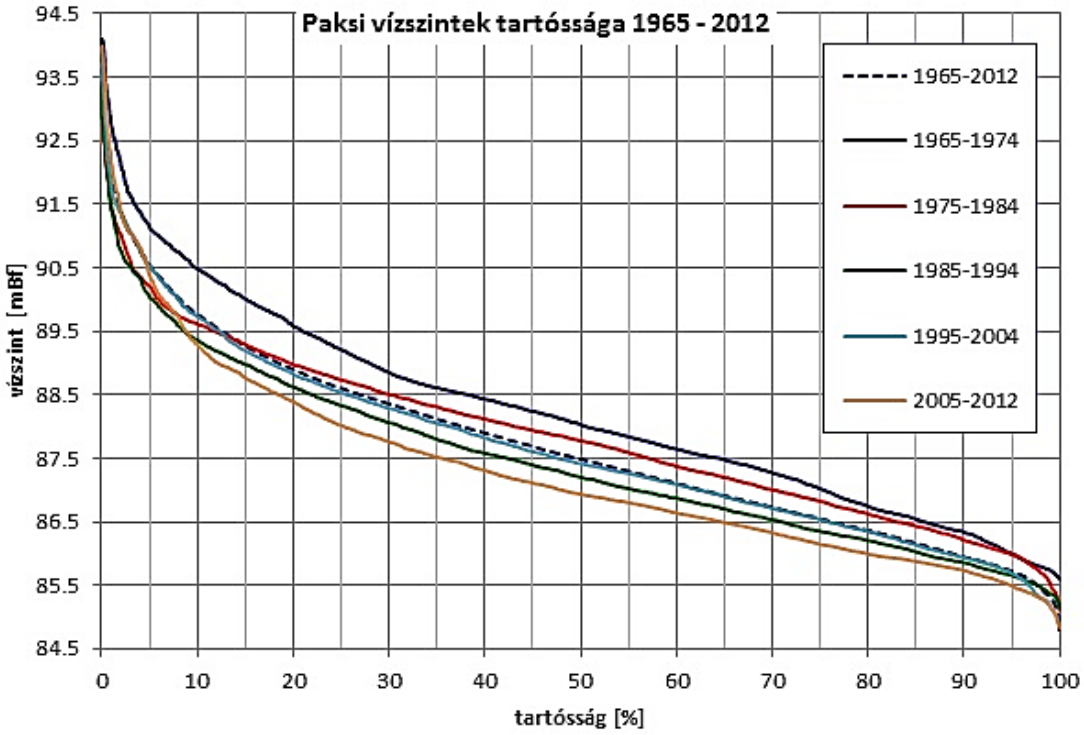
11.7.1-4. táblázat: Árvízvédelmi fokozatok elrendelési vízállásai a Duna bajai és paksi vízmércéin

Vízszint tartósságok időbeli változása, medermélyülés

A Duna 1531,3 fkm (Paksi vízmérce) szelvényében 1965-től, 2012. év végéig napi gyakorisággal észlelt vízállások alapján meghatározható a sokéves vízszint-tartóssági görbe, amelyet a 11.7.1-5. ábran mutatunk be, kiegészítve a teljes időtartamot 10 éves ciklusokra is elkészített vízszint-tartóssági görbékkel. Adott Duna vízszinthez tartozó tartósság, az adott vízszint alatti tartózkodási időt jelenti [nap/év], vagy [%] (egy évre vetítve) dimenzióban.

A 10 éves ciklusokban megadott vízszint-tartóssági görbék, kb. a 88,5 mBf vízszinttől alacsonyabb vízszintek alatt tendenciózusan csökkennek, ami nagyrészt a Duna középvízi- és kisvízi medrének süllyedésére utal. Látszik a görbéken az utóbbi évek levonuló árhullámainak (2002., 2006., 2010.) a hatása is.

A 2013-as év júniusában rendkívüli árhullám vonult le a Dunán, mely egészen Mohácsig meghaladta az eddig mért legnagyobb jégmentes vízszinteket. Minden eddiginél nagyobb vízszintet (94,29 mBf / 891 cm vízállás 2013.) produkált az eddig Paksnál mért legnagyobb vízállást (872 cm, 1965.) 19 cm-rel meghaladva.



11.7.1-5. ábra: Duna 1531,3 fkm (paksi vízmérce) vízszinttartósságainak jellemzése és a 10 évenkénti változások bemutatása

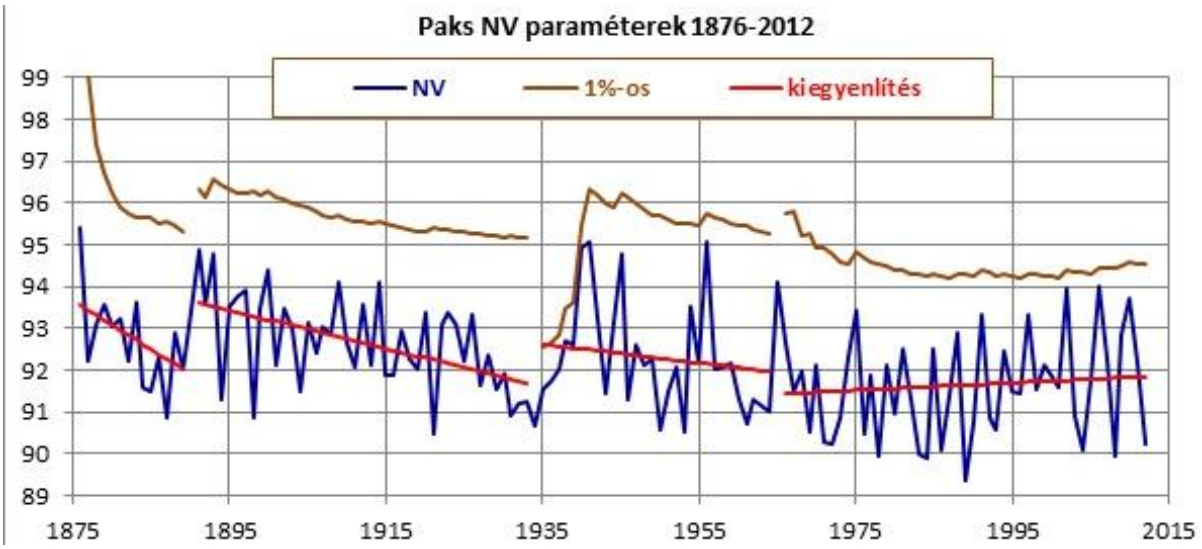
A középvizek trendje az elmúlt 60 éves adatsor vizsgálata során kb. 1,0 métert, míg a kisvizeké 1,4 métert [11-2] süllyedt. A nagyvizek, az 1965. évi inhomogenitás időpontja óta markánsan emelkedő vízszinttel tetőztek.

Az éves kisvizek idősorában az 1981-1983 közötti időszakban egy törés figyelhető meg. Az elmúlt 60 év kisvizeinek trendje enyhén csökken. Az 1983-2002 közötti, majd a 2003. extrém kisvizes év utáni 2003-2013 közötti időszakokban átmenetileg emelkedő trend figyelhető meg. A hatvanéves lineáris kiegyenlítés kapcsolata értelemszerűen jobb, mint a húszévesé, a közbenső ingadozások és a 2003-ban indult emelkedés ellenére hosszabb távon továbbra is a kisvízállások csökkenő, a közeljövőre várhatóan mérséklődő trendje uralkodik.

Az éves fajlagos mederváltozás a hidegvíz-csatorna környezetében és alatta 2013. évben is 2,0 cm/év mélyüléssel volt jellemezhető. Az 1537-1527 fkm közötti szakasz medre a hidegvíz-csatorna felett 2006-tól különböző mértékben, de folyamatosan mélyült. Az 1527-1512 fkm között 2006-2008-ban mélyülés volt, az utána következő három évet - ingadozásokkal - közelítő mederegyensúly jellemezte, majd 2013-ben ismét mélyülés volt tapasztalható.

11.7.1.2 A Duna nagyvizeinek statisztikai vizsgálata

A Duna 1531,3 fkm Paksi vízmérce szelvényében mért napi összes vízállás adata (jégjelenséggel befolyásoltakkal együtt) alapján meghatároztuk az évenkénti, vagy éves nagyvízszinteket 1986-tól 2012-ig. Az adatsor homogenitás vizsgálata alapján meghatároztuk a trendeket (kiegyenlítő egyenes szakaszokat), amelyet az alábbi ábrán szemléltetünk (11.7.1-6. ábra). A nagyvízszintek 1965. év óta emelkedő trendet mutatnak.



11.7.1-6. ábra: Duna 1531,3 fkm (paksi vízmérce) nagyvízszintjeinek homogenitásvizsgálata és trendje az 1987-2012. évek időszakának éves nagyvízi adatainak feldolgozásával

11.7.1.2.1 Mértékadó árvízszint meghaladási valószínűségi értékének indoklása

A mértékadó kis- és nagyvízszinteket, a 20 000 évenként visszatérő, azaz 5×10^{-5} / év valószínűségi szintű-, meghaladási valószínűségű- vagy gyakoriságú eseményként, a mért adatokra illesztendő, legjobban illeszkedő valószínűség eloszlás számításán keresztül határozzuk meg. Ez száz (100) éves üzemidőnek és 5×10^{-3}, teljes üzemidőre vonatkoztatott valószínűségű szintnek felel meg ($p = 5 \times 10^{-5}$ / év = 5×10^{-3} / 100 év).

„A nukleáris létesítmények nukleáris biztonsági követelményeiről és az ezzel összefüggő hatósági tevékenységről” szóló 118/2011. (VII. 11.) Korm. rendelet (7. melléklet: Nukleáris Biztonsági Szabályzatok /röviden: NBSZ/ 7. kötet: Nukleáris Létesítmények Telephelyének Vizsgálata és Értékelése, 7.5. alfejezete: Az Atomerőművek Telephelyének Vizsgálata és Értékelése, 7.5.5. Áradások pontja) írja elő az Atomerőművi telephely árvízvédelmi biztonságának nukleáris biztonsági követelményeit, az alábbiak szerint:

7.5.5.0100. Annak valószínűsége a teljes üzemidőre, hogy a telephelyen az árvízszint meghaladja az atomerőmű tervezési alapjában figyelembe vett szintet, nem lehet nagyobb, mint 5×10^{-3}.

7.5.5.0200. A telephely árvízvédelmét biztosító műtárgyak, földművek tervezésénél a tervezési alapba tartozó paramétereket úgy kell megválasztani, hogy az intézkedés hatására a telephely elárasztásának valószínűsége a teljes üzemidőre nem lehet nagyobb, mint 5×10^{-3}. Ehhez a telephelyvizsgálat során az elárasztás, és az árvízveszély jellemzőit az adott műtárgyak, földművek tervezésére vonatkozó előírások, és az atomerőmű nukleáris biztonsági követelményei szerint kell meghatározni. Ha jogszabály másként nem szabályozza, akkor ezeket a jellemzőket az 5×10^{-3} teljes üzemidőre vonatkoztatott meghaladási valószínűségi szinten kell meghatározni.”

11.7.1.2.2 A telephely árvédelemhez kapcsolódóan jellemző szintjei

A paksi vízmérce (Duna 1531,3 fkm, a vízmérce ”0” pontjának magassága 85,38 mBf) alapján az egyes területi árvízvédelmi fokozatok életbe léptetésének értékei:

Védelmi fokozatok	Vízállás és vízszint a paksi vízmércén		Vízszint az öblözeti vízmércén*
I. fokozat	650 cm	91,88 mBf	91,50 mBf
II. fokozat	800 cm	93,38 mBf	93,00 mBf
III. fokozat	900 cm	94,38 mBf	94,00 mBf

Megjegyzés:
* Az öblözeti vízmérce (hűtő-vízkivételi szivattyúk előtere), vízmérce ”0” pontjának magassága: 85,00 mBf.

11.7.1-5. táblázat: Árvízvédelmi fokozatok jellemző vízszintjei a Paksi- és az Erőművi vízmércén

11.7.1.2.3 Jégjelenséggel befolyásolt nagyvízszintek a tervezett fejlesztés területén

A jégjelenséggel nem befolyásolt vízszintek esetén a jégkóddal (Z: zajló jég, A: álló jég, T: jégtorlasz, P: parti jég) vízállásészleléskor rögzített vízállásadatokat kihagytuk a vizsgálatból, a hidrológiai statisztikai vizsgálatokban szokásos módon.

A jégjelenségekkel befolyásoltság a hidrológiai statisztikai vizsgálatok során azt jelenti, hogy az összes vízállásadattal számolunk, azaz a jégkód nélküli és a jégkóddal ellátott adatokat együttesen vizsgáljuk.

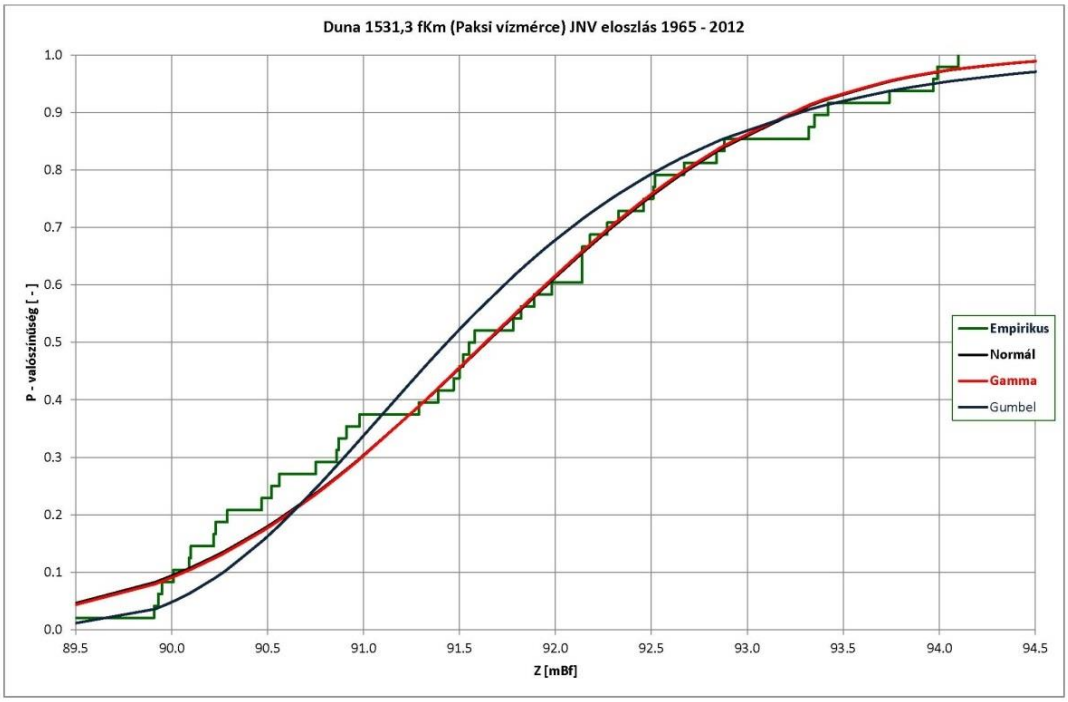
A jégjelenséggel befolyásolt és jégmentes vízállások együttes elemzése azt mutatja meg, hogy mennyiben módosulnak a statisztikai jellemzők a jégkóddal megjelölt vízállások figyelembevételével.

A vizsgált éves nagyvízi adatsor függetlenségének teljesülése esetén, az időben utolsó, szignifikáns inhomogenitást megkeressük, majd a szignifikáns inhomogenitásnál korábbi adatsor rész további vizsgálatától eltekintünk. Az éves nagyvizek független és homogén, majd rendezett adatsorára (empirikus eloszlásfüggvény), az alábbi eloszlásfüggvényeket illesztjük, majd a kiválasztjuk a legjobban illeszkedőt, mint legvalószínűbb értéket.

A 20 000 évente visszatérő ($p = 5 \times 10^{-5}$/év valószínűségű) jégjelenséggel befolyásolt árvízszint legvalószínűbb értéke 96,49 mBf, a Duna 1531,3 fkm szelvényben. A bővítendő telephely területe a Duna 1531,3 fkm szelvénye alatt (Duna 1527 fkm) helyezkedik el, így az ott a várható 20 000 éves nagyvízszint ~27 cm-rel kisebbre, 96,22 mBf szintűre adódik. A jelenleg üzemelő és tervezett erőművi telephely szintje 97,00 mBf alatt van és a 96,30 mBf árvízvédelmi koronaszint alatta marad, illetve a bal parti töltéskoronán (95,80 mBf) átbukik.

A mértékadó árvízszint az erőmű szelvényében (Duna 1527 fkm), $MÁSZ_{2010}$-től = 94,10 mBf, „A folyók mértékadó árvízszintjeiről" szóló hatályos, 11/2010. (IV. 28.) hatályos KvVM rendelet szerint. Az általunk meghatározott 20 000 évente visszatérő árvízszint értéke: 96,22 [mBf], azaz több mint 2 m-rel meghaladja a jogszabály szerinti mértékadó (100 évente visszatérő) árvízszint értéket.

Az éves jégjelenséggel befolyásolt nagyvízszintek (JNV) empirikus és illesztett eloszlásfüggvényeit a 11.7.1-7. ábra szemlélteti.



Megjegyzés:
A fenti ábrán a Normál és Gamma eloszlásfüggvény gyakorlatilag egybeesik, ezért a Normál eloszlás függvény görbéje a Gamma eloszlásfüggvény görbéje alatt található.

11.7.1-7. ábra: Jégjelenséggel befolyásolt nagyvízszintek (JNV) eloszlásfüggvénye (1968-2012) – Duna 1531,3 fkm

Az eddig észlelt legnagyobb jeges vízszint az 1876. évi jeges árvíz idején (1876.02.27.) fordult elő, melynek értéke 1006 cm a Paksi vízmérce szelvényben (Duna 1531,3 fkm), amely az erőmű szelvényében csak néhány cm-rel lehetett kisebb, ugyanis a Duna felszíne a jégtorlasz miatt, szinte vízszintes lehetett.

Az utolsó komoly jeges árvíz 1956-ban volt, és a rögzített adatok általánosságban a jégjelenségek erőteljes csökkenését és időbeli rövidülését mutatják. A kutatások ezen változásokat három tényezővel magyarázzák:

- A Duna ausztriai szakaszán láncszerűen nagy teljesítményű erőműveket építettek. A Duna menti településeket szinte mindenhol csatornázták. Az erőművek hűtővizének és a szennyvíznek a bevezetése komoly mértékű hőszennyezést jelent.
- A vízminőségben negatív változások álltak be. Az összes oldott anyag koncentráció növekedése a szilárd jégképződéshez szükséges időtartamot jelentősen növeli, de az egyéb vegyi szennyezések is akadályozzák a jégképződést.
- Az osztrák vízlépcsők ma már vízlépcsőláncot alkotnak, és az osztrák szakasz csatornázottnak tekinthető. Az osztrák vízlépcsők üzemrendje szerint a duzzasztóterekből jeget nem eresztenek le, ezért nagymértékben csökkent az osztrák szakaszról származó jégutánpótlás.

A folyószabályozási beavatkozások és az egyéb emberi tevékenység eredményeképpen az utóbbi évtizedekben a jégtorlódás kialakulásának valószínűsége erősen csökkent. Ennek ellenére – tekintettel a jelenség váratlanságára és az előre alig jelezhető méretére – a jeges árvíz veszélyét továbbra sem szabad figyelmen kívül hagyni. A jégtörő hajóparkot jelenleg a vízügyi szervezetek (Országos Vízügyi Főigazgatóság: OVF és Vízügyi Igazgatóságok: VIZIG-ek) tartják fenn. A dunai jégtörő flotta 9 hajóból áll.

11.7.1.2.4 Mértékadó jégmentes nagyvízszintek számítása

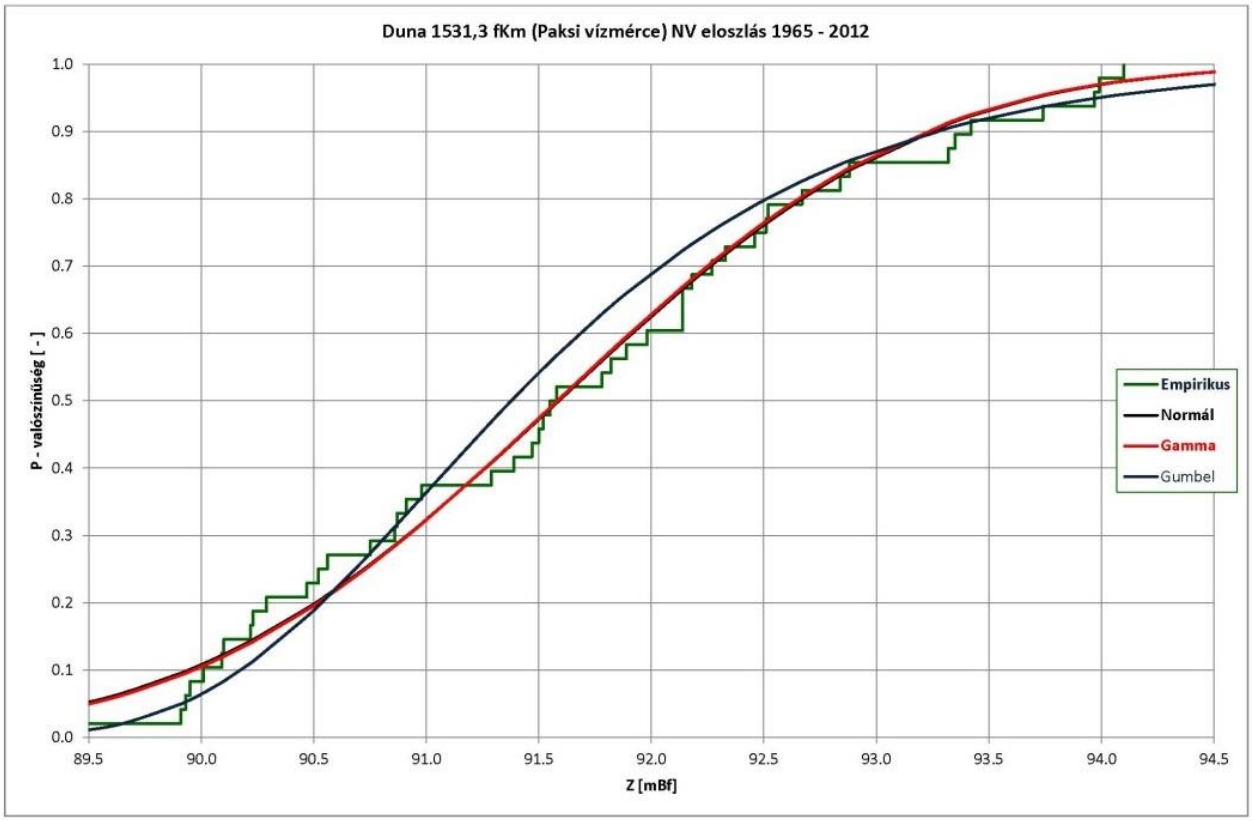
A vizsgált éves nagyvízi adatsor függetlenségének teljesülése esetén, az időben utolsó, szignifikáns inhomogenitást megkeressük, majd a szignifikáns inhomogentitásnál korábbi adatsor rész további vizsgálatától eltekintünk. Az éves nagyvizek független és homogén, majd rendezett adatsorára (empirikus eloszlásfüggvény), az alábbi eloszlásfüggvényeket (Normál, Gamma és Gumbel) illesztjük, majd kiválasztjuk a legjobban illeszkedőt, mint legvalószínűbb értéket:

A 20 000 évente visszatérő ($p = 5 \times 10^{-5}$/év valószínűségű) jégmentes árvízszint legvalószínűbb értéke a Duna 1531,3 fkm szelvényében 96,49 mBf. A bővítendő telephely területe a Duna 1531,3 fkm szelvénye alatt helyezkedik el (Duna 1527 fkm), így az ott várható 20 000 éves nagyvízszint ~27 cm-rel kisebbre, 96,22 mBf-re adódik, amely a jelenleg üzemelő erőművi telephely szintje ~97,00 mBf alatt van.

A mértékadó árvízszint az erőmű Duna szelvényében (Duna 1527 fkm), $MÁSZ_{2010}$-től = 94,10 mBf, „A folyók mértékadó árvízszintjeiről” szóló hatályos, 11/2010. (IV. 28.) hatályos KvVM rendelet szerint. Az általunk 1968-2012. időszakra meghatározott, 20 000 évente visszatérő árvízszint értéke: 96,22 mBf, azaz több mint 2 m-rel meghaladja a jogszabály szerinti (100 évente visszatérő) mértékadó árvízszint értéket, de még mindig a 96,30 mBf árvízvédelmi koronaszint alatta marad, illetve a bal parti töltéskoronán - ami 95,80 mBf koronaszintű -, átbukik.

A 2013. évi árhullám tetőzési szintje az erőmű szelvényében (Duna 1527 fkm) 94,06 mBf volt.

Az éves jégmentes nagyvízszintek (NV) empirikus és illesztett eloszlásfüggvényeit a 11.7.1-8. ábra szemlélteti:



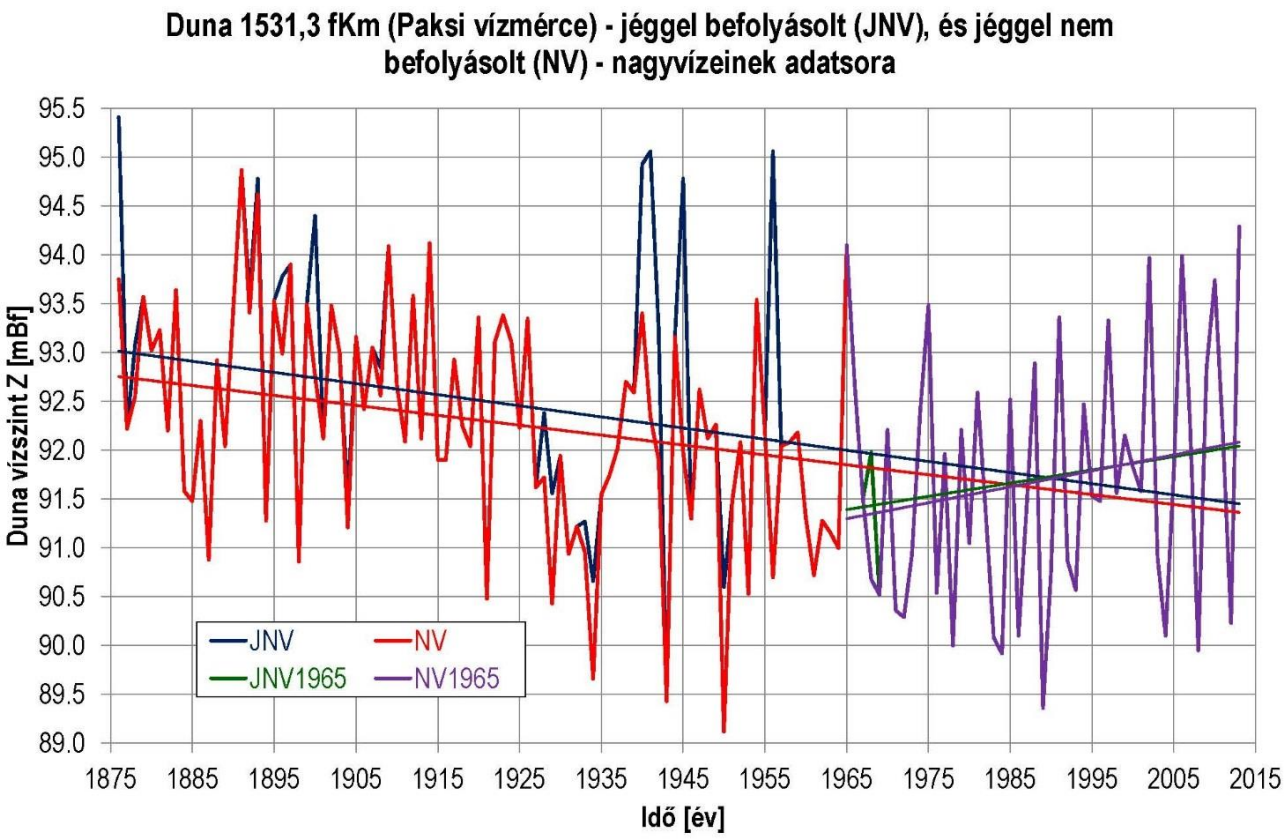
Megjegyzés:
A fenti ábrán a Normál és Gamma eloszlásfüggvény gyakorlatilag egybeesik, ezért a Normál eloszlás függvény görbéje a Gamma eloszlásfüggvény görbéje alatt található.

11.7.1-8. ábra: Jégmentes nagyvízszintek (NV) eloszlásfüggvénye (1965-2012) – Duna 1531,3 fkm

Fenti eredményekből megállapítható, hogy a kisebb előfordulási valószínűségű (nagyobb visszatérési idejű) magasabb vízállásoknál, a jéggel nem befolyásolt maximális vízállások a magasabbak, az utolsó homogénnek tekinthető vízállás adatsor alapján (1965-2012).

A 11.7.1-9. ábra, a Duna paksi vízmércéjén mért éves legnagyobb, jégjelenséggel befolyásolt és jégjelenséggel nem befolyásolt vízállásadatokat mutatja be 1876-tól 2013-ig. Az adatsor 1965-től tekinthető homogénnek, a jégjelenségek nagyvízszintet befolyásoló hatásának csökkenésével.

A 11.7.1-9. ábraán az évenkénti legnagyobb napi vízállás adatokból (Duna 1531,3 fkm, Paks) látszik, hogy az 1968, 1969 és 1971 évben, a jégjelenséggel befolyásolt nagyvizek nagyobb értékűek voltak, mint a jégmentesek, ezért a jégjelenséggel befolyásolt trendvonal meredeksége a jégmentes trendvonal meredekségénél kisebb, de az 1965-től vizsgált adatsorokban nincs szignifikáns eltérés. Mivel kb. 1999. óta a jégmentes trendvonal a jeges trendvonal fölé emelkedik, ezért a következőkben a mértékadóbb jégmentes nagyvízi adatsort alkalmazzuk.



11.7.1-9. ábra: Jégmentes (NV) és jégjelenséggel befolyásolt nagyvízszintek (JNV) éves maximális vízállás idősora és trendje 1876-2013., valamint 1965-2013. évek között – Duna 1531,3 fkm - Paks

Éves nagyvízszintek előrebecslése:

Az adatsort (1965-2012) logaritmikus trenddel kiegyenlítve és a jövőbe folytatva előrebecsültük a 20 000 évente visszatérő nagyvízszintet 2120-ra is, amelynek értéke 97,41 mBf-re adódott a Duna 1531,3 fkm szelvényében. Az erőmű szelvényében ez 97,14 mBf szintű. A számítások szerint az éves jégjelenséggel nem befolyásolt nagyvízszintek 2120. évig, várhatóan mintegy egy méterrel növekednek.

Ez a vízszint nem alakulhat ki, ugyanis az árvízvédelmi töltések koronaszintjét (erőműnél Duna jobb parton 96,30 mBf, a bal parton 95,80 mBf) meghaladja, ami nem lehetséges, ugyanis az árhullám levonulása során a felvízi töltéskoronán való átbukás lefejezi az árhullámot. Mivel a bal parton lényegesen, mintegy 0,5 méterrrel alacsonyabb koronaszintű az árvédelmi töltés, ezért a jobb parti töltéskoronán történő átbukás gyakorlatilag kizárható. A töltéskorona, a Duna mindkét partján lényegesen meghaladja a 100 évente visszatérő mértékadó árvízszintet (94,10 mBf), ugyanis a töltéseket a korábban előforduló jégtorlaszok hatására kialakult mértékadó jeges árvízszintjére (1876-os jeges árvíz) méretezték, a koronaszintet megnövelve kb. 1 méter biztonsággal. Emiatt nem indokolt és nem várható, hogy a töltéseket megerősítsék, a koronaszint emelése érdekében.

11.7.1.2.5 Mértékadó árvízszintek a tervezett fejlesztés környezetében

A 11.7.1-6. táblázat mutatja be a tervezett fejlesztés közvetlenebb környezetében lévő Duna szakasz (Duna 1525 – 1531,3 fkm) hatályos jogszabályban rögzített mértékadó árvízszintjeit (MÁSZ), összevetve a 2013. évben vízhozam alapú vizsgálattal meghatározott (VITUKI Hungary Kft .- BME VVT, 2013.) mértékadó árvízszint értékkel (1 % valószínűségű, 100 éves visszatérési idejű), valamint a 2013. évi eddigi legnagyobb (LNV) jégmentes tetőzési szinttel.

Duna [fkm]	MÁSZ számított (2013)* [mBf]	MÁSZ 2010.** [mBf]	Zmax 2013. [mBf]	Megjegyzés
1 531,30	94,39	94,33	94,29	Paksi vízmérce (891 cm)
1 530,00	94,32	94,25	94,23	
1 529,00	94,29	94,18	94,19	
1 528,00	94,21	94,14	94,13	
1 527,00	94,14	94,10	94,06	
1 526,00	94,08	94,05	94,00	
1 526,69	94,12	94,08	94,04	hidegvíz-csatorna
1 526,25	94,10	94,06	94,02	melegvíz-csatorna
1 525,75	94,06	94,04	93,99	Referencia szelvén (+500 m)
1 525,00	94,01	94,01	93,94	

Megjegyzés a fenti táblázathoz:

* „A Duna mértékadó árvízszintjeinek felülvizsgálata" (VITUKI Hungary Kft.-BME VVT, 2013.) projekt eredményei (MÁSZszámított, 2013.: vízhozam alapú Q1%-os Dunai jégmentes vízhozam tetőzési szintjei).

** MÁSZ 2010.: „A folyók mértékadó árvízszintjeiről" szóló hatályos, 11/2010. (IV. 28.) KvVM rendeletben szereplő mértékadó árvízszintek alapján.

11.7.1-6. táblázat: A 2013. évi legmagasabban tetőző jégmentes árhullám és a mértékadó árvízszintek (MÁSZ) alakulása az erőmű és a tervezett fejlesztés környezetében

A 11.7.1-7. táblázatban a meglévő erőmű jellemzőbb szintjeit és az árvízvédelmi fokozatok elrendelési szintjeit foglaltuk össze.

Árvízi elöntéssel veszélyeztetett, főbb objektumok A Paksi Atomerőmű területén, a Duna 1527 fkm környezetében	Mértékadó vízszintek [mBf] (Duna 1527 fkm)
Töltéskorona szint a PA Zrt. térségében, jobb part	96,30 mBf
Töltéskorona szint a PA Zrt. térségében, bal part	95,80* mBf
Az erőmű terepszintje	97,00 mBf
KKÁT kirakó csarnok padlószintje	92,30 mBf
Déli övcsatorna melletti trafóház padlószintje	93,30 mBf
Szennyvíztisztító telep szintje	94,00 mBf
Mészisztaptározó túlfolyó küszöbszintje	97,00 mBf
I. Árvízvédelmi Fokozat (öblözeti vízmérce)	91,50 mBf
II. Árvízvédelmi Fokozat (öblözeti vízmérce)	93,00 mBf
III. Árvízvédelmi Fokozat (öblözeti vízmérce)	94,00 mBf
Legnagyobb jégmentes vízszint (LNV) 2013.06.11.	94,06 mBf (8790 m³/s)
$MÁSZ_{2010}$ - A hatályos: 11/2010. (IV. 28.) KvVM rendelet „A folyók mértékadó árvízszintjeiről"	94,14 mBf (a rendeletbeli értékek alapján lineárisan interpolálva)

11.7.1-7. táblázat: Árvízi elöntéssel veszélyeztetett, főbb objektumok, árvízvédelmi fokozatok a Paksi Atomerőmű területén

Árvízvédelmi készültségek elrendelése

Az árvízvédelmi készültséget, a veszélyes vízjárási helyzettel (árhullámmal) érintett területileg illetékes Vízügyi Igazgatóság (VIZIG) rendeli el és szervezi, irányítja a védekezést. Amennyiben egy adott vízfolyáson két, vagy annál több VIZIG is érintett III. fokú készültséggel, akkor az Országos Műszaki Irányító Törzs (OMIT) hatáskörébe kerül a védelemirányítás.

Az árvízvédelmi készültség egyes fokozatait és az ezeknek megfelelő intézkedések végrehajtását KDT-VIZIG akkor rendeli el, ha az áradó víz az adott fokozati vízállást elérte vagy meghaladta és további áradás várható. Jeges árvíz veszélye, vagy ha a védművek állapota ezt indokolja, az adott vízállástól függetlenül magasabb készültségi fokozat is elrendelhető.

A készültség egyes fokozatait akkor kell megszüntetni, ha az apadó víz a fokozati vízállás alá csökkent, és újabb áradás nem várható, illetőleg a készültség elrendelésének oka megszűnt. Az erőmű területén (Duna jobb part) az árvízvédelmi feladatokat jelenleg a KDT-VIZIG látja el az MVM Paksi Atomerőmű Zrt. megbízása alapján. A megbízás az I. fokú árvízvédelmi készültség elrendelésétől az I. fokú árvízvédelmi készültség megszüntetéséig tart.

A paksi vízmérce (Duna 1531,3 fkm, a vízmérce "0" pontjának magassága 85,38 mBf) alapján az egyes területi árvízvédelmi fokozatok életbe léptetésének értékei:

Védelmi fokozatok	Vízállás és vízszint a paksi vízmércén		Vízszint az öblözeti vízmércén*
I. fokozat	650 cm	91,88 mBf	91,50 mBf
II. fokozat	800 cm	93,38 mBf	93,00 mBf
III. fokozat	900 cm	94,38 mBf	94,00 mBf

Megjegyzés:
***** Az öblözeti vízmérce (Duna 1526,5 fkm) vízmérce "0" pontjának magassága 85,00 mBf.

11.7.1-8. táblázat: Jellemző szintek a Paksi Atomerőmű környezetében és az árvízvédelmi elrendelési fokozatok

11.7.1.2.6 Történelmi árvizek eddig előfordult szélsőségei

Az eddig észlelt legmagasabb jégjelenséggel befolyásolt vízállás a paksi vízmércén mérve 95,44 mBf (1876. február 27.) volt. A Duna 1527 fkm szelvényre átszámított tetőzés szintje ettől a vízszinttől nem lényeges mértékben térhetett el, ugyanis a jégtorlaszok miatti duzzasztott felszín a paksi vízmérce és a Duna 1527 fkm szelvénye között csaknem vízszintes lehetett.

A legmagasabb jégmentes vízállás a Duna Paksi vízmérce szelvényében (1531,3 fkm) 2013. júniusában 891 cm-rel és 94,29 mBf vízszinttel (Paksi vízmérce „0" pontja: 85,38 mBf) tetőzött, amely az erőműnél (Duna 1527 fkm) 94,00 mBf szinten folyt le, az öblözeti vízmércén mérve: 93,97 mBf (öblözeti vízmérce „0" pontja: 85,00 mBf).

Ezt megelőző nagyvíz (872 cm: 1965. június 18.) a paksi vízmércén mérve 94,10 mBf volt, a Duna 1527 fkm szelvényre (erőmű) átszámított tetőzés szintje 93,80 mBf (öblözeti vízmércén mérve: 93,72 mBf).

11.7.1.2.7 Mértékadó jégmentes nagyvízi hozamok számítása

A telephely környezetében lévő vízrajzi állomásokra meghatározott mértékadó nagy-vízhozamok:

Az alábbiakban összefoglalóan megadjuk a 10 000 és 20 000 évente visszatérő mértékadó (jégmentes) nagy-vízhozam értékeket (Q_{NV}), a Duna Dunaújvárosi (11.7.1-9. táblázat), Dombori (11.7.1-10. táblázat) és Bajai (11.7.1-11. táblázat) vízrajzi mérőállomásainak Duna szelvényére (és környezetére) vonatkoztatva, a homogénnek tekinthető 1965-2012. időszak évenkénti legnagyobb vízhozamainak alapul vételével:

DUNAÚJVÁROS (DUNA 1580,6 fkm)			
	Normál eloszlás	Gamma eloszlás	Gumbel eloszlás
Visszatérési idő: T[év]	100 évente visszatérő		
Valószínűség: P [1/év]	1×10^{-2} [1/év]		
Vizsgált adatok: Q_{NV} [m³/s] (1965 - 2012)	8 631 [m³/s]	9 017 [m³/s]	9 755 [m³/s]
Visszatérési idő: T[év]	10 000 évente visszatérő		
Valószínűség: P [1/év]	1×10^{-4} [1/év]		
Vizsgált adatok: Q_{NV} [m³/s] (1965 - 2012)	10 560 [m³/s]	11 881 [m³/s]	14 735 [m³/s]
Visszatérési idő: T[év]	20 000 évente visszatérő		
Valószínűség: P [1/év]	5×10^{-5} [1/év]		
Vizsgált adatok: Q_{NV} [m³/s] (1965 - 2012)	10 797 [m³/s]	12 269 [m³/s]	15 484 [m³/s]
Illeszkedési mértéke Im [%]	91.32 [%]	92.24 [%]	93.00 [%]

11.7.1-9. táblázat: Mértékadó jégmentes nagyvízi Duna vízhozamok (Dunaújváros)

DOMBORI (DUNA 1506,8 fkm)			
	Normál eloszlás	Gamma eloszlás	Gumbel eloszlás
Visszatérési idő: T[év]	100 évente visszatérő		
Valószínűség: P [1/év]	1×10^{-2} [1/év]		
Vizsgált adatok: Q_{NV} [m³/s] (1965 - 2012)	8 306 [m³/s]	8 666 [m³/s]	9 371 [m³/s]
Visszatérési idő: T[év]	10 000 évente visszatérő		
Valószínűség: P [1/év]	1×10^{-4} [1/év]		
Vizsgált adatok: Q_{NV} [m³/s] (1965 - 2012)	10 134 [m³/s]	11 361 [m³/s]	14 089 [m³/s]
Visszatérési idő: T[év]	20 000 évente visszatérő		
Valószínűség: P [1/év]	5×10^{-5} [1/év]		
Vizsgált adatok: Q_{NV} [m³/s] (1965 - 2012)	10 359 [m³/s]	11 726 [m³/s]	14 799 [m³/s]
Illeszkedési mértéke Im [%]	92.34 [%]	93.77 [%]	92.85 [%]

11.7.1-10. táblázat: Mértékadó jégmentes nagyvízi Duna vízhozamok (Dombori)

BAJA (DUNA 1478,7 fkm)			
	Normál eloszlás	Gamma eloszlás	Gumbel eloszlás
Visszatérési idő: T[év]	100 évente visszatérő		
Valószínűség: P [1/év]	1×10^{-2} [1/év]		
Vizsgált adatok: Q_{NV} [m³/s] (1965 - 2012)	8 030 [m³/s]	8 336 [m³/s]	9 011 [m³/s]
Visszatérési idő: T[év]	10 000 évente visszatérő		
Valószínűség: P [1/év]	1×10^{-4} [1/év]		
Vizsgált adatok: Q_{NV} [m³/s] (1965 - 2012)	9 713 [m³/s]	10 757 [m³/s]	13 335 [m³/s]
Visszatérési idő: T[év]	20 000 évente visszatérő		
Valószínűség: P [1/év]	5×10^{-5} [1/év]		
Vizsgált adatok: Q_{NV} [m³/s] (1965 - 2012)	9 920 [m³/s]	11 083 [m³/s]	14 009 [m³/s]
Illeszkedési mértéke Im [%]	89.82 [%]	92.86 [%]	94.60 [%]

11.7.1-11. táblázat: Mértékadó jégmentes nagyvízi Duna vízhozamok (Baja)

Hidrodinamikai modellvizsgálatokhoz meghatározott mértékadó nagy-vízhozamok

Az alábbiakban összefoglalóan megadjuk a 10 000 és 20 000 évente visszatérő mértékadó nagy-vízhozam értékeket (Q_{NV}), a Duna Pozsonyi (11.7.1-12. táblázat) és Budapesti (11.7.1-12. táblázat) vízrajzi mérőállomásainak Duna szelvényére (és környezetére) vonatkoztatva, a homogénnek tekinthető 1965-2012. időszak évenkénti legkisebb vízhozamainak figyelembe vételével:

POZSONY (DUNA 1868,7 fkm)			
	Normál eloszlás	Gamma eloszlás	Gumbel eloszlás
Visszatérési idő: T[év]	100 évente visszatérő		
Valószínűség: P [1/év]	1×10^{-2} [1/év]		
Vizsgált adatok: Q_{NV} [m³/s] (1965 - 2012)	9 690 [m³/s]	10 177 [m³/s]	11 001 [m³/s]
Visszatérési idő: T[év]	10 000 évente visszatérő		
Valószínűség: P [1/év]	1×10^{-4} [1/év]		
Vizsgált adatok: Q_{NV} [m³/s] (1965 - 2012)	11 940 [m³/s]	13 598 [m³/s]	16 811 [m³/s]
Visszatérési idő: T[év]	20 000 évente visszatérő		
Valószínűség: P [1/év]	5×10^{-5} [1/év]		
Vizsgált adatok: Q_{NV} [m³/s] (1965 - 2012)	12 217 [m³/s]	14 063 [m³/s]	17 684 [m³/s]
Illeszkedési mértéke Im [%]	87.93 [%]	91.31 [%]	92.25 [%]

11.7.1-12. táblázat: Mértékadó jégmentes nagyvízi Duna vízhozamok (Pozsony)

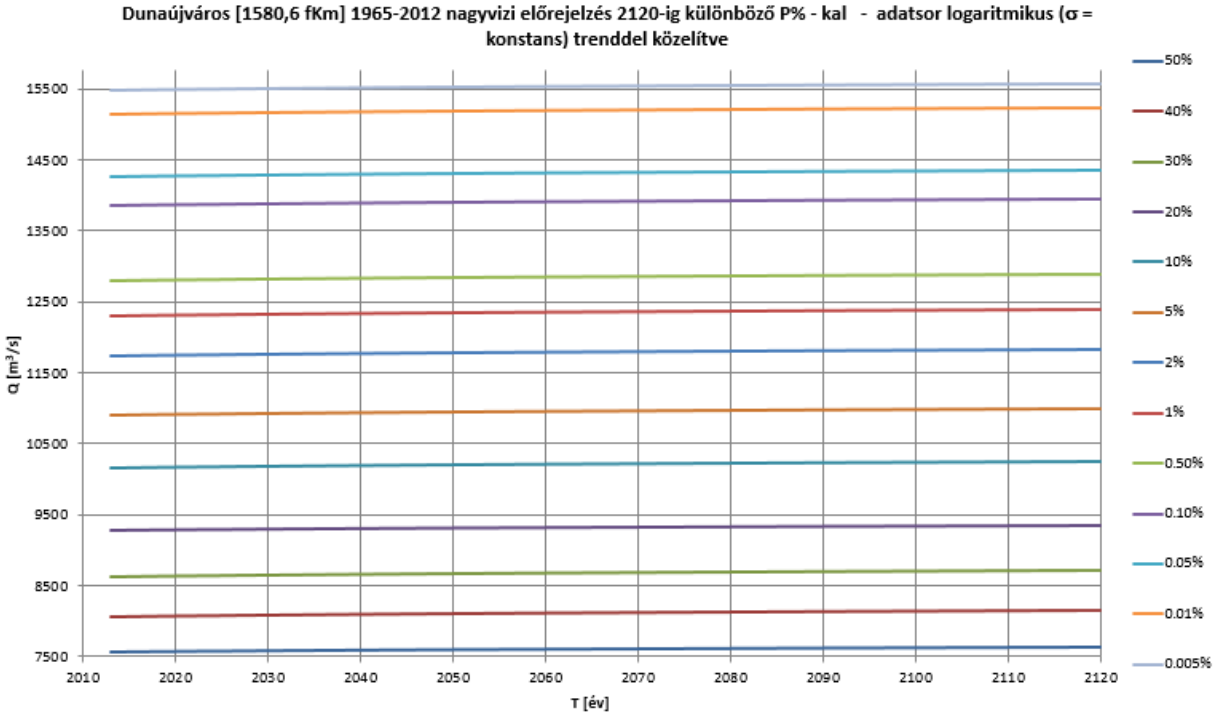
BUDAPEST Vigadó tér (DUNA 1646,5 fkm)			
	Normál eloszlás	Gamma eloszlás	Gumbel eloszlás
Visszatérési idő: T[év]	100 évente visszatérő		
Valószínűség: P [1/év]	1×10^{-2} [1/év]		
Vizsgált adatok: Q_{NV} [m³/s] (1965 - 2012)	8 698 [m³/s]	9 103 [m³/s]	9 822 [m³/s]
Visszatérési idő: T[év]	10 000 évente visszatérő		
Valószínűség: P [1/év]	1 × 10-4 [1/év]		
Vizsgált adatok: Q_{NV} [m³/s] (1965 - 2012)	10 626 [m³/s]	11 975 [m³/s]	14 798 [m³/s]
Visszatérési idő: T[év]	20 000 évente visszatérő		
Valószínűség: P [1/év]	5×10^{-5} [1/év]		
Vizsgált adatok: Q_{NV} [m³/s] (1965 - 2012)	10 863 [m³/s]	12 364 [m³/s]	15 547 [m³/s]

11.7.1-13. táblázat: Mértékadó jégmentes nagyvízi Duna vízhozamok (Budapest)

11.7.1.2.8 Várható nagyvízi hozamok előrejelzése a tervezett bővítés üzemidejének időtartamára

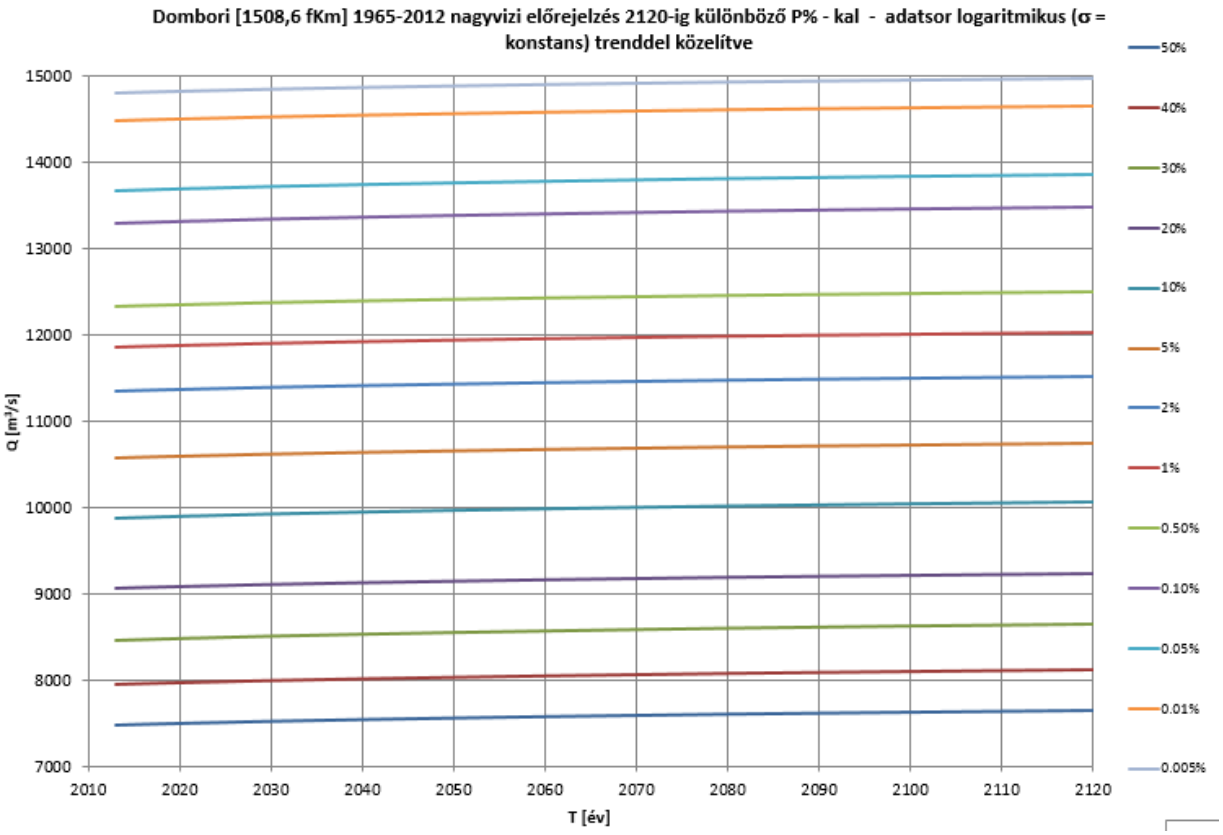
Az éves nagy-vízhozamokat (Q_{NV}) 2013. évtől 2120. évig (a tervezett bővítés üzemidejének végéig), kb. 110 év időelőnnyel becsültük előre (a kisvízhozamok előrebecslésénél leírtak szerinti módon). A halmozott szórás 1965-től 2012-ig állandó értékkel vettük figyelembe, az előrejelzés trendjét pedig logaritmikus kiegyenlítéssel.

Az éves dunai nagy-vízhozam értékek Dunaújvárosnál (Duna 1580,6 fkm) kis mértékben növekednek 2013-tól 2120-ig (11.7.1-10. ábra).

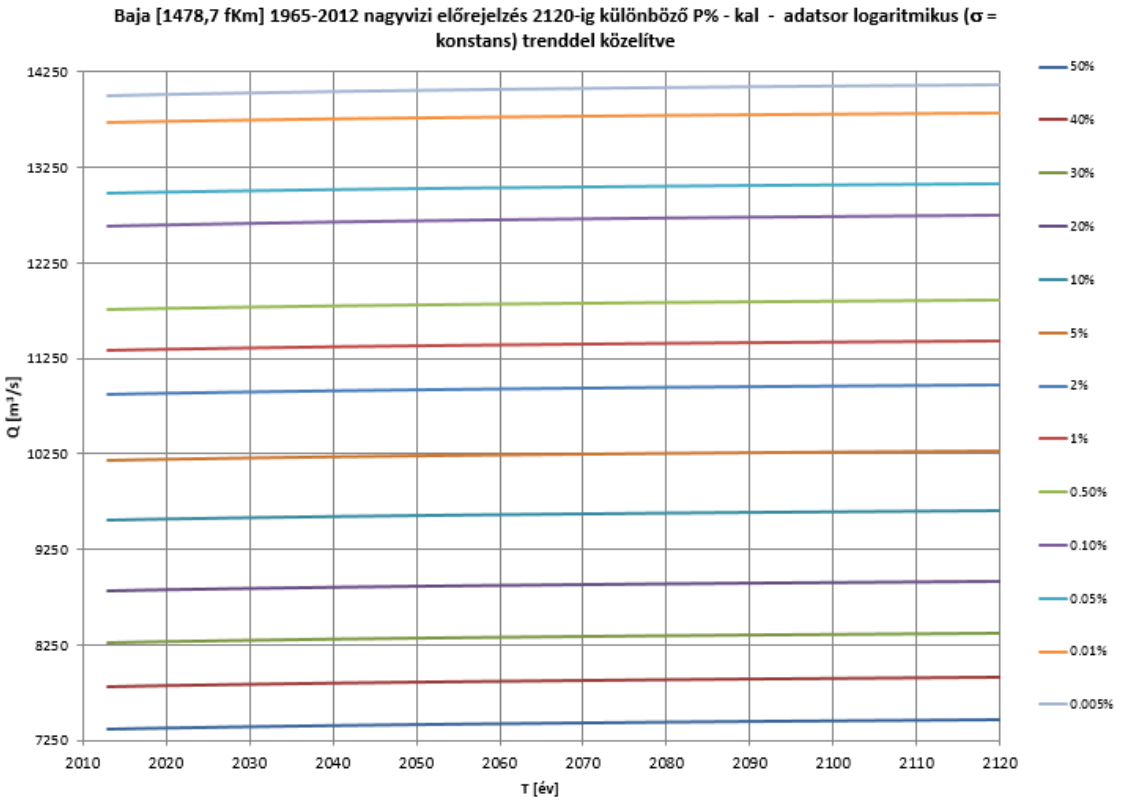


11.7.1-10. ábra: Duna 1580,6 fkm - Dunaújváros NV (nagy-vízhozam) 1965 - 2012 előrejelzés 2120-ig

A 20 000 évente visszatérő éves nagy-vízhozamok mindhárom előrejelző görbéje a Duna dunaújvárosi szelvényéhez hasonló lefutásúak, azaz időben kis mértékben növekednek a Duna Domborinál (Duna 1506,8 fkm) és Bajánál (Duna 1478,7 fkm) lévő vízmércéi éves kisvízhozam adatai tekintetében (11.7.1-11. ábra és 11.7.1-12. ábra).



11.7.1-11. ábra: Duna 1508,6 fkm - Dombori NV (nagy-vízhozam) 1965 - 2012 előrejelzés 2120-ig



11.7.1-12. ábra: Duna 1478,7 fkm - Baja NV (nagy-vízhozam) 1965 - 2012 előrejelzés 2120-ig

Az erőmű környezetében lévő vízmércékre vonatkozó éves nagyvízi vízhozamok előrebecslési eredményeit a 11.7.1-14. táblázatban foglaltuk össze.

	Q_{NV}			
Az előrejelzés bázisidőszaka	**T_0 = 2012**	**T = 2120**		
	P=50%		P=1%	P=0,005%
	logaritmikus trend			
DUNAÚJVÁROS (Duna 1580,6 fkm)				
Q_{NV} (1965 - 2012)	7 554 [m³/s]	7 641 [m³/s]	12 382 [m³/s]	15 569 [m³/s] (2012-ben: 15 484 m³/s; 2120-ra 0,55 %-kal nő
DOMBORI (Duna 1506,8 fkm)				
Q_{NV} (1965 - 2012)	7 464 [m³/s]	7 647 [m³/s]	12 302 [m³/s]	14 981 [m³/s] (2012-ben: 14 799 m³/s; 2120-ra 1,23 %-kal nő
BAJA (Duna 1478,7 fkm)				
Q_{NV} (1965 - 2012)	7 373 [m³/s]	7 474 [m³/s]	11 442 [m³/s]	14 109 [m³/s (2012-ben: 14 009 m³/s; 2120-ra 0,71 %-kal nő

11.7.1-14. táblázat: Dunai nagyvízhozamok előrejelzése 2120-ig (Dunaújváros, Dombori és Baja)

Becsléseink szerint 2120-ra (a tervezett bővítés üzemidejének végén) a jelenlegi szélsőségesen nagy vízhozam értékek kb. 1,5 %-kal növekednek.

11.7.1.3 A Duna kisvizeinek statisztikai vizsgálata

11.7.1.3.1 Történeti kisvizek

A Dunán 2003. augusztus végén és 2004. január elején extrém alacsony vízállás (-49 cm a paksi vízmércénél (84,89 mBf, 84,62 mBf az erőmű szelvényében), ami 84,51 mBf az erőmű öblözeti vízmércéjén, valamint 2011 december elején a paksi vízmércén -58 cm (84,80 mBf), ami az erőmű öblözeti vízmércéjén 84,42 mBf) következett be. Az okokat kutatva, a VITUKI és a BME már korábban egymástól függetlenül arra a következtetésre jutott, hogy a közel változatlan kis- és középvízi vízhozamokat a folyam azért vezeti le a korábbi évekhez (1960-as, 70-es évek) viszonyítva alacsonyabb vízállással, mert elsősorban a Dunaföldvár alatti ipari kotrások, valamint a felvízi vízlépcsők hordalék visszatartása miatt a Duna medre, az eredeti viszonyok melletti morfo-dinamikai mélyüléshez képest is több mint 40-60 cm-rel mélyült.

Az OVF jogelődje az OVH (Országos Vízügyi Hivatal) az ipari kotrásokat 1985 nyarán az 1505-1536 fkm között – a nemzetközi hajóút fenntartásához szükséges eseti gázlókotrások kivételével – leállította. Az 1985, illetve 1986 őszén elvégzett ellenőrző mederszelvényezések bizonyították, hogy az ipari kotrások korlátozása elérte célját, a felmért szelvények, a mederszakasz dinamikus egyensúlyát, illetve enyhébb mélyülést mutattak.

2003-ban a dunai vízjárást a téli-tavaszi időszakban rövid árhullámokkal megszakított alacsony vagy közepes vízjárás jellemezte, majd a hóolvadást nem kísérte csapadék, így már áprilisra szárazság és szokatlanul alacsony vízjárás alakult ki. Az extrém alacsony vízjárás augusztusban is folytatódott, 2003.08.30-án -49 cm paksi vízállás minimumot (az erőműnél 84,62 mBf) érve el. Ezt követően is folytatódott a rendkívül alacsony vízjárás, számottevő áradás csak október közepén volt, majd ismét apadt, és november közepétől 2004. január közepéig csaknem folyamatosan igen alacsony, többnyire 85,0 mBf alatti kisvízi állapot volt a meghatározó.

Hasonlóan szélsőséges kisvízi állapot jellemezte a 2011. november 10. – december 10. közötti időszakot, amelynek során a vízállás az Erőmű szelvényben többnyire 85,0 mBf érték alatt tartózkodott.

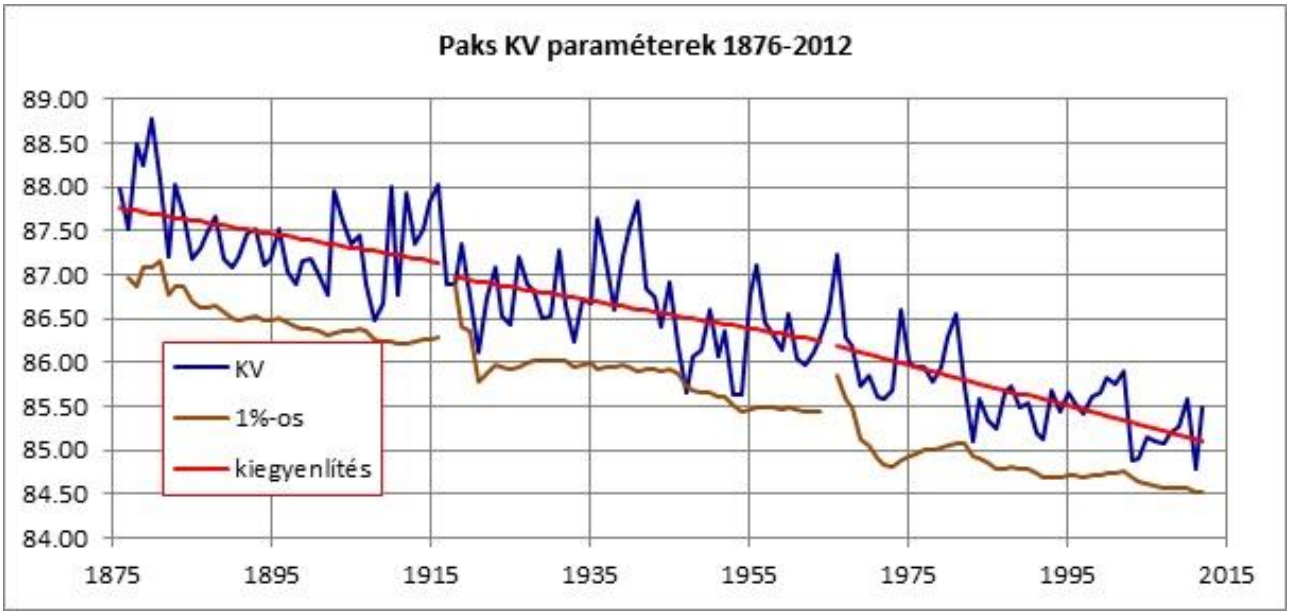
Az 1983. novemberi rendkívül alacsony vízállás után az alábbi intézkedések végrehajtásával lényegesen növelték a hűtővíz rendszer biztonságát alacsony Duna vízállás esetére. A hidegvíz-csatorna medermélyítése 82,00 mBf szintről 81,00 mBf szintre, a BQS 600-II. biztonsági hűtővíz szivattyúk fejlesztése, az MJO kondenzátor hűtővíz szivattyúk járókerekeinek átalakítása, kiépítésenként két-két olyan zsiliptábla kialakítása, amelyek alacsony vízállásnál lehelyezésre kerülnek és a rajtuk található ablakon keresztül búvárszivattyúkkal biztosítható a megfelelő mennyiségű hűtővíz.

Kidolgozásra került a Kisvízi Intézkedési Terv, mely tartalmazza mindazon intézkedéseket, melyekkel az Erőmű biztonsági hűtővízrendszere, 3 m³/s mobil szivattyús vízkivételi kapacitással elvileg bármilyen alacsony vízállás mellett is tartaléküzemben tartható.

A dunai extrém kisvizek elleni védelem, illetve az üzembiztonság fokozható lenne a hidegvíz-csatorna dunai torkolat közeli mederelzárási lehetőségének kiépítésével (az 1983-as extrém kisvíz esetén ilyen provizórikus mederelzárást építettek ki), valamint a Duna vizének nagyobb kapacitású mobil dízel szivattyúkkal történő beemeléséhez szükséges infrastruktúra telepítésével.

11.7.1.3.2 Kisvízszintek statisztikai vizsgálata

Homogenitás-vizsgálatnak vetettük alá a Duna paksi vízmérce szelvényében (Duna 1531,3 fkm), az 1876-2012. időszak összes éves nagyvízi vízszint adatát, idősorát. Két törést találtunk 1919 és 1965 évek környezetében. Ezt figyelembe véve határoztuk meg szakaszonként a trendet, lineárisan kiegyenlítéssel (11.7.1-13. ábra). Megjegyezzük, hogy a Duna összes hazai vízmérce szelvényében megtalálható mindkét inhomogenitás, az említett két év kis környezetében.



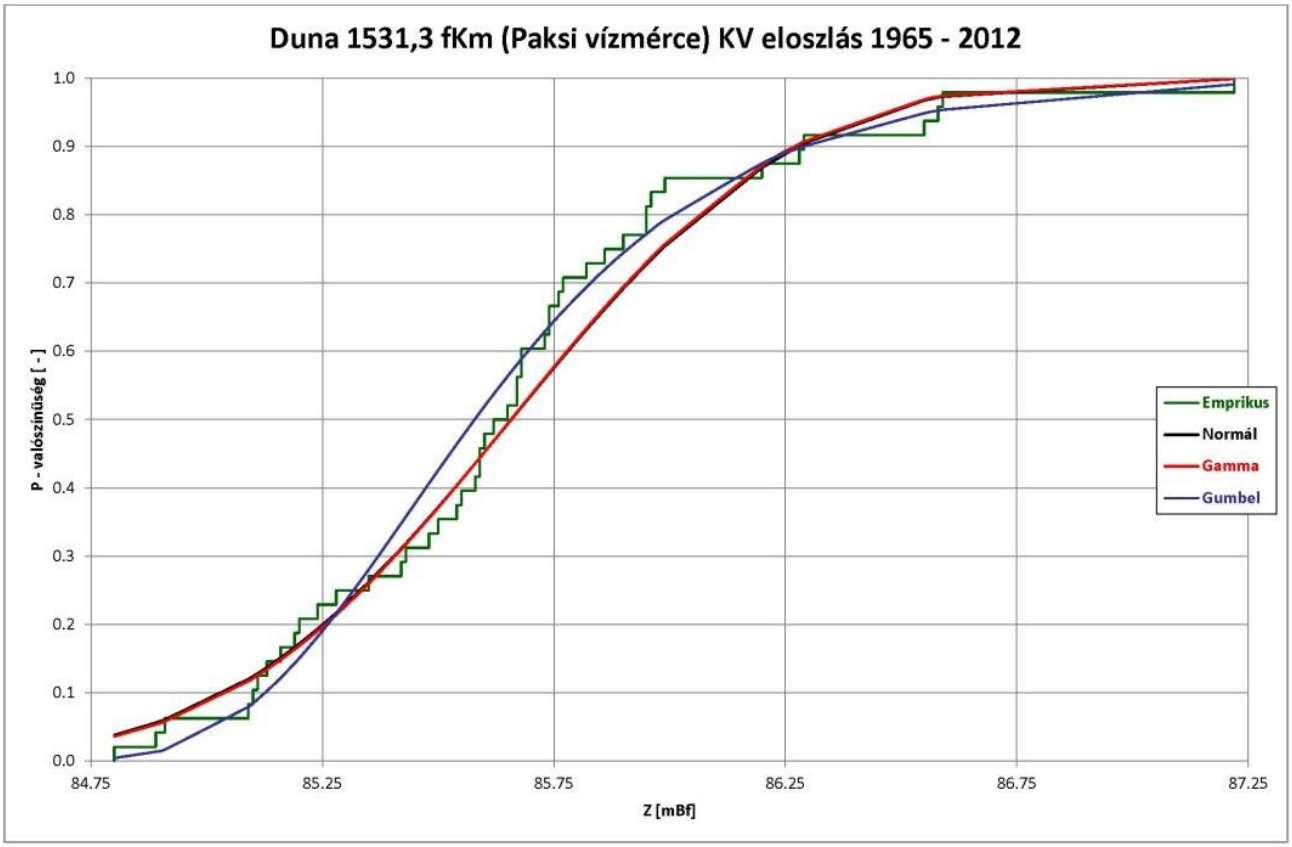
11.7.1-13. ábra: Duna 1531,3 fkm (paksi vízmérce) kisvízszintjeinek homogenitásvizsgálata és trendje az 1987-2012. évek időszakának éves nagyvízi adatainak feldolgozásával

A Paksi vízmérce szelvényben (Duna 1531,3 fkm) ezért az utolsó homogénnek tekinthető időszakra 1965-2012 évek kisvízszintjeire illesztettünk Normál, Gamma és Gumbel eloszlásfüggvényeket.

A T = 20 000 ($F(x20.000) = 5.10^{-5}$ [1/év]) évenként visszatérő kisvízszinteket az eloszlásfüggvények inverzének segítségével határoztuk meg az alábbi eredményekkel.

A 20 000 évente visszatérő kisvízszint: 83,78 mBf a Paksi vízmérce szelvényben (Duna 1531,3 fkm), amely az erőmű szelvényében ~27 cm-rel kisebbre, azaz 83,51 mBf-re adódik.

Az éves kisvízszintek (KV) empirikus és illesztett eloszlásfüggvényeit az alábbi ábra szemlélteti:

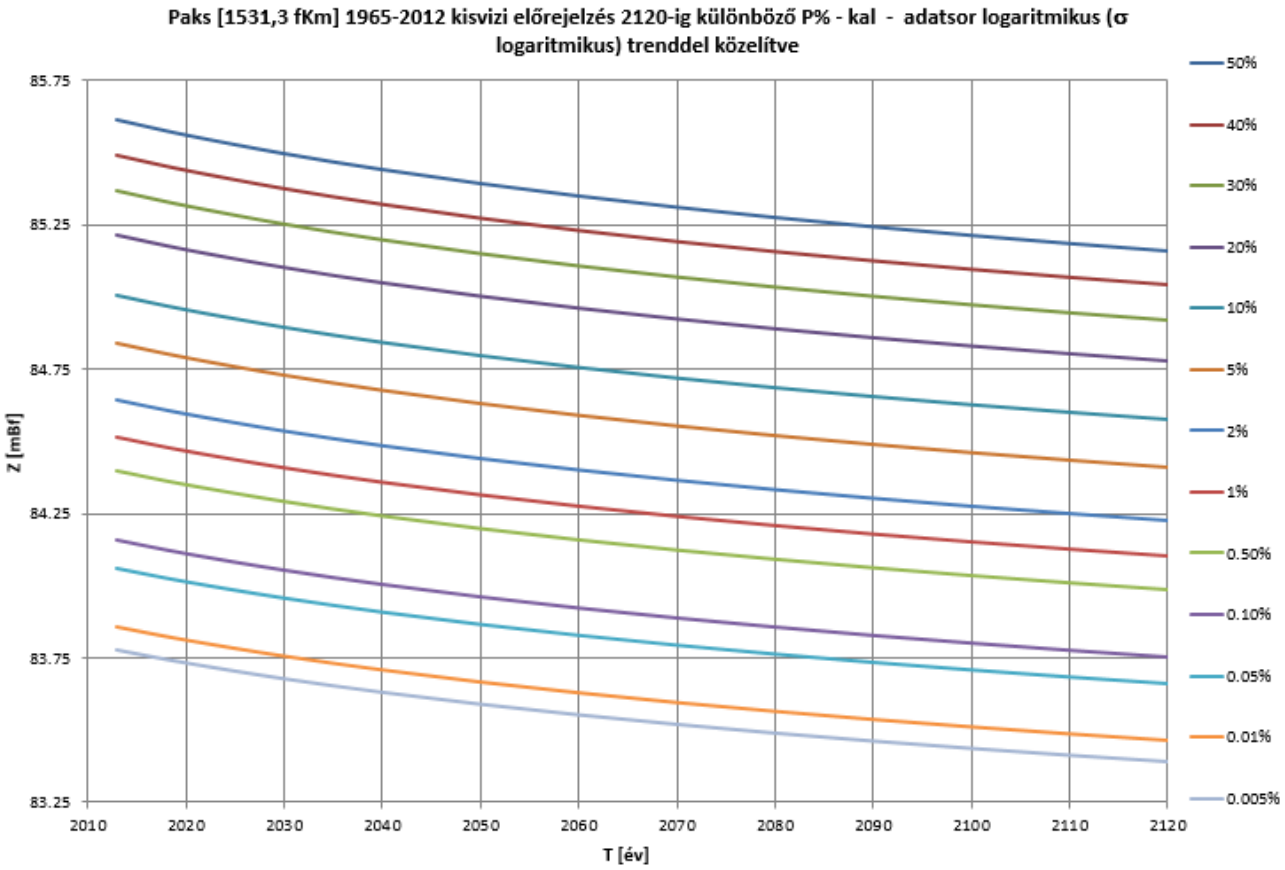


11.7.1-14. ábra: Kisvízszintek (KV) eloszlásfüggvénye (1965-2012) – Duna 1531,3 fkm (Paksi vízmérce)

A 11.7.1-14. ábran is látható, hogy a rendezett kisvízi adatsorra illesztett Gumbel eloszlásfüggvény illeszkedik legjobban az empirikus (lépcsős) függvényhez. A Gumbel eloszlásfüggvények illeszkedésének mértéke, a mértékadó kisvízszintek tartományában lényegesen jobb, mint az esetünkben speciálisan együtt haladó Normál és Gamma eloszlásfüggvényeké, de a biztonság javára a Normál eloszlásfüggvényt vettük alapul.

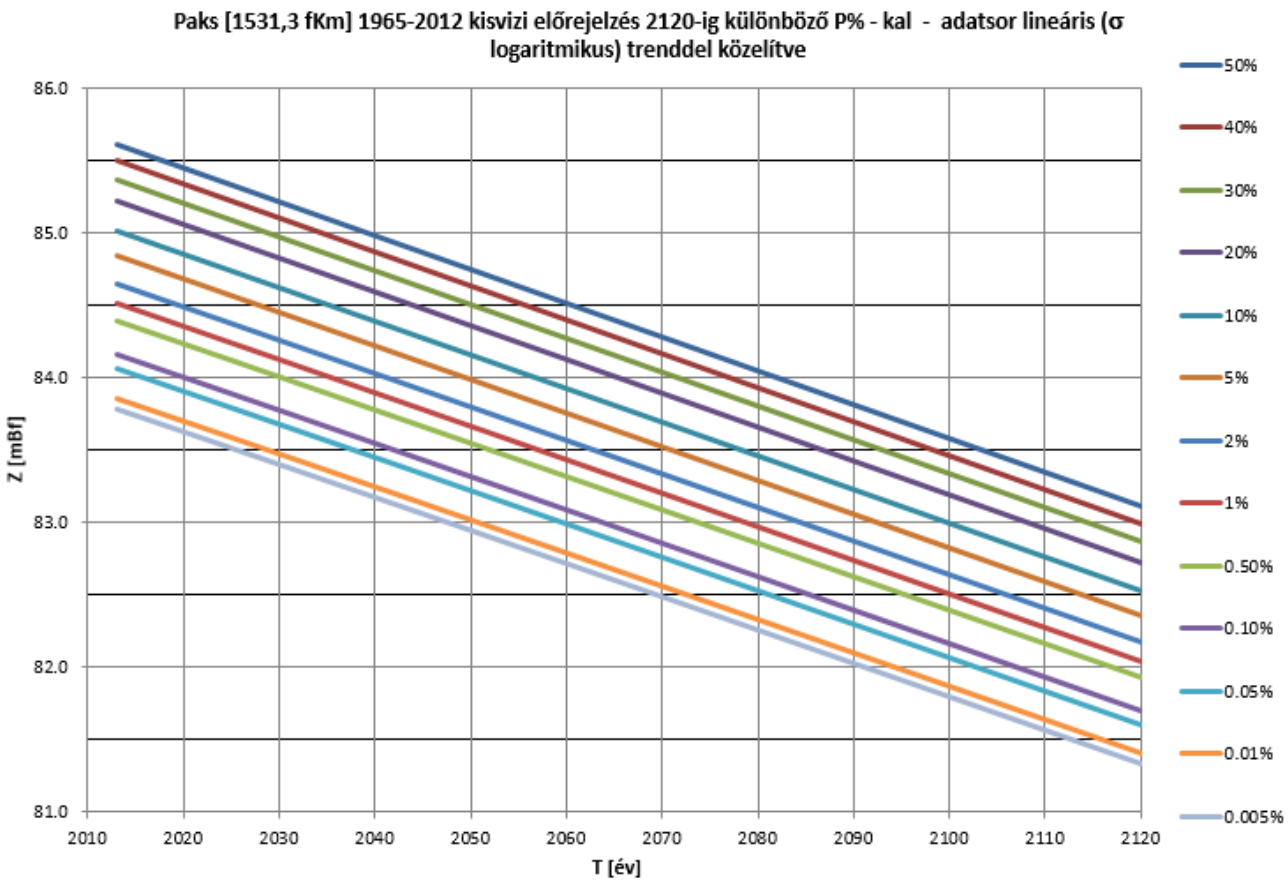
11.7.1.3.3 Várható kisvízszintek előrebecslése

A kisvízi adatsort (1965-2012) logaritmikus és lineáris trenddel kiegyenlítve és a jövőbe folytatva előrebecsültük a 20 000 évente visszatérő kisvízszintet 2120-ra is.



11.7.1-15. ábra: Kisvízszintek előrebecslése 2120-ig a Duna Paksi vízmérce szelvényében – logaritmikus kiegyenlítéssel

Logaritmikus trend esetén (optimista becslés az ipari kotrások teljes leállását, hatásainak lecsengő tenfenciáját feltételezve) a 20 000 évente visszatérő kisvízszint értéke 83,39 [mBf]-re adódott a Duna 1531,3 fkm szelvényében. Az erőmű szelvényében ez 83,12 mBf szintű, a csökkenés összesen -0,39 m, a csökkenés átlagos értéke 2120-ig: -0,36 cm/év.



11.7.1-16. ábra: Kisvízszintek előrebecslése 2120-ig a Duna Paksi vízmérce szelvényében – ineáris kiegyenlítéssel

Lineáris trend esetén (ha a jelenlegi kisvízszint csökkenés és a medermélyülés gyengítetlenül folytatódik) a 20 000 évente visszatérő kisvízszint értéke 81,33 [mBf]-re adódott a Duna 1531,3 fkm szelvényében. Az erőmű szelvényében ez 81,06 mBf szintű, a csökkenés összesen -2,45 m, a csökkenés átlagos értéke 2120-ig: -2,27 cm/év.

A két (logaritmikus és lineáris kiegyenlítéses) módszerrel kapott vízszintsüllyedések átlagos értéke -1,42 m, a csökkenés átlagos értéke 2120-ig: -1,31 cm/év. Ebben az esetben a 20 000 évente visszatérő kisvízszint 2120-ban 82,36 mBf értékű a paksi vízmércénél, míg 82,09 mBf az erőmű Duna (1527 fkm) szelvényében.

A telephely környezetében a tervezett Paks II. blokkjainak kilépésekor, 2090. évben az alábbi kis- és középvízszint süllyedésekre lehet számítani:

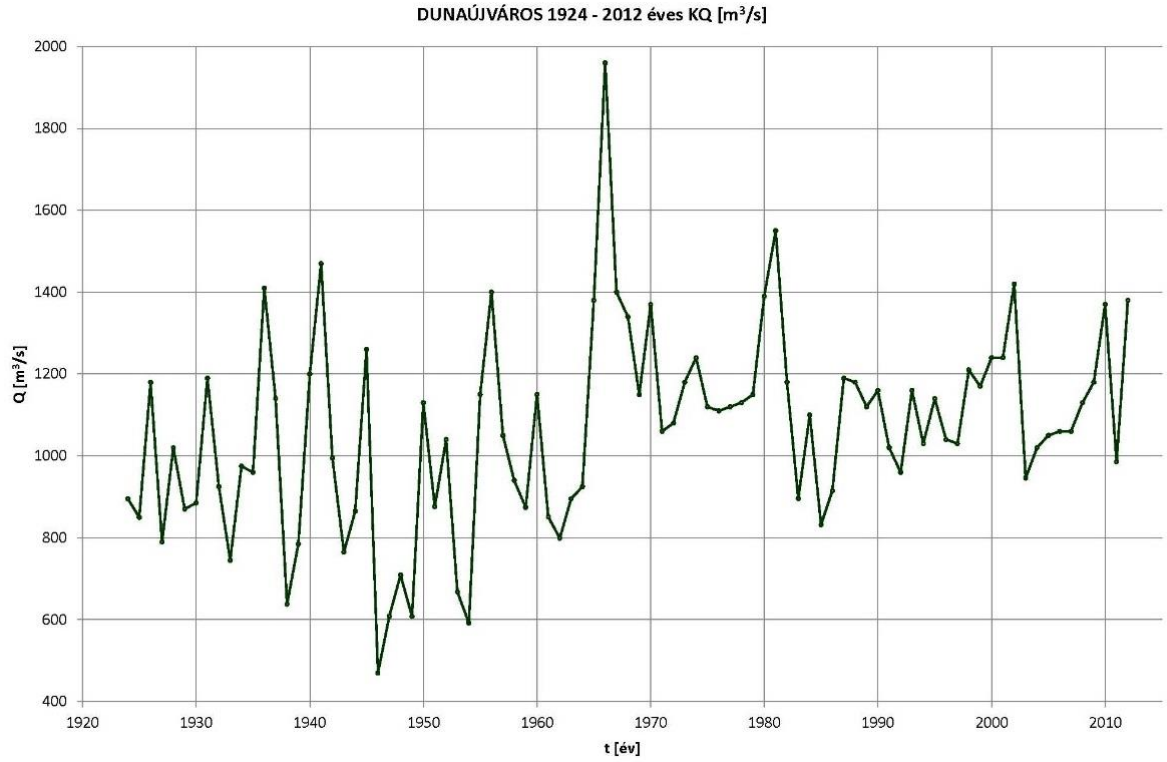
- Lineáris trend meghosszabbítása esetén (2090.) ~1,8 [m] süllyedést (-2,29 [cm/év]),
- Logaritmikus trend meghosszabbítása esetén (2090.) ~0,3 [m] süllyedést (átlagosan: -0,36 [cm/év]),
- A Lineáris és Logaritmikus trend átlagértékével számolva (2090.) ~1,0 [m] süllyedést mutat (átlagosan: -1,33 [cm/év]).

11.7.1.3.4 A Duna mértékadó kisvízi vízhozamainak meghatározása

A Duna alábbi vízrajzi mérőállomásainak éves kisvízhozam adatait elemeztük, a hidrológiai statisztika klasszikus eszközeivel:

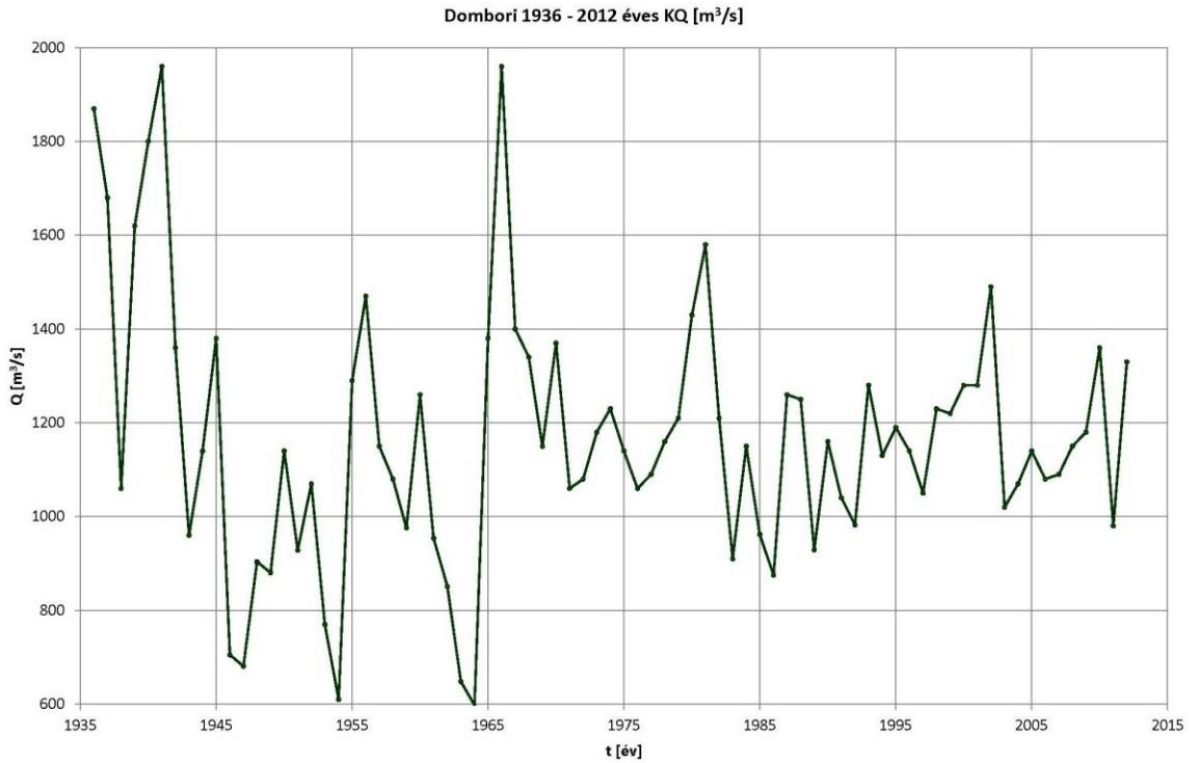
- Dunaújvárosi (Duna 1580,6 fkm) vízhozam adatok: 1924 – 2012.
- Dombori (Duna 1506,8 fkm) vízhozam adatok: 1936 – 2012.
- Bajai (Duna 1478,7 fkm) vízhozam adatok: 1930 – 2012.

A Duna Dunaújvárosi vízrajzi mérőállomásának éves kisvízhozamait, 1924-től 2012-ig terjedően a 11.7.1-17. ábra mutatja:



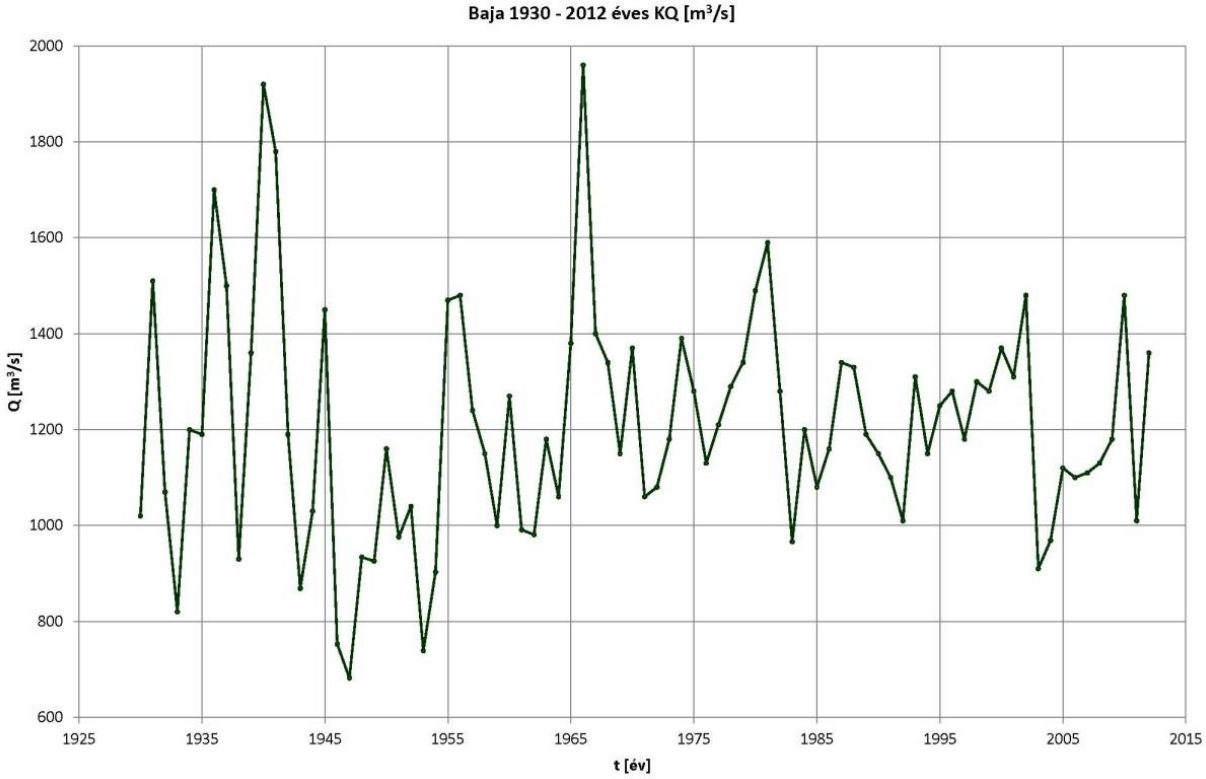
11.7.1-17. ábra: Duna 1580,6 fkm - Dunaújvárosi éves kisvízhozam adatok: 1924 – 2012.

A Duna Dombori vízrajzi mérőállomásának éves kisvízhozamait, 1936-2012-ig terjedően a 11.7.1-18. ábra szemlélteti.



11.7.1-18. ábra: Duna 1506,8 fkm - Dombori éves kisvízhozam adatok: 1936 – 2012.

A Duna Bajai vízrajzi mérőállomásának éves kisvízhozamait, 1930-tól 2012-ig terjedően a 11.7.1-19. ábra szemlélteti.



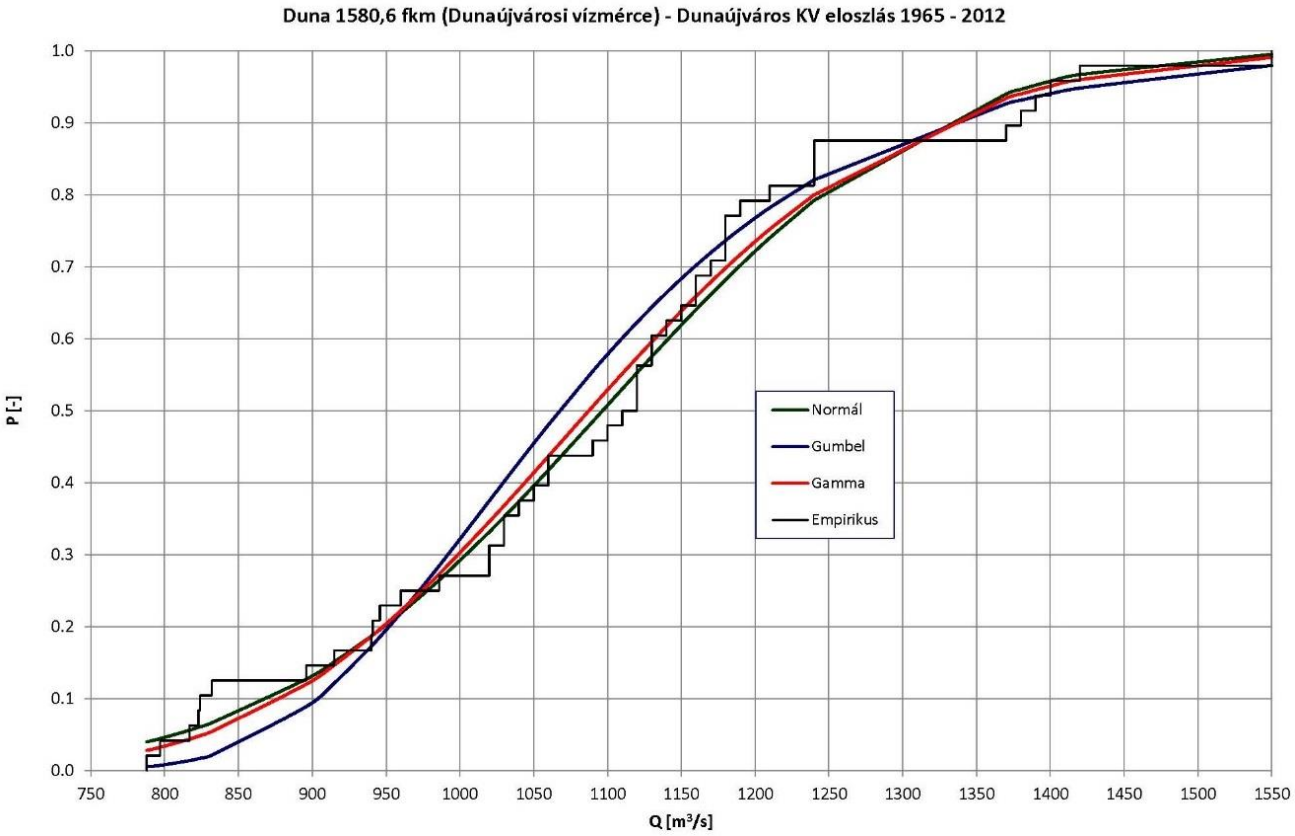
11.7.1-19. ábra: Duna 1478,7 fkm - Bajai éves kisvízhozam adatok: 1930 – 2012.

A mértékadónak tekintett, szélsőséges kisvízhozamot, a 20 000 évenként visszatérő, azaz $5x10^{-5}$/év valószínűségi szintű eseményként, az éves kisvízhozam adatokra legjobban illeszkedő (Normál, Gamma és Gumbel) valószínűség eloszlás számításán keresztül határozzuk meg. Az adatsorok halmozott statisztikai jellemzőinek elemzése azt mutatta, hogy az éves kisvízhozamok 1965. évtől alkotnak csak homogén statisztikai mintát, így csak az 1965. évtől, 2012. évig terjedő adatokat elemeztük tovább.

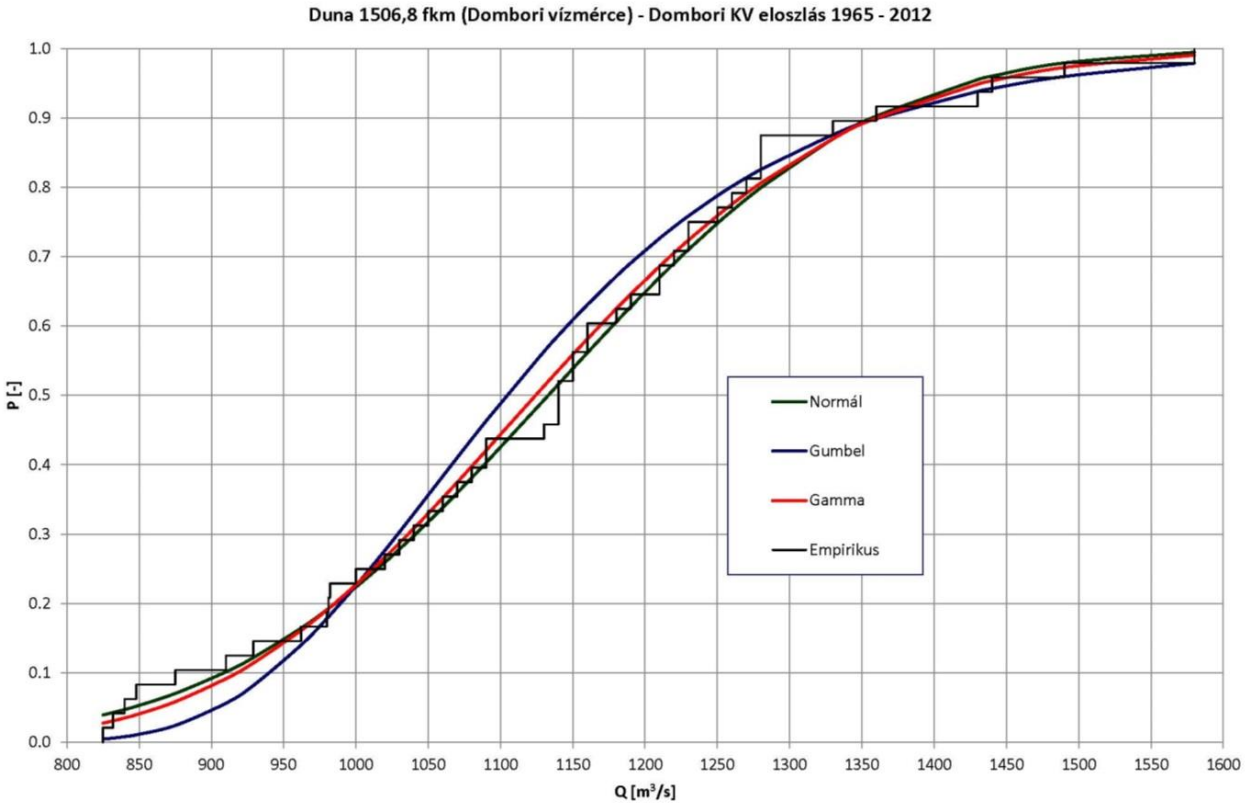
A megfelelő Atomerőművi hűtővízellátási biztonság biztosítása érdekében, a kisvízhozamokkal történő vizsgálatok esetére alkalmazandó abszolút valószínűségi szintet, „A nukleáris létesítmények nukleáris biztonsági követelményeiről és az ezzel összefüggő hatósági tevékenységről” szóló 118/2011. (VII. 11.) Korm. rendelet írja elő.

A fejlesztés elmaradása esetén, a meglévő blokkokra a 10 000 évente visszatérő kisvízhozamok a mértékadóak, míg a két új blokk megvalósulásakor a 20 000 évente visszatérő események a mértékadóak. Emiatt mindkét visszatérési időhöz meghatároztuk a mértékadó kisvízi vízhozamokat.

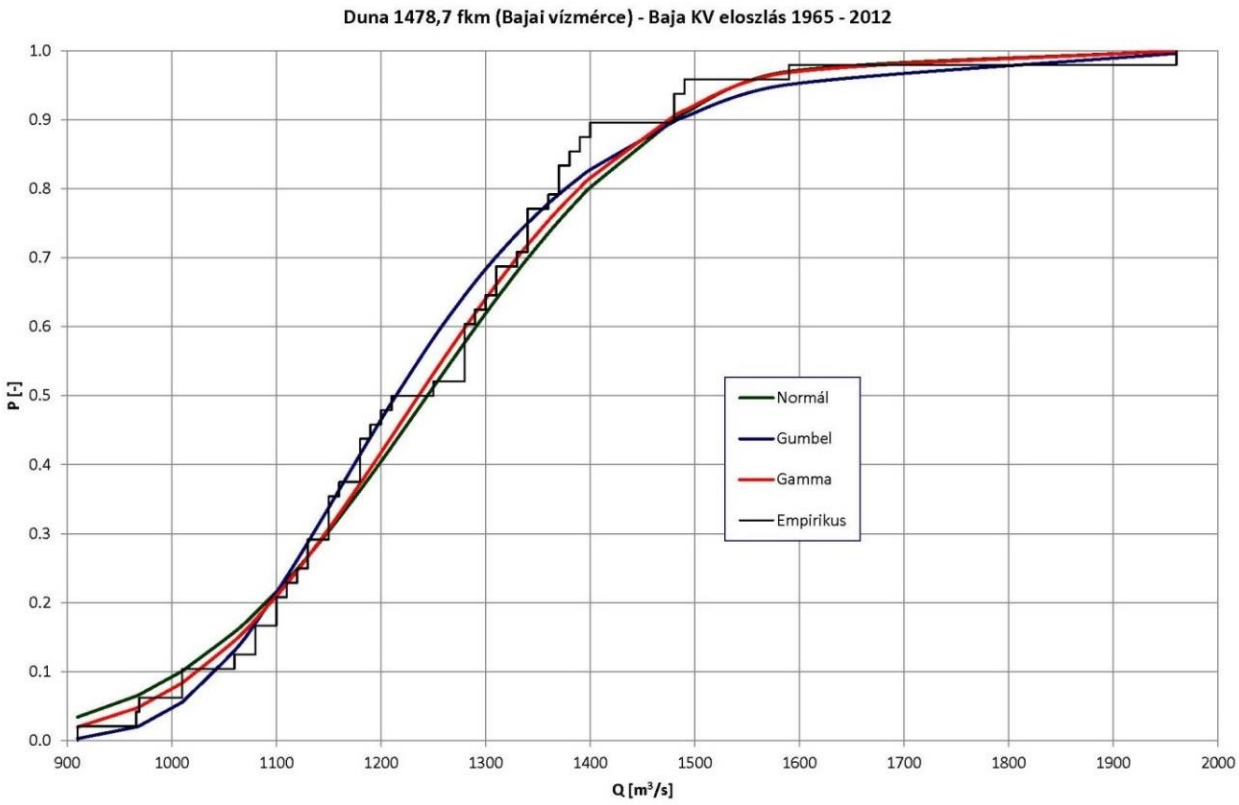
A vizsgált valószínűség eloszlásfüggvények illeszkedését az éves kisvizek adatainak sorba-rendezése útján előálló empirikus valószínűség-eloszlásra az alábbi ábrák szemléltetik a Duna Dunaújvárosi, Dombori és Bajai vízrajzi állomásának szelvényére vonatkozóan.



11.7.1-20. ábra: Duna 1580,6 fkm - Dunaújváros KV (vízhozam) eloszlásai 1965 - 2012



11.7.1-21. ábra: Duna 1506,8 fkm - Dombori KV (vízhozam) eloszlásai 1965 - 2012



11.7.1-22. ábra: Duna 1478,7 fkm - Bajai KV (vízhozam) eloszlásai 1965 - 2012

A hűtővízkivétel (hidegvíz-csatorna dunai torkolata) környezetében vizsgált vízrajzi mérőállomások mértékadó kisvízhozamai:

A 11.7.1-15. táblázatban összefoglalóan megadjuk a 10 000 és 20 000 évente visszatérő mértékadó kisvízhozam értékeket (Q_{KV}), a Duna Dunaújvárosi, Dombori és Bajai vízrajzi mérőállomásainak Duna szelvényére (és környezetére) vonatkoztatva, a homogénnek tekinthető 1965-2012. időszak évenkénti legkisebb vízhozamainak alapul vételével:

DUNAÚJVÁROS (Duna 1580,6 fkm)			
	Normál eloszlás	Gamma eloszlás	Gumbel eloszlás
Visszatérési idő: T [év]	10 000 évente visszatérő		
Valószínűség: P [1/év]	1×10^{-4} [1/év]		
Vizsgált adatok: Q_{KV} [m³/s] (1965 - 2012)	458 [m³/s]	618 [m³/s]	750 [m³/s]
Visszatérési idő: T [év]	20 000 évente visszatérő		
Valószínűség: P [1/év]	5×10^{-5} [1/év]		
Vizsgált adatok: Q_{KV} [m³/s] (1965 - 2012)	425 [m³/s]	598 [m³/s]	739 [m³/s]
Illeszkedés mértéke Im [%]	84.35 [%]	85.57 [%]	91.34 [%]
DOMBORI (Duna 1506,8 fkm)			
	Normál eloszlás	Gamma eloszlás	Gumbel eloszlás
Visszatérési idő: T [év]	10 000 évente visszatérő		
Valószínűség: P [1/év]	1×10^{-4} [1/év]		
Vizsgált adatok: Q_{KV} [m³/s] (1965 - 2012)	483 [m³/s]	640 [m³/s]	775 [m³/s]
Visszatérési idő: T [év]	20 000 évente visszatérő		
Valószínűség: P [1/év]	5×10^{-5} [1/év]		
Vizsgált adatok: Q_{KV} [m³/s] (1965 - 2012)	450 [m³/s]	620 [m³/s]	764 [m³/s]
Illeszkedés mértéke Im [%]	89.13 [%]	91.00 [%]	91.86 [%]

BAJA (Duna 1478,7 fkm)			
	Normál eloszlás	Gamma eloszlás	Gumbel eloszlás
Visszatérési idő: T [év]	10 000 évente visszatérő		
Valószínűség: P [1/év]	1×10^{-4} [1/év]		
Vizsgált adatok: Q_{KV} [m³/s] (1965 - 2012)	555 [m³/s]	694 [m³/s]	839 [m³/s]
Visszatérési idő: T [év]	20 000 évente visszatérő		
Valószínűség: P [1/év]	5×10^{-5} [1/év]		
Vizsgált adatok: Q_{KV} [m³/s] (1965 - 2012)	523 [m³/s]	674 [m³/s]	828 [m³/s]
Illeszkedés mértéke Im [%]	89.13 [%]	91.99 [%]	89.17 [%]

Megjegyzés:
A Duna 20 000 évente visszatérő kisvízi hozamainak meghatározásánál a Gamma eloszlást fogadtuk el, mert a Bajai adatokat megbízhatóbbnak ítéltük.

11.7.1-15. táblázat: A hűtővízkivétel környezetében vizsgált vízrajzi mérőállomások számított mértékadó kisvízhozamai, eloszlásfüggvények illesztésével

Hidrodinamikai modellvizsgálatokhoz meghatározott mértékadó kisvízhozamok:

A 11.7.1-16. táblázatban összefoglalóan megadjuk a 10 000 és 20 000 évente visszatérő mértékadó kisvízhozam értékeket (Q_{KV}), a Duna Pozsonyi, Budapesti és Dombori vízrajzi mérőállomásainak Duna szelvényére (és környezetére) vonatkoztatva, a homogénnek tekinthető 1965-2012. időszak évenkénti legkisebb vízhozamainak figyelembe vételével:

POZSONY (Duna 1868,7 fkm)			
	Normál eloszlás	Gamma eloszlás	Gumbel eloszlás
Visszatérési idő: T [év]	10 000 évente visszatérő		
Valószínűség: P [1/év]	1×10^{-4} [1/év]		
Vizsgált adatok: Q_{KV} [m³/s] (1965 - 2012)	504 [m³/s]	571 [m³/s]	687 [m³/s]
Visszatérési idő: T [év]	20 000 évente visszatérő		
Valószínűség: P [1/év]	5×10^{-5} [1/év]		
Vizsgált adatok: Q_{KV} [m³/s] (1965 - 2012)	484 [m³/s]	556 [m³/s]	680 [m³/s]
Illeszkedés mértéke Im [%]	89.11 [%]	88.68 [%]	89.12 [%]
BUDAPEST Vigadó tér (Duna 1646,5 fkm)			
	Normál eloszlás	Gamma eloszlás	Gumbel eloszlás
Visszatérési idő: T [év]	10 000 évente visszatérő		
Valószínűség: P [1/év]	1×10^{-4} [1/év]		
Vizsgált adatok: Q_{KV} [m³/s] (1965 - 2012)	482 [m³/s]	586 [m³/s]	731 [m³/s]
Visszatérési idő: T [év]	20 000 évente visszatérő		
Valószínűség: P [1/év]	5×10^{-5} [1/év]		
Vizsgált adatok: Q_{KV} [m³/s] (1965 - 2012)	454 [m³/s]	568 [m³/s]	722 [m³/s]
Illeszkedés mértéke Im [%]	94.35 [%]	93.37 [%]	90.30 [%]
DOMBORI (Duna 1506,8 fkm)			
	Normál eloszlás	Gamma eloszlás	Gumbel eloszlás
Visszatérési idő: T [év]	10 000 évente visszatérő		
Valószínűség: P [1/év]	1×10^{-4} [1/év]		
Vizsgált adatok: Q_{KV} [m³/s] (1965 - 2012)	483 [m³/s]	640 [m³/s]	775 [m³/s]
Visszatérési idő: T [év]	20 000 évente visszatérő		
Valószínűség: P [1/év]	5×10^{-5} [1/év]		
Vizsgált adatok: Q_{KV} [m³/s] (1965 - 2012)	450 [m³/s]	620 [m³/s]	764 [m³/s]
Illeszkedés mértéke Im [%]	89.13 [%]	91.00 [%]	91.86 [%]

11.7.1-16. táblázat: A hidrodinamikai modellvizsgálatokhoz meghatározott mértékadó kisvízhozamok, eloszlásfüggvények illesztésével

11.7.1.3.5 Várható kisvízhozamok előrebecslése a tervezett bővítés üzemidejének időtartamára:

A kisvízhozamok jövőben várható alakulásának becslése, a hűtővízellátás mindenkori biztonságának megismerése, vizsgálata miatt szükséges. Vizsgálatainkat a hidrológiai statisztika eszközrendszerével végezzük, a releváns vízrajzi mérőállomások máig összegyűjtött vízhozam adatainak felhasználásával.

A kisvízhozamok, vagyis az évenkénti legkisebb vízhozamok adatsora 1965-2012. időszakban tekinthető homogénnek, ezért az előrejelzés trendjét erre a bázisidőszakra határoztuk meg, logaritmikus kiegyenlítéssel (az adatsorra a legkisebb négyzetek elve /esetünkben a logaritmikus görbe két paraméterét úgy számítjuk ki, hogy a mért pontoknak, az illesztendő görbétől való távolságának négyzetösszege minimális legyen: Gauss norma/ szerint legjobban illeszkedő), az alábbiak szerint.

$$Q_{KV}(t) = Q_{KV}(t_0) + M_{KV} \cdot \ln(t - t_0).$$

ahol:

t_0 [év]: az előrejelzés kezdő éve, t_0 = 2012.,
t [év]: az előrejelzés éve (t = 2013., 2014., …, 2120.),
$Q_{KV}(t)$: a t időpontra előrebecsült, éves (KV) kisvízhozam [mBf],
$Q_{KV}(t_0)$: a t0 időpontra, logaritmikus kiegyenlítéssel meghatározott éves (KV) kisvízhozam [mBf],
M_{KV}: a kisvízhozamok (KV) logaritmikus trendjének szorzótényezője,
$\ln(t-t_0)$: az előrejelzési időelőny ($t-t_0$), természetes alapú logaritmusa.

A kisvízhozam (QKV) előrejelzést különböző valószínűségi szinteken adjuk meg, az alábbiak szerint:

$$Q_{KV}(t, p[\%]) = Q_{KV}(t_0) + M_{KV} \cdot \ln(t - t_0) - \sigma_{KV} \cdot \text{inv}\{F(x = p)\}.$$

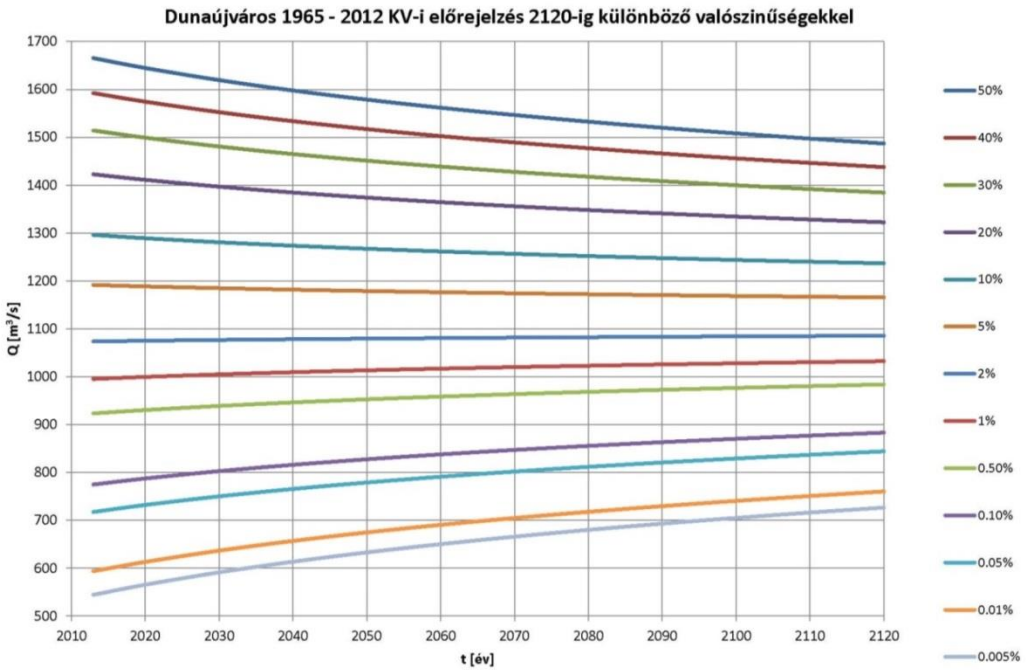
ahol:

σ_{KV} [m]: a kisvízhozam (KV) adatsor halmozott szórása, logaritmikus kiegyenlítéssel, az előrejelzés időszakára időben változóan (a logaritmikus görbe időbeli folytatásával) meghatározva, inv{F(x=p)}: F(x) a standardizált normál eloszlásfüggvény N(0,1) inverzének x = p valószínűségéhez tartozó értéke,

p [%/év]: p = 50% (trend alapján), p = 1 [%/év]-es (100 évente visszatérő) és p = 0,005 [%/év]-es 20.000 évente visszatérő).

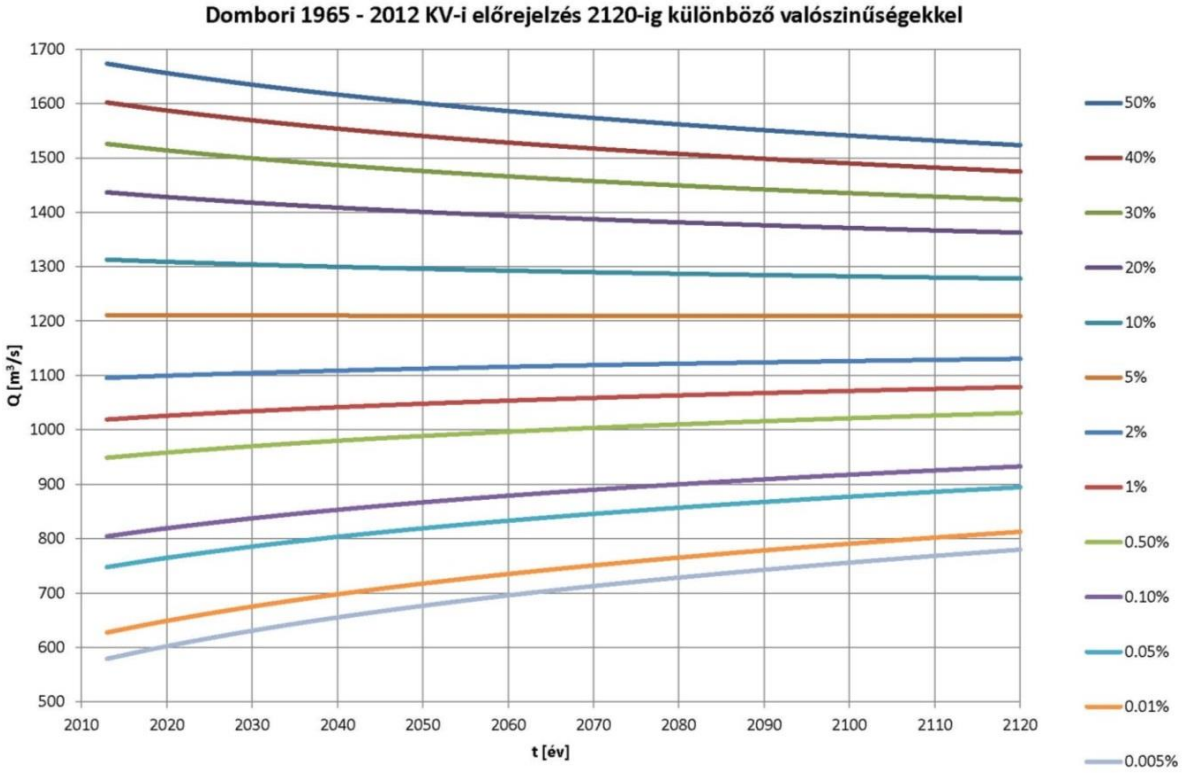
Az éves kisvízhozamokat (Q_{KV}) 2012. évtől 2120. évig (a tervezett bővítés üzemidejének végéig), 110 év időelőnnyel jeleztük előre. A halmozott szórás 1965-től 2012-ig logaritmikusan, asszimptotikusan csökken 2012-re. Az előrejelzés időszakára változó értékűre vettük fel a halmozott szórást, folytatva a halmozott szórás logaritmikus függvényét időben 2120-ig.

Az 50 évnél nagyobb visszatérési idejű (2%/év alatti valószínűségű) éves dunai kisvízhozam értékek Dunaújvárosnál (Duna 1580,6 fkm) növekednek 2012-től 2120-ig (lásd az alábbi ábrákat).

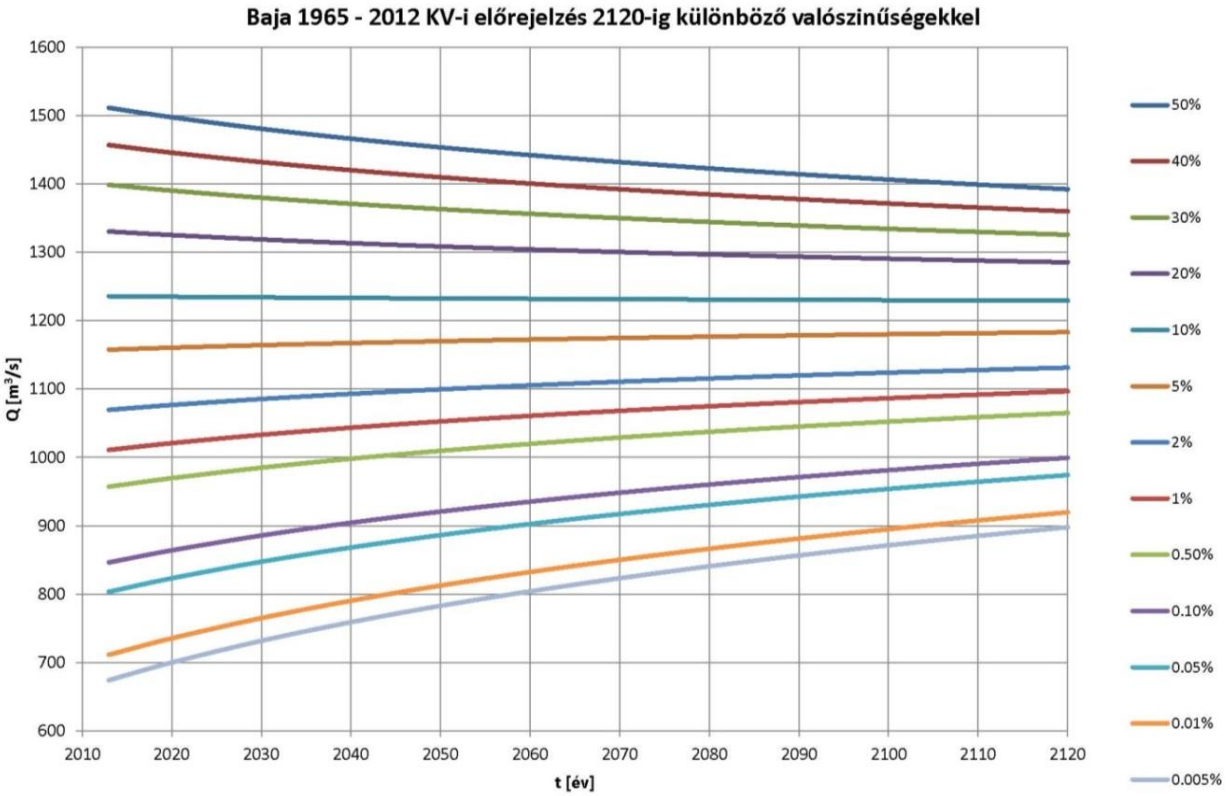


11.7.1-23. ábra: Duna 1580,6 fkm - Dunaújváros KV (vízhozam) 1965 - 2012 előrejelzés 2120-ig

A 20 000 évente visszatérő éves kisvízhozamok előrejelző görbéi a Duna dunaújvárosi szelvényéhez hasonló lefutásúak, azaz időben növekednek a Duna Domborinál (Duna 1506,8 fkm) és Bajánál (Duna 1478,7 fkm) lévő vízmércéi éves kisvízhozam adatai tekintetében (lásd az alábbi ábrákat).



11.7.1-24. ábra: Duna 1506,8 fkm - Dombori KV (vízhozam) 1965 - 2012 előrejelzés 2120-ig



11.7.1-25. ábra: Duna 1478,7 fkm - Baja KV (vízhozam) 1965 - 2012 előrejelzés 2120-ig

Fenti kisvízhozam előrebecslési vizsgálat eredményeinek értékeléséhez kiemelünk néhány jellemző (50 %, 1 %, 0,005 %) valószínűségi szintű, előrebecsült kisvízhozam értéket, a Duna Dunaújvárosi, Dombori és Bajai vízrajzi mérőállomásának szelvényeire vonatkozóan.

Az erőmű környezetében lévő vízmérce szelvények éves kisvízhozamainak előrebecslési eredményeit a 11.7.1-17. táblázat foglalja össze.

	Q_{KV}			
Az előrejelzés bázisidőszaka	**T_0 = 2012**	**T = 2120**		
	P=50%		P=1%	P=0,005%
	logaritmikus trend			
DUNAÚJVÁROS (Duna 1580,6 fkm)				
Q_{KV} (1965 - 2012)	1668 [m³/s]	1487 [m³/s]	1032 [m³/s]	727 [m³/s] (2012-ben: 544 m³/s; 2120-ra 34%-kal nő)
DOMBORI (Duna 1506,8 fkm)				
Q_{KV} (1965 - 2012)	1676 [m³/s]	1523 [m³/s]	1079 [m³/s]	780 [m³/s] (2012-ben: 579 m³/s; 2120-ra 35%-kal nő)
BAJA (Duna 1478,7 fkm)				
Q_{KV} (1965 - 2012)	1513 [m³/s]	1392 [m³/s]	1097 [m³/s]	898 [m³/s] (2012-ben: 674 m³/s; 2120-ra 33%-kal nő)

11.7.1-17. táblázat: Dunai kisvízhozamok előrejelzése 2120-ig (Dunaújváros, Dombori és Baja)

Becsléseink szerint 2120-ra (a tervezett bővítés üzemidejének végén) a jelenlegi szélsőségesen kicsi vízhozam értékek kb. 33-35 %-kal növekedhetnek.

11.7.2 A VIZSGÁLT DUNA SZAKASZ ÁRAMLÁSI- ÉS MEDERVISZONYAINAK JELLEMZÉSE

11.7.2.1 A vizsgált Duna szakasz mederviszonyainak általános jellemzése

A Dunaföldvár (Duna 1560,6 fkm)–déli országhatár (Duna 1433 fkm) közötti, mintegy ~128 km hosszúságú folyószakaszon 32 kanyarulat található. A kanyarok változó görbületűek, a hajózás szempontjából a legveszélyesebb a Sárosparti kanyar, ahol a görbületi sugár mindössze 1000 m. A középvízi meder átlagos szélessége 400–600 m között alakul. A folyó esése Fajszig 6–8 cm/km, az alatt pedig 4–5 cm/km. A folyót mindkét oldalon – a Dunaföldvár–Bölcske, Paks és a Dunaszekcső–Bár közötti jobb oldali magaspartok kivételével – árvédelmi töltések kísérik. A töltések közötti árvízi meder szélessége Dunafalvánál mindössze 450 m (ez az ország egyik legkisebb dunai árvízi keresztmetszete), de a Gemenci és a Béda-Karapancsai tájegység területén eléri a 3–5 km-t. Az atomerőműnél (1527 fkm) a középvízi meder szélessége 430 m, az árvízié mintegy 1,2 km (amennyiben a nagyvízszintek az árvédelmi töltések között maradnak).

A Dunaföldvár–déli országhatár közötti folyószakasz részben szabályozottnak tekinthető. Az utolsó, az 1970-es évek végén kidolgozott szabályozási tervek szerint a folyószabályozás legfontosabb célkitűzései a következők voltak:

- - a középvíz magasságára kiépített hossz- és keresztirányú szabályozási művekkel, valamint 350–400 m szélességre szűkített középvízi mederrel az egyensúlyi mederviszonyok megteremtése,
- - a jéglevonulási viszonyok javítása, a jeges árvizek elkerülése,
- - a kis-, közép- és nagyvizek, valamint a hordalék megfelelő levezetése,
- - e beavatkozások hatásaként a nemzetközi hajóút paramétereinek javítása, a hajóútszűkületek és a gázlós szakaszok számának csökkentése.

A XX század második felében végrehajtott szabályozási munkákat részben az 1956. évi jeges árvíz, részben az 1965. évi dunai nagy árvíz tette szükségessé, de sor került kanyarulatok szabályozására is.

Ennek eredményeként a középvízi szabályozás stabilizálta a főmeder horizontálsi geometriai jellemzőit, így az 1980-as, 1990-es évekre érdemben javultak az árvíz és a jég levonulásának körülményei, valamint a hajózási viszonyok. Azonban mind a szűkítés okozta sebességnövekedés, mind a Duna meder hosszának csökkenése (210 km-ről, mintegy 128 km-re történt), rövidülés miatti esésnövekedés a folyó hordalék-szállító képességének növekedésével jár, így

mindkét típusú beavatkozás eredményeként medermélyülési, meder beágyazódási folyamat kismértékben felfokozódott. Ezt jelentősen fokozta a Dunaföldvár-Uszód folyószakasz természetes görgetett hordalék-utánpótlódását sokszorosan meghaladó volumenű (mintegy félmillió m3 mértékű) ipari kavicskotrás is. [11-8]

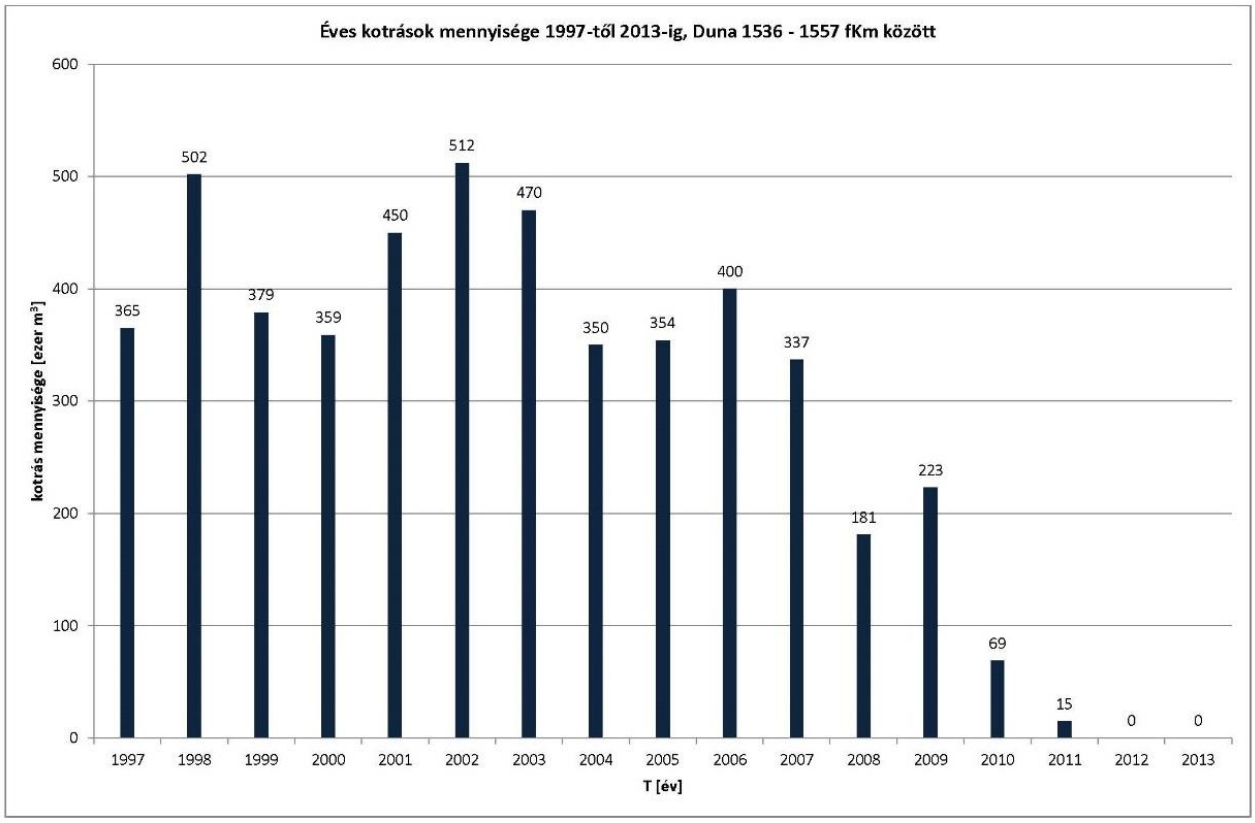
A társadalmi-gazdasági fejlődés eredményeként a folyó mellett mind több helyen vízkivételek, védőterületek létesültek, ugyanakkor a Dunaföldvár-Uszód szakaszon ipari célra mintegy ötmillió m3 kavicsot kotortak ki, ami egyes mederszakaszokon katasztrofális medermélyülést okozott.

A Dunaföldvár és Paks közötti mederkotrások térfogatának (ezer m³/fkm) időbeli (1997-2013) és Duna folyam kilométerek (Duna 1536 – 1557 fkm) szerinti alakulását a 11.7.2-1. táblázatban foglaltuk össze.

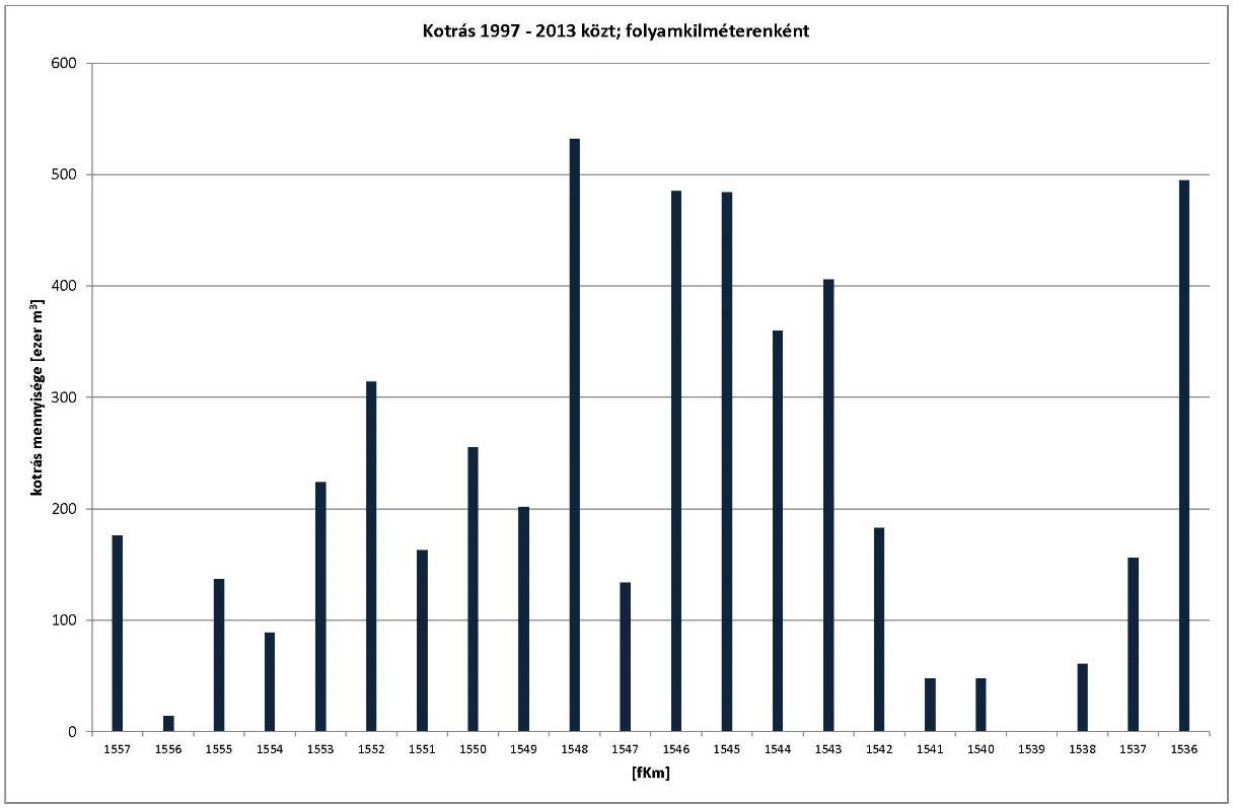
Fkm	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	Összesen
1557	9	40		20		20						30	44	5	8			176
1556												14						14
1555	38	15	49	11	24													137
1554	35			29			25											89
1553			88	38			25		6	10	16	16	10	15				224
1552		32			26		25	30	60	21	32	36	20	32				314
1551					60		34	48	21									163
1550	14			28	60	80	45	28										255
1549					39	90	73											202
1548	40	107	30	35		100	97	35	40	28	20							532
1547	40		10	10	25		8	17	15		9							134
1546	40		50	24	50	50	12	54	43	69	54	25	11	3				485
1545	40	70	52	3	42	50	12	54	9	69	74			2	7			484
1544	40	70	80	3	40		6					32	79	10				360
1543		42		40	30	28	40	37	69	60	50	10						406
1542	6	42		30	28		14	18			30	13		2				183
1541	6	42																48
1540	6	42																48
1539																		0
1538	51								10									61
1537									34	55	8		59					156
1536			20	88	26	94	54	29	47	88	44	5						495
Összesen	**365**	**502**	**379**	**359**	**450**	**512**	**470**	**350**	**354**	**400**	**337**	**181**	**223**	**69**	**15**	**0**	**0**	**4966**

11.7.2-1. táblázat: A kotrási térfogatok időbeli (évenkénti) és Duna folyam kilométerenkénti (fkm) alakulása 1997-től napjainkig [ezer m³/fkm]

A fenti táblázatban összefoglalt kotrási térfogatok alapján bemutatjuk a Duna 1636 – 1557 fkm szakaszán összesen kotort kotrási térfogatok évenkénti alakulását 1997-2013. közötti időszakban (11.7.2-1. ábra), továbbá bemutatjuk a 1997-2013. időszakra összesített, folyam-kilométerenkénti kotort térfogatokat 1636 – 1557 fkm között (11.7.2-2. ábra).



11.7.2-1. ábra: A Duna 1636 – 1557 fkm szakaszán összesen kotort térfogatok évenkénti alakulását 1997-2013. közötti időszakban



11.7.2-2. ábra: Az 1997-2013. időszakra összesített, folyam-kilométerenkénti kotort térfogatok alakulása, 1636 – 1557 fkm között

Az utóbbi 20 évben alacsonyabb szinttel és módosított helyszínrajzi elrendezéssel épülnek a szabályozási művek, ezzel a vízszintsüllyedési folyamatot több helyen sikerült megállítani, illetve mérsékelni.

Az atomerőművi vízkivétel helyétől É-ra, közvetlenül Paks város fölött a Duna nagy kanyarral Ny-i irányból D-i irányba fordul. Emiatt a sodorvonal a jobb közelébe tolódott, és az itteni mederszabályozás előtt a jobb partot az 1525,5–1533 fkm között alámosással bontotta. Jelenleg a város mellett végighúzódó partvonal mentén és az alatt is, e homorú partot kőburkolat védi az oldalazó erózió ellen. Ez a partbiztosítás az 1528 fkm fölött 1906-ban készült, ettől lefelé az 1526,5 fkm-ig 1887-ben, míg az 1525,5–1526,5 fkm közötti szakaszon 1926–1927 között épült ki. Ezzel a partbiztosítással a folyó középvízi medre a homorú oldalon Pakstól Dunaszentbenedekig, horizontális értelemben stabilizálva lett. A domború parton 1530–1533 fkm között 600–750 m-enként sarkantyúk létesültek. Közöttük nagyméretű, ártéri galériaerdővel borított zátonyszigetek alakultak ki. A bal part mentén a szegélyzátonyok képződése jelenleg is folyik, egészen az 1525,5 fkm-ig.

Az 1526 fkm-nél a sodorvonal a bal part közelébe helyeződik át. Az atomerőmű melegvíz csatornájának visszavezetése alatt, ahol a jobb parti hullámtér fokozatosan kiszélesedik, a jobb part közelében egy kb. 2 km hosszú zátonysziget húzódik. Ezt a hajózás szempontjából kedvezőtlen zátonyosodást már több évtizeddel ezelőtt sarkantyúkkal úgy szabályozták, hogy lehetővé tegyék a beöblösödés folyamatos természetes feltöltődését. A jobb parti biztosítással egyidejűleg, a szemben lévő parton, Uszódnál kb. 400 m-enként rövid sarkantyúkat építettek. Ezekkel a bal part vonalát is teljes mértékben stabilizálták. A közép- és kisvízi medret összeszorítva, a meder állandóságát és a kellő hajózási mélységet sikerült biztosítani.

11.7.2.2 A vizsgált Duna szakasz morfológiai változásának megfigyelése 1982-től napjainkig

11.7.2.2.1 Mederváltozások vizsgálata 2011-ig

Az üzemelő erőmű biztonságos hűtővíz ellátását a Dunából biztosítják. Kisvízi vízjárási körülmények között a hűtővíz kivétele a vízkivételi mű kiépítési magasságának helyzete miatt veszélybe kerülhet. Ilyen esemény következett be 1983. novemberében, amikor a hűtővíz ellátást szivattyúkkal kellett biztosítani, szádpallókkal lezárva a hidegvíz-csatornát. A VITUKI Vízgazdálkodási Tudományos Kutató Intézet ettől az időtől kezdve folyamatosan 2011-ig mérte és értékelte az erőmű által érintett Duna szakasz morfológiai viszonyait a középvízi meder évenkénti felmérésével, valamint a kisvízi vízjárási helyzetekben végzett vízszintrögzítésekkel és sebesség (vízhozam) mérésekkel.

A meder morfológiai változásainak 2011-ig végzett vizsgálata az alábbiakkal jellemezhető:

- 1983-1989 között (Duna 1505-1533 fkm) szabatos összehasonlítás nem végezhető, kizárólag a szakasz teljes medertérfogata számítható a 300 m-es szelvénysűrűségnek megfelelő pontossággal.
- 1990-1997 között (Duna 1512-1533 fkm) a 300 m-es szelvénysűrűségű mérések alkalmasak szelvényterületek összehasonlítására a helyazonos szelvény felmérés biztosításának köszönhetően.
- 1998-2003 között (Duna 1512-1533 fkm) a 100 m-es sűrűségű szelvényezésnek köszönhetően az előzőeknél pontosabb meder (térfogat) változás mutatható ki.
- 2004-től (Duna 1512-1537,3 fkm) kezdődő időszak hosszabb szakaszon, szintén 100 m-es szelvénysűrűséggel ad lehetőséget a mederváltozások értékelésére.

A medermorfológiai változások meghatározását a meder térfogatának változása szerint végezték el. A számításokhoz meghatározták a szomszédos keresztszelvények közötti mederszeleteknek egy viszonyító szint alatti térfogat értékét. Viszonyító szintként az MVSz ’84 (1984. évben elfogadott kisvízszintek) felszíngörbéjét alkalmazták.

A két irányban eltérő sűrűségű mérési eredmények (a szelvények egymás közötti távolsága legalább 100 méter, a szelvényeken belüli pontsűrűség 1,5-2 méter) miatt az ismert és általában alkalmazott felületszerkesztő és térfogat számító programokat nem lehetett alkalmazni, ezért a számításokhoz saját fejlesztésű szoftvert készítettek.

A Duna medrének mintázása a Duna Gerjen – Madocsa közötti szakaszán

A Gerjen és Madocsa között a VITUKI Nonprofit Kft. által 2009-ben felmért 12 db VO szelvény mederanyag mintáinak szemösszetételi jellegzetességeit és összevetette azokat ugyanezen VO szelvényeknek az 1970-ben és 1999-ben közzétett Duna Atlaszokban található szemcse összetételi adataival. Ellenőrizte azt is, hogy a meder felszín közeli rétegében tapasztalt szemösszetételi változások összhangban vannak-e a VO szelvények 1970 és 2009 között

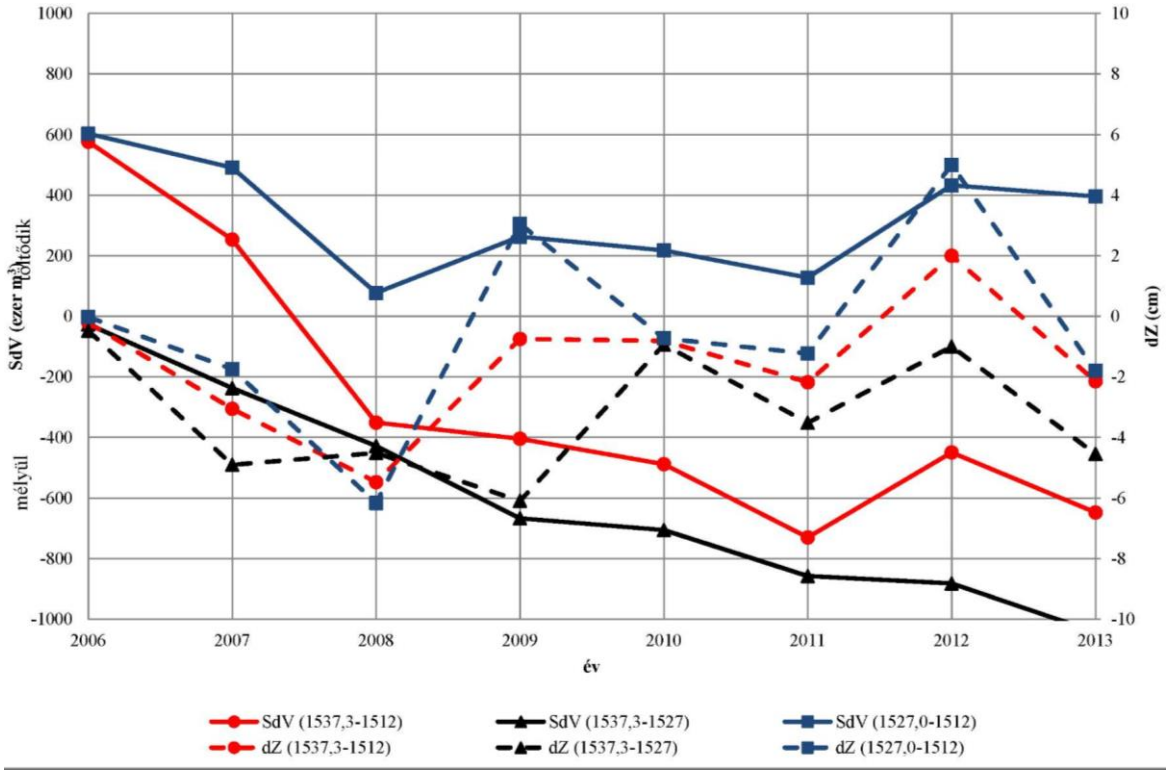
kimutatott alakváltozásaival. Megállapítást nyert, hogy a két Duna Atlasz mederfelmérési és mederanyag mintázási eredményei nem igazán használhatók a változások elemzésére, mivel a közöttük eltelt csaknem 30 év alatt számos beavatkozás történt a Duna paksi és Paks feletti szakaszán, amelyek megváltoztatták a természetes mederalakulást a Paks alatti gázlós szakaszon. Még az 1999 - 2009 időszak is hosszúnak bizonyult a mederváltozások menetének kimutatása céljára, mivel a folyószabályozási és ipari célú mederkotrások még folytak Dunaföldvár alatt és fölött egyaránt, jelentősen átalakítva a Duna korábbi hordalék-szállítási jellemzőit. Az újabban épült osztrák dunai vízlépcsők, valamint a Dunacsúnyi szlovák duzzasztómű üzeme ugyanakkor a hazánkba lépő Duna hordalék- és vízjárását tette természetellenessé és ennek hatásai Paksnál is kimutathatók.

11.7.2.2.2 Mederváltozások értékelése 2011 után

2012-ben a MicroMap Bt. [11-35], 2013-ban pedig az Alsó-Duna-völgyi Vízügyi Igazgatóság (ADU-VIZIG) [11-2] végezte el a felmérést és a mederváltozások értékelését.

Az ellenőrzött felmérési szelvényadatokból kiszámításra kerültek a Duna MVSz '84 referenciavízszintje alatti mederváltozási jellemzők. A vizsgálat alá vont 1512-1537,3 fkm közötti Duna-szakaszon a 2006-2013-es mederváltozásokat értékelték.

A kisvízi meder nyolc (8) év átlagában a felső szakaszon 23 m-rel keskenyebb, mint a hidegvíz-csatorna alatt, ahol a víz valamivel jobban szétterül. A kisvízi mederterület átlaga a hidegvíz-csatorna feletti szakaszon 103 m^2-rel több, mint az alatta. Fentiek alapján megállapítható tehát, hogy a meder a hidegvíz-csatorna felett összefogottabb és mélyebb, valamint valószínűsíthető, hogy az áramlási szelvény-középsebességek átlagértéke csekély értékkel kisebb. Az éves fajlagos (teljes szelvényszélességre terített) mederváltozás a felső szakaszon 2013-ban -5.0 cm/év mélyülés, a hidegvíz-csatorna alatt -2.0 cm/év mélyülés (a + jel a feltöltődést, míg a - jel lefelé a kimélyülést jelzi). A fajlagos mederváltozás számítása az évenként az elméleti MVSz '84 referencia-vízszint esetén kialakuló nedvesített szelvényterületének (F [m^2]) megfelelő, az adott szelvényt jellemző szélességű (B [m]) helyettesítő téglalap szelvények magassági értékei különbségei meghatározásával történt. A kisvíz alatti medertérfogat változás eredője kilenc év alatt a felső szakaszon kereken 1043 ezer m^3 kimélyülés, míg a hidegvíz-csatorna alatti szakaszon 395 ezer m^3 feltöltődés. A számok látszatra nagyok, de 10, illetve 15 km hosszú és 400, 450 m széles területre vonatkoznak.



11.7.2-3. ábra: Fajlagos mederváltozás a szelvényekben (1537-1512 fkm)

A felső szakasz medre 2006-tól különböző mértékben, de folyamatosan mélyült. A hidegvíz-csatorna alatt 2006-2008 között mélyülés volt, az utána következő három évet - ingadozásokkal - közelítő mederegyensúly jellemezte, majd 2012-ben feltöltődés uralkodott. A 2013.-as évben ezt a szakaszt ismét kismértékű mélyülés jellemezte.

A mérőszelvények F/B évi fajlagos mederváltozását 2009-től a 11.7.2-3. ábra részletezi. A szélsőértékek átlagosan mindkét irányban 30 cm/év körüli értékeket mutatnak, de 2013-ban ennél nagyobb értékek lokálisan azonban egymást ellensúlyozva előfordultak. A 13. ábra ötös mozgóátlagai a csúcsokat tompítják, de mind a hosszirányú, mind a mélységi ritmusokat jóval áttekinthetőbben mutatják. Jobban elkülönülnek a mélyülő-töltődő jelleget mutató szakaszok, érzékelhető a mozgások dinamizmusa is. A viszonylagos mederállandóságot jelző csomópontok változatlanul az 1532,5 és az 1521 fkm (Barákai gázló) környezetében figyelhetőek meg. Más helyeken a burkológörbék tágassága a medermozgások mértékével, intenzitásával arányos, kiemelkedő változást a 2013-as év sem hozott.

A 2006-2013. évek közötti, nyolcévi mérési időszak hossz menti mederváltozásai az alábbiak szerint alakultak. A felső szakasz az 1530 fkm térségéig eléggé egyenletesen mélyült, onnan a Barákai gázlóig (1522 fkm) lényegében egyensúlyban volt, majd az alsó szakasz egyenletesen, csekély mértékben töltődött. A hidegvíz-csatorna alatti mederszakasz többéves, viszonylagos stabilitását a szakasz morfológiai jellemzői közül a korábban már lejegyzett, laposabb, szélesebb és csekély mértékben nagyobb nedvesített szelvényterületű meder, valamint a Barákai gázló vízjárásra gyakorolt hatásai okozhatják.

11.7.2.3 A Duna meder terepmodellje Dunaföldvár-Fajsz között (Duna 1560,6 - 1500 fkm), valamint a Duna 1519-1529 fkm szelvényei között, a lokális 2D áramlási modell bearányosítása és igazolása

11.7.2.3.1 A Duna meder domborzatmodellje és felszínborítottsági jellemzői

Mederbeli vízmozgás modellezéséhez az egyik legfontosabb alapadat a medergeometria. Mivel kellő pontosságú és felbontású terepmodell nem állt rendelkezésünkre a kérdéses Duna-szakaszról, a modellezési munka első legfőbb részfeladata egy ilyen terepmodell felépítése volt.

A Duna 1529–1519 fkm közötti szakszára, a nagyvízi állapot számítására is alkalmas terepmodellt (geometriát) az alábbi alapadatokból állítottuk elő:

- 2012. évi középvízi mederfelvétel 100 m-es szelvénysűrűséggel a vizsgált szakaszon, kiegészítve a szabályozási művek környezetében mért részletesebb adatokkal (tengelyvonal, alatta-felette kiegészítő szelvények), [11-35],
- M = 1:10 000 méretarányú topográfiai térkép (MVM ERBE Zrt.),
- 2013. évi térképhelyes ortofotó (MVM ERBE Zrt.),
- 1970. évi vízrajzi atlasz sorozat Lévai Projektben feldolgozott adatai,
- A Lévai Projekt keretében felhasznált hidrodinamikai modellépítési Duna mederadatok.

A terepmodell (11.7.2-4. ábra) előállítása során igénybevettük a HEC-RAS egydimenziós hidrodinamikai modell keresztszelvény-interpolációs modulját, valamint az ArcGIS software különböző térinformatikai eljárásait.

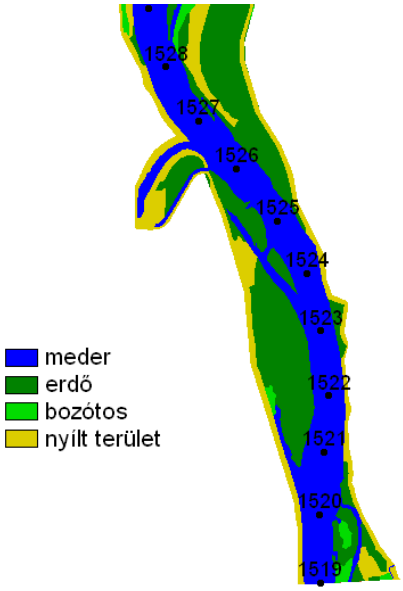
A terepmodell mellett, a modellezés számára szükséges másik alapvető térbeli adat az érdességek eloszlása, melyet a terep borítottság-kategóriáihoz hozzárendelve tudtunk származtatni. A paksi Duna-szakasz nagyvízi medrének borítottság térképét az ortofotó kiértékelésének aggregált állományai alapján hoztuk létre (11.7.2-5. ábra).

A mintegy 30 km hosszúságú Duna medermodellt a szélsőséges kis- és nagyvízi 2D hidrodinamikai modellvizsgálatok elemzéséhez alkalmaztuk.

A 3D hőtranszport- és 2D morfodinamikai modellek hidraulikai peremfeltételeinek pontosítása érdekében, a Dunaföldvár-Fajsz (30 km-es) Duna szakasz, tíz (10) km-es rész-szakaszát (Duna 1519-1529 fkm) használtuk fel. A peremfeltételeket, a mértékadó terhelési állapotokra meghatároztuk, az alábbi modellterületen:

- 2D morfodinamikai modell esetében a Duna 1524,75 - 1527,75 fkm (3 km) szakaszának alsó- és felső peremeire,
- 3D hőtranszport modell esetében pedig a Duna 1524 - 1527 fkm (3 km) szakaszának alsó- és felső peremeire.

11.7.2-4. ábra: A Duna nagyvízi medrének digitális terepmodellje (részlet)



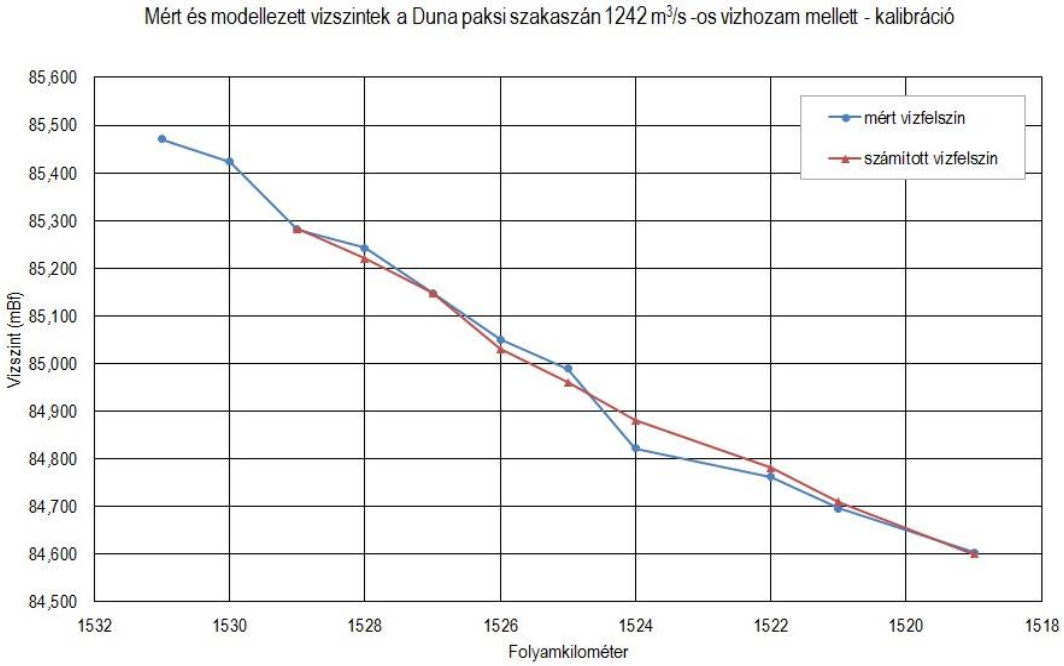
11.7.2-5. ábra: A Duna paksi nagyvízi medrének egyszerűsített borítottság-térképe

A digitális terepmodell és -borítottság térkép alapján, a River2D software segítségével felállítottunk egy permanens, kétdimenziós hidrodinamikai modellt a kérdéses Duna-szakaszra. Ez a modell egy végeselem-háromszögháló csúcspontjaiban számítja a vízszinteket és határozza meg a mélységintegrált sebességeket. A modell peremfeltételeit a

Duna vízhozama, a vízhozamhoz tartozó alvízi vízszint, valamint az erőmű hűtővíz kivétele és bevezetése képezi. Ez utóbbiakat a jelenlegi alapállapotnak tekinthető helyzetben mértékadó 100 m³/s-os értékre vettük fel (25 m³/s blokkonként).

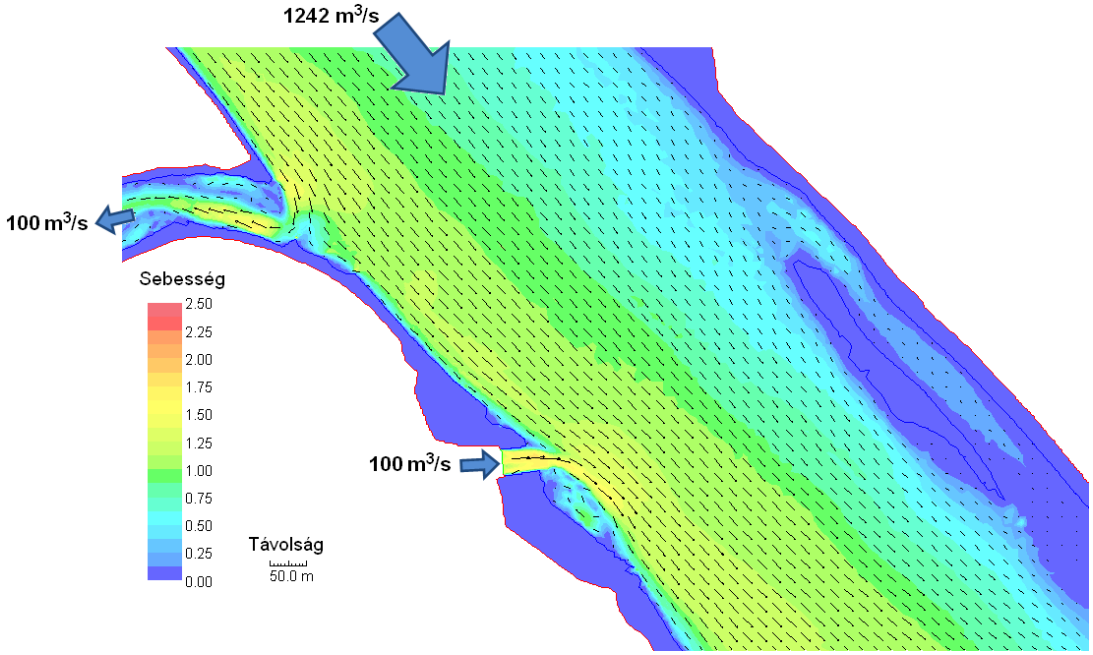
11.7.2.3.2 2D áramlási modell kalibrálása (bearányosítása)

A modell kalibrálását (Duna 1519 - 1529 fkm mederszakaszra) az 1 242 m³/s-os dunai vízhozam mellett mért vízszintek alapján végeztük el. A kalibráció során a meder érdességi paraméterét állítottuk be úgy, hogy a számított és mért vízszintek a lehető legközelebb kerüljenek egymáshoz (11.7.2-6. ábra).



11.7.2-6. ábra: A River2D modell kalibrálása 1 242 m³/s-os dunai vízhozamnál

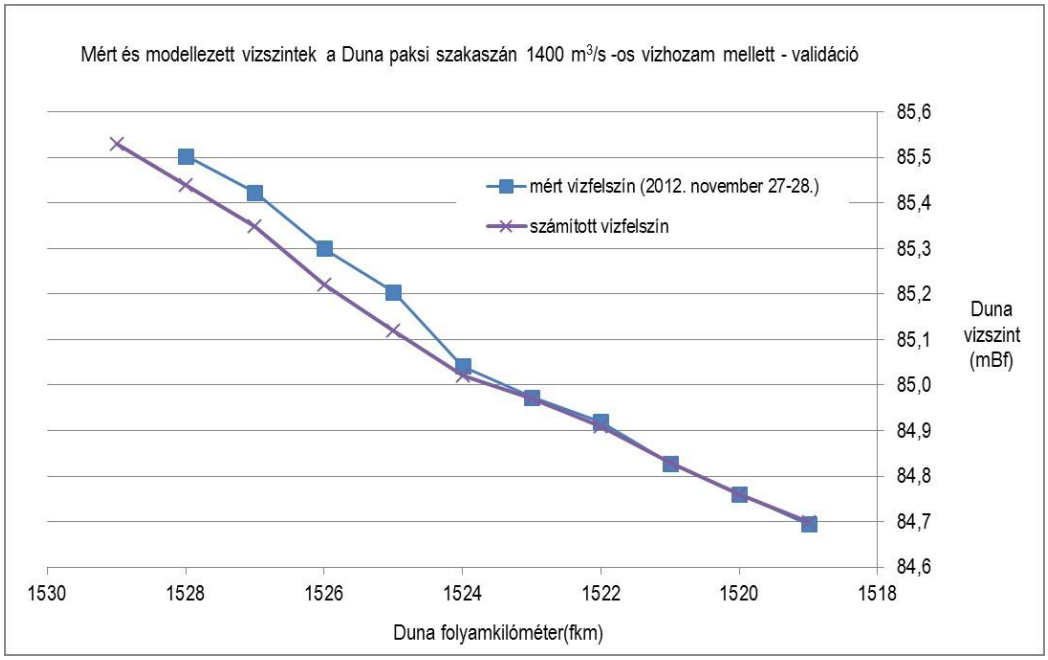
A kalibrált mélységintegrált sebességmezőt az alábbi ábrán (11.7.2-7. ábra) mutatjuk be:



11.7.2-7. ábra: A River2D modell által számított vízsebességek az atomerőmű hűtővíz-kivételi és bevezetési csatornáinak torkolatai közelében, 1242 m³/s-os dunai vízhozam és 100 m³/s-os hűtővízkivétel és bevezetés mellett

11.7.2.3.3 A 2D áramlási modell validálása (igazolása)

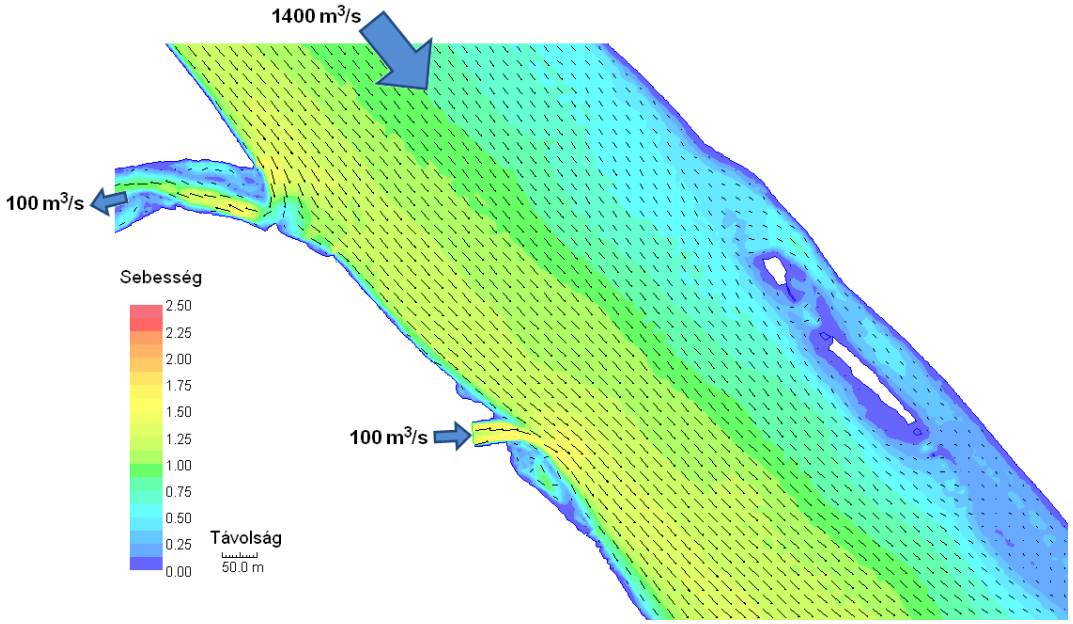
A kalibrált (bearányosított) áramlási modell validációját (igazolását) a Duna 1400 m³/s vízhozamakor mért áramlási jellemzők esetére (vízfelszín esés és áramlási sebességek) hajtottuk végre, amely közel áll a hőcsóva mértékadó Duna vízhozamához, az 1 500 m³/s Duna vízhozamhoz. A mért és számított vízfelszín alakulását az alábbi ábra szemlélteti (*11.7.2-8. ábra*).



11.7.2-8. ábra: A River2D modell validálása 1 400 m³/s-os dunai vízhozamra

Fenti ábráról látható, hogy a két mérési nap eltérő vízhozamú volt, ezért nem tekinthető a két nap alatt a dunai áramlás permanensnek. Emiatt csak az egyik napra illeszkedik a mért vízfelszín a 2D modellben számított vízfelszínhez, amely a modell tartományának alsó szakaszára esik. Az 1 242 m³/s-os Duna vízhozam, a mérési időszakban permanensnek tekinthető vízfelszínű volt, emiatt alkalmasabbnak bizonyult a kalibrálásra is.

A validáció esetére számított mélységintegrált sebességmezőt a *11.7.2-9. ábra* szemlélteti.



11.7.2-9. ábra: A River2D modell által számított vízsebességek az atomerőmű hűtővíz-kivételi és melegvíz-bevezetési csatornáinak torkolatai közelében, 1 400 m³/s-os dunai vízhozam és 100 m³/s-os hűtővízkivétel és bevezetés mellett.

Az atomerőmű által Dunába bocsátott felmelegedett hűtővízterhelés hatására a Duna 3 km-es szakaszán (Duna 1524-1527 fkm) kialakuló hőcsóva háromdimenziós (3D) modellvizsgálatához, a 30 km hosszúságú nagyvízi Duna mederdomborzat területének 10, illetve 4 kilométeres rész-szakaszát vettük alapul. Így a hőtranszport modell hidraulikai peremfeltételeit, a peremzavaroktól "mentes" felső peremfeltétellel volt biztosítható, a River2D modell segítségével.

11.7.2.4 A Duna víz- és hordalékjárásának vizsgálatához használt észlelési és mérési adatok a Dunaföldvár-Gerjen szakaszon

A Duna vizsgált szakaszán elsősorban az állami vízmércék szelvényeire vonatkozó észlelési adatokat kell és lehet felhasználni. A modellezési feladatokra tekintettel célszerű az adatgyűjtést kiterjeszteni mind a felvíz, mind az alvíz irányába. Így a Dunaföldvár-Gerjen szakasz vizsgálatához az adatgyűjtést kiterjesztettük a Budapest- déli országhatár közötti szakaszra. Az érintett állomások jellemző adatait, ezen belül az összefüggően rendelkezésre álló adatsorok kezdő évszámát a 11.7.2-2. táblázat sorolja fel.

Állomás	Törzsszám	Szelvény-szám	Mérce „0" pont	Napi adatok rendelkezésre állásának kezdete		
		fkm	mBf	Vízállás	Vízhozam	Lebegtetett hordalék
Budapest	001026	1646,5	94,97	1876	1924	1969
Adony	000546	1597,8	91,68	1876	-	-
Dunaújváros	000547	1580,6	90,30	1876	1945	1950
Dunaföldvár	000548	1560,6	88,86	1878	-	-
Paks	000549	1531,3	85,38	1876	-	-
Dombori-puszta	000550	1506,8	83,52	1888	1936	1968
Baja	001344	1478,7	80,99	1878	1930	1951-(1965)
Mohács	000831	1446,9	79,20	1876	1924	1949

11.7.2-2. táblázat: A Duna Budapest-déli országhatár közötti főállomások adatai

A legtöbb dunai főállomást a 18. század 70-es éveiben állították fel. Az elsődleges cél kezdetben a vízállások változásainak követése volt. A Dunán a napi 2 észlelés volt a jellemző (7 és 19 órakor). Ennél nagyobb gyakoriságú észlelést árvízi helyzetben rendeltek el, a készültségi fokozat függvényében. Ma a dunai főállomásokon – Dunaújváros kivételével – elektronikus vízállás regisztráló működik, jellemzően 1 órás gyakoriságú észleléssel.

A vízhozamok meghatározásához vízállás-vízhozam összefüggések (vízhozam görbék) szerkesztésére volt szükség. Ennek előfeltétele a rendszeres vízhozam-mérések beindítása volt. Ez a Dunán az 1920-as, 30-as években kezdődött, így folyamatos vízhozam idősorok ezt követően állnak rendelkezésre.

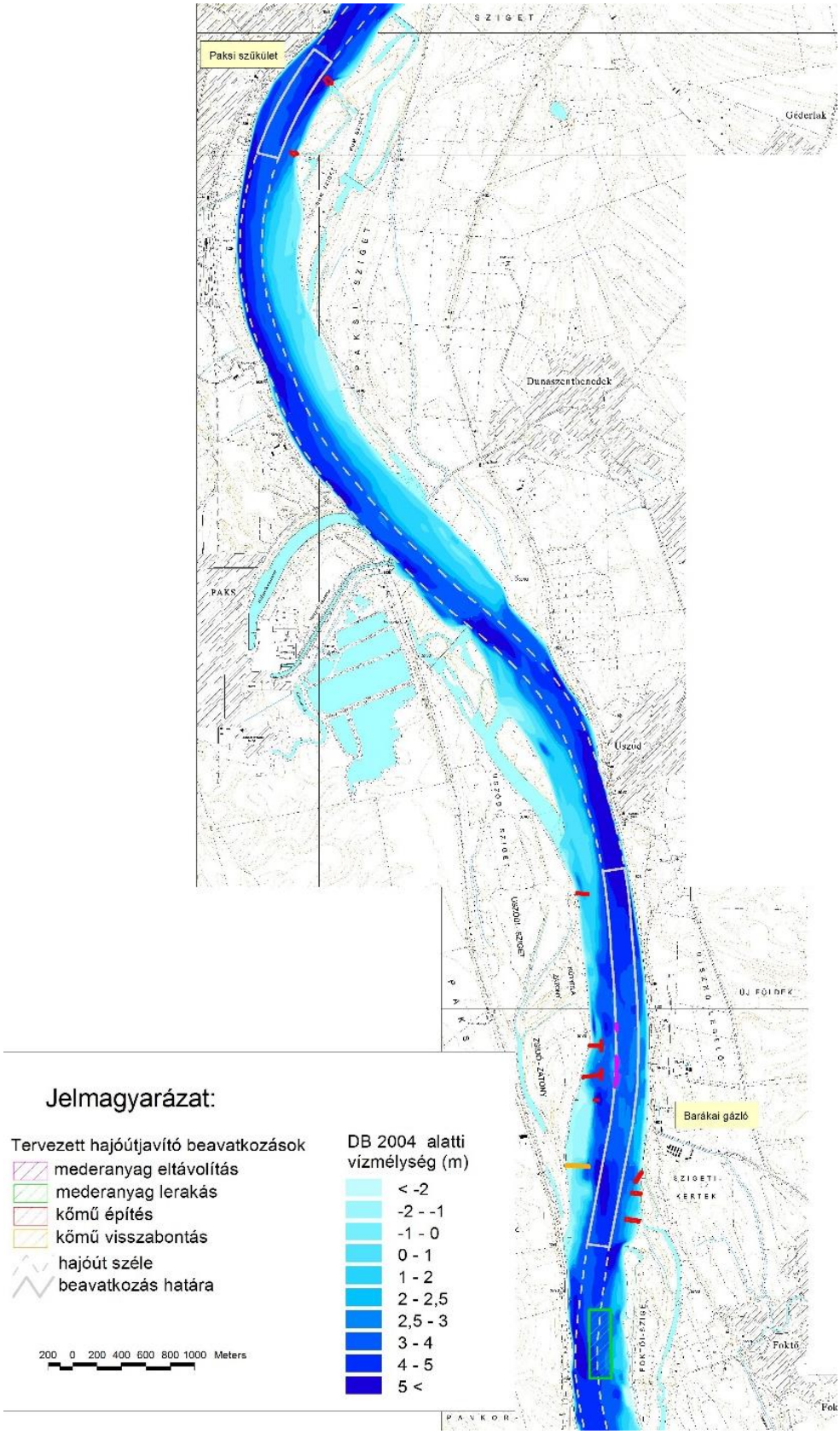
A lebegtetett hordalék észlelése az 1950-es évek óta folyik, kijelölt szelvényekben, általában a vízhozam-méréssel egyidejűen. Az összegyűjtendő adatok jelentős része a vízügyi ágazati adatbázisokban megtalálható. (SHATIR: Számítógépes Hidrológiai Adatfeldolgozó, Tároló és Információszolgáltató Rendszer, MAHAB: Magyar Hidrológiai Adatbázis, MH: Műszaki Hidrológia). Egyes adatok forrásai (pl. vízhozam görbék, hordalék részletadatok, stb.) az OVF, illetve a VIZIG-ek adattárai.

Megjegyzendő, hogy az adatok hivatalos publikálásának eszköze az 1990-es évek végéig a vízrajzi évkönyv volt, a VITUKI ezt néhány év késedelemmel 2011. évig végezte. Egyes adatok viszont az észlelés korábbi évtizedeiből csak az évkönyvekben állnak rendelkezésre.

11.7.2.5 A hajózhatóság javítása céljából tervezett folyószabályozási művek építésének és/vagy a kotrások hatásának vizsgálata és minősítése az erőmű hűtővízének biztosítása szempontjából

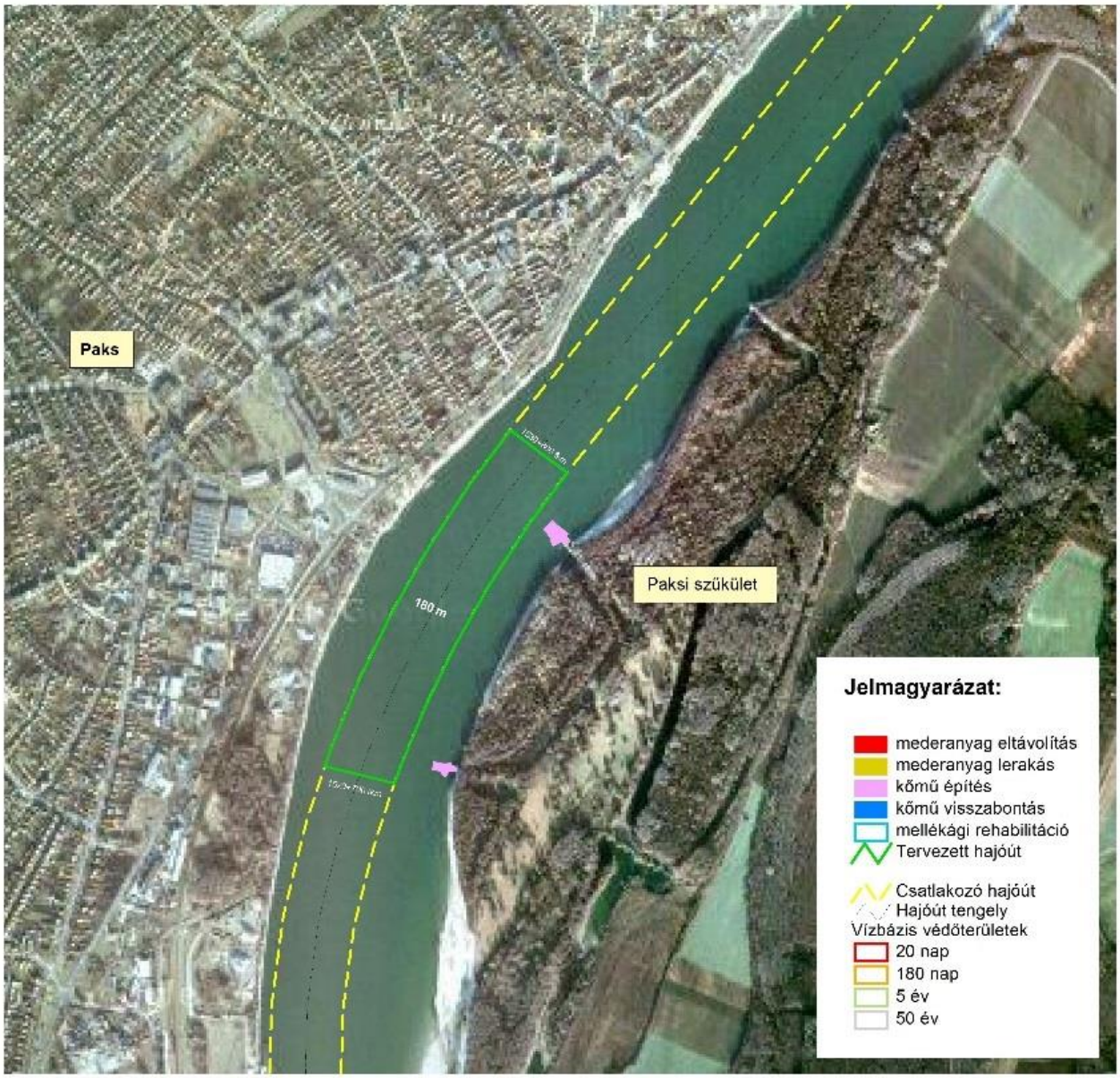
A Duna Szob-Déli országhatár szakaszán 31 helyen nincs meg a nemzetközi egyezményekben rögzített hajóút mélység és/vagy szélesség [11-66], [11-67]. Ennek biztosítása érdekében az Európai Bizottság TEN-T projektje támogatásával ezekre a szakaszokra környezeti hatásvizsgálati dokumentáció és a szabályozás vízjogi létesítési engedélyes tervek készültek (VITUKI Nonprofit Kft., 2009-2010.). A tervezett beavatkozások kivitelezése után a jelezett szakaszon a 2,5 méter merülési mélységű hajókaravánok az év 300-310 napján akadálymentesen közlekedhetnek.

A Paksi Atomerőmű hűtővíz biztosítására a Paksi szűkület és a Barákai gázló területén tervezett beavatkozások gyakorolhatnak közvetett hatást (11.7.2-10. ábra). Ennek meghatározása céljából számba vették a hajózási akadályok kiváltására tervezett vízépítési beavatkozásokat és becsültük azoknak a medermorfológiai, hidraulikai hatását.



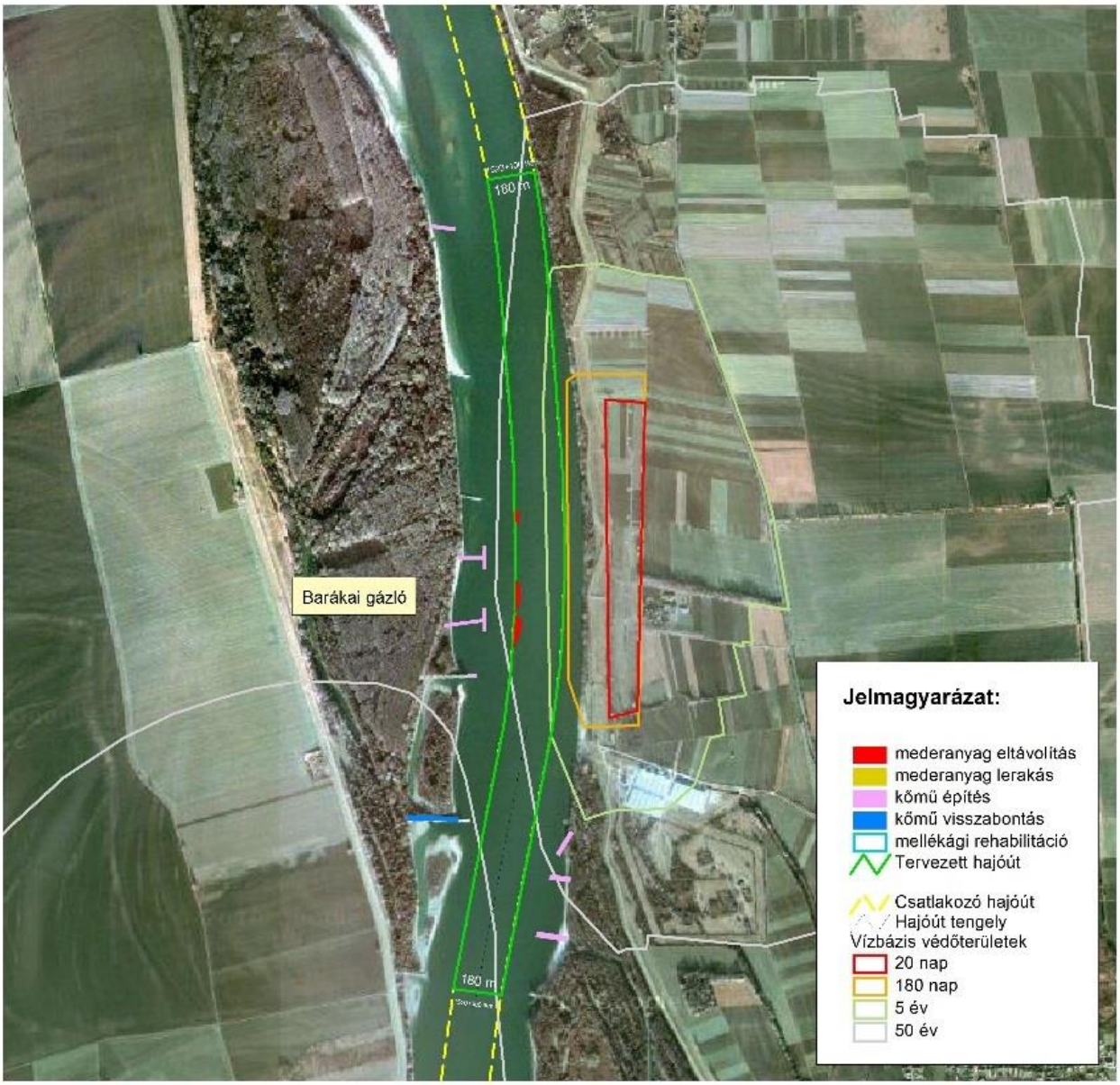
11.7.2-10. ábra: Tervezett hajóút javító beavatkozások a Paksi Atomerőmű környezetében

Megállapítottuk, hogy a hajózhatóság érdekében a két helyen tervezett beavatkozások (11.7.2-11. ábra és 11.7.2-12. ábra) hatásai lokálisan a beavatkozási helyek közvetlen környezetében fejtik ki hatásaikat, azok hatásainak lokális kiterjedése és a beavatkozási helyek egymástól való távolsága miatt akkumulálódó hatásokra nem számíthatunk.



11.7.2-11. ábra: A Paksi szűkület rendezésének tervezett beavatkozásai

A tervezett mederrendezések (szabályozási művek építése) csak az érintett Duna-szakaszon fejtik ki hatásukat, a folyam más szakaszán (nevezetesen a Paksi Atomerőmű hidegvíz-csatornáját közrefogó környezetben) az áramlási viszonyokra, vízszintekre, meder-fejlődési, meder-alakulási folyamatokra gyakorolt hatás nem jelentkezik, az akkumulálódó hatásukkal nem kell számolni. A 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 hat új sarkantyú megépítését, egy régi keresztgát visszabontását, továbbá egy régi keresztgát hosszabbítását terveztük. A hajóút szélén 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. Így bizonyosan megállapítható hogy a hajózhatóság javítása érdekében tervezett beavatkozások a hűtővíz kivétele szempontjából negatív hatással nem járnak.



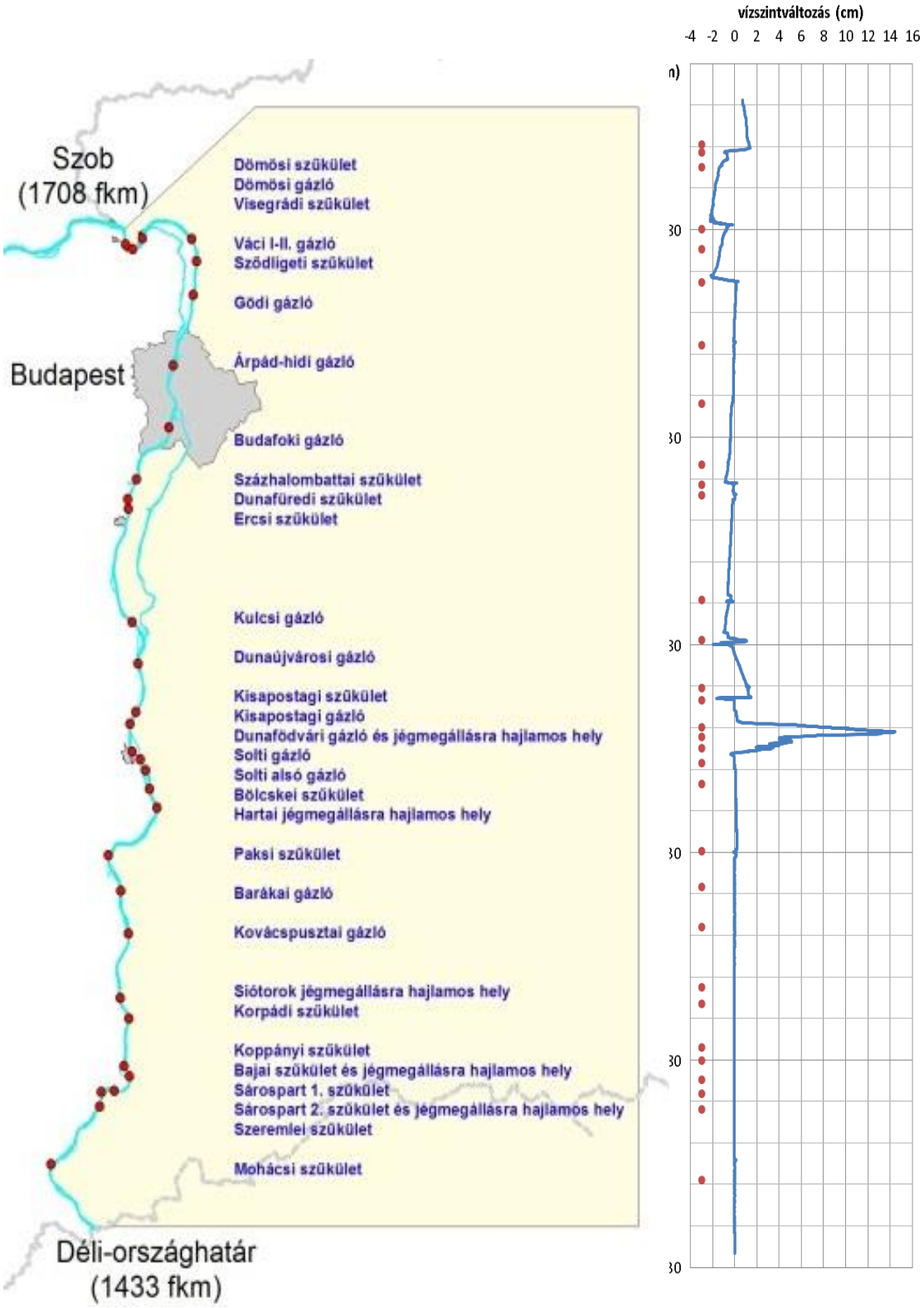
11.7.2-12. ábra: Barákai gázló rendezésének tervezett beavatkozásai

A tervezett hajóút felszíni vízre gyakorolt hatásainak kimutatása érdekében valamennyi beavatkozási hely, tervező által javasolt, beavatkozásait beépítettük egy 1 dimenziós (1D) modellbe. A modellt előzőleg a 2003. évi kisvizes mérésekre kalibráltuk (ez gyakorlatilag megegyezik a DB 2004-es /Duna Bizottsági/ hajózási kisvízszinttel) és feltételeztük, hogy beavatkozások az meder simaságát lényegesen nem befolyásolják. 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, valamint az egyes beavatkozások egymásra gyakorolt hatását (11.7.2-13. ábra)

Az ábrán összegeztük a kumulatív hatásokat. Az ábrán piros karikával tüntettük fel a beavatkozási helyeket és ugyanezt a jelölést alkalmaztuk a hossz-szelvényen is a könnyebb azonosítás érdekében. Látható, hogy az 1540 fkm szelvény alatt a változások nem érik el a ±1 cm-t sem (milliméteres nagyságrendbe esnek). A Szob (1708 fkm) és Dunaegyháza (1565 fkm) közötti szakaszon a változások a ±2 cm-es tartományon belül maradnak (ami a vízszintmérések pontosságának ±1 cm-es tartományába esik). Ezen a szakaszon, az egymást követő gázlók rendezése minimális hatást gyakorol a vízszintekre. Hasonló hatás figyelhető meg a Kisapostag-Dunaújváros-Kulcs hármas rendezése esetén is, de az egymásra hatás itt is minimális. A legnagyobb beavatkozás és hatás a Solti (I., II.) és a Dunaföldvári gázlók

szakaszán jelentkezik. Itt a meder beszűkítése valamivel több, mint 14 cm-es vízszintemelkedéssel jár. Ez a hatás azonban rövid szakaszon eltűnik és mire a Kisapostagi gázlóhoz érünk, már belesimul a korábbi felszíngörbébe.

Összefoglalóan megállapítható, hogy a tervezett beavatkozások jól kompenzálják egymást és a Dunaföldvári-Solti gázlók kivételével a ±2 cm-es tartományon belül maradnak.



11.7.2-13. ábra: A tervezett hajózhatósági beavatkozások hatására bekövetkező vízszintváltozások

11.7.3 A VIZSGÁLT DUNA SZAKASZ ÁRAMLÁSI ÉS HORDALÉKVISZONYAINAK JELLEMZÉSE

11.7.3.1 Helyszíni áramlási- és hordalék felmérések eredményeinek összegzése

A jelen környezeti hatásvizsgálati dokumentációt előkészítő Lévai projekt során, „A Duna medrének és partfalának állapota" című szakterületi program keretein belül a VITUKI Nonprofit Kft. és később a VITUKI Hungary Kft. a 2012 és 2013 években a Duna kis-, közép- és nagyvízi viszonyaira helyszíni áramlásmérést (vízhozam, sebességirány) és lebegtetett hordalék hozam és szemeloszlás vizsgálatokat hajtott végre, amelynek eredményeit az alábbiakban összegezzük.

A mérések alapvető célja vízi környezet állapotának felmérése és értékelése mellett, hogy adatokat szolgáltasson a szakterületi program keretein belül, az üzemidő hosszabbítás telephely jellemzési program során a Duna paksi szakaszára kidolgozott kétdimenziós és háromdimenziós hidrodinamikai modellek és a tervezést elősegítő kétdimenziós hidrodinamikai és morfodinamikai modell számára.

11.7.3.1.1 Vízhozam és sebességeloszlás mérések

A hidrodinamikai modell kalibrálásához, validálásához kapcsolódó mérések, a vízhozam, középsebesség eloszlások, vízszint meghatározására, lebegtetett hordalék és mederanyag mintavételére, a minták feldolgozására és a mérési eredmények értékelésére terjedtek ki. A mérésekre az üzemidő hosszabbítás során kijelölt mérési szelvényekben, kisvízi, középvízi, nagyvízi tartományban került sor, lehetőleg kvázi-permanens állapotnál. Kisvízi mérésnek a $Q < 1\,500$ m³/s, középvíz mérésnek a $Q \sim 1\,800$-$3\,200$ m³/s, nagyvízi mérésnek, a $Q > 4\,500$ m³/s, vízhozam tartományt tekintettük. A vízhozam és sebességeloszlás mérésére kijelölt szelvények az 1527+000 fkm, 1525+800 (1526+000 fkm), +500m (1525+750 fkm, a melegvízcsóva hőmérsékletének mérésére kijelölt referencia szelvény) 1525+500, 1525+000, 1524+000, 1523+700 (az uszodi-sziget mellékága), 1522+000 és az 1520+000 fkm szelvény.

A mérési szelvények kijelölése partközeli végpontok meghatározásával történt, a végpontok EOV koordinátáit GARMIN GPSMAP60 típusú helymeghatározóval rögzítettük, a helymeghatározás jellemző pontossága az ellenőrző mérések szerint a Duna vonalában ±2 m, függ a látható műholdak számától. A láthatóság feltétele miatt, a GPS-szel végzett helymeghatározás pontossága a galériaerdők árnyékoló hatása miatt csökkenhet.

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 mérő a vízhozam meghatározása szolgál, emellett a pillanatnyi áramlási sebesség irányának és nagyságának (egy pont mérési ideje beállítástól függően ~1-2 másodperc), és a középsebesség eloszlásának mérésére is alkalmas. A műszer a sebességvektor meghatározása mellett rögzíti a mérési pont vízmélységét a hozzátartozó távolsággal, így a meder felvételét is lehetővé teszi. Az ADCP mérő a felszínközeli sávban, a műszer (műszaki adottságból adódó) holtidejének megfelelő távolságnál, ~ vízszint alatt 1 m kezd mérni és a zavarként fellépő interferencia miatt a fenékközeli sávban sincs mérés, ezért felszín- és fenékközelben a sebességeket a feldolgozó program a beállításnál kijelölt jelleggörbe szerint számítja. Szelvényenként 2-4 vízhozam mérés eredményének közel azonossága esetén a vízhozam a mérések átlagaként adható meg, a mérések pontossága < ± 2 %.

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. A középsebesség vektorok eloszlásának megadásánál célszerű a csúszóátlag vagy interpoláció alkalmazása.

Tekintettel arra, hogy a hajó mozgása eltér az egyenestől, a mérési szelvényeket az EOV koordinátával megadott végpontokkal jelöltük ki és a mért értékeket a végpontok által kijelölt egyenesre vetítjük. 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 feldolgozott mérések mindig a balparttól indulnak, a medermélység koordinátáit a két vízmérce (Paks, Dombori) vízszintjéből az átlagos esés figyelembevételével, balti szintben [mBf] határoztuk meg.

A méréseknél az ME-10-231-17-2009 számú („Vízrajzi észlelések és mérések" című) műszaki előírás követelményeit alkalmaztuk, a mérési adatok kiértékelése, feldolgozása saját feldolgozó szoftver segítségével történt.

Mérési eredmények feldolgozása:

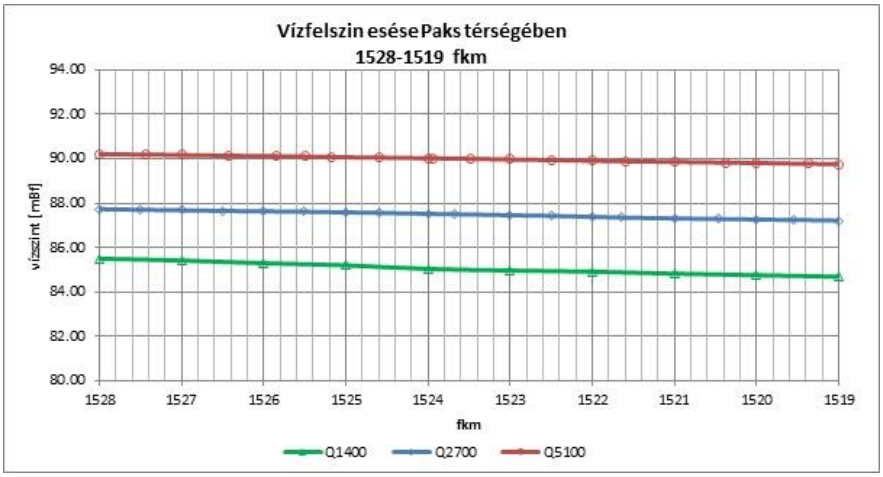
A vízhozam mérések jellemző hidrológiai és mérési adatait a 11.7.3-1 táblázatban ismertetjük:

Paks vízmérce		Dombori vízmérce		QDombori	QMért	szórás	felszín esés	időpont
H [cm]	H [mBf]	H [cm]	H [mBf]	[m³/s]	[m³/s]	[%]	[cm/km]	
33	85.71	50	84.02	1390	1367	1.95	6.90	2012.08.21
64	86.02	82	84.34	1540	1711	1.91	6.86	2012.10.30
195	87.33	239	85.91	2320	2318	0.67	5.80	2012.08.02
200	87.38	250	86.02	2443	2389	1.19	5.55	2012.05.31
258	87.96	297	86.49	2640	2746	1.78	6.00	2012.03.20
502	90.40	568	89.20	4520	5087	1.78	4.84	2013.02.06
512	90.50	553	89.05	4070	5447	1.58	5.92	2013.01.09
556	90.94	606	89.58	4780	5687	1.15	5.55	2013.01.10

11.7.3-1. táblázat: A 2012. és 2013. évi helyszíni, kis-, közép- és nagyvízi vízhozammérések eredményei a Paksi vízmérce szelvényben (Duna 1531,3 fkm)

A kisvízi- és középvízi mérési eredmények jellemzően jó egyezést mutatnak a Dombori vízmérce Q-H (vízhozam görbe: vízhozam-vízállás) görbéjéből nyert vízhozam adataival, mivel a mérések közel-permanens állapotban történtek. A nagyvízi vízhozam méréseket meredek felfutású rövididejű árhullám jellemezte, ezért a mérési eredmények a vízmérce hozamától jelentősen eltérnek. A mérések hibája minden mérési sorozatnál a specifikációnak megfelelően minden esetben 2 % alatt marad. A nagyvízi méréseknél csak a galériaerdők határáig tudtuk a mérni és az árterület vízszállítására a Dombori vízmércén megadott hozam sem ad támpontot. A mért vízhozamok, a partközeli áramlási határok (max. 0.05-0.10 m/s-os áramlási sebesség) és a terepviszonyok ismeretében becsülhető, hogy felső három és alsó két mérési szelvényben az árterületen minimális a vízszállítás, nem haladja 25-50 m³/s mennyiséget, ami a mért mennyiség 0.5-1 % -nak felel meg. A középső szakaszon az árterületi vízszállítás elérheti a Q = 200 m³/s vízhozamot.

A hidrodinamikai modellek arányosításához, szükséges a vízhozam, sebességeloszlás mellett a hozamokhoz tartozó vízfelszín esés ismerete (lásd: 11.7.3-1 ábra). Kisvízi, középvízi, nagyvízi arányosításhoz csak olyan mérést választhatunk, ahol a felszíngörbe ismeretes. A Q = 2 746 m³/s-s középvízi, a Q = 5 087 m³/s-os nagyvízi hozammérésekhez vízfelszín rögzítés is kapcsolódik. Kisvízi mérésnek Q =1 367 m³/s vízhozamhoz tartozó mérést tekinthetjük, mivel vízhozamhoz hozzárendelhető a hajózási kisvízszint DB 2004 Q = 1 180 m³/s–hoz tartozó felszíngörbéje, mivel a Paksi vízmércén a Q =1 367 m³/s hozamnál mért vízszint csak 26 cm haladja meg a DB 2004 vízszintjét.



11.7.3-1. ábra: Kis-, közép- és nagyvízi vízfelszín esés mérési eredményei az erőmű térségében - 2012. és 2013. évi helyszíni mérések a Duna 1528 – 1519 fkm szakszán

A Duna 1528 – 1519 fkm szakaszának, 2012. és 2013. évi mérések alapján meghatározott átlagos felszínesését a 11.7.3-2. táblázat tartalmazza.

Q	esés	Q	esés	Q	esés
[m³/s]	[cm/km]	[m³/s]	[cm/km]	[m³/s]	[cm/km]
1400	8.98	2700	5.71	5100	5.02

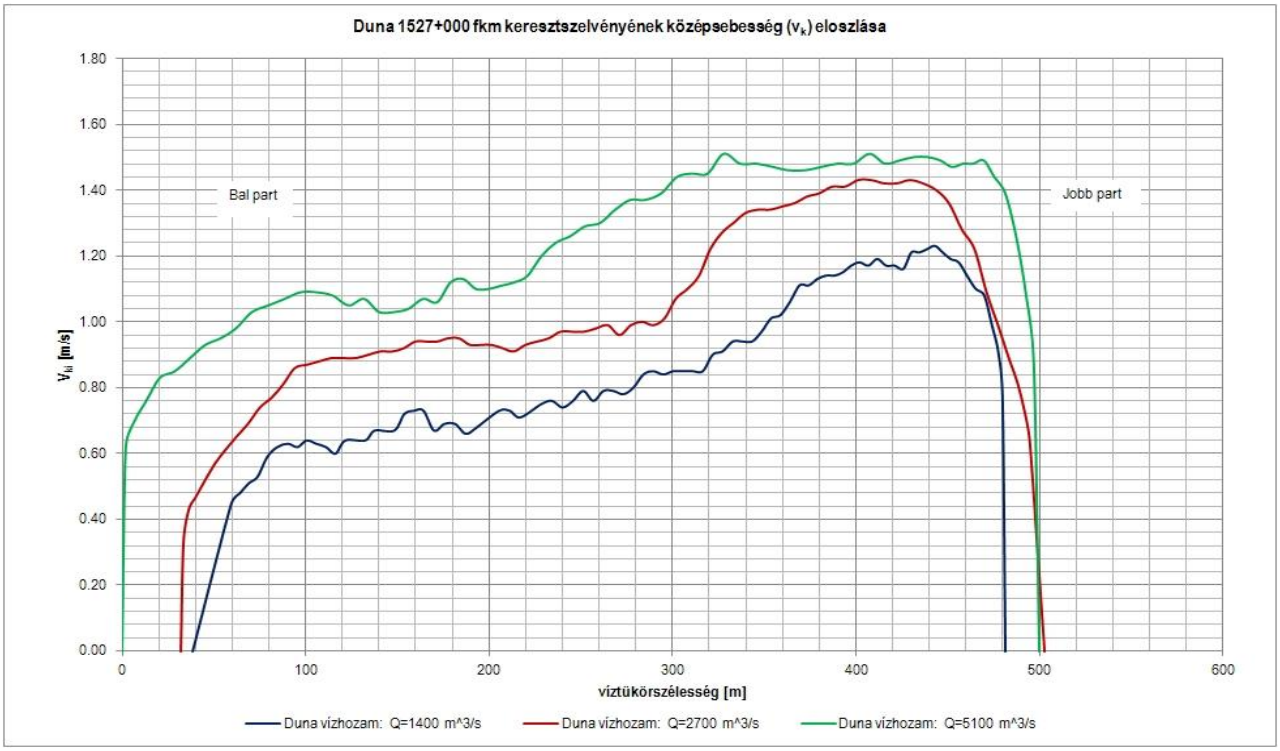
11.7.3-2. táblázat: Kis-, közép- és nagyvízi átlagos vízfelszín esés - 2012. és 2013. évi helyszíni mérések a Duna 1528 – 1519 fkm szakaszán

A mérések alapján a számított jellemző hidraulikai paramétereket szelvényenként megadva a 11.7.3-3. táblázatban foglaltuk össze.

szelvény	$Q_{névl}$	Qmért	áramlási szelvény	víztükör szélesség	közép-mélység	v_k (középsebesség)	v_{max} (max.sebesség)	vízszint a szelvényben
Duna [fkm]	[m³/s]	[m³/s]	[m2]	[m]	[m]	[m/s]	[m/s]	[mBf]
1527+000	1400	1388	1487	443.2	3.32	0.93	1.23	85.41
	2700	2917	2640	471.0	5.56	1.10	1.43	87.74
	5100	5384	4220	503.1	8.28	1.28	1.51	90.17
1525+800 (1526)	1400	1396	1420	416.4	3.40	0.98	1.36	85.35
	2700	2940	2806	553.2	5.04	1.05	1.40	87.68
	5100	5318	4586	588.9	7.69	1.16	1.54	90.12
+500m (1525+750)	1400	1388	1412	459.8	3.06	0.98	1.35	85.33
	2700	2892	2945	583.8	5.02	0.98	1.35	87.66
	5100	5261	4834	623.0	7.68	1.09	1.50	90.10
1525+500	1400	1396	1676	444.2	3.74	0.83	1.34	85.31
	2700	2846	2829	532.5	5.29	1.01	1.34	87.61
	5100	5024	4633	584.3	7.87	1.08	1.34	90.10
1525+000	1400	1412	1660	486.4	3.40	0.85	1.19	85.28
	2700	2773	2784	520.7	5.32	1.00	1.37	87.62
	5100	5144	4637	552.4	8.30	1.11	1.61	90.08
1524+000 főág	1400	1344	1510	398.6	3.73	0.89	1.01	85.21
	2700	2667	2603	430.8	5.98	1.02	1.16	87.55
	5100	4744	3947	439.4	8.80	1.20	1.40	90.03
mellékág 1524+500 1523+700								
	2700	164	339	135.0	2.47	0.48	0.62	87.55
	5100	358	522	87.0	5.55	0.69	0.62	90.05
1522+000	1400	1435	1797	464.1	3.84	0.80	0.94	85.07
	2700	2748	2822	461.0	6.06	0.97	1.18	87.40
	5100	5223	4438	493.3	8.85	1.18	1.42	89.93
1520+000	1400	1409	1821	411.1	4.41	0.77	0.97	84.93
	2700	2919	3424	521.0	6.51	0.85	1.16	87.27
	5100	5135	4507	494.5	8.92	1.14	1.36	89.83

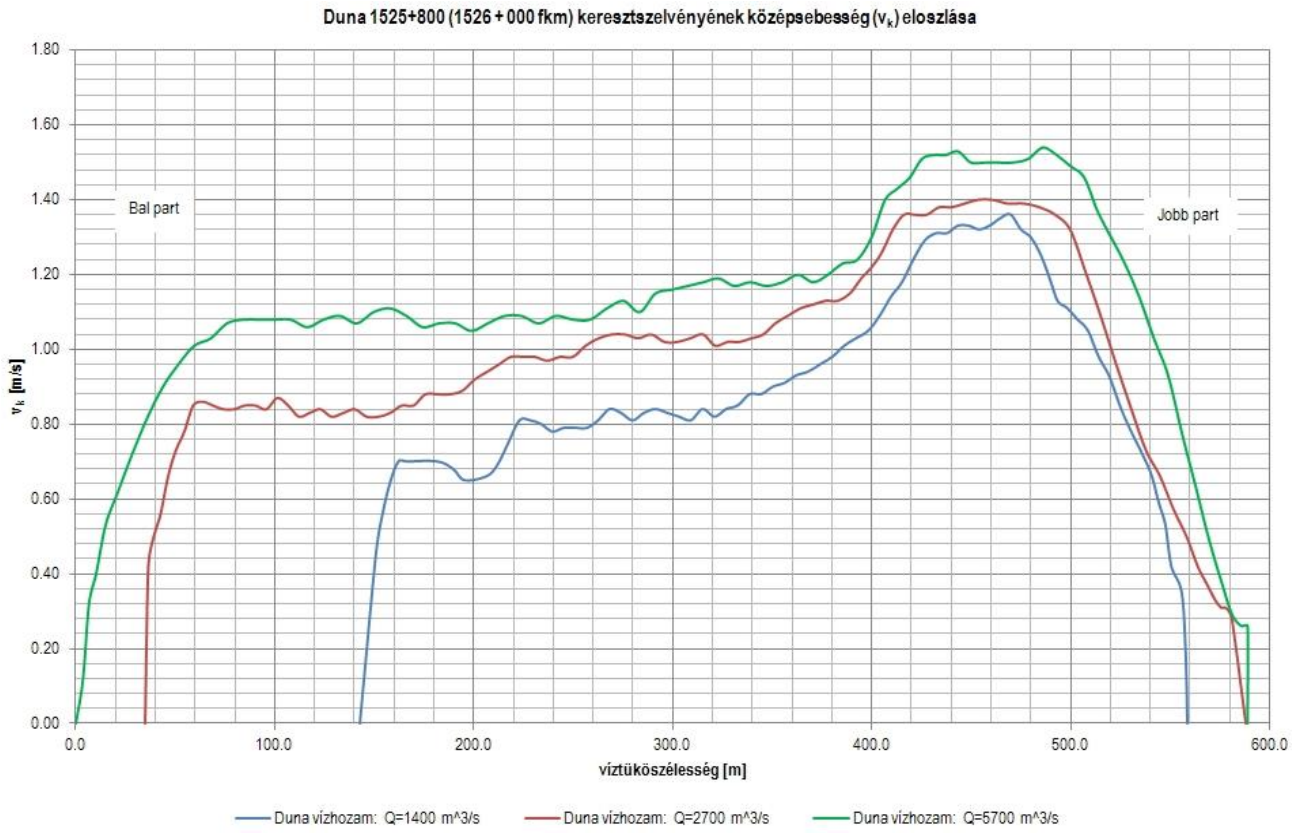
11.7.3-3. táblázat: Kis-, közép- és nagyvízi mérések alapján számított jellemző hidraulikai paraméterek - 2012. és 2013. évi helyszíni mérések

Az 1527+000 fkm szelvényben a meder a jobbkanyarnak megfelelően asszimetrikus, jelentős jobbparti kimélyüléssel, a sodor a kanyar és a hideg-csatorna vízkivétele miatt rászorul a jobbpartra. A víztükör a vízhozam növekedésével ~10 %-ot növekszik, középsebesség növekedése jelentősebb, nagyobb 30 %-nál és a sebességcsúcsok is jelentősek (11.7.3-2. ábra). A szelvénybővülést a Paksi-szigeten megtelepült galériaerdő korlátozza, 5100 m³/s–nál a mellékágban még nincs vízszállítás.

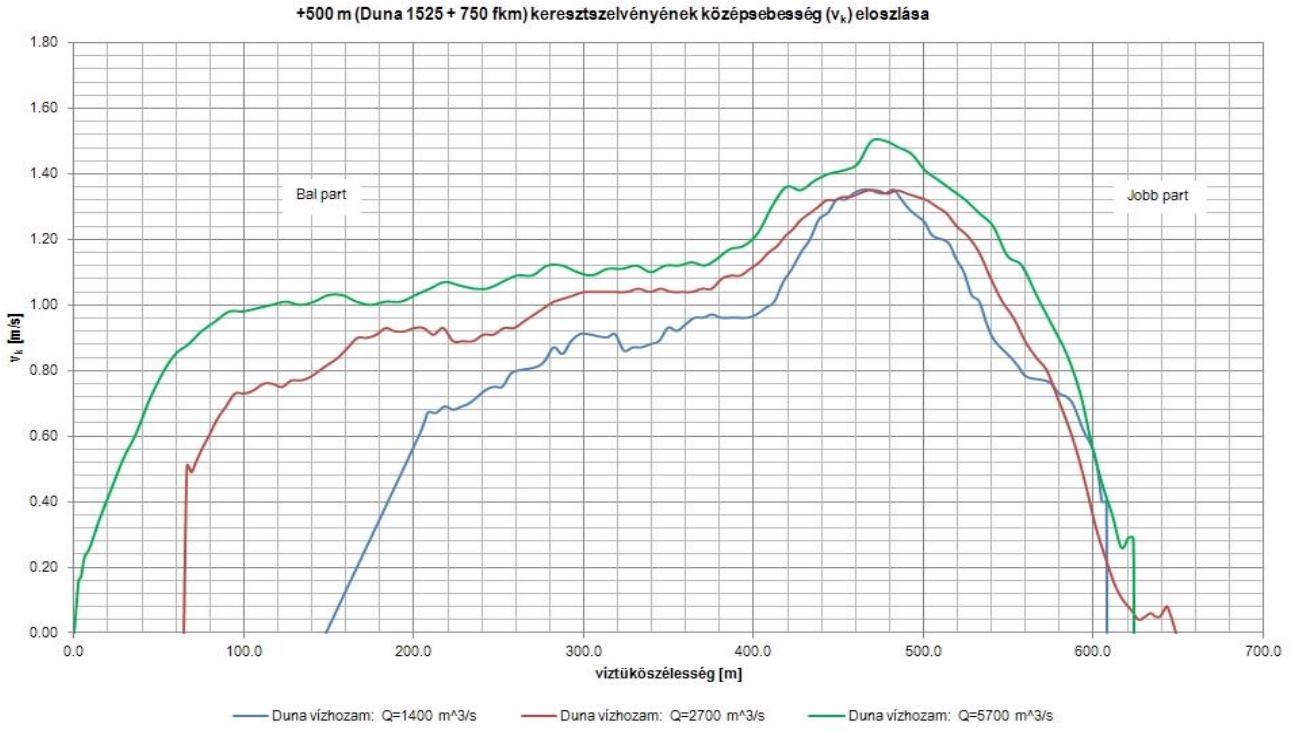


11.7.3-2. ábra: Szelvény-középsebességek alakulása a Duna 1527 fkm szelvényében, kis-, közép- és nagyvízkor - 2012. és 2013. évi helyszíni mérések

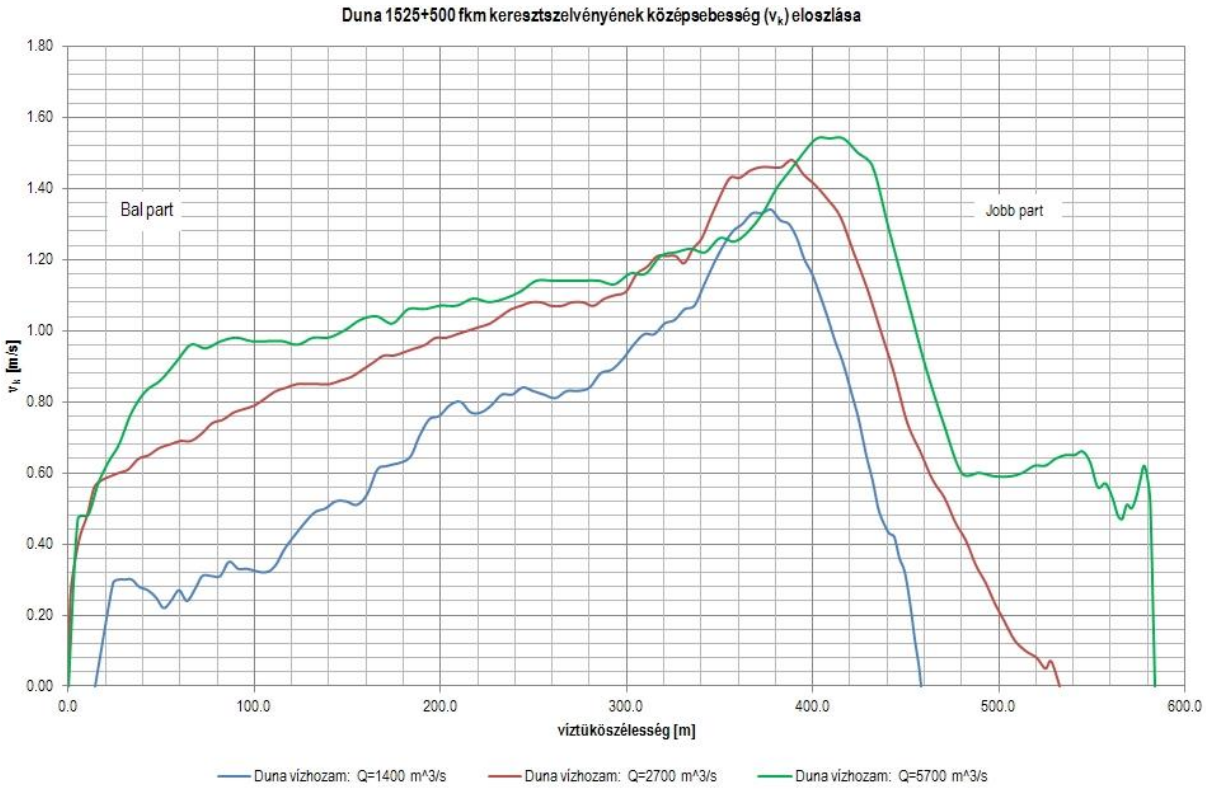
A 1525+800 (1526+000 fkm), a hely megnevezése a hajózási fkm tábla alapján történt) – 1525+500 fkm közötti szakasz együttesen jellemezhető, a melegvíz torkolati műtárgytól a keresztgátig (55 VO (vízrajzi osztály) szelvény környezete) tart. A szakaszon a kisvízi és nagyvízi meder jelentősen eltér egymástól, mivel a Paksi sziget vonalában folytatódó zátony kisvíznél a víztükör szélességet ~150 m-rel csökkenti. A vízhozammal növekvő szelvényterület miatt a középsebesség kiegyenlített, de a jobbparton nagy sebességgel bevezetett melegvízcsóva miatt, a sebességmaximumok is jelentősek. A szakaszon a jobbparti áramlást erőteljes makro-turbulens jelenségek jellemzik és csak a keresztgát hatására válik az áramlás kiegyenlítettebbé (11.7.3-3. ábra - 11.7.3-5. ábra). A sodor a keresztgátig a jobbparton marad és alatta jelentős iránytöréssel a balpart felé irányul. Nagyvíznél az ártéren keresztül a felső Uszódi-sziget mellékágának feltöltése is megkezdődik.



11.7.3-3. ábra: Szelvény-középsebességek alakulása a Duna 1526 fkm szelvényében, kis-, közép- és nagyvízkor - 2012. és 2013. évi helyszíni mérések

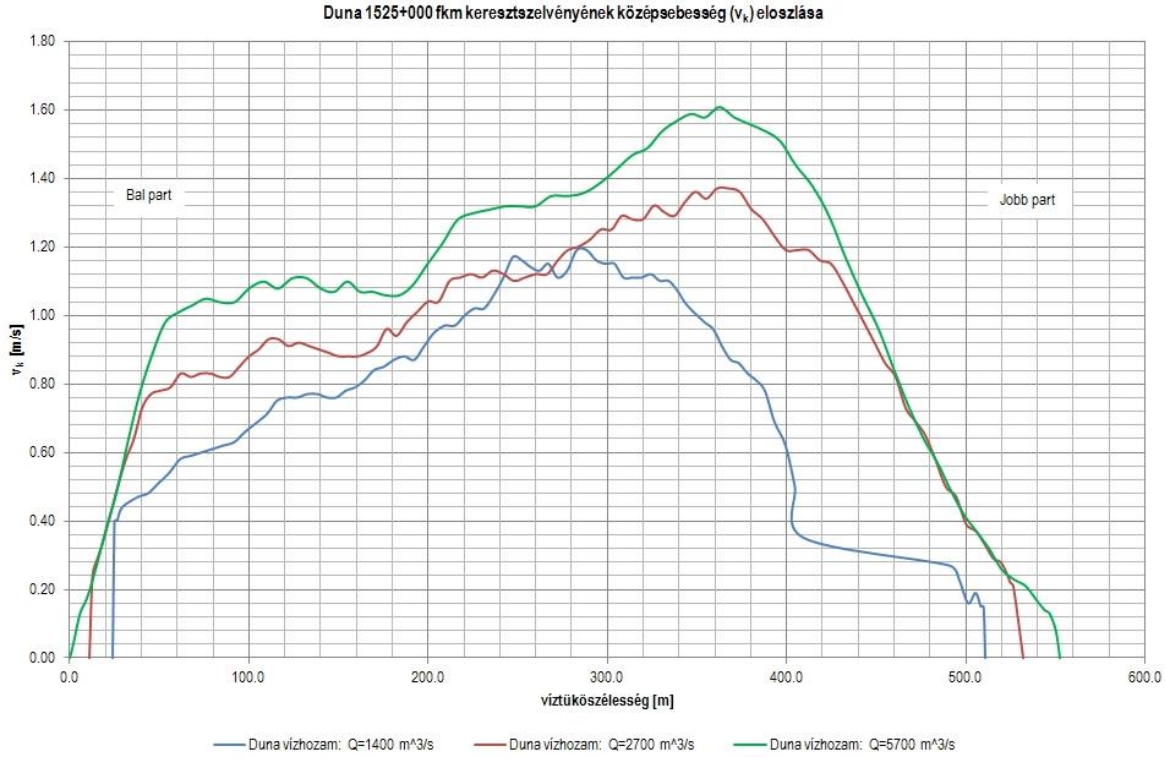


11.7.3-4. ábra: Szelvény-középsebességek alakulása a Duna 1525+750 fkm (+500 m-es) referencia szelvényében, kis-, közép- és nagyvízkor - 2012. és 2013. évi helyszíni mérések



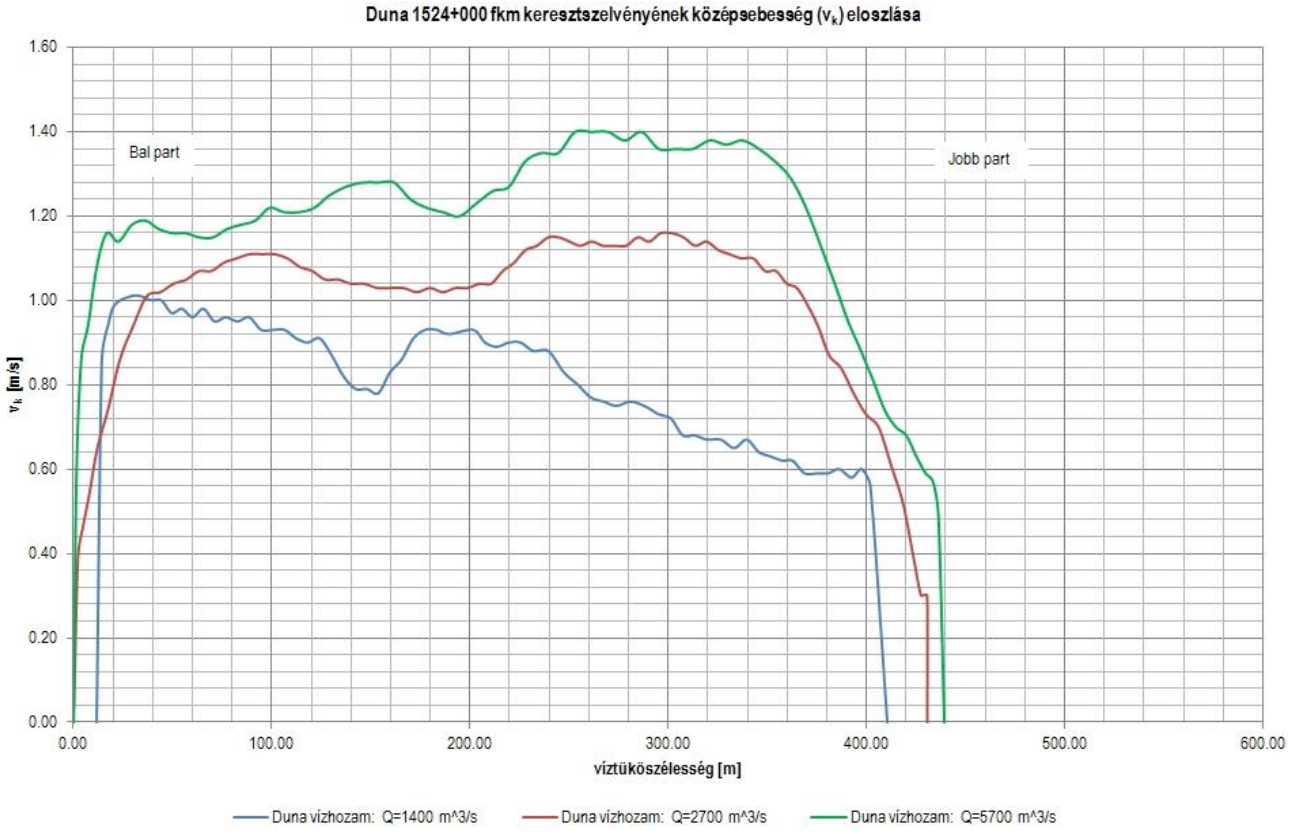
11.7.3-5. ábra: Szelvény-középsebességek alakulása a Duna 1525+500 fkm szelvényében, kis-, közép- és nagyvízkor - 2012. és 2013. évi helyszíni mérések

A Duna 1525 fkm szelvény alatt alakul ki az inflexió, és az Uszódi-sziget mellékága fokozatosan kapcsolódik be a vízszállításba. Kisvíznél a sodor a mederközép felé tolódik, de középvíztől az Uszódi-sziget jobbpartja közelében marad. A csóva hatása kimutatható, a sebességmaximumok jelentősek, de a középsebesség kiegyenlítettebb (11.7.3-6. ábra).



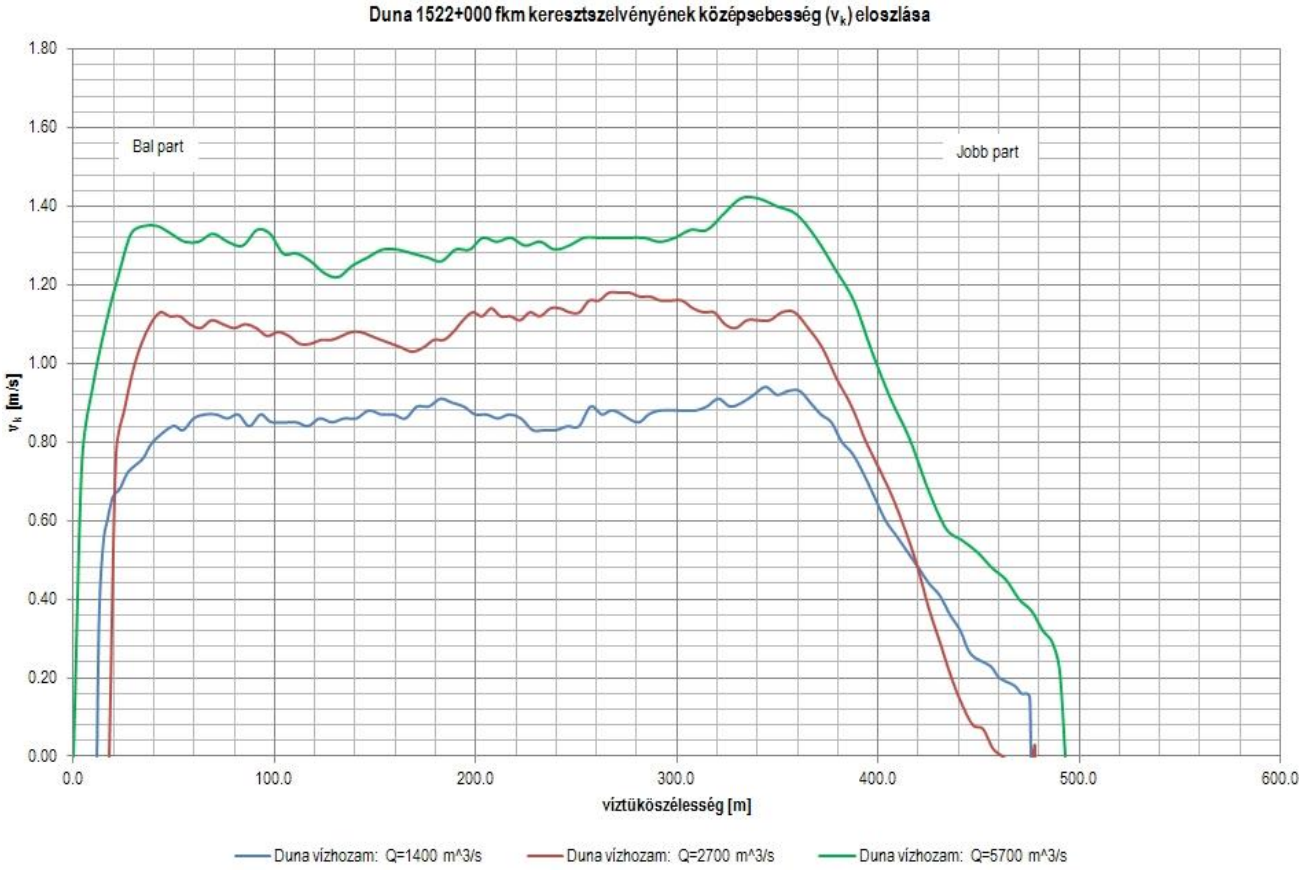
11.7.3-6. ábra: Szelvény-középsebességek alakulása a Duna 1525+000 fkm szelvényében, kis-, közép- és nagyvízkor - 2012. és 2013. évi helyszíni mérések

A Duna 1524 fkm mederszelvénye balkanyarra jellemzően erősen aszimmetrikus, jelentős balparti kimélyüléssel, kőszórással védett parttal. A mederalakulatnak megfelelően a sebességeloszlás is aszimmetrikus, kisvíznél a sodorvonal a balpartnak szorul. Középvíztől a sebességeloszlás egyenletesebbé válik, és sodor a mederközéphez közelít. Nagyvíznél a sodor a mederközéptől az Uszódi-sziget felé kerül (11.7.3-7. ábra). Ez azt is jelenti, hogy a korábbi időszakhoz képest a balkanyar tetőpontja lejjebb tolódott. Az Uszódi mellékágban nincs mederfelmérés, a vízszállításra illetve a meder alakulására csak az általunk rögzített ADCP mérés 4 szelvénye szolgáltat adatot.



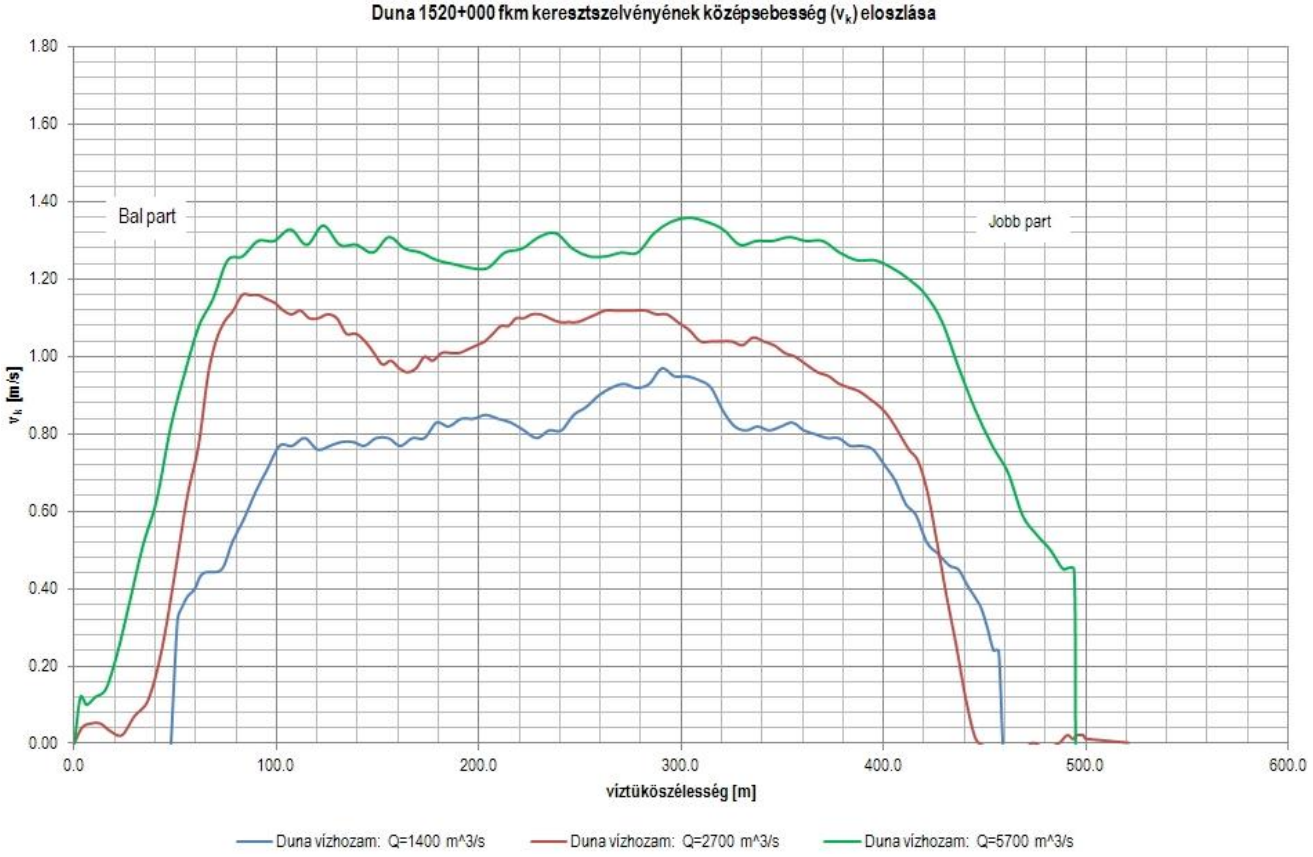
11.7.3-7. ábra: Szelvény-középsebességek alakulása a Duna 1524+000 fkm szelvényében, kis-, közép- és nagyvízkor - 2012. és 2013. évi helyszíni mérések

A Duna 1522 fkm szelvénye egyenletes csészeszelvény, amit a kiegyenlített sebességeloszlás is mutat. A jobbparti sarkantyúköz kisvíznél sem záródik ki az áramlásból, de a sebességek jelentősen visszaesnek (11.7.3-8. ábra).



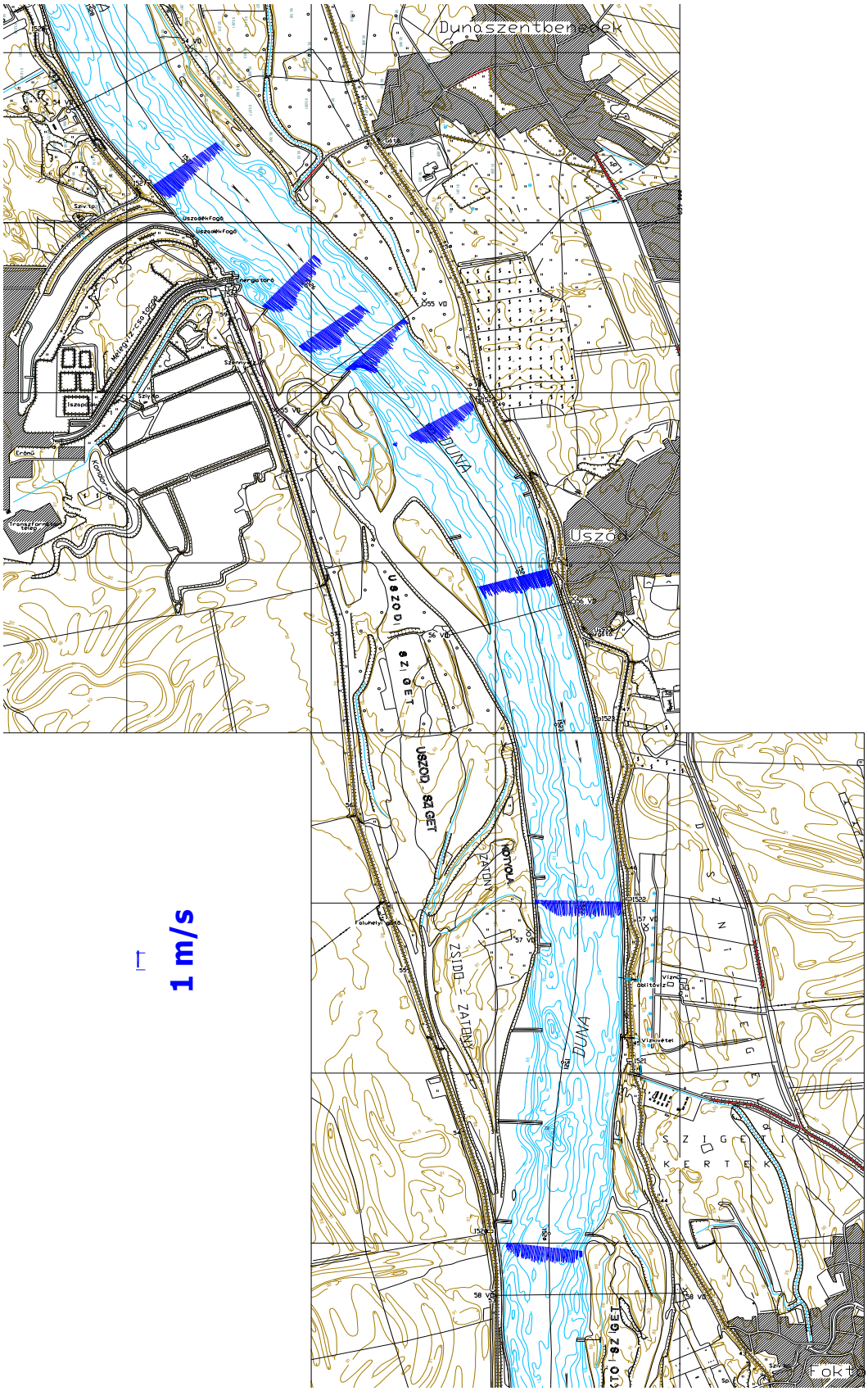
11.7.3-8. ábra: Szelvény-középsebességek alakulása a Duna 1522+000 fkm szelvényében, kis-, közép- és nagyvízkor - 2012. és 2013. évi helyszíni mérések

A Duna 1520 fkm szelvényben a partoknál a szelvény feletti sarkantyúk hatása jelentkezik. A jobbparton a sarkanytyúsor miatt feltöltődés folyamata zajlik, így középvíznél sincs áramlás, a balparton a sarkantyúnál kialakuló áramlási zavarok okoznak jelentős kimélyülést és sebességnövekedést (11.7.3-9. ábra). A partok kivételével a középsebességek eloszlása kiegyenlített képet mutat (az áramlási zavarok miatt nagyvíznél a mérést 250 m-rel lejjebb végeztük).

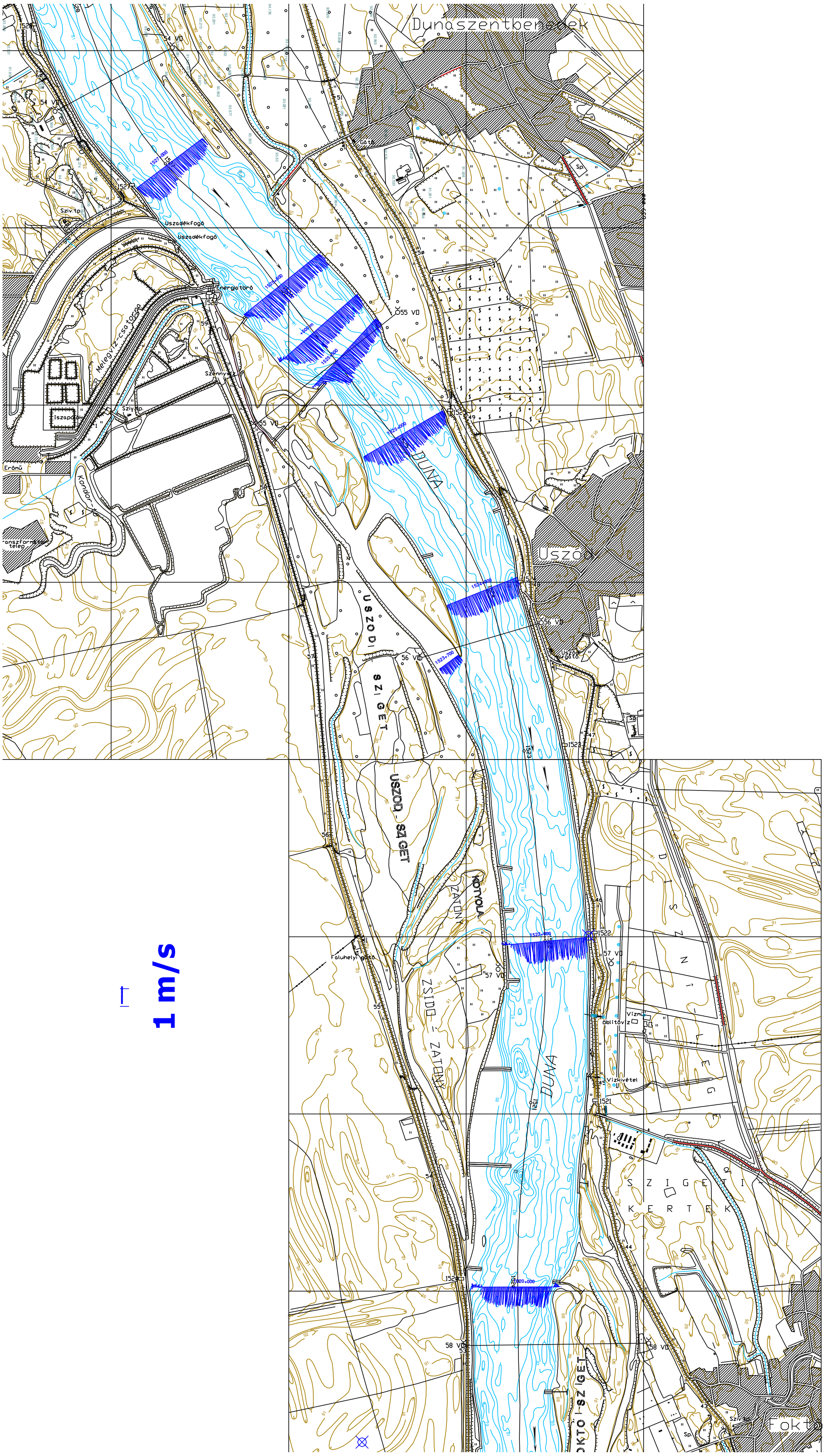


11.7.3-9. ábra: Szelvény-középsebességek alakulása a Duna 1520+000 fkm szelvényében, kis-, közép- és nagyvízkor - 2012. és 2013. évi helyszíni mérések

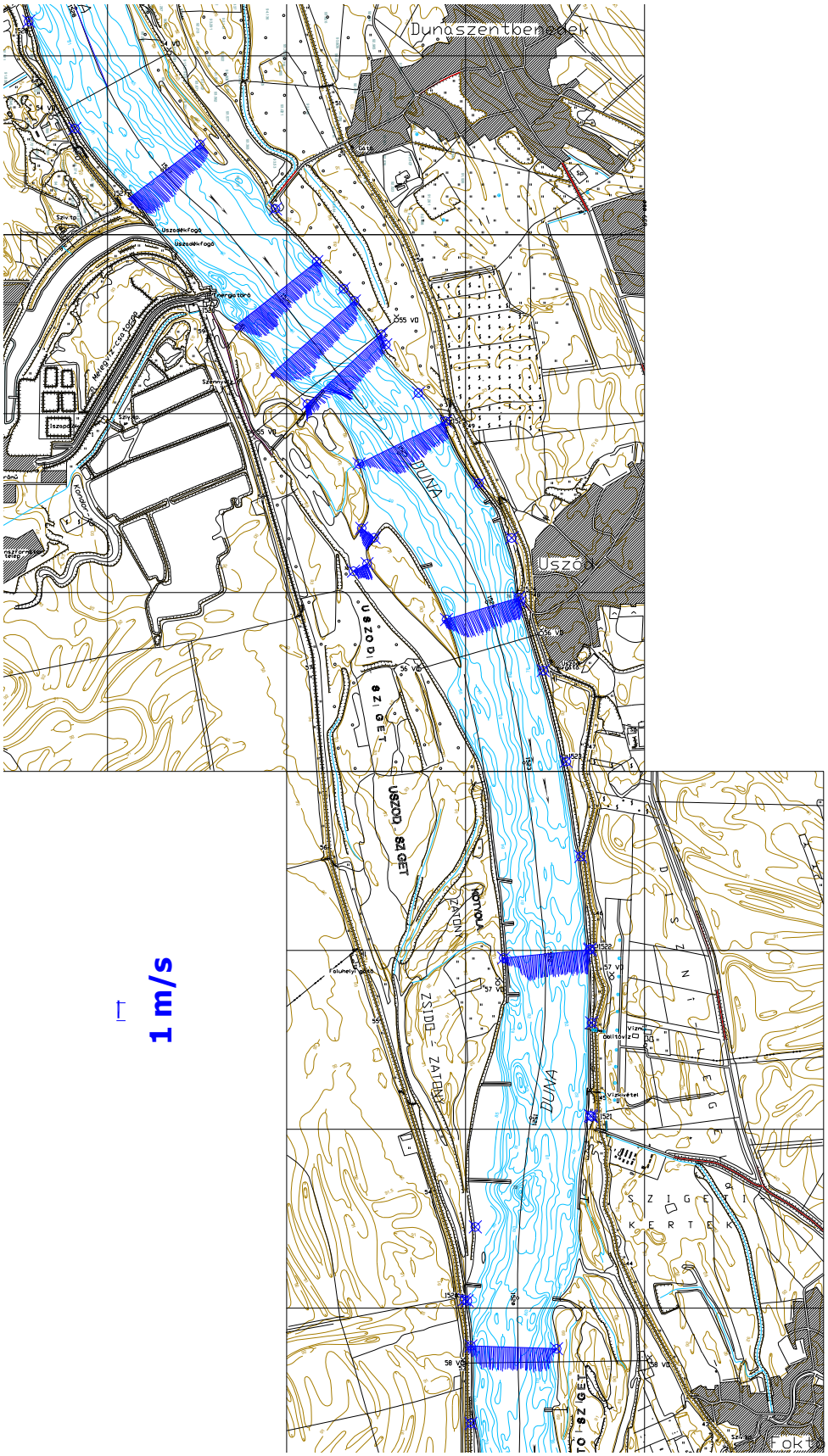
A Duna vízterében mért, keresztszelvény menti mélységintegrált sebességeloszlások alakulását, kis-, közép- és nagyvízi állapotokra, az alábbi ábrasor (lásd: 11.7.3-10, 11.7.3-11 és 11.7.3-12 ábrák) szemlélteti:



11.7.3-10. ábra: Áramlási sebességvektorok szelvényenkénti eloszlása a Duna 1528-1519 fkm szakaszán, Q = 1400 m³/s.



11.7.3-11. ábra: Áramlási sebességvektorok szelvényenkénti eloszlása a Duna 1528-1519 fkm szakaszán, Q = 2700 m³/s.



11.7.3-12. ábra: Áramlási sebességvektorok szelvényenkénti eloszlása a Duna 1528-1519 fkm szakaszán, Q = 5100 m³/s.

11.7.3.1.2 Lebegtetett hordalék mintavétele és jellemzőinek feldolgozása

Lebegtetett hordalék mintavételére az 1527, 1525+800 (1526), 1525+500, 1525, és 1524 fkm szelvényekben került sor, **kisvízi, középvízi és nagyvízi állapot**ban. A kijelölt szelvényekben kis- és középvíznél, 13 függélyben forgószárnnyal sebességmérést végeztünk és egyidejűleg forgószárny testére szerelt szivattyús mintavevővel lebegtetett minta vételére került sor. A mintákat függélyenként gyűjtőtartályban egyesítettük. Nagyvíznél a sebességviszonyok miatt csak ADCP-vel vehettük fel a sebességteret. A sebességtér meghatározása után minden szelvény 7 függélypontjában, szivattyús mintavevővel egyesített lebegtetett minta vételére került sor. A mintavétel helyét GPS-szel rögzítettük és interpolációval határoztuk meg a függélyekben mért hidraulikai paramétereket.

A lebegtetett hordalék mintavételezés hidraulikai jellemzői az alábbiak (11.7.3-4. táblázat):

Paksi vízmérce (Duna 1531,3 fkm)											
kisvíz				**középvíz**				**nagyvíz**			
Dátum	h	H	Q	Dátum	h	H	Q	Dátum	h	H	Q
	[cm]	[mBf]	[m³/s]		[cm]	[mBf]	[m³/s]		[cm]	[mBf]	[m³/s]
2012.11.27	37	86.17	1450	2012.05.21	158	86.96	2148	2013.06.06	629	92.06	5987
2012.11.28	22	86.02	1380	2012.05.22	144	86.82	2101	2013.06.07	739	92.62	6926

11.7.3-4. táblázat: Hidraulikai jellemzők alakulása a 2012-2013. évi lebegtetett hordalékmintavételezéskor, kis-, közép- és nagyvízi helyzetben, a Duna 1531,3 fkm (paksi vízmérce) szelvényében

A lebegtetett hordalékminták laboratóriumi elemzése azok szárazanyag-tartalmának, azaz a lebegtetett hordalék töménységének, valamint minta-sorozatok szemösszetételének meghatározásával történtek.

A **kisvízi tartomány**ban, a 2012-2013. évi mintavételek alapján meghatározott lebegtetett hordalék koncentráció és hordalékhozam paraméterek (11.7.3-5. táblázat):

Duna szelvény [fkm]	Qmért [m³/s]	cs [mg/l]	cs-min-max [mg/l]	D50 [mm]	Qs [kg/s]
1527+000	1419	12.9	9.0 - 17.0	0.046	18.398
1525+800 (1526)	1427	20.5	16.2 - 28.2	0.053	30.602
1525+500	1442	15.9	12.4 - 25.6	0.040	22.127
1525+000	1391	14.4	11.6 - 29.8	0.053	23.328
1524+000	1312	15.9	11.6 - 28.8	0.045	25.584

11.7.3-5. táblázat: Kisvízi lebegtetett hordalék koncentráció és hordalékhozamok, a Duna 1524-1527 fkm szelvényeiben

A mért minták szemösszetétele jellemzően durva iszap tartományhoz tartozik mindhárom vízhozam tartományban. Az átlagos közepes átmérő D50 = 0.047 mm. A szelvényben mért átlagos koncentráció cs_átl = 15.9 mg/l a koncentráció értéke átlagosan a 12.1 … 25.9 mg/s tartományban mozog. A hordalékhozam átlagos értéke Qs_átl =24.01 kg/s.

A **középvízi tartomány**ban meghatározott paraméterek (11.7.3-6. táblázat):

Duna szelvény [fkm]	Qmért [m³/s]	cfügg [mg/l]	cs_min-max [mg/l]	D50 [mm]	Qs [kg/s]
1527+000	2156	48.9	34.3 - 86.9	0.048	105.046
1525+800 (1526)	2157	52.4	36.2 - 73.7	0.036	117.200
1525+500	2125	49.4	42.9 - 54.2	0.043	102.141
1525+000	2040	49.6	42.5-63.2	0.051	104.021
1524+000	2100	42.7	20.6-52.2	0.043	98.259

11.7.3-6. táblázat: Középvízi lebegtetett hordalék koncentráció és hordalékhozamok, a Duna 1524-1527 fkm szelvényeiben

A középvízi tartományban az átlagos közepes átmérő alig változik D50 = 0.044 mm. A szelvényben mért átlagos koncentráció a kisvizes koncentráció háromszorosára növekszik cs_átl = 48.6 mg/l a koncentráció értéke átlagosan a 35.3 … 66.0 mg/s tartományban mozog. A hordalékhozam átlagos értéke Qs_átl =105.33 kg/s.

A **nagyvízi tartomány**ban meghatározott paraméterek a 11.7.3-7. táblázatban láthatók.

Duna szelvény [fkm]	Qmért	cs_átl	cs_min-max	D50	Qs
	[m³/s]	[mg/l]	[mg/l]	[mm]	[kg/s]
1527+000	6414.5	153.69	107.3-200	0.037	978.4
1525+800 (1526)	6438.0	140.09	89.6-175.2	0.037	884.77
1525+500	6117.0	140.01	107.8-174.3	0.039	878.00
1525+000	6684.0	157.87	125.6-182.5	0.038	1182.43
1524+000	6973.0	162.65	129.6-187.0	0.035	1085.78

11.7.3-7. táblázat: Nagyvízi lebegtetett hordalék koncentráció és hordalékhozamok, a Duna 1524-1527 fkm szelvényeiben

A nagyvízi tartományban az átlagos közepes átmérő kismértékben csökken D50 = 0.035 mm. A szelvényben mért átlagos koncentráció a kisvizes koncentráció tízszerese cs_átl = 150.8 mg/l a koncentráció értéke átlagosan a 112.6….183.5 mg/s tartományban mozog. A hordalékhozam átlagos értéke Qs_átl =1 001.9 kg/s.

11.7.3.1.3 Mederanyag mintavétel és jellemzőinek feldolgozása

Mederanyag mintavételt a lebegtetett mintavételi függélyekben középvíznél végeztük, harangos mintavevővel. A mederanyag hordalékminták laboratóriumi elemzése a szemcseeloszlás meghatározására irányult és a minta-sorozatok szemösszetételének meghatározásával történtek.

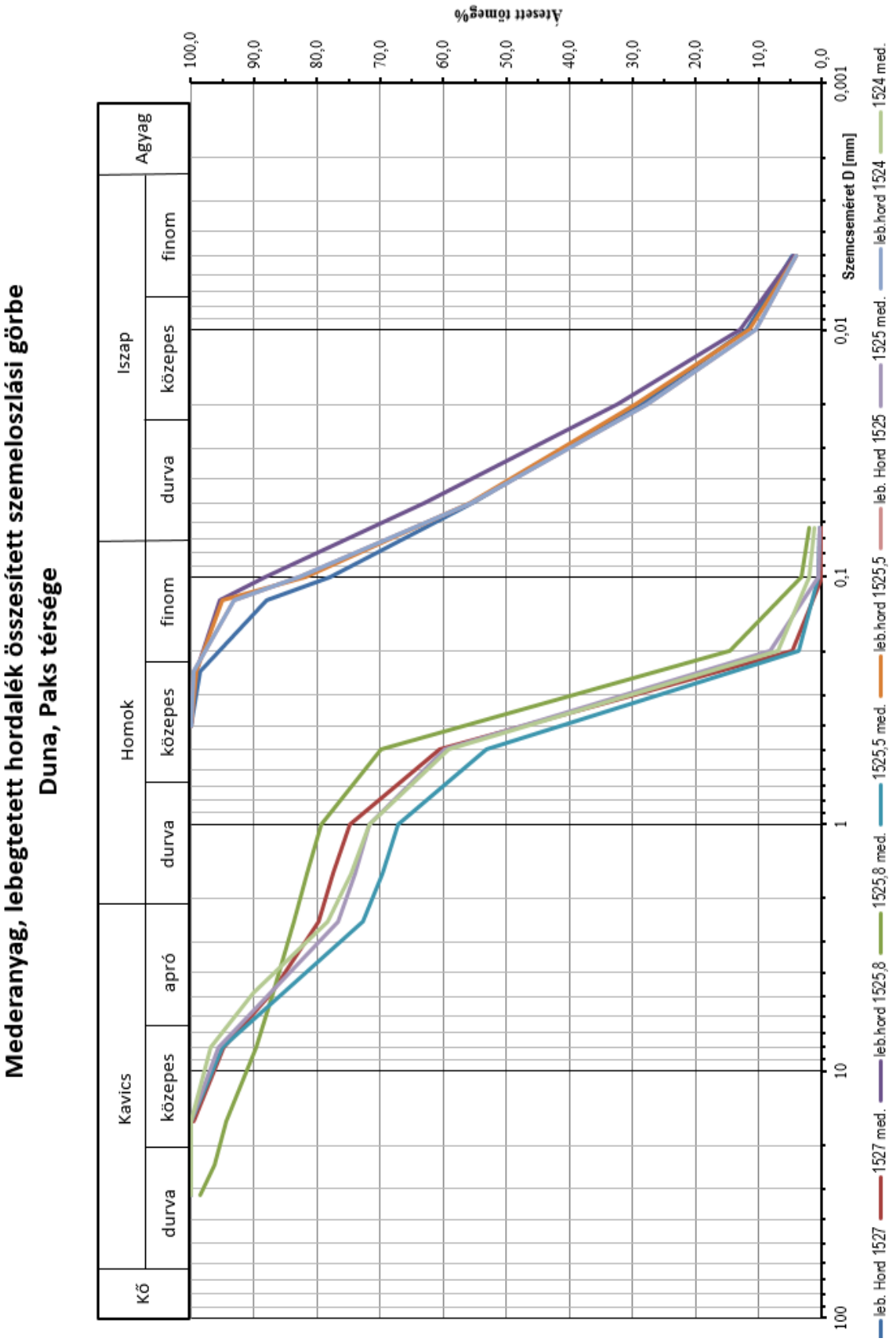
A szemeloszlási görbék kiértékelés alapján megállapítható, hogy az 1527 fkm szelvényben a balparttól a mederközépig a jellemző szemcseméret a közepes homok. A jobbpart irányában a mederanyag durvul, a szemcseátmérő az apró kavics tartományába tolódik. A közepes szemátmérő (Dg) 0.32 … 5.22 mm tartományban mozog. A meder a jobbparton erősen páncélozódott, a mintavevő nem tudta a medret megbontani és a minta csak a felszíni görgetett hordalékot mutatja (11.7.3-13. ábra).

Az 1525+800 (1526) fkm szelvényben az első hét minta szemösszetétele vegyes képet mutat a durva kavicstól a homokig, de jellemző szemcsemérete a homok. A jobbparti nagysebességű zónában a jellemző szemcseméret az apró kavics. A közepes szemátmérő (Dg) 0.35 … 10.9 mm tartományban mozog.

Az 1525+500 fkm szelvény a balparti 7 függélyben homogén közepes homok. A jobbparti függélyekben a mederanyag jellemzően kavics és fordul elő az 5 szelvényben a legnagyobb szemcseméret. A közepes szemátmérő (Dg) tartománya 0.33 … 27.0 mm.

Az 1525 fkm szelvény első hat függélyben a mederanyag közepes homok, a jobbpart felé a meder anyaga jellemzően az apró kavics tartományába tolódik. A közepes szemátmérő (Dg) 0.28 … 4.59 mm között változik.

Az 1524 fkm szelvényben a balparti első 5 függély mederanyaga homok és a további függélyekben a jellemző átmérő vegyes képet mutat a homoktól a kavicsig. A közepes szemátmérő (Dg) 0.32 … 3.24 mm között változik.



11.7.3-13. ábra: A Duna mederanyagának és lebegtetett hordalékának összesített szemeloszlási diagrammja, a Duna 1524-1527 fkm szakaszán

Az alábbiakban összegezzük táblázatosan is a Duna vizsgált mederanyagának és lebegtetett hordalékának összesített szemeloszlását folyam-kilométerenként (11.7.3-8. táblázat):

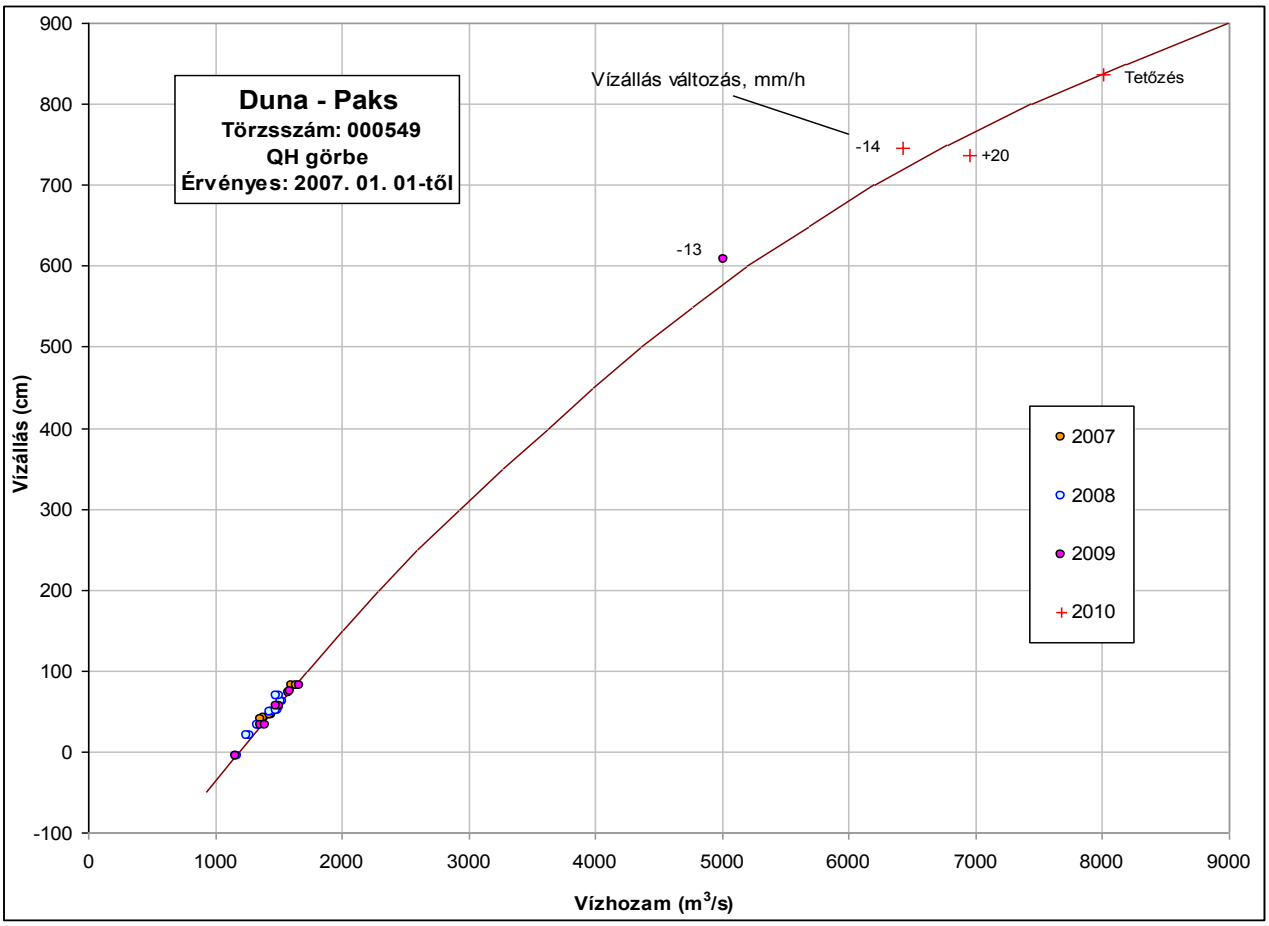
D [mm]	1527	1525.8	1525.5	1525	1524
	lebegtetett hordalék [%] (súly %)				
0.005	4.6	4.5	4.1	4.1	4.1
0.01	12.0	12.9	11.6	11.6	10.6
0.02	28.7	32.5	29.6	29.6	27.7
0.05	55.4	63.0	55.9	55.9	55.6
0.1	78.0	88.3	81.9	81.9	82.8
0.125	88.0	95.4	95.0	95.0	93.1
0.24	98.5	99.2	99.2	99.2	99.6
0.4	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
D [mm]	mederanyag [%] (súly %)				
0.063	0.0	2.1	0.4	0.3	1.2
0.1	0.1	3.3	0.6	0.6	2.1
0.2	4.6	14.6	3.8	8.1	6.9
0.5	60.5	69.9	53.3	59.9	59.2
1	74.8	79.3	67.1	71.8	71.7
1.6	77.5	81.7	69.6	74.0	74.7
2.5	79.7	83.6	72.8	76.7	78.4
4.8	87.2	87.1	85.4	87.5	90.0
8	94.8	89.8	95.0	95.7	96.9
16	99.6	94.5	99.9	99.9	100.0
24	100	96.3	100.0	100.0	100.0
32	100	98.6	100.0	100.0	100.0

11.7.3-8. táblázat: A Duna mederanyagának és lebegtetett hordalékának összesített szemeloszlása, a Duna 1524-1527 fkm szakaszán

Fenti táblázat alapján megállapítható, hogy a lebegtetett hordalék szemösszetétele a mederanyag szemösszetételében 5%-ot képvisel.

11.7.3.1.4 Vízállás-vízhozam kapcsolat vizsgálata a Duna paksi vízmérce szelvényében

A vízállás-vízhozam kapcsolat legegyszerűbb formája a kétváltozós vízhozamgörbe, ami a mérési szelvényben végrehajtott vízhozam mérések eredményei és az egyidejűen észlelt vízállás adatok felhasználásával készül (11.7.3-14. ábra) Tekintettel arra, hogy a mérések egy része nem permanens állapotban történik, a szerkesztéshez felhasznált pontok több-kevesebb szóródást mutatnak. A pontok kiegyenlítésével megrajzolt görbét a permanens vízhozamgörbe egy közelítésének tekinthetjük (a hidrológiai gyakorlatban további módszerek állnak rendelkezésre az esésváltozás figyelembe vételére, ezek ismertetése azonban itt nem célunk).



11.7.3-14. ábra: A jelenleg érvényes vízhozamgörbe a Duna paksi szelvényére az utóbbi évek mérési adataival

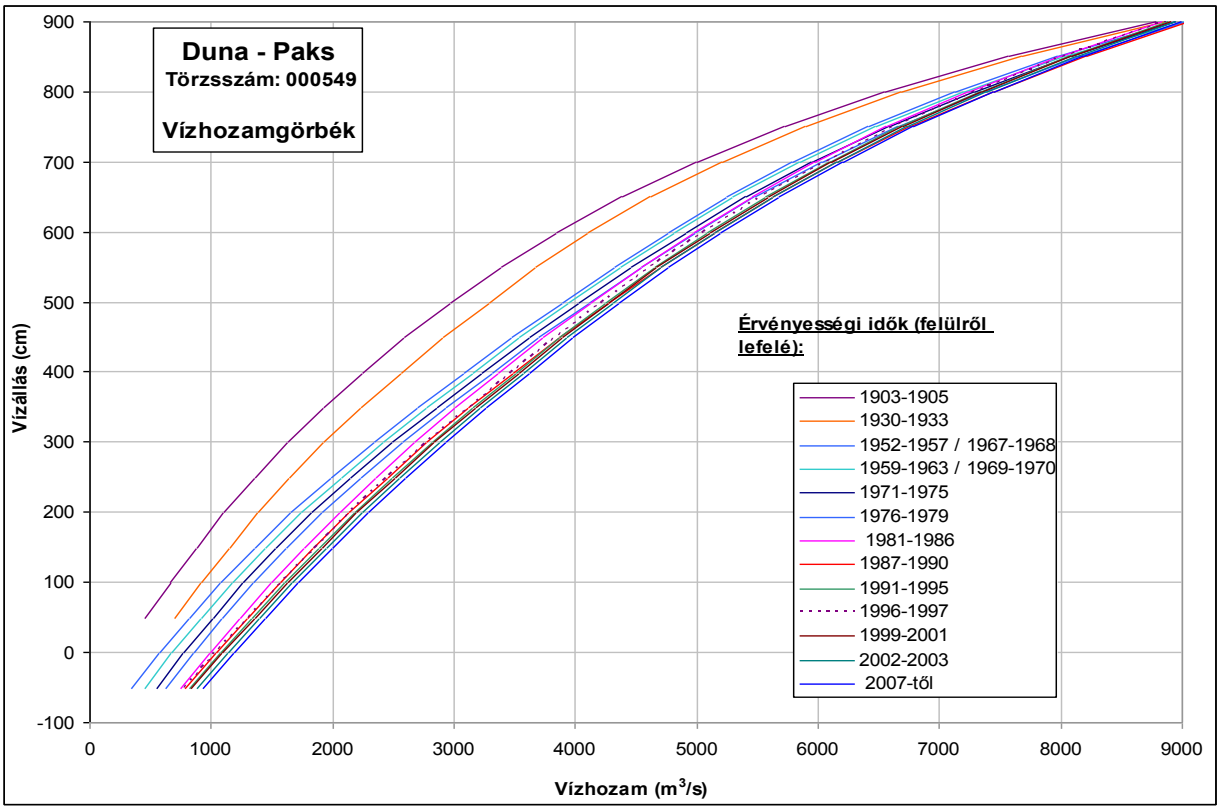
A fent elmondottak alapján a vízhozamgörbe integráltan tartalmazza a mederben lezajló változások hatásait, így kiválóan alkalmas e változások vizsgálatára és értékelésére.

A paksi állami vízmérce 1876 óta működő vízrajzi állomás. Az 1531,3 fkm szelvényben található, azaz mintegy 4 km-rel az Erőmű hidegvíz csatornájának kivezetése fölött. A paksi állomás vízhozam nyilvántartásra nem kijelölt szelvény, emiatt folyamatos, rendszeres vízhozam méréseket nem végeznek. Ennek ellenére a rendelkezése álló mérések száma lehetővé teszi vízhozamgörbék szerkesztését és a változások követését.

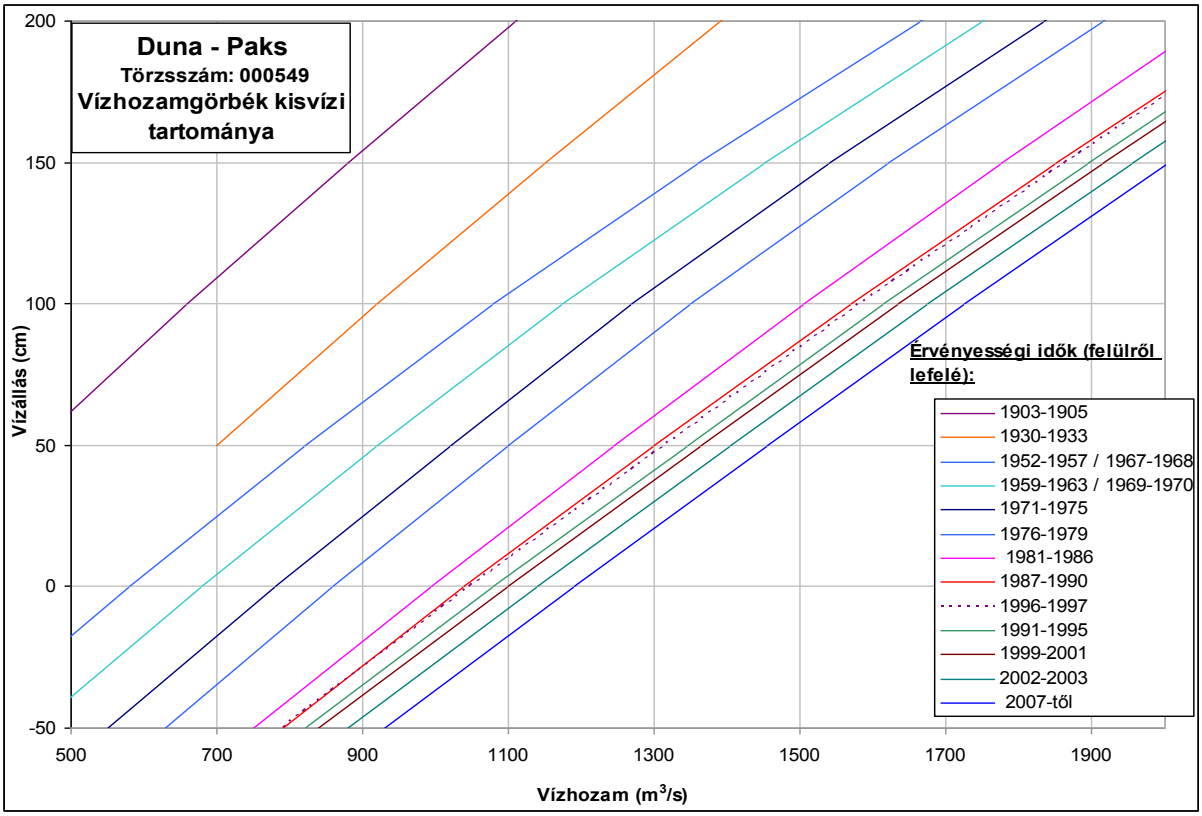
Az 1950-es évektől kezdődően nagyszámú mérést végeztek Dombori állomáson, amely Paks alatt mintegy 25 km-rel található. A két szelvény között számottevő hozzáfolyás nincs, a víz útja pedig mindössze 6-8 órán át tart Pakstól Domboriig. Így a Domborinál végzett mérések eredményeit – különösen permanens-közeli állapotokban – a paksi vízhozamgörbékhez felhasználhatjuk, természetesen megfelelő paksi vízállások figyelembevételével (az 1967-1970 között kampányszerűen Pakson is számos mérés történt, az 1971-1983 közötti időszakból ismét Dombori adatokat használhatunk). 1984-től Pakson is megfelelő számú és gyakoriságú mérés történt, az utóbbi két évtizedben éppen az Erőmű vízellátását érintő mederváltozások követésének érdekében. A legutóbbi időszakban a mai hatékony mérési technika (ADCP) lehetővé tette a mérések gyakoriságának növelését. Felhasználásával sikerült pl. megmérni a 2010. ez év júniusi árhullám csúcshozamát, amely Pakson az addigi legmagasabb mérési eredmény volt (8002 m³/s), majd 2013-ban az eddig legmagasabb (LNV) 8790 m³/s (891 cm vízállás mellett).

Q-H görbe változások értékelése:

A megszerkesztett (VITUKI Nonprofit Kft., 2011.) vízhozamgörbe sorozatot egy rendszerben ábrázolva azt állapíthatjuk meg, hogy a görbék részben lefelé, részben jobbra mozdultak el (11.7.3-15. ábra és 11.7.3-16 ábra). A változás a medersüllyedés következménye, ami a kis- és középvízi tartományban mintegy 2 m-t tesz ki a múlt század eleje óta. A legfelső, árvízi tartományban ilyen változás nincs, hiszen a hullámtéren süllyedésről nem beszélhetünk.



11.7.3-15. ábra: Vízhozamgörbe sorozat a Duna paksi vízmérce szelvényében



11.7.3-16. ábra: Vízhozamgörbe sorozat a Duna paksi vízmérce szelvényében, a Duna kisvízi tartományában

A változások időbeli követéséhez célszerűen azt a módszert választhatjuk, hogy megvizsgáljuk, hogy egy adott vízhozam milyen vízállás mellett folyt volna le a különböző időszakokban. Mivel elsősorban a kisvízi tartomány vizsgálata a célunk, válasszuk ehhez a hajózási kisvízszinthez tartozó vízhozamot (94 %-os tartósságú, jégmentes vízhozam). Ezt az értéket a vizsgált szakaszra a VITUKI 2004-ben 1180 m³/s-ban állapította meg (VITUKI, 2004)

11.7.4 A DUNA VÍZHŐMÉRSÉKLETÉNEK JELENLEGI ÉS VÁRHATÓ ALAKULÁSA

11.7.4.1 A Paksi Atomerőmű üzemének mértékadó állapota

Jelenleg a Paksi Atomerőmű üzemidő hosszabbítási engedéllyel üzemel 2037-ig, a jelenlegi állapot fennmaradása, illetve a fejlesztés elmaradása esetén, az alábbi blokk kilépési és terhelés kilépési ütemezéssel (11.7.4-1. táblázat):

Időszak [évek]	Kibocsátandó legnagyobb melegvíz hozam Q [m³/s]	Üzemelő blokkok száma [db]
2013-tól – 2032-ig	100	4 meglévő blokk
2032-től – 2034-ig	75	3 meglévő blokk
2034-től – 2036-ig	50	2 meglévő blokk
2036-től – 2037-ig	25	1 meglévő blokk
2037-től	0	-

11.7.4-1. táblázat: Melegvíz kibocsátás (Q m³/s) alakulása a jelen állapot fennmaradása esetén

A jelenleg hatályos, „az atomenergia alkalmazása során a levegőbe és vízbe történő radioaktív kibocsátásokról és azok ellenőrzéséről” szóló 15/2001. (VI. 6.) KöM rendelet szerint a melegvíz kibocsátás szelvénye alatt 500 méterrel folyásirányban elhelyezkedő Duna szelvény a referencia szelvény (elnevezése: +500 m). Jelenleg a referencia szelvény a Duna 1525+750 fkm szelvényében van.

Meghatározó az üzemelés szempontjából, hogy a Duna háttérhőmérséklete (T_{Duna} [°C]) mekkora és hogyan alakul a kibocsátás alatti +500 m-es referenciaszelvényben:

$$T_{Duna} + \Delta T_{Hőlépcső} - \Delta T_{Elkeveredés} \leq T_{Határérték}$$

ahol:

$T_{Határérték}$: 30 °C (15/2001. (VI. 6.) KöM rendelet),

$\Delta T_{Hőlépcső}$: 8 °C,

$\Delta T_{Elkeveredés}$: A hőterhelés Dunában történő elkeveredése által okozott lehűlés mértéke a hivatkozott jogszabályban előírt +500 m-es Duna referenciaszelvényében. A hőterhelés hatására a Duna referenciaszelvényében kialakuló hőmérséklet-eloszlásnak, a Duna vízhőmérséklethez viszonyított maximális hőmérséklet növekménye.

Ebben az egyenlőtlenségben $\Delta T_{Elkeveredés} = \Delta T_{Elkeveredés}$ (Q_{Duna}), azaz a lehűlés mértéke a Duna vízhozamának függvénye. A modell és a mérések azt mutatják, hogy ez az érték a sebességtér változásai miatt – a Duna kis, illetve középvízközeli (2300 m³/s) kisvízhozamok tartományában, azaz 1850 m³/s alatt - viszonylag független a vízhozamtól, ezért is számolhatunk az 1500 m³/s Duna vízhozammal.

„Kisvízi állapotok mellett elvégzett méréseink alapján a near field zónában a legnagyobb függély menti átlagsebességek nem a mélység-maximumok, hanem a jobb part környezetében jelentkeznek. Ez a Duna más szakaszaira tett megfigyelések, illetve a modellezési tapasztalatok alapján némileg meglepő sajátosság. A kritikusnak tekintett (Q_{Duna} < 1850 m³/s) vízhozam tartományban a keresztirányú sebességeloszlások jellegüket tekintve változatlanok.” (BME Vízi Közmű és környezetmérnöki Tanszék, 2008). Vagyis ebben a vízhozam tartományban az elkeveredést alapvetően meghatározó keresztirányú diszperzió változatlan, így a várható hőmérséklet-eloszlások között sem tapasztalható szignifikáns eltérés.Jelen állapotban, az 1500 m³/s Duna vízhozam alatti vízhozam tartományban, a jelen állapotra mértékadó 25,61 °C Duna vízhőmérséklet elérése, illetve annak túllépése 1 nap/év tartósság alatt marad. A hőcsóvaszámítás során általánosságban felvenni javasolt 1500 m³/s Duna vízhozam életszerűségét, a következőkben (lentebb, „Az éghajlatváltozás hatása a Duna vízhőmérsékletére” 11.7.4.3. alfejezetben) még ellenőrizzük, a mértékadó 2032. és 2085. évekre, az alkalmazott pesszimistább forgatókönyv szerinti klímamodellel történt tartósságszámítások ellenőrzésével.

A 11.7.4-2. táblázatban megadjuk a mértékadó 2032. és 2085. években várható adott vízhőmérsékletet meghaladó tartósságokat [nap/év] és [%] dimenzióban:

	Q/T	**T_{Duna} [°C]**		
Mértékadó időpont:	Q_{Duna} [m³/s]	23 °C	24 °C	25 °C
2032.	600	1,46 nap/év (0,4%)	0,95 nap/év (0,3%)	0,65 nap/év (0,2%)
	1500	8,3 nap/év (3,3%)	4,99 nap/év (2,3%)	2,65 nap/év (1,4%)
2085.	600	3,50 nap/év (1%)	2,15 nap/év (0,6%)	1,81 nap/év (0,5%)
	1500	20,3 nap/év (5,6%)	14,84 nap/év (4,1%)	10,07 nap/év (2,8%)

11.7.4-2. táblázat: Adott (T) hőmérsékletet meghaladó és adott (Q) Duna vízhozamot alulmúló napok átlagos száma évenként (és %-osan), 2032. és 2085. évben

Hidrodinamikai- és hőtranszport-számítások szerint, a Paksi Atomerőmű mértékadó, négyblokkos üzeme esetén (mértékadó melegvízhozam: 100 m³/s), a $\Delta T_{Elkeveredés}$ értéke sok tényezőtől függően kismértékben változik. A 2014. évi mértékadó helyzeben, 8 °C-os hőlépcső esetén, a melegvízkibocsátás alatt 500 méterrel ~4 °C-kal csökken. Ez azt jelenti, hogy a Duna 26 °C vízhőmérséklete esetén, a melegvízkibocsátás 34 °C-os értéke, a Dunában 30 °C-ra csökken, a kialakuló hőcsóva maximális hőmérsékletének vonalában (máshol kisebb a vízhőmérséklet 26 és 30 °C közötti).

A Duna vízhőmérsékletének időbeli emelkedése miatt, a fejlesztés elmaradása esetén 2032. évben mutatkozik egy hőterhelés tekintetében mértékadó helyzet, amikor a melegvízhozam 100 m³/s és a Duna mértékadó vízhőmérséklete 26,38 °C. Későbbiekben – 2032-től 2037-ig -, a blokkok kb. 2 évenkénti ütemezett kilépése miatt, a hőterhelés már nem lesz mértékadó. Mivel a Duna mértékadó vízhőmérséklete a 26 °C-ot meghaladja az üzemidőhosszabbítás végéig, így az 500 méteres referenciaszelvényben a 30 °C túllépése lenne várható, intézkedés nélkül.

A biztonság javára ezért mértékadóként előzetesen, a Duna 25 °C vízhőmérsékletét vesszük alapul, a várható évenkénti intézkedési időtartam meghatározásában.

A Lévai projektben az analógiák módszerével modellezték (BME, 2013) a klímaváltozás Duna vízhőmérsékletére gyakorolt hatásait 2100-ig. A Lévai projekt kiegészítéseként kidolgoztak (BME, 2014) egy olyan szimulációs generátort, melynek segítségével a vizsgálati időtartamot 2120-ra kiterjesztették. A kidolgozott generátor nem csak a dunai vízhozam és a dunai háttérhőmérséklet előállítására, hanem azon kritikus időszakok meghatározására is alkalmas, amikor a vonatkozó (jövőbeni) hatósági előírások alapján beavatkozást igénylő körülmények alakulhatnak ki. Az auto-regresszív modellt múltbeli paksi adatok alapján állították fel, majd figyelembe vették az éghajlatváltozás lehetséges hatásait.

11.7.4.2 Az éghajlatváltozás várható alakulása

A Föld globális hőmérséklete (a Föld átlaghőmérsékletének emelkedése) a XIX. század közepétől 0,8 °C-ot emelkedett, ennek több mint a fele az 1970-es évek utáni időszakra jutott. Különösen gyors volt a melegedés az 1990-es évektől, az utolsó 100 év legmelegebb 10 évéből 9 az 1995-2005 közötti években fordult elő [11-26]. A globális melegedést támasztja alá a sarkok körüli tengeri jégborítások csökkenése, gleccserek visszahúzódása, az ezekből táplálkozó vízfolyások vízhozamának növekedése. Európában az éghajlat melegedése a globálist meghaladó mértékű volt, 1901-2005 között a növekedés elérte a 0,9 °C-ot (Alcamo et al, 2007).

Az IPCC Negyedik Értékelő Jelentésének állásfoglalása szerint „az éghajlati rendszer melegedése vitán felül áll". A melegedés kiváltó oka az antropogén eredetű légköri szennyezések, ezen belül az üvegházgázok növekvő kibocsátása [11-26].

A globális hőmérséklet növekedése a XXI. században is folytatódik. Ezt egyértelműen megerősíti az IPCC 5., véglegesítés alatt álló, tehát ma még nem hivatalos jelentése is. A növekedés üteme alapvetően a társadalom-gazdaság fejlődésétől függ, mivel az határozza meg a légköri kibocsátások további mértékét. A fejlődés pályájának függvényében több ún. kibocsátási forgatókönyvet (SRES emissziós szcenáriót) fogalmaznak meg [11-26]. a melegedés eltérő ütemben ugyan, de valamennyi kibocsátási forgatókönyv szerint folytatódik a XXI. században is.

A kibocsátási forgatókönyvtől függően a legvalószínűbb növekedés a XXI. század végére 1.8 °C (B1, B2 forgatókönyv) és 4.0 °C (A1F1 forgatókönyv) között lehetséges az alapul választott 1980-1999 évekhez képest.

- A legjobb becslés szerint Európában minden időszakban (tél, nyár, év) nő a hőmérséklet.
- A csapadék a magasabb szélességeken minden időszakban nő, az alacsonyabb szélességeken csökken.
- A növekedést és csökkenést elválasztó vonal nagyjából a 48-50° szélességi kör mentén halad, helyzete nyáron a magasabb (53-57°), télen az alacsonyabb (44-46°) szélességi körök felé tolódik el.

Az Országos Meteorológiai Szolgálatnál két regionális klímamodellel, az ALADIN-Climate és a REMO modellekkel végeznek kísérleteket a Magyarországon a jövőben várható éghajlatváltozás leírására. A modellekkel az 1961–2100 időszakra készültek szimulációk, az emberi tevékenységre egy átlagos kibocsátási forgatókönyvet figyelembe véve. A hazánk területére készített éghajlati forgatókönyvek a hőmérséklet emelkedését jelzik előre, a növekedés mértéke és üteme a kibocsátási forgatókönyv mellett függ az éghajlati modelltől. Ennek függvényében a növekedés legvalószínűbb üteme 0,3 °C/évtized a 0,1-0,5 °C/évtized szélső értékek között. A biztonság javára 0,4 °C/évtized értékkel számolunk.

A PRUDENCE projekt léghőfok előrejelzései 2070-2100 közötti évekre milyen vízhőfok változásokat okoznak:

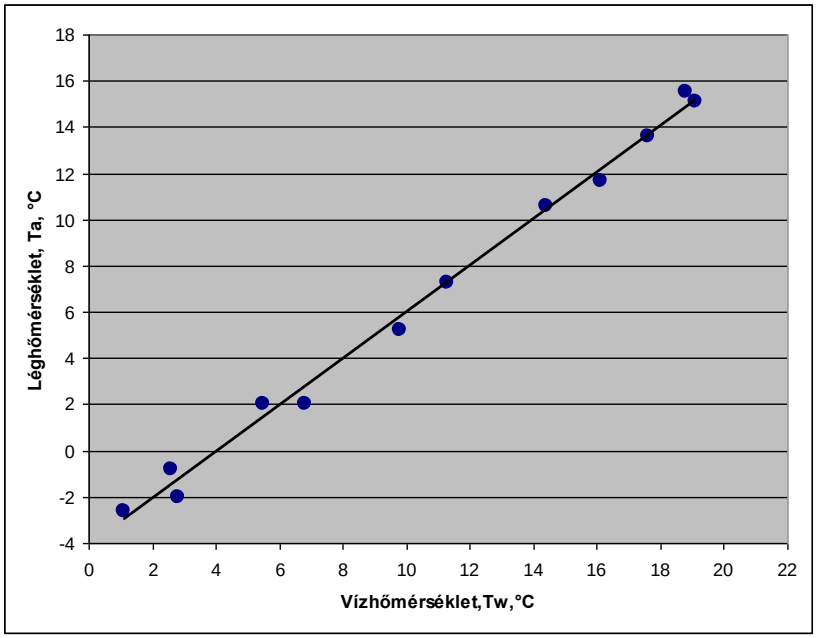
Két előrejelző központ, a DMI (Dán Meteorológiai Intézet) és a Hadely Center előrejelzéseit elemeztük (BME, 2014). A PRUDENCE projekt keretében végzett vizsgálatok szerint a XXI. század végére a Kárpát-medencében 1 °C-os globális melegedés esetében az évi középhőmérséklet 1.4 °C emelkedése várható, valamivel nagyobb, 1,7 °C-os melegedés nyáron, 1,3 °C-os melegedés télen, tavasszal 1.1 és ősszel 1,5 °C emelkedés. A szórás valamennyi időszakra 0,3-0,4 °C között lehetséges [11-5].

A PRUDENCE projekt keretében végzett vizsgálatok előrejelzése szerint, 1 °C-os globális melegedést tekintve a csapadék legvalószínűbben várható változásai: nyáron 8% körüli csökkenés, télen 9 %- körüli növekedés, a tavaszi és őszi időszakban 1 % körüli növekedés, illetve 2 % körüli csökkenés [11-5]. A legvalószínűbb becslés körüli szóródás nagyobb, mint a hőmérséklet esetében.

11.7.4.3 Az éghajlatváltozás hatása a Duna vízhőmérsékletére

A vízfolyások hőmérséklete az idő minden léptékében követi a léghőmérsékletet. Az átlagos havi vízhőmérséklet és a léghőmérséklet a változók széles tartományában lineáris kapcsolattal írható le [11-39]. A kapcsolatban nincs meg a tavak víz- és léghőmérsékleti kapcsolatát jellemző hiszterézis, a folyók a tavakénál lényegesen kisebb tehetetlenséggel válaszolnak a léghőmérséklet változásaira.

A léghőmérséklet és a vízhőmérséklet havi értékeinek kapcsolatát érvényesnek fogadjuk el az éghajlatváltozás esetén is.



11.7.4-1. ábra: A levegő- és a vízhőmérséklet havi átlagainak kapcsolata a Dunára [11-39]

A Duna Paksi vízmércénél mért éves átlagos- és maximális vízhőmérséklet idősorát (1970-2013. évek között), „A mértékadó hőterhelési állapot meghatározása" című (11.7.4.4 számú) alfejezet „Mérési adatok feldolgozás" (11.7.4.4.1) pontja tartalmazza. A PRUDENCE projekt paksi modellezési cellájára tett előrejelzések (A2 és B2 forgatókönyvekre nyert) idősorait a fejlesztett auto-regresszív modellel dunai vízhőfok adatsorokká konvertáltuk. Az A2-es forgatókönyv szerint éves átlagban a Duna vízhőfoka 4.3 °C-al, míg a B2 forgatókönyv esetében 3.17 °C-al nő 2100-ra. Az OMSZ által készített ALADIN előrejelzés éves átlagban 1.17 °C-al, a REMO előrejelzés pedig 1.13 °C-al jelez magasabb vízhőfokot előre a századvégre.

A forgatókönyveknek tehát alapvetően két csoportja különböztethető meg: DMI B2 forgatókönyvek (pesszimistább: $\Delta T_{Föld}$*=1,8 °C, 2000 és 2100 között*), és az Aladin (optimistább: $\Delta T_{Föld}$*=1 °C, 2000 és 2100 között*) modellre épülő forgatókönyvek. A statiszikai momentumokra feltételeztük, hogy valamely időpontban a jelen és a 2100. évi időhorizontra előrejelzett értékek lineáris interpolációjával nyerhetők. A generált (1000 éves) vízhozam és vízhőmérséklet idősorokból válogattuk le az átlagos feltételes (Q/T) tartósságokat 2000-től, 2120-ig.

A biztonság javára a pesszimista (*DMI: B2 PRODUCE,* $\Delta T_{Föld}$ *= 1,8 °C, 2000 és 2100 között*) klímamodell eredményeit alkalmazzuk és mutatjuk be, a két mértékadó időpontban 2032-ben (lásd: 11.7.4-3 táblázat) és 2085-ben (lásd: 11.7.4-4 táblázat), az adott Duna vízhőmérséklet túllépésének évente átlagosan várható, napokban kifejezett időtartamait (tartósságait), a Duna vízhozama (800 – 3500 m³/s vízhozam tartományában, 100 m³/s vízhozamlépcsőnként) függvényében.

Q/T	**T_{Duna} [°C]**										
Q_{Duna} [m³/s]	**20 °C**	**21 °C**	**22 °C**	**23 °C**	**24 °C**	**25 °C**	**26 °C**	**27 °C**	**28 °C**	**29 °C**	**30 °C**
800	5,62	4,58	3,48	2,47	1,48	0,85	0,37	0,17	0,05	0,00	0,00
900	7,34	5,97	4,57	3,24	1,92	1,09	0,51	0,22	0,07	0,01	0,00
1000	9,22	7,45	5,70	4,00	2,35	1,35	0,63	0,28	0,08	0,01	0,00
1100	11,10	8,85	6,66	4,69	2,76	1,54	0,69	0,31	0,10	0,01	0,00
1200	12,91	10,34	7,80	5,44	3,21	1,75	0,80	0,37	0,10	0,01	0,00
1300	14,96	11,97	9,06	6,34	3,77	2,03	0,94	0,45	0,13	0,01	0,00
1400	17,36	13,82	10,46	7,32	4,38	2,33	1,08	0,50	0,15	0,01	0,00
1500*	19,79	15,76	11,94	8,30	4,99	2,65	**1,25***	**0,56***	0,19	0,02	0,00
1600	22,34	17,75	13,40	9,31	5,54	2,94	1,38	0,63	0,22	0,03	0,01
1700	24,94	19,75	14,80	10,29	6,11	3,23	1,52	0,68	0,24	0,03	0,01
1800	27,75	21,93	16,25	11,26	6,72	3,53	1,66	0,73	0,26	0,04	0,01
1900	30,70	24,16	17,89	12,33	7,32	3,85	1,83	0,82	0,28	0,04	0,01
2000	33,86	26,63	19,69	13,45	8,06	4,28	2,09	0,94	0,32	0,07	0,02
2100	36,98	29,00	21,37	14,61	8,71	4,64	2,26	1,00	0,34	0,08	0,02
2200	40,10	31,34	23,05	15,70	9,33	4,98	2,42	1,10	0,40	0,09	0,02
2300	43,35	33,83	24,76	16,72	9,98	5,38	2,59	1,17	0,43	0,09	0,02
2400	46,57	36,21	26,32	17,69	10,54	5,69	2,71	1,25	0,47	0,10	0,02
2500	49,47	38,40	27,76	18,64	11,01	5,94	2,80	1,28	0,47	0,11	0,02
2600	52,69	40,75	29,37	19,64	11,53	6,21	2,95	1,34	0,48	0,11	0,02
2700	55,42	42,79	30,79	20,52	12,00	6,47	3,06	1,39	0,51	0,12	0,02
2800	58,10	44,89	32,18	21,36	12,47	6,73	3,16	1,45	0,52	0,12	0,02
2900	60,51	46,56	33,35	22,02	12,83	6,94	3,27	1,49	0,53	0,12	0,02
3000	62,86	48,31	34,58	22,85	13,35	7,18	3,38	1,54	0,55	0,12	0,02
3100	64,71	49,67	35,47	23,39	13,71	7,34	3,45	1,56	0,55	0,12	0,02
3200	66,56	51,01	36,37	23,96	14,05	7,50	3,52	1,59	0,56	0,12	0,02
3300	68,18	52,17	37,04	24,33	14,26	7,62	3,57	1,61	0,57	0,13	0,02
3400	69,39	53,08	37,68	24,72	14,46	7,71	3,61	1,63	0,58	0,13	0,02
3500	70,37	53,72	38,12	25,02	14,61	7,80	3,65	1,63	0,58	0,13	0,02

11.7.4-3. táblázat: Adott (T) hőmérsékletet meghaladó és adott (Q) Duna vízhozamot alulmúló napok átlagos száma évenként, 2032. évben – DMI (B2 PRODUCE, $\Delta T_{Föld}$ *= 1,8 °C, 2000 és 2100 között)*

**Megjegyezzük, hogy a Duna kisvízhozamainak és nagy vízhőmérsékleteinek tartományában az együttjárás olyan kis tartósságú, hogy az nem indokolja a hőcsóvaszámításnál a Duna szélsőségesen kis vízhozamának felvételét, a 2032-ben mértékadó 26,38 °C Duna vízhőmérséklet mellett. Ezért az életszerűbb 1 nap/év tartósságú 1500 m³/nap Duna vízhozam felvételét tartjuk a hőcsóvaszámításhoz indokoltnak (a táblázatban jelölt tartósságok, 26,38 °C-hoz tartózó*

tartósságának interpolációja alapján). 2014. évben a 25,61 °C Duna vízhőmérséklet szintén közel 1 nap/év tartósságú, 1500 m³/s Duna vízhozam esetén.

A hőcsóvavizsgálat mértékadó Duna vízhozamát, a fenti táblázat (11.7.4-3) 2032-re előrejelzett tartósságai alapján vettük fel úgy, hogy a 2032. évre adódó mértékadó 26,38 °C Duna vízhőmérséklet tartóssága ~1nap/év legyen.

Q/T	**T_{Duna} [°C]**										
Q_{Duna} [m³/s]	**20 °C**	**21 °C**	**22 °C**	**23 °C**	**24 °C**	**25 °C**	**26 °C**	**27 °C**	**28 °C**	**29 °C**	**30 °C**
800	11,60	10,17	8,66	6,94	5,25	3,65	2,22	1,13	0,52	0,22	0,07
900	14,60	12,76	10,86	8,67	6,47	4,52	2,67	1,39	0,63	0,29	0,10
1000	17,85	15,55	13,03	10,38	7,64	5,27	3,12	1,61	0,73	0,33	0,12
1100	21,37	18,47	15,38	12,16	8,97	6,29	3,74	1,94	0,88	0,38	0,14
1200	25,13	21,66	18,02	14,12	10,37	7,21	4,31	2,26	1,01	0,45	0,17
1300	28,93	24,78	20,50	16,07	11,80	8,13	4,81	2,52	1,11	0,50	0,18
1400	32,79	27,99	23,12	18,11	13,28	9,06	5,38	2,81	1,28	0,58	0,21
1500*	37,01	31,48	25,98	20,30	14,84	10,07	5,93	3,09	1,43*	0,63*	0,22
1600	41,51	35,24	29,00	22,54	16,32	11,02	6,47	3,33	1,51	0,67	0,23
1700	46,18	39,12	32,05	24,80	17,94	12,09	7,12	3,61	1,64	0,71	0,24
1800	51,04	43,16	35,19	27,22	19,57	13,11	7,67	3,90	1,77	0,80	0,28
1900	55,46	46,71	37,93	29,16	20,91	13,95	8,13	4,13	1,88	0,84	0,29
2000	59,87	50,33	40,74	31,29	22,38	14,90	8,62	4,37	2,00	0,88	0,30
2100	64,26	53,91	43,50	33,30	23,72	15,73	9,09	4,58	2,07	0,92	0,30
2200	68,32	57,10	46,00	35,16	24,98	16,46	9,48	4,78	2,13	0,94	0,32
2300	72,51	60,43	48,55	37,10	26,19	17,21	9,94	5,02	2,24	0,99	0,34
2400	76,14	63,41	50,81	38,70	27,22	17,81	10,29	5,20	2,30	1,01	0,35
2500	79,56	66,13	52,88	40,25	28,27	18,44	10,63	5,36	2,39	1,06	0,36
2600	82,96	68,85	55,04	41,75	29,28	19,14	10,99	5,53	2,48	1,10	0,38
2700	85,95	71,23	56,92	43,10	30,17	19,64	11,24	5,67	2,53	1,11	0,39
2800	88,38	73,18	58,47	44,26	30,97	20,11	11,52	5,82	2,58	1,14	0,39
2900	90,40	74,82	59,75	45,17	31,57	20,51	11,76	5,93	2,64	1,17	0,40
3000	92,47	76,52	61,05	46,13	32,23	20,90	11,95	6,02	2,65	1,17	0,40
3100	94,23	77,89	62,09	46,86	32,72	21,16	12,09	6,09	2,68	1,19	0,41
3200	95,84	79,17	63,04	47,52	33,18	21,46	12,23	6,15	2,71	1,20	0,42
3300	97,00	80,03	63,69	48,01	33,50	21,66	12,33	6,19	2,73	1,20	0,42
3400	98,02	80,84	64,31	48,51	33,84	21,84	12,44	6,26	2,75	1,22	0,42
3500	98,89	81,54	64,86	48,90	34,07	22,00	12,51	6,29	2,77	1,23	0,42

11.7.4-4. táblázat: Adott (T) hőmérsékletet meghaladó és adott (Q) Duna vízhozamot alulmúló napok átlagos száma évenként, 2085. évben – DMI (B2 PRODUCE, $\Delta T_{Föld}$ = 1,8 °C, 2000 és 2100 között)

**Megjegyezzük, hogy a Duna kisvízhozamainak és nagy vízhőmérsékleteinek tartományában az együttjárás olyan kis tartósságú, hogy az nem indokolja a hőcsóvaszámításnál a Duna szélsőségesen kis vízhozamának felvételét, a 2085-ben mértékadó 28,64 °C Duna vízhőmérséklet mellett. Ezért az életszerűbb 1 nap/év tartósságú 1500 m³/nap Duna vízhozam felvételét tartjuk a hőcsóvaszámításhoz indokoltnak (a táblázatban jelölt tartósságok, 28,64 °C-hoz tartózó tartósságának interpolációja alapján). 2014. évben a 25,61 °C Duna vízhőmérséklet szintén közel 1 nap/év tartósságú, 1500 m³/s Duna vízhozam esetén.*

A pesszimistább klímamodellel (DMI-B2 PRODUCE) vizsgált esetekben, a 2000-2100. időszak interpolált havi átlag és maximum vízhőfok-változást a 2000. évhez viszonyítva, a 11.7.4-5 táblázatban foglaltuk össze 2020-tól 2090-ig:

Hónap	2020.	2030.	2032.	2040.	2080.	2085.	2090.
1.	0,80	1,07	1,12	1,34	2,41	2,55	2,68
2.	0,98	1,30	1,37	1,63	2,93	3,10	3,26
3.	0,94	1,25	1,31	1,57	2,82	2,98	3,14
4.	0,53	0,70	0,74	0,88	1,58	1,67	1,76
5.	0,66	0,88	0,92	1,10	1,98	2,09	2,20
6.	0,71	0,95	1,00	1,19	2,14	2,26	2,37
7.	0,94	1,25	1,31	1,57	2,82	2,98	3,13
8.	1,31	1,75	1,84	2,18	3,93	4,15	4,37
9.	0,99	1,32	1,39	1,65	2,97	3,14	3,30
10.	0,82	1,09	1,14	1,36	2,45	2,59	2,73
11.	0,84	1,11	1,17	1,39	2,51	2,65	2,78
12.	0,88	1,17	1,23	1,47	2,64	2,79	2,93
Átlag:	0,87	1,15	1,21	1,44	2,60	2,74	2,89
Max.:	1,31	1,75	1,84	2,18	3,93	4,15	4,37

11.7.4-5. táblázat: Átlagos havi vízhőfokok változása a jelenhez képest (átlag: éves átlagos változás, max: éves maximális változás) – DMI (B2 PRODUCE, $\Delta T_{Föld}$ = 1,8 °C, 2000 és 2100 között)

A fenti táblázatban (11.7.4-5) szereplő pesszimistább klímamodell eredményei szerint, a Duna éves átlagos- és maximális vízhőmérsékletei 2020 és 2090 közöztt (70 év alatt) és évente, az alábbiak szerint alakulnak:

- *éves átlagos Duna vízhőmérséklet emelkedés 2020-2090 között: 2,89 – 0,87 °C = 2,02 °C;*
- *éves átlagos Duna vízhőmérséklet emelkedés éventet: 2,02 °C / 70 év ≈ 0,03 [°C/év];*
- *éves maximális Duna vízhőmérséklet emelkedés 2020-2090 között: 4,37 – 1,31 °C = 3,06 °C;*
- *éves maximális Duna vízhőmérséklet emelkedés évente: 3,06 °C / 70 év ≈ 0,04 [°C/év].*

Az optimistább klímamodellel (OMSZ-Aladin) vizsgált esetekben, a 2000-2100. időszak interpolált havi átlag és maximum vízhőfok-változást a 2000. évhez viszonyítva, a 11.7.4-6 táblázatban foglaltuk össze 2020-tól 2090-ig:

Hónap	2020.	2030.	2032.	2040.	2080.	2085.	2090.
1.	0,16	0,21	0,22	0,26	0,48	0,51	0,53
2.	0,62	0,82	0,86	1,03	1,85	1,96	2,06
3.	0,84	1,12	1,18	1,40	2,52	2,66	2,80
4.	0,70	0,93	0,98	1,16	2,10	2,22	2,33
5.	0,21	0,28	0,29	0,35	0,63	0,67	0,70
6.	0,10	0,13	0,14	0,16	0,29	0,31	0,33
7.	0,42	0,56	0,59	0,70	1,27	1,34	1,41
8.	0,32	0,42	0,44	0,53	0,95	1,01	1,06
9.	0,23	0,30	0,32	0,38	0,68	0,72	0,76
10.	0,06	0,08	0,08	0,10	0,19	0,20	0,21
11.	0,06	0,09	0,09	0,11	0,19	0,20	0,21
12.	0,12	0,16	0,17	0,20	0,36	0,38	0,40
Átlag:	0,32	0,43	0,45	0,53	0,96	1,01	1,07
Max.:	0,84	1,12	1,18	1,40	2,52	2,66	2,80

11.7.4-6. táblázat: Átlagos havi vízhőfokok változása a jelenhez képest (átlag: éves átlagos változás, max: éves maximális változás) – OMSZ(Aladin, $\Delta T_{Föld}$ = 1 °C, 2000 és 2100 között)

A fenti táblázatban (11.7.4-6) szereplő optimistább klímamodell eredményei szerint, a Duna éves átlagos- és maximális vízhőmérsékletei 2020 és 2090 közöztt (70 év alatt) és évente, az alábbiak szerint alakulnak:

- *éves átlagos Duna vízhőmérséklet emelkedés 2020-2090 között: 1,07 – 0,32 °C = 0,75 °C;*
- *éves átlagos Duna vízhőmérséklet emelkedés éventet: 0,75 °C / 70 év ≈ 0,01 [°C/év];*
- *éves maximális Duna vízhőmérséklet emelkedés 2020-2090 között: 2,80 – 0,84 °C = 1,96 °C;*
- *éves maximális Duna vízhőmérséklet emelkedés éventet: 3,06 °C / 70 év ≈ 0,03 [°C/év].*

A hőcsóvaszámítás mértékadó helyzeteinek (2014, 2032 és 2085), a Duna háttér vízhőmérséklet értékeinek felvételeinél a továbbiakban a pesszimistább klímamodell (DMI-B2 PRODUCE) eredményeivel számolunk.

11.7.4.3.1 Prognosztizált Duna vízhőmérséklet tartósság-növekedés, a tervezett fejlesztés üzemideje alatt

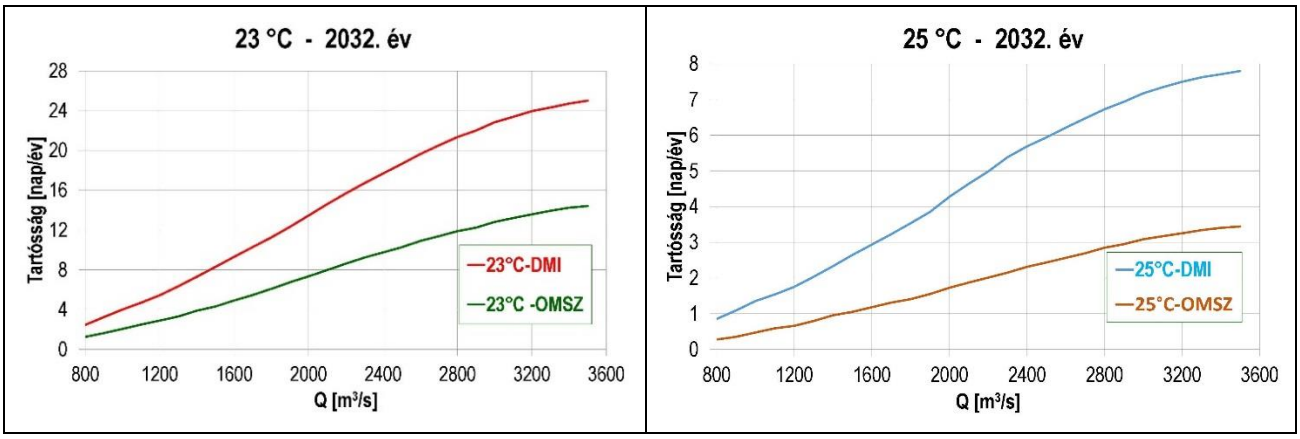
A tervezett fejlesztés megvalósulása esetén, a jövőben 2032. és 2085. években várhatók a Duna mértékadó terhelési állapotai. Ugyanis 2032. év után a meglévő blokkok ütemezetten kilépnek (2 évente 25 m³/s-mal csökken), a melegvízterhelés térfogatáramát jelentősen lecsökkentve. 2085. évet követően szintén jelentősen lecsökken a melegvízterhelés vízhozama (132 m³/s-ról 66 m³/s-ra). A melegvízterhelések térfogatárama jelentősebb mértékben csökken, mint ahogy a Duna háttérvízhőmérséklete növekszik, ezért lesz mértékadó a 2032. és 2085. év.

A 2032. és 2085. évi mértékadó hőterhelési helyzetekben, a Duna vízhőmérsékletének időbeli növekedése és a Paksi Atomerőmű jelenlegi mértékadó vízhozamának (100 m³/s) meghaladása miatt, az elkeveredés hatékonysága, illetve hőmérsékletcsökkenés mértéke várhatóan ~4 °C-ról, kb. 2 °C-ra csökken. A 30 °C-os határérték tartása - az 500 méteres Duna referenciaszelvénynél -, tehát 8 °C hőlépcső esetén ~26 °C-, míg a 2032. és 2085. évi mértékadó terhelési állapotokban ~24 °C Duna vízhőmérséklett alatt lehetséges.

Az intézkedést (helyszíni monitoring mérések indítása, majd a szükséges döntés meghozatala az esetleges beavatkozásra) igénylő Duna vízhőmérsékleteket a fentiek miatt, előzetesen 23 °C-ra (Paksi Atomerőmű + Paks II. együttes és Paks II. önálló üzemekor) és 25 °C-ra (Paksi Atomerőmű) vesszük fel, a biztonság javára.

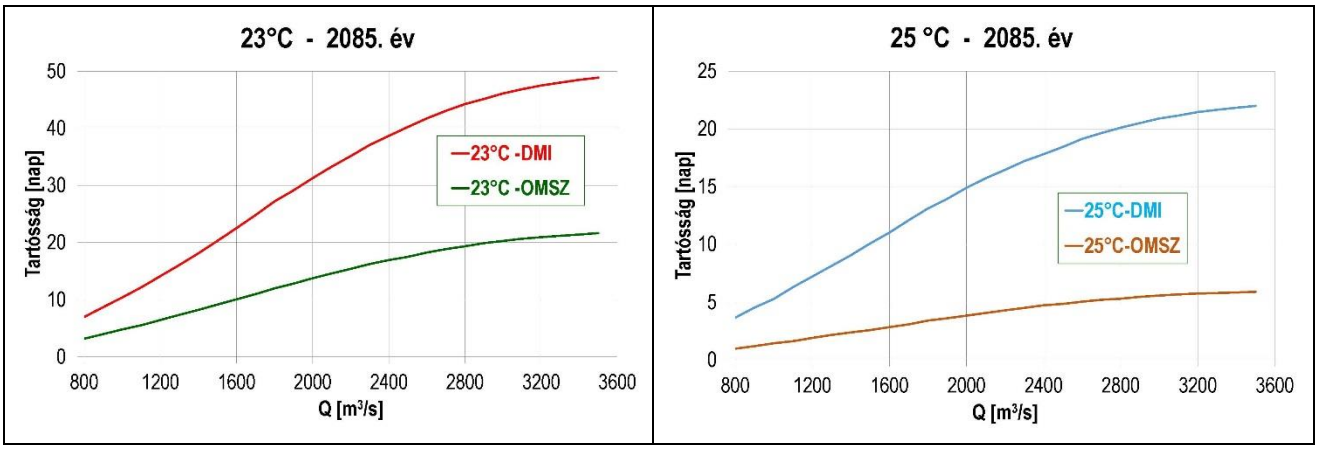
Megvizsgáljuk az adott Duna vízhőmérséklet túllépésének évente átlagosan várható, napokban kifejezett időtartamait, vagyis a túllépési tartósságokat a jelen állapotban és a jövőbeli mértékadó hőterhelési állapotokra, a DMI és Aladin elnevezésű klimatológiai forgatókönyvek alapján. A vizsgálat kiterjed a Duna vízhőmérséklet 20 °C – 30 °C közötti tartományára (1°C-onként), és a Duna 800 m³/s – 3 500 m³/s közötti vízhozam tartománya (100 m³/s-onként). A jövőben várható magasabb Duna vízhőmérséklethez tartozó tartósságok várható alakulását, a pesszimistább klimatológiai forgatókönyv (*DMI: B2 PRODUCE, $\Delta T_{Föld}$ = 1,8 °C, 2000 és 2100 között*) felvétele alapján vizsgáljuk tovább.

A jövőben várható, 23°C feletti Duna vízhőmérsékletek éves átlagos tartósságát (napokban), a vízhozam függvényében a 11.7.4-2. ábra mutatja, a DMI és az Aladdin forgatókönyvek szerint.



11.7.4-2. ábra: A 23 ˚C-ot meghaladó vízhőmérsékletű napok átlagos, éves száma adott érték alatti Duna-vízhozamoknál, 2032-ben – DMI (B2 PRODUCE, $\Delta T_{Föld}$ = 1,8 °C/100 év) és OMSZ (Aladin, $\Delta T_{Föld}$ = 1 °C/100 év) forgatókönyvek

A jövőben várható, 25°C feletti Duna vízhőmérsékletek éves átlagos tartóssága (napokban), a vízhozam függvényében az alábbi ábrán látható, a DMI és Aladdin forgatókönyvek szerint (11.7.4-3. ábra).



11.7.4-3. ábra: A 25 ˚C-ot meghaladó vízhőmérsékletű napok átlagos, éves száma adott érték alatti Duna-vízhozamoknál, 2085-ben – DMI (B2 PRODUCE, $\Delta T_{Föld}$ = 1,8 °C/100 év) és OMSZ (Aladin, $\Delta T_{Föld}$ = 1 °C/100 év) forgatókönyvek

Az összetartozó dunai vízhozamok és háttér vízhőmérsékletek együttes, szintetikus generálására - múltbeli adatok alapján - napi léptékű auto-regresszív modellt fejlesztettek (BME, 2013.). Ezt követően a 2100-ra vonatkozó potenciális éghajlati hatások elemzésével módosított modellt is levezették, momentumait 2120-ig extrapolálták, majd Monte Carlo szimulációk révén elemezték azon kritikus állapotok hosszát (tartósságát), amikor az ellenőrzési szelvényben a hőmérsékleti korlát - különböző növekményt feltételezve – beavatkozás (utóhűtés, vagy visszaterhelés, vagy blokk leállás, illetve blokk karbantartás) nélkül nem tartható. A mért és szimulált Q [m³/s], T [°C] adatsor elemzése alapján megállapítható, hogy a nagy Duna vízhőmérséklet tartományban mértékadó Duna vízhozam tartomány, 1500 – 2800 m³/s között változik.

Eredményként a jelenlegi és a módosult éghajlat mellett, a biztonság javára 2800 m³/s Duna vízhozam alatti vízhozam tartományban, a Duna 25°Cvízhőmérséklete felett, átlagosan évi 5 nap/év tartósság volt tapasztalható.

A pesszimistább DMI (B2 PRODUCE projekt) forgatókönyv alapján számított mértékadó meghaladási tartósságok, a Duna 23 és 25°C-t meghaladó vízhőmérséklete esetén az alábbiak szerint alakultak (DMI forgatókönyv: 1,8°C globális felmelegedést feltételezve 2100-ra), a biztonság javára 2 800 m³/s Duna vízhozam alapulvételével (11.7.4-7. táblázat).

Év	T_{Duna} [°C]	Tartósság [nap/év]
2014. (Jelen)	T_{Duna} > 25 °C	5
	T_{Duna} > 23 °C	13
2025.	T_{Duna} > 25 °C	6
	T_{Duna} > 23 °C	20
2032.	T_{Duna} > 25 °C	7
	T_{Duna} > 23 °C	22
2085.	T_{Duna} > 25 °C	21
	T_{Duna} > 23 °C	45

11.7.4-7. táblázat: A Duna 23 és 25 °C vízhőmérékletét meghaladó évenkénti napok száma (tartóssága [nap/év]) alakulása – DMI (B2 PRODUCE projekt) forgatókönyv szerint

A klímaváltozás OMSZ által feltételezett klímaváltozási forgatókönyvek [11-40] mellett a kritikus Duna vízhőmérsékleti helyzetek tartóssága mintegy kétszeresére nőhet, még ha ennek pontos értékét csak bizonytalanul is látjuk előre. Ugyanakkor DMI által feltételezett klímaváltozási forgatókönyvek esetén az előrejelzett növekedés lényegesen jelentősebb mértékű, 2120-ra elérheti a 60-80 kritikus napot is, 2 800 m³/s vízhozam alatti tartományban. *A biztonság javára ezt a középvíz feletti (*2 800 m³/s*) vízhozamot vesszük alapul a mértékadóként felvett 1500 m³/s Duna vízhozam helyett - a későbbiekben jelzett esetleges kiegészítő hűtés évente várható tartósságának megállapításánál -, pedig a számított túllépések lényegesen kisebb időtartamúak: 2032-ben a 26,38 °C-os, 2085-ben pedig 28,64 °C-os mértékadó Duna vízhőmérséklet ugyanis egyaránt 1 [nap/év] tartóssággal várható az alkalmazott klimatológiai modell szerint*). A DMI előrejelzések a várakozásnak megfelelően nagyobb mértékű hőmérséklet növekményt jeleznek előre, mint az OMSZ előrejelzések.

Az, hogy a jövőben melyik hőmérsékletváltozási forgatókönyv fog érvényesülni, ma még nem lehet eldönteni. Érdemes tehát a változásokat nyomon követni és az elővigyázatosság elve szerint az előrejelzéseket rendszeresen felülvizsgálni.

A számítási eredmények szerint, Paks környezetében 2032-re mérhető, 23 és 25 °C feletti Duna vízhőmérsékletek évenként várható átlagos időtartama (tartóssága), a jelenlegi tartósság (7 - 21 nap/év) több, mint kétszeresére (20 - 44 nap/év), míg 2085-re a jelenlegi tartósság háromszorosára nőhet.

Az 1500 m³/s, mértékadóként felvett Duna vízhozam alatti vízhozamok időszakában, 2014-re, 2032-re és 2085-re meghatározott mértékadó Duna vízhomérsékletek (*2014-ben 25,61 °C, 2032-ben 26,38 °C, míg 2085-ben 28,64 °C*) tartósságai alulról közelítik az 1 nap/év-et, a pesszimistább klimatológiai forgatókönyv (DMI: B2 PRODUCE, $\Delta T_{Föld}$ = 1,8 °C/100 év) szerint! Emiatt szélsőséges kis Duna vízhozamként ezt tartottuk indokoltnak felvenni a hőcsóva modellszámításai során.

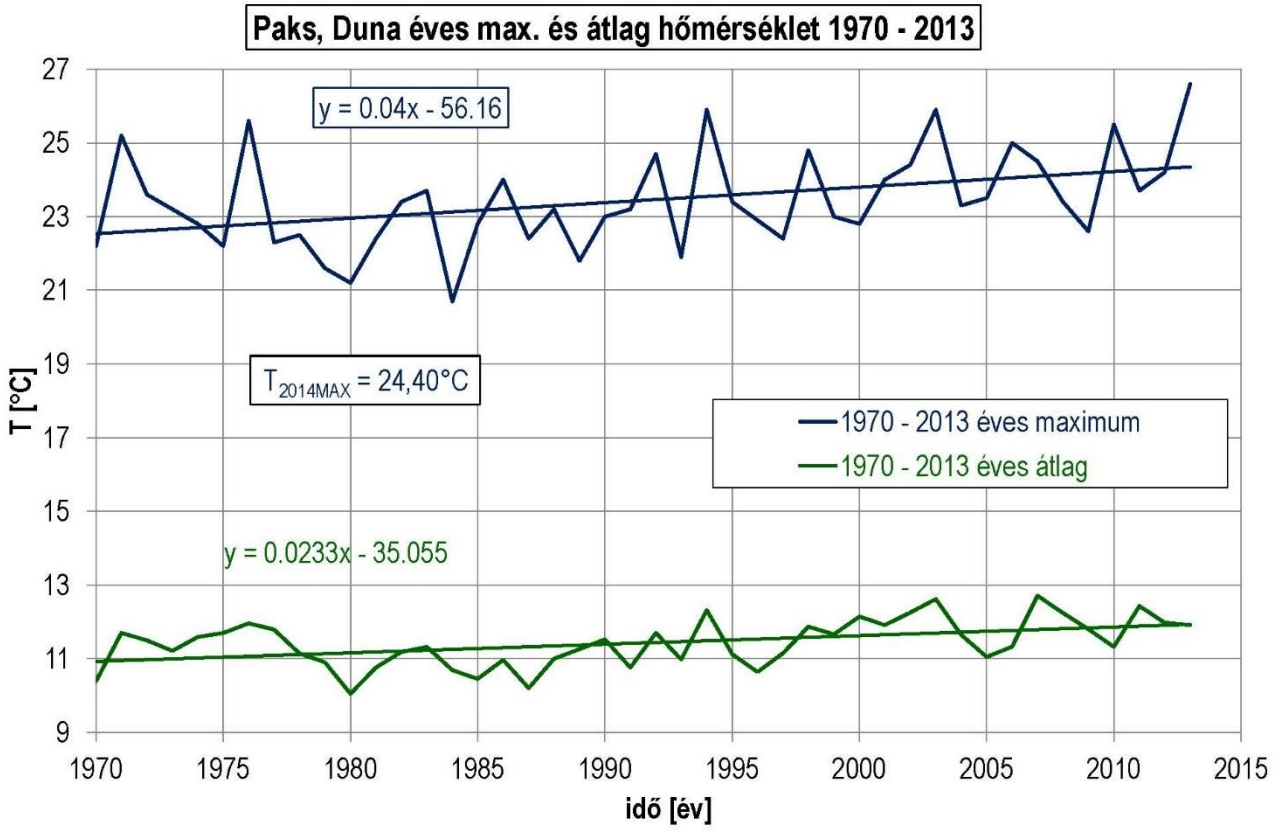
A Duna 30 °C feletti vízhőmérsékletének várható évenkénti időtartama 0,5 [nap/év] alatt várható a 2090. évre, míg 2120-ra kisebb, mint 2 [nap/év].

11.7.4.4 A mértékadó hőterhelési állapot meghatározása

11.7.4.4.1 Mérési adatok feldolgozása

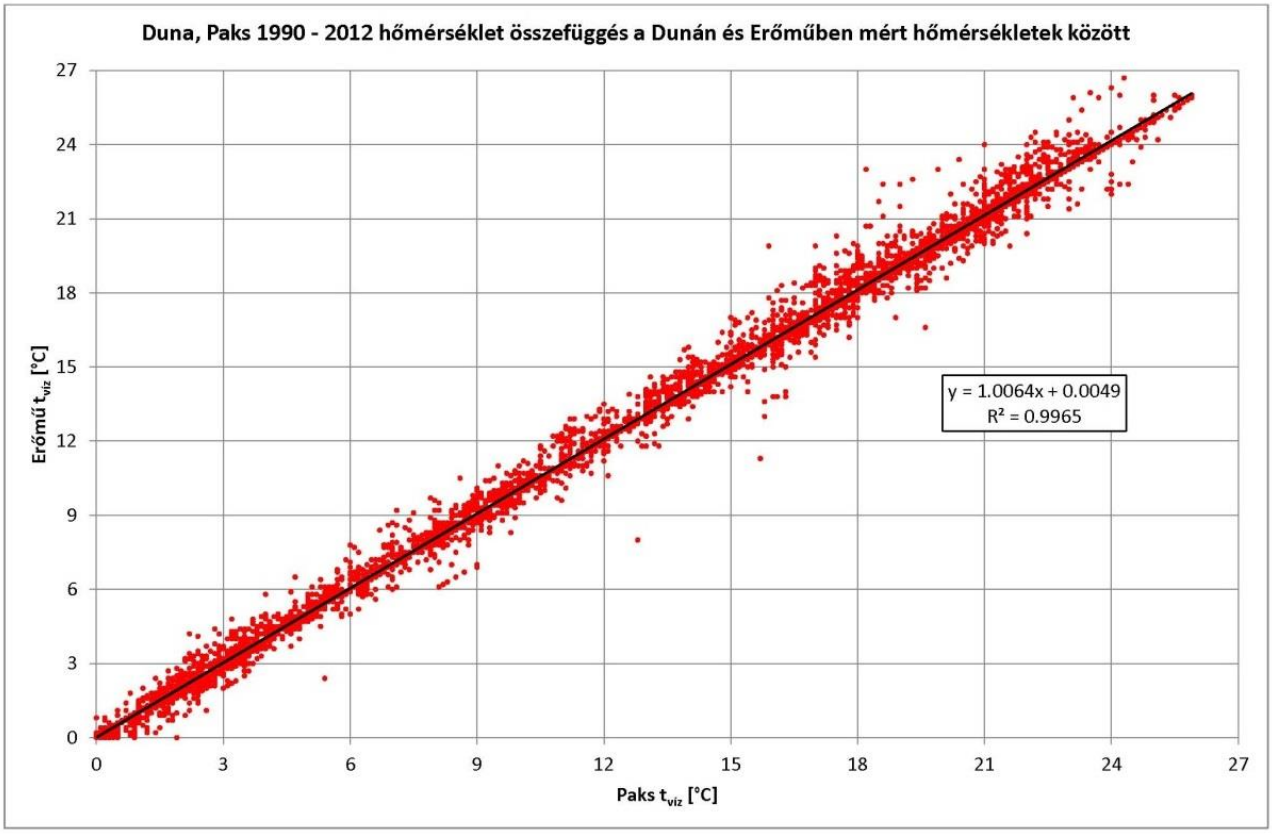
A Duna Paksi vízmérce szelvényében (Duna 1531,3 fkm) mért Duna vízhőmérsékletek napi idősorát vizsgáltuk, az 1956-2013. évek adatainak alapul vételével. A napi adatok alapján meghatároztuk az éves vízhőmérséklet maximum értékeket.

A maximális és átlagos éves Duna vízhőmérséklet adatok idősorait 1970-2013. évek közötti időszakra, az alábbi ábra szemlélteti, az idősorok számított trendjeinek megadásával (11.7.4-4. ábra).

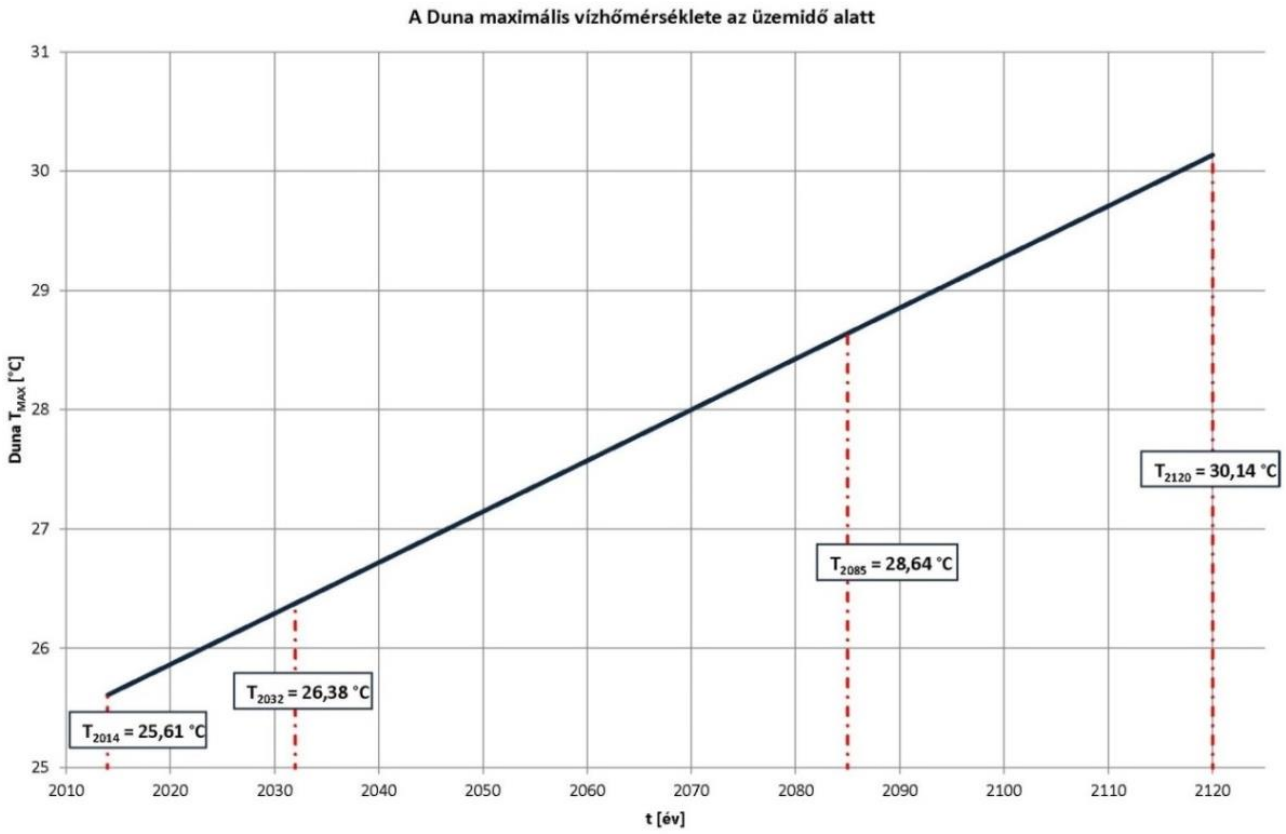


11.7.4-4. ábra: A Duna éves legnagyobb és átlagos vízhőmérséklet idősorainak trendvonalai, a Duna 1531,3 fkm szelvényében (1970-2013. évek napi Duna vízhőmérséklet adatai alapján)

Az éves maximális Duna vízhőmérsékletek (1970-2013. évek közötti időszak) trendvonalának meredeksége 0,04 °C/év, a trendvonal 2014. évi értéke 24,4 °C, ami a paksi vízmérce napi reggel 7 órakor mért Duna 1531,3 fkm szelvényének vízhőmérsékletére vonatkozik. Ennél 1,2 °C -kal nagyobb értéket vettünk fel (25,6 °C), ugyanis az erőmű hidegvíz-csatornánál 11-12 óra körül mért vízhőfoka 1,2 °C -kal nagyobb, mint a paksi vízmércénél mért reggel 7 órakor mért adat. A Duna paksi vízmérce (Duna 1531,3 fkm) szelvényében mért napi törzshálózati vízhőmérsékletek és az erőmű szelvénye (Duna 1527 fkm) között, az erőmű szakemberei által mért vízhőmérsékletek közötti összefüggést az alábbi ábra szemlélteti.



11.7.4-5. ábra: Lineáris összefüggés a Duna Paksi (1531,3 fkm) és az erőmű (1527 fkm) szelvényben mért vízhőmérsékletek között



11.7.4-6. ábra: A Duna vízhőmérsékletének (tD [°C]) évenként várható legnagyobb értéke, a tervezett üzemidő alatt, az erőmű szelvényében

A Duna erőmű szelvénybeli maximális vízhőmérsékletére 2014. évi induló értékként, a fentiek miatt 25,6 °C -t vettünk fel, az 1990-2013. éves maximális Duna vízhőmérséklet adatok alapján, lineáris trendjének meredekségét pedig a pesszimistább klímamodellből (DMI-B2 PRODUCE) kapott 0,04 [°C/év]-re, 2120-ig kiterjesztve (11.7.4-6. ábra), ami megegyezett az 1990-2013. és 1970-2013. évek alapján 2014-re számított meredekségekkel (lásd: 11.7.4-4. ábra).

Vízhőmérsékleti kapcsolatvizsgálatot végeztünk a Duna, Paksi vízmérce (1531,3 fkm) és a hidegvíz-csatorna dunai torkolati szelvényében (1527,0 fkm) mért vízhőmérséklet adatok között. A paksi vízmérce szelvényében 1956-tól napjainkig mérik és rögzítik a vízhőmérsékleti adatokat, míg az erőmű Duna szelvényénél 1988 óta állnak rendelkezésre, az erőmű által rögzített digitális vízhőmérsékleti adatok. A fenti ábrán látható, hogy a paksi vízmérce és az erőmű vízhőmérséklet adatai közti kapcsolat igen szoros, ezért a továbbiakban a Paksi vízmérce adatait vesszük alapul a számításaink során.

A jelenleg üzemelő blokkok teljes kapacitású üzemi hűtővízigénye 25 m³/s blokkonként (4 blokk összesen: 100 m³/s). A tervezett 2 x 1 200 MW-os új blokkok maximális üzemi hűtővízigénye blokkonként 66 m³/s (2 új blokk összesen: 132 m³/s). Az üzemidő-hosszabbítás és a tervezett fejlesztés tervezett ütemezését az alábbiakban összegezzük.

11.7.4.4.2 A tervezett fejlesztés megvalósulása esetén az elkeveredés szempontjából mértékadó állapotok meghatározása

A jelenlegi tervek szerint a meglévő és fejlesztendő blokkok üzemeltetési ütemezése az alábbi hűtővízkivételi ütemezéssel valósul meg a jövőben (lásd: 11.7.4-8 táblázat). A vízkivételi és melegvízkibocsátási ütemezést kiegészítettük a mértékadó időpontokban (2014, 2032 és 2085) a pesszimistább (DMI-B2 PRODUCE) klímamodellel becsült maximális Duna vízhőmérséklet értékével:

Időszak [évek]	Melegvízhozam maximuma [m³/s]	Üzemelő blokkok száma [db]	Mértékadó időpontok [év]	Duna becsült legnagyobb éves vízhőmérséklete [ºC]
2014. (Jelen)	100	4 meglévő blokk	2014. év	25,61 [°C]
2014-től – 2025-ig	100	4 meglévő blokk		26,10 [°C] (2025. évben)
2025-től – 2030-ig	166	4 meglévő blokk + 1 új blokk		
2030-től – 2032-ig	232	4 meglévő blokk + 2 új blokk	2032. év	26,38 [°C]
2032-től – 2034-ig	207	3 meglévő blokk + 2 új blokk		
2034-től – 2036-ig	182	2 meglévő blokk + 2 új blokk		
2036-től – 2037-ig	157	1 meglévő blokk + 2 új blokk		
2037-től – 2085-ig	132	2 új blokk	2085. év	28,64 [°C]
2085-től – 2090-ig	66	1 új blokk		
2090-től	0	-		

11.7.4-8. táblázat: Melegvíz kibocsátás (Q m³/s) alakulása a tervezett fejlesztés megvalósulása esetén, a Duna várható évi legnagyobb vízhőmérsékletével (T_{Duna}, °C) a mértékadó időpontokban

11.7.4.4.3 Mértékadó helyzet meghatározása a fejlesztés elmaradása esetén (az üzemidő-hosszabbítás üteme szerint)

A fejlesztés elmaradása esetén a jelenlegi tervek szerint (üzemidőhosszabbítási ütemterv), a meglévő blokkok üzemeltetési ütemezése az alábbi hűtővízkivételi ütemezéssel valósul meg a jövőben (lásd: 11.7.4-9 táblázat).

Időszak [évek]	Melegvízhozam [m³/s]	Üzemelő blokkok száma [db]	Mértékadó időpontok [év]	Duna becsült legnagyobb éves vízhőmérséklete [ºC]
2014-től – 2032-ig	100	4 meglévő blokk	2032. év	26,38 [ºC]
2032-től – 2034-ig	75	3 meglévő blokk		
2034-től – 2036-ig	50	2 meglévő blokk		
2036-től – 2037-ig	25	1 meglévő blokk		
2037-től	0	-		

11.7.4-9. táblázat: Melegvíz kibocsátás (Q m³/s) alakulása a tervezett fejlesztés elmaradása esetén, a Duna várható évi legnagyobb vízhőmérsékletével (T_{Duna}, °C) a mértékadó időpontokban

2032-től 2037-ig az üzemidő hosszabbítás ütemezése szerint a meglévő blokkok kilépnek, így a melegvíz hozama fokozatosan - 5 év alatt átlagosan évi 20 %-kal - lecsökken. Ennek mértéke nagyobb hatású, mint a Duna vízhőmérséklet emelkedésének hatása, így a 2032. év mértékadónak tekinthető.

11.7.4.5 A kiegészítő hűtés évenként átlagosan szükséges időtartamának számítása

11.7.4.5.1 Duna vízhőmérséklet meghaladási tartósságok számítása, klimatológiai modell alapján

Mértékadó állapotra lehet számítani, a melegvízhozam kibocsátásától függően az alábbi esetekben:

- $T_{Duna} \leq 25°C$ – jelen állapotban és a fejlesztés elmaradásakor 2037-ig ($Q_{Melegvíz}$ = 100 m³/s),
- $T_{Duna} \leq 23°C$ – a 2030-2032. évek közötti mértékadó esetben ($Q_{Melegvíz}$ = 232 m³/s),
- $T_{Duna} \leq T_{Duna}(Q_{Melegvíz})$ 2032-től, 2090-ig a meleg vízhozam mértékétől függően változik,
- $T_{Duna} \leq 22°C$ – a 2037-2085. évek közötti mértékadó esetben ($Q_{Melegvíz}$ = 132 m³/s),

A klimatológiai vizsgálatok eredményeképpen meghatározott Duna vízhőmérsékleteket meghaladó vízhőmérsékletek tartósság értékeinek éves átlagát - egész napokra kerekített értékkel -, a 11.7.4-10 táblázatban foglaltuk össze, a mértékadó időpontokra vonatkozóan.

T_{Duna} = T [°C]											
	T ≥ 20	T ≥ 21	T ≥ 22	T ≥ 23	T ≥ 24	T ≥ 25	T ≥ 26	T ≥ 27	T ≥ 28	T ≥ 29	T ≥ 30
Évek:	Meghaladási időtartam (tartósság) [nap/év]										
2013 (jelen)	49	38	26	14	5	2	0	0	0	0	0
2025	55	42	29	19	10	5	2	1	0	0	0
2032	58	45	32	21	12	7	3	1	1	0	0
2085	88	73	58	44	31	20	12	6	3	1	0
2090	91	76	62	47	33	22	12	6	3	1	0

11.7.4-10. táblázat: A Duna adott vízhőmérséklet feletti vízhőmérséklet tartományának tartóssága (egész napokra kerekített értéke) a mértékadó hatású időpontokban – DMI (B2 PRODUCE projekt) forgatókönyv szerint

11.7.4.5.2 Kiegészítő hűtés alkalmazása a tervezett fejlesztés megvalósítása esetén

Amennyiben a Duna háttér vízhőmérséklete indokolja - amelyet a jelenlegi gyakorlat szerint folyamatosan mér a meglévő üzem a hidegvíz-csatorna dunai torkolatánál -, azaz a 8 °C-os hőlépcsővel a +500 m-es referenciaszelvényben határérték túllépés várható, a tervek szerint visszaterheléses kiegészítő hűtési rendszert alkalmaznak, amely mindenkor 33 °C-ra képes a felmelegedett, Dunába kibocsátandó hűtővizet lehűteni.

Az új blokkok felmelegedett hűtővize a jelenlegi melegvízkibocsátási hely felett mintegy 200 méterrel kerül kibocsátásra, a Duna 1526+450 fkm szelvényének jobb partján, rekuperációs műtárgyon keresztül.

A meglévő négy blokk felmelegedett hűtővize jelenleg a meglévő bevezetési helyen, a meglévő energiatörő műtárgyon keresztül kerül kibocsátásra, a Duna 1526+250 fkm szelvényében, jobb parti bevezetésként.

11.7.4.5.3 Kiegészítő intézkedési lehetőségek

- visszaterhelés,
- kiegészítő dunai vízkivétel hűtési céllal (továbbiakban nem vizsgáljuk, mert a tervezés során elvetésre került),
- utóhűtés, utóhűtő rendszer kiépítésével (továbbiakban nem vizsgáljuk, mert a tervezés során elvetésre került),
- blokkleállás, vagy blokk karbantartás (lehetőségként).

11.7.4.5.4 Jelenlegi helyzet fennmaradása esetén szükséges kiegészítő hűtés

Amennyiben a Duna háttér vízhőmérséklete $T_{Duna} \leq T_{Határérték}$ (30 °C) - $\Delta T_{Hőlépcső}$ (8 °C) + $\Delta T_{Elkeveredés}$ °C - ez jelenleg, 100 m³/s melegvízhozam esetén ~4 °C, így $T_{Duna} \leq$ 26 °C -, akkor egyáltalán nem szükséges a kiegészítő hűtést üzemeltetni. 2014-re 25,61 °C a Duna várható maximális vízhőmérséklete, így a jelenlegi kibocsátásnál a referenciaszelvényben 30 °C alatti Duna vízhőmérséklet alakul ki. Mivel az idő előrehaladtával a Duna vízhőmérséklete emelkedik, ezért az intézkedésre okot adó Duna vízhőmérsékletet 25 °C-ra vesszük fel, a biztonság javára.

A jelenlegi melegvíz bevezetési hely a Duna 1526+250 fkm szelvényének jobb parti zónájába esik.

- Kiegészítő hűtés (és rendkívüli vihőmérséklet felmérési monitoring, a döntés megalapozására) szükséges lehet a biztonság javára: T_{Duna}> 25 °C esetén. Mértékadó helyzet a Duna 1500 – 1850 m³/s vízhozam tartományában található.
- A 25 °C feletti Duna vízhőmérséklet ***jelenlegi tartóssága***, a biztonság javára 2800 m³/s alatt (az 1956 - 2012., valamint 1990-2012. években mért adatok alapján): ***2 [nap/év]***.
- A 25 °C feletti Duna vízhőmérséklet ***2032-ben*** várható tartóssága, 2 800 m³/s alatt (DMI forgatókönyv szerint): ***7[nap/év]***.
- 2032. évet követően a blokkok ütemezett kilépése – a melegvíz térfogatáramának (25 m³/s / 2 év) intenzívebb csökkenése miatt - terheléscsökkenéssel jár, a Duna háttér vízhőmérsékletének időbeli emelkedése ellenére.

11.7.4.5.5 A tervezett fejlesztés megvalósulása esetén szükséges kiegészítő hűtés

A tervezett fejlesztés megvalósulásával, vagyis legfeljebb 232 m³/s melegvízhozam kibocsátása esetén a $\Delta T_{Elkeveredés}$ várható értéke ~2 °C, így ha $T_{Duna} \leq$ 24 °C, akkor egyáltalán nem szükséges a kiegészítő hűtést üzemeltetni, ugyanis a

kibocsátott melegvíz és a Duna háttér közötti hőlépcső $\Delta T_{Hőlépcső}$ = 8 °C. Kiegészítő hűtés szükséges, a biztonság javára T_{Duna}> 23 °C esetén. Mértékadó helyzet a Duna 1500 – 1850 m³/s vízhozam tartományában található. A 23 °C Duna vízhőfok felett kiegészítő hűtés (és rendkívüli víhőmérséklet felmérési monitoring, a döntés megalapozására) szükséges lehet (a biztonság javára 2800 m³/s Duna vízhozam alatti teljes tartományra kiterjesztettük az alábbi hőmérséklet-túllépési tartományt):

- A 23 °C feletti Duna vízhőmérséklet ***jelenlegi tartóssága***, a biztonság javára 2800 m³/s alatt (az 1956 - 2012., valamint 1990-2012. években mért adatok alapján): ***14 [nap/év]***.
- A 23 °C feletti Duna vízhőmérséklet ***2032-ben*** várható tartóssága, a biztonság javára 2800 m³/s alatt (DMI forgatókönyv szerint): ***21 [nap/év]***.
- A 23 °C feletti Duna vízhőmérséklet ***2085-ben*** várható tartóssága, a biztonság javára 2800 m³/s alatt (DMI forgatókönyv szerint): ***44 [nap/év]***.
- 2032. évet követően a blokkok ütemezett kilépése – a melegvíz térfogatáramának (25 m³/s / 2 év) intenzívebb csökkenése miatt - terheléscsökkenéssel jár, a Duna háttér vízhőmérsékletének időbeli emelkedése ellenére
- 2085. évet követően az első új blokk kilépése – a melegvíz térfogatáramának (132 m³/s-ról 66 m³/s-ra) intenzívebb csökkenése miatt - terheléscsökkenéssel jár, a Duna háttér vízhőmérsékletének időbeli emelkedése ellenére.

A jelenleg hatályos, „az atomenergia alkalmazása során a levegőbe és vízbe történő radioaktív kibocsátásokról és azok ellenőrzéséről” szóló 15/2001. (VI. 6.) KöM rendelet szerint a melegvíz kibocsátás szelvénye alatt 500 méterrel folyásirányban elhelyezkedő Duna szelvény a referencia szelvény. Jelenleg a +500 m jelű referencia szelvény a Duna 1525+750 fkm szelvényében van.

A Duna 30 °C feletti vízhőmérsékletének várható időtartama 0,5 [nap/év] alatt várható a 2090. évre, míg 2120-ra kisebb, mint 2 [nap/év].

11.8 PAKS II. LÉTESÍTÉSÉNEK HATÁSA A DUNÁRA

11.8.1 PAKS II. LÉTESÍTÉSÉNEK HATÁSA A DUNA MEDRÉRE, A VÍZTEST ÁRAMLÁSI, VALAMINT HŐMÉRSÉKLETELOSZLÁSI JELLEMZŐIRE

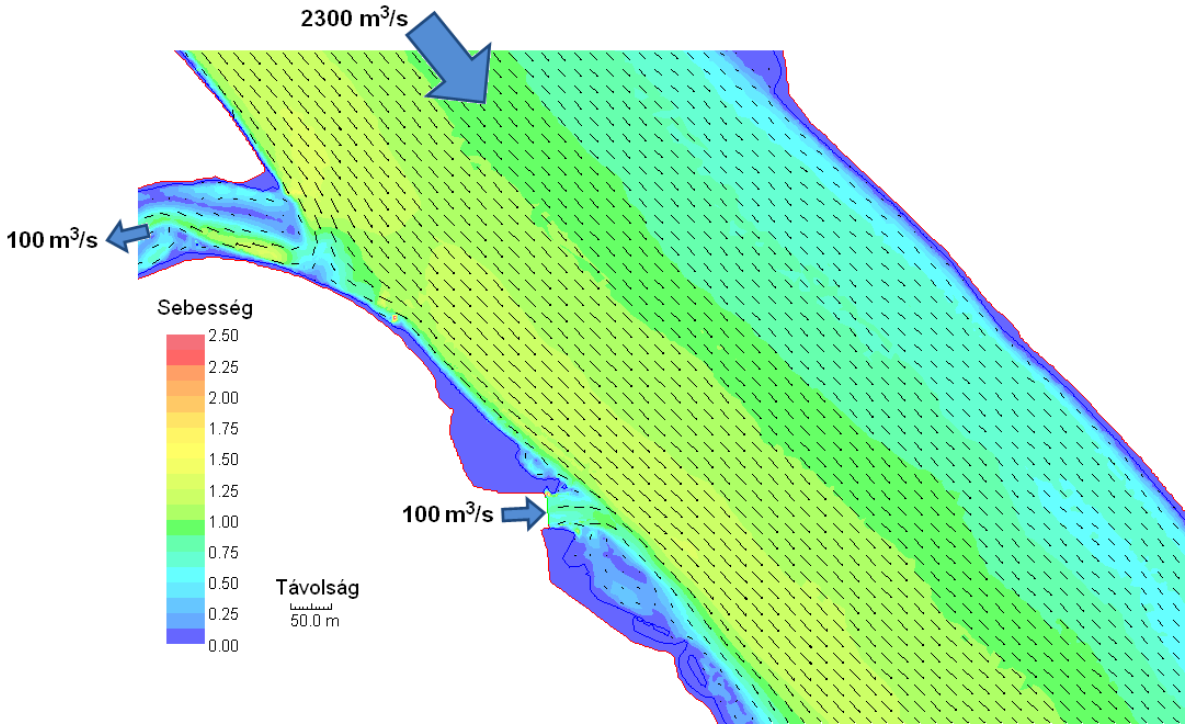
11.8.1.1 Paks II. létesítésének általános értékelése

Paks II. létesítésének nincs releváns hatása sem a Duna kis- és nagyvízszintjeinek, sem áramlási viszonyainak alakulására, sem a Duna medrének változására illetve a melegvíz kibocsátás elkeveredésére. Egyedül a meglévő melegvíz kibocsátás felett mintegy 200 m-rel tervezett rekuperációs műtárgy alapozásaként létesítendő alaptestnek lesz minimális, áramlást befolyásoló hatása, a Duna jobb partközeli áramlási viszonyaira, amely a hajózásra a rekuperációs mű üzembe lépését megelőzően nincs befolyásoló hatással. Hasonlóan minimális áramlási sebességteret módosító hatása várható a hidegvíz-csatorna torkolati szelvénye bővítésének.

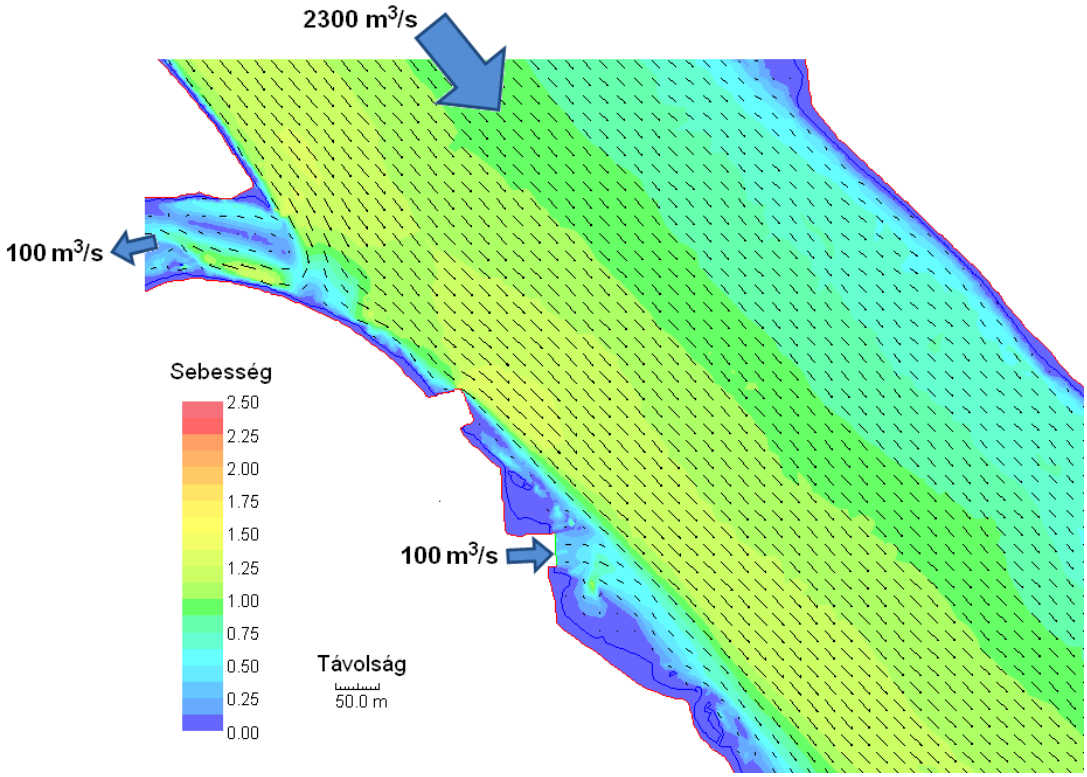
Fenti értékelés alátámasztására, az alábbi alfejezetben mutatjuk be az áramlási sebességeloszlás változására gyakorolt hatásokat, a 2D hidrodinamikai modellvizsgálat eredményeinek szemléltetésén keresztül.

11.8.1.2 Paks II. létesítésének hatása a Duna áramlási terére és mederváltozási folyamataira

A jelen állapotra kalibrált 2D áramlási modellel meghatároztuk a mélységintegrált áramlási mezőt, a Duna - telephely környezetében lévő vízterére -, a sokéves átlagos Duna vízhozamra (2 300 m³/s-ra) – a Paksi Atomerőmű esetére és az építés alatti állapotra. A két sebességmező összehasonlítása alapján (lásd *11.8.1-1. ábra* és *11.8.1-2. ábra*) megállapítható, hogy Paks II. építése alig okoz a Duna áramlási viszonyaiban (sebességeloszlás, vízszintek) változást. Fentiek miatt, a mederváltozásokban és a kibocsátott melegvíz elkeveredése tekintetében is elenyésző változással kell számolnunk, a tervezett fejlesztés megvalósulása esetén.



11.8.1-1. ábra: Számított mélységintegrált sebességmező a hidegvíz és melegvíz-csatornák torkolatainak környezetében, 2 300 m³/s-os, sokéves átlagos Duna vízhozam és 100 m³/s-os hűtővíz-kivétel esetén – Paksi Atomerőmű önállóan



11.8.1-2. ábra: Számított mélységintegrált sebességmező a hidegvíz és melegvíz-csatornák torkolatainak környezetében, 2 300 m³/s-os, sokéves átlagos Duna vízhozam és 100 m³/s-os hűtővíz-kivétel esetén (Paksi Atomerőmű – Paks II. építés alatti állapota)

11.8.2 TISZTÍTOTT KOMMUNÁLIS SZENNYVÍZKIBOCSÁTÁS

Hivatkozva a jelen környezeti hatástanulmány első kötetében lévő műszaki tartalomra, az alábbiakban foglalhatjuk össze a tervezett fejlesztés, mértékadó kommunális szennyvízmennyiségeinek alakulását:

„A szükséges maximális ivóvíz-mennyiség az első blokk megkezdett üzemelési és a második blokk ezzel egyidejű létesítési időszakában jelentkezik, amelynek maximális mennyisége 646 m³/nap, a keletkező maximális szennyvíz mennyiség ennek a 95 %-a, azaz 614 m³/nap."

„Egy blokk létesítésének időigénye 5 évre tehető, a második blokk létesítésének kezdő időpontja 5 év eltolódással került figyelembe vételre. A létesítés időszakára 1 blokk létesítése esetén (a technológiai szállító előadásai alapján) maximálisan 5 250 főt vettünk figyelembe."

Az erőmű területén jelenleg található kommunális szennyvízkezelő műtárgyak összes kapacitása 1 870 m³/nap, amelyből a 2012-ben felújított II.-es jelű, 1 200 m³/nap kapacitású szennyvíztisztító műtárgy üzemel, a másik jelenleg tartalékként van figyelembe véve. Mivel a Paksi Atomerőmű területén átlagosan keletkező kommunális szennyvizek mennyisége jelenleg kb. 300 m³/nap (Paksi Atomerőmű. üzeme), ezért ~1570 m³/nap szabad tisztító kapacitás biztonsággal rendelkezésre áll.

A tervezett fejlesztés figyelembevételével a mértékadó kommunális tisztítandó szennyvízhozama tehát, a biztonság javára 1000 m³/nap (300 + 614 m³/nap), amelyet a szennyvíztisztító telep 2012. évben felújított II. jelű műtárgyának tisztító kapacitása (1200 m³/nap) önállóan is le tud fedni.

Mivel a tisztított szennyvíz vízminőségi komponenseire a Felügyelőség által előírt kibocsátási határértékek állandó értékek ($C_{tisztított\ szennyvíz}$), így a kibocsátott vízhozam ($Q_{tisztított\ szennyvíz}$) növekedéssel lineáris arányban vannak a tisztított szennyvízkibocsátás vízminőségi komponenseinek maximális terhelés értékei ($T\ [g/s] = C_{tisztított\ szennyvíz} \times Q_{tisztítottszennyvíz}$). A Dunában elkeveredő tisztított szennyvízcsóva maximális koncentrációja a terheléssel lineáris kapcsolatban van, így a kibocsátott vízminőségi komponens maximális koncentrációjának nagysága a kibocsátott szennyvízhozammal lesz egyenesen arányos.

A befogadó vízminősítés határértékeit „A felszíni víz vízszennyezettségi határértékeiről és azok alkalmazásának szabályairól" szóló 10/2010. (VIII. 18.) VM rendelet (2. Melléklete: Vízminőségi Határértékek Vízfolyásokra).

A víztest típusok ökológiai állapota szerinti osztályba sorolását „A felszíni vizek megfigyelésének és állapotértékelésének egyes szabályairól" szóló 31/2004. (XII. 30.) KvVM rendelet alapján kidolgozott Országos Vízgyűjtőgazdálkodási Terv tartalmazza a fizikai- kémiai komponensekre (I. osztály: kiváló, II. osztály: jó, III. osztály: mérsékelt, IV. osztály: gyenge, V. osztály: rossz).

A befogadó felszíni víztest terhelhetőségére az osztályhatár váltások területi kiterjedése ad minősítési információt.

Az 50 éves elérési idejű (hidrogeológiai „B") védőterületen, a 6/2009. (IV.14.) KvVM-EüM-FVM együttes rendeletben előírt határértéket kell betartani az ivóvízbázis védelme érdekében.

Fontos lesz a meglévő erőműi szennyvíztisztító tisztított szennyvízkibocsátásának folyamatos nyomon követése és a vízjogi üzemeltetési engedélyben előírt vízminőségi komponensek kibocsátási határértékeknek történő megfelelőség folyamatos monitoring vizsgálata.

A mértékadó szennyvízhozam – a létesítés- és az üzemelés időszakában egyaránt - kisebb, mint a szennyvíztisztító telep kapacitása, ezért az alábbi elkeveredés-vizsgálatot a telep tisztítókapacitásával, azaz 1000 m³/nap vízhozammal számítjuk.

11.8.2.1 Az alkalmazott analitikus elkeveredési modell ismertetése

Az kalibrált 2D és 3D transzportmodell felhasználásával meghatároztuk a 2D analitikus transzportmodell keresztirányú diszperziós tényezőjét, amely összhangban van a műszaki irányelv ajánlott paramétereivel. A tisztított szennyvíz Dunában kialakuló koncentrációjának számítása az MI-10-298-85 (Szennyezőanyagok terjedésének meghatározása vízfolyásokban) műszaki irányelv alapján a következőképpen történik:

$$c_{m.h}^{sodorvonal} = \frac{M}{2h\left(\pi D_{y,1} v_x x\right)^{\frac{1}{2}}} exp\left(-\frac{v_x}{4D_{y,1}x} y^2\right)$$

$$c_{m.h}^{parti} = \frac{M}{h\left(\pi D_{y,1} v_x x\right)^{\frac{1}{2}}} exp\left(-\frac{v_x}{4D_{y,1}x} y^2\right)$$

A partélekkel nem befolyásolt – sodorvonali - szennyvízbevezetés során a bevezetés helyén (y=0, x mentén) alakul ki a csóva maximális mélységintegrált koncentrációja. A fenti képlet keresztirányú koordinátájának behelyettesítésével adódik a maximális koncentráció értéke, sodorvonali és parti bevezetés esetén:

$$c_{m.max}^{sodorvonal} = \frac{M}{2h\left(\pi D_{y,1} v_x x\right)^{\frac{1}{2}}}$$

$$c_{m.max}^{parti} = \frac{M}{h\left(\pi D_{y,1} v_x x\right)^{\frac{1}{2}}}$$

ahol:

x, y	lokális koordinátarendszer a bevezetés helyén, y: keresztirányú távolság, x: hosszirányú távolság [m],
$c_{m,h}$	a koncentráció keresztirányú mélységátlagolt eloszlása [kg/m^3],
$c_{m,max}$	a koncentráció maximális értéke [kg/m^3],
v_x	jellemző hosszirányú átlagsebesség [m/s],
$D_{y,1}$	keresztirányú diszperziós együttható [m^2/s],
M	szennyezőanyag tömegárama [kg/s],
q	a bevezetett szennyezőanyag térfogatárama vagy hozama [m^3/s],
c	a bevezetett szennyezőanyag koncentrációja [kg/m^3],
h	a jellemző vízmélység [m]

Megjegyezzük, hogy a befogadó háttér koncentrációját zérusnak felvéve a fent említett képletekkel a koncentráció növekmény mértéke számítható.

Esetünkben a Duna szennyezőanyag koncentrációját nem hanyagoljuk el, hanem az Országos Vízminőségi Törzshálózat hosszúidejű, (FEVI) adatbázis (2006-2011. évek közötti adatainak) statisztikai értékelése alapján kiválasztott mértékadó $P_{50\%}$-os, illetve átlagos szennyezőanyag koncentrációval jellemezzük. A végső értéket a számított koncentráció és a háttér koncentráció összege adja.

A keresztirányú diszperziós együttható:

$$D_y^* = d_y^* u^* R$$

ahol,

D_y^*	a keresztirányú diszperziós tényező,
d_y^*	a dimenziótlan keresztirányú diszperziós tényező,
u^*	a fenékcsúsztató sebesség [m/s],
R	a hidraulikai sugár [m]

A mederfenéken ébredő fenékcsúsztató sebességet az alábbiak szerint számítjuk:

$$u^* = \sqrt{gRI}$$

ahol:

g	a nehézségi gyorsulás [m/s^2]
I	a vízfelszín, illetve a mederfenék esése [m/m]

Fenti képletek közül a Duna jobb parti (parti bevezetés) bevezetéséhez kapcsolódó képleteket alkalmazzuk, ugyanis a kommunális szennyvíztisztító telep tisztított szennyvízkibocsátása a melegvíz-csatornába történik. A tisztított szennyvíz melegvíz-csatornában történő hígulásától, a biztonság javára eltekintettünk. A telep kibocsátott tisztított szennyvízhozamát és szennyező-komponenseinek koncentrációit, közvetlenül a Duna 1526+250 fkm

keresztszelvényének Duna jobb parti pontjába vezettük. A biztonság javára pontszerű bevezetéssel számoltunk, vagyis a kibocsátott szennyvíz véges kibocsátási folyadéksugarának keresztmetszetét egyetlen pontra koncentráltuk.

11.8.2.2 A felszíni vizekbe történő szennyezőanyag-kibocsátás, figyelembe veendő kibocsátási határértékei és a tisztítatlan (havériás) szennyvízterhelések felvétele

„A vízszennyező anyagok kibocsátásaira vonatkozó határértékekről és alkalmazásuk szabályairól" szóló 28/2004. (XII. 25.) KvVM rendelet 2. sz. mellékletében (*A szennyvizek befogadóba való közvetlen bevezetésére vonatkozó, vízminőségvédelmi területi kategóriák szerint meghatározott kibocsátási határértékek*) előírtak szerint, a Duna 1526+250 fkm szelvényére vonatkozó (***4. Általános védettségi kategória befogadói***), ajánlott kibocsátási határértékeket vettük alapul a számítások során. A szennyvíztisztító telepre érkező szennyvíz minőségét a tervezési tapasztalatok alapján vettük fel (lásd: 11.8.2-1. táblázat).

A szennyvíztelepre érkező- és onnan elvezetett tisztított szennyvíz a következő táblázatban szereplő vízminőségi paraméterekkel lett figyelembe véve az elkeveredés-vizsgálati számítások során:

Szennyezőanyag komponens jele	**Telepre érkező tisztítatlan szennyvíz (havériás terhelés), szennyező anyag koncentrációk (mg/l)**	**Tisztított szennyvízre vonatkozó kibocsátási határértékek, a 28/2004. (XII. 25.) KvVM rendelet szerint (Általános védettségi kategória befogadói)**
KOI_k (mg/l)	761	150
BOI_5 (mg/l)	259	50
SZOE (mg/l)	41	10
Összes nitrogén (mg/l)	82	55
Összes foszfor (mg/l)	17,04	10
Ammónia (mg/l)	56,8	20
Összes vas (mg/l)	2,11	20
Összes réz (mg/l)	0,167	2
Összes mangán (mg/l)	0,1	5
Összes ezüst (mg/l)	0,0124	0,1
Összes higany (mg/l)	0,01	0,01
Összes cink (mg/l)	0,835	5
Összes kadmium (mg/l)	0,0028	0,05

11.8.2-1. táblázat: Nyers és tisztított szennyvíz minőségi paraméterei

A víztest típusok ökológiai állapota szerinti, fizikai- kémiai komponesek osztályba sorolását (osztály határértékeit) *„A felszíni vizek megfigyelésének és állapotértékelésének egyes szabályairól"* szóló 31/2004. (XII. 30.) KvVM rendelet alapján kidolgozott Országos Vízgyűjtő-gazdálkodási Terv tartalmazza.

11.8.2.3 Felszín alatti vizek védelme érdekében figyelembe veendő vízminőségi határértékek

Az üzemi viszonyok esetén vizsgáljuk a nitrát és ammónium koncentrációt, mint esetlegesen előírandó kibocsátási határértéket.

Az üzemelő- és távlati, parti szűrésű ivóvízbázisok 50 éves elérési idejű védőterületein, "A földtani közeg és „a felszín alatti vízszennyezéssel szembeni védelméhez szükséges határértékekről és a szennyezések méréséről" szóló 6/2009. (IV. 14.) KvVM-EüM-FVM együttes rendelet szerint, a „B" szennyezettségi határérték 25 mg/l Nitrát (= 5,65 mg/l Nitrát-N) koncentráció, valamint 0,5 mg/l Ammónium (= 0,39 Ammónium-N) koncentráció.

A tisztított szennyvíz bevezetés távlati, partiszűrésű ivóvízbázisok 50 éves elérési idejű hidrogeológiai védőterületei területén tehát, figyelembe vesszük a 6/2009. (IV. 14.) KvVM-EüM-FVM együttes rendelet által előírt felszín alatti vízminőségvédelmi határértékeket is.

Felszín alatti vízre előírt – a szennyvíztisztító telepnél alkalmazandó - vízminőségi határértékek, a 6/2009. (IV. 14.) KvVM-EüM-FVM együttes rendelet szerint (11.8.2-2. táblázat):

Vízminőségi paraméter	Mértékegység	Határérték („B" szennyezettségi)
Nitrát	mg/l	25 mg/l
Ammónium	µg/l	500 (0,5 mg/l)

11.8.2-2. táblázat: Felszín alatti vízre figyelembe veendő vízminőségi határértékek a 6/2009 (IV. 14) KvVM-EüM-FVM együttes rendelet szerint

A melegvíz-csatornán keresztül a Dunába kibocsátott tisztított szennyvíz, az alábbi Duna mederre telepített sérülékeny üzemelő, és telepítendő sérülékeny távlati partiszűrésű vízbázisokat érinti:

Bal parti sérülékeny vízbázisok az érintett (Duna 1505 fkm – 1526,25 fkm közötti) területen, folyásirányba haladva:

- Foktő-Barákai (Kalocsai) üzemelő partiszűrésű ivóvízbázis,
- Bátya É-i – 9.2 távlati partiszűrésű ivóvízbázis,
- Bátya-Fajszi – 9.3 távlati partiszűrésű ivóvízbázis,

Jobb parti sérülékeny vízbázisok az érintett (Duna 1505 fkm – 1526,25 fkm közötti) területen, folyásirányba haladva:

- Gerjen É-i – 6.1 távlati partiszűrésű ivóvízbázis,
- Gerjen-Dombori – 6.2 távlati partiszűrésű ivóvízbázis,
- Fadd-Dombori-Bogyiszló É-i távlati partiszűrésű ivóvízbázis.

A kibocsátási helyhez legközelebb, attól mintegy 3450 m-re esik a Foktő-Barákai vízbázis számított 50 éves elérési idejű, hidrogeológiai védőövezete (védőidoma), amelynek É-i pereme a Duna 1522,8 fkm szelvényét érinti, a Duna sodorvonalát metszi.

Következő legközelebbi vízbázis, a Gerjen É-i távlati vízbázis. A vízbázis számított 50 éves elérési idejű, hidrogeológiai védőövezete (Duna 1521 fkm), a kibocsátási helytől folyásirányban mintegy 5250 m-re esik.

11.8.2.4 A szennyvíztisztító telep normál üzemelésének elkeveredés-vizsgálata

A szennyvíztisztító telep normál üzemmódja esetén feltételeztük, hogy a szennyvíztisztító telep az előírásoknak megfelelően működik, így a Dunába (Duna víztest kódja: 24 Duna, Szob és Baja között, a víztest VOR azonosítója: HURwAEP444) bevezetett tisztított szennyvíz minőségi paraméterei és hozama (tisztítókapacitás: 1870 m³/nap) a fentiekben leírtakkal megegyezik.

11.8.2.4.1 Elkeveredés-vizsgálat szélsőséges dunai kisvízhozam esetén

„A felszíni víz vízszennyezettségi határértékeiről és azok alkalmazásának szabályairól" szóló 10/2010. (VIII. 18.) VM rendelet szerint az érintett Duna víztest, fizikai-kémiai vízminőségi minősítése, a vízminőségi törzshálózati monitoring pontokon mért fizikai-kémiai kompnesek átlagértékén alapul. Emiatt az tisztított szennyvízbevezetés elkeveredés-vizsgálatát átlagos Duna vízhozam (éves átlagvízhozam) esetére kellene vizsgálni. De mivel a szélsőségesen kis Duna vízhozam esetén (nagyon kis Duna víztest terület kivételével) sincs a fizikai-kémiai komponensekben a Duna háttér-szennyezettségét érdemben (vízminőségi osztályhatár-váltással) meghaladó változás, ezért a Duna átlag vízhozamára vonatkozó változások még kisebb mértékűnek tekinthetők. Tekinthetjük tehát a Duna kis-vízhozamára történő vizsgálatot, egyben természeti okokból kialakuló tervezett üzemi havária esemény vizsgálatának is, amely additív eredménnyel szolgál az átlagvízhozamra történő vizsgálathoz képest.

A Dél-dunántúli Környezetvédelmi Természetvédelmi és Vízügyi Felügyelőség a 917-20/2009-9992 számú Vízjogi üzemeltetési engedélyében a melegvíz-csatorna torkolati energiatörő műtárgyában kilakított (V4) mintavételi helyet határozta meg hatósági mintavételi helyként.

Ebben a szelvényben a víz minőségét jellemző komponensek koncentrációja nem lépheti túl az üzemelési engedélyben meghatározott értékeket (11.8.2-3. táblázat).

Szennyzőanyag	Mértékegység	Határérték	Határérték jellege
pH	mg/l	6,0-9,5	területi
Dikromátos oxigénfogyasztás KOI_k	mg/l	150	területi
Biokémiai oxigénigény BOI_5	mg/l	50	területi
Szerves oldószer extrakt	mg/l	10	területi
Összes lebegőanyag	mg/l	200	területi
Összes nitrogén $N_{összes}$	mg/l	55	területi
Összes foszfor $P_{összes}$	mg/l	10	területi
Ammónia-ammónium nitrogén	mg/l	20	területi
Összes vas	mg/l	20	területi
Összes réz	mg/l	2	területi
Összes mangán	mg/l	5	területi
Összes ezüst	mg/l	0,1	területi
Összes higany	mg/l	0,01	területi
Összes cink	mg/l	5	területi
Összes kadmium	mg/l	0,05	területi

11.8.2-3. táblázat: Az elvezetett tisztított szennyvízre előírt vízminőségi határértékek

A szennyvíztisztító telepről elvezetett tisztított szennyvíz hatására a V4 szelvényben kialakuló koncetrációkat a fentiekben említett módszerrel számoltuk. Az elvezetett tisztított szenyvíz koncetrációját az elmúlt két évben mért legmagasabb koncentrációval vettük figyelembe. A bevezetés és a mérési szelvény közötti távolságot 50 m-re vettük fel. A számítás eredményét a 11.8.2-4. táblázat tartalmazza:

Szennyzőanyag	Mértékegység	Határérték	Számított koncentráció a V4 szelvényben
Dikromátos oxigénfogyasztás KOI_k	mg/l	150	7,15
Biokémiai oxigénigény BOI_5	mg/l	50	1,98
Szerves oldószer extrakt	mg/l	10	0,30
Összes nitrogén $N_{összes}$	mg/l	55	1,44
Összes foszfor $P_{összes}$	mg/l	10	0,75
Ammónia-ammónium nitrogén	mg/l	20	1,05
Összes vas	mg/l	20	0,010
Összes réz	mg/l	2	0,000
Összes mangán	mg/l	5	0,000
Összes ezüst	mg/l	0,1	0,000
Összes higany	mg/l	0,01	0,000
Összes cink	mg/l	5	0,000
Összes kadmium	mg/l	0,05	0,000

11.8.2-4. táblázat: Számított koncentráció növekmény normál üzemmód esetén a V4 szelvényben

A táblázatból jól látható, hogy koncentráció minden komponens esetében lényegesen alacsonyabb, mint az üzemelési engedélyben meghatározott határérték.

A 11.8.2-5. táblázat a Dikromátos kémiai oxigénigény (KOI_K), az 5 napos Biokémiai oxigén igény (BOI_5), az Ammónia-ammónium (NH_4 + NH_3), az összes Foszfor (öP) és az összes Nitrogén (öN) koncentráció, Duna víztest jobb parti vonalában, a 2D analitikus elkeveredési modellel számított maximális szennyezőanyag koncentráció növekményeit mutatja, a bevezetési helytől mért „x" távolságban, normál üzemmód esetén:

Távolság a bevezetési helytől folyásirányban (m)	Duna vízhozam 579 m³/s (20 000 évente visszatérő szélsőséges kisvízhozam) Számított maximális (Duna jobb partja menti) szennyezőanyag koncentráció növekmények					
	KOI_K (mg/l)	BOI_5 (mg/l)	SZOE (mg/l)	Összes nitrogén (mg/l)	Összes foszfor (mg/l)	Ammónia-ammónium (mg/l)
1	0,61	0,17	0,03	0,12	0,06	0,09
10	0,19	0,05	0,01	0,04	0,02	0,03
20	0,14	0,04	0,01	0,03	0,01	0,02
50	0,09	0,02	0,00	0,02	0,01	0,01
100	0,06	0,02	0,00	0,01	0,01	0,01
200	0,04	0,01	0,00	0,01	0,00	0,01
500	0,03	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00
1000	0,02	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
1500	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2000	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2500	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3000	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3450	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5000	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

11.8.2-5. táblázat: Számított hosszmenti koncentráció növekmény normál üzemmód esetén, Duna vízhozam 579 m³/s (20 000 évente visszatérő szélsőséges kisvízhozam)

Távolság a bevezetési helytől folyásirányban (m)	Duna vízhozam 579 m³/s (20 000 évente visszatérő szélsőséges kisvízhozam) Számított maximális (Duna jobb partja menti) szennyezőanyag koncentráció növekmények						
	Összes vas (mg/l)	Összes réz (mg/l)	Összes mangán (mg/l)	Összes ezüst (mg/l)	Összes higany (mg/l)	Összes cink (mg/l)	Összes kadmium (mg/l)
1	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
10	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
20	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
50	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
100	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
200	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
500	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
1000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
1500	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
2000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
2500	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
3000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
3450	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
5000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

11.8.2-6. táblázat: Számított hosszmenti koncentráció növekmény normál üzemmód esetén, Duna vízhozam 579 m³/s (20 000 évente visszatérő szélsőséges kisvízhozam)

A tisztított szennyvízbevezetéstől 3450 m-re lévő távlati, Foktő-Barákai (Kalocsai) sérülékeny partiszűrésű ivóvízbázis, hidrogeológiai védőterület határánál (Duna 1522,8 fkm) figyelembe kell venni a 6/2009. (IV. 14.) KvVM-EüM-FVM együttes rendelet által előírt felszín alatti vízminőség-védelmi határértékeket is. A fenti táblázatokból (11.8.2-5. táblázat és 11.8.2-6. táblázat) jól látható, hogy vízminőségi szempontból a dikromátos oxigénfogyasztás (KOI_k) a mértékadó, vagyis a terheléssel leginkább érintett vízminőségi paraméter.

500 m-re a bevezetéstől (melegvíz-csatorna dunai torkolata) - ami gyakorlatilag az ellenőrzési referenciaszelvény helyének felel meg - 0,03 mg/l-es KOI_k koncentráció növekmény várható, amit elhanyagolhatónak lehet tekinteni, „A felszíni víz vízszennyezettségi határértékeiről és azok alkalmazásának szabályairól” szóló 10/2010. (VIII. 18.) VM rendeletben szereplő határértékek alapján. Ugyanakkor figyelembe kell venni, hogy ez a koncentráció növekmény nem a teljes keresztszelvényre érvényes, hanem csak a Duna jobb partjától (a víztest belseje felé) számított ~25 m-es Duna víztest szakaszon, illetve területen belül. A számítás alapján megállapítható, hogy a - FEVI adatbázis: Duna, Dunaföldvár törzshálózati szelvényében 2006-2011. évben mért - átlagkoncentrációhoz képest vízminőségi osztály változás nem várható. Ez az állapot, a vízjogi üzemeltetési engedéllyel rendelkező szennyvíztisztító telep, engedélyes terhelési kapacitásával (1870 m³/nap) teljesen lefedett 1000 m³/nap mértékadó terhelés esetében alakul ki.

11.8.2.4.2 Elkeveredés-vizsgálat, a Duna sokéves átlagos vízhozama esetén

A következőkben láthatjuk a 10/2010. (VIII. 18.) VM rendelet szellemével összhangban lévő, azaz a felszíni víztestek átlagos vízszennyezettségi állapotára jellemző (így éves átlagos Duna vízhozammal jellemezhető) minősítéshez tartozó elkeveredés-vizsgálat eredményeit.

Átlagos Duna vízhozam esetén (2300 m^3/s) a számított koncentráció növekmények lényeges kedvezőbben alakulnak (lásd 11.8.2-7. táblázat és 11.8.2-8. táblázat). Ebben az esetben a csóva szélessége 30 m - 40 m a jobb parttól (a víztest belseje felé mérve 500 m-re a bevezetési helytől) mérve, a kialakuló maximális koncentrációk pedig elhanyagolhatók, mind a Duna víztest fizikai – kémiai komponensei szerinti vízminőségi osztályba sorolása, mind pedig a felszín alatti vizek (ivóvízbázisok) potenciális szennyezése szempontjából. Vízminőségi osztályváltás nem valószínűsíthető.

Távolság a bevezetési helytől folyásirányban (m)	Duna vízhozam 2300 m^3/s (sokéves átlagos vízhozam) Számított maximális (Duna jobb partja menti) szennyezőanyag koncentráció növekmények					
	KOI_K (mg/l)	BOI_5 (mg/l)	SZOE (mg/l)	Összes nitrogén (mg/l)	Összes foszfor (mg/l)	Ammónia-ammónium (mg/l)
1	0,14	0,04	0,01	0,03	0,02	0,02
10	0,05	0,01	0,00	0,01	0,00	0,01
20	0,03	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00
50	0,02	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
100	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
200	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
500	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1000	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1500	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2000	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2500	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3000	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3450	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5000	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

11.8.2-7. táblázat: Számított hosszmenti koncentráció növekmény normál üzemmód esetén, Duna vízhozam 2300 m^3/s (sokéves átlagos Duna vízhozam)

Távolság a bevezetési helytől folyásirányban (m)	Duna vízhozam 2300 m^3/s (sokéves átlagos vízhozam) Számított maximális (Duna jobb partja menti) szennyezőanyag koncentráció növekmények						
	Összes vas (mg/l)	Összes réz (mg/l)	Összes mangán (mg/l)	Összes ezüst (mg/l)	Összes higany (mg/l)	Összes cink (mg/l)	Összes kadmium (mg/l)
1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
10	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
20	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
50	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
100	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
200	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
500	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
1000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
1500	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
2000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
2500	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
3000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
3450	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
5000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

11.8.2-8. táblázat: Számított hosszmenti koncentráció növekmény normál üzemmód esetén, Duna vízhozam 2300 m^3/s (sokéves átlagos Duna vízhozam)

A normál üzemállapotra elvégzett számítások alapján megállapítható, hogy átlagos dunai vízhozamok esetén az elkeveredett tisztított szennyvíz nem okoz vízminőség osztályromlást, továbbá a felszín alatti ivóvízbázisokra érvényben lévő vízminőségi előírásokat is kielégíti, mind az építés alatti, mind pedig az üzemeltetés alatti teljes időszakban.

11.8.2.5 A szennyvíztisztító telep haváriás üzemelésének elkeveredés-vizsgálata

A tisztított szennyvíz elkeveredési számításait havária esetére is elvégeztük, melynek eredményét a következő táblázatokban összegezzük. Ebben az esetben feltételeztük, hogy a szennyvíztelepre befolyó tisztítatlan kommunális szennyvíz (1000 m³/nap), tisztítás nélkül folyik bele a Dunába. A számítások során az elvezetett nyers szenyvíz koncetrációját az elmúlt két évben mért legmagasabb koncentráció értékkel vettük figyelembe. Az alábbi 11.8.2-9. táblázat és 11.8.2-10. táblázat, az 579 m³/s-os, szélsőségesen kicsi (20 000 évente visszatérő) Duna vízhozam esetére mutatja meg, a hossz-szelvény mentén kialakuló maximális koncentráció-növekményeket. Az átlagos dunai vízhozam esetében a hossz-szelvény mentén számított koncentráció-növekményeket a 11.8.2-11. táblázat és a 11.8.2-12. táblázat foglalja össze.

Távolság a bevezetési helytől folyásirányban (m)	Duna vízhozam 579 m³/s (20 000 évente visszatérő szélsőséges kisvízhozam) Számított maximális (Duna jobb partja menti) szennyezőanyag koncentráció növekmények (mg/l)					
	KOI_K (mg/l)	BOI_5 (mg/l)	SZOE (mg/l)	Ammónia-ammónium (mg/l)	Összes Nitrogén (mg/l)	Összes Foszfor (mg/l)
1	27,70	9,43	1,49	2,07	2,98	0,62
10	8,76	2,98	0,47	0,65	0,94	0,20
20	6,19	2,11	0,33	0,46	0,67	0,14
50	3,92	1,33	0,21	0,29	0,42	0,09
100	2,77	0,94	0,15	0,21	0,30	0,06
200	1,96	0,67	0,11	0,15	0,21	0,04
500	1,24	0,42	0,07	0,09	0,13	0,03
1000	0,88	0,30	0,05	0,07	0,09	0,02
1500	0,72	0,24	0,04	0,05	0,08	0,02
2000	0,62	0,21	0,03	0,05	0,07	0,01
2500	0,55	0,19	0,03	0,04	0,06	0,01
3000	0,51	0,17	0,03	0,04	0,05	0,01
3450	0,47	0,16	0,03	0,04	0,05	0,01
5000	0,39	0,13	0,02	0,03	0,04	0,01

11.8.2-9. táblázat: Hosszmenti koncentráció növekmény havária esetén, Duna vízhozam 579 m³/s

Távolság a bevezetési helytől folyásirányban (m)	Duna vízhozam 579 m³/s (20 000 évente visszatérő szélsőséges kisvízhozam) Számított maximális (Duna jobb partja menti) szennyezőanyag koncentráció növekmények (mg/l)						
	Összes vas (mg/l)	Összes réz (mg/l)	Összes mangán (mg/l)	Összes ezüst (mg/l)	Összes higany (mg/l)	Összes cink (mg/l)	Összes kadmium (mg/l)
1	0,077	0,006	0,004	0,000	0,000	0,030	0,000
10	0,024	0,002	0,001	0,000	0,000	0,010	0,000
20	0,017	0,001	0,001	0,000	0,000	0,007	0,000
50	0,011	0,001	0,001	0,000	0,000	0,004	0,000
100	0,008	0,001	0,000	0,000	0,000	0,003	0,000
200	0,005	0,000	0,000	0,000	0,000	0,002	0,000
500	0,003	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000
1000	0,002	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000
1500	0,002	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000
2000	0,002	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000
2500	0,002	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000
3000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000
3450	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000
5000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

11.8.2-10. táblázat: Hosszmenti koncentráció növekmény havária esetén, Duna vízhozam 579 m³/s

Megjegyezzük, hogy a tisztítatlan szennyvízben a nitrát gyakorlatilag zérus koncentrációjú, így annak a haváriás (tisztítatlan) szennyvízterheléskor nincs befolyása a Duna víztest vízminőségi állapotára.

A fenti tisztítatlan szennyvíz-kibocsátási havária helyzetek csak időben rövid ideig rontják a Duna víztest, jobb parti sávja környezetében a vízminőségi mutatókat, a szennyvíztisztító telep működési üzemzavarának helyreállításával a negatív hatás megszűnik.

A szennyvízbevezetés hatására, a szennyvízbevezetés (Duna 1526+250 fkm) alatti Duna szakaszon üzemelő sérülékeny- és távlati, partiszűrésű ivóvízbázisok 50 éves elérési idejű védőterületei - a felszín alatti vizekre előírt vízminőségi határértékek sérülése tekintetében -, még szélsőséges dunai kisvízhozam esetén (579 m³/s), haváriás terhelés (1000 m³/nap tisztítatlan szennyvízkibocsátás) mellett sem veszélyeztetettek a Duna víztest felöl.

Távolság a bevezetési helytől folyásirányban (m)	Duna vízhozam 2 300 m³/s (sokéves átlagos Duna vízhozam) Számított maximális (Duna jobb partja menti) szennyezőanyag koncentráció növekmények (mg/l)					
	KOI_K (mg/l)	BOI_5 (mg/l)	SZOE (mg/l)	Ammónia-ammónium (mg/l)	Összes Nitrogén (mg/l)	Összes Foszfor (mg/l)
1	15,22	5,18	0,82	1,14	1,64	0,34
10	4,81	1,64	0,26	0,36	0,52	0,11
20	3,40	1,16	0,18	0,25	0,37	0,08
50	2,15	0,73	0,12	0,16	0,23	0,05
100	1,52	0,52	0,08	0,11	0,16	0,03
200	1,08	0,37	0,06	0,08	0,12	0,02
500	0,68	0,23	0,04	0,05	0,07	0,02
1000	0,48	0,16	0,03	0,04	0,05	0,01
1500	0,39	0,13	0,02	0,03	0,04	0,01
2000	0,34	0,12	0,02	0,03	0,04	0,01
2500	0,30	0,10	0,02	0,02	0,03	0,01
3000	0,28	0,09	0,01	0,02	0,03	0,01
3450	0,26	0,09	0,01	0,02	0,03	0,01
5000	0,22	0,07	0,01	0,02	0,02	0,00

11.8.2-11. táblázat: Hosszmenti koncentráció növekmény havária esetén, Duna vízhozam 2 300 m³/s

Távolság a bevezetési helytől folyásirányban (m)	Duna vízhozam 2 300 m³/s (sokéves átlagos Duna vízhozam) Számított maximális (Duna jobb partja menti) szennyezőanyag koncentráció növekmények (mg/l)						
	Összes vas (mg/l)	Összes réz (mg/l)	Összes mangán (mg/l)	Összes ezüst (mg/l)	Összes higany (mg/l)	Összes cink (mg/l)	Összes kadmium (mg/l)
1	0,042	0,003	0,002	0,000	0,000	0,017	0,000
10	0,013	0,001	0,001	0,000	0,000	0,005	0,000
20	0,009	0,001	0,000	0,000	0,000	0,004	0,000
50	0,006	0,000	0,000	0,000	0,000	0,002	0,000
100	0,004	0,000	0,000	0,000	0,000	0,002	0,000
200	0,003	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000
500	0,002	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000
1000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000
1500	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
2000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
2500	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
3000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
3450	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
5000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

11.8.2-12. táblázat: Hosszmenti koncentráció növekmény havária esetén, Duna vízhozam 2 300 m³/s

Megjegyezzük, hogy a tervezett fejlesztés megvalósításának (Paks II. létesítése) időszakában és a jelenleg üzemelő atomerőművel való együttes üzemelésének idején (Paksi Atomerőmű + Paks II.), a szennyvíztisztító telep terhelése nem éri el (maximum 1 000 m³/nap-ra becsülhető), a vízjogi üzemeltetési engedélyben meghatározott szennyvíztisztítási kapacitás mértékét (1 870 m³/nap-ot).

11.9 PAKS II. ÜZEMELÉSÉNEK HATÁSAI A DUNÁRA

11.9.1 A NORMÁL ÜZEMELÉS

11.9.1.1 Várható változások leírása az áramlási sebességmező elemzése alapján

A meglévő 4 blokk (legfeljebb 100 m³/s) és a 2 új blokk (legfeljebb 132 m³/s) biztosítása a meglévő hidegvíz-csatorna mederbővítésével (mintegy 1,7 méteres mélyítésével és keresztszelvényének szélesítésével) történik. A vízkivételi mű a hidegvíz-csatornában valósul meg, így annak dunai áramlási térre és dunai mederre gyakorolt közvetlen hatása nincs, csak kismértékű közvetett hatással bír, a vízkivételi mű szivattyúinak és a rávezető hidegvíz-csatorna (feliszapolódás, kotrás) szakasz üzemelése miatt. Ez a közvetett hatás a jelenleg üzemelő erőmű által keltett hatásokhoz hasonlóan elenyésző területi kiterjedésű és időszakos jellegű.

A két új blokk melegvizének elvezetésére új melegvíz-csatorna meder készül, amelynek a dunai torkolatánál (Duna 1526+450 fkm) rekuperációs mű kerül kialakításra. A meglévő négy blokk melegvizét a meglévő melegvíz-csatorna vezeti a Dunába (1526+250 fkm, jobb part), a meglévő energiatörő műtárgyon keresztül. A melegvíz-csatorna torkolat tervezett kialakítása a rekuperációs erőműn keresztül közvetlenül érinti a Duna áramlási viszonyait és lokális mederváltozásait. Az új melegvíz-bevezetés a felvíz felé, a hidegvíz-csatorna torkolata alatt közvetlenül visszaduzzasztást okoz, mert megtöri a Duna parti sávjában kialakult, partvonallal közel párhuzamos áramlást. A hidegvíz-csatorna és az új melegvíz-bevezetés között egy, az óramutató járásával megegyező és egy azzal ellentétes irányú, közel vertikális tengelyű nagyléptékű örvények alakulnak ki, amelyek dinamikusan forognak, időnként örvényleválásokat okozva a Duna jobb parti partközeli sávjában. A melegvíz-bevezetés alatt, az óramutató járásával megegyező nagyléptékű örvény alakul ki, eltolva a Duna középvonala felé a melegvíz-csóvát. Ez is dinamikusan viselkedik, időnként örvények válnak le és sodródnak a Duna áramlásával a jobb parti sáv környezetében, illetve a Duna középvonala felé terjedően.

A legnagyobb vízkivételi vízhozam 2030. és 2032. évek között várható, 232 m³/s vízhozammal. A hatások az áramlásmódosító helyi hatásokban nyilvánulnak meg:

- a Dunából történő hidegvíz-kivezetés a Duna partközeli áramlási irányait módosítja, a vízkivezetés környezetében,
- az áramlási irány módosulása területén kis visszaduzzasztás és a sodorvonal helyzetének kismértékű módosulása várható,
- a Dunából történő hidegvíz-kivezetés alatt a Duna partközeli részén nagy léptékű, közel függőleges tengelyű nagyléptékű örvény alakul ki, mozgása során pulzálóan leváló örvényleválást eredményezve, amelyek a part közelében sodródnak a főáramlással, majd útjuk során disszipálódnak. Ezt a hatást erősíti az új melegvíz-bevezetés mintegy 200 méterrel feljebb történő kialakítása (a melegvíz-csatorna dunai torkolatához viszonyítva), a sodorvonalat a jobb part közeléből, a Duna középvonala felé tolja el. A kialakuló nagyléptékű örvények belsejében az áramlás pangó jellegű, ami a szállított lebegtetett hordalék kiülepedését, a holttér feliszapolódását eredményezheti.

A fenti áramlást módosító hatások a Duna kisvízi- és középvízi időszakában erősebben, markánsabban jelentkeznek, míg a Duna nagyvizeinek idején a hatások mérsékeltebbek, a dunai főáramlás dominál.

11.9.1.2 Szélsőséges dunai kis- és nagyvízi áramlási esetek 2D modellvizsgálata a Duna 1500-1530 fkm szakaszán

A Dunában történő mederbeli lefolyás, fenti permanens kisvízi- és árvízi modellvizsgálatait a Delft3D-Flow hidrodinamikai modell alkalmazásával, annak kétdimenziós (2D) mélységintegrált moduljával végeztük, a Duna szélsőséges - 20 000 évente visszatérő -, kis- és nagyvízi áramlási viszonyai mellett, a Duna 1500-1530 fkm mederszakaszára.

A vizsgált Duna-szakasz magába foglalja a meglévő és tervezett erőművi telephely felvízi- és alvízi szakaszait.

A számítási eredményeket az alábbiakban ismertetjük, az alábbi területi (Duna szakasz) bontásban:

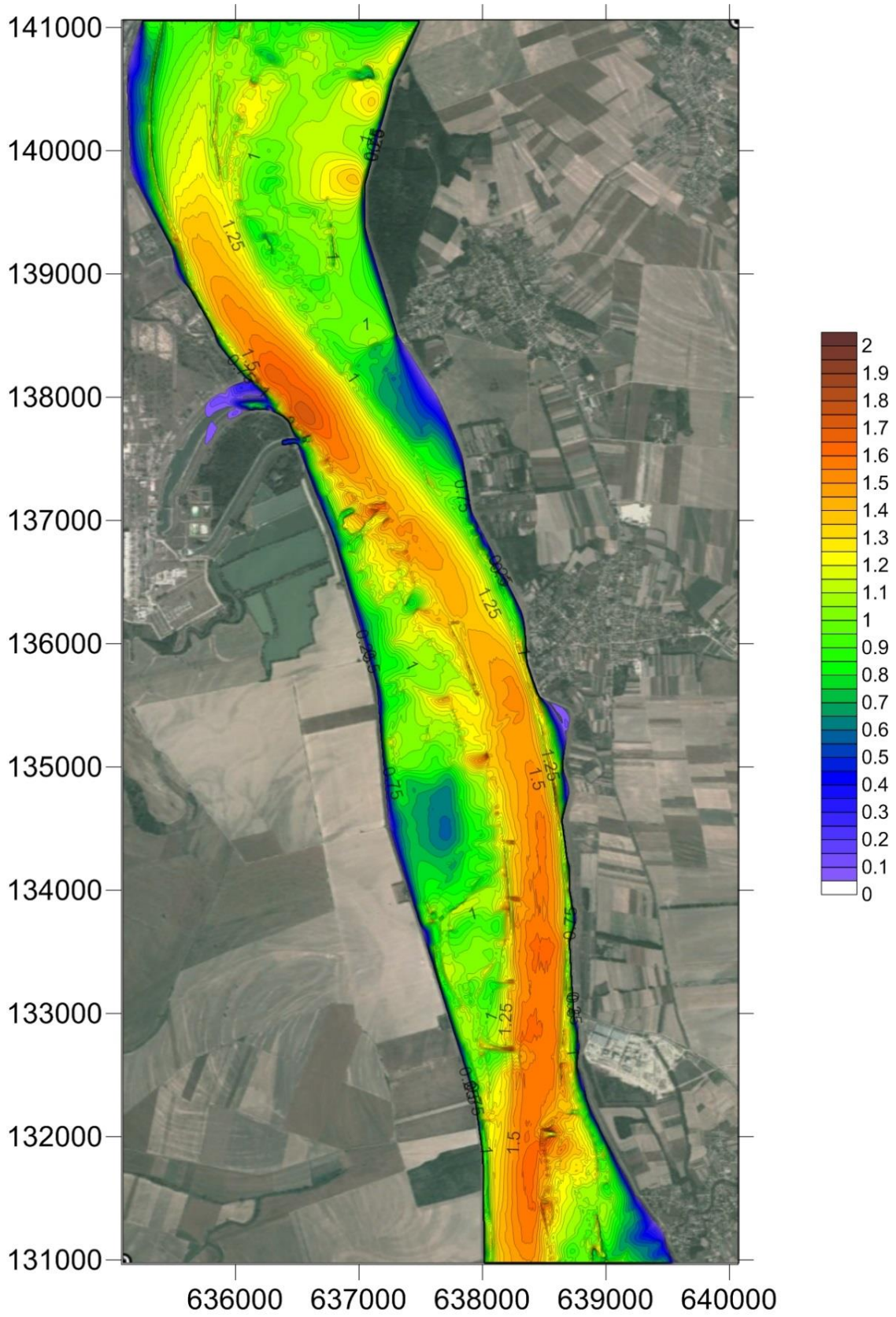
1.) *Duna 1519-1530 fkm (a számításokban: 1. szakasz)*
2.) *Duna 1509-1519 fkm (a számításokban: 2. szakasz)*
3.) *Duna 1500-1509 fkm (a számításokban: 3. szakasz)*

11.9.1.2.1 Szélsőséges nagyvízi 2D áramlási esetek vizsgálati eredményeinek bemutatása a mértékadó üzemi helyzetekben, földcsuszamlással

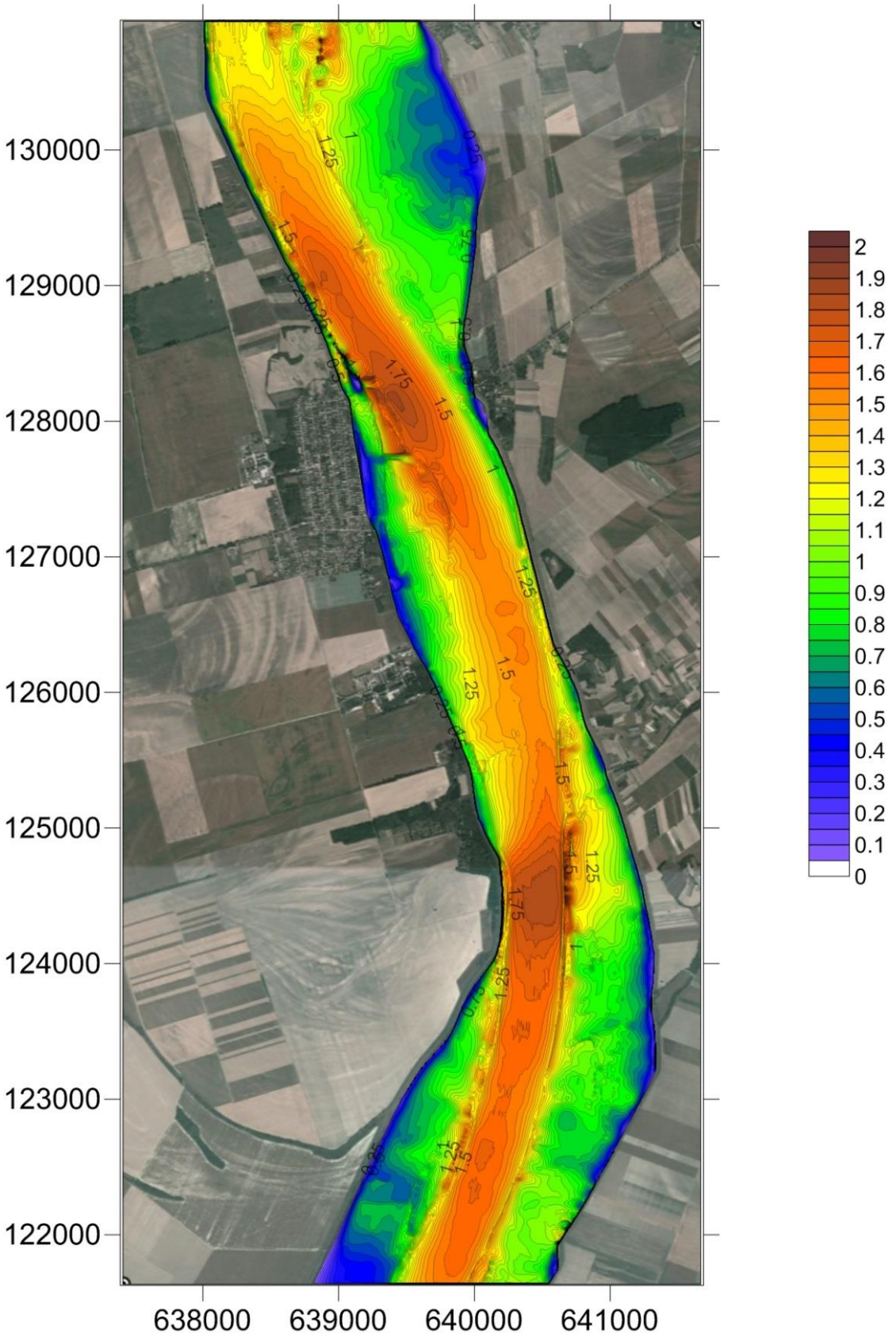
Az árvízi események vizsgálatakor a felső (vízhozam) peremfeltétel (Duna 1530 fkm) a Duna 20 000 évente egyszer előforduló Q=14 799 m³/s térfogatáramú árhullám (tetőzési, azaz kvázi permanens helyzetben). Az alsó vízszint, mint peremfeltétel (Duna 1500 fkm), a számítások során 81.55 mBf. A modellvizsgálati eredmények számított sebesség-eloszlását (sebesség abszolút érték eloszlását) az alábbi ábrák mutatják be.

11.9.1.2.1.1 Mértékadó normál üzemelés – Paksi Atomerőmű

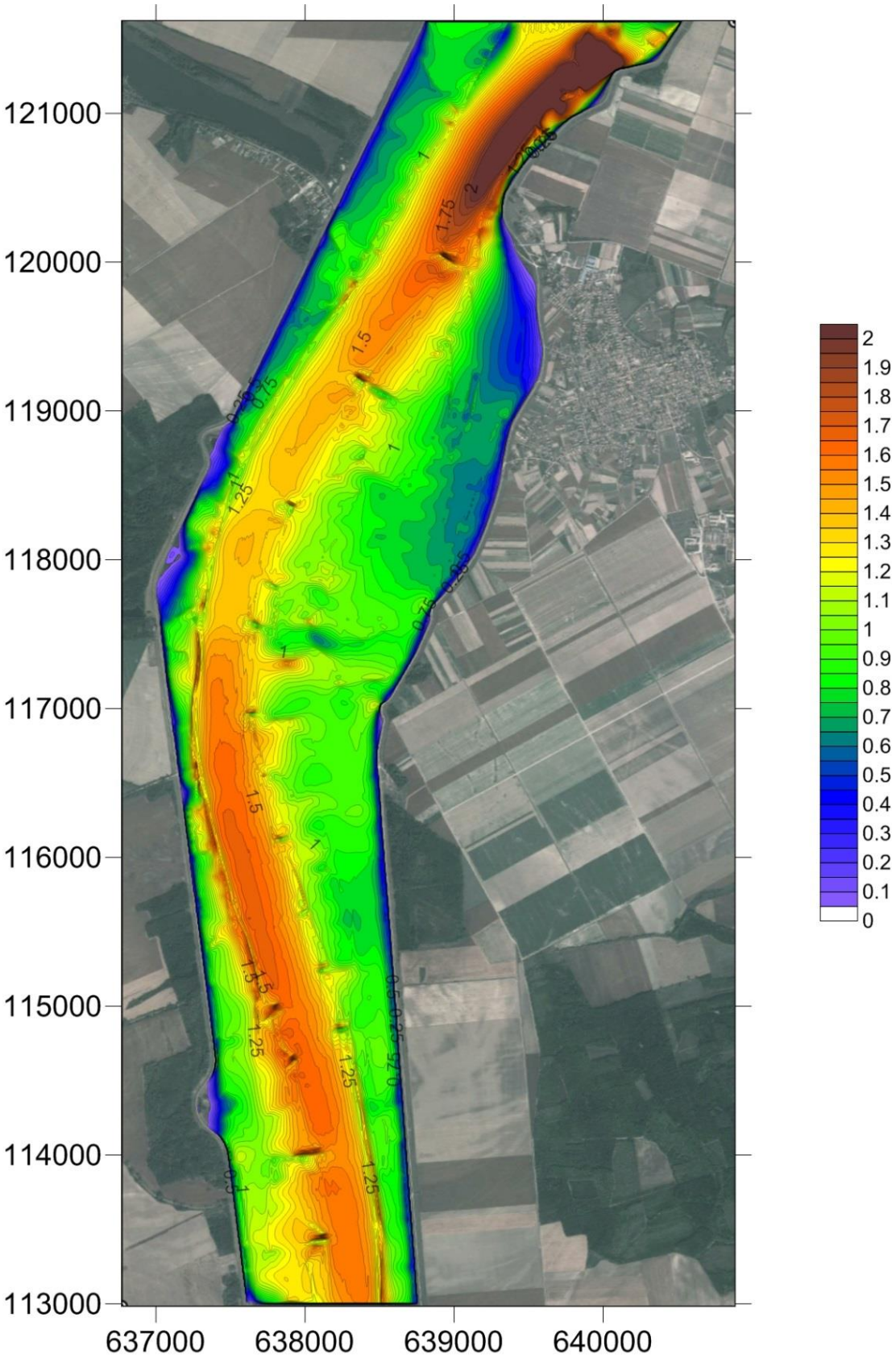
Szélsőséges, 20 000 évente visszatérő, permanens dunai nagy-vízhozammal, **Q_{Duna}=14 799 m³/s** és a maximális 100 m³/s hűtővízkivétellel (meglévő hidegvíz-csatornán keresztüli), visszavezetéssel az energiatörő műtárgyon keresztül. (11.9.1-1. ábra, 11.9.1-2. ábra és 11.9.1-3. ábra).



11.9.1-1. ábra: A Duna 1519-1530 fkm szakaszának abszolút áramlási sebesség-eloszlása [m/s] – Paksi Atomerőmű, szélsőséges nagyvíz ($Q_{20\,000év}$ = 14 799 m³/s, vízkivétel 100 m³/s) – Paksi Atomerőmű önállóan – EOV koordinátákkal



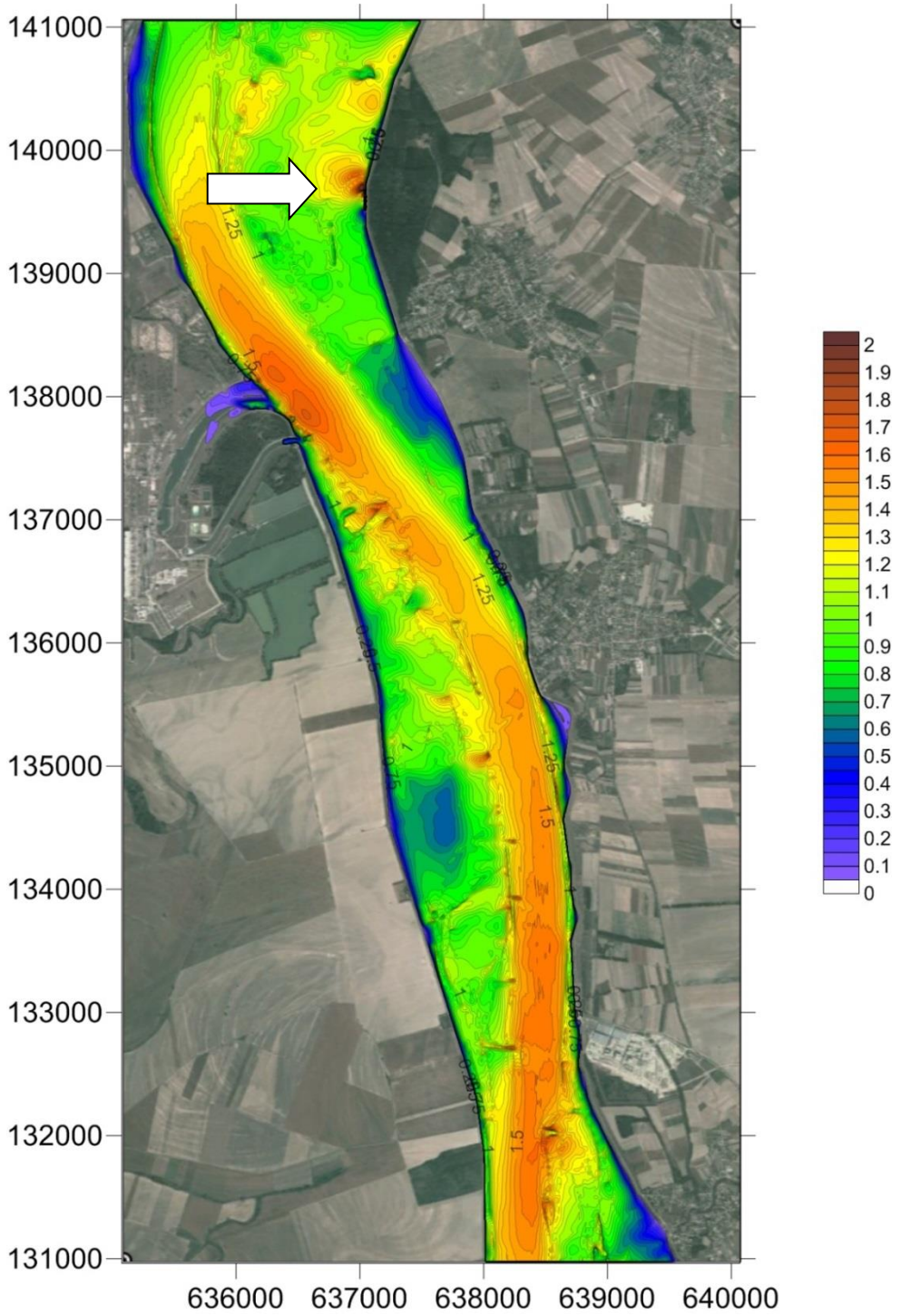
11.9.1-2. ábra: A Duna 1509-1519 fkm szakaszának abszolút áramlási sebesség-eloszlása [m/s] – Paksi Atomerőmű, szélsőséges nagyvíz ($Q_{20\,000év}$ = 14 799 m³/s, vízkivétel 100 m³/s) – Paksi Atomerőmű önállóan – EOV koordinátákkal



11.9.1-3. ábra: A Duna 1500-1509 fkm szakaszának abszolút áramlási sebesség-eloszlása [m/s] – Paksi Atomerőmű, szélsőséges nagyvíz ($Q_{20\,000év}$ = 14 799 m³/s, vízkivétel 100 m³/s) – Paksi Atomerőmű önállóan – EOV koordinátákkal

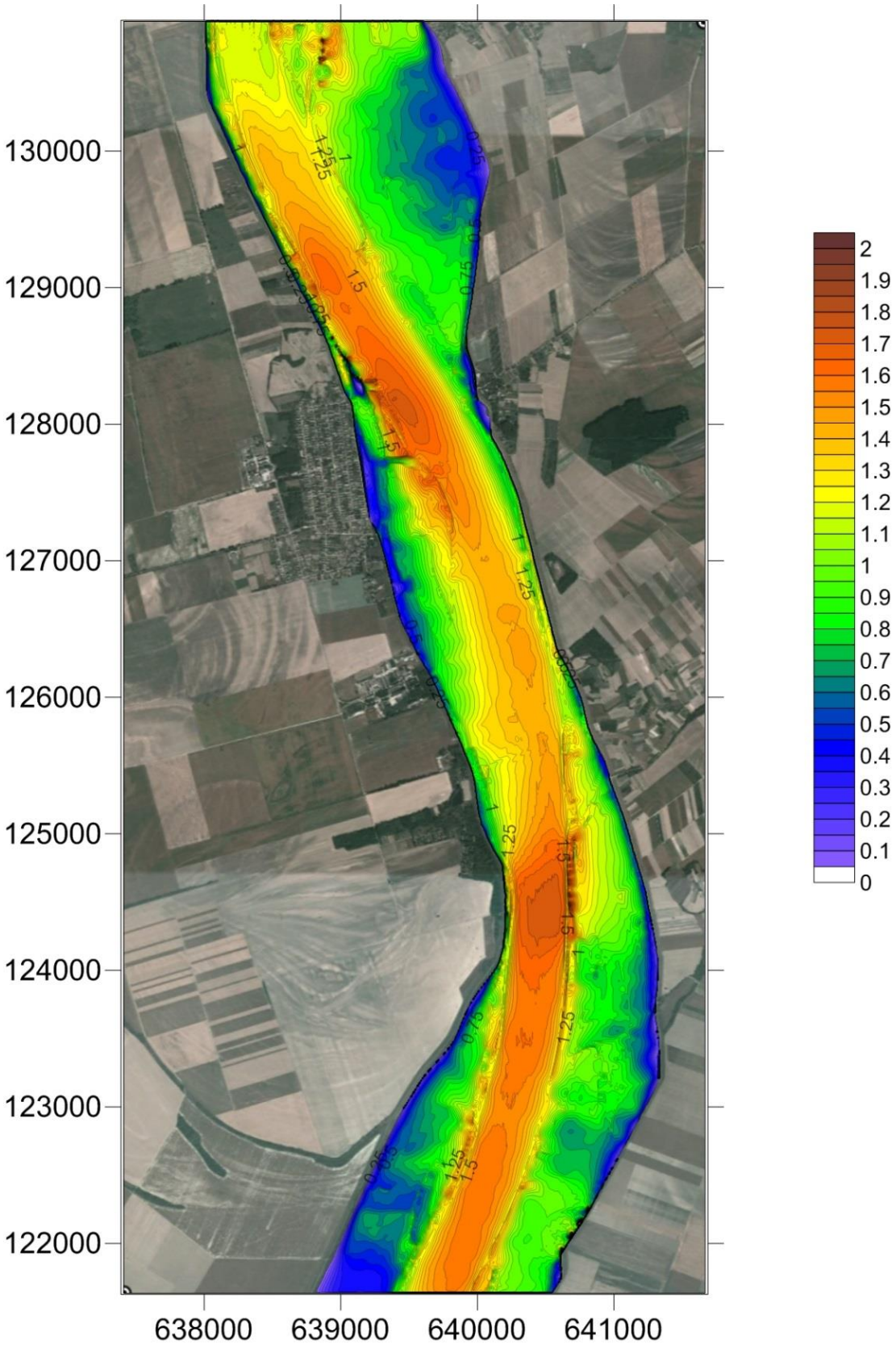
11.9.1.2.1.2 Mértékadó normál üzemelés, felvízi töltésszakadással – Paksi Atomerőmű

A dunai vízkivétel feletti, Duna bal parti töltésszakadásának (vagy töltésátvágásának) hatásvizsgálata - szélsőséges (20 000 évente visszatérő vízhozam, **Q_{Duna}=14 799 m³/s**) árvízi vízhozam esetén, az árvízvédelmi biztonság alakulására, a telephely környezetében. (11.9.1-4. ábra, 11.9.1-5. ábra és 11.9.1-6. ábra).

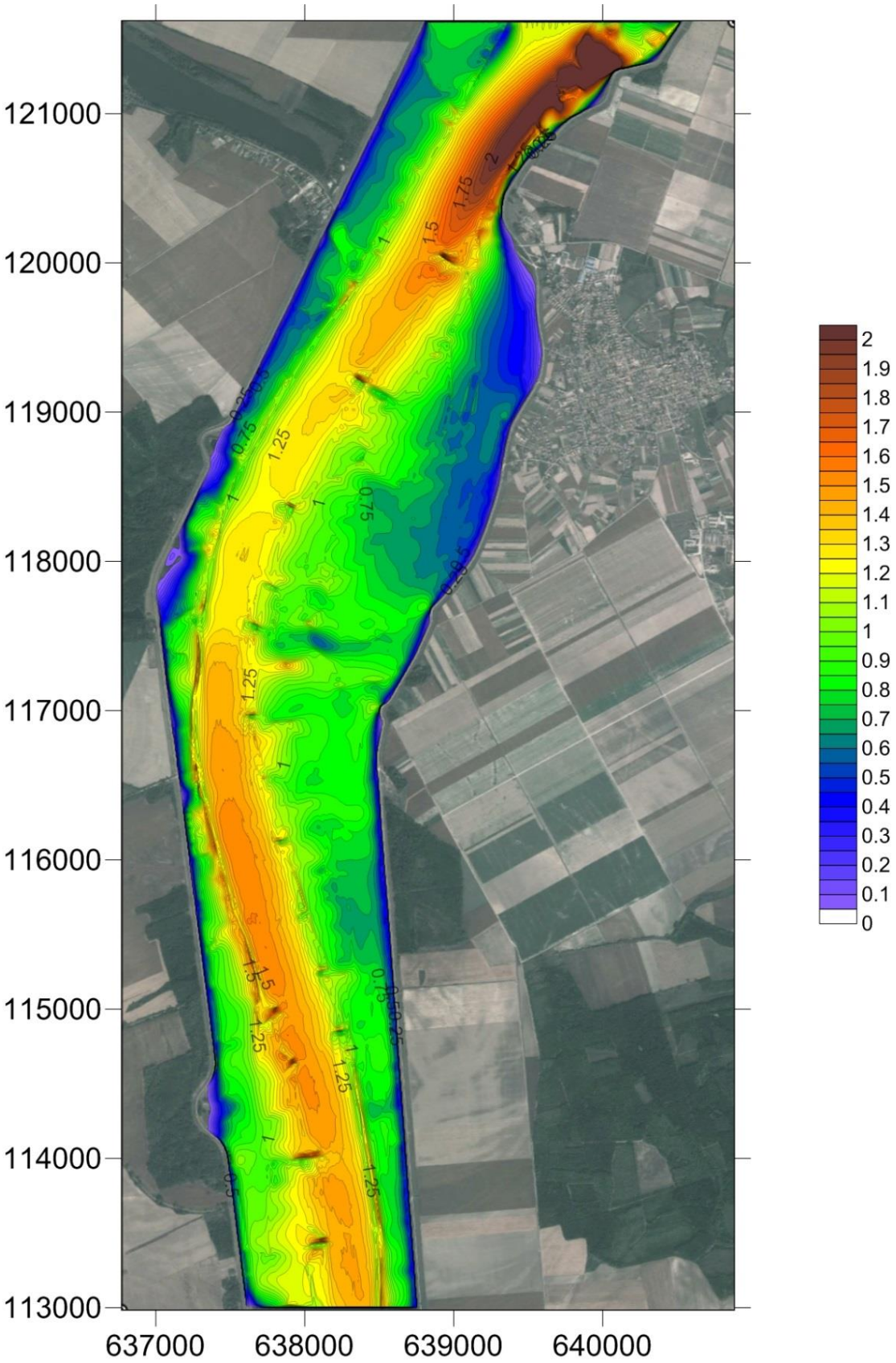


Megjegyzés:
a nyíl a 100 m széles szakadás helyét mutatja

11.9.1-4. ábra: A Duna 1519-1530 fkm szakaszának abszolút áramlási sebesség-eloszlása [m/s] – Paksi Atomerőmű, felvízi töltésszakadással, a kifolyó térfogatáram 1 200 m³/s, szélsőséges nagyvíz ($Q_{20\ 000év}$ = 14 799 m³/s, vízkivétel 100 m³/s) – EOV koordinátákkal



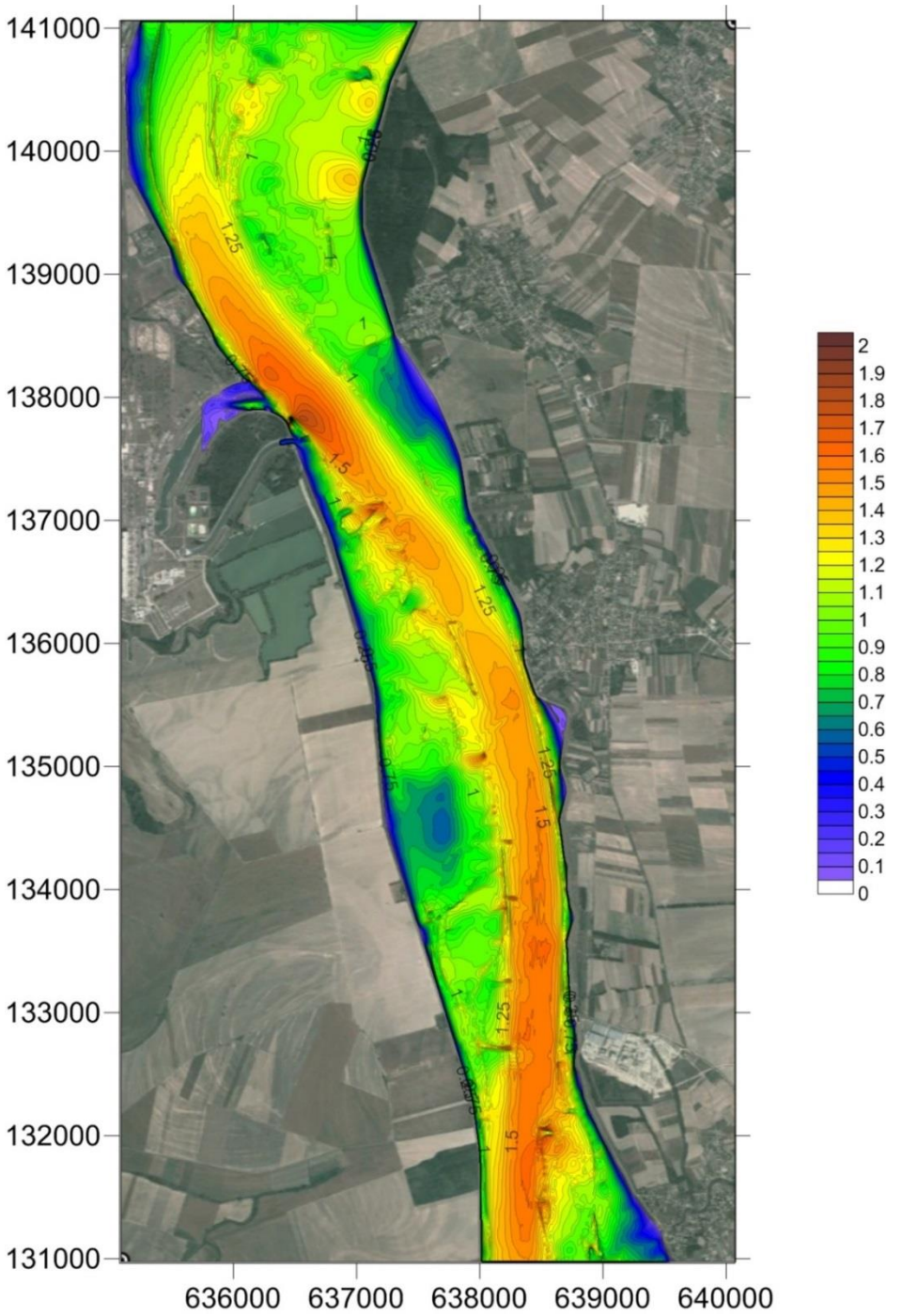
11.9.1-5. ábra: A Duna 1509-1519 fkm szakaszának abszolút áramlási sebesség-eloszlása [m/s] – Paksi Atomerőmű, felvízi töltésszakadással, a kifolyó térfogatáram 1 200 m³/s, szélsőséges nagyvíz ($Q_{20\ 000év}$ = 14 799 m³/s, vízkivétel 100 m³/s) – EOV koordinátákkal



11.9.1-6. ábra: A Duna 1500-1509 fkm szakaszának abszolút áramlási sebesség-eloszlása [m/s] – Paksi Atomerőmű, felvízi töltésszakadással, a kifolyó térfogatáram 1 200 m³/s ($Q_{20\ 000év}$ = 14 799 m³/s, vízkivétel 100 m³/s) – EOV koordinátákkal

11.9.1.2.1.3 Mértékadó normál üzemelés – Paksi Atomerőmű és Paks II. együttes üzeme

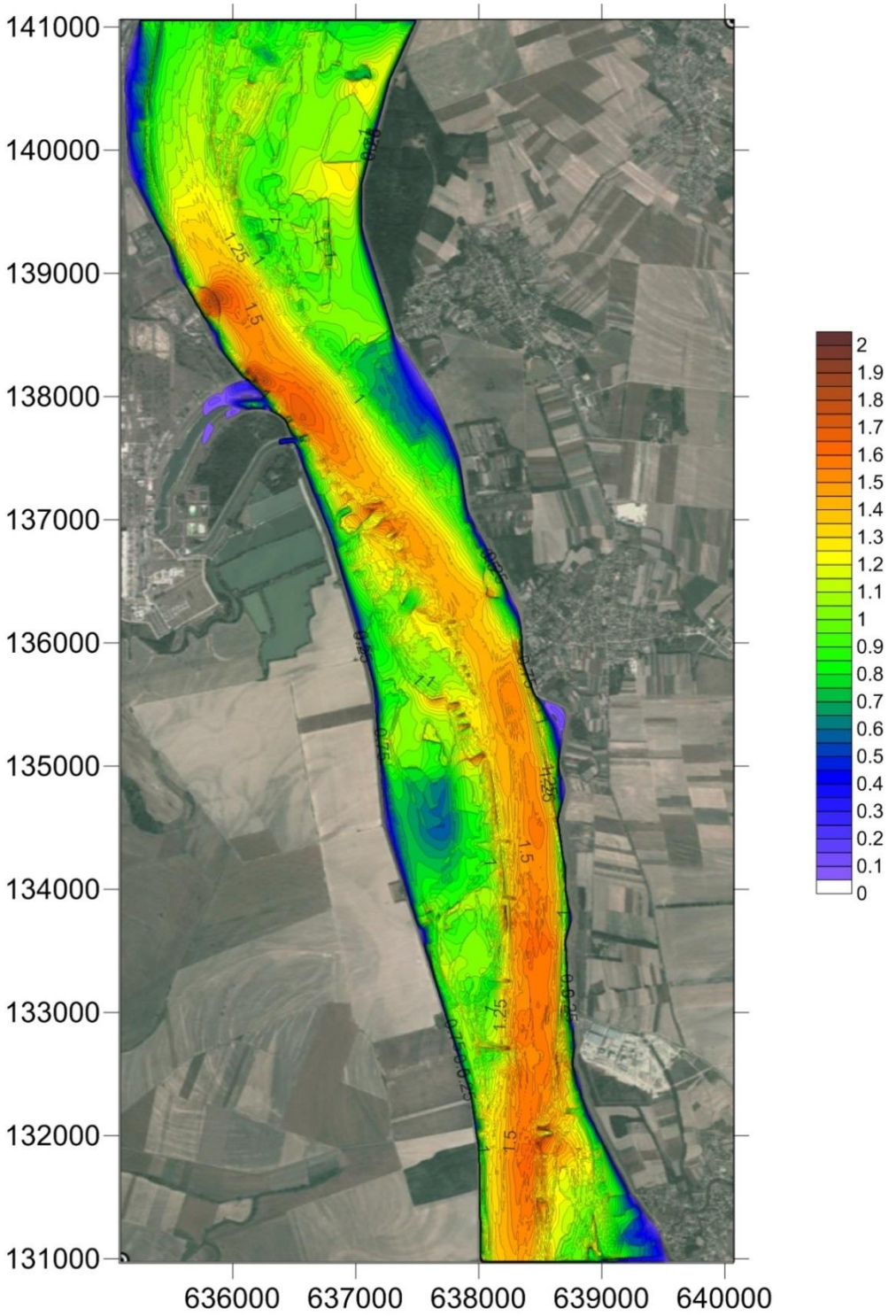
Szélsőséges, 20 000 évente visszatérő, permanens dunai árvízhozammal, **Q_{Duna}=14 799 m³/s** és a maximális 232 m³/s (a meglévő hidegvíz-csatorna tervezett bővítésével kialakítandó, Duna torkolati keresztszelvényen keresztüli) hűtővízkivétellel. A vízvisszavezetés egyrészt a meglévő melegvíz-csatornán keresztül, az energiatörő műtárgyon át történik a Dunába (jobb parti bevezetésként) maximum 100 m³/s meleg-vízhozammal, másrészt 200 méterrel az e felett tervezett, rekuperációs műtárgyon keresztül történő Dunába történő jobb parti bevezetésként, maximum 132 m³/s melegvíz-hozammal. (11.9.1-7. ábra)



11.9.1-7. ábra: A Duna 1519-1530 fkm szakaszának abszolút áramlási sebesség-eloszlása [m/s] – mértékadó normál üzemelés, szélsőséges nagyvíz ($Q_{20\,000év}$ = 14 799 m³/s, vízkivétel 232 m³/s) – Paksi Atomerőmű és Paks II. együttesen – EOV koordinátákkal

11.9.1.2.1.4 Mértékadó normál üzemelés, földcsuszamlással – Paksi Atomerőmű és Paks II. együttes üzeme - Havária esemény

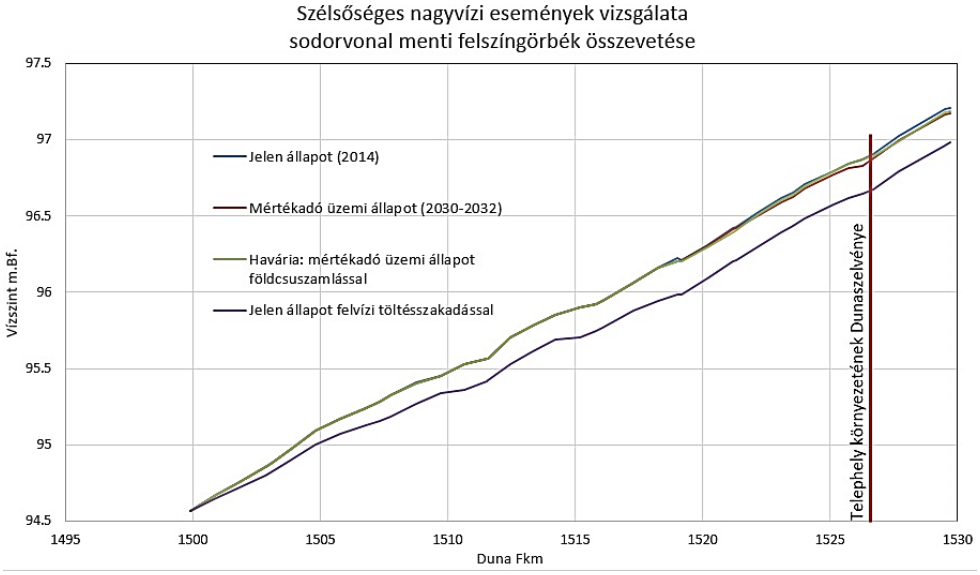
Mértékadó normál üzemelés vizsgálata, egy lehetséges kedvezőtlen földcsuszamlás, partfalomlás figyelembe vételével. (11.9.1-8. ábra).



11.9.1-8. ábra: A Duna 1519-1530 fkm szakaszának abszolút áramlási sebesség-eloszlása [m/s] –mértékadó normál üzemelés földcsuszamlással, szélsőséges nagyvíz ($Q_{20\,000év}$ = 14 799 m³/s, vízkivétel 232 m³/s) – Paksi Atomerőmű és Paks II. együttesen – EOV koordinátákkal

A fenti szélsőséges, permanens árvízi számítások eredményei az áramlási sebességeloszláson túlmenően a vízfelszín felületek eloszlásai formájában adódnak a számítási tartományon.

Az egyes modellváltozatok vízfelületeinek könnyebb összehasonlíthatósága érdekében az egyes vízfelületek sodorvonalaiban számított vízszint adatait, azaz a sodorvonali felszíngörbéket a 11.9.1-9. ábra szemlélteti.



11.9.1-9. ábra: Számított vízfelszín felületek sodorvonali metszeteinek (egydimenziós felszíngörbe a sodor mentén) összehasonlítása (Duna 1500-1530 fkm), a vizsgált szélsőséges (Q = 14799 m³/s) árvízi esetekben (Paksi Atomerőmű üzeme, Paksi Atomerőmű üzeme töltésszakadással, Paksi Atomerőmű és Paks II. együttesen: mértékadó üzemi állapot és havária)

A modellszámítások alapján a szélsőséges árvíz idején (20 000 évente visszatérő árvízhozam), a legkedvezőtlenebb körülmények között (a biztonság javára feltételeztük, hogy a Duna jelenlegi árvédelmi töltéseit a jövőben fejlesztik, illetve, hogy árvízvédekezéssel tartani tudják a levonuló árvíz töltések között tartását) 96,90 mBf szinten tetőzik a Duna vízszintje a meglévő- és tervezett telephely környezetében. Ha ennél a Duna vízszintnél a Duna jobb parti árvédelmi töltése átszakad, vagy a hidegvíz-csatorna és melegvíz-csatorna valamelyikének védtöltése megsérül, akkor az alábbi ábrán szemléltetett elöntési kép alakulhatna ki.

11.9.1-10. ábra: A Duna 96,90 mBf esetén kialakuló statikus elöntési képe

Láthatóan közvetlenül ez sem veszélyezteti sem a meglévő, sem pedig a tervezett fejlesztéssel érintett üzemi terület 97,00 mBf terepszintjét statikus elöntéssel, de ha a hullámzás valamilyen okból intenzifikálódik, akkor veszélyhelyzetet generálhat, ha a felszínen, vagy a közműalagutakon keresztül sérülékeny objektumokat érinthet. Emiatt a felszín közeli sérülékeny objektumokat aktív védelemmel (parapet fal, stb.) javasolt ellátni, a tervezett fejlesztés esetében pedig kiépíteni.Fenti szélsőséges eset haváriának tekintendő, ugyanis a Duna érintett szakaszán a jobb és bal parti töltések, koronaszintek emelésével járó fejlesztésére a jövőben hosszútávon sem lehet számítani, ugyanis a mértékadó (1 %-os, azaz 100 évente egyszer visszatérő) árvízszintek a töltéskoronák kiépítési szintje alatt maradnak.

Az egydimenziós haváriás árvízi modellvizsgálatoknál látható, hogy a töltésfejlesztések nélkül a Pozsony felöl érkező, maximális - töltések között maradó - szélsőséges árhullám esetén, földcsuszamlás, partfalomlás hatásait is tekintetbe véve a telephely környezetében kialakuló maximális Duna vízszint 96,30 mBf szint alatt marad. Ezért a telephely környezetében esetlegesen (pl. az árvízvédelmi töltés sérülése hatására), csak a 96,30 mBf vízszintű elöntés alakulhatna ki.

11.9.1-11. ábra: A Duna 96,30 mBf esetén kialakuló statikus elöntési képe

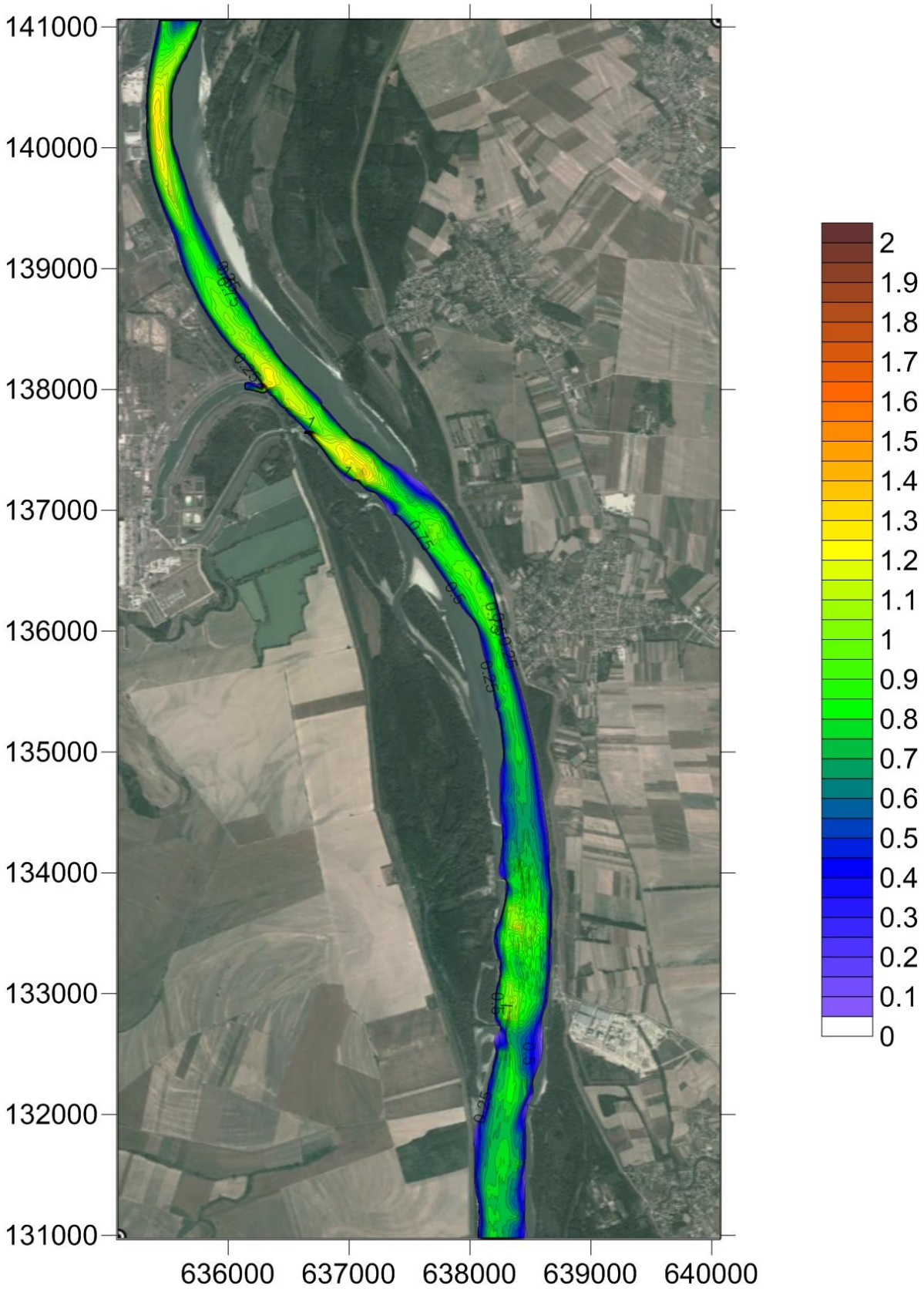
11.9.1.2.2 Szélsőséges kisvízi esetek 2D modellvizsgálati eredményei

A szélsőséges kisvízi események vizsgálatakor a felső (vízhozam) peremfeltétel (Duna 1530 fkm) a 20 000 évente egyszer előforduló, mértékadó Q=579 m³/s térfogatáramú vízhozam (permanens helyzetben).

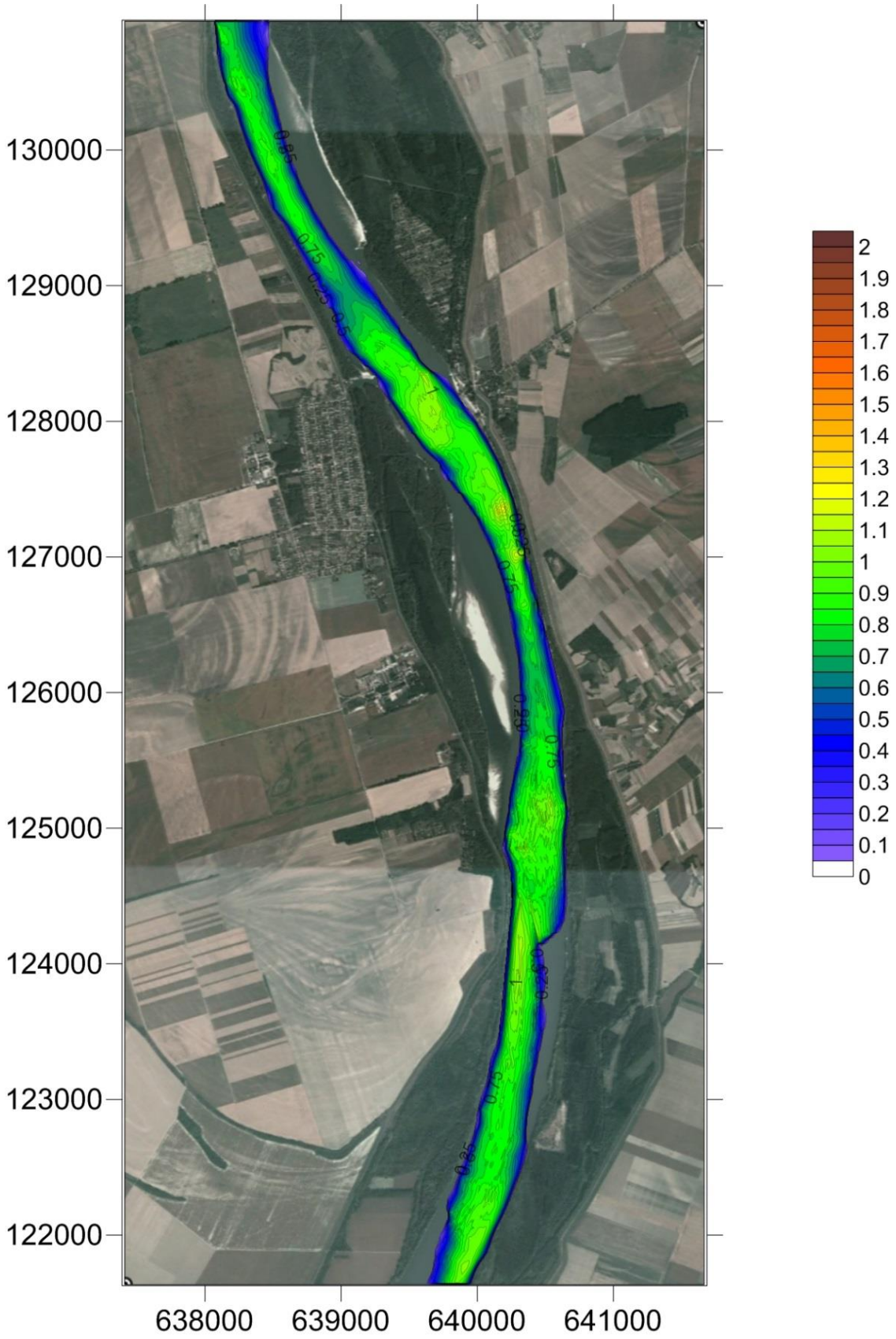
A modellvizsgálati eredmények számított sebesség-eloszlását (sebesség abszolút érték eloszlását) az alábbi ábrák mutatják be.

11.9.1.2.2.1 Jelen állapot, mértékadó normál üzemelés - Paksi Atomerőmű

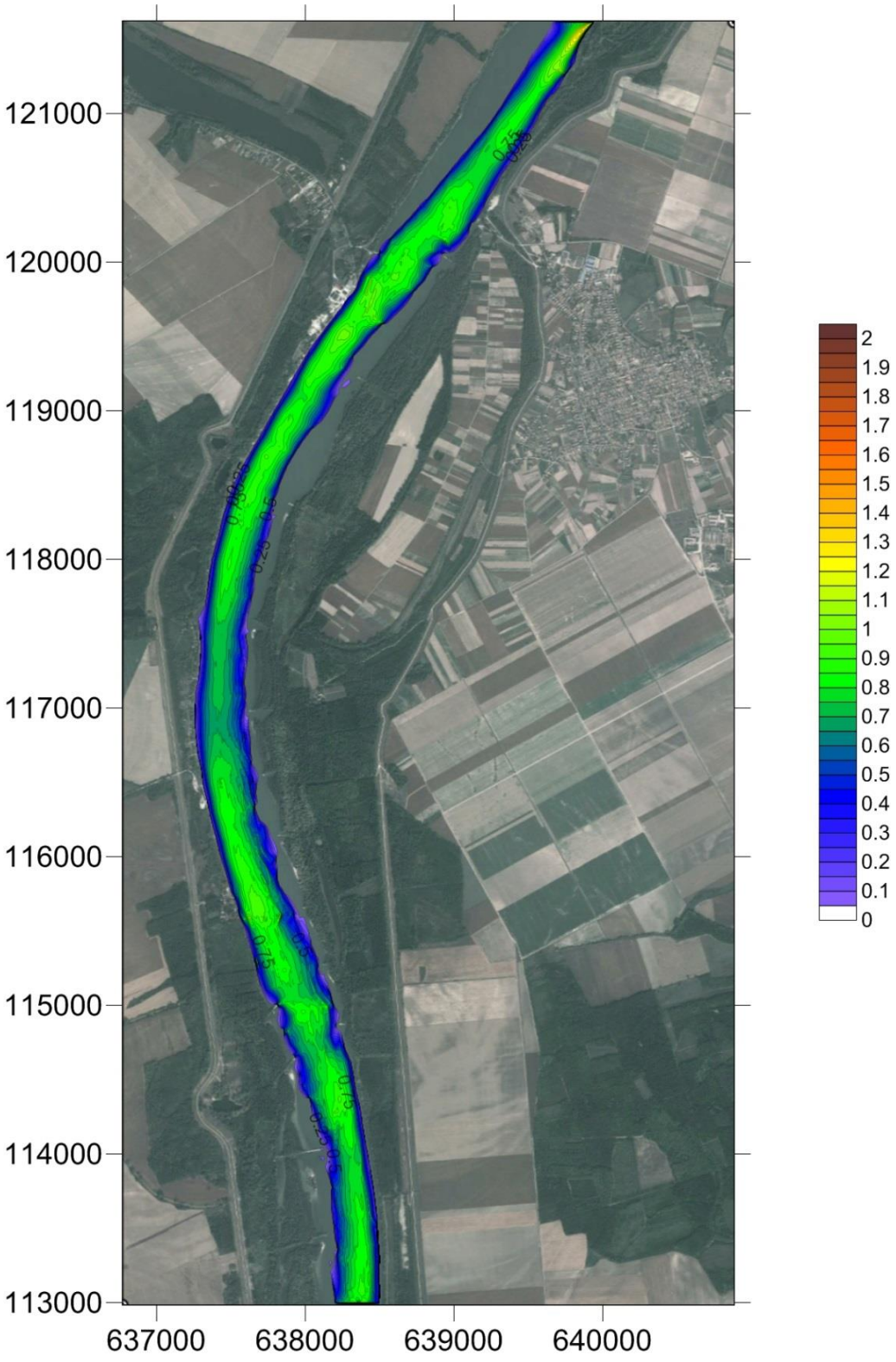
Szélsőséges, 20 000 évente visszatérő, permanens Dunai kisvízhozammal, $\mathbf{Q_{Duna}}$ **= 579 m³/s** és a maximális 100 m³/s hűtővízkivétellel (meglévő hidegvíz-csatornán keresztüli), visszavezetéssel az energiatörő műtárgyon keresztül (11.9.1-12. ábra, 11.9.1-13. ábra és 11.9.1-14. ábra).



11.9.1-12. ábra: A Duna 1519-1530 fkm szakaszának abszolút áramlási sebesség-eloszlása [m/s] – Paksi Atomerőmű önállóan, szélsőséges kisvíz ($Q_{20\,000év}$ = 579 m³/s, vízkivétel 100 m³/s) – EOV koordinátákkal



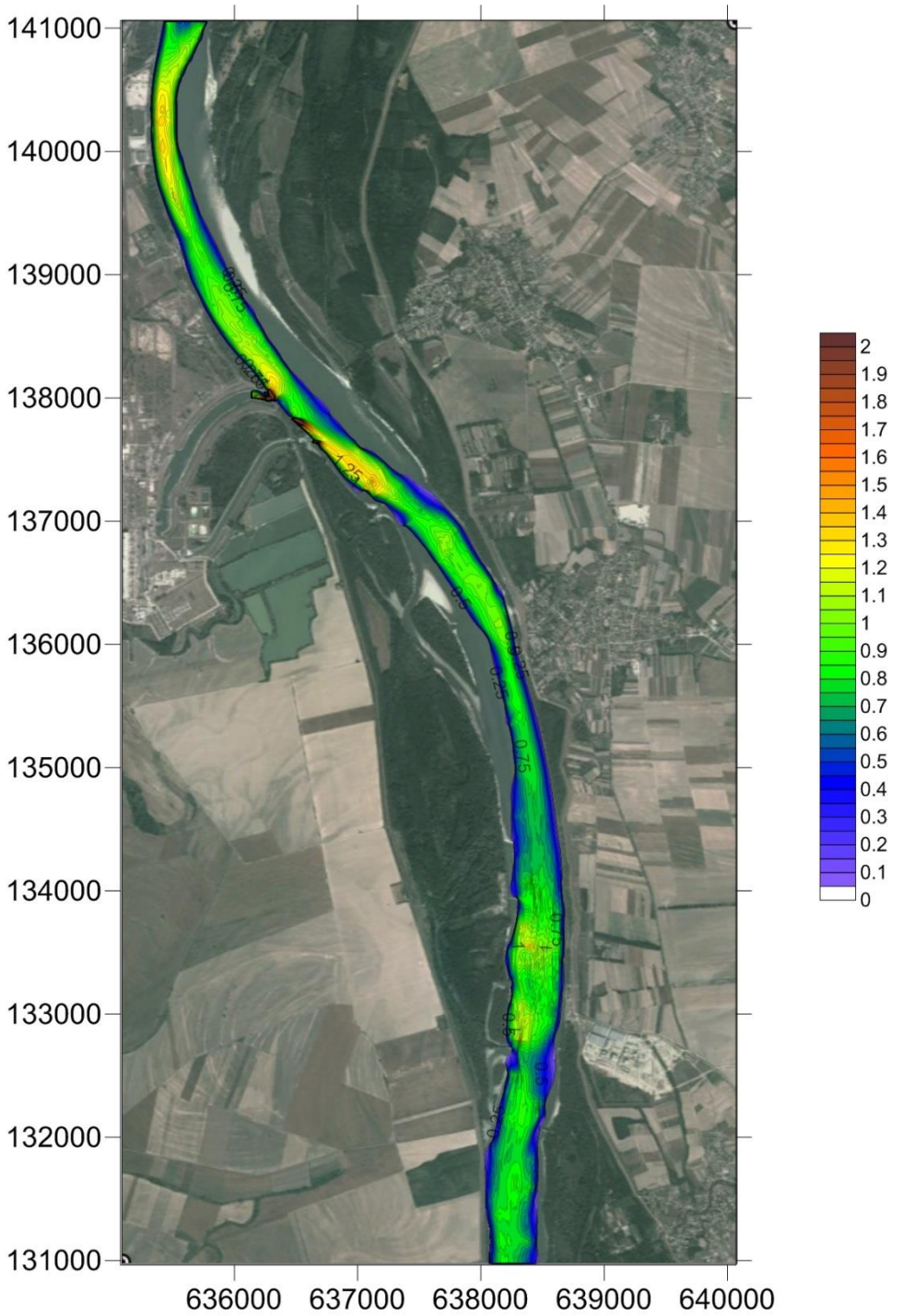
11.9.1-13. ábra: A Duna 1509-1519 fkm szakaszának abszolút áramlási sebesség-eloszlása [m/s] – Paksi Atomerőmű önállóan, szélsőséges kisvíz ($Q_{20\ 000év}$ = 579 m³/s, vízkivétel 100 m³/s) – EOV koordinátákkal



11.9.1-14. ábra: A Duna 1500-1509 fkm szakaszának abszolút áramlási sebesség-eloszlása [m/s] – Paksi Atomerőmű önállóan, szélsőséges kisvíz ($Q_{20\ 000év}$ = 579 m³/s, vízkivétel 100 m³/s) – EOV koordinátákkal

11.9.1.2.2.2 2030-2032. évek közötti mértékadó normál üzemelés – Paksi Atomerőmű és Paks II. együttesen

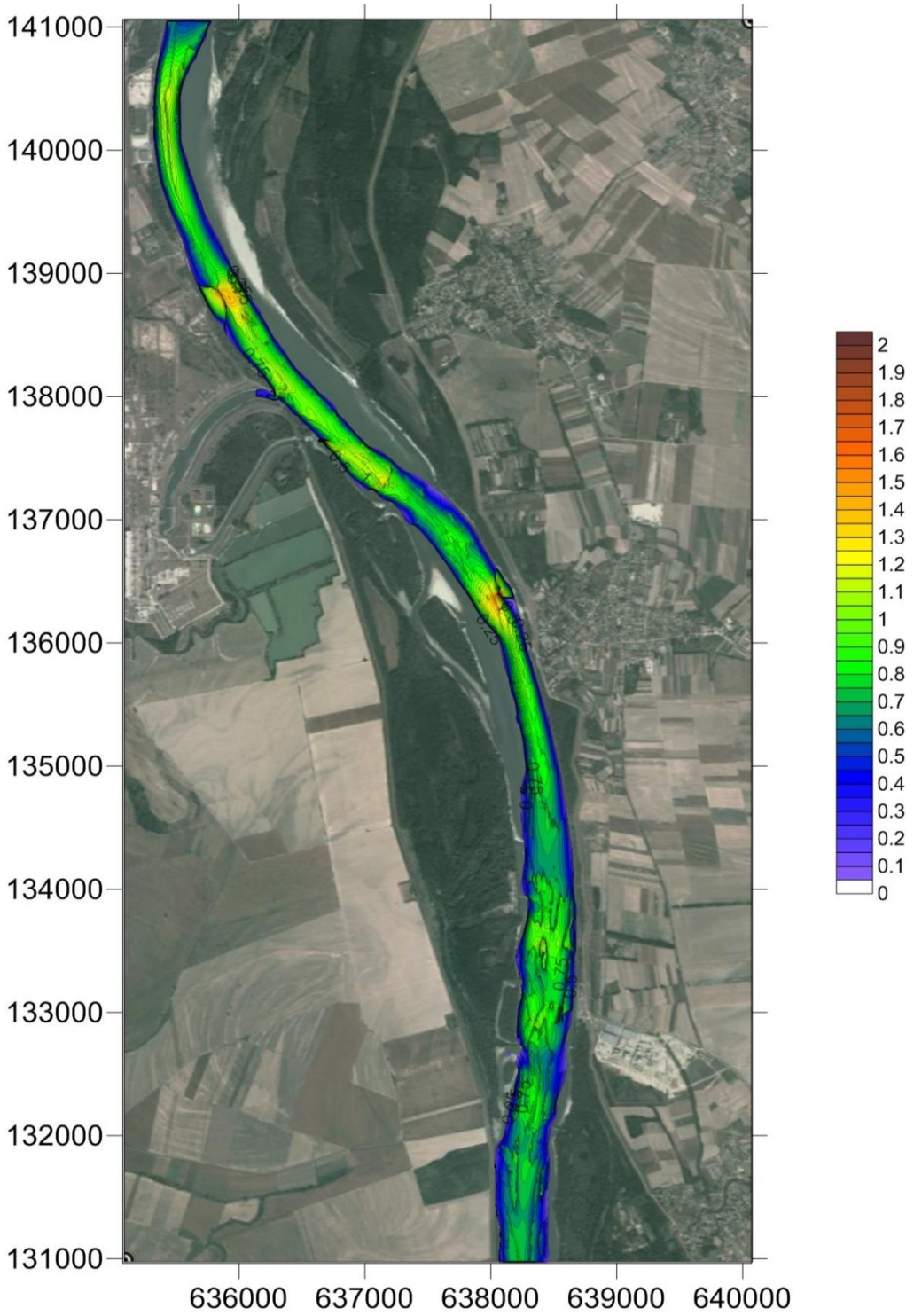
Szélsőséges, 20 000 évente visszatérő, permanens dunai kisvízhozammal, $\mathbf{Q_{Duna}}$ **= 579 m³/s** és a maximum 232 m³/s (a meglévő hidegvíz-csatorna tervezett bővítésével kialakítandó, Duna torkolati keresztszelvényen keresztüli) hűtővízkivétellel. A vízvisszavezetés egyrészt a meglévő melegvíz-csatornán keresztül, az energiatörő műtárgyon át történik a Dunába (jobb parti bevezetésként) maximum 100 m³/s meleg vízhozammal, másrészt 200 méterrel az e felett tervezett, rekuperációs műtárgyon keresztül történő Dunába történő, Duna jobb parti bevezetésként, maximum 132 m³/s melegvíz-hozammal (11.9.1-15. ábra).



11.9.1-15. ábra: A Duna 1519-1530 fkm szakaszának abszolút áramlási sebesség-eloszlása [m/s] – mértékadó üzemi állapot, szélsőséges kisvíz ($Q_{20\,000év}$ = 579 m³/s, vízkivétel 232 m³/s) – Paksi Atomerőmű és Paks II. együttesen – EOV koordinátákkal

11.9.1.2.2.3 Mértékadó normál üzemelés földcsuszamlással - Paksi Atomerőmű és Paks II. együttesen - Havária esemény

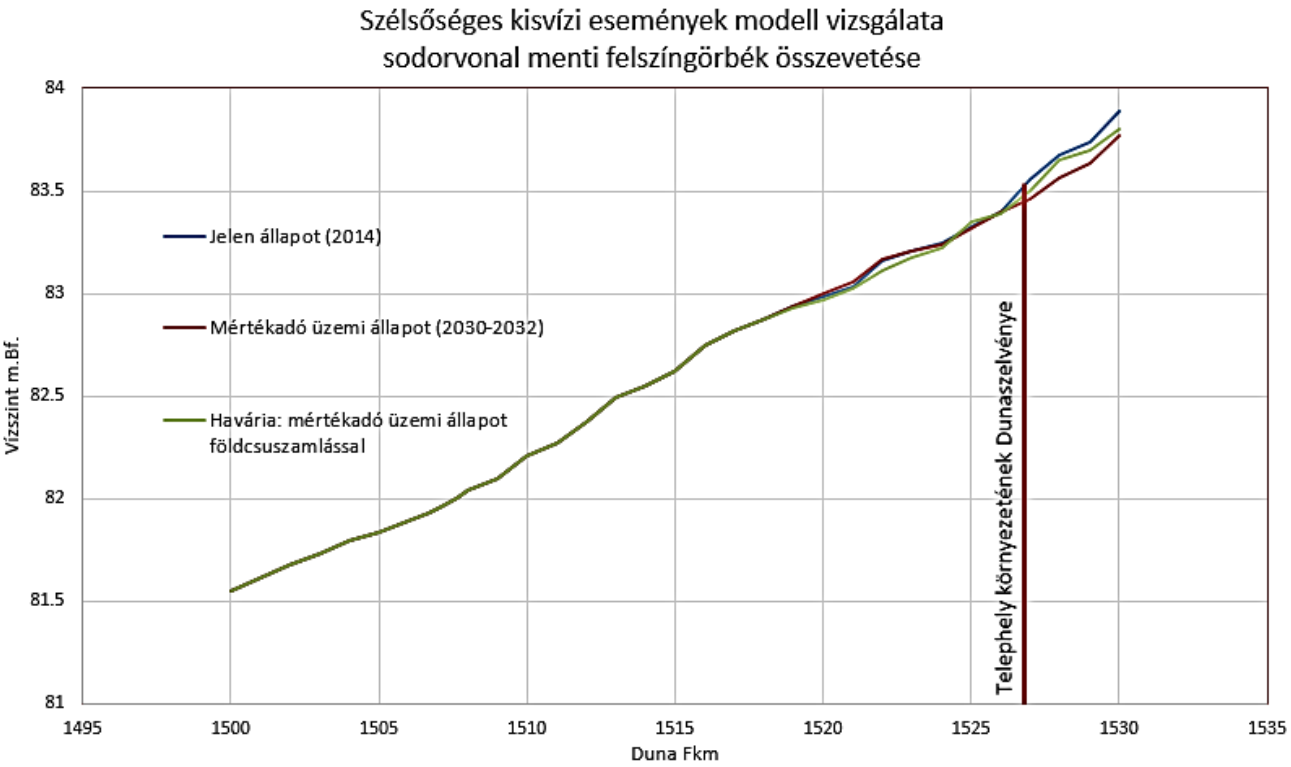
Mértékadó normál üzemelés vizsgálata, egy lehetséges kedvezőtlen földcsuszamlás, partfalomlás figyelembe vételével. (11.9.1-16. ábra).



11.9.1-16. ábra: A Duna 1519-1530 fkm szakaszának abszolút áramlási sebesség-eloszlása [m/s] –mértékadó üzemi állapot földcsuszamlással, szélsőséges kisvíz ($Q_{20\,000év}$ = 579 m³/s, vízkivétel 232 m³/s) – Paksi Atomerőmű és Paks II. együttesen – EOV koordinátákkal

A fenti szélsőséges, permanens kisvízi számítások eredményei az áramlási sebességeloszláson túlmenően a vízfelszín felületek eloszlásai formájában adódnak a számítási tartományon.

Az egyes modellváltozatok vízfelületeinek könnyebb összehasonlíthatósága érdekében az egyes vízfelületek sodorvonalaiban számított vízszint adatait, azaz a sodorvonali felszíngörbéket az alábbi ábra szemlélteti (11.9.1-17. ábra) mutatjuk be.



11.9.1-17. ábra: Számított vízfelszín felületek sodorvonali metszeteinek (egydimenziós felszíngörbe a sodor mentén) összehasonlítása (Duna 1500-1530 fkm), a vizsgált szélsőséges kisvízi (Q = 579 m³/s) esetekben (Paksi Atomerőmű üzeme, Paksi Atomerőmű és Paks II. együttes üzeme: mértékadó üzemi állapot és havária)

11.9.1.2.3 Szélsőséges kisvízi és nagyvízi esetek 2D hidrodinamikai hatásainak összefoglaló értékelése (Duna 1500 - 1530 fkm)

- Az alapállapotban (jelen állapot) 20 000 éves gyakoriságú árhullámok a Duna, kb. 0,5 méterrel alacsonyabb árvédelmi koronaszintű bal partján fognak gátkorona meghágási problémákat okozni. Ez a töltés koronamagasságának ismeretében nyúlgátakkal sem kivédhető hatás.
- Az erőmű keresztszelvényében, a jövőbeni töltésemelés esetén is a szélsőséges árvízszintek az meglévő és tervezett telephelyi terepszint (97 mBf) alatt maradnak.
- Ha feltételezzük a bal parti gátszakadást - amely „természetes módon”, vagy vészhelyzeti döntés nyomán jön létre, akkor annak hatása 20 cm alatt marad, a vizsgált szakasz felső peremén -, ebben az esetben az árhullám az erőmű meglévő és tervezett terepszintje alatt vonul le.
- A tervezett hűtővízkivétel-növelése - a bővítés megvalósulásával -, szélsőséges kisvízi esetben 12 cm alatt maradó vízszintcsökkenést okoz, nagyvízi hatása 3 cm alatt marad.
- A földcsuszamlásos változat a hidegvíz-csatorna fölött torlasztja, duzzasztja a vízszintet. A földcsuszamlás alatti szakaszon a szűkületben felgyorsuló vízmozgás miatt csökken a vízszint.
- A főmedret szűkítő földcsuszamlás hatása, vízszintnövelő és csökkentő (a földcsuszamlási hely felett, illetve alatt), mind nagyvízi, mind kisvízi körülmények között. A vízszintnövelő hatás kis-, és nagyvízi esetben elérheti az 5, illetve 3 cm-t.

11.9.1.3 A Duna várható áramlási- és morfodinamikai hatásainak jellemzése

Modellvizsgálati eredmények alapján megállapítható, hogy a morfodinamikai változások fő hajtóerejét a Duna sokéves átlagos vízhozama adja, a kisebb tartósságú árhullámok (nem-permanens folyamatok) ezt csak kismértékben perturbálják. Ezért a Duna kvázi permanens hidrodinamikai állapotában végezzük a mederváltozási folyamatok modellvizsálatait, a sokéves átlagos vízhozamra 2300 m³/s vízhozamra. Vizsgáljuk még több egymást követő nedves hidrológiai év mederváltozási folyamatait is, a Duna 3000 m³/s átlagos éves vízhozamára, a hatásnövekmények elemzése érdekében.

Az alábbi mértékadó helyzeteket vizsgáljuk:

Mértékadó üzemállapotok:

A.) Paksi Atomerőmű üzemelése (2014-2037)

Hűtővízkivétel, Q = 100 m³/s

B.) Paksi Atomerőmű és Paks II. együttes üzeme (2030-2032)

Hűtővízkivétel, Q = 132 m³/s + 100 m³/s = 232 m³/s

C.) Paks II. önálló üzemelése (2037-2085)

Hűtővízkivétel, Q = 132 m³/s

Hidrológiai időszakok (a Duna vízgyűjtőt érő éves csapadékösszegektől függő):

1. Átlagos mederbeli lefolyással rendelkező időszak (1 - 5 év)

   Duna vízhozam: Q = 2 300 m³/s - A1.), B1.), C1.)

2. Jelentősen nedves hidrológiai időszak (1 - 5 év)

   Duna vízhozam: Q = 3 000 m³/s - A2.), B2.), C2.)

11.9.1.3.1 Lokális morfodinamikai hatások és hatásterületek meghatározása, morfodinamikai folyamatok elemzése

Alábbiakban a következő morfodinamikai hatásokat vizsgáljuk, a tervezett üzemi helyzetek (Paksi Atomerőmű önállóan, Paksi Atomerőmű és Paks II. együttesen, valamint Paks II. önállóan) mértékadó állapotaira vonatkozóan:

1.) Lokális Duna mederváltozások várható alakulása, a tervezett fejlesztés üzembelépésének hatására,

2.) Mélységintegrált áramlási sebességváltozásra gyakorolt hatások vizsgálata, hatásterületek lehatárolása,

3.) A Duna sodorvonalának nyomvonal-változására gyakorolt hatások vizsgálata, hatásterületek lehatárolása,

4.) A Duna vízszinteloszlás-változására gyakorolt hatások vizsgálata, hatásterületek lehatárolása.

11.9.1.3.1.1 Mélységintegrált áramlási sebességváltozásra gyakorolt hatások vizsgálata, hatásterületek lehatárolása

Vizsgáljuk a mértékadó helyzetek esetére, átlagos és jelentősen nedves hidrológiai időszakra számított Duna vízsebességeloszlások (a mélységintegrált sebességvektor eloszlás abszolút értékének eloszlása) különbségeként meghatározott sebbeségeloszlás-változásokat.

A három mértékadó üzemállapot, 2D Duna permanens áramlási sebességeloszlásaiból - V=V(x,y) [m/s] - különbséget képzünk, az alábbi módon:

- $\Delta V_{B1-A1}(x,y) = V_{B1}(x,y) - V_{A1}(x,y)$ és $\Delta V_{C1-A1}(x,y) = V_{C1}(x,y) - V_{A1}(x,y)$ (átlagos év),
- $\Delta V_{B2-A2}(x,y) = V_{B2}(x,y) - V_{A2}(x,y)$ és $\Delta V_{C2-A2}(x,y) = V_{C2}(x,y) - V_{A2}(x,y)$ (nedves év).

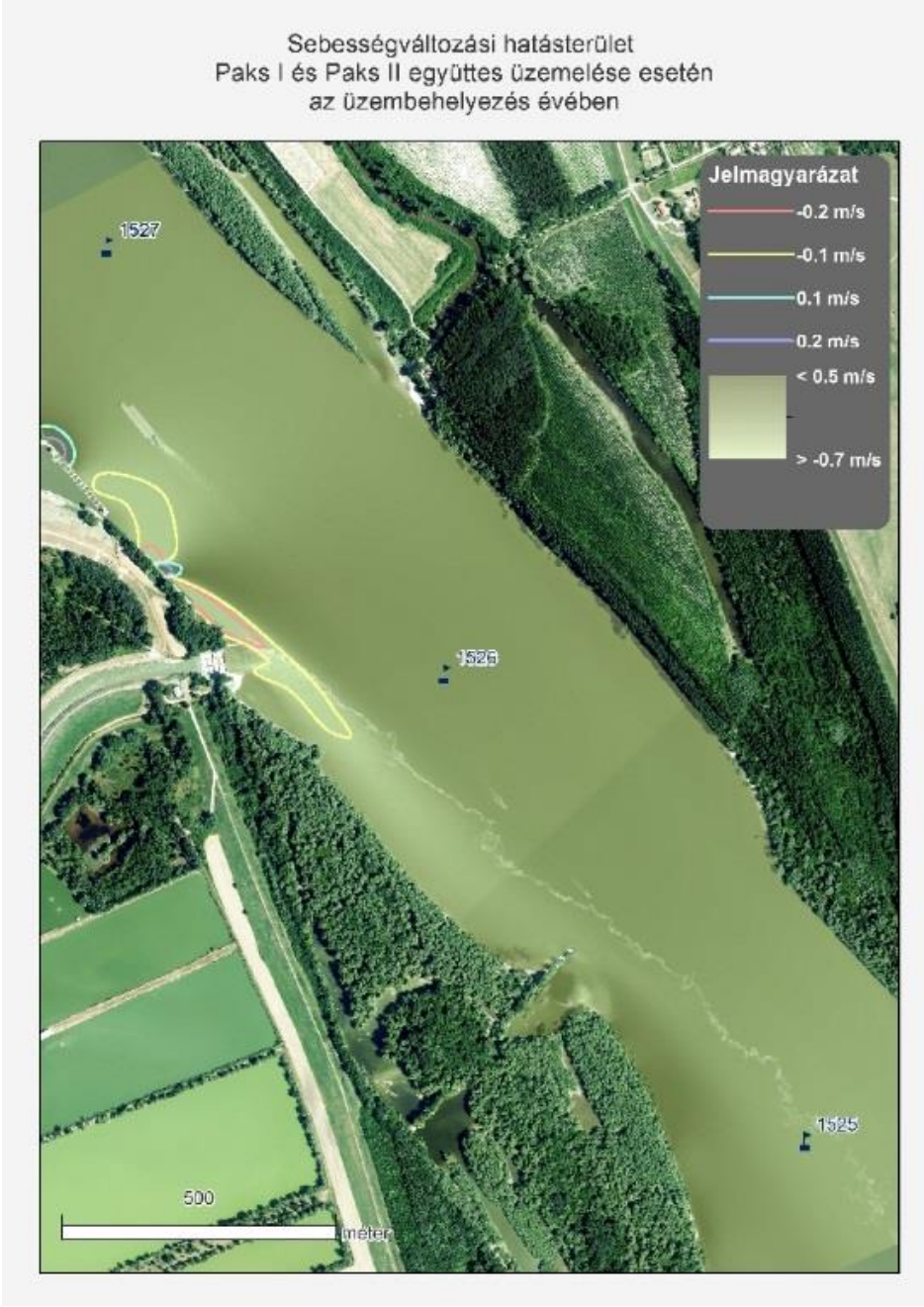
A hatásterületet a ±0,2 m/s-nál nagyobb mértékű vízsebességváltozások területe jelenti, a vízsebességváltozást ±0,2 m/s alatt nem tekintjük relevánsnak.

B) A Paksi Atomerőmű és Paks II. együttes mértékadó üzemelésének (2030-2032) hatásai

B1) Átlagos mederbeli lefolyással rendelkező időszak

Duna vízhozam: Q_{Duna} = 2 300 m³/s (átlagos), hűtővízkivétel: Q = 100 m³/s + 132 m³/s = 232 m³/s

A *11.9.1-18. ábra* szemlélteti Paks II. üzembehelyezésének kezdeti időszakában (Paksi Atomerőmű + Paks II.), a Duna áramlási sebességeinek megváltozását, a jelen (Paksi Atomerőmű) állapothoz képest. Megállapítható, hogy a ±0,2 m/s sebességváltozás által érintett, Duna mederterületére eső, többletmederváltozást generáló, sebességváltozási hatásterület egyrészt a két melegvízkibocsátási hely között helyezkedik el (a főáramlás irányában/ÉNy-DK kissé, mindkét irányban a kitorkolló szelvényen túlnyulva, másrészt a hidegvíz-csatorna Duna torkolatának É-i fele területén.

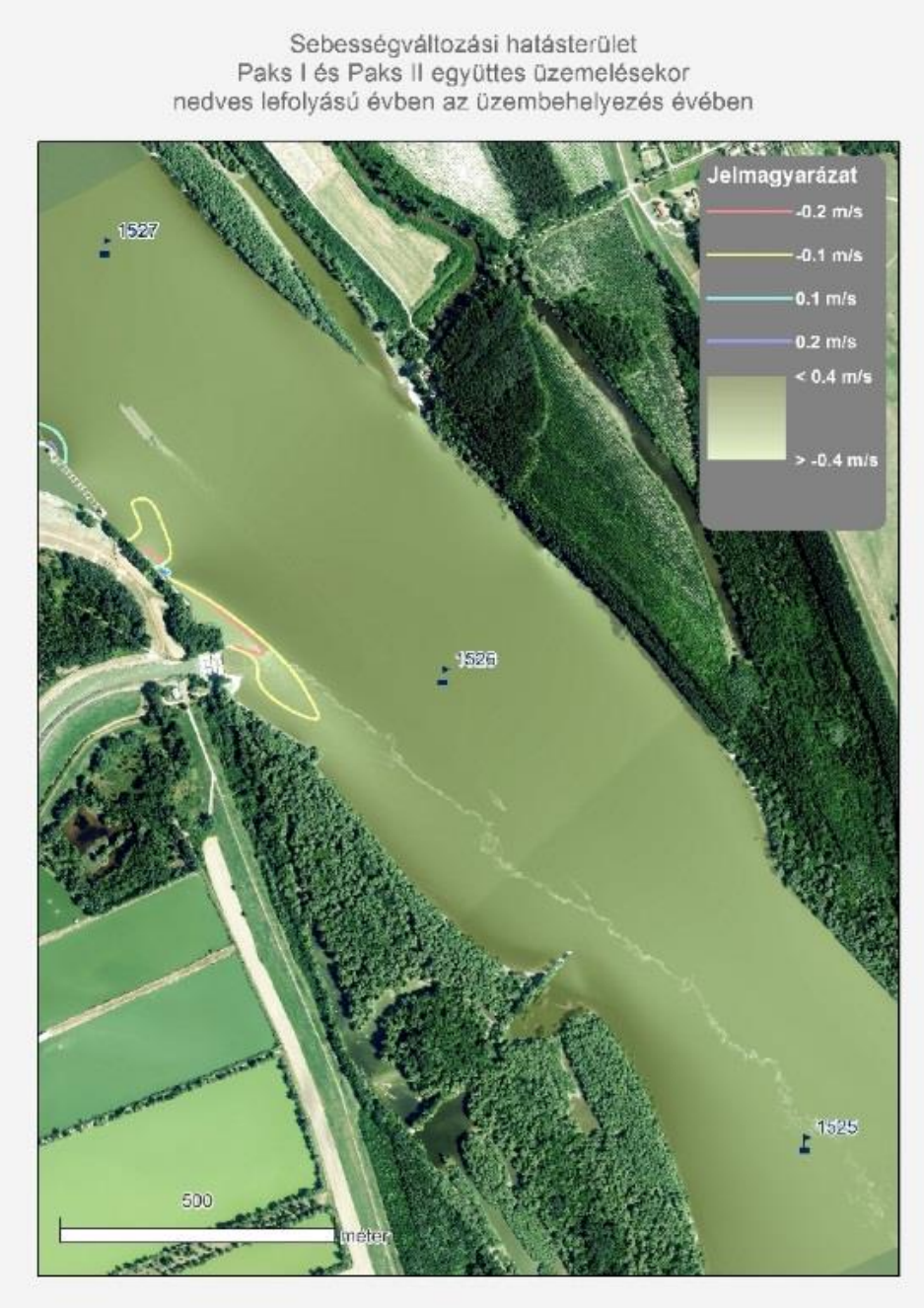


11.9.1-18. ábra: Számított Duna sebességváltozási hatásterület (± 0,2 m/s sebességváltozás feletti terület), Paksi Atomerőmű üzeméhez viszonyított vízsebesség eltérések, az üzemelés kezdetén, 2 300 m³/s-os dunai hozam (átlagos hidrológiai év) esetén (2030-2032.), Paksi Atomerőmű és Paks II. együttesen – (minusz Paksi Atomerőmű)

B2) Jelentősen nedves hidrológiai időszak

Duna vízhozam: Q_{Duna} = 3 000 m³/s (nedves), hűtővízkivétel: Q = 100 m³/s + 132 m³/s = 232 m³/s:

Az alábbi ábra (*11.9.1-19. ábra*) szemlélteti Paks II. üzembehelyezésének kezdeti időszakában (Paksi Atomerőmű + Paks II.), a Duna áramlási sebességeinek megváltozását, a jelen (Paksi Atomerőmű.) állapothoz képest, nedves hidrológiai év, illetve nagyobb Duna vízhozam esetén. Megállapítható, hogy a ±0,2 m/s sebességváltozás által érintett, Duna mederterületére eső, többletmederváltozást generáló, sebességváltozási hatásterület jelentősen nedves hidrológiai évben, hasonló szerkezetű, kismértékben csökkent méretű hatásterületet ad, mint átlagos hidrológiai év esetén. A Duna főáramlásának vízhozama, vagyis dominanciája növekedésével arányosan, a dunai vízkivétel- és melegvíz-kibocsátások áramlásváltozást, és így mederváltozást okozó hatásai csökkennek.



11.9.1-19. ábra: Számított Duna sebességváltozási hatásterület (± 0,2 m/s sebességváltozás feletti terület), Paksi Atomerőmű üzeméhez viszonyított vízsebesség eltérések, az üzemelés kezdetén, 3 000 m³/s-os dunai hozam (nedves hidrológiai év) esetén (2030-2032.), Paksi Atomerőmű és Paks II. együttesen - (minusz) Paksi Atomerőmű

C) Paks II. önálló mértékadó üzemelésének (2037-2085) hatásai

C1) Átlagos mederbeli lefolyással rendelkező időszak

Duna vízhozam: Q_{Duna} = 2 300 m³/s (átlagos), hűtővízkivétel: Q = 132 m³/s:

11.9.1-20. ábra: Számított Duna sebességváltozási hatásterület (± 0,2 m/s sebességváltozás feletti terület), Paksi Atomerőmű üzeméhez viszonyított vízsebességeltérések, az üzemelés kezdetén, 2 300 m³/s-os dunai hozam (átlagos hidrológiai év) esetén (2030-2032.), Paks II. önállóan - (minusz) Paksi Atomerőmű

C2) Jelentősen nedves hidrológiai időszak

Duna vízhozam: Q_{Duna} = 3 000 m³/s (nedves), hűtővízkivétel: Q = 132 m³/s:

11.9.1-21. ábra: Számított Duna sebességváltozási hatásterület (± 0,2 m/s sebességváltozás feletti terület), a Paksi Atomerőmű üzeméhez viszonyított vízsebesség eltérések, az üzemelés kezdetén, 3 000 m³/s-os dunai hozam (nedves hidrológiai év) esetén (2030-2032.), Paks II. önállóan - (minusz) Paksi Atomerőmű

11.9.1.3.1.2 A Duna sodorvonalának nyomvonal-változására gyakorolt hatások vizsgálata, hatásterületek lehatárolása

A Duna jelenlegi áramlási állapotban (Paksi Atomerőmű üzemelése alatt) meghatározható sodorvonal - a középvízi meder területének áramlási irányú mélyvonulatának, a legnagyobb áramlási sebességek pályájának - helyzete a

telephely környezetében, a Duna főmedrének jobb partja közelében található (lásd a 11.9.1-22 ábrát). Ennek helyzete a Duna vízhozamának függvényében kis mértékben módosulhat, az áramlási sebességek alakulása függvényében.

11.9.1-22. ábra: Számított Duna sodorvonalak alakulása az üzemelés kezdetén, 2 300 m³/s-os dunai hozam (átlagos hidrológiai év) esetén (2030-2032.), három üzemi időszakban: Paksi Atomerőmű önállóan, Paksi Atomerőmű és Paks II. együtt, Paks II. önállóan

Nedves hidrológiai évben az éves átlagos Duna vízhozam 3 000 m³/s (1,3-szorosa a sokéves átlagos vízhozamnak). Ez esetben a hosszirányú hatásterület kis mértékben, kb. 10 %-kal növekszik (1 100 m), míg a sodorvonal áthelyeződése a Duna középvonala felé, kb. 10 %-kal csökken (22 m), (lásd 11.9.1-23. *ábra*).

11.9.1-23. ábra: Számított Duna sodorvonalak alakulása az üzemelés kezdetén, 3 000 m³/s-os dunai hozam (nedves hidrológiai év) esetén (2030-2032.), három üzemi időszakban: Paksi Atomerőmű önállóan, Paksi Atomerőmű és Paks II. együtt, Paks II. önállóan

Az áramlási sebességekben bekövetkező változás, így a sodorvonal áthelyeződése is, a megváltozott mértékadó üzemi helyzet kezdeti időszakában a legnagyobb mértékű. A mederváltozások az idő előrehaladtával, az áramlási anomáliákat csökkentik, kb. 5 év elteltével a meder, a megváltozott áramlási helyzethez idomul (töltődik, illetve mélyül), a

mederváltozás lecsillapodik, illetve a további mederváltozások megszűnnek. A lokális morfodinamikai folyamatok időbeli előrehaladásával tehát a kezdeti lokális áramlási változások mértéke is lecsillapodik, a hatásterületük lecsökken.

A Duna jelenlegi állapotában meghatározott, telephely környezetében haladó sodorvonalának, a tervezett fejlesztés megvalósulása esetén számítható áthelyeződése alapján becsülhetők a mértékadó hatásterületek, a mértékadó üzemelési helyzetekben.

- *Paksi Atomerőmű és Paks II. együttes üzeme esetén*: A sodorvonal a jelenlegi állapothoz képest maximum 25 méterrel a Duna középvonala felé mozdul el, de továbbra is a jobb part közelében halad. A sodorvonalak a számítások szerint, sokéves átlagos Duna vízhozam esetén (2 300 m³/s) csak mintegy 1000 méter hosszon térnek el egymástól. Hatásterület tehát a telephely környezetében a Duna, kb. 150 méteres jobb parti sávja, 1 000 méter hosszon a Duna áramlásának irányában mérve.
- *Paks II. önálló üzeme esetén*: A sodorvonal a jelenlegi sodorvonal nyomvonaltól mindössze 500 méter hosszon tér el, maximális eltérése szintén 25 méter. Hatásterület tehát a telephely környezetében, sokéves átlagos Duna vízhozam esetén (2 300 m³/s) a Duna, kb. 150 méteres jobb parti sávja, 500 méter hosszon a Duna áramlásának irányában mérve.

11.9.1.3.1.3 A Duna vízszinteloszlás-változására gyakorolt hatások vizsgálata, hatásterületek lehatárolása

Kétdimenziós 2D morfodinamikai modell (Delft3D-Flow) alkalmazásával vizsgáljuk a mértékadó üzemi helyzetek esetére számított Duna vízszinteloszlások különbségeként meghatározott vízszinteloszlás-változásokat:

A három mértékadó üzemállapot, 2D permanens Duna vízfelszín eloszlásaiból - Z = Z(x,y) [mBf] - különbséget képzünk, az alábbi módon:

- $\Delta Z_{B1-A1}(x,y) = Z_{B1}(x,y) - Z_{A1}(x,y)$ és $\Delta Z_{C1-A1}(x,y) = Z_{C1}(x,y) - Z_{A1}(x,y)$ (átlagos év),
- a nedves évet a vízsebesség változások alapján értékeljük..

Hatásterületnek a +2 cm-nél és a -2 cm-nél nagyobb mértékű vízszintváltozások területe jelenti, a vízszintváltozást ±2 cm alatt nem tekintjük relevánsnak.

B) A Paksi Atomerőmű és Paks II. együttes mértékadó üzemelésének (2030-2032) hatásai

B1) Átlagos mederbeli lefolyással rendelkező időszak

Duna vízhozam: Q_{Duna} = 2 300 m³/s (átlagos), hűtővízkivétel: Q = 100 m³/s + 132 m³/s = 232 m³/s

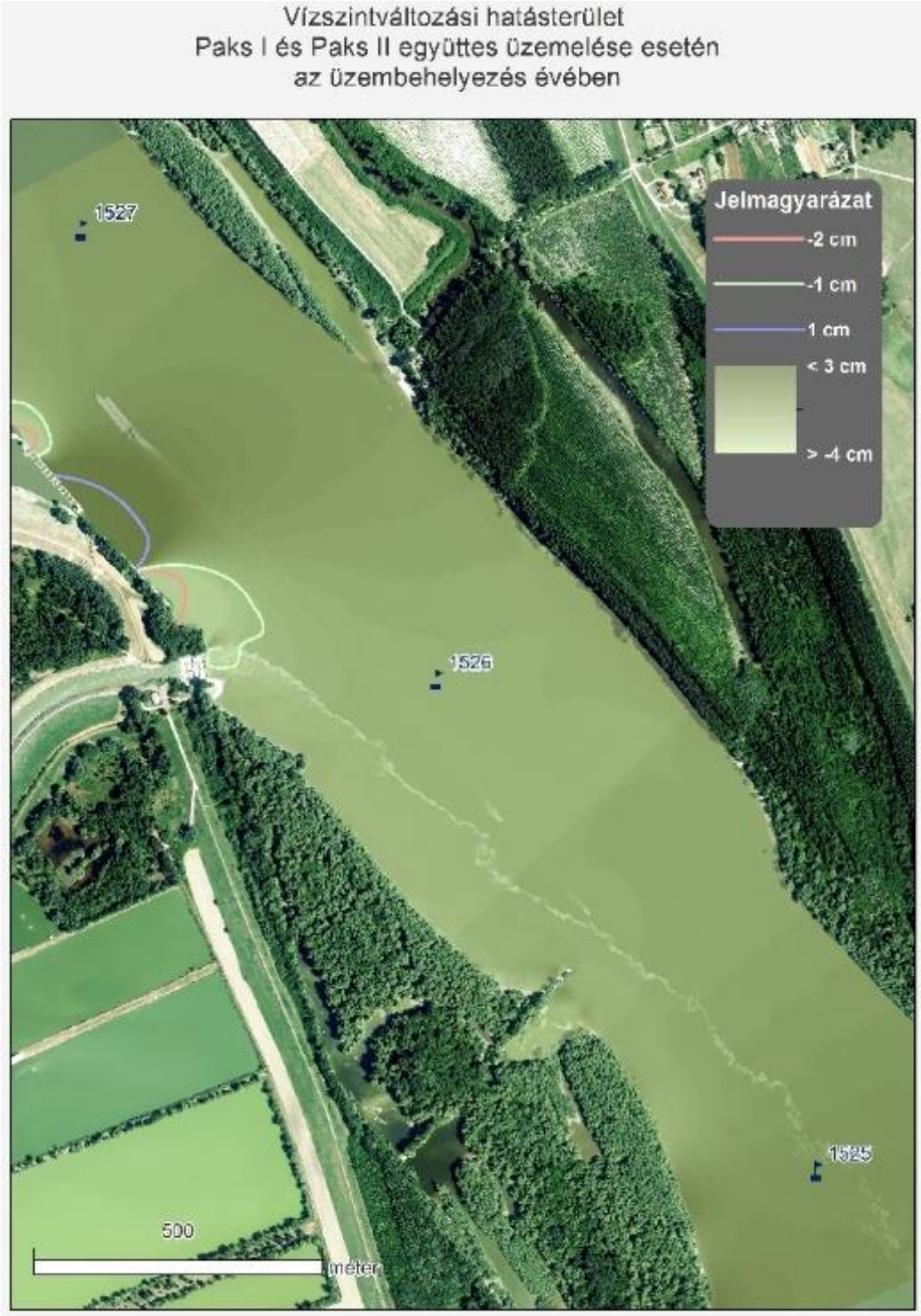
A Paksi Atomerőmű és Paks II. együttes üzeme és a Paksi Atomerőmű. üzeme vízszintkülönbségeit, mint morfodinamikai hatásterületet, az alábbi ábrákon szemléltetjük az átlagos hidrológiai évre vetítve (*11.9.1-24. ábra* és *11.9.1-25. ábra*).

A mértékadó morfodinamikai hatásterületet (±2 cm-es vízszintkülönbségek területe), a mederváltozási folyamatok kezdeti időszakában kialakuló Duna vízszintek különbségei adják. A hatásterület, már két év üzemelés miatt kialakuló mederváltozás következtében jelentős mértékben lecsökken, később asszimptotikusan csöken, de már alig változik.

A morfodinamikai hatásterület - a vízszintváltozási hatásterületek értékelése szerint -, az alábbi ábrán (11.9.1-24. ábra) láthatóan, a Duna jobb parti területére korlátozódik. A hidegvíz-csatornán kilépő vízhozam 100 m³/s-ról, 232 m³/s-ra nő, ezzel az északi torkolati területen sebességnövekedéssel járó vízszintcsökkenés alakul ki.

A meglévő kibocsátási hely felett 200 m-rel tervezett kibocsátási helyen megjelenő, rekuperációs művön keresztül Dunába folyó +132 m³/s többletvízhozam, sebességnövekedéssel jár a bevezetés környezetében.

A morfodinamikai hatásterület, éves átlagos Duna vízhozam mellett - a vízszintváltozások szerint - a hidegvíz-csatorna Duna torkolatától, a meglévő melegvízkibocsátás környezetéig terjed és a Duna jobb partjának kis területű környezetét érinti. Nedves évben, illetve nagyobb Duna vízhozam esetén a hatásterület csökken a főáramlás dominanciájának növekedése miatt (ezt fentebb, a sebességváltozások értékelésénél ismertettük részletesebben).



11.9.1-24. ábra: Számított Duna vízszint változási hatásterület (± 2 cm vízszintváltozás feletti terület), Paksi Atomerőmű üzeméhez (2014. évhez) viszonyított vízszintelt érések, az üzemelés kezdetén, 2 300 m³/s-os dunai hozam (átlagos hidrológiai év) esetén (2030-2032.), Paksi Atomerőmű. és Paks II. együttesen - (minusz) Paksi Atomerőmű.

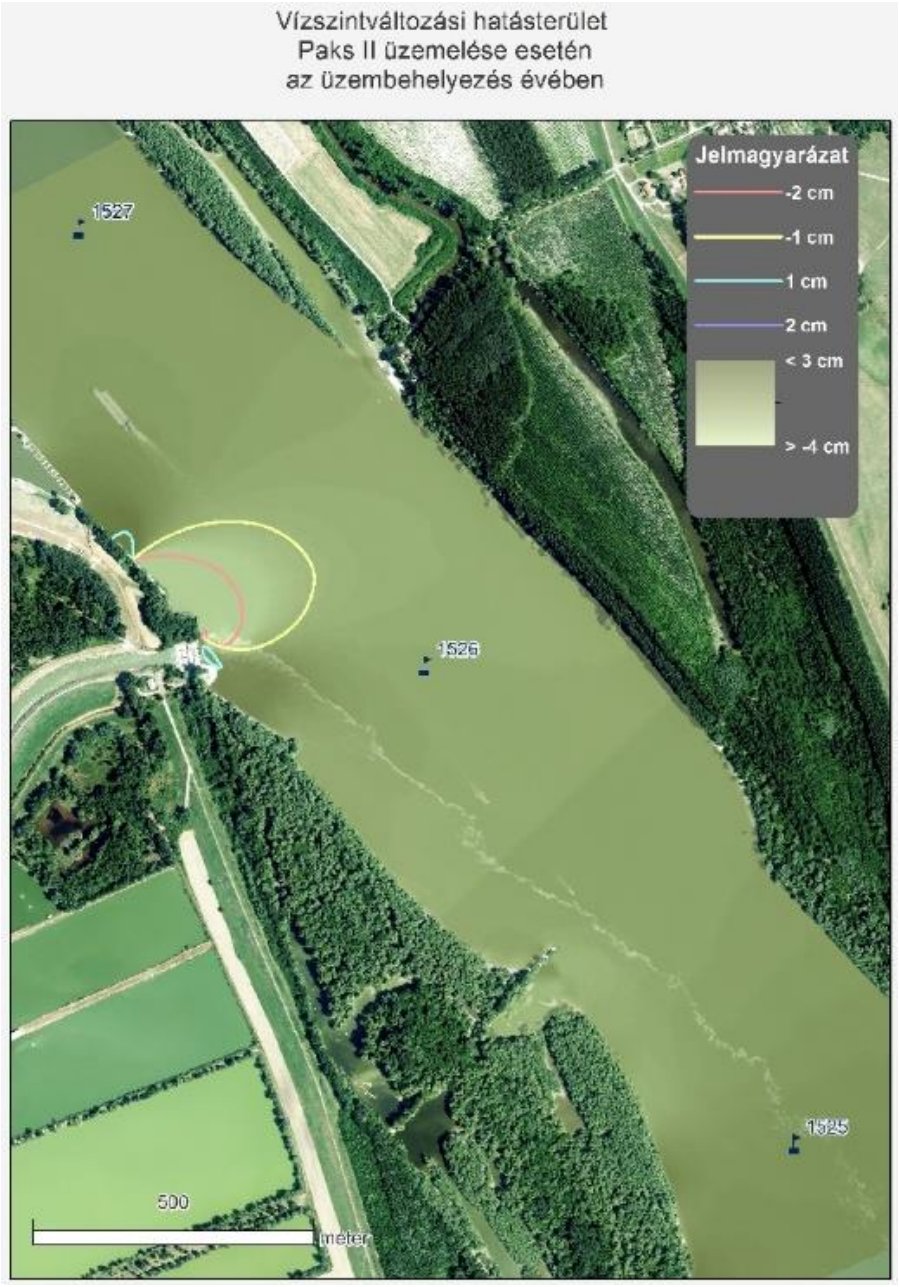
A tervezett új melegvízbevezetés felett és a hidegvíz-csatorna nagy áramlási sebességű, északi torkolati területe között vízszintsüllyedés alakul ki. A ±2 cm-es vízszintváltozáshoz tartozó hatásterület egyrészt a hidegvíz-csatorna, É-i Duna torkolata környezetében, a fő kiáramlási zónában alakul ki, másrészt pedig a két melegvízkibocsátási hely között.

C) Paks II. önálló mértékadó üzemelésének (2037-2085) hatásai

C1) Átlagos mederbeli lefolyással rendelkező időszak

Duna vízhozam: Q_{Duna} = 2 300 m³/s (átlagos), hűtővízkivétel: Q = 132 m³/s:

Paks II. önálló üzeme és a Paksi Atomerőmű üzeme vízszintkülönbségeit, mint morfodinamikai hatásterületet, a 11.9.1-25. ábran szemléltetjük, az átlagos hidrológiai évre vetítve. A ábrán a korábbi 100 m³/s melegvízkibocsátás helyett 132 m³/s folyik ki, kétszáz méterrel feljebb a Dunába, a két kibocsátási hely közötti vízszintek csökkennek. A vízszintcsökkenéssel jellemezhető hatásterület a Duna jobb parti sávjára korlátozódik a két kibocsátási hely közötti, mintegy 200 m-es Duna szakaszon. Minimális területi kiterjedésű vízszint emelkedés található a sülyedt tartomány parti végein, a kialakuló kisméretű áramlási holtterek lelassult áramlása miatt.



11.9.1-25. ábra: Számított Duna vízszint változási hatásterület (± 2 cm vízszintváltozás feletti terület), Paksi Atomerőmű üzeméhez (2014. évhez) viszonyított vízszint eltérések, az üzemelés kezdetén, 2 300 m³/s-os dunai hozam (átlagos hidrológiai év) esetén (2030-2032.), Paks II. önállóan - (minusz) Paksi Atomerőmű

11.9.1.3.1.4 Lokális Duna mederváltozások várható alakulása, a tervezett fejlesztés üzembelépésének hatására

A mértékadó üzemi helyzetekben várható Duna mederváltozásokat kétdimenziós 2D morfodinamikai modell (Delft3D-Flow) alkalmazásával vizsgáljuk.

Paksi Atomerőmű üzemelése (2014-2037), Duna vízhozam: Q_{Duna} = 2 300 m³/s (átlagos) és Q_{Duna} = 3 000 m³/s (nedves), hűtővízkivétel: Q = 100 m³/s:

Az 5 év üzemidőre számított mederváltozásokat a 11.9.1-26. ábran szemléltetjük. Az ábrán a mederváltozás szinezését áttetszővé tettük és ráillesztettük a 2013. július 22-i légifelvételből készített ortofotóra. Látszik, hogy a melegvízcsóva mentén kialakuló mederváltozások határa, az energiatörő műtárgy északi szélén, az áramlási térbe benyúló terelőműről (kis méretű sarkantyúról) leváló, majd az áramlási térben sodródó örvénysor által fodrozott (habzó) Dunavíz mentén halad. A Duna légifelvételezéskor mért (Dombori vízmérce) vízhozama 2013.07.22-én ~2000 m³/s volt, a számításokat a sokéves átlagos 2300 m³/s vízhozamra végeztük el.

Mederkimélyülés és mederfeltöltődés azért alakul ki a jelenlegi hidraulikai üzemi állapot mellett is, mert a Duna medrének területileg- és mélységileg bonyolult, és ezért nem teljesen feltárt (különösen igaz ez a keresztgát környezetének medrére) szemösszetétel eloszlását a morfodinamikai modellben egyszerűsítettük, ami mindenképpen mederváltozásokat indukál, amíg a mederfenék egyensúlyi, illetve egyensúlyközeli állapota be nem áll. Emiatt a tervezett fejlesztés mederváltozást indukáló folyamatainak hatásvizsgálatát, az áramlási sebességek- és a vízszinteloszlások különbségeinek elemzése alapján végeztük el. Ezzel a módszerrel határozzuk meg a hatásterületeket is.

11.9.1-26. ábra: Számított Duna mederváltozások 5 év üzemelés után, 2 300 m³/s-os dunai hozam (átlagos hidrológiai év) és 100 m³/s-os hűtővíz-kivétel esetén (2014-2025. év közötti állapot) – Paksi Atomerőmű önállóan

A 11.9.1-27. ábran az átlagosnál nedvesebb hidrológiai év esetére számított mederváltozásokat jelenítettük meg. A lokális kimélyülés maximális értéke 40 cm-nél kisebb, míg a feltöltődésé 80 cm-nél kisebb mértékű.

11.9.1-27. ábra: Számított Duna mederváltozások 5 év üzemelés után, 3 000 m³/s-os dunai hozam (átlagosnál lényegesen nedvesebb hidrológiai év) és 100 m³/s-os hűtővíz-kivétel esetén (2014-2025. év közötti állapot) – Paksi Atomerőmű önállóan

Paksi Atomerőmű és Paks II. együttes mértékadó üzemelése (2030-2032), Duna vízhozam: Q_{Duna} = 2 300 m³/s (átlagos) és Q_{Duna} = 3 000 m³/s (nedves), hűtővízkivétel: Q = 100 m³/s + 132 m³/s = 232 m³/s:

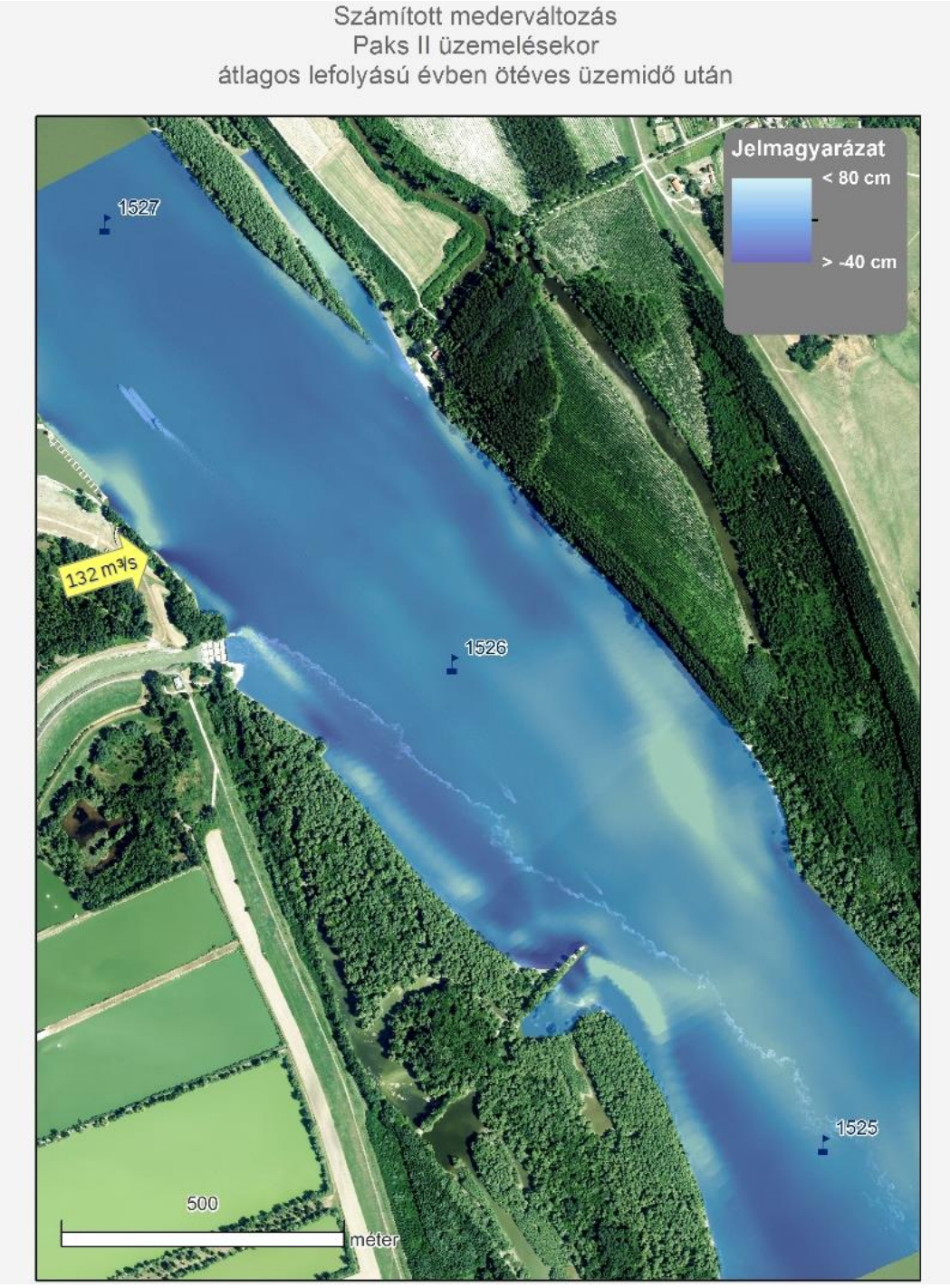
Az alábbi ábrákon bemutatott (11.9.1-28. ábra és 11.9.1-29. ábra), Paksi Atomerőmű és Paks II. együttes üzemére vonatkozó 2D morfodinamikai modellel számított 5 éves mederváltozások, a Paksi Atomerőmű üzeme miatti mederváltozásokhoz képest, kb. 10 cm mélyülést mutat a melegvízterhelés meglévő dunai csóvájának területén, kb. 40 cm kimélyülés várható a tervezett új melegvízkibocsátási hely és a meglévő hely közötti 200 m-es mederszakaszon, a csóva mentén. A csóva és a part között minimális töltődés várható. A lokális hatások a Duna 1525+500 fkm szelvénye (keresztgát, a Duna jobb partján létesített, az áramtérbe benyúló mű) környezetében már alig érzékelhetők. A keresztgát környezetében kialakuló mederváltozások a morfodinamikai modell közelítő jellege miatt indukálódnak, ugyanis a meder szemeloszlását homogénnek vettük és kétfrakciós szemeloszlási modellel közelítettük. A valóságban ezeken a szakaszokon a meder páncélozódott, a nagyobb szemátmérőjű mederszemcsék dominálnak, amelyek nem mosódnak ki és nem rakódnak le máshol, vagyis ezt nem kell figyelembe vennünk, csak a jelen állapot 5 évi üzeméhez való különbségek mérvadóak.

11.9.1-28. ábra: Számított Duna mederváltozások 5 év üzemelés után, 2 300 m³/s-os dunai hozam (átlagos hidrológiai év) és 100 m³/s-os hűtővíz-kivétel esetén (2030-2032. év közötti állapot) – Paksi Atomerőmű és Paks II. együttesen

11.9.1-29. ábra: Számított Duna mederváltozások 5 év üzemelés után, 3 000 m³/s-os dunai hozam (átlagosnál lényegesen nedvesebb hidrológiai év) és 100 m³/s-os hűtővíz-kivétel esetén (2030-2032. év közötti állapot) – Paksi Atomerőmű és Paks II. együttesen

Paks II. önálló mértékadó üzemelése (2037-2085), Duna vízhozam: Q_{Duna} = 2300 m³/s (átlagos) és Q_{Duna} = 3000 m³/s (nedves), hűtővízkivétel: Q = 132 m³/s:

Az alábbi ábrákon bemutatott (11.9.1-30. ábra és 11.9.1-31. ábra), Paks II. önálló üzemére vonatkozó 2D morfodinamikai modellel számított 5 éves mederváltozások, a Paksi Atomerőmű. üzeme miatti mederváltozásokhoz képest, kb. 5 cm mélyülést mutat a melegvízterhelés meglévő dunai csóvájának területén és még kb. 10 cm kimélyülés várható a tervezett új melegvízkibocsátási hely és a meglévő hely közötti 200 m-es mederszakaszon, a csóva mentén - ugyanis az alsó csóva megszűnésével, annak duzzasztó hatása megszűnik. A csóva és a part között minimális töltődés várható. A lokális hatások a Duna 1525 fkm szelvénye alatt elhanyagolhatókká válnak.



11.9.1-30. ábra: Számított Duna mederváltozások 5 év üzemelés után, 2 300 m³/s-os dunai hozam (átlagos hidrológiai év) és 100 m³/s-os hűtővíz-kivétel esetén (2037-2085. év közötti állapot) – Paks II. önállóan

11.9.1-31. ábra: Számított Duna mederváltozások 5 év üzemelés után, 3 000 m³/s-os dunai hozam (átlagosnál lényegesen nedvesebb hidrológiai év) és 100 m³/s-os hűtővíz-kivétel esetén (2037-2085. év közötti állapot) – Paks II. önállóan

A Duna mederfenékszintje időbeli változásának bemutatása, a mértékadó üzemi helyzetek időszakában, átlagos és nedves hidrológiai évben, a kijelölt ***A*** és ***B*** jelű kontrollpontokon:

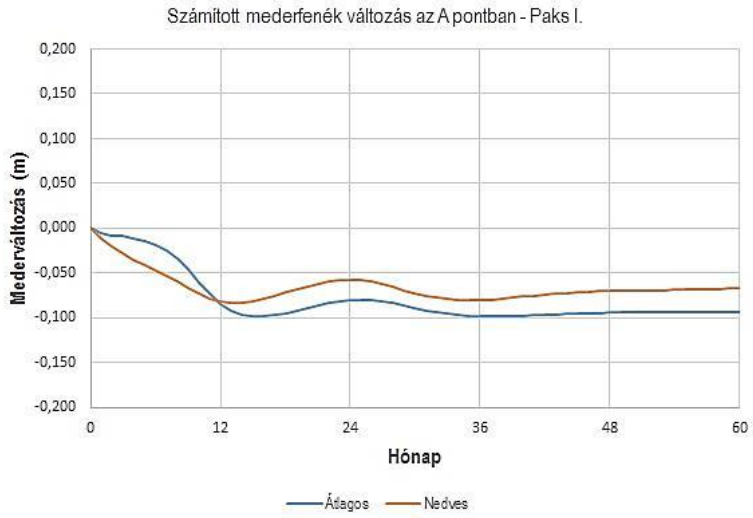
A *11.9.1-23. ábra*n látható helyen felvett A és B jelű kontrollponton, a jelenlegi mederállapotból kiindulva mutatjuk be az alábbiakban a morfodinamikai modellel számított mederváltozás időbeli folyamatát, a mértékadó üzemállapotokban.

Paksi Atomerőmű önálló üzeme

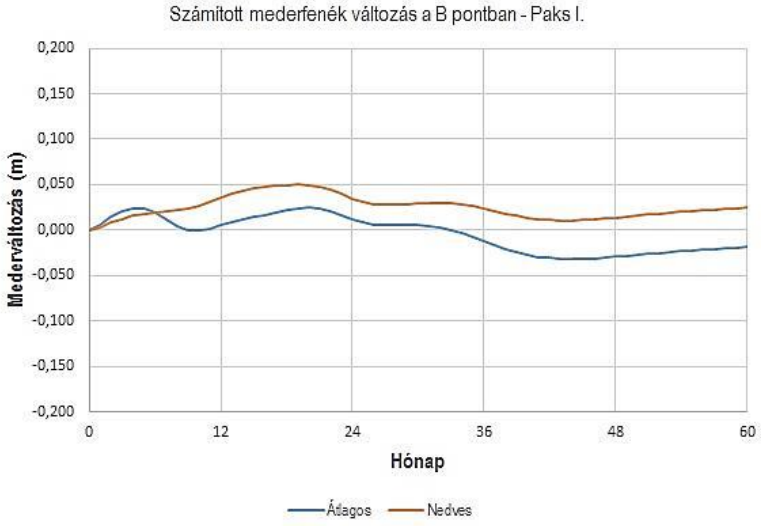
A *11.9.1-32. ábra* és a *11.9.1-33.* ábra a Duna medrének ***A*** és ***B*** jelű kontrollpontja helyén számított mederfenékszintek időbeli alakulását mutatja be, a jelen mederállapottól öt (5) évig terjedően, Paksi Atomerőmű átlagos és nedves hidrológiai években való üzemére.

A mederfenék a kezdeti zavarok lecsengése után, a harmadik évtől egyensúlyi helyzet felé közeledik:

- az ***A*** pontban 5-10 cm-t mélyül,
- a ***B*** pontban ±0 cm körül ingadozik.



11.9.1-32. ábra: Számított Duna mederfenékszint-változás az (A) ponban 5 év üzemelés után, átlagos és az álagosnál lényegesen nedvesebb hidrológiai év esetén, 100 m³/s-os hűtővíz-kivétellel (2014-2025) – Paksi Atomerőmű önállóan

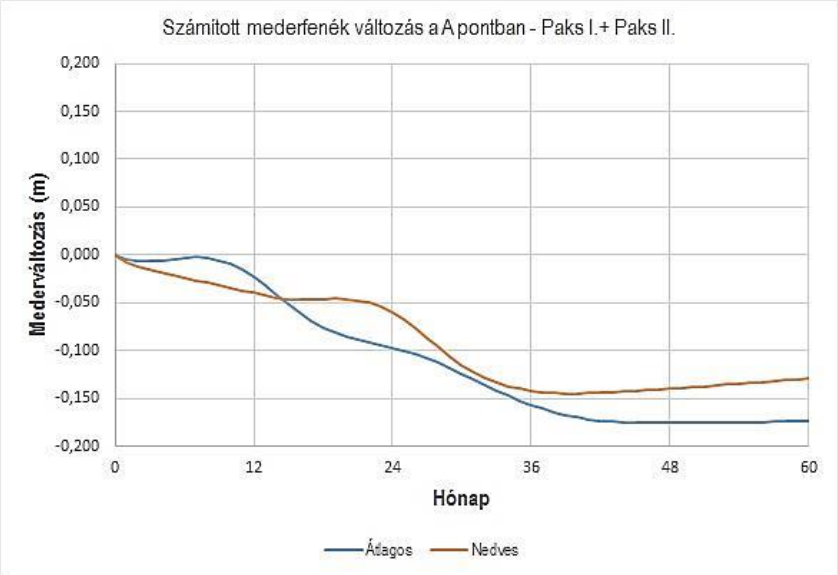


11.9.1-33. ábra: Számított Duna mederfenékszint-változás a (B) ponban 5 év üzemelés után, átlagos és az álagosnál lényegesen nedvesebb hidrológiai év esetén, 100 m³/s-os hűtővíz-kivétellel (2014-2025) – Paksi Atomerőmű önállóan

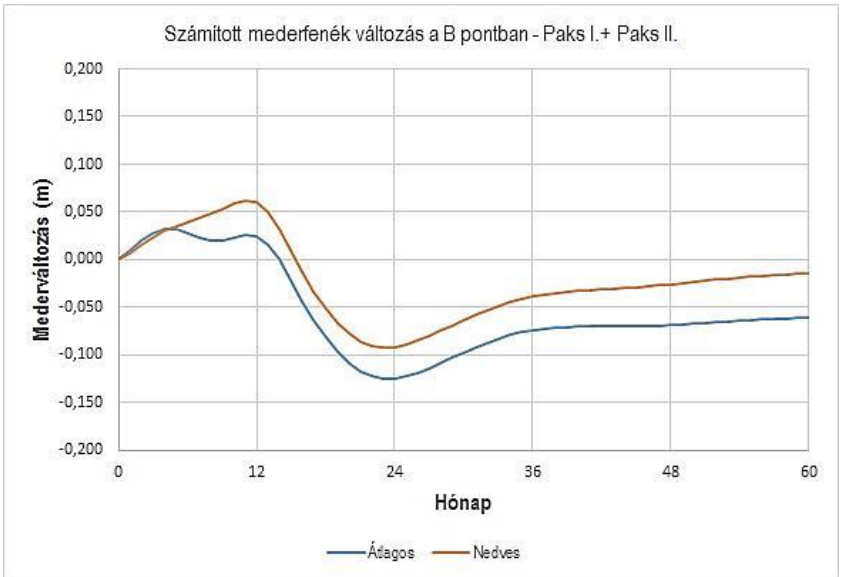
Paksi Atomerőmű és Paks II. együttes üzeme

A mederfenék a kezdeti zavarok lecsengése után, a harmadik évtől egyensúlyi helyzet felé közeledik:

- az ***A*** pontban 15-20 cm-t mélyül (11.9.1-34. ábra),
- a ***B*** pontban -5 cm körül ingadozik (11.9.1-35. ábra).



11.9.1-34. ábra: Számított Duna mederfenékszint-változás az (A) ponban 5 év üzemelés után, átlagos és az álagosnál lényegesen nedvesebb hidrológiai év esetén, 232 m³/s-os hűtővíz-kivétellel (2030-2032) – Paksi Atomerőmű.és Paks II. együttesen

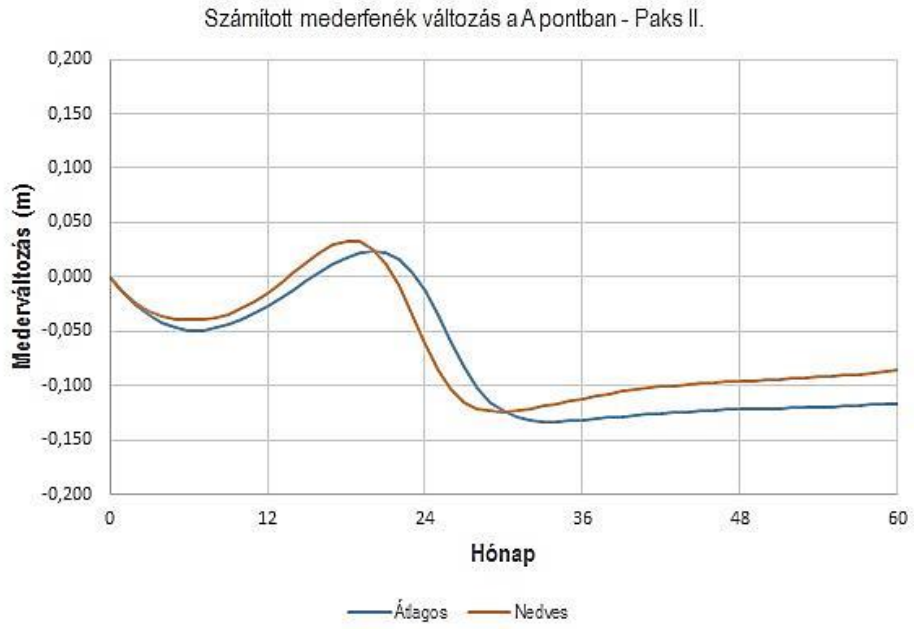


11.9.1-35. ábra: Számított Duna mederfenékszint-változás a (B) ponban 5 év üzemelés után, átlagos és az álagosnál lényegesen nedvesebb hidrológiai év esetén, 232 m³/s-os hűtővíz-kivétellel (2030-2032) – Paksi Atomerőmű és Paks II. együttesen

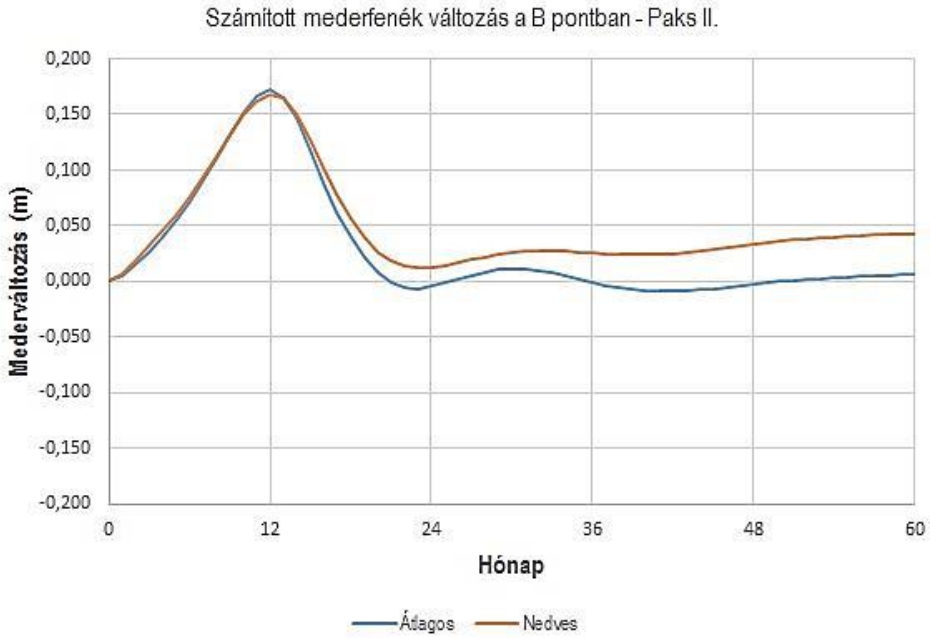
Paks II. önálló üzeme

A mederfenék a kezdeti zavarok lecsengése után, a harmadik évtől egyensúlyi helyzet felé közeledik:

- az ***A*** pontban -10 cm körül ingadozik (11.9.1-36. ábra),
- a ***B*** pontban 0-5 cm között töltődik (11.9.1-37. ábra).



11.9.1-36. ábra: Számított Duna mederfenékszint-változás az (A) ponban 5 év üzemelés után, átlagos és az álagosnál lényegesen nedvesebb hidrológiai év esetén, 132 m³/s-os hűtővíz-kivétellel (2037-2085) – Paks II. önállóan



11.9.1-37. ábra: Számított Duna mederfenékszint-változás az (A) ponban 5 év üzemelés után, átlagos és az álagosnál lényegesen nedvesebb hidrológiai év esetén, 132 m³/s-os hűtővíz-kivétellel (2037-2085) – Paks II. önállóan

A lokális mederváltozási hatások értékelése, az A és B kontrollpontok fenékszint idősorának összevetése alapján:

A fenti számítási eredmények konszolidációs mederváltozásainak összevetése alapján, a 11.9.1-1. táblázatban foglaljuk össze a tervezett fejlesztés várható mederfenékszint változás hatásait.

A tervezett fejlesztés (Paks II.) mértékadó üzemállapotai	**Duna mederfenékszint-változások a jelen állapothoz (Paksi Atomerőmű üzeme, 100 m³/s) képest, az (A) és (B) jelű kontrollpontokban (a meglévő melegvízkibocsátás alatt 200 m-rel)**	
	Mederváltozási hatás az (A) pontban [cm]	**Mederváltozási hatás a (B) pontban [cm]**
Paksi Atomerőmű és Paks II. együttesen (232 m³/s)	-10 cm	-5 cm
Paks II. önállóan (132 m³/s)	-3 cm	-2 cm

11.9.1-1. táblázat: Mederváltozási hatások összefoglalása, a Dunameder (A) és (B) pontjában számított mederfenékszintek időbeli alakulása, jelen állapothoz visznyított változása alapján, a mértékadó üzemállapotok időszakában

A morfodinamikai számítások eredményeinek vizsgálata alapján megállapítható, hogy a Duna jobbparti sávjában, a meglévő melegvízkibocsátástól folyásirányban számított 200 méterrel lejebb lévő szelvényben, a mederfenékszintek 5 év üzemidő alatt - jelen állapothoz képest -, kis mértékben változtak és egyben konszolidálódtak.

Fenti, lokális mederváltozási esetek vizsgálatának eredményei röviden összefoglalva:

A lokális mederváltozási számítások eredményeként megállapítható, hogy az öt (5) évi - mederfenék konszolidációhoz közelítő -, üzemelést követően:

- A morfodinamikai változások fő hajtóereje, meghatározója a Duna sokéves átlagos vízhozama, amelyet a kisebb tartósságú árhullámok (nem-permanens folyamatok) csak kismértékben perturbálnak.
- Az átlagosnál lényegesen nedvesebb üzemi évek idején (3000 m³/s), kismértékben növekszik a mederfenék változások mértéke, a sokéves átlagos (2300 m³/s) Duna vízhozammal történt időszak mederfenékszint-változásaihoz képest.
- A lokális mederfenékszint növekedés (feltöltődés) mértéke, minden esetben legfeljebb 80 cm volt, míg a lokális mederfenékszint csökkenés (kimélyülés) mértéke, minden esetben legfeljebb 40 cm, területi kiterjedésük nem jelentős. (A jelen állapotban, vagyis a Paksi Atomerőmű terhelésére bekövetkező lokális mederváltozások, már konszolidálták a meder alakját és szemösszetételét. Ezzel szemben a morfodinamikai modell mégis mederváltozásokat indukál, ugyanis a meder területi- és mélységmenti szemösszetételének valódi képét nem megfelelő részletességgel ismerjük, a modellben egyszerűsített, térben homogén szemösszetétellel számoltunk.)
- A mértékadó önálló Paksi Atomerőmű (2014-2025), illetve az önálló Paks II. (2037-2085) üzemelés közötti mederváltozás-különbségek mértéke minimális.
- A mértékadó Paksi Atomerőmű és Paks II. együttes üzem esetén (2030-2032) tapasztalhatóak említésre méltó mederváltozás különbségek, az önálló üzemelésekhez képest. Ez a hatás azonban 2 év után csökken, az üzemidőhosszabbítás ütemterve szerinti Paksi Atomerőmű blokk-kilépések miatt, ugyanis blokkonként 25 m³/s-mal csökken a vízkivétel-, és vízkibocsátás, majd 2037. évre eléri a Paks II. önálló üzemelésének időszakát.

11.9.1.3.1.5 Lokális morfodinamikai hatások és hatásterületek meghatározása, morfodinamikai folyamatok értékelése

A fenti morfodinamikai modellvizsgálatok - sebességváltozások, vízszintváltozások és mederváltozások - alapján, a 11.9.1-2. táblázatban foglaljuk össze a tervezett fejlesztés mértékadó helyzeteiben várható morfodinamikai hatásterületeket:

A tervezett fejlesztés (Paks II.) mértékadó üzemállapotai	**Duna mederbeli morfodinamikai- és áramlási hatásterület meghatározása, a tervezett fejlesztés megvalósulása esetén, az alapállapothoz képest**	
	Hatásterület hossza a dunai főáramlás irányában [Duna fkm], [m]	**Hatásterület szélessége, a Duna jobb partjától, a keresztszelvény mentén [m]**
Paksi Atomerőmű és Paks II. együttesen (232 m³/s)	1525+500 - 1527+000 fkm (1500 m)	maximum 300 m
Paks II. önállóan (132 m³/s)	1526+000 - 1527+000 fkm (1000 m)	maximum 200 m

11.9.1-2. táblázat: Morfodinamikai- és áramlási hatásterület meghatározása, a tervezett fejlesztés megvalósulása esetén, a jelen állapothoz képest

A morfodinamikai változással, nagyobb mértékben (40 cm-es mederfenékszint-változásokkal) érintett területek a mértékadóbb Paksi Atomerőmű és Paks II. együttes üzem alatt (2030-2032) a következők (11.9.1-3. táblázat):

Paks II. és Paksi Atomerőmű együttes üzeme esetén érintett területek	**Jelentősebb (40 cm-es mederváltozással jellemezhető) Duna mederbeli morfodinamikai- és áramlási hatásterület lehatárolása, a tervezett fejlesztés megvalósulása esetén, az alapállapothoz képest**	
	Hatásterület hossza a dunai főáramlás irányában [Duna fkm], [m]	**Hatásterület szélessége, a Duna jobb partjától, a keresztszelvény mentén [m]**
Melegvízkibocsátások környezete:	1526+200 - 1526+500 fkm (300 m)	maximum 150 m
Hidegvízkivétel dunai torkolata	1526+750 - 1527+000 fkm (250 m)	maximum 100 m

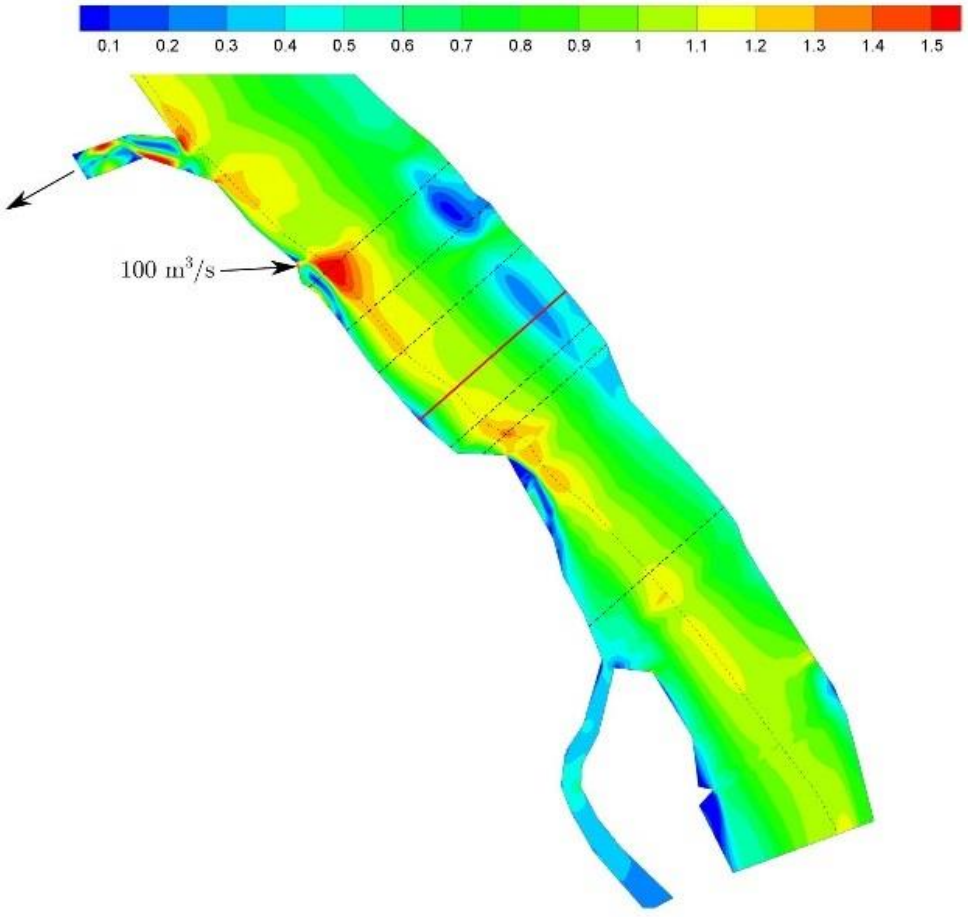
11.9.1-3. táblázat: Jelentősebb morfodinamikai- és áramlási hatásterület lehatárolása, a tervezett fejlesztés megvalósulása esetén, a jelen állapothoz képest

11.9.1.4 A felmelegedett hűtővíz bevezetése a Dunába

11.9.1.4.1 Hőcsóvaszámítás eredményei a Duna mértékadó 1 500 m³/s vízhozama esetében

11.9.1.4.1.1 A 2014. évi mértékadó állapot bemutatása (Paksi Atomerőmű önállóan)

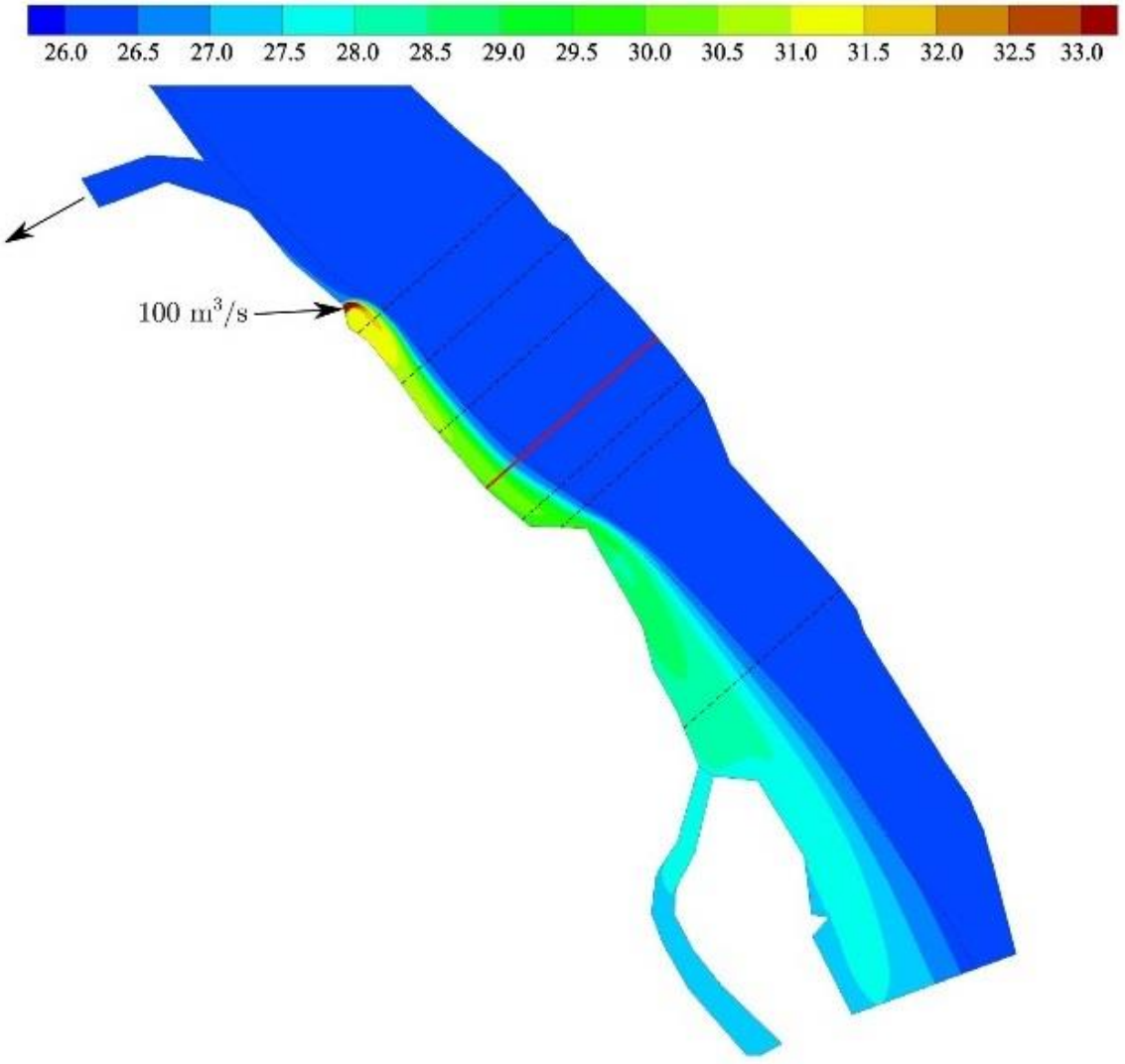
A jelen állapotra elvégzett háromdimenziós (3D) hidrodinamikai számítások eredményeként adódó áramlási sebesség abszolút értékének eloszlását a 11.9.1-38. ábra mutatja be, a Duna 1500 m³/s mértékadó vízhozama (ugyanis 2014. évben a 25,61 °C Duna vízhőmérséklet közel 1 nap/év tartósságú, az 1500 m³/s Duna vízhozam esetén – lásd a 11.7.4 fejezetet) és 100 m³/s-os felmelegedett hűtővíz kibocsátás esetében, a felszín közeli horizontális síkú rétegben (ahol a vízhőmérsékleti maximumok kialakulnak).



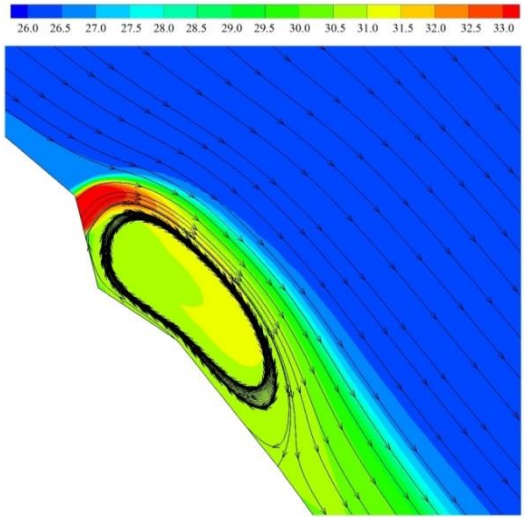
11.9.1-38. ábra: A felszín közelében kialakuló sebességeloszlás (hőlépcső 8 °C) – 2014. évi mértékadó állapot ($T_{Duna,max}$=25,61 °C) – Paksi Atomerőmű önállóan

A 11.9.1-39. ábra mutatja a 8 °C-os hőlépcsővel számoló változat hőcsóváját. Jól látható, hogy a csóva a jobb parthoz simul. Megfigyelhető továbbá, hogy jelentős hőmérsékletcsökkenés az előbb tárgyalt jelenségek miatt, a belépésnél és keresztgátnál következik be. A jelenségeket a 11.9.1-40. ábra részletezi.

A 11.9.1-39. ábra a Duna sebességterét a sebesség-vektorok irányán és nagyságán, a hőmérsékletet a vektorok színezésen keresztül mutatja be, így egyszerre kapunk képet az áramlási és a hozzá közvetlenül kapcsolódó hőtranszport jellemzőiről. A bevezetés környezetében nagyfokú impulzuscsökkenés következik be, ezáltal növelve a turbulens kinetikus energia disszipációját, mely változóból származtatható hidraulikai gradiens az elkeveredés mértékét mutatja. A gyors iránytörés és a csóva különböző rétegeiben lévő sebességkülönbség okozta sebesség-nyírás az örvénylés kialakulásának kedvez. Ez az oka, hogy a bevezetés alvízi oldalán az óramutató járásával megegyező módon forgó örvényzónát találunk, melynek fenntartását a folyamatosan bevezetett hűtővíz kinetikus energiája táplálja. Az örvényzóna alatt, a jobb part közelében a sekélyebb részeken kisebb sebességek alakulnak ki, amely a sodorvonal felé növekszik. Itt folyásirányban nem tapasztalható jelentős hőmérsékletcsökkenés. A keresztirányú diszperziót a medermélység térbeli egyenlőtlensége és a csóva iránytörése a keresztgátnál jelentősen megnöveli, ezért a hőmérsékletcsökkenés itt ismét jelentős lehet.



11.9.1-39. ábra: Hőcsóva, 8°C-os hőlépcső – 2014. évi mértékadó állapot ($T_{Duna,max}$=25,61 °C) – Paksi Atomerőmű önállóan



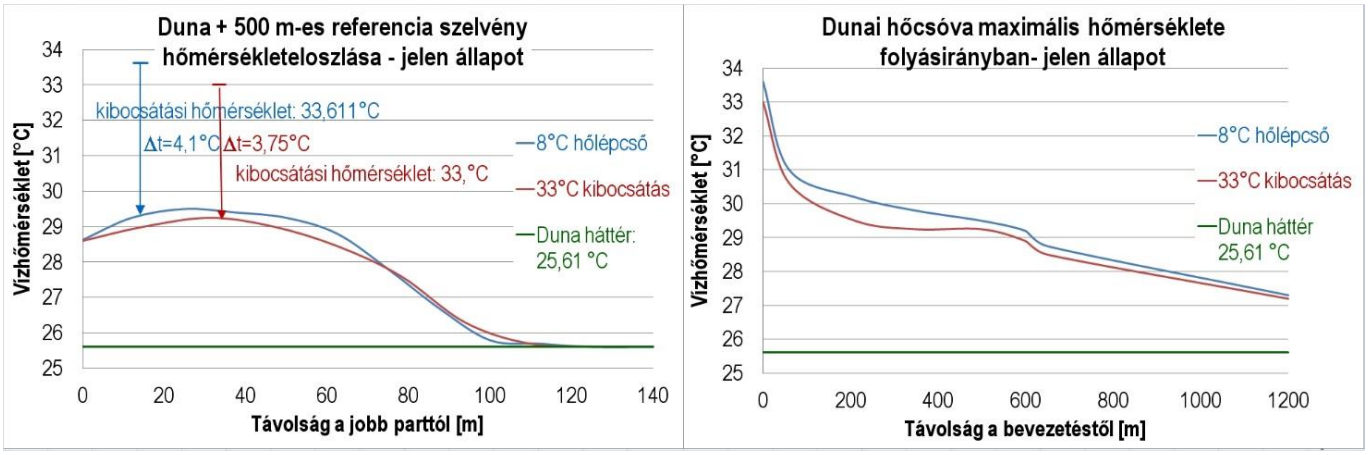
11.9.1-40. ábra: Hőmérséklet eloszlás áramvonalakkal (8°C-os hőlépcső) – 2014. évi mértékadó állapot ($T_{Duna,max}$=25,61 °C) – Paksi Atomerőmű önállóan

A hőcsóva maximális hőmérsékletének folyásirányú változása is azt mutatja, hogy a kezdeti nagy meredekségű hőmérsékletesés után, a következő éles változás a bevezetéstől számítva mintegy 650 m-re a keresztgátnál lesz tapasztalható.

A +500 m-es szelvényben mért hőmérséklet eloszlás alapján elmondhatjuk, hogy jelen állapotban, a 8°C-os hőlépcső és az állandóan 33°C-ot bevezető változat esetében a várhatóan előforduló legmagasabb Duna háttérhőmérséklete mellett is a 30°C-os hőmérsékleti korlát teljesíthető. Nagyobb hőlépcső alkalmazásával a visszahűlés is nagyobb, hiszen a kiegyenlítődés hajtóereje a hőmérséklet különbség.

A 3D elkeveredés-vizsgálat eredményeként, a Dunába (1 nap/év tartósságú,1500 m³/s Duna vízhozam mellett) bevezetendő mértékadó melegvízterhelés (100 m³/s, 8 °C-os hőlépcsővel és 33 °C-os kibocsátással), a 2014. évben várható maximális Duna vízhőmérséklet (25,61 °C) alapulvételével, az alábbi maximális vízhőmérséklet hossz-szelvény és referenciaszelvényben (+ 500 m) várható maximális vízhőmérsékleti keresztszelvény adódik (11.9.1-41 ábra).

Mivel a 33 °C-os melegvízkibocsátás 7,39 °C-os (33 – 25,61 °C) hőlépcsőt jelent, ami a 8 °C-os hőlépcsővel történő kibocsátástól nem tér el jelentős mértékben, ezért a modellszámítással számított maximális vízhőmérséklet eloszlások is csak kismértékben maradnak el, a 8 °C-os hőlépcsővel számított vízhőmérséklet-eloszlási eredményektől.

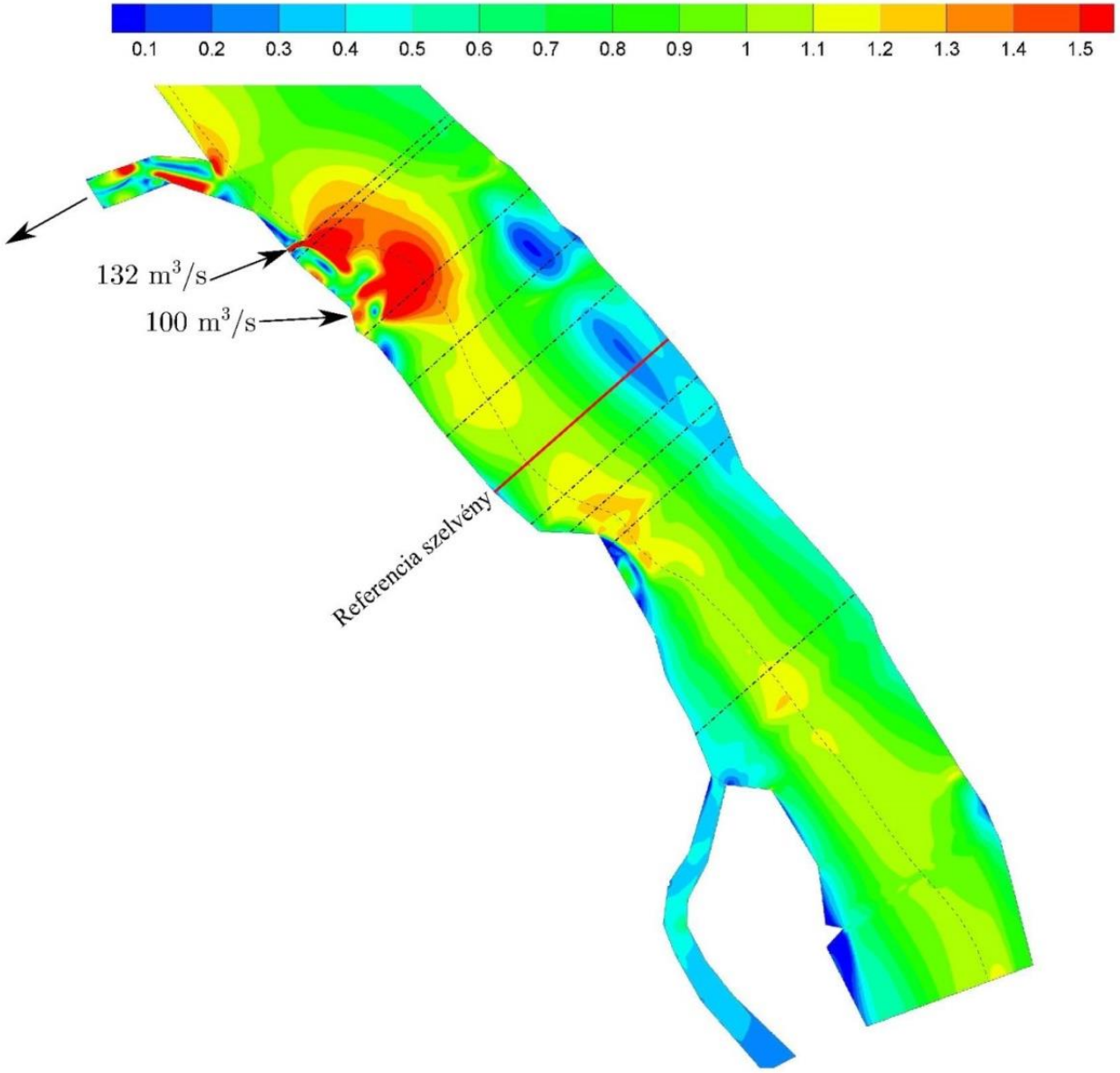


Magyarázat:
kék: hőlépcső 8 °C; piros: melegvíz 33 °C

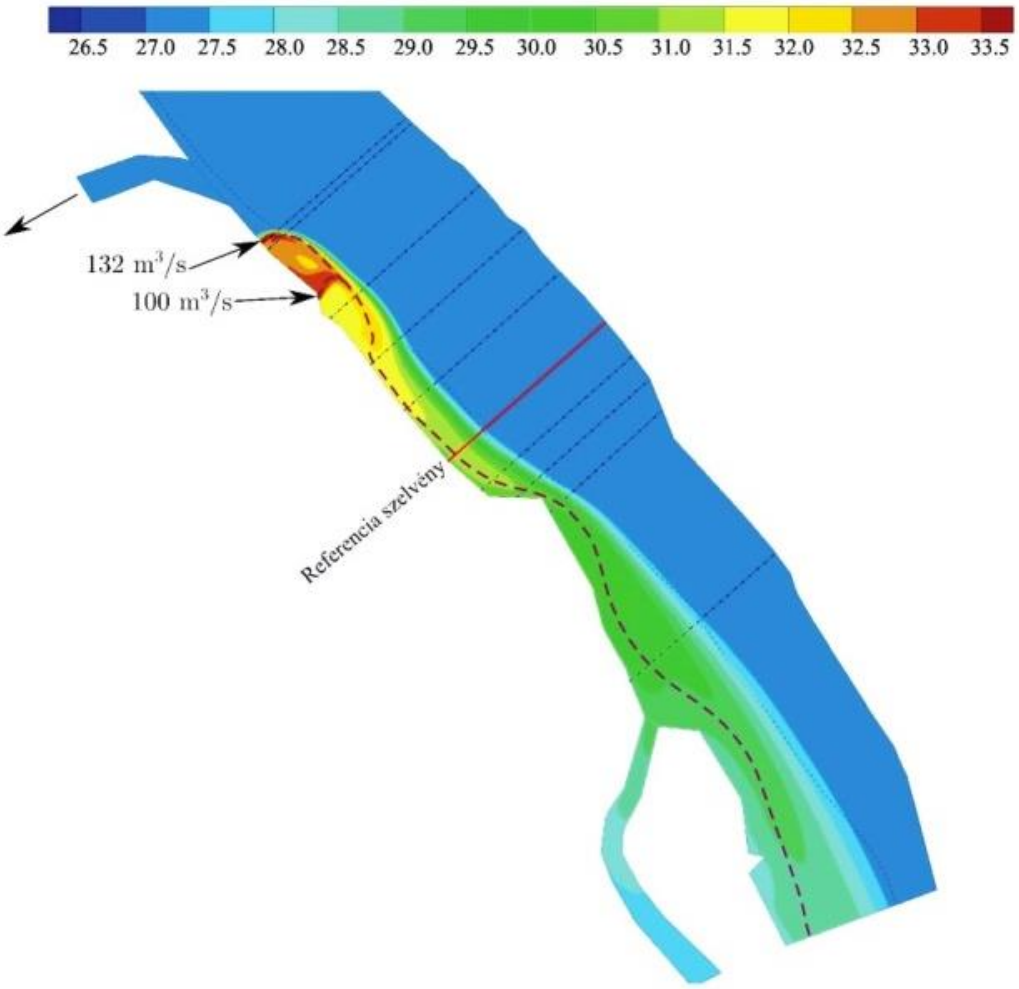
11.9.1-41. ábra: Hőmérséklet változása kereszt- és hosszirányban – 2014. évi mértékadó állapot ($T_{Duna,max}$=25,61 °C; Duna vízhozam 1 500 m³/s) – Paksi Atomerőmű önállóan

11.9.1.4.1.2 A 2032. évi mértékadó állapot jellemzése (Paksi Atomerőmű + Paks II. együttesen)

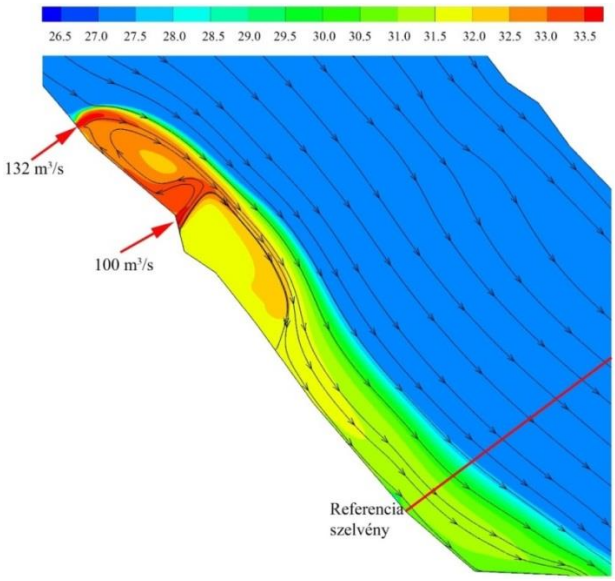
A Paksi Atomerőmű és Paks II. együttes üzemelésekor a két rendszer hűtővize együttesen, de külön helyen kibocsátva terheli a Dunát. Az áramlási- és hőtranszport vizsgálatoknál az együttes terhelés hatását vizsgáltuk, 3D hidrodinamikai és hőtranszport modellel. A 11.9.1-42. ábra mutatja a két bebocsátási hely környezetében kialakuló áramlási jelleget és a gyors hőmérsékletcsökkenést. Az új bevezetési hely alatt, az előzőekben tárgyalt jelenségek miatt örvényzóna keletkezik, mely az alatta lévő eredeti bevezetési ponton beömlő víz egy részét magával sodorja és ez az oka annak, amit a 11.9.1-43. ábra is mutat, hogy a második bevezetési szelvényig a hőmérsékletcsökkenés nem monoton. A monotonitást a háromdimenziós örvények, és hozzájuk tartozó szekunder áramlási zónák szüntetik meg úgy, hogy a második bevezetés felvízén is megjelenik a hőtöbblet.



11.9.1-42. ábra: Felszín közelében kialakuló sebességeloszlás (melegvíz 33 °C) –2032. évi mértékadó állapot ($T_{Duna,max}$=26,38 °C, Duna vízhozam = 1 500 m³/s) – Paksi Atomerőmű + Paks II. együttesen



11.9.1-43. ábra: Hőcsóva, 33 °C-os melegvízkibocsátás esetén –2032. évi mértékadó állapot ($T_{Duna,max}$=26,38 °C, Duna vízhozam = 1 500 m³/s) – Paksi Atomerőmű + Paks II. együttesen

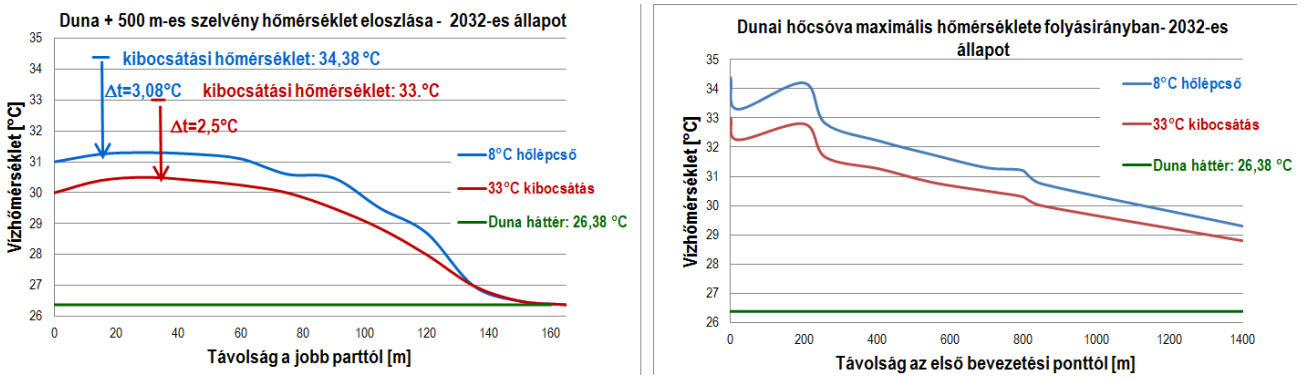


11.9.1-44. ábra: Hőcsóva áramlási viszonyai, áramvonalak és hőmérséklet (melegvíz: 33°C) –2032. évi mértékadó állapot ($T_{Duna,max}$=26,38 °C, Duna vízhozam = 1 500 m³/s) – Paksi Atomerőmű + Paks II. együttesen

A +500 m-es szelvénynek a jelen állapotnál definiált, az eredeti bevezetési helytől számított 500 m-t (eredeti referenciaszelvényt) értjük. Az első bevezetéstől számított tetszőleges távolságban meghatározhatjuk a maximális hőmérsékletet, ez esetben viszont gondot okozhat – éppen a háromdimenziós hatások összetettsége miatt - annak az eldöntése, hogy az adott hőmérséklet-többlet mekkora részét jelenti az első, illetve a második bevezetés.

A 3D elkeveredés-vizsgálat eredményeként, a Dunába (1 nap/év tartósságú,1500 m³/s Duna vízhozam mellett) bevezetendő mértékadó melegvízterhelés (100 m³/s + 132 m³/s = 232 m³/s, 8 °C-os hőlépcsővel és 33 °C-os kibocsátással), a 2085. évben várható maximális Duna vízhőmérséklet (26,38 °C) alapulvételével, az alábbi maximális vízhőmérséklet hossz-szelvény és referenciaszelvényben (+ 500 m) várható maximális vízhőmérsékleti keresztszelvény adódik (11.9.1-45 ábra).

Mivel a 33 °C-os melegvízkibocsátás 6,62 °C-os (33 – 26,38 °C) hőlépcsőt jelent, ami a 8 °C-os hőlépcsővel történő kibocsátástól már jelentősebb mértékben eltér, ezért a modellszámítással számított maximális vízhőmérséklet eloszlások is jelentősebb mértékben eltérnek egymástól.



11.9.1-45. ábra: Hőmérséklet változása kereszt- és hosszirányban - 2032-es mértékadó állapot ($T_{Duna,max}$=26,38 °C) – Paksi Atomerőmű + Paks II. együttesen

Megjegyzendő, hogy a 11.9.1-45 ábra a 3D hidrodinamikai és transzportmodellel, a háromdimenziós víztérben számított maximális vízhőmérsékleteket ábrázolja, amely meghaladja a 2D mélységintegrált vízhőmérséklet értékeket. A melegvízbevezetés alatt ~2-3 km-ig a maximális vízhőmérséklet a Duna vízterének felszínközeli tartományában található, míg ~2-3 km után a melegvíz a Dunában, a mélység mentén gyakorlatilag átkeveredik, így ott a 2D transzportmodell már jól alkamazható a melegvízelkeveredés modellezésére.

Az eredmények alapján megállapítható, hogy a Paksi Atomerőmű és Paks II. együttes hőterhelése esetén a kibocsátott hőmennyiség nagy volumene és az emelkedett háttérhőmérséklet miatt a 30 °C-os határérték az év összes napján várhatóan nem tartható (1500 m³/s alatti Duna vízhozam esetén, várhatóan legfeljebb 1 nap/év tartóssággal). Ez utóbbi egyébként mindössze 30-26,38 = 3,62 °C többlethőmérsékletet engedne meg. Míg 8 °C-os hőlépcsőt feltételezve ez 4,38 °C-os hűlést, 33 °C-os bebocsátásnál pedig 3 °C-os hűlést kellene elérni (szemben a modell eredmények 3,08 és 2,5 °C-os hűlésével).

A várható határérték túllépéskor, mikor a Duna vízhőmérséklete meghaladja a 8 °C-os hőlépcső esetén a 24,31 °C-t (várható tartósság, a biztonság javára 2800 m³/s Duna vízhozam alatti vízhozam tartományban: 13 nap/év, míg 1500 m³/s Duna vízhozam alatti tartományban 1 nap/év), 33 °C-os melegvíz terhelés esetén pedig a 25,11 °C-t (várható tartósság: a biztonság javára 2800 m³/s Duna vízhozam alatti vízhozam tartományban: 7 nap/év), intézkedést igényel (pl. monitoring, visszaterhelés, blokk karbantartás, blokk leállás).

<u>A +500 m-es referencia szelvényben várható, 30 °C határérték túllépés időtartama, tartóssága:</u>

A mértékadó állapotokban, az ellenőrző szelvényben (+500 m) számított maximális Duna vízhőmérsékletek alakulását és a 30 °C határértéktúllépés klímamodell alapján számított időtartamát, tartósságát a 11.9.1-4. táblázatban foglaljuk össze. A Duna 1500 m³/nap alatti vízhozamának tartóssága 1 nap/év körüli az alapul vett Duna háttér vízhőmérséklete (26,38 °C) esetében (lásd: „A Duna vízhőmérsékletének jelenlegi és várható alakulása” című 11.7.4 számú fejezetben), de a biztonság javára a 2800 m³/s-hoz tartozó nagyobb tartósságértékeket vettük figyelembe.

A határérték túllépés, beavatkozással kezelendő tartománya	Mértékadó állapot (2014.)		Mértékadó állapot (2032.)	
	8 [°C] hőlépcső	33 [°C] melegvíz kibocsátás	8 [°C] hőlépcső	33 [°C] melegvíz kibocsátás
Maximális háttér Duna vízhőmérséklet várhatóan [°C]	25,61 [°C]		26,38 [°C]	
Számított maximális Duna vízhőmérséklet [°C]	26,11 [°C]	26,36 [°C]	24,31 [°C]	25,11 [°C]
Számított túllépési idő, tartósság [nap]	0,2 [nap/év]	0,1 [nap/év]	13 [nap/év]	7 [nap/év]

11.9.1-4. táblázat: A határértéktúllépés időtartama, tartóssága (2032.) – Paksi Atomerőmű + Paks II.

A határérték túllépés elkerülésének lehetőségei:

- utóhűtés, utóhűtő rendszer kiépítésével (a 8 °C-os hőlépcső helyett 33 °C-os maximális melegvíz kibocsátással),
- visszaterhelés,
- blokkleállás, vagy blokk karbantartás.

11.9.1.4.1.3 A 2085. évi mértékadó állapot jellemzése (Paks II. önállóan)

Paks II. működése esetén az új bevezetési helyen 132 m³/s hűtővizet vezetünk a Dunába, rekuperációs műtárgyon keresztül. A hőterhelés ugyan kisebb, mint a 2032-es esetben, de a klímaváltozás miatt maximálisan előforduló háttérhőmérséklet időbeli emelkedése miatt, a 30 °C-os határérték – 1500 m³/s alatti Duna vízhozam esetén, várhatóan legfeljebb 1 nap/év tartósággal -, csak a keresztgát után tartható, hiszen ebben az esetben a csóva megengedhető többlethőmérséklete csupán 30 - 28,64 = 1,36 °C, az 500 m-es referenciaszelvényben.

Határérték túllépés akkor várható, amikor a Duna vízhőmérséklete a 8 °C-os hőlépcső esetén meghaladja a 23,81 °C-t (várható tartósság: a biztonság javára 2800 m³/s Duna vízhozam alatti vízhozam tartományban: 40 nap/év, míg 1500 m³/s Duna vízhozam alatti tartományban 1 nap/év), 33 °C-os melegvíz terhelés esetén pedig a 25,23 °C-t (várható tartósság: a biztonság javára 2800 m³/s Duna vízhozam alatti vízhozam tartományban: 13 nap/év, míg 1500 m³/s Duna vízhozam alatti tartományban 20 nap/év). Ezen esetek intézkedést igényelnek (pl. visszaterhelés, utóhűtés, blokkleállás, blokk karbantartás).

A +500 m-es referenciaszelvényben várható, 30 °C határértéktúllépés időtartama, tartóssága:

A mértékadó állapotokban, az ellenőrző szelvényben (+500 m) számított maximális Duna vízhőmérsékletek alakulását és a 30 °C határértéktúllépés pesszimista klímamodell (DMI-B2 PRODUCE) alapján számított időtartamát, tartósságát a 11.9.1-5. táblázatban foglaljuk össze. A Duna 1500 m³/nap alatti vízhozamának tartóssága 1 nap/év körüli az alapul vett Duna háttér vízhőmérséklete (28,64 °C) esetében (lásd: „A Duna vízhőmérsékletének jelenlegi és várható alakulása" című 11.7.4 számú fejezetben), de a biztonság javára a 2800 m³/s-hoz tartozó nagyobb tartósságértékeket vettük figyelembe.

A határértéktúllépés, beavatkozással kezelendő tartománya	Mértékadó állapot (2014.)		Mértékadó állapot (2085.)	
	8 [°C] hőlépcső	33 [°C] melegvíz kibocsátás	8 [°C] hőlépcső	33 [°C] melegvíz kibocsátás
Maximális háttér Duna vízhőmérséklet várhatóan [°C]	25,61 [°C]		28,64 [°C]	
Számított maximális Duna vízhőmérséklet [°C]	26,11 [°C]	26,36 [°C]	23,81 [°C]	25,23 [°C]
Számított túllépési idő, tartósság [nap]	0,2 [nap]	0,1 [nap/év]	40 [nap/év]	20 [nap/év]

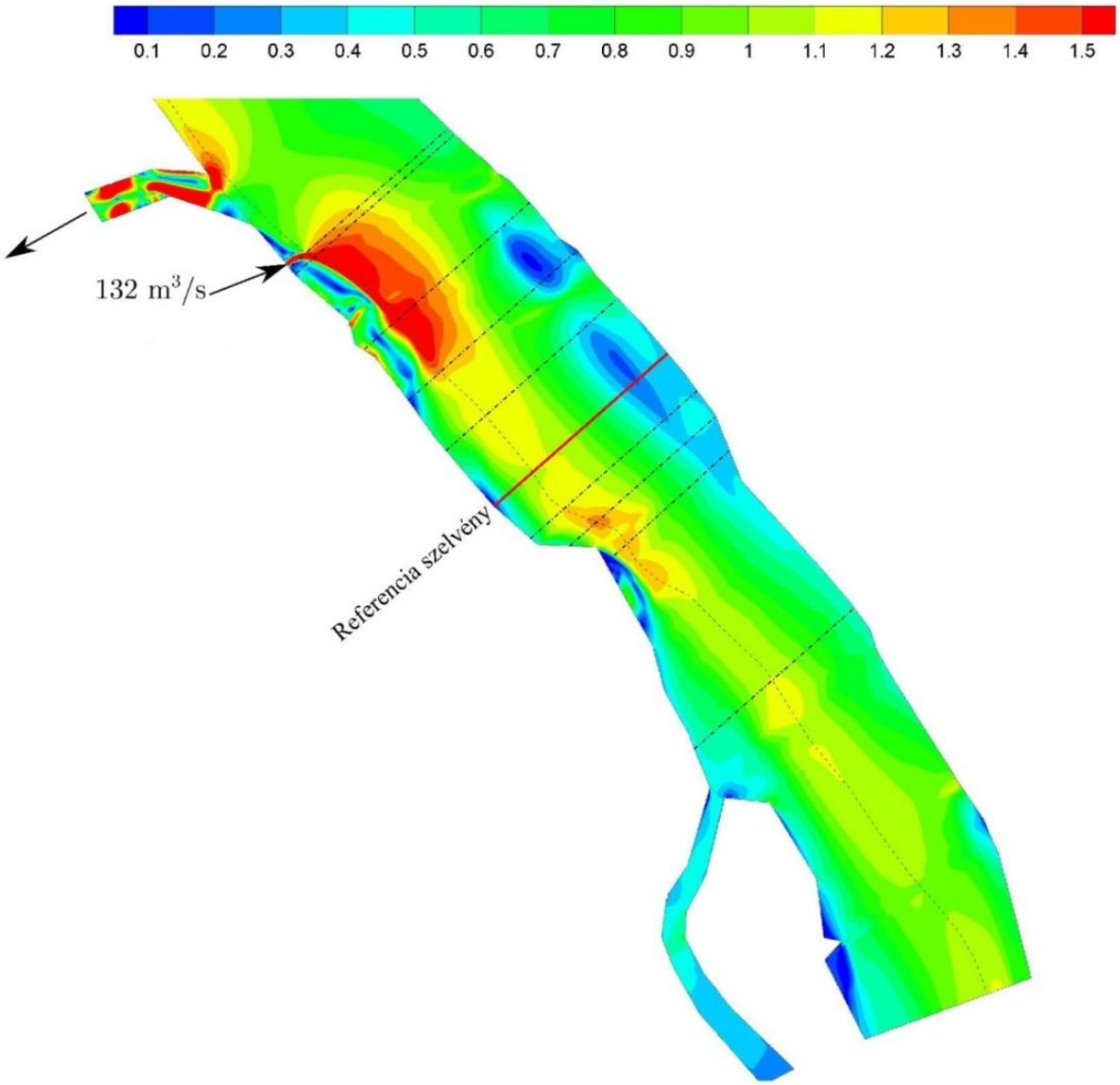
11.9.1-5. táblázat: A határérték túllépés időtartama, tartóssága (2085) – Paks II. önállóan

A határérték túllépés elkerülésének lehetőségei:

- utóhűtés, utóhűtő rendszer kiépítésével (a 8 °C-os hőlépcső helyett 33 °C-os maximális melegvízkibocsátással),
- visszaterhelés,
- blokkleállás, vagy blokk karbantartás.

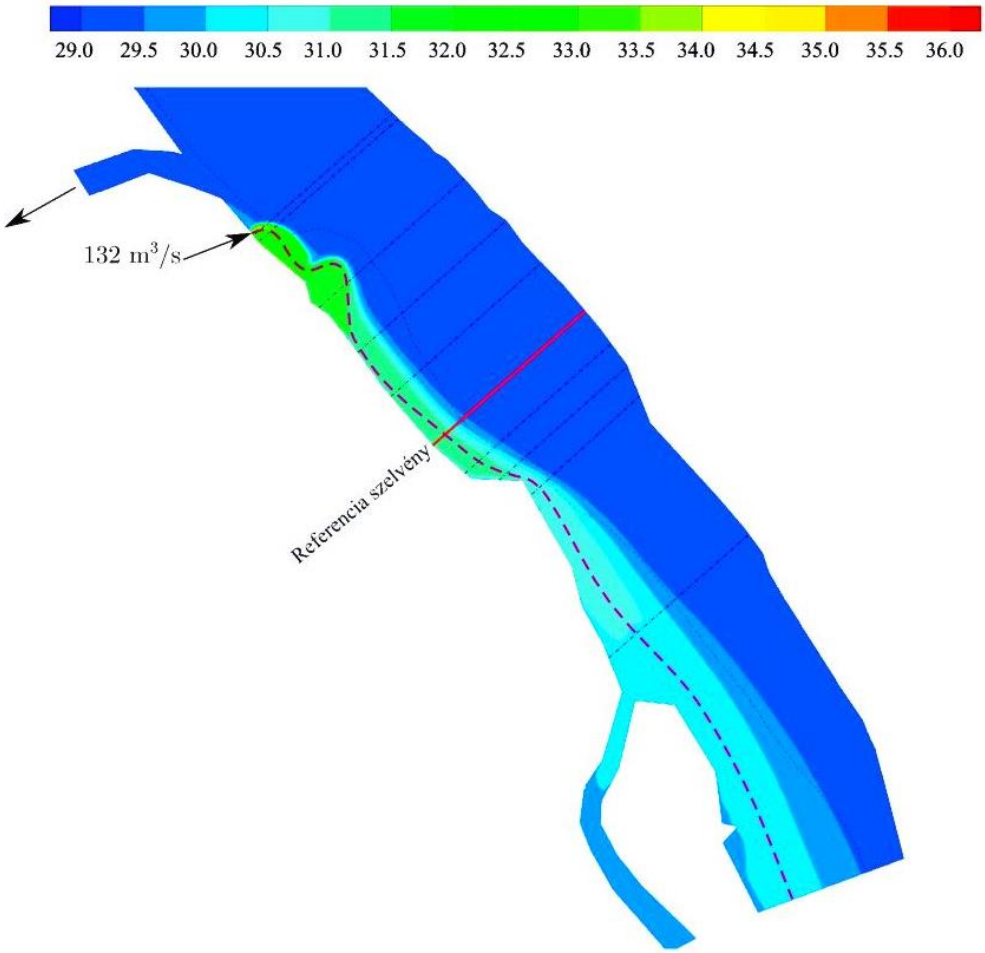
A 3D hidrodinamikai és hőtranszport modell számítási eredményei:

A Duna 1500 m³/s alatti vízhozamának várható tartóssága 2085-ben, a 28,64 °C Duna vízhőmérséklet feletti vízhőmérsékletekre 1 nap/év. A 132 m³/s tervezett maximális hűtővízkivétel és egyben melegvíz kibocsátás esetén a Duna 1500 m³/s vízhozama idején, a 3D hidrodinamikai modellel számított felszínközeli sebességeloszlást a 11.9.1-46 ábra szemlélteti.



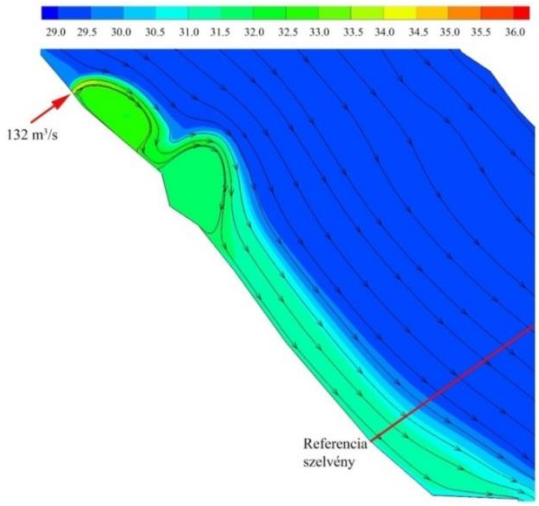
11.9.1-46. ábra: Felszín közelében kialakuló sebesség eloszlás (melegvíz 33 °C) – 2085. évi mértékadó állapot ($T_{Duna,max}$=28,64 °C, Duna vízhozam 1 500 m³/s) – Paks II. önállóan

A 132 m³/s tervezett maximális hűtővízkivétel és egyben (33 °C-os) melegvíz kibocsátás esetén (2085) a Duna 1500 m³/s vízhozama idején, a 3D hidrodinamikai modellel számított felszínközeli maximális hőmérsékleteloszlást a 11.9.1-47 ábra szemlélteti.



11.9.1-47. ábra: Hőcsóva, 33°C-os melegvízkibocsátás esetén – 2085. évi mértékadó állapot ($T_{Duna,max}$=28,64 °C, Duna vízhozam = 1 500 m³/s) – Paks II. önállóan

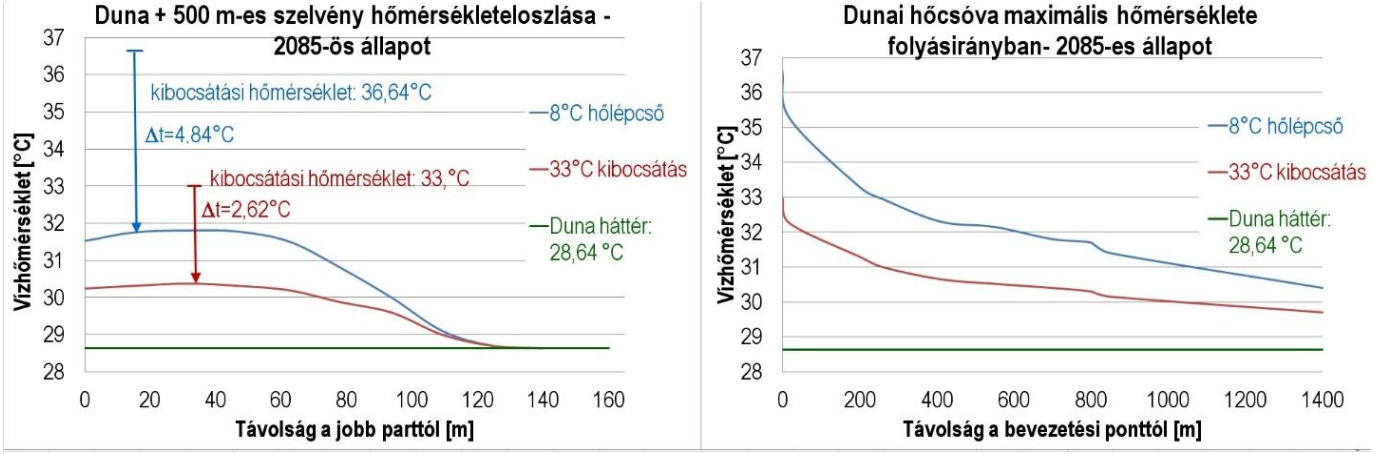
A 132 m³/s tervezett maximális hűtővízkivétel és egyben (33 °C-os) melegvíz kibocsátás esetén (2085), a Duna 1500 m³/s vízhozama idején, a 3D hidrodinamikai modellel számított felszínközeli maximális hőmérsékleteloszlást és az áramlási pályákat, a bevezetés környezetében a 11.9.1-48 ábra szemlélteti.



11.9.1-48. ábra: Hőcsóva áramlási viszonyai, sebességirányok és hőmérséklet (melegvíz: 33 °C) – 2085-ös mértékadó állapot ($T_{Duna,max}$=28,64 °C, Duna vízhozam = 1 500 m³/s) – Paks II. önállóan

A 3D elkeveredés-vizsgálat eredményeként, a Dunába (1 nap/év tartósságú, 1500 m³/s Duna vízhozam mellett) bevezetendő mértékadó melegvízterhelés (132 m³/s, 8 °C-os hőlépcsővel és 33 °C-os kibocsátással), a 2085. évben várható maximális Duna vízhőmérséklet (28,64 °C) alapulvételével, az alábbi maximális vízhőmérséklet hossz-szelvény és referenciaszelvényben (+ 500 m) várható maximális vízhőmérsékleti keresztszelvény adódik (11.9.1-49 ábra).

Mivel a 33 °C-os melegvízkibocsátás 4,36 °C-os (33 – 28,64 °C) hőlépcsőt jelent, ami a 8 °C-os hőlépcsővel történő kibocsátástól már jelentős mértékben eltér, ezért a két alternatívára, modellszámítással számított maximális vízhőmérséklet eloszlások is jelentős mértékben eltérnek egymástól.



11.9.1-49. ábra: Hőmérséklet változása hosszirányban – 2085-ös mértékadó állapot ($T_{Duna,max}$ =28,64 °C, Duna vízhozam = 1 500 m³/s) – Paks II. önállóan

11.9.1.4.2 A 30 °C feletti Duna vízhőmérséklettel érintett hatásterület meghatározása, a Duna 1 500 m³/s vízhozama esetén

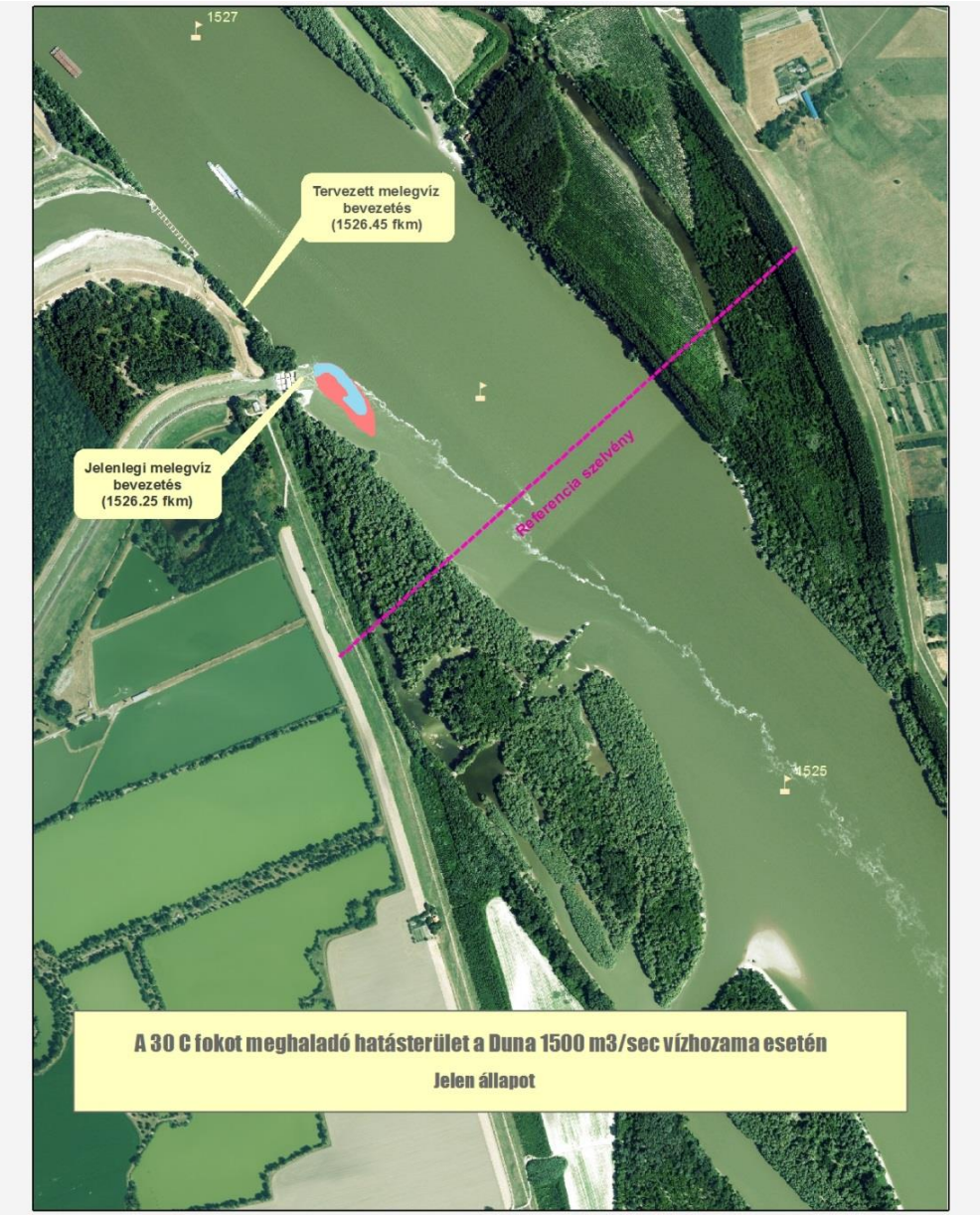
A 2014., a 2032. és a 2085. évi mértékadó helyzetekben számított hőcsóva hatásterületeit, a 30 °C vízhőmérséklettel érintett Duna víztér területet, az alábbi ábrákon mutatjuk be.

A pesszimistább (DMI-B2 PRODUCE) klimatológiai forgatókönyv szerint, az 1500 m³/s alatti Dunavízhozam tartományban, a mértékadó időpontokban (2014, 2032 és 2085), mértékadóként felvett Duna háttér vízhőmérsékletek (2014: 25,61 °C; 2032: 26,38 °C és 2085-ben: 28,64 °C) várható túllépési tartóssága mindössze 1 nap/év.

Hatásterület meghatározása a 2014. évi mértékadó állapotban, a Duna 1 500 m³/s vízhozama esetén

- a Duna háttérhőmérséklete (T_{Duna}) 25,61°C (Az 1500 m³/s vízhozam alatti vízhozamtartományhoz, a matematikai statisztikai vizsgálatok és a pesszimistább (DMI-B2 PRODUCE) klímamodell alapján, alulról közelítve 1 nap/év hőmérséklet túllépési tartósság tartozik 2014-ben.),
- hűtővíz hozama (q) 100 m³/s, a jelenlegi bevezetési helyen ömlik a Dunába,
- a felmelegedett hűtővíz hőmérséklete:
  (1. eset) $T_{melegvíz}$=33°C és
  (2. eset) a 8°C hőlépcsőt alkalmazó bebocsátás ($T_{melegvíz}$ = T_{Duna}+8°C = 33,61°C).

A 2014-re számított mértékadó, várhatóan 1 nap/év tartósságú dunai vízhőmérséklet eloszlás, 30 °C-t meghaladó vízhőmérséklettel jellemezhető víztest területét, a 11.9.1-50 ábrán szemléltetjük, a 8 °C hőlépcsővel és a 33 °C-kal, valamint 100 m³/s melegvízhozammal történő mértékadó terhelések eseteire.



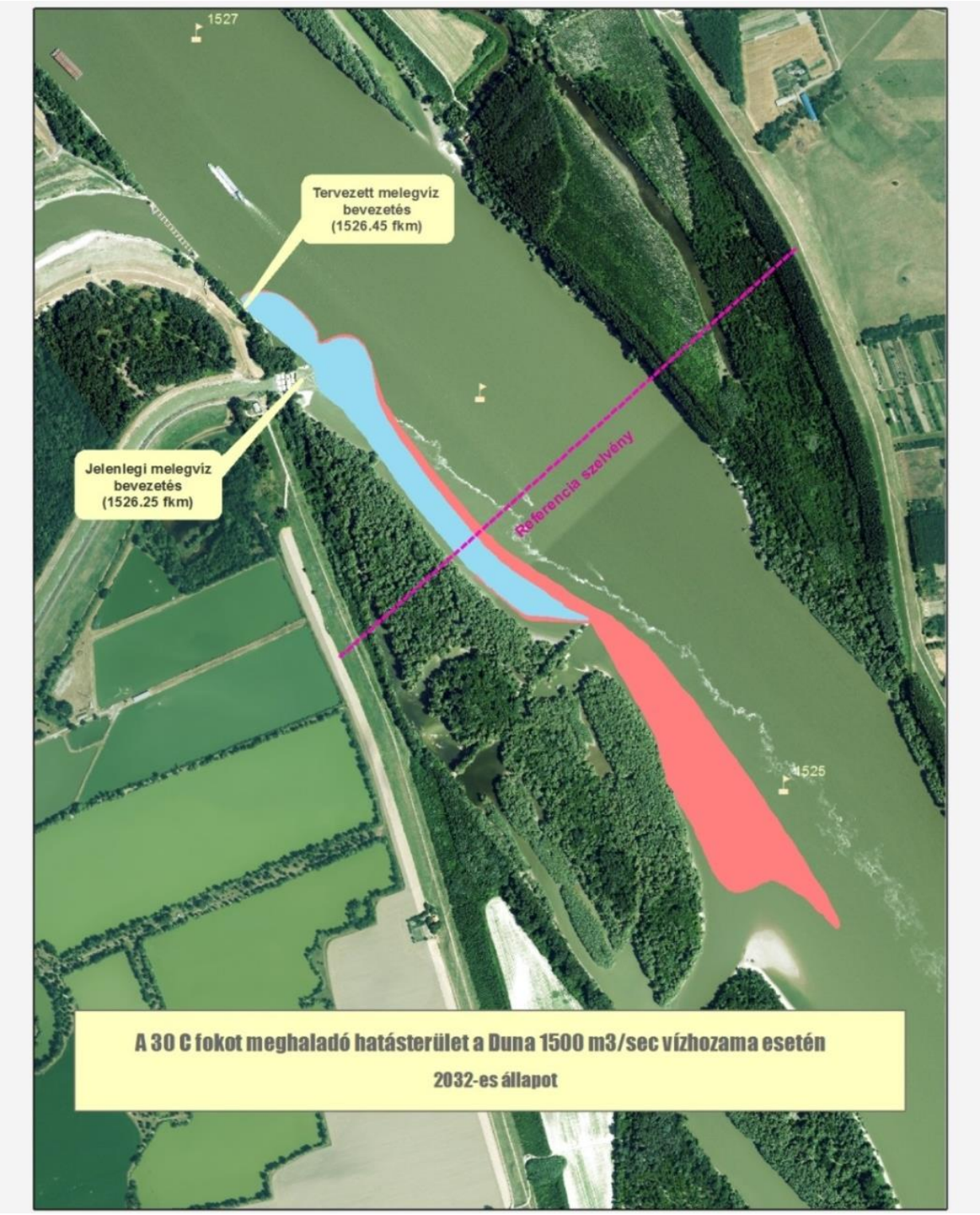
Megjegyzés:
kék: melegvíz kibocsátás 33 °C, piros: hőlépcső 8 °C

11.9.1-50. ábra: A hőcsóva számított, 30 °C feletti hatásterülete – 2014. évi mértékadó állapot ($T_{Duna,max}$=25,61 °C, Q_{Duna}= 1 500 m³/s, melegvíz hozam: 100 m³/s) – Paksi Atomerőmű önállóan

Hatásterület meghatározása a 2032. évi mértékadó állapotban, a Duna 1500 m³/s vízhozama esetén

- T_{Duna}=26,38°C (Az 1500 m³/s vízhozam alatti vízhozamtartományhoz, a matematikai statisztikai vizsgálatok és a pesszimistább (DMI-B2 PRODUCE) klímamodell alapján, alulról közelítve 1 nap/év hőmérséklet túllépési tartósság tartozik 2032-ben.),
- Paksi Atomerőmű és Paks II. egyidejű működése folytán $q_{Jelenlegi}$=100 m³/s a jelenlegi bebocsátási helyen és $q_{2032.}$=132 m³/s, a jelenlegi bebocsátási hely felvízi oldalára (200 méterrel feljebb) tervezett bebocsátási helyen ömlik a Dunába, rekuperációs műtárgyon keresztül,
- a felmelegedett hűtővíz hőmérséklete:
  (1. eset) $T_{melegvíz}$=33°C és
  (2. eset) $T_{melegvíz}$=34,38°C (8°C-os hőlépcső).

A 2032-re számított mértékadó, várhatóan 1 nap/év tartósságú dunai vízhőmérséklet eloszlás, 30 °C-t meghaladó vízhőmérséklettel jellemezhető víztest területét, az alábbi (11.9.1-51) ábrán szemléltetjük, a 8 °C hőlépcsővel és a 33 °C-kal, valamint 232 m³/s melegvízhozammal történő mértékadó terhelések eseteire.



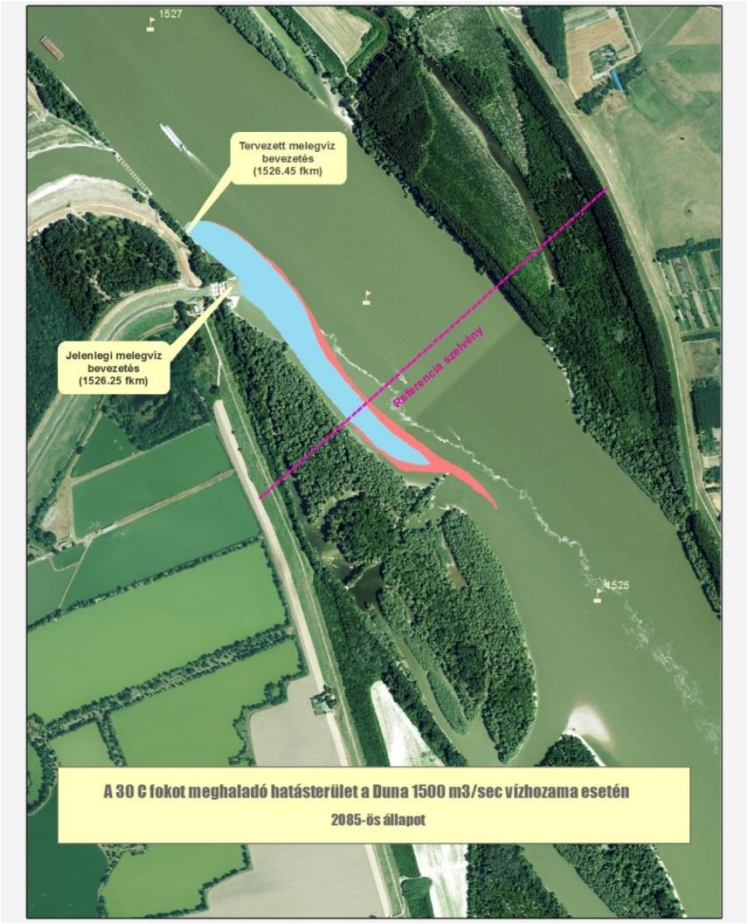
Megjegyzés:
kék: melegvíz kibocsátás 33 °C, piros: hőlépcső 8 °C

11.9.1-51. ábra: A hőcsóva számított, 30 °C feletti hatásterülete – 2032. évi mértékadó állapot (T_{Duna},max=26,38 °C, Q_{Duna}= 1 500 m³/s, melegvíz hozam: 100 ³/s + 132 m³/s) – Paksi Atomerőmű + Paks II. együttesen

Hatásterület meghatározása a 2085. évi mértékadó állapotban, a Duna 1500 m³/s vízhozama esetén

- T_{Duna}=28,64°C (Az 1500 m³/s vízhozam alatti vízhozamtartományhoz, a matematikai statisztikai vizsgálatok és a pesszimistább (DMI-B2 PRODUCE) klímamodell alapján, alulról közelítve 1 nap/év hőmérséklet túllépési tartósság tartozik 2085-ben.),
- $q_{2085.}$=132 m³/s, a jelenlegi bebocsátási hely felvízi oldalára tervezett bebocsátási helyen ömlik a Dunába, rekuperációs műtárgyon keresztül,
- a felmelegedett hűtővíz hőmérséklete:
  (1. eset) $T_{melegvíz}$=33°C, illetve
  (2. eset) $T_{melegvíz}$=36,64°C (8°C-os hőlépcső).

A 2085-re számított mértékadó, várhatóan 1 nap/év tartósságú dunai vízhőmérséklet eloszlás, 30 °C-t meghaladó vízhőmérséklettel jellemezhető víztest területét, az alábbi (11.9.1-52) ábrán szemléltetjük, a 8 °C hőlépcsővel és a 33 °C-kal, valamint 132 m³/s melegvízhozammal történő mértékadó terhelések eseteire.

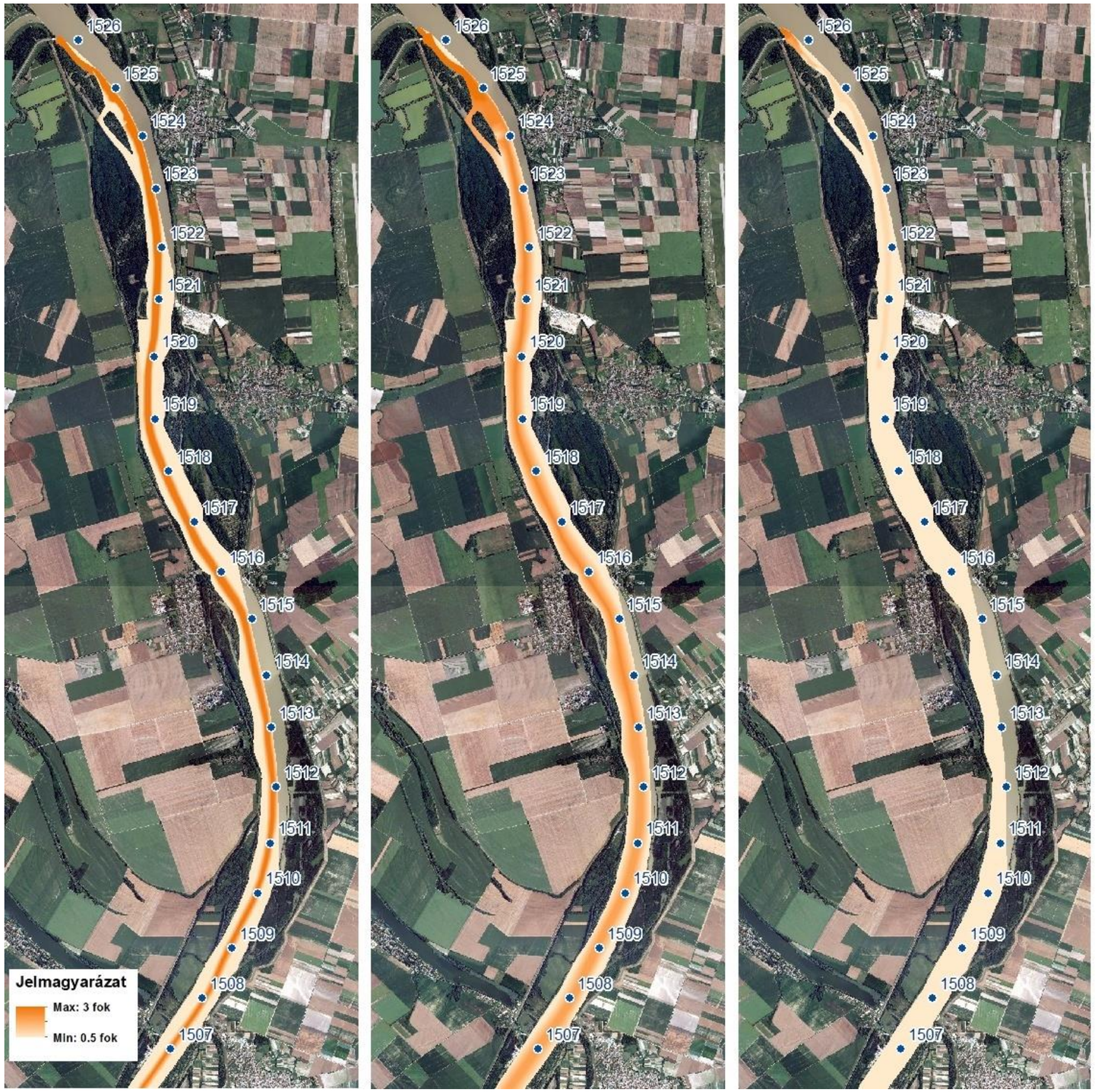


Megjegyzés:
kék: melegvíz kibocsátás 33 °C, piros: hőlépcső 8 °C

11.9.1-52. ábra: A hőcsóva számított, 30 °C feletti hatásterülete – 2085. évi mértékadó állapot ($T_{Duna,max}$=28,64 °C, Q_{Duna}= 1 500 m³/s, melegvíz hozam: 132 m³/s) – Paks II. önállóan

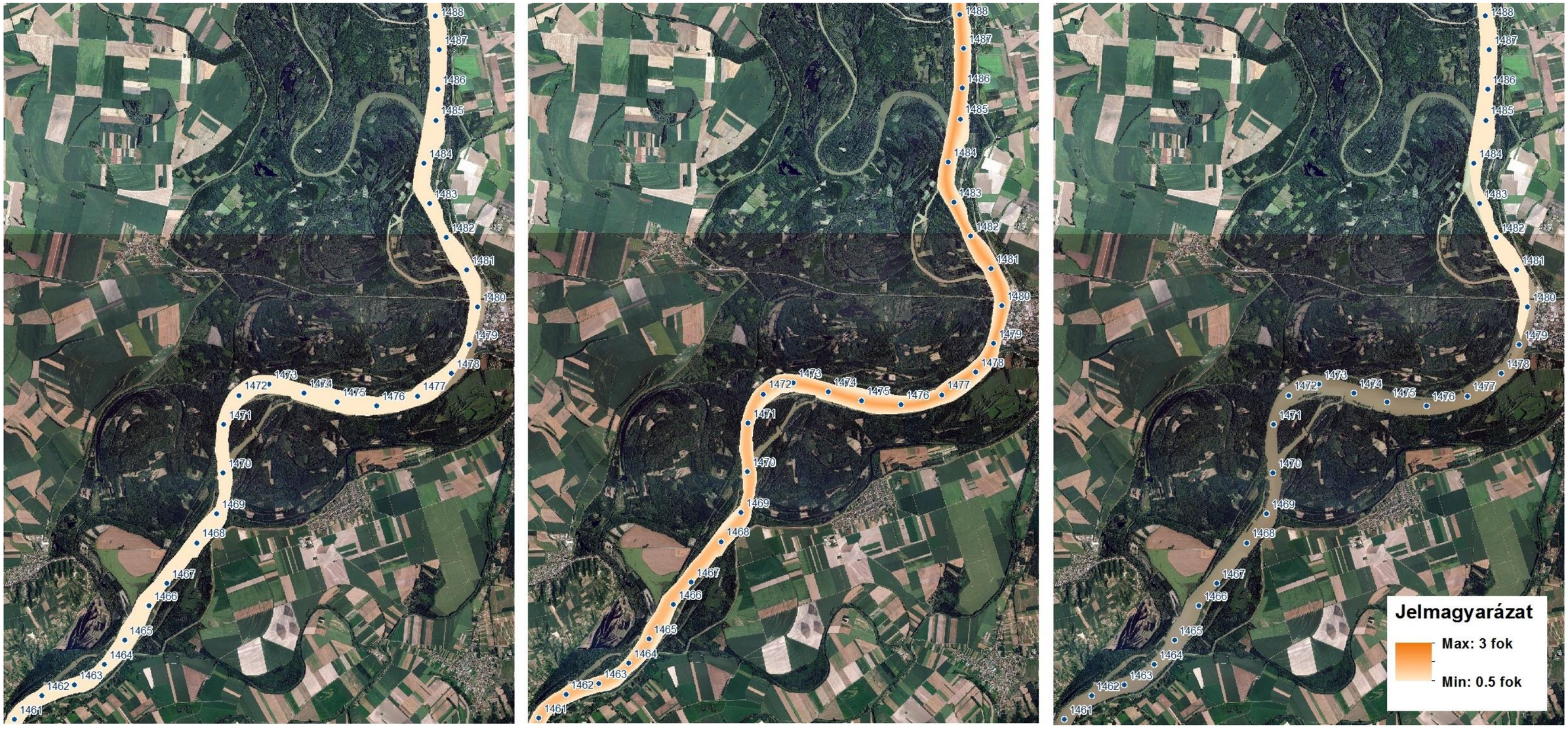
11.9.1.4.3 A számított hőcsóva szintvonalas eloszlása a Déli országhatárig (Duna 1 500 m³/s, Melegvíz 33 °C)

A fentiekben ismertetett modellszámítások eredményei alapján - a jelen, a 2032. és 2085. évi mértékadó helyzetekhez - készített hőcsóva, szintvonalas eloszlását az alábbi ábrasor (11.9.1-53. ábra, 11.9.1-54. ábra, 11.9.1-55. ábra és 11.9.1-56. ábra) szelélteti, a Duna 1 500 m³/s vízhozama és 33 °C-os melelgvíz kibocsátás esetén (1517-1436 fkm között).



11.9.1-53. ábra: A 2014., a 2032. és 2085. évi mértékadó helyzetekben a hőcsóva szintvonalas eloszlása (Duna 1507 – 1526 fkm között) – Paksi Atomerőmű; Paksi Atomerőmű + Paks II. együttesen; Paks II. önállóan

11.9.1-54. ábra: A 2014., a 2032. és 2085. évi mértékadó helyzetekben a hőcsóva szintvonalas eloszlása (Duna 1488 – 1507 fkm között) – Paksi Atomerőmű; Paksi Atomerőmű + Paks II. együttesen; Paks II. önállóan



11.9.1-55. ábra: A 2014., a 2032. és 2085. évi mértékadó helyzetekben a hőcsóva szintvonalas eloszlása (Duna 1488 – 1461 fkm között) – Paksi Atomerőmű; Paksi Atomerőmű + Paks II. együttesen; Paks II. önállóan

11.9.1-56. ábra: A 2014., a 2032. és 2085. évi mértékadó helyzetekben a hőcsóva szintvonalas eloszlása (Duna 1436 – 1461 fkm között – Paksi Atomerőmű; Paksi Atomerőmű + Paks II. együttesen; Paks II. önállóan

11.9.1.4.4 Hőmérséklet eloszlás a Déli országhatár Duna szelvényében (Duna 1433 fkm), a Duna 1 500 m³/s vízhozama esetén

A +500 m-es szelvénytől az országhatárig terjedő Duna szakaszon (Duna 1525,75 - 1433 fkm) a hőcsóva jellemzőinek számítására az analitikus kvázi 3D CORMIX modellt alkalmaztuk. Fentiekben bemutattuk a modell kalibrációját.

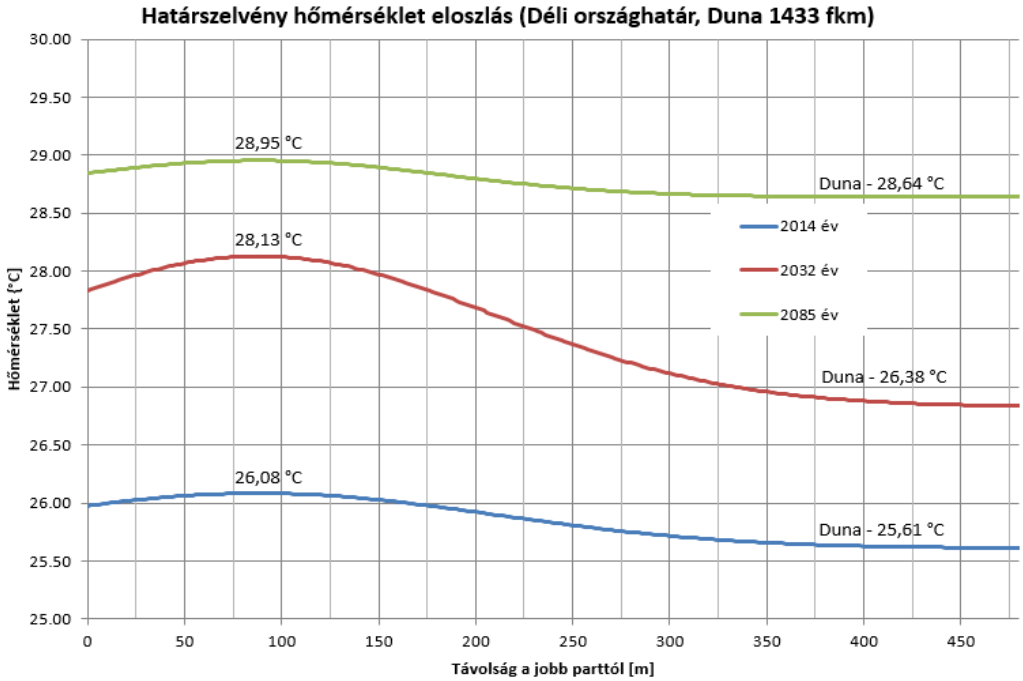
A pesszimistább (DMI-B2 PRODUCE) klimatológiai forgatókönyv szerint, az 1500 m³/s alatti Dunavízhozam tartományban, a mértékadó időpontokban (2014, 2032 és 2085), mértékadóként felvett Duna háttér vízhőmérsékletek (2014: 25,61 °C; 2032: 26,38 °C és 2085-ben: 28,64 °C) várható túllépési tartóssága mindössze 1 nap/év.

A mértékadó helyzetekben előforduló, hőterhelés szempontjából kritikus elkeveredési állapotokat, a korábbiakhoz hasonló módon, az alábbi esetek vizsgálatára alapoztuk:

- ***Paksi Atomerőmű üzeme***: a Duna háttérhőmérséklete (T_{Duna}) 25,61°C, hűtővíz hozama (q) 100 m³/s, a jelenlegi bevezetési helyen ömlik a Dunába, a felmelegedett hűtővíz hőmérséklete
  (1. eset) ($T_{melegvíz}$)=33°C,, illetve külön megvizsgáltuk
  (2. eset) a 8°C hőlépcsőt alkalmazó bebocsátást ($T_{melegvíz}$ = T_{Duna}+8°C = 33,61°C).
- ***2032-es állapot (Paksi Atomerőmű + Paks II. mértékadó)***: T_{Duna}=26,38°C, Paksi Atomerőmű és Paks II. egyidejű működése folytán $q_{Jelenlegi}$=100 m³/s a jelenlegi bebocsátási helyen és q_{2032}=132 m³/s a jövőbeli, amely a jelenlegi bebocsátási hely felvízi oldalára tervezett bebocsátási helyen ömlik a Dunába, rekuperációs műtárgyon keresztül,
  (1. eset) $T_{melegvíz}$=33°C, illetve (2. eset) $T_{melegvíz}$=34,38°C.
- ***2085-ös állapot (Paks II. mértékadó)***: T_{Duna}=28,64°C, q_{2085} = 132 m³/s a jövőbeli, amely a jelenlegi bebocsátási hely felvízi oldalára tervezett bebocsátási helyen ömlik a Dunába, rekuperációs műtárgyon keresztül
  (1. eset) $T_{melegvíz}$=33°C, illetve (2. eset) $T_{melegvíz}$=36,64°C.

1. eset - A Dunába vezetendő melegvíz hőmérséklete $T_{melegvíz}$ = 33°C

Paksi Atomerőmű üzeme esetén (melegvíz hozam: 100 m³/s), valamint a mértékadó 2032. és 2085. években számított hőmérséklet eloszlást, a Duna Déli országhatár szelvényében (Duna 1433 fkm), 1 500 m³/s permanens Duna vízhozamra, az alábbi ábrákon mutatjuk be és az alábbi táblázatokban összegezzük a számított maximális és háttérhőmérséklet közötti különbségeket.



11.9.1-57. ábra: Hőmérséklet-eloszlás a Duna Déli országhatár szelvényében (Duna 1433 fkm), $T_{Melegvíz}$ = 33 °C (2014., 2032. és 2085. évi mértékadó állapot)

Megjegyezzük, hogy a melegvíz, Dunai bevezetésének helyétől (Duna 1526,25 fkm), a Déli országhatár szelvényéig (Duna 1433 fkm), mintegy ~93 km utat tesz meg a Duna mederben, átlagosan 24 óra alatt - a Duna középvíz hozamánál (2300 m³/s) kisebb Duna vízhozamoknál az utazási idő növekszik.

A melegvíz Dunába történő bevezetését déli 12 órára vettük fel (a Paksi vízmérce napi hőmérsékletadatainak éves maximumaira illeszkedő trendjét 1,2 °C fokkal megnöveltük a hidegvíz-csatorna szelvényében, a déli órákra), így a melegvíz mintegy egy nappal később, 12 óra körül lép ki az országból. Az éjszakai napsugárzás hiányának és a léghőmérséklet csökkenés hűtő hatását figyelembe vettük a számítások során.

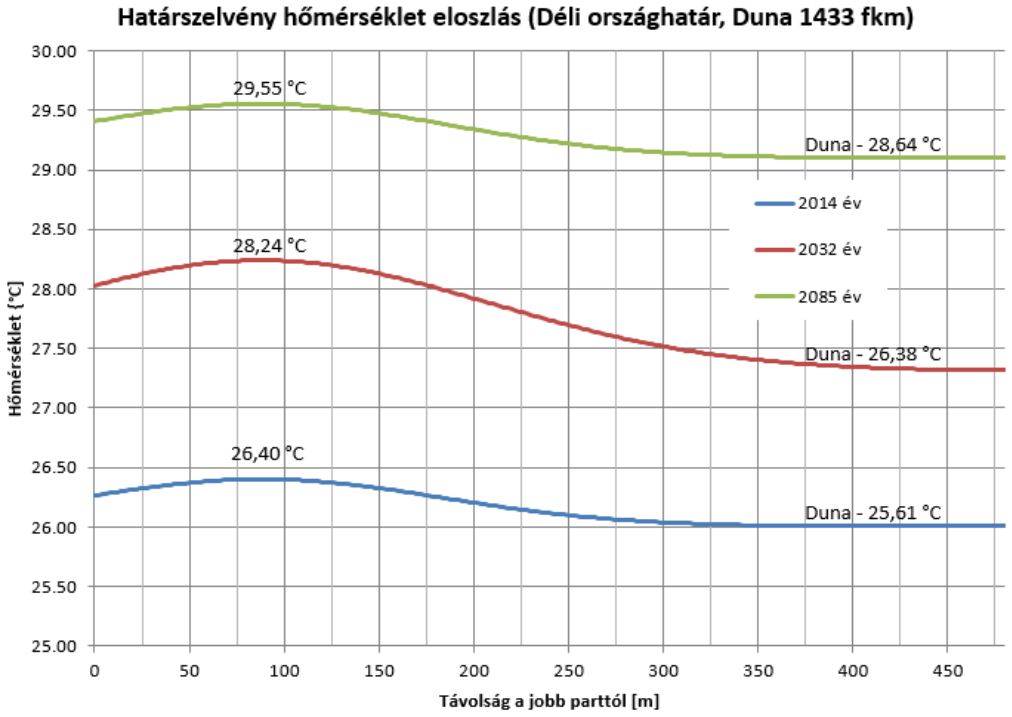
A Duna D-i országhatár szelvényében számított legnagyobb hőmérsékletváltozásokat, a mértékadó 2014., 2032. és 2085. évekre vonatkozóan a 11.9.1-6 táblázatban foglaljuk össze, a 33 °C-os melegvízkibocsátás esetére.

A legnagyobb hőmérséklet-változás mértéke a Duna Déli országhatár szelvényében (Duna 1433 fkm) $T_{Melegvíz}$ **= 33 °C,** Q_{Duna}**= 1500 m³/s** $\Delta T_{Max} = T_{Max} - T_{Hattér}$ **[°C]**		
2014. évi mértékadó állapot	**2032. évi mértékadó állapot**	**2085. évi mértékadó állapot**
T_{Max} = 26,08 [°C]	T_{Max} = 28,13 [°C]	T_{Max} = 28,95 [°C]
$T_{Hattér}$ = 25,61 [°C]	$T_{Hattér}$ = 26,38 [°C]	$T_{Hattér}$ = 28,64 [°C]
ΔT_{Max} = 0,47 [°C]	ΔT_{Max} = 1,75 [°C]	ΔT_{Max} = 0,31 [°C]

11.9.1-6. táblázat: A legnagyobb hőmérséklet-változás mértéke a Duna Déli országhatár szelvényében, $T_{Melegvíz}$ = 33 °C (2014., 2032. és 2085. évi mértékadó állapot)

2. eset - A Dunába vezetendő melegvíz hőmérséklete 8 °C fokos hőlépcsővel nagyobb a dunai háttér vízhőmérsékletnél $T_{melegvíz} = T_{Duna} + 8°C$

Paksi Atomerőmű üzeme esetén (melegvíz hozam: 100 m³/s), valamint a mértékadó 2032. és 2085. években számított hőmérséklet eloszlást, a Duna Déli országhatár szelvényében (Duna 1433 fkm), permanens 1500 m³/s Duna vízhozamra a 11.9.1-58. ábra mutatja be és a 11.9.1-7. táblázat összegzi a számított maximális és háttérhőmérséklet közötti különbségeket.



11.9.1-58. ábra: Hőmérséklet-eloszlás a Duna Déli országhatár szelvényében (Duna 1433 fkm), $\Delta T_{Hőlépcső}$ = 8 °C (Paksi Atomerőmű, Paksi Atomerőmű és Paks II. együtt, Paks II. önállóan(2014., 2032. és 2085. évi mértékadó állapot)

A legnagyobb hőmérséklet-változás mértéke a Duna Déli országhatár szelvényében (Duna 1433 fkm) $\Delta T_{Hőlépcső}$ **= 8 °C,** Q_{Duna}**= 1500 m³/s** $\Delta T_{Max} = T_{Max} - T_{Hattér}$ **[°C]**		
2014. évi mértékadó állapot	**2032. évi mértékadó állapot**	**2085. évi mértékadó állapot**
T_{Max} = 26,40 [°C]	T_{Max} = 28,24 [°C]	T_{Max} = 29,55 [°C]
$T_{Hattér}$ = 25,61 [°C]	$T_{Hattér}$ = 26,38 [°C]	$T_{Hattér}$ = 28,64 [°C]
ΔT_{Max} = 0,79 [°C]	ΔT_{Max} = 1,86 [°C]	ΔT_{Max} = 0,91 [°C]

11.9.1-7. táblázat: A legnagyobb hőmérséklet-változás mértéke a Duna Déli országhatár szelvényében, $\Delta T_{Hőlépcső}$ = 8 °C (2014., 2032. és 2085. évi mértékadó állapot)

11.9.1.4.5 A Duna keresztszelvényeiben számított maximális vízhőmérsékletek hossz-szelvényei, a melegvíz bevezetésétől a déli országhatárig (Duna 1433 fkm), a Duna 1500 m³/s vízhozama esetén

A melegvíz Dunába vezetésének 3 km-es Duna mederbeli környezetében kialakuló hőcsóvát – a fentiekben bemutatott – háromdimenziós (3D OpenFOAM) hidrodinamikai- és transzport – modellel számítottuk, amely tartalmazta a meglévő bevezetés alatt 500 méterre lévő referenciaszelvényt is (Duna 1524-1527 fkm).

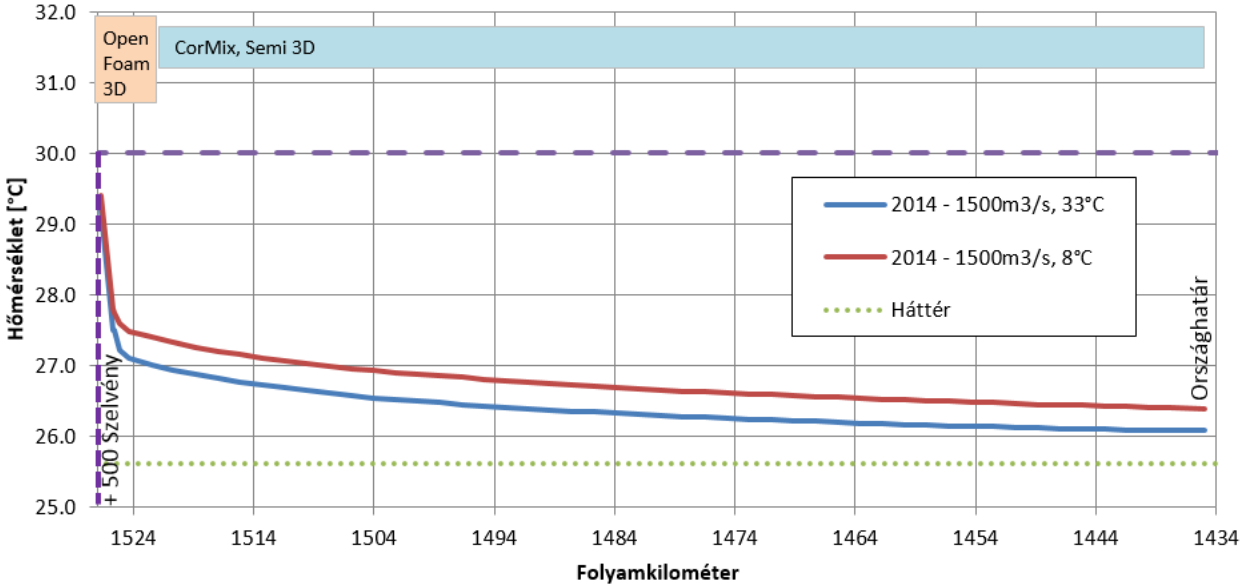
A melegvíz bevezetés hatásterületének és a déli országhatáron átterjedő hatások meghatározása érdekében a 3D számítási eredményekre illesztett, „Semi" 3D CORMIX modellt alkalmaztuk (az alábbi Duna hossz-szelvény ábrasoron 11.9.1-59. ábra (2014), 11.9.1-60. ábra (2032) és 11.9.1-61. ábra (2085) jelöltük az alkalmazott modell típust is).

A melegvíz bevezetés a jelen állapotban a Duna 1526,25 fkm szelvényében a jobb parton található energiatörő műtárggyal, míg a tervezett új bevezetés, mintegy 200 méterrel feljebb (Duna 1526,45 fkm), szintén a jobb parton található, a tervek szerint rekuperációs műtárggyal.

A referenciaszelvényt a jelenlegi melegvíz bevezetés alatt 500 méterrel, a Duna 1525,75 fkm szelvényében vettük fel, a vonatkozó hatályos jogszabály szerint („Az atomenergia alkalmazása során a levegőbe és vízbe történő radioaktív kibocsátásokról és azok ellenőrzéséről" szóló 15/2001. (VI. 6.) KöM rendelet szerint).

11.9.1.4.5.1 Paksi Atomerőmű üzeme - 2014. évi mértékadó állapot

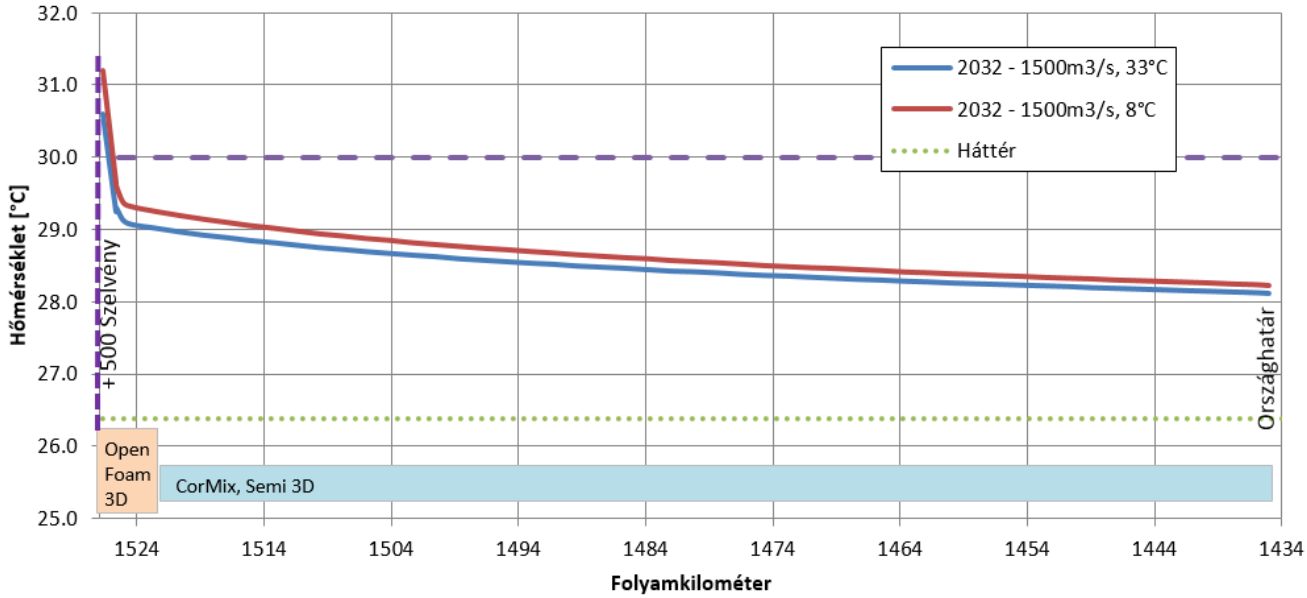
Paksi Atomerőmű üzeme esetén ($q_{melegvíz}$=100 m³/s) vizsgált két melegvíz kibocsátási esetben (33 °C-os kibocsátás és 8 °C-os hőlépcső), a Duna keresztszelvényeiben kialakuló maximális vízhőmérsékleteket az alábbi hossz-szelvény (11.9.1-59. ábra) mutatja be.



11.9.1-59. ábra: A hőcsóva hőmérsékleti maximumainak hossz-szelvénye (Duna 1525,75 – 1433,00 fkm, Q_{Duna} = 1 500 m³/s), $T_{Melegvíz}$ = 33°C és 8°C-os hőlépcső (2014. évi mértékadó állapot) – Paksi Atomerőmű önállóan

11.9.1.4.5.2 Paksi Atomerőmű és Paks II. együttes üzeme - 2032. évi mértékadó állapot

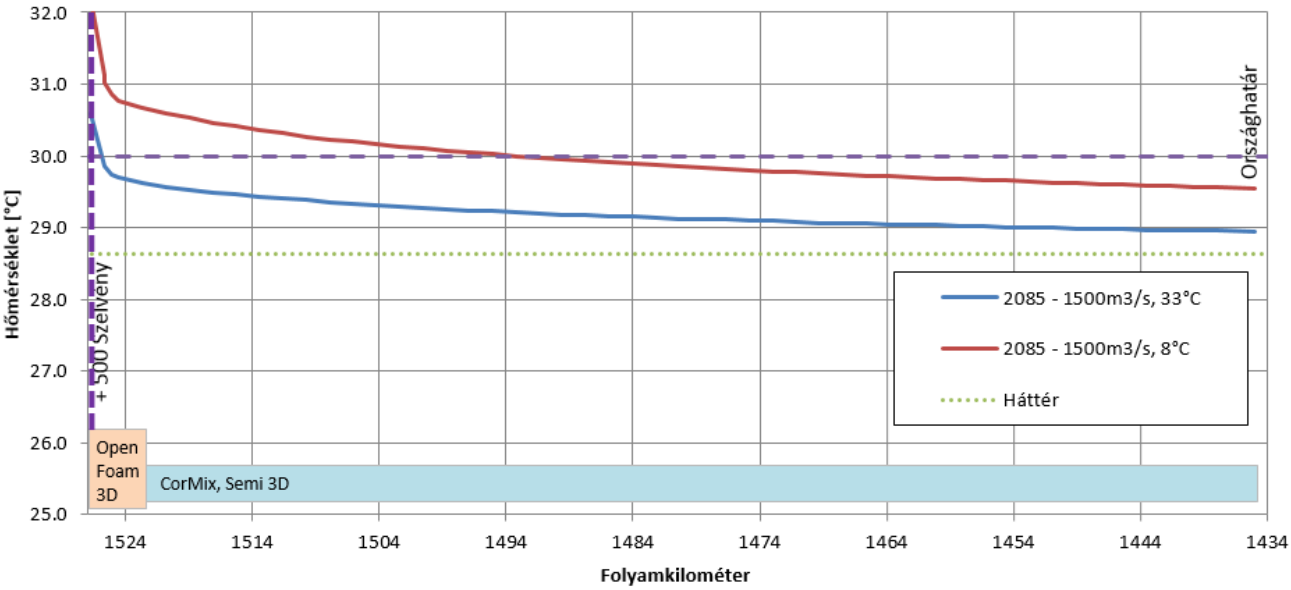
A 2032. évi mértékadó állapotban ($q_{melegvíz}$=100 m³/s+132 m³/s) vizsgált két melegvíz kibocsátás esetében (33 °C-os kibocsátás és 8 °C-os hőlépcső), a Duna keresztszelvényeiben kialakuló maximális vízhőmérsékleteket, az alábbi hossz-szelvény (11.9.1-60. ábra) mutatja be.



11.9.1-60. ábra: A hőcsóva hőmérsékleti maximumainak hossz-szelvénye (Duna 1525,75 – 1433,00 fkm, Q_{Duna} = 1 500 m³/s), $T_{Melegvíz}$ = 33 °C (2032. évi mértékadó állapot) – Paksi Atomerőmű és Paks II. együttesen

11.9.1.4.5.3 Paks II. önálló üzeme - 2085. évi mértékadó állapot

A 2085. évi mértékadó állapotban ($q_{melegvíz}$=132 m³/s) vizsgált két melegvíz kibocsátási alternatíva esetében (33 °C-os kibocsátás és 8 °C-os hőlépcső), a Duna keresztszelvényeiben kialakuló maximális vízhőmérsékleteket az alábbi hossz-szelvény (11.9.1-61. ábra) mutatja be.



11.9.1-61. ábra: A hőcsóva hőmérsékleti maximumainak hossz-szelvénye (Duna 1525,75 – 1433,00 fkm, Q_{Duna} = 1 500 m³/s), $T_{Melegvíz}$ = 33°C (2085. évi mértékadó állapot) – Paks II. önállóan

A fenti ábrasor alapján megállapítható, hogy jelen állapotban az 500 méteres dunai referenciaszelvényben (Duna 1525,75 fkm) a 30 °C fokos határértéket nem éri el a Dunavíz vízhőmérséklet maximuma, de a mértékadónak tekinthető 2032. és 2085. években – a Duna mértékadónak tekinthető 1 500 m³/s vízhozama esetében -, a referenciaszelvényben a 30 °C-os határérték kismértékű túllépése tapasztalható a 33 °C-os melegvíz kibocsátás esetében, nagyobb mértékű túllépés alakul ki a 8 °C-os hőlépcsővel történő kibocsátás esetében. A túllépés időtartamának várható jövőbeli tartósságát fentebb vizsgáltuk. A határérték túllépés elkerülése érdekében intézkedés,monitoring és kiegészítő hűtés vagy egyéb intézkedés alkalmazása szükséges. [11-51]

11.9.1.5 Tisztított kommunális szennyvíz kibocsátás

A Felügyelőség által engedélyezett vízjogi üzemeltetési engedély alapján üzemelő, meglévő erőműi szennyvíztisztító telep kapacitása 1870 m³/nap, amely elegendő az építés- és az üzemelés időszakában várható maximális kommunális terhelésnövekedések fogadására, tisztítására.

Paks II. üzemeltetésekor jelentkező többlet kommunális szennyvízhozam átlagosan 67 m³/nap, csúcskibocsátás tíz (10) évenkénti nagy-karbantartás idején 95 m³/nap.

Mivel a Paksi Atomerőmű területén átlagosan keletkező kommunális szennyvizek mennyisége jelenleg kb. 300 m³/nap (Paksi Atomerőmű üzeme), emiatt a kommunális szennyvízhozam várhatóan Paksi Atomerőmű és Paks II. együttes üzemekor sem éri el a 400 m³/nap-ot, ami felett marad még ~1 470 m³/nap szabad tisztító kapacitás.

A mértékadó szennyvízhozam – a létesítés- és az üzemelés időszakában egyaránt - kisebb, mint a szennyvíztisztító telep kapacitása, ezért az elkeveredés-vizsgálatot csak a mértékadó 1 000 m³/nap vízhozammal számítottuk (lásd a „Paks II. létesítésének hatásai a Dunára” című alfejezetet).

11.9.2 ÜZEMZAVAROK, BALESETEK, HAVÁRIÁK

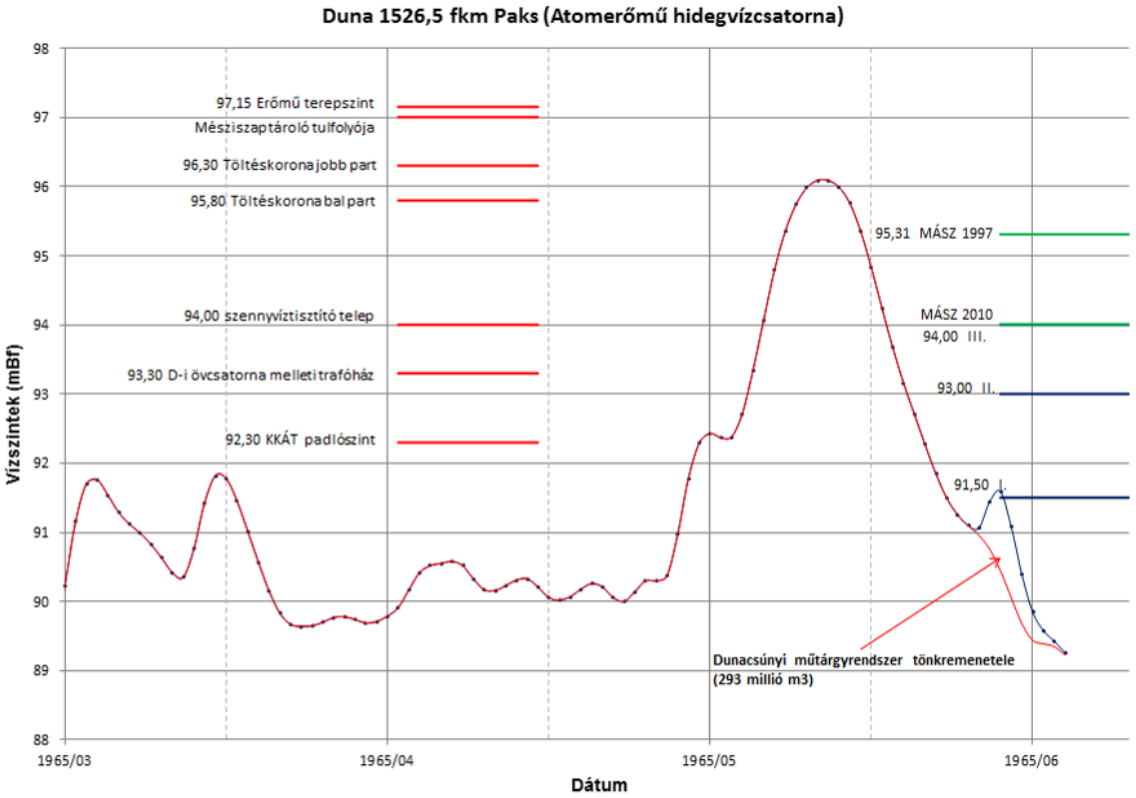
11.9.2.1 Üzemzavarok, balesetek, haváriák szélsőséges dunai nagyvízkor

A szélsőséges (20 000 évente visszatérő) árvízi jelenségek esetén 2D modellel vizsgáltuk a Duna 1500-1530 fkm szakaszát. Havári esetként tárgyaltuk a 2032. évi mértékadó dunai vízkivételi és vízvisszabocsátási helyzetben, a megvíz-csatorna alatt történő részleges főmedri mederelzáródást, földcsuszamlás hatására.

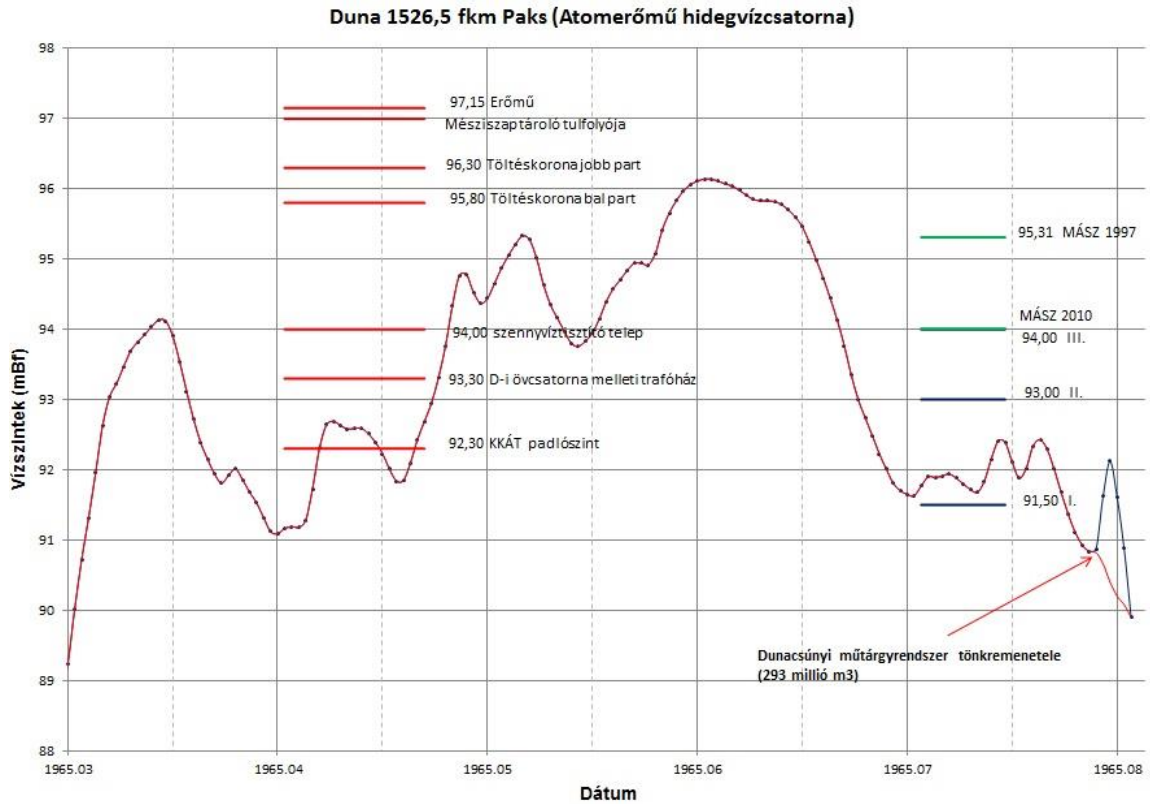
11.9.2.1.1 A felvízoldali vízszintszabályozó szerkezetek, extrém földcsuszamlások és jégjelenségek hatásának vizsgálata (1D)

11.9.2.1.1.1 A felvízoldali vízszabályozó szerkezetek meghibásodásának hatása

A legkedvezőtlenebb - Pozsony alatti Dunaszakaszon az árvízvédelmi töltések között maradó - árhullám levonulása esetén, a Paksi Atomerőmű telephelyi (Duna 1526,5 fkm szelvénye) domborzata és az ott lévő főbb létesítmények tekintetében mértékadó, az Atomerőmű által is jegyzett biztonsági szintek feletti elöntési időtartamok ($T_{túllépés}$) a 11.9.2-1. táblázat szerint alakulnak (lásd 11.9.2-1. ábra és 11.9.2-2. ábra).



11.9.2-1. ábra: Az 1954-es árhullám levonulásának hatására a Paksi Atomerőmű környezetében (Duna, 1526,5 fkm) kialakuló vízszintek időbeli alakulása



11.9.2-2. ábra: Az 1965-ös árhullám levonulásának hatására a Paksi Atomerőmű környezetében (Duna, 1526,5 fkm) kialakuló vízszintek időbeli alakulása

Veszélyeztetett, főbb objektumok (Paksi Atomerőmű területén, a Duna 1526,5 fkm környezetében)	**Mértékadó vízszintek (Duna 1526,5 fkm) [mBf]**	**Túllépési időtartam (a kedvezőtlenebb 1965-ös árhullám levonulása esetén) [nap]**
Töltéskorona szint az erőmű térségében, jobb part	96,30 mBf	0,0
Töltéskorona szint az erőmű térségében, bal part*	95,80* mBf	16,0
Az Erőmű terepszintje	97,00 - 97,10 mBf	0,0
KKÁT kirakó csarnok padlószintje	92,30 mBf	68,5
Déli övcsatorna melletti trafóház padlószintje	93,30 mBf	59,5
Szennyvíztisztító telep szintje	94,00 mBf	57,0
Mésziszaptározó túlfolyó küszöbszintje	97,00 mBf	0,0
Árvízvédelmi fokozatok** (az PA Zrt. öblözeti vízmércéje szerint, Duna 1526,5 fkm)		
Fokozat	91,50 mBf	108,0
Fokozat	93,00 mBf	61,0
Fokozat	94,00 mBf	56,5
Mértékadó árvízszintek		
Legnagyobb jégmentes vízszint (LNV) 2013.06.11.	94,06 mBf (8790 m³/s)	56,0
$MÁSZ_{2010}$ (A hatályos: 11/2010. (IV. 28.) KvVM rendelet „A folyók mértékadó árvízszintjeiről”)	94,14 mBf (a rendeletbeli értékek alapján lineárisan interpolálva)	55,1

Megjegyzések a fenti táblázathoz:
* A táblázatban feltüntetett magassági adat forrása: A töltéskorona szintet helyszíni méréssel határoztuk meg RTK GPS mérőállomás alkalmazásával.
** Árvízvédelmi készültségek elrendelése: Az árvízvédelmi készültséget, a veszélyes vízjárási helyzettel (árhullámmal) érintett területileg illetékes Környezetvédelmi és Vízügyi Igazgatóság (KÖVIZIG) rendeli el és szervezi, irányítja a védekezést. Amennyiben egy adott vízfolyáson két, vagy annál több KÖVIZIG is érintett III. fokú készültséggel, akkor az Országos Műszaki Irányító Törzs (OMIT) hatáskörébe kerül a védelemirányítás.

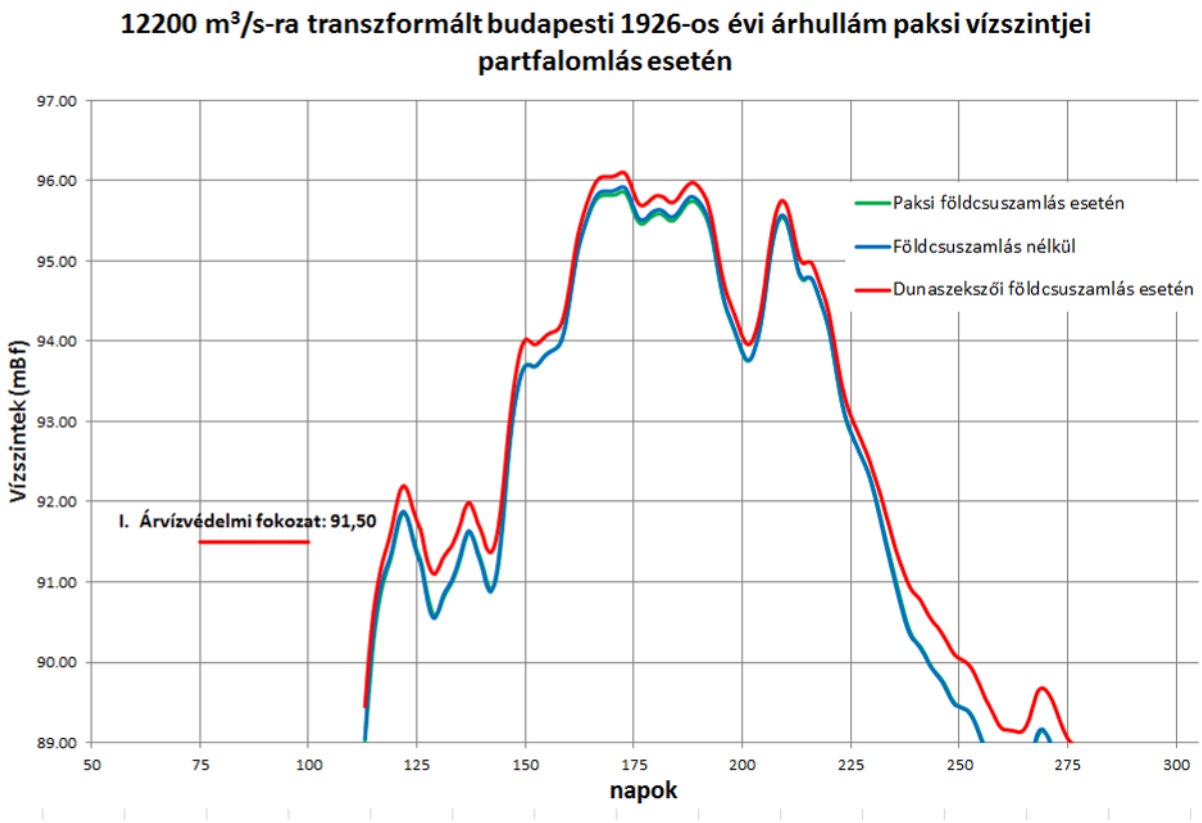
11.9.2-1. táblázat: Az erőmű környezetének legkedvezőtlenebb szintű (96,30 mBf) árvízi elöntése esetén meghatározott, néhány fontosabb védelmi szint túllépésének várható időtartama.

A Paksi Atomerőmű telephelyén a Duna jobb parti árvédelmi töltéskoronájával (96,30 mBf) színelő elöntési szintnél nagyobb, azt meghaladó vízszint, még a fent vizsgált extrém nagyvízi terhelések hatására sem alakult ki.

11.9.2.1.1.2 A Duna meder változását előidéző magaspart csuszamlások hatásainak vizsgálata

A modellvizsgálatunknál két helyen történő földcsuszamlást vizsgáltunk, egyet a Paksi Atomerőmű felett, egyet pedig Dunaszekcsőnél. Mindkét helyen nagymértékű mederelzáródást okozó csuszamlást feltételeztünk, mintegy 1 000 méter hosszon, a mértékadónak tekintett (20 000 évente visszatérő) 12 200 m³/s-ra transzformált 1926-os árhullámot szimuláltunk.

Mindkét esetben megállapítható, hogy a feltételezett földcsuszamlások hatásai nem jelentősek, a Paks feletti földcsuszamlás esetében a maximális vízszintek 5 cm-el csökkennek, a dunaszekcsői földcsuszamlásnál 13 cm-rel növekednek a tetőző vízállások (lásd 11.9.2-3. ábra).



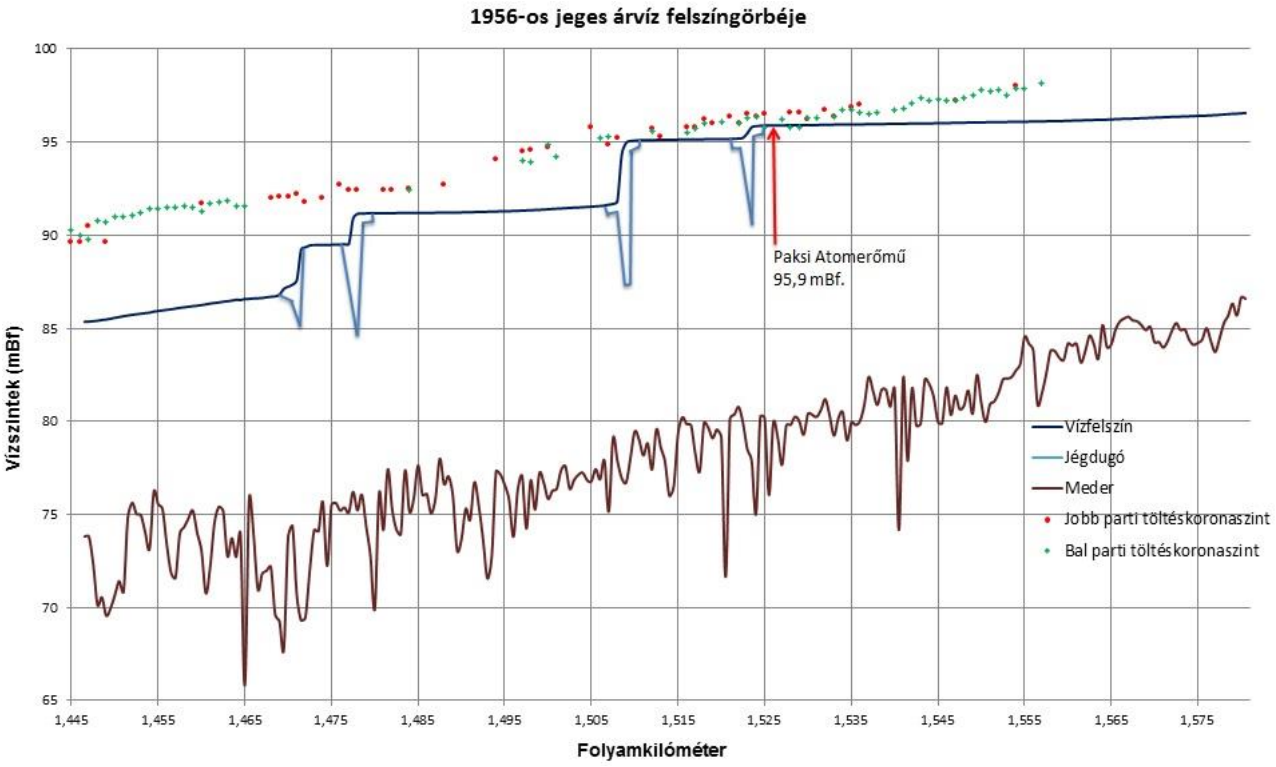
11.9.2-3. ábra: A felszorzott budapesti 1926-os árhullám paksi levonulási vízszintjei földcsuszamlások esetén

11.9.2.1.1.3 Jégdugó kialakulásának prognosztizálása, nagyvízi hatásának vizsgálata áramlási modell alkalmazásával

Jelen vizsgálat célja, hogy meghatározza a Paksi Atomerőmű területének jeges nagyvízi érintettségét, az erőmű alatt kialakuló jégdugó hatására, a lehető legkedvezőtlenebbnek ítélt jeges nagyvízi, illetve jégtorlasz vagy jégdugó által előidézett nagy vízszintemelkedés hatására kialakuló helyzetben (amely általában a téli időszak kis- és középvíz hozamú időszakában történt meg).

A jelenlegi éghajlatváltozási tendenciáktól eltekintve, az 1965. évi mértékadó jéghelyzetet (jégtorlaszokkal) vettük alapul a vizsgálataink során, az akkori mértékadó jeges árvízszinteken túlmenően az erőmű melegvíz-csatornája alatt, a korábbi tapasztalatoknak megfelelő, mintegy 5 km hosszúságú jégtorlasz kialakulását generáltunk, a Duna szakasz mederviszonyaiból adódó jégmegállási hajlamra való érzéketlensége ellenére.

Az alábbi 11.9.2-4. ábra a MÁSZ$_{1997}$ alapján bearányosított vízszinteket és a jelenlegi töltéskorona szinteket ábrázolja:



11.9.2-4. ábra: A legkedvezőtlenebb jeges nagyvízszintek alakulása a Paksi Atomerőmű környezetében (Duna, 1526,5 fkm), az 1956-os mértékadó helyzethez képesti extra jégdugóval a melegvíz-csatorna alatti Duna szakaszon

A hidraulikai vizsgálat eredményeképpen megállapíthatjuk, hogy a lehető legkedvezőtlenebbnek ítélt jeges nagyvízszintek a Paksi Atomerőmű környezetében, az árvízvédelmi mű koronaszintjével színeltek (95,90 mBf). Korábbi tapasztalatok- és jéghidraulikai vizsgálatok alapján megállapítható, hogy a kedvezőtlenül nagy szintet elérő jégborítás tartóssága, időtartama legfeljebb 2-3 nap, amelyet követően a feltorlódást okozó jégdugó/jégtorlasz összeomlik. Jeges árvízi elöntéssel a Paksi Atomerőmű környezetében nem kell számolni.

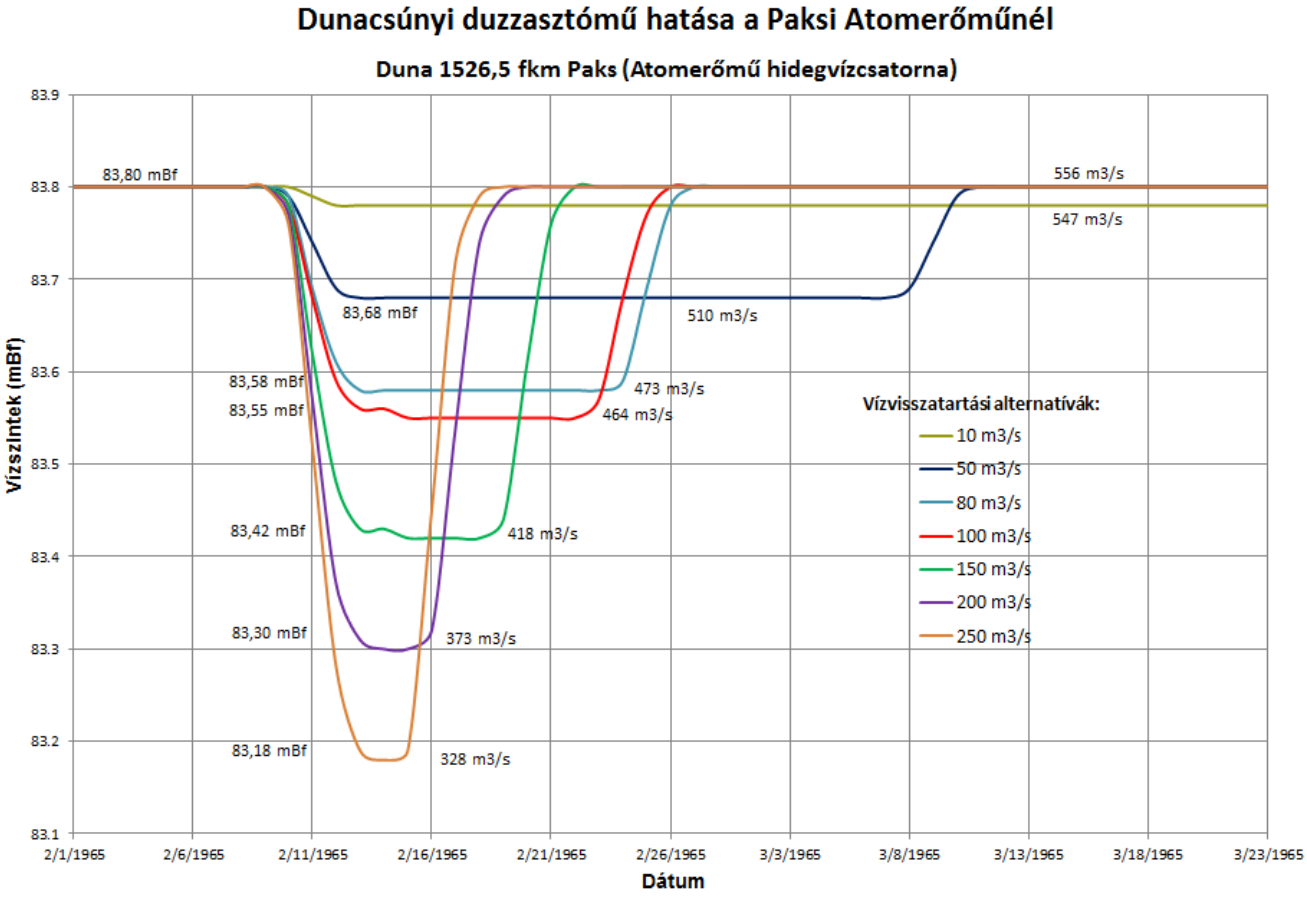
Amennyiben a víz megkerüli a jégtorlaszt/jégdugót, elbontja a Duna bal- és/vagy az erőművet védő jobb partot, illetve megbontja az árvízvédelmi töltést és új mederben folyik le, elöntve esetleg ezzel a Paksi Atomerőmű külső, a telephelynél (97,15 mBf) mélyebben fekvő területének részeit, úgy gyors apadásra számíthatunk, mert a jégtorlasz megbomlásával a folyó mederbeli lefolyása helyreáll, az elöntés legnagyobb szintje nem fogja megközelíteni a Duna erőmű menti árvízvédelmi töltésének koronaszintjét (96,30 mBf). A 96,30 mBf szint alatti létesítmények érintettségét az előző fejezetben közölteknek megfelelően alakul.

Jégvédekezéskor fontos, hogy a zajló jég zavartalan továbbhaladását, lehetőség szerint mindenkor biztosítsuk. Amennyiben kialakul a jégtorlasz/jégdugó, azt alulról kell megbontani, amely történhet jégtörő hajóval vagy robbantással. A jégtáblák akadálytalan levonulását biztosítani kell. A jégzajlás megindulása után, ameddig mód van rá, célszerű lehet a jégtáblákat kiszedni, hogy egy következő szűkületnél ne épülhessen fel újra a torlasz.

11.9.2.2 Üzemzavarok, balesetek, haváriák szélsőséges dunai kisvízkor

11.9.2.2.1 Felvízszint-szabályozó műtárgy sérülésének, nem üzemszerű működésének hatása (1D)

A dunacsúnyi duzzasztómű nem-üzemszerű vízvisszatartásának idejére, az egydimenziós (1D) áramlási modellel számított apadási hullámokat a 11.9.2-5. ábra szemlélteti.



11.9.2-5. ábra: A Dunacsúnyi / Bősi duzzasztómű 20 000 évente visszatérő kisvízi időszakban történő, alternatívákkal jellemzett vízvisszatartásának hatása a Paksi Atomerőmű vízkivételének biztonságára (Duna, 1526,5 fkm)

Az üzemi- és biztonsági vízkivételi szintek a meglévő vízkivételi mű öblözetében az alábbiak szerint alakulnak:

- Üzemi hűtővíz (kondenzátor hűtővíz) szivattyúk kritikus vízkivételi szintje: 83,60 mBf az öblözeti vízmércén, 83,60 mBf, a Duna 1526,5 fkm szelvényében 83,71 mBf (a paksi vízmércénél Duna 1531,3 fkm: 83,98 mBf).
- A Bősi duzzasztómű ~50 m³/s visszatartása felett állhat elő az üzemi vízkivételre nézve kritikus szint, tartós Dunai 556 m³/s szélsőséges, 20 000 évente visszatérő kisvízi vízhozam esetén,
- Biztonsági hűtővíz szivattyúk kritikus vízkivételi szintje: 83,50 mBf, az öblözeti vízmércén, 83,50 mBf, a Duna 1526,5 fkm szelvényében 83,61 mBf (a paksi vízmércénél, Duna 1531,3 fkm: 83,88 mBf).
- A Bősi duzzasztómű ~70 m³/s visszatartása felett állhat elő a biztonsági vízkivételre nézve kritikus szint, tartós Dunai 556 m³/s szélsőséges, 20 000 évente visszatérő kisvízi vízhozam esetén.

A Dunacsúnyi duzzasztómű üzemeltetési engedélye, üzemrendje szerinti üzemeltetése esetén 1000 m³/s Duna vízhozamnál kisebb vízhozam esetén nem lehet vízvisszatartást eszközölni. Havária eseményként vizsgáltuk a Duna szélsőséges kisvízi időszakában, a nem üzemrend szerinti vízvisszatartás hatását.

A Vízügyi Szolgálat a Duna Medvei vízmérce szelvényben tudja érzékelni a nemkívánt depressziós hullámok kialakulását, ezért 1,5 - 2 napos időelőnnyel előre tudja jelezni annak Paksra érkezését. Ezalatt az 1,5-2 napban

tárgyalásos úton kell elérni, hogy a rendkívüli vízvisszatartás sűrgősen leálljon. Ha a tárgyalás nem vezet eredményre és a kialakuló dunai depressziós hullám a hűtővízkivételt veszélyezteti, akkor az Atomerőmű üzemeltetőjének gondoskodnia kell a blokkok leállításáról és a biztonsági hűtővízellátás biztosításáról.

A Dunacsúnyi duzzasztómű nem üzemrend szerinti Dunai vízeresztéséből, a Paksi Atomerőmű környezetében kialakuló, 1D hidrodinamikai modellel jól közelíthetően meghatározható rendkívüli dunai kisvízszintek és a vízkivételi küszöbszintek viszonya alapján dönthető majd el, hogy szükséges lesz-e a blokkok leállítása, illetve hogy milyen intézkedések szükségesek a biztonsági hűtővízkivétel biztosítása érdekében (pl. a hidegvíz-csatorna leürülésének megakadályozása érdekében annak mederelzárása, mobil vízkivételi művek ideiglenes Dunára telepítése, majd a Duna felöl lezárt hidegvíz-csatornába történő termeltetése, stb.).

11.9.2.2.2 Jégtorlasz, jégdugó hatására előálló helyzet hatásai

Jelen vizsgálat célja, hogy meghatározza az erőmű területének jeges, extrém kisvízi érintettségét, az erőmű vízkivétele felett kialakuló jégdugó hatására, a hűtővíz-kivételi biztonság alakulásának jellemzése érdekében

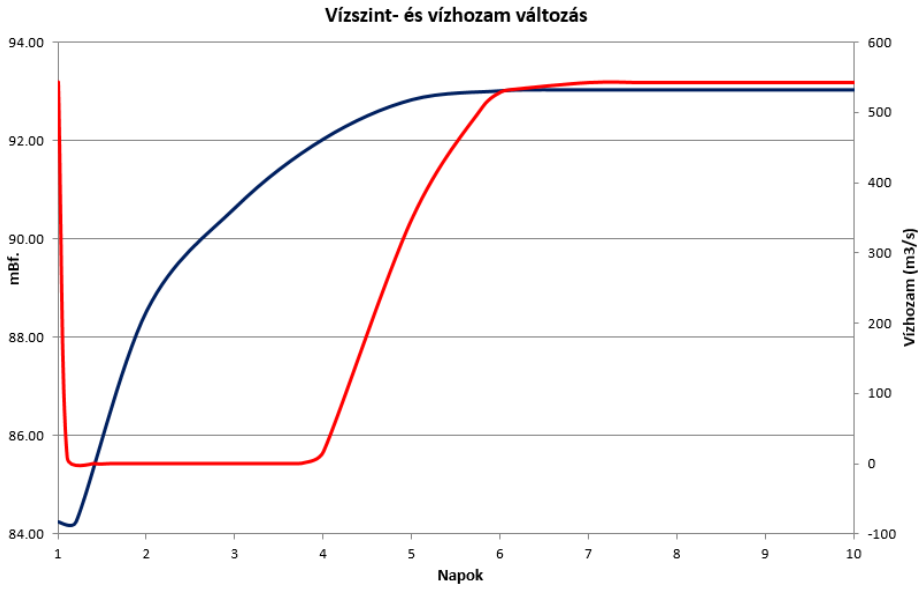
A jégdugó a jégtorlódás legextrémebb változata, mely a teljes vízfolyás keresztszelvényt elzárja. Ilyen esetben (legalábbis elméletben) az átfolyás egy időre megszűnik, az átfolyó vízhozam nullára csökken. Mindez az állapot addig áll fenn, amíg jégdugó feletti folyószakaszon feltorlódó víz szintje eléri a jégtorlasz koronaszintjét és a víz át tud bukni a torlaszon. Ezután az alvízi szakasz vízhozama fokozatosan nő, majd eléri a kiindulási vízhozamot.

Jelen modellszámítási vizsgálatokat két jégtorlasz-magasságra végeztük el. Az első egy 15,34 m magas (93,0 mBf koronaszintű) torlasz volt, mely teljesen elzárta a főmedret, a legmélyebb ponttól a főmeder part éléig. A második esetben egy kisebb, reálisabb torlaszméretet választottunk, mely azonban még mindig 10,34 m magas (88,0 mBf koronaszintű) volt.

Minkét számítást a 84,24 mBf szinthez tartozó, 20 000 évente előforduló 544 m³/s (Duna 1580,6 fkm, Dunaújvárosi vízmérce), extrém kis vízhozamra végeztük el. Korábban az 1983. évi rendkívüli dunai kisvíz után a VITUKI 1985-ben (VITUKI, 1985.) végzett kritikus kisvízi Duna állapotokra vonatkozóan számításokat, a hidegvíz-csatorna dunai torkolata felett, a Dunán jégtorlasz kialakulását feltételezve. Alábbiakban ismertetendő modellszámításainkat a 20 000 évente visszatérő kisvízi, permanens vízhozam (544 m³/s) esetére végeztük el.

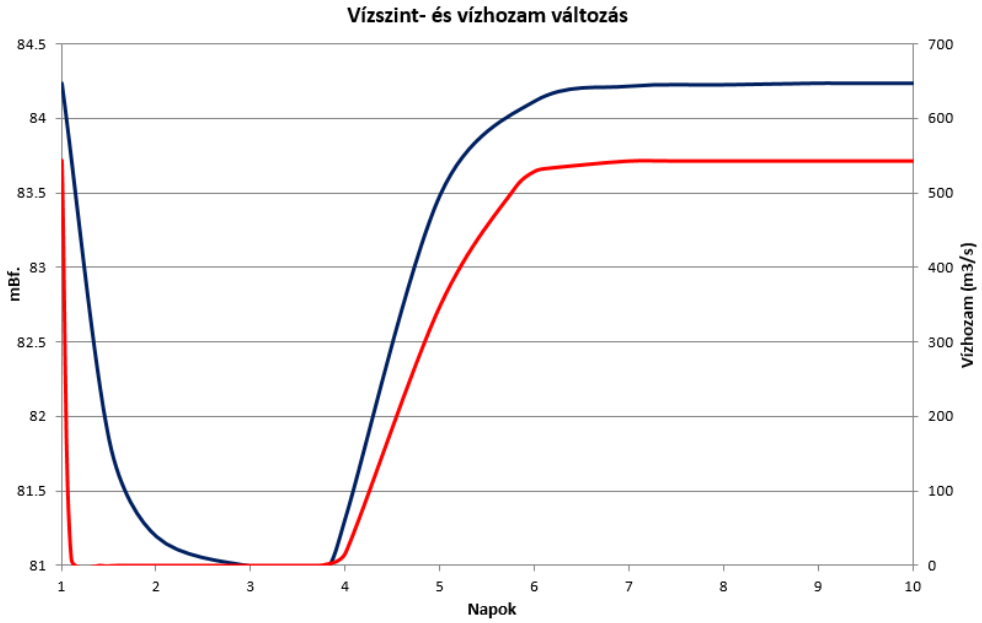
A szimuláció indulásakor, a hidegvíz-csatorna torkolata felett egy óra alatt elzártuk a teljes Duna medret, a jégtorlaszt, jégdugót helyettesítő bukó segítségével, a bukó korona-élének 93,0 mBf, illetve 88,0 mBf szintre történő emelésével. Ezután a táblát zárva tartottuk a szimuláció végéig (összesen 10 napig).

A várakozásnak megfelelően a mederlezárás felett a Duna vízhozama, a meder elzárásának következtében gyorsan csökkenni kezd, gyakorlatilag egy (1) óra alatt nullára esik vissza (lásd az alábbi ábrát). Így a teljes 544 m³/s a felette levő meder feltöltődését segíti elő. Négy (4) nap múlva a felvíz szintje eléri a bukó koronáját, illetve a jégdugó tetejét, így elindul az átbukás, vagyis a szelvény vízhozama fokozatosan nőni kezd, majd a mederelzárás után mintegy 6 nappal jól megközelíti (~92,70 mBf), az elzárás után 8 nappal újra eléri a kiindulási koronaszintet (93,0 mBf).



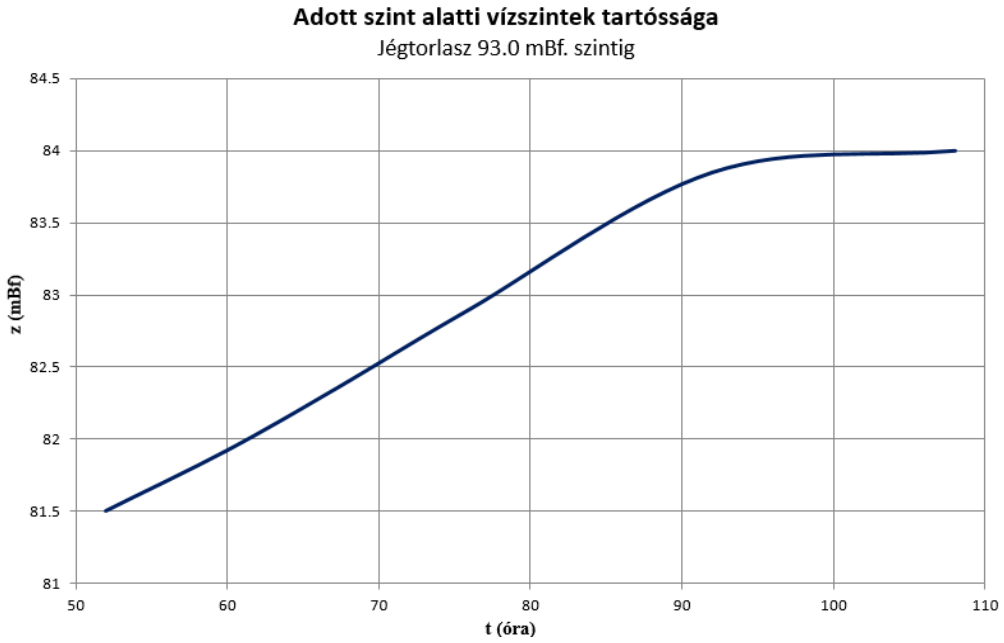
11.9.2-6. ábra: Vízszint- és vízhozam változás a 93,0 mBf magas torlasz felvizén

A Duna mederelzárásának alvízén, a hidegvíz-csatorna torkolatánál a jelenség némileg másképpen zajlik le. A vízhozamok, természetesen, teljesen hasonló lefutást mutatnak, de a vízszint, itt ellentétes mozgást végez (lásd az alábbi ábrát). A teljes mederelzárást követően, az alvízszint gyors csökkenésnek indult (depressziós hullám), melyet csak a vízhozam újbóli megjelenése (elzárás után 4. nap) szakított meg, ezután a vízszintek mintegy 3-4 nap elteltével visszaálltak az eredeti szintre (84,3 mBf). A Duna meder tehát az elzárás után 6 nappal megközelítően teljesen, 8 nappal teljesen visszatöltődött.



11.9.2-7. ábra: Vízszint- és vízhozam változás a 93,0 mBf magas torlasz alvízén

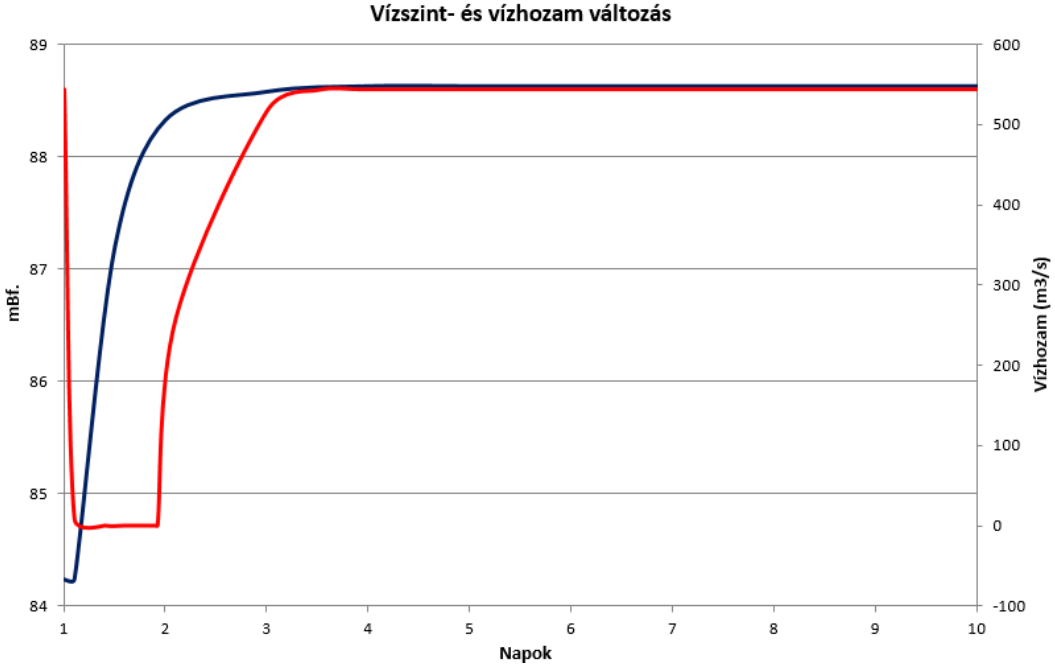
Az alábbi ábrán összefoglaltuk, hogy a 93,0 mBf. szinten tetőző dunai jégtorlasz vagy mederelzárás következtében lecsökkent vízszintek milyen tartóssággal maradtak egy-egy vízszint alatt. Vizsgálataink során, a felszín alatti vizekből Duna felé áramló vízhozamok (Duna vízszintemelő) hatásának számbavételétől, a biztonság javára eltekintettünk. Eltekintettünk a biztonság javára attól is, hogy a jégtorlasz kialakulását követően, annak hatásait megfelelő beavatkozásokkal (jégtörő hajók, robbantás) gyorsabban lecsökkenthetik.



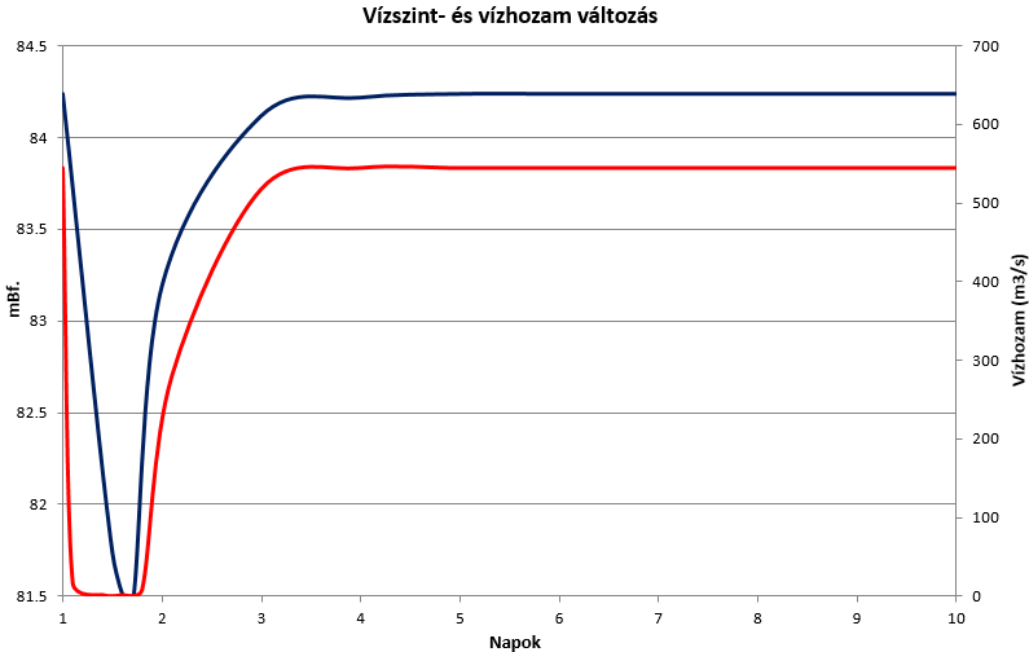
11.9.2-8. ábra: Vízszintek tartóssága a 93,0 mBf magas torlasz alvízén

A fentiekben ismertetett, szélsőséges időjárási viszonyok mellett végzett vizsgálatainkat elvégeztük a reálisabb, mintegy 5 m-rel alacsonyabb, 88,0 mBf koronaszintű, de még mindig 10,34 m magasságú Duna-mederelzáró jégdugó esetére. Ebben az esetben a jégdugó koronaszintje nem érte el a partéleket, tehát a jégdugón átbukó víz a főmederben marad (az előző esetben az átbukó víz kijutott a hullámtérre is), tehát – a rövidebb átbukási- vagy koronaszélesség miatt – relatíve nagyobb átbukási magasság alakul ki.

Az alábbi ábrákon összefoglaljuk a 20 000 évente visszatérő extrém kisvízi viszonyok (544 m³/s) mellett feltételezett, 5 m-rel alacsonyabb, 88,0 mBf koronaszintű jégdugó által okozott hidraulikai események hatásait. A biztonság javára feltételeztük, hogy nem történik hatáscsökkentő beavatkozás, valamint nem növekedik a vizsgálati idő alatt a Duna vízhozama.



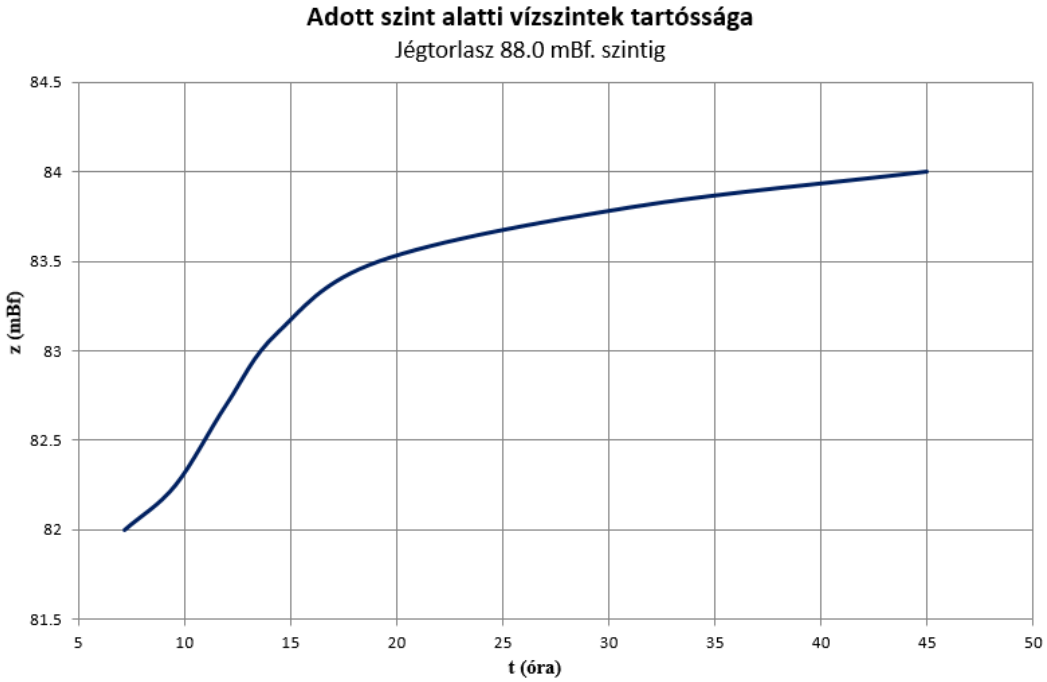
11.9.2-9. ábra: Vízszint- és vízhozam változás a 88,0 mBf magas torlasz felvízén



11.9.2-10. ábra: Vízszint- és vízhozam változás a 88,0 mBf magas torlasz alvízén

A fenti ábrákon jól látható, hogy a teljes elzárás most is gyors alvízszint csökkenést okoz, de a kisebb jégtorlasz magasság miatt, az átbukás, már a második nap közepén megindul. Ezért a vízszintek gyakorlatilag 3-4 nap alatt visszaállnak a jégtorlasz kialakulása előtti szintekre.

Ha megnézzük az egyes szintek tartósságát (11.9.2-11. ábra), akkor itt is komoly változásokat tapasztalhatunk a két különböző koronaszintű jégtorlasz hatásaiban. A 93,0 mBf koronaszintű jégtorlasz esetén 50-110 óra közötti, azaz Δt = 60 óra tartóssággal kellett számolnunk. Az alacsonyabb, 88,0 mBf koronaszintű jégdugó esetében a permanens kisvízszint alatti vízszintek tartóssága 5-45 óra közötti (Δt = 40 óra) időintervallumra csökkent.



11.9.2-11. ábra: Vízszint- és vízhozam változás a 88,0 mBf magas torlasz alvízén

Összefoglalóan megállapíthatjuk, hogy a közvetlenül a hidegvíz-csatorna felett kialakuló jégdugó, főként extrém kisvízi Duna vízjárási viszonyok esetén, komoly problémákat okozhat az erőmű hűtővízellátásában. Azonban egy ilyen

eseményre nagy biztonsággal fel lehet készülni. A jégzajlás és a jégbeállás között akár 10-15, nagyon hideg (a napi középhőmérséklet: -10 C° alatti) napnak kell eltelnie. Ha mindez egy 20.000 évente visszatérő extrém kisvízhozam mellett (544 m³/s) következik be, akkor ez azt mutatja, hogy akár több hónapnyi csapadékmentes időszak kellett, hogy ezt megelőzze.

A magyar Duna-szakaszon a jég elleni védelmet egy jégtörő flotta is segíti. Amennyiben a fenti, nem várt esemény bekövetkezne, akkor a jégtörők munkájával megelőzhető lenne a jégdugó kialakulása.

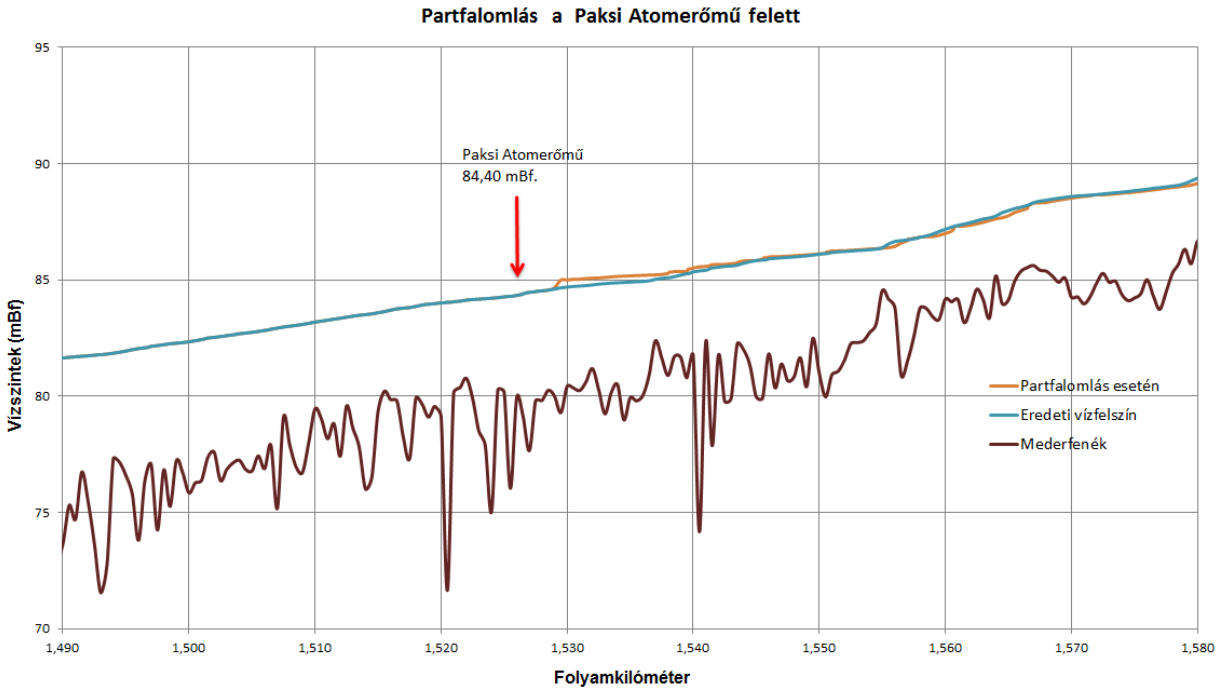
Megjegyezzük még, hogy a Dunacsúnyi Duzzasztómű és a Gabcikovoi Erőmű megépülte után, a jégképződés „nulláról" indul a magyar Duna felső szakaszán. A felső, osztrák, szlovák, szakaszon keletkezett jeget a Hrusovi Tározó visszafogja, így az erőmű/duzzasztómű alatt tiszta, jégmentes víz folyik le. A jégképződés tehát az erőmű alatt indul újra, ami csak nagyon hideg (és arra még nincs tapasztalatunk, hogy milyen hideg) időszak végén termelődhet annyi és olyan erős jég, ami torlasz, vagy jégdugó kialakulásához vezethetne.

A hűtővíz ideiglenes elvesztése esetén, amikor már az üzemi szivattyúknál a 83,60 mBf, a biztonsági szivattyúknál a 83,50 mBf vízszint nem biztosítható, továbbá a hidegvíz-csatorna meder fenékszintje körüli, azaz 81,0 - 81,5 mBf Duna vízszintek alakulnak ki, a biztonsági hűtésre elérhető vízbázis a Duna vízteste és a Dunára telepített partiszűrésű vízbázisok lehetnek. Az extrém helyzetben 3-4 napig előforduló rendkívül alacsony dunai vízállások mellett sem csökken érzékelhetően a partiszűrésű vízbázis kútjainak vízkitermelő képessége, ugyanis a talajvíztartó utánpótlódása a háttér irányából, ilyenkor erősödik. A felszín alatti víztartó kiürülése és utánpótlódása lényegesen lassúbb folyamat, amit nemcsak a Duna befolyásol.

11.9.2.2.3 Partfalomlások, partfalcsuszamlások hatásainak értékelésére

A modellvizsgálatunknál egy helyen történő földcsuszamlást vizsgáltunk - annak ellenére, hogy kialakulásának esélye szinte kizárható -, amely a Paksi Atomerőmű vízkivétele felett alakul ki. Nagymértékű Duna meder-elzáródást okozó csuszamlást feltételeztünk mintegy 1 000 méter hosszon, és a mértékadónak tekintett (20 000 évente visszatérő kisvízhozam Dombori vízmércénél, Duna 1506,8 fkm) 579 m³/s szélsőséges kisvízi vízhozamnak megfelelő Duna állapotot szimuláltunk. Megállapítható, hogy a feltételezett földcsuszamlás hatásai nem jelentősek, a földcsuszamlás alatt mintegy 1 cm-es vízszintsüllyedés tapasztalható, felette pedig 30 cm-el megemelkedik a vízszint, amely mintegy tizenöt kilométerrel feljebb már teljesen belesimul az eredeti vízfelszínbe (lásd az 11.9.2-12. ábra)).

A rendkívüli mértékű dunai partfalomlások, partfalcsuszamlások, hűtővízkivételi biztonságra gyakorolt hatása tehát elenyésző és átmeneti jellegű, mert a Duna áramlása azt folyamatosan erodálja, elhordja.



11.9.2-12. ábra: 579 m³/s vízhozam vízfelszín-görbéje partfalomlás esetén

11.10 PAKS II. FELHAGYÁSAKOR VÁRHATÓ HATÁSOK A DUNÁRA

Paks II. felhagyásakor várható hatások a létesítési és üzemelési hatásoktól elmaradnak. Részletesebb elemzés a telephely felhagyásának tervei (tervezett beavatkozások és azok időbeli ütemezése) alapján lehetségesek.

11.11 IRODALOMJEGYZÉK

[11-1] Alcamo, J., J.M. Moreno, B. Nováky, M. Bindi, R. Corobov, P.J.N Devoy, C. Giannokopoulos, E. Martin, J.E. Olesen and A. Shvidenko (2007): Europe. Climate Change 2007: Impacts, Adaptations and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of Intergovernmental Panel on Climate Change, M.L.Parry, O.E. Canzione, J.P.Palutikof, P.J. van den Linden and C.E.Hanson, Eds. Cambridge University Press, Cambridge, UK. 541-580 Bartholy 2006

[11-2] Alsó-Duna-völgyi Vízügyi Igazgatóság (ADU-VIZIG), (2013): A paksi duna-szakasz mederváltozásának ellenőrzése, Baja, 2013., Megrendelő: MVM Paksi Atomerőmű Zrt.

[11-3] Baranya, S. (2009): Folyószakaszok áramlási és morfológiai viszonyainak térbeli vizsgálata. PhD értekezés, BME

[11-4] Bartholy J. and Schlanger V. (2004): Az éghajlat regionális modellezése. Természet Világa, II. különszám. 35-40

[11-5] Bartholy J. (2006) : Éghajlatváltozási forgatókönyvek hazánk térségére (kézirat)

[11-6] BME VKKT (2006) : A Paksi Atomerőmű hőterhelése: A monitorozás és az üzemirányítás fejlesztése – Zárójelentés, 2006 (kézirat), Budapest

[11-7] BME VKKT (2007) : A Paksi Atomerőmű hőterhelése: A monitorozás és az üzemirányítás fejlesztése – Előrehaladási jelentés, 2007 (kézirat), Budapest

[11-8] BME VKK (2010): Jelentés a mederkotrás és folyamszabályozás hatásairól, Budapest, Megrendelő: MVM Paksi Atomerőmű Zrt.

[11-9] Bogárdi J. (1969): A hordalékmozgás jelentősége a folyószabályozásban. In. Korszerű folyószabályozás OVH VIZDOK Budapest

[11-10] Bogárdi J. (1971): Vízfolyások hordalékszállítása. Akadémiai Kiadó, Budapest 1971.

[11-11] Braun, L.N. (2006): Glaciers as sensitive indicators of climate change: enhanced water yield from Vernagtferner, Ötztal Alps, Austria. Summary statement for the project “Overtures” www.callingtheglacier.org/Glacier.html

[11-12] Christensen, J.H., B.Hewitso, A. Busuioc, A. Chen, X. Gao, I. Held, R. Jones, R.K.Kolli, W.-T. Kwon, R.Laprise, V. Magana Rueda, L. Mearns, C.G. Menéndez, J. Raisanen, A. Rinke, A. Sarr and P. Whetton, (2007): Regional Climate Projections. In: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, R.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA

[11-13] Christensen J. H. (2005) : Prediction of Regional scenarios and Uncertainties for Defining European climate change risks and effects, Final report PRUDENCE EVK2-CT2001-00132, Danish Meteorological Institute, Copenhagen, Denmark.

[11-14] Christensen, J. H., O.B. Christensen, P. Lopez, E. Van Meijgaard, and M. Botzet (1996): The HIRHAM4 Regional Atmospheric Climate Model, Scientific Report 96-4, 51 pp., DMI, Copenhagen, 1996.

[11-15] Dr. Csoma János - Dr. Szigyártó Zoltán (1975): A matematikai statisztika alkalmazása a hidrológiában, Vízgazdálkodási Tudományos Kutató Intézet

[11-16] David R. Maidment, Dean Djokic (2000): Hydrologic and hydraulic modeling support: with geographic information systems.

[11-17] Delft3D-Flow (2013.): Simulation of multi-dimensional hydrodynamic flows and transport phenomena, including sediments User Manual Hydro-Morphodynamics Version: 3.15 Revision: 18392 7 Szeptember 2011; Version: 3.15.30932 22 November 2013.

[11-18] Detrekői Á. – Szabó Gy.: Térinformatika, Nemzeti Tankönyvkiadó Budapest, 2002.

[11-19] Di Toro, D. (1984) Probability model of stream quality due to runoff, Journal of Environmental Engineering, Vol. 110. pp. 607-629.

[11-20] Eric Tate, M.S.E. and David Maidment, PhD. (1999): Floodplain Mapping Using HEC-RAS and ArcView GIS, The University of Texas at Austin.

[11-21] Dr. Elter, J. és Szél S. (2011): A Paksi Atomerőmű tervezett üzemidőn túli üzemeléssel összefüggésben a hatóság által előírt Célzott Biztonsági Felülvizsgálat kijelölt feladatainak elvégzése, VITUKI Nonprofit Kft., Megrendelő: MVM Paksi Atomerőmű Zrt.

[11-22] Fischer, H.B.-List, E.J., Koh, R.C.Y, Imberger, J. and Brooks, N.H. (1979): Mixing in Inland and Coastal Waters, Academic Press, New York, 1979.

[11-23] 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

[11-24] Gary W. Brunner (2002): HEC-RAS River Analysis System Hydraulic Reference Manual - US Army Corps of Engineers Hydrologic Engineering Center, Davis, 2002.

[11-25] Gauzer B., (1994): A léghőmérséklet változásának hatása a Duna nagymarosi szelvényének lefolyási viszonyaira, in Az éghajlatváltozás hatása a hidrológiai és vízminőségi paraméterekre (szerk.: Starosolszky Ö), VITUKI'59. Budapest, 37-58

[11-26] IPCC (2007a): Climate Change (2007): Impacts, Adaptation and Vulnerability, Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel of Climate Change. M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P.Palutikoff, P. van den Linden and C. E. Hanson, Eds. Cambridge University Press. Cambridge, 976 pp

[11-27] IPCC (2007b): Climate Change (2007): The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel of Climate Change [Solomon, S, D.Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquies, H.B. Averyt, M.

[11-28] Jia, Yafei and Wang, Sam S.Y.: „CCHE2D (2001): Two-Dimensional Hydrodynamic and Sediment Transport Model for Unsteady Open Channel Flows Over Loose Bed. "NCCHE Technical Report, NCCHE-TR-2001, Aug. 2001.

[11-29] Jones, R., J. Murphy, D. Hassell, and R. Taylor (2001): Ensemble mean changes in a simulation of the European climate of 2071-2100 using the new Hadley Centre regional modelling system HadAM3H/HadRM3H

[11-30] Kaszás Ferenc, Kraft János (2011): A dunaszekcsői szeletes csuszamlás 2008-ban, Vándorgyűlés előadás, 2011.

[11-31] Dr. Kontur István-Dr. Koris Kálmán-Dr. Winter János (2003): Hidrológiai számítások, Akadémiai Kiadó, Budapest.

[11-32] Launder B. E. and Spalding D. B. (1972): Lectures in Mathematical Models of Turbulence. Academic Press, London, England, 1972.

[11-33] 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.

[11-34] Mika J. és Bálint G. (2005): Rainfall Scenarios for the Upper Danube Catchments

[11-35] MicroMap Bt. (2012): A paksi duna-szakasz mederváltozásának ellenőrzése, Budapest, 2012., Megrendelő: MVM Paksi Atomerőmű Zrt.

[11-36] Muszkalay, L.,Sebességpulzáció mértéke vízfolyásokban az elkeveredés szempontjából (1980): 7631/2-500/a VITUKI témajelentés, [11-1] 1980.

[11-37] MVM ERBE Zrt. (2011-2014): MVM Lévai projekt kiegészítése –A Paksi Atomerőmű bővítése környezeti hatástanulmány és telephely engedélyeztetés összeállítását megalapozó szakterületi vizsgálati és értékelési programok kidolgozása és végrehajtása [„Telephely jellemzése" szakterületi program keretében „A telephely környezetében a felszínborítás-területhasználat térképezése és területszerkezet jellemzése" szakterület, valamint a „Földtani közeg, felszín alatti vízi környezet jellemzése" szakterületi program c.) „Telephely hidrológiai jellemzése" alprogram és e.) Duna meder és partfal állapota alprogram kidolgozása és végrehajtása], Budapest, Megrendelő: MVM Paks II. Atomerőmű Fejlesztő Zrt. (7030 Paks, Gagarin utca 1., E-mail: titkarsag@mvmpaks2.hu)

[11-38] MVM ERBE Zrt. (2012-2014): Lévai projekt és kiegészítése: „A környezeti hatástanulmány összeállítását megalapozó szakterületi vizsgálati és értékelési programok kidolgozása és végrehajtása" keretében a „Telephely jellemzése" szakterületi program keretében „A telephely környezetében a felszínborítás-területhasználat térképezése és területszerkezet jellemzése" alprogram, valamint a „Földtani közeg, felszín alatti vízi környezet jellemzése" szakterületi program c.) „Telephely hidrológiai jellemzése" alprogram és e.) „Duna meder és partfal állapota" alprogram kidolgozása és végrehajtása tárgyában., Megrendelő: MVM Paks II. Zrt., Készítette: MVM ERBE Zrt., Budapest

[11-39] Nováky B. és Szilágyi F. (1991): A globális felmelegedés hatása a felszíni vizek hidrológiai viszonyaira és minőségére. VITUKI-jelentés

[11-40] OMSz, ELTE Meteorológiai Tanszék, 2006: Klímaváltozási forgatókönyvek a Nemzeti Éghajlatváltozási Stratégiához, in Klímapolitika (KVVM)

[11-41] Dr. Reimann József (1973): Valószínűségelmélet és matematikai statisztika, Tankönyvkiadó.

[11-42] Rodi W. (2000): Turbulence Models and Their Application in Hydraulics IAHR-AIRH

[11-43] 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

[11-44] Simons T. J. (1980): Circulation models of lakes and inland seas

[11-45] Somlyódy, L. (1978): Vízfolyásokban végbemenö szennyvízelkeveredés vizsgálata az anyagáramvonal fogalmának bevezetésével. Kandidátusi értekezés (kézirat). MTA, Budapest

[11-46] Somlyódy, L. (1982): An Approach to the Study of Transverse Mixing in Streams, Journal of Hydraulic Research, Vol. 20, No.2

[11-47] Somlyódy, L. (1985): A szennyezőanyagok elkeveredésének meghatározása vízfolyásokban Vízügyi Közlemények 1985. év, 2. füzet

[11-48] 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.

[11-49] Somlyódy, L. (2006): A paksi atomerőmű hőterhelése: a monitorozás és az üzemirányítás fejlesztése (Szintézisjelentés 2006, a zárójelentés I. függeléke), BME VKKT, Budapest, 2006. december

[11-50] Somlyódy, L. (2007): A paksi atomerőmű hőterhelése: a monitorozás és az üzemirányítás fejlesztése (Szintézisjelentés 2007, a zárójelentés II. függeléke), BME VKKT, Budapest, 2007. december

[11-51] Somlyódy, L. (2008): A paksi atomerőmű hőterhelése: a monitorozás és az üzemirányítás fejlesztése (Zárójelentés), BME VKKT

[11-52] Stelczer K. (1980): A görgetett hordalék mozgásának számítása. Vízügyi Műszaki Gazdasági Tájékoztató VÍZDOK Budapest

[11-53] 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.

[11-54] Topolska, J. and Klucovska, J. (1997): River morphology, Gabcikovo part of the hydroelectric power project environmental impact review. p.5.

[11-55] Tignor and H.L.Miller (eds.). Cambridge University Press. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. 996 pp.

[11-56] Di Toro, D. (1984): Probability model of stream quality due to runoff, Journal of Environmental Engineering, Vol. 110. pp. 607-629.

[11-57] 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

[11-58] 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.

[11-59] van Rijn L.C. (1984a): Sediment Transport, Part I: Bed Load Transport, Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 110, No. 10. 1984/a, pp. 1431-1456.

[11-60] van Rijn L.C. (1984b): Sediment Transport, Part II: Suspended Load Transport, Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 110, No. 11. 1984/b, pp. 1613-1641.

[11-61] VITUKI Hungary Kft. (2013): A paksi atomerőmű végleges biztonsági jelentése (VBJ) „2. A telephely leírása" című fejezetének 2013. évi aktualizálásához az atomerőmű tágabb és szűkebb környezetében lévő Duna szakasz hidrológiai jellemzőinek felülvizsgálata és aktualizálása a 2012. évi adatok, mérési eredmények alapján (árvízi érintettség, hűtővízkivételi biztonság, vízminőségvédelem), Megbízó: PÖYRY ERŐTERV Zrt./MVM Paksi Atomerőmű Zrt., Budapest

[11-62] VITUKI Hungary Kft. (2012-2014): Az MVM Paksi Atomerőmű Zrt. vízépítési létesítményeinek rendszeres műszaki ellenőrzése, Budapest, Megrendelő: MVM Paksi Atomerőmű Zrt.

[11-63] VITUKI Nonprofit Kft. (2003-2011): A paksi duna-szakasz mederváltozásának ellenőrzése, Budapest, Megrendelő: MVM Paksi Atomerőmű Zrt.

[11-64] VITUKI Nonprofit Kft. (2009-2010): A Paksi Atomerőmű tervezett bővítése morfológiai, hidraulikai és vízminőségi feltételeinek áttekintése, környezeti hatásainak vizsgálata, frissvízhűtéses üzemeltetés esetén (RMT frissvízhűtéses változat kidolgozása), Budapest, 2009-2010., Megrendelő: MÉLYÉPTERV Komplex Zrt. / GEA-EGI / MVM Paksi Atomerőmű Zrt.

[11-65] VITUKI Nonprofit Kft. (2009-2011): A paksi Duna-szakasz morfológiai változásának előrejelzése matematikai modell fejlesztésével - K+F projekt, Budapest, Megrendelő: MVM Paksi Atomerőmű Zrt.

[11-66] VITUKI Nonprofit Kft.-Aquaprofit Kft.-Tér-Team Kft-VTK Innosystem Kft. (2009-2011): A Szob-Déli országhatár közötti Duna szakasz hajózhatóságának javítása keretében tervezett beavatkozások környezeti vizsgálata - Barákai gázló rendezése környezeti hatástanulmány; Paksi szűkület rendezése környezeti hatástanulmány - (az Európai Bizottság TEN-T* (The Trans-European Transport Networks, „Tanulmányok a Duna hajózhatóságának javításáról Program") projektje támogatásával), 2009-2011., Megrendelő: Közlekedésfejlesztési Koordinációs Központ (KKK).

[11-67] VITUKI Nonprofit Kft.-Aquaprofit Kft.-Tér-Team Kft-VTK Innosystem Kft. (2009-2011): A Szob-Déli országhatár közötti Duna szakasz hajózhatóságának javítása keretében tervezett beavatkozások vízjogi létesítési engedélyeztetési tervdokumentációjának kidolgozása - Barákai gázló rendezése; Paksi szűkület rendezése - (az Európai Bizottság TEN-T* (The Trans-European Transport Networks, „Tanulmányok a Duna hajózhatóságának javításáról Program") projektje támogatásával), 2009-2011., Megrendelő: Közlekedésfejlesztési Koordinációs Központ (KKK).

[11-68] VITUKI Nonprofit Kft. (2011): A PAKSI ATOMERŐMŰ CÉLZOTT BIZTONSÁGI FELÜLVIZSGÁLATA - A szélsőséges helyzetekben kialakuló magas és alacsony vízállások, valamint nagy és kis vízhozamok lehetséges hatásának meghatározása, 2011. Megrendelő: Paksi Atomerőmű Zrt.

[11-69] VITUKI Vízgazdálkodási Tudományos Kutató Rt. (1992-1993): Rendkívüli helyzetek értékelése a Bős-Nagymarosi Vízlépcsőrendszer felső, Dunacsuny-Bősi üzemvízcsatornás alrendszere üzembehelyezésével kapcsolatban, 1992-1993.

[11-70] Wu W. (2001): CCHE2D Sediment Transport Model (Version 2.1) Technical Report No. NCCHE-TR-2001-3 School of Engineering. The University of Mississippi University

[11-71] Wu W.-Wang S.S.Y.-Jia Y. (2000): Nonuniform sediment transport in alluvial rivers. Journal of Hydraulic, Vol. 38, No. 6.

[11-72] Zweimüller, I. (2004): Effects of global change on the hydrology of the Danube, a large European River. Geophysical Research Abstracts, 6. 06186