



**Környezettudományi Doktori Iskola**

**Konzervatív nyomjelzőanyag transzport- és evapotranszspiráció-vizsgálata a  
hosszanti átfolyású kavicsstöltetű gyökérszónás műtárgyban**

**Doktori (PhD) értekezés**

**Somfai Dávid Márton**

**Gödöllő**

**2022**

**A doktori iskola**

**megnevezése:** Környezettudományi Doktori Iskola  
**tudományága:** Környezettudomány  
**vezetője:** Csákiné Dr. Michéli Erika, DSc  
egyetemi tanár, intézetigazgató  
Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem,  
Mezőgazdaság- és Környezettudományi Kar,  
Környezettudományi Intézet

**Témavezető:** Dr. Szalai Sándor  
egyetemi docens  
Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem,  
Mezőgazdasági- és Környezettudományi Kar  
Vízgazdálkodási és Agroklimatológiai Tanszék

**Társ témavezető:** Dr. Dittrich Ernő  
egyetemi adjunktus  
Pécsi Tudományegyetem  
Műszaki és Informatikai Kar  
Környezetmérnök Tanszék

.....  
Az iskolavezető jóváhagyása

.....  
A témavezető jóváhagyása

.....  
A társ témavezető jóváhagyása

## Tartalomjegyzék

Ábrajegyzék .....	6
Táblázatjegyzék.....	11
Rövidítések, jelölések.....	13
1. Bevezetés.....	1
1.1. A témaválasztás indokai .....	1
1.2. Az értekezés tartalma és célkitűzései .....	4
2. Irodalmi áttekintés.....	7
2.1. A gyökérvázis szennyvíztisztítás általános bemutatása, konstrukciós változatai, tisztítási mechanizmusok .....	7
2.2. Nemzetközi szakirodalomban publikált gyökérvázis műtárgyak evapotranszspirációs vizsgálatainak bemutatása .....	14
2.3. A konzervatív nyomjelzőanyag-mérések vizsgálatához szükséges elméleti és matematikai összefüggések bemutatása .....	23
2.3.1. 1 dimenziós konvektív-diszperzív transzportegyenlet, Gauss-eloszlás és Fick-féle eloszlás bemutatása .....	23
2.3.2. Sorba kapcsolt elkevert reaktormodell és Gamma-eloszlás kapcsolata.....	26
2.4. A szakirodalomban publikált konzervatív nyomjelzőanyagtranszport-vizsgálatok hosszanti átfolyású gyökérvázis műtárgyakban .....	27
3. Anyag és módszer .....	31
3.1. A hódmezővásárhelyi gyökérvázis szennyvíztisztító kutatótelep rövid bemutatása .....	31
3.2. A gyökérvázis mintatelepen található mérőrendszer rövid bemutatása .....	31
3.3. Konzervatív nyomjelzőanyag-mérések kivitelezése a hódmezővásárhelyi gyökérvázis mintatelep hosszanti átfolyású műtárgyában .....	32
3.4. Evapotranszspirációs és transzspirációs mérésekhez alkalmazott módszerek, műszerek ..	34
3.4.1. Evapotranszspirációs mérésekhez használt gázanalizátor rövid bemutatása.....	34
3.4.2. A gyökérvázis műtárgyban található sás bemutatása.....	35
3.4.3. Laboratóriumi mérésekhez használt mérési modell ismertetése.....	36
3.4.4. Transzspiráció számítása .....	36
3.4.5. Evapotranszspiráció számítása terepi mérési eredményekből .....	38
3.5. Az illesztésekhez felhasznált eloszlásfüggvények rövid ismertetése .....	38

3.6. A háromparaméteres Inverz Gauss-eloszlás bemutatása és az abszolút késleltetés bevezetése .....	40
3.7. $R^2$ definiálása .....	41
3.8. A Li-ion diffúziós tényezőjének értéke .....	41
3.9. Az eloszlástípusok részletes vizsgálatához használt szoftver ismertetése.....	42
3.10. Az osztott konvektív-diszperzív modell illesztésére alkalmazott program ismertetése ...	45
4. Eredmények és értékelés .....	47
4.1. Laboratóriumi transzspirációs mérések eredményei .....	47
4.1.1. A vizsgált sás szezonális transzspirációs eredményei .....	47
4.1.2. Gyökérvénás műtárgy szezonális transzspiráció okozta vízvesztései.....	49
4.1.3. Részösszefoglaló, a kapott eredmények jelentősége.....	52
4.2. A napon belüli evapotranszspiráció mérési eredményei .....	52
4.2.1. Részösszefoglaló, a kapott eredmények jelentősége.....	60
4.3. A transzportfolyamatok leírásához felhasznált eloszlások illesztési eredményei .....	61
4.3.1. Részösszefoglaló, kapott eredmények jelentősége .....	74
4.4. 1 dimenziós konvektív-diszperzív transzportmodell és 1 dimenziós osztott konvektív-diszperzív modell használata hosszanti átfolyású gyökérvénás műtárgyakra .....	74
4.4.1. A konvektív-diszperzív folyamatot szimuláló illesztési eljárás és az 1 dimenziós osztott konvektív-diszperzív modell illesztési eredményei .....	74
4.4.2. Áramlási paraméterek számítása az osztott konvektív-diszperzív modell alkalmazásával, és összehasonlítása a jelenleg használatos eljárással.....	83
4.4.3. Részösszefoglaló, kapott eredmények jelentősége .....	91
5. A disszertáció eredményeinek gyakorlati alkalmazhatósága .....	92
6. Következtetések, javaslatok .....	94
6.1. Következtetések.....	94
6.2. Eredmények tézisszerű összefoglalása .....	96
7. Összefoglalás.....	100
8. Summary .....	102
Köszönetnyilvánítás .....	104
Felhasznált irodalom .....	105
A témában megjelent saját publikációk listája.....	117



Mellékletek.....	118
1.Melléklet: A hódmezővásárhelyi telep bemutatása .....	118
2.Melléklet: A hódmezővásárhelyi gyökérszennyvíztelep monitoringrendszerének bemutatása .....	121
3. Melléklet: Transzspirációs mérés adatsora.....	125
4. Melléklet: A szezonális evapotranszspiráció meghatározásához használt napi vízszint változásait bemutató ábrák szemléltetése .....	143
5. Melléklet: A hódmezővásárhelyi hosszanti átfolyású gyökérszennyvíztelep műtárgyon végzett konzervatív nyomjelzőanyagmérések adatai .....	159
6. Melléklet: A mérési eredményekre illesztett sűrűségfüggvények illesztési eredményei és képei.....	164
6.1. Melléklet: A sűrűségfüggvények pontonkénti $R^2$ értékei .....	164
6.2. Melléklet: A sűrűségfüggvények illesztési paraméterei .....	167
6.3. Melléklet: A sűrűségfüggvények illesztési képei .....	177
7. melléklet: A hódmezővásárhelyi mérési eredményekre illesztett 1 dimenziós osztott konvektív-diszperzív transzportmodell főbb adatai, illesztési eredményei és képei.....	214
7.1. Melléklet: Az 1 dimenziós osztott konvektív-diszperzív transzportmodell mérési adatai, eredményei.....	214
7.2. Melléklet: Az 1 dimenziós osztott konvektív-diszperzív transzportmodell illesztési képei.....	218

## Ábrajegyzék

1. ábra: Függőleges átfolyású gyökérszónás szennyvíztisztító műtárgy sematikus rajza (DITTRICH 2006b)	9
2. ábra: Vízszintes átfolyású gyökérszónás szennyvíztisztító műtárgy sematikus rajza (DITTRICH 2006b)	10
3. ábra: A „multistage” rendszer felépítése (DITTRICH 2006b)	14
4. ábra: A talaj szemeloszlásának hatása a párologtatható vízkészlet fogyására 1 m vastag talajszelvényre (ZSUFFA 1996)	16
5. ábra: A kialakított mintavételi helyek a hosszanti átfolyású műtárgyban (DITTRICH 2016)	33
6. ábra: A vízszintes átfolyású műtárgy második szelvénye a mintavételi helyekkel (SZEKERES 2014)	44
7. ábra.: A vizsgált sás ( <i>Carex elata</i> ) transzspirációs rátájának alakulása (a) a PPFD (fényintenzitás) függvényében (b) a levelehőmérséklet függvényében (c) a relatív páratartalom függvényében. A fényválaszfüggvények az egyes évszakok átlaghőmérsékleteiben lettek mérve (Tavaszi: $20 \pm 2.5^\circ\text{C}$ ; Nyári: $30 \pm 2.5^\circ\text{C}$ ; Őszi: $25 \pm 2.5^\circ\text{C}$ ); az egyes görbéket a besugárzás egy adott intervallumán mértem ( $0 - 1566 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ). A harmadrendű polinomok egy adott hőmérsékleti tartományra ( $17.5 - 42.0^\circ\text{C}$ ) és páratartalomra ( $3.2 - 60.2\%$ ) lettek számolva az adott évszakoknak megfelelően.	49
8. ábra: Regisztrált vízszintek (2012.05.24.)	53
9. ábra: A vízszint alakulása 2012.05.25-én	53
10. ábra: A vízszint alakulása 2011.08.29-én	54
11. ábra: Napon belüli óránkénti vízszintváltozás	54
12. ábra: Napon belüli óránkénti vízszintváltozás	55
13. ábra: Napon belüli óránkénti vízszintváltozás	55
14. ábra: Napon belüli óránkénti vízszintváltozás	56
15. ábra: Napon belüli óránkénti vízszintváltozás	56
16. ábra: Az átlag, minimum és maximum óránkénti evapotranszspiráció alakulása tavasszal, a napi evapotranszspiráció százalékában kifejezve	59
17. ábra: Az átlag, minimum és maximum óránkénti evapotranszspiráció alakulása nyáron, a napi evapotranszspiráció százalékában kifejezve	59
18. ábra: Az átlag, minimum és maximum óránkénti evapotranszspiráció alakulása ősszel, a napi evapotranszspiráció százalékában kifejezve	60
19. ábra: Az 5 sűrűségfüggvény és a CDT-modell illesztési eredménye az S/1 I. felső pontnál	62
20. ábra: Az 5 sűrűségfüggvény és a CDT-modell illesztési eredménye az S/1 V. alsó pontnál	62
21. ábra: Az 5 sűrűségfüggvény és a CDT-modell illesztési eredménye az S/1 VII. alsó pontnál	63
22. ábra: Az 5 sűrűségfüggvény és a CDT-modell illesztési eredménye az S/2 IV. alsó pontnál	64
23. ábra: Az 5 sűrűségfüggvény és a CDT-modell illesztési eredménye az S/2 V. alsó pontnál	64
24. ábra: Az 5 sűrűségfüggvény és a CDT-modell illesztési eredménye az S/2 VI. alsó pontnál	65
25. ábra: Az 5 sűrűségfüggvény és a CDT-modell illesztési eredménye az S/3 IV. alsó pontnál	66
26. ábra: Az 5 sűrűségfüggvény és a CDT-modell illesztési eredménye az S/3 V. felső pontnál	66
27. ábra: Az 5 sűrűségfüggvény és a CDT-modell illesztési eredménye az S/3 VI. alsó pontnál	67
28. ábra: Az 5 sűrűségfüggvény és a CDT-modell illesztési eredménye az S/3 V. felső pontnál	67
29. ábra: Az 5 sűrűségfüggvény és a CDT-modell illesztési eredménye az S/4 V. felső pontnál	68
30. ábra: Az 5 sűrűségfüggvény és a CDT-modell illesztési eredménye az S/4 VIII. alsó pontnál	68
31. ábra: A függvények illeszkedésének alakulása a műtárgy korának függvényében	70
32. ábra: A sás rhizoma rendszere a töltetben (DITTRICH 2016)	70
33. ábra: Az illeszkedés mértéke az I-IX. felső pontokra	71
34. ábra: Az illeszkedés mértéke az I-IX. alsó pontokra	71
35. ábra: A három modell illesztési eredményei (D-CDT, Fréchet, CDT) az S/1 VII. alsó ponton	78
36. ábra: A három modell illesztési eredményei (D-CDT, Fréchet, CDT) az S/1 VIII. alsó ponton	78
37. ábra: A három modell illesztési eredményei (D-CDT, Fréchet, CDT) az S/2 IV. alsó ponton	79
38. ábra: A három modell illesztési eredményei (D-CDT, Fréchet, CDT) az S/3 IV. felső ponton	79
39. ábra: A három modell illesztési eredményei (D-CDT, Fréchet, CDT) az S/3 V. felső ponton	80
40. ábra: A három modell illesztési eredményei (D-CDT, Fréchet, CDT) az S/3 VI. felső ponton	80
41. ábra: A három modell illesztési eredményei (D-CDT, Fréchet, CDT) az S/1 VIII. felső ponton	81

42. ábra: A három modell illesztési eredményei (D-CDT, Fréchet, CDT) az S/4 I. felső ponton .....	81
43. ábra: A három modell illesztési eredményei (D-CDT, Fréchet, CDT) az S/2 III. alsó ponton .....	82
44. ábra: A függőleges átfolyású műtárgy (DITTRICH 2016) .....	119
45. ábra: Hosszanti átfolyású gyökérszónás műtárgy (fotó: Somfai Dávid, 2016.07.07.) .....	120
46. ábra: A jelátalakító egység (DITTRICH 2016) .....	123
47. ábra: A vízszint alakulása 2011.08.11-én .....	143
48. ábra: Regisztrált vízszintek (2011.08.11.) .....	143
49. ábra: A vízszint alakulása 2011.08.27-én .....	144
50. ábra: Regisztrált vízszintek (2011.08.27.) .....	144
51. ábra: A vízszint alakulása 2011.08.28-án .....	145
52. ábra: Regisztrált vízszintek (2011.08.28.) .....	145
53. ábra: A vízszint alakulása 2011.08.29-én .....	146
54. ábra: Regisztrált vízszintek (2011.08.29.) .....	146
55. ábra: A vízszint alakulása 2011.08.30-án .....	147
56. ábra: Regisztrált vízszintek (2011.08.30.) .....	147
57. ábra: A vízszint alakulása 2011.08.31-én .....	148
58. ábra: Regisztrált vízszintek (2011.08.31.) .....	148
59. ábra: A vízszint alakulása 2011.09.11-én .....	149
60. ábra: Regisztrált vízszintek (2011.09.11.) .....	149
61. ábra: A vízszint alakulása 2011.09.25-én .....	150
62. ábra: Regisztrált vízszintek (2011.09.25.) .....	150
63. ábra: A vízszint alakulása 2011.09.27-én .....	151
64. ábra: Regisztrált vízszintek (2011.09.27.) .....	151
65. ábra: A vízszint alakulása 2011.09.29-én .....	152
66. ábra: Regisztrált vízszintek (2011.09.29.) .....	152
67. ábra: A vízszint alakulása 2012.05.18-án .....	153
68. ábra: Regisztrált vízszintek (2012.05.18.) .....	153
69. ábra: A vízszint alakulása 2012.05.24-én .....	154
70. ábra: Regisztrált vízszintek (2012.05.24.) .....	154
71. ábra: A vízszint alakulása 2012.05.25-én .....	155
72. ábra: Regisztrált vízszintek (2012.05.25.) .....	155
73. ábra: A vízszint alakulása 2012.05.27-én .....	156
74. ábra: Regisztrált vízszintek (2012.05.27.) .....	156
75. ábra: A vízszint alakulása 2012.05.28-án .....	157
76. ábra: Regisztrált vízszintek (2012.05.28.) .....	157
77. ábra: A vízszint alakulása 2012.05.29-én .....	158
78. ábra: Regisztrált vízszintek (2012.05.29.) .....	158
79. ábra: Az 5 sűrűségfüggvény és a CDT-modell illesztési eredménye az S/1 I. felső pontnál .....	177
80. ábra: Az 5 sűrűségfüggvény és a CDT-modell illesztési eredménye az S/1 II. felső pontnál .....	178
81. ábra: Az 5 sűrűségfüggvény és a CDT-modell illesztési eredménye az S/1 III. felső pontnál .....	178
82. ábra: Az 5 sűrűségfüggvény és a CDT-modell illesztési eredménye az S/1 IV. felső pontnál .....	179
83. ábra: Az 5 sűrűségfüggvény és a CDT-modell illesztési eredménye az S/1 V. felső pontnál .....	179
84. ábra: Az 5 sűrűségfüggvény és a CDT-modell illesztési eredménye az S/1 VI. felső pontnál .....	180
85. ábra: Az 5 sűrűségfüggvény és a CDT-modell illesztési eredménye az S/1 VII. felső pontnál .....	180
86. ábra: Az 5 sűrűségfüggvény és a CDT-modell illesztési eredménye az S/1 VIII. felső pontnál .....	181
87. ábra: Az 5 sűrűségfüggvény és a CDT-modell illesztési eredménye az S/1 IX. felső pontnál .....	181
88. ábra: Az 5 sűrűségfüggvény és a CDT-modell illesztési eredménye az S/1 I. alsó pontnál .....	182
89. ábra: Az 5 sűrűségfüggvény és a CDT-modell illesztési eredménye az S/1 II. alsó pontnál .....	182
90. ábra: Az 5 sűrűségfüggvény és a CDT-modell illesztési eredménye az S/1 III. alsó pontnál .....	183
91. ábra: Az 5 sűrűségfüggvény és a CDT-modell illesztési eredménye az S/1 IV. alsó pontnál .....	183
92. ábra: Az 5 sűrűségfüggvény és a CDT-modell illesztési eredménye az S/1 V. alsó pontnál .....	184





195. ábra: Három modell illesztési eredményei (D-CDT, Fréchet, CDT) az S/3 IX. felső ponton .....	240
196. ábra: Három modell illesztési eredményei (D-CDT, Fréchet, CDT) az S/3 I. alsó ponton.....	240
197. ábra: Három modell illesztési eredményei (D-CDT, Fréchet, CDT) az S/3 II. alsó ponton .....	241
198. ábra: Három modell illesztési eredményei (D-CDT, Fréchet, CDT) az S/3 III. alsó ponton.....	241
199. ábra: Három modell illesztési eredményei (D-CDT, Fréchet, CDT) az S/3 IV. alsó ponton .....	242
200. ábra: Három modell illesztési eredményei (D-CDT, Fréchet, CDT) az S/3 V. alsó ponton .....	242
201. ábra: Három modell illesztési eredményei (D-CDT, Fréchet, CDT) az S/3 VI. alsó ponton .....	243
202. ábra: Három modell illesztési eredményei (D-CDT, Fréchet, CDT) az S/3 VII. alsó ponton.....	243
203. ábra: Három modell illesztési eredményei (D-CDT, Fréchet, CDT) az S/3 VIII. alsó ponton .....	244
204. ábra: Három modell illesztési eredményei (D-CDT, Fréchet, CDT) az S/3 IX. alsó ponton .....	244
205. ábra: Három modell illesztési eredményei (D-CDT, Fréchet, CDT) az S/4 I. felső ponton.....	245
206. ábra: Három modell illesztési eredményei (D-CDT, Fréchet, CDT) az S/4 II. felső ponton .....	245
207. ábra: Három modell illesztési eredményei (D-CDT, Fréchet, CDT) az S/4 III. felső ponton .....	246
208. ábra: Három modell illesztési eredményei (D-CDT, Fréchet, CDT) az S/4 IV. felső ponton .....	246
209. ábra: Három modell illesztési eredményei (D-CDT, Fréchet, CDT) az S/4 V. felső ponton.....	247
210. ábra: Három modell illesztési eredményei (D-CDT, Fréchet, CDT) az S/4 VI. felső ponton .....	247
211. ábra: Három modell illesztési eredményei (D-CDT, Fréchet, CDT) az S/4 VII. felső ponton.....	248
212. ábra: Három modell illesztési eredményei (D-CDT, Fréchet, CDT) az S/4 VIII. felső ponton.....	248
213. ábra: Három modell illesztési eredményei (D-CDT, Fréchet, CDT) az S/4 IX. felső ponton .....	249
214. ábra: Három modell illesztési eredményei (D-CDT, Fréchet, CDT) az S/4 I. alsó ponton.....	249
215. ábra: Három modell illesztési eredményei (D-CDT, Fréchet, CDT) az S/4 II. alsó ponton .....	250
216. ábra: Három modell illesztési eredményei (D-CDT, Fréchet, CDT) az S/4 III. alsó ponton.....	250
217. ábra: Három modell illesztési eredményei (D-CDT, Fréchet, CDT) az S/4 IV. alsó ponton .....	251
218. ábra: Három modell illesztési eredményei (D-CDT, Fréchet, CDT) az S/4 V. alsó ponton .....	251
219. ábra: Három modell illesztési eredményei (D-CDT, Fréchet, CDT) az S/4 VI. alsó ponton .....	252
220. ábra: Három modell illesztési eredményei (D-CDT, Fréchet, CDT) az S/4 VII. alsó ponton.....	252
221. ábra: Három modell illesztési eredményei (D-CDT, Fréchet, CDT) az S/4 VIII. alsó ponton .....	253
222. ábra: Három modell illesztési eredményei (D-CDT, Fréchet, CDT) az S/4 IX. alsó ponton .....	253

## Táblázatjegyzék

1. táblázat: Függőleges és vízszintes átfolyású rendszerek összehasonlítása (DITTRICH 2006b).....	10
2. táblázat: A vizsgált sás ( <i>Carex elata</i> ) átlagos transzspirációs rátája a szezonális intervallumokra és környezeti értékekre számolva, mely tartalmazza az átlag értékeket is. E a transzspiráció ( $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), PPFD a fényintenzitás-besugárzás ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), T a hőmérséklet ( $^{\circ}\text{C}$ ) és RH a relatív páratartalom (%). .....	51
3. táblázat: A vizsgált sás ( <i>Carex elata</i> ) minimum transzspirációs rátája a szezonális intervallumokra és környezeti értékekre számolva, mely tartalmazza az átlag értékeket is. E a transzspiráció ( $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), PPFD a fényintenzitás-besugárzás ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), T a hőmérséklet ( $^{\circ}\text{C}$ ) és RH a relatív páratartalom (%). .....	51
4. táblázat: A vizsgált sás ( <i>Carex elata</i> ) maximális transzspirációs rátája a szezonális intervallumokra és környezeti értékekre számolva, mely tartalmazza az átlag értékeket is. E a transzspiráció ( $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), PPFD a fényintenzitás-besugárzás ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), T a hőmérséklet ( $^{\circ}\text{C}$ ) és RH a relatív páratartalom (%). .....	51
5. táblázat: Szezonális napi transzspiráció általi vízvesztés a horizontális átfolyású gyökérszónás mőtárgyban. TVV: transzspiráció általi vízvesztés ( $\text{m}^3$ ); *TVV: átlag vízvesztés $\text{m}^3/\text{m}^2$ (mőtárgyfelület); min: minimum; max: maximum.....	51
6. táblázat: A vizsgált napok adatai.....	57
7. táblázat: A vizsgált napok napi, nappali és éjszakai evapotranszspirációs értékei.....	58
8. táblázat: VII. alsó pont $R^2$ értéke a különböző függvényekre.....	63
9. táblázat: Az $R^2$ átlagai az egyes mérési időpontokban az egyes függvényekre az illesztés sorrendjében.....	69
10. táblázat: A függvények $R^2$ értékeinek alakulása a felső és alsó pontokon.....	72
11. táblázat: A belső pontok végleges sorrendjének összehasonlítása a X. pont eredményeivel.....	73
12. táblázat: Fréchet sűrűségfüggvény, a jelenleg használt CDT-modell és a kifejlesztett D-CDT-modell $R^2$ értékei az S/1-S/2 mérési eredményekre.....	75
13. táblázat: Fréchet sűrűségfüggvény, a jelenleg használt CDT-modell és a kifejlesztett D-CDT-modell $R^2$ értékei az S/3-S/4 mérési eredményekre.....	76
14. táblázat: A mérési eredmények s átlagértékei.....	82
15. táblázat: A D-CDT-modellből az S/1 és S/2 felső és alsó pontokra kalkulált transzportparaméterek.....	84
16. táblázat: A D-CDT-modellből az S/3 és S/4 felső és alsó pontokra kalkulált transzportparaméterek.....	85
17. táblázat: A D-CDT fő áram és a CDT-modell közötti különbség az S/1 és S/2 felső és alsó mérési pontoknál....	88
18. táblázat: A D-CDT fő áram és a CDT-modell közötti különbség az S/3 és S/4 felső és alsó mérési pontoknál....	89
19. táblázat: Tavaszi transzspiráció a fényintenzitás függvényében.....	125
20. táblázat: Nyári transzspiráció a fényintenzitás függvényében.....	127
21. táblázat: Őszi transzspiráció a fényintenzitás függvényében.....	128
22. táblázat: Tavaszi transzspiráció a hőmérséklet függvényében.....	131
23. táblázat: Nyári transzspiráció a hőmérséklet függvényében.....	133
24. táblázat: Őszi transzspiráció a hőmérséklet függvényében.....	135
25. táblázat: Tavaszi transzspiráció a páratartalom függvényében.....	137
26. táblázat: Nyári transzspiráció a páratartalom függvényében.....	139
27. táblázat: Őszi transzspiráció a páratartalom függvényében.....	141
28. táblázat: Mérések főbb adatai (DITTRICH 2016).....	159
29. táblázat: A statisztikai vizsgálatokhoz használt adatsorok, 2007.09.02.....	160
30. táblázat: A statisztikai vizsgálatokhoz használt adatsorok, 2007.10.07.....	161
31. táblázat: A statisztikai vizsgálatokhoz használt adatsorok, 2008.02.08.....	162
32. táblázat: A statisztikai vizsgálatokhoz használt adatsorok, 2008.05.29.....	163
33. táblázat: Az 5 sűrűségfüggvény $R^2$ értékei az egyes pontokban.....	164
34. táblázat: Sűrűségfüggvények illesztési paraméterei az S/1 mérési eredményekre.....	167
35. táblázat: Sűrűségfüggvények illesztési paraméterei az S/2 mérési eredményekre.....	169
36. táblázat: Sűrűségfüggvények illesztési paraméterei az S/3 mérési eredményekre.....	172
37. táblázat: Sűrűségfüggvények illesztési paraméterei az S/4 mérési eredményekre.....	174
38. táblázat: D-CDT-modell illesztési paraméterei az S/1 felső pontokra.....	214
39. táblázat: D-CDT-modell illesztési paraméterei az S/1 alsó pontokra.....	214
40. táblázat: D-CDT-modell illesztési paraméterei az S/2 felső pontokra.....	215

41. táblázat: D-CDT-modell illesztési paramétereit az S/2 alsó pontokra.....	215
42. táblázat: D-CDT-modell illesztési paramétereit az S/3 felső pontokra.....	216
43. táblázat: D-CDT-modell illesztési paramétereit az S/3 alsó pontokra.....	216
44. táblázat: D-CDT-modell illesztési paramétereit az S/4 felső pontokra.....	217
45. táblázat: D-CDT-modell illesztési paramétereit az S/4 alsó pontokra.....	217



## Rövidítések, jelölések

- $BOI_5$ : 5 napos biológiai (biokémiai) oxigénigény
- CDT-modell: konvektív-diszperzív transzport modell
- D-CDT-modell: osztott konvektív-diszperzív transzport modell
- D: diszperziós tényező
- $D_x$ : x-irányú diszperziós tényező
- $D_e$ : effektív diszperziós tényező
- $D_0, D_D$ : diffúziós tényező
- $D_{0,eff}$ : effektív diffúziós együttható
- $D_{impl}$ : implicit diffúziós tényező
- $D_i$ : diszperziós szám
- E: transzspiráció
- ET: evapotranszspiráció
- FA: felszín alatti
- h, m: töltetmélység
- HDPE: High Density Polyethylene
- $K_c$ : növényi együttható
- KOI: kémiai oxigénigény
- k: Darcy-féle szivárgási tényező
- L: műtárgy hossza vagy szivárgási hossz
- M: tömeg
- PPF: fényintenzitás
- $R^2$ : standardizált négyzetes hiba
- SVF: szabad vízfelszínű
- S/1, S/2, S/3, S/4: vizsgált nyomjelzőanyag transzportvizsgálatok jelei
- SSE: a mért és illesztett értékek közötti négyzetes hiba összege
- TOC: összes szerves szén
- TSS: a négyzetes eltérések összege
- t: idő
- Tu: tortuozitás
- v: szivárgási sebesség

- $V$ : térfogat
- $Y_i$ : mért értékek
- $Y$ : mért értékek átlaga
- $y_i$ : illesztett függvény értékei  $Y_i$  érték helyén értelmezve
- $x, y, z$ : fő koordináta irányok
- $\alpha$ : regressziós egyenes irányszöge
- $\tau, \underline{\tau}$ : átlagos tartózkodási idő
- $\sigma$ : szórás
- $\mu$ : várható értéke vagy momentum
- $\varepsilon$ : töltet porozitása
- $\varepsilon_0$ : kezdeti porozitás
- $\varepsilon_m$ : holttérszerűen viselkedő mátrix porozitása
- $\varepsilon_a$ : az áramlástanilag aktív szivárgási zóna porozitása

# 1. Bevezetés

## 1.1. A témaválasztás indokai

A klímaváltozás a 21. század egyik, ha nem a legnagyobb problémája. Az elmúlt évtized volt az egyik legmelegebb a Földön. Ennek a folyamatnak a csillapítását elsősorban a környezetünk védelmével, az emissziók csökkentésével tudjuk megtenni. Olyan technológiákat kell előtérbe helyoznünk, melyek mérsékelik a környezetünk szennyezését, mert sajnos mind a levegőbe, mind a talajba és a vizekbe is jelentős mennyiségű szennyezőanyag jut. Az egyik ilyen terület a vizek tisztaságának védelme. Nagyon fontos, hogy a bevezetendő szennyvizek minél nagyobb fokú tisztítása megtörténjen. A világon a legelterjedtebb technológiai csoport az intenzív szennyvíztisztítási eljárásokat foglalja magában, ilyen technológia például az eleveniszapos eljárás. A másik az extenzív technológiák csoportja, melyeket természetközeli szennyvíztisztító rendszereknek is szoktak nevezni a hazai szakirodalomban. Ezek a szennyvíztisztítási eljárások jelenleg is kutatottak, mivel még nem teljesen kiforrott technológiákról beszélünk, elsősorban azért, mert mindössze 40 éve történt meg az újrafelfedezésük KICKUTH (1981) révén.

Fontos kiemelni azt is, hogy a természetközeli szennyvíztisztítók teljesen eltérnek funkciójukban, kialakításukban és terhelési viszonyaikban a műtárgyas intenzív technológiáktól. A természetközeli rendszerekben összetettebb lebontási folyamatok zajlanak le, illetve az időjárási tényezők nagyobb mértékű kihatása miatt jóval nagyobb számú mérést és más jellegű tárgyalási technikákat igényel, mint a hagyományos rendszerek. Lehetséges a két technológia ötvözése is, amit a nemzetközi szakirodalom hibrid rendszernek nevez, de a dolgozat ezt a témakört nem tárgyalja.

Ahogy fentebb utaltam rá, Kickuth 1981-ben publikálta ebben a témában híressé vált „root zone method”-jét, mely a szinte teljesen elfeledett természetközeli szennyvíztisztítási eljárásokat újra a köztudatba hozta (KICKUTH 1981). Ennek hatására kezdett el terjedni a gyökérszónás szennyvíztisztítás alkalmazása. Így a nyugat-európai országokban és az USA-ban több tízezer gyökérszónás szennyvíztisztító telep épült. Ezek leginkább kísérleti jellegű telepek voltak, majd ezeknek a tapasztalatai járultak hozzá ahhoz, hogy a '80-as évek végétől kezdve megjelenjenek az első tervezési irányelvek az USA-ban, Németországban, Angliában, illetve az Európai Unióban (EC GUIDE 2002, DITTRICH 2006a), melyekben mindig a legújabb szakmai tapasztalatokat adaptálták. A kétezres évek elejétől jó pár országban (például Angliában és Dániában) már az

úgynevezett második generációs gyökérszénás tervezési irányelveket alakították ki (WEEDON 2003, BRIX 2005), és emellett megjelentek az első modellezési próbálkozások is (LANGERGRABER 2003). Ez a fejlődési folyamat még ma is tart, melyhez nagy segítséget nyújt az egyre nagyobb mennyiségű üzemi tapasztalat és a témában publikált cikkek növekvő száma.

A gyökérszénás szennyvíztisztítási technológia mind az USA-ban, mind az EU-ban, illetve Ausztráliában is széles körben elterjedt.

Hazánkban a gyökérszénás szennyvíztisztítás témájában az 1980-as évek óta zajlik kutatás (FLEIT 1988). A hazai gyökérszénás szennyvíztisztítás elterjedésében és fejlesztésében nagy szerepe volt Szilágyi Ferencnek (SZILÁGYI 1994, SZILÁGYI 1998, SZILÁGYI 2004), aki több mint 25 éve kutatja a gyökérszénás szennyvíztisztítás hazai problémáit és a lehetséges fejlesztési irányokat. Mellette kiemelkedő szerepe volt Jobbágy Sándornak és Horváth Lászlónak is abban, hogy Magyarországon ez a fajta szennyvíztisztítási eljárás egyre inkább elterjedjen (JOBÁGY 1995). Dulovics Dezső alkotta meg a Magyar Szennyvíztechnikai Szövetség (MASZESZ) által készített első hazai gyökérszénás tervezési irányelvet (MASZESZ MI-I-1:2003).

A hazai elterjedésnek sajnos több korlátja volt és van, melynek okai az alábbiak (DITTRICH 2006a):

1. A nem megfelelő tervezési gyakorlat és a viszonylag kevés hazai tapasztalat.
2. Az eddig megépült hazai rendszerek negatív üzemi tapasztalatai.

Még napjainkban is jelen vannak ezek a problémák, de szerencsére egyre több telep működik jól hazánkban is. Magyarországon 2019-es adatok alapján 1054 közüzemi szennyvízrendszerrel nem rendelkező település van, többségük lakossága 1000 főnél alacsonyabb. Ezek a települések többnyire olyan területeken vannak, ahol nem megoldható a szennyvízelvezető közmű gazdaságos üzemeltetése. Magyarországon elsősorban ezeken a településeken érné meg gyökérszénás szennyvíztisztító telepeket alkalmazni. Talán ezen belül is a 600 lakosegyenérték alatti települések azok, melyeken célszerű lenne ilyen rendszerekkel letisztítani a keletkező szennyvizet.

Az Európai Unió a 2014-től 2020-ig terjedő időszakban folyamatosan támogatta a természetközeli szennyvíztisztítók építését különböző pályázatok keretében (H2020-EU.3.5., H2020-EU.3.2.) A 2021-2027-es időszakban továbbra is támogatni fogja.

Magyarországon a VP6-7.2.1.2-16 - EGYEDI SZENNYVÍZKEZELÉS című pályázat keretében valósultak meg gyökérszénás szennyvízkezelő rendszerek. A pályázat a vidéki térségben működő

települési önkormányzatok, önkormányzati társulások számára a 2000 lakosegyenérték alatti települések, elkülönült településrészek és külterületek autonóm és természetközeli szennyvízkezelésének támogatására fókuszál. Megvalósult projektek többek között: Abaliget, Cserkút, Dencsháza, Ellend, Göresöny, Kutas, Magyarbóly, Pécs-Árpádtető, Bugacpuszta. A gyökérszennyvízkezelési rendszerek kiváló és praktikus környezetkímélő alternatívák lehetnek hazánkban is, leginkább a kis agglomerációk és az egyéb kisméretű kibocsátások tisztítására.

Az egyik kutatandó terület ezen műtárgyak pontos vízmérlegének mérése a hazai klimatikus viszonyok között. A vízmérleg egyik fontos paramétere az evapotranszspiráció, ami a töltet párolgásának és a növény párologtatásának együtteséből adódik. Ezen paraméterek ismerete nélkül csak becsülhető a műtárgy vízmérlege, ami közvetlenül kihat a műtárgyból elfolyó víz minőségére. Hazánkban – különösen a nyári időszakban – az evapotranszspiráció jelentősen befolyásolhatja a műtárgy vízháztartását, így az elfolyó víz minőségét is. Olyan hazai publikációról nincs tudomásom, mely ezzel a problémával részletesen foglalkozott volna. A nemzetközi szakirodalomban fellelhető publikációk pedig csak a nappali evapotranszspirációt vizsgálták (BEEBE et al. 2014, TUTTOLUMONDO et al. 2015).

A másik számomra izgalmas fejlesztendő irány a gyökérszennyvízkezelési műtárgyakban lezajló áramlási és anyagtranszport-folyamatok elemzése. Magyarországon a transzportfolyamatok modellezésével Somlyódy László nemzetközi szinten is elismert professzor foglalkozott. Kutatásának fő iránya a felszíni vizek transzportfolyamatainak leírása (SOMLYÓDY 1980, SOMLYÓDY 1982) volt. Kovács Balázs volt az, aki a felszín alatti szivárgások transzportfolyamatait részletesen vizsgálta, és készített egy összefoglaló értékelést a hazai szakirodalomban (KOVÁCS et al. 2002). Ő leginkább a nagyobb területi kiterjedésű felszín alatti transzportproblémák megoldására fókuszált. A gyökérszennyvízkezelési szennyvíztisztítók transzportfolyamataihoz nagyon hasonló, kisléptékű transzportmodellezéssel Simonffy Zoltán (SIMONFFY 1998) foglalkozott.

A gyökérszennyvízkezelési szennyvíztisztítók transzportfolyamataival kapcsolatban a nemzetközi szakirodalomban is kevés számú publikáció született, hazai publikációról pedig témavezetőm publikációin (DITTRICH 2006c, DITTRICH és KLINCSIK 2015a, DITTRICH és KLINCSIK 2015b) kívül nincs tudomásom. Ennek főbb okai, hogy ezen műtárgyak transzportmodellezése nagyon nehézkes, mivel a gyökérszennyvízkezelési rendszer vízmérlegére erősen kiható időjárási jellemzők sztochasztikussá teszik az áramlási rendszer anyagforgalmi folyamatait. Emellett a gyökérszennyvízkezelési

átszött és biofilmmel telítődött, térben és időben dinamikusan változó aktív pórusrendszer is nehezíti ezeknek a folyamatoknak a pontos leírását. Ezek alapján érthetővé válik, hogy máig miért nem fejlesztettek ki nagy pontosságú transzportmodellt a gyökérszívás rendszerekre vonatkozóan. Jelen disszertáció egy újszerű transzportmodellezési irány egyedi alkalmazását mutatja be, és segítségével hasznos tudományos eredményeket rögzít.

## 1.2. Az értekezés tartalma és célkitűzései

A dolgozat kizárólag a gyökérszívás szennyvíztisztító rendszerekkel foglalkozik. A gyökérszívás szennyvíztisztító műtárgyakra rávezetett szennyvíz összetett folyamatok segítségével letisztul.

A disszertáció első részében a transzspiráció hatását vizsgálom a hosszanti átfolyású gyökérszívás műtárgyak vízháztartására vonatkozóan laboratóriumi körülmények között végzett mérések segítségével. Emellett terepi monitoring rendszerrel vizsgálom az evapotranszspiráció hatását szintén a hosszanti átfolyású gyökérszívás műtárgyak vízháztartására.

Ez irányú vizsgálataimnak három célja van:

1. A hazai klimatikus viszonyok között megvizsgálom, hogyan transzspirál a hosszanti átfolyású gyökérszívás műtárgyba ültetett sás (*Carex elata*), és ennek milyen hatása van a műtárgy vízháztartására tavasszal, nyáron és ősszel.
2. Terepi mérési eredmények alapján hazai klimatikus viszonyokra meghatározom a napon belüli evapotranszspiráció mértékét és annak a hosszanti átfolyású gyökérszívás műtárgyak vízháztartására való hatását tavaszi, nyári és őszi időszakokra.
3. Vizsgálataim során hazai klimatikus viszonyokra meghatározom a hajnali és esti páralecsapódás mértékét és hatását a hosszanti átfolyású gyökérszívás műtárgyak vízháztartására.

A DITTRICH és KLINCSIK (2015a, 2015b) által kidolgozott statisztikai módszer segítségével vizsgálom a hosszanti átfolyású gyökérszívás műtárgyak transzportfolyamatait, melyből a folyamat megértését elősegítő következtetéseket vonok le. **Vizsgálatom újdonságtartalmát és egyediségét az adja, hogy az egész műtárgyra kifejlesztett módszert a műtárgy belső pontjainak vizsgálatára használom, melyhez a módszer kiegészítésére is szükség volt. Ehhez kapcsolódóan a disszertáció további céljai:**

4. Annak vizsgálata, hogy nemzetközi szakirodalomban napjainkig publikált és legelterjedtebben használt módszer (konvektív-diszperzív transzportegyenlet) alkalmas-e az ilyen típusú mőtárgyak belső pontjaiban a transzportfolyamatok megfelelő pontosságú leírására.
5. Eddig nem alkalmazott eloszlásfüggvények keresése a gyökérvónás mőtárgyak belső pontjaiban a transzportfolyamatok leírására annak érdekében, hogy az eddigiéknél nagyobb pontosságú modellt találjak.
6. További célom annak bizonyítása, hogy a DITTRICH és KLINCSIK (2015b) által fejlesztett transzportmodellezési módszer alkalmazható-e gyökérvónás mőtárgyak transzportfolyamatainak leírására.
7. Annak igazolása, hogy az ún. osztott konvektív-diszperzív transzportmodell precízebben írja le a valóságot a hagyományosan alkalmazott transzportmodelleknél.

A 2. fejezet részletesen ismerteti a nemzetközi és hazai szakirodalom jelenlegi állását mind az evapotranszspiráció mérésére vonatkozóan, mind a gyökérvónás szennyvíztisztítás területén. Az evapotranszspiráció becslésére, mérésére használatos egyenleteket és módszereket is bemutatom. A fejezet bővebben tárgyalja a hosszanti átfolyású gyökérvónás mőtárgyak transzportfolyamataival kapcsolatos ismereteket is. Részletesen ismertetem a konzervatív nyomjelző anyag transzportfolyamatok alapvető összefüggéseit, az ezekre vonatkozó alapvető irodalmi ismereteket és eloszlásfüggvény-típusokat is.

A 3.1.-3.2. fejezetekben bemutatom a hódmezővásárhelyi gyökérvónás mőtárgyat és az ott használt monitoring rendszer főbb elemeit. A 3.3. fejezetben a mőtárgyon végzett konzervatív nyomjelzőanyag-méréseket ismertetem. A 3.4. fejezetben az evapotranszspirációs és transzspirációs mérésekhez szükséges eszközöket és mérési módszereket mutatom be. A 3.5.-3.10. fejezetekben a transzportmodellezéshez használt szoftvert és programot ismertetem, illetve a használt eloszlásfüggvényeket, emellett a Dittrich és Klincsik által kifejlesztett alapmodellt (DITTRICH és KLINCSIK 2015a, DITTRICH és KLINCSIK 2015b) és annak új alkalmazási környezetre történő adaptációját mutatom be. A 4.1.-4.2. fejezetekben a hosszanti átfolyású gyökérvónás mőtárgyak vízháztartását befolyásoló transzspirációs és evapotranszspirációs méréseim eredményei és annak elemzéseit vannak bemutatva. A 4.3.-4.4. fejezetek mutatják be a hosszanti átfolyású gyökérvónás mőtárgyak konzervatív nyomjelző anyag transzportfolyamatainak mérési eredményeit és elemzését.

Az 5. fejezet az eredmények gyakorlati alkalmazhatóságára tett következtetéseit tartalmazza. A 6. fejezetben az eredményekből levonható következtetések és az eredmények tézisszerű összefoglalása található. Ezt a kapcsolódó publikációk majd az irodalomjegyzék követik. A disszertáció végén található mellékletek hozzájárulnak az anyag könnyebb érthetőségéhez, illetve alátámasztják az elemzések helyességét. A vizsgálataim során elvégzett nagyszámú statisztikai illesztés és egyéb elemzések eredményeit bemutató ábrák is itt találhatók.



## 2. Irodalmi áttekintés

### 2.1. A gyökérszénás szennyvíztisztítás általános bemutatása, konstrukciós változatai, tisztítási mechanizmusok

A gyökérszénás szennyvíztisztítás (melyet hazánkban „gyökérteresz”, illetve „gyökérmezős” szennyvíztisztítási eljárásnak is szoktak hívni) a nemzetközi szakirodalomban az ún. épített wetland-ek (constructed wetlands) csoportjába tartozik. Megkülönböztetünk szabad vízfelszínű (SVF), illetve felszín alatti átfolyású (FA) rendszereket (VYMAZAL 2008). A kettő között az az alapvető különbség, hogy az SVF rendszerek esetén az épített medencében elhelyezett töltőanyag felszíne felett időszakosan, vagy állandó jelleggel vízátfolyás van. Ezzel szemben az FA rendszerek esetén a víz a medencék töltőanyagán keresztül, kizárólag a felszín alatt szivárog át, ezt nevezzük gyökérszénás szennyvíztisztításnak.

A gyökérszénás műtárgyak kialakítása általában szigetelt földműves medencékben történik, melyekben megfelelő anyagú töltetet helyeznek el. A medencében elhelyezett töltet anyaga lehet homok, kavics, zúzalék, talaj vagy ezek keveréke. A szakirodalom az eltömődési folyamatok miatt kizárólag jó szivárgási tényezőjű anyagok (frakcionált homok, frakcionált kavics) beépítését javasolja (DITTRICH 2006a). Különböző kísérleteket végeztek olyan töltetanyagokkal, melyekkel fenntartható a foszforeltávolítás a szennyvízből. Ilyen alkalmazott töltetanyagok például: apatit, kalcit, granulált salak vagy vasérc (GRÜNEBERG és KERN 2001, ARIAS et al. 2003b, KORKUSUZ et al. 2004, MOLLE et al. 2005b).

A beültetett növényzet gyökérzete megfelelő telepítés, illetve műtárgy-kialakítás esetén teljesen átszövi a szűrőtöltetet. Habár világszerte több mint 150 makrofita fajt használtak ilyen műtárgyakban, a valóságban ezeknek a növényfajoknak csak korlátozott számát ültetik gyakran (VYMAZAL 2013b). A leginkább alkalmazott fajok a nád (*Phragmites australis*), a sás (*Carex acutiformis*), a gyékény (*Typha latifolia*) és a káka (*Scirpus lacustris*). A növényeket legtöbbször monokultúráként telepítik (SZILÁGYI 1994).

A gyökérszénás műtárgyakban a szennyvíz tisztulása fizikai, kémiai, illetve biológiai folyamatok segítségével zajlik le. A fizikai folyamatok (pl. ülepedés, szűrés, adszorpció stb.) miatt jelentősen csökken a lebegőanyagok és a kolloidok mennyisége, emellett a tisztítandó folyadék szervesanyag, növényi tápanyag- illetve nehézfém-tartalma kismértékben csökken. A kémiai (pl. adszorpció, kicsapódás, bomlás stb.), illetve biológiai és biokémiai folyamatok (pl. növényi és bakteriális

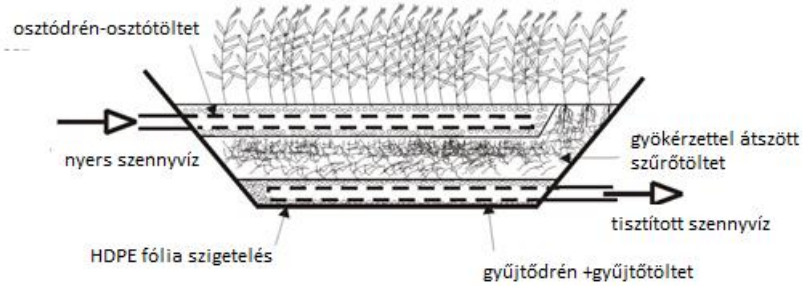
anyagcsere, enzimikus reakciók stb.) hatására csökken a tisztítandó szennyvízben lévő szerves anyag, mikroszennyező, nehézfém és növényi tápanyagok mennyisége, valamint a vírusok és baktériumok egyedszáma. A biológiai lebontásért a műtárgyban több tízezer baktérium- és gombafaj a felelős (JOBÁGY 1995). A gyökérszónás műtárgyakkal magas tisztítási hatások érthető el például ammónium-nitrogén, összes nitrogén, összes foszfor vagy nitrát és nitrit tekintetében is (PARDE et al. 2020).

A betelepített növényeknek számos fontos szerepe van (BRIX 1994):

- a gyökérszóna felületén telepedhetnek meg a gombák, baktériumok és egyéb tisztítást végző mikroorganizmusok,
- a növényzet által biztosított mikroklíma szintén a mikroorganizmusok megtelepedését, illetve szaporodását segíti,
- a növények gyökérszónájukon keresztül oxigént juttatnak a szennyvíztérbe, mellyel elősegíthetik a lebontási folyamatokat (nitrifikációt),
- a növényzet stabilizálja a töltetfelszínt a műtárgyban,
- a betelepített makrofiták a téli időszakban csökkentik a szennyvíz hőveszteségét,
- a növényzet növényi tápanyagokat vesz fel a szennyvízből,
- életteret biztosítanak különböző magasabb rendű élőlények számára,
- javítják a műtárgy esztétikai képét,
- mérséklék az eltömődési folyamatokat.

A gyökérszónás szennyvíztisztító rendszerek lehetnek függőleges vagy vízszintes átfolyásúak (VYMAZAL 2008), illetve ezek kombinációi (multistage rendszerek). A függőleges átfolyású rendszereknél a legelterjedtebbek a függőleges, lefelé áramlású műtárgyak. Az első függőleges átfolyású rendszereket első generációs rendszereknek hívták, ezek 2-4 sorba kapcsolt műtárgyból álltak (VYMAZAL 2008). Tulajdonképpen ezek a rendszerek jelentették az első lépést a hibrid rendszerek kialakulása felé (BURKA és LAWRENCE 1990, LIÉNARD et al. 1990). A mostani függőleges átfolyású rendszereket második generációs rendszereknek hívják. Itt már csak egy műtárgy végzi a szennyvíz tisztítását (BRIX et al. 2002, JOHANSEN et al. 2002). Franciaországban több mint 1000 ilyen rendszer került kiépítésre (BOUTIN és LIÉNARD 2003).

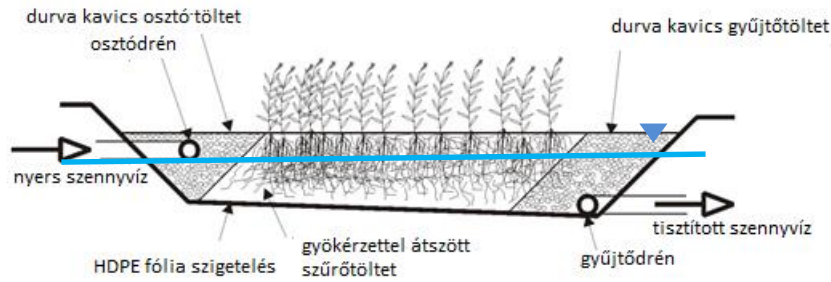
A függőleges átfolyású kialakítás esetében a töltet felső rétegében, a műtárgy felülete mentén helyezik el az osztódréneket. A műtárgy alján az osztódrénekhez hasonló geometriai elosztású gyűjtődréneket építenek be. Az osztó- és a gyűjtődrének között 0,5 – 1,2 m vastag szűrőtöltet végzi a szennyvíz tisztítását, ez látható a 1. ábrán.



**1. ábra: Függőleges átfolyású gyökézzónás szennyvíztisztító műtárgy sematikus rajza (DITTRICH 2006b)**

1 lakosegyenértéknek (a szennyvízterhelés nemzetközileg elfogadott mértékegysége) megfelelő mennyiségű szennyvíz letisztításához 3 m<sup>2</sup> területre van szükség ennél a műtárgytípusnál amennyiben városi szennyvíz tisztításáról beszélünk, de a 2000 lakosegyenérték alatti településeknél ez inkább 5 m<sup>2</sup>, mivel sokkal töményebb a szennyvíz. Ha adott ez a felület, akkor a beérkező szennyvíz BOI<sub>5</sub> koncentrációjának tekintetében 95%-os hatásfokú tisztítás érhető el 1 m szűrőmélység esetén (VYMAZAL 2008). A hazai tapasztalatok alapján 3 m<sup>2</sup>-nél jóval nagyobb fajlagos területigény is adódhat.

Vízszintes átfolyású rendszereknél a szennyvizet egy, a szűrőtöltetben keresztirányban kialakított osztódren osztja szét. A hidraulikai szétosztás minőségét azzal lehet tovább fokozni, ha az osztódren környezetében nagy szemszerkezetű osztótöltet van elhelyezve. A kezelendő szennyvíz a tölteten, tulajdonképpen a „gyökézzónán” keresztül halad végig a műtárgy hossza mentén. Innen a 2. ábrán látható módon a tisztított szennyvíz a gyűjtődrenbe szivárog, melyet általában a műtárgy fenekén keresztirányban helyeznek el. A gyűjtődren köré a megfelelő működés érdekében az osztótöltethez hasonló szemszerkezetű anyagot szoktak elhelyezni. A javasolt töltetmélység 0,6-1 m (VYMAZAL 2008).



**2. ábra: Vízszintes átfolyású gyökérezónás szennyvíztisztító műtárgy sematikus rajza (DITTRICH 2006b)**

A függőleges átfolyású rendszerekben háromfázisú, nem permanens szivárgás a jellemző, míg a hosszanti átfolyású rendszerek esetében kétfázisú, nem permanens változó felszínű szivárgás alakul ki (DITTRICH 2006c). Ez az alapvető áramlástanai különbség jelentős kihatással van többek között a műtárgytípusok töltetanyagára, a tartózkodási időre, az oxigénháztartási folyamatokra, a gyökérezet áramlási viszonyokra gyakorolt hatásaira és egyes paraméterek tisztítási hatásfokára is. Az 1. táblázat foglalja össze a függőleges és vízszintes átfolyású rendszerek alapvető különbségeit.

**1. táblázat: Függőleges és vízszintes átfolyású rendszerek összehasonlítása (DITTRICH 2006b)**

	<b>Függőleges átfolyású rendszerek</b>	<b>Vízszintes átfolyású rendszerek</b>
<b>Szervesanyag-eltávolítás mértéke</b>	kiváló	jó
<b>LA eltávolítás mértéke</b>	közepes	kiváló
<b>NH<sub>4</sub>-N eltávolítás mértéke</b>	kiváló	alacsony
<b>NO<sub>3</sub>-N eltávolítás mértéke</b>	alacsony	jó
<b>Szennyvízadagolási mód</b>	szakaszos	folyamatos
<b>Áramlás jellege</b>	háromfázisú	kétfázisú
<b>Makrofiták jelentősége az oxigénháztartásban</b>	kismértékű	nagymértékű
<b>Makrofiták gyökérezetének áramlástorzító hatása</b>	elhanyagolható	jelentős
<b>Maximális hidraulikai terhelés [mm/nap]</b>	60	40
<b>Töltetanyag</b>	homok	frakcionált kavics

Látható, hogy a függőleges átfolyású rendszerekben az ammónium-nitrogén eltávolítás sokkal jobb hatásfokkal történik, mivel ezeknek a rendszereknek jóval magasabb az oxigénellátottságuk. A függőleges átfolyású konstrukciós változatnál hatékony nitrifikáció esetén a teljesen aerob szűrőtestben nem tud a denitrifikáció lezajlani, ezért az elfolyó szennyvízben magas koncentrációban jelenik meg nitrit és nitrát. A függőleges átfolyású rendszereknél a magas oldottoxigén-ellátottságért nagyrészt a háromfázisú függőleges áramlás által keltett oxigéntranszport a felelős, mely biztosítja az aerob környezetet a töltetben. Ezekben a rendszerekben a foszforeltávolítás mértéke elsősorban a szűrőközeg anyagától függ, ami megkötí a foszfort (VYMAZAL 2008). A BOI<sub>5</sub>, KOI tekintetében kiváló hatásfokkal működnek.

Ezzel szemben a hosszanti átfolyású rendszerekben az anoxikus zónák jelenléte miatt a denitrifikációs folyamatok azok, amelyek dominánsak és a nitrogén eltávolításban főszerepet játszanak. Ha a műtárgy megfelelően működik, akkor a nitrát csak kis koncentrációban jelenik meg az elfolyó szennyvízben (VYMAZAL 2008). A nemzetközi mérési eredmények azt mutatják, hogy a hosszanti átfolyású rendszerek lebegőanyag-eltávolítási hatékonysága alacsonyabb, mint a függőleges átfolyásúaké (COOPER 1999).

Az 1. táblázatból látszik, hogy azonos töltettípus és azonos fajlagos felület esetén a függőleges átfolyású rendszerek hidraulikai terhelhetősége nagyobb, mint a vízszintes átfolyásúaké, ennek főbb okai a szétesztási felületi arányok és az áramlási jellegbeli különbségek. A szakirodalom maximális felületi hidraulikai terhelésre függőleges átfolyású rendszerek esetén a 60 mm/d MASZESZ MI-I-1:2003, de 2000 lakosegyenérték alatti települések esetében ez inkább 40-50 mm/d érték. Hosszanti átfolyású rendszereknél DULOVICS (2002) 40 mm/d értéket javasol. Annak érdekében, hogy az eltömődési folyamatokat csökkentsék, a nemzetközi szakirodalom hosszanti átfolyású rendszerek tölteteként kizárólag frakcionált kavics alkalmazását ajánlja. A szemcseátmérő tekintetében azonban megoszlanak a vélemények, de a lényeg, hogy a legkisebb szemcseátmérő 3-5 mm-nél kisebb semmiképpen ne legyen (EC-GUIDE 2002, CRITES 1994, MAGMEDOV et al. 1996). A függőleges átfolyású rendszereknél az alkalmazott töltetanyag megválasztása jóval nehezebb feladat, mert ha túl alacsony pórustérfogatú töltetet választunk, akkor az hamar eltömődik. Ha viszont túl magas pórustérfogatút alkalmazunk, akkor a szennyvíz túl gyorsan folyik át a szűrőrétegen, így pedig a megfelelő mértékű lebomlási folyamatok sem tudnak lezajlani. A szakirodalom általában minimum 60 cm homok vagy homokos kavics töltetet ajánl a szűrőréteg vastagságának, azonban más-más frakciótartományút. LANGERGRABER et

al. (2003) és LABER et al. (2000) 0,06-4 mm szemcsetartományú vagy 1-4 mm-es frakciótartományú homokos kavics szűrőréteget javasol, mely összhangban van a német tervezési irányelvvel is.

Függőleges átfolyású rendszerek esetében az optimális szennyvízszétosztást és a megfelelő mértékű konvektív oxigéntranszportot a szűrőtöltet pórusai között úgy érhetjük el, hogy szakaszosan engedjük rá a szennyvizet. Az eltömődési folyamatokat befolyásolhatja a naponta rávezetett dózisok száma és a dózisonkénti szennyvíz mennyisége (LANGERGRABER 2003).

A vízszintes átfolyású rendszerek oxigénháztartásában jelentős szerepe van a töltetet átszövő rizómák biztosította oxigénbevitelnek. A szennyvíztisztításhoz szükséges oxigén előteremtésében a makrofiták rizoszférájában található oxigén játssza a legfontosabb szerepet. Kutatók bebizonyították, hogy a gyökerek által felszabadított oxigén a makrofiták fotoszintézis-melléktermékei. A növények a gyökérzetük közvetlen környezetében mindig egy vékony oxigénben gazdag réteget tartanak fenn. A makrofiták által a szennyvíztérbe juttatott oxigén fluxus  $0,5 - 6 \text{ g O}_2/\text{m}^2$ , nap közötti értékre becsülhető (KADLEC és TANNER 2003). Ez az érték nagyban függ az adott makrofita morfológiai tulajdonságától, oxigéntranszportjától, emellett a szűrőközeg anyagától is (REHMAN et al. 2016). Méréseket végeztek a nád gyökérzete általi oxigén mennyiségére vonatkozóan: talajtöltetben  $0,02 \text{ g O}_2/\text{m}^2$ , nap, kavicsöltetben ez az érték  $0,8 \text{ g O}_2/\text{m}^2$ , nap, míg homok és kavics töltetben  $4,1 \text{ g O}_2/\text{m}^2$ , nap (BRIX és SCHIERUP 1990, ARMSTRONG et al. 1990, ARMSTRONG et al. 1991). BURGOON (1993) közönséges kákán végzett méréseinek az eredményei a  $0-28,8 \text{ g O}_2/\text{m}^2$ , nap intervallumban mozogtak. KEMP és MURRY (1985) kutatásai bebizonyították, hogy a fiatalabb és kisebb növényeknek nagyobb a gyökérzet általi oxigéntranszportjuk, mint az öregebb és nagyobb növényeknek.

A szennyvíz átlagos tartózkodási ideje a függőleges átfolyású rendszerek szűrőtöltetében csupán pár perces (LANGERGRABER 2003), míg egy hosszanti átfolyású rendszerben akár 2-7 nap (CRITES 1994).

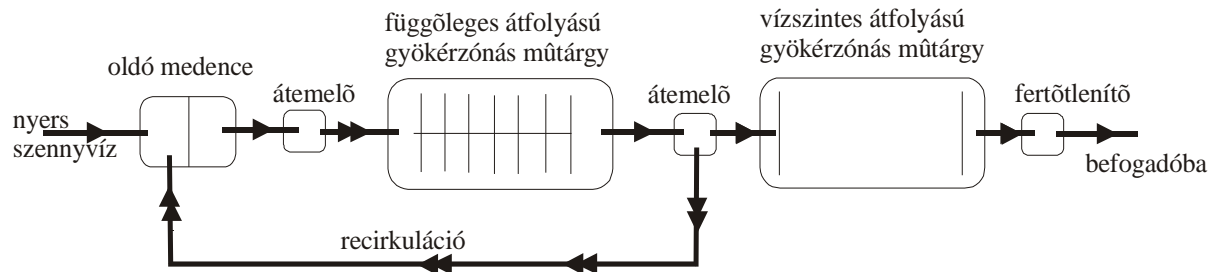
A nemzetközi szakirodalomban a káros eltömődési folyamatok és a megfelelő szervesanyag-eltávolítási hatások érdekében a szervesanyag-terhelés limitálását javasolják. Néhány szakirodalmi adat a szervesanyag-terhelésre vonatkozóan:  $20 \text{ g KOI}/\text{m}^2$ , nap (WINTER és GOETZ 2003),  $25 \text{ g KOI}/\text{m}^2$ , nap (WEEDON 2003),  $5 \text{ g TOC}/\text{m}^2$ , nap (LABER et al. 2000). Ezek az értékek függőleges átfolyású rendszerekre vonatkoznak. A hosszanti átfolyású műtárgyak

szervesanyag-lebontó képessége alacsonyabb, így ennél a műtárgytípusnál a fenti értékeket nagyobb biztonsággal kell figyelembe venni a tervezésnél.

A két műtárgytípus között az áramlási viszonyokból fakadóan jelentős különbség mutatkozik a gyökérzetben és annak áramlásra gyakorolt hatásait illetően is. Az 1980-as évek elején szakirodalomban publikált értékelések (Kickuth, Beven és German stb.) szerint a műtárgyba telepített növényzet gyökérzete a töltet szivárgási tényezőjét javítja. Az elképzelés szerint a talajtöltetű gyökérszónás műtárgyakban a makrofiták gyökérzete átszövi a rendelkezésére álló talajtöltetet. Az olyan helyeken, ahol a töltetben a gyökérzet elpusztul, ún. makropórusok maradnak. A nagy gyökérsűrűség miatt létrejövő makropórusrendszer következtében 3 évvel a betelepítés után a talajtöltetű gyökérmezők hidraulikai áteresztőképessége stabilizálódik kb.  $10^{-3}$  m/s értéken. Ez a tézis a talajtöltetű hosszanti átfolyású rendszerekre (Kickuth-rendszer) már megcáfolódott (BRIX 1994), ugyanis BRIX (1994) és HABERL et al. (1995) mérési eredményeikre alapozva ennek ellentettjét állították. Véleményük szerint a talajtestek állandósult áteresztőképessége maximum  $10^{-5} - 10^{-6}$  m/s-os tartományt ér el, emiatt a talajtöltetű műtárgyak tervezésénél nem szabad figyelembe venni a makrofiták gyökérzetének lehetséges hidraulikai áteresztőképesség-javító hatását. A nemzetközi szakirodalomban található publikációk alapján (HABERL et al. 1995, BATCHELOR és LOOTS 1996) egyes kavicsöltetű hosszanti átfolyású műtárgyaknál is áteresztőképességi problémákat okozott a gyökérzet növekedése, mely annak póruskitöltő hatásából fakad. BREEN és CHICK (1995) a rhizóma sűrűség eloszlását vizsgálták a gyökérszónás műtárgyakban. Az eredményeikből arra következtettek, hogy a töltet függőleges szelvénye mentén a gyökérzet sűrűsége a mélység növekedésével folyamatosan csökken. Méréseik azt mutatták, hogy a gyökérzet által képviselt biomasszatömeg 70%-a a töltetmélység felső 30%-ában helyezkedik el. Vizsgálataik alapján a gyökérzet sűrűségének jelentős hatása van a műtárgyban zajló áramlásra. Így elmondható, hogy a hosszanti átfolyású rendszerekben a gyökérzet hatására rétegzett áramlás alakul ki. A felső rétegekben lassabb áramlások vannak, mivel a rhizómák a pórusokat jobban kitöltik, míg az alsóbb rétegekben gyorsabb kényszeráramlások alakulnak ki, melyet saját vizsgálataim is alátámasztanak. Több szerző is vizsgálta a függőleges átfolyású rendszereket (BREEN és CHICK 1995, LABER et al. 2000, LANGERGRABER et al. 2003, WINTER és GOETZ 2003), de ott a gyökérzet tölteteltömítő hatását elhanyagolhatónak tekintik.

A kombinált gyökérszónás szennyvíztisztítási eljárások (multistage rendszerek) mind a két műtárgytípusnak az előnyeiket próbálják ötvözni, így tulajdonképpen a technológia tisztítási

hatásfokát lehet fokozni. A rendszer alapját Brix 1994-ben fektette le (BRIX 1994a). Jobban kiaknázhatók ezen rendszerek előnyei, ha a függőleges és vízszintes átfolyású medencéket egymás után sorba kapcsoljuk. A multistage rendszer alapkombinációját a 3. ábra szemlélteti. A rendszer tisztítási hatékonyságát növelni lehet a medencék között recirkulációs vonal kialakításával.



3. ábra: A „multistage” rendszer felépítése (DITTRICH 2006b)

## 2.2. Nemzetközi szakirodalomban publikált gyökérszónás műtárgyak evapotranszpirációs vizsgálatainak bemutatása

A gyökérszónás rendszerekben a hidraulikai folyamatok ismeretéhez elengedhetetlen a vízforgalom kis időléptékű, vízháztartási mérleg szintű ismerete. A szakirodalomban publikált számos cikk szerzője ezek részletes ismerete nélkül végzett áramlástani vagy anyagtranszport-vizsgálatokat, és a tisztítási hatékonyságot vizsgáló publikációk legnagyobb része figyelmen kívül hagyta a párolgás és csapadékáramlás torzító, tisztítási folyamatokra gyakorolt hatását.

A gyökérszónás rendszerek vízháztartási mérlegét a következő képlettel lehet leírni (QUELUZ 2018):

$$\frac{dV}{dt} = Q_{be} - Q_{ki} + (P * A) - (ET_c * A) \quad (1)$$

Az egyenlet tagjai:

- **V**: víztérfogat (m<sup>3</sup>),
- **t**: idő (nap),
- **ET<sub>c</sub>**: növény evapotranszpiráció (mm/nap),
- **Q<sub>be</sub>**: befolyó szennyvízmennyiség (m<sup>3</sup>/nap),
- **Q<sub>ki</sub>**: kifolyó szennyvízmennyiség (m<sup>3</sup>/nap),



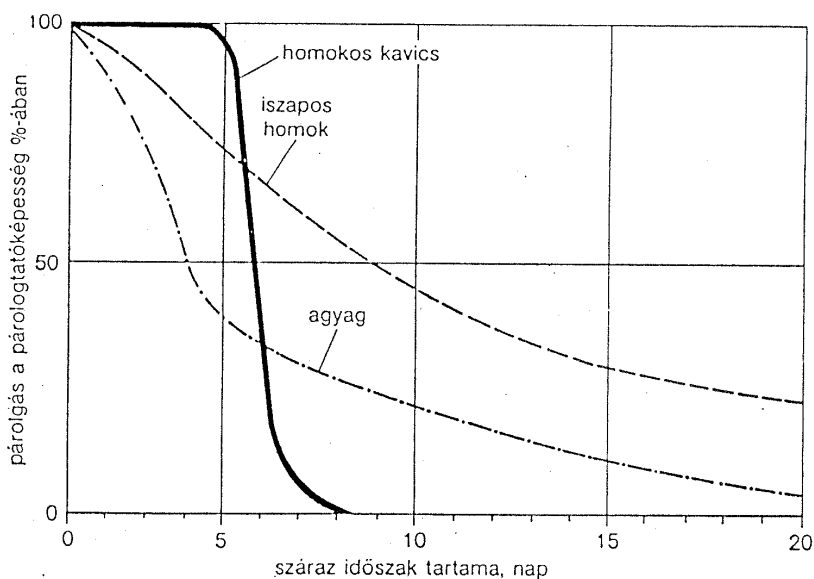
- **A:** műtárgy felülete (m<sup>2</sup>),
- **P:** csapadék mennyisége (mm/nap).

A képletből látható, hogy az evapotranszpiráció mértéke egy igen fontos paramétere a vízháztartásnak, annak pontos mértéke nélkül nem lehet precíz vízmérleggel számolni.

Az evapotranszpiráció tulajdonképpen az evaporációból, azaz a talaj párolgásából és a transzpirációból, azaz a növényzet párologtatásából áll, mely számos tényezőtől függ, azonban a legfontosabbak az alábbiak (ZSUFFA 1996, STELCZER 2000):

- levegő hőmérséklete,
- levegő páratartalma (telítési hiánya),
- csapadékmennyiség és annak időbeli eloszlása,
- talajvízszint,
- talaj összetétele,
- talaj szerkezete,
- talajfelszín színe,
- talajvíz hőmérséklete,
- a talajban tárolt elpárologtatható vízkészlet,
- szélesebesség,
- növényzet fedettsége,
- növényzet minősége,
- növényzet fejlődési fázisa,
- gyökérzet sűrűsége, mélysége,
- párányomás,
- légnyomás,
- napsütéses órák száma,
- stb.

Az egyes talajtípusok párologtató képességét a 4. ábra szemlélteti:



**4. ábra: A talaj szemeloszlásának hatása a párolgatható vízkészlet fogyására 1 m vastag talajszelvényre (ZSUFFA 1996)**

A fenti ábrából jól látható, hogy a gyökérszomszédos rendszerek 3 fázisú rétegének víztartalom-változása annál dinamikusabb folyamat, minél nagyobb a töltet átlagos szemcsemérete. A szabad (növénymentes) talajfelszíni párolgató képességét ( $E_{s,w}$ ) az alábbi összefüggéssel lehet számítani (STELCZER 2000):

$$E_{s,w} = a * E_{w,U} \quad (2)$$

Ahol  $E_{w,u}$  az „U” jelű párolgásmérő kád által mért párolgás értéke,  $a$  a talajvíz mélységétől és a talajszerkezettől függő állandó, melynek értéke 0,45-0,7 m talajvízmélység esetén 0,16-0,71.

ZSUFFA (1996) szerint a talaj párolgató képességét 150-400%-kal növeli a növényzet párolgatóképessége. A növényzet párolgatóképességének időbeni alakulása nagyon összetett folyamat. Mivel az éjszakai órákban a növények párolgatónyílásai szinte teljesen bezárulnak, ezért a napi transzspiráció 90-95%-a a nappali órákra tevődik. A transzspirációt befolyásoló legfontosabb tényezők a növény által felvehető vízmennyiség, a növény élettani körülményei és a légtér páratelítettségének mértéke (STELCZER 2000).

Magyarországon alkalmazott eljárások 50-100 km<sup>2</sup>-nél nagyobb vízgyűjtő területek lehetséges evapotranszpirációjának meghatározására (STELCZER 2000):

- Thonthwaite-Holzman módszere,
- Budiko módszere,

- Penman egyenlet,
- Szesztay egyenlete,
- Jaworsky egyenlete,
- Sugárzási módszer.

A gyökérzónás műtárgyak esetében, azok kisebb területe révén ezek az egyenletek és módszerek nehezen adaptálhatók az evapotranszpiráció becslésére, ennek ellenére a nemzetközi szakirodalomban is használatosak ezek az egyenletek. Több szerző is alkalmazta az alábbi egyenleteket és módszereket az evapotranszpiráció meghatározására.

Az egyik lehetséges evapotranszpiráció becslésére használt módszer a Turc (TURC 1961):

$$ET = 0,013 * \left( \frac{T_a}{T_a+15} \right) * (R_s + 50) \text{ akkor ha } RH_{\text{átlag}} > 50 \% \quad (3)$$

$$ET = 0,013 * \left( \frac{T_a}{T_a+15} \right) * \left( \frac{1+(50-RH)}{70} \right) * (R_s + 50) \text{ akkor ha } RH_{\text{átlag}} < 50 \% \quad (4)$$

Az egyenletek tagjai:

- **ET:** napi evapotranszpiráció (mm / nap),
- **RH:** átlagos relatív páratartalom az adott napon,
- **R<sub>s</sub>:** napsugárzás (W / m<sup>2</sup>),
- **T<sub>a</sub>:** napi átlagos hőmérséklet (°C).

A másik módszer a Thornthwaite (THORNTHWAITE 1948):

$$ET_{mo} = 16 * L_d * T_{mo} \quad (5)$$

$$T_{mo} = \left( \frac{10 * T_{mo}}{I} \right) \quad (6)$$

Az egyenletek tagjai:

- **ET<sub>mo</sub>:** havi evapotranszpiráció (mm),
- **L<sub>d</sub>:** hányados, ami a napfényes órák számától és a sugárzás szögétől függ,
- **T<sub>mo</sub>:** havi átlagos hőmérséklet (°C),
- **I:** a megadott év hőindexe.

A szakirodalomban használják a Hargeaves módszert is (HARGEAVES és SAMANI 1985):

$$ET_r = 0,0023 * \left(\frac{R_A}{\lambda}\right) * (T_a + 17,8) * (T_{max} - T_{min})^{0,5} (7)$$

Az egyenlet tagjai:

- **ET<sub>r</sub>**: referencianövény evapotranszspirációja (mm / nap),
- **T<sub>a</sub>**: napi átlagos hőmérséklet (°C),
- **T<sub>max</sub>**: maximális napi hőmérséklet (°C),
- **T<sub>min</sub>**: minimális napi hőmérséklet (°C),
- **RA**: földön kívüli sugárzás (kJ / m<sup>2</sup> nap),
- **λ**: látens párolgási hő (kJ / kg).

A Blaney-Criddle módszer (BLANEY és CRIDDLE 1962):

$$ET_r = k * p * (0,46 * T_a + 8,13) (8)$$

Az egyenlet tagjai:

- **ET<sub>r</sub>**: referencianövény evapotranszspirációja (mm / nap),
- **k**: havi fogyasztási együttható, amely a növényzet típusától, helyétől és évszakától függ,
- **p**: a felhasznált időszak (napi) összes nappali órájának százalékos aránya az év összes nappali órájához viszonyítva,
- **T<sub>a</sub>**: napi átlagos hőmérséklet (°C).

A széles körben használt Penman-Monteith módszer (PENMAN 1948, MONTEITH 1965, 1981):

$$ET_r = \left(0,408 * \Delta * (R_n - G) + \gamma * \frac{900}{(T_a + 273)} * U_2 * (e_z^0 - e_z)\right) * (\Delta + \gamma(1 + 0,34 * U_2))^{-1} (9)$$

Az egyenlet tagjai:

- **ET<sub>r</sub>**: referencianövény evapotranszspirációja (mm / nap),
- **Δ**: a gőznyomásgörbe meredeksége (kPa / °C),
- **R<sub>n</sub>**: nettó sugárzás a növény felületén (MJ / m<sup>2</sup>),
- **G**: talaj hőáramsűrűsége (MJ / m<sup>2</sup> nap),
- **γ**: pszichometriai állandó (kPa / °C),

- **T<sub>a</sub>**: napi átlagos hőmérséklet (°C),
- **e<sub>z</sub><sup>0</sup>**- **e<sub>z</sub>**: telítettségi gőznyomás (kPa),
- **e<sub>z</sub><sup>0</sup>**: átlagos telítettségi gőznyomás (kPa),
- **e<sub>z</sub>**: átlagos tényleges gőznyomás (kPa),
- **U<sub>2</sub>**: napi átlagos szélesség 2 m magasságban (m / s).

A Priestly-Taylor egyenlet (PRIESTLY és TAYLOR 1972):

$$ET = 1,26 * \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} * (R_n - G) \quad (10)$$

Az egyenlet tagjai:

- **ET**: napi evapotranszpiráció (mm / nap),
- **Δ**: a gőznyomásgörbe meredeksége (kPa / °C),
- **R<sub>n</sub>**: nettó sugárzás a növény felületén (MJ / m<sup>2</sup>),
- **G**: talaj hőáramsűrűsége (MJ / m<sup>2</sup> nap),
- **γ**: pszichometria állandó (kPa / °C).

A Pan módszer (CHRISTIANSEN 1968):

$$ET = 0,775 * C_t * C_w * C_H * C_S * E_P \quad (11)$$

Az egyenlet tagjai:

- **ET**: napi evapotranszpiráció (mm / nap),
- **C<sub>H</sub>**: relatív páratartalom,
- **C<sub>S</sub>**: koeficiens, ami a lehetséges napsütéses órák számának és tengerszint feletti magasságnak a százalékaránya,
- **C<sub>t</sub>**: a hőmérséklet együtthatója,
- **C<sub>w</sub>**: a szélesség együtthatója,
- **E<sub>p</sub>**: számított tál-párologtatás, amely egyenértékű az A. osztályú tál-párologással.

PAPAEVANGELOU et al. (2012) a fentebb felsorolt módszereket és egyenleteket alkalmazta és meghatározta az evapotranszspirációt és összehasonlította az általa mért evapotranszspirációs értékkel. A mérési eredményeihez a legjobban a Blaney-Cridde módszer közelített, de az  $R^2$  értéke ennek is 0,76 értékre adódott, ami eléggé rossznak minősíthető.

A növényi együttható, más néven  $K_c$  fogalmát JENSEN (1968) vezette be és több kutató is továbbfejlesztette (DOORENBOS és PRUITT 1975, BURMAN et al. 1980a, ALLEN et al. 1998). A növényi együttható a tényleges növényi párologás és a referencia evapotranszspiráció aránya  $ET_c/ ET_0$ . A Világ Meteorológiai Szervezet szakértői minden növényre meghatározták az együttható görbéket, amelyek felhasználhatók a  $K_c$  meghatározására a különböző növekedési szakaszokban (TARANTINO és SPANO 2001).

A valóságban a növények nem úgy növekednek (és párologtatnak), mint ideális esetben, mert számos környezeti tényező befolyásolja működésüket.  $K_c$  értékét ismerve a környezeti tényezők korrekcióival számítható a várható evapotranszspiráció ( $ET_{est}$ ):

$$ET_{est}=K_w*K_{s1}*K_{s2}*K_c*ET_0 \quad (12)$$

Ahol az egyenletben szereplő újabb tényezők:

- $K_w$ : vízmennyiségi tényező,
- $K_{s1}$ : toxicitási tényező,
- $K_{s2}$ : növényzet egészségi tényezője.

A stressztényezők értéke 0-1 között változik, és 1 értéket akkor vesznek fel, ha az adott faktor nem limitálja a növényzet párologtatását. Természetesen más stressztényezők is beépíthetők a képletbe, illetve beépíthető a levélfelületi index is. Általában párologtatási szempontból a legdominánsabb a vízmennyiségi tényező hatása.

GALVAO et al. (2010) előállította a napi átlagos evapotranszspiráció napon belüli alakulását. A gyökérszónás műtárgy evapotranszspirációjának mértékét a Penman-Monteith egyenlet és a „növényállomány-állandó” segítségével modellezte. Kalibrált modellt készített a kifolyó vízhozamváltozás modellezésére. Eredményei igazolták, hogy különösen a nyári hónapokban a modell csak az evapotranszspiráció napon belüli ingadozásának figyelembevételével kalibrálható.

Az evapotranszpiráció mértéke leginkább az éghajlati tényezőktől függ, mint például a csapadék, a hőmérséklet és a szél (KUMAR et al. 2012), továbbá nagyban befolyásolja a műtárgyban lévő növények növekedésének mértéke (BORIN et al. 2011), a növények magassága és a levelek sűrűsége is (PAULIUKONIS és SCHNEIDER 2001, BIALOWIEC et al. 2014). Különösen meleg és szeles időjárási körülmények között nagyon magas is lehet az evapotranszpiráció értéke (BIALOWIEC és WOJNOWSKA-BARYLA 2007, ALBUQUERQUE et al. 2009, HEADLEY et al. 2012).

PEDESCOLL et al. (2013) vizsgálta felszín alatti átfolyású gyökérszónás műtárgyakon az evapotranszpirációt Spanyolországban, ami a 20-22 mm/nap értéket is elérte. Ennek alapján az evapotranszpiráció okozta vízveszteség mintegy 44%-a volt a hidraulikai terhelésnek. Voltak olyan napok is, melyeknél ezen érték elérte a 100%-ot.

BEEBE et al. (2014) Egyesült Államok-beli vizsgálatai során hasonló értékeket mért (20 mm/nap), de voltak olyan napok, ahol 40 mm/napot is meghaladta ez az érték. Egy másik tanulmányban az evapotranszpiráció 19,5 mm/nap és 40 mm/nap között mozgott egy izraeli műtárgyban (FREEDMAN et al. 2014).

TUTTOLOMONDO et al. (2015) egy olaszországi gyökérszónás műtárgyon vizsgálta az evapotranszpiráció mértékét és megfigyelte, hogy egyes nyári napokon elérte a 25-35 mm/nap értéket. Ezen érték a hidraulikai terhelés 20-30%-a volt. TANNER et al. (1995) ugyancsak hasonló eredményeket kapott az 1995-ös új-zélandi mérések során. A gyökérszónás műtárgyak evapotranszpirációjának mértékét vizsgálta egy forró nyári napon, melynek eredményei 7,1-11,7 mm/nap körüliek voltak. Ez gyakorlatilag azt jelentette, hogy a napi hidraulikai terhelés 20%-át az evapotranszpiráció tette ki.

MILANI et al. (2019) Szicília keleti részén 12 kísérleti léptékű vízszintes, felszín alatti átfolyású gyökérszónás műtárgyon vizsgálta az evapotranszpiráció mértékét. Az eredmények azt mutatták, hogy a párolgás mértéke 7,35 és 17,31 mm/nap között változott.

QUELUZ et al. (2018) hasonló eredményeket kapott egy kísérleti léptékű horizontális felszín alatti átfolyású gyökérszónás műtárgyban. Ezek 4,9 és 20 mm/nap közötti értékek voltak. Azonban regisztrált egy feltűnően magas eredményt is, amely 46 mm/nap volt. Ez különösképp kiugró értéknek felel meg, melyre nem talált pontos magyarázatot.

YANO et al. (2017) azt vizsgálta, hogy milyen hatással van az evapotranszpirációra a növény növekedése. Az eredmények azt mutatták, hogy a növények növekedése miatt nőtt az evapotranszpiráció mértéke, mely miatt a vízveszteség elérte a hidraulikai terhelés 80%-át. HAMOURI et al. (2007) is vizsgálta az evapotranszpiráció okozta vízveszteséget egy marokkói vízszintes átfolyású rendszerben. Arra a következtetésre jutott, hogy a vízveszteség a beáramló mennyiség 11-17%-át tette ki.

CHAZARENC et al. (2003) egy 1 m<sup>2</sup> kísérleti léptékű gyökérszónás műtárgyon vizsgálta az evapotranszpiráció mértékét. Az evapotranszpiráció általi vízveszteség 13-40%-a volt a hidraulikai terhelésnek. Az eredmények megmutatták, hogy az evapotranszpiráció hatására a tartózkodási idő megnő és csökken a diszperzió mértéke. Kutatók eredményei alapján a legmagasabb evapotranszpirációs érték körülbelül 12:00 és 13:00 óra között lehet (JACOBS et al. 2002, GALVEO et al. 2010).

BIALOWIEC et al. (2014) különböző evapotranszpirációs értékek mellett mérte a gyökérszónás telepek szennyezőanyag-eltávolító hatékonyságát, és arra a következtetésre jutott, hogy a magasabb evapotranszpiráció nagyobb szennyezőanyag-koncentrációt okozott. Egy másik tanulmányban, ahol az evapotranszpiráció és a szennyeződéseeltávolítási hatékonyság közötti kapcsolatot vizsgálták, az eredmények azt mutatták, hogy a megnövekedett evapotranszpiráció negatívan befolyásolta a kiáramló víz biokémiai oxigénigény- (BOI<sub>5</sub>) és a kémiai oxigénigény- (KOI) koncentrációkat (TUTTOLOMONDO et al. 2016). Az evapotranszpiráció miatt a gyökérszónás műtárgyakban erőteljes töményedés valószínű (KADLEC et al. 2000).

A hazai szakirodalom részletesen nem foglalkozott az evapotranszpiráció gyökérszónás műtárgyakra gyakorolt hatásával, és a nemzetközi szakirodalom is elég szórványos, illetve a legtöbb módszer és egyenlet a tényleges evapotranszpiráció értékének meghatározására nem alkalmas. Egyértelmű, kiforrott összefüggések nem ismertek az evapotranszpiráció mértékének meghatározására sem, erre vonatkozóan mindössze pár szakirodalom mutatott be különböző módon történő „kísérletet”.

A fenti szakirodalmi mérési eredményekből látható, hogy a klimatikus viszonyok, vagy a műtárgyon lévő növényzet, illetve az időjárás milyen különbözőségeket eredményez az egyes kutatók mérési eredményei között.



Az evapotranszspiráció műtárgyon belüli folyamatokra gyakorolt hatásainak irodalma elég szórványos, és kevés a konkrét mérésrel is alátámasztott publikáció. Jelen dolgozatban egy újfajta módszert mutatok be a transzspiráció meghatározására, mellyel a 3.4. és 4.1 fejezet foglalkozik. Ez a módszer segít pontosabb képet adni a transzspiráció gyökérszónás műtárgyak vízháztartására való hatásáról.

## 2.3. A konzervatív nyomjelzőanyag-mérések vizsgálatához szükséges elméleti és matematikai összefüggések bemutatása

### 2.3.1. 1 dimenziós konvektív-diszperzív transzportegyenlet, Gauss-eloszlás és Fick-féle eloszlás bemutatása

A leggyakrabban az 1 dimenziós konvektív-diszperzív transzportmodellt szokták alkalmazni a konzervatív nyomjelzőanyag-transzport mérési eredmények illesztésére. Az 1 dimenziós konvektív-diszperzív transzportegyenlet konzervatív anyagra vonatkozóan az alábbi alakban írható fel:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - \frac{q}{\varepsilon} \frac{\partial C}{\partial x} \quad (13)$$

Ahol  $D_x$  [m<sup>2</sup>/h]: az ún. hosszirányú diszperziós tényező (a diszperzió a továbbiakban a szemcsés szivárgási térre jellemző makrodiszperziót jelenti),  $q$  [l/h]: a fajlagos hidraulikai terhelés és  $\varepsilon$  a vizsgálati időpontra jellemző porozitás értéke. Gyökérszónás műtárgyak transzportmodellezésére ezt az egyenletet használják a leggyakrabban. Az egyenlet analitikus megoldása pillanatnyi koncentrációimpulzus bevezetése és zárt reaktor feltételezése esetén (KOVÁCS et al. 2002):

$$C(x, t) = \frac{M}{2 \cdot w \cdot m \cdot \varepsilon_0 \cdot \sqrt{\pi \cdot D_x \cdot t}} \cdot e^{-\frac{(x-vt)^2}{4D_x t}} \quad (14)$$

A fenti egyenlet  $C(x,t)$  – x síknegyeden Gauss-eloszlású, melynek várható értéke:

$$l = v_x \cdot \bar{t} \quad (15)$$

és szórása:

$$\sigma = \sqrt{2 \cdot D_x \cdot \bar{t}} \quad (16)$$

Ahol  $M$  [kg]: a bevezetett nyomjelző anyag tömege,  $w$  [m]: a szivárgási zóna szélessége,  $m$  [m]: a szivárgási zóna magassága,  $\varepsilon_0$  [-]: a töltet porozitása,  $\bar{t}$  [h]: az eltelt idő,  $x$  [m]: a szivárgási

iránnyal párhuzamos távolsága,  $\mathbf{v}_x$  [m/h]: a pórusbeli szivárgási sebesség. A 14. egyenletben bemutatott eloszlás egy ún. kétparaméteres ( $\mathbf{D}_x, \mathbf{v}_x$ ) Gauss-eloszlást ad.

Általában a konzervatív nyomjelzőanyag-mérések során egy adott  $X=L$  mérési helyen végezzük a mérést, így a mért válaszfüggvényt nem  $C(x,t)-x$ , hanem  $C(x,t)-t$  síknegyedben kell vizsgálnunk. E síknegyedben a fenti analitikus megoldás már nem Gauss-eloszlást ad, mivel itt már egy aszimmetrikus haranggörbét kapunk.

Ezért terjedt el a nemzetközi transzportfolyamatokat tagláló szakirodalomban széles körben az ún. Fick-féle eloszlás. Ez nem más, mint a fentiekben bemutatott analitikus megoldás  $C(x,t)-t$  síknegyedben értelmezett sűrűségfüggvénye. A Fick-féle eloszlás sűrűségfüggvényét az alábbi összefüggés adja meg (GOVINDARAJU és DAS 2007):

$$c(t, x = L) = \mu_0 \cdot \frac{L}{2 \cdot \sqrt{\pi \cdot D_x \cdot t^3}} e^{-\frac{(L - v_x \cdot t)^2}{4 D_x t}} \quad (17)$$

Ahol  $\mu_0$  az illesztett vagy mért  $C-t$  sík negyedben értelmezett válaszfüggvény 0. momentuma:

$$\mu_0 = \int_0^\infty c(t) dt \approx \sum C_i \cdot \Delta t_i \quad (18)$$

A Fick-féle eloszlás várható értéke:

$$\bar{t} = \frac{L}{v_x} \quad (19)$$

Variációjára (szórásnégyzete):

$$\sigma^2 = \frac{2 D_x L}{v_x^3} \quad (20)$$

A jelentősen frakcionált, diverz szivárgási rendszerekre jellemző, hogy a pórusok egy része nem vesz részt közvetlenül az áramlási rendszerben. Ezek holtterszerűen viselkednek. Ez jóval lassúbb keveredési folyamatokat eredményez, mint a fő áramban kialakuló diszperzió okozta elkeveredés. Ez a jelenség azt eredményezi, hogy a holtterszerűen viselkedő kisebb pórusokba bekerülő nyomjelző anyag jóval lassabban mosódik ki, ami a nyomjelző anyag impulzusra adott válaszfüggvény hosszú, farokszerű elnyúlását okozza. Ennek jellemzésére a '70-es évek végén bevezették az ún. késleltetési tényezőt, mellyel az előzőekben már bemutatott 1 dimenziós konvektív-diszperzív transzportegyenletet az alábbiak szerint módosították (GOEBES és YOUNGER, 2004):

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{D_x}{R} \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - \frac{q}{\epsilon \cdot R} \frac{\partial C}{\partial x} \quad (21)$$

Ahol  $\mathbf{R}$  [-] az ún. látszólagos késleltetési tényező.

Amennyiben  $\mathbf{R}$  konstans, akkor az analitikus megoldás az alábbiak szerint alakul:

$$C(x, t) = \frac{M}{2 \cdot w \cdot m \cdot n \cdot \sqrt{\frac{\pi \cdot D_x \cdot t}{R}}} \cdot e^{-\frac{(x-vt)^2}{\frac{4D_x t}{R}}} \quad (22)$$

Ez a megoldás is kétparaméteres Gauss-eloszlás, mert az  $\mathbf{R}$  paraméter külön paraméterként történő értelmezése már nem Gauss-eloszlást adna. Csak úgy maradhat Gauss-eloszlású a függvény, ha az illesztési változók  $v_x$  és  $D_x/R$  lesznek. Amennyiben a folyamatot C-t síknegyeden vizsgáljuk, akkor a késleltetési tényező a Fick-féle eloszlás összefüggésébe egyszerűen átvezethető, az alábbiak szerint:

$$c(t, x = L) = \frac{L}{2 \cdot \sqrt{\frac{\pi \cdot D_x \cdot t^3}{R}}} e^{-\frac{(L-v_x t)^2}{\frac{4D_x t}{R}}} \quad (23)$$

Tulajdonképpen egy  $\mathbf{R}$  késleltetési tényezővel kiegészített kétparaméteres Fick-féle eloszlást kaptunk, melynek várható értéke:

$$\bar{t} = \frac{L}{v_x} \quad (24)$$

Variáciája (szórásnégyzete):

$$\sigma^2 = \frac{2D_x L}{R \cdot v_x^3} \quad (25)$$

Itt érdemes megemlíteni, hogy a szórásnégyzet képletébe egy plusz ismeretlen kerül  $\mathbf{R}$  által, mely jóval nehezebbé teszi a diszperziós tényező számszerűsítését.

A kétparaméteres Inverz Gauss-eloszlás sűrűségfüggvénye az alábbi:

$$g(t) = \frac{1}{2} \sqrt{2} \sqrt{\frac{a}{\pi \cdot t^3}} e^{-\frac{1}{2} \frac{a(t-b)^2}{t \cdot b^2}} \quad (26)$$

Ahol  $\mathbf{a}$  és  $\mathbf{b}$  az eloszlás paraméterei. A bemutatott Fick-féle eloszlás tulajdonképpen Inverz Gauss-eloszlás, melyet igazol az alábbi levezetés.

A Fick-féle eloszlás az alábbi alakra alakítható át:

$$c(t, x = L) = \frac{L}{2 \cdot \sqrt{\frac{\pi \cdot D_x \cdot t^3}{R}}} e^{-\frac{(L-v_x t)^2}{\frac{4D_x t}{R}}} = \frac{L}{2} \sqrt{\frac{R}{D_x \cdot \pi \cdot t^3}} \cdot e^{-\frac{1}{4} \frac{R \cdot (t - \frac{L}{v_x})^2 \cdot v_x^2}{D_x t}} = \frac{1}{2} \sqrt{2} \sqrt{\frac{R \cdot L^2}{2 \cdot D_x \cdot \pi \cdot t^3}} \cdot e^{-\frac{1}{4} \frac{R \cdot (t - \frac{L}{v_x})^2}{\frac{1}{2} D_x t}} \quad (27)$$

A fenti átalakítás után belátható a kétféle eloszlás azonossága, amennyiben felállítjuk az alábbi paraméteregyenlőségeket:

$$\mathbf{a} = \frac{R \cdot L^2}{2 \cdot D_x} \quad (28), \quad \mathbf{b} = \frac{L}{v_x} \quad (29)$$

Így látható, hogy a kétparaméteres késleltetési tényezős Fick-féle eloszlás kétparaméteres Inverz Gauss-eloszlásnak felel meg.

### 2.3.2. Sorba kapcsolt elkevert reaktormodell és Gamma-eloszlás kapcsolata

A másik gyakran alkalmazott modell a sorba kapcsolt elkevert reaktor-kaszád modell. A modell alapelve szerint kapcsoljunk sorba tökéletesen kevert reaktorokat stacioner áramlás mellett. Mindegyik reaktornak egyenlő térfogatúnak ( $V_i$ ) kell lennie, és az azokat összekötő csővezetékek térfogata legyen elhanyagolhatóan kicsi. A tökéletes elkeveredés következtében a beinjektálást követő időpillanatban vezessük be az első reaktorra jellemző koncentrációt (DITTRICH 2008):

$$c_{1,0} = \frac{M_0}{V_1} \quad (30)$$

Amennyiben  $n$  db sorba kapcsolt reaktorunk van, akkor a koncentrációimpulzusra adott válaszfüggvény az alábbi (SZOLCSÁNYI 1972, LEVENSPIEL 1972):

$$c(t)_n = \frac{c_{1,0}}{(n-1)!} \left(\frac{t}{\bar{t}}\right)^{n-1} e^{-\frac{t}{\bar{t}}} \quad (31)$$

A sorba kapcsolt egyenlő térfogatú reaktorok együttes térfogata:

$$\sum V = n \cdot V_i \quad (32)$$

Ilyen elrendezésnél a teljes reaktor-kaszád átlagos tartózkodási ideje egyenlő a kevert reaktorok tartózkodási idejének  $n$ -szeresével:

$$\overline{t_{\Sigma V}} = \bar{t} \cdot n \quad (33)$$

Fontos kérdés, hogy a sorba kapcsolt elkevert reaktorkaszád-modell koncentrációimpulzusra adott válaszfüggvénye milyen eloszlású. MARTIN (2000) publikációjában egyértelműen rögzítette, hogy ez a modell Gamma-eloszlású (bizonyos esetekben Erlang-eloszlású). A Gamma-eloszlás sűrűségfüggvénye:

$$f(t) = \frac{\left(\frac{t}{a}\right)^{b-1} e^{-\frac{t}{a}}}{a \cdot \Gamma(b)} \quad (34)$$

A (34) egyenlet akkor lesz Gamma-eloszlású, ha  $n \neq 1$ .

DITTRICH (2016) a gyökérvázolás műtárgy elfolyópontján vett konzervatív nyomjelzőanyag-mérési eredményeire illesztette a Gamma-eloszlást, mivel az eredmények rossz illeszkedést mutattak, ezért a belső pontok esetében ezzel az eloszlással nem foglalkoztam. Egyes szerzők ugyan elérték jó illeszkedéseket ezzel a modellel, de irreális paraméterezés mellett (MENA et al. 2011, LAFFAT et al. 2015). Így ezt a modellt nem tartom alkalmasnak a továbbfejlesztésre. A modell másik hátránya, hogy közvetlen áramlástan paraméterek (sebesség, diszperzió) nem nyerhetők ki belőle.

## **2.4. A szakirodalomban publikált konzervatív nyomjelzőanyagtranszport- vizsgálatok hosszanti átfolyású gyökérszónás műtárgyakban**

A gyökérszónás műtárgyakban az ideális és a valós áramlási folyamatok között nagy különbségek vannak, melyek okai a következők: időjárási körülmények, mint például a csapadék mennyisége (KADLEC 1997, KADLEC 1999, RASH és LIEHR 1999), az evapotranszpiráció (GALVAÓ et al. 2010, BEEBE et al. 2014), illetve a hóolvadás, melyek nagy hatással lehetnek a műtárgyak áramlási folyamataira. A másik, ami hatással lehet ezekre a folyamatokra, az a műtárgy kialakítása: a porozitásbeli és a szivárgáshidraulikai különbségek a szűrőközegben mind térben, mind időben (DITTRICH et al. 2015a, LICCIARDELLO et al. 2019), az aktívtöltet-rész (GOEBES és YOUNGER 2004) és a befolyó-kifolyó pozíciói (ALCOCER et al. 2012, WANG et al. 2014, OKHRAVI et al. 2017). További fontos hatás az eltömődési folyamatokból adódik, amiket a szilárd szemcsék kiülepedése (CARBALLEIRA et al. 2016, LANCHEROS et al. 2017, LIU et al. 2019, WANG et al. 2020), a biofilmfejlődés (BUTTON et al. 2015, AIELLO et al. 2016, VYMAZAL et al. 2018, DE MATOS et al. 2018), illetve a gyökérszóna sűrűsége és kiterjedése (DE PAOLI és VON SPERLING 2013, TANG et al. 2017) okozhatnak.

A felsorolt okok miatt a gyökérszónás műtárgyak áramlási modellezése igen komoly problémát jelent a kutatóknak. Ezekben a műtárgyakban a biofilm-aktivitás és a gyökérszóna sűrűsége nagyon intenzív, és folyamatosan változik (növekszik és elhal) (SAMSÓ et al. 2013, RAJABZADEH et al. 2015). Ezek a folyamatok jelentősen befolyásolják a mikropórusrendszert, az áteresztőképességet és az eltömődési folyamatokat (TANNER és SUKIAS 1995). Ezeknek a folyamatoknak gyakran még a becslése is nagy problémát jelent, nemhogy a modellezése.

A konzervatív nyomjelzőanyag-vizsgálatok nagyon elterjedtek ismeretlen vagy részben ismert működésű reaktorok áramlási viszonyainak vizsgálatára (LEVENSPIEL 1972). A módszer alapelve az, hogy a reaktor bevezetési szelvényébe konzervatív nyomjelző anyagot juttatunk, majd mérjük a reaktor belső pontjaiban és kifolyási szelvényében a nyomjelzőanyag-koncentráció időbeni alakulását. A vizsgálatok célja elsősorban a reaktorban zajló áramlási rendszer mélyebb megismerése, illetve a tényleges tartózkodási idő és a diszperzió mértékének számszerűsítése, mely a tisztítási mechanizmusokat leíró modellek egy-egy fontos paramétere (NETTER 1994, SULIMAN et al. 2006, BARBAGALLO et al. 2011, WANG et al. 2014).

NETTER (1994) két hosszanti átfolyású gyökérszónás műtárgyon végzett konzervatív nyomjelzőanyag-vizsgálatot, melyeket különböző homogén keverékű közegekkel, kavicsos

homokkal és homokos kavicsal töltötték meg. A mőtárgyak belsejében és az elfolyópontnál is történt mintavétel. Arra a következtetésre jutott, hogy az áramlás mértéke a rendszer belsejében nagyon eltérő volt.

Ennek fő oka a kedvezőtlen kialakítású hosszúság és szélesség aránya lehet. Ebben a rendszerben – a szerző szerint – főleg dugószerű áramlás volt, kis hosszanti diszperzióval. A nyomjelzőanyagteszt eredményei megmutatták a fő áramlási utakat. Elsősorban a mőtárgy két oldala volt a preferált áramlás a befolyónál; az elfolyónál a fő áramlás a mőtárgy közepén volt. Az eredmények azt mutatták, hogy mindkét típusú szűrőközegben heterogén áramlás alakult ki.

MUNOZ et al. (2006) négy nyomjelzőanyag-vizsgálatot végzett. A nyomjelző anyag bromid volt. Négy vízszintes átfolyású gyökérszónás mőtárgyat vizsgált. Eredményei azt mutatták, hogy az elméleti tartózkodási idő minden vizsgálatban magasabb volt, mint az átlagos tartózkodási idő.

TANG et al. (2017) tanulmányozta egy horizontális felszín alatti átfolyású gyökérszónás mőtárgy áramlási folyamatait. Nyomjelző anyagot használtak a transzportfolyamatok nyomon követésére, a nyomjelzőanyag bromid-ion volt. Négy gyökérszónás mőtárgyat vizsgáltak. A porozitás 41 és 44% érték között volt. Az eredmények azt mutatták, hogy az elméleti tartózkodási idő nagyobb volt, mint az átlagos tartózkodási idő.

BIRKIGT et al. (2018) vizsgálták az áramlási és transzportfolyamatokat egy kísérleti léptékű, hosszanti felszín alatti átfolyású gyökérszónás mőtárgyon nyomjelzőanyag segítségével. A nyomjelző anyagok bromid, deutérium-oxid és uranin voltak. Egy mintavételi pont volt a mőtárgyban, de vertikálisan három mintavételi pontot jelöltek ki. Az eredmények rávilágítottak arra, hogy az áramlás 65-70%-ban a fenéken történt, míg a középső részben 14-18%, a felső részben 16-17% zajlott. A tényleges tartózkodási idő kisebb volt, mint az elméleti.

RICHTER et al. (2003) áramlástan vizsgálatokat végzett egy hosszanti átfolyású gyökérszónás mőtárgyban. Vizsgálatai rámutattak arra, hogy a tényleges tartózkodási idő magasabb, mint az átlagos tartózkodási idő, azonban ennek okát nem tudták megmondani.

BONNER et al. (2017) nyomjelzőanyag-vizsgálatokat végeztek egy laboratóriumi léptékű horizontális felszín alatti átfolyású gyökérszónás mőtárgyon, vörös fluoreszcens festéket használtak nyomjelző anyagként. 13 mintavételi pont volt a mőtárgyban. Az eredmények azt mutatták, hogy a tényleges tartózkodási idő nagyobb, mint az elméleti, továbbá, hogy a rendszerben némi

visszakeveredés volt. DITTRICH és KLINCSIK (2015a) hasonló következtetésre jutott a saját konzervatív nyomjelzőanyagtranszport-modellezési eredményeiből.

LIU et al. (2018) a szilárd anyagok akkumulációját és a gyökérnövekedés hatását vizsgálták az áramlási folyamatokra a gyökérszónás műtárgyakban. Három kísérleti léptékű műtárgyban végezték a vizsgálatokat. A nyomjelző anyag fluoreszcein-nátrium volt. A mintákat két ponton vették, mindegyik ponton három mélységből. Az ő eredményeik is azt támasztják alá, hogy a felső rétegekben lévő gyökérszóna miatt a nagyobb arányú áramlási útvonal az alsó rétegben van. A diszperziós érték 0,09-0,16 között mozgott, melyet sorba kapcsolt reaktormodellből számolt.

BREEN és CHICK (1995) egy gyökérszónás műtárgy belső pontjaiban végeztek konzervatív nyomjelzőanyagtranszport-méréseket. Minden pontban külön alsó és felső mintát is vettek. A szerzők NETTER-hez (1994) hasonlóan egyenlőtlen áramlási viszonyokat tártak fel, melyet hidraulikai rövidzárlatok és holtterek kialakulásával magyaráztak. Eredményeik szerint a felső és az alsó réteg áramlási szétválását leginkább az okozza, hogy a teljes gyökérszóna biomasszájának a 70%-ával vannak kitöltve a felső rétegek pórusai, melynek hatására az alsóbb töltetrétegekben intenzívebb áramlás alakul ki.

WANG et al. (2011) szerint a ma két legjobban elterjedt modellező rendszer a gyökérszónás rendszerek leírására a Hydrus-2D és a FITOVERT, de mindegyikük működése hagy kívánnivalókat maga után. Jelenleg a Hydrus-2D szoftver a leginkább elterjedőben lévő modell, mely függőleges és vízszintes átfolyású rendszerek modellezésére is alkalmas (TOSCANO et al. 2009). A modell sorba kapcsolt reaktorkaszád-modellt használ a transzportfolyamatok leírására (LANGERGRABER et al. 2011), míg ugyanazon szerző 2009-ben még normál advektív-diszperzív transzportmodellt publikált (LANGERGRABER et al. 2009). Mindkét cikkben (LANGERGRABER et al. 2009, TOSCANO et al. 2009) a közzétett Hydrus-2D-t tesztelő eredményekből jól látható, hogy a transzportmodul illesztési pontossága hagy kívánnivalókat maga után.

BATCHELOR és LOOTS (1996) nyomjelzőanyag-vizsgálataira – melyet NaCl-dal végeztek – próbáltak transzportmodellt illeszteni. Sem a teljesen elkevert reaktormodell, sem a konvektív-diszperzív reaktormodell nem illeszkedett jól a mérési eredményeikre. Az eredmények bár erősen eltértek mind a két modell mért értékeitől, a konvektív-diszperzív modellétől kevésbé.

YUAN et al. (2020) tanulmányában összegezte az összes jelenleg használatos szoftvert és modellt, és arra a következtetésre jutott, hogy egyik sem alkalmazható a gyökérezónás mütárgyak pontos modellezésére.

A fenti szakirodalmi összefoglalóból megállapítható, hogy a gyökérezónás mütárgyakban zajló áramlási folyamatokat nehéz pontosan modellezni. A mütárgy alakja, a mütárgyban levő növények gyökérszete, illetve a kialakuló biofilm jelentősen befolyásolja az áramlási folyamatokat. Több kutató is megállapította, hogy a fő áramlás a mütárgy alján alakul ki elsősorban a gyökérszet felső rétegekben való elhelyezkedése miatt (BREEN és CHICK 1995, BIRKIGT et al. 2018, LIU et al. 2018). Az olyan gyökérezónás mütárgyakban, ahol a gyökérszet kifejlett, illetve a biofilm-aktivitás jelentős, gyakori a heterogén áramlási zónák kialakulása (NETTER 1994, BREEN és CHICK 1995) A heterogén áramlás és a holtterek miatt lehetséges, hogy az átlagos tartózkodási idő nagyobb, mint az elméleti, de ezt az állítást csak kevés kutató eredményei bizonyítják (DITTRICH és KLINCSIK 2015a, BONNER et al. 2017), és ezt támasztják alá a 4.4. fejezet eredményei. Ugyanakkor ez ellentét a legtöbb szakirodalmi mérési eredménnyel (MUNOZ et al. 2006, TANG et al. 2017, BIRKIGT et al. 2018). Mint a fentiekből látható, nincs megfelelő gyökérezónás mütárgyak transzportfolyamatait leíró modell. Ebben a disszertációban egy olyan transzportmodellt mutatok be, mely a jelenleg használatos modelleknél pontosabban írja le a mütárgyak belsejében lezajló transzportfolyamatokat. A modellt a 3.10. fejezetben, az eredményeket pedig a 4.4. fejezetben ismertetem.



### 3. Anyag és módszer

#### 3.1. A hódmezővásárhelyi gyökérszénázás szennyvíztisztító kutatótelep rövid bemutatása

A Katholieke Hogeschool Kempen, Geel (Belgium) irányításával 2003-ban kezdődött el egy kooperáció a Szegedi Tudományegyetem hódmezővásárhelyi Mezőgazdasági Karával, melyet „TOKAI-projekt”-nek neveztek el. Az együttműködés keretében egy természetközeli szennyvíztisztító telep épült kísérleti berendezésként, tejházi szennyvíz tisztítására.

A telep napi körülbelül 1-1,5 m<sup>3</sup> tejházi szennyvizet tisztított meg, melyet a közeli fejtől szállítottak a gyökérszénázás tisztító oldómedencéjébe. A telep egy oldómedencéből, egy szennyvízátelőlől, egy függőleges átfolyású gyökérszénázás műtárgyból, egy vízszintes átfolyású gyökérszénázás műtárgyból és egy nyárfás szikkasztómezől áll. A telepet és egyes műtárgyait bővebben az **1. mellékletben** mutatom be.

#### 3.2. A gyökérszénázás mintatelepen található mérőrendszer rövid bemutatása

A kutatás céljának megfelelően a mérési program is 3 fő részre bontható:

- kiindulási állapotfelvétel,
- vízminőségmérések,
- áramlástan és hidrológiai mérések.

A vízminőségi mérések nem képezik e disszertáció témáját, így azok bemutatásától eltekintek. Az áramlástan méréseit két fő részre osztva alább mutatom be.

Az alkalmanként, manuálisan végzett mérések:

- töltet víztartalmának mérése,
- növényzet állapotának mérése:
  - növényzet magassága,
  - gyökérszénázás mélysége,
- töltetporozitás mérése,

- csapadékmennyiség mérése,
- konzervatív nyomjelzőanyag-vizsgálatok.

Automatikus mérőrendszerrel végzett folyamatos mérések:

- szivattyú ki-bekapcsolás regisztrálása,
- vízhozammérés 3 pontban,
- vízszintmérés 5 pontban,
- hőmérséklet- és páratartalom-mérés.

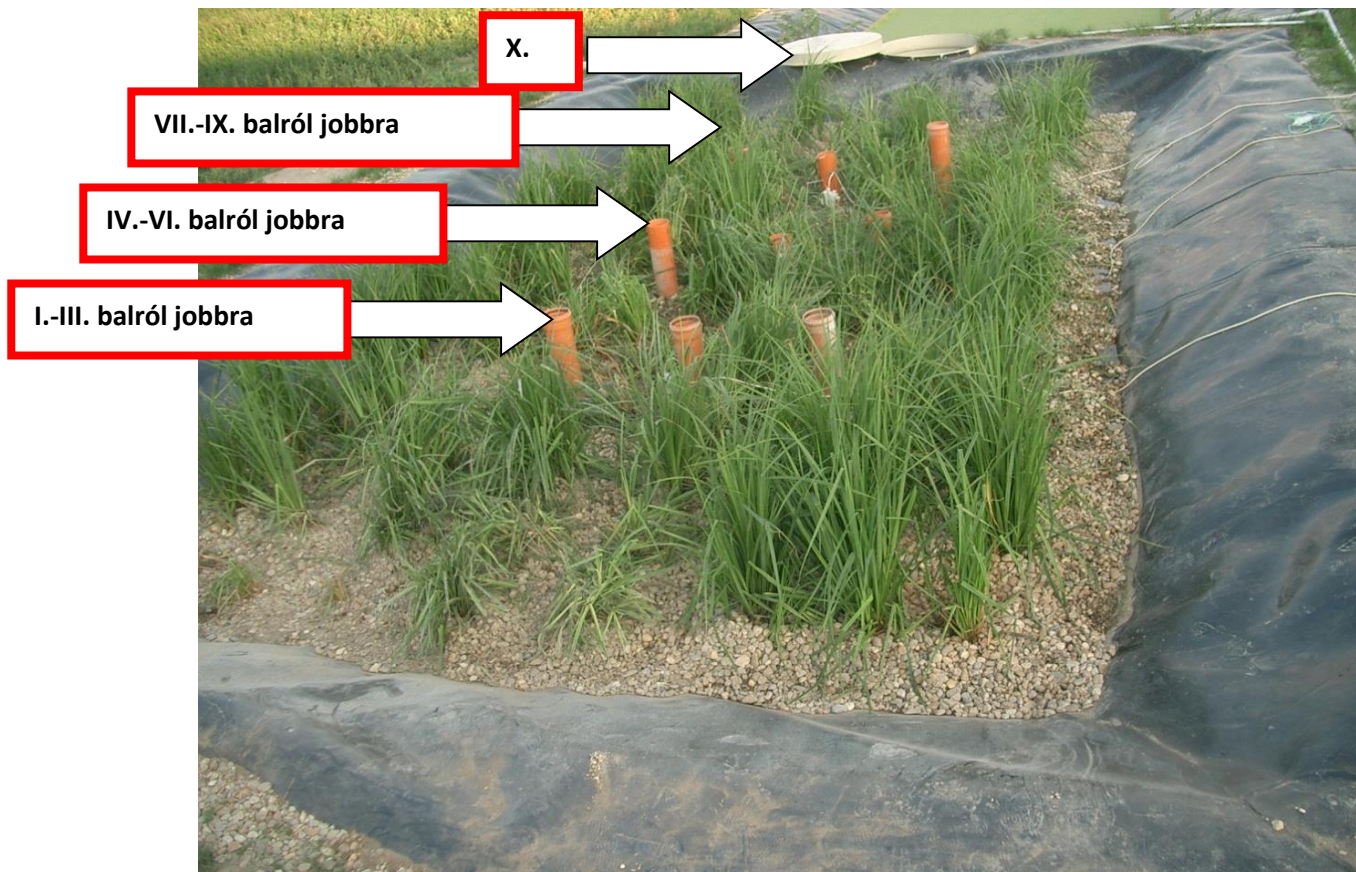
A telep üzemeltetése 2007.09.01-jén kezdődött meg. A mérési program és a telep 2020-ig működött. A mérőrendszer és a mérési program részletes bemutatását a **2. melléklet** tartalmazza.

### **3.3. Konzervatív nyomjelzőanyag-mérések kivitelezése a hódmezővásárhelyi gyökérvénás mintatelep hosszanti átfolyású műtárgyában**

DITTRICH és KLINCSIK (2015a, 2015b) a mérésekhez SIGMA ALDRICH 000010-62480-500G-F katalógusszámú LiCl konzervatív nyomjelző anyagot használtak. A konzervatív nyomjelző anyag kiválasztását szakirodalmi értékelések alapján végezték el, a nemzetközi szakirodalomban fellelhető publikációkban két esetben NaBr-ot (NETTER 1994, TANNER 1995), egy esetben tríciumot (NETTER 1994), egy esetben egy speciális fluoreszcens anyagot (BREEN és CHICK 1995), és négy esetben LiCl-ot (SCHIERUP et al. 1990, NETTER 1994, KING et al. 1997, RASH és LIEHR 1999) használtak a szerzők.

A műtárgyban történő mérés előtt 50 mg LiCl-ot oldottak fel 200 ml vízben. Ezután a minta adott időpontban impulzusszerűen került beinjektálásra a hosszanti átfolyású műtárgy bevezetőcsövébe az 1-es Parschall-csatorna végszelvényénél. A mérés időtartama alatt a konstans vízhozam folyamatosan biztosítva volt, és a méréseket csapadékmentes időben végezték. A gyökérvénás műtárgyba 3 sorban, soronként 3 db perforált függőleges cső került beépítésre, melyekből a vízmintákat vették. Ez mellett a műtárgy kifolyócsövében is mintavételre került sor. Így tíz mintavételi pontból származnak a minták, melyek az 5. ábrán láthatóak I-X-ig római számokkal jelölve.

A minták a vízmélység felének alsó feléből (továbbiakban alsó minta), illetve a vízmélység felének felső feléből (továbbiakban felső minta) kerültek levételre. A mintavételi helyeken a mintavételi sűrűséget alkalomról alkalomra fokozatosan finomították, ezért ötperces időköztől a kettő órás időközre változik a mintavételi gyakoriság pontonként, igazodva a koncentrációidő-görbe aktuális szakaszának változékonyságához.



**5. ábra: A kialakított mintavételi helyek a hosszanti átfolyású műtárgyban (DITTRICH 2016)**

A minták 200 ml-es zárható műanyag edényekben kerültek begyűjtésre, ráírva a mintavétel helyét, időpontját és a minta típusát. A minták salétromsavval lettek tartósítva, majd a Dél-Dunántúli Környezetvédelmi, Természetvédelmi és Vízügyi Felügyelőség vízminőségi laboratóriumába szállították őket. A minták Li-ion koncentrációját atomabszorpciós spektrofotométerrel mérték meg.

Az alkáli elemek mérésére általánosan alkalmazott mérési módszer a lángfotometria. A Li mérését emissziós üzemmódban UNICAM Solaar M atomabszorpciós készülékkel lángban (acetilén-levegő) végezték.

A mérőgörbe felvételéhez  $1 \text{ g/dm}^3$  Li törzsoldatból  $50 \text{ cm}^3$ -es mérőlombikban 0,0-0,5-1,0-2,5-5,0-7,5  $\text{mg/dm}^3$  koncentrációjú oldatokat készítettek. Az ionizáció visszaszorításához minden lombikba  $5 \text{ cm}^3$  50 g/l-es KCl oldatot pipettáztak. Az oldat tartósítására  $0,5 \text{ cm}^3$   $\text{HNO}_3$ -at használtak ugyanúgy, mint a mintavételnél. A mérés során keresztbe fordított égőfejállást alkalmaztak. A tartósított mintából  $4,5 \text{ cm}^3$ -t, az  $50 \text{ g/dm}^3$  KCl oldatból  $0,5 \text{ cm}^3$ -t mértek be a mintatartó edénybe, és jól összerázták. Az eredmény értékelésénél figyelembe vették az 1,111-szeres hígulást.

Négy alkalommal történt konzervatív nyomjelzőanyag-mérés. Egy-egy mérés 12-16 órán át tartott, és pontonként 10-20 db minta került levételre. A négy mérési alkalom több mint 500 db mintavételt és annak laborálását jelentette. Jelen disszertáció az I.-IX. mérési pontokon vett mérési eredményekkel foglalkozik, mert ezek részletes és tudományos mélységű kiértékelésére kutatói munkám kezdetéig nem került sor. A kutatócsoport (DITTRICH és KLINCSIK 2015a, 2015b) munkám kezdetéig csak a X. számú mérési pontra illeszthető optimális modell kidolgozását végezte el. Az egyes időpontokhoz tartozó mérések eredményeit S/1, S/2, S/3 és S/4 hivatkozási számmal láttam el a jobb érthetőség és áttekinthetőség miatt.

### **3.4. Evapotranszspirációs és transzspirációs mérésekhez alkalmazott módszerek, műszerek**

#### **3.4.1. Evapotranszspirációs mérésekhez használt gázanalizátor rövid bemutatása**

A laboratóriumi transzspirációs méréseket az LCpro+ IRGA (ADC Bioscientific, United Kingdom) gázanalizátorral végeztem. A készülék méri és szabályozza a levélkamrán belüli környezetet, kiszámolja a levél fotoszintetikus aktivitását. A berendezés rendelkezik jelszabályozóval, levegőszabályozóval, mikroprocesszor-irányítással, PCMCIA (PC) kártya adattárolóval és 5 gombos billentyűzettel ellátott fő konzollal, emellett egy, a konzolhoz vezetékkel csatlakozó levélkamrával. A kamra fel van szerelve egy hőmérsékletszabályozó és egy eltávolítható fényegységgel.

A fő konzol kontrollálható  $\text{CO}_2$ - és  $\text{H}_2\text{O}$ -koncentrációjú levegőt juttat a kamrába, mérhető értékkel. Mind a két paraméter lemérése után a levegő a levél mindkét felszínére áramlik. A kamrát elhagyó kiáramló levegőt analizálja, és leméri az (általában csökkent)  $\text{CO}_2$ - és (megnövekedett)  $\text{H}_2\text{O}$ -tartalmat.

A gázkoncentrációban és a levegő áramlásában bekövetkező változások alapján az asszimilációs és transzspirációs rátát a készülék 20 másodpercenként kiszámolja. A kamrában egy ventilátor biztosítja a levelet körülvevő levegő keverését. A CO<sub>2</sub> mérését az infravörös gázanalizátor segítségével (IRGA) lehet elvégezni. A H<sub>2</sub>O mérése két nagy érzékenységű páratartalom-szenzor segítségével történik. Ezek mellett a rendszer méri a levél hőmérsékletét, a kamrában levő levegő hőmérsékletét, a PAR-t (fotoszintetikusan aktív radiáció) és a légnyomást. A készülék kiszámítja a levelet érő PAR-t és a levél sugárzásienergia-egyensúlyát.

A mért és számított adatok egy LCD kijelzőn jelennek meg. Az adatok első két oldala 1-es típusú PCMCIA-kártyán rögzíthető. A rögzített log-fájl megjeleníthető képernyőn, soros kapcsolaton keresztül átküldhető PC-re vagy nyomtatóra, vagy közvetlenül felvihető egy PC-kártya foglalattal rendelkező PC-re.

A méréseket „nyílt rendszer”-ben végzi a készülék, ami azt jelenti, hogy a friss gáz (levegő) folyamatosan keresztüláramlik a levélkamrán (PLC-Plant Leaf Chamber). A méréseket a beáramló gáz (referenciaszintek) állapotának és a levélminta elhagyása után kiáramló gáz állapotának összevetése alapján végzi a készülék. Ez az elrendezés tolerálja a kismértékű, kifelé irányuló gázszivárgást és a gázáramban alkalmazott anyagok abszorpcióját.

A rendszert levegővel ellátó levegőáramoltató egység tulajdonképpen egy akkumulátoros pumpa. Itt található a levegő páramentesítésére szolgáló szilikagéles tubus. A levélkamrából érkező levegő az analizátor analiziscellájába, a levegőáramoltatótól közvetlenül érkező referenciacellába jut. Az analizátor a két külön úton beérkező levegő CO<sub>2</sub>-koncentráció különbségét állapítja meg az infravörös fényelnyelés alapján. A levegőáramoltató egységből érkező állandó sebességű légköri levegő a levélkamrába jut, melyben a növényi működés hatására gázösszetétele megváltozik.

### **3.4.2. A gyökérszónás műtárgyban található sás bemutatása**

A növény majdnem egész Európában elterjedt (kivéve északon és részben a Mediterráneumban). Magyarországon őshonos (<https://www.iucnredlist.org/species/164259/5801418>). Természetes körülmények között magas sásos társulásokban zombékalkotó, de elszórtan nádasok szárazföld felőli szegélyén, valamint lápréteken, fűz- és nyírlápokban, égeresekben is előfordul. Eurázsiai mérsékelt flóraelemként széles ökológiai toleranciát mutat a fény, valamint a talaj nedvesség-, nitrogén- és sótartalma szempontjából. Vízben állva 20-100 cm-es zombékokat képez. A szár 40-120 cm, mereven felálló, élesen háromélű, és különösen felül igen érdes (<https://www.brc.ac.uk/plantatlas>). A levéllemez 2-5 mm széles, szürkészöld, fonákján

fénytelenebb, mint a színén, száradáskor fonákja felé göngyölködik. Virágzata 4-6 hengeres, 2-6 cm hosszú, felálló füžérkékből áll. Hiposztomatikus növény, vagyis a levél alsó részén sztómás nyílások vannak a gázcseréhez (DEAN és ASHTON 2008). A sztómás nyílások általában megtalálhatók a lombos virághajtásokon is (személyes megfigyelés). A lecsapolt talajviszonyok – különösen a nyár legmelegebb időszakában – erősen csökkenthetik a sztómavezetés okozta transzspirációt (BUSCH és LÖSCH 1998).

### 3.4.3. Laboratóriumi mérésekhez használt mérési modell ismertetése

A modell műtárgyas mérések során a hódmezővásárhelyi gyökérzónás szennyvíztisztító mintatelepéről elhozott zombéksás (*Carex elata*) kb. 1m<sup>2</sup>-es kiterjedésű zombékjait vizsgáltam. A növény elhelyezését közvetlenül 'Florasca' kerti földkeverékben (4 db 42\*42\*40 tápkocka), ezen kívül pedig sóderágyban (90\*80\*100 cm műanyag konténer) valósítottam meg.

A növények teljes felületének méréséhez a rendszerszintű vízveszteség becsléséhez hordozható levélterület-mérőt használtam (AM-100-002, ADC Ltd., Egyesült Királyság).

### 3.4.4. Transzspiráció számítása

A transzspirációs rátát (**E**) az elemző körülbelül 20 másodpercenként kiszámította a két paraméter és korrekciós tényező (35. egyenlet) felhasználásával.

$$E = \Delta e_{us}/p \text{ (35)}$$

ahol  $\Delta e$ : a hígítással korrigált különbség a vízgőz-koncentrációban (mBar); **us**: a levélkamrába jutó levegő tömegárama a levélfelület négyzetméterére (mol s<sup>-1</sup>m<sup>-2</sup>); **p**: az aktuális légköri légnyomás (mBar).

Az elemzéshez sértetlen, érett (nem túl fiatal vagy öreg), fotoszintetikus pigmentekben gazdag leveleket választottam ki. A mérések előtt mintavételi csíkkal jelöltem őket. A műszer és a mérőrendszer felállítása után két vizsgálati egység két levelét párhuzamosan helyeztem el a levélkamrában.

A levéllemeznek – a mérési pontosság növelése érdekében – azt a részét választottam ki, amelynek megfelelően széles asszimilálószöve van, és gondoskodtam arról, hogy a rendelkezésre álló levélkamra területe (5,8 cm<sup>2</sup>) megteljen.

A kiválasztott levélpárok segítségével a gázcsere három paraméterét (fény, hőmérséklet és páratartalom) mértem standard skálák és állandó CO<sub>2</sub>-szint alkalmazásával.

A fényválaszokat 0 és 1566  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  között rögzítettem állandó CO<sub>2</sub> (370 ppm), hőmérséklet (20 ° C, 25 ° C, 30 ° C) és páratartalom (1-19 mBar, 3,6-62,5% relatív levegő-páratartalom) értékek mellett.

A hőmérsékletválaszokat 17,5-40,0°C hőmérsékleten, állandó besugárzás (1218  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), CO<sub>2</sub> (370 ppm) és páratartalom (1-19 mBar, 3,6-62,5% relatív levegő-páratartalom) mellett rögzítettem. A páratartalom-válaszokat 1-19 mBar nyomáson, állandó besugárzás (1218  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), CO<sub>2</sub> (370 ppm) és hőmérséklet (20°C, 25°C és 30°C) mellett rögzítettem. A kamrába a leveleket kettesével tettem be, hogy kitöltsék a kamra területét, és minden vizsgálatnál 5 párhuzamos mérést végeztem. Az adatsorokat a **3. melléklet** tartalmazza.

A fényválaszokat az évszakok reprezentatív átlaghőmérsékletén, azaz tavasszal  $20 \pm 0,5^\circ\text{C}$ , nyáron  $30 \pm 0,5^\circ\text{C}$  és ősszel  $25 \pm 0,5^\circ\text{C}$  hőmérsékleten rögzítettem. Az elsőrendű exponenciális görbéket kiszámítottam a besugárzás széles tartományára (0-1566  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), amelyek alacsonyabb és magasabb fényintenzitási szintet képviselnek.

A hőmérsékleti válaszokat és a környezeti feltételeket figyelembe véve rögzítettem az adatokat a műszer mérési tartományában. A páratartalom-válaszokat illetően a mérési tartomány az extrém alacsony értéktől a közepes értékig terjedt, ami nagyon száraz vagy közepesen száraz környezetet jelent a transzspirációhoz.

Mindkét előző esetben a skálák összehangolása és a vízveszteség-számítás következetessége érdekében harmadrendű polinomokat illesztettem a hőmérsékleti (17,5–42,0°C) és páratartalmi (3,2–60,2%) tartományokhoz, amelyek megfelelnek a környezeti paraméterek reprezentatív szintjének az adott évszakokban.

A teljes sötétség párolgási értékeit kihagytam a számításokból, mert ez nappal nem jellemző. Az illesztett függvényben polinomegyenleteket alkalmaztam az Origin 6.0 (Originlab, Northampton, USA) program segítségével a görbeillesztéshez és az adatok értelmezéséhez.

Levélfelület-mérőt használtam a kísérleti modell levélfelületének mérésére. A vízveszteség kiszámításához a következő egyenletet használtam:

$$V = \frac{E \cdot A \cdot t \cdot M_{\text{H}_2\text{O}}}{\rho}, \quad (36)$$

ahol  $V$ : a transzspiráció általi vízveszteség ( $m^3$ ),  $E$ : a transzspirációs ráta az adott időszakban ( $mol\ m^{-2}s^{-1}$ ),  $A$ : a levélfelület ( $m^2$ ),  $t$ : az adott vizsgált időszak időtartama (s),  $M_{H_2O}$ : a víz moláris tömege ( $g\ mol^{-1}$ ), és  $\rho$ : a víz sűrűsége ( $g\ m^{-3}$ ).

A vizsgálataim során minimum és maximum értékekkel dolgoztam, mivel nagyon kevés információ állt rendelkezésemre, így szerettem volna legalább intervallumokat megadni az évszakos növénypárologtatás mértékére a gyökérszónás műtárgyakban. A napfelkelte és napnyugta adatait a magyarországi Országos Meteorológiai Szolgálat honlapjáról (<http://www.met.hu/>) gyűjtöttem ki, így tudtam számolni a nappali órákkal.

### **3.4.5. Evapotranszspiráció számítása terepi mérési eredményekből**

Az evapotranszspiráció napon belüli vizsgálatához olyan napokat kerestem a rendelkezésemre álló monitoring rendszer adatbázisában, melyek a következő feltételeknek megfelelnek:

- nincs a műtárgyra szennyvízfeladás,
- nincs elfolyás a műtárgyból,
- jelentős a napi vízszintcsökkenés,
- csapadék nem terheli a műtárgyat.

Könnyen belátható, hogy ezeken a napokon az evapotranszspiráció mértéke csak a vízszintváltozás függvénye. A jelentős napi vízszintváltozás mértékére azért volt szükség, hogy a vízszintérzékelő nyomástávadók mérési pontatlanságai kiszűrhetőek legyenek az adatsorból. A vízszintészlelések 10 s-es időintervallumonként lettek regisztrálva a vizsgált napokon 0,1 mm ( $\pm$  mérési hiba) pontossággal.

Perforált csövek lettek elhelyezve a műtárgyban, melyekben a műtárgy közepén 3 kútszonda került elhelyezésre. A kiértékelési pontosság érdekében mindhárom adatsort felhasználtam, és vettem a 3 nyomástávadó által mért értékek átlagértékét. Az adatbázisban 2 év adatsorát néztem át (2011-2012). Az adatbázisban 16 napot találtam, amely megfelel a peremfeltételeknek.

### **3.5. Az illesztésekhez felhasznált eloszlásfüggvények rövid ismertetése**

Az illesztésekhez használt eloszlásfüggvények:

A logNormál eloszlás egy folytonos valószínűség-eloszlás, melyre az jellemző, hogy a valószínűségi változó logaritmus normális eloszlású. Alkalmazzák a biológiában, hidrológiában, illetve megbízhatósági analízisben is.

LogNormal eloszlás sűrűségfüggvénye:



$$c(t, x = L) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma \cdot t} e^{-\frac{(\ln t - \mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (37)$$

várható értéke:

$$\mu = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \ln t_i \quad (38)$$

variánciája:

$$\sigma^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\ln t_i - \mu)^2 \quad (39)$$

A Pearson5 eloszlásfüggvényt Karl Pearson alkalmazta először az 1800-as évek végén. Olyan esetekben alkalmazzák, ahol a minimum és a maximum késleltetés nincs meghatározva, például különböző berendezések javítási ideje esetén.

Pearson5 (3 paraméteres) sűrűségfüggvénye:

$$f(t, a, b, c) = \frac{e^{-\left(\frac{b}{t-c}\right)}}{b \cdot \Gamma(a) \cdot \left(\frac{t-c}{b}\right)^{(a+1)}} \quad (40)$$

A valószínűségi számításban és a statisztikában a Fréchet-eloszlás az általánosított extrémérték-eloszlás egy speciális esete, Maurice Fréchet-ről nevezték el. Hidrológiában alkalmazzák például az évente egy nap maximális csapadéknak vagy folyók áradásának becslésére.

Fréchet (3 paraméteres) sűrűségfüggvénye:

$$f(t, a, b, c) = \frac{a}{b} \cdot \left(\frac{b}{t-c}\right)^{a+1} e^{-\left(\frac{b}{t-c}\right)^a} \quad (41)$$

A Fatigue Life eloszlásfüggvényt általában különböző eszközök élettartam-modellezésére használják.

Fatigue Life (3 paraméteres) eloszlásfüggvénye:

$$f(t, a, b, c) = \frac{\sqrt{\frac{x-c}{b}} + \sqrt{\frac{b}{x-c}}}{2a(x-c)} \cdot \Phi \left( \frac{1}{a} \left( \sqrt{\frac{x-c}{b}} - \sqrt{\frac{b}{x-c}} \right) \right) \quad (42)$$

ahol  $\Phi$  a Standard Normális eloszlás sűrűségfüggvénye.

### 3.6. A háromparaméteres Inverz Gauss-eloszlás bemutatása és az abszolút késleltetés bevezetése

Amennyiben egy kétparaméteres Inverz Gauss-eloszlást illesztünk a nyomjelzőanyag-transzport koncentrációidő-mérési adatsorunkra, akkor a  $\mathbf{b}$  paraméterből az effektív szivárgási sebesség meghatározható, mert a legtöbb esetben a műtárgy hossza ismert. Az  $\mathbf{a}$  paraméterből nem tudjuk kiszámítani  $\mathbf{D}_x$  diszperziós tényezőt, csak  $\mathbf{R}/\mathbf{D}_x$  hányadost. Ez problémát jelent a transzportfolyamat elemzésekor, mivel a diszperziós tényező meghatározása elengedhetetlen.  $\mathbf{R}$  meghatározása csak nagy bizonytalansággal végezhető el külön egyenletek bevonásával. A késleltetés az általam vizsgált gyökérvázú rendszerekre jellemző, emiatt fontos tudnunk ezt az értéket úgy, hogy  $\mathbf{D}_x$  számíthatóvá váljék. A megoldás a háromparaméteres Inverz Gauss-eloszlás, ami jobban illeszkedett a mérési eredményekre, mint a kétparaméteres Inverz Gauss-eloszlás. A háromparaméteres Gauss-eloszlás sűrűségfüggvénye:

$$g(t) = \frac{1}{2} \sqrt{2} \sqrt{\frac{a}{\pi \cdot (t-c)^3}} e^{-\frac{1}{2} \frac{a(t-c-b)^2}{(t-c) \cdot b^2}} \quad (43)$$

A háromparaméteres Inverz Gauss-eloszlás várható értéke és szórása:

$$\mu = b + c \quad (44)$$

$$\sigma = b \cdot \sqrt{\frac{b}{a}} \quad (45)$$

A háromparaméteres eloszlásban  $\mathbf{c}$  paraméter fejezi ki a sűrűségfüggvény vízszintes tengelyen történő késleltetését. Így amennyiben a mérési adatsorunkat  $\mathbf{C}$ -t síknegyedben vizsgáljuk egyértelmű, hogy  $\mathbf{c}$  értéke a késleltetési idő értékét adja. Ezért a 2.3.1. fejezetben bemutatott relatív késleltetési tényező helyett abszolút késleltetéssel számolok. Ezzel a megoldással az eloszlásfüggvény  $\mathbf{a}$  paramétere megszabadul az  $\mathbf{R}$ -től és a várható érték is kiegészül:

$$a = \frac{L^2}{2 \cdot D_x} \quad (46)$$

$$c + b = \frac{L}{v_x} \quad (47)$$

az egyenletekből következik, hogy  $\mathbf{c}$  abszolút késleltetésből kalkulálható közelítő jelleggel  $\mathbf{R}$  értéke közvetett úton abban az esetben, ha a relatív késleltetési tényezőt a késleltetésmentes és a késleltetés várható értékek arányának tekintjük:

$$R = \frac{c+b}{b} \quad (48)$$

Így a (46), (47) és (48) egyenletek átrendezéséből  $v_x$ ,  $D_x$  és  $R$  számíthatóvá válnak abban az esetben, ha megfelelő illeszkedésű háromparaméteres Inverz Gauss-függvényt találunk. A későbbi fejezetekben ezt a módszert fogom használni az illesztett transzportfüggvények paramétereinek kiértékelésére.

### 3.7. $R^2$ definiálása

GOVINDARAJU és DAS (2007) publikációjában a mérnöki alkalmazások illeszkedésvizsgálatára a legelterjedtebb módszernek a négyzetes hiba ( $R^2$ ) meghatározási módszert tekintik. Ezért a 3.9.-3.10. fejezetekben ismertetett illesztési eljárás lett kidolgozva, hogy az illesztett függvény mérési pontokra történő illeszkedése a lehető legnagyobb  $R^2$  érték mellett történjen (közelítsen 1-hez). Emiatt az eredmények összehasonlíthatóvá válnak a nemzetközi szakirodalmi eredményekkel. Ezzel az eljárással tulajdonképpen a mérési eredmények és a hozzá tartozó függvényértékek közötti eltérések standardizált függőleges távolságának minimumát keressük.  $R^2$  értéke az alábbi összefüggésből számítható:

$$R^2 = 1 - \frac{SSE}{TSS} \quad (49)$$

$$TSS = \sum(Y_i - Y)^2 \quad (50)$$

$$SSE = \sum(Y_i - y_i)^2 \quad (51)$$

Ahol:  $TSS$  a négyzetes eltérések összege,  $SSE$  a mért és illesztett értékek közötti négyzetes hiba összege,  $Y_i$  a mért értékek,  $Y$  a mért értékek átlaga,  $y_i$  az illesztett függvény értékei  $Y_i$  értékhelyén értelmezve.

### 3.8. A Li-ion diffúziós tényezőjének értéke

Az elmúlt fejezetekben már bemutatott konzervatív nyomjelzőanyag-transzportvizsgálatokhoz DITTRICH és KLINCSIK (2015a, 2015b) LiCl-ot használtak, és tulajdonképpen a Li-ion koncentrációjának alakulását mérték a szennyvízben. A későbbi elemzéseim szempontjából fontos ismernünk az Li-ion diffúziós tulajdonságait a vízben. A Li-ion diffúziós együtthatójának értéke (KOVÁCS et al. 2002):

$$D_0 = 10,3 \cdot 10^{-10} \frac{m^2}{s} = 8,9 \cdot 10^{-5} \frac{m^2}{nap} \quad (52)$$

A pórusos rendszerekben közelítő jelleggel az effektív diffúziós együttható ( $D_{0,eff}$ ) az alábbi összefüggéssel számítható:

$$D_{0,eff} = \frac{D_0}{Tu} \quad (53)$$

Az egyenletben a  $Tu$  az ún. tortuozitás, melynek értéke pórusos közegben 1,25-5 közötti (KOVÁCS et al. 2002). Ebből kalkulálható, hogy a Li-ion diffúziós együtthatójának értéke  $1,8 - 7 \cdot 10^{-5}$  m<sup>2</sup>/nap körüli.

### 3.9. Az eloszlástípusok részletes vizsgálatához használt szoftver ismertetése

Maple 16 szoftverben egy egyedileg készített eljárást használtam az illesztések elvégzésére. A Maple 16 egy matematikai szoftver, ebben a számítási eljárások könnyen és egyszerűen leprogramozhatók, ezért választottam ezt a szoftvert az illesztésoptimalizálási feladat elvégzésére. A program a mérési pontokra illeszt előzetesen definiált eloszlástípusokat. A programot DITTRICH és KLINCSIK (2015a) úgy alkotta meg, hogy mind az illesztés peremfeltételeit, mind a kezdeti érték feltételeit a mérések körülményei, illetve a műtárgy kialakítása szabta meg, melyek a következők (DITTRICH 2016):

- a műtárgy vízzáróan szigetelt,
- a műtárgy hidraulikai terhelése a mérés egésze során konstans (azaz konstans a befolyó vízhozam),
- nincs csapadék és az evapotranszpiráció elhanyagolható mértékű,
- a háttér-koncentráció értéke zérus,
- a műtárgyban nincs recirkuláció a nyomjelzőanyag-mérés alatt,
- nincs felszíni átfolyás, illetve egyéb jelentős hidraulikai rövidzárlat, melynek következtében:
  - a nyomjelző anyag impulzusra adott válaszfüggvény-koncentrációja egycsúcsú,
  - a függvény kezdőpontja és maximum értéke között egy inflexiós pont van,
- a műtárgyak kavicsöltetűek.

A kikötések azért fontosak, mert a mérések során ezek a feltételek voltak biztosítva, és a felhasznált nemzetközi publikációknál is erre törekedtek a szerzők. Ezt legfőképp azért kell megtenni, mert így kizárhatók az áramlási teret torzító, módosító folyamatok, és ezáltal a kapott mérési eredményekből pontosabb következtetéseket tudok levonni.

A mérési pontthalmazra történő sűrűségfüggvény-illesztésekhez a fentiekből következően az alábbi kritériumokat kell rögzíteni (DITTRICH 2016):

- a kezdeti időpillanatban a koncentráció értéke a műtárgy minden pontjában zérus:

$$\text{ha } t_0=0, \text{ akkor } C_0=0 \quad (54)$$

- a koncentráció időben előre haladva a végtelenben tart a nullához:

$$\text{ha } t \rightarrow \infty, \text{ akkor } C_\infty \rightarrow 0 \quad (55)$$

- a függvény alatti területre (A) igaznak kell lennie 100%-os nyomjelzőanyag-visszatérülés esetén, hogy:

$$A=M/Q \quad (56)$$

ahol:

- **M**: a beinjektált nyomjelzőanyag-tömeg,
- **Q**: a szennyvízhozam,
- a választott függvénynek a lehető legkisebb eltéréssel kell illeszkednie a mérési eredményekhez ( $R^2 \rightarrow 1$ ) ( $R^2$  értelmezését lásd a 3.7. fejezetben).

A program a különböző mérési sorozatokra illeszt Fatigue Life, Lognormal, Fréchet, Pearson5, Inverz Gauss-eloszlásokat. A bevitt eloszlások háromparaméteresek (**a**, **b**, **c**), de a program a **c=0** feltételt is vizsgálja. A **c** paraméter mindegyik eloszlásnál annak késleltetését fejezi ki. Abban az esetben, ha a **c=0** feltétel mellett ad a program legjobb illesztést, akkor az adott eloszlás kétparaméteresnek tekinthető, azonban, ha a **c>0** feltétel teljesül, akkor a háromparaméteres változata a megfelelőbb. A program először az eloszlásfüggvény deriváltját 0-val egyenlővé téve meghatározza az eloszlásfüggvények maximum helyének függvényeit a három illesztési paraméterre vonatkozóan (**a**, **b** és **c**). Ezt követően a mérési eredmény maximumát definiáltam a

programban előzetes közelítő maximumhelynek. Ezt egyenlővé téve **a**, **b** és **c** maximumhelyfüggvényeivel a program számítja **a**, **b**, **c** maximumhelyhez tartozó közelítő értékeit.

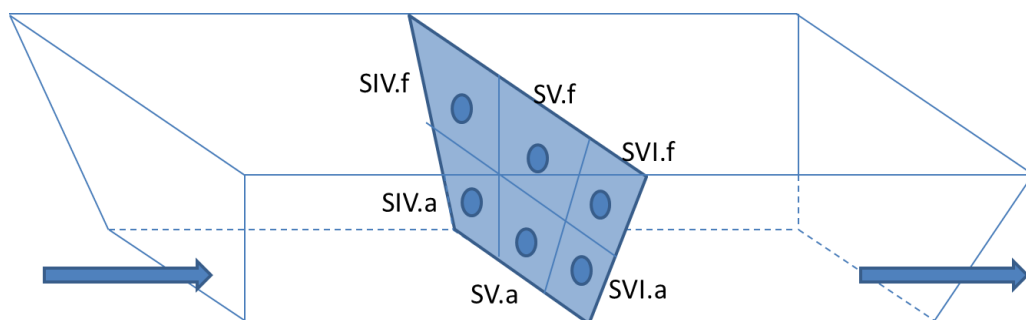
Ezután a **0,5a – 1,5a**, **0,5b – 1,5b** és **c=0 – t(max)/2** (**t(max)** itt a legnagyobb mért függvényértékhez tartozó időpont) közötti tartományban numerikusan végeztem el az eloszlásfüggvények legjobb illeszkedéséhez tartozó képeinek megkeresését.

A program tulajdonképpen a vizsgált tartományban rögzített háromdimenziós mátrix oldalait osztja 20, 20 és 30 egyenlő szakaszra, majd az így kialakuló metszéspontok mindegyikére meghatározza az eloszlásfüggvény képét, és a mérési eredményektől való eltérés mértékére jellemző  $R^2$  értékét is kiszámítja. Amikor a program megtalálta a legjobb illeszkedéshez tartozó cellát, akkor újra elvégzi a számítást annak a cellának egy szűkített környezetében, mégpedig úgy, hogy azonos mátrix cellaszámmal dolgozva a kisebb tartományt jóval kisebb diszkretizációs hálózattal osztja fel. A program addig finomítja és szűkíti a megoldási mátrixot, míg  $R^2$  értékében a 4. tizedesjegyben el nem tűnik az eltérés az egyes futtatási eredmények között. A cél a legjobban illeszkedő  $R^2$  érték megtalálása. Az illesztés stabilitását DITTRICH és KLINCSIK (2015a) ellenőrizték. Numerikus vizsgálatokkal megállapították, hogy az  $R^2$  (**a**, **b**, **c**) függvénynek egy maximuma van.

A 6. ábra a szelvény elhelyezkedését szemlélteti a példa kedvéért a IV.-VI. mérési pontokkal. A szelvény felosztása azt a felületet mutatja, melyen a szennyvíz keresztül haladva az adott pont feltételezett térfogatáramát adja. Az 56. egyenlet a belső pontokra úgy módosul, hogy mind a 6 ponton egységes térfogatárammal és beinjektált anyagmennyiséggel számoltam.

- a függvény alatti területre (A) igaznak kell lennie 100%-os nyomjelzőanyag-visszatérülés esetén, hogy:

$$\sum_{i=1}^6 A_i = \left(\frac{M}{Q}\right)_i \quad (57)$$



6. ábra: A vízszintes átfolyású műtárgy második szelvénye a mintavételi helyekkel (SZEKERES 2014)

### 3.10. Az osztott konvektív-diszperzív modell illesztésére alkalmazott program ismertetése

A kutatási munkám során ismert eloszlások mellett a DITTRICH és KLINCSIK (2015b) által kifejlesztett osztott konvektív-diszperzív transzportmodellt is illesztettem a mérési eredményekre. A gyökérvonalas műtárgy belső pontjaira vonatkozó mérési eredményeinek illesztésére – az eddig a szakirodalomban használtaknál – alkalmasabb módszernek feltételeztem a kifejlesztett osztott konvektív-diszperzív modellt.

A modell a nagy sebességű fő áram részére létrehoz egy Inverz Gauss-alakú diszperziós görbét (továbbiakban 1. Inverz Gauss-függvény), és a kis sebességű mikropórusrendszeren átáramló mellékáram részére is egy attól teljesen független Inverz Gauss diszperziós görbét (továbbiakban 2. Inverz Gauss-függvény) állít elő. A 4.3. fejezetben ismertetett eredmények ellenére a függvény kiválasztásának oka, hogy amíg Fréchet eloszlásfüggvénye mögött fizikai tartalom mindeddig nem ismert, az Inverz Gauss ezzel szemben átvezethető a tervezési gyakorlatba a fizikai tényezők számíthatóságának segítségével.

A modell peremfeltételei az alábbiak (DITTRICH 2016):

- a kezdeti időpillanatban a koncentráció értéke a műtárgy minden pontjában zérus:

$$\text{ha } t_0=0, \text{ akkor } C_0=0 \quad (58)$$

- a koncentráció időben előre haladva a végtelenben tart a nullához:

$$\text{ha } t \rightarrow \infty, \text{ akkor } C_\infty \rightarrow 0 \quad (59)$$

- az 1. Inverz Gauss-görbe késleltetése ( $c_1$ ) a lehető legjobb illeszkedésű Fréchet-eloszlás sűrűségfüggvényének késleltetésével közel egyenlő,
- a 2. Inverz Gauss-görbe késleltetése nagyobb vagy egyenlő az 1. Inverz Gauss-görbe késleltetésénél,
- a két Inverz Gauss-görbe alatti terület összege meg kell, hogy egyezzen a 100% nyomjelzőanyag-visszatérülésre jellemző területtel:

$$A(G1)+A(G2)=M/Q \quad (60)$$

- a két Inverz Gauss-függvény összegéből előállított görbének a lehető legkisebb eltéréssel kell illeszkednie a mérési eredményekhez ( $R^2 \rightarrow 1$ ).

A belső pontokra való függvény alatti terület számítását a 3.9. fejezet tartalmazza.

Az illesztési módszerrel azt feltételeztem, hogy a mért válaszfüggvény gyorsan felfutó szakaszában csak a fő áramnak van jelentős szerepe. Egy paraméter segítségével ( $s$ ) meg lehet adni az 1. Inverz Gauss-görbe alatti terület és a teljes terület arányát. Egy tetszőlegesen felvett  $s$  értékre illesztettem az 1. Inverz Gauss-görbét a mérések gyors felfutó részéhez, majd előállítottam a mérési eredmények és az 1. Inverz Gauss-görbe eltérését, és arra illesztettem a 2. Inverz Gauss-görbét. Ezután az  $s$  paraméter értékét 0.01 értékű lépésközzel vizsgáltam, hogy milyen  $s$  értéknél ad a két görbe összege legjobb illeszkedést a mérési pontokkal. A modell tulajdonképpen egy osztott konvektív-diszperzív modell, mely az áramlási folyamatot két egymástól független konvektív-diszperzív görbe összegéből állítja elő, és az ( $s$ ) paraméter segítségével a modell rögzíti a fő áramban és a mellékáramban résztvevő folyamatok arányát is.

Az első Inverz Gauss-görbe a nagysebességű fő áramot szimulálja, míg a második Inverz Gauss-görbe a mikropórus rendszer lassabb áramlású zónáiban létrejövő transzportfolyamatokat, és ebben a görbében jelennek meg a holtterek és a visszakeveredés hatása is. A módszer az előzőekben precízen illesztett Fréchet-eloszlás maximumhelyének környezetében keresi a két Inverz Gauss-görbe maximumhelyét, így csökkenthető a minimumra az optimalizációs idő.



## 4. Eredmények és értékelés

### 4.1. Laboratóriumi transzspirációs mérések eredményei

#### 4.1.1. A vizsgált sás szezonális transzspirációs eredményei

A 3.4. fejezetben bemutatott mérési módszer szerint méréseket végeztem a hódmezővásárhelyi gyökérszónás műtárgyból elhozott sáson laboratóriumi körülmények között. A növény transzspirációját vizsgáltam három paraméter segítségével (hőmérséklet, páratartalom és fényintenzitás). A három vizsgált paraméterből származtattam a növényi egyedek környezeti válaszgörbéinek jellemzőit (7. ábra).

Figyelembe véve a fényreakciókat, a várakozásoknak megfelelően a görbék többé-kevésbé fokozatosan növekedtek minden évszakban. A legalacsonyabb minimális és maximális transzspirációs ráta ősszel figyelhető meg közepes levélhőmérsékleti körülmények között. A legintenzívebb transzspirációs érték a legmagasabb hőmérsékleten, nyáron történt.

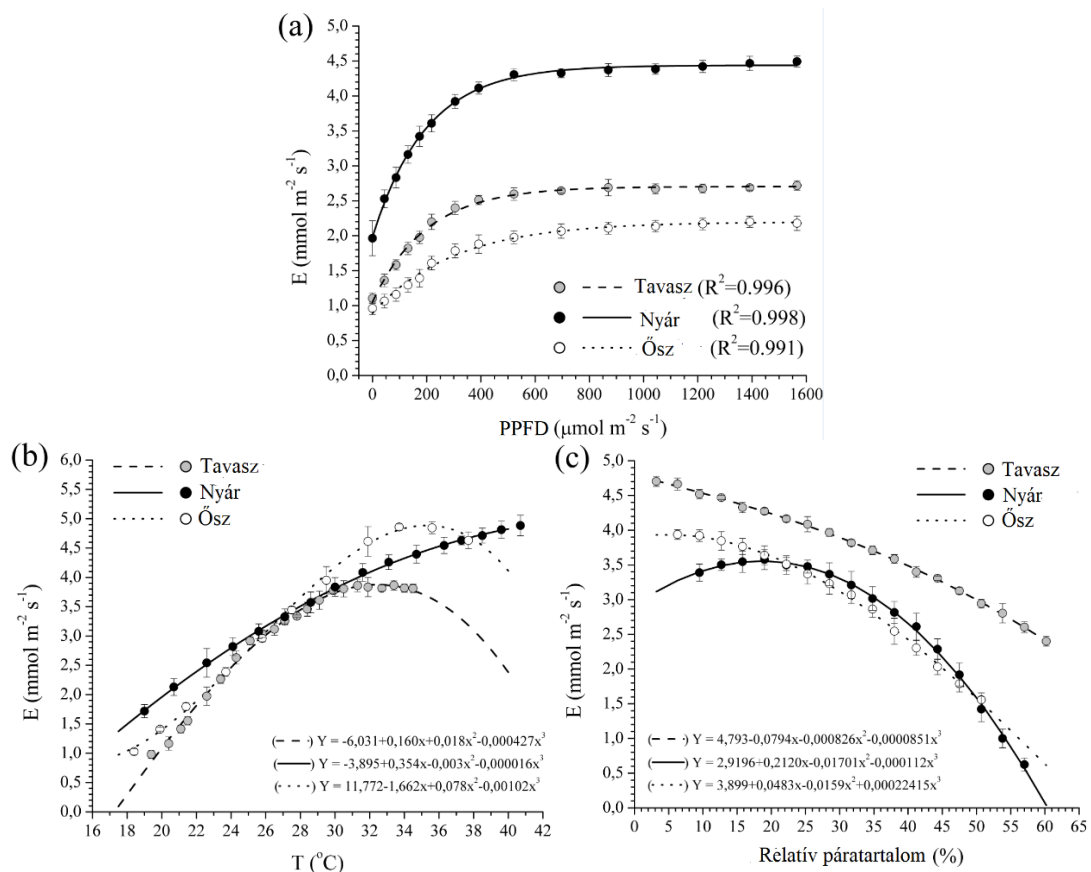
A transzspiráció tavasszal volt alacsonyabb, és az idő előrehaladtával növekedett. Tavasszal és nyáron a transzspiráció maximális sebességét viszonylag alacsony besugárzási szinten érte el (198,5, illetve 197,7  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ). Ősszel a maximális vízvesztés (302,5  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) intenzívebb besugárzást igényelt. A transzspiráció nem nőtt szoros összefüggésben az évszakok átlagos hőmérséklet-emelkedésével.

A hőmérsékleti válaszok folyamatosan növekedtek az évszakok során, a harmadrendű polinomgörbék jól illeszkedtek a transzspiráció változásához. A legdinamikusabb transzspirációnövekedés nyáron volt, 40°C feletti hőmérsékleten. Ősszel és tavasszal a vízvesztés alacsonyabb hőmérsékleten volt a legnagyobb (35,5, illetve 32,5°C). Ez a jelenség azt mutatja, hogy a növény tavaszi és őszi vízvesztési folyamata hőmérsékleti viszonyokkal szabályozható, ami szezonális abiotikus kényszert jelent.

A kísérlet harmadik környezeti válasza a páratartalom volt. A levegő növekvő víztartalma monoton csökkenést okozott a transzspirációban. Általában alacsonyabb páratartalom mellett nagyobb a vízvesztés, amely drámai módon csökkenhet a növekvő légnedvesség mellett. Nyáron az extrém alacsony páratartalom csökkentheti a transzspirációt, ami azt sugallja, hogy megemelkedett hőmérsékleten a transzspiráció a víz adottságaival szabályozható. Ennek megfelelően az alacsony légköri páratartalom magas hőmérsékletekkel párosulva környezeti

akadályt jelenthet a transzspirációs maximumok teljes kifejlődésében. Ennek elsősorban növényélettani okai vannak. A növény vízleadásának legjelentősebb része a sztómákon keresztül, ami az összes víz közel 90%-áért felel. Ennek egyik fontos tényezője a levél és a környező légtér közötti vízgőzkoncentráció-gradiens. A levélfelületen minden négyzetmilliméteren átlagosan 100 sztóma található, de akár ennél tízszer több is lehet. A sztómarések meglehetősen kicsik, ugyanis nyitott állapotban is a teljes levélfelületnek legfeljebb az 1-2%-át teszik ki. A sztómányitás biztosítja a vízleadást és a széndioxid-felvételt is. A növények eltérő módon biztosítják, hogy elegendő szén-dioxid jusson a levélbe a fotoszintézishez, de minél kisebb legyen az ezzel egyidejű vízleadásuk.

A sztómamozgást a külső környezeti tényezők közül leginkább a szén-dioxid-koncentráció, a fény, a hőmérséklet és a levegő páratartalma szabályozza. A levelek sejt közötti járataiban lévő nagyobb szén-dioxid-koncentráció sztómazáródáshoz, míg a kisebb koncentráció sztómányitódáshoz vezet. Ugyanakkor magasabb hőmérsékleten erőteljesebben növekszik a légzés, mint a fotoszintézis, ami a levélben még nagyobb szén-dioxid-koncentrációhoz, végül sztómazáródáshoz vezet. A levegő páratartalmának csökkenésével növekszik a nyitott sztómákon a transzspiráció.



7. ábra.: A vizsgált sás (*Carex elata*) transzspirációs rátájának alakulása (a) a PPFD (fényintenzitás) függvényében (b) a levélhőmérséklet függvényében (c) a relatív páratartalom függvényében. A fényválaszfüggvények az egyes évszakok átlaghőmérsékleteiben lettek mérve (Tavasz:  $20 \pm 2.5^{\circ}\text{C}$ ; Nyár:  $30 \pm 2.5^{\circ}\text{C}$ ; Ősz:  $25 \pm 2.5^{\circ}\text{C}$ ); az egyes görbék egy adott intervallumán mértem ( $0 - 1566 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ). A harmadrendű polinomok egy adott hőmérsékleti tartományra ( $17.5 - 42.0^{\circ}\text{C}$ ) és páratartalomra ( $3.2 - 60.2\%$ ) lettek számolva az adott évszakoknak megfelelően.

#### 4.1.2. Gyökérszónás műtárgy szezonális transzspiráció okozta vízvesztései

A 3.4.4. fejezetben bemutatott számolási módszer alapján (36. egyenlet) szezonális intervallumokat határoztam meg a gyökérszónás műtárgy transzspiráció okozta vízvesztés mértékére. A 4.1.1. fejezetben bemutatott eredményeket használtam a számoláshoz.

A 4 kísérleti modell felülete  $0,25 \text{ m}^2$  volt, melyen  $2,65 \text{ m}^2$  levélfelület adódott. Ezen érték alapján becsültem a levélfelületet a gyökérszónás műtárgyban. A gyökérszónás műtárgy felülete  $25,2 \text{ m}^2$ , így a becsült levélfelület  $267 \text{ m}^2$ .

A vízveszteségi számításokat a 2-5. táblázatok mutatják be. Tavasszal a párolgás általi vízveszteség 0,46-0,83 m<sup>3</sup> értékek között alakult; ha tipikus éghajlati viszonyok vannak, akkor ez az érték 0,50 m<sup>3</sup>. A napi feladott szennyvízmennyiség körülbelül 1 m<sup>3</sup>, ami azt jelenti, hogy tavasszal a napi feladott mennyiség fele elpárolog, illetve, hogy a vízveszteség a hidraulikai terheléshez viszonyítva 46-83% között alakul.

Nyáron a transzspiráció okozta napi vízveszteség 0,52-1,08 m<sup>3</sup>, ami 52-108%-a a hidraulikai terhelésnek, tipikus éghajlati körülmények között 0,97 m<sup>3</sup>. Így elmondható, hogy nyáron vannak olyan napok, amikor akár a napi hidraulikai terhelés értékénél is magasabb a transzspiráció általi vízveszteség. A plusz elpárologtatott víztöbblet a műtárgyban található vízből származik, emiatt folyamatosan csökkenhet a műtárgyban a vízszint.

Ősszel a transzspiráció általi napi vízveszteség 0,17-0,48 m<sup>3</sup>, ami 17-48%-a a hidraulikai terhelésnek. Tipikus éghajlati körülmények között pedig 0,31 m<sup>3</sup>. Elmondható, hogy ez az érték alacsonyabb, mint a tavaszi.

Összeségében elmondható, hogy extrém időjárási körülmények között a transzspiráció általi vízveszteség nagyobb, mint a maximális hidraulikai terhelés. Ez nagyon fontos következtetés az elfolyó vízminőség tekintetében, ahol fontos, hogy a befogadói vízminőségi határértékeket betartsa a telep. A növényzet párologtatásából eredő betöményedés kedvezőtlenül hat az elfolyó vízminőségre, ugyanakkor a vízminőségi mérésekre kalkulált lebontási modellek hibásak, hiszen a betöményedést nem veszik figyelembe. Ez alapján a valódi lebontási folyamatok jóval erőteljesebbek, mint egy kalibrált lebontási modell alapján becsült érték. A laboratóriumi méréseknél nem számoltam a szél hatásával, mely befolyásolhatja a műtárgyban lévő hőmérsékletet és a páratartalmat akár napszakon belül is, így a transzspirációra is nagy hatással lehet. Emellett a felhők hatását sem vettem számításba, mely a fényintenzitást és a hőmérsékletet is befolyásolhatja szintén napszakon belül is.

2. táblázat: A vizsgált sás (*Carex elata*) átlagos transzspirációs rátája a szezonális intervallumokra és környezeti értékekre számolva, mely tartalmazza az átlag értékeket is. E a transzspiráció ( $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), PPFD a fényintenzitás-besugárzás ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), T a hőmérséklet ( $^{\circ}\text{C}$ ) és RH a relatív páratartalom (%).

	Tavaszi	Nyári	Őszi
E (PPFD)	<sup>1</sup> 2.18 ± 0.47	<sup>2</sup> 4.43 ± 0.05	<sup>1</sup> 1.63 ± 0.39
E (T)	<sup>3</sup> 1.07 ± 0.63	<sup>4</sup> 3.80 ± 0.24	<sup>5</sup> 2.76 ± 0.50
E (RH)	<sup>6</sup> 3.02 ± 0.41	<sup>7</sup> 3.32 ± 0.27	<sup>8</sup> 2.52 ± 0.64
Átlag ± SD	2.09 ± 0.98	3.85 ± 0.56	2.31 ± 0.60

<sup>1</sup>PPFD: 44-870  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ; <sup>2</sup>PPFD: 870-1566  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ; <sup>3</sup>T: 20±2.5°C; <sup>4</sup>T: 30±2.5°C; <sup>5</sup>T: 25±2.5°C; <sup>6</sup>RH: 38-60.2 %; <sup>7</sup>RH: 15.8-38 %; <sup>8</sup>RH: 25.3-50.7 %.

3. táblázat: A vizsgált sás (*Carex elata*) minimum transzspirációs rátája a szezonális intervallumokra és környezeti értékekre számolva, mely tartalmazza az átlag értékeket is. E a transzspiráció ( $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), PPFD a fényintenzitás-besugárzás ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), T a hőmérséklet ( $^{\circ}\text{C}$ ) és RH a relatív páratartalom (%).

	Tavaszi	Nyári	Őszi
E (PPFD)	<sup>1</sup> 1.89 ± 0.33	<sup>1</sup> 2.99 ± 0.44	<sup>1</sup> 1.23 ± 0.21
E (T)	<sup>2</sup> 1.07 ± 0.63	<sup>2</sup> 1.95 ± 0.37	<sup>2</sup> 1.44 ± 0.35
E (RH)	<sup>3</sup> 2.78 ± 0.29	<sup>3</sup> 1.01 ± 0.73	<sup>3</sup> 1.22 ± 0.47
Átlag ± SD	1.91 ± 0.86	1.98 ± 0.99	1.29 ± 0.12

<sup>1</sup>PPFD: 44-218  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ; <sup>2</sup>T: 20±2.5°C; <sup>3</sup>RH: 47.5-62.5 %.

4. táblázat: A vizsgált sás (*Carex elata*) maximális transzspirációs rátája a szezonális intervallumokra és környezeti értékekre számolva, mely tartalmazza az átlag értékeket is. E a transzspiráció ( $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), PPFD a fényintenzitás-besugárzás ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), T a hőmérséklet ( $^{\circ}\text{C}$ ) és RH a relatív páratartalom (%).

	Tavaszi	Nyári	Őszi
E (PPFD)	<sup>1</sup> 2.69 ± 0.02	<sup>1</sup> 4.44 ± 0.05	<sup>1</sup> 2.17 ± 0.03
E (T)	<sup>2</sup> 3.16 ± 0.45	<sup>2</sup> 4.65 ± 0.13	<sup>2</sup> 4.64 ± 0.27
E (RH)	<sup>3</sup> 4.59 ± 0.11	<sup>3</sup> 3.32 ± 0.16	<sup>3</sup> 3.91 ± 0.04
Átlag ± SD	3.48 ± 0.99	4.14 ± 0.71	3.57 ± 1.27

<sup>1</sup>PPFD: 1044-1566  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ; <sup>2</sup>T: 37±2.5 °C; <sup>3</sup>RH: 3.2-15.7 %.

5. táblázat: Szezonális napi transzspiráció általi vízvesztés a horizontális átfolyású gyökérszónás műtárgyban. TVV: transzspiráció általi vízvesztés ( $\text{m}^3$ ); \*TVV: átlag vízvesztés  $\text{m}^3/\text{m}^2$  (műtárgyfelület); min: minimum; max: maximum

	Tavaszi	Nyári	Őszi
TVV <sub>min</sub>	0.46	0.52	0.17
TVV <sub>átlag</sub>	0.50	0.97	0.31
TVV <sub>max</sub>	0.83	1.08	0.48
*TVV <sub>átlag</sub>	0.02	0.04	0.01

### 4.1.3. Részösszefoglaló, a kapott eredmények jelentősége

Meghatároztam a minimális és maximális transzspiráció általi vízveszteségeket hosszanti átfolyású, kavicsöltetű, sással telepített gyökérszónás műtárgyakra hazai klimatikus viszonyok között.

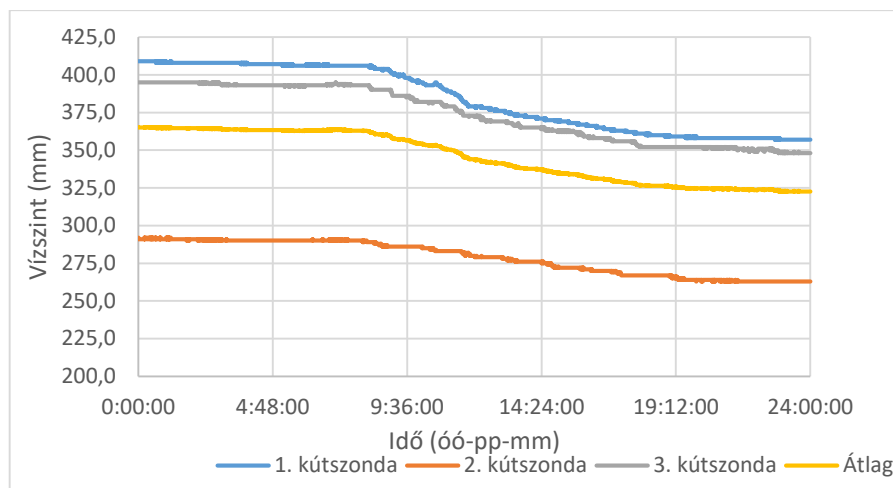
Tavasszal a transzspiráció okozta napi vízveszteség  $0,46-0,83 \text{ m}^3$ , ami 46-83%-a a hidraulikai terhelésnek. Nyáron ez az érték  $0,52-1,08 \text{ m}^3$ , ami 52-108%-a a hidraulikai terhelésnek, míg ősszel  $0,17-0,48 \text{ m}^3$ , ami 17-48%-a a hidraulikai terhelésnek. Leginkább tavasszal és nyáron a transzspiráció nagy hatással van az elfolyó tisztított víz koncentrációjára. Ha a horizontális átfolyású gyökérszónás műtárgy vízháztartása jelentősen csökken, akkor megnövekedhet a műtárgyban a koncentráció, ami azt eredményezi, hogy az elfolyó tisztított szennyvízben is megemelkedik a koncentráció. Egy átlagos nyáron a növények befolyásolják legjobban a műtárgy vízháztartását. Tavasszal és ősszel ez a hatás jóval kisebb, mivel a klimatikus körülmények nem éppen optimálisak.

Hazai klimatikus viszonyok között végzett ilyen részletességű mérésről a témában nincs tudomásom.

Összeségében elmondható, hogy a szakirodalomhoz hasonló eredményeket kaptam (CHAZARENC et al. 2003, PEDESCOLL et al. 2013), a transzspiráció nagy hatással lehet a gyökérszónás műtárgyak vízháztartására.

## 4.2. A napon belüli evapotranszspiráció mérési eredményei

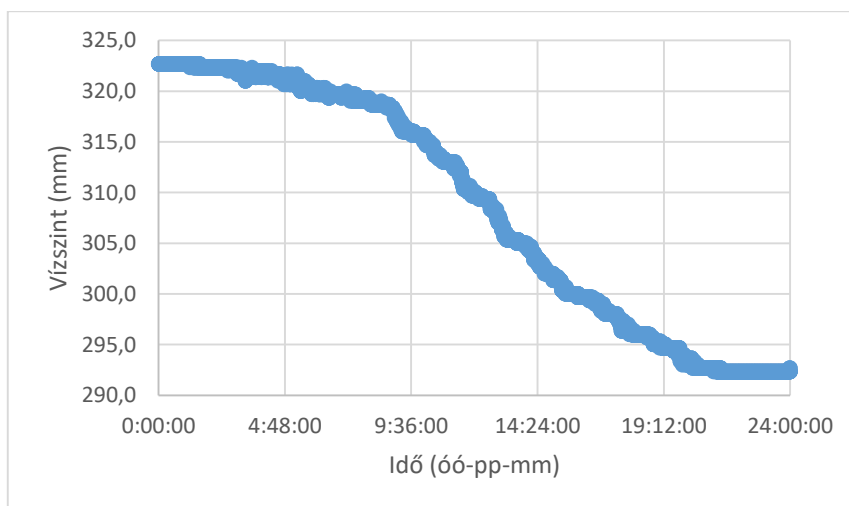
Ebben a fejezetben bemutatom a terepi monitoringrendszer mérési eredményeiből levonható következtetéseket a napi és évszakos evapotranszspirációra vonatkozóan. A monitoringrendszer részletes bemutatása a **2. mellékletben** található, illetve a mérési módszer leírása a 3.4.5 fejezetben. Az adatbázisból kiválasztott napokra először előállítottam a kútszondák vízmélység mérési értékeit, illetve a három kútszonda átlagából regisztrált vízszinteket. Ezzel a mérési hibák kijtésre kerültek. Példaként egy napot kiválasztottam, ez látható a 8. ábrán, melyről a három nyomástávadó értékei és azok átlaga is leolvashatók. A többi vizsgált mérési eredményt összegző általam készített ábra a **4. mellékletben** található.



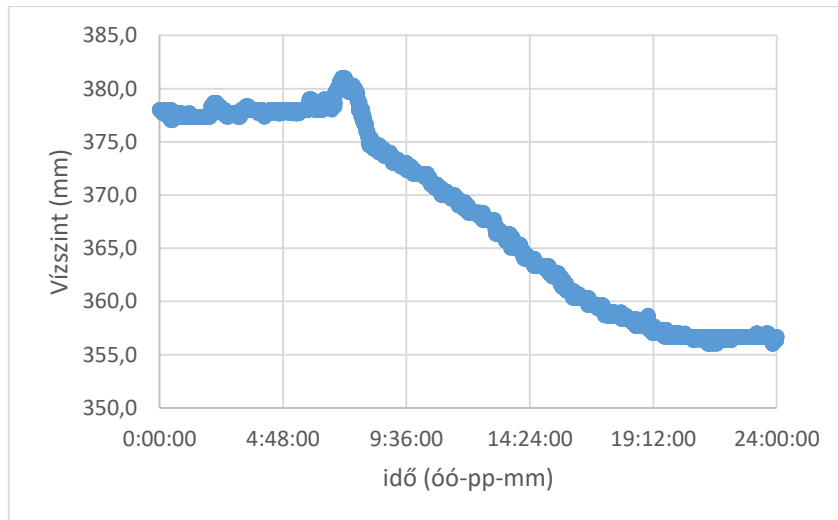
**8. ábra: Regisztrált vízszintek (2012 05.24.)**

Az egyes kútszondák értékei azért mutatnak jelentős eltéréseket, mert különböző mélységben lettek elhelyezve, de ez az eredmények szempontjából nem releváns, csak a vízszintváltozás mértéke a fontos. Mind a négy függvényen látszik, hogy az éjszakai vízszintcsökkenés kisebb mértékű, mint a nappali. Ez a jelenség a nappali időszakban megnövekedett evapotranszpirációval magyarázható.

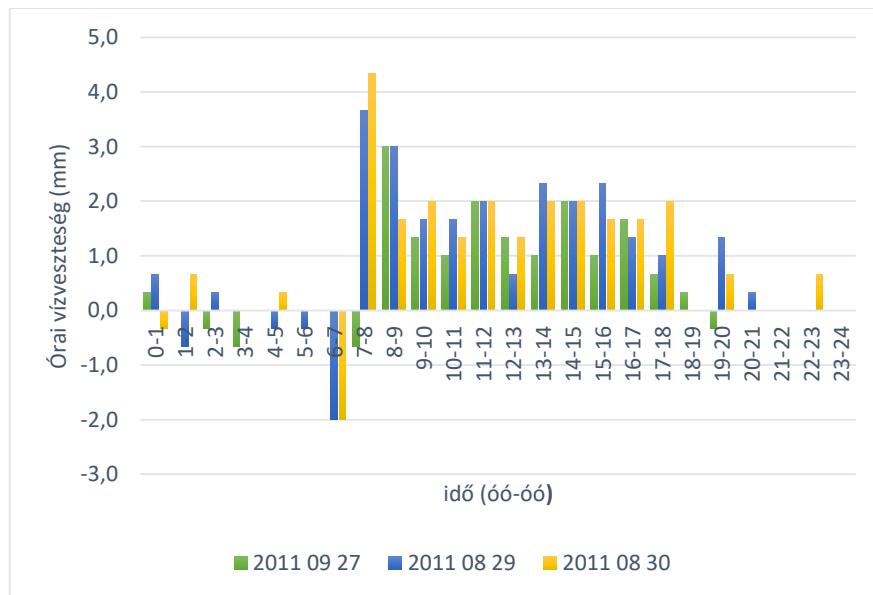
A vízszintváltozás mértéke a lenti diagramokon látható (9-10. ábra). Az első diagram mutatja a jelentős vízszintcsökkenést a nap folyamán (a három kútszonda átlaga alapján), a második pedig a napfelkeltekor és naplementekor képződő páralecsapódás mértékét.



**9. ábra: A vízszint alakulása 2012.05.25-én**

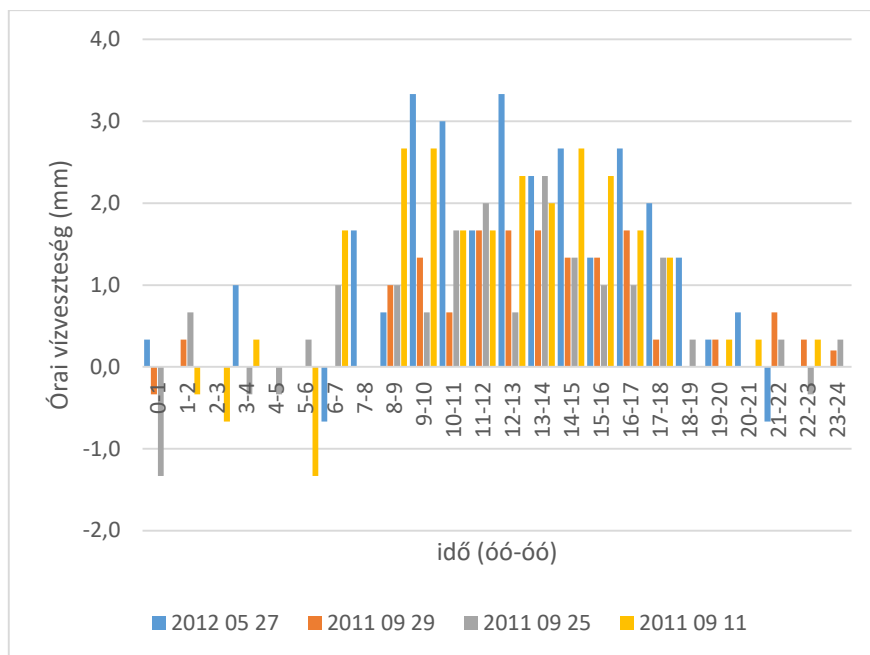


**10. ábra: A vízszint alakulása 2011.08.29-én**

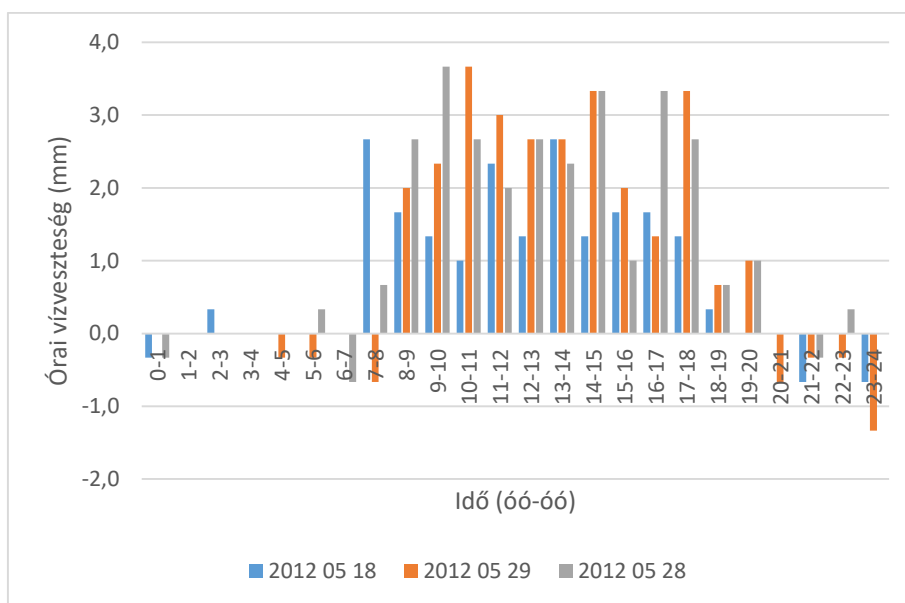


**11. ábra: Napon belüli óránkénti vízszintváltozás**

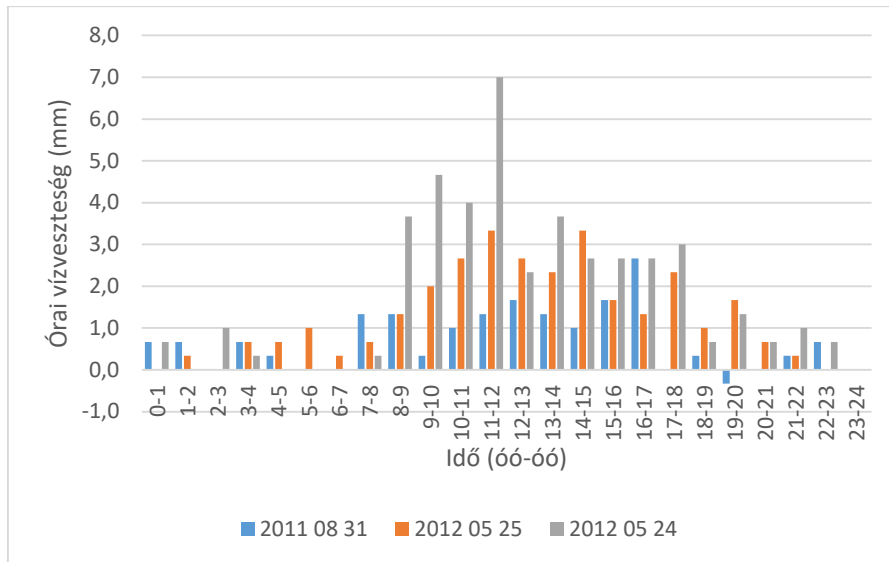




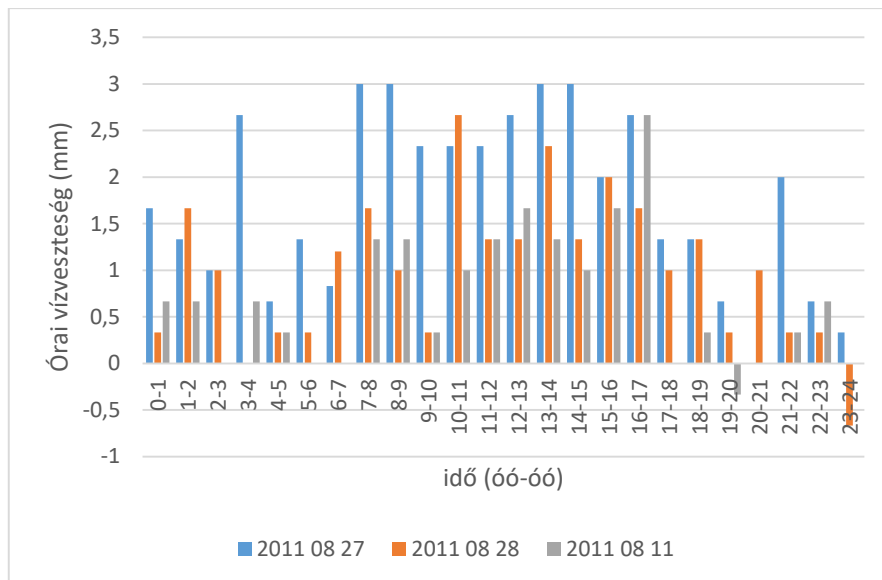
**12. ábra: Napon belüli óránkénti vízszintváltozás**



**13. ábra: Napon belüli óránkénti vízszintváltozás**



14. ábra: Napon belüli óránkénti vízszintváltozás



15. ábra: Napon belüli óránkénti vízszintváltozás

A 11-15. ábrákon láthatók az általam kiválasztott napok óránként számított vízszintcsökkenés értékei. Három csoportba soroltam a kiválasztott napokat. Az első csoportba a 11-12. ábrán található napok tartoznak, ahol a napfelkelte utáni vízszintemelkedést a hajnali páralecsapódás okozta. A legnagyobb vízszintcsökkenés a napfelkelte utáni órákban volt megfigyelhető. A jelenség okának meghatározásához további kutatásra van szükség.

A második csoportba a 13. ábrán található napok kerültek, ahol nem volt hajnali páralecsapódás, de az esti páralecsapódás jelentős mértékű volt, 2012.05.29-én több órán át tartott a hatása. A

legnagyobb óránként számított vízvesztéseket 10 és 14 óra között regisztrálták a vízszintérzékelők.

A harmadik csoportba a 14. és 15. ábrákon látható napok tartoznak, ahol se reggeli, se esti páralecsapódás nem volt tapasztalható. A napi maximális vízszintcsökkenés 12 és 14 óra között volt, 2012.05.24-én ez az érték elérte a 7 mm/h-t is. Ezen a napon regisztráltam a legnagyobb nappali és éjszakai vízszintcsökkenést is.

**6. táblázat: A vizsgált napok adatai**

	Napfel- kelte	Naple- mente	Nappali óraszám (óó:pp)	Éjszakai órák száma (óó:pp)	Napi középhő- mérséklet (°C)	Nappali vízszint- változás (mm)	Éjszakai vízszint- változás (mm)	Napi vízszint- változás (mm)
2011.08.11.	5:27	20:00	14:33	9:27	17	9,0	3,3	12,3
2011.08.27.	5:49	19:31	13:42	10:18	26	30,3	12,0	42,3
2011.08.28.	5:50	19:30	13:40	10:20	22	20,0	4,3	24,3
2011.08.29.	5:53	19:26	13:29	10:31	22	22	-0,3	21,7
2011.08.30.	5:54	19:24	13:30	10:30	23	19,7	2	21,7
2011.08.31.	5:55	19:22	13:27	10:33	21	14	3,7	17,7
2011.09.11.	6:09	19:01	12:52	11:08	24	23,7	-1	22,7
2011.09.25.	6:27	18:33	12:05	11:55	16	14,4	-0,8	13,6
2011.09.27.	6:29	18:29	12:00	12:00	18	14,4	-0,7	13,7
2011.09.29.	6:32	18:25	11:53	12:07	17	12,7	1	13,7
2012.05.18.	5:02	20:08	15:07	8:53	14	19,7	-1,7	18
2012.05.24.	4:56	20:15	15:19	8:41	20	38,6	4	42,6
2012.05.25.	4:55	20:16	15:21	8:39	20	28,3	2,1	30,4
2012.05.27.	4:54	20:17	15:23	8:37	17	25	2	27
2012.05.28.	4:53	20:18	15:25	8:35	17	28	0	28
2012.05.29.	4:52	20:19	15:27	8:33	18	26	-2	24

A 6. táblázat mutatja minden egyes nap adatait, a nappali/éjszakai adatok arányát és a nappali és éjszakai vízszintcsökkenéseket is. Voltak napok, ahol a reggeli és éjszakai páralecsapódás miatt negatív értékű lett a vízszintváltozás. A legkisebb napi változás 12,3 mm, míg a legnagyobb 42,6 mm. A napi középhőmérséklet tavasszal 14 és 20, nyáron 17 és 26, míg ősszel 16 és 24 fok között alakult.

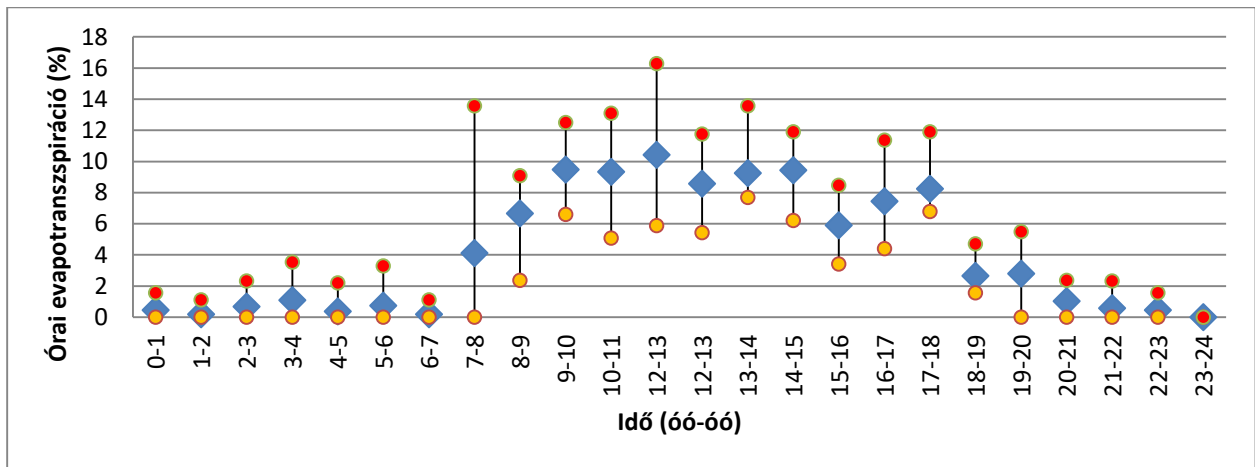
**7. táblázat: A vizsgált napok napi, nappali és éjszakai evapotranszpirációs értékei**

Dátum	Evapotranszspiráció (mm/nap)	Evapotranszspiráció és a maximális hidraulikai terhelés aránya (%)	Nappali evapotranszspiráció (%)	Éjszakai evapotranszspiráció (%)	Napi páralecsapódás és a hidraulikai terhelés aránya (%)
2011.08.11.	12,3	30,8	73,0	27,0	0,0
2011.08.27.	42,3	105,8	71,7	28,3	0,0
2011.08.28.	24,3	60,8	82,2	17,8	1,8
2011.08.29.	21,7	54,3	100,0	0,0	8,3
2011.08.30.	21,7	54,3	90,8	9,2	5,8
2011.08.31.	17,7	44,3	79,1	20,9	0,8
2011.09.11.	22,7	56,8	100,0	0,0	5,8
2011.09.25.	13,6	34,0	100,0	0,0	5,8
2011.09.27.	13,7	34,3	100,0	0,0	5,8
2011.09.29.	13,7	34,3	92,7	7,3	0,8
2012.05.18.	18,0	45,0	100,0	0,0	4,3
2012.05.24.	42,6	106,5	90,6	9,4	0,0
2012.05.25.	30,4	76,0	93,1	6,9	0,0
2012.05.27.	27,0	67,5	92,6	7,4	3,3
2012.05.28.	28,0	70,0	100,0	0,0	3,3
2012.05.29.	24,0	60,0	100,0	0,0	10,0

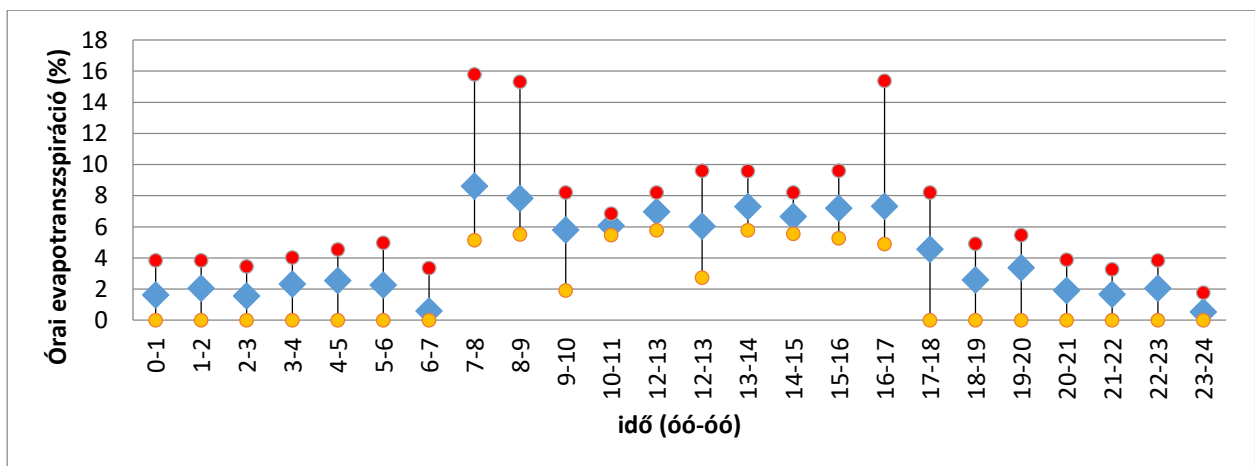
A napi evapotranszpirációt és a párolgás mértékét a maximális hidraulikai terheléshez hasonlítottam, ami 40 mm/nap a hosszanti átfolyású gyökérszívás műtárgyak esetében, emellett szétválasztottam a nappali és éjszakai evapotranszpirációt is. Az eredményeket a 7. táblázat összegezi, melyből az alábbi következtetéseket vontam le:

- A vizsgált napokon a teljes napi vízvesztés 71,7-93,1%-a a nappali órákban párolgott el. Ez azt is jelenti, hogy a szennyvíz töményedése a műtárgyban az evapotranszspiráció hatására 4-10-szer nagyobb nappal, mint éjjel.
- Az éjjeli evapotranszspiráció jelentős mértékű, mivel voltak napok, amikor a teljes napi vízvesztésnek a 20,9-28,3%-a párolgott el éjszaka. Ez azért kiemelt jelentőségű, mert a nemzetközi szakirodalomban ezt közel nullának szokták tekinteni (JACOBS et al. 2002, GALVAÓ et al. 2010).
- Voltak napok, melyeken a páralecsapódás magas volt, ezért az éjszakai és nappali evapotranszspiráció nem volt szétválasztható.

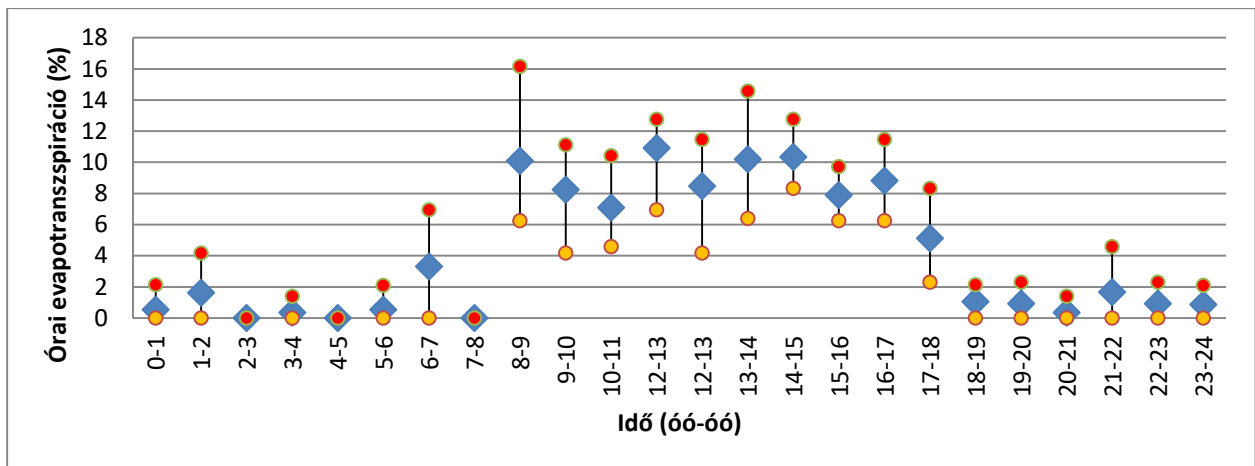
- Tavasszal az evapotranszpiráció 18,0-42,6 mm/nap értékre tevődött, ami a hidraulikai terhelés 45,0-106,0%-a.
- Ez az érték nyáron 12,3-42,3 mm/nap volt, ami 30,8-105,8%-a a hidraulikai terhelésnek.
- Ősszel az evapotranszpiráció 13,6-22,7 mm/nap, ami a hidraulikai terhelés 34,0-56,8%-a.
- Voltak napok, amikor a páralecsapódás mérhető volt és 1,8 és 10,0%-a volt a maximális hidraulikai terhelésnek. Ez leginkább a napfelkelte utáni időszakban csökkenti a koncentrációt a műtárgyban.



16. ábra: Az átlag, minimum és maximum óránkénti evapotranszpiráció alakulása tavasszal, a napi evapotranszpiráció százalékában kifejezve



17. ábra: Az átlag, minimum és maximum óránkénti evapotranszpiráció alakulása nyáron, a napi evapotranszpiráció százalékában kifejezve



**18. ábra: Az átlag, minimum és maximum óránkénti evapotranszpiráció alakulása ősszel, a napi evapotranszpiráció százalékában kifejezve**

A 16.-18. ábrák mutatják a napi minimum, maximum és átlag óránkénti százalékos evapotranszpirációkat tavaszra, nyárra és őszre vonatkozóan. Az átlag evapotranszpiráció éjjel alacsony, majd napfelkeltéig emelkedni kezd, majd csökken a reggeli páralecsapódás miatt, majd újra emelkedik és 12-13 óra között éri el a maximum értéket, majd folyamatosan csökken. Ezek az eredmények hasonlóak GALVEO et al. (2010) eredményeihez, de ők a páralecsapódás jelenségét nem tárták fel. Vannak napok, ahol reggel mérhető a napi maximális evapotranszpiráció.

A 16. ábrán látható a tavaszi óránkénti csúcs evapotranszpiráció: 16,3%, nyáron ez 15,8%, míg ősszel 16,2%. A tavaszi napi maximális evapotranszpiráció 42,6 mm/nap, ennek a 16,3%-a 6,94 mm/h, ami az átlagos óránkénti hidraulikai terhelés 415%-a (1,7 mm/h). Nyáron és ősszel ezek az értékek 229 és 150%-ra adódtak. A betöményedési folyamatok főképp tavasszal és nyáron nagyon jelentősek.

#### 4.2.1. Részösszefoglaló, a kapott eredmények jelentősége

Vizsgáltam az óránkénti, napi és szezonális evapotranszpirációt a horizontális gyökérszónás műtárgyakban. 16 napot találtam, ahol sem csapadék, sem hozzáfolyás, sem elfolyás nem volt a műtárgyban, így az egyetlen, ami a vízháztartást befolyásolta, az az evapotranszpiráció volt.

A vizsgált napokon a teljes vízveszteség 71,7-93,1%-a a nappali időszakban párologott el. Ez azt jelenti, hogy a betöményedési folyamatok 4-10-szer erőteljesebbek nappal, mint éjszaka.

Az éjjeli evapotranszpiráció jelentős mértékű, voltak olyan napok, amikor a teljes vízveszteség 20,9-28,3%-át éjjeli evapotranszpiráció okozta.

Vizsgáltam az evapotranszpirációt a helyi klimatikus viszonyok között: tavasszal 18,0-42,6 mm/napos értékek között mozgott, ami a 45,0-106,5%-a a maximális hidraulikai terhelésnek; nyáron ezek az értékek 12,3-42,3 mm/nap voltak, amik egyeznek FREEDMAN et al. (2014) eredményeivel. Ez a maximális hidraulikai terhelésnek a 30,8-105,8%-a. Ősszel 13,6 - 22,7 mm/nap értékek között alakult a vízszintcsökkenés, ami a hidraulikai terhelés 34,0-56,8%-a. Ezek az értékek hasonlóak a 4.1.1. fejezetben bemutatott mérési eredményekhez.

Voltak napok, amikor a reggeli és esti páralecsapódás miatt megemelkedett a vízszint. Ez azt jelenti, hogy megemeli a vízszintet a műtárgyban és 100% páratartalmat eredményez, így ekkor nincs párologtatás. Voltak napok, amikor a reggeli páralecsapódás után regisztráltam a legnagyobb evapotranszpirációt azon a napon. Ennek egyik lehetséges oka, hogy a növényeken lévő sztómák a páralecsapódás után hirtelen nyíltak ki és a nyomáskiegyenlítés miatt ekkor transzspiráltak a legjobban.

Volt olyan tavaszi nap, amikor az óránkénti evapotranszpiráció a napi evapotranszpiráció 16%-át tette ki, ami azt jelenti, hogy ez az érték az óránkénti átlagos terhelés 415%-a. Nyáron ez az érték 229%, míg ősszel 150% volt. Tavasszal és nyáron a betöményedés jelentős hatással volt az elfolyó vízminőségére. A páralecsapódás bár rövid ideig, de ezt a betöményedést enyhítheti, ezért látható, hogy miért ilyen szélsőségesen változik a műtárgyából elfolyó víz minősége. Az ebben a fejezetben található eredmények gyakorlati jelentőségét az 5. fejezet tartalmazza.

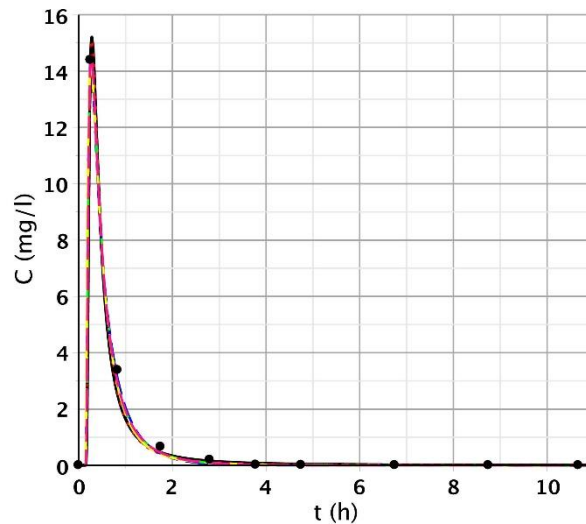
### **4.3. A transzportfolyamatok leírásához felhasznált eloszlások illesztési eredményei**

A 2.3.1. és a 3.5. fejezetekben bemutatott sűrűségfüggvényeket illesztettem az **5. mellékletben** található konzervatív nyomjelzőanyag-mérési adatsorokra hogy megnézzem, hogy a Fatigue Life, Fréchet, Inverz Gauss, LogNormal, és Pearson5 sűrűségfüggvények jobban illeszkednek-e, mint a jelenleg használatos 1 dimenziós konvektív-diszperzív (CDT) modell. Az illesztéseket a Maple szoftverben, egy egyedileg készített programban végeztem. A bemeneti adatokat az **5-6. melléklet** tartalmazza. A program részletes leírását a 3.9. fejezet tartalmazza.

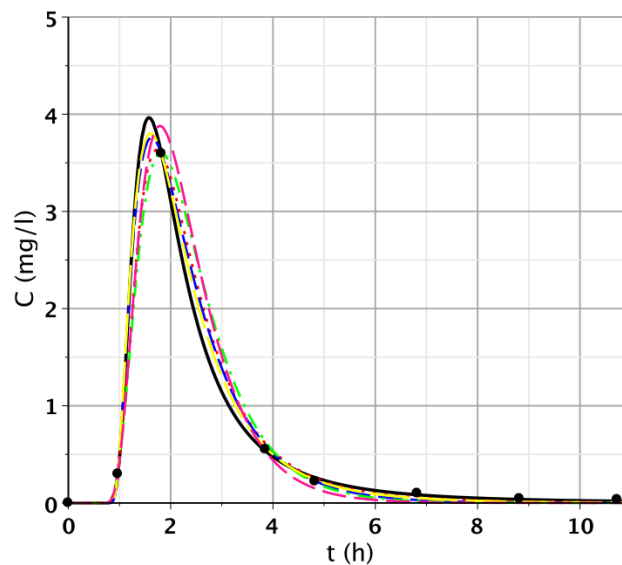
Az S/1 mérési eredmények esetében a műtárgy még csak két napja volt üzembe helyezve. Általánosságban elmondható, hogy az I-III. mérési pontokra jó illeszkedésű eredményeket kaptam. Az illesztések megfelelőségének mértékét az  $R^2$  értékéből lehet megállapítani. 0,95 érték felett jónak mondható az illeszkedés mértéke (Az  $R^2$  a 3.7. fejezetben lett definiálva). Ezen eredmények függvényképe egy gyorsan felfutó csúcsot mutat. A második keresztzelvényben (IV-VI.) szélesebb, laposabb görbéket kaptam, valószínűsíthetően azért, mert a diszperzió a nagyobb

szivárgási hossz alatt komolyabb mértékű szóródását okozta a koncentrációimpulzusnak. A VII - IX. mérési pontoknál a függvények már nem követik a mérési pontokat, nem illeszkednek megfelelően. Ezt a kijelentést az alábbi függvényképek (18-20. ábra) támasztják alá.

A 19-30. ábrákon a fekete folytonos vonal a Fréchet, a fekete pontozott vonal a Pearson5, a kék szaggatott vonal a Fatigue Life, a zöld szaggatott vonal az Inverz Gauss, a sárga a LogNormal és a rózsaszín szaggatott vonal az 1 dimenziós konvektív-diszperzív transzportmodellt mutatja.

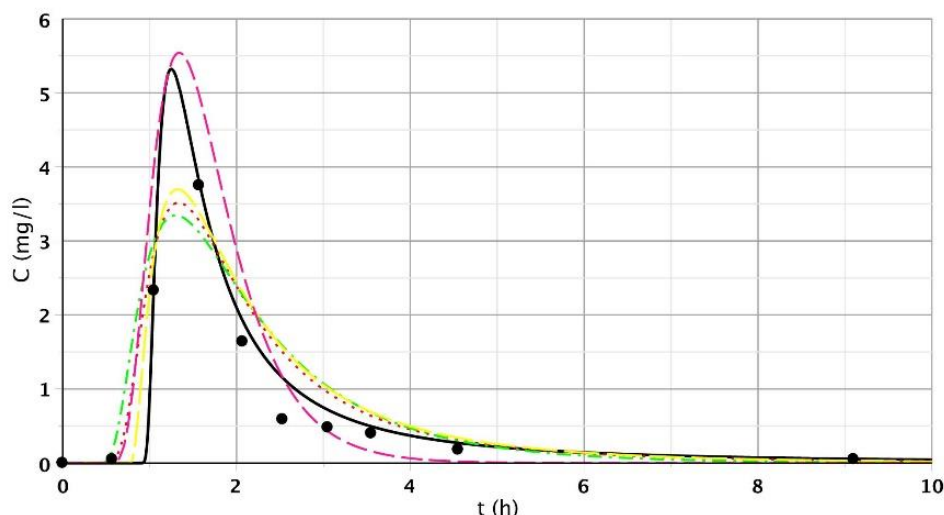


19. ábra: Az 5 sűrűségfüggvény és a CDT-modell illesztési eredménye az S/1 I. felső pontnál



20. ábra: Az 5 sűrűségfüggvény és a CDT-modell illesztési eredménye az S/1 V. alsó pontnál





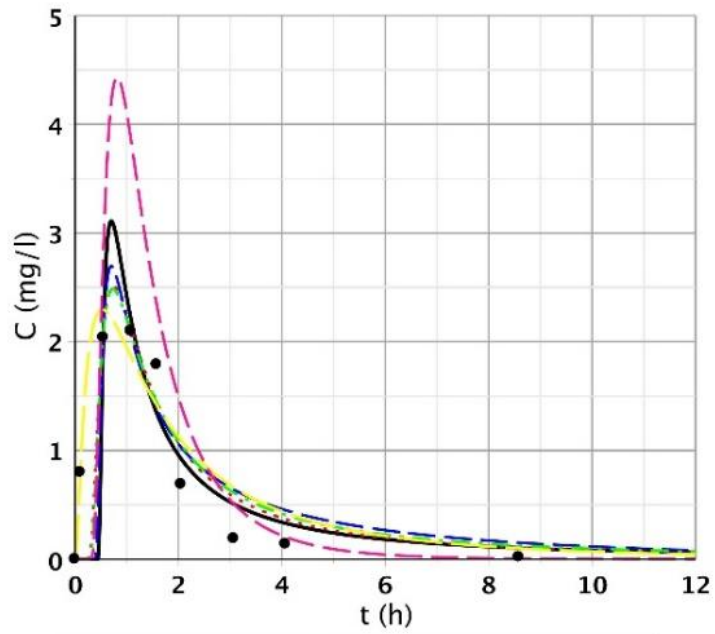
**21. ábra: Az 5 sűrűségfüggvény és a CDT-modell illesztési eredménye az S/1 VII. alsó pontnál**

Az alsó VII. pont volt az első, ahol rossz illeszkedési eredményeket kaptam, ez látható a 8. táblázatban is. Voltak olyan függvények, melyek nem tudták követni a mért pontokat, csak a Fréchet-függvény adott 0,95 feletti illeszkedési értéket.

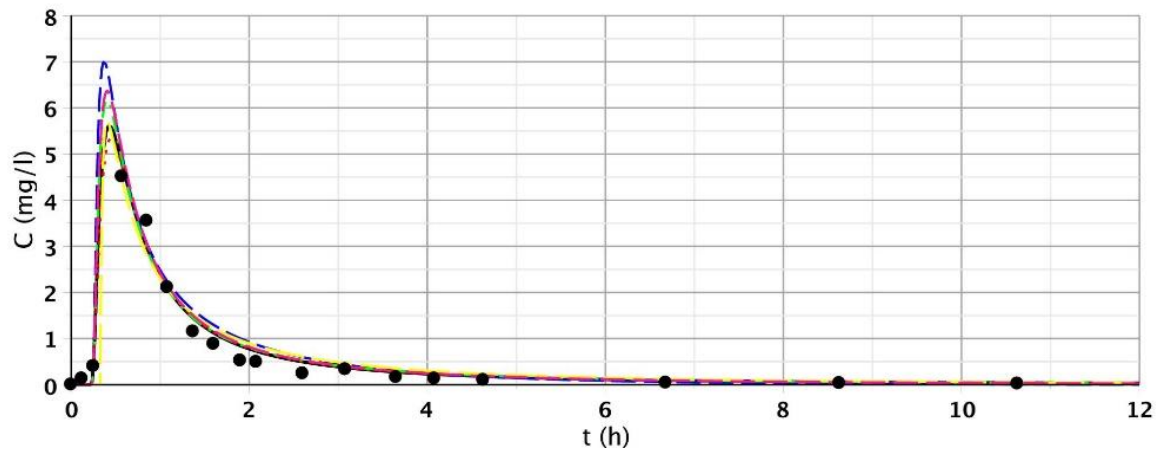
**8. táblázat: VII. alsó pont  $R^2$  értéke a különböző függvényekre**

Függvénytípus	$R^2$ értéke
Fatigue Life	0,8047
Fréchet	0,9651
Inverz Gauss	0,8126
LogNormal	0,8481
Pearson5	0,8576

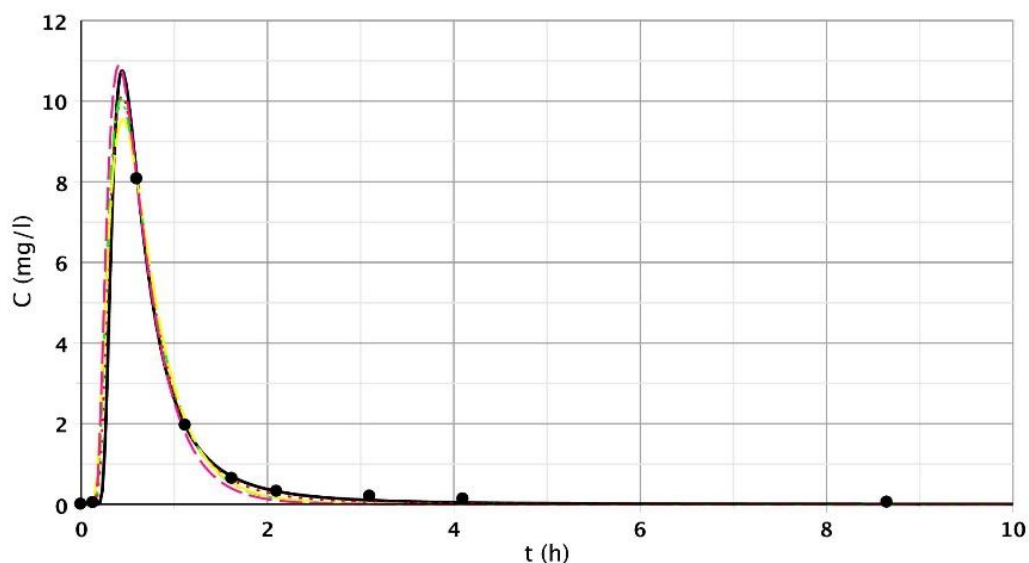
Az S/2 eredmények az 1 hónapos korú műtárgy transzportfolyamatait mutatják be (22-24. ábra). Az első három pont esetében hasonló eredményeket kaptam, mint az első mérési eredményeknél. A második keresztaszelvényben a IV. pontnál kaptam rosszabb illeszkedést, míg az V-VI. pontnál ugyanolyan jó illeszkedést kaptam, mint az első mérési eredményeknél. Ez a jelenség azt támasztja alá, hogy a keresztaszelvényben inhomogén áramlás alakult ki, mely azt jelenti, hogy a keresztaszelvényben (IV-VI.) a IV. pontnál a gyökérzet növekedése és a biofilm-aktivitás miatt lassabb áramlás alakulhatott ki. Ezzel szemben az V. és VI. pontnál az áramlás gyorsabb, mert kevesebb a gyökérzet és a biofilm-aktivitás.



22. ábra: Az 5 sűrűségfüggvény és a CDT-modell illesztési eredménye az S/2 IV. alsó pontnál



23. ábra: Az 5 sűrűségfüggvény és a CDT-modell illesztési eredménye az S/2 V. alsó pontnál

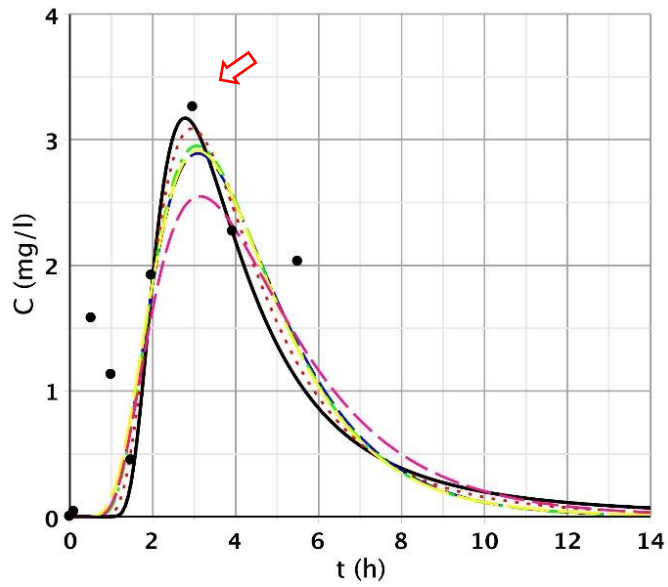


**24. ábra: Az 5 sűrűségfüggvény és a CDT-modell illesztési eredménye az S/2 VI. alsó pontnál**

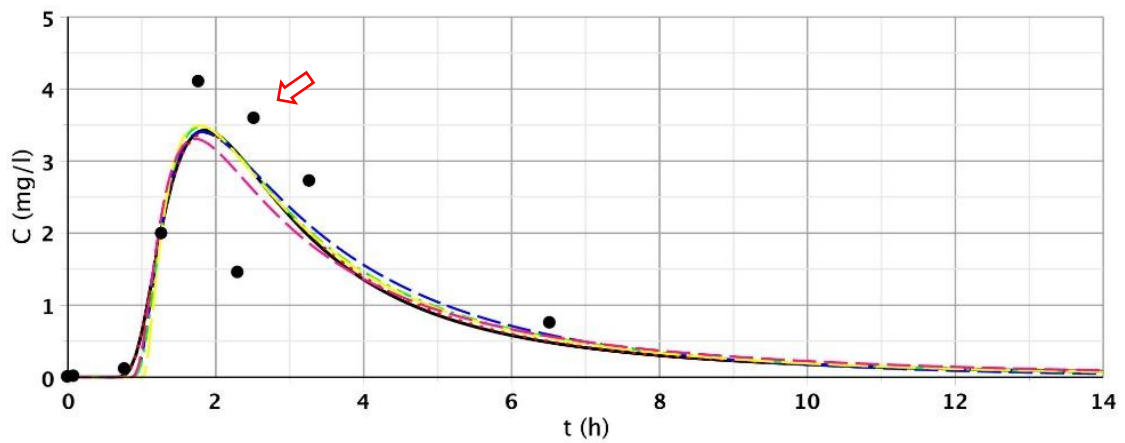
A harmadik időpont mérési eredményeire (S/3) volt a legnehezebb a függvények illesztése. Az első két szelvénynél a függvények illesztései rossz eredményt adtak. Csak a harmadik keresztmetszvény adott elfogadható értékeket. Ez a jelenség azért történhetett, mert a szennyvíz – tévedésből – mechanikai előkezelés nélkül lett feladagolva a műtárgyra, ez pedig jelentős eltömődési folyamatot eredményezett. A mechanikai előkezelés egy ülepítőmedence volt, melyet kikerülve került a műtárgyba a szennyvíz. A szűrőközeg később ki lett cserélve egy új, de ugyanolyan típusú szűrőtöltetire, így az utolsó mérési eredményeknél már ilyen probléma nem merült fel.

A függvények rossz illeszkedésének másik oka az, hogy a sás gyökérzete már erőteljesen benőtte a töltetet, így még nagyobb áramlási torzulásokat, inhomogenitásokat okozott.

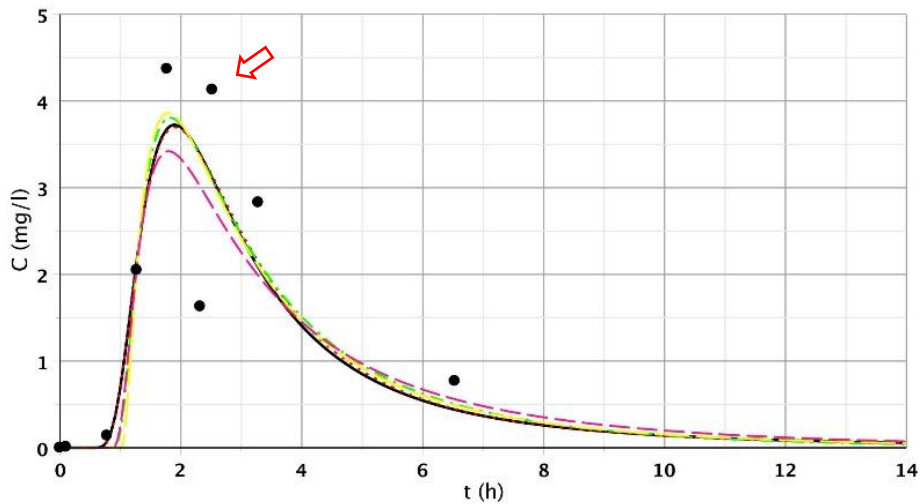
Ezek miatt az okok miatt még több holtter, intenzívebb biofilmképződés és eltömődési folyamatok indultak be, melyek miatt a mellékáram szerepe egyre jelentősebb lett. A holttereket leginkább az Inverz Gauss-függvény rossz illesztési eredményei mutatják be, illetve a hosszúra nyúlt görbe. Ez teljesen jól látszik a következő függvényképeken (25-27. ábra). A piros nyilak mutatják meg a második csúcsokat (a mellékáramot).



25. ábra: Az 5 sűrűségfüggvény és a CDT-modell illesztési eredménye az S/3 IV. alsó pontnál



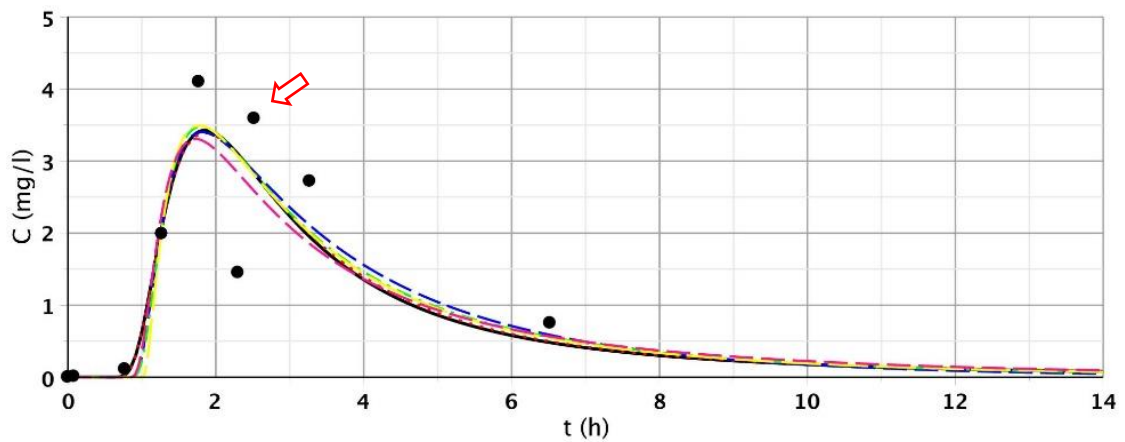
26. ábra: Az 5 sűrűségfüggvény és a CDT-modell illesztési eredménye az S/3 V. felső pontnál



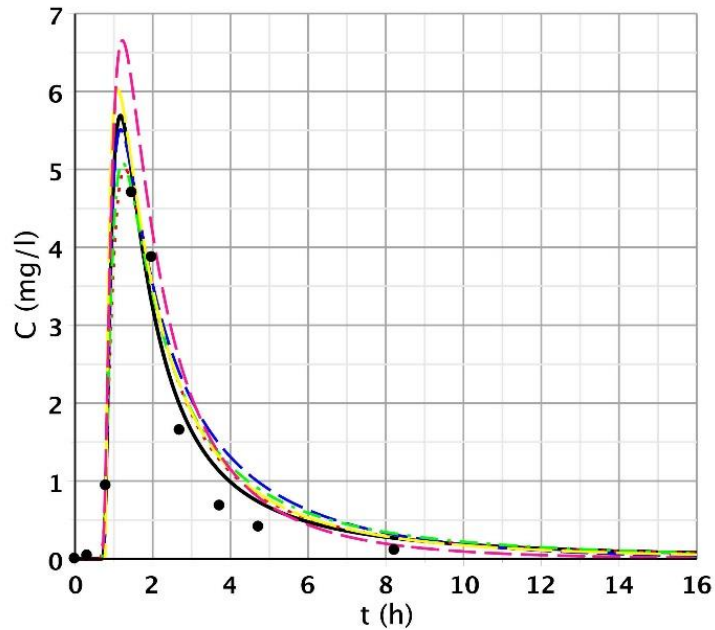
27. ábra: Az 5 sűrűségfüggvény és a CDT-modell illesztési eredménye az S/3 VI. alsó pontnál

A fenti függvényképeken jól látszik, hogy ha a válaszgörbének két csúcsa van, akkor egyik függvény sem illeszkedik jól a mért pontokra. Ezeknél a pontoknál a kifejlesztett osztott konvektív-diszperzív (D-CDT) modellre nagy szükség lesz, melynek eredményeit a 4.4. fejezet tartalmazza. Ez egyben jól jelzi a hagyományos konvektív-diszperzív modell erős korlátosságát is.

Az utolsó mérési időpontnál már jobb eredményeket kaptam, mivel a régi szűrőtöltetet kicserélték a műtárgy első eltömődött harmadában. Ha összehasonlítjuk az S/3 és az S/4 V. pont mérési eredményét (28-29. ábra), látható, hogy miután mérséklődött az eltömődés, sikerült jobb illeszkedéseket elérni az utolsó mérési időpontra.

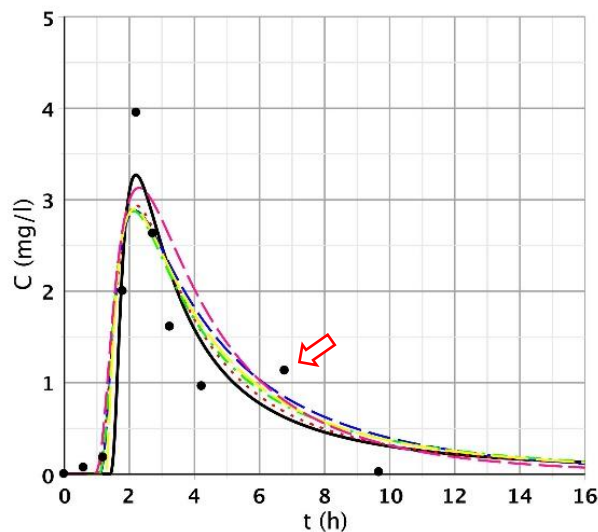


28. ábra: Az 5 sűrűségfüggvény és a CDT-modell illesztési eredménye az S/3 V. felső pontnál



**29. ábra: Az 5 sűrűségfüggvény és a CDT-modell illesztési eredménye az S/4 V. felső pontnál**

Az eredmények teljesen különbözőek az S/3 eredményeitől, mivel a szűrőközeg cseréje után kevesebb ponttal jelent meg a két csúcs, de itt is voltak olyan kétszűcsű függvények, melyekre nagyon rossz illesztési eredményeket kaptam. Az Inverz Gauss-függvény esetében két pontnál is manuálisan kellett beállítanom a paramétereket, de így is nagyon rossz illeszkedést kaptam. Ezeknél a pontoknál nagy jelentősége lesz az osztott konvektív-diszperzív modellnek, mely nem csak az első csúcsra, de a második csúcsra is jól illeszkedik, így jóval jobb illesztési eredményeket ad, mint a jelenleg használatos CDT-modell. Ez jól látható a 30. ábrán.



**30. ábra: Az 5 sűrűségfüggvény és a CDT-modell illesztési eredménye az S/4 VIII. alsó pontnál**

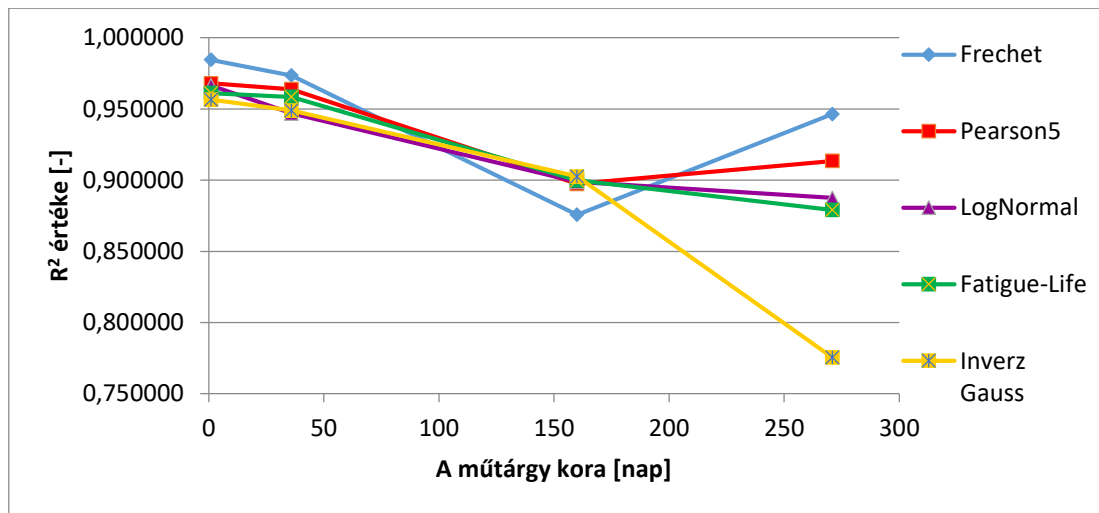
Vizsgáltam a mérési eredményeket abból a szempontból is, hogy a műtárgy korának előrehaladásával hogyan változtak az eredmények. Először az összes függvényre vonatkozóan minden időpontra meghatároztam az  $R^2$  átlagokat, ezt a 9. táblázat mutatja be.

**9. táblázat: Az  $R^2$  átlagai az egyes mérési időpontokban az egyes függvényekre az illesztés sorrendjében**

Függvénytípusok	$R^2$ értékek			
	2007.09.02	2007.10.07	2008.02.08	2008.05.29
Fréchet	0,984546	0,973443	0,875733	0,946450
Pearson5	0,967940	0,963841	0,897407	0,913429
LogNormal	0,966497	0,946875	0,898795	0,887550
Fatigue-Life	0,961163	0,958451	0,899836	0,879096
Inverz Gauss	0,956540	0,948844	0,902576	0,775451

A 9. táblázatban látható, hogy amikor még a műtárgy új volt, mindegyik függvény nagyon jó illesztési eredményeket adott. De ahogy a műtárgyban elindultak olyan folyamatok, mint a gyökérzet növekedése vagy a biofilm-aktivitás, a függvények egyre kevésbé tudták követni a mért koncentrációértékeket. A **6.1. melléklet**ben az összes  $R^2$  érték megtalálható. Még így is a legtöbb függvény jobb  $R^2$  értékeket adott, mint a legnépszerűbben alkalmazott CDT-modell.

0,95 az az  $R^2$  határérték, amit meghatároztam, ez alatt rossznak, ez felett jónak mondható az illeszkedés mértéke. Ezt az értéket úgy határoztam meg, hogy a jelenlegi modelleknél jobb illeszkedést adjon. A 31. ábra mutatja az  $R^2$  értékek alakulását az időben a függvények szerint. A hipotézisem az volt, hogy mindegyik függvény illeszkedése romlani fog az idővel, de ez – mint az ábrán is látható – nem így van. Csak a harmadik mérési időpontig jelenthető ki, hogy mindegyik függvény egyre rosszabb illesztési eredményeket produkált. Ennek magyarázata a harmadik mérési időpont utáni töltetcsere lehet. Ha a válaszgörbe egycsúcsú, akkor a Fréchet-sűrűségfüggvény az, ami a legjobban illeszkedik, de ha kétcsúcsú a válaszgörbe, akkor a hagyományos eloszlások sűrűségfüggvényei önmagukban nem alkalmasak precíz vizsgálatra.



**31. ábra: A függvények illeszkedésének alakulása a műtárgy korának függvényében**

Azt is vizsgáltam, hogy az alsó és felső pontoknál milyen volt az illeszkedés mértéke. Minden egyes mérési alkalommal meg lett mérve egy átlagos gyökér hossza és kiterjedése. A telepített *Carex elatának* gömbformájú gyökérzete van, ez látható a 32. ábrán. Ezen gyökerek miatt könnyen kialakulhatnak visszakeveredések a műtárgyban, illetve lassabb áramlási zónák.

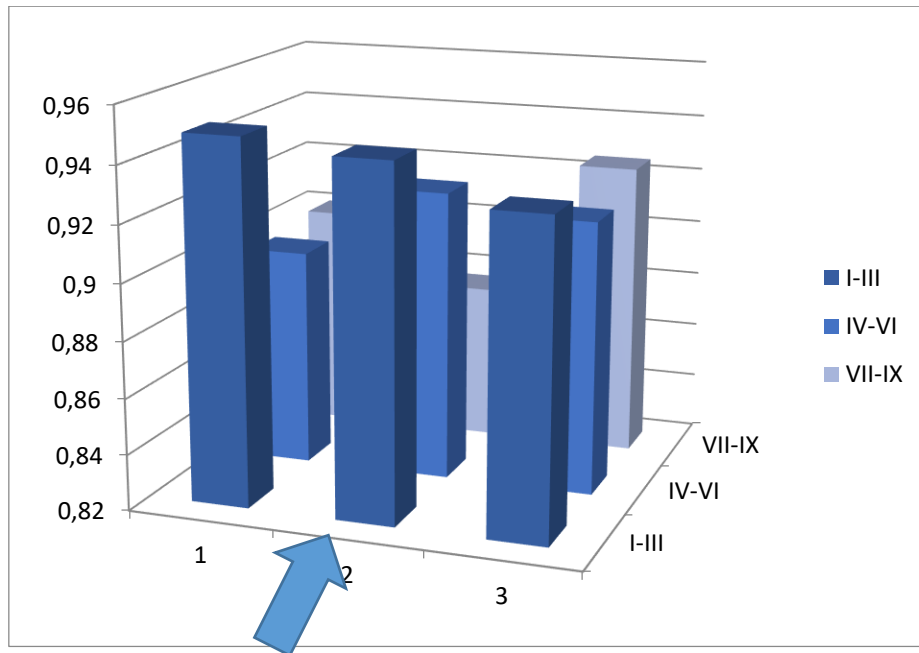


**32. ábra: A sás rhizoma rendszere a töltetben (DITTRICH 2016)**

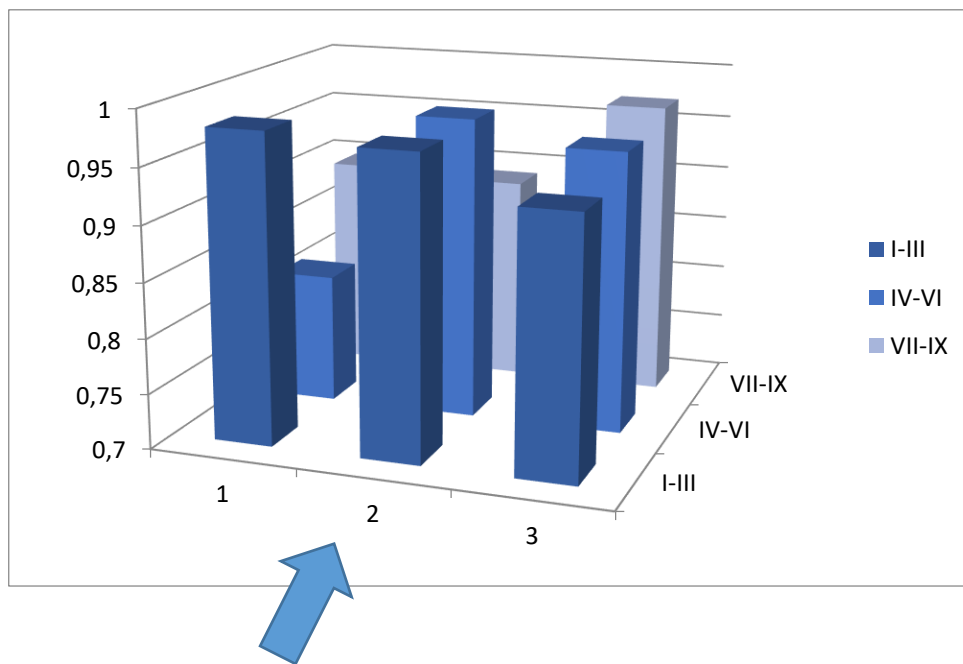
Az áramlási képet külön vizsgáltam az alsó és felső pontokra. Az átlagokat úgy számítottam ki, hogy az adott mérési pont minden időpontjára mind az öt eloszlás eredményét átlagoltam, így megkaptam az egyes mérési pontokra vonatkozó  $R^2$  átlagokat. Azt feltételeztem, hogy a jobb eredményeket a középső sáv, azaz a II., V., VIII. pontok fogják adni, a legkevésbé pedig az I., III., VII., IX. pontok fognak illeszkedni. A nyíl szimbolizálja a szennyvíz műtárgyba való beáramlásának irányát.

Az ábrákon (33-34.) a függőleges tengelyen az  $R^2$ -ek értéke szerepel, a vízszintes tengelyen pedig a hosszirányú (1-3.) és keresztirányú (I-III.; IV-VI.; VII-IX.) metszet szerepel.





**33. ábra: Az illesszkedés mértéke az I-IX. felső pontokra**



**34. ábra: Az illesszkedés mértéke az I-IX. alsó pontokra**

Várakozásommal ellentétben teljesen más áramlási képet kaptam. A feltételezésem, hogy a műtárgy sarkaiban, leginkább a holtteresedés miatt rosszabb illesszkedési eredményeket kapok, megcáfolódott.

Az eredmények szerint az illeszkedés mértéke nem a műtárgy alakjától, hanem a térfogatáram eloszlásától függ. Ezeket az eredményeket támasztják alá a 4.4.2. fejezetben található eredmények is.

*10. táblázat: A függvények R<sup>2</sup> értékeinek alakulása a felső és alsó pontokon*

Sűrűségfüggvény-típusok	Felső		Alsó	
	Felső pontok R <sup>2</sup> átlagos értéke	Sorrend	Alsó pontok R <sup>2</sup> átlagos értéke	Sorrend
<b>Fréchet</b>	0,948576	1	0,941510	1
<b>Pearson5</b>	0,936302	2	0,935006	2
<b>Fatigue Life</b>	0,921510	3	0,927763	4
<b>LogNormal</b>	0,917511	4	0,932348	3
<b>Inverz Gauss</b>	0,868013	5	0,923692	5

A 10. táblázatban látható, hogy az alsó pontok sokkal kiegyensúlyozottabbak és magasabb értékeket eredményeznek, mint a felsők. A felső pontok tekintetében csak a Fréchet és Pearson5 eloszlások adtak jobb illeszkedést az alsónál. A felső pontoknál kiemelném az Inverz Gauss nagyon rossz eredményét. Ha a függvénysorrendet nézzük, akkor elmondható, hogy a Fréchet és a Pearson5 azok a függvények, amik a felső és alsó pontoknál is az első két helyen végeztek. Az Inverz Gauss-eloszlás mind a két esetben az utolsó lett. **A felső rétegben lassabb áramlás alakult ki és sűrűbb gyökérzet, így ezeken a helyeken több holtter illetve intenzív biofilmképződés van, melyekhez ezek a függvények nehezen alkalmazkodnak.** Ez azt is jelenti, hogy a fő áramlás a műtárgy alsó rétegeiben alakul ki. Erre a konklúzióra jutott BONNER et al. (2017) és LIU et al. (2018) is a saját méréseik esetében.

11. táblázat: A belső pontok végleges sorrendjének összehasonlítása a X. pont eredményeivel

Sűrűségfüggvény-típus	X.	Sorrend	I-IX.	Sorrend
Fréchet	0,9867	1	0,9450	1
Pearson5	0,9839	2	0,9357	2
LogNormal	<b>0,9769</b>	<b>4</b>	<b>0,9249</b>	<b>3</b>
Fatigue Life	<b>0,9779</b>	<b>3</b>	<b>0,9246</b>	<b>4</b>
Inverz Gauss	0,9714	5	0,8959	5

A 11. táblázat második és harmadik oszlopában láthatóak az elfolyási pont eredményei és a függvények sorrendje (DITTRICH és KLINCSIK 2015a), míg a negyedik és ötödik oszlopban a belső pontok eredményei és a függvények sorrendje. Mind a két esetben a Fréchet és a Pearson5 függvények végeztek az első két helyen, a legrosszabb pedig az Inverz Gauss lett.

Fontos megjegyezni, hogy a belső pontok esetében az átlagtól való eltérés magasabb volt, mint az elfolyópont esetében, és, hogy rosszabb illeszkedéseket kaptam, mint az elfolyópont esetében, emellett egyik függvény sem érte el a 0,95-ös  $R^2$  értéket. Ennek oka, hogy a kifolyási szelvényben az eltérő irányból érkező folyadékszálak által szállított nyomjelző anyag integrálódik. Ezért az áramlástanai torzulások egy része egymást kiegyenlíti. A kifolyási szelvényben így „kisimultabb” görbét adó mérési eredmények adódnak, mint a belső pontokban. **Kutatásom egyedisége és értéke pont ebben fejezhető ki, hogy diverzebben változó rendszerben végeztem el ezeket az elemzéseket.** Ezeket figyelembe véve komoly meglepetést és tudományos eredményt hozott, hogy a belső pontokon mért szélsőségesebb folyamatok esetében is ugyanaz az eloszlásfüggvény adta a legjobb illeszkedést. A Fréchet-eloszlást extrém események becslésére használják, elsősorban rugalmassága miatt, ezért lehetséges, hogy a belső pontokon is ez az eloszlás adta a legjobb illeszkedést. A Fréchet-eloszlást gyökérváltoztatás műtárgyak belső pontjainak illesztésére ismereteim szerint más szerző még nem elemezte.

#### **4.3.1. Részösszefoglaló, kapott eredmények jelentősége**

Olyan sűrűségfüggvényeket vizsgáltam, melyek jobban illeszkednek a konzervatív nyomjelzőanyag-mérési eredményekre, mint a jelenleg használatos modellek.

Meghatároztam, hogy az Inverz Gauss-függvény lett a legrosszabb illeszkedésű, illetve két mérési válaszgörbe esetében manuálisan kellett változtatni a paramétereken, hogy illeszteni tudjam. Az analitikus megoldása a CDT-modellnek Inverz Gauss eloszlású, így kimondható, hogy a jelenleg használatos CDT-modell nem alkalmas pontos modellezésre, mivel az  $R^2$  érték nem érte el a 0,95-ös határértéket. A hiba a műtárgy korának növekedésével nő.

A Fatigue Life és a Lognormal eloszlások a 3. és 4. helyet foglalták el a rangsorban. A második és első helyen a Pearson5 és a Fréchet-eloszlás található. A Fréchet jobban követi a válaszgörbéket, így elmondható, hogy a sással ültetett kavicstöltetű hosszanti átfolyású gyökérvénás műtárgyak konzervatív nyomjelzőanyag-méréseiből kapott válaszgörbéi Fréchet eloszlásúak a műtárgy belső pontjaiban is. Ahol a válaszgörbének két csúcsa van, ott hagyományos eloszlásfüggvényekkel történő vizsgálat nem alkalmas elemzésre.

Vizsgáltam az alsó és felső mérési eredmények illeszkedését is, amiből azt a következtetést lehet levonni, hogy a felső rétegek rossz illesztési eredményei a sűrűbb gyökérvénás, a holtteredésnek és az intenzívebb biofilmképződésnek köszönhetők. Ezáltal kimondható, hogy a fő áramlás az alsó rétegekben történik.

#### **4.4. 1 dimenziós konvektív-diszperzív transzportmodell és 1 dimenziós osztott konvektív-diszperzív modell használata hosszanti átfolyású gyökérvénás műtárgyakra**

##### **4.4.1. A konvektív-diszperzív folyamatot szimuláló illesztési eljárás és az 1 dimenziós osztott konvektív-diszperzív modell illesztési eredményei**

A 3.10. fejezetben bemutatott modellt illesztettem az 5. ábrán látható műtárgy belső pontjaiban vett nyomjelzőanyag-mérési eredményekre (S/1, S/2, S/3, S/4). A belső pontokban mind felső, mind alsó mintavételezés is történt elsősorban azért, hogy megvizsgáljam, mennyire térnek el a felső és alsó részekben az áramlási folyamatok. **A cél az volt, hogy bebizonyítsam, hogy a belső pontokra is alkalmazható a kifejlesztett osztott konvektív-diszperzív transzport modell (D-CDT) (DITTRICH és KLINCSIK 2015b), nemcsak az elfolyópontra. További célom az volt, hogy a nemzetközi szakirodalomban leginkább használt konvektív-diszperzív (CDT) modell**

**pontatlanságát a belső pontokon is igazoljam.** Továbbá az eredmények segítenek jobban megérteni a transzportfolyamatokat ezekben a műtárgyakban.

Az alábbi táblázatokban összegeztem a D-CDT, CDT modellek és a Fréchet-eloszlás illesztési eredményeit. A 12-13. táblázatokban látható, hogy a D-CDT-modell jobban illeszkedik a mért pontokra, mint a Fréchet sűrűségfüggvény vagy a CDT-modell. A D-CDT átlag  $R^2$  értékei 0,96 fölött vannak. A második mérési időpontnál kaptam a legnagyobb eltérést a két modell között: 0,97 és 0,88 a D-CDT-modell javára.

**12. táblázat: Fréchet sűrűségfüggvény, a jelenleg használt CDT-modell és a kifejlesztett D-CDT-modell  $R^2$  értékei az S/1-S/2 mérési eredményekre**

Referencia-szám	Fréchet sűrűség-függvény	CDT-modell	D-CDT-modell	Referencia-szám	Fréchet sűrűség-függvény	CDT-modell	D-CDT-modell
S/1							
I <sub>f</sub>	1,000	0,999	1,000	I <sub>a</sub>	0,999	0,991	1,000
II <sub>f</sub>	0,995	0,999	1,000	II <sub>a</sub>	0,982	0,992	1,000
III <sub>f</sub>	0,993	0,999	1,000	III <sub>a</sub>	0,988	0,998	1,000
IV <sub>f</sub>	1,000	1,000	1,000	IV <sub>a</sub>	0,993	0,996	1,000
V <sub>f</sub>	1,000	0,836	1,000	V <sub>a</sub>	1,000	0,999	1,000
VI <sub>f</sub>	0,991	0,997	1,000	VI <sub>a</sub>	0,973	0,992	1,000
VII <sub>f</sub>	0,977	0,983	0,988	VII <sub>a</sub>	0,965	0,967	0,998
VIII <sub>f</sub>	0,926	0,935	0,993	VIII <sub>a</sub>	0,944	0,942	0,997
IX <sub>f</sub>	0,999	0,993	0,999	IX <sub>a</sub>	0,998	0,984	0,999
Átlag	0,987	0,971	0,998	Átlag	0,983	0,984	0,999
S/2							
I <sub>f</sub>	0,998	0,993	0,996	I <sub>a</sub>	1,000	1,000	1,000
II <sub>f</sub>	0,977	0,973	0,976	II <sub>a</sub>	0,989	0,990	0,996
III <sub>f</sub>	0,997	0,997	1,000	III <sub>a</sub>	0,917	0,161	0,921
IV <sub>f</sub>	0,988	0,956	0,987	IV <sub>a</sub>	0,831	0,864	0,861
V <sub>f</sub>	0,975	0,975	0,991	V <sub>a</sub>	0,970	0,970	0,996
VI <sub>f</sub>	1,000	0,997	0,998	VI <sub>a</sub>	1,000	0,999	0,999
VII <sub>f</sub>	0,976	0,986	0,996	VII <sub>a</sub>	0,994	0,988	0,997
VIII <sub>f</sub>	0,955	0,972	0,993	VIII <sub>a</sub>	0,967	0,968	0,995
IX <sub>f</sub>	0,999	0,987	0,998	IX <sub>a</sub>	0,989	0,982	0,989
Átlag	0,985	0,979	0,993	Átlag	0,962	0,880	0,973

**13. táblázat: Fréchet sűrűségfüggvény, a jelenleg használt CDT-modell és a kifejlesztett D-CDT-modell  $R^2$  értékei az S/3-S/4 mérési eredményekre**

Referencia-szám	Fréchet sűrűségfüggvény	CDT-modell	D-CDT-modell	Referencia-szám	Fréchet sűrűségfüggvény	CDT-modell	D-CDT-modell
S/3							
I <sub>f</sub>	0,980	0,988	0,990	I <sub>a</sub>	0,982	0,981	0,990
II <sub>f</sub>	0,995	0,986	0,996	II <sub>a</sub>	0,807	0,963	0,970
III <sub>f</sub>	0,990	0,986	0,997	III <sub>a</sub>	0,829	0,936	0,944
IV <sub>f</sub>	0,793	0,802	0,975	IV <sub>a</sub>	0,512	0,714	0,833
V <sub>f</sub>	0,773	0,790	0,994	V <sub>a</sub>	0,928	0,973	0,975
VI <sub>f</sub>	0,775	0,795	0,992	VI <sub>a</sub>	0,844	0,913	0,933
VII <sub>f</sub>	0,822	0,925	0,972	VII <sub>a</sub>	0,926	0,940	0,966
VIII <sub>f</sub>	0,986	0,987	0,987	VIII <sub>a</sub>	0,877	0,908	0,977
IX <sub>f</sub>	0,995	0,997	0,999	IX <sub>a</sub>	0,950	0,990	0,991
Átlag	0,901	0,917	0,989	Átlag	0,851	0,917	0,953
S/4							
I <sub>f</sub>	0,941	0,810	0,964	I <sub>a</sub>	0,982	0,979	0,990
II <sub>f</sub>	0,980	0,945	0,979	II <sub>a</sub>	0,995	0,968	0,991
III <sub>f</sub>	0,960	0,870	0,990	III <sub>a</sub>	0,994	0,995	0,991
IV <sub>f</sub>	0,953	0,935	0,989	IV <sub>a</sub>	0,983	0,950	0,994
V <sub>f</sub>	0,966	0,977	0,989	V <sub>a</sub>	0,995	0,992	0,999
VI <sub>f</sub>	0,956	0,973	0,981	VI <sub>a</sub>	0,989	0,986	0,999
VII <sub>f</sub>	0,824	0,864	0,973	VII <sub>a</sub>	0,940	0,935	0,989
VIII <sub>f</sub>	0,898	0,941	0,955	VIII <sub>a</sub>	0,897	0,823	0,975
IX <sub>f</sub>	0,819	0,943	0,993	IX <sub>a</sub>	0,966	0,968	0,990
Átlag	0,922	0,918	0,979	Átlag	0,971	0,955	0,991

S/1 mérési eredményeknél (12. táblázat) kaptam a legjobb illeszkedést a 4 mérési időpont közül. Az első mérési alkalomnál még csak 2 napja működött a szennyvíztisztító, így sem a gyökérzet, sem a biofilmképződés nem befolyásolta az áramlást a műtárgyban. Ezen okok miatt nem alakulhatott ki hidraulikai torzulás. Az eredményekből jól látható, hogy a D-CDT-modell minden esetben jobban illeszkedik a mérési eredményekre, mint a jól illeszkedő Fréchet sűrűségfüggvény és a jelenleg népszerű CDT-modell.

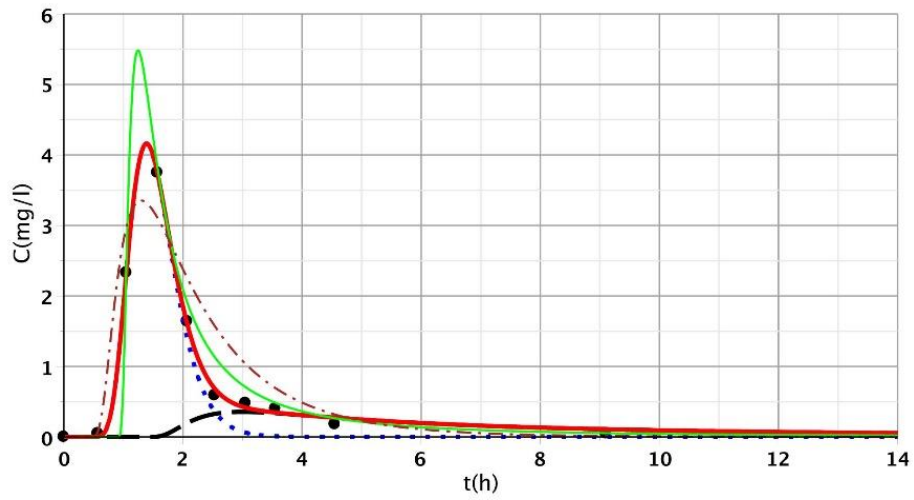
Az S/2 mérési eredményeknél a műtárgy 1 hónapos volt, és ez már meg is látszik az illesztéseken. A D-CDT-modell még így is 0,95 értéknél magasabb  $R^2$  eredményeket adott. A IV. alsó pontnál egy hidraulikai rövidzárlat miatt minden függvényre rosszabb illeszkedést kaptam, de ennél a pontnál is a D-CDT-modell adta a legjobb illeszkedést. A D-CDT-modell emiatt a pont miatt fejlesztésre szorul, hogy a jelentősebb mértékű hidraulikai rövidzárlatok esetében is jó illeszkedést adjon.

Az S/3 eredményeknél (13. táblázat) a D-CDT-modell esetében hasonló eredményeket kaptam, mint a második mérési időpontnál, de a CDT-modell és a Fréchet-függvény esetében jóval rosszabb illeszkedést kaptam. A III., IV. és a VI. alsó pontoknál extrém hidraulikai rövidzárlat okozta a nagyon rossz illeszkedést. Ezen pontok esetében a D-CDT-modell viszont sokkal jobban illeszkedett a mérési pontokra, mint a másik két függvény.

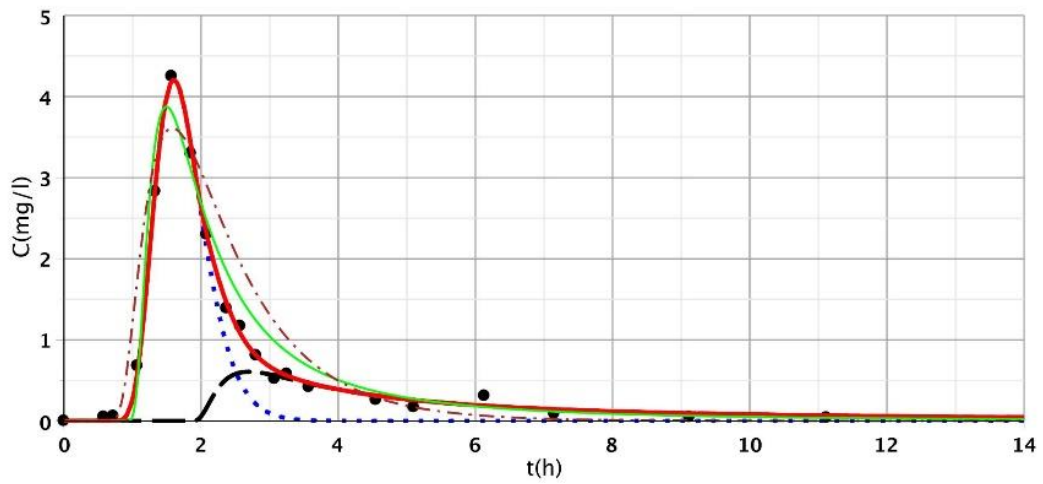
Az S/4 mérés eredményeit tekintve a három függvény különbözőségeket mutatott. A D-CDT-modell sokkal jobb illesztési eredményeket produkált, mint a másik két eljárás. Ez az állítás leginkább az I., III. és VII. felső pontokra igaz, ahol a CDT-modellnek nagyon rossz illesztési eredményei lettek, míg a D-CDT-modellnek nagyon jók.

A 35-43. ábrák bemutatják a D-CDT-modell, a Fréchet-függvény, illetve a nemzetközileg használatos CDT-modell eredményeit. Az összes függvénykép a **7.2. mellékletben** található.

A 35-43. ábrákon a diszkrét pontok a mérési eredményeket, a kék pontvonal az 1. Inverz Gauss-görbét, a fekete szaggatott vonal a 2. Inverz Gauss-görbét, a zöld folytonos vonal a Fréchet-eloszlást, a piros szaggatott vonal az 1 dimenziós konvektív-diszperzív transzportmodellt, a piros folytonos vonal pedig az 1 dimenziós osztott konvektív-diszperzív transzportmodellt mutatja.

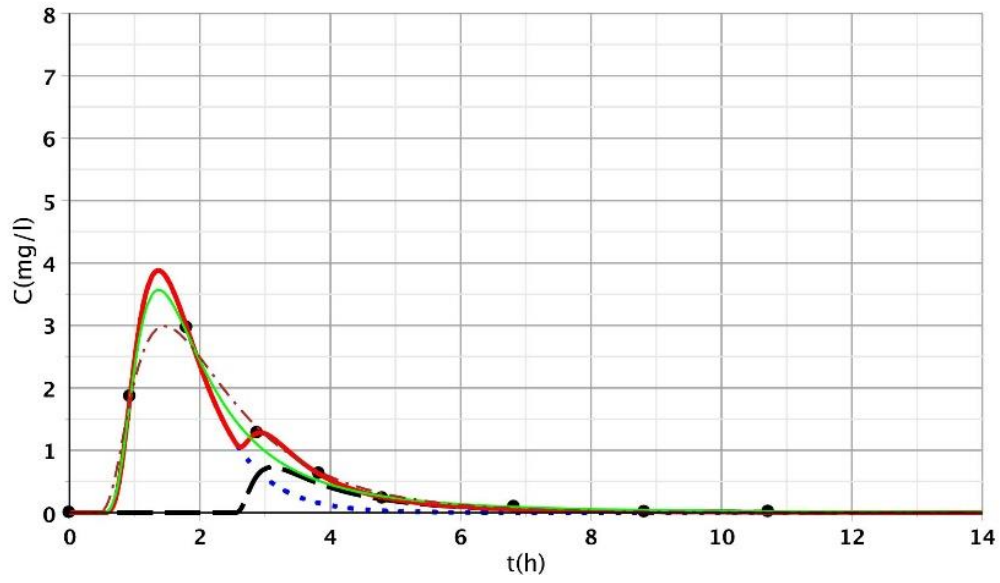


35. ábra: A három modell illesztési eredményei (D-CDT, Fréchet, CDT) az S/I VII. alsó ponton

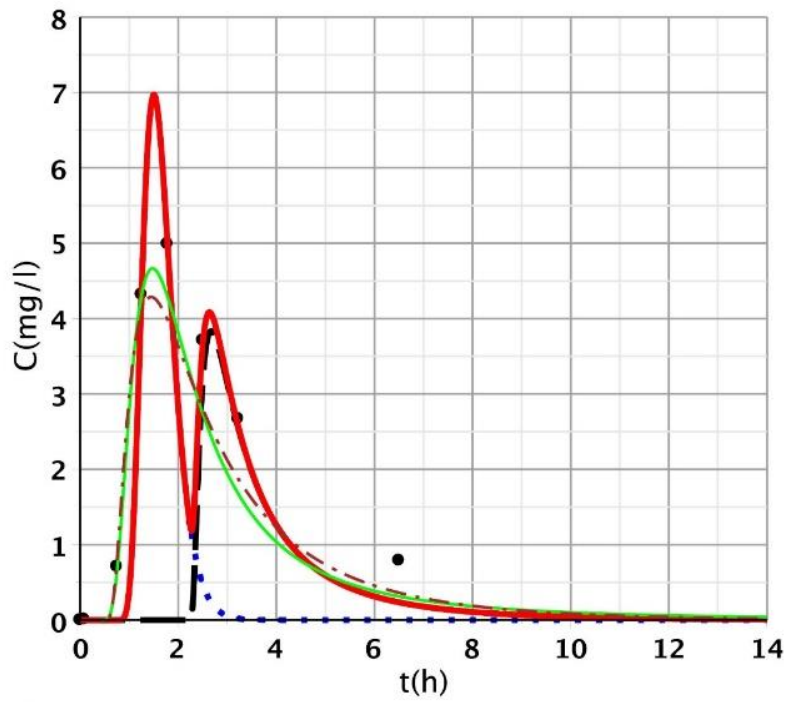


36. ábra: A három modell illesztési eredményei (D-CDT, Fréchet, CDT) az S/I VIII. alsó ponton

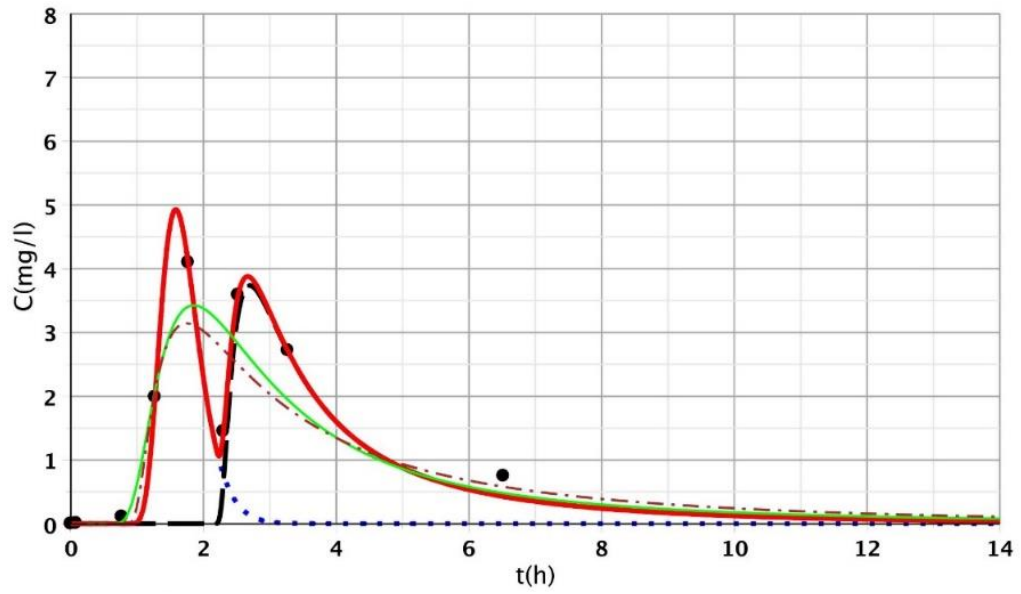




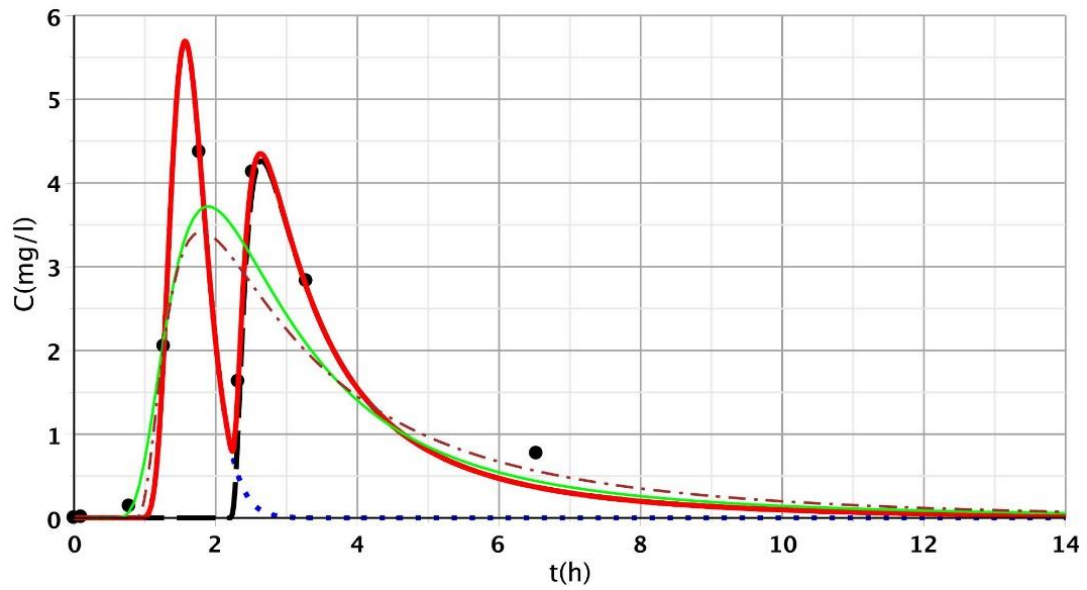
37. ábra: A három modell illesztési eredményei (D-CDT, Fréchet, CDT) az S/2 IV. alsó ponton



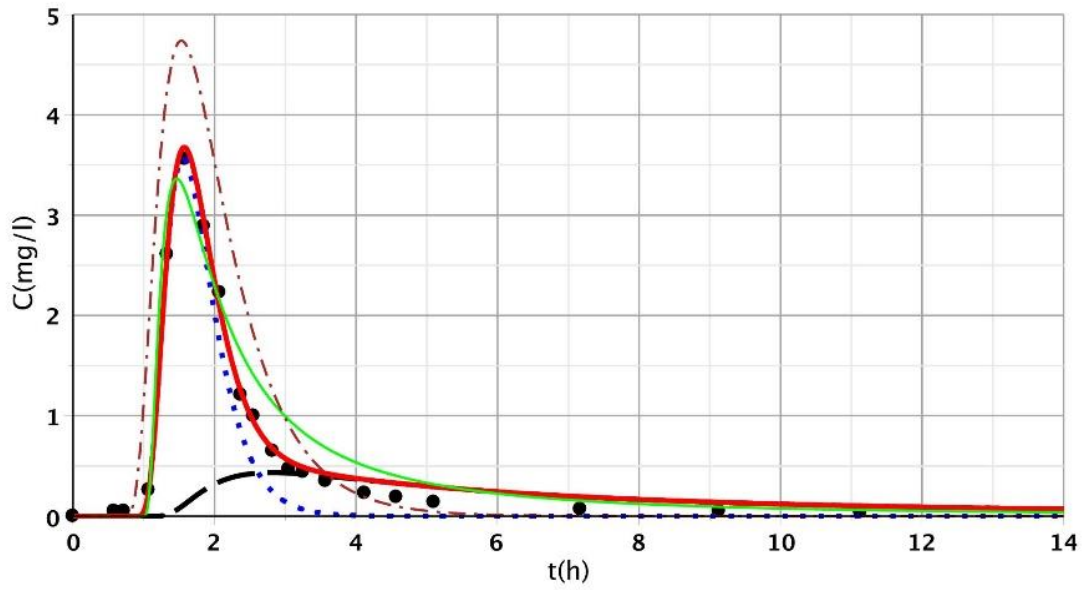
38. ábra: A három modell illesztési eredményei (D-CDT, Fréchet, CDT) az S/3 IV. felső ponton



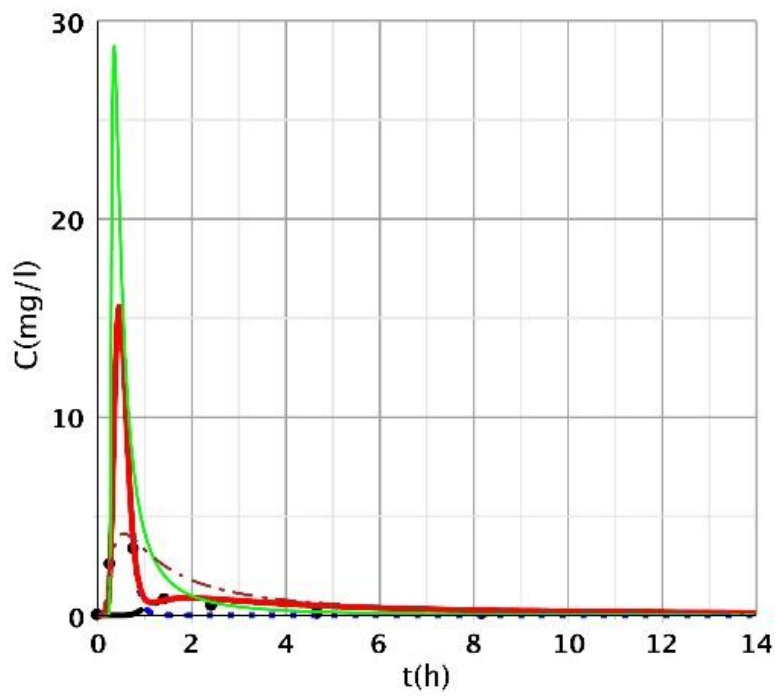
39. ábra: A három modell illesztési eredményei (D-CDT, Fréchet, CDT) az S/3 V. felső ponton



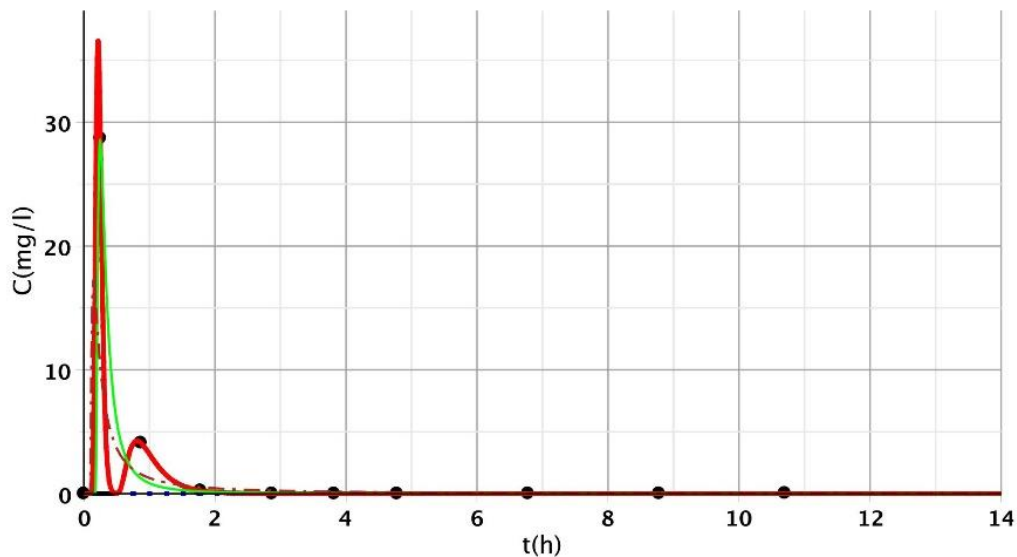
40. ábra: A három modell illesztési eredményei (D-CDT, Fréchet, CDT) az S/3 VI. felső ponton



41. ábra: A három modell illesztési eredményei (D-CDT, Fréchet, CDT) az S/1 VIII. felső ponton



42. ábra: A három modell illesztési eredményei (D-CDT, Fréchet, CDT) az S/4 I. felső ponton



43. ábra: A három modell illesztési eredményei (D-CDT, Fréchet, CDT) az S/2 III. alsó ponton

A fenti ábrából egyértelműen látható, hogy míg a jelenleg használatos CDT-modell, illetve a Fréchet nem tudja követni a második csúcsokat, addig a D-CDT modell ezekre is illeszkedik.

14. táblázat: A mérési eredmények s átlagértékei

Mérési időpontok	s átlag- értéke
S/1. felső	0,62
S/1. alsó	0,67
S/2. felső	0,62
S/2. alsó	0,61
S/3. felső	0,54
S/3. alsó	0,58
S/4. felső	0,43
S/4. alsó	0,51

Ha összehasonlítjuk az  $s$  értékeket (14. táblázat) – az  $s$  érték magyarázata a 3.10. fejezetben található –, akkor látható, hogy a felső pontoknál az első és második mérési időpontnál hasonló, de a harmadik és negyediknél már folyamatos csökkenés figyelhető meg. Ez azt jelenti, hogy a mikropórusrendszer jelenléte az idő függvényében növekedik a teljes pórustérfogathoz képest 38%-ról 57%-ra.

Az alsó pontok értékeinél látható, hogy folyamatosan csökken az  $s$  értéke. Itt is azt lehet mondani, hogy a mikropórus jelenléte folyamatosan növekszik 32,9%-ról 49%-ra. A felső rétegben nagyobb

arányban kimutatott gyökérzet és biofilm-aktivitás itt is látható, hiszen a mikropórusrendszer aránya a felső rétegben nagyobb.

#### **4.4.2. Áramlási paraméterek számítása az osztott konvektív-diszperzív modell alkalmazásával, és összehasonlítása a jelenleg használatos eljárással**

A D-CDT modell előnye, hogy az illesztett függvényből kalkulálhatók a makropórusrendszer és a mikropórusrendszer áramlási jellemzői. Így a modell nem csak jó illeszkedéseket ad, hanem segítségével ténylegesen meghatározható áramlási paramétereken keresztül mélyebben megérthetők a műtárgy belsejében lezajló áramlási viszonyok. A  $v_x$ ,  $D$  és az  $R$  az első és a második Inverz Gauss-görbéből is számolható az 50-52. egyenletek segítségével. Ezt követően számítottam a visszatartási rátát és a sebesség súlyozott átlagát is a görbe alatti területek aránya szerint súlyozva. Az eredményeket a 15. és 16. táblázat tartalmazza. A mérésillesztési paramétereket a **7.1. melléklet** tartalmazza.

15. táblázat: A D-CDT-modellből az S/1 és S/2 felső és alsó pontokra kalkulált transzportparaméterek

Ref.-szám	Átlag $v_x$ (m/h)	Első Inverz Gauss-görbe				Második Inverz Gauss-görbe				Súlyozott $v_x$ (m/h)	Súlyozott R (-)
		$v_{x1}$ (m/h)	$D_1$ (m <sup>2</sup> /d)	$D_i$ (-)	$R_1$ (-)	$v_{x2}$ (m/h)	$D_2$ (m <sup>2</sup> /d)	$D_i$ (-)	$R_2$ (-)		
S/1											
I <sub>f</sub>	3,49	1,73	1,79	0,05	1,25	0,44	3,31	0,08	1,37	0,95	1,32
II <sub>f</sub>	3,49	1,16	2,52	0,06	1,04	0,38	2,73	0,07	2,71	0,89	1,63
III <sub>f</sub>	3,49	1,58	1,38	0,04	1,48	0,46	12,85	0,33	2,83	1,2	1,94
IV <sub>f</sub>	3,49	1,48	26,37	0,14	1,33	0,88	39,75	0,21	1,6	1,24	1,44
V <sub>f</sub>	3,49	1	3,07	0,02	1,01	0,16	4,63	0,03	1,07	0,83	1,02
VI <sub>f</sub>	3,49	1,32	1,92	0,01	1,01	0,62	3,8	0,02	1,73	1,15	1,19
VII <sub>f</sub>	3,49	2,68	11,5	0,04	1,14	0,44	40,42	0,12	1,06	1,9	1,12
VIII <sub>f</sub>	3,49	2,17	26,75	0,08	1,66	0,31	30,72	0,09	1,08	1,2	1,36
IX <sub>f</sub>	3,49	2,94	4,95	0,02	1,17	1,2	327,13	1,01	2,14	2,24	1,56
I <sub>a</sub>	3,49	1,89	2,95	0,07	1,19	0,28	3,47	0,09	1,74	1,17	1,44
II <sub>a</sub>	3,49	1,16	2,52	0,06	1,04	0,39	7,2	0,18	2,14	0,89	1,43
III <sub>a</sub>	3,49	2,02	0,78	0,02	1,16	0,47	1,26	0,03	1,7	1,44	1,36
IV <sub>a</sub>	3,49	1,23	9,83	0,05	1,24	0,51	25,98	0,14	2,31	1,08	1,45
V <sub>a</sub>	3,49	1,03	2,57	0,01	1	0,26	28,15	0,15	1,47	0,78	1,16
VI <sub>a</sub>	3,49	1,28	1,97	0,01	1	0,47	27,71	0,15	2,75	1,08	1,44
VII <sub>a</sub>	3,49	2,48	10,46	0,03	1,08	0,31	33,55	0,1	1,11	1,61	1,09
VIII <sub>a</sub>	3,49	2,21	8,5	0,03	1,18	0,32	63,68	0,2	1,17	1,4	1,18
IX <sub>a</sub>	3,49	2,39	8,1	0,02	1,14	1,24	33,12	0,1	1,74	2,16	1,26
S/2											
I <sub>f</sub>	4,33	1,28	1,56	0,03	1,26	0,08	28,12	0,58	1,04	0,76	1,16
II <sub>f</sub>	4,33	0,66	5,4	0,11	1,06	0,07	5,69	0,12	1,03	0,45	1,05
III <sub>f</sub>	4,33	1,95	1,61	0,03	1,1	0,57	8,93	0,18	3,55	1,63	1,66
IV <sub>f</sub>	4,33	3,02	35,56	0,15	1,07	0,17	41,24	0,18	1,15	2,16	1,1
V <sub>f</sub>	4,33	2,96	16,99	0,07	1,13	0,22	21,53	0,09	1,03	1,43	1,07
VI <sub>f</sub>	4,33	3,17	15,62	0,07	1,21	0,04	17,5	0,08	1,01	2,14	1,14
VII <sub>f</sub>	4,33	4,95	28,2	0,07	1,03	2,56	31,37	0,08	1,64	4,23	1,21
VIII <sub>f</sub>	4,33	2,93	22,35	0,06	1,21	0,38	32,84	0,08	1,05	1,63	1,13
IX <sub>f</sub>	4,33	3,77	32,34	0,08	1,56	2,08	51,66	0,13	1,6	3,09	1,57
I <sub>a</sub>	4,33	0,63	1,22	0,03	1,16	0,19	2,99	0,06	1,47	0,54	1,22
II <sub>a</sub>	4,33	0,68	1,72	0,04	1,01	0,07	2,06	0,04	1,08	0,5	1,03
III <sub>a</sub>	4,33	0,93	6,76	0,14	1,01	0,91	9,35	0,19	1,22	0,92	1,09
IV <sub>a</sub>	4,33	2,26	23,69	0,1	1	0	25,36	0,11	1	0,99	1
V <sub>a</sub>	4,33	4,03	19,14	0,08	1,2	0,07	86,82	0,38	1,02	1,42	1,08
VI <sub>a</sub>	4,33	3,2	19,22	0,08	1,25	0,43	35,56	0,15	1,1	2,18	1,19
VII <sub>a</sub>	4,33	3,49	37,76	0,09	1,23	0,14	67,01	0,17	1,04	2,18	1,15
VIII <sub>a</sub>	4,33	2,83	16,08	0,04	1,05	0,48	41,46	0,1	1,18	1,98	1,1
IX <sub>a</sub>	4,33	3,65	9,63	0,02	1,01	2,02	36,17	0,09	1,67	3,11	1,23

16. táblázat: A D-CDT-modellből az S/3 és S/4 felső és alsó pontokra kalkulált transzportparaméterek

Ref.-szám	Átlag $v_x$ (m/h)	Első Inverz Gauss-görbe				Második Inverz Gauss-görbe				Súlyozott $v_x$ (m/h)	Súlyozott R (-)
		$v_{x1}$ (m/h)	$D_1$ (m <sup>2</sup> /d)	$D_i$ (-)	$R_1$ (-)	$v_{x2}$ (m/h)	$D_2$ (m <sup>2</sup> /d)	$D_i$ (-)	$R_2$ (-)		
S/3											
I <sub>f</sub>	3,18	0,37	0,91	0,03	1,16	0,11	1,43	0,04	1,8	0,31	1,32
II <sub>f</sub>	3,18	0,43	0,28	0,01	1,21	0,12	0,61	0,02	1,26	0,25	1,24
III <sub>f</sub>	3,18	0,43	0,27	0,01	1,16	0,11	0,87	0,02	1,66	0,28	1,4
IV <sub>f</sub>	3,18	1,34	4,45	0,03	1,42	0,56	36,54	0,22	2,23	0,93	1,85
V <sub>f</sub>	3,18	1,29	4,11	0,02	1,51	0,79	32,33	0,19	1,05	0,95	1,19
VI <sub>f</sub>	3,18	1,32	3,87	0,02	1,58	0,5	36,7	0,22	1,95	0,76	1,83
VII <sub>f</sub>	3,18	1,24	6,07	0,02	1	0,74	19,29	0,07	3,07	1,09	1,62
VIII <sub>f</sub>	3,18	1	8,05	0,03	1,18	0,49	12,67	0,04	1,55	0,97	1,21
IX <sub>f</sub>	3,18	0,86	7,17	0,02	1,09	0,19	59,47	0,2	1,42	0,72	1,15
I <sub>a</sub>	3,18	0,49	0,37	0,01	1,07	0,11	6,38	0,18	1,46	0,39	1,17
II <sub>a</sub>	3,18	0,3	0,2	0,01	1,18	0,1	1,31	0,04	2,48	0,19	1,88
III <sub>a</sub>	3,18	0,53	0,79	0,02	1,24	0,26	7,54	0,21	9,67	0,51	1,91
IV <sub>a</sub>	3,18	2,75	13,25	0,08	1,17	0,49	18,52	0,11	1,52	0,72	1,48
V <sub>a</sub>	3,18	1,07	2,99	0,02	1,11	0,53	12,24	0,07	2,11	0,81	1,59
VI <sub>a</sub>	3,18	2,66	2,22	0,01	2,94	0,6	10,04	0,06	2,57	1,67	2,76
VII <sub>a</sub>	3,18	1,3	7,17	0,02	1,23	0,71	34,65	0,12	2,54	1,01	1,88
VIII <sub>a</sub>	3,18	1,28	6,69	0,02	1,35	0,62	21,27	0,07	1,76	0,8	1,65
IX <sub>a</sub>	3,18	0,82	5,6	0,02	1,02	0,59	8,13	0,03	1,62	0,79	1,11
S/4											
I <sub>f</sub>	2,7	0,89	0,45	0,01	1,01	0,01	0,57	0,02	1,01	0,36	1,01
II <sub>f</sub>	2,7	0,99	5,2	0,17	1	1,02	0	0	1,6	1,01	1,48
III <sub>f</sub>	2,7	0,95	0,76	0,02	1,47	0	3,7	0,12	1	0,72	1,36
IV <sub>f</sub>	2,7	0,95	0,76	0,02	1,47	0	3,7	0,12	1	0,72	1,36
V <sub>f</sub>	2,7	2,03	8,49	0,06	2	0,03	56,54	0,39	1,02	1,47	1,73
VI <sub>f</sub>	2,7	1,23	8,47	0,06	1,2	0,13	8,6	0,06	1,04	0,66	1,12
VII <sub>f</sub>	2,7	1,6	7,4	0,05	1,08	0,11	27,16	0,19	1,07	0,74	1,08
VIII <sub>f</sub>	2,7	1,76	14,67	0,06	1,18	0,01	17,8	0,07	1	0,59	1,06
IX <sub>f</sub>	2,7	1,57	14,78	0,06	1,31	0,07	19,36	0,08	1,03	0,52	1,12
I <sub>a</sub>	2,7	0,37	0,59	0,02	1,02	0,04	2,31	0,08	1,26	0,29	1,08
II <sub>a</sub>	2,7	0,77	1,08	0,04	1,33	0,06	4,96	0,16	1	0,15	1,04
III <sub>a</sub>	2,7	0,85	1,39	0,05	1	0,02	1,9	0,06	1,02	0,48	1,01
IV <sub>a</sub>	2,7	2,59	9,43	0,07	1,61	0,46	35,09	0,25	1,4	1,95	1,55
V <sub>a</sub>	2,7	1,32	26,87	0,19	1,38	0,18	31,05	0,22	1,09	0,92	1,28
VI <sub>a</sub>	2,7	1,31	9,85	0,07	1,11	0,16	10,1	0,07	1,17	0,9	1,13
VII <sub>a</sub>	2,7	1,68	12,51	0,05	1,08	0,03	21,44	0,09	1,02	0,77	1,05
VIII <sub>a</sub>	2,7	1,56	10,19	0,04	1,44	0,34	21,74	0,09	1,22	0,76	1,3
IX <sub>a</sub>	2,7	1,7	15,19	0,06	1,37	0,25	19,1	0,08	1,09	0,84	1,21

Mind a négy mérési alkalom eredményeire (15-16. táblázat) elmondható, hogy a felső és alsó pontoknál is a mellékáramban (narancssárga jelölés) magasabb a diszperziós koefficiens, mint a fő áramban (zöld). Ez azt jelenti, hogy jelentős visszakeveredések vannak a hosszanti átfolyású műtárgyban.

Az első mérési időpontnál (S/1) a IV., V., VI., VII. és IX. felső pontoknál (kék) a súlyozott áramlási sebesség magasabb, mint az alsó pontoknál, ami lehetséges, mivel itt a műtárgy még csak 1 napja üzemelt, így se a gyökérzet, se a biofilm-aktivitás nem volt hatással a transzportfolyamatokra.

A 15. táblázatban láthatóak a második mérési pont eredményei (S/2). Az I., III., IV., V. és VII. felső pontok (kék) súlyozott áramlási sebességértékei nagyobbak az alsó pontokénál, a többi pont esetében pedig az alsók magasabbak a felső pontok értékeinél (sárga). Ez azt jelenti, hogy a gyökérzet és a biofilm növekedik, ezért már hatással vannak a műtárgyban zajló transzportfolyamatokra. Ez egy 1 hónapos műtárgy esetében teljesen elfogadható. **A keresztaszelvényben a középső pontoknál (II., V., VIII.) kaptam a legalacsonyabb áramlási sebességértékeket. Ezekből az eredményekből arra lehet következtetni, hogy a gyökérrendszer és a biofilm-aktivitás itt fejt ki a legnagyobb hatását, ami azt is jelenti, hogy a fő áram a két oldalon van.**

A 16. táblázatban láthatóak a harmadik mérési időpont eredményei (S/3), ez már az 5 hónapos műtárgyban zajló folyamatokat mutatja be. A II., IV., V., VII. és VIII. felső pontok (kék) esetében a súlyozott áramlási sebesség nagyobb az alsó pontokénál. **A keresztaszelvényben a II., V. és IX. pontoknál adódott a legkisebb szivárgási sebesség, ami azt jelenti, hogy a gyökérzetnek és a biofilm-aktivitásnak ezekben a pontokban van a legnagyobb hatása az áramlási folyamatokra. A fő áram így a III., VI. és VII. pontokon át vezet.**

Az utolsó mérési időpontnál már 9 hónapos volt a műtárgy. Az I., II., III. és V. felső pontoknál (kék) a súlyozott áramlási sebesség nagyobb volt az alsó pontokénál, ami azt jelenti, hogy az első szekció keresztaszelvényében (I-III.) a felső részben volt a fő áramlás, míg a másik két szelvényben pont az ellenkezője történt (sárga). A jelenség fő oka az, hogy a gyökérrendszer az első keresztaszelvényben még nem volt olyan kiterjedt a felső rétegben, míg a másik két szelvényben már igen. Emellett a biofilm-aktivitás is közrejátszott abban, hogy itt az alsó áramlási zónában volt a fő áram. Hasonló eredményekre jutott LIU et al. (2018) is. A felső rétegekben kialakulhat



nagymértékű visszakeveredés és hidraulikai rövidzárlat, továbbá holtterek is megjelenhetnek. **A preferált fő áram a műtárgy két oldalán alakult ki.**

A visszakeveredést két dolog okozza:

- Az osztódrént a kivitelező – a tervekkel ellentétben – a műtárgy fenekén a rézsú talpvonalánál kb. 0,8 m-el beljebb helyezte el. Emiatt az osztódrén mögötti zónába vissza tud keveredni a szennyvíz.
- A műtárgyba ültetett sás gyökérzete szinte tökéletes gömb alakú szigeteket alkot a töltetben, ahogy az a 32. ábrán is látható, és az ezek mögötti zónák hajlamosak a holtteresedésre, így a visszakeveredéshez megfelelő zónákat biztosítanak.

Az eredményekből az is látható, hogy a súlyozott átlaggal kalkulált szivárgási sebesség alacsonyabb az átlagos szivárgási sebességnél, ami alátámasztja, hogy a tényleges tartózkodási idő nagyobb ezekben a műtárgyakban, mint az elméleti átlagos tartózkodási idő, ahogy azt a kifolyási pont eredményei is megmutatták (DITTRICH és KLINCSIK 2015b). Az eredmények ellentmondanak a nemzetközi szakirodalomban lévő eredményekkel (SCHIERUP et al. 1990, BREEN és CHICK 1995, TANNER és SUKIAS 1995, KING et al. 1997). Az **R** értéke 1,00-2,67 intervallum között mozog, ez az érték a holtterek jelenlétére utal a műtárgyban. A 17. és 18. táblázatban a D-CDT modell fő áramára számított áramlástan paramétereket hasonlítottam össze a CDT-modell eredményeivel.

17. táblázat: A D-CDT fő áram és a CDT-modell közötti különbség az S/1 és S/2 felső és alsó mérési pontoknál

Ref.-szám	v (m/h)	v <sub>x1</sub> (m/h)	Különbség (%)	D (m <sup>2</sup> /nap)	D <sub>1</sub> (m <sup>2</sup> /nap)	Különbség (%)
S/1						
<b>I<sub>f</sub></b>	0,74	1,73	57,45	5,83	1,79	-225,32
<b>II<sub>f</sub></b>	0,82	1,16	29	6,45	2,52	-155,79
<b>III<sub>f</sub></b>	1,49	1,58	5,91	3,45	1,38	-150
<b>IV<sub>f</sub></b>	1,22	1,48	17,43	26,37	26,37	0
<b>V<sub>f</sub></b>	0,91	1	8,59	3,27	3,07	-6,63
<b>VI<sub>f</sub></b>	1,02	1,32	22,73	6,51	1,92	-239,61
<b>VII<sub>f</sub></b>	2,47	2,68	7,91	43,8	11,5	-280,88
<b>VIII<sub>f</sub></b>	1,33	2,17	38,7	49,31	26,75	-84,35
<b>IX<sub>f</sub></b>	2,49	2,94	15,05	18,91	4,95	-282,11
<b>I<sub>a</sub></b>	0,53	1,89	71,99	12,67	2,95	-329,90
<b>II<sub>a</sub></b>	0,68	1,16	41,41	3,99	2,52	-58,3
<b>III<sub>a</sub></b>	1,46	2,02	27,47	3,24	0,78	-313,07
<b>IV<sub>a</sub></b>	0,97	1,23	20,57	10,13	9,83	-3,11
<b>V<sub>a</sub></b>	0,92	1,03	10,96	7,51	2,57	-191,5
<b>VI<sub>a</sub></b>	1,01	1,28	21,52	7,52	1,97	-281,69
<b>VII<sub>a</sub></b>	1,71	2,48	31,13	47,27	10,46	-352,06
<b>VIII<sub>a</sub></b>	1,67	2,21	24,7	36,13	8,5	-325,16
<b>IX<sub>a</sub></b>	2,2	2,39	8,16	21,4	8,1	-164,12
S/2						
<b>I<sub>f</sub></b>	1,22	1,28	4,36	3,08	1,56	-96,75
<b>II<sub>f</sub></b>	0,26	0,66	60,9	6,02	5,4	-11,46
<b>III<sub>f</sub></b>	1,41	1,95	27,63	5,96	1,61	-270,67
<b>IV<sub>f</sub></b>	0,91	3,02	69,8	57,01	35,56	-60,34
<b>V<sub>f</sub></b>	0,90	3,01	69,97	106,58	25,09	-324,78
<b>VI<sub>f</sub></b>	3,23	3,17	-2,02	51,29	15,62	-228,43
<b>VII<sub>f</sub></b>	3,42	4,95	30,83	62,67	28,2	-122,22
<b>VIII<sub>f</sub></b>	1,42	2,93	51,64	93,71	22,35	-319,25
<b>IX<sub>f</sub></b>	3,25	3,77	13,85	52,16	32,34	-61,29
<b>I<sub>a</sub></b>	0,53	0,63	15,53	1,58	1,22	-29,03
<b>II<sub>a</sub></b>	0,38	0,68	44,07	3,13	1,72	-82,54
<b>III<sub>a</sub></b>	0,24	0,93	74,41	7,97	6,76	-17,96
<b>IV<sub>a</sub></b>	0,39	2,26	82,52	38,24	23,69	-61,44
<b>V<sub>a</sub></b>	0,87	4,03	78,56	94,66	19,14	-394,66
<b>VI<sub>a</sub></b>	3,19	3,2	0,40	38,03	19,22	-97,88
<b>VII<sub>a</sub></b>	2,01	3,49	42,24	81,08	37,76	-114,73
<b>VIII<sub>a</sub></b>	1,89	2,83	33,14	74,42	16,08	-362,96
<b>IX<sub>a</sub></b>	2,93	3,65	19,76	35,99	9,63	-273,5

18. táblázat: A D-CDT fő áram és a CDT-modell közötti különbség az S/3 és S/4 felső és alsó mérési pontoknál

Ref.-szám	v (m/h)	v <sub>x1</sub> (m/h)	Különbség (%)	D (m <sup>2</sup> /nap)	D <sub>1</sub> (m <sup>2</sup> /nap)	Különbség (%)
S/3						
<b>I<sub>f</sub></b>	0,21	0,37	43,1	2,04	0,91	-125,12
<b>II<sub>f</sub></b>	0,19	0,43	56,11	1,22	0,28	-329,51
<b>III<sub>f</sub></b>	0,22	0,43	48,86	1,1	0,27	-312,04
<b>IV<sub>f</sub></b>	0,76	1,34	43,68	15,28	4,45	-243,29
<b>V<sub>f</sub></b>	0,51	1,29	60,49	16,64	4,11	-304,84
<b>VI<sub>f</sub></b>	0,58	1,32	56,45	15,62	3,87	-304,25
<b>VII<sub>f</sub></b>	0,97	1,24	21,59	7,27	6,07	-19,87
<b>VIII<sub>f</sub></b>	0,79	1	21,1	18,65	8,05	-131,57
<b>IX<sub>f</sub></b>	0,71	0,86	17,03	14,52	7,17	-102,47
<b>I<sub>a</sub></b>	0,32	0,49	35,57	1,18	0,37	-217,72
<b>II<sub>a</sub></b>	0,16	0,3	46,47	0,29	0,2	-49,08
<b>III<sub>a</sub></b>	0,46	0,53	13,73	0,82	0,79	-3,42
<b>IV<sub>a</sub></b>	0,52	2,75	81,14	3,06	13,25	76,89
<b>V<sub>a</sub></b>	0,72	1,07	32,39	7,55	2,99	-152,56
<b>VI<sub>a</sub></b>	0,84	2,66	68,59	9,82	2,22	-343,15
<b>VII<sub>a</sub></b>	0,91	1,3	29,84	13,11	7,17	-82,89
<b>VIII<sub>a</sub></b>	0,7	1,28	45,63	9,37	6,69	-40,07
<b>IX<sub>a</sub></b>	0,76	0,82	7,76	5,75	5,6	-2,53
S/4						
<b>I<sub>f</sub></b>	0,02	0,84	97,18	1,59	0,45	-250,73
<b>II<sub>f</sub></b>	0,08	0,99	92,33	8,17	5,20	-57,20
<b>III<sub>f</sub></b>	0	0,95	100	0,79	0,76	-3,84
<b>IV<sub>f</sub></b>	0,1	2,03	95,1	16,6	8,49	-95,55
<b>V<sub>f</sub></b>	0,47	1,23	61,51	30,51	8,47	-260,19
<b>VI<sub>f</sub></b>	0,47	1,6	70,51	26	7,4	-251,16
<b>VII<sub>f</sub></b>	0,46	1,76	73,95	50,35	14,67	-243,26
<b>VIII<sub>f</sub></b>	0,4	1,57	74,44	43,57	14,78	-194,83
<b>IX<sub>f</sub></b>	0,48	1,67	71,29	60,25	13,24	-355,04
<b>I<sub>a</sub></b>	0,23	0,37	39,23	1,34	0,59	-126,14
<b>II<sub>a</sub></b>	0,51	0,85	39,50	5,33	1,09	-390,66
<b>III<sub>a</sub></b>	0,75	0,85	11,84	4,82	1,39	-247,02
<b>IV<sub>a</sub></b>	0,25	2,59	90,51	20,58	9,43	-118,25
<b>V<sub>a</sub></b>	0,86	1,32	34,97	29,86	26,87	-11,11
<b>VI<sub>a</sub></b>	0,73	1,31	43,94	36,92	9,85	-274,82
<b>VII<sub>a</sub></b>	0,51	1,68	69,58	51,42	12,51	-311,18
<b>VIII<sub>a</sub></b>	0,55	1,56	64,53	46,14	10,19	-352,71
<b>IX<sub>a</sub></b>	0,61	1,7	63,83	73,11	15,19	-381,33

Az első mérési időpontnál (17. táblázat) mind a felső, mind az alsó mérési pontoknál a CDT-modell alacsonyabb szivárgási sebességértéket és magasabb diszperziós koefficiens értékeket mutatott, mint a D-CDT-modell. Vannak pontok, ahol nagyok az eltérések. A sebesség 5,91-71,99%-kal alacsonyabb értéket mutatott, a diszperziós koefficiens pedig 0-352,06%-kal volt magasabb. Mindez azt mutatja, hogy a jóval jobban illeszkedő D-CDT-modell sokkal realisztikusabban mutatja be a műtárgyban zajló folyamatokat.

A második mérési eredményeknél (17. táblázat) egy pontot leszámítva (VI. felső pont) a D-CDT-modellből kalkulált szivárgási sebesség nagyobb értéket adott, a diszperziós koefficiens pedig kisebbet. Az eltérés sebesség esetében 0,40-82,52%, a diszperziós koefficiens esetében pedig 11,46-394,66%, ami azt is jelenti, hogy voltak pontok, ahol az eltérés mértéke kifejezetten magas.

A 18. táblázatban látható a harmadik mérés eredményeinek összehasonlítása. Itt is kijelenthető, hogy a CDT-modell egy esetet leszámítva alacsonyabb szivárgási értéket és magasabb diszperziós koefficiens értéket adott. A IV. alsó pontnál kaptam a legrosszabb illesztési értékeket, így a modellt ez alapján tovább kell fejleszteni. Az eltérés sebesség esetében 7,76-81,14%, a diszperziós koefficiens esetében pedig 2,53-343,13%, ami az eddigiekkel azonos következtetések levonására ad okot.

Az utolsó mérési időpontnál (18. táblázat) is hasonló értékeket kaptam, mint a többinél. Itt is kijelenthető, hogy a D-CDT-modell magasabb szivárgási értéket és alacsonyabb diszperziós koefficiens értéket adott. Az eltérés sebesség esetében 11,84-97,18%, a diszperziós koefficiens esetében pedig 11,11-390,66% volt.

A hosszanti átfolyású gyökérszónás műtárgyak mikropórusrendszereiben a diffúzió elhanyagolható mértékű a transzportfolyamatok tekintetében. Ezekben a műtárgyakban egy fő áram és egy mellékáram alakul ki, melyben lassabb szivárgási sebesség mérhető. A diszperzió jóval nagyobb a mellékáramban, mint a fő áramban. Ez a tényező sokkal nagyobb hatású, mint a diffúzió, ez miatt lehet a diffúziót elhanyagolni.

A 3.10. fejezetben bemutatott modell első Inverz Gauss-görbéje (35-43. ábrákon a kék vonal) mutatja, melyért a fő áram felelős. A második Inverz Gauss-görbe (35-43. ábrákon a fekete vonal) illusztrálja a konvektív-diszperzív transzport lassabb mellékáramát. A biofilm-aktivitásnak és a gyökérszónának nagy szerepe van a transzportfolyamatokban, különösen a műtárgy korának emelkedésével.

#### **4.4.3. Részösszefoglaló, kapott eredmények jelentősége**

Az osztott konvektív-diszperzív modell pontosabban szimulálja a konzervatív nyomjelző anyag transzportját a horizontális átfolyású, kavicsal töltött gyökérszónás műtárgyban. Ez a modell tulajdonképpen két független Inverz Gauss-görbét illeszt a fő áramra és a mellékáramra, és egy görbét készít belőlük.

**Az eredmények bebizonyították, hogy a modell nemcsak az elfolyópontra, hanem a belső pontokra is jól alkalmazható.** A D-CDT-modell jobban illeszkedik, mint a CDT-modell, amit jelenleg leginkább használnak a nemzetközi szakirodalomban. Vannak olyan illesztések, ahol nagy különbség van a két modell között. A mikropórusarány az idővel növekedik, a felső pontoknál 38%-ról 57%-ra, míg az alsó pontoknál 32,9%-ról 49%-ra, mely jól szemlélteti a növényzet és a biofilm-aktivitás hatásait a műtárgy hosszabtvú élettartama során.

**Az eredmények azt is megmutatták, hogy a 9 hónapos műtárgyban a fő áram az alsó rétegben van, és hogy a felső rétegekben holtterek és hidraulikai rövidzárlatok alakulhatnak ki. Ezek leginkább a gyökérszóna jelenléte és a biofilmképződés miatt alakulnak ki.** A számított szivárgási sebesség és diszperziós koefficiens esetében a D-CDT-modell 5,91-97,18% és 0-394,66% eltérést mutatott a CDT-modell eredményeihez képest. Kijelenthető, hogy a D-CDT modell jobban közelíti a valós hidraulikai körülményeket.

Összességében elmondható, hogy a kifejlesztett D-CDT-modell alkalmazható a belső pontokra is annak érdekében, hogy egy pontosabb és érthetőbb képet kapjunk a hosszanti átfolyású gyökérszónás műtárgyak hidraulikai viselkedéséről, és a benne zajló transzportfolyamatokról. A fejezetben található eredmények gyakorlati jelentőségét a következő fejezet tartalmazza.

## 5. A disszertáció eredményeinek gyakorlati alkalmazhatósága

A 4.1.-4.2. fejezetekben bemutatott transzspirációs és evapotranszspirációs eredmények rámutattak, hogy évszakonként más a növények párolgásának mértéke, illetve a kavicstöltet párolgása, ezáltal az ebből származó vízveszteség is változik. Ez nyáron akár 100%-os értéket is elérhet a napi hidraulikai terheléshez viszonyítva. A 28/2004 Kvvm rendelet szabályozza a természetközeli szennyvíztisztítók befogadói határértékeinek megállapítását. Ebben a jogszabályban a tisztítási hatásfokot a befolyó és kifolyó vízminőségből számolják. A 4.1. és a 4.2. fejezetekben található 5. és 7. táblázat alapján hazai klimatikus viszonyok mellett akár több hónapon át 30-97%-kal kevesebb elfolyó tisztított vízzel kell számolni. Ez azt jelenti, hogy a tisztítási hatásfok számításánál hosszabb időszakokra hibával terhelt értékkel kell számolni. A másik probléma a befogadót ért terhelés megállapítása. Jelen pillanatban ezt is a befolyó és kifolyó értékek alapján számítják. A 4.2. fejezet eredményeiből arra következtethetünk, hogy érdekesebb lenne csak a ténylegesen a műtárgyakból kifolyó tisztított szennyvíz mennyiségét figyelembe venni, hisz így kapjuk meg ténylegesen a befogadót ért terhelést. Így jelen eredmények alapul szolgálhatnak egy esetleg jogszabály-módosításra.

A másik nagyon fontos gyakorlati alkalmazása a 4.1. és 4.2 fejezetek eredményeinek a 4.4. fejezetben bemutatott modell továbbfejlesztése, mégpedig az evapotranszspirációs tag beillesztésével a kifejlesztett modellbe. Ezáltal a modell még pontosabb lehet, hisz például nyáron egyértelműen nagy befolyással van a műtárgy tisztítási hatékonyságára az evapotranszspiráció okozta vízveszteség.

A 4.3. és a 4.4. fejezetben bemutatott eredmények gyakorlati alkalmazása elsősorban az, hogy a gyökérszónás műtárgyak transzportfolyamatairól pontosabb képet tudunk kapni. Ez azért fontos, mert a műtárgyban lévő áramlási viszonyok nagyban befolyásolják a szerves anyagok és egyéb szennyezőanyagok lebontását. Ezen műtárgyak legfontosabb funkciója a szennyvizek megtisztítása, így az áramlási kép pontos feltérképezése segíti a műtárgyban zajló lebontási folyamatok jobb megértését is. A 2.4. fejezetben említett modellek nem alkalmasak arra, hogy a modellekből kinyert transzportparaméterek felhasználásával a műtárgy tisztítási hatékonyságát és a rendszerben zajló folyamatokat precízen modellezzük.

A lebontási viszonyok meghatározására leginkább az elsőrendű kinetikai modellt használják, mely a gyökérszónás műtárgyakban homogén sebességteret és dugóáramlást feltételez, emellett

elhanyagolja a diszperziót és állandó szivárgási sebességet feltételez. A 4.3. és a 4.4. fejezetek eredményeiből látható, hogy ezekben a műtárgyakban teljesen más áramlási viszonyok vannak (heterogén áramlás, diszperzió nem elhanyagolható). Ezen okok miatt a modelltől számítható eredmények hibával terheltek, így nem a valós lebontási viszonyokat mutatják meg. Ennek ellenére a könnyű és gyors tervezhetősége, illetve a nemzetközi összehasonlíthatósága miatt alkalmazzák.

A 4.4. fejezetben bemutatott osztott konvektív-diszperzív modell segítségével olyan transzportparaméterekkel (diszperzió, szivárgási sebesség, tartózkodási idő) tudunk számolni, melyek a valóságot sokkal jobban közelítik (4.4.2. fejezet 17-18. táblázat). Az eredményekből beazonosíthatóak az eltömődések, melyek a gyökérszónás műtárgyak egyik legnagyobb megoldandó problémái közé sorolhatóak, emellett a visszakeveredések, hidraulikai rövidzárlatok vagy holtterek is „láthatóvá” válnak, melyek közvetlenül hatnak a műtárgyban zajló lebontási folyamatokra.

Az osztott konvektív-diszperzív modell kiegészítve egy kinetikai modellel, vagy egy meglévő modell úgynevezett almodelljeként alkalmazva ezen műtárgyak tervezése, üzemeltetése könnyebbé válhatna, emellett pedig az időjárás miatti sztochasztikussága csökkenthető lenne, így az egész rendszer tisztítási hatékonysága is javulhatna, kiszámíthatóbbá válna. Ezen okok nagyban elősegítenék a magyarországi elterjedését a gyökérszónás szennyvíztisztítóknak, illetve új országokban is elősegíthetnék ezen technológia alkalmazhatóságát.

A kialakított modell jó alapot képez egy olyan módszer megalkotására, mely a világ bármely területén kialakított gyökérszónás szennyvíztisztító tervezésében, méretezésében és üzemeltetésében segítséget nyújthat.

## 6. Következtetések, javaslatok

### 6.1. Következtetések

A disszertáció első részében vizsgáltam a gyökérszónás műtárgyak transzspiráció általi vízveszteségét tavasszal, nyáron és ősszel. Először laborkörülmények között mértem a műtárgyra telepített sás transzspirációját, majd meghatároztam a műtárgyon lévő sás mennyiségét, ezután kiszámítottam a szezonális transzspiráció általi vízveszteséget. Tavasszal a napi transzspiráció általi vízveszteség 46-83%-a a hidraulikai terhelésnek. Tavasszal lehetnek olyan napok, melyeken a vízháztartást jelentősen befolyásolja a növények párologtatása. Nyáron ez az érték (transzspiráció általi vízveszteség) 52-108% között alakult. Látható az értékekből, hogy akár a teljes napi feladagolt szennyvízmennyiséget is elpárologtathatja a növényzet, ezért a horizontális átfolyású gyökérszónás műtárgy vízkészlete jelentősen csökken. Emiatt megnövekedhet a műtárgyban a koncentráció, ami megnövelheti a műtárgyból elfolyó víz koncentrációját is. Ősszel a napi transzspiráció általi vízveszteség 17-48% között mozgott. Összességében elmondható, hogy a hidraulikai terheléshez képest is jelentős hatással van a növényzet a műtárgy vízháztartására, így a tisztítási hatásokra is.

Dolgozatom következő részében terepi mérési adatsorokból meghatároztam a napi evapotranszspirációt tavasszal, nyáron és ősszel. A vizsgált napokon a teljes vízveszteség 71,7-93,1%-a a nappali időszakban párologt el. Ez azt jelenti, hogy a betöményedési folyamatok 4-10-szer erőteljesebbek nappal, mint éjszaka. Az éjjeli evapotranszspiráció jelentős mértékű. Voltak olyan napok, amikor a teljes vízveszteség 20,9-28,3%-át az éjjeli evapotranszspiráció okozta, mely egy fontos tudományos eredmény, mivel a szakirodalom az éjjeli evapotranszspirációt 0-nak tekinti (GALVAÓ et al. 2010). A vizsgált tavaszi napokon az evapotranszspiráció 18,0-42,6 mm/napos érték között mozgott, ami a maximális hidraulikai terhelés 45,0-106,5%-a, nyáron ezek az értékek 12,3-42,3 mm/napra adódtak, mely a maximális hidraulikai terhelés 30,8-105,8%-a. Ősszel 13,6-22,7 mm/nap értékek között alakult a vízszintcsökkenés, ami 34,0-56,8%-a a hidraulikai terhelésnek.

Vizsgáltam a reggeli és esti páralecsapódás hatását is a műtárgy vízháztartására. A páralecsapódás megemeli a vízszintet a műtárgyban, és 100%-os páratartalmat eredményez, így ekkor nincs növények általi párologtatás. Volt olyan tavaszi nap, amikor az óránkénti evapotranszspiráció a napi evapotranszspiráció 16%-át tette ki, ami azt jelenti, hogy ez az érték az óránkénti átlagos



hidraulikai terhelés 415%-át teszi ki. Nyáron ez az érték 229%, míg ősszel 150% volt. Tavasszal és nyáron a betöményedés kiemelten jelentős hatással van az elfolyó vízminőségére.

Dolgozatom következő fejezetében olyan sűrűségfüggvényeket vizsgáltam, melyek jobban illeszkedhetnek a konzervatív nyomjelzőanyag-mérési eredményekre, mint a jelenleg használatosak. Igazoltam, hogy az Inverz Gauss-függvény lett a legrosszabb illeszkedésű a vizsgált eloszlásfüggvénytípusok közül annak ellenére, hogy ez a leggyakrabban használt eloszlástípus a szakirodalomban. A jelenleg használatos CDT-modellnek az analitikus megoldása Inverz Gauss-eloszlású, így kimondható, hogy a jelenleg használatos CDT-modell nem alkalmas pontos modellezésre, mivel az  $R^2$  érték nem érte el a 0,95-ös illeszkedési értéket sem. A hiba a műtárgy korának növekedésével nő. Megállapítottam, hogy a Fréchet sűrűségfüggvény követi a legjobban a válaszgörbét, így elmondható, hogy a sással ültetett, kavicsöltetű, hosszanti átfolyású gyökérszónás műtárgyak belső pontjain vett konzervatív nyomjelzőanyag-méréseiből kapott válaszgörbéi Fréchet-eloszlásúak. Ahol két csúcsa van a válaszgörbének, ott további egyik hagyományos eloszlástípus sem alkalmas a válaszfüggvény pontos leírására.

Dolgozatom utolsó részében az osztott konvektív-diszperzív modellt illesztettem a műtárgy belső pontjaiban vett konzervatív nyomjelzőanyag-mérési eredményekre. Ez a modell tulajdonképpen két független Inverz Gauss-görbét illeszt a fő áramra és a mellékáramra, és egy görbét készít belőlük, mely – ahogy azt az eredmények is megmutatták – jobban illeszkedik, mint a jelenleg használatos CDT-modell. Vannak olyan illesztések, ahol nagy különbség van a két modell között. Meghatároztam a mikropórusarányt, mely az idővel növekedik, a felső pontoknál 38%-ról 57%-ra, míg az alsó pontoknál 32,9%-ról 49%-ra.

Az eredményekből az is kiderül, hogy a 9 hónapos műtárgyban a fő áram az alsó rétegben van, illetve, hogy a felső rétegekben holtterek és hidraulikai rövidzárlatok alakultak ki. Ezek leginkább a gyökérszóna jelenléte és a biofilmképződés miatt jelentek meg. A számított sebesség és diszperziós koefficiens esetében a D-CDT-modell 5,91-97,18% és 0-394,66% eltérést mutatott a CDT-modell eredményeihez képest. Így a D-CDT modell jobban közelíti a valós hidraulikai körülményeket. Az eredmények alapján kijelenthető, hogy a kifejlesztett D-CDT-modell alkalmazható a műtárgy belső pontjaira annak érdekében, hogy egy pontosabb és érthetőbb képet kapjunk a hosszanti átfolyású gyökérszónás műtárgyak hidraulikai viselkedéséről és a benne zajló transzportfolyamatokról.

## **6.2. Eredmények tézisszerű összefoglalása**

### **1. tézis: Tavaszi, nyári és őszi transzspiráció mértékének becslése laboratóriumi mérések segítségével a hosszanti átfolyású, kavicsöltetű, sással telepített gyökérszónás műtárgyakban.**

Laboratóriumi mérések során meghatároztam a tavaszi, nyári és őszi minimális és maximális transzspiráció okozta vízvesztésüket a hosszanti átfolyású, kavicsöltetű, sással telepített gyökérszónás műtárgyakban a helyi klimatikus viszonyok között.

A tavaszi transzspiráció okozta vízvesztés-értékek a műtárgyra vezetett napi szennyvízmennyiség 46-83 %-át teszik ki, míg a nyári időszakban ez az érték akár 52-108% is lehet, ami azt jelenti, hogy nyáron lehetnek olyan napok, hetek, amikor a vízvesztés miatt nagymértékű szennyvíz-betöményedés következhet be. Ez az érték ősszel a havi feladott szennyvíz mennyiségének a 17-48%-át adja. A mérések során az is meghatározásra került, hogy a fény, hőmérséklet és páratartalom közül a legutóbbi bír a legnagyobb hatással a transzspiráció mértékére.

Publikáció: Dittrich, E., Salamon-Albert É., Somfai D., Dolgos-Kovács A., Kiss T. (2019):  
Transpiration effect of Tufted sedge for a horizontal subsurface flow constructed wetland.  
Water Science and Technology 79(10) 1905-1911 p.

### **2. tézis: Napi evapotranszspiráció alakulásának meghatározása a hosszanti átfolyású, kavicsöltetű, sással telepített gyökérszónás műtárgyakban a helyi klimatikus viszonyok között tavasszal, nyáron és ősszel.**

A mérési eredmények elemzése alapján a nappali evapotranszspiráció értéke a tavaszi, nyári és őszi időszakban a napi evapotranszspiráció 71,7-93,1%-a. Ebből következően rögzíthető, hogy az evapotranszspiráció okozta töményedési folyamatok 4-10-szer erőteljesebbek nappal, mint éjjel a hosszanti átfolyású, kavicsöltetű, sással telepített gyökérszónás műtárgyakban. Az éjjeli evapotranszspiráció jelentős mértékű, voltak olyan napok, amikor a teljes vízvesztés 21,0-28,3%-át az éjjeli evapotranszspiráció okozta.

Meghatározásra került a tavaszi napi evapotranszspiráció, melynek értéke 18,0-42,6 mm/nap, ami 45,0-106,5%-a a napi feladott szennyvízmennyiségnek. A nyári napi evapotranszspiráció 12,3-42,3 mm/nap, ami a napi feladott mennyiség 30,8-105,8%-a. Az őszi értékek pedig 13,6-22,7 mm/nap között változtak, ami a napi feladott mennyiség 34,0-56,8%-a.

Publikáció: Dittrich, E., Somfai, D., Dolgos-Kovacs A., Salamon-Albert É. (2020): Estimated seasonal daily evapotranspiration rates for a horizontal subsurface flow constructed wetland. Review of Faculty of Engineering Analecta Technica Szegedinensia, 14(2) 1-12 p.

**3. tézis: A reggeli és esti páralecsapódás hatása a hosszanti átfolyású, kavicsöltetű, sással telepített gyökérszűrő mőtárgyak vízháztartására a helyi klimatikus viszonyok között.**

A napfelkelte és napnyugta körüli időszakban páralecsapódás figyelhető meg, amennyiben a hőmérsékleti és páratartalom értékek ideálisak. Ez kétféleképpen fejezi ki hatását. Egyrészt a lecsapódott pára növeli a mőtárgy vízkészletét, másrészt a 100% körüli páratartalom miatt rövid időre lecsökken a transzspiráció. A vizsgált napokon meghatározásra került az éjjeli és hajnali páralecsapódás mértéke helyi klimatikus viszonyok között. Az éjjeli és hajnali páralecsapódás együttes mennyisége a maximális hidraulikai terhelés 1,8 és 10%-a volt, ez leginkább a napfelkelte utáni időszakban csökkenti a koncentrációt a mőtárgyban, és a növények transzspirációját teljesen vagy részlegesen gátolja.

Publikáció: Dittrich, E., Somfai, D., Dolgos-Kovacs A., Salamon-Albert É. (2020): Estimated seasonal daily evapotranspiration rates for a horizontal subsurface flow constructed wetland. Review of Faculty of Engineering Analecta Technica Szegedinensia, 14(2) 1-12 p.

**4. tézis: Egyedi szoftver újszerű alkalmazása a hosszanti átfolyású növényzettel benőtt kavicsöltetű gyökérszűrő mőtárgyak belső pontjaira végzett konzervatív nyomjelző anyag mérési hibáinak mérséklésére Fréchet-eloszlással.**

A MAPLE környezetben kidolgozott matematikai eljárást alkalmaztam, mely használható konzervatív nyomjelző anyag transzportvizsgálatainak mérési hibáinak mérséklésére a mőtárgy belső pontjain.

Az eljárás a konzervatív nyomjelző anyag transzportmérési eredményekre olyan folytonos függvényt illeszt, mely figyelembe veszi a fizikai folyamatok szabta peremfeltételeket, kötöttségeket. Ezáltal a diszkrét mérésekből 100%-os anyag-visszatérülést biztosító folytonos görbék nyerhetők, melyek alkalmasak precíz transzportfolyamat-elemzésre. A szoftver segítségével bebizonyítottam, hogy a hosszanti átfolyású, kavicsöltetű, növényzettel telepített mőtárgyak belső pontjaiban vizsgált transzportfolyamatai a legnagyobb pontossággal Fréchet-eloszlással közelíthetők abban az esetben, ha a válaszfüggvénynek egy csúcsa van. Kétcsúcsú

válaszfüggvény esetében további kutatásra van szükség. Továbbá matematikai úton közvetve bizonyítást nyert, hogy az 1 dimenziós konvektív-diszperzív transzportegyenlet rögzített helyen, koncentráció-idő síknegyeden vett analitikus megoldása pontatlanul illeszkedik a vizsgált mérési eredményekre.

Publikáció: Dittrich, E., Klincsik, M., Somfai, D., Dolgos-Kovacs A., Kiss T., Szekeres A. (2021): Analysis of conservative tracer measurement results inside a planted horizontal subsurface flow constructed wetland filled with coarse gravel using Fréchet distribution  
Environmental Science and Pollution Research 28(5) 5180-5204 p. (Impact Factor: 3,056)

**5. tézis: Meglévő osztott konvektív-diszperzív modell innovatív felhasználása növényzettel benőtt, kavicsöltetű, hosszanti átfolyású gyökérszónás műtárgyak konzervatív nyomjelző anyag belső transzportfolyamatainak modellezésére.**

1 dimenziós osztott konvektív-diszperzív transzportmodellt alkalmaztam hosszanti átfolyású gyökérszónás műtárgyak belső transzportfolyamatainak az eddig publikáltaknál pontosabb modellezésére.

A jelenleg leggyakrabban használatos konvektív-diszperzív modell eredményeihez képest ez a modell szivárgási sebesség tekintetében 0,40-97,66%-kal, míg a diszperziós tényező tekintetében 0,00-394,66%-kal adott eltérő – a valóságot jobban közelítő – eredményt.

A függvényillesztési vizsgálataim eredményeire alapozva azt feltételeztem, hogy a mért válaszfüggvény gyorsan felfutó szakaszában csak a fő áramnak van jelentős szerepe. Az előállított modell tulajdonképpen egy olyan osztott konvektív-diszperzív modell, mely az áramlási folyamatot két egymástól független konvektív-diszperzív Inverz Gauss-görbe összegéből állítja elő úgy, hogy közben rögzíti a fő áramban és a mellékáramban résztvevő folyamatok arányát, és a két folyamat egymással párhuzamos lefutását feltételezi.

Az eredményekből igazolást nyert az is, hogy a nemzetközi szakirodalomban legnépszerűbb konvektív-diszperzív transzportmodell pontatlanabban képes leírni a hosszanti átfolyású, kavicsöltetű, növényzettel telepített gyökérszónás műtárgyak belső pontjaiban lezajló folyamatokat. Az alkalmazott modell segítségével fő belső áramlási vonalakat is sikerült meghatározni.

Publikáció: Dittrich, E., Klincsik, M., Somfai, D., Dolgos-Kovacs A., Kiss, T., Szekeres, A. (2021): Application of divided convective-dispersive transport model to simulate variability of conservative transport processes inside a planted horizontal subsurface flow constructed wetland. *Environmental Science and Pollution Research*, 28 15966–15994 p. (Impact Factor: 3,056)

## 7. Összefoglalás

A természetközeli szennyvíztisztítás a világon és hazánkban is egyre jobban elterjedt szennyvíztisztítási eljárás, de a sztochasztikus jellege miatt nagyon sok a kutatandó terület, hogy a kisebb településeken a mesterséges szennyvíztisztítási technológiák alternatívája legyen. A gyökérszénás szennyvíztisztítás hazai terjedését gátolja a hazai klimatikus viszonyokra való adaptálás szükségessége.

Dolgozatom első részében az evapotranszspiráció, illetve a transzspiráció hatását vizsgáltam a gyökérszénás műtárgyak vízháztartására hazai klimatikus viszonyok között. Végeztem mind laboratóriumi, mind terepi méréseket annak érdekében, hogy megfelelő képet kapjak a gyökérszénás műtárgyak vízháztartásának egyik fontos eleméről, a talajpárolgásról, illetve a növény párologtatásáról. Szezonális és napi vizsgálatok segítségével sikerült becslési intervallumokat, szélsőértékeket megállapítanom mind a transzspiráció, mind az evapotranszspiráció mértékéről. Az eredményeim azt mutatják, hogy a transzspiráció jelentős hatással van a gyökérszénás műtárgyak vízháztartására. Különösen nyáron a transzspiráció okozta vízveszteség miatt a maximális hidraulikai terhelés értékének akár 100%-a is elpárologhat, ez erőteljes betöményedést eredményez a műtárgyban, ami így az elfolyó vízminőségre is nagymértékben kihathat. Ez a hatás tavasszal is hasonló mértékű lehet.

Az evapotranszspirációs vizsgálataim eredményei bebizonyították, hogy a nappali evapotranszspiráció a domináns ezekben a műtárgyakban, de az éjjeli evapotranszspiráció is jelentős. Voltak olyan napok, melyeken akár a teljes napi vízveszteség 30 százalékáért az éjjeli evapotranszspiráció volt a felelős. Fontos tudományos eredmény továbbá, hogy ezen műtárgyak vízháztartását befolyásolja a hajnali illetve az éjjeli páralecsapódás, azonban ennek mérésére vonatkozóan sem hazai, sem nemzetközi publikációról nincs tudomásom. Ez a jelenség egyrészt növeli a műtárgy vízháztartását, másrészt csökkenti az evapotranszspiráció mértékét.

Doktori munkám során vizsgáltam a transzportfolyamatokat ezekben a műtárgyakban. Konzervatív nyomjelzőanyag-mérési eredményekre illeszttem olyan sűrűségfüggvényeket, melyeket nem használtak ilyen műtárgyak transzportmodellezésére, annak reményében, hogy ezek a függvények jobban illeszkednek a mérési eredményekre, mint a jelenleg használatos modell. Az eredményeim bebizonyították, hogy a sással ültetett, kavicsöltetű, hosszanti átfolyású gyökérszénás műtárgyak konzervatív nyomjelzőanyag-méréseiből kapott válaszgörbéi Fréchet-

eloszlásúak, emellett bizonyítást nyert, hogy a jelenleg használatos CDT-modell nem alkalmas ilyen műtárgyak transzportfolyamatainak pontos modellezésére.

A másik célkitűzésem, hogy a témavezetőm által kifejlesztett új transzportmodellt illesztettem a belső pontokon vett konzervatív nyomjelzőanyag-mérési eredményekre annak érdekében, hogy bebizonyítsam, hogy belső pontok tekintetében is alkalmazható, és a modell pontosabb képet ad a műtárgyban zajló transzportfolyamatokról, mint a jelenleg használatos modell.

Az eredményekből bizonyítást nyert, hogy a D-CDT-modell pontosabb képet ad a sással ültetett, kavicsöltetű, hosszanti átfolyású gyökérszónás műtárgyak transzportfolyamatairól, mint a jelenleg használatos CDT-modell, és helyenként nagy különbségek vannak a két modelltől számított transzportparaméterek között (szivárgási sebesség, diszperziós koefficiens).

A jelen dolgozatban bemutatott két kutatási irányt a jövőben tovább lehet fejleszteni a két irány összekapcsolásával úgy, hogy az evapotranszpirációt is be lehetne építeni a transzportmodellbe, ezzel a modell még reálisabb képet adna a gyökérszónás műtárgyak transzportfolyamatairól.

## 8. Summary

Extensive wastewater treatment is becoming more and more widespread in the world and in Hungary as well, but due to its stochastic nature, there is a lot of research needed to be done to become an alternative treatment of intensive wastewater treatment technologies in small towns. It is hindered by the spread of constructed wetland wastewater treatment in Hungary, the need to adapt to the Hungarian climatic conditions.

In the first part of my dissertation I investigated the effect of evapotranspiration and transpiration on the water balance of the constructed wetland between Hungarian climatic conditions. I performed both laboratory and field measurements in order to get a proper picture of one of the most important elements of water management of constructed wetlands, soil evaporation and plant transpiration. With the help of seasonal and daily examinations, I was able to establish estimation intervals of both transpiration and evapotranspiration. My results show that transpiration has a significant effect on the water balance of constructed wetlands. Especially in summer, up to 100% of the maximum hydraulic load can evaporate due to water loss due to transpiration, resulting in a strong concentration in the constructed wetland, which can also have a major impact on the quality of the wastewater. This effect may be similar in the spring.

The results of the evapotranspiration studies proved that in the daytime evapotranspiration is dominant in these constructed wetlands, but at nighttime evapotranspiration is also significant; there were days when evapotranspiration was responsible for up to 30% of the total daily water loss at nighttime. Another important scientific result is that the water balance of these wetlands is influenced by the condensation of the dawn and night, which I have no knowledge of either domestic or international publications. This phenomenon on the one hand increases the water balance of the wetland but on the other hand reduces the degree of evapotranspiration.

During my PhD work I studied the transport processes in these systems. I fitted five density functions to conservative tracer measurement results, in the hope that these functions would fit the measurement results better than the currently used model. My results demonstrated that the response curves obtained from conservative tracer measurements of horizontal subsurface flow constructed wetlands filled with coarse gravel were Fréchet distributed, and it was proved that the currently used CDT model is not suitable for accurate modeling of transport processes in these kind of systems.



My other goal was to fit novel transport model – developed by my supervisor – to the conservative tracer measurement results taken at the inner points in order to prove that it can be applied to the inner points as well, and the model gives a more accurate picture of the transport processes in constructed wetland than conventionally used model. The results showed that the D-CDT model gives a more accurate picture of the transport processes of horizontal subsurface flow constructed wetlands filled with coarse gravel than the currently used CDT model. In some cases there are large differences in the transport parameters calculated from the two models (leakage rate, dispersion coefficient).

The two research directions presented in the current dissertation can be further developed in the future by combining the two directions, so that evapotranspiration could be incorporated into the transport model, thus giving the model an even more realistic picture of the transport processes of these systems.

## Köszönetnyilvánítás

Elsősorban szeretném megköszönni Dr. Dittrich Ernő témavezetőmnek azt a sok szakmai segítséget, amit ezalatt a 7 év alatt kaptam tőle, külön köszönöm, hogy hitt bennem és a kulcspillanatokban tartotta bennem a lelket. Köszönöm továbbá a magánéleti tanácsokat, melyek nélkül ez a disszertáció nem valósulhatott volna meg.

Külön köszönöm másik témavezetőmnek, Dr. Szalai Sándornak a sok segítséget, amit még a Pécs-Gödöllő távolság ellenére is megkaptam tőle.

Nagyon hálás vagyok a Környezetmérnök Tanszék vezetőjének, Dolgosné Dr. Kovács Anitának és Vér Csabának, hogy hittek bennem és támogatták a szakmai fejlődésemet, és hogy tanácsaikkal jobb kutató, oktató és jobb ember lett belőlem. Köszönöm a Környezetmérnök Tanszék oktatóinak, kollégáimnak: Jancskár Lajosnak, Soós Károlynak, Dr. Fekete Jenő György tanár úrnak, Dr. Pécz Tibornak, Vízvári Zoltánnak, Pataki Tamásnak, Jászó Andreának, Dr. Leitol Csabának, Horváth Lajosnak és Varga Zsoltnak a szakmai segítséget.

Köszönettel tartozom Salamonné Dr. Albert Éva tanárnőnek, hogy a transzspirációs mérésekben rengeteget segített, emellett minden tudásával segítette a munkámat és a fejlődésemet. Köszönöm volt hallgatóimnak, Szekeres Anettnek, Fébó Viktóriának és Szénásy Lucának, hogy a mérésekben és az eredmények feldolgozásában rengeteget segítettek.

Hálásan köszönöm Dr. Klincsik Mihály professzor úrnak a rengeteg segítséget, amit kaptam tőle.

Szeretném megköszönni Czakóné Dr. Vér Klárának, hogy szakmai és egyéb tanácsaival segítette a fejlődésemet.

Köszönettel tartozom a dolgozat bírálóinak, Dr. Szilágyi Ferenc tanár úrnak, Dr. Aleksza László tanár úrnak és Dr. Weinpel Tamásnak, hogy észrevételeikkel emelték a dolgozat színvonalát.

Külön köszönöm feleségemnek, Koronczi Noéminek azt a rengeteg segítséget, támogatást és különösen az utolsó évben azt a stabilitást, ami nélkül jelen dolgozat nem készülhetett volna el.

Végül szeretném megköszönni a családomnak, különösen Édesanyámnak azt a támogatást, amit tőle kaptam az évek során.

## Felhasznált irodalom

- AIELLO, R., BAGARELLO V., BARBAGALLO, S., IOVINO, M., MARZO, A., TOSCANO, A. (2016): Evaluation of clogging in full-scale subsurface flow constructed wetlands. *Ecological Engineering*, 95 505–513 p.
- ALBUQUERQUE, A., OLIVEIRA, J., SEMITELA, S., AMARAL, L. (2009): Influence of bed media characteristics on ammonia and nitrate removal in shallow horizontal subsurface flow constructed wetlands. *Bioresource Technology*, 100 (24) 6269-6277 p.
- ALCOCER, D. J. R., VALLEJOS, G. G., CHAMPAGNE, P. (2012): Assessment of the plug flow and dead volume ratios in a sub-surface horizontal-flow packed-bed reactor as a representative model of a sub-surface horizontal constructed wetland. *Ecological Engineering*, 40 18– 26. p.
- ALLEN, R.G., PEREIRA, L.S. RAES, D., SMITH, M. (1998): Crop evapotranspiration guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper 56. United Nations Food and Agriculture Organization. Rome. Italy. 50 p.
- ARIAS, C.A., BRIX, H., JOHANSEN, N.-H. (2003b): Phosphorus removal from municipal wastewater in an experimental two-stage vertical flow constructed wetland system equipped with a calcite filter. *Water Science and Technology*, 48(5) 51-58 p.
- ARMSTRONG, W., ARMSTRONG, J., BECKETT, P. M. (1990): Measurement and modelling of oxygen from roots of *Phragmites australis*. In: Cooper PF, Findlater BC (eds) *The use of constructed wetlands in water pollution control*. Pergamon, Oxford, p. 41.–51.
- ARMSTRONG, W., ARMSTRONG, J., BECKETT, P. M., JUSTIN, S. H. F. W., (1991): Convective gas-flows in wetland plant aeration. In: Jackson MB, Davies DD, Lambers H (eds) *Plant life under oxygen stress*. SPB Academic Publishing bv, The Hague, p. 283.–302.
- BARBAGALLO, S., CIRELLI, G.L., MARZO, A., MILANI, M., TOSCANO, A. (2011): Hydraulic behavior and removal efficiencies of two H-SSF constructed wetlands for wastewater reuse with different operational life. *Water Science and Technology*, 64 (5) 1032–1039 p.
- BATCHELOR A., LOOTS, P. (1996): Critical Evaluation of a Pilot Scale Subsurface Flow Wetland: 10 Years After Commissioning. *Water Science and Technology*, 35(5) 337-343 p.
- BEEBE, D. A., CASTLE, J. W., MOLZ, F. J., RODGERS, J. H. (2014): Effects of evapotranspiration on treatment performance in constructed wetlands: Experimental studies and modeling. *Ecological Engineering*, 71 394–400 p.
- BREEN, P. F., CHICK, A. J. (1995): Rootzone Dynamics in Constructed Wetlands receiving Wastewater: a Comparison of Vertical and Horizontal Format Systems. *Water Science and Technology*, 32 (3) 281-289 p.

- BRIX, H. (1994): Function of macrophytes in constructed wetlands. *Water Sci. and Techn.* 29(04): 71-78 p.
- BRIX, H. (1994a): Use of constructed wetlands in water pollution control: historical development, present status and future perspectives. *Water Science and Technology*, 30 (8) 209-223 p.
- BRIX, H., SCHIERUP, H. H. (1990): Soil oxygenation in constructed reed beds: the role of macrophyte and soil-atmosphere interface oxygen transport. In: *Constructed Wetlands in Water Pollution Control*. Pergamon Press, Oxford, p. 53.–66.
- BRIX, H., ARIAS, C.A., JOHANSEN, N.H., (2002): BOD and nitrogen removal from municipal wastewater in an experimental two-stage vertical flow constructed wetland with recycling. In: *Proceedings 8th International Conference Wetland Systems for Water Pollution Control*, University of Dar es Salaam, Tanzania, p. 400.-410.
- BRIX, H., ARIAS, C., A. (2005): Danish guidelines for small-scale constructed wetland systems for onsite treatment of domestic sewage. *Water Science and technology*, 51 (9) 1-9 p.
- BIALOWIEC, A., ALBUQUERQUE, A., RANDERSON, P. F. (2014): The influence of evapotranspiration on vertical flow subsurface constructed wetland performance. *Ecological Engineering*, 67 89–94 p.
- BIAŁOWIEC, A., WOJNOWSKA - BARYLA, I. (2007): The efficiency of landfill leachate evapotranspiration in soil-plant system with reed *Phragmites australis*. *Ecohydrologic Hydrobiologic*, 7 (3–4) 331–337 p.
- BIRKIGT, J., STUMPP, C., MALOSZEWSKI, P., NIJENHUISI. (2017): Evaluation of the hydrological flow paths in a gravel bed filter modeling a horizontal subsurface flow wetland by using a multi-tracer experiment. *The Science of The Total Environment*, 621 265-272 p.
- BLANEY, H. F., CRIDDLE, W. D. (1962): Determining consumptive use and irrigation water requirements. *USDA Tech. Bull.* 1275 59 p.
- BONNER, R., AYLWARD, L., KAPPELMEYER, U., SHERIDAN, C. (2017): A comparison of three different residence time distribution modelling methodologies for horizontal subsurface flow constructed wetlands. *Ecological Engineering*, 99 99-113 p.
- BORIN, M. MILANI, M. SALVATO, M., TOSCANO, A. (2011): Evaluation *Phragmites australis* (Cav.) Trin. Evapotranspiration in Northern and Southern Italy. *Ecological Engineering*, 37 (5) 721–728 p.
- BOUTIN, C., LIÉNARD, A., (2003): Constructed wetlands for wastewater treatment: The French experience. In: *Proceedings Conference The Use of Aquatic Macrophytes for Wastewater*

Treatment in Constructed Wetlands, V. Dias and J. Vymazal, eds., ICN and INAGLisbon, Portugal, p. 437.-466.

BURGOON, P. S. (1993): Oxidation of carbon and nitrogen in the root zone of emergent macrophytes grown in wetland microcosms. PhD Thesis, University of Florida, Gainesville, United States of America

BURKA, U., LAWRENCE, P., (1990): A new community approach to wastewater treatment with higher water plants, in: *Constructed Wetlands in Water Pollution Control*, P.F. Cooper and B.C. Findlater, eds., Pergamon Press, Oxford, UK, p. 359.-371.

BURMAN, R. D., NIXON, P. R., WRIGHT, J. L., PRUITT, W. O. (1980): Water requirements. In: *Design of Farm Irrigation Systems*, 533 p.

BUSCH., J., LÖSCH., R. (1998): Stomatal behaviour and gas exchange of sedges (*Carex* spp.) under different soil moisture regimes. *Physics and Chemistry of the Earth* 23 443-448 p.

BUTTON, M., NIVALA J., WEBER K. P., AUBRON T., MÜLLER, R. A. (2015): Microbial community metabolic function in subsurface flow constructed wetlands of different designs, *Ecological Engineering*, 80 162-171 p.

CARBALLEIRA, T., RUIZ, I., SOTO, M. (2016): Aerobic and anaerobic biodegradability of accumulated solids in horizontal subsurface flow constructed wetlands. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 119 396-404 p.

CHAZARENCO, C., MERLIN, G., YVES, G. (2003): Hydrodynamics of horizontal subsurface flow constructed wetlands. *Ecological Engineering*, 21 165-173 p.

CHRISTIANSEN, J. E. (1968): Pan evaporation and evapotranspiration from climatic data. *Journal of Irrigation Drain Division*, ASCE, 263–265 p.

COOPER, P., GRIFFIN, P., HUMPHRIES, S., POUND, A. (1999): Design of a hybrid reed bed system to achieve complete nitrification and denitrification of domestic sewage. *Water Science and Technology*, 40 (03) 283-289 p.

CRITES, R. W. (1994): Design Criteria and Practice for Constructed Wetlands. *Water Science and Technology*, 29 (4) 1- 6 p.

DE MATOS, M. P., SPERLING VON M., DE MATOS, A. T.(2018): Clogging in horizontal subsurface flow constructed wetlands: influencing factors, research methods and remediation techniques. *Environmental Science and Bio/Technology*, 17 87–107 p.

DEAN, M., ASHTON, P.A. (2008): Leaf surfaces as a taxonomic tool: the case of *Carex* section *Phacocystis* (Cyperaceae) in the British Isles. *Plant Systematics Evolution*, 273 97–105 p.

- DE PAOLI, A., SPERLING, VON, M. (2013): Evaluation of clogging in planted and unplanted horizontal subsurface flow constructed wetlands: solids accumulation and hydraulic conductivity reduction. *Water Science and Technology*, 67 (6) 1345-52 p.
- DITTRICH, E. (2006a): A gyökérszénés szennyvíztisztítás hazai tapasztalatai és elterjedésének lehetőségei. *Maszesz Hírcsatorna*, 10-20 p.
- DITTRICH, E. (2006b): A gyökérszénés szennyvíztisztítás és technológiai alternatívái. MHT XXIV. Országos vándorgyűlés Pécs, Magyarország 235-253 p.
- DITTRICH, E. (2006c): Experiences on hydraulic performance of sub-surface flow constructed wetlands. *Pollack Periodica* 1 (1) 53-66 p.
- DITTRICH E. (2008): A tartózkodási idő eloszlás vizsgálata. PTE-PMMK Környezetmérnöki Tanszék, oktatási segédlet, Pécs, Magyarország
- DITTRICH, E. (2016): Statisztikai módszerek fejlesztése a gyökérszénés szennyvíztisztítók méretezésére és modellezésének támogatására. PhD Értekezés, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Budapest, Magyarország 256 p.
- DITTRICH, E., KLINCSIK, M. (2015a): Analysis of conservative tracer measurement results using the Fréchet distribution at planted horizontal subsurface flow constructed wetlands filled with coarse gravel and showing the effect of clogging processes. *Environmental Science and Pollution Research*, 22 (21) 17104–17122 p.
- DITTRICH, E., KLINCSIK, M. (2015b): Application of divided convective-dispersive transport model to simulate conservative transport processes in planted horizontal sub-surface flow constructed wetlands, *Environmental Science and Pollution Research*, 22 (22) 18148-62 p.
- DULOVICS, D. (2002): Kistelepülések és csatornával gazdaságosan nem ellátható területek szennyvíztisztítása. II. *MASZESZ Hírcsatorna*, 3-14 p.
- DOORENBOS, J., PRUITT, W.O. (1975): Guidelines for predicting crop water requirements. Irrigation Drainage Paper. FAO/UNU, Rome, Italy. 168 p.
- EUROPEAN COMMISSION GUIDE (2002): Extensive wastewater treatment processes. Adapted to small and medium sized communities (500 to 5000 P.E.)
- FLEIT, E. (1988): Gyökérszénés szennyvízkezelés. VITUKI jelentés, 3 – 20 p.
- FREEDMAN, A., GROSS, A., SHELEF, O., RACHMILEVITCH, S., ARNON, S. (2014): Salt uptake and evapotranspiration under arid conditions in horizontal subsurface flow constructed wetland planted with halophytes. *Ecological Engineering*, 70 282-286. p.

- GALVÃO, A. F., MATOS, J. S., FERREIRA, F. S., CORREIA, F. N. (2010): Simulating flows in horizontal subsurface flow constructed wetlands operating in Portugal. *Ecological Engineering*, 36 (4) 596–600 p.
- GOEBES, MD., YOUNGER, PL. (2004): A simple analytical model for interpretation tracer test in two-domain subsurface flow systems. *Mine Water Environmental*, 23 138–143 p.
- GOVINDARAJU, R. S., DAS, B. S. (2007): Moment analysis for subsurface hydrologic applications. *Water Science Technology Library*. Vol 61. Springer Netherland.
- GRÜNEBERG, B., KERN, J. (2001): Phosphorus retention capacity of iron-ore blast furnace slag in subsurface flow constructed wetlands. *Water Science and Technology*, 44 (11/12) 69-75 p.
- HABERL, R., PERFLER, R., MAYER, H. (1995): Constructed Wetlands in Europe. *Water Science and Technology*, 32 (3) 305-315 p.
- HAMOURI, E. B., NAZIH, J, LAHJOUJ, J. (2007): Subsurface-horizontal flow constructed wetland for sewage treatment under Moroccan climate conditions. *Desalination*, 215 153–158 p.
- HARGEAVES, G. H., SAMANI, Z. A. (1985): Reference crop evaporation from temperature. *Applied Engineering in Agriculture*, 1 (2) 96–99 p.
- HEADLEY, T. R., DAVISON, L., HUETT, D. O., MÜLLER, R. (2012): Evapotranspiration from subsurface horizontal flow wetlands planted with *Phragmites australis* in sub-tropical Australia. *Water Research*, 46 (2) 345–354 p.
- JACOBS, J. M., MYERS, D. A., ANDERSON, M. C, DIAK, G. R. (2002): GOES surface insolation to estimate wetlands evapotranspiration. *Journal of Hydrology*, 266 53–65 p.
- JENSEN, M. E. (1968): Water consumption by agricultural plants. Chapter 1. In: *Water Deficits and Plant Growth* (T. T. Kozlowski, ed.). Academic Press, New York, p. 1.–22.
- JOBBÁGY, S. (1995): Környezetkímélő és természetközeli szennyvíztisztítási eljárások alkalmazásainak, elterjedésének lehetőségei Magyarországon. Környezetfejlesztési és Területfejlesztési Minisztérium, Budapest.
- JOHANSEN, N.H., BRIX, H., ARIAS, C.A., (2002): Design and characterization of a compact constructed wetland system removing BOD, nitrogen and phosphorus from single household sewage. In: *Proceedings 8th International Conference Wetland Systems for Water Pollution Control*, University of Dar es Salaam, p. 47.-61.
- KADLEC, R. H. (1997): Deterministic and stochastic aspects of constructed wetland performance and design. *Water Science and Technology*, 35 (5) 149-156 p.
- KADLEC, R. H. (1999): Chemical, physical and biological cycles in treatment wetland. *Water Science and Technology*, 40 (3) 37-44 p.

- KADLEC, R. H. (2006): Water temperature and evapotranspiration on surface flow wetland in hot arid climate. *Ecological Engineering*, 26 328-340 p.
- KADLEC, R.H., KNIGHT, R.L., VYMAZAL, J., BRIX, H., COOPER, P., HABERL R. (2000): Constructed wetlands for pollution control: processes. performances. design and operation. IWA Specialist Group on Use of Macrophytes in Water Pollution Control. IWA Publishing. London. UK 171 p.
- KADLEC, R. H., TANNER, C. C. (2003): Oxygen flux implications of observed nitrogen removal rates in subsurface-flow treatment wetlands. *Water Science and Technology*, 48 (05) 191-198 p.
- KEMP, W. M., MURRAY, L. (1986): Oxygen Release from Roots of the Submersed Macrophyte *Potamogeton perfoliatus* L.: Regulating Factors and Ecological Implications, *Aquatic Botany*, 26 271–283 p.
- KING, A. C., MITCHELL, C. A., HOWES, T. (1997): Hydraulic tracer studies in a pilot scale subsurface flow constructed wetland. *Water Science and Technology*, 35 (05) 189-196 p.
- KICKUTH, R. (1981): Verfahren spinzip. - Der Wurzelraumsorgung-Mitt. Des wasserverbandstonges wiedersachsen un der Landesverbander wasser-und bodenverbände in Hessen und Rhein land-Pfalz, 51 p.
- KONYHA, D. K., SHAW, D. T., WEILER, K. W. (1995): Hydrologic design of a wetland: advantages of continuous modelling. *Ecological Engineering*, 4 99-116 p.
- KORKUSUZ, E.A., BEGLIO, LU, M., DEMIRER, G.N., (2004): Comparison of gravel and slag based vertical flow reed bed performance in Turkey. In: Proceeding 9th International Conference Wetland Systems for Water Pollution Control, ASTEE, Lyon, p. 173.-180.
- KOVÁCS, B., FILEP GY., LAKATOS, J., MADARÁSZ, T., SZABÓ, I. (2002): Szennyezett területek kármentesítése. (Szerk. Szabó Imre). Miskolci egyetem kiadó, Miskolc. 483 p.
- KUMAR, R., JAT, M. K., SHANKAR, V. (2012): Methods to estimate irrigated reference crop evapotranspiration – a review. *Water Science and Technology*, 66 (3) 525–535 p.
- LABER, J., PERFLER, R., HABERL, R. (2000): Influence of substrate clogging on the treatment capacity of vertical-flow constructed wetland system. In: 7th International Conference on Wetland Systems for Pollution Control p. 937.-945.
- LAAFFAT, J., OUAZZANI, N., MANDI, L. (2015): The evaluation of potential purification of a horizontal subsurface flow constructed wetland treating greywater in semi-arid environment, *Process Safety and Environmental Protection*, 95 86-92 p.



- LANCHEROS, J. C., PUMAREJO, C. A., QUINTANA, J. C., CASELLES-OSORIO, A., CASIERRA-MARTÍNEZ, H. A. (2017): Solids distribution and hydraulic conductivity in multi-cell horizontal subsurface flow constructed wetlands. *Ecological Engineering*, 107 49–55 p.
- LANGERGRABER, G., HARBERL, R., LABER, J., PRESSL, A. (2003): Evaluation of substrate clogging processes in vertical flow constructed wetlands. *Water Science and Technology* 48 (05) 25-34 p.
- LANGERGRABER, G., GIRALDI, D., MENA, J., MEYER, D., PENA, M., TOSCANO, A., BROVELLI, A., KORKUSUZ, A. (2009): Recent developments in numerical modelling of subsurface flow constructed wetlands. *Science of the Total Environment*, 407 3931–3943 p.
- LANGERGRABER, G., SIMUNEK, J. (2011): Hydrus 2D wetland module manual. PC-Progress, Prague, 56 p.
- LEVENSPIEL, O. (1972): Chemical Reaction Engineering. John Wiley and Sons Inc, New York, 578 p.
- LETO, C., TUTTOLOMONDO, T., LA BELLA, S., LEONE, R., LICATA, M. (2013): Effects of plant species in a horizontal subsurface flow constructed wetland – phytoremediation of treated urban wastewater with *Cyperus alternifolius* L. and *Typhalatifolia* L. in the West of Sicily (Italy). *Ecological Engineering*, 61 282–291 p.
- LICCIARDELLO, F., AIELLO, R., ALAGNA, V., IOVINO, M., VENTURA, D., CIRELLI, L. G. (2019): Assessment of clogging in constructed wetlands by saturated hydraulic conductivity measurements. *Water Science and Technology*, 79 (2) 314–322 p.
- LIENARD, A., BOUTIN, C., ESSER, D., (1990): Domestic wastewater treatment with emergent helophyte beds in France. In: *Constructed Wetlands in Water Pollution*, P.F. Cooper, and B.C. Findlater, eds., Pergamon Press, Oxford, UK, p. 183.-192.
- LIU H., HU Z., JIANG, L., ZHUANG, L., HAO L., ZHANG, J., NIE, L. (2019): Roles of carbon source-derived extracellular polymeric substances in solids accumulation and nutrient removal in horizontal subsurface flow constructed wetlands. *Chemical Engineering Journal*, 362 702-711 p.
- LIU, H., HU, Z., ZHANG, J., JI, M., ZHUANG, L., NIE, L., LIU, Z. (2018): Effects of solids accumulation and plant root on water flow characteristics in horizontal subsurface flow constructed wetland. *Ecological Engineering*, 120 481-486 p.
- MAGMEDOV, V. G., ZAKHARCHENKO, M. A., YAKOVLEVA, L., INCE, M. (1996): The use of constructed wetlands for the treatment of run-off and drainage waters: the UK and Ukraina experience. *Water Science and Technology*, 33 (4-5) 315-323 p.

- MARTIN, A.D. (2000): Interpretation of residence time distribution data. *Chemical Engineering Science*, 55 5907-5917 p.
- MASZESZ MI-I-1:2003 : Természet-közeli szennyvíztisztítás. Gyökérmezős szennyvíz tisztító kialakítása és üzemelése. Függőleges átfolyás. MASZESZ műszaki irányelv.
- MILANI, M., MARZO, A., TOSCANO, A. , CONSOLI, S. , CIRELLI, G. L., VENTURA, D. , BARBAGALLO, S. (2019): Evapotranspiration from horizontal subsurface flow constructed wetlands planted with different perennial plant species. *Water*, 11 (10) 21-59 p.
- MENA, J., VILLASENOR, J., FERNANDEZ, F. J., GOMEZ, R., DE LUCAS, A. (2011): Hydraulic modelling of horizontal-subsurface flow constructed wetlands: Influence of operation time and plant species. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 91 (7–8) 786–800 p.
- MOLLE, P., LIÉNARD, A., GRASMICK, A., IWEMA, A., KABBABI, A. (2005b): Apatite as an interesting seed to remove phosphorus from wastewater in constructed wetlands, *Water Science and Technology*, 51 (9) 193-203 p.
- MONTEITH, J.L. (1965): Evaporation and environment. In: Proceedings of the 19th Symposia of the society for Experimental Biology. University Press, Cambridge, p. 205.–234.
- MONTEITH, J.L. (1981): Evaporation and surface temperature. *Quartely Journal of the Royal Meteorological Society*, 107 (451) 1–27 p.
- MUNOZ, P., DRIZO, A., HESSION, W. C. (2006): Flow patterns of dairy wastewater constructed wetlands in a cold climate, *Water Research*, 40 (17) 3209-3218 p.
- NETTER, R. (1994): Flow Characteristics of Planted Soil Filter. *Water Science and Technology*, 29 (4) 36-44 p.
- OKHRAVI, S., ESLAMIA, S., FATHIANPOUR, N. (2017): Assessing the effects of flow distribution on the internal hydraulic behavior of a constructed horizontal subsurface flow wetland using a numerical model and a tracer study. *Ecohydrology & Hydrobiology*, 17 (4) 264–273 p.
- PAPAEVANGELOU, V. A., GIKAS, G. D., TSIHRINTZIS, V. A. (2012): Evaluation of evapotranspiration in small on-site HSF constructed wetlands, *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, 47 (5) 766-785 p.
- PARDE, D., PATWA, A., SHUKLA, A., VIJAY, R., KILLEDAR, D. J., KUMAR, R. (2020): A review of constructed wetland on type, treatment and technology of wastewater. *Environmental Technology and Innovation*, 101261 p.

- PAULIUKONIS, N., SCHNEIDER, R. (2001): Temporal patterns in evapotranspiration from lysimeters with three common wetland plant species in the eastern United States. *Aquatic Botany*, 71 35–46 p.
- PEDESCOLL, A., SIDRACH-CARDONA, R., SÁNCHEZ, J. C., BÉCARES, E. (2013): Evapotranspiration affecting redox conditions in horizontal constructed wetlands under Mediterranean climate: influence of plant species. *Ecological Engineering*, 58 335–343 p.
- PENMAN, H.L. (1948): Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proceedings of the Royal Society*, 194 120–146 p.
- PRIESTLEY, C. H. B., TAYLOR, R. J. (1972): On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. *Monthly Weather Review*, 100 81–92 p.
- QUELUZ, J. G. T., FRANCISCA, F. S., PEREIRA, F. F. S., SÁNCHEZ-ROMÁN, R. M. (2018): Evapotranspiration and crop coefficient for *Typha latifolia* in constructed wetlands. *Water Quality Journal*, 53 (2) 53-60 p.
- RASH, J. K., LIEHR, S. K. (1999): Flow pattern analysis of constructed wetlands treating landfill leachate. *Water Science and Technology*, 40 (3) 309-315 p.
- RAJABZADEH, AMIN R., RAYMOND, L. L., KELA, P. W. (2015): Multiphysics modelling of flow dynamics, biofilm development and wastewater treatment in a subsurface vertical flow constructed wetland mesocosm. *Ecological Engineering*, 74 107-116 p.
- REHMAN, F., PERVEZ, A., KHATTAK, B. N., AHMAD, R., (2017): Constructed wetlands: perspectives of the oxygen released in the rhizosphere of macrophytes. *Clean - Soil Air Water*, 45 (1) 1600054
- RICHTER, K. M., MARGETS, J., SAUL, A. J., GUYMER, I., WORRALL, P. (2003): Baseline hydraulic performance of the Heathrow constructed wetlands subsurface flow system. *Water Science and Technology*, 47 177-181 p.
- SAMSÓ, R., JOAN G. (2013): BIO\_PORE, a mathematical model to simulate biofilm growth and water quality improvement in porous media: application and calibration for constructed wetlands. *Ecological Engineering*, 54 116-127 p.
- SCHIERUP, H.H., BRIX, H., LORENZEN, B. (1990): Wastewater Treatment in Constructed Reed Beds in Denmark – State of the Art. In: Proceedings of the International Conference on the Use of Constructed Wetlands in Water Pollution Control, Cambridge, UK, p. 495.-504.
- SIMONFFY, Z. (1998): Transzport modellek alkalmazása. KTM, Budapest. 147 p. (Kármentesítési kézikönyvsorozat)

- SULIMAN, F., FUTSAETHER, C., OXAAL, U., HAUGEN, L.E., JENSSEN, P. (2006): Effect of the inlet outlet positions on the hydraulic performance of horizontal subsurface-flow wetlands constructed with heterogeneous porous media. *Journal of Contamination Hydrology*, 87 (1–2) 22–36 p.
- SOMLYÓDY, L. (1980): A keresztirányú elkeveredés vizsgálata folyókban. *Hidrológiai Közlöny*, 5. sz. 221-232 p.
- SOMLYÓDY, L. (1982): An Approach to the Study of Transverse Mixing in Stream. *Journal of Hydraulic Research*, 20 (2)
- STELCZER, K. (2000): A vízkészlet gazdálkodás hidrológiai alapjai. Elte Eötvös Kiadó, Budapest. 410 p.
- SZEKERES, A. (2014): A hódmezővásárhelyi gyökérszénázás mintatelep transzport folyamatainak részletes elemzése, a műtárgy belső pontjain végzett mérések segítségével. PTE-MIK Tudományos Diákköri Konferencia, Pécs, Magyarország, 92 p.
- SZÉNÁSY, L. (2017): Az evapotranszpiráció napon belüli ingadozásának meghatározása. PTE-MIK Tudományos Diákköri Konferencia, Pécs, Magyarország, 40 p.
- SZILÁGYI, F. (1994): A szügyi gyökérszénázás szennyvíztisztító próbaüzemének értékelése és a telep végeleges üzemelési utasítása. Vituki Consult Rt., Budapest
- SZILÁGYI, F. (1998): Nádágyas szennyvíztisztítás. –“Környezetvédelem és Kutatás Fejlesztés”Országos Környezetvédelmi Innovációs Konferencia Kiadványa, Budapest, p. 25.-27.
- SZILÁGYI, F. (2004): A természet-közeli szennyvíztisztítás: áldás vagy átok? *Vízmű Panoráma*, XII.: 9-15 p.
- SZOLCSÁNYI, P. (1972): Transzportfolyamatok. Tankönyvkiadó, Budapest, 300 p.
- TANG, P., YU, B., ZHOU, Y., ZHANG, Y., LI, J. (2017): Clogging development and hydraulic performance of the horizontal subsurface flow stormwater constructed wetlands: a laboratory study. *Environmental Science and Pollution Research*, 24 9210–9219 p.
- TANNER, C. C., (1995): Accumulation of organic solids in gravel-bed constructed wetlands. *Water Science and Technology*, 32 (3) 229-239 p.
- TANNER, C. C., SUKIAS, J. P. (1995): Accumulation of organic solids in gravel-bed constructed wetlands. *Water Science and Technology*, 32 (3) 229-239 p.
- TARANTINO, E., SPANO, D. (2001): La valutazione dei fabbisogni irrigui. *Rivista di Irrigazione e Drenaggio*, 48 (4) 21–35 p. (in Italian).
- THORNTHWAITE, C.W. (1948): An approach toward a rational classification of climate. *Geographical Review*, 38 (1) 55–94 p.

- TOSCANO, A., LANGERGRABER, G., CONSOLI, S., CIRELLI, GL. (2009): Modelling pollutant removal in a pilot-scale two-stage subsurface-flow constructed wetlands. *Ecological Engineering*, 35 281–289 p.
- TURC, L. (1961): Estimation of irrigation water requirements, potential evapotranspiration: A simple climatic formula evolved up to date. *Annales Agronomiques*, 12 (1) 13–49 p.
- TUTTOLOMONDO, T., LICATA, M., LETO, C., LEONE, R., LA, BELLA, S. (2015): Effect of plant species on water balance in a pilot-scale horizontal subsurface flow constructed wetland planted with *Arundodonax L.* and *Cyperusalternifolius L.* – Two-year tests in a Mediterranean environment in the West of Sicily (Italy). *Ecological Engineering*, 74 79-92 p.
- TUTTOLOMONDO, T., LETO, C., LA, BELLA, S., LEONE, R., VIRGA, G., LICATA, M. (2016): Water balance and pollutant removal efficiency when considering evapotranspiration in a pilot-scale horizontal subsurface flow constructed wetland in Western Sicily (Italy). *Ecological Engineering*, 87 295-304 p.
- VYMAZAL, J. (2009): The Use Constructed Wetlands with Horizontal Sub-Surface Flow for Various Types of Wastewater, *Ecological Engineering*, 35 (1) 1-17 p.
- VYMAZAL, J. (2013): Emergent plants used in free water surface constructed wetlands: A review, *Ecological Engineering*, 61 582-592 p.
- VYMAZAL, J. (2018): Does clogging affect long-term removal of organics and suspended solids in gravel-based horizontal subsurface flow constructed wetlands? *Chemical Engineering Journal*, 331 663-674 p.
- VYMAZAL, J., KROPFLOVA, L. (2008): Wastewater treatment in constructed wetlands with horizontal sub-surface flow. Springer, Verlag, Germany, 579 p.
- WANG, J., HUANG, S., HE, C., NG, C. (2011): Numerical analysis of the performance of horizontal and wavy subsurface flow constructed wetlands. *Journal of Hydrodynamics*, 23 (3) 339-347 p.
- WANG, Y., SONG, X., LIAO, W., NIU, W., WANG, W., DING, Y., WANG, Y., YANB, D. (2014): Impacts of inlet–outlet configuration, flow rate and filter size on hydraulic behavior of quasi-2-dimensional horizontal constructed wetland: NaCl and dye tracer test. *Ecological Engineering*, 69 177–185 p.
- WANG, H., SHENG, L., XU, J. (2021): Clogging mechanisms of constructed wetlands: A critical review, *Journal of Cleaner Production*, 295 126455
- WEEDON, C.M. (2003): Compact vertical flow constructed wetland systems – first two years' performance. *Water Science and Technology*, 48 (05) 18-23 p.

WINTER, K. J., GOETZ, D. (2003): The impact of sewage composition on the soil clogging phenomena of vertical flow constructed wetlands. *Water Sci. and Techn.* 48 (05) 9-14 p.

WU, H., ZHANG, J., NGO, H. H., GUO, W., HU, Z., LIANG, S., FAN, J., LIU, H. (2015): A review on the sustainability of constructed wetlands for wastewater treatment: Design and operation. *Bioresource Technology*, 175 594-601 p.

YANO, T., NAKAYAMA, M., YAMADA, K., INOUE-KOHAMA, A., SATO, S., ENARI, K. (2017): Influence of Growth of Reeds on Evapotranspiration in Horizontal Subsurface Flow Constructed Wetlands. *Environment and Ecology Research*, 5 (6) 427-435 p.

YUAN, C., HUANG, T., ZHAO, X., ZHAO, Y. (2020): Numerical Models of Subsurface Flow Constructed Wetlands: Review and Future Development. *Sustainability*, 12 (8) 3498 p.

ZSUFFA, I. (1996): Műszaki Hidrológia I. Műegyetemi Kiadó, Budapest, 305 p.

#### **Internetes hivatkozások:**

http1: <https://www.brc.ac.uk/plantatlas> Kereső program: Google. Lekérdezés időpontja: 2021. 12. 07.

http2: <https://www.iucnredlist.org/species/164259/5801418> Kereső program: Google. Lekérdezés időpontja: 2021. 11. 18.

http3: <http://www.met.hu> Kereső program: Google. Lekérdezés időpontja: 2022. 01. 13.

## A témában megjelent saját publikációk listája

1. Tudományos folyóiratokban megjelent (közlésre elfogadott), lektorált, teljes szövegű tudományos közlemény

1.1. Idegen nyelvű, impakt faktoros folyóiratban (WEB OF SCIENCE szerint):

1.1.1. Hazai kiadású

1.1.2. Külföldi kiadású

E. Dittrich, É. Salamon-Albert, **D. Somfai**, A. Dolgos-Kovács, and T. Kiss, “Transpiration effect of Tufted sedge for a horizontal subsurface flow constructed wetland,” *Water Science and Technology*, 79 1905–1911 p. IF: 1,624 (2019)

E. Dittrich, M. Klincsik, **D. Somfai**, A. Dolgos-Kovács, T. Kiss, A. Szekeres (2020): Analysis of conservative tracer measurement results inside a planted horizontal sub-surface flow constructed wetland filled with coarse gravel using Fréchet distribution. *Environmental Science and Pollution Research*, 28, pp. 5180–5204, IF:3,056 (2021)

E. Dittrich, M. Klincsik, **D. Somfai**, A. Dolgos-Kovács, T. Kiss, A. Szekeres (2020): Application of divided convective-dispersive transport model to simulate variability of conservative transport processes inside a planted horizontal sub-surface flow constructed wetland. *Environmental Science and Pollution Research*, 28 15966–15994 p. 3,056 (2021)

1.2. Idegen nyelvű, nem impakt faktoros folyóiratban

1.2.1. Hazai kiadású

**D. Somfai**, E. Dittrich, É. Salamon- Albert, A. Dolgos-Kovács (2020): Estimated seasonal daily evapotranspiration rates for a horizontal subsurface flow constructed wetland. *Analecta Technica Szegedinesia* Vol. 14., II.

1.2.2. Külföldi kiadású

1.3. Magyar nyelvű, nem impakt faktoros hazai folyóiratban

**Somfai D.**, Dittrich E., Dolgosné Kovács A. (2020): Innovatív szennyvíztisztító kutatótelep Pécsen. *Dunakavics* VIII. évfolyam, X. szám

**Impakt faktor összesen: 7,736**

## Mellékletek

### 1.Melléklet: A hódmezővásárhelyi telep bemutatása

Oldómedence:

A zárt szennyvízgyűjtő egy VB medence, melynek elfolyási oldalán egy függőleges T-idom és csőcsonkok segítségével oldották meg az uszadék- és iszapmentes elfolyást. Az oldó-medence belmérete: 210\*168 cm.

Átemelő műtárgy:

A házi átemelőbe a szennyvíz egy Dk 110 KG-PVC csövön keresztül folyik át. Az átemelő szakaszosan juttatja a szennyvizet a függőleges átfolyású gyökérszívós műtárgyra, így biztosítva a megfelelő oxigéntranszport kialakulását. A nyomócső Dk 50 KPE vezetékéből épült ki. Az átemelőszivattyú egy úszókapcsolós vérszintvezérléssel és időkapcsolós vezérléssel van felszerelve. Az időkapcsoló 6 óránként kapcsol be 2 perc időtartamra. A rávezetési vízhozamot egy golyóscsap fojtási szögének állításával lehet szabályozni az üzemeltetés során.

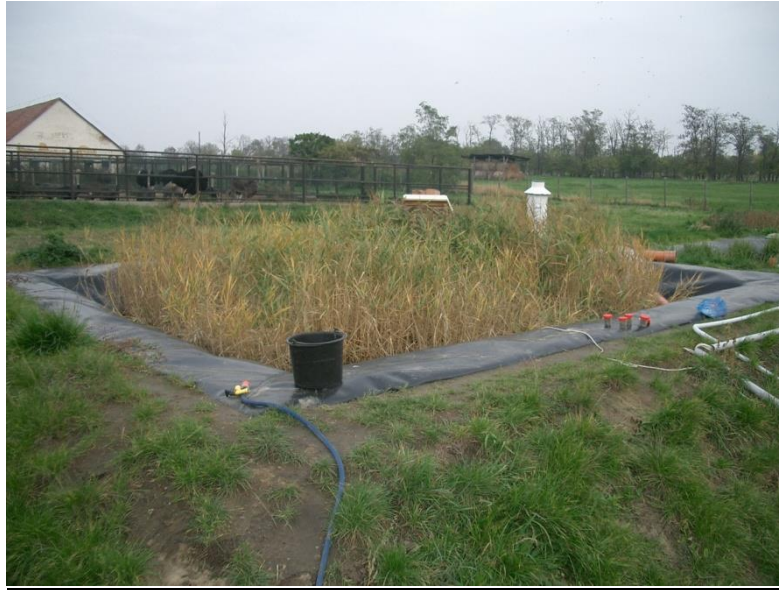
Függőleges átfolyású gyökérszívós műtárgy:

A függőleges átfolyású műtárgy belülről gyökérálló HDPE fóliával bélelt. A műtárgyban többrétegű töltet van elhelyezve, a rétegrend az alábbi (lentől felfelé haladva):

- 20 cm frakcionált kavics gyűjtőtöltet 6-12 mm frakciótartománnyal
- 10 cm frakcionált kavics gyűjtőtöltet 1-8 mm frakciótartománnyal
- 50 cm folyami homok vagy homokos kavics szűrőtöltet
- 15 cm frakcionált kavics osztótöltet 6-12 mm frakciótartománnyal az osztódrének körül, közöttük a szűrőtöltettel azonos anyag
- 10 cm frakcionált kavics gyűjtőtöltet 1-8 mm frakciótartománnyal a fagyvédelem fokozására

Az osztódrének Dk 63 KPE csőből készültek, rajtuk 30 cm-enként egy 4 mm átmérőjű furattal. A gyűjtődrén egy Dk 125 KG-PVC csőből épült ki, ezen szintén egyedileg sorban perforált, 4 mm-es lyukakkal. Az utóbbi csőnél 30 cm-enként 3 lyuk van fúrva a csőre, 120°-ban elforgatva. Ez a műtárgy náddal van telepítve. A műtárgyban a vízszint szabályozható, hasznos felülete pedig 450\*390 cm.





**44. ábra: A függőleges átfolyású műtárgy (DITTRICH 2016)**

Vízszintes átfolyású gyökérszűrésű műtárgy:

A második műtárgy egy hosszanti átfolyású gyökérszűrésű műtárgy. Az osztótöltet 16-64 mm-es frakcionált kavics, melyben található egy egyedileg perforált Dk 125 KG-PVC cső. A perforáció lyukbőssége itt is 4 mm. A gyűjtőtöltet és gyűjtődrén anyaga az osztótöltettel és osztódrénnel azonos, a köztük a szűrőtöltet van, mely frakcionált kavics 4-12 mm átmérővel. A fenéklejtés hosszirányban közel 1,0%-os. Az egész műtárgy 1,5 mm-es HDPE fólia szigeteléssel bélelt. A töltet átlagos mélysége 0,6 m. Az állandó vízszintet egy szinttartó akna biztosítja az elfolyási oldalon. A műtárgy hasznos felülete 685\*370 cm. A műtárgy sással van telepítve.

Utótisztító tó:

Az utótisztító tó békalencsével (Lemna) van telepítve. A műtárgy egy rézsűs, 1,5 mm-es HDPE fóliával szigetelt földmedence, melynek hasznos felülete 7,40\*3,40 m, és 60 cm vízmélységgel rendelkezik. A műtárgy végében beépített Dk 125 KG-PVC szinttartó cső vezeti át a tisztított szennyvizet a nyárfás öntözőterületre.



**45. ábra: Hosszanti átfolyású gyökérszórás műtárgy (fotó: Somfai Dávid, 2016.07.07.)**

Nyárfás öntözőterület:

A nyárfás öntözőterület két szivárogtató árokból áll, árkonként pedig egy leágazás van kialakítva és elzárószerelvénnel ellátva. A kazetták öntözését havonta váltogatják úgy, hogy mindig egy tolózár zárt, egy pedig nyitott állapotban van. Csak a téli időszakban van mindkét tolózár nyitva. Az árkok 0,2% hosszirányú lejtéssel vannak kialakítva. Abban az esetben, ha a talajvíz olyan magas szintre kerül, hogy nincs biztosítva a legalább 1 m vastag szűrőréteg, a tározóban kell tartani a tisztított vizeket addig, míg a talajvíz újra vissza nem süllyed a megfelelő szintre.

## **2.Melléklet: A hódmezővásárhelyi gyökérszénázás szennyvíztelep monitoringrendszerének bemutatása**

Jelen mellékletben a TOKAI-projekt keretében kialakított áramlási és vízszintmérési monitoringrendszert mutatom be, mely szükséges a disszertációban lévő mérések és eredmények megértéséhez.

### Áramlási mérések

Az áramlási mérések célja a gyökérszénázás rendszerekben lejárató áramlási folyamatok szakirodalomban publikáltaknál jóval pontosabb megismerése. Az alábbiakban bemutatott mérőkör a lehető legpontosabb dinamikus vízmérleg felállítását teszi lehetővé, és modellkalibrálásra alkalmas mérési eredményeket biztosít.

Az összeállított mérőkör segítségével az alábbi paramétereket mértük:

- vízhozammérés,
- vízszintmérés 5 pontban,
- töltet víztartalmának mérése,
- növényzet állapotának mérése,
- növényzet magassága,
- gyökérszénázás mélysége,
- hőmérsékletmérés,
- páratartalom-mérés,
- töltetporozitás-mérés,
- csapadékmennyiség-mérés,
- konzervatív nyomjelzőanyagvizsgálatok.

Ezek közül egyes mért paraméterek közvetlenül áramlási jellegűek, míg mások csak közvetve szolgálják az áramlási rendszer megismerését.

### Vízszintmérés

A vizsgált tisztítórendszer 5 pontján van folyamatos vízszintészlelés. Ezek az alábbiak:

- 1. kútszonda: átemelőben
- 2. kútszonda: függőleges átfolyású gyökérszénázás műtárgy egy pontján

- 3., 4. és 5. kútszonda: vízszintes átfolyású műtárgy 3 különböző pontján

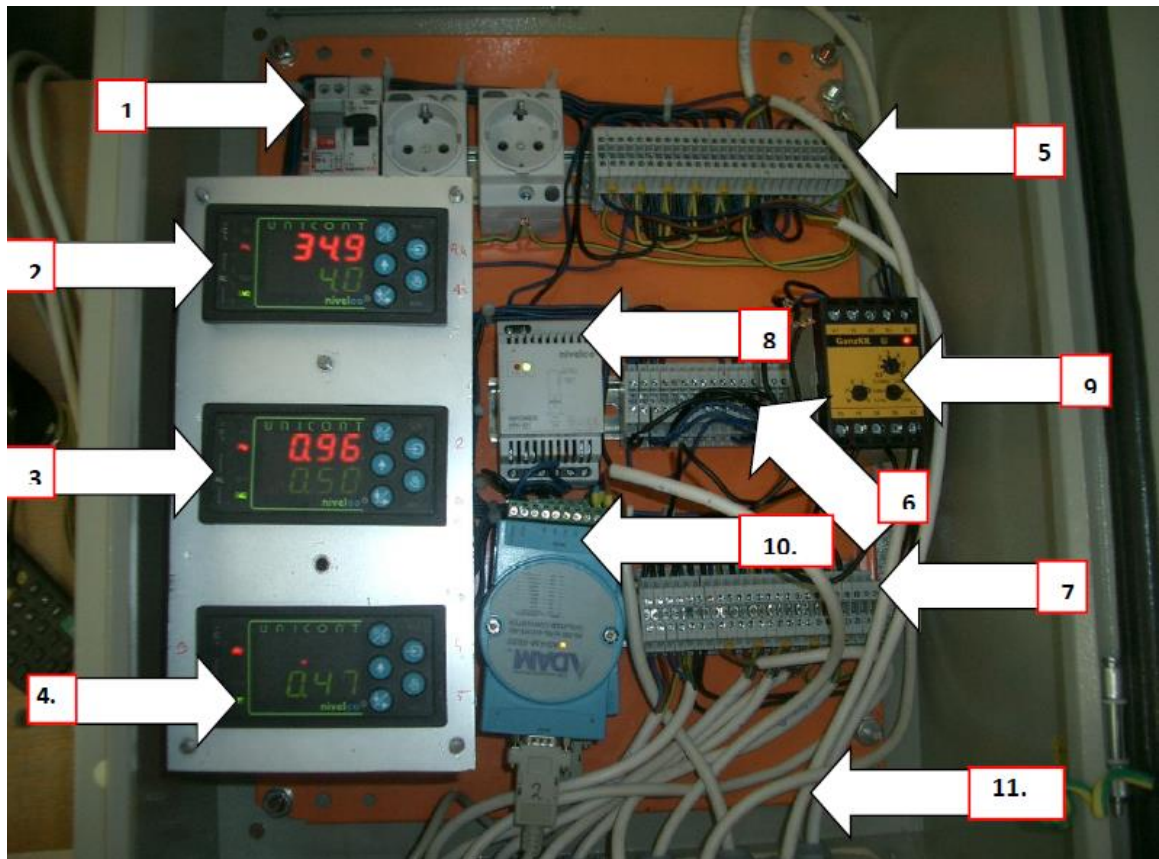
A vízszintmérésre a NIVELCO NIVOPRESS NPK220-2 kútszondák lettek beépítve, melyek 4-20 mA-es kimeneten keresztül juttatják az adatokat a később ismertetésre kerülő jelátalakító és adattároló rendszerre.

A jelátalakító rendszer kialakításánál a fő cél az volt, hogy a lehető legtöbb paramétert folyamatosan – teljesen automatizáltan – lehessen észlelni és regisztrálni.

Az adatgyűjtő rendszer a következő információkat fogadja, emellett konvertálja és tárolja 10 s-os időléptékben:

- Az 1-es Parshall-csatornán átfolyó vízhozam
- A 2-es Parshall-csatornán átfolyó vízhozam
- Az 5 db kútszondával mért vízszintek
- Az átemelő ki- és bekapcsolási időpontjai
- A nedves és száraz hőmérő által mért hőmérsékletértékek

A mérőszondák és egyéb eszközök már fentebb bemutatásra kerültek. Ebben a fejezetben a rendszer központi egysége kerül bemutatásra. A központi jelátalakító és adatgyűjtő rendszer két szoftverből, egy számítógépből és emellett egy egyedileg kialakított speciális egységből épül fel. A két alkalmazott szoftver közül az egyik egy egyedileg átalakított port monitor, ez fentebb került bemutatásra. A másik szoftver a Nivelco Zrt. által forgalmazott NIVISION adatgyűjtő program, ezt a forgalmazó egyedileg adaptálta a kialakított mérőrendszerre.



46. ábra: A jelátalakító egység (DITTRICH 2016)

A fenti képen jelölt egységek:

1. Fő- és mellék kismegszakítók szerviz dug-aljzatokkal
2. UNICONT univerzális szabályzó PMM3241M hőmérők váltott, illetve az 1. kútszonda jeleire beállítva
3. UNICONT univerzális szabályzó PMM3241M 2. és 3. kútszonda jeleire beállítva
4. UNICONT univerzális szabályzó PMM3241M 4. és 5. kútszonda jeleire beállítva
5. Erősáramú sorkapocstömb
6. RS485 közösítő sorkapocstömb
7. Fő osztó sorkapocstömb
8. PPK311M NIPOWER PPK 331-1 tápegység
9. Ganz KK váltó-relé
10. Jad450M ADAM 4520 RS485/RS232 átalakító

A PPK311M NIPOWER PPK 331-1 tápegység azt a célt szolgálja, hogy a kútszondák és a hőmérők áramhurkos elektromos táplálását biztosítsa. A kútszondák és hőmérők felől érkező 4-20 mA-es mérőjelek rávezethetőek az UNICONT PMM3241M típusú szabályzókra. A szabályzók fogadják a jeleket, és átalakítják azokat numerikus jellé, majd kijelzik, és a digitális jeleket továbbítják az RS485 közösítő sorkapocsra; ugyanerre a sorkapocsra mennek az ultrahangos szinttávadók felől érkező jelek is. A közösített RS485-ös jelet egy serial converter, a Jad450M ADAM 4520 serial alakítja át a számítógép által fogadható RS232-es soros jellé.

### 3. Melléklet: Transzspirációs mérés adatsora

Az ebben a mellékletben szereplő adatsorok mind a három paraméter (fényintenzitás, hőmérséklet, páratartalom) tavaszi, nyári és őszi mérési eredményeit mutatják be. A táblázatokban fellehető színezés miatt könnyebben elkülöníthető az 5 mérési adat, aminek az átlagait vettem a számításaimhoz.

19. táblázat: Tavaszi transzspiráció a fényintenzitás függvényében

PPFD	E_20_Tavaszi	Átlag	Szórás	PPFD	E_25_Tavaszi	Átlag	Szórás	PPFD	E_30_Tavaszi	Átlag	Szórás
1566	2,70			1566	3,10			1566	4,82		
1566	2,72			1566	3,13			1566	4,90		
1566	2,67			1566	3,12			1566	4,79		
1566	2,74			1566	3,18			1566	4,88		
1566	2,76	2,72	0,03	1566	3,11	3,13	0,03	1566	4,80	4,84	0,05
1392	2,69			1392	3,12			1392	4,81		
1392	2,68			1392	3,13			1392	4,77		
1392	2,66			1392	3,06			1392	4,76		
1392	2,70			1392	3,04			1392	4,64		
1392	2,70	2,69	0,02	1392	3,09	3,09	0,04	1392	4,79	4,75	0,07
1218	2,65			1218	3,10			1218	4,75		
1218	2,67			1218	3,00			1218	4,73		
1218	2,64			1218	3,09			1218	4,72		
1218	2,72			1218	3,00			1218	4,72		
1218	2,65	2,67	0,03	1218	3,03	3,04	0,05	1218	4,70	4,72	0,02
1044	2,65			1044	2,93			1044	4,78		
1044	2,68			1044	3,02			1044	4,74		
1044	2,64			1044	3,03			1044	4,77		
1044	2,65			1044	3,07			1044	4,72		
1044	2,73	2,67	0,04	1044	3,00	3,01	0,05	1044	4,68	4,74	0,04
870	2,74			870	2,90			870	4,56		
870	2,63			870	2,95			870	4,68		
870	2,60			870	3,01			870	4,77		
870	2,72			870	3,03			870	4,68		
870	2,65	2,67	0,06	870	2,97	2,97	0,05	870	4,61	4,66	0,08
696	2,63			696	2,92			696	4,57		
696	2,64			696	2,97			696	4,70		
696	2,63			696	2,93			696	4,59		
696	2,67			696	2,97			696	4,66		
696	2,64	2,64	0,02	696	2,90	2,94	0,03	696	4,67	4,64	0,06
522	2,62			522	2,90			522	4,46		
522	2,66			522	2,91			522	4,55		
522	2,54			522	2,92			522	4,58		
522	2,57			522	2,89			522	4,63		
522	2,59	2,60	0,05	522	2,93	2,91	0,02	522	4,51	4,55	0,07
392	2,55			392	2,80			392	4,39		



PPFD	E_20_Tavaszi	Átlag	Szórás	PPFD	E_25_Tavaszi	Átlag	Szórás	PPFD	E_30_Tavaszi	Átlag	Szórás
392	2,52			392	2,72			392	4,28		
392	2,48			392	2,75			392	4,33		
392	2,53			392	2,76			392	4,32		
392	2,47	2,51	0,03	392	2,79	2,76	0,03	392	4,31	4,33	0,04
305	2,45			305	2,68			305	4,19		
305	2,40			305	2,74			305	4,19		
305	2,42			305	2,72			305	3,99		
305	2,40			305	2,68			305	4,02		
305	2,32	2,40	0,05	305	2,62	2,69	0,05	305	4,09	4,10	0,09
218	2,25			218	2,53			218	3,89		
218	2,22			218	2,60			218	3,88		
218	2,18			218	2,59			218	3,92		
218	2,23			218	2,62			218	3,92		
218	2,11	2,20	0,06	218	2,59	2,59	0,03	218	3,86	3,89	0,03
174	2,04			174	2,44			174	3,81		
174	1,99			174	2,44			174	3,68		
174	1,92			174	2,47			174	3,75		
174	1,95			174	2,47			174	3,67		
174	1,98	1,98	0,05	174	2,45	2,45	0,02	174	3,65	3,71	0,07
131	1,81			131	2,26			131	3,53		
131	1,78			131	2,22			131	3,37		
131	1,78			131	2,24			131	3,34		
131	1,89			131	2,21			131	3,40		
131	1,84	1,82	0,05	131	2,25	2,24	0,02	131	3,38	3,40	0,07
87	1,63			87	2,21			87	3,28		
87	1,61			87	2,16			87	3,26		
87	1,58			87	2,15			87	3,23		
87	1,55			87	2,08			87	3,14		
87	1,54	1,58	0,04	87	2,06	2,13	0,06	87	3,12	3,21	0,07
44	1,38			44	2,08			44	3,00		
44	1,36			44	2,04			44	3,00		
44	1,43			44	2,06			44	2,93		
44	1,32			44	2,01			44	2,89		
44	1,32	1,36	0,05	44	1,97	2,03	0,04	44	2,89	2,94	0,06
0	1,15			0	1,87			0	2,58		
0	1,12			0	1,86			0	2,53		
0	1,06			0	1,80			0	2,49		
0	1,07			0	1,76			0	2,64		
0	1,12	1,10	0,04	0	1,81	1,82	0,05	0	2,53	2,55	0,06



20. táblázat: Nyári transzspiráció a fényintenzitás függvényében

PPFD	E_20_Nyár	Átlag	Szórás	PPFD	E_25_Nyár	Átlag	Szórás	PPFD	E_30_Nyár	Átlag	Szórás
1566	1,47			1566	3,44			1566	4,44		
1566	1,48			1566	3,47			1566	4,47		
1566	1,51			1566	3,48			1566	4,49		
1566	1,52			1566	3,49			1566	4,52		
1566	1,54	1,50	0,03	1566	3,51	3,48	0,03	1566	4,54	4,49	0,04
1392	1,48			1392	3,41			1392	4,51		
1392	1,49			1392	3,42			1392	4,48		
1392	1,51			1392	3,45			1392	4,50		
1392	1,52			1392	3,46			1392	4,46		
1392	1,54	1,51	0,02	1392	3,47	3,44	0,03	1392	4,38	4,47	0,05
1218	1,47			1218	3,34			1218	4,37		
1218	1,48			1218	3,39			1218	4,39		
1218	1,49			1218	3,42			1218	4,42		
1218	1,50			1218	3,43			1218	4,45		
1218	1,51	1,49	0,02	1218	3,44	3,40	0,04	1218	4,48	4,42	0,04
1044	1,47			1044	3,38			1044	4,34		
1044	1,48			1044	3,41			1044	4,36		
1044	1,49			1044	3,44			1044	4,38		
1044	1,50			1044	3,45			1044	4,40		
1044	1,52	1,49	0,02	1044	3,49	3,43	0,04	1044	4,44	4,38	0,04
870	1,43			870	3,29			870	4,31		
870	1,46			870	3,34			870	4,34		
870	1,48			870	3,36			870	4,37		
870	1,49			870	3,38			870	4,40		
870	1,51	1,47	0,03	870	3,39	3,35	0,04	870	4,43	4,37	0,05
696	1,44			696	3,29			696	4,29		
696	1,48			696	3,32			696	4,31		
696	1,49			696	3,33			696	4,32		
696	1,51			696	3,34			696	4,33		
696	1,54	1,49	0,04	696	3,37	3,33	0,03	696	4,38	4,33	0,03
522	1,43			522	3,24			522	4,26		
522	1,45			522	3,29			522	4,27		
522	1,46			522	3,33			522	4,30		
522	1,48			522	3,33			522	4,33		
522	1,49	1,46	0,02	522	3,36	3,31	0,05	522	4,37	4,31	0,05
392	1,42			392	3,10			392	4,05		
392	1,43			392	3,16			392	4,10		
392	1,45			392	3,18			392	4,11		
392	1,46			392	3,20			392	4,13		
392	1,47	1,45	0,02	392	3,21	3,17	0,04	392	4,17	4,11	0,04
305	1,36			305	3,04			305	3,86		
305	1,38			305	3,06			305	3,89		
305	1,40			305	3,08			305	3,91		
305	1,42			305	3,12			305	3,95		
305	1,43	1,40	0,03	305	3,13	3,09	0,04	305	3,99	3,92	0,05
218	1,29			218	2,87			218	3,52		
218	1,37			218	2,91			218	3,57		

PPFD	E_20_Nyár	Átlag	Szórás	PPFD	E_25_Nyár	Átlag	Szórás	PPFD	E_30_Nyár	Átlag	Szórás
218	1,32			218	2,92			218	3,63		
218	1,29			218	2,94			218	3,64		
218	1,30	1,31	0,03	218	2,97	2,92	0,04	218	3,68	3,61	0,06
174	1,25			174	2,75			174	3,33		
174	1,27			174	2,79			174	3,37		
174	1,23			174	2,83			174	3,42		
174	1,21			174	2,85			174	3,49		
174	1,20	1,23	0,03	174	2,86	2,82	0,05	174	3,50	3,42	0,07
131	1,08			131	2,51			131	3,08		
131	1,13			131	2,59			131	3,13		
131	1,12			131	2,62			131	3,16		
131	1,19			131	2,64			131	3,19		
131	1,16	1,14	0,04	131	2,67	2,61	0,06	131	3,25	3,16	0,06
87	1,03			87	2,33			87	2,73		
87	1,01			87	2,36			87	2,78		
87	0,97			87	2,38			87	2,85		
87	0,97			87	2,42			87	2,89		
87	1,03	1,00	0,03	87	2,48	2,39	0,06	87	2,91	2,83	0,08
44	0,81			44	2,16			44	2,44		
44	0,82			44	2,19			44	2,49		
44	0,83			44	2,23			44	2,54		
44	0,84			44	2,25			44	2,56		
44	0,86	0,83	0,02	44	2,26	2,22	0,04	44	2,61	2,53	0,07
0	0,62			0	1,94			0	1,84		
0	0,63			0	2,02			0	1,89		
0	0,65			0	2,04			0	1,91		
0	0,66			0	2,09			0	2,02		
0	0,67	0,65	0,02	0	2,11	2,04	0,07	0	2,16	1,96	0,13

21. táblázat: Őszi transzspiráció a fényintenzitás függvényében

PPFD	E_20_Ősz	Átlag	Szórás	PPFD	E_25_Ősz	Átlag	Szórás	PPFD	E_30_Ősz	Átlag	Szórás
1566	1,40			1566	2,11			1566	4,01		
1566	1,42			1566	2,14			1566	4,06		
1566	1,43			1566	2,19			1566	4,08		
1566	1,45			1566	2,21			1566	4,11		
1566	1,46	1,43	0,02	1566	2,24	2,18	0,05	1566	4,18	4,09	0,06
1392	1,38			1392	2,14			1392	3,98		
1392	1,40			1392	2,19			1392	4,08		
1392	1,41			1392	2,20			1392	4,12		
1392	1,43			1392	2,22			1392	4,15		
1392	1,45	1,41	0,03	1392	2,25	2,20	0,04	1392	4,21	4,11	0,09
1218	1,36			1218	2,12			1218	4,06		
1218	1,38			1218	2,14			1218	4,10		
1218	1,39			1218	2,16			1218	4,14		
1218	1,40			1218	2,19			1218	4,18		
1218	1,44	1,39	0,03	1218	2,23	2,17	0,04	1218	4,21	4,14	0,06
1044	1,35			1044	2,09			1044	4,08		

PPFD	E_20_Ősz	Átlag	Szórás	PPFD	E_25_Ősz	Átlag	Szórás	PPFD	E_30_Ősz	Átlag	Szórás
1044	1,37			1044	2,11			1044	4,11		
1044	1,39			1044	2,13			1044	4,12		
1044	1,40			1044	2,15			1044	4,16		
1044	1,43	1,39	0,03	1044	2,20	2,14	0,04	1044	4,17	4,13	0,04
870	1,38			870	2,05			870	4,05		
870	1,41			870	2,09			870	4,07		
870	1,42			870	2,10			870	4,09		
870	1,40			870	2,14			870	4,12		
870	1,34	1,39	0,03	870	2,16	2,11	0,04	870	4,15	4,10	0,04
696	1,28			696	2,00			696	3,97		
696	1,31			696	2,03			696	3,99		
696	1,32			696	2,07			696	4,04		
696	1,33			696	2,10			696	4,07		
696	1,37	1,32	0,03	696	2,13	2,07	0,05	696	4,11	4,04	0,06
522	1,24			522	1,91			522	3,86		
522	1,26			522	1,95			522	3,87		
522	1,27			522	1,98			522	3,90		
522	1,30			522	2,01			522	3,95		
522	1,32	1,28	0,03	522	2,03	1,98	0,05	522	4,02	3,92	0,07
392	1,16			392	1,80			392	3,75		
392	1,18			392	1,82			392	3,77		
392	1,20			392	1,90			392	3,81		
392	1,21			392	1,93			392	3,84		
392	1,22	1,19	0,02	392	1,95	1,88	0,07	392	3,86	3,81	0,05
305	1,10			305	1,71			305	3,60		
305	1,11			305	1,76			305	3,64		
305	1,13			305	1,79			305	3,67		
305	1,14			305	1,82			305	3,69		
305	1,18	1,13	0,03	305	1,84	1,78	0,05	305	3,72	3,66	0,05
218	1,02			218	1,54			218	3,33		
218	1,04			218	1,58			218	3,37		
218	1,06			218	1,61			218	3,40		
218	1,07			218	1,65			218	3,43		
218	1,09	1,06	0,03	218	1,66	1,61	0,05	218	3,52	3,41	0,07
174	0,91			174	1,32			174	3,14		
174	0,93			174	1,34			174	3,20		
174	0,94			174	1,40			174	3,24		
174	0,96			174	1,42			174	3,28		
174	1,00	0,95	0,03	174	1,48	1,39	0,06	174	3,32	3,24	0,07
131	0,79			131	1,22			131	2,84		
131	0,81			131	1,26			131	2,88		
131	0,84			131	1,31			131	2,95		
131	0,87			131	1,33			131	3,01		
131	0,89	0,84	0,04	131	1,35	1,29	0,05	131	3,08	2,95	0,10
87	0,72			87	1,10			87	2,50		
87	0,74			87	1,13			87	2,57		
87	0,77			87	1,17			87	2,59		
87	0,78			87	1,20			87	2,65		

PPFD	E_20_Ősz	Átlag	Szórás	PPFD	E_25_Ősz	Átlag	Szórás	PPFD	E_30_Ősz	Átlag	Szórás
87	0,80	0,76	0,03	87	1,22	1,16	0,05	87	2,67	2,60	0,07
44	0,65			44	1,01			44	2,18		
44	0,69			44	1,02			44	2,19		
44	0,71			44	1,07			44	2,22		
44	0,73			44	1,09			44	2,29		
44	0,74	0,70	0,04	44	1,13	1,06	0,05	44	2,34	2,24	0,07
0	0,58			0	0,90			0	1,63		
0	0,61			0	0,93			0	1,69		
0	0,63			0	0,97			0	1,74		
0	0,65			0	0,99			0	1,79		
0	0,67	0,63	0,03	0	1,01	0,96	0,04	0	1,87	1,74	0,09

22. táblázat: Tavaszi transzspiráció a hőmérséklet függvényében

Kamra-hőmérséklet tavasz	Hőmérséklet tavasz	E tavasz	Átlag	Szórás
17,6	19,4	1,02		
17,7	19,4	0,94		
17,6	19,4	1,02		
17,6	19,4	0,96		
17,6	19,5	0,97	0,98	0,04
18,6	20,4	1,21		
18,5	20,3	1,22		
18,6	20,4	1,09		
18,6	20,4	1,19		
18,6	20,5	1,12	1,17	0,06
19,5	21,3	1,38		
19,4	21,3	1,46		
19,3	21,1	1,40		
19,2	20,9	1,39		
19,1	20,7	1,44	1,41	0,03
19,7	21,4	1,57		
19,7	21,4	1,59		
19,6	21,5	1,57		
19,8	21,7	1,53		
19,9	21,7	1,50	1,55	0,04
20,6	22,5	2,03		
20,7	22,5	2,03		
20,7	22,6	1,92		
20,8	22,6	1,86		
21,0	22,9	2,03	1,97	0,08
21,6	23,4	2,24		
21,6	23,4	2,27		
21,6	23,4	2,32		
21,7	23,4	2,28		
21,6	23,5	2,22	2,27	0,04
22,4	24,2	2,55		
22,4	24,3	2,63		
22,5	24,3	2,62		
22,5	24,3	2,71		
22,6	24,3	2,64	2,63	0,06
23,3	25,1	2,95		
23,3	25,1	2,90		
23,3	25,1	2,87		
23,4	25,2	2,92		
23,4	25,2	2,95	2,92	0,03
24,0	25,8	3,02		
24,1	25,8	3,05		
24,0	25,8	3,07		
24,0	25,9	2,99		
24,1	25,9	3,05	3,04	0,03

Kamra- hőmérséklet tavasz	Hőmérséklet tavasz	E tavasz	Átlag	Szórás
24,7	26,5	3,13		
24,6	26,4	3,09		
24,7	26,5	3,04		
24,7	26,5	3,18		
24,7	26,5	3,14	3,12	0,05
25,3	27,0	3,27		
25,3	27,1	3,22		
25,3	27,1	3,28		
25,4	27,2	3,25		
25,4	27,2	3,26	3,26	0,02
26,0	27,8	3,33		
26,0	27,8	3,35		
26,0	27,8	3,33		
26,0	27,8	3,33		
26,1	27,8	3,35	3,34	0,01
26,6	28,4	3,38		
26,7	28,4	3,55		
26,6	28,5	3,44		
26,6	28,4	3,45		
26,7	28,4	3,47	3,46	0,06
27,2	29,1	3,54		
27,3	29,1	3,65		
27,3	29,0	3,56		
27,4	29,2	3,57		
27,5	29,3	3,73	3,61	0,08
28,0	29,8	3,81		
28,0	29,9	3,76		
28,1	29,8	3,77		
28,1	29,9	3,77		
28,1	30,0	3,75	3,77	0,02
28,7	30,4	3,88		
28,7	30,6	3,75		
28,7	30,5	3,76		
28,8	30,5	3,75		
28,8	30,6	3,88	3,80	0,07
29,3	31,2	3,82		
29,4	31,2	3,92		
29,5	31,3	3,88		
29,5	31,3	3,89		
29,5	31,3	3,79	3,86	0,05
30,1	31,9	3,86		
30,1	32,0	3,96		
30,1	31,9	3,83		
30,2	32,0	3,75		
30,2	31,9	3,77	3,83	0,08
30,8	32,6	3,83		
30,9	32,7	3,83		

Kamra-hőmérséklet tavasz	Hőmérséklet tavasz	E tavasz	Átlag	Szórás
31,0	32,8	3,84		
31,0	32,8	3,77		
31,0	32,8	3,81	3,82	0,03
31,6	33,4	3,85		
31,6	33,4	3,91		
31,6	33,4	3,88		
31,7	33,5	3,88		
31,7	33,5	3,80	3,86	0,04
32,3	34,0	3,79		
32,2	34,1	3,88		
32,2	34,0	3,82		
32,3	34,0	3,80		
32,2	34,0	3,80	3,82	0,04
32,8	34,6	3,85		
32,8	34,6	3,84		
32,7	34,5	3,82		
32,7	34,5	3,79		
32,6	34,4	3,76	3,81	0,04

23. táblázat: Nyári transzspiráció a hőmérséklet függvényében

Kamra-hőmérséklet nyár	Hőmérséklet nyár	E nyár	Átlag	Szórás
17,3	19,0	1,64		
17,3	19,0	1,69		
17,3	19,0	1,72		
17,2	19,0	1,75		
17,2	19,0	1,79	1,72	0,06
19,0	20,8	2,04		
19,1	20,8	2,08		
18,8	20,6	2,13		
18,7	20,5	2,18		
19,0	20,8	2,22	2,13	0,07
20,7	22,4	2,39		
20,6	22,4	2,44		
20,9	22,8	2,56		
20,9	22,7	2,64		
20,9	22,6	2,68	2,54	0,12
22,4	24,2	2,71		
22,3	24,0	2,79		
22,4	24,3	2,83		
22,4	24,1	2,85		
22,3	24,1	2,92	2,82	0,08
23,7	25,5	2,98		
23,9	25,6	3,06		
23,8	25,7	3,08		

Kamra- hőmérséklet nyár	Hőmérséklet nyár	E nyár	Átlag	Szórás
23,8	25,6	3,12		
23,8	25,6	3,15	3,08	0,06
25,3	27,1	3,23		
25,3	27,1	3,33		
25,2	27,0	3,36		
25,3	27,1	3,39		
25,3	27,0	3,42	3,33	0,07
26,8	28,7	3,57		
26,7	28,5	3,60		
26,7	28,5	3,61		
26,7	28,5	3,66		
26,8	28,7	3,74	3,57	0,09
28,1	30,0	3,77		
28,2	30,0	3,83		
28,1	29,8	3,90		
28,3	30,1	3,93		
28,3	30,1	3,99	3,83	0,08
29,8	31,6	4,02		
29,9	31,6	4,10		
29,9	31,6	4,14		
29,8	31,7	4,17		
29,9	31,6	4,24	4,08	0,08
31,2	33,0	4,18		
31,1	32,9	4,23		
31,3	33,2	4,29		
31,3	33,1	4,35		
31,3	33,1	4,40	4,26	0,06
32,9	34,7	4,29		
33,0	34,7	4,36		
32,8	34,6	4,42		
32,9	34,8	4,50		
32,8	34,6	4,55	4,39	0,08
34,6	36,4	4,45		
34,5	36,2	4,51		
34,5	36,3	4,57		
34,5	36,3	4,64		
34,6	36,4	4,65	4,54	0,07
35,6	37,3	4,58		
35,6	37,3	4,61		
35,5	37,4	4,63		
35,6	37,4	4,68		
35,5	37,3	4,76	4,63	0,04
36,6	38,4	4,62		
36,7	38,5	4,67		
36,9	38,7	4,74		
37,0	38,6	4,77		
36,8	38,5	4,82	4,71	0,06



Kamra-hőmérséklet nyár	Hőmérséklet nyár	E nyár	Átlag	Szórás
37,8	39,6	4,70		
37,8	39,7	4,79		
37,9	39,6	4,85		
37,8	39,5	4,90		
37,8	39,6	4,93	4,81	0,07
38,8	40,6	4,76		
39,0	40,7	4,83		
39,0	40,7	4,91		
38,8	40,7	4,99		
39,0	40,8	5,03	4,88	0,09

24. táblázat: Őszi transzspiráció a hőmérséklet függvényében

Kamra-hőmérséklet őszi	Hőmérséklet őszi	E őszi	Átlag	Szórás
16,4	18,4	0,95		
16,5	18,4	1,02		
16,5	18,4	1,04		
16,6	18,5	1,05		
16,5	18,4	1,08	1,03	0,05
18,0	19,9	1,36		
18,1	19,9	1,40		
18,0	19,8	1,41		
18,0	20,0	1,43		
18,0	19,9	1,45	1,41	0,03
19,6	21,3	1,70		
19,6	21,4	1,78		
19,6	21,3	1,80		
19,6	21,4	1,84		
19,6	21,4	1,86	1,80	0,06
21,7	23,6	2,29		
21,8	23,6	2,34		
21,9	23,8	2,38		
22,0	23,7	2,45		
22,0	23,7	2,47	2,39	0,08
23,6	25,8	2,88		
23,9	25,7	2,93		
23,8	25,7	2,97		
24,0	25,8	2,98		
24,0	25,8	3,04	2,96	0,06
25,5	27,5	3,37		
25,7	27,5	3,43		
25,7	27,5	3,47		
25,8	27,6	3,50		

Kamra- hőmérséklet ősz	Hőmérséklet ősz	E ősz	Átlag	Szórás
25,8	27,6	3,54	3,44	0,06
27,6	29,4	3,99		
27,7	29,5	4,03		
27,7	29,5	4,07		
27,8	29,6	4,12		
27,9	29,7	4,17	3,95	0,23
30,2	32,0	4,64		
30,2	32,0	4,70		
30,2	32,1	4,75		
30,0	31,8	4,80		
29,9	31,7	4,83	4,61	0,25
32,1	33,8	4,79		
31,7	33,5	4,86		
31,7	33,5	4,88		
32,0	33,8	4,93		
31,8	33,8	4,97	4,86	0,05
33,4	35,2	4,88		
33,6	35,5	4,89		
33,7	35,6	4,75		
33,9	35,8	4,73		
34,0	35,7	4,87	4,84	0,10
36,1	37,8	4,50		
36,1	37,8	4,56		
36,0	37,8	4,60		
35,9	37,6	4,62		
35,8	37,6	4,67	4,63	0,14

25. táblázat: Tavaszi transzpiráció a páratartalom függvényében

Páratartalom tavasz	E_tavasz	Átlag	Szórás
1,4	4,75		
1,5	4,72		
1,3	4,71		
1,4	4,69		
1,4	4,65	4,70	0,04
1,9	4,64		
2,0	4,60		
2,1	4,68		
1,9	4,71		
2,1	4,69	4,66	0,04
2,9	4,47		
3,0	4,52		
3,0	4,54		
3,0	4,51		
2,9	4,56	4,52	0,03
3,8	4,49		
3,8	4,48		
3,7	4,47		
4,0	4,46		
3,9	4,45	4,47	0,02
5,1	4,31		
5,1	4,32		
5,1	4,28		
5,0	4,35		
4,9	4,38	4,33	0,04
6,1	4,31		
6,1	4,28		
6,0	4,27		
5,9	4,26		
6,1	4,25	4,27	0,02
6,9	4,19		
7,1	4,15		
7,0	4,13		
7,0	4,18		
7,0	4,17	4,16	0,02
8,0	4,00		
8,0	4,07		
8,0	4,10		
7,8	4,15		
8,0	4,11	4,09	0,06
8,9	3,96		
9,0	3,93		
9,0	4,00		
9,0	3,99		
8,9	3,95	3,97	0,03
10,0	3,83		

<b>Páratartalom tavasz</b>	<b>E_tavasz</b>	<b>Átlag</b>	<b>Szórás</b>
10,0	3,84		
10,0	3,81		
9,9	3,78		
10,0	3,83	3,82	0,02
11,0	3,72		
11,0	3,76		
11,0	3,69		
10,9	3,70		
10,9	3,68	3,71	0,03
12,1	3,60		
12,0	3,55		
11,9	3,56		
11,9	3,63		
12,0	3,59	3,59	0,03
12,9	3,45		
13,1	3,43		
12,8	3,39		
13,1	3,37		
13,1	3,36	3,40	0,04
13,9	3,32		
14,1	3,28		
14,0	3,31		
14,0	3,31		
14,1	3,32	3,31	0,02
15,1	3,12		
15,0	3,14		
15,0	3,16		
15,0	3,10		
14,9	3,11	3,13	0,02
16,0	2,91		
15,7	2,98		
16,0	2,94		
16,1	2,91		
16,0	2,97	2,94	0,03
17,0	2,90		
16,8	2,71		
17,1	2,78		
16,9	2,84		
17,0	2,79	2,80	0,07
18,0	2,64		
18,0	2,58		
17,9	2,65		
18,1	2,59		
18,0	2,56	2,60	0,04
18,8	2,43		
19,0	2,40		
19,2	2,42		
19,0	2,35		

Páratartalom tavasz	E_tavasz	Átlag	Szórás
18,9	2,37	2,40	0,04

26. táblázat: Nyári transzspiráció a páratartalom függvényében

Páratartalom nyár	E_nyár	Átlag	Szórás
3,1	3,31		
2,8	3,35		
3,1	3,38		
3,0	3,43		
2,9	3,47	3,39	0,06
3,9	3,44		
4,0	3,49		
3,9	3,50		
4,0	3,53		
4,0	3,55	3,50	0,04
5,1	3,46		
5,1	3,49		
4,9	3,53		
5,0	3,60		
4,9	3,65	3,55	0,08
6,0	3,47		
6,0	3,54		
5,8	3,59		
6,0	3,63		
6,2	3,65	3,58	0,07
6,8	3,42		
7,0	3,45		
6,9	3,49		
6,9	3,54		
7,0	3,59	3,50	0,07
8,0	3,41		
8,0	3,45		
8,0	3,48		
8,0	3,51		
8,1	3,53	3,48	0,05
9,0	3,26		
9,0	3,31		
9,1	3,37		
9,0	3,42		
9,1	3,47	3,37	0,08
9,9	3,09		
10,1	3,15		
10,0	3,20		

<b>Páratartalom nyár</b>	<b>E_nyár</b>	<b>Átlag</b>	<b>Szórás</b>
10,0	3,26		
10,2	3,35	3,21	0,10
11,1	2,90		
11,0	2,96		
11,1	3,03		
10,9	3,07		
11,0	3,12	3,02	0,09
12,0	2,70		
12,1	2,78		
11,9	2,83		
11,8	2,86		
11,9	2,91	2,82	0,08
13,0	2,49		
12,8	2,55		
13,0	2,60		
13,0	2,67		
12,8	2,74	2,61	0,10
14,0	2,19		
14,2	2,25		
14,0	2,27		
14,0	2,33		
14,0	2,39	2,29	0,08
14,9	1,83		
15,2	1,87		
15,1	1,89		
15,0	1,95		
15,0	2,05	1,92	0,09
16,0	1,31		
15,9	1,37		
16,0	1,41		
16,2	1,47		
16,1	1,55	1,42	0,09
17,0	0,91		
17,1	0,95		
16,7	1,02		
16,9	1,04		
17,1	1,08	1,00	0,07
18,1	0,55		
17,8	0,61		
17,8	0,63		
18,0	0,66		
17,8	0,67	0,62	0,05

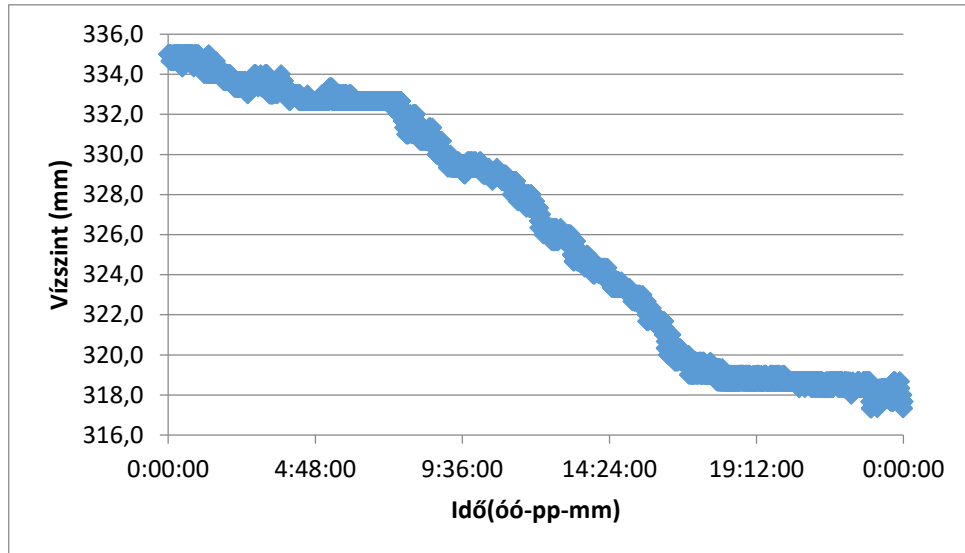
27. táblázat: Őszi transzspiráció a páratartalom függvényében

Páratartalom			
Ősz	E_ősz	Átlag	Szórás
2,2	3,88		
2,2	3,93		
2,2	3,95		
2,2	3,96		
2,2	3,97	3,94	0,04
3,0	3,86		
3,1	3,90		
2,9	3,93		
3,1	3,95		
3,2	3,97	3,92	0,04
4,2	3,76		
4,0	3,81		
4,0	3,84		
4,0	3,88		
4,0	3,94	3,85	0,07
5,0	3,68		
5,3	3,74		
4,9	3,77		
5,0	3,81		
5,0	3,83	3,77	0,06
6,0	3,54		
5,9	3,61		
6,0	3,65		
6,0	3,68		
5,8	3,72	3,64	0,07
7,1	3,45		
6,9	3,48		
6,9	3,52		
7,0	3,54		
6,9	3,57	3,51	0,05
7,9	3,28		
7,9	3,32		
7,9	3,36		
8,2	3,42		
8,1	3,47	3,37	0,08
8,9	3,15		
9,0	3,19		
9,3	3,20		
9,1	3,26		
9,0	3,35	3,23	0,08
9,9	3,01		
10,0	3,03		
9,9	3,05		
10,1	3,08		
9,8	3,17	3,07	0,06
11,0	2,79		

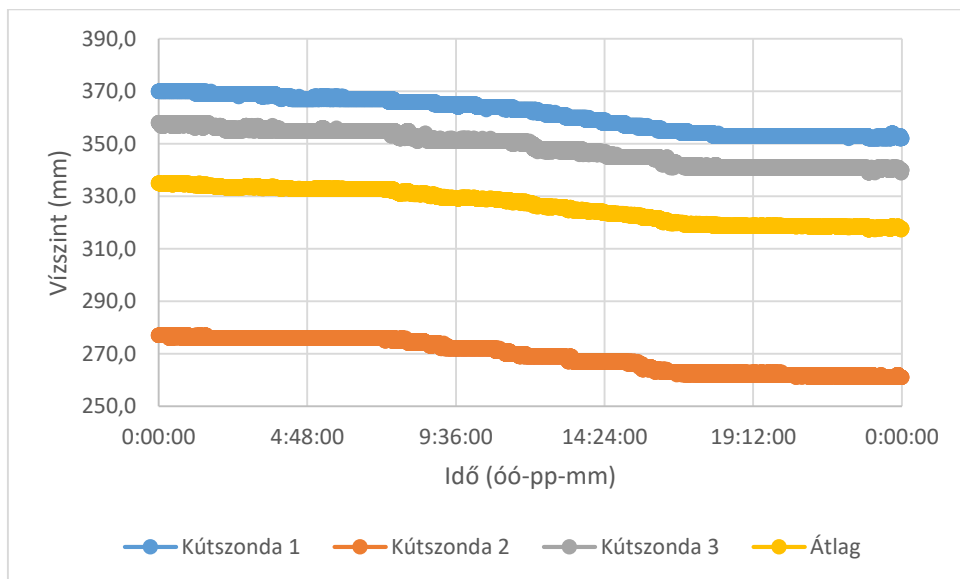
<b>Páratartalom ősz</b>	<b>E_ősz</b>	<b>Átlag</b>	<b>Szórás</b>
10,9	2,83		
10,9	2,86		
10,9	2,89		
11,0	2,95	2,86	0,06
12,0	2,44		
11,9	2,47		
11,9	2,53		
12,0	2,61		
11,9	2,67	2,54	0,10
13,1	2,22		
13,0	2,29		
13,1	2,31		
13,2	2,34		
13,1	2,36	2,30	0,05
14,2	1,97		
14,0	2,00		
13,9	2,02		
13,9	2,05		
14,0	2,12	2,03	0,06
15,1	1,71		
14,9	1,76		
15,0	1,79		
14,8	1,80		
15,0	1,87	1,79	0,06
15,9	1,48		
15,9	1,54		
16,0	1,57		
16,0	1,59		
15,9	1,61	1,56	0,05



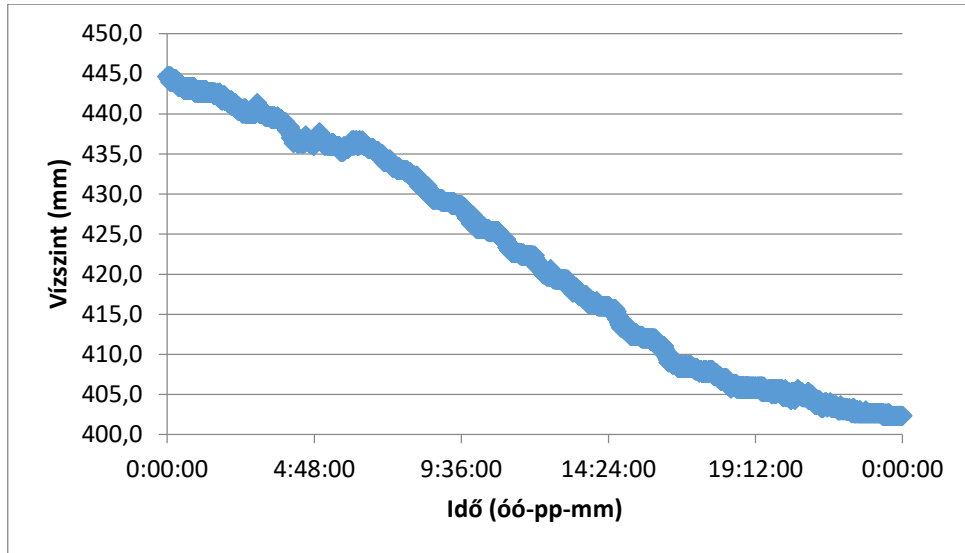
#### 4. Melléklet: A szezonális evapotranszpiráció meghatározásához használt napi vízszint változásait bemutató ábrák szemléltetése



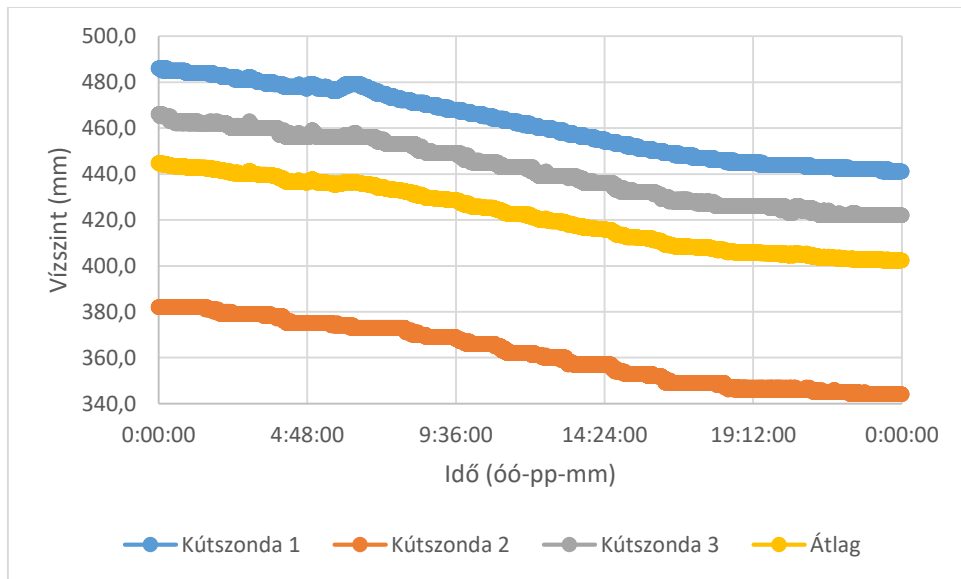
47. ábra: A vízszint alakulása 2011.08.11-én



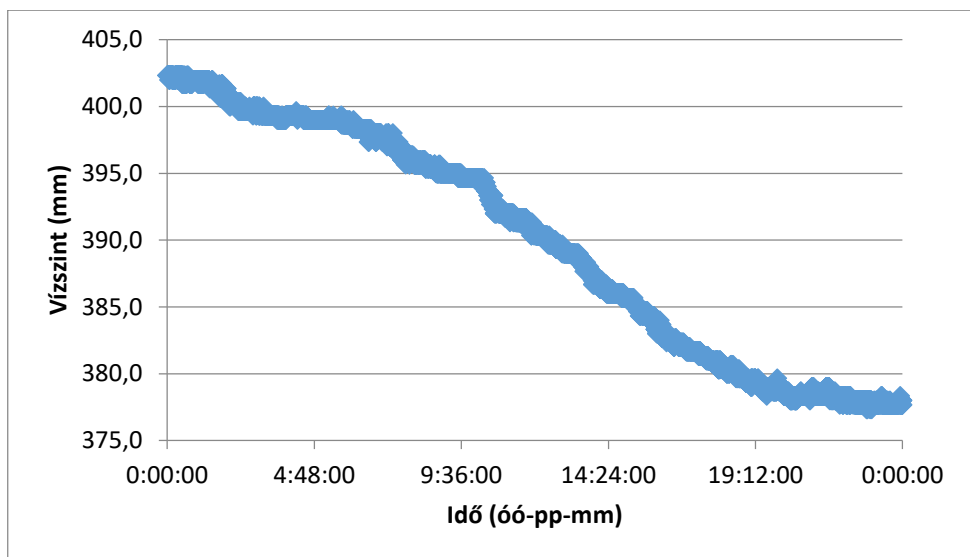
48. ábra: Regisztrált vízszintek (2011.08.11.)



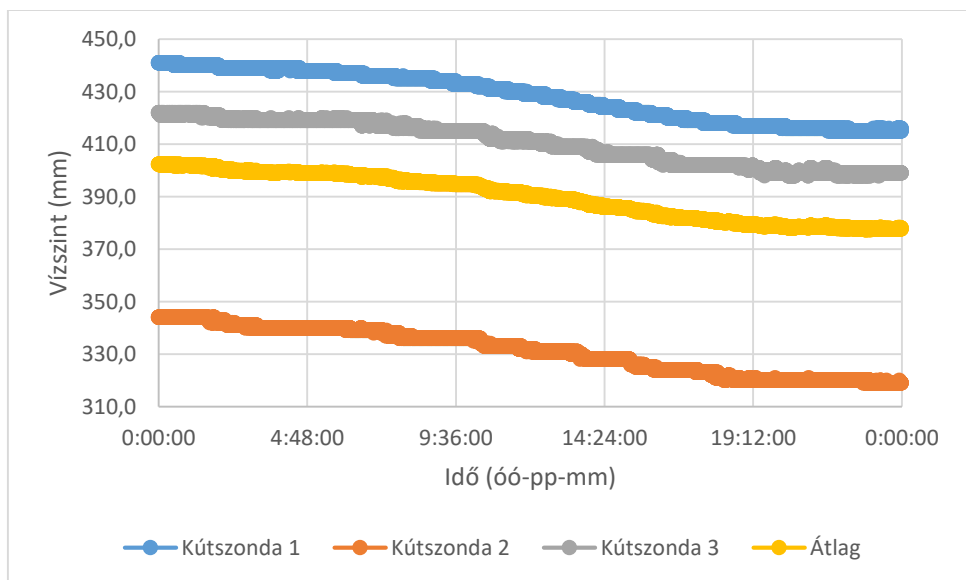
**49. ábra: A vízszint alakulása 2011.08.27-én**



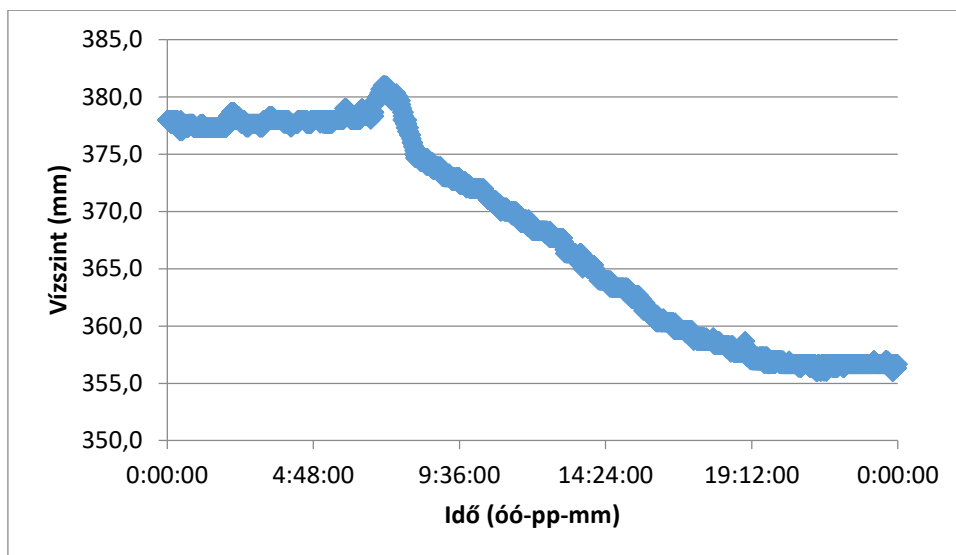
**50. ábra: Regisztrált vízszintek (2011.08.27.)**



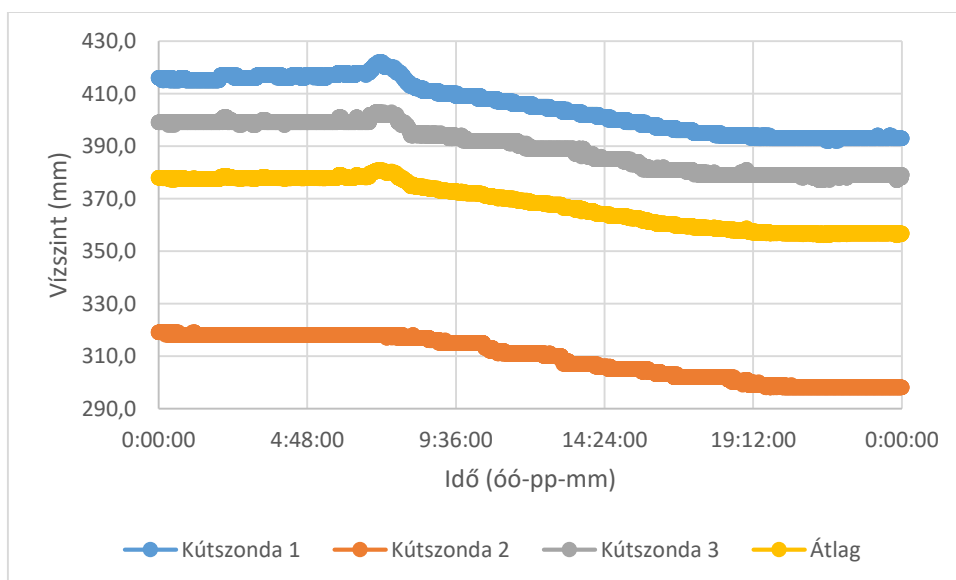
**51. ábra: A vízszint alakulása 2011.08.28-án**



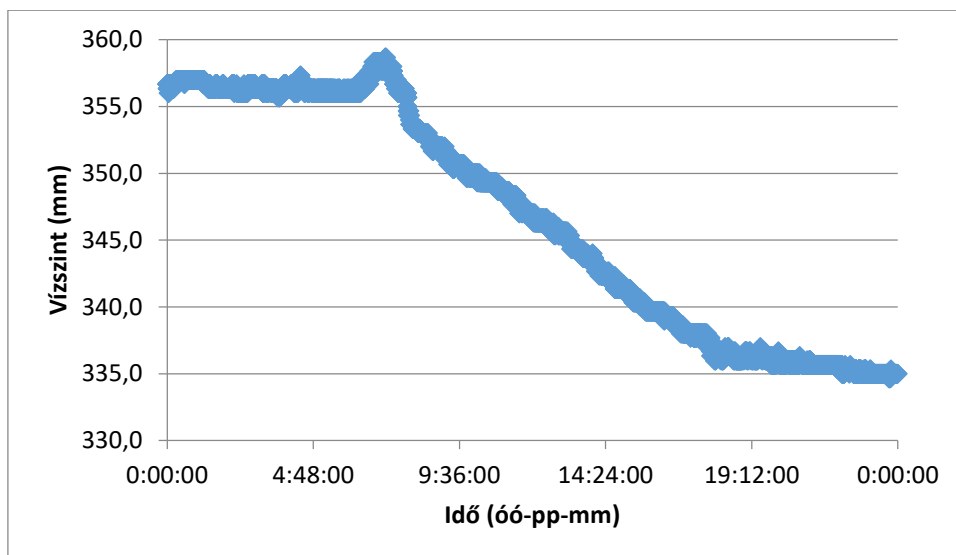
**52. ábra: Regisztrált vízszintek (2011.08.28.)**



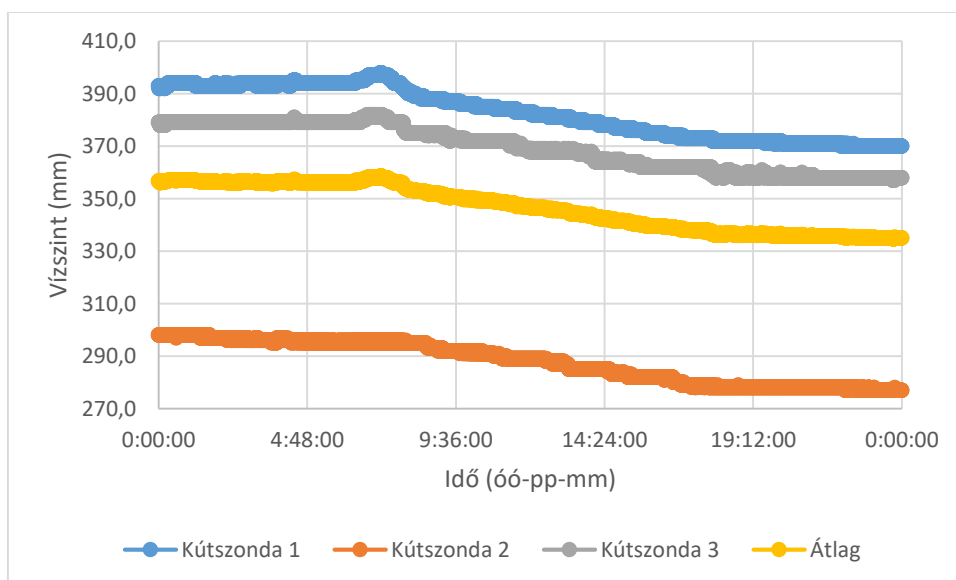
**53. ábra: A vízszint alakulása 2011.08.29-én**



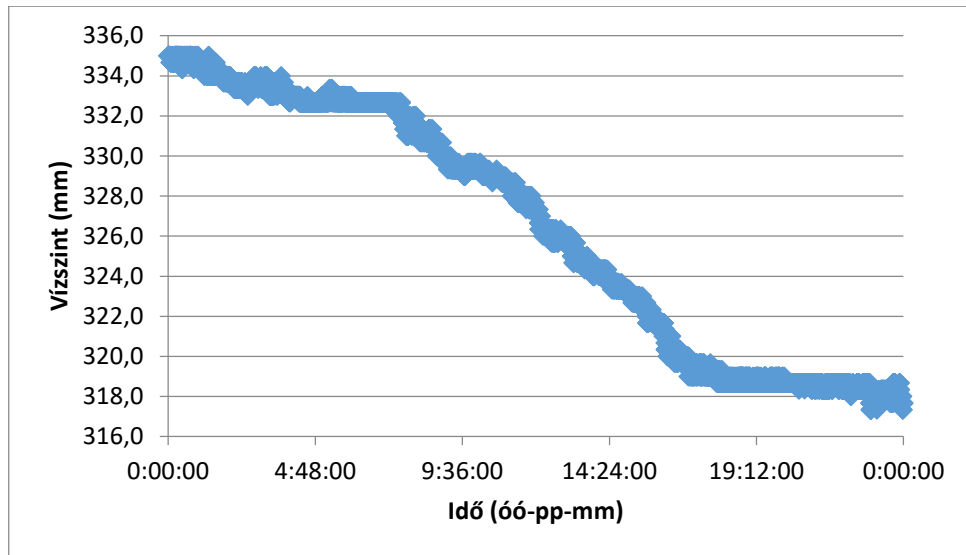
**54. ábra: Regisztrált vízszintek (2011.08.29.)**



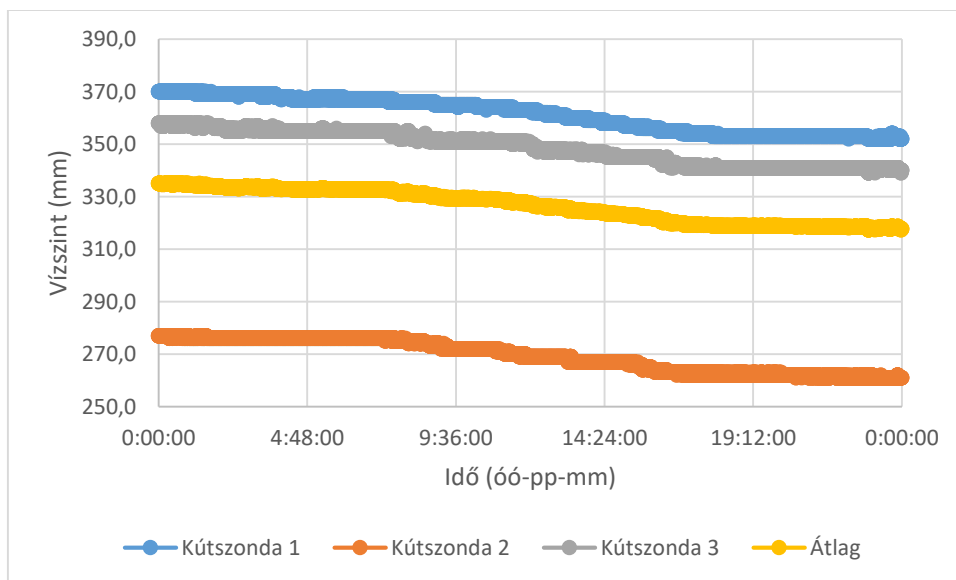
**55. ábra: A vízszint alakulása 2011.08.30-án**



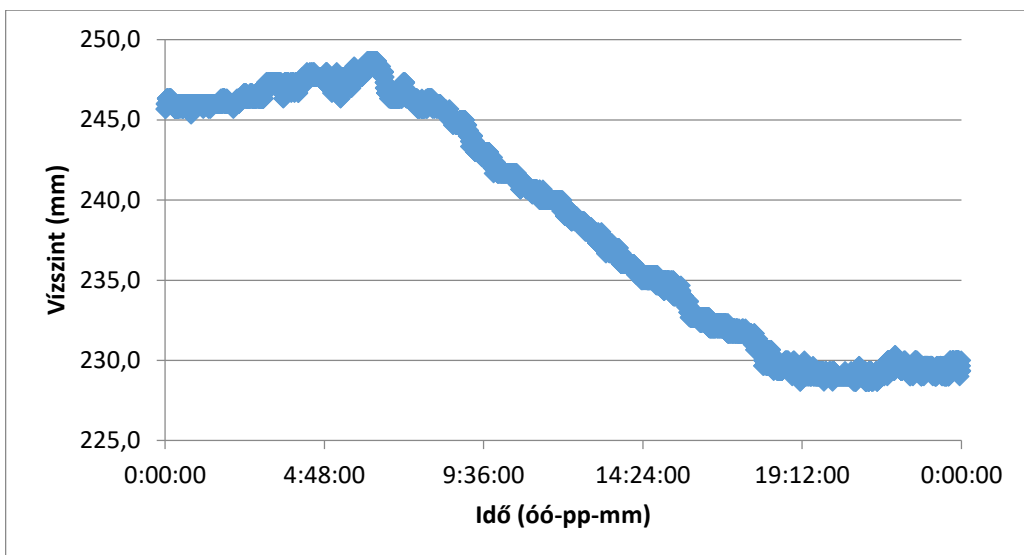
**56. ábra: Regisztrált vízszintek (2011.08.30.)**



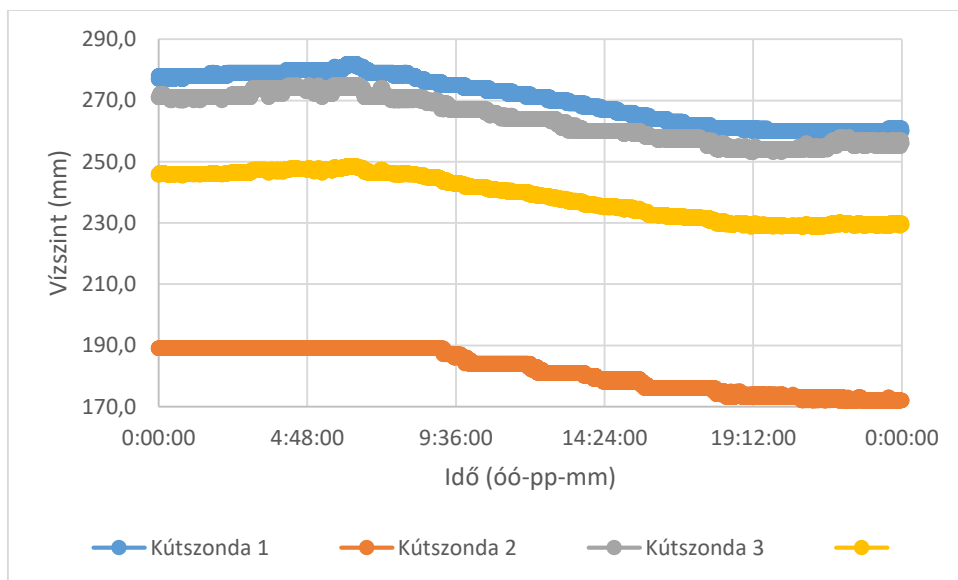
**57. ábra: A vízszint alakulása 2011.08.31-én**



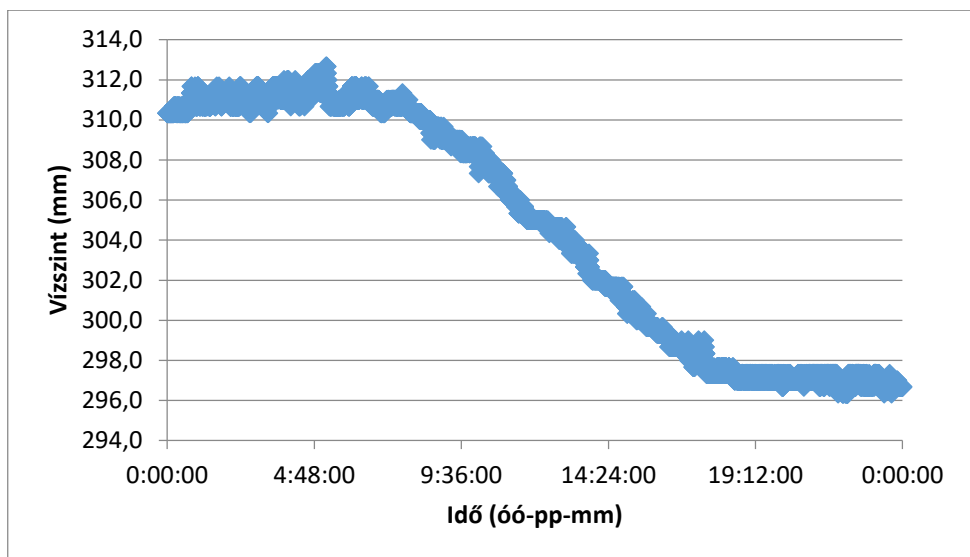
**58. ábra: Regisztrált vízszintek (2011.08.31.)**



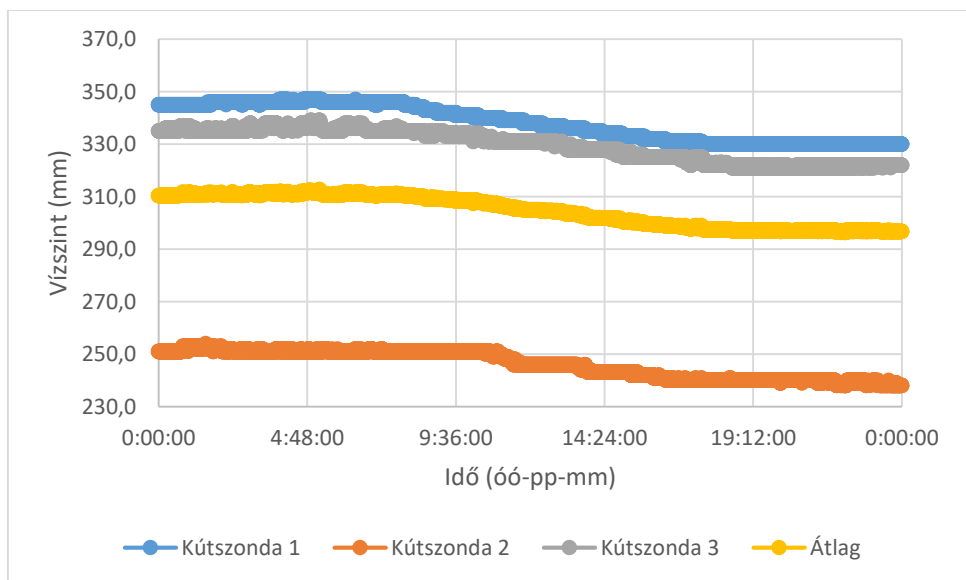
**59. ábra: A vízszint alakulása 2011.09.11-én**



**60. ábra: Regisztrált vízszintek (2011.09.11.)**

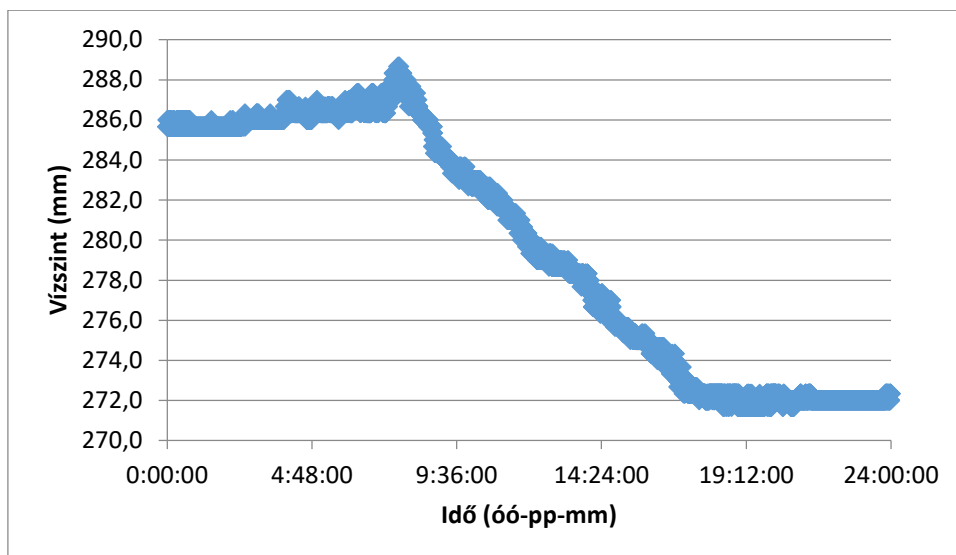


**61. ábra: A vízszint alakulása 2011.09.25-én**

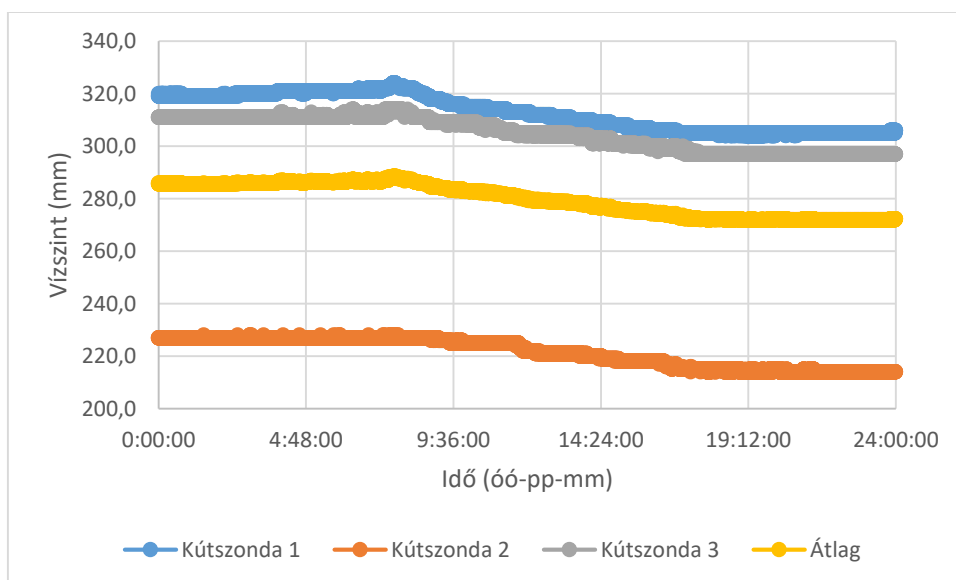


**62. ábra: Regisztrált vízszintek (2011.09.25.)**

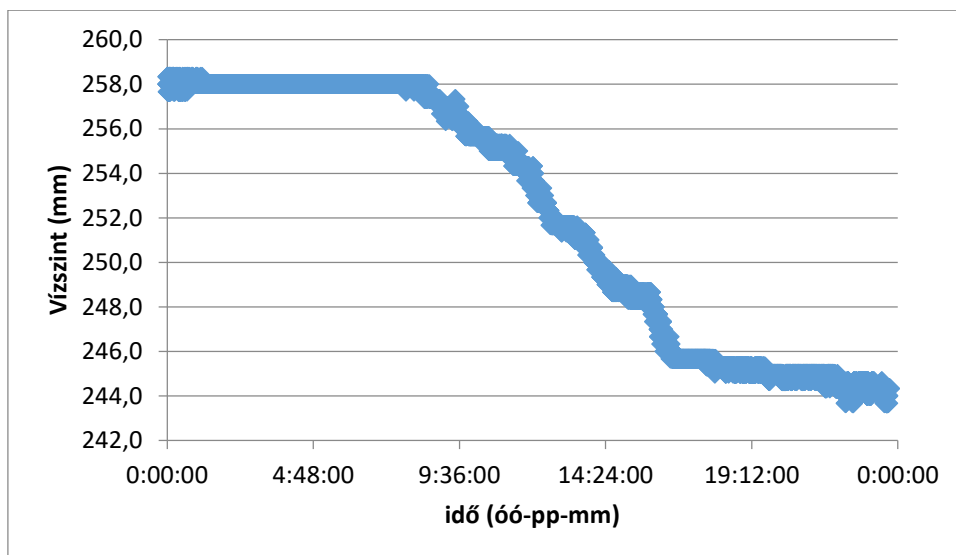




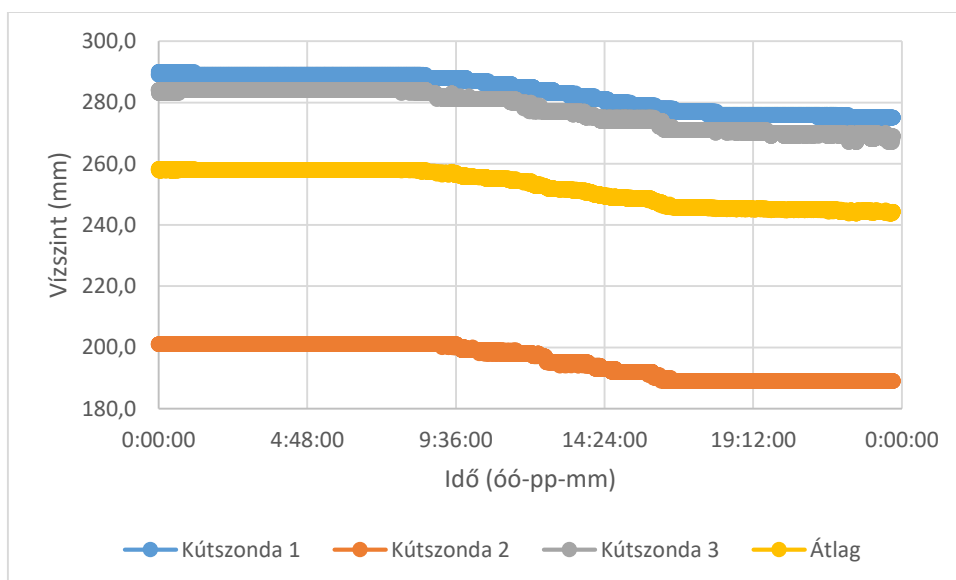
**63. ábra: A vízszint alakulása 2011.09.27-én**



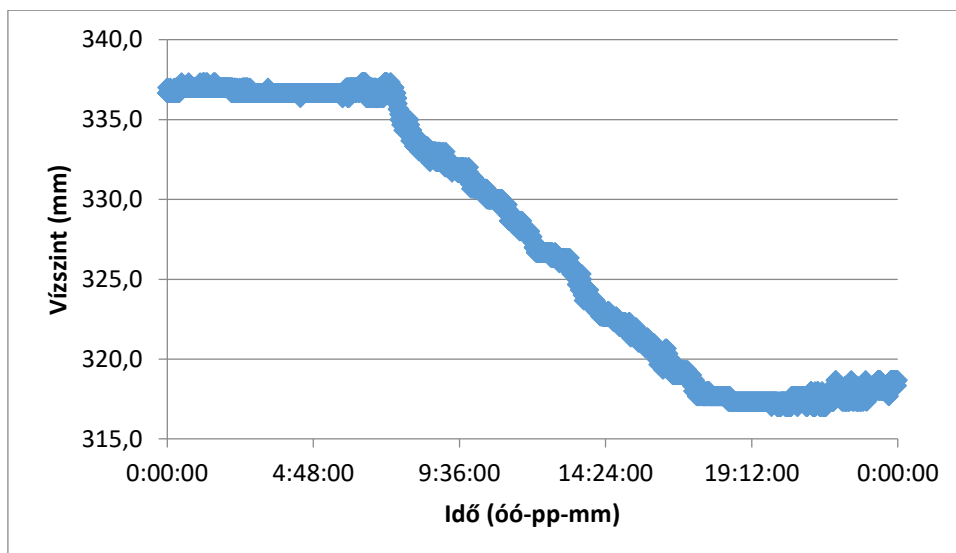
**64. ábra: Regisztrált vízszintek (2011.09.27.)**



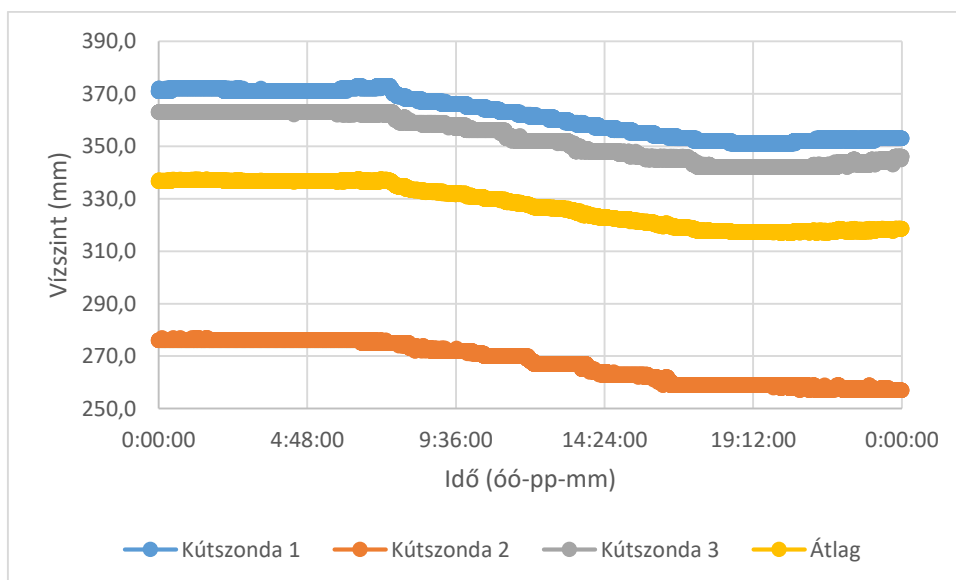
**65. ábra: A vízszint alakulása 2011.09.29-én**



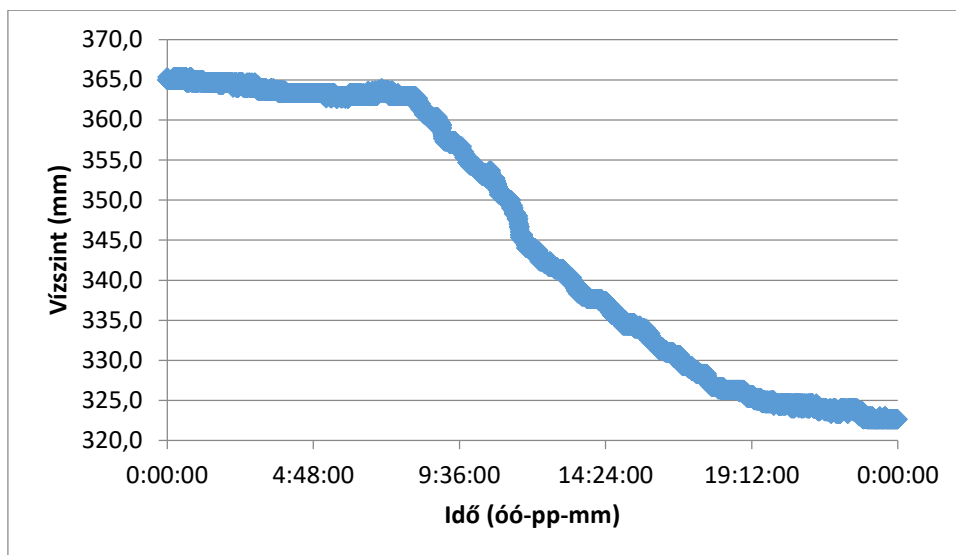
**66. ábra: Regisztrált vízszintek (2011.09.29.)**



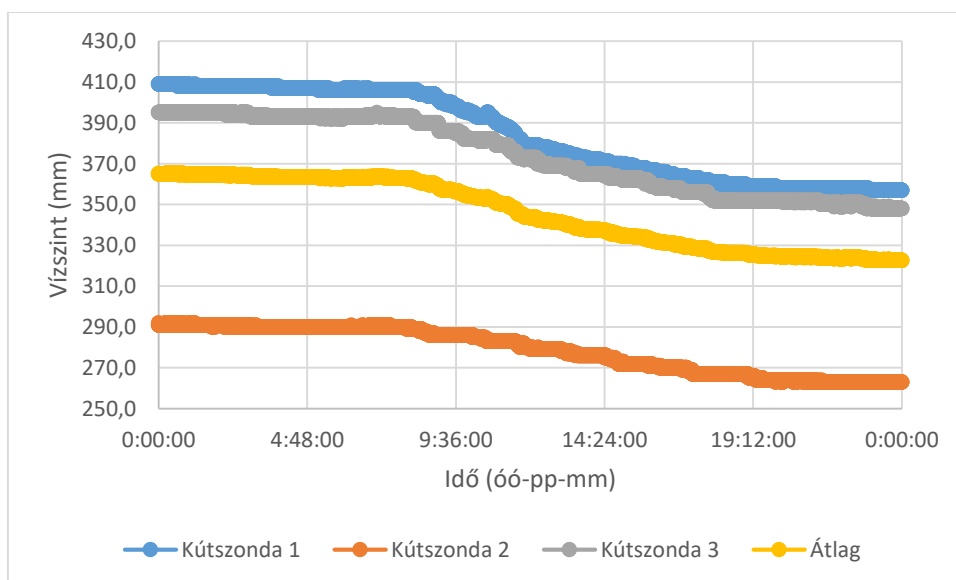
**67. ábra: A vízszint alakulása 2012.05.18-án**



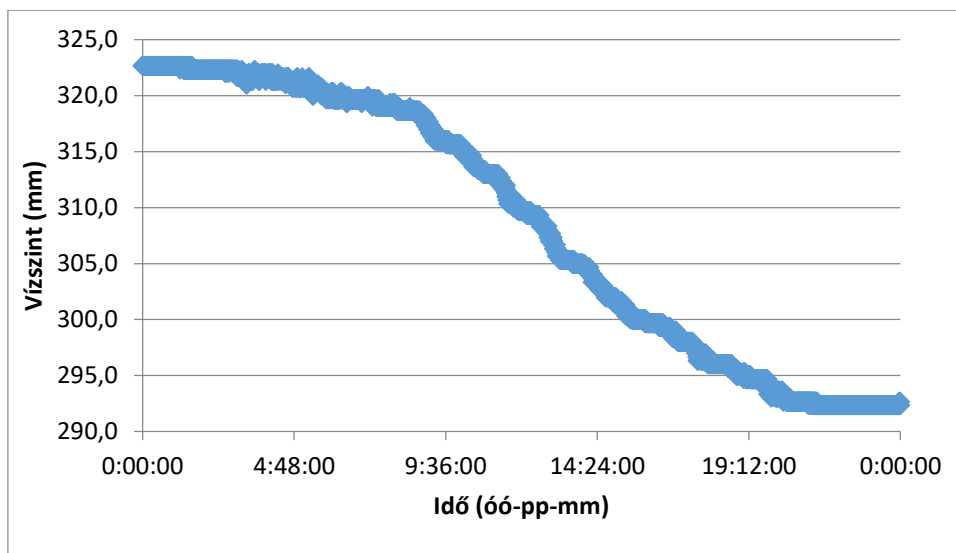
**68. ábra: Regisztrált vízszintek (2012.05.18.)**



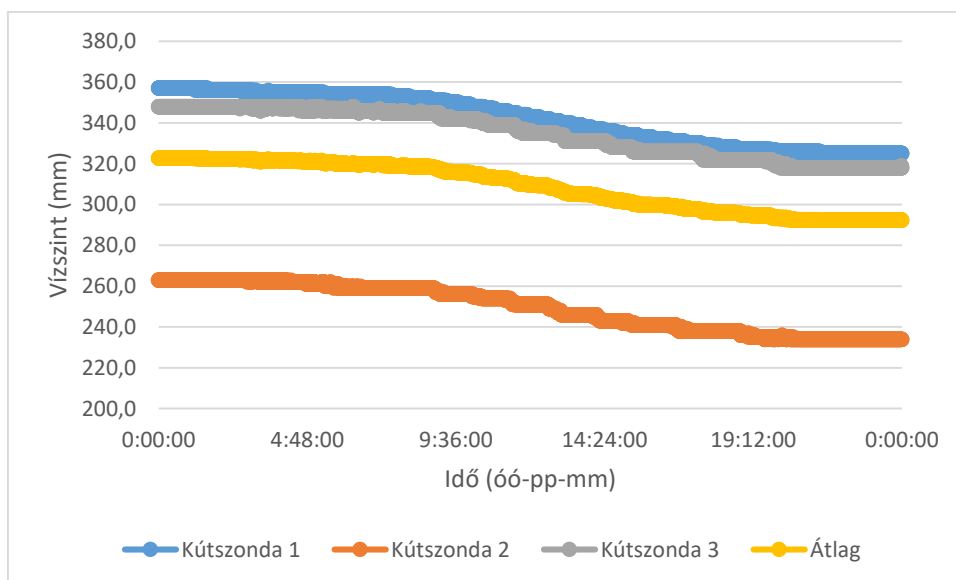
**69. ábra: A vízszint alakulása 2012.05.24-én**



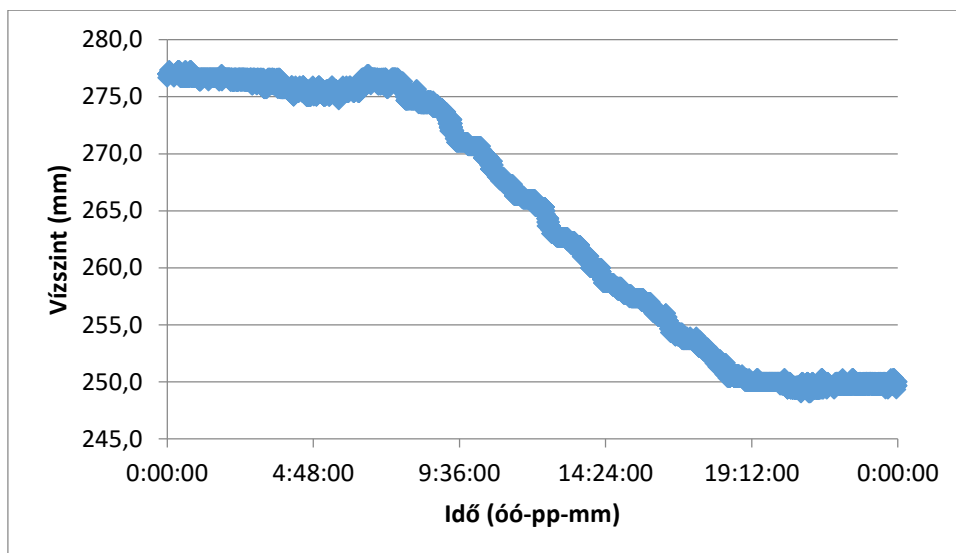
**70. ábra: Regisztrált vízszintek (2012.05.24.)**



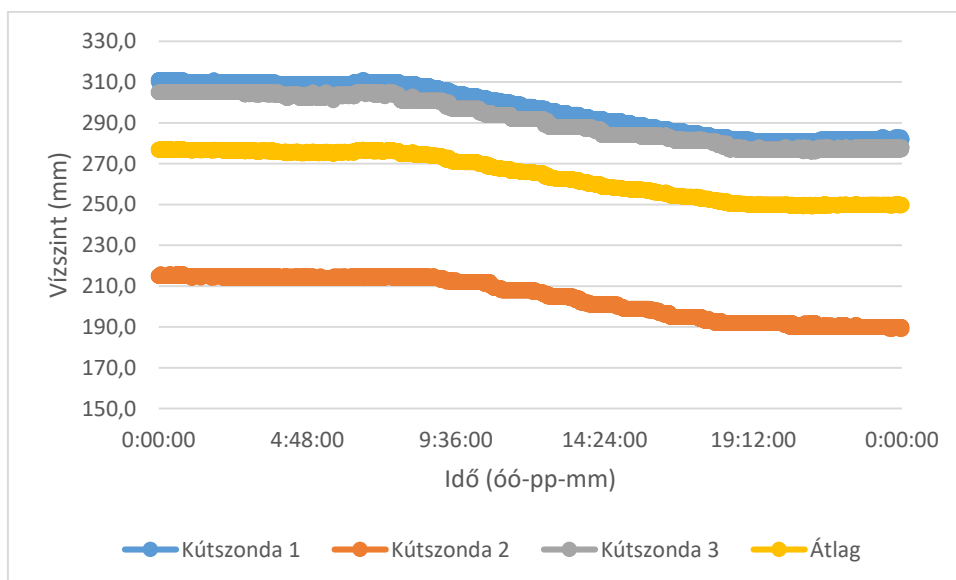
**71. ábra: A vízszint alakulása 2012.05.25-én**



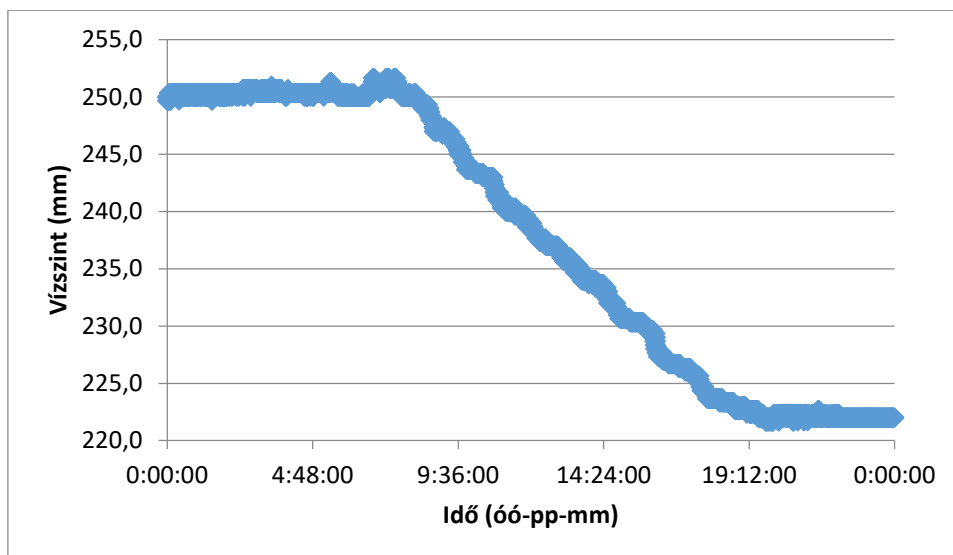
**72. ábra: Regisztrált vízszintek (2012.05.25.)**



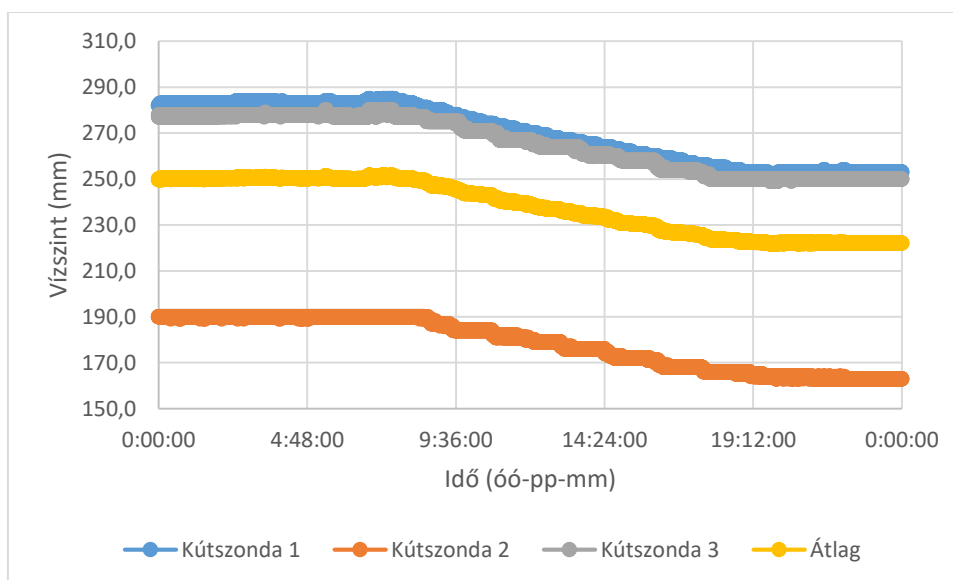
**73. ábra: A vízszint alakulása 2012.05.27-én**



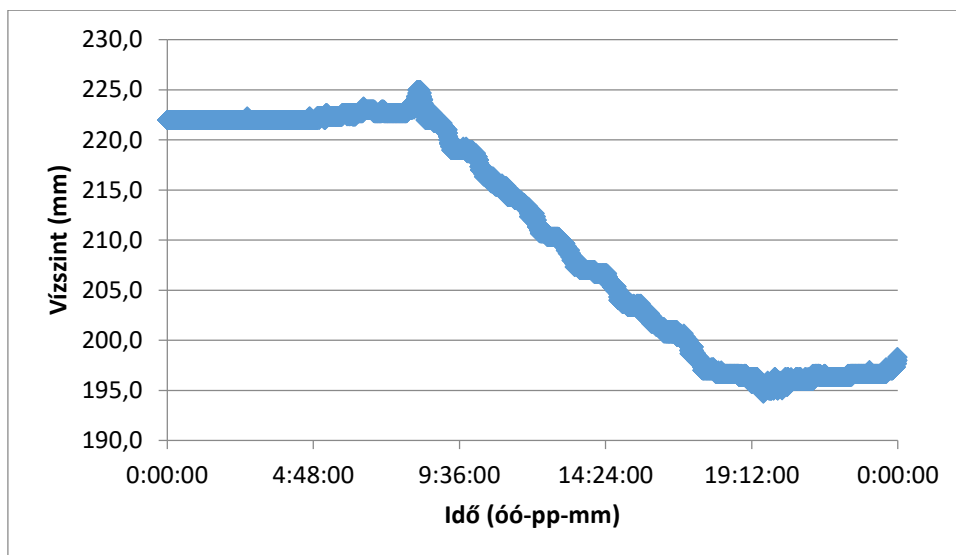
**74. ábra: Regisztrált vízszintek (2012.05.27.)**



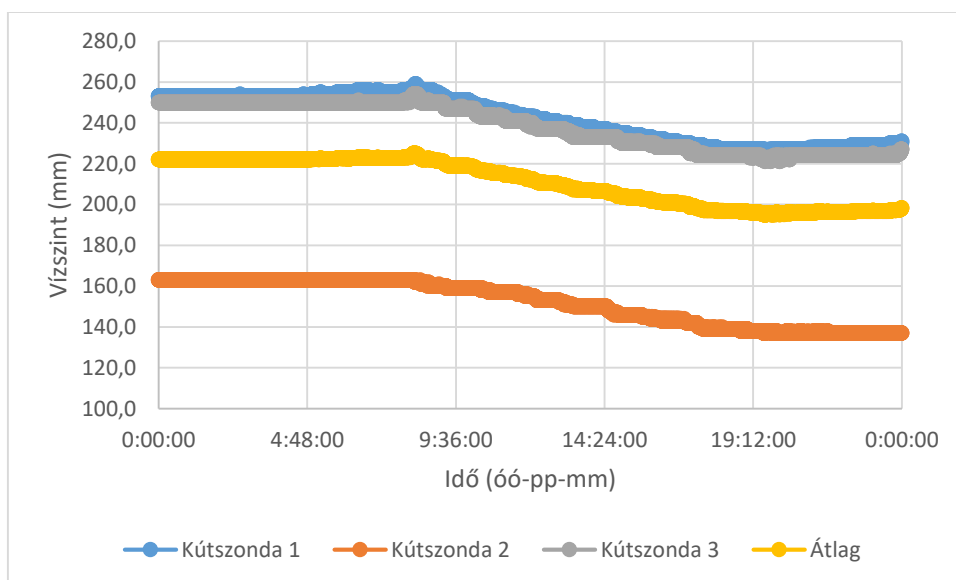
**75. ábra: A vízszint alakulása 2012.05.28-án**



**76. ábra: Regisztrált vízszintek (2012.05.28.)**



**77. ábra: A vízszint alakulása 2012.05.29-én**



**78. ábra: Regisztrált vízszintek (2012.05.29.)**



**5. Melléklet: A hódmezővásárhelyi hosszanti átfolyású gyökérvázolás műtárgyon végzett konzervatív nyomjelzőanyagmérések adatai**

*28. táblázat: Mérések főbb adatai (DITTRICH 2016)*

Referenciaszám	S/1	S/2	S/3	S/4
Dátum	2007.09.02	2007.10.07	2008.02.08	2008.05.29
Nyomjelző anyag	LiCl			
Nyomjelzőanyag-mennyiség Li-ionban megadva (gramm)	8-17			
Klimatikus környezet	Hódmezővásárhely, Magyarország			
Szennyvíztípus	tejházi szennyvíz			
Töltet	4-12 mm kavics			
Növény	sás			
Osztó- és gyűjtődrén	Dk 125 KG-PVC cső egyedileg perforálva			
Bevezetési és elvezetési körülmények	Dk 160 KG-PVC csővel			
Műtárgy kora	2 nap	1 hónap	5 hónap	9 hónap
Méret (m)	6.85*3.7*0.6			
Evaportranszspiráció (mm/d)	elhanyagolható			
Porozitás (-)	0.27	0.23	0.17	0.17
Vízhozam (m <sup>3</sup> /d)	29.4	31.1	16.93	14.34
C-t függvény alatti terület 100% visszatérülésnél (h*mg/l)	6.669	6.305	11.582	13.674
Drének közötti szivárgási hossz (m)	4.65	4.65	4.65	4.65
Effektív szivárgási sebesség (m/nap)	83.76	104.01	76.61	64.89
b=L/vx (nap)	0.06	0.04	0.06	0.07
b=L/vx (óra)	1.33	1.07	1.46	1.72

29. táblázat: A statisztikai vizsgálatokhoz használt adatsorok, 2007.09.02.

2007.09.02.		Függvény alatti terület: 6,6694 [h*mg/l]										
<b>I.f</b>	eltelt idő [h]	0,00	0,25	0,83	1,75	2,80	3,78	4,75	6,75	8,75	10,67	
	C [mg/l]	0,00	14,39	3,37	0,66	0,19	0,02	0,01	0,00	0,00	0,00	
<b>I.a</b>	eltelt idő [h]	0	0,25	0,8	1,8	2,8	3,8	4,8	6,8	8,8	10,7	
	C [mg/l]	0	14,4	2,4	1	0,3	0	0,1	0	0	0	
<b>II.f</b>	eltelt idő [h]	0	0,25	0,9	1,8	2,8	3,8	4,8	6,8	8,8	10,7	
	C [mg/l]	0	11	2,2	0,5	0,1	0	0	0	0	0	
<b>II.a</b>	eltelt idő [h]	0	0,25	0,9	1,8	2,8	3,8	4,8	6,8	8,8	10,7	
	C [mg/l]	0	11	3,6	0,4	0,1	0	0	0	0	0	
<b>III.f</b>	eltelt idő [h]	0	0,25	0,9	1,8	2,9	3,8	4,8	6,8	8,8	10,7	
	C [mg/l]	0	28,7	3,3	0,2	0	0	0	0	0	0	
<b>III.a</b>	eltelt idő [h]	0	0,25	0,9	1,8	2,9	3,8	4,8	6,8	8,8	10,7	
	C [mg/l]	0	28,7	4,1	0,2	0	0	0	0	0	0,04	
<b>IV.f</b>	eltelt idő [h]	0	0,93	1,8	3,8	4,8	6,8	8,8	11			
	C [mg/l]	0	3,5	2,7	0,3	0,1	0,1	0	0			
<b>IV.a</b>	eltelt idő [h]	0	0,93	1,8	2,9	3,8	4,8	6,8	8,8	11		
	C [mg/l]	0	1,86	3	1,3	0,6	0,2	0,1	0	0		
<b>V.f</b>	eltelt idő [h]	0	0,97	1,8	3,9	4,8	6,8	8,8	11			
	C [mg/l]	0	0,39	3,3	0,4	0,2	0,1	0	0			
<b>V.a</b>	eltelt idő [h]	0	0,97	1,8	3,9	4,8	6,8	8,8	11			
	C [mg/l]	0	0,3	3,6	0,6	0,2	0,1	0	0			
<b>VI.f</b>	eltelt idő [h]	0	0,98	1,8	3,9	4,8	6,9	8,9	11			
	C [mg/l]	0	0,71	4,2	0,7	0,2	0,1	0	0			
<b>VI.a</b>	eltelt idő [h]	0	0,98	1,8	3,9	4,8	6,9	8,9	11			
	C [mg/l]	0	0,64	4,3	0,9	0,4	0,1	0	0			
<b>VII.f</b>	eltelt idő [h]	0	0,7	1,3	1,8	2,4	2,8	3,2	4,1	5,1	7,13	9,1
	C [mg/l]	0	0,1	5,3	2,9	0,6	0,3	0,2	0,1	0,1	0,05	0,02
<b>VII.a</b>	eltelt idő [h]	0	0,57	1,1	1,6	2,1	2,5	3,1	3,6	4,6	9,1	
	C [mg/l]	0	0,05	2,3	3,8	1,6	0,6	0,5	0,4	0,2	0,05	
<b>VIII.f</b>	eltelt idő [h]	0	0,58	0,7	1,1	1,3	1,6	1,9	2,1	2,4	2,55	2,816667
		3,05	3,25	3,6	4,1	4,6	5,1	7,2	9,1	11		
	C [mg/l]	0	0,05	0,1	0,3	2,6	3,6	2,9	2,2	1,2	1	0,65
		0,47	0,44	0,4	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0		
<b>VIII.a</b>	eltelt idő [h]	0	0,58	0,7	1,1	1,3	1,6	1,9	2,1	2,4	2,57	2,8
		3,0667	3,25	3,6	4,6	5,1	6,1	7,2	9,1	11		
	C [mg/l]	0	0,05	0,1	0,7	2,8	4,3	3,3	2,3	1,4	1,17	0,81
		0,52	0,58	0,4	0,3	0,2	0,3	0,1	0,1	0		
<b>IX.f</b>	eltelt idő [h]	0	0,73	1,4	1,9	2,4	2,8	3,3	5,1	6,2	7,18	11,15
	C [mg/l]	0	0,06	7,6	3,4	1,2	0,7	0,5	0,1	0,2	0,08	0,04
<b>IX.a</b>	eltelt idő [h]	0	0,6	1,1	1,6	2,1	2,6	3,1	3,6	4,6	9,15	
	C [mg/l]	0	0,05	2	6,1	2,6	1,1	0,6	0,4	0,2	0,06	

30. táblázat: A statisztikai vizsgálatokhoz használt adatsorok, 2007.10.07.

2007.10.07. Függvény alatti terület: 6,305 [h*mg/l]												
<b>I.f</b>	eltelt idő [h]	0	0,2	0,8	1,3	2,3	4,6	6,6	11			
	C [mg/l]	0	10,8	1	0,8	0,2	0	0	0			
<b>I.a</b>	eltelt idő [h]	0	0,05	0,5	1	1,9	3,6	8,6				
	C [mg/l]	0	0,05	8,1	3,6	0,6	0,1	0				
<b>II.f</b>	eltelt idő [h]	0	0,07	0,2	0,5	0,8	1,1	1,3	1,9	2,3	3,58	4,583333
		6,5667	8,58	11								
	C [mg/l]	0	0,19	7,2	5,3	2,2	0,9	0,5	0,4	0,1	0,1	0,07
		0,02	0,02	0								
<b>II.a</b>	eltelt idő [h]	0	0,07	0,2	0,5	0,8	1,1	1,3	1,9	2,3	3,6	4,583333
		6,6167	8,58									
	C [mg/l]	0	0,04	4,1	5,3	3,6	2,6	1,2	0,5	0,4	0,26	0,13
		0,02	0,01									
<b>III.f</b>	eltelt idő [h]	0	0,23	0,8	1,3	2,4	4,6	6,7	11			
	C [mg/l]	0	25,8	2,7	0,2	0	0	0	0			
<b>III.a</b>	eltelt idő [h]	0	0,08	0,5	1,1	1,9	3,6	8,6				
	C [mg/l]	0	7,73	5,7	0,5	0,2	0	0				
<b>IV.f</b>	eltelt idő [h]	0	0,23	0,9	1,4	1,9	2,6	3,6	4,6	6,7	10,6	
	C [mg/l]	0	2,44	3,1	0,8	0,5	0,4	0,1	0	0	0,01	
<b>IV.a</b>	eltelt idő [h]	0	0,1	0,5	1,1	1,6	2,1	3,1	4,1	8,6		
	C [mg/l]	0	0,8	2	2,1	1,8	0,7	0,2	0,1	0		
<b>V.f</b>	eltelt idő [h]	0	0,12	0,3	0,6	0,9	1,1	1,4	1,6	1,9	2,08	2,583333
		3,1	3,65	4,1	4,6	6,7	8,6	11				
	C [mg/l]	0	0,05	0,1	4,7	3,5	2,1	1,2	0,8	0,5	0,45	0,28
		0,2	0,16	0,1	0,1	0	0	0				
<b>V.a</b>	eltelt idő [h]	0	0,12	0,3	0,6	0,9	1,1	1,4	1,6	1,9	2,08	2,6
		3,0833	3,65	4,1	4,6	6,7	8,6	11				
	C [mg/l]	0	0,13	0,4	4,5	3,6	2,1	1,2	0,9	0,5	0,49	0,24
		0,33	0,16	0,1	0,1	0	0	0				
<b>VI.f</b>	eltelt idő [h]	0	0,27	0,9	1,4	1,9	2,6	3,7	4,7	6,7	10,6	
	C [mg/l]	0	0,62	4	1	0,3	0,2	0,1	0,1	0	0,02	
<b>VI.a</b>	eltelt idő [h]	0	0,13	0,6	1,1	1,6	2,1	3,1	4,1	8,7		
	C [mg/l]	0	0,04	8,1	2	0,6	0,3	0,2	0,1	0,1		
<b>VII.f</b>	eltelt idő [h]	0	0,27	0,9	1,4	1,9	2,4	2,8	3,7	4,7	6,7	8,666667
	C [mg/l]	0	0,1	5,3	2,9	0,6	0,3	0,2	0,1	0,1	0,05	0,02
<b>VII.a</b>	eltelt idő [h]	0	0,13	0,6	1,1	1,6	2,1	2,6	3,1	4,1	8,67	
	C [mg/l]	0	0,05	2,3	3,8	1,6	0,6	0,5	0,4	0,2	0,05	
<b>VIII.f</b>	eltelt idő [h]	0	0,15	0,3	0,6	0,9	1,2	1,4	1,6	1,9	2,12	2,383333
		2,6167	2,82	3,1	3,7	4,1	4,7	6,7	8,7	11		
	C [mg/l]	0	0,05	0,1	0,3	2,6	3,6	2,9	2,2	1,2	1	0,65
0,47		0,44	0,4	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0			
<b>VIII.a</b>	eltelt idő [h]	0	0,15	0,3	0,6	0,9	1,1	1,4	1,7	1,9	2,13	2,366667

		2,6333	2,82	3,1	4,1	4,7	5,7	6,7	8,7	11		
	C [mg/l]	0	0,05	0,1	0,7	2,8	4,3	3,3	2,3	1,4	1,17	0,81
		0,52	0,58	0,4	0,3	0,2	0,3	0,1	0,1	0		
<b>IX.f</b>	eltelt idő [h]	0	0,3	0,9	1,4	2	2,4	2,8	4,7	5,7	6,75	10,71667
	C [mg/l]	0	0,06	7,6	3,4	1,2	0,7	0,5	0,1	0,2	0,08	0,04
<b>IX.a</b>	eltelt idő [h]	0	0,17	0,7	1,2	1,7	2,2	2,6	3,2	4,2	8,72	
	C [mg/l]	0	0,05	2	6,1	2,6	1,1	0,6	0,4	0,2	0,06	

31. táblázat: A statisztikai vizsgálatokhoz használt adatsorok, 2008.02.08.

2008.02.08.		Függvény alatti terület: 11,582 [h*mg/l]										
<b>I.f</b>	eltelt idő [h]	0	0,05	0,7	1,2	2,3	4,5	6,5				
	C [mg/l]	0	0,01	7,6	5,3	2,6	0,9	0,6				
<b>I.a</b>	eltelt idő [h]	0	0,05	0,5	1	1,7	3,2	5,5				
	C [mg/l]	0	0,01	0,5	3,5	4,6	2,8	1,3				
<b>II.f</b>	eltelt idő [h]	0	0,05	0,7	1,2	2,3	4,5	6,5				
	C [mg/l]	0	0,01	4,2	5,6	2,1	0,8	0,5				
<b>II.a</b>	eltelt idő [h]	0	0,07	0,5	1	1,7	3,2	5,5				
	C [mg/l]	0	0,02	0,5	2,2	4,1	3,3	1,2				
<b>III.f</b>	eltelt idő [h]	0	0,07	0,7	1,3	2,3	4,5	6,5				
	C [mg/l]	0	0,01	5,1	5,9	2,1	1	0,5				
<b>III.a</b>	eltelt idő [h]	0	0,08	0,5	1	1,7	3,2	5,5				
	C [mg/l]	0	0,03	10	12	5,6	2,1	1				
<b>IV.f</b>	eltelt idő [h]	0	0,08	0,8	1,3	1,8	2,3	2,5	3,2	6,5		
	C [mg/l]	0	0,01	0,7	4,3	5	1,3	3,7	2,7	0,8		
<b>IV.a</b>	eltelt idő [h]	0	0,1	0,5	1	1,5	2	3	3,9	5,5		
	C [mg/l]	0	0,04	1,6	1,1	0,5	1,9	3,3	2,3	2		
<b>V.f</b>	eltelt idő [h]	0	0,08	0,8	1,3	1,8	2,3	2,5	3,3	6,5		
	C [mg/l]	0	0,01	0,1	2	4,1	1,5	3,6	2,7	0,8		
<b>V.a</b>	eltelt idő [h]	0	0,1	0,5	1	1,5	2	3	4	5,5		
	C [mg/l]	0	0,01	0,3	0,5	3,4	4,6	3,4	2,3	1,2		
<b>VI.f</b>	eltelt idő [h]	0	0,1	0,8	1,3	1,8	2,3	2,5	3,3	6,5		
	C [mg/l]	0	0,01	0,1	2,1	4,4	1,6	4,1	2,8	0,8		
<b>VI.a</b>	eltelt idő [h]	0	0,12	0,5	1	1,5	2	3	4	5,5		
	C [mg/l]	0	0,01	0,1	0,9	5,4	5,7	3,9	2,8	1,5		
<b>VII.f</b>	eltelt idő [h]	0	0,8	1,3	1,8	2,7	3,3	4,5	5,6	6,5		
	C [mg/l]	0	0,03	0,2	1,6	3,6	3,3	3,1	1,9	0,8		
<b>VII.a</b>	eltelt idő [h]	0	0,55	1,1	1,5	2	2,5	3	4	5,5		
	C [mg/l]	0	0,02	0,1	0,8	1,5	3,6	2,8	2,5	1,6		
<b>VIII.f</b>	eltelt idő [h]	0	0,82	1	1,1	2,3	2,7	3,3	4,6	6,6		
	C [mg/l]	0	0,01	0	0,4	1,6	2,6	3,1	2,1	0,9		
<b>VIII.a</b>	eltelt idő [h]	0	0,55	1	1,5	2	2,5	3	4	5,6		
	C [mg/l]	0	0,02	0	0,1	0,4	2,1	1,6	2,3	1,9		
<b>IX.f</b>	eltelt idő [h]	0	0,83	1,3	1,8	2,3	2,8	3,3	4,6	6,6		

	C [mg/l]	0	0,01	0	0,3	1,2	1,9	2,6	2,1	1,1		
IX.a	eltelt idő [h]	0	0,57	1,1	1,5	2	2,6	3,1	4	5,6		
	C [mg/l]	0	0,02	0	0	0,4	1,6	2	2,7	2,1		

32. táblázat: A statisztikai vizsgálatokhoz használt adatsorok, 2008.05.29.

2008.05.29.		Függvény alatti terület: 13,674 [h*mg/l]										
I.f	eltelt idő [h]	0	0,27	0,8	1,4	2,4	4,7	8,2				
	C [mg/l]	0	2,56	3,3	0,8	0,5	0,1	0,1				
I.a	eltelt idő [h]	0	0,03	0,5	1,1	1,7	2	3,7	6,7	9,6		
	C [mg/l]	0	0,08	5,1	7,2	3,6	1,6	0,9	0,1	0,2		
II.f	eltelt idő [h]	0	0,27	0,8	1,4	2,5	4,7	8,2				
	C [mg/l]	0	4,7	2,1	0,6	0,2	0,1	0				
II.a	eltelt idő [h]	0	0,03	0,5	1,2	1,7	2	3,7	6,7	9,6		
	C [mg/l]	0	0,27	9,5	2,6	0,7	0,9	0,6	0,1	0,2		
III.f	eltelt idő [h]	0	0,28	0,8	1,5	2,5	4,7	8,2				
	C [mg/l]	0	0,58	2	1,1	0,3	0,1	0				
III.a	eltelt idő [h]	0	0,05	0,5	1,2	1,7	2	3,7	6,7	9,6		
	C [mg/l]	0	0,02	10	3,2	0,7	0,5	0,2	0	0,1		
IV.f	eltelt idő [h]	0	0,3	0,8	1,5	2	2,7	3,7	4,7	8,2		
	C [mg/l]	0	0,12	1,8	2	1,5	0,7	0,3	0,1	0,1		
IV.a	eltelt idő [h]	0	0,07	0,5	1,2	1,8	2,2	3,2	4,2	6,7	9,62	
	C [mg/l]	0	0,07	1	3,3	1,6	1,6	0,7	0,4	0,4	0,09	
V.f	eltelt idő [h]	0	0,32	0,8	1,5	2	2,7	3,7	4,7	8,2		
	C [mg/l]	0	0,04	0,9	4,7	3,9	1,7	0,7	0,4	0,1		
V.a	eltelt idő [h]	0	0,07	0,6	1,2	1,8	2,2	3,2	4,2	6,7	9,63	
	C [mg/l]	0	0,06	0,4	6,7	5	3	1,2	0,7	0,2	0,08	
VI.f	eltelt idő [h]	0	0,32	0,8	1,5	2	2,7	3,8	4,8	8,2		
	C [mg/l]	0	0,04	3,8	4,1	3,5	1,3	0,5	0,3	0,1		
VI.a	eltelt idő [h]	0	0,08	0,6	1,2	1,8	2,2	3,2	4,2	6,8	9,65	
	C [mg/l]	0	0,07	0,7	6,1	4,4	2,5	1,1	0,7	0,3	0,08	
VII.f	eltelt idő [h]	0	0,83	1,5	2	2,5	2,9	3,8	4,8	8,3		
	C [mg/l]	0	0,19	2,2	3	1,6	1,1	0,5	0,3	0,1		
VII.a	eltelt idő [h]	0	0,58	1,2	1,8	2,2	2,7	3,2	4,2	6,8	9,65	
	C [mg/l]	0	0,07	1,5	3,3	3,4	1,9	1	0,8	0,3	0,23	
VIII.f	eltelt idő [h]	0	0,87	1,5	2	2,5	3	3,8	4,8	8,3		
	C [mg/l]	0	0,05	0,9	2,8	1,8	1,7	0,9	0,5	0,2		
VIII.a	eltelt idő [h]	0	0,6	1,2	1,8	2,2	2,7	3,3	4,2	6,8	9,68	
	C [mg/l]	0	0,07	0,2	2	4	2,6	1,6	1	1,1	0,02	
IX.f	eltelt idő [h]	0	0,87	1,5	2	2,5	3	3,8	4,8	8,3		
	C [mg/l]	0	0,04	0,9	3,4	2,7	1,2	0,8	0,5	0,2		
IX.a	eltelt idő [h]	0	0,62	1,2	1,8	2,3	2,8	3,3	4,3	6,8	9,68	
	C [mg/l]	0	0,08	0,3	4	3,7	2,6	1,2	0,8	0,5	0,04	

## 6. Melléklet: A mérési eredményekre illesztett sűrűségfüggvények illesztési eredményei és képei

### 6.1. Melléklet: A sűrűségfüggvények pontonkénti $R^2$ értékei

33. táblázat: Az 5 sűrűségfüggvény  $R^2$  értékei az egyes pontokban

Függvénytípus	S/1	S/2	S/3	S/4	Átlag	Sorrend
	I.f					
<b>Fatigue Life</b>	0,9990483	0,9964985	0,9905653	0,8268249	0,9532342	4
<b>Fréchet</b>	0,9954288	0,9983542	0,9804223	0,9414321	0,9789094	1
<b>Inverz Gauss</b>	0,9984391	0,9933385	0,9876921	0,5959973	0,8938667	5
<b>LogNormal</b>	0,9976400	0,9980836	0,9859843	0,8520550	0,9584407	3
<b>Pearson5</b>	0,9959178	0,9982882	0,9813021	0,8689344	0,9611106	2
	I.a					
<b>Fatigue Life</b>	0,9973505	0,9997468	0,9771815	0,9362932	0,9776430	3
<b>Fréchet</b>	0,9988952	0,9997236	0,9815055	0,9822044	0,9905822	1
<b>Inverz Gauss</b>	0,9982367	0,9997567	0,9657623	0,9303222	0,9735195	5
<b>LogNormal</b>	0,9986666	0,9998048	0,9572933	0,9459650	0,9754324	4
<b>Pearson5</b>	0,9983096	0,9998377	0,9796206	0,9570924	0,9837151	2
	II.f					
<b>Fatigue Life</b>	0,9999796	0,9380227	0,9881080	0,9561988	0,9705773	4
<b>Fréchet</b>	0,9997464	0,9771032	0,9953776	0,9797063	0,9879834	2
<b>Inverz Gauss</b>	0,9999635	0,9647803	0,9894761	0,2362123	0,7976080	5
<b>LogNormal</b>	0,9999397	0,9510968	0,9963922	0,9675143	0,9787358	3
<b>Pearson5</b>	0,9997480	0,9791859	0,9927710	0,9824567	0,9885404	1
	II.a					
<b>Fatigue Life</b>	0,9929453	0,9859261	0,8980641	0,9934923	0,9676069	4
<b>Fréchet</b>	0,9817928	0,9891670	0,8072736	0,9947718	0,9432513	5
<b>Inverz Gauss</b>	0,9901382	0,9881574	0,9841524	0,9808378	0,9858215	2
<b>LogNormal</b>	0,9890182	0,9851464	0,9853617	0,9370626	0,9741472	3
<b>Pearson5</b>	0,9835861	0,9910056	0,9887829	0,9881641	0,9878847	1
	III.f					
<b>Fatigue Life</b>	0,9866371	0,9929030	0,9863500	0,7922346	0,9395312	4
<b>Fréchet</b>	0,9930542	0,9969969	0,9897232	0,9597313	0,9848764	1
<b>Inverz Gauss</b>	0,9862241	0,9930475	0,9841524	0,2528717	0,8040739	5
<b>LogNormal</b>	0,9896432	0,9944416	0,9853617	0,8222279	0,9479186	3
<b>Pearson5</b>	0,9902011	0,9936564	0,9887829	0,9448932	0,9793834	2
	III.a					
<b>Fatigue Life</b>	0,9801622	0,9810131	0,8588887	0,9974508	0,9543787	1
<b>Fréchet</b>	0,9883591	0,9172672	0,8294235	0,9936218	0,9321679	2
<b>Inverz Gauss</b>	0,9791514	0,8857450	0,8554077	0,9961181	0,9291056	3
<b>LogNormal</b>	0,9839547	0,9818868	0,7930911	0,9505247	0,9273644	4
<b>Pearson5</b>	0,9845854	0,8566977	0,8464156	0,9921814	0,9199700	5

	IV.f					
<b>Függvénytípus</b>	<b>S/1</b>	<b>S/2</b>	<b>S/3</b>	<b>S/4</b>	<b>Átlag</b>	<b>Sorrend</b>
<b>Fatigue Life</b>	0,9998384	0,9834074	0,7982244	0,8584564	0,9099816	3
<b>Fréchet</b>	0,9996639	0,9880429	0,7926658	0,9526526	0,9332563	1
<b>Inverz Gauss</b>	0,9998450	0,8742735	0,7963954	0,6737219	0,8360589	5
<b>LogNormal</b>	0,9998624	0,8810614	0,7955800	0,8896934	0,8915493	4
<b>Pearson5</b>	0,9997257	0,9896600	0,7936633	0,8858418	0,9172227	2
	IV.a					
<b>Fatigue Life</b>	0,9993861	0,8015015	0,5531714	0,8943552	0,8121035	4
<b>Fréchet</b>	0,9929551	0,8312120	0,5118319	0,9828929	0,8297230	2
<b>Inverz Gauss</b>	0,9991790	0,8142216	0,5523752	0,7452716	0,7777618	5
<b>LogNormal</b>	0,9993211	0,8821993	0,5575688	0,9440974	0,8457967	1
<b>Pearson5</b>	0,9986404	0,8256657	0,5371880	0,9381725	0,8249166	3
	V.f					
<b>Fatigue Life</b>	0,9990576	0,9600173	0,7897402	0,9316007	0,9201039	5
<b>Fréchet</b>	0,9998970	0,9745538	0,7731059	0,9659643	0,9283802	1
<b>Inverz Gauss</b>	0,9880063	0,9693795	0,7860100	0,9467878	0,9225459	3
<b>LogNormal</b>	0,9891960	0,9557982	0,7871123	0,9518583	0,9209912	4
<b>Pearson5</b>	0,9918065	0,9733260	0,7754781	0,9585155	0,9247815	2
	V.a					
<b>Fatigue Life</b>	0,9990576	0,9483234	0,9582676	0,9888563	0,9736262	3
<b>Fréchet</b>	0,9997460	0,9699938	0,9283780	0,9950464	0,9732911	4
<b>Inverz Gauss</b>	0,9984269	0,9638057	0,9567854	0,9906152	0,9774083	2
<b>LogNormal</b>	0,9994740	0,9449103	0,9537473	0,9923065	0,9726095	5
<b>Pearson5</b>	0,9991355	0,9708838	0,9474534	0,9945290	0,9780004	1
	VI.f					
<b>Fatigue Life</b>	0,9924795	0,9979064	0,7924666	0,9177026	0,9251388	3
<b>Fréchet</b>	0,9906573	0,9995147	0,7745855	0,9557481	0,9301264	1
<b>Inverz Gauss</b>	0,9927017	0,9886506	0,7873374	0,9253559	0,9235114	4
<b>LogNormal</b>	0,9932749	0,7920947	0,7869983	0,9438706	0,8790596	5
<b>Pearson5</b>	0,9939746	0,9992733	0,7774496	0,9454392	0,9290342	2
	VI.a					
<b>Fatigue Life</b>	0,9732938	0,9984193	0,8722504	0,9812782	0,9563104	2
<b>Fréchet</b>	0,9731266	0,9995673	0,8439338	0,9893282	0,9514890	5
<b>Inverz Gauss</b>	0,9738623	0,9979910	0,8702960	0,9846687	0,9567045	1
<b>LogNormal</b>	0,9750581	0,9980415	0,8657561	0,9859654	0,9562053	3
<b>Pearson5</b>	0,9768433	0,9991803	0,8578517	0,9890387	0,9557285	4
	VII.f					
<b>Fatigue Life</b>	0,9810945	0,9856496	0,9163164	0,7315068	0,9036418	3
<b>Fréchet</b>	0,9768150	0,9762976	0,8224238	0,8235096	0,8997615	4
<b>Inverz Gauss</b>	0,9701262	0,9848442	0,9144720	0,6569351	0,8815944	5
<b>LogNormal</b>	0,9602193	0,9786853	0,9133894	0,7829279	0,9088055	2
<b>Pearson5</b>	0,9758899	0,9823159	0,8850978	0,7943311	0,9094087	1
	VII.a					

<b>Fatigue Life</b>	0,8047370	0,9160324	0,9379976	0,8026297	0,8653492	5
<b>Függvénytípus</b>	<b>S/1</b>	<b>S/2</b>	<b>S/3</b>	<b>S/4</b>	<b>Átlag</b>	<b>Sorrend</b>
<b>Fréchet</b>	0,9651028	0,9943321	0,9256109	0,9397179	0,9561909	1
<b>Inverz Gauss</b>	0,8125819	0,8784417	0,9381574	0,8392966	0,8671194	4
<b>LogNormal</b>	0,8480947	0,9120819	0,9372373	0,8878620	0,8963189	2
<b>Pearson5</b>	0,8575948	0,9295408	0,9370792	0,8528600	0,8942687	3
	VIII.f					
<b>Fatigue Life</b>	0,7719628	0,8692355	0,9856393	0,7995190	0,8565891	4
<b>Fréchet</b>	0,9255360	0,9547435	0,9858291	0,8975049	0,9409034	1
<b>Inverz Gauss</b>	0,7348998	0,8819606	0,9847765	0,7332032	0,8337100	5
<b>LogNormal</b>	0,8136480	0,8961653	0,9862356	0,7655223	0,8653928	3
<b>Pearson5</b>	0,7990849	0,9219356	0,9862273	0,8275554	0,8837008	2
	VIII.a					
<b>Fatigue Life</b>	0,8453055	0,9098024	0,9083662	0,8230729	0,8716367	5
<b>Fréchet</b>	0,9439932	0,9670718	0,8770160	0,8973011	0,9213455	1
<b>Inverz Gauss</b>	0,8274731	0,9161541	0,9072530	0,8364812	0,8718403	4
<b>LogNormal</b>	0,8903416	0,9161541	0,9056400	0,8289256	0,8852653	3
<b>Pearson5</b>	0,8927030	0,9477708	0,8986099	0,8445824	0,8959165	2
	IX.f					
<b>Fatigue Life</b>	0,9911774	0,9943360	0,9959835	0,6776589	0,9147889	4
<b>Fréchet</b>	0,9989628	0,9991253	0,9944780	0,8193722	0,9529846	1
<b>Inverz Gauss</b>	0,9876203	0,9924518	0,9966406	0,6998849	0,9191494	3
<b>LogNormal</b>	0,9877172	0,9856857	0,9972227	0,6561846	0,9067026	5
<b>Pearson5</b>	0,9928758	0,9960280	0,9983779	0,7468479	0,9335324	2
	IX.a					
<b>Fatigue Life</b>	0,9874206	0,9933780	0,9894684	0,9145983	0,9712163	4
<b>Fréchet</b>	0,9980923	0,9889121	0,9496186	0,9655890	0,9755530	1
<b>Inverz Gauss</b>	0,9808440	0,9921971	0,9892189	0,9335342	0,9739485	3
<b>LogNormal</b>	0,9818835	0,9904096	0,9883371	0,8713314	0,9579904	5
<b>Pearson5</b>	0,9922996	0,9948828	0,9811671	0,9302801	0,9746574	2



## 6.2. Melléklet: A sűrűségfüggvények illesztési paraméterei

34. táblázat: Sűrűségfüggvények illesztési paraméterei az S/1 mérési eredményekre

Ref.szám	Függvénytípus	Terület (h mg/l)	Paraméter a	Paraméter b	Paraméter c	
S/1	I. felső	Pearson5	6,669	1,715	0,482	0,104
S/1	I. felső	LogNormal	6,669	-1,182	0,977	0,142
S/1	I. felső	Inverz Gauss	6,669	0,454	0,510	0,129
S/1	I. felső	Fréchet	6,669	1,285	0,265	0,111
S/1	I. felső	Fatigue Life	6,669	0,961	0,327	0,133
S/1	I. felső	CDT	6,669	0,449	0,513	0,129
S/1	I. alsó	Pearson5	6,669	1,372	0,382	0,089
S/1	I. alsó	LogNormal	6,669	-1,270	1,287	0,139
S/1	I. alsó	Inverz Gauss	6,669	0,350	0,528	0,087
S/1	I. alsó	Fréchet	6,669	0,968	0,248	0,129
S/1	I. alsó	Fatigue Life	6,669	1,022	0,301	0,098
S/1	I. alsó	CDT	6,669	0,516	0,754	0,009
S/1	II. felső	Pearson5	6,669	1,399	0,478	0,000
S/1	II. felső	LogNormal	6,669	-1,058	1,016	0,038
S/1	II. felső	Inverz Gauss	6,669	0,491	0,584	0,006
S/1	II. felső	Fréchet	6,669	1,511	0,249	0,136
S/1	II. felső	Fatigue Life	6,669	1,149	0,317	0,051
S/1	II. felső	CDT	6,669	0,279	0,754	0,200
S/1	II. alsó	Pearson5	6,669	2,196	0,873	0,029
S/1	II. alsó	LogNormal	6,669	-0,985	0,925	0,142
S/1	II. alsó	Inverz Gauss	6,669	0,664	0,590	0,101
S/1	II. alsó	Fréchet	6,669	1,619	0,396	0,007
S/1	II. alsó	Fatigue Life	6,669	0,922	0,401	0,130
S/1	II. alsó	CDT	6,669	0,672	5,586	0,100
S/1	III. felső	Pearson5	6,669	3,069	0,558	0,103
S/1	III. felső	LogNormal	6,669	-1,812	0,752	0,146
S/1	III. felső	Inverz Gauss	6,669	0,769	0,232	0,083
S/1	III. felső	Fréchet	6,669	1,498	0,154	0,133
S/1	III. felső	Fatigue Life	6,669	0,568	0,195	0,108
S/1	III. felső	CDT	6,669	0,365	0,521	0,086
S/1	III. alsó	Pearson5	6,669	3,069	0,558	0,104
S/1	III. alsó	LogNormal	6,669	-1,812	0,755	0,146
S/1	III. alsó	Inverz Gauss	6,669	0,818	0,238	0,083
S/1	III. alsó	Fréchet	6,669	1,528	0,156	0,133
S/1	III. alsó	Fatigue Life	6,669	0,593	0,191	0,112
S/1	III. alsó	CDT	6,669	0,191	2,825	0,083
S/1	IV. felső	Pearson5	6,669	3,534	4,776	0,118
S/1	IV. felső	LogNormal	6,669	0,324	0,598	0,187
S/1	IV. felső	Inverz Gauss	6,669	5,343	1,753	0,058
S/1	IV. felső	Fréchet	6,669	2,285	1,354	0,021

Ref.szám		Függvénytípus	Terület (h mg/l)	Paraméter a	Paraméter b	Paraméter c
S/1	IV. felső	Fatigue Life	6,669	0,567	1,473	0,097
S/1	IV. felső	CDT	6,669	5,948	1,718	0,032
S/1	IV. alsó	Pearson5	6,669	3,979	6,989	0,040
S/1	IV. alsó	LogNormal	6,669	0,416	0,657	0,449
S/1	IV. alsó	Inverz Gauss	6,669	5,207	1,997	0,284
S/1	IV. alsó	Fréchet	6,669	2,197	1,614	0,006
S/1	IV. alsó	Fatigue Life	6,669	0,678	1,466	0,484
S/1	IV. alsó	CDT	6,669	7,847	1,951	0,461
S/1	V. felső	Pearson5	6,669	2,788	3,893	0,545
S/1	V. felső	LogNormal	6,669	0,826	0,353	0,000
S/1	V. felső	Inverz Gauss	6,669	17,833	2,411	0,006
S/1	V. felső	Fréchet	6,669	1,594	0,872	0,697
S/1	V. felső	Fatigue Life	6,669	0,617	1,411	0,688
S/1	V. felső	CDT	6,669	10,830	3,090	0,006
S/1	V. alsó	Pearson5	6,669	4,429	7,441	0,362
S/1	V. alsó	LogNormal	6,669	0,262	0,677	0,785
S/1	V. alsó	Inverz Gauss	6,669	7,774	1,949	0,460
S/1	V. alsó	Fréchet	6,669	2,215	1,499	0,309
S/1	V. alsó	Fatigue Life	6,669	0,617	1,411	0,688
S/1	V. alsó	CDT	6,669	8,276	1,859	0,455
S/1	VI. felső	Pearson5	6,669	7,456	13,586	0,097
S/1	VI. felső	LogNormal	6,669	0,404	0,473	0,502
S/1	VI. felső	Inverz Gauss	6,669	9,052	1,793	0,377
S/1	VI. felső	Fréchet	6,669	3,170	1,651	0,004
S/1	VI. felső	Fatigue Life	6,669	0,438	1,616	0,393
S/1	VI. felső	CDT	6,669	9,387	1,901	0,376
S/1	VI. alsó	Pearson5	6,669	6,548	11,258	0,215
S/1	VI. alsó	LogNormal	6,669	0,371	0,499	0,575
S/1	VI. alsó	Inverz Gauss	6,669	7,828	1,744	0,456
S/1	VI. alsó	Fréchet	6,669	3,094	1,726	0,000
S/1	VI. alsó	Fatigue Life	6,669	0,459	1,569	0,464
S/1	VI. alsó	CDT	6,669	11,330	3,030	0,006
S/1	VII. felső	Pearson5	6,669	4,099	4,022	0,373
S/1	VII. felső	LogNormal	6,669	0,094	0,472	0,373
S/1	VII. felső	Inverz Gauss	6,669	4,116	1,152	0,418
S/1	VII. felső	Fréchet	6,669	2,400	1,031	0,244
S/1	VII. felső	Fatigue Life	6,669	0,620	0,829	0,550
S/1	VII. felső	CDT	6,669	4,085	1,109	0,419
S/1	VII. alsó	Pearson5	6,669	2,733	3,906	0,288
S/1	VII. alsó	LogNormal	6,669	0,188	0,873	0,760
S/1	VII. alsó	Inverz Gauss	6,669	4,166	1,932	0,289
S/1	VII. alsó	Fréchet	6,669	1,102	0,703	0,859
S/1	VII. alsó	Fatigue Life	6,669	0,689	1,483	0,411
S/1	VII. alsó	CDT	6,669	3,802	1,925	0,342

Ref.szám		Függvénytípus	Terület (h mg/l)	Paraméter a	Paraméter b	Paraméter c
S/1	VIII. felső	Pearson5	6,669	2,252	3,525	0,487
S/1	VIII. felső	LogNormal	6,669	0,336	0,913	0,908
S/1	VIII. felső	Inverz Gauss	6,669	3,610	2,347	0,565
S/1	VIII. felső	Fréchet	6,669	1,025	1,090	0,906
S/1	VIII. felső	Fatigue Life	6,669	0,785	1,496	0,777
S/1	VIII. felső	CDT	6,669	5,245	1,451	0,562
S/1	VIII. alsó	Pearson5	6,669	2,877	3,988	0,525
S/1	VIII. alsó	LogNormal	6,669	0,183	0,804	0,890
S/1	VIII. alsó	Inverz Gauss	6,669	4,957	1,822	0,500
S/1	VIII. alsó	Fréchet	6,669	1,335	1,076	0,784
S/1	VIII. alsó	Fatigue Life	6,669	0,649	1,372	0,683
S/1	VIII. alsó	CDT	6,669	1,337	1,064	0,791
S/1	IX. felső	Pearson5	6,669	8,649	9,478	0,362
S/1	IX. felső	LogNormal	6,669	0,090	0,350	0,393
S/1	IX. felső	Inverz Gauss	6,669	9,133	1,162	0,384
S/1	IX. felső	Fréchet	6,669	2,201	0,783	0,694
S/1	IX. felső	Fatigue Life	6,669	0,436	0,910	0,587
S/1	IX. felső	CDT	6,669	8,875	1,140	0,312
S/1	IX. alsó	Pearson5	6,669	6,992	8,186	0,451
S/1	IX. alsó	LogNormal	6,669	0,154	0,391	0,511
S/1	IX. alsó	Inverz Gauss	6,669	8,445	1,284	0,484
S/1	IX. alsó	Fréchet	6,669	3,533	1,337	0,178
S/1	IX. alsó	Fatigue Life	6,669	0,466	0,999	0,674
S/1	IX. alsó	CDT	6,669	9,095	4,184	0,481

35. táblázat: Sűrűségfüggvények illesztési paramétereit az S/2 mérési eredményekre

Ref.szám		Függvénytípus	Terület (h mg/l)	Paraméter a	Paraméter b	Paraméter c
S/2	I. felső	Pearson5	6,305	0,974	0,131	0,002
S/2	I. felső	LogNormal	6,305	-1,996	1,513	0,047
S/2	I. felső	Inverz Gauss	6,305	1,010	0,291	0,094
S/2	I. felső	Fréchet	6,305	0,921	0,128	0,013
S/2	I. felső	Fatigue Life	6,305	1,246	0,157	0,015
S/2	I. felső	CDT	6,305	0,274	10,503	0,105
S/2	I. alsó	Pearson5	6,305	3,509	2,252	0,058
S/2	I. alsó	LogNormal	6,305	-0,543	0,674	0,164
S/2	I. alsó	Inverz Gauss	6,305	1,681	0,758	0,121
S/2	I. alsó	Fréchet	6,305	0,657	0,603	0,133
S/2	I. alsó	Fatigue Life	6,305	0,657	0,603	0,133
S/2	I. alsó	CDT	6,305	1,680	0,754	0,121
S/2	II. felső	Pearson5	6,305	0,865	0,289	0,127
S/2	II. felső	LogNormal	6,305	-0,596	1,129	0,062
S/2	II. felső	Inverz Gauss	6,305	0,440	1,699	0,124

Ref.szám		Függvénytípus	Terület (h mg/l)	Paraméter a	Paraméter b	Paraméter c
S/2	II. felső	Fréchet	6,305	0,963	0,339	0,124
S/2	II. felső	Fatigue Life	6,305	1,091	0,605	0,034
S/2	II. felső	CDT	6,305	0,447	1,516	0,124
S/2	II. alsó	Pearson5	6,305	1,527	0,946	0,000
S/2	II. alsó	LogNormal	6,305	-0,306	0,911	0,061
S/2	II. alsó	Inverz Gauss	6,305	0,846	1,144	0,084
S/2	II. alsó	Fréchet	6,305	1,261	0,575	0,002
S/2	II. alsó	Fatigue Life	6,305	1,098	0,615	0,138
S/2	II. alsó	CDT	6,305	0,871	1,019	0,084
S/2	III. felső	Pearson5	6,305	3,604	0,747	0,066
S/2	III. felső	LogNormal	6,305	-1,767	0,777	0,130
S/2	III. felső	Inverz Gauss	6,305	0,445	0,234	0,100
S/2	III. felső	Fréchet	6,305	1,351	0,152	0,130
S/2	III. felső	Fatigue Life	6,305	0,670	0,187	0,119
S/2	III. felső	CDT	6,305	0,089	1,510	0,213
S/2	III. alsó	Pearson5	6,305	0,530	0,140	0,031
S/2	III. alsó	LogNormal	6,305	-1,086	0,789	0,000
S/2	III. alsó	Inverz Gauss	6,305	0,333	1,955	0,018
S/2	III. alsó	Fréchet	6,305	1,024	0,257	0,012
S/2	III. alsó	Fatigue Life	6,305	0,825	0,334	0,003
S/2	III. alsó	CDT	6,305	0,191	2,825	0,083
S/2	IV. felső	Pearson5	6,305	2,204	0,748	0,132
S/2	IV. felső	LogNormal	6,305	0,088	1,604	0,218
S/2	IV. felső	Inverz Gauss	6,305	1,028	2,319	0,065
S/2	IV. felső	Fréchet	6,305	1,320	0,327	0,137
S/2	IV. felső	Fatigue Life	6,305	1,097	0,297	0,206
S/2	IV. felső	CDT	6,305	1,341	0,908	0,064
S/2	IV. alsó	Pearson5	6,305	0,811	1,045	0,169
S/2	IV. alsó	LogNormal	6,305	0,604	1,114	0,000
S/2	IV. alsó	Inverz Gauss	6,305	1,544	5,345	0,222
S/2	IV. alsó	Fréchet	6,305	0,671	1,094	0,422
S/2	IV. alsó	Fatigue Life	6,305	1,429	2,022	0,348
S/2	IV. alsó	CDT	6,305	5,459	2,182	0,223
S/2	V. felső	Pearson5	6,305	0,834	0,483	0,185
S/2	V. felső	LogNormal	6,305	-0,107	1,573	0,340
S/2	V. felső	Inverz Gauss	6,305	0,550	2,234	0,213
S/2	V. felső	Fréchet	6,305	0,842	0,536	0,210
S/2	V. felső	Fatigue Life	6,305	1,294	0,512	0,230
S/2	V. felső	CDT	6,305	2,394	1,234	0,428
S/2	V. alsó	Pearson5	6,305	0,789	0,476	0,179
S/2	V. alsó	LogNormal	6,305	-0,029	1,578	0,326
S/2	V. alsó	Inverz Gauss	6,305	0,603	2,381	0,202
S/2	V. alsó	Fréchet	6,305	0,844	0,588	0,195
S/2	V. alsó	Fatigue Life	6,305	1,292	0,717	0,215

Ref.szám		Függvénytípus	Terület (h mg/l)	Paraméter a	Paraméter b	Paraméter c
S/2	V. alsó	CDT	6,305	0,618	1,956	0,200
S/2	VI. felső	Pearson5	6,305	2,970	1,209	0,159
S/2	VI. felső	LogNormal	6,305	0,051	1,242	0,251
S/2	VI. felső	Inverz Gauss	6,305	1,143	0,493	0,190
S/2	VI. felső	Fréchet	6,305	2,398	0,500	0,042
S/2	VI. felső	Fatigue Life	6,305	0,782	0,370	0,225
S/2	VI. felső	CDT	6,305	3,489	0,897	0,302
S/2	VI. alsó	Pearson5	6,305	3,480	1,793	0,040
S/2	VI. alsó	LogNormal	6,305	-0,631	0,590	0,070
S/2	VI. alsó	Inverz Gauss	6,305	1,541	0,614	0,079
S/2	VI. alsó	Fréchet	6,305	1,961	0,473	0,057
S/2	VI. alsó	Fatigue Life	6,305	0,752	0,406	0,185
S/2	VI. alsó	CDT	6,305	1,470	0,567	0,079
S/2	VII. felső	Pearson5	6,305	3,888	3,605	0,000
S/2	VII. felső	LogNormal	6,305	0,026	0,491	0,004
S/2	VII. felső	Inverz Gauss	6,305	2,868	1,037	0,094
S/2	VII. felső	Fréchet	6,305	2,061	0,891	0,000
S/2	VII. felső	Fatigue Life	6,305	0,601	0,841	0,121
S/2	VII. felső	CDT	6,305	2,841	1,028	0,093
S/2	VII. alsó	Pearson5	6,305	1,848	1,858	0,233
S/2	VII. alsó	LogNormal	6,305	0,089	1,172	0,536
S/2	VII. alsó	Inverz Gauss	6,305	2,217	1,671	0,252
S/2	VII. alsó	Fréchet	6,305	1,040	0,419	0,533
S/2	VII. alsó	Fatigue Life	6,305	0,944	0,863	0,478
S/2	VII. alsó	CDT	6,305	3,120	1,061	0,251
S/2	VIII. felső	Pearson5	6,305	1,384	1,584	0,390
S/2	VIII. felső	LogNormal	6,305	0,244	1,131	0,603
S/2	VIII. felső	Inverz Gauss	6,305	1,918	2,301	0,428
S/2	VIII. felső	Fréchet	6,305	0,904	0,918	0,657
S/2	VIII. felső	Fatigue Life	6,305	0,939	1,338	0,492
S/2	VIII. felső	CDT	6,305	2,394	1,234	0,428
S/2	VIII. alsó	Pearson5	6,305	1,856	2,001	0,363
S/2	VIII. alsó	LogNormal	6,305	0,098	0,905	0,542
S/2	VIII. alsó	Inverz Gauss	6,305	2,415	1,667	0,382
S/2	VIII. alsó	Fréchet	6,305	1,027	0,794	0,664
S/2	VIII. alsó	Fatigue Life	6,305	0,813	1,186	0,447
S/2	VIII. alsó	CDT	6,305	2,884	1,211	0,382
S/2	IX. felső	Pearson5	6,305	4,607	3,645	0,277
S/2	IX. felső	LogNormal	6,305	0,010	0,361	0,058
S/2	IX. felső	Inverz Gauss	6,305	3,446	0,889	0,303
S/2	IX. felső	Fréchet	6,305	1,760	0,613	0,478
S/2	IX. felső	Fatigue Life	6,305	0,567	0,706	0,395
S/2	IX. felső	CDT	6,305	3,489	0,897	0,302
S/2	IX. alsó	Pearson5	6,305	6,221	6,368	0,130

Ref.szám		Függvénytípus	Terület (h mg/l)	Paraméter a	Paraméter b	Paraméter c
S/2	IX. alsó	LogNormal	6,305	0,063	0,415	0,166
S/2	IX. alsó	Inverz Gauss	6,305	4,995	1,076	0,244
S/2	IX. alsó	Fréchet	6,305	2,978	1,051	0,002
S/2	IX. alsó	Fatigue Life	6,305	0,542	0,827	0,378
S/2	IX. alsó	CDT	6,305	4,659	1,175	0,244

**36. táblázat: Sűrűségfüggvények illesztési paramétereit az S/3 mérési eredményekre**

Ref.szám		Függvénytípus	Terület (h mg/l)	Paraméter a	Paraméter b	Paraméter c
S/3	I. felső	Pearson5	11,582	1,394	1,245	0,283
S/3	I. felső	LogNormal	11,582	0,032	1,034	0,408
S/3	I. felső	Inverz Gauss	11,582	1,300	1,840	0,378
S/3	I. felső	Fréchet	11,582	1,196	0,862	0,288
S/3	I. felső	Fatigue Life	11,582	1,043	1,086	0,421
S/3	I. felső	CDT	11,582	1,757	0,472	0,288
S/3	I. alsó	Pearson5	11,582	2,461	2,179	0,165
S/3	I. alsó	LogNormal	11,582	0,107	0,609	0,086
S/3	I. alsó	Inverz Gauss	11,582	2,247	1,269	0,212
S/3	I. alsó	Fréchet	11,582	1,867	0,888	0,075
S/3	I. alsó	Fatigue Life	11,582	0,875	0,711	0,401
S/3	I. alsó	CDT	11,582	2,661	1,029	0,212
S/3	II. felső	Pearson5	11,582	1,737	2,209	0,217
S/3	II. felső	LogNormal	11,582	0,157	1,236	0,657
S/3	II. felső	Inverz Gauss	11,582	2,182	2,131	0,349
S/3	II. felső	Fréchet	11,582	1,149	1,054	0,366
S/3	II. felső	Fatigue Life	11,582	0,935	1,389	0,431
S/3	II. felső	CDT	11,582	2,530	1,472	0,366
S/3	II. alsó	Pearson5	11,582	3,160	7,156	0,000
S/3	II. alsó	LogNormal	11,582	0,919	0,536	0,000
S/3	II. alsó	Inverz Gauss	11,582	9,034	2,906	0,000
S/3	II. alsó	Fréchet	11,582	1,746	2,070	0,000
S/3	II. alsó	Fatigue Life	11,582	0,542	2,516	0,000
S/3	II. alsó	CDT	11,582	8,696	3,027	0,000
S/3	III. felső	Pearson5	11,582	1,858	2,126	0,235
S/3	III. felső	LogNormal	11,582	0,185	0,895	0,434
S/3	III. felső	Inverz Gauss	11,582	2,405	1,839	0,286
S/3	III. felső	Fréchet	11,582	1,305	1,011	0,303
S/3	III. felső	Fatigue Life	11,582	0,929	1,226	0,447
S/3	III. felső	CDT	11,582	2,711	1,472	0,302
S/3	III. alsó	Pearson5	11,582	4,949	4,140	0,000
S/3	III. alsó	LogNormal	11,582	0,029	0,525	0,000
S/3	III. alsó	Inverz Gauss	11,582	3,234	0,931	0,089

Ref.szám		Függvénytípus	Terület (h mg/l)	Paraméter a	Paraméter b	Paraméter c
S/3	III. alsó	Fréchet	11,582	2,456	0,766	0,000
S/3	III. alsó	Fatigue Life	11,582	0,615	0,694	0,216
S/3	III. alsó	CDT	11,582	4,502	0,980	0,000
S/3	IV. felső	Pearson5	11,582	2,166	3,767	0,280
S/3	IV. felső	LogNormal	11,582	0,545	0,851	0,594
S/3	IV. felső	Inverz Gauss	11,582	3,834	2,526	0,396
S/3	IV. felső	Fréchet	11,582	1,733	1,823	0,071
S/3	IV. felső	Fatigue Life	11,582	0,800	1,835	0,483
S/3	IV. felső	CDT	11,582	5,459	2,182	0,223
S/3	IV. alsó	Pearson5	11,582	4,708	16,597	0,027
S/3	IV. alsó	LogNormal	11,582	1,341	0,462	0,000
S/3	IV. alsó	Inverz Gauss	11,582	19,138	4,255	0,000
S/3	IV. alsó	Fréchet	11,582	2,235	3,279	0,000
S/3	IV. alsó	Fatigue Life	11,582	0,463	3,863	0,000
S/3	IV. alsó	CDT	11,582	17,078	4,692	0,000
S/3	V. felső	Pearson5	11,582	1,800	3,988	0,433
S/3	V. felső	LogNormal	11,582	0,780	1,015	0,997
S/3	V. felső	Inverz Gauss	11,582	3,523	3,595	0,730
S/3	V. felső	Fréchet	11,582	1,494	2,238	0,266
S/3	V. felső	Fatigue Life	11,582	0,862	2,410	0,730
S/3	V. felső	CDT	11,582	0,618	1,956	0,200
S/3	V. alsó	Pearson5	11,582	5,090	12,652	0,000
S/3	V. alsó	LogNormal	11,582	0,728	0,598	0,601
S/3	V. alsó	Inverz Gauss	11,582	7,765	2,613	0,438
S/3	V. alsó	Fréchet	11,582	2,238	2,321	0,000
S/3	V. alsó	Fatigue Life	11,582	0,578	2,171	0,515
S/3	V. alsó	CDT	11,582	8,414	2,534	0,416
S/3	VI. felső	Pearson5	11,582	2,399	5,396	0,317
S/3	VI. felső	LogNormal	11,582	0,682	0,956	0,997
S/3	VI. felső	Inverz Gauss	11,582	3,751	3,111	0,730
S/3	VI. felső	Fréchet	11,582	1,836	2,386	0,010
S/3	VI. felső	Fatigue Life	11,582	0,876	2,121	0,845
S/3	VI. felső	CDT	11,582	1,470	0,567	0,079
S/3	VI. alsó	Pearson5	11,582	5,032	9,974	0,213
S/3	VI. alsó	LogNormal	11,582	0,509	0,595	0,677
S/3	VI. alsó	Inverz Gauss	11,582	5,966	2,072	0,573
S/3	VI. alsó	Fréchet	11,582	2,553	2,032	0,005
S/3	VI. alsó	Fatigue Life	11,582	0,581	1,731	0,615
S/3	VI. alsó	CDT	11,582	6,853	2,396	0,451
S/3	VII. felső	Pearson5	11,582	6,108	21,416	0,000
S/3	VII. felső	LogNormal	11,582	1,304	0,393	0,012
S/3	VII. felső	Inverz Gauss	11,582	24,704	3,984	0,000
S/3	VII. felső	Fréchet	11,582	2,425	3,220	0,000
S/3	VII. felső	Fatigue Life	11,582	0,395	3,716	0,000

Ref.szám	Függvénytípus	Terület (h mg/l)	Paraméter a	Paraméter b	Paraméter c	
S/3	VII. felső	CDT	11,582	9,672	3,212	0,876
S/3	VII. alsó	Pearson5	11,582	4,998	17,486	0,028
S/3	VII. alsó	LogNormal	11,582	1,140	0,546	0,653
S/3	VII. alsó	Inverz Gauss	11,582	13,708	3,795	0,439
S/3	VII. alsó	Fréchet	11,582	2,284	3,322	0,000
S/3	VII. alsó	Fatigue Life	11,582	0,523	3,247	0,531
S/3	VII. alsó	CDT	11,582	12,253	4,212	0,430
S/3	VIII. felső	Pearson5	11,582	3,407	10,571	0,871
S/3	VIII. felső	LogNormal	11,582	1,013	0,722	1,594
S/3	VIII. felső	Inverz Gauss	11,582	9,638	3,758	1,132
S/3	VIII. felső	Fréchet	11,582	2,453	3,674	0,044
S/3	VIII. felső	Fatigue Life	11,582	0,684	2,904	1,453
S/3	VIII. felső	CDT	11,582	10,458	3,821	1,044
S/3	VIII. alsó	Pearson5	11,582	4,477	20,687	0,000
S/3	VIII. alsó	LogNormal	11,582	1,447	0,545	0,691
S/3	VIII. alsó	Inverz Gauss	11,582	19,191	5,177	0,363
S/3	VIII. alsó	Fréchet	11,582	2,062	4,264	0,000
S/3	VIII. alsó	Fatigue Life	11,582	0,525	4,420	0,531
S/3	VIII. alsó	CDT	11,582	15,428	6,210	0,360
S/3	IX. felső	Pearson5	11,582	4,011	15,848	0,437
S/3	IX. felső	LogNormal	11,582	1,269	0,617	1,184
S/3	IX. felső	Inverz Gauss	11,582	12,381	4,512	0,932
S/3	IX. felső	Fréchet	11,582	2,255	4,102	0,000
S/3	IX. felső	Fatigue Life	11,582	0,590	3,717	1,032
S/3	IX. felső	CDT	11,582	9,396	4,212	1,259
S/3	IX. alsó	Pearson5	11,582	6,064	27,261	0,000
S/3	IX. alsó	LogNormal	11,582	1,498	0,413	0,244
S/3	IX. alsó	Inverz Gauss	11,582	31,275	5,078	0,027
S/3	IX. alsó	Fréchet	11,582	2,380	4,206	0,000
S/3	IX. alsó	Fatigue Life	11,582	0,396	4,684	0,044
S/3	IX. alsó	CDT	11,582	30,975	5,312	0,020

37. táblázat: Sűrűségfüggvények illesztési paraméterei az S/4 mérési eredményekre

Ref.szám	Függvénytípus	Terület (h mg/l)	Paraméter a	Paraméter b	Paraméter c	
S/4	I. felső	Pearson5	13,674	0,266	0,454	0,061
S/4	I. felső	LogNormal	13,674	1,696	2,288	0,269
S/4	I. felső	Inverz Gauss	13,674	1,668	19,836	0,000
S/4	I. felső	Fréchet	13,674	0,312	1,584	0,269
S/4	I. felső	Fatigue Life	13,674	2,116	5,187	0,041
S/4	I. felső	CDT	13,674	1,667	0,200	0,000
S/4	I. alsó	Pearson5	13,674	1,682	1,726	0,154



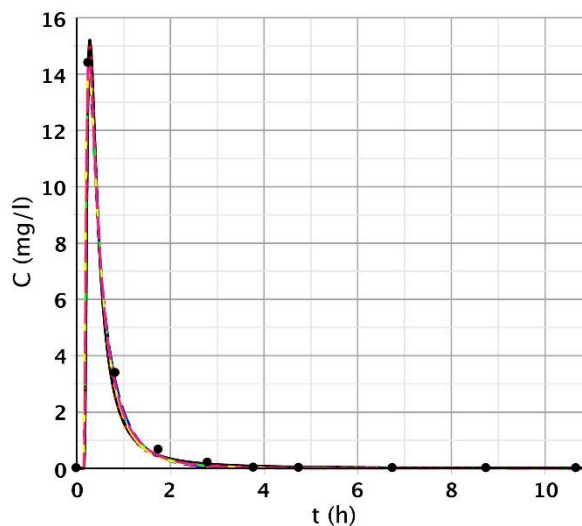
Ref.szám		Függvénytípus	Terület (h mg/l)	Paraméter a	Paraméter b	Paraméter c
S/4	I. alsó	LogNormal	13,674	0,105	1,178	0,445
S/4	I. alsó	Inverz Gauss	13,674	1,977	1,887	0,194
S/4	I. alsó	Fréchet	13,674	1,103	0,578	0,383
S/4	I. alsó	Fatigue Life	13,674	0,973	1,133	0,327
S/4	I. alsó	CDT	13,674	1,197	0,950	0,394
S/4	II. felső	Pearson5	13,674	0,126	0,131	0,090
S/4	II. felső	LogNormal	13,674	1,855	3,301	0,066
S/4	II. felső	Inverz Gauss	13,674	0,013	35000,000	0,000
S/4	II. felső	Fréchet	13,674	0,260	0,513	0,000
S/4	II. felső	Fatigue Life	13,674	4,084	11,634	0,000
S/4	II. felső	CDT	13,674	0,016	0,478	0,000
S/4	II. alsó	Pearson5	13,674	1,874	0,559	0,000
S/4	II. alsó	LogNormal	13,674	0,000	1,708	0,293
S/4	II. alsó	Inverz Gauss	13,674	0,497	0,900	0,016
S/4	II. alsó	Fréchet	13,674	1,161	0,294	0,034
S/4	II. alsó	Fatigue Life	13,674	0,991	0,354	0,009
S/4	II. alsó	CDT	13,674	0,182	0,499	0,033
S/4	III. felső	Pearson5	13,674	0,138	0,321	0,197
S/4	III. felső	LogNormal	13,674	3,347	3,132	0,443
S/4	III. felső	Inverz Gauss	13,674	0,012	35000,000	0,210
S/4	III. felső	Fréchet	13,674	0,234	5,196	0,280
S/4	III. felső	Fatigue Life	13,674	2,914	15,802	0,053
S/4	III. felső	CDT	13,674	0,018	1,250	0,280
S/4	III. alsó	Pearson5	13,674	1,763	0,608	0,000
S/4	III. alsó	LogNormal	13,674	-0,256	1,612	0,292
S/4	III. alsó	Inverz Gauss	13,674	0,550	0,606	0,023
S/4	III. alsó	Fréchet	13,674	1,304	0,356	0,001
S/4	III. alsó	Fatigue Life	13,674	0,964	0,380	0,031
S/4	III. alsó	CDT	13,674	0,604	0,869	0,022
S/4	IV. felső	Pearson5	13,674	0,295	0,865	0,220
S/4	IV. felső	LogNormal	13,674	2,234	2,292	0,796
S/4	IV. felső	Inverz Gauss	13,674	3,530	22,168	0,000
S/4	IV. felső	Fréchet	13,674	0,299	4,222	0,797
S/4	IV. felső	Fatigue Life	13,674	2,032	8,877	0,143
S/4	IV. felső	CDT	13,674	0,048	0,817	0,797
S/4	IV. alsó	Pearson5	13,674	0,408	0,795	0,340
S/4	IV. alsó	LogNormal	13,674	1,282	1,973	0,548
S/4	IV. alsó	Inverz Gauss	13,674	2,848	8,805	0,169
S/4	IV. alsó	Fréchet	13,674	0,430	1,440	0,540
S/4	IV. alsó	Fatigue Life	13,674	1,644	4,433	0,338
S/4	IV. alsó	CDT	13,674	0,151	0,821	0,540
S/4	V. felső	Pearson5	13,674	1,040	1,554	0,523
S/4	V. felső	LogNormal	13,674	0,460	1,252	0,770
S/4	V. felső	Inverz Gauss	13,674	1,921	4,072	0,598

Ref.szám		Függvénytípus	Terület (h mg/l)	Paraméter a	Paraméter b	Paraméter c
S/4	V. felső	Fréchet	13,674	0,871	1,262	0,644
S/4	V. felső	Fatigue Life	13,674	1,116	1,823	0,648
S/4	V. felső	CDT	13,674	2,032	2,294	0,591
S/4	V. alsó	Pearson5	13,674	1,553	1,926	0,393
S/4	V. alsó	LogNormal	13,674	0,230	0,980	0,546
S/4	V. alsó	Inverz Gauss	13,674	1,963	2,121	0,453
S/4	V. alsó	Fréchet	13,674	1,372	1,254	0,319
S/4	V. alsó	Fatigue Life	13,674	0,934	1,308	0,476
S/4	V. alsó	CDT	13,674	1,940	2,005	0,455
S/4	VI. felső	Pearson5	13,674	1,050	1,678	0,277
S/4	VI. felső	LogNormal	13,674	0,531	1,525	0,797
S/4	VI. felső	Inverz Gauss	13,674	2,254	4,347	0,327
S/4	VI. felső	Fréchet	13,674	0,738	1,192	0,657
S/4	VI. felső	Fatigue Life	13,674	1,232	2,177	0,523
S/4	VI. felső	CDT	13,674	2,870	1,924	0,367
S/4	VI. alsó	Pearson5	13,674	1,237	1,493	0,369
S/4	VI. alsó	LogNormal	13,674	0,232	1,135	0,551
S/4	VI. alsó	Inverz Gauss	13,674	1,587	2,571	0,447
S/4	VI. alsó	Fréchet	13,674	1,198	1,230	0,316
S/4	VI. alsó	Fatigue Life	13,674	1,071	1,336	0,479
S/4	VI. alsó	CDT	13,674	1,631	2,473	0,441
S/4	VII. felső	Pearson5	13,674	0,595	1,684	0,481
S/4	VII. felső	LogNormal	13,674	1,486	1,605	0,822
S/4	VII. felső	Inverz Gauss	13,674	3,569	7,955	0,488
S/4	VII. felső	Fréchet	13,674	0,592	2,926	0,753
S/4	VII. felső	Fatigue Life	13,674	1,283	4,620	0,567
S/4	VII. felső	CDT	13,674	3,752	4,239	0,483
S/4	VII. alsó	Pearson5	13,674	1,077	2,771	0,446
S/4	VII. alsó	LogNormal	13,674	1,046	1,343	1,119
S/4	VII. alsó	Inverz Gauss	13,674	3,495	7,001	0,593
S/4	VII. alsó	Fréchet	13,674	0,655	1,861	1,062
S/4	VII. alsó	Fatigue Life	13,674	1,056	3,549	0,593
S/4	VII. alsó	CDT	13,674	2,206	5,317	0,928
S/4	VIII. felső	Pearson5	13,674	0,656	2,150	0,790
S/4	VIII. felső	LogNormal	13,674	1,629	1,339	1,196
S/4	VIII. felső	Inverz Gauss	13,674	4,125	8,785	0,880
S/4	VIII. felső	Fréchet	13,674	0,660	3,244	1,196
S/4	VIII. felső	Fatigue Life	13,674	1,283	5,319	0,928
S/4	VIII. felső	CDT	13,674	2,466	80,116	1,196
S/4	VIII. alsó	Pearson5	13,674	1,216	3,237	0,746
S/4	VIII. alsó	LogNormal	13,674	1,148	1,126	1,258
S/4	VIII. alsó	Inverz Gauss	13,674	3,895	6,103	0,894
S/4	VIII. alsó	Fréchet	13,674	0,863	2,193	1,300
S/4	VIII. alsó	Fatigue Life	13,674	0,972	3,362	0,931

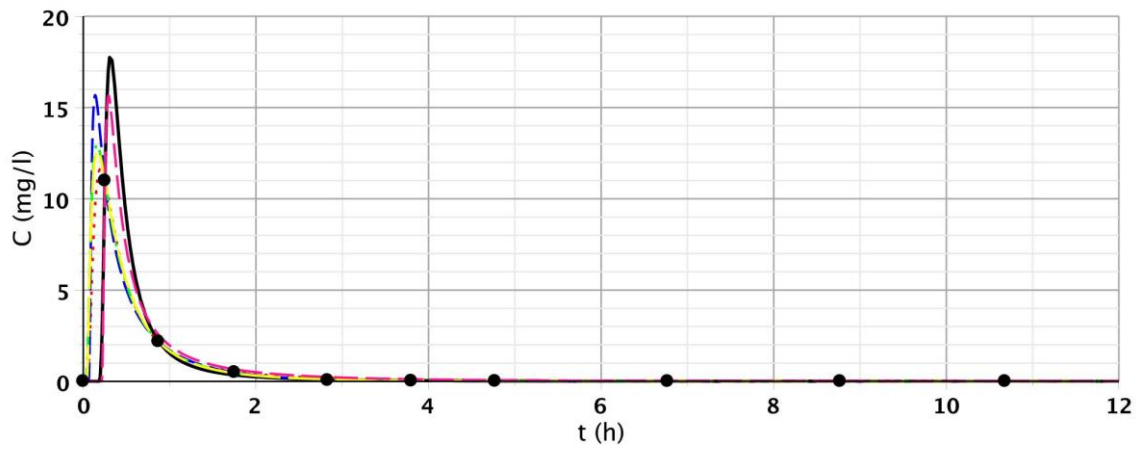
Ref.szám		Függvénytípus	Terület (h mg/l)	Paraméter a	Paraméter b	Paraméter c
S/4	VIII. alsó	CDT	13,674	5,531	4,431	0,693
S/4	IX. felső	Pearson5	13,674	0,732	2,059	0,892
S/4	IX. felső	LogNormal	13,674	1,438	1,260	1,196
S/4	IX. felső	Inverz Gauss	13,674	2,983	6,954	1,129
S/4	IX. felső	Fréchet	13,674	0,742	2,610	1,197
S/4	IX. felső	Fatigue Life	13,674	1,179	4,487	0,928
S/4	IX. felső	CDT	13,674	2,717	1,431	1,196
S/4	IX. alsó	Pearson5	13,674	1,034	2,036	0,860
S/4	IX. alsó	LogNormal	13,674	0,903	1,059	1,072
S/4	IX. alsó	Inverz Gauss	13,674	2,458	5,321	0,976
S/4	IX. alsó	Fréchet	13,674	0,827	1,688	1,064
S/4	IX. alsó	Fatigue Life	13,674	1,088	2,486	1,028
S/4	IX. alsó	CDT	13,674	2,115	4,781	1,042

### 6.3. Melléklet: A sűrűségfüggvények illesztési képei

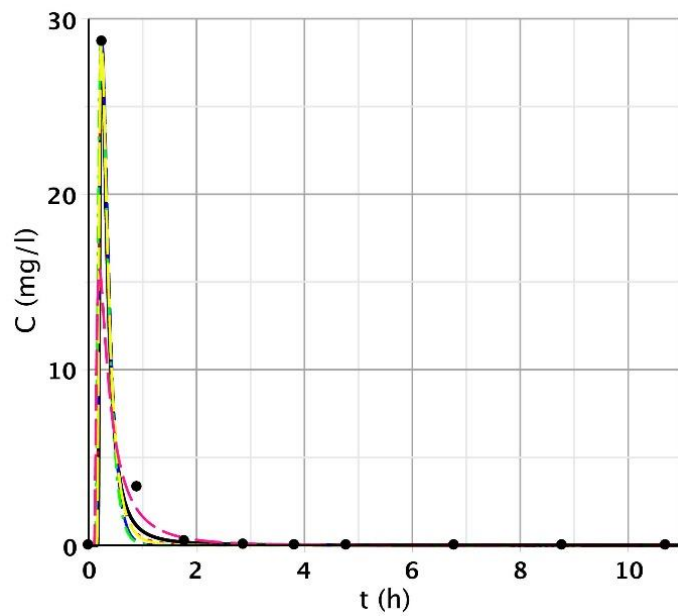
A 79.-150. ábrákon a fekete folytonos vonal a Fréchet, a fekete pontozott vonal a Pearson5, a kék szaggatott vonal a Fatigue Life, a zöld szaggatott vonal az Inverz Gauss, a sárga a LogNormal és a rózsaszín szaggatott vonal az 1 dimenziós konvektív-diszperzív transzportmodellt mutatja.



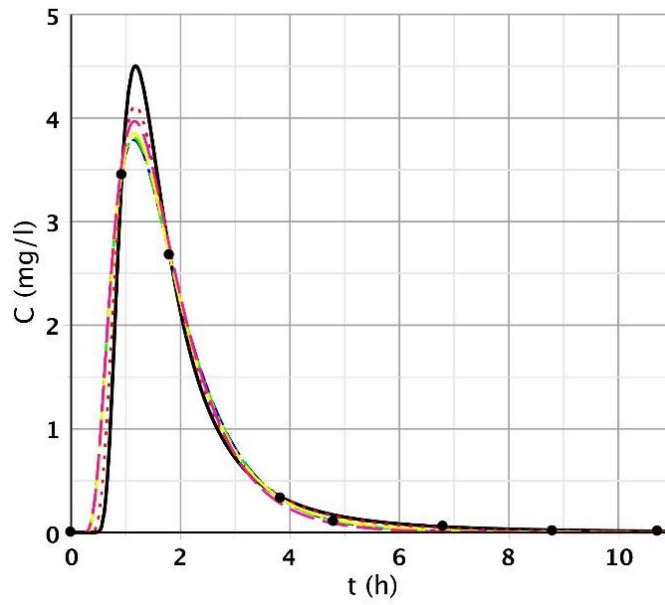
79. ábra: Az 5 sűrűségfüggvény és a CDT-modell illesztési eredménye az S/1 I. felső pontnál



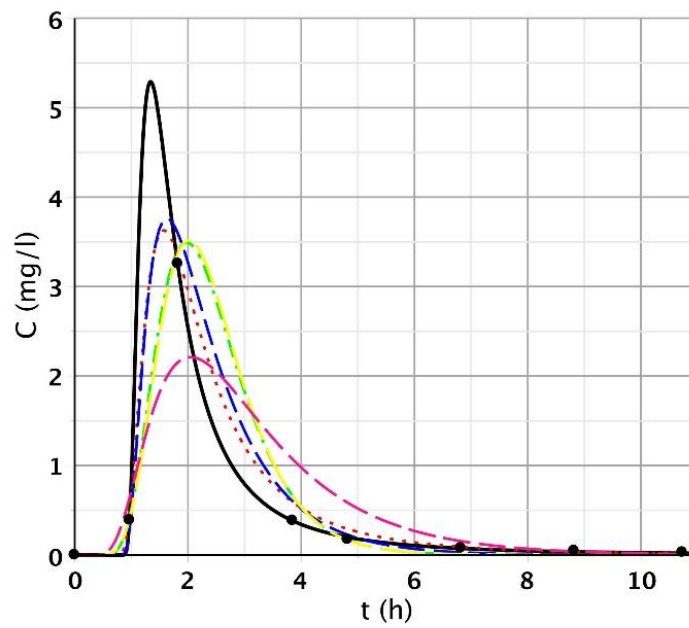
80. ábra: Az 5 sűrűségfüggvény és a CDT-modell illesztési eredménye az S/1 II. felső pontnál



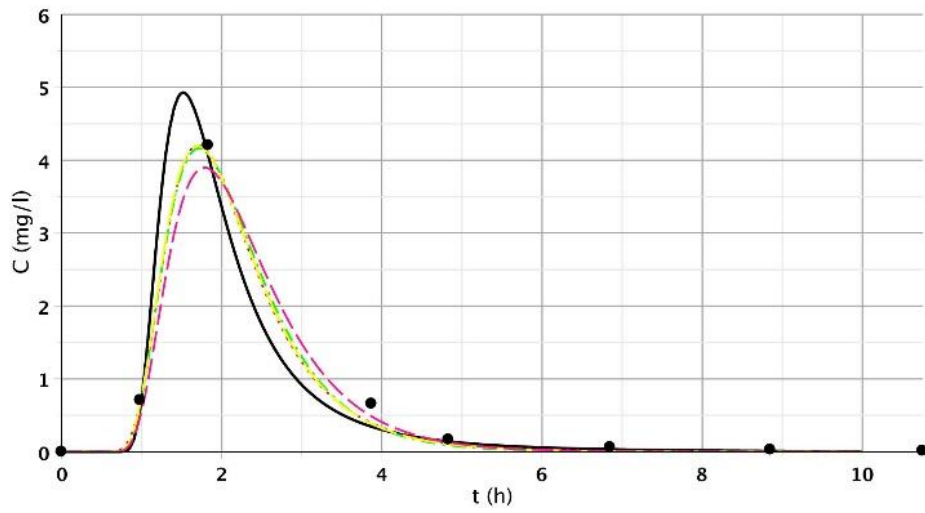
81. ábra: Az 5 sűrűségfüggvény és a CDT-modell illesztési eredménye az S/1 III. felső pontnál



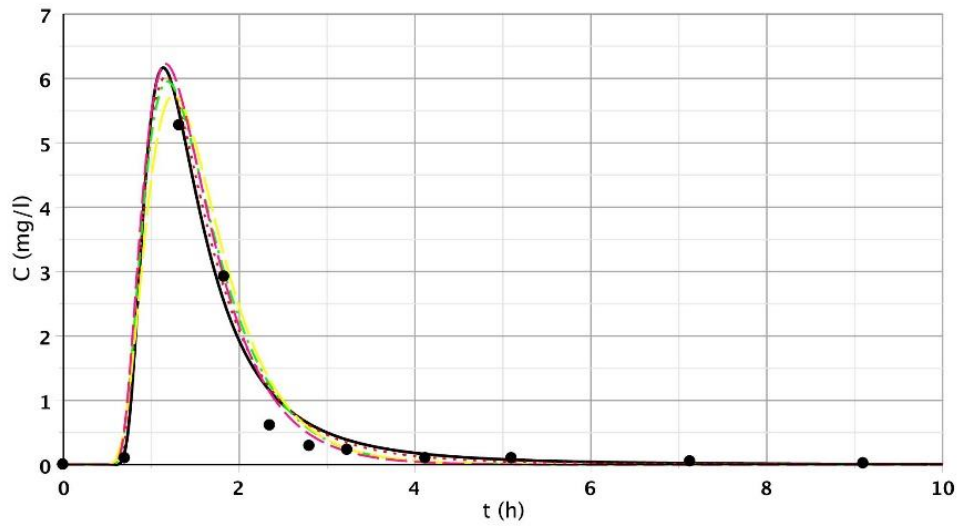
82. ábra: Az 5 sűrűségfüggvény és a CDT-modell illesztési eredménye az S/I IV. felső pontnál



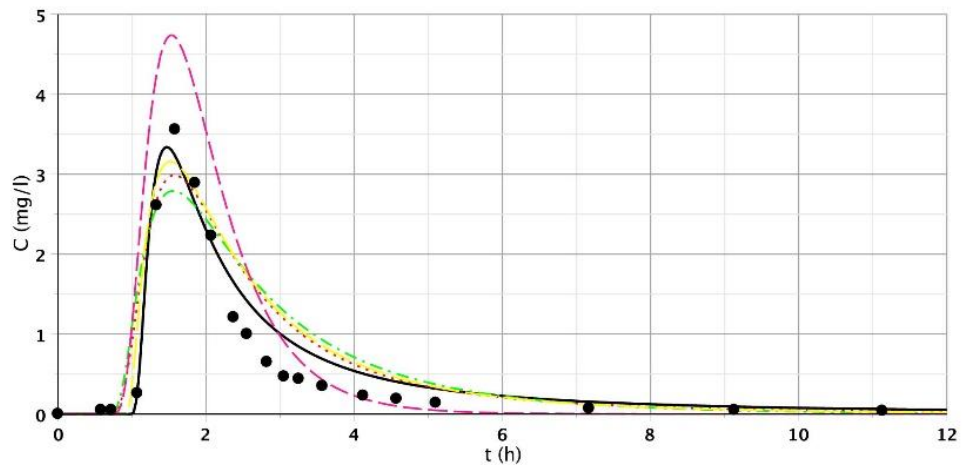
83. ábra: Az 5 sűrűségfüggvény és a CDT-modell illesztési eredménye az S/I V. felső pontnál



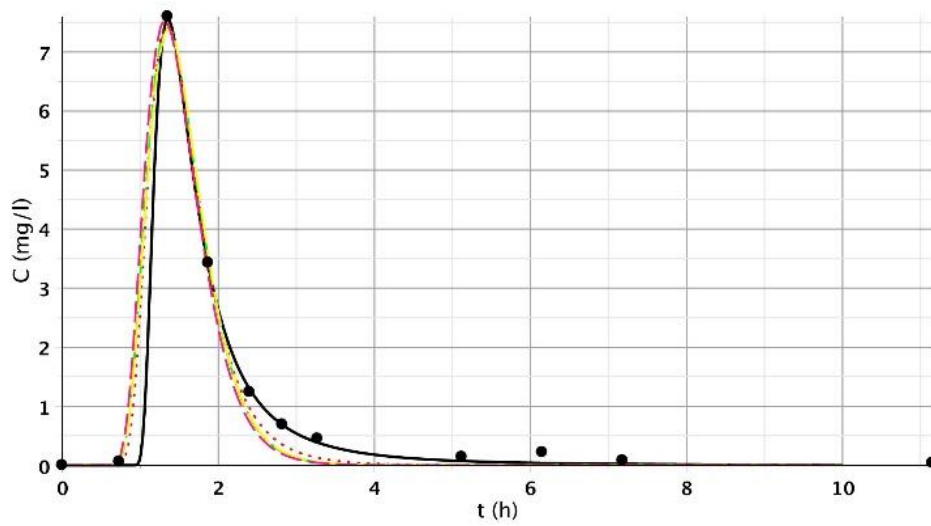
84. ábra: Az 5 sűrűségfüggvény és a CDT-modell illesztési eredménye az S/I VI. felső pontnál



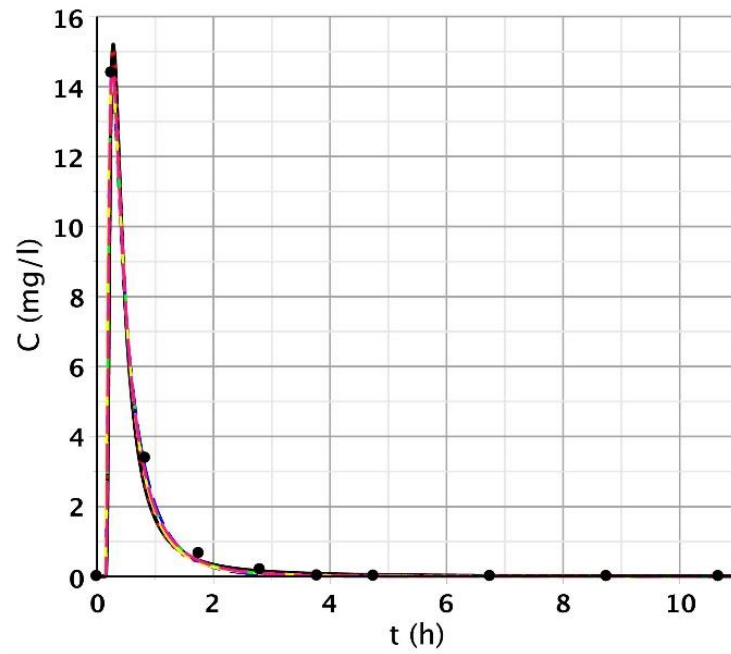
85. ábra: Az 5 sűrűségfüggvény és a CDT-modell illesztési eredménye az S/I VII. felső pontnál



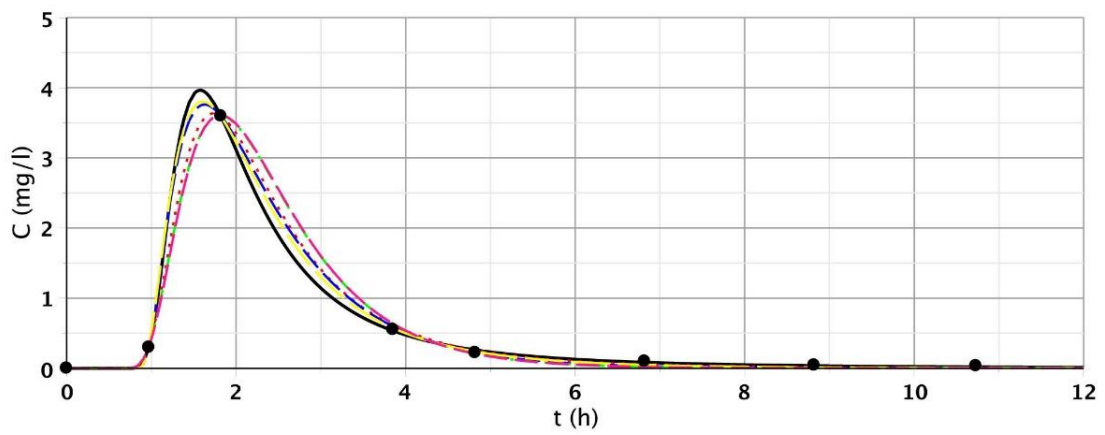
86. ábra: Az 5 sűrűségfüggvény és a CDT-modell illesztési eredménye az S/1 VIII. felső pontnál



87. ábra: Az 5 sűrűségfüggvény és a CDT-modell illesztési eredménye az S/1 IX. felső pontnál

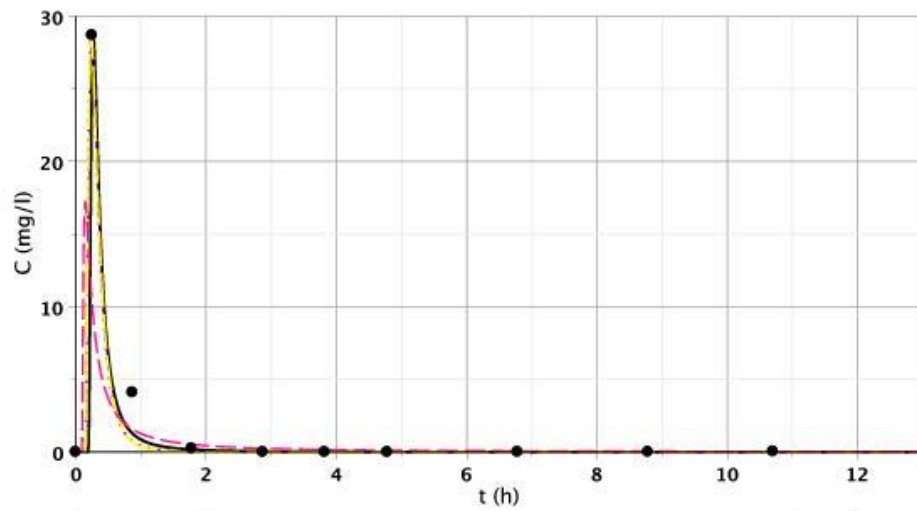


88. ábra: Az 5 sűrűségfüggvény és a CDT-modell illesztési eredménye az S/I I. alsó pontnál

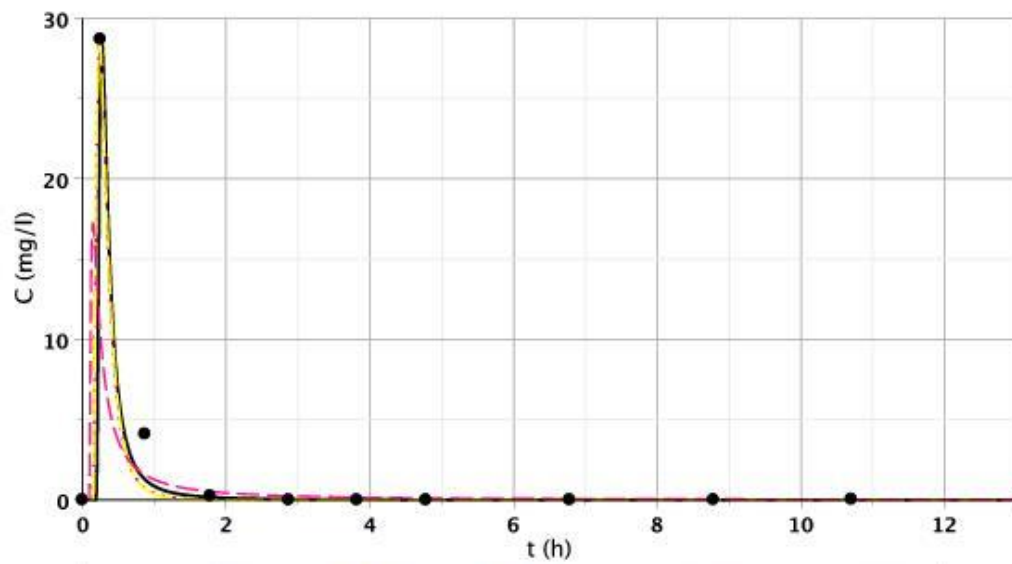


89. ábra: Az 5 sűrűségfüggvény és a CDT-modell illesztési eredménye az S/I II. alsó pontnál

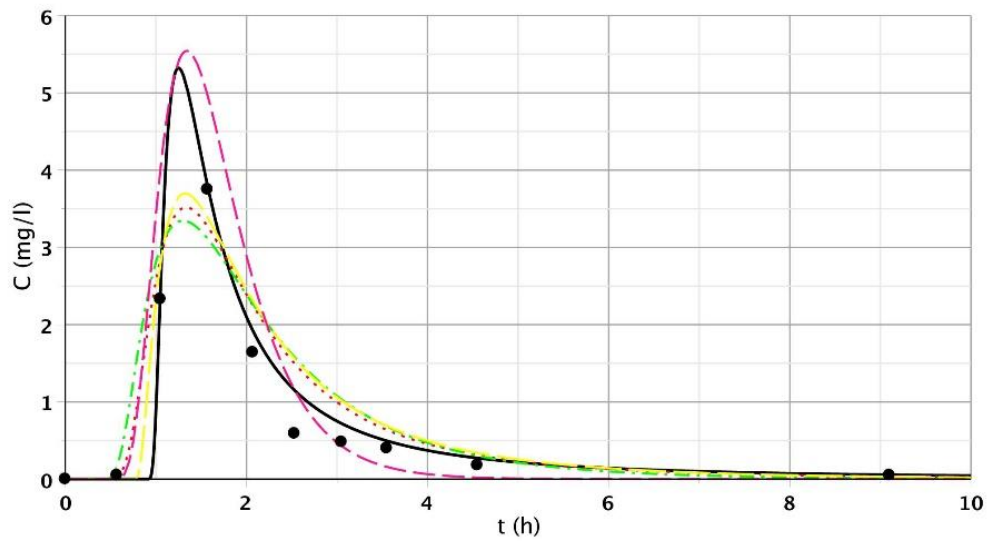




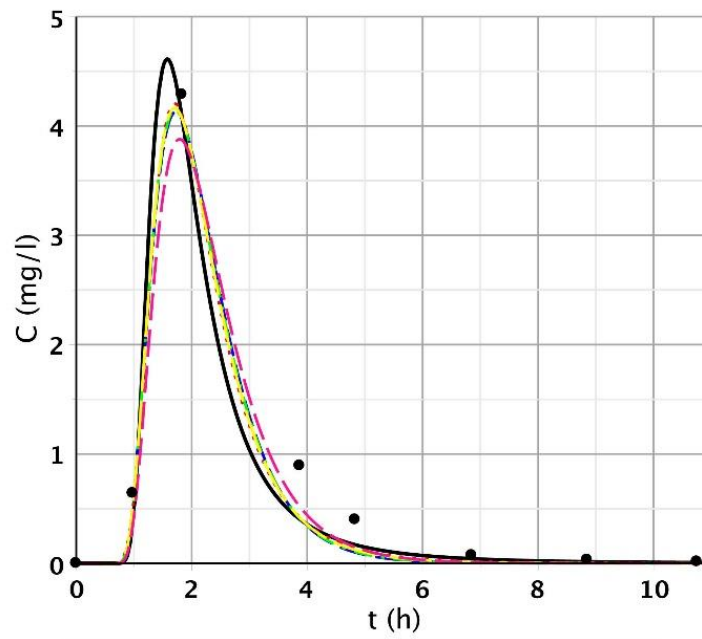
90. ábra: Az 5 sűrűségfüggvény és a CDT-modell illesztési eredménye az S/I III. alsó pontnál



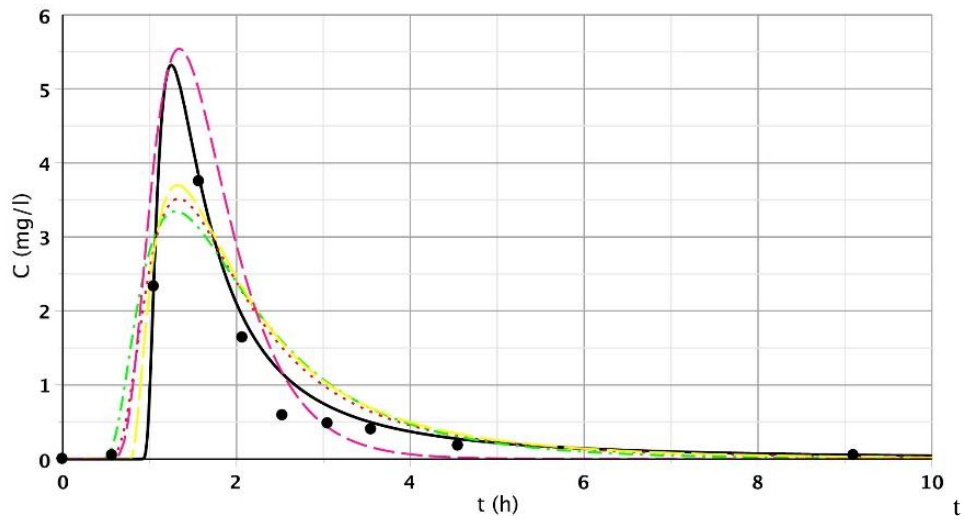
91. ábra: Az 5 sűrűségfüggvény és a CDT-modell illesztési eredménye az S/I IV. alsó pontnál



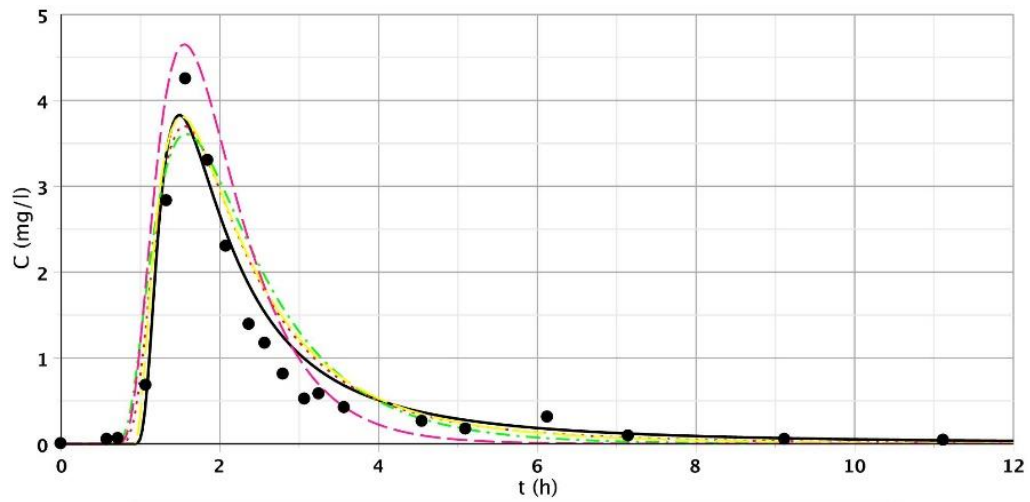
92. ábra: Az 5 sűrűségfüggvény és a CDT-modell illesztési eredménye az S/I V. alsó pontnál



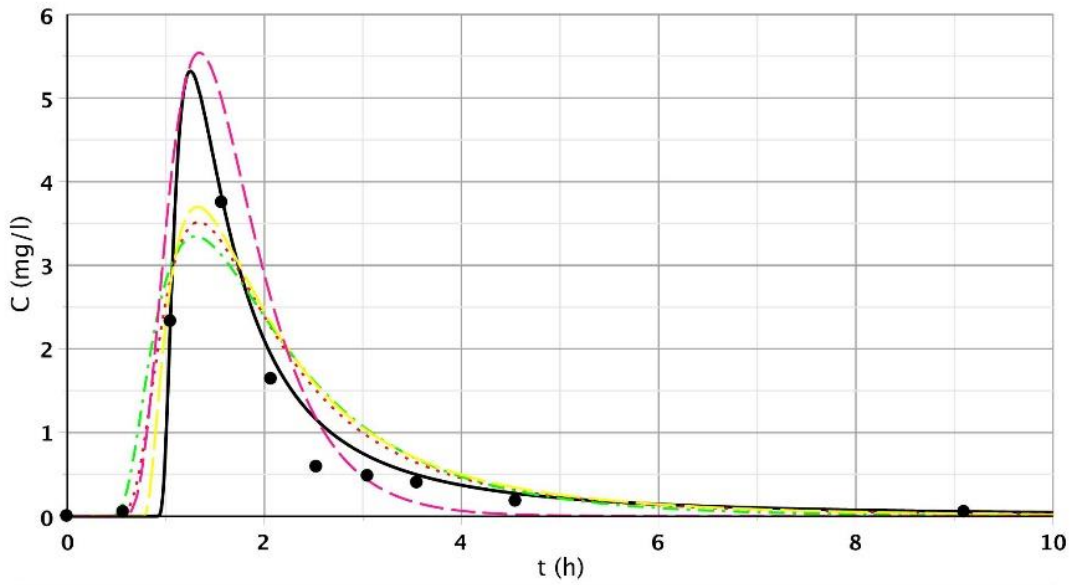
93. ábra: Az 5 sűrűségfüggvény és a CDT-modell illesztési eredménye az S/I VI. alsó pontnál



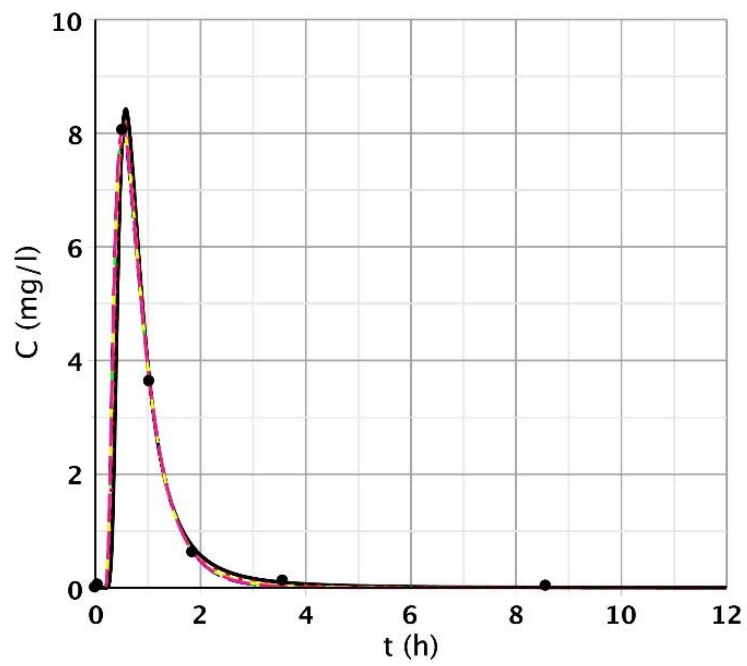
94. ábra: Az 5 sűrűségfüggvény és a CDT-modell illesztési eredménye az S/I VII. alsó pontnál



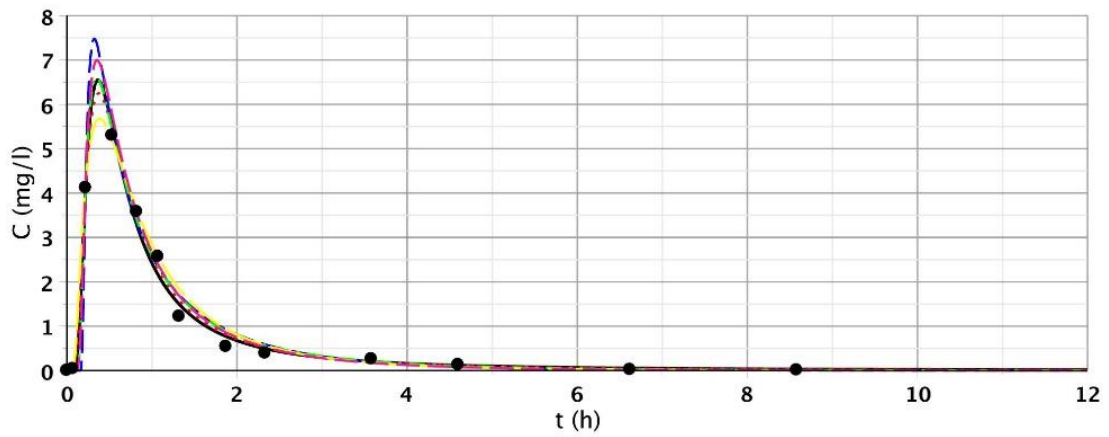
95. ábra: Az 5 sűrűségfüggvény és a CDT-modell illesztési eredménye az S/I VIII. alsó pontnál



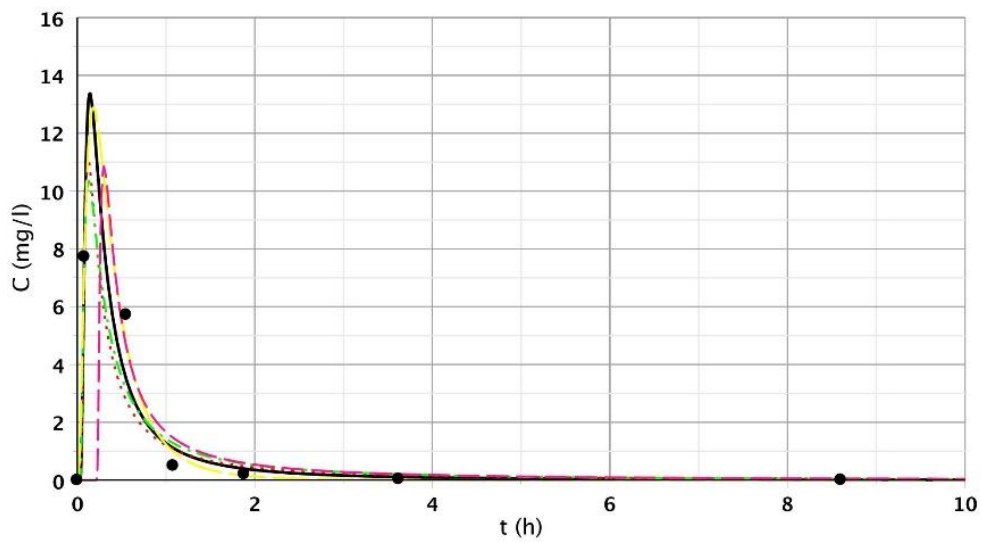
96. ábra: Az 5 sűrűségfüggvény és a CDT-modell illesztési eredménye az S/1 IX. alsó pontnál



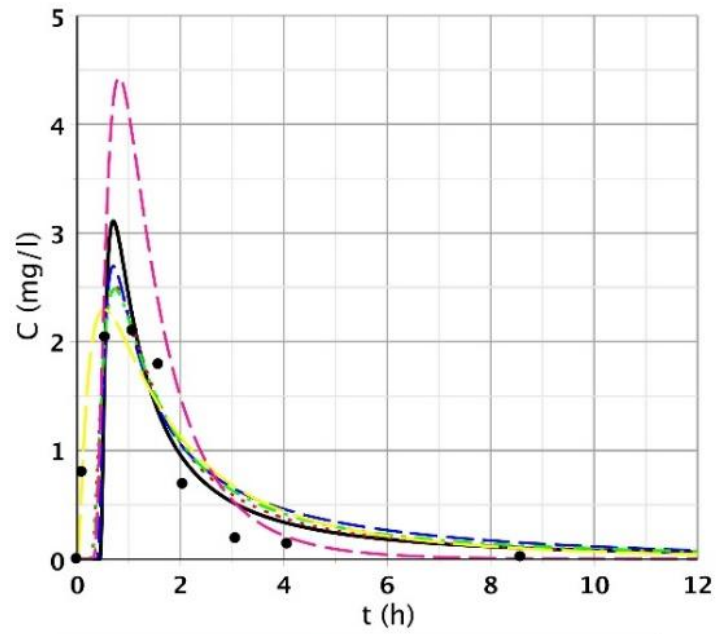
97. ábra: Az 5 sűrűségfüggvény és a CDT-modell illesztési eredménye az S/2 I. alsó pontnál



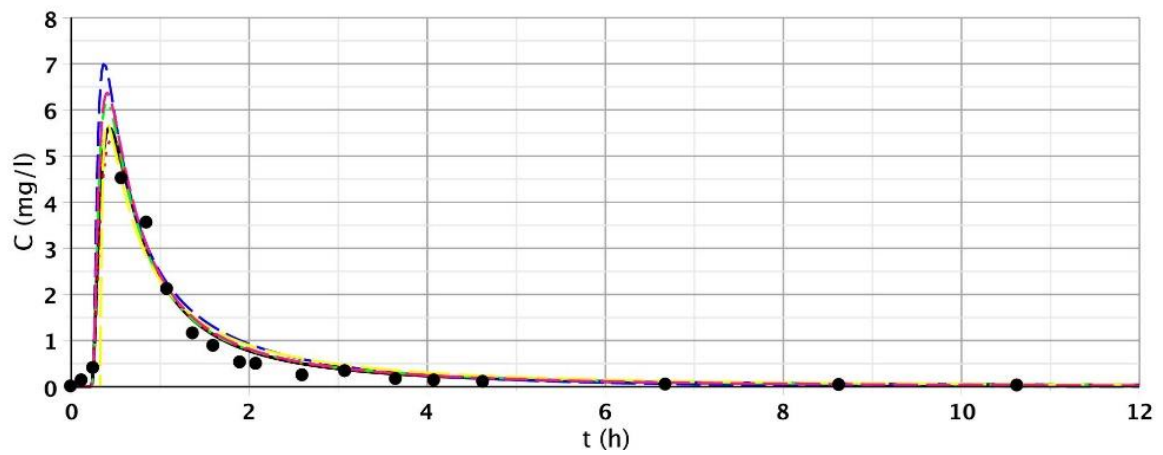
98. ábra: Az 5 sűrűségfüggvény és a CDT-modell illesztési eredménye az S/2 II. alsó pontnál



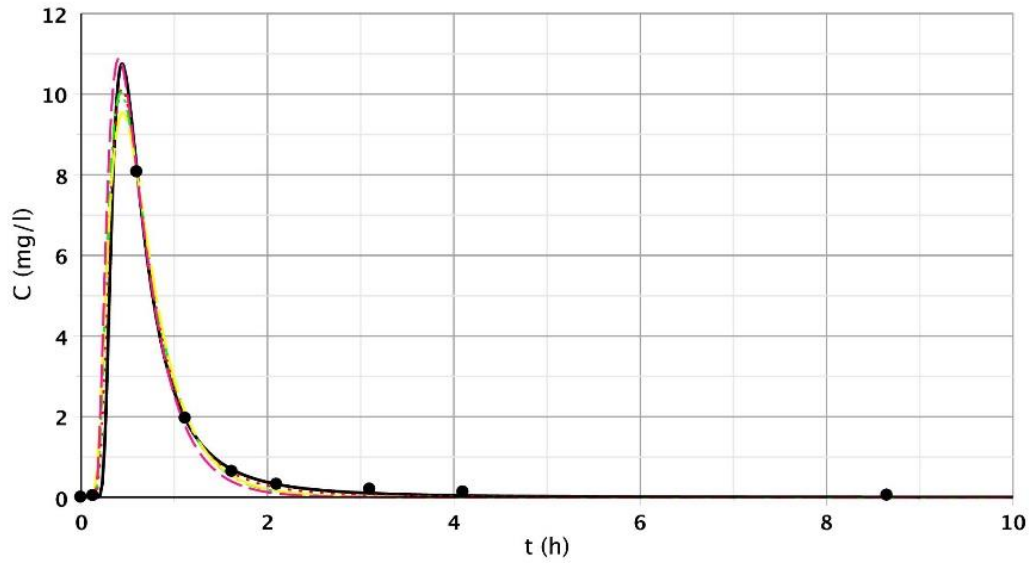
99. ábra: Az 5 sűrűségfüggvény és a CDT-modell illesztési eredménye az S/2 III. alsó pontnál



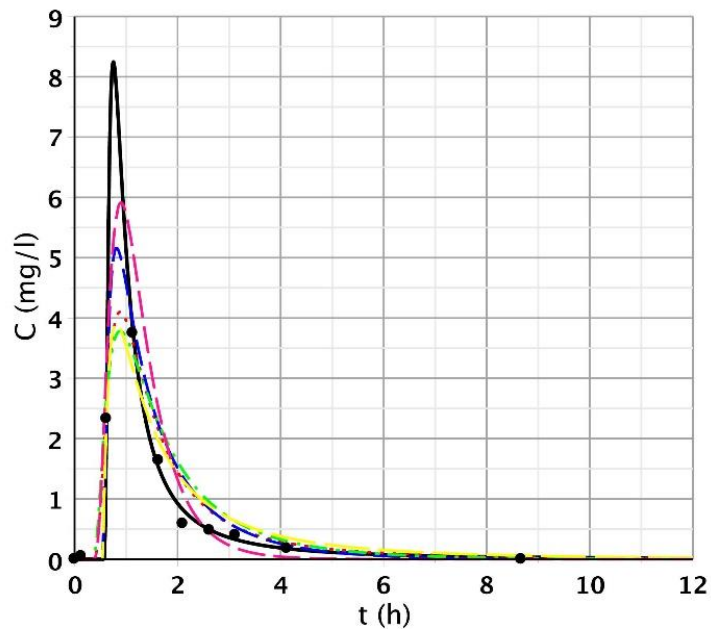
100. ábra: Az 5 sűrűségfüggvény és a CDT-modell illesztési eredménye az S/2 IV. alsó pontnál



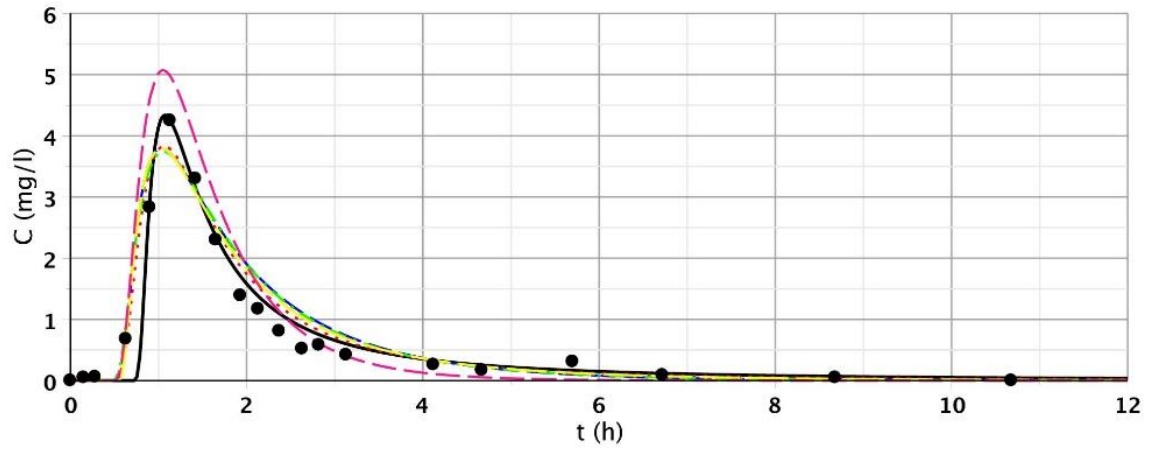
101. ábra: Az 5 sűrűségfüggvény és a CDT-modell illesztési eredménye az S/2 V. alsó pontnál



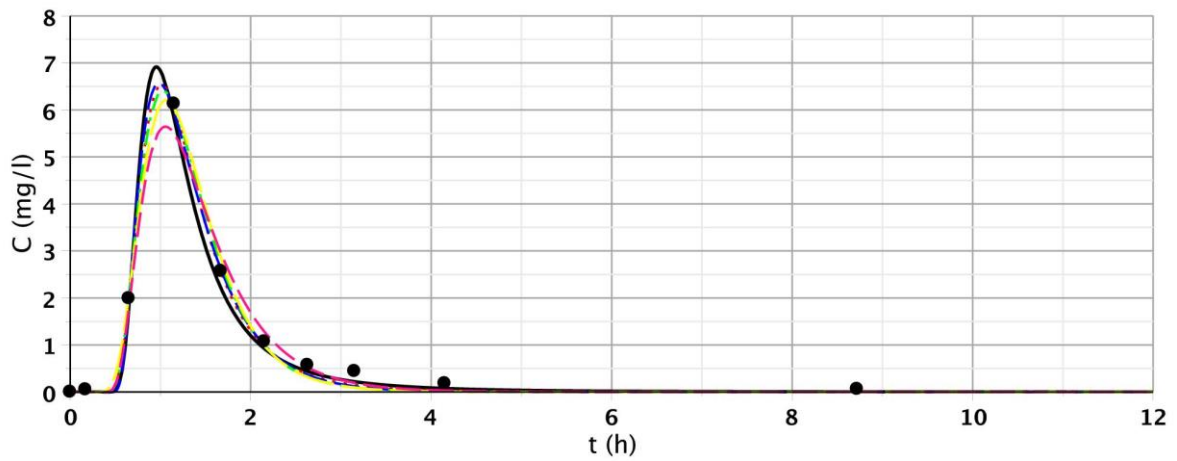
102. ábra: Az 5 sűrűségfüggvény és a CDT-modell illesztési eredménye az S/2 VI. alsó pontnál



103. ábra: Az 5 sűrűségfüggvény és a CDT-modell illesztési eredménye az S/2 VII. alsó pontnál

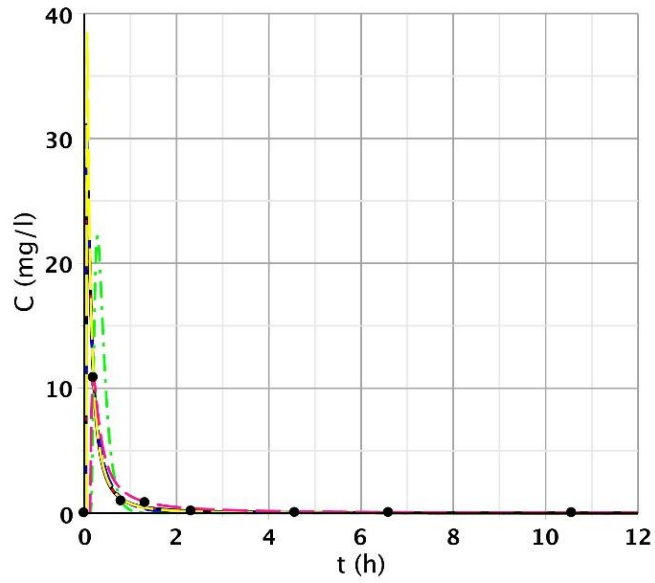


104. ábra: Az 5 sűrűségfüggvény és a CDT-modell illesztési eredménye az S/2 VIII. alsó pontnál

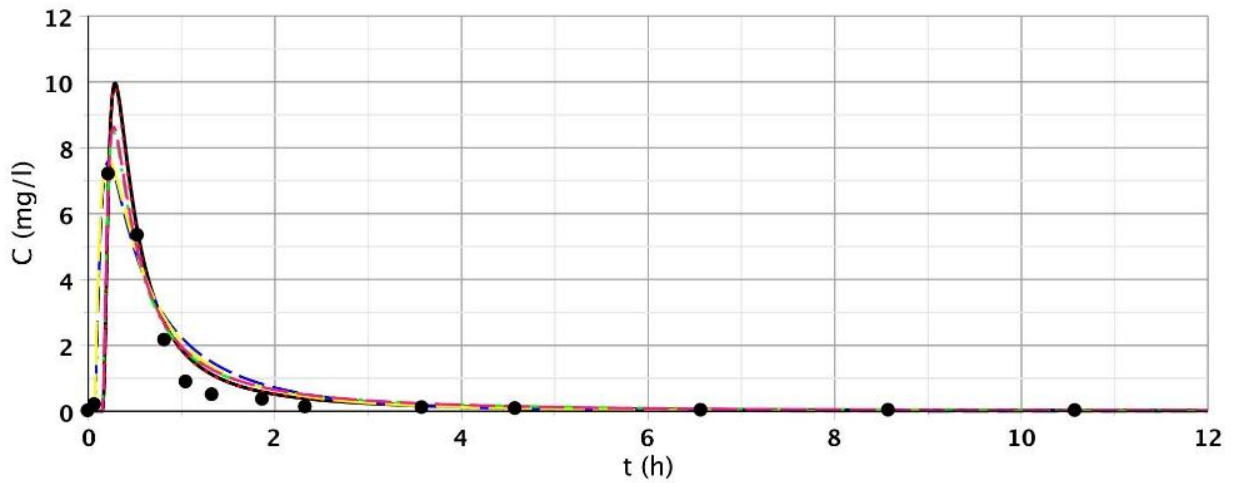


105. ábra: Az 5 sűrűségfüggvény és a CDT-modell illesztési eredménye az S/2 IX. alsó pontnál

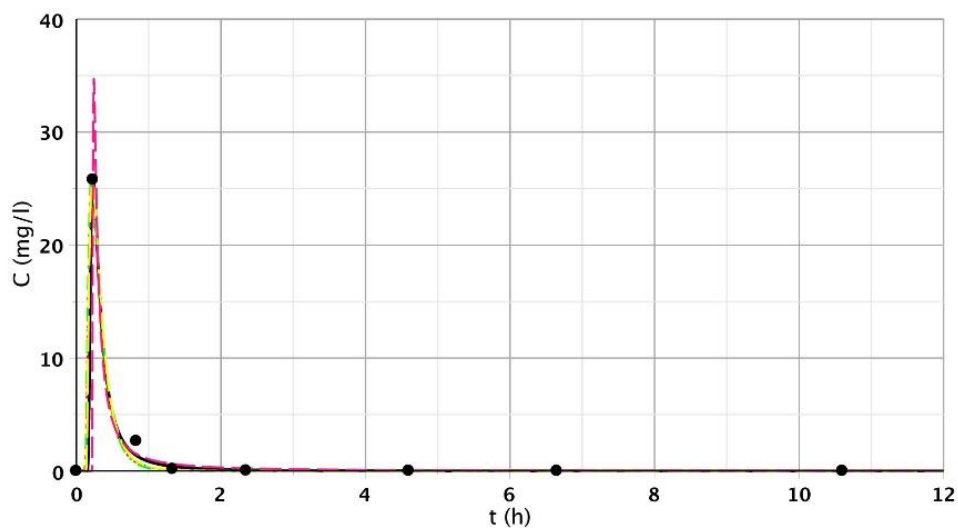




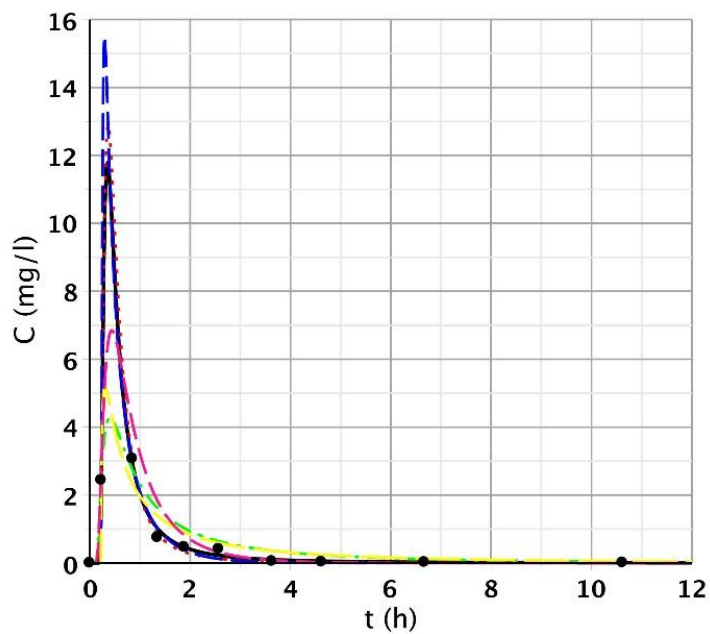
106. ábra: Az 5 sűrűségfüggvény és a CDT-modell illesztési eredménye az S/2 I. felső pontnál



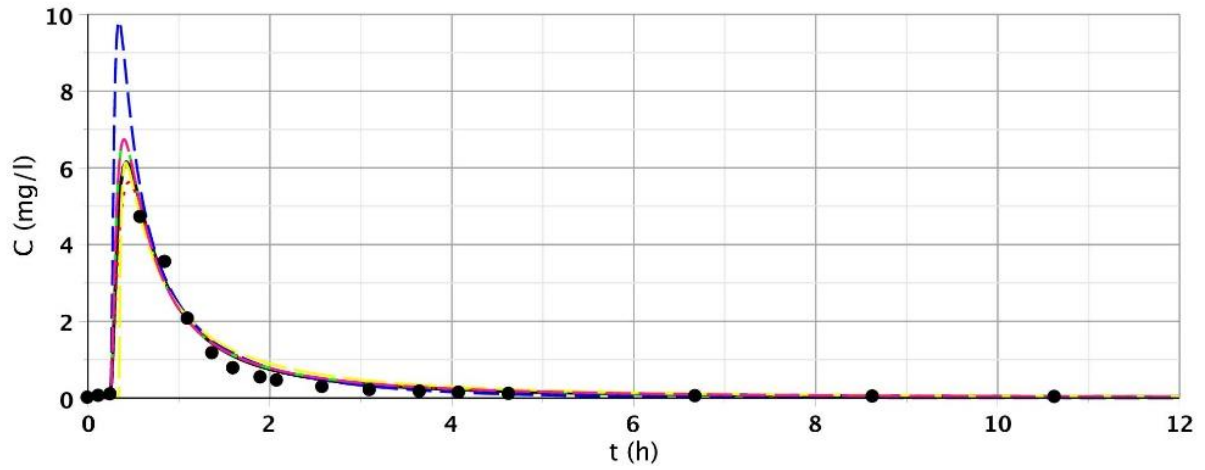
107. ábra: Az 5 sűrűségfüggvény és a CDT-modell illesztési eredménye az S/2 II. felső pontnál



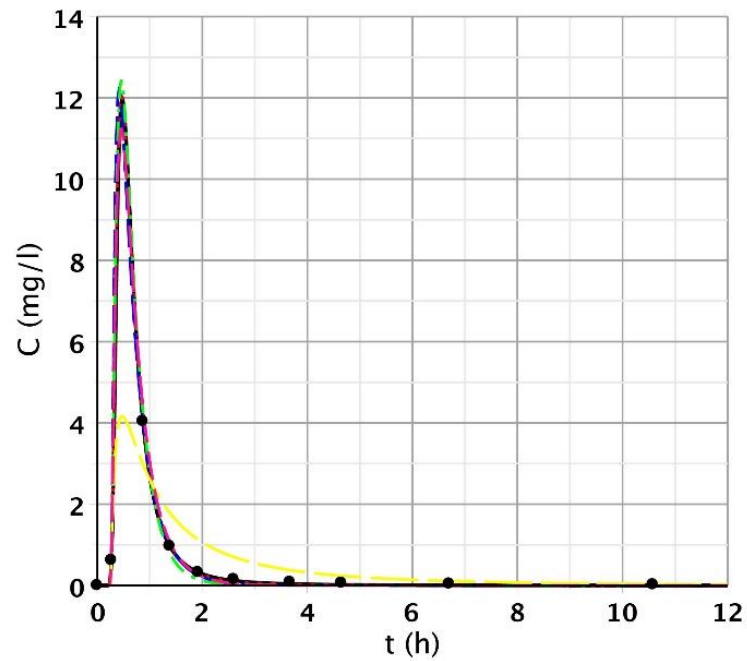
108. ábra: Az 5 sűrűségfüggvény és a CDT-modell illesztési eredménye az S/2 III. felső pontnál



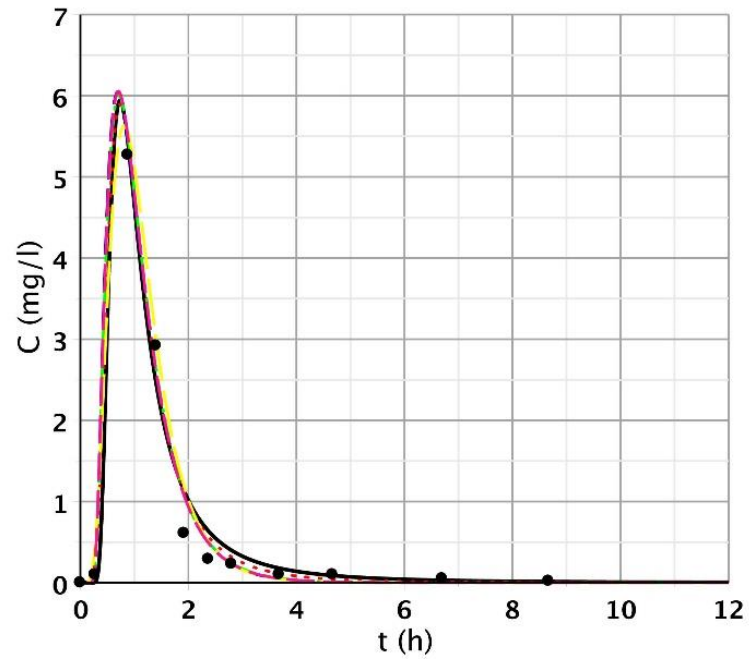
109. ábra: Az 5 sűrűségfüggvény és a CDT-modell illesztési eredménye az S/2 IV. felső pontnál



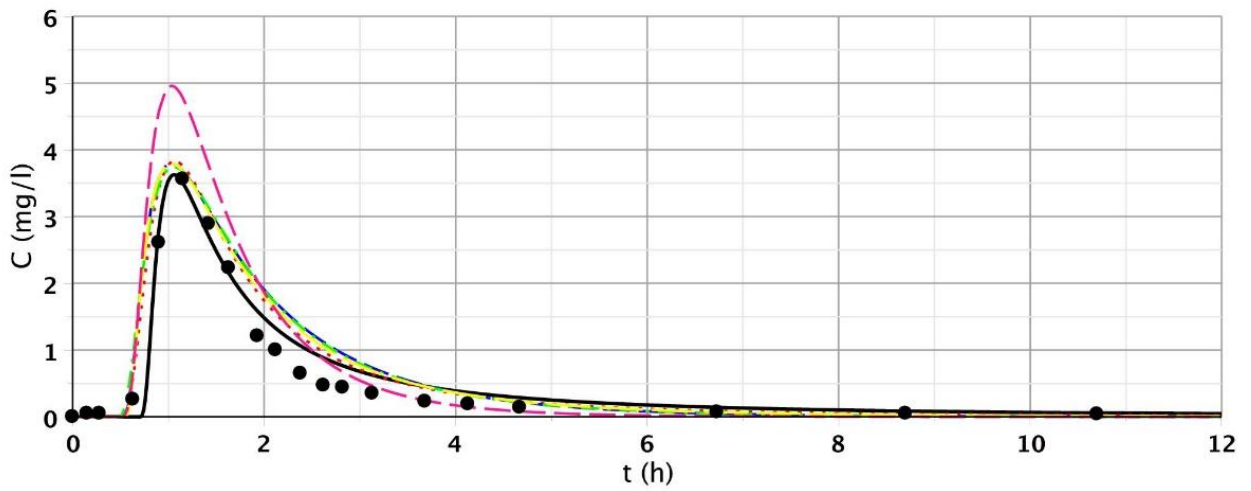
110. ábra: Az 5 sűrűségfüggvény és a CDT-modell illesztési eredménye az S/2 V. felső pontnál



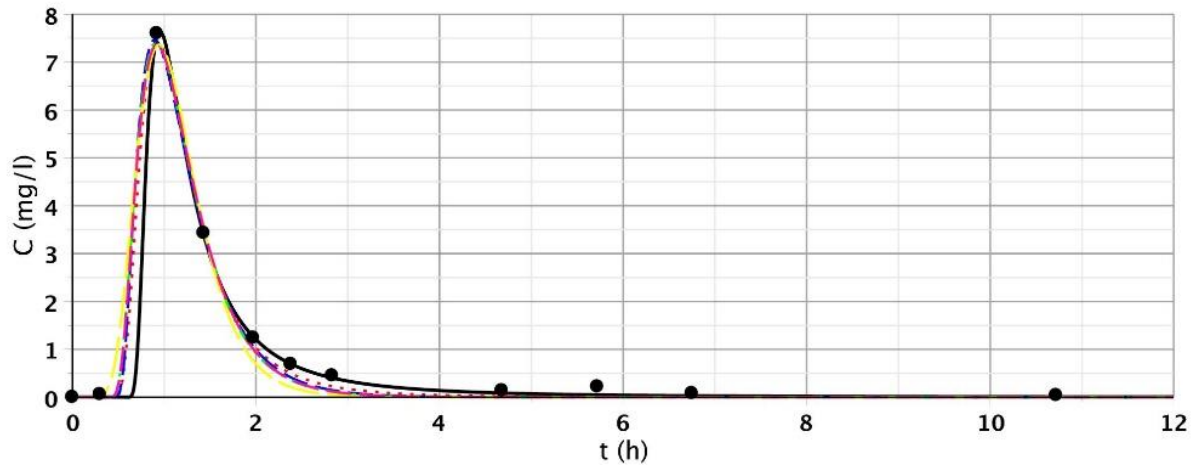
111. ábra: Az 5 sűrűségfüggvény és a CDT-modell illesztési eredménye az S/2 VI. felső pontnál



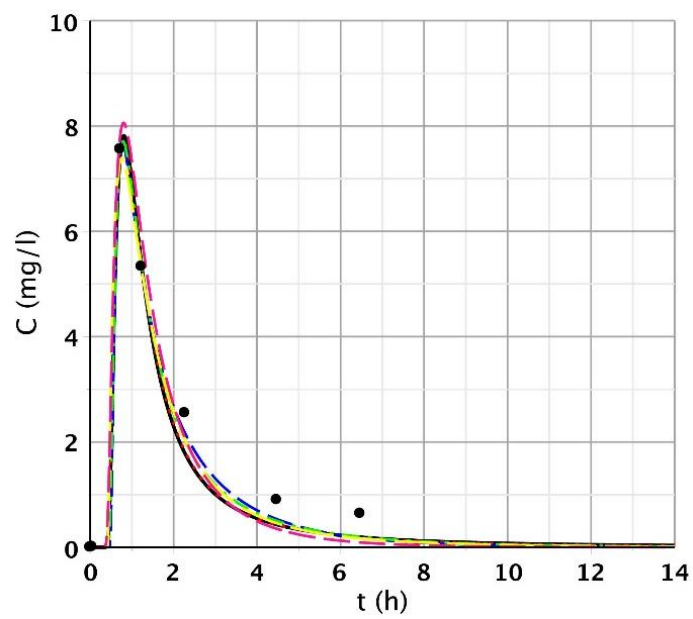
112. ábra: Az 5 sűrűségfüggvény és a CDT-modell illesztési eredménye az S/2 VII. felső pontnál



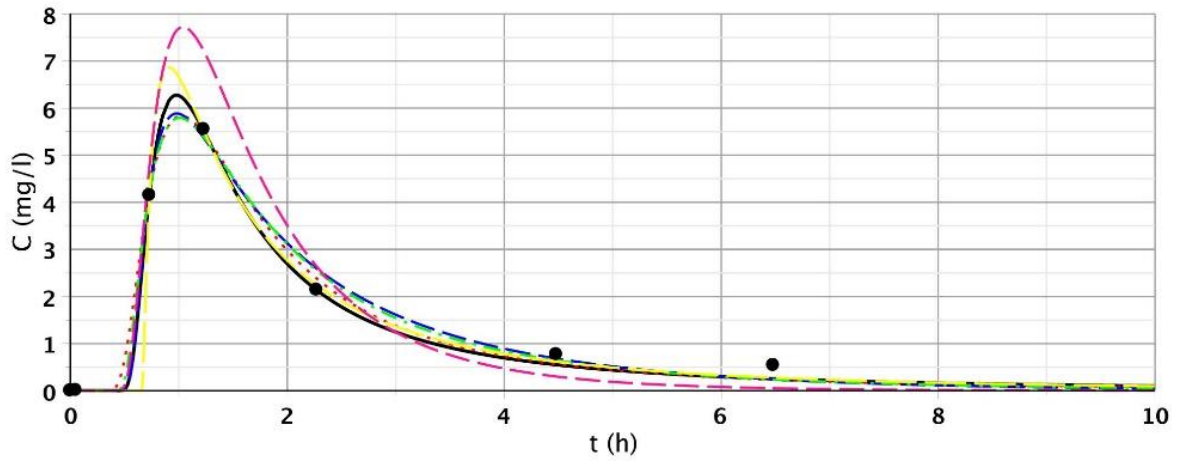
113. ábra: Az 5 sűrűségfüggvény és a CDT-modell illesztési eredménye az S/2 VIII. felső pontnál



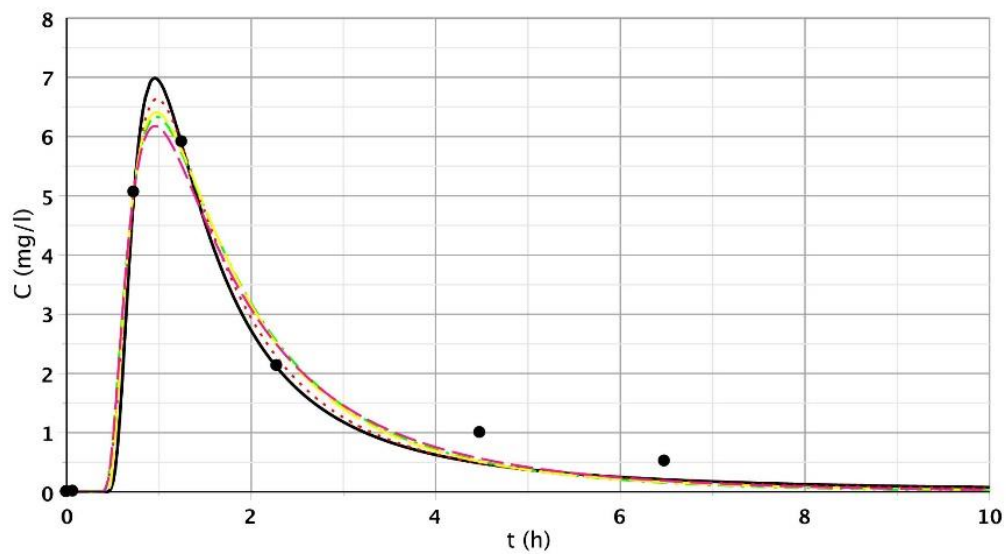
114. ábra: Az 5 sűrűségfüggvény és a CDT-modell illesztési eredménye az S/2 IX. felső pontnál



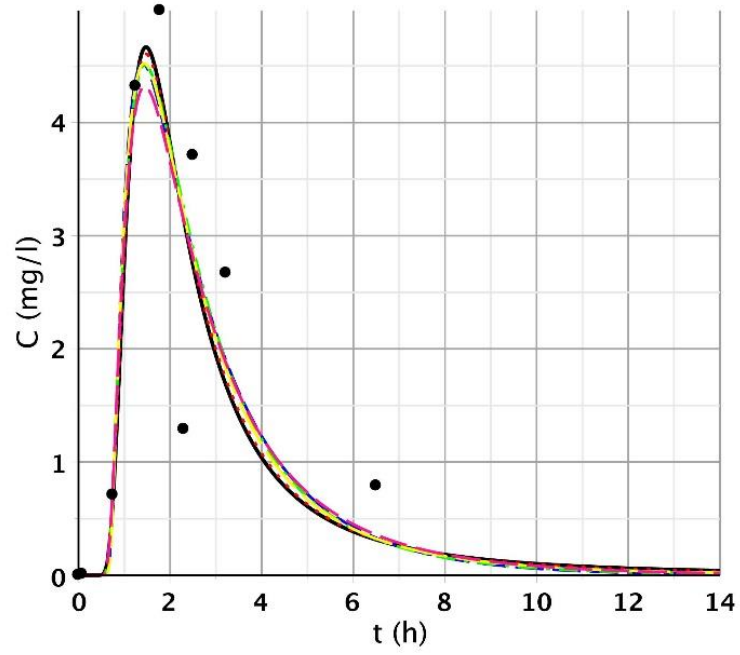
115. ábra: Az 5 sűrűségfüggvény és a CDT-modell illesztési eredménye az S/3 I. felső pontnál



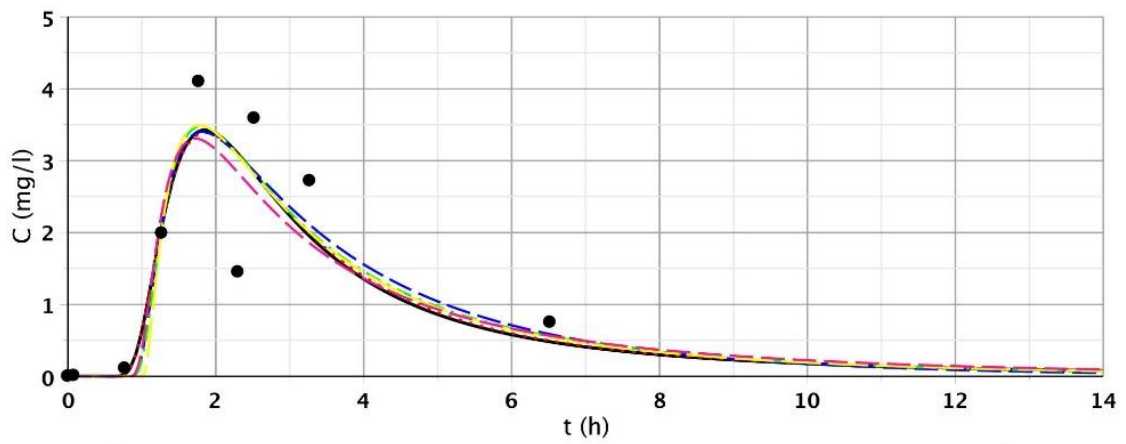
116. ábra: Az 5 sűrűségfüggvény és a CDT-modell illesztési eredménye az S/3 II. felső pontnál



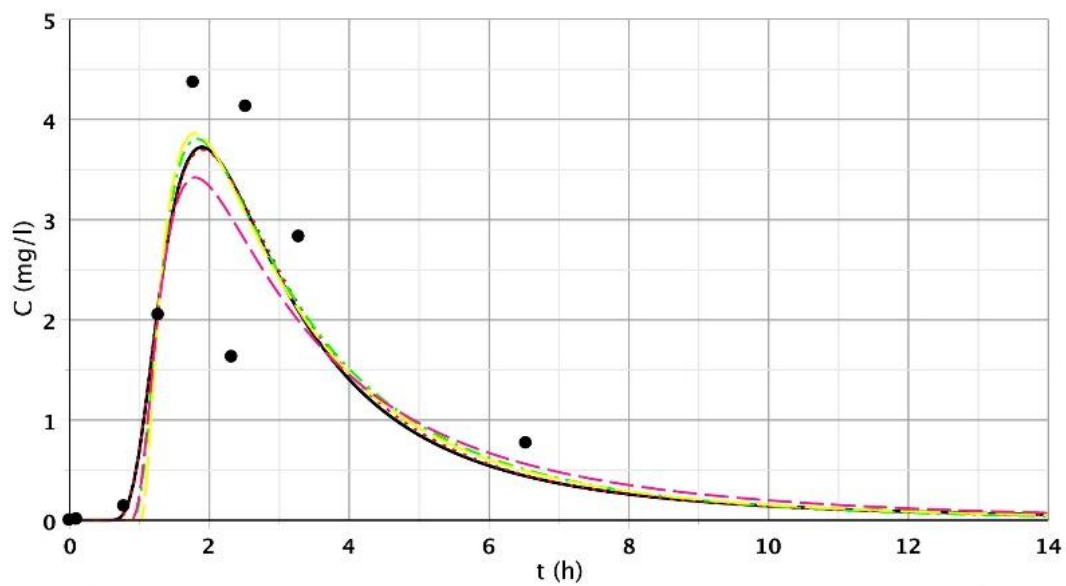
117. ábra: Az 5 sűrűségfüggvény és a CDT-modell illesztési eredménye az S/3 III. felső pontnál



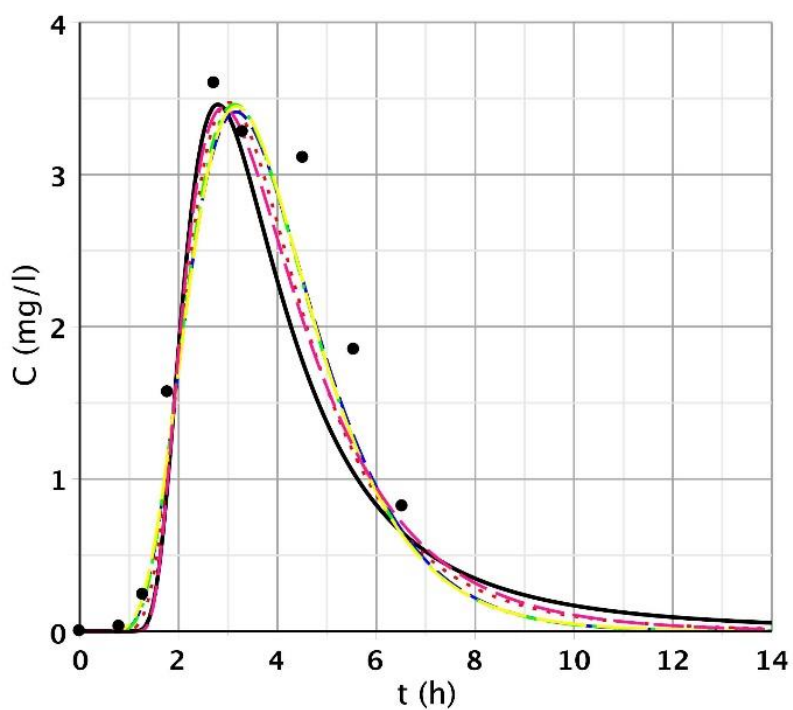
118. ábra: Az 5 sűrűségfüggvény és a CDT-modell illesztési eredménye az S/3 IV. felső pontnál



119. ábra: Az 5 sűrűségfüggvény és a CDT-modell illesztési eredménye az S/3 V. felső pontnál

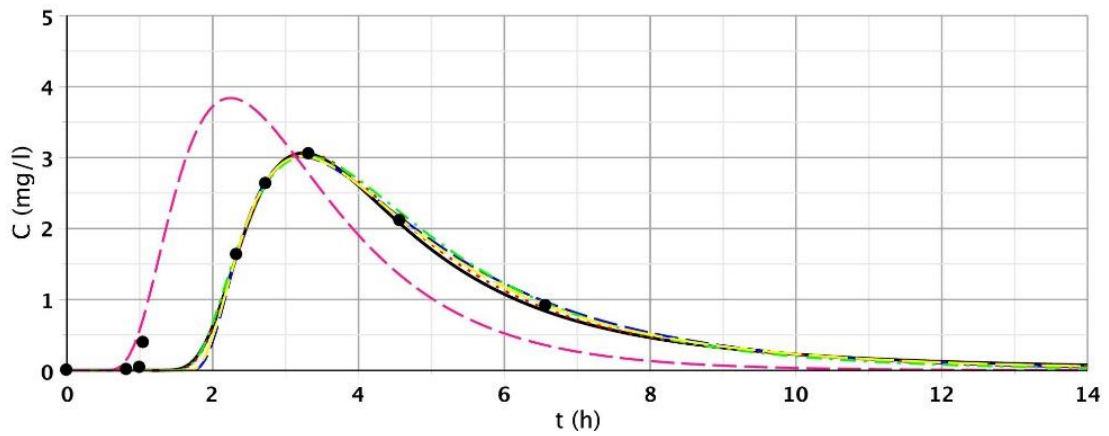


120. ábra: Az 5 sűrűségfüggvény és a CDT-modell illesztési eredménye az S/3 VI. felső pontnál

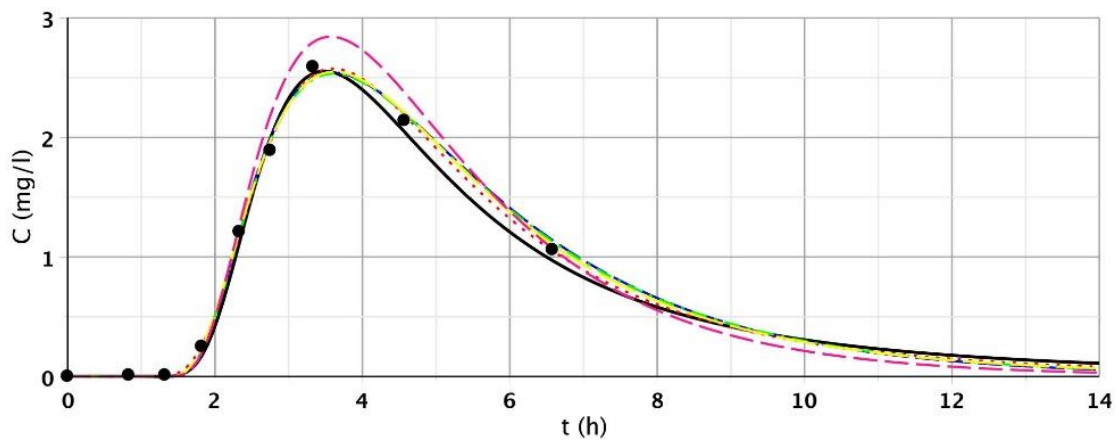


121. ábra: Az 5 sűrűségfüggvény és a CDT-modell illesztési eredménye az S/3 VII. felső pontnál

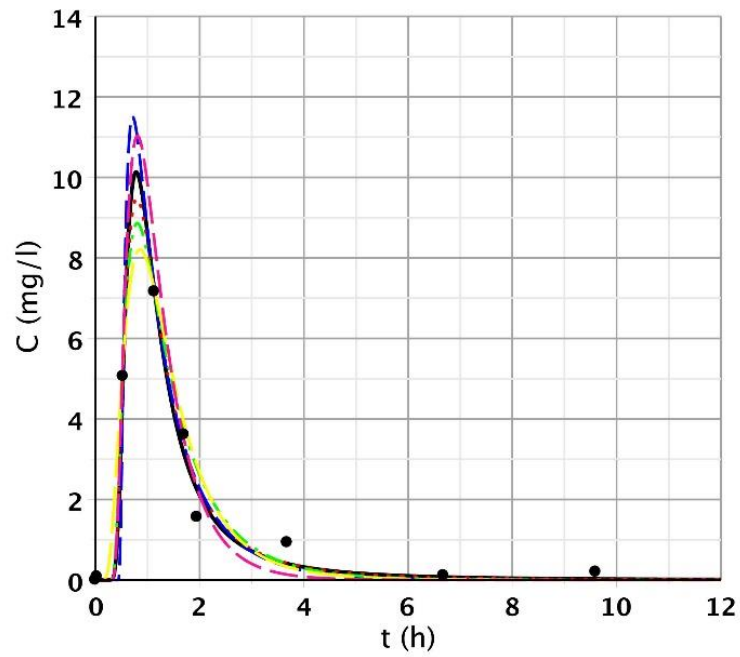




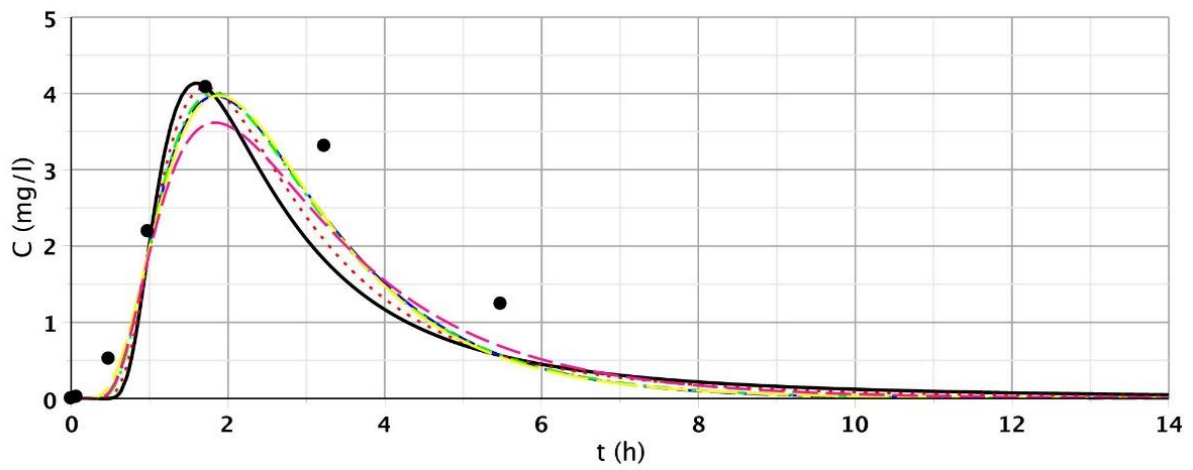
122. ábra: Az 5 sűrűségfüggvény és a CDT-modell illesztési eredménye az S/3 VIII. felső pontnál



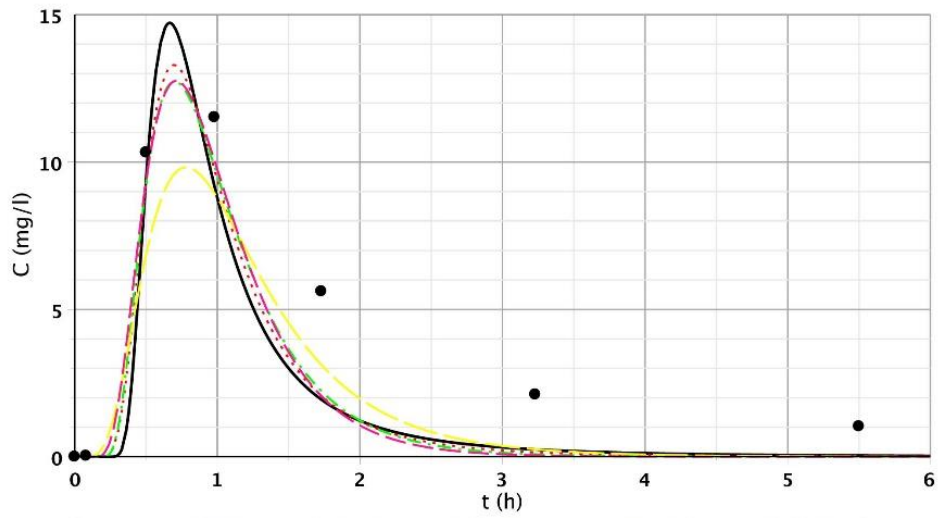
123. ábra: Az 5 sűrűségfüggvény és a CDT-modell illesztési eredménye az S/3 IX. felső pontnál



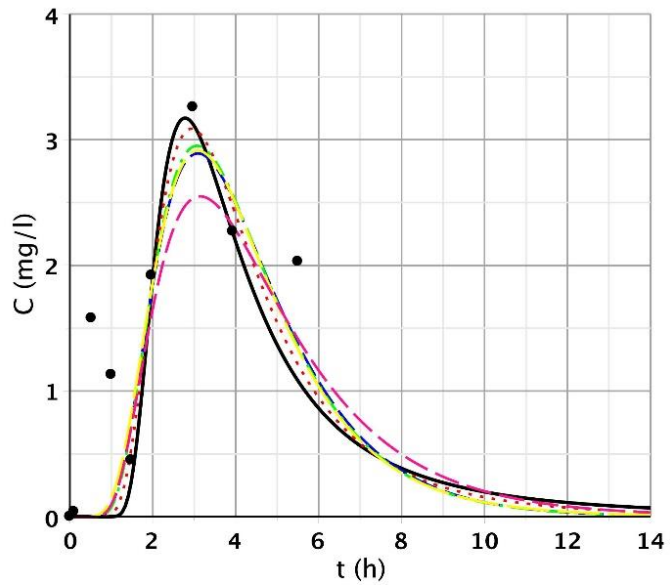
124. ábra: Az 5 sűrűségfüggvény és a CDT-modell illesztési eredménye az S/3 I. alsó pontnál



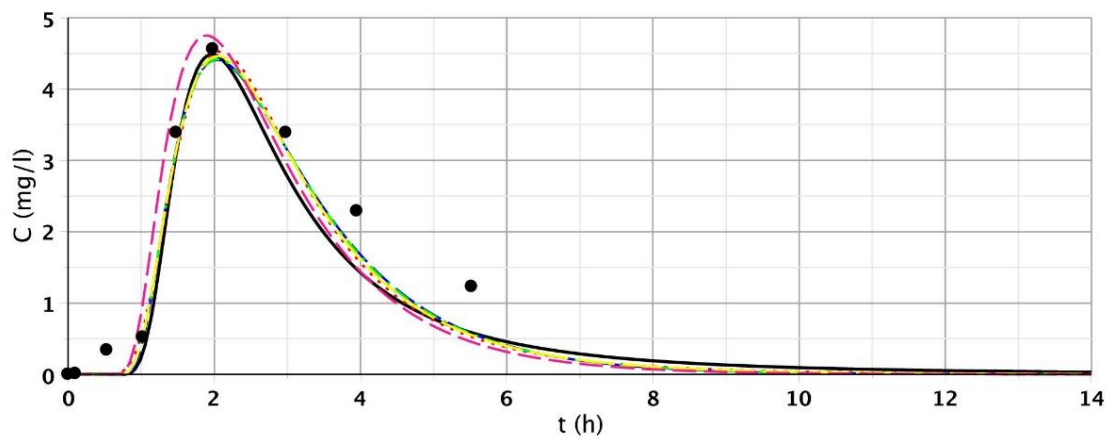
125. ábra: Az 5 sűrűségfüggvény és a CDT-modell illesztési eredménye az S/3 II. alsó pontnál



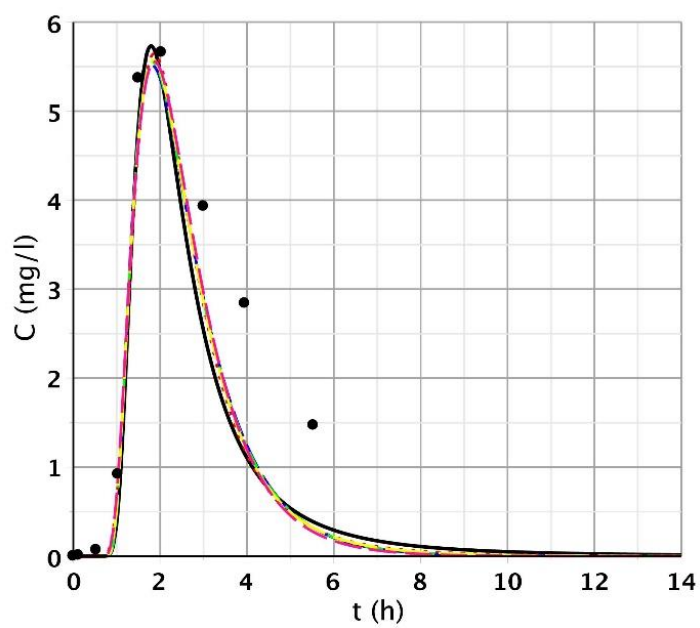
126. ábra: Az 5 sűrűségfüggvény és a CDT-modell illesztési eredménye az S/3 III. alsó pontnál



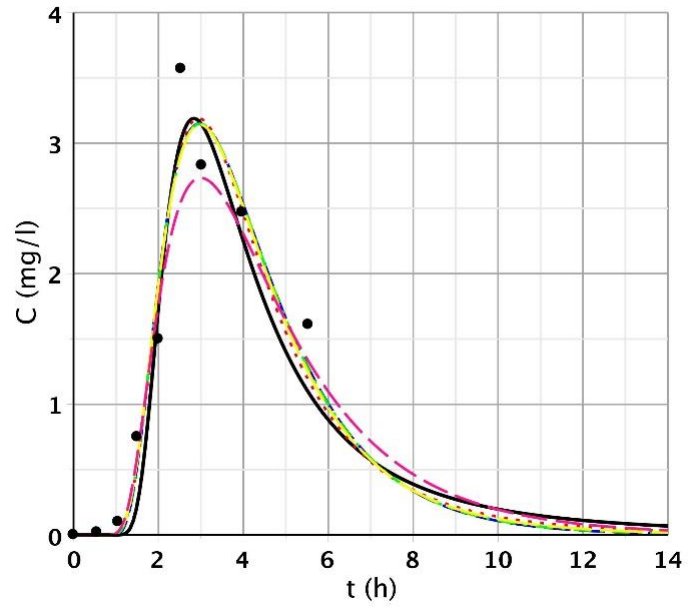
127. ábra: Az 5 sűrűségfüggvény és a CDT-modell illesztési eredménye az S/3 IV. alsó pontnál



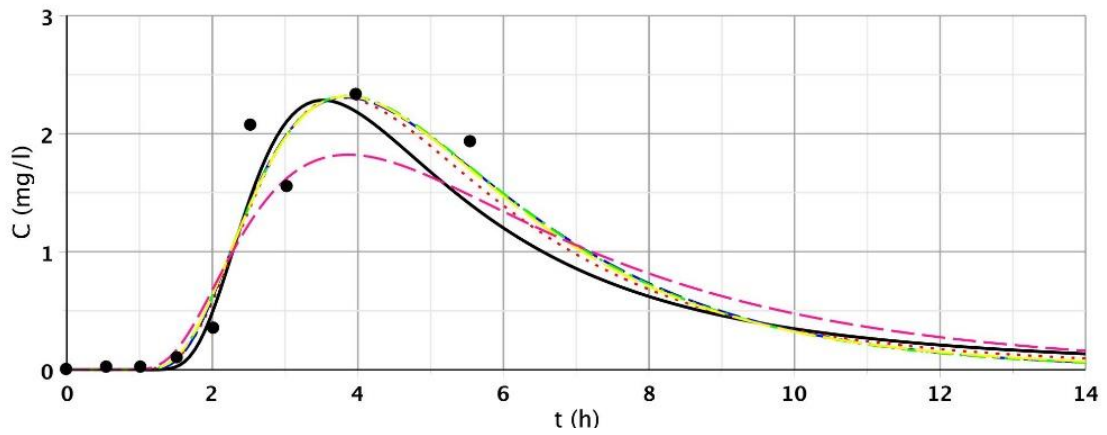
128. ábra: Az 5 sűrűségfüggvény és a CDT-modell illesztési eredménye az S/3 V. alsó pontnál



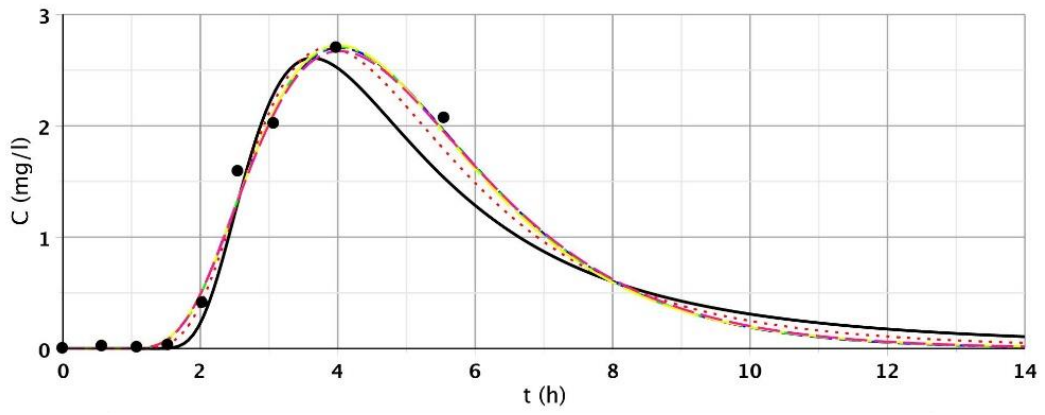
129. ábra: Az 5 sűrűségfüggvény és a CDT-modell illesztési eredménye az S/3 VI. alsó pontnál



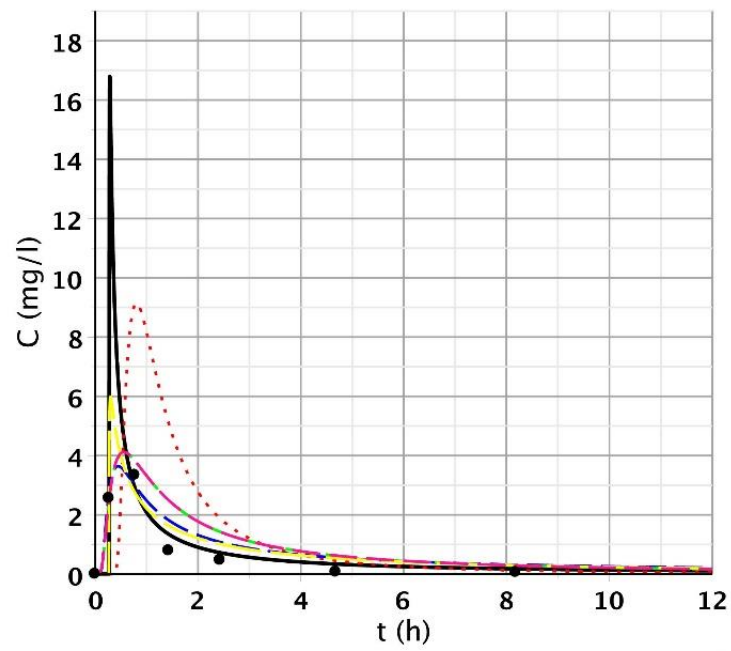
130. ábra: Az 5 sűrűségfüggvény és a CDT-modell illesztési eredménye az S/3 VII. alsó pontnál



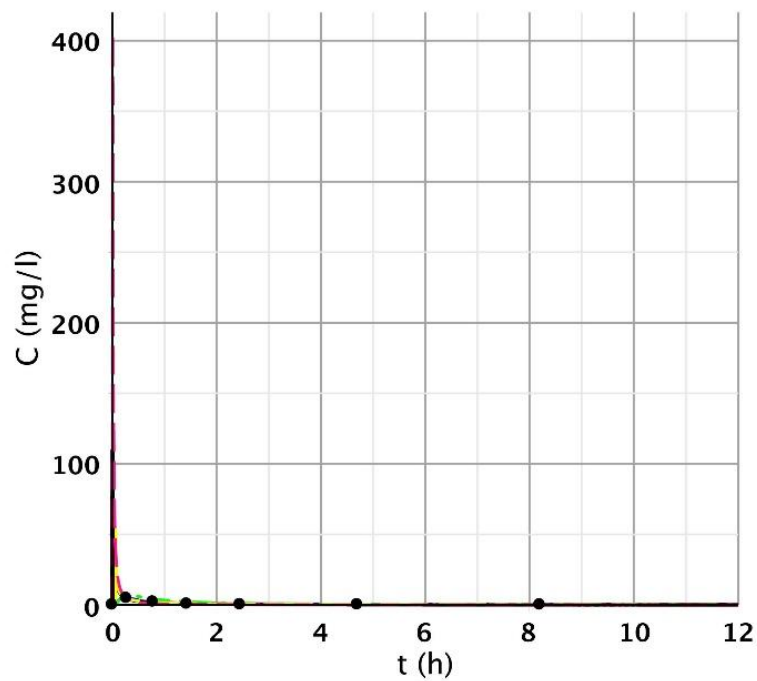
131. ábra: Az 5 sűrűségfüggvény és a CDT-modell illesztési eredménye az S/3 VIII. alsó pontnál



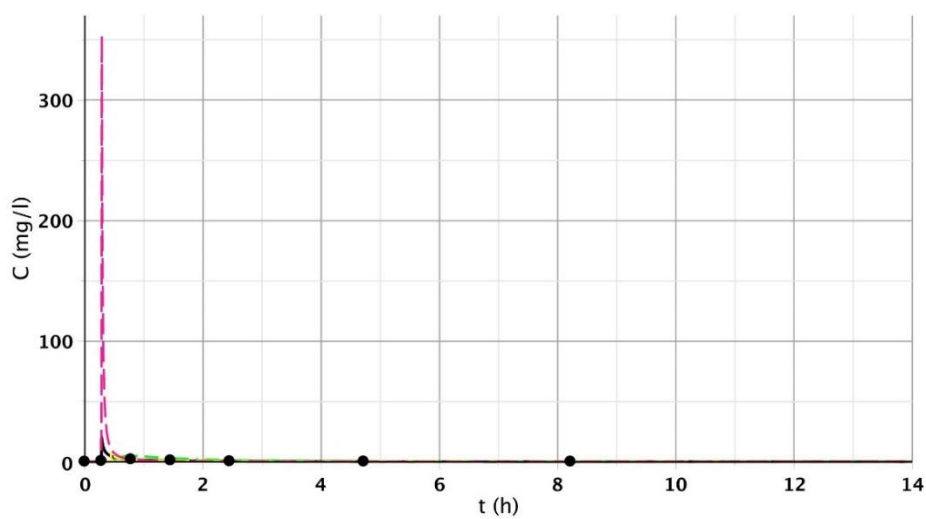
132. ábra: Az 5 sűrűségfüggvény és a CDT-modell illesztési eredménye az S/3 IX. alsó pontnál



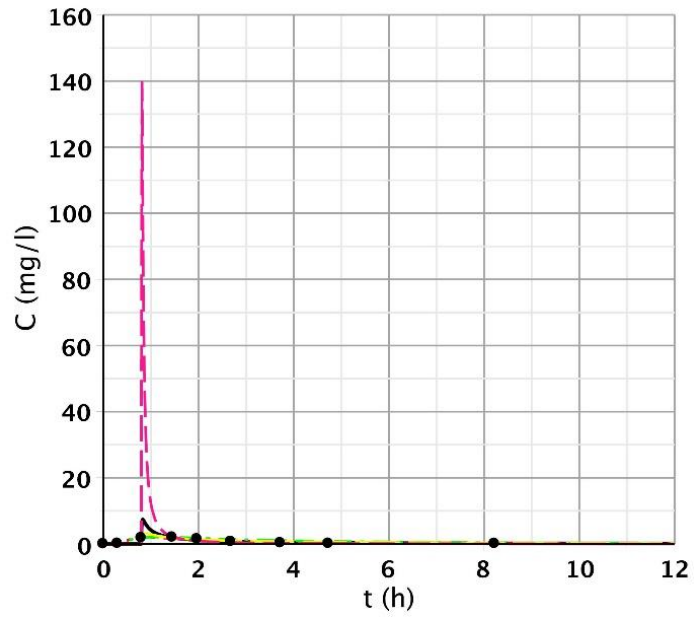
133. ábra: Az 5 sűrűségfüggvény és a CDT-modell illesztési eredménye az S/4 I. felső pontnál



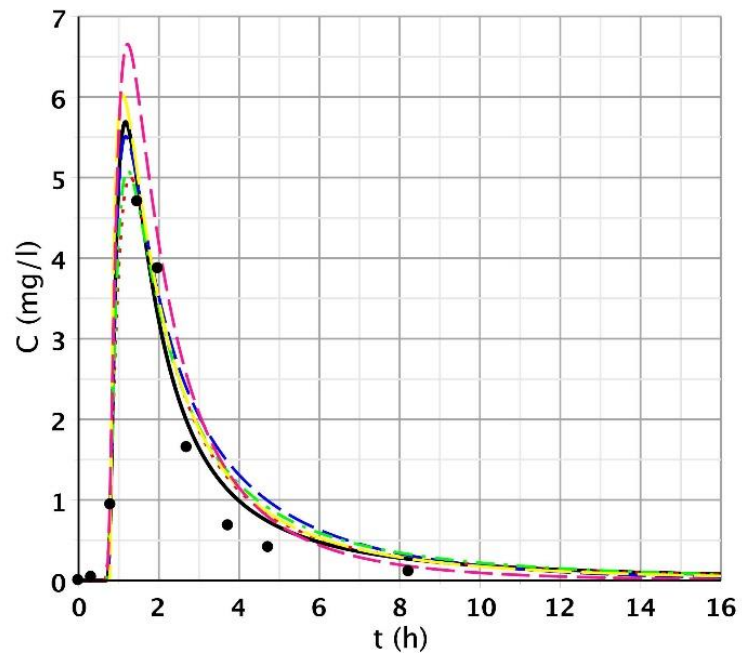
134. ábra: Az 5 sűrűségfüggvény és a CDT-modell illesztési eredménye az S/4 II. felső pontnál



135. ábra: Az 5 sűrűségfüggvény és a CDT-modell illesztési eredménye az S/4 III. felső pontnál

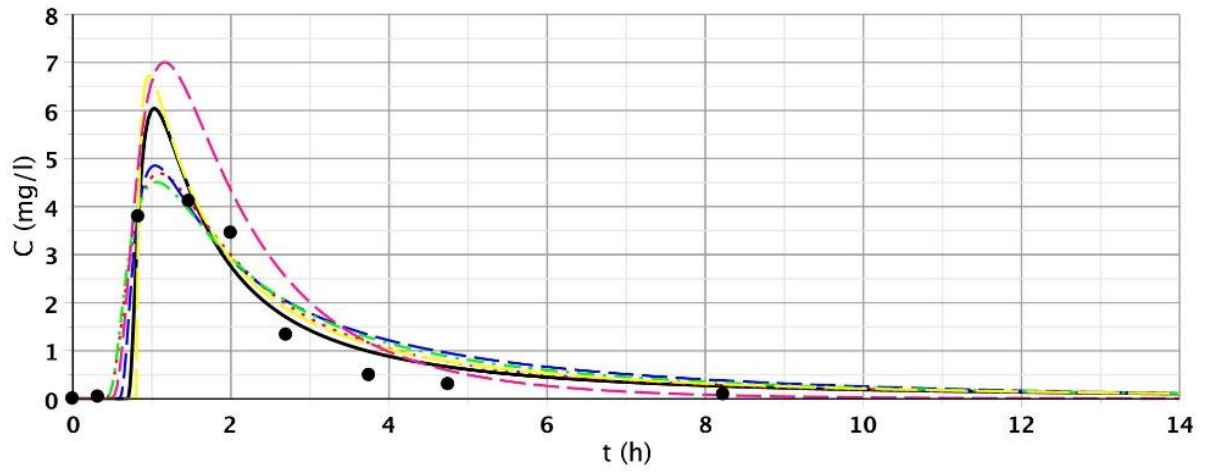


136. ábra: Az 5 sűrűségfüggvény és a CDT-modell illesztési eredménye az S/4 IV. felső pontnál

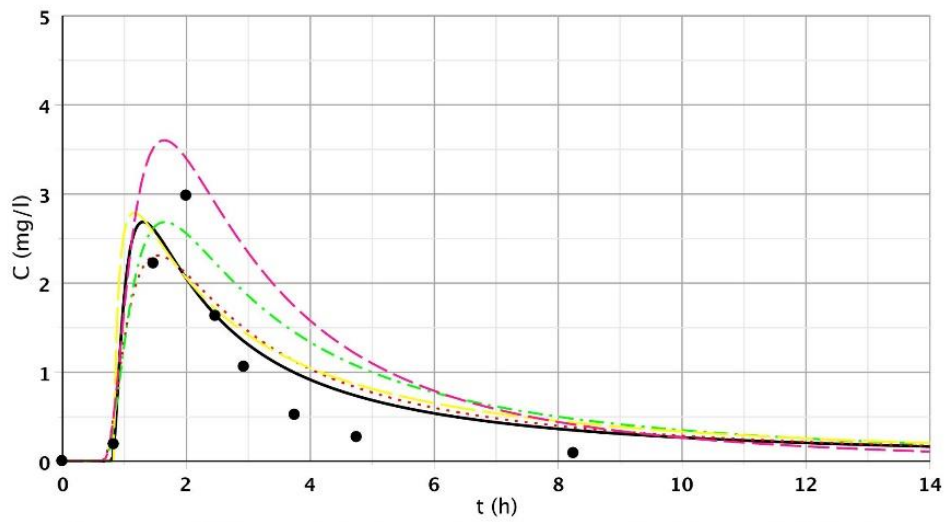


137. ábra: Az 5 sűrűségfüggvény és a CDT-modell illesztési eredménye az S/4 V. felső pontnál

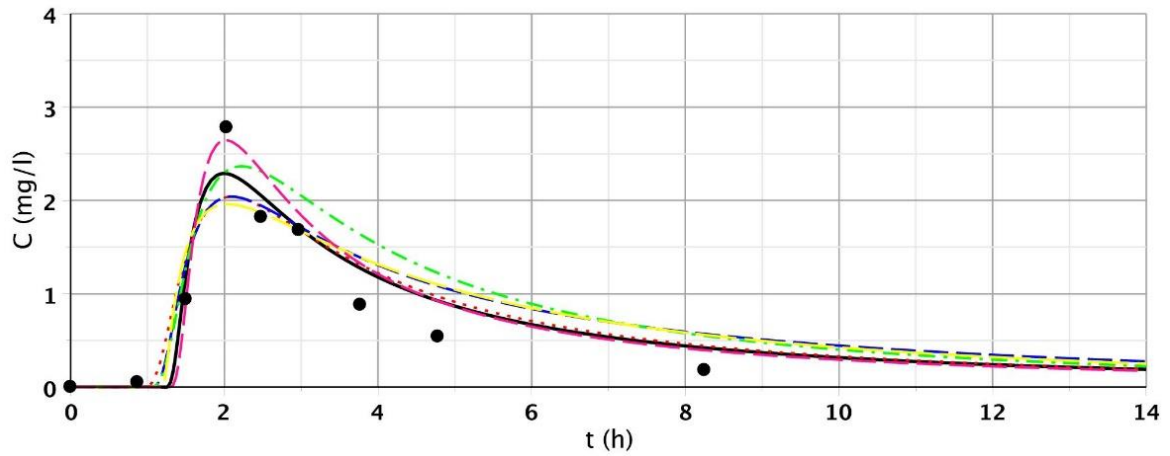




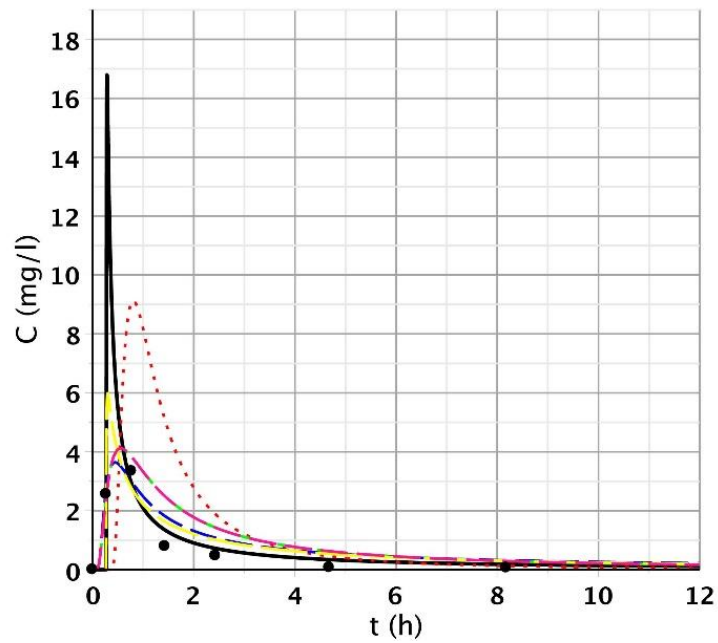
138. ábra: Az 5 sűrűségfüggvény és a CDT-modell illesztési eredménye az S/4 VI. felső pontnál



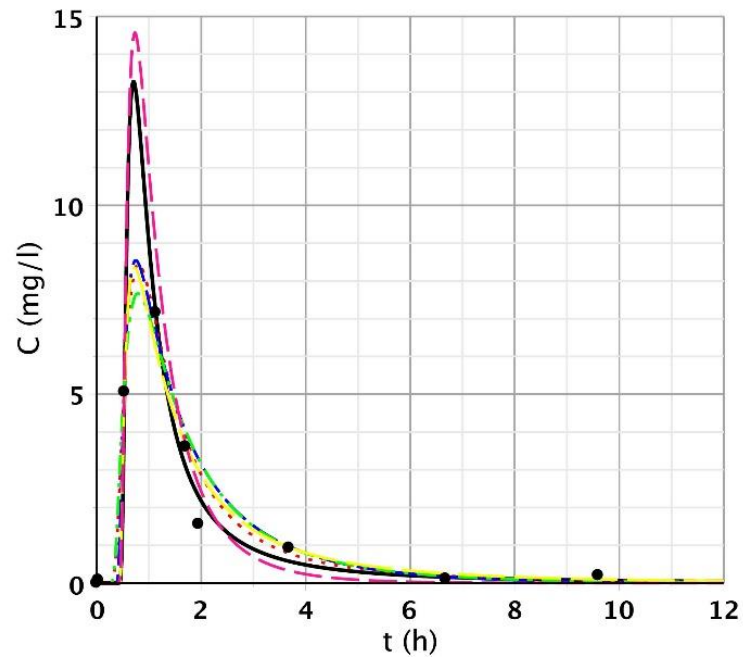
139. ábra: Az 5 sűrűségfüggvény és a CDT-modell illesztési eredménye az S/4 VII. felső pontnál



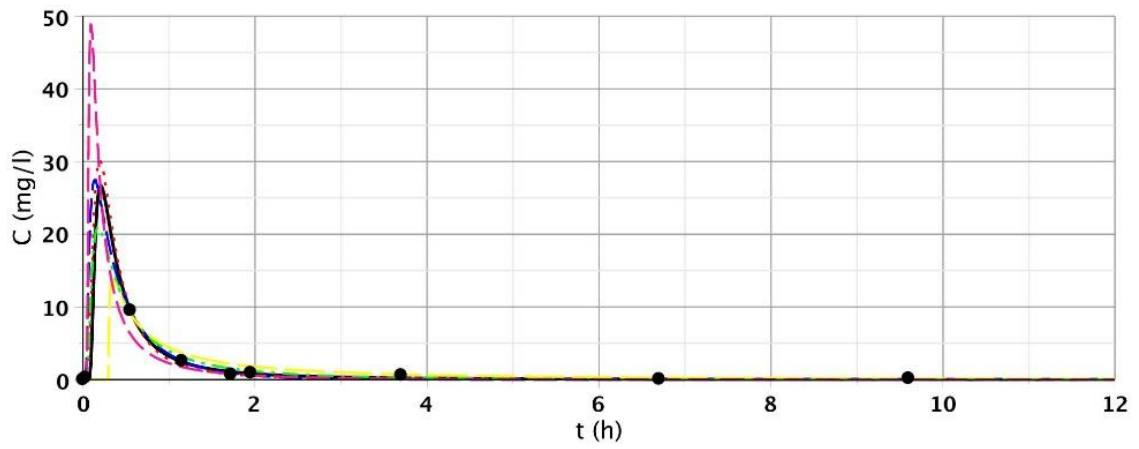
140. ábra: Az 5 sűrűségfüggvény és a CDT-modell illesztési eredménye az S/4 VIII. felső pontnál



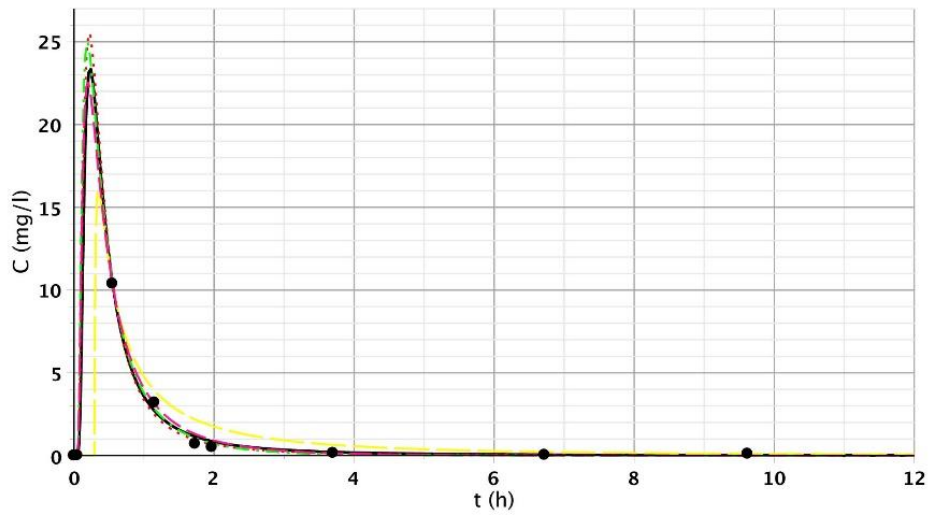
141. ábra: Az 5 sűrűségfüggvény és a CDT-modell illesztési eredménye az S/4 IX. felső pontnál



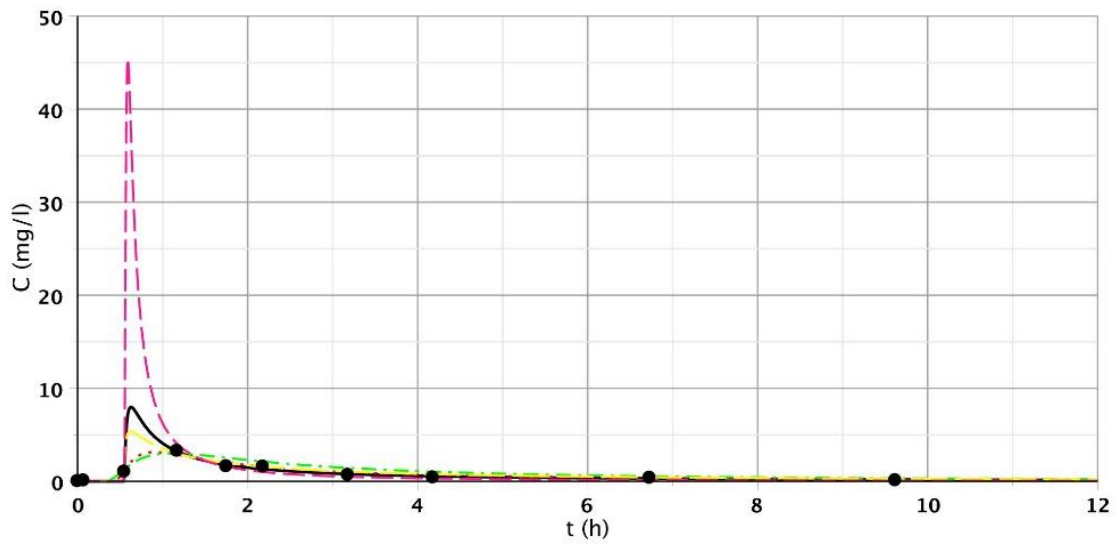
142. ábra: Az 5 sűrűségfüggvény és a CDT-modell illesztési eredménye az S/4 I. alsó pontnál



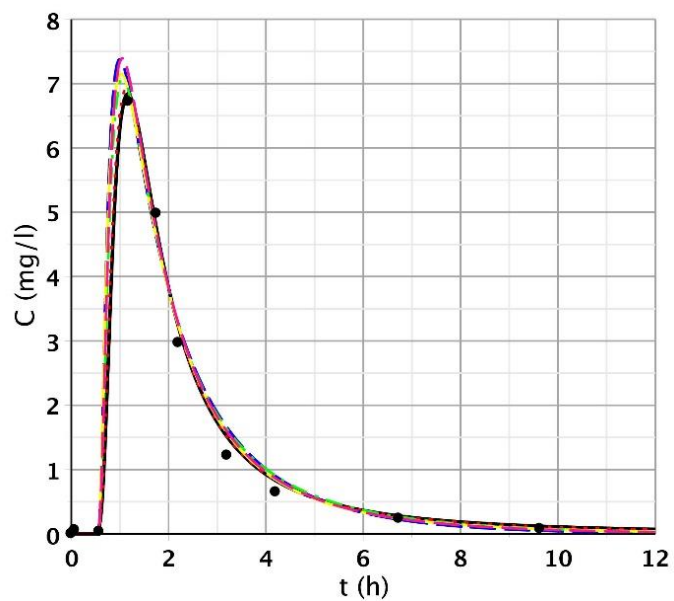
143. ábra: Az 5 sűrűségfüggvény és a CDT-modell illesztési eredménye az S/4 II. alsó pontnál



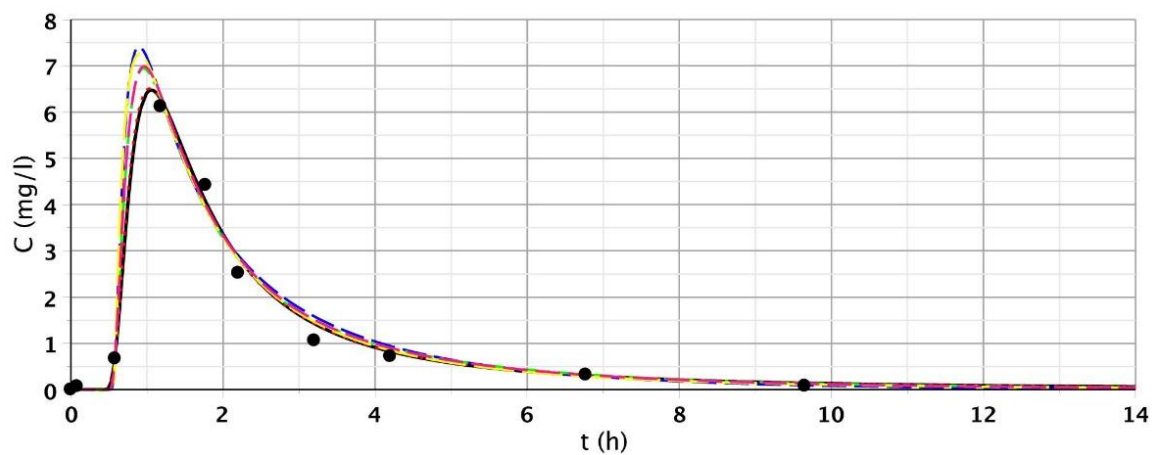
144. ábra: Az 5 sűrűségfüggvény és a CDT-modell illesztési eredménye az S/4 III. alsó pontnál



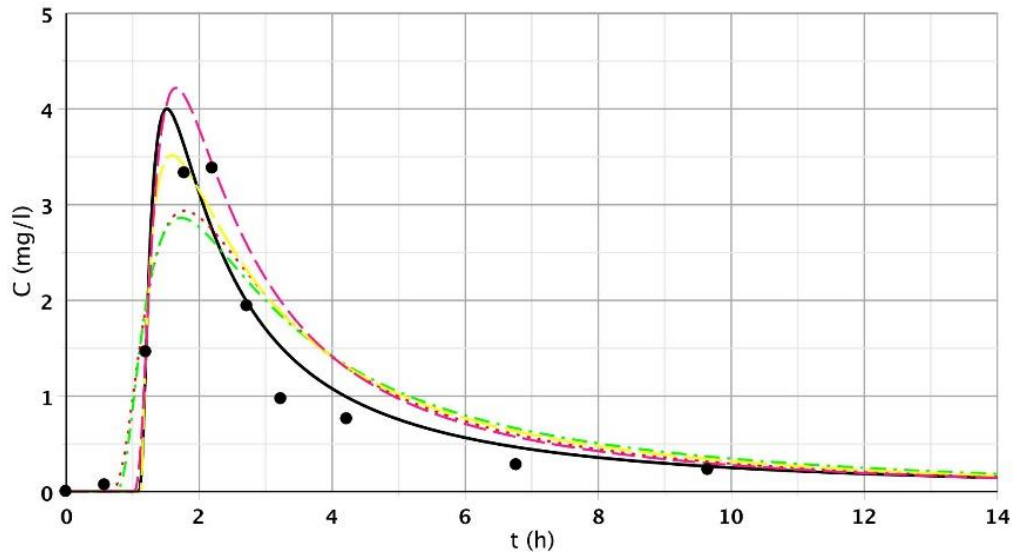
145. ábra: Az 5 sűrűségfüggvény és a CDT-modell illesztési eredménye az S/4 IV. alsó pontnál



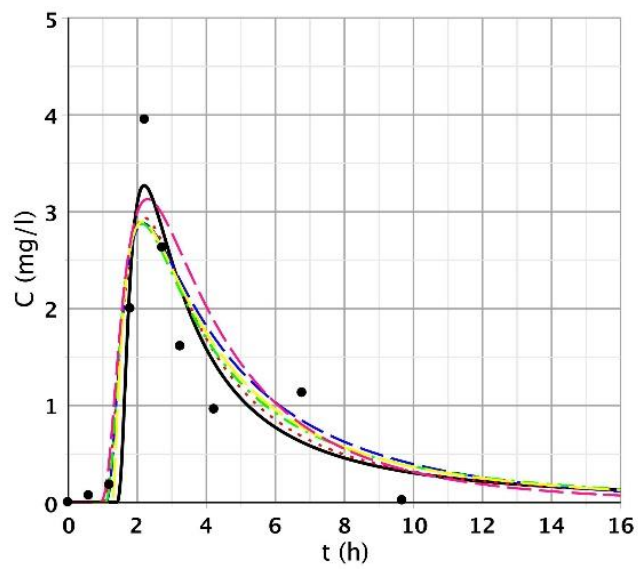
146. ábra: Az 5 sűrűségfüggvény és a CDT-modell illesztési eredménye az S/4 V. alsó pontnál



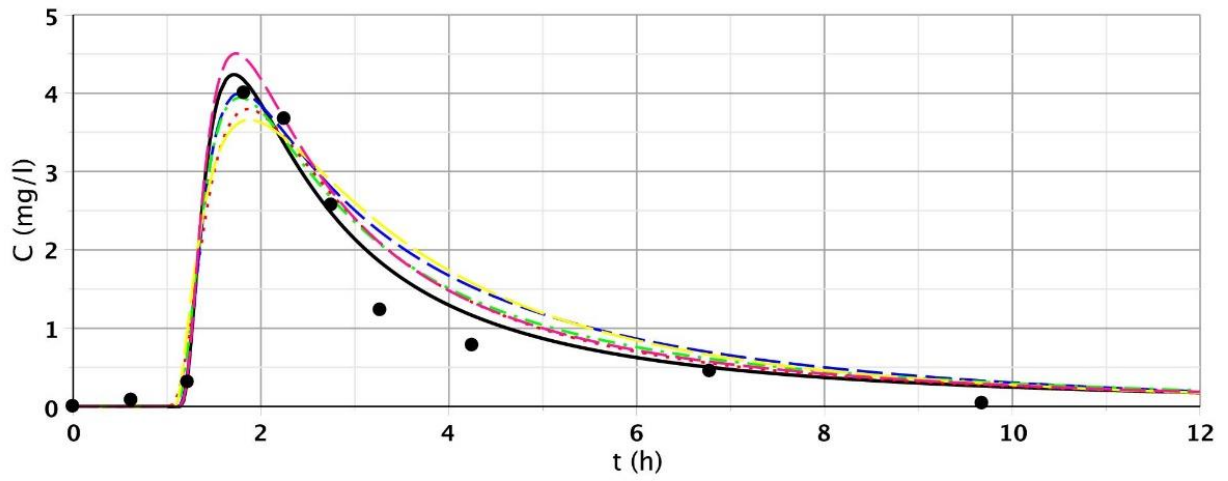
147. ábra: Az 5 sűrűségfüggvény és a CDT-modell illesztési eredménye az S/4 VI. alsó pontnál



148. ábra: Az 5 sűrűségfüggvény és a CDT-modell illesztési eredménye az S/4 VII. alsó pontnál



149. ábra: Az 5 sűrűségfüggvény és a CDT-modell illesztési eredménye az S/4 VIII. alsó pontnál



150. ábra: Az 5 sűrűségfüggvény és a CDT-modell illesztési eredménye az S/4 IX. alsó pontnál

**7. melléklet: A hódmezővásárhelyi mérési eredményekre illesztett 1 dimenziós osztott konvektív-diszperzív transzportmodell főbb adatai, illesztési eredményei és képei**

**7.1. Melléklet: Az 1 dimenziós osztott konvektív-diszperzív transzportmodell mérési adatai, eredményei**

**38. táblázat: D-CDT-modell illesztési paramétereai az S/I felső pontokra**

Ref.szám	Mérési adatok			Az első és a második Inverz Gauss-görbe illesztési paramétereai							
	Függvény alatti terület (h*mg/l)	L (m)	$b_1=L/vx$ (h)	s	$a_1$	$b_1$	$c_1$	$a_2$	$b_2$	$c_2$	$R^2$
I	6,67	0,47	0,13	0,40	1,48	0,22	0,05	0,80	0,79	0,29	0,999988
II	6,67	0,47	0,13	0,65	1,05	0,39	0,02	0,97	0,45	0,78	0,999976
III	6,67	0,47	0,13	0,66	1,92	0,20	0,10	0,21	0,36	0,66	1,000000
IV	6,67	2,21	0,63	0,60	2,22	1,12	0,37	1,47	1,57	0,94	0,999842
V	6,67	2,21	0,63	0,80	19,10	2,19	0,02	12,65	13,25	0,92	0,999673
VI	6,67	2,21	0,63	0,75	30,60	1,65	0,02	15,43	2,05	1,49	0,999701
VII	6,67	3,87	1,11	0,65	15,63	1,26	0,18	4,45	8,22	0,53	0,987500
VIII	6,67	3,87	1,11	0,48	6,72	1,07	0,71	5,85	11,71	0,92	0,993271
IX	6,67	3,87	1,11	0,60	36,32	1,13	0,19	0,55	1,50	1,71	0,999400

**39. táblázat: D-CDT-modell illesztési paramétereai az S/I alsó pontokra**

Ref.szám	Mérési adatok			Az első és a második Inverz Gauss görbe illesztési paramétereai							
	Függvény alatti terület (h*mg/l)	L (m)	$b_1=L/vx$ (h)	s	$a_1$	$b_1$	$c_1$	$a_2$	$b_2$	$c_2$	$R^2$
I	6,67	0,47	0,13	0,55	0,90	0,21	0,04	0,76	0,95	0,71	0,999949
II	6,67	0,47	0,13	0,65	1,05	0,39	0,02	0,37	0,57	0,65	0,999999
III	6,67	0,47	0,13	0,63	3,38	0,20	0,03	2,10	0,59	0,42	0,999998
IV	6,67	2,21	0,63	0,80	5,97	1,46	0,35	2,26	1,87	2,45	0,999796
V	6,67	2,21	0,63	0,67	22,76	2,14	0,01	2,08	5,72	2,68	0,999984
VI	6,67	2,21	0,63	0,75	29,74	1,72	0,01	2,12	1,72	3,01	0,999981
VII	6,67	3,87	1,11	0,60	17,19	1,45	0,11	5,36	11,39	1,26	0,997683
VIII	6,67	3,87	1,11	0,57	21,15	1,48	0,27	2,82	10,51	1,76	0,996894
IX	6,67	3,87	1,11	0,80	22,18	1,42	0,20	5,43	1,79	1,33	0,999408



**40. táblázat: D-CDT-modell illesztési paramétereai az S/2 felső pontokra**

Ref.szám	Mérési adatok			Az első és a második Inverz Gauss-görbe illesztési paramétereai							
	Függvény alatti terület (h*mg/l)	L (m)	$b_1=L/vx$ (h)	s	$a_1$	$b_1$	$c_1$	$a_2$	$b_2$	$c_2$	$R^2$
I	6,31	0,47	0,11	0,57	1,70	0,29	0,08	0,09	5,41	0,20	0,995905
II	6,31	0,47	0,11	0,65	0,49	0,67	0,04	0,47	6,65	0,21	0,975735
III	6,31	0,47	0,11	0,77	1,65	0,22	0,02	0,30	0,23	0,59	0,999996
IV	6,31	2,21	0,51	0,70	1,65	0,68	0,05	1,42	11,59	1,70	0,987438
V	6,31	2,21	0,51	0,44	3,45	0,66	0,08	2,72	9,52	0,32	0,991427
VI	6,31	2,21	0,51	0,67	3,75	0,58	0,12	3,35	51,41	0,54	0,997636
VII	6,31	3,87	0,89	0,70	6,37	0,76	0,02	5,73	0,92	0,59	0,995639
VIII	6,31	3,87	0,89	0,49	8,04	1,09	0,23	5,47	9,77	0,50	0,992866
IX	6,31	3,87	0,89	0,60	5,56	0,66	0,37	3,48	1,16	0,70	0,998058

**41. táblázat: D-CDT-modell illesztési paramétereai az S/2 alsó pontokra**

Ref.szám	Mérési adatok			Az első és a második Inverz Gauss-görbe illesztési paramétereai							
	Függvény alatti terület (h*mg/l)	L (m)	$b_1=L/vx$ (h)	s	$a_1$	$b_1$	$c_1$	$a_2$	$b_2$	$c_2$	$R^2$
I	6,31	0,47	0,11	0,80	2,17	0,64	0,10	0,89	1,72	0,80	0,999939
II	6,31	0,47	0,11	0,70	1,54	0,68	0,00	1,29	6,47	0,49	0,996188
III	6,31	0,47	0,11	0,63	0,39	0,50	0,00	0,28	0,43	0,09	0,921434
IV	6,31	2,21	0,51	0,44	2,47	0,98	0,00	2,31	1042,87	0,00	0,861043
V	6,31	2,21	0,51	0,34	3,06	0,46	0,09	0,68	29,98	0,52	0,995669
VI	6,31	2,21	0,51	0,63	3,05	0,55	0,14	1,65	4,71	0,47	0,999236
VII	6,31	3,87	0,89	0,61	4,76	0,91	0,20	2,68	26,57	0,93	0,997206
VIII	6,31	3,87	0,89	0,64	11,18	1,30	0,07	4,33	6,79	1,24	0,995287
IX	6,31	3,87	0,89	0,67	18,65	1,05	0,01	4,97	1,15	0,77	0,989086

**42. táblázat: D-CDT-modell illesztési paramétereai az S/3 felső pontokra**

Ref.szám	Mérési adatok			Az első és a második Inverz Gauss-görbe illesztési paramétereai							
	Függvény alatti terület (h*mg/l)	L (m)	$b_1=L/vx$ (h)	s	$a_1$	$b_1$	$c_1$	$a_2$	$b_2$	$c_2$	$R^2$
I	11,58	0,47	0,15	0,75	2,93	1,09	0,17	1,85	2,28	1,83	0,990438
II	11,58	0,47	0,15	0,43	9,37	0,90	0,19	4,37	3,11	0,80	0,995902
III	11,58	0,47	0,15	0,53	9,91	0,93	0,15	3,05	2,47	1,63	0,996642
IV	11,58	2,21	0,69	0,47	13,16	1,16	0,49	1,60	1,78	2,18	0,975159
V	11,58	2,21	0,69	0,31	14,26	1,13	0,58	1,81	2,66	0,12	0,994278
VI	11,58	2,21	0,69	0,32	15,16	1,06	0,61	1,60	2,26	2,14	0,992411
VII	11,58	3,87	1,22	0,70	29,61	3,11	0,01	9,32	1,70	3,51	0,972126
VIII	11,58	3,87	1,22	0,94	22,32	3,26	0,60	14,18	5,08	2,77	0,987436
IX	11,58	3,87	1,22	0,80	25,07	4,16	0,36	3,02	14,44	5,99	0,999000

**43. táblázat: D-CDT-modell illesztési paramétereai az S/3 alsó pontokra**

Ref.szám	Mérési adatok			Az első és a második Inverz Gauss-görbe illesztési paramétereai							
	Függvény alatti terület (h*mg/l)	L (m)	$b_1=L/vx$ (h)	s	$a_1$	$b_1$	$c_1$	$a_2$	$b_2$	$c_2$	$R^2$
I	11,58	0,47	0,15	0,73	7,14	0,89	0,06	0,42	2,97	1,37	0,989761
II	11,58	0,47	0,15	0,46	13,47	1,32	0,24	2,03	1,88	2,77	0,969585
III	11,58	0,47	0,15	0,92	3,34	0,71	0,17	0,35	0,19	1,64	0,943776
IV	11,58	2,21	0,69	0,10	4,42	0,69	0,11	3,16	2,96	1,54	0,833379
V	11,58	2,21	0,69	0,52	19,61	1,86	0,20	4,79	1,98	2,20	0,974708
VI	11,58	2,21	0,69	0,52	26,44	0,28	0,55	5,84	1,43	2,24	0,932704
VII	11,58	3,87	1,22	0,51	25,07	2,41	0,57	5,19	2,14	3,31	0,965969
VIII	11,58	3,87	1,22	0,27	26,88	2,24	0,78	8,45	3,53	2,69	0,976594
IX	11,58	3,87	1,22	0,85	32,07	4,61	0,09	22,10	4,06	2,52	0,991358

**44. táblázat: D-CDT-modell illesztési paramétereit az S/4 felső pontokra**

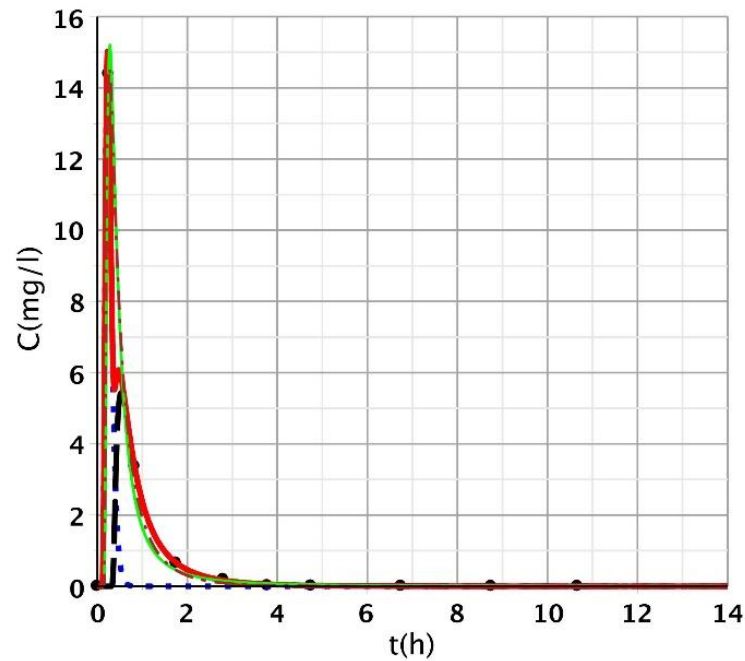
Ref.szám	Mérési adatok			Az első és a második Inverz Gauss-görbe illesztési paramétereit							
	Függvény alatti terület (h*mg/l)	L (m)	$b_1=L/vx$ (h)	s	$a_1$	$b_1$	$c_1$	$a_2$	$b_2$	$c_2$	$R^2$
I	13,67	0,47	0,17	0,40	5,86	0,52	0,01	4,68	61,58	0,37	0,9639
II	13,67	0,47	0,17	0,20	0,51	0,48	0,00	0,00	0,29	0,17	0,9790
III	13,67	0,47	0,17	0,75	3,48	0,33	0,16	0,72	198,95	0,73	0,9895
IV	13,67	2,21	0,82	0,72	6,90	0,54	0,54	1,04	71,94	1,41	0,9885
V	13,67	2,21	0,82	0,48	6,92	1,50	0,29	6,81	15,79	0,68	0,9887
VI	13,67	2,21	0,82	0,42	7,92	1,27	0,11	2,16	18,12	1,27	0,9813
VII	13,67	3,87	1,43	0,33	12,25	1,87	0,33	10,10	520,97	2,25	0,9732
VIII	13,67	3,87	1,43	0,30	12,16	1,88	0,59	9,28	54,03	1,80	0,9547
IX	13,67	3,87	1,43	0,29	13,57	1,57	0,75	10,59	64,51	1,11	0,9930

**45. táblázat: D-CDT-modell illesztési paramétereit az S/4 alsó pontokra**

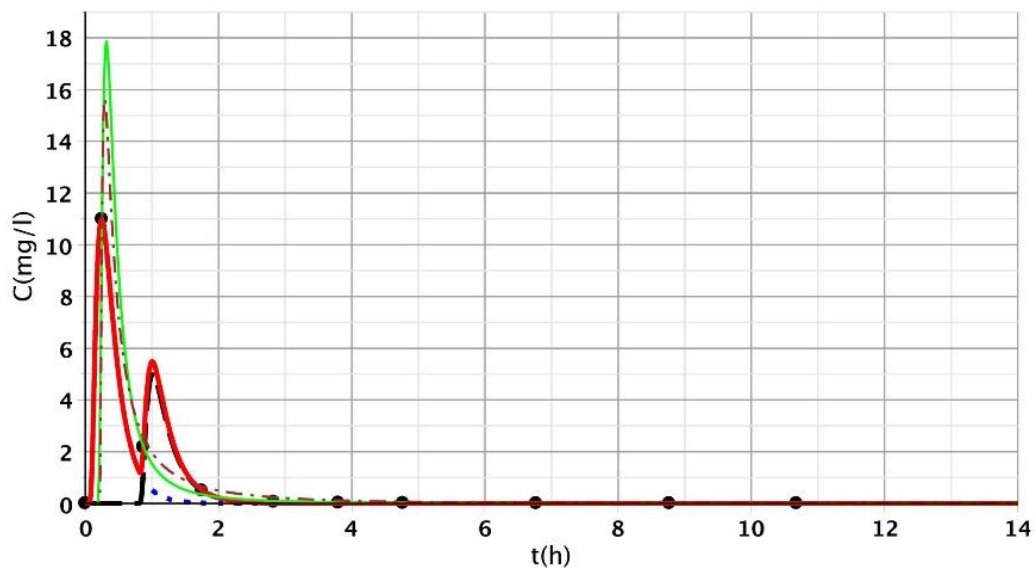
Ref.szám	Mérési adatok			Az első és a második Inverz Gauss-görbe illesztési paramétereit							
	Függvény alatti terület (h*mg/l)	L (m)	$b_1=L/vx$ (h)	s	$a_1$	$b_1$	$c_1$	$a_2$	$b_2$	$c_2$	$R^2$
I	13,67	0,47	0,17	0,74	4,47	1,24	0,02	1,15	9,65	2,50	0,989527
II	13,67	0,47	0,17	0,12	2,45	0,46	0,15	0,53	7,63	0,00	0,991407
III	13,67	0,47	0,17	0,56	1,91	0,55	0,00	1,39	21,05	0,44	0,990961
IV	13,67	2,21	0,82	0,70	6,22	0,53	0,32	1,67	3,42	1,37	0,993795
V	13,67	2,21	0,82	0,65	2,18	1,21	0,46	1,89	11,20	1,04	0,999333
VI	13,67	2,21	0,82	0,65	5,95	1,52	0,17	5,80	12,16	2,09	0,998708
VII	13,67	3,87	1,43	0,45	14,37	2,14	0,17	8,38	133,85	2,47	0,989126
VIII	13,67	3,87	1,43	0,35	17,63	1,72	0,76	8,27	9,46	2,09	0,974937
IX	13,67	3,87	1,43	0,41	11,83	1,66	0,61	9,41	14,36	1,31	0,989607

## 7.2. Melléklet: Az 1 dimenziós osztott konvektív-diszperzív transzportmodell illesztési képei

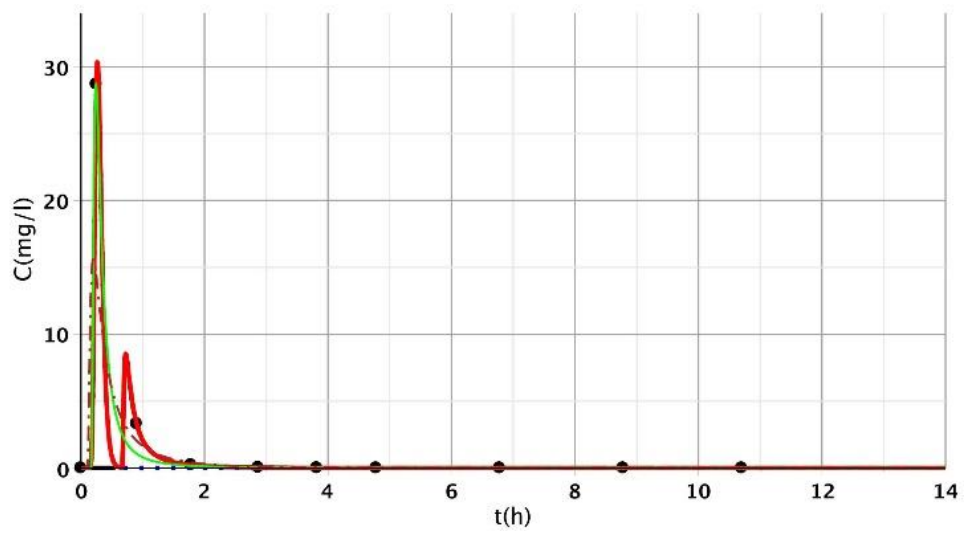
Az 151.-222. ábrákon a diszkrét pontok a mérési eredményeket, a kék pontvonal az 1. Inverz Gauss-görbét, a fekete szaggatott vonal a 2. Inverz Gauss-görbét, a zöld folytonos vonal a Fréchet-eloszlást, a piros szaggatott vonal a 1 dimenziós konvektív-diszperzív transzportmodellt, a piros folytonos vonal pedig az 1 dimenziós osztott konvektív-diszperzív transzportmodellt mutatja.



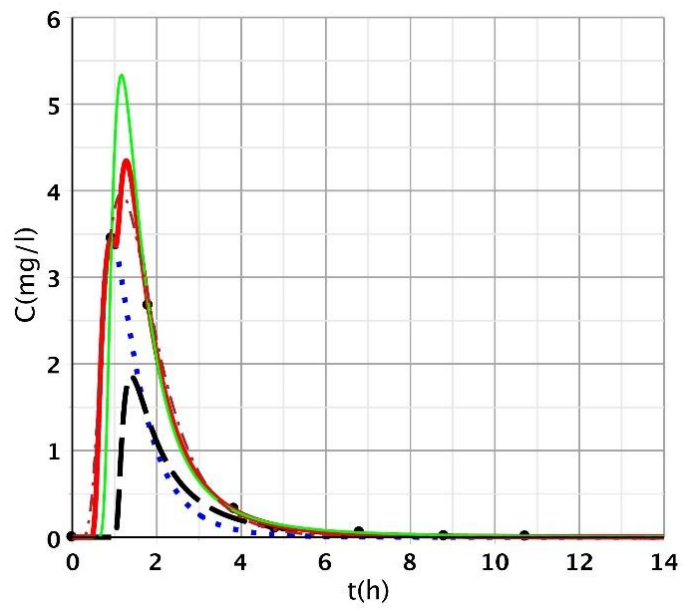
151. ábra: Három modell illesztési eredményei (D-CDT, Fréchet, CDT) az S/1 I. felső ponton



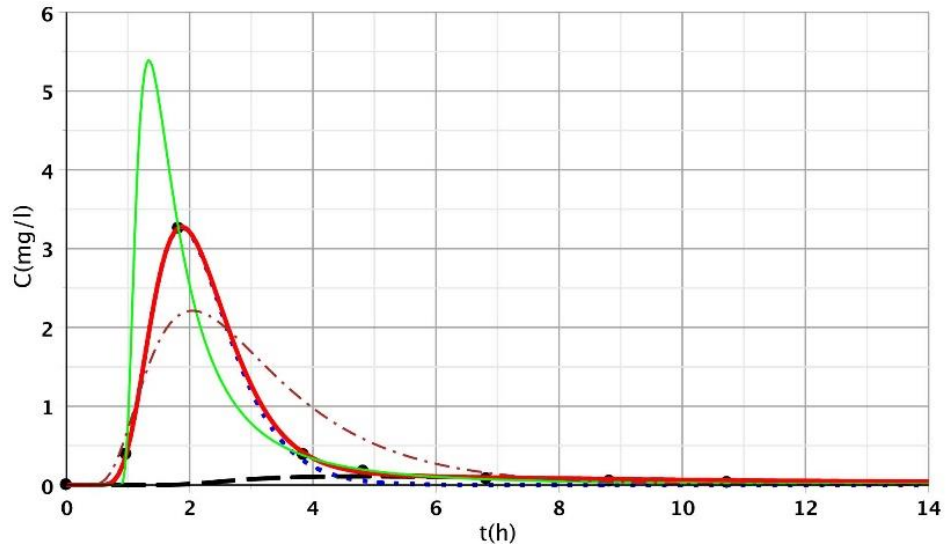
152. ábra: Három modell illesztési eredményei (D-CDT, Fréchet, CDT) az S/1 II. felső ponton



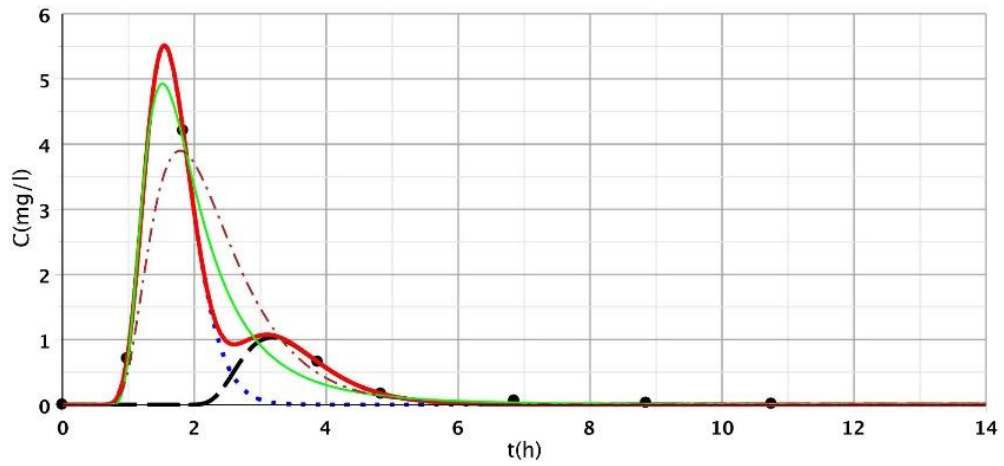
153. ábra: Három modell illesztési eredményei (D-CDT, Fréchet, CDT) az S/1 III. felső ponton



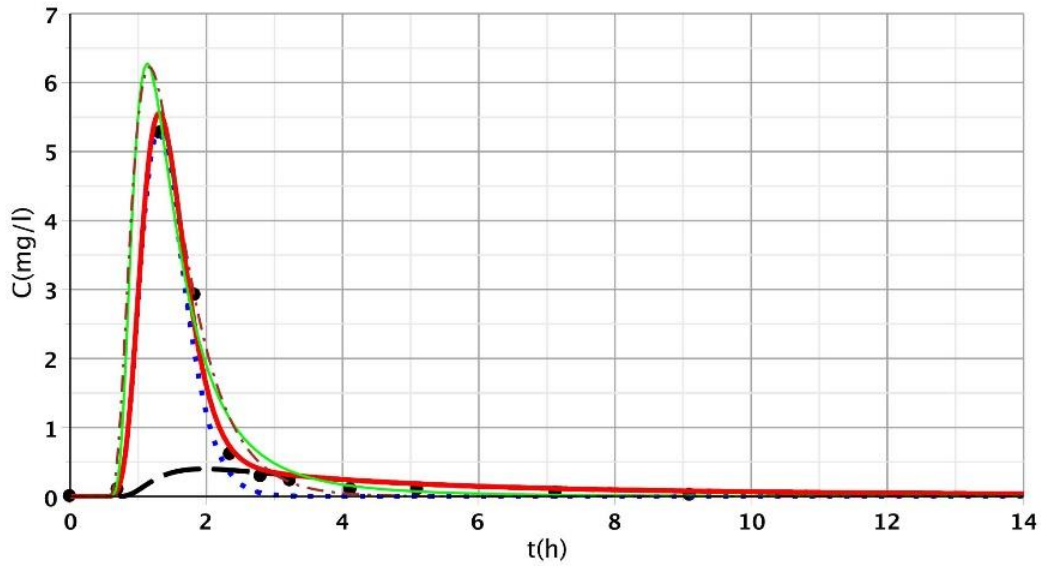
154. ábra: Három modell illesztési eredményei (D-CDT, Fréchet, CDT) az S/1 IV. felső ponton



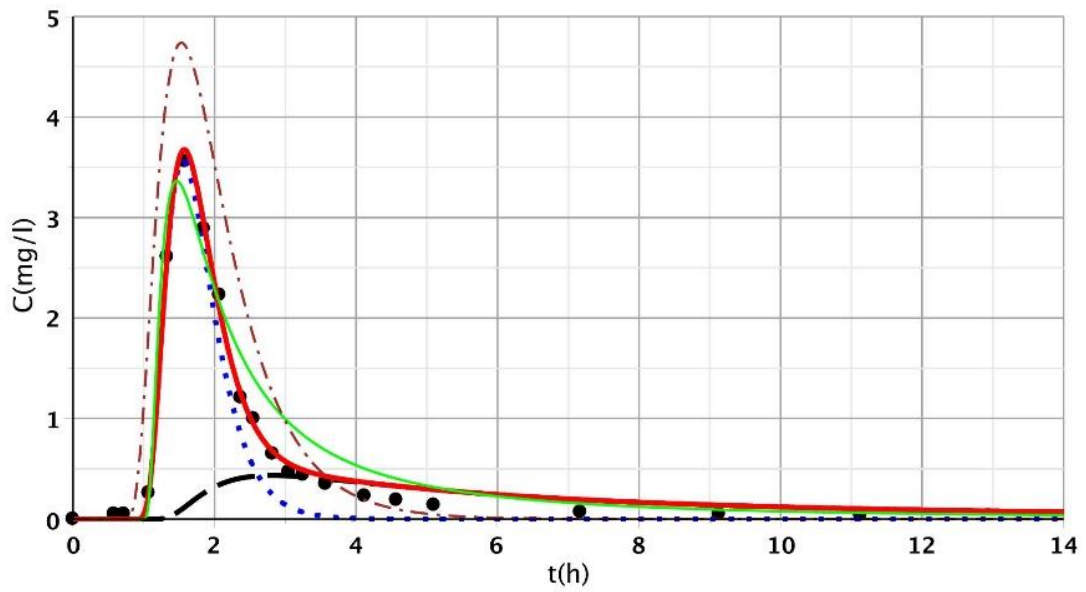
155. ábra: Három modell illesztési eredményei (D-CDT, Fréchet, CDT) az S/I V. felső ponton



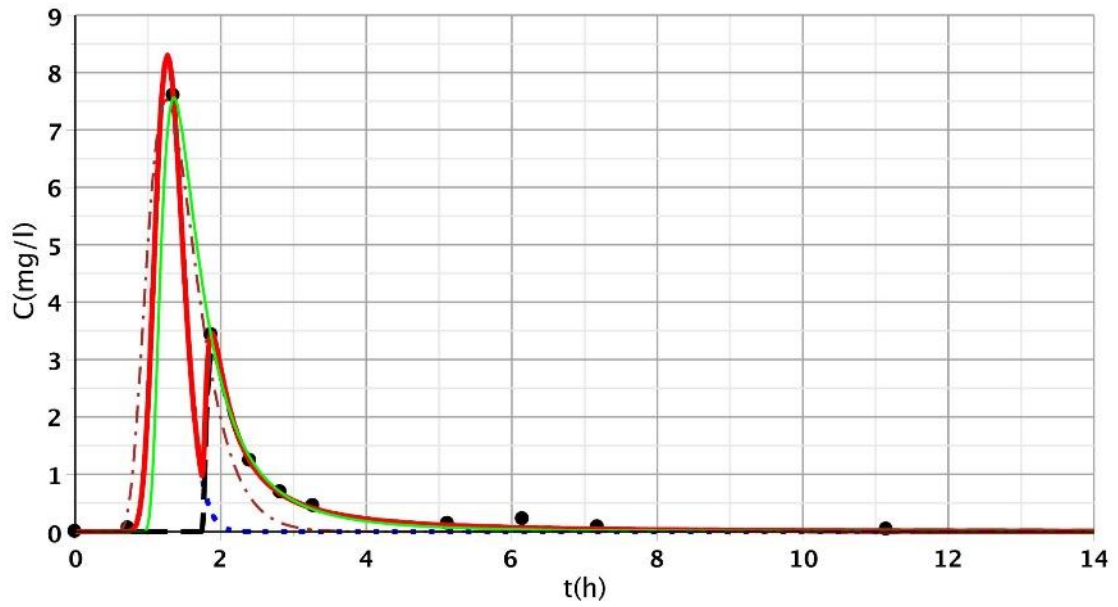
156. ábra: Három modell illesztési eredményei (D-CDT, Fréchet, CDT) az S/I VI. felső ponton



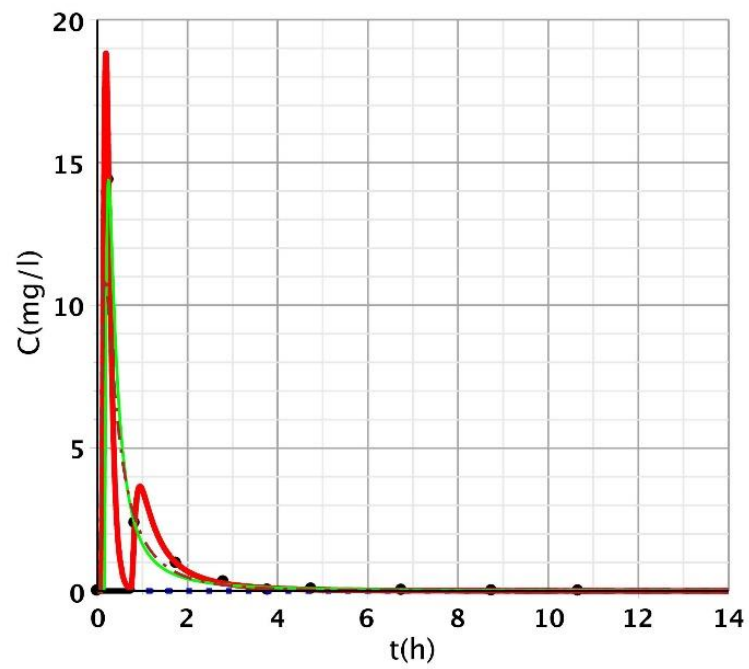
157. ábra: Három modell illesztési eredményei (D-CDT, Fréchet, CDT) az S/I VII. felső ponton



158. ábra: Három modell illesztési eredményei (D-CDT, Fréchet, CDT) az S/I VIII. felső ponton

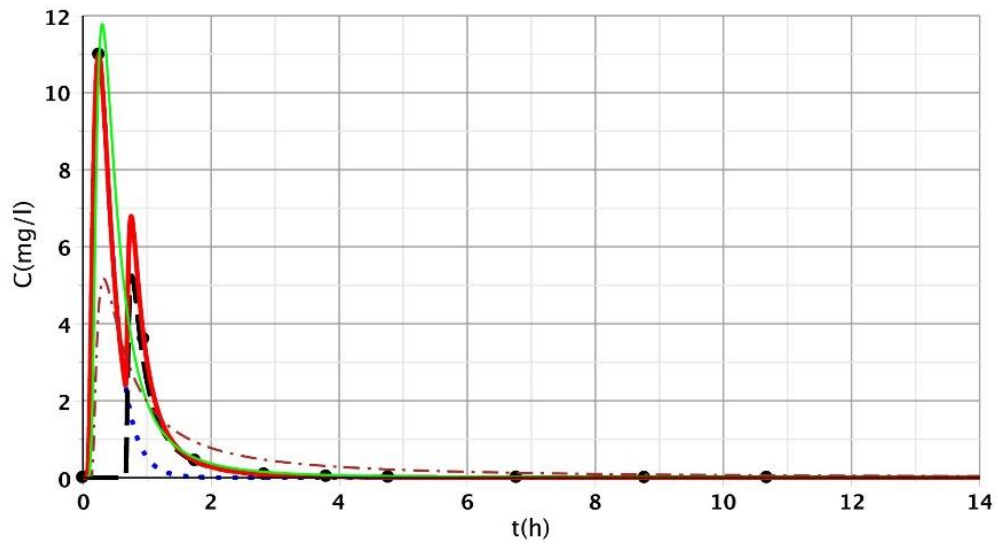


159. ábra: Három modell illesztési eredményei (D-CDT, Fréchet, CDT) az S/1 IX. felső ponton

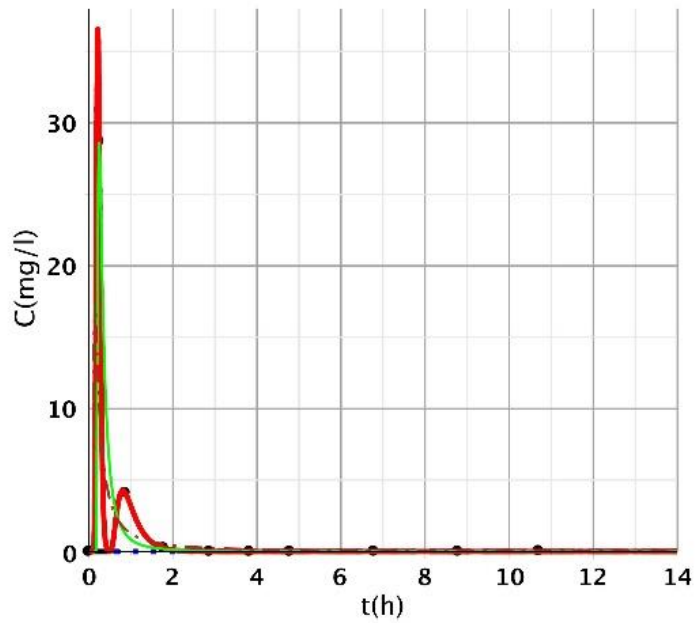


160. ábra: Három modell illesztési eredményei (D-CDT, Fréchet, CDT) az S/1 I. alsó ponton

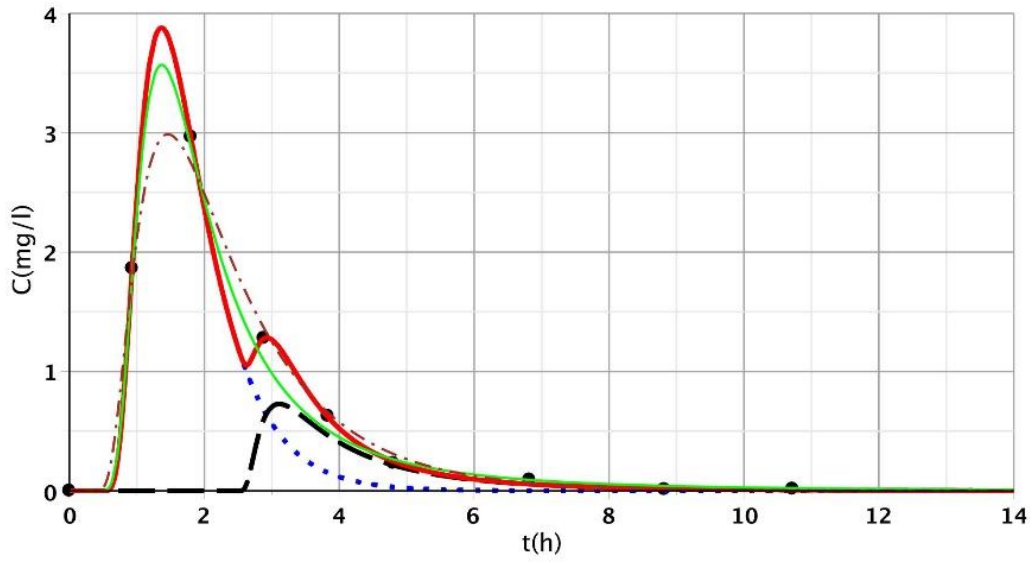




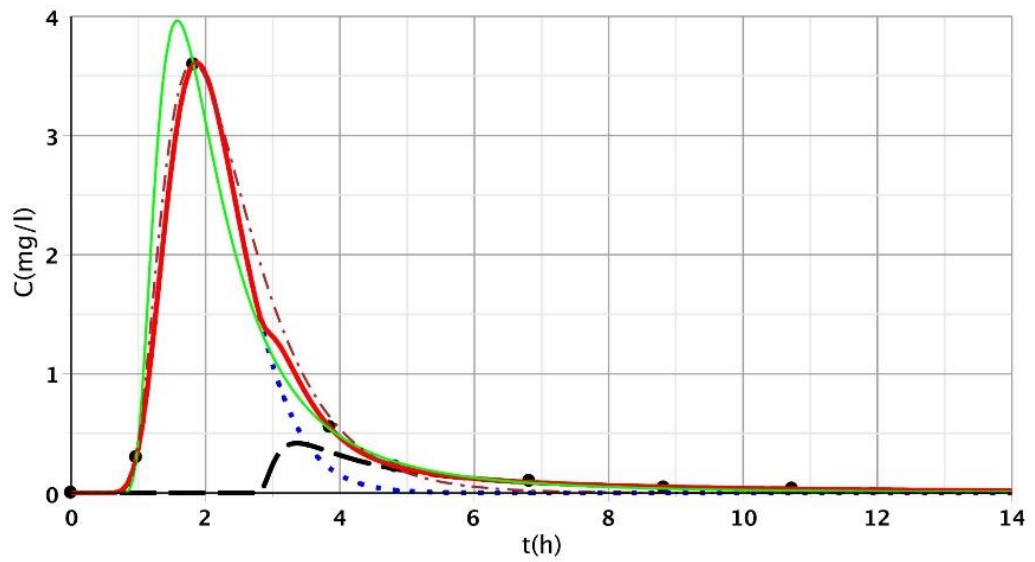
161. ábra: Három modell illesztési eredményei (D-CDT, Fréchet, CDT) az S/1 II. alsó ponton



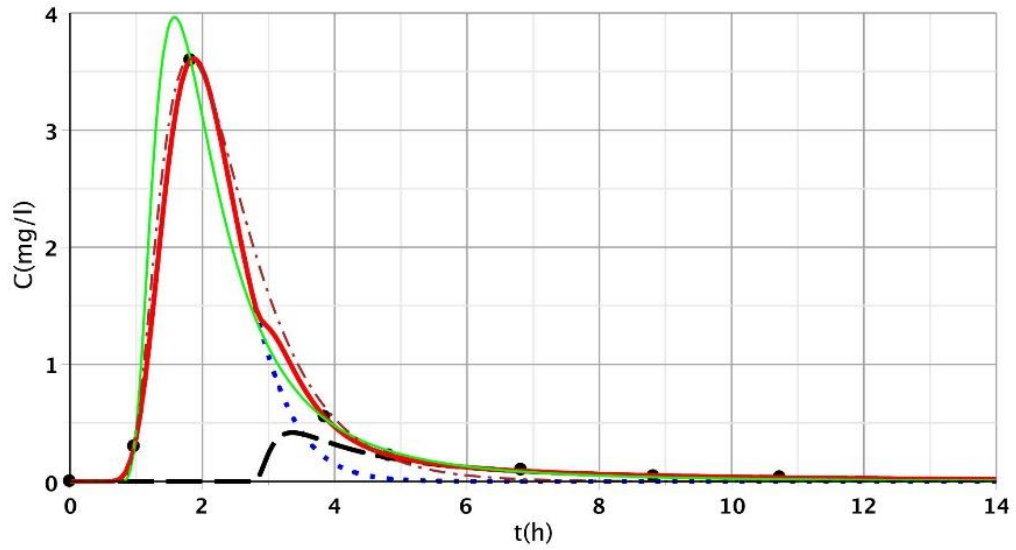
162. ábra: Három modell illesztési eredményei (D-CDT, Fréchet, CDT) az S/1 III. alsó ponton



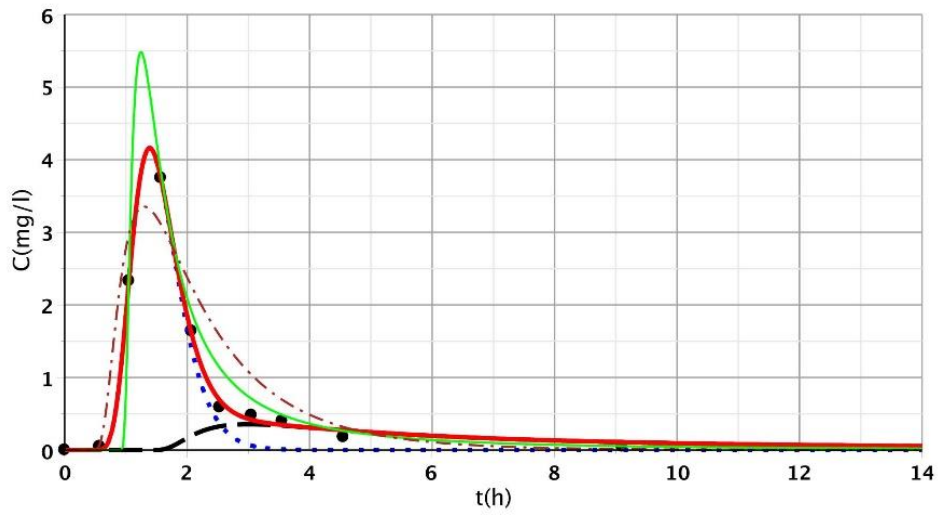
163. ábra: Három modell illesztési eredményei (D-CDT, Fréchet, CDT) az S/I IV. alsó ponton



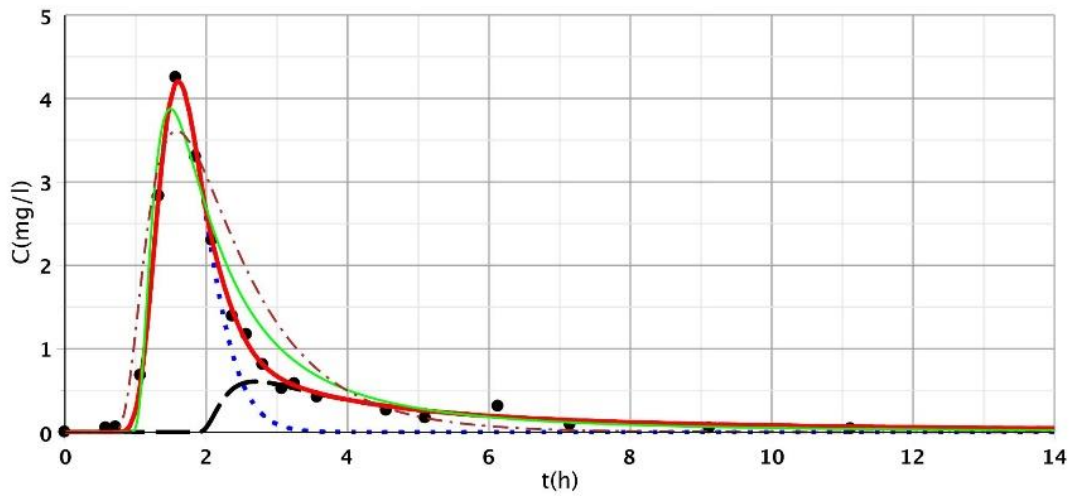
164. ábra: Három modell illesztési eredményei (D-CDT, Fréchet, CDT) az S/I V. alsó ponton



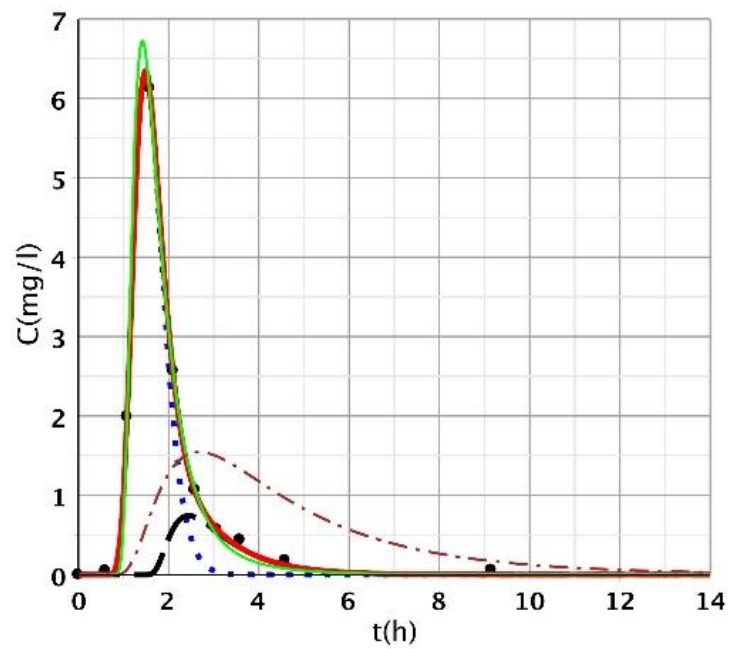
165. ábra: Három modell illesztési eredményei (D-CDT, Fréchet, CDT) az S/I VI. alsó ponton



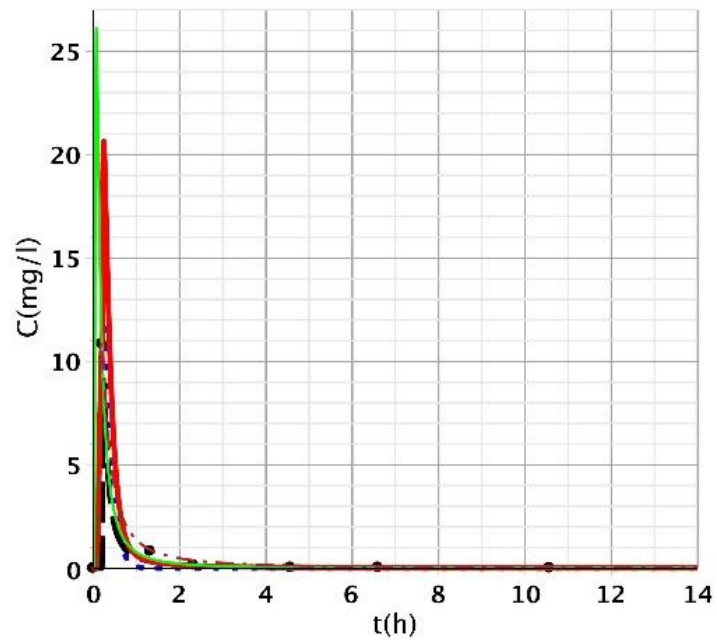
166. ábra: Három modell illesztési eredményei (D-CDT, Fréchet, CDT) az S/I VII. alsó ponton



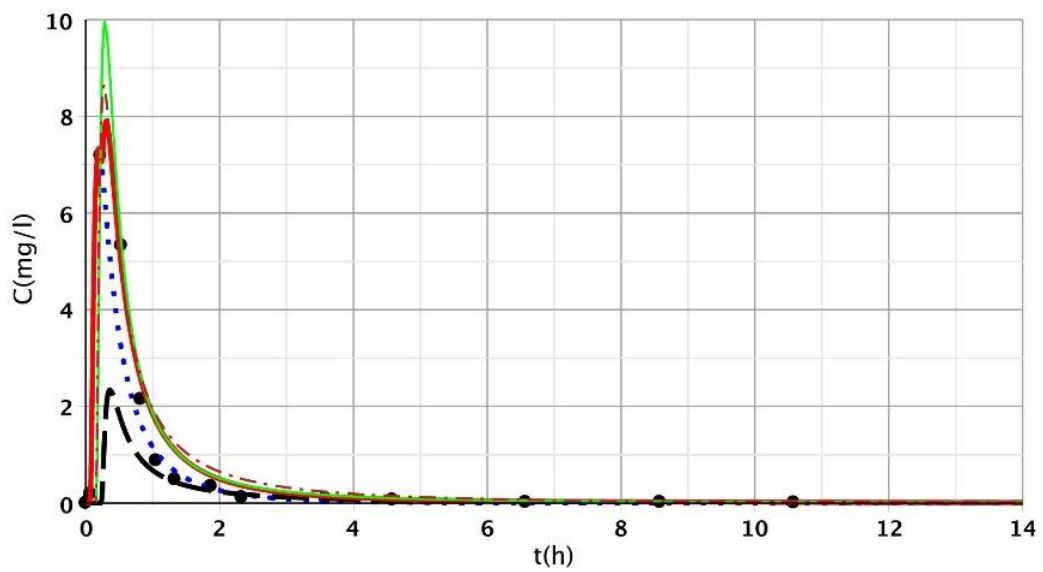
167. ábra: Három modell illesztési eredményei (D-CDT, Fréchet, CDT) az S/1 VIII. alsó ponton



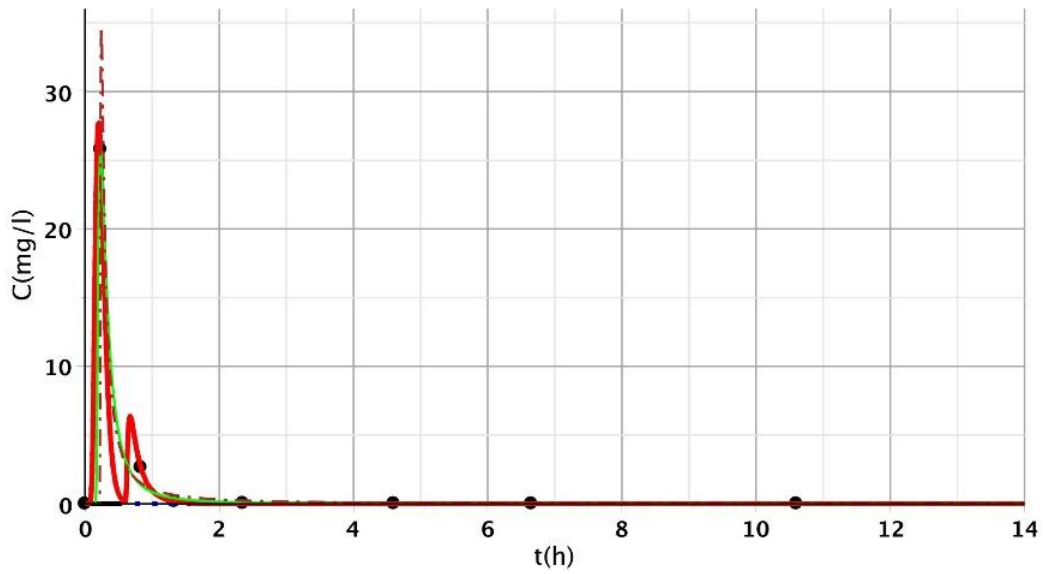
168. ábra: Három modell illesztési eredményei (D-CDT, Fréchet, CDT) az S/1 IX. alsó ponton



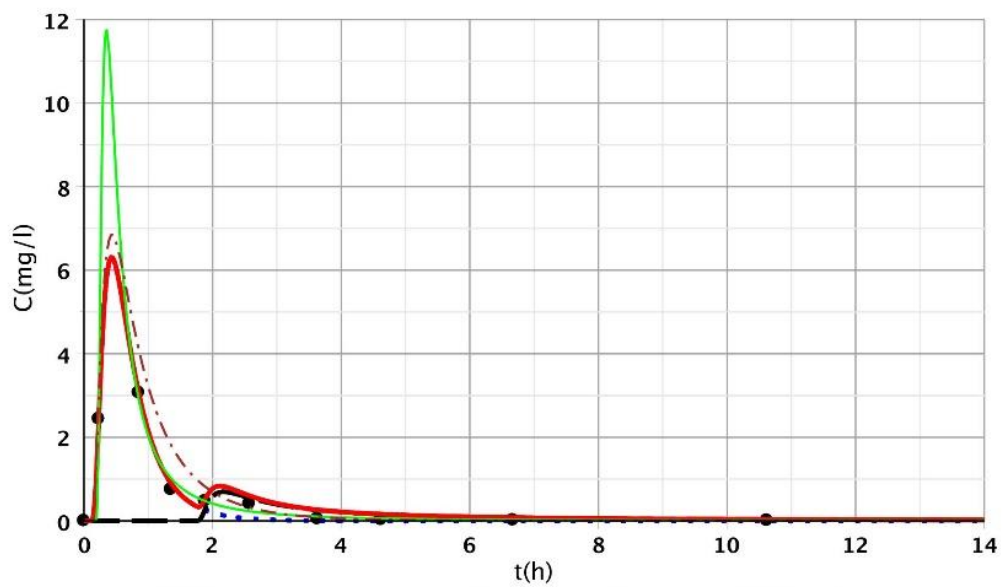
169. ábra: Három modell illesztési eredményei (D-CDT, Fréchet, CDT) az S/2 I. felső ponton



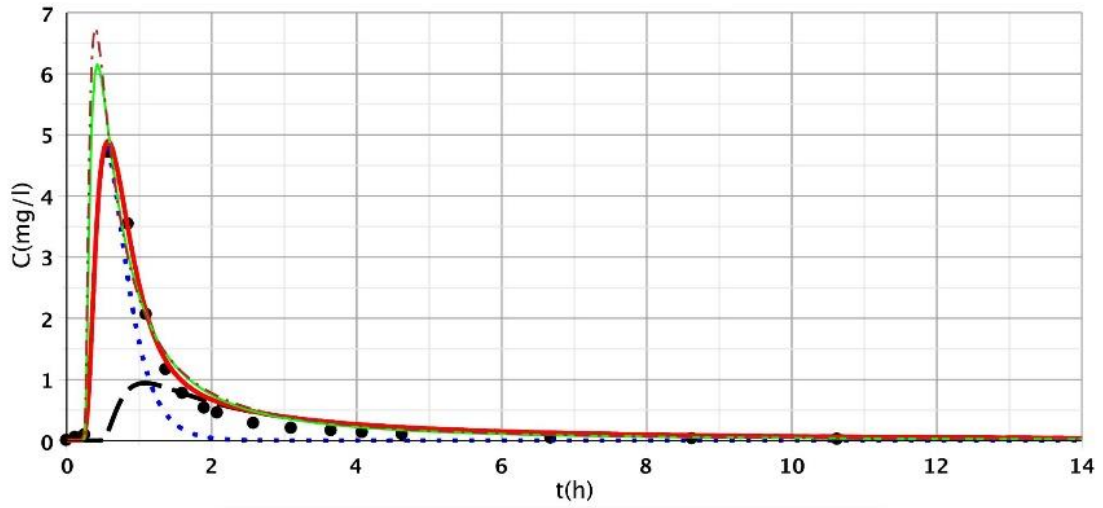
170. ábra: Három modell illesztési eredményei (D-CDT, Fréchet, CDT) az S/2 II. felső ponton



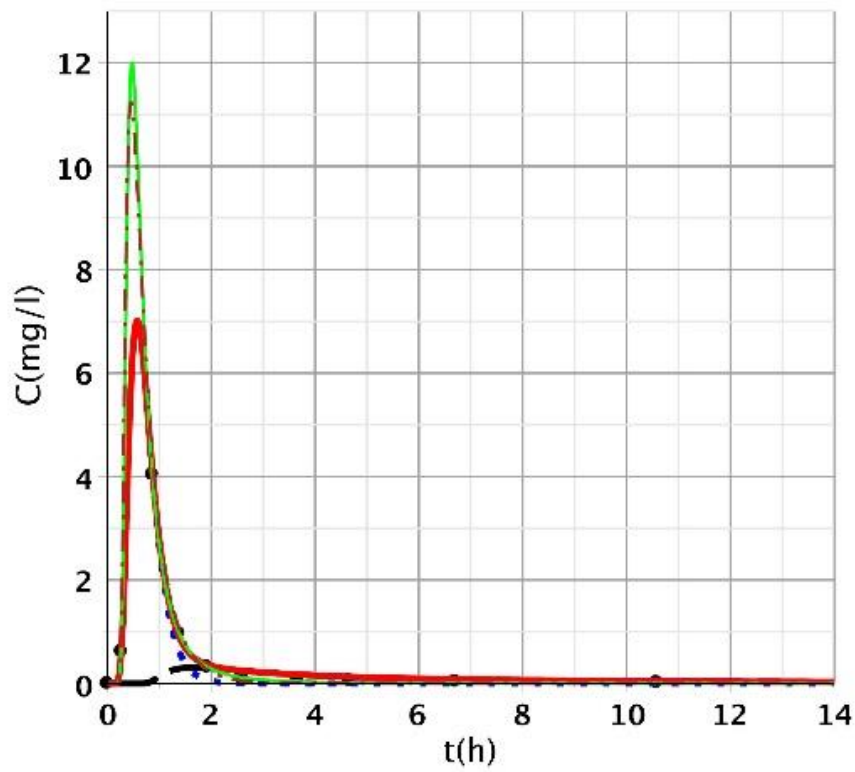
171. ábra: Három modell illesztési eredményei (D-CDT, Fréchet, CDT) az S/2 III. felső ponton



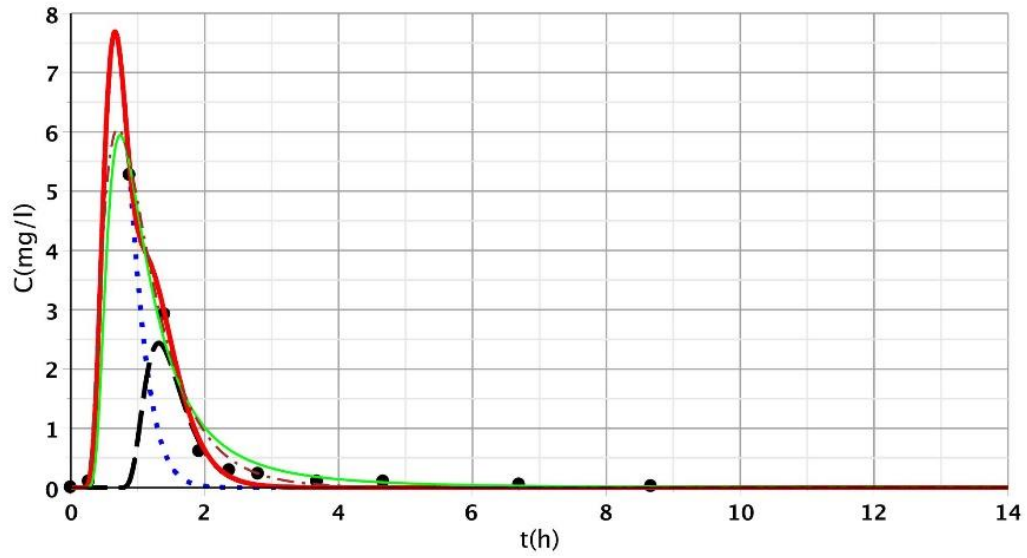
172. ábra: Három modell illesztési eredményei (D-CDT, Fréchet, CDT) az S/2 IV. felső ponton



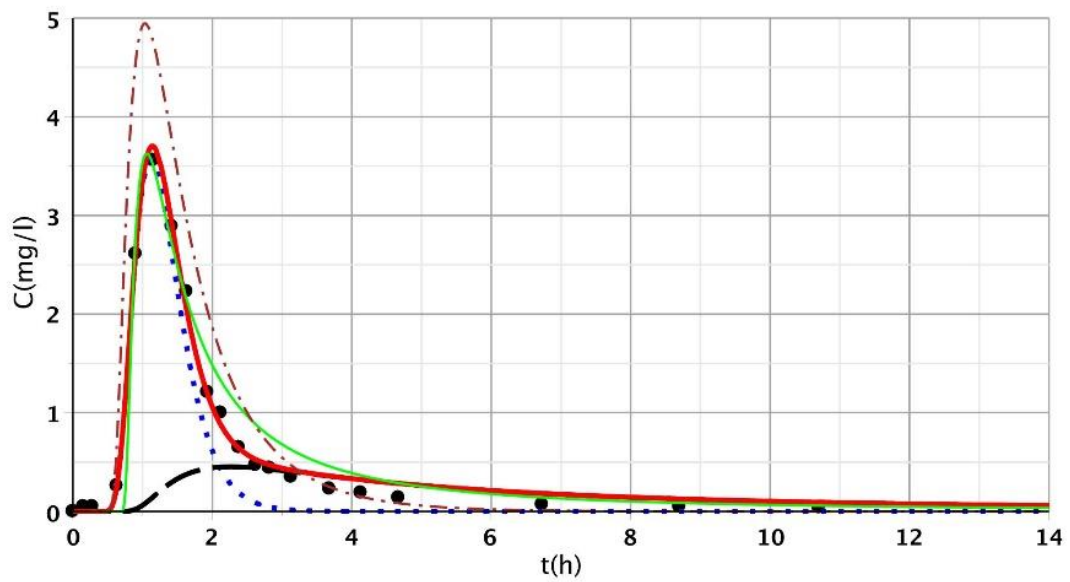
173. ábra: Három modell illesztési eredményei (D-CDT, Fréchet, CDT) az S/2 V. felső ponton



174. ábra: Három modell illesztési eredményei (D-CDT, Fréchet, CDT) az S/2 VI. felső ponton

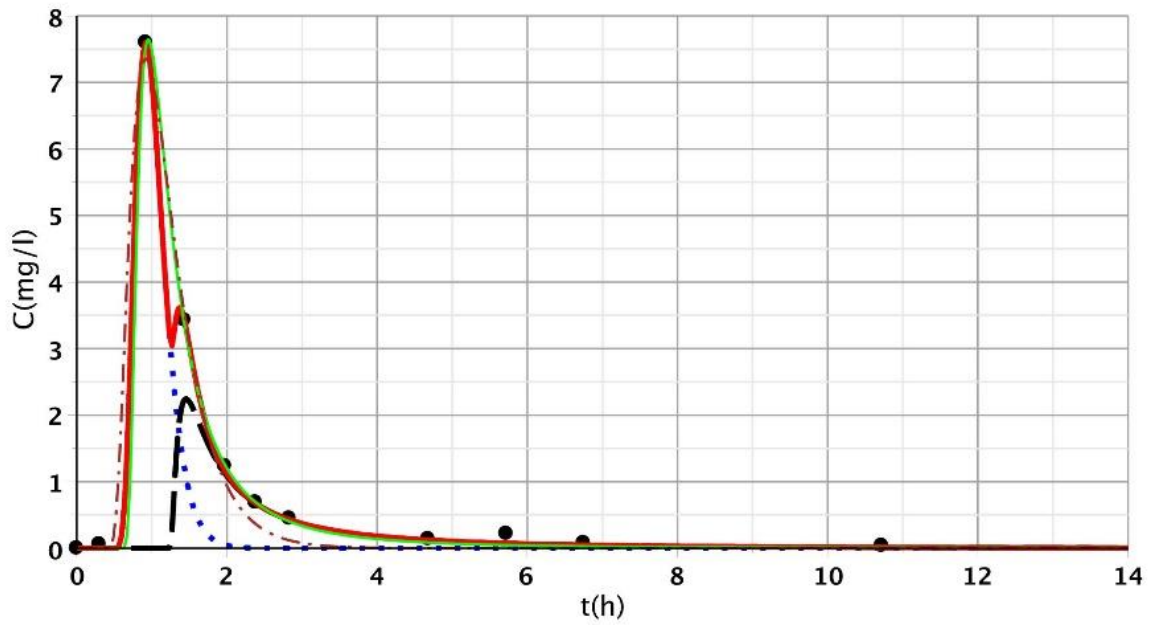


175. ábra: Három modell illesztési eredményei (D-CDT, Fréchet, CDT) az S/2 VII. felső ponton

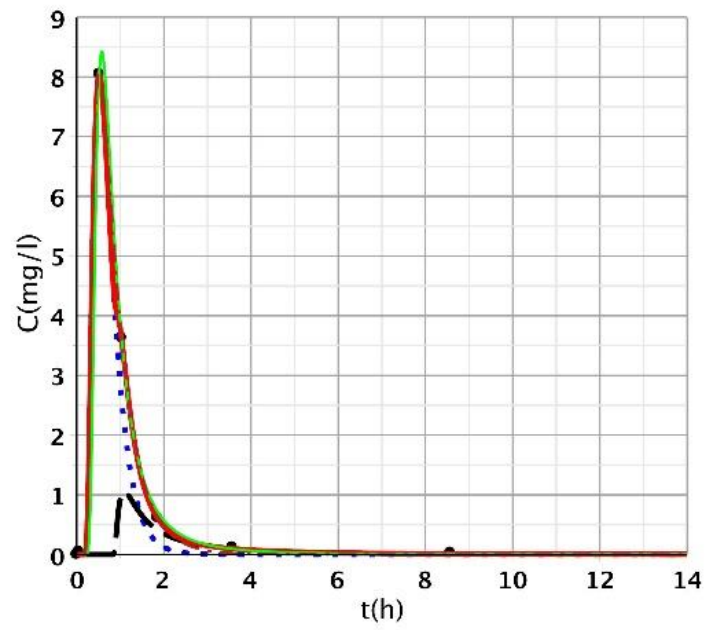


176. ábra: Három modell illesztési eredményei (D-CDT, Fréchet, CDT) az S/2 VIII. felső ponton

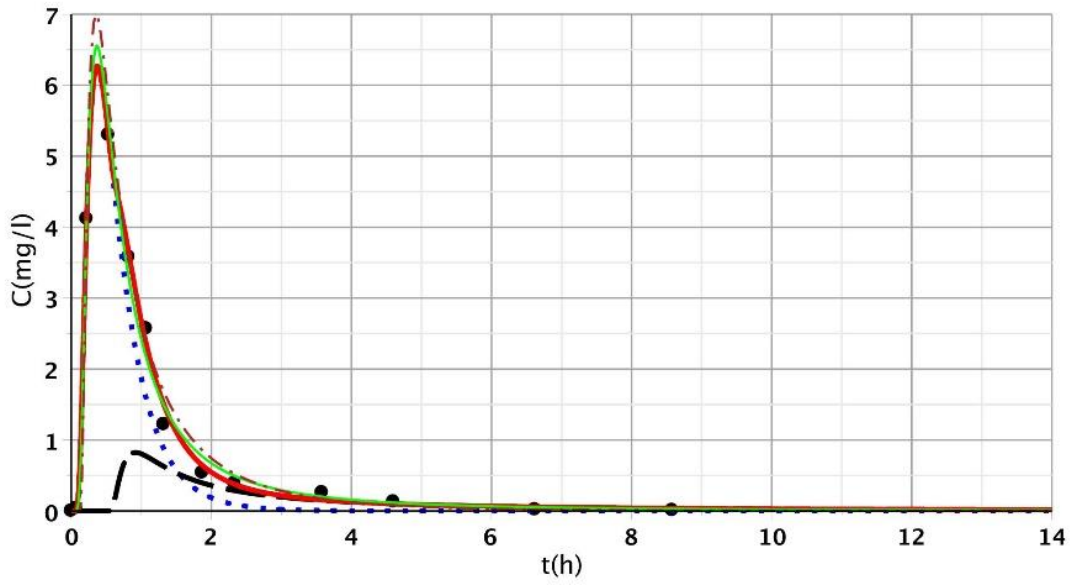




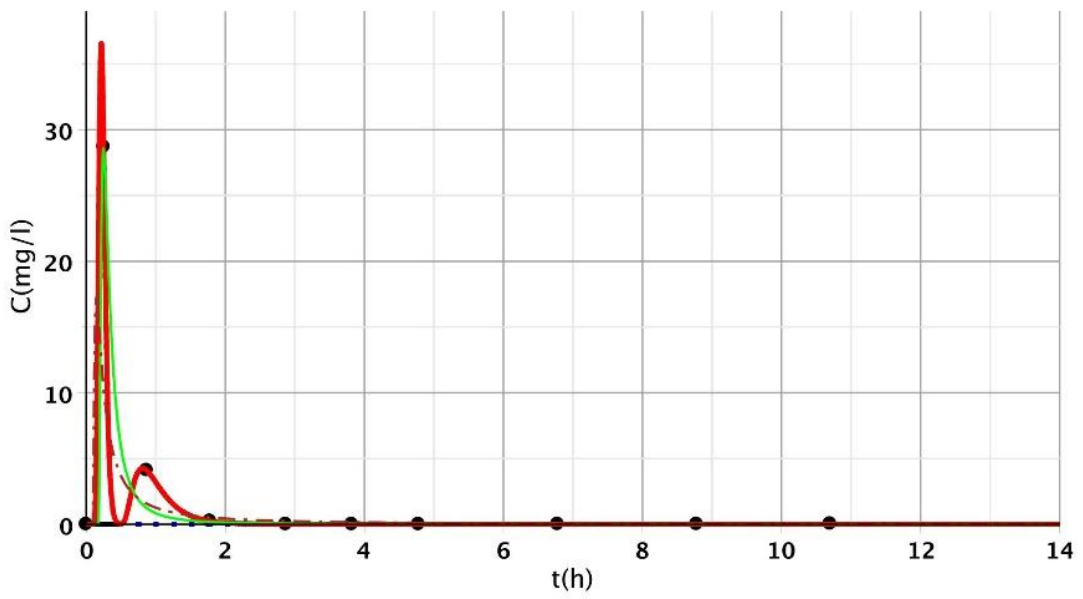
177. ábra: Három modell illesztési eredményei (D-CDT, Fréchet, CDT) az S/2 IX. felső ponton



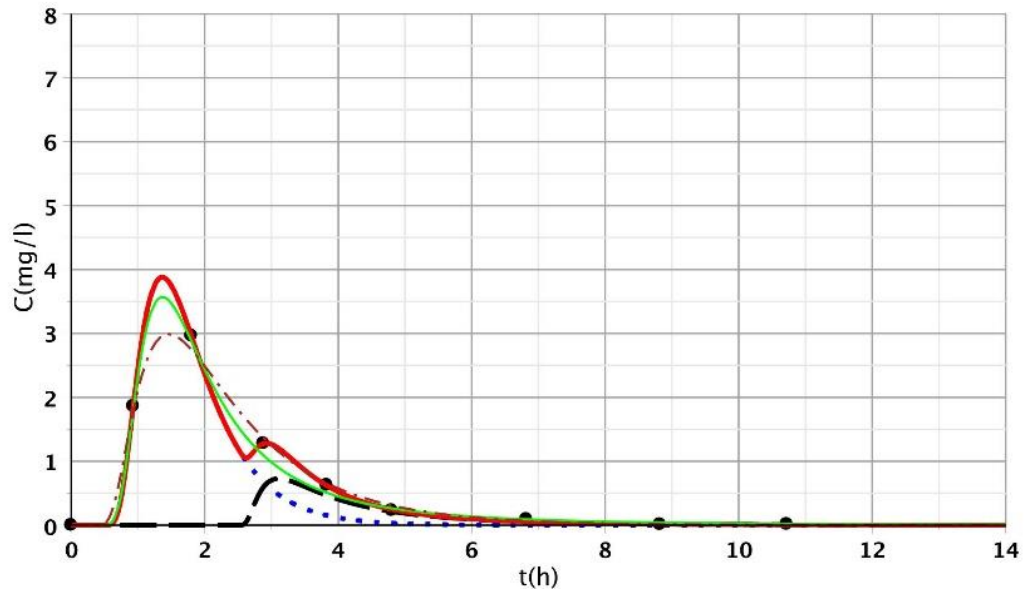
178. ábra: Három modell illesztési eredményei (D-CDT, Fréchet, CDT) az S/2 I. alsó ponton



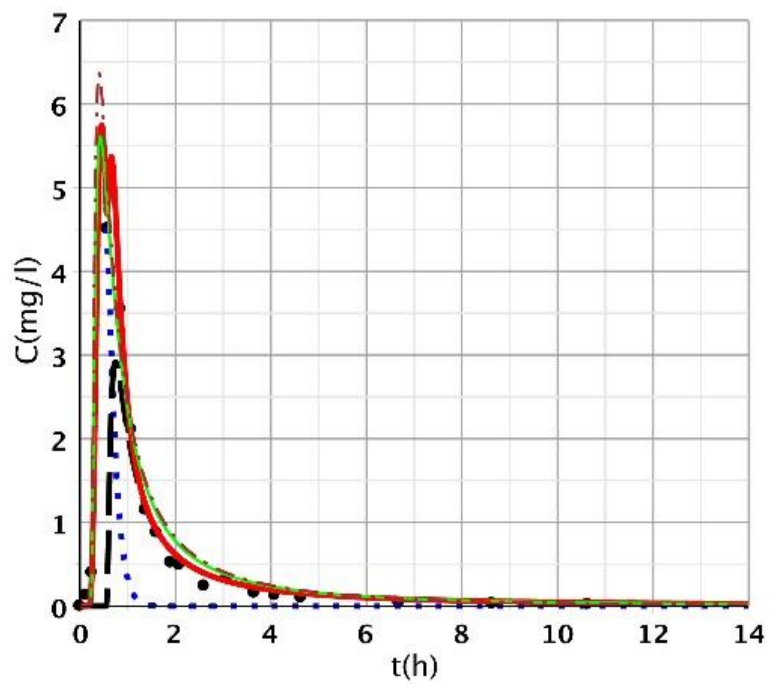
179. ábra: Három modell illesztési eredményei (D-CDT, Fréchet, CDT) az S/2 II. alsó ponton



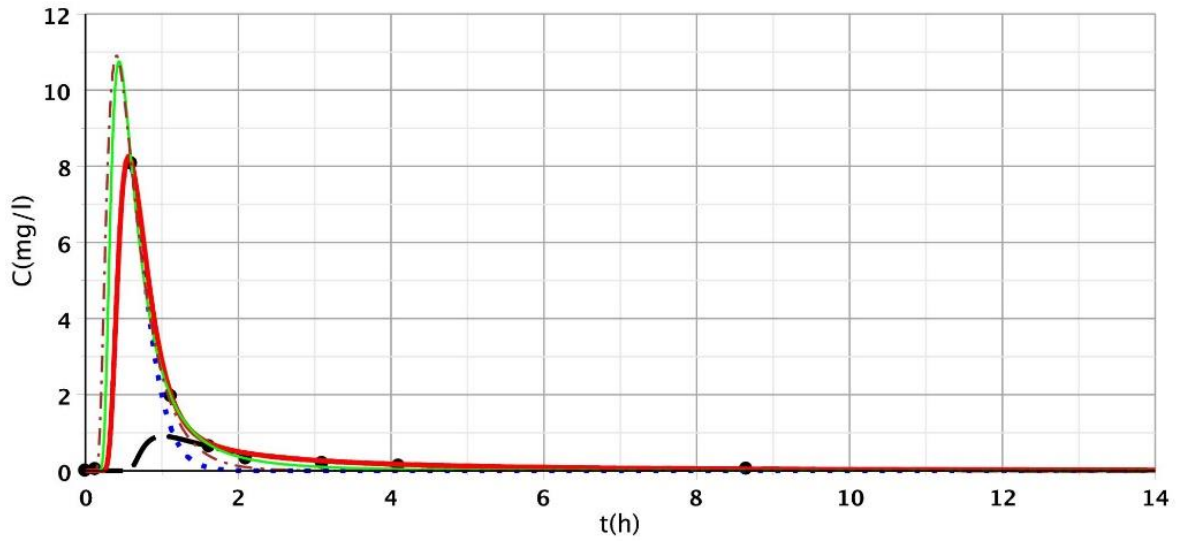
180. ábra: Három modell illesztési eredményei (D-CDT, Fréchet, CDT) az S/2 III. alsó ponton



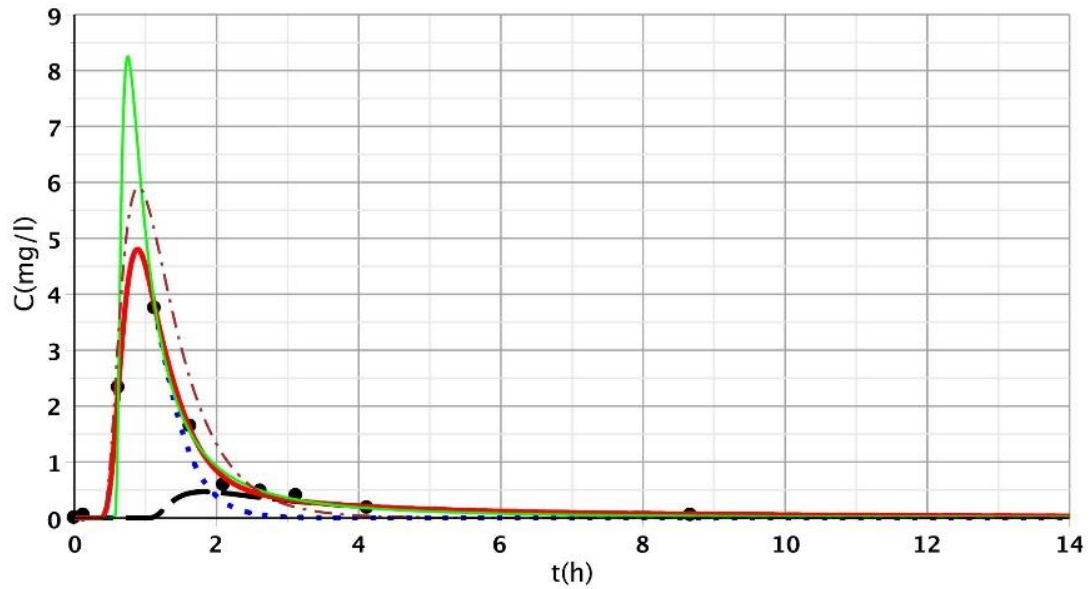
181. ábra: Három modell illesztési eredményei (D-CDT, Fréchet, CDT) az S/2 IV. alsó ponton



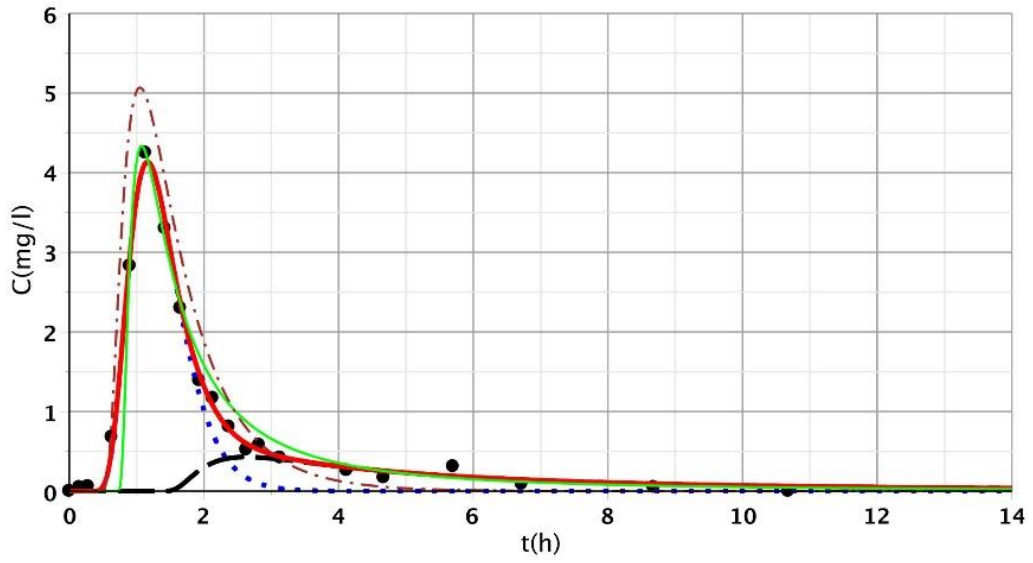
182. ábra: Három modell illesztési eredményei (D-CDT, Fréchet, CDT) az S/2 V. alsó ponton



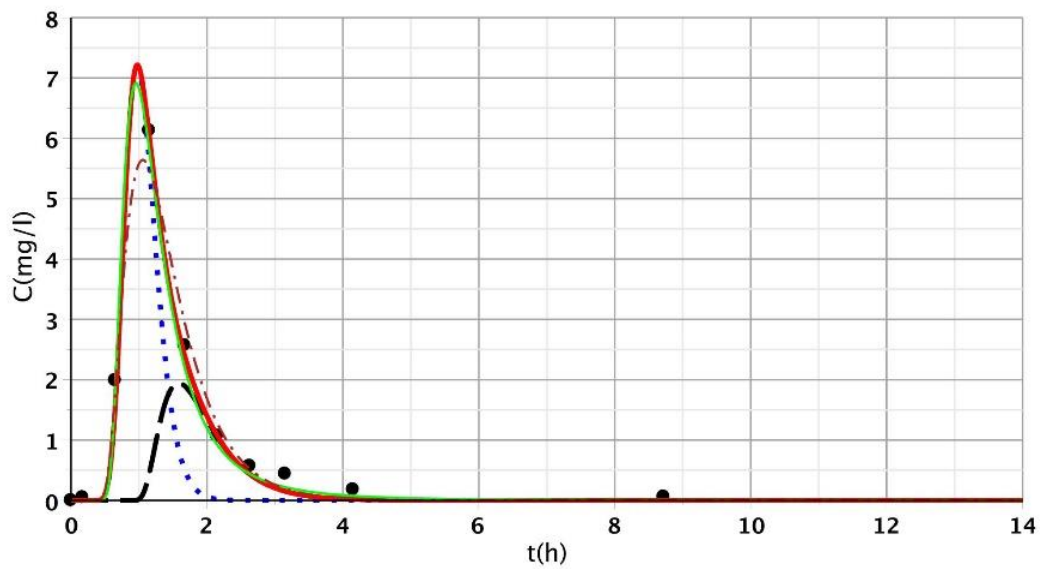
183. ábra: Három modell illesztési eredményei (D-CDT, Fréchet, CDT) az S/2 VI. alsó ponton



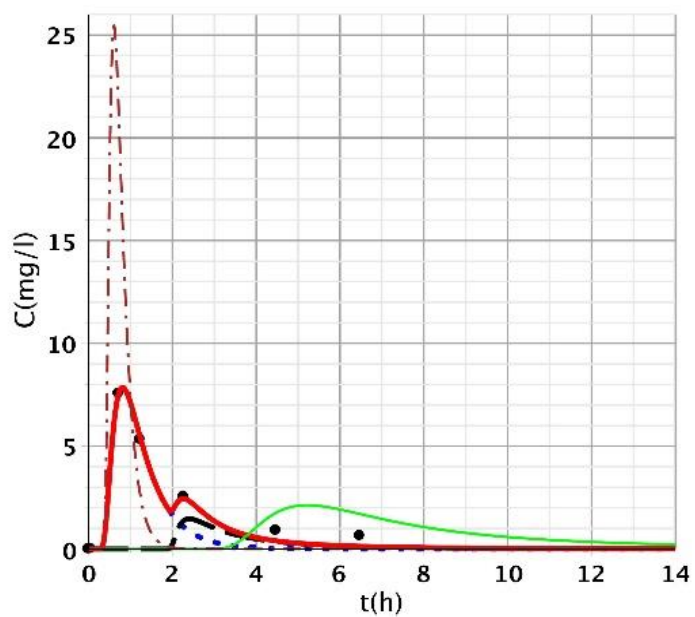
184. ábra: Három modell illesztési eredményei (D-CDT, Fréchet, CDT) az S/2 VII. alsó ponton



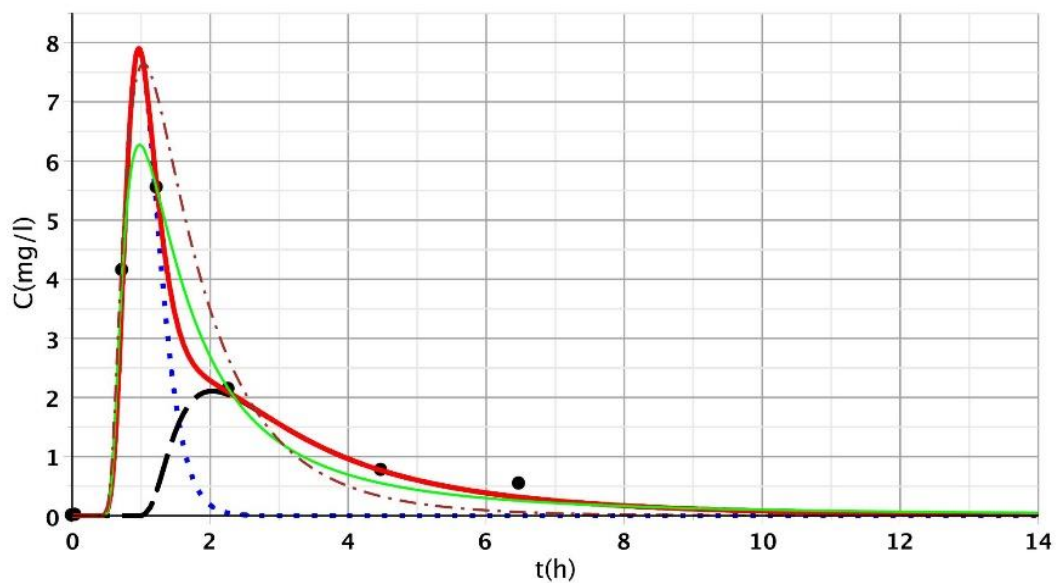
185. ábra: Három modell illesztési eredményei (D-CDT, Fréchet, CDT) az S/2 VIII. alsó ponton



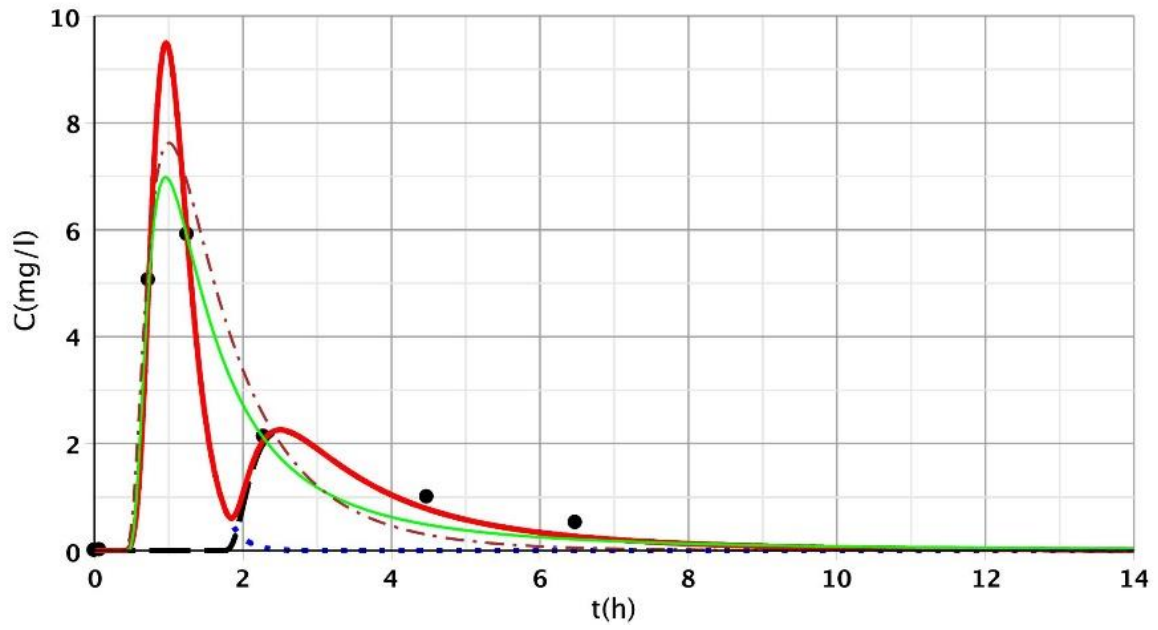
186. ábra: Három modell illesztési eredményei (D-CDT, Fréchet, CDT) az S/2 IX. alsó ponton



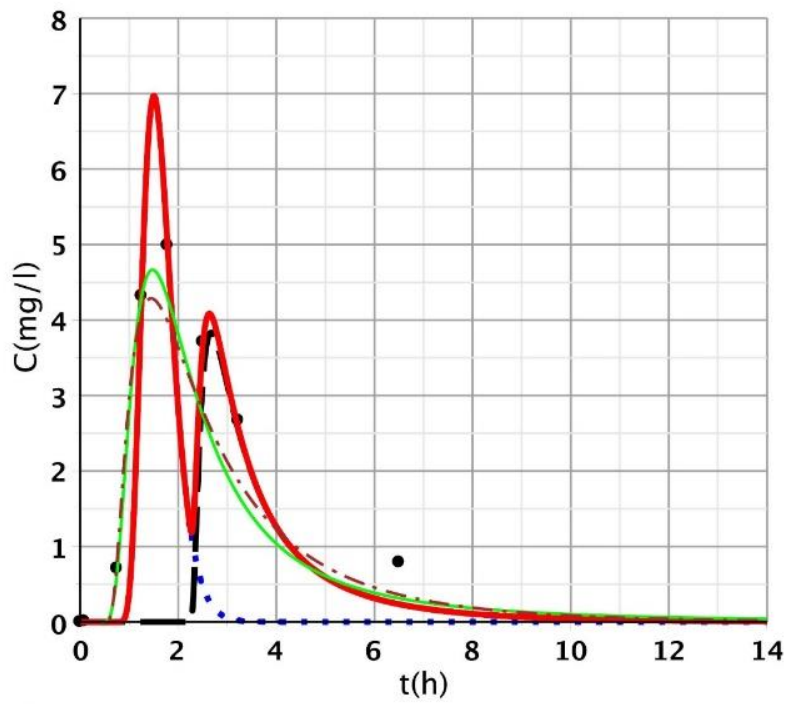
187. ábra: Három modell illesztési eredményei (D-CDT, Fréchet, CDT) az S/3 I. felső ponton



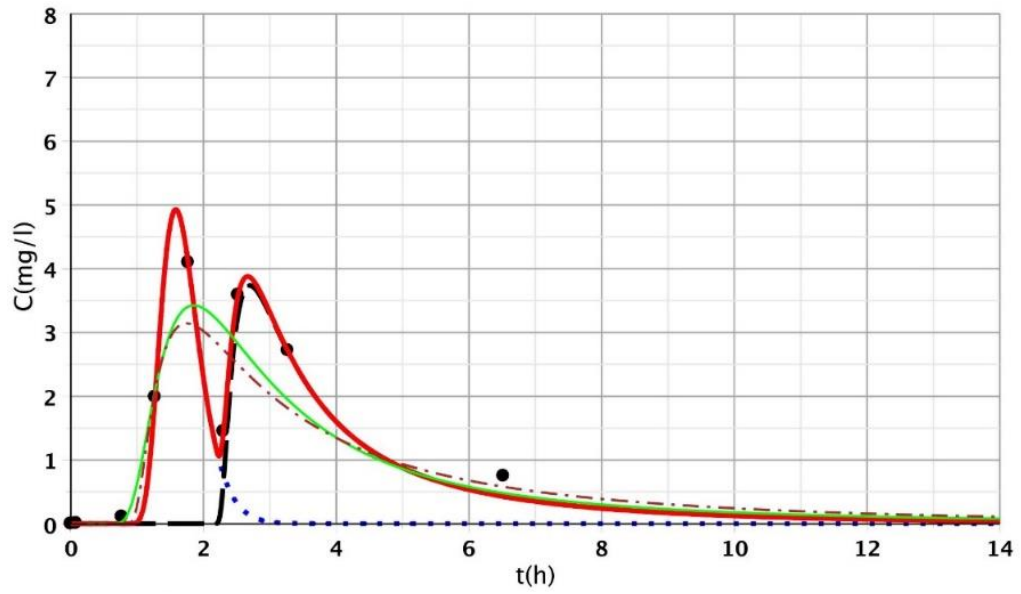
188. ábra: Három modell illesztési eredményei (D-CDT, Fréchet, CDT) az S/3 II. felső ponton



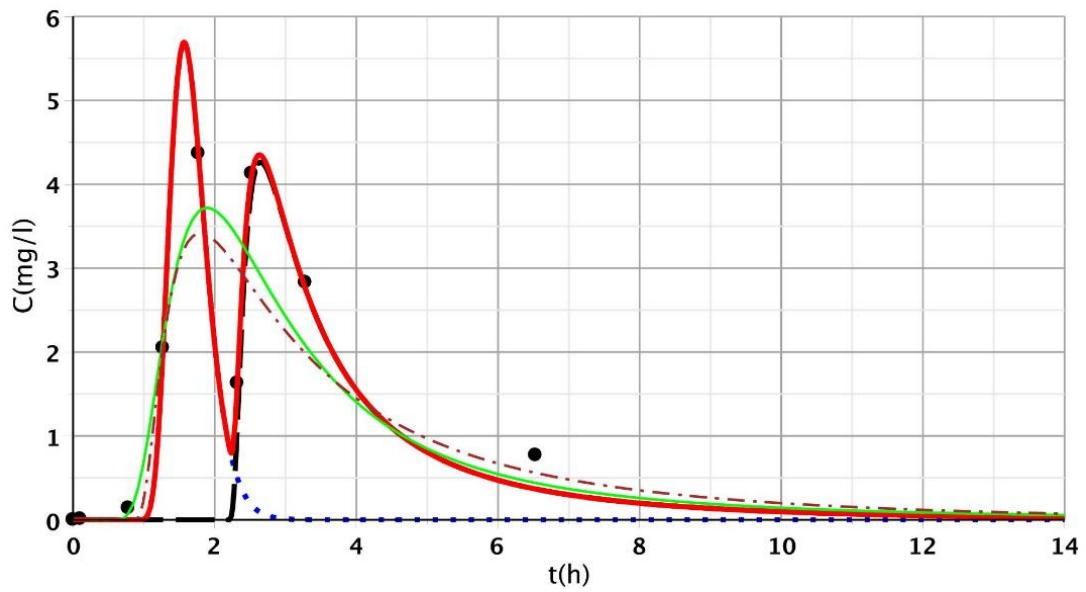
189. ábra: Három modell illesztési eredményei (D-CDT, Fréchet, CDT) az S/3 III. felső ponton



190. ábra: Három modell illesztési eredményei (D-CDT, Fréchet, CDT) az S/3 IV. felső ponton

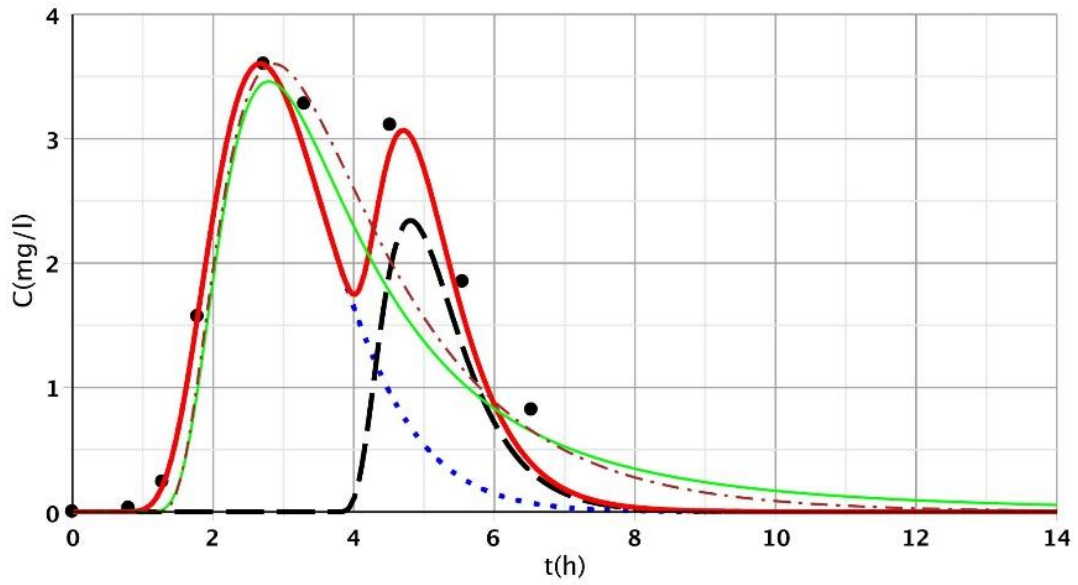


191. ábra: Három modell illesztési eredményei (D-CDT, Fréchet, CDT) az S/3 V. felső ponton

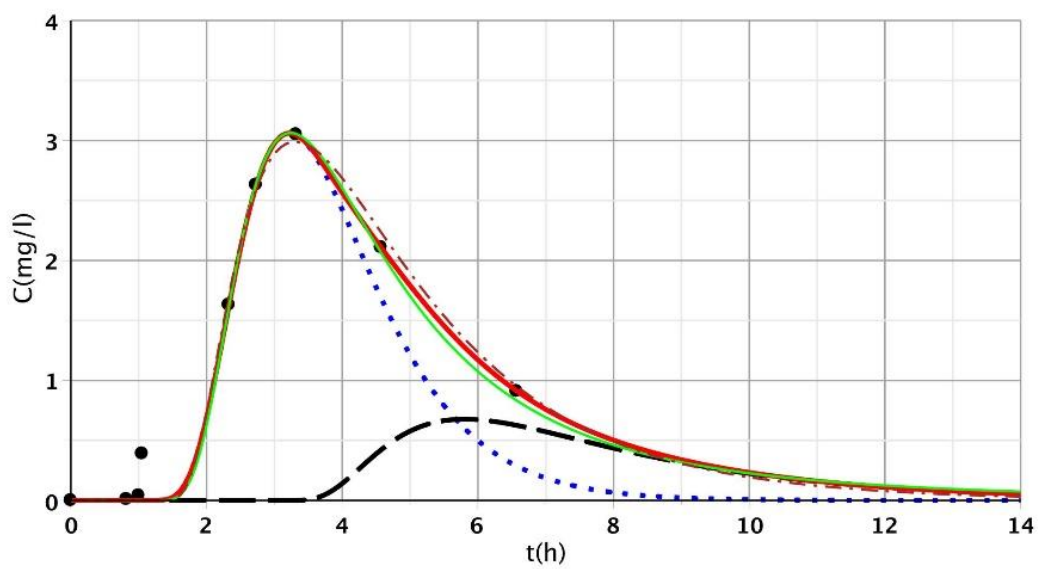


192. ábra: Három modell illesztési eredményei (D-CDT, Fréchet, CDT) az S/3 VI. felső ponton

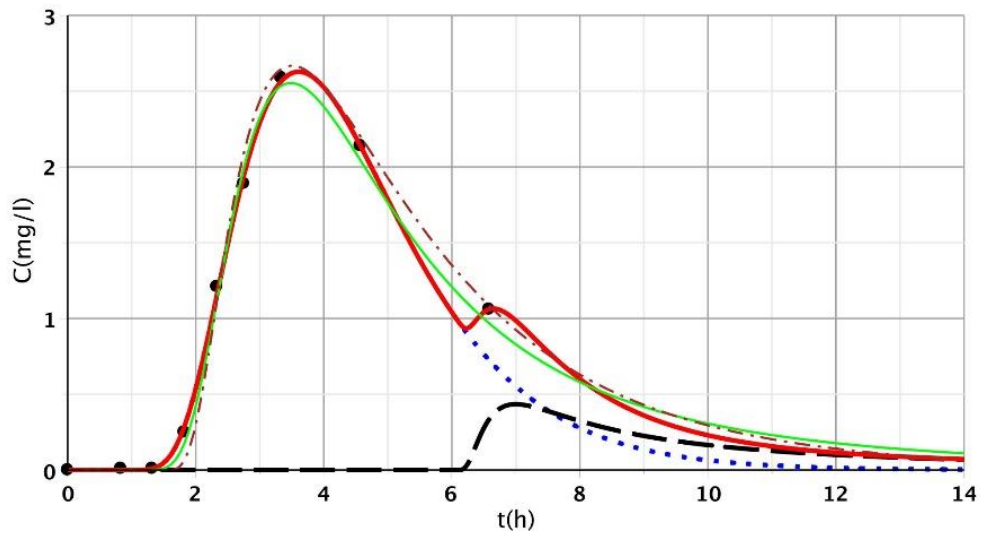




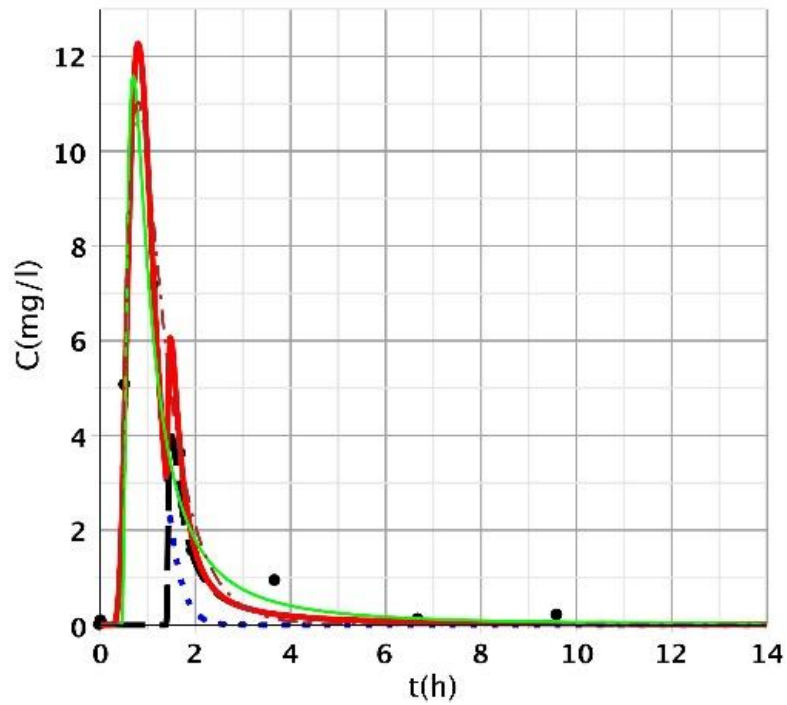
193. ábra: Három modell illesztési eredményei (D-CDT, Fréchet, CDT) az S/3 VII. felső ponton



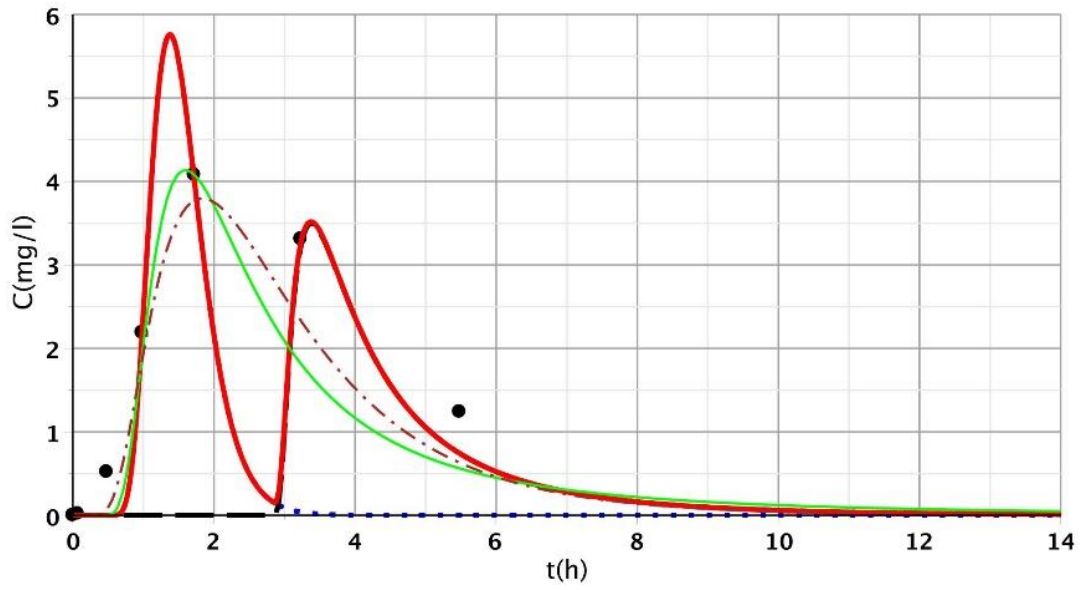
194. ábra: Három modell illesztési eredményei (D-CDT, Fréchet, CDT) az S/3 VIII. felső ponton



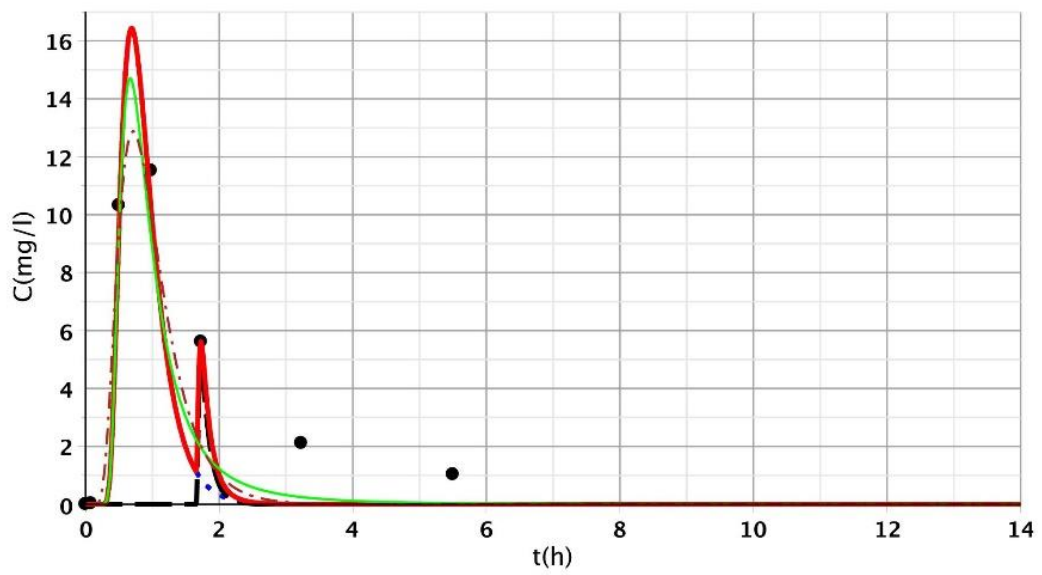
195. ábra: Három modell illesztési eredményei (D-CDT, Fréchet, CDT) az S/3 IX. felső ponton



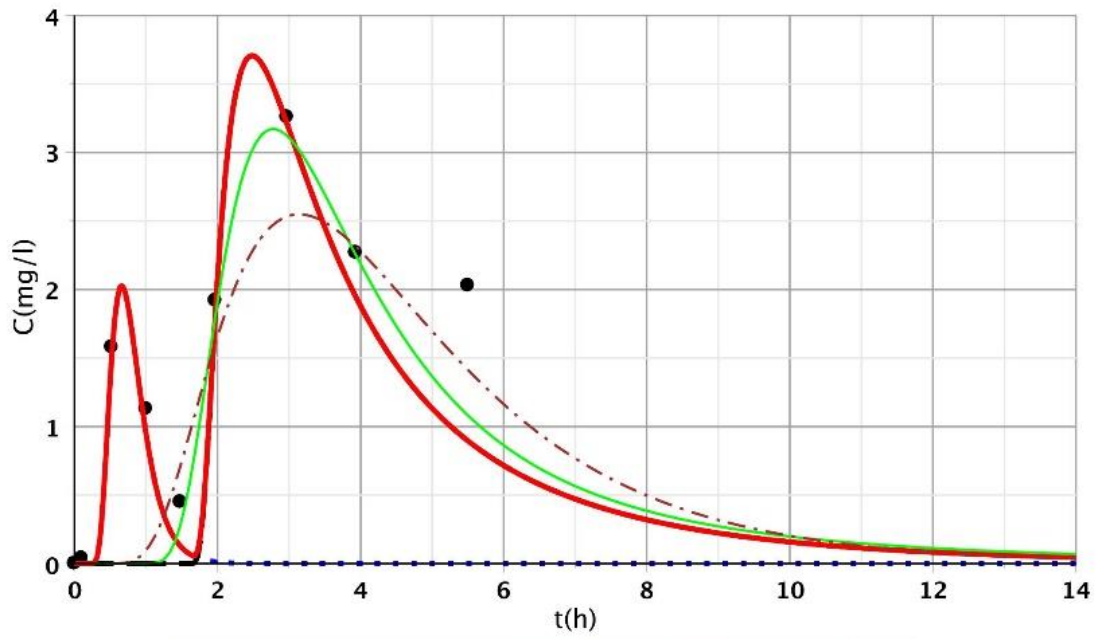
196. ábra: Három modell illesztési eredményei (D-CDT, Fréchet, CDT) az S/3 I. alsó ponton



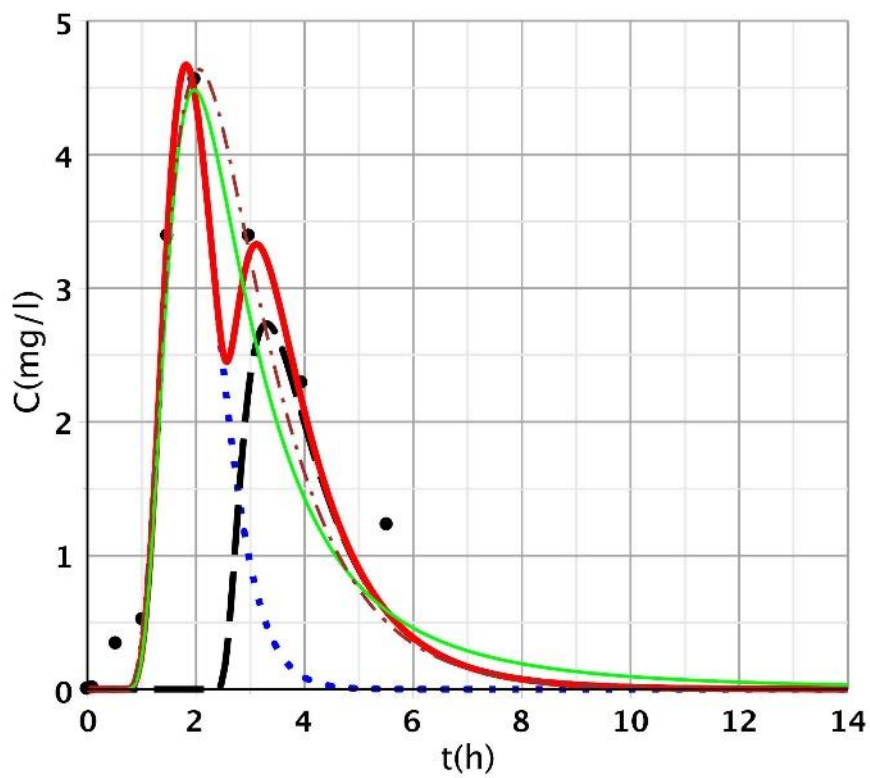
197. ábra: Három modell illesztési eredményei (D-CDT, Fréchet, CDT) az S/3 II. alsó ponton



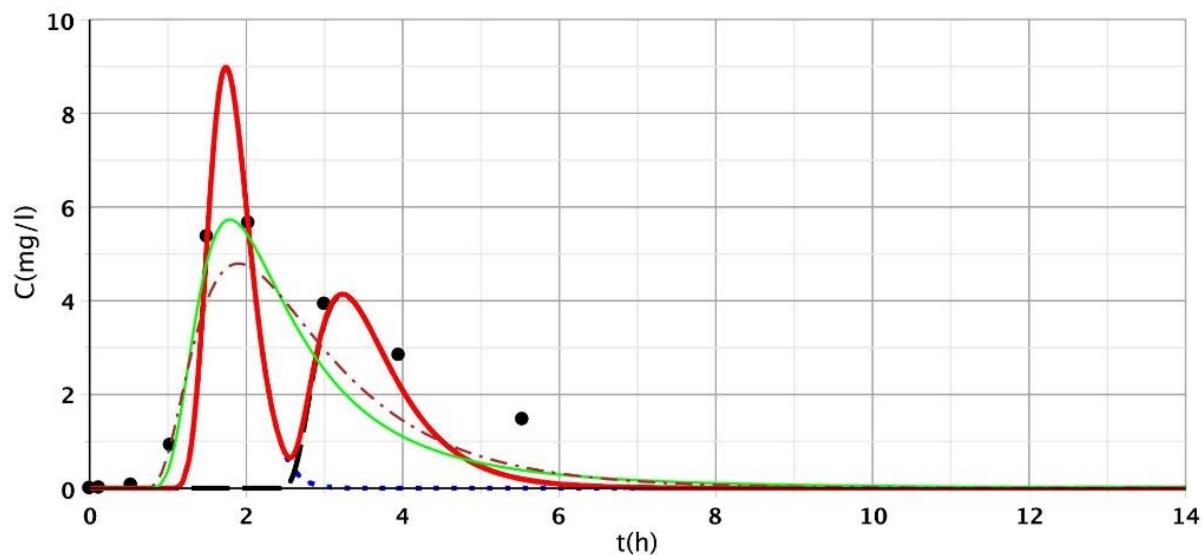
198. ábra: Három modell illesztési eredményei (D-CDT, Fréchet, CDT) az S/3 III. alsó ponton



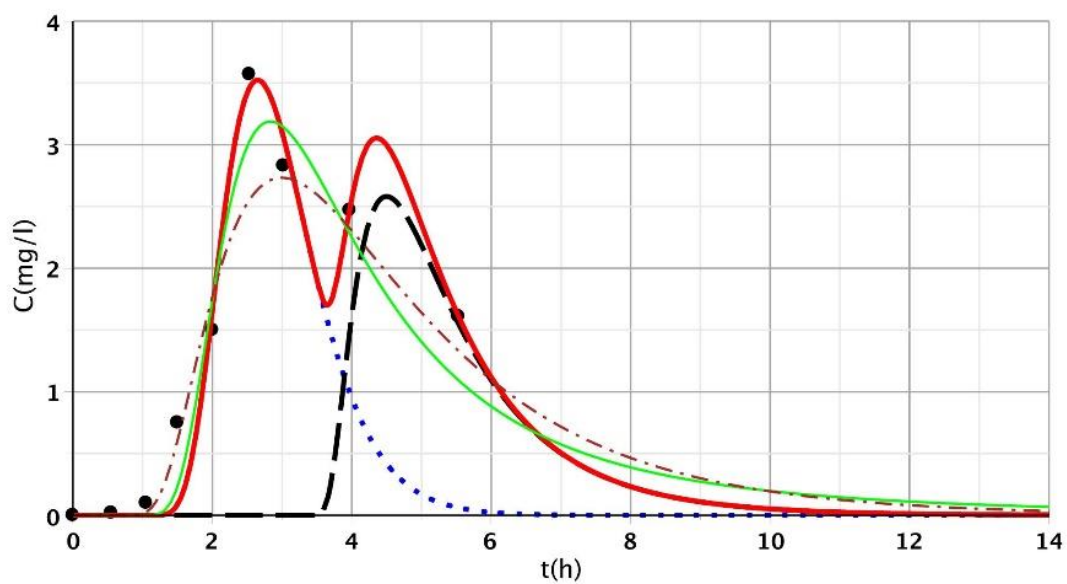
199. ábra: Három modell illesztési eredményei (D-CDT, Fréchet, CDT) az S/3 IV. alsó ponton



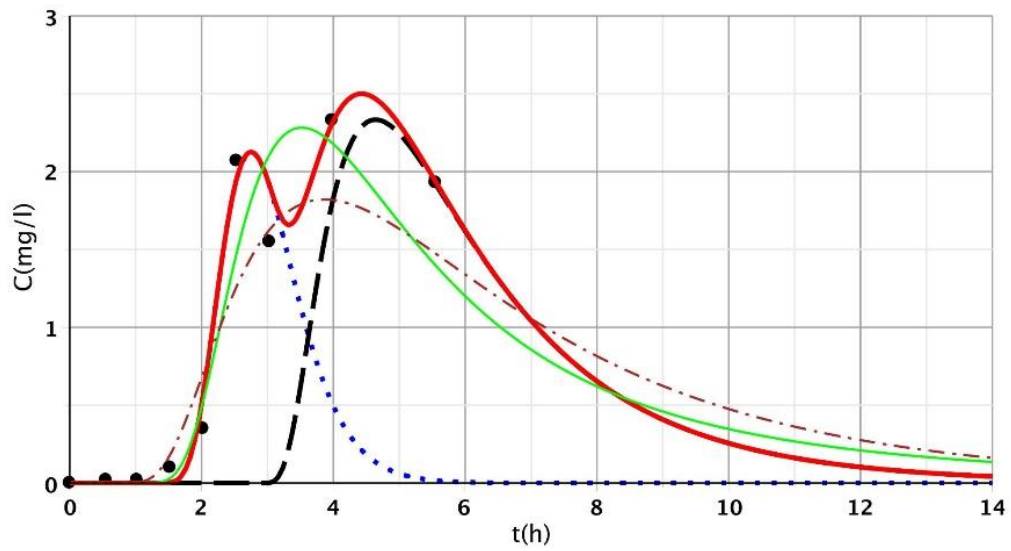
200. ábra: Három modell illesztési eredményei (D-CDT, Fréchet, CDT) az S/3 V. alsó ponton



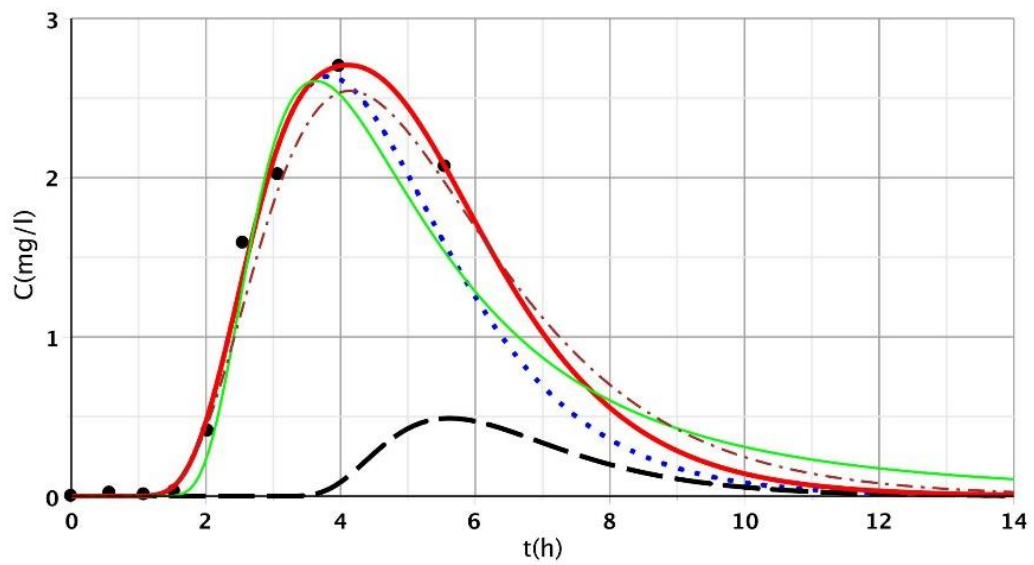
201. ábra: Három modell illesztési eredményei (D-CDT, Fréchet, CDT) az S/3 VI. alsó ponton



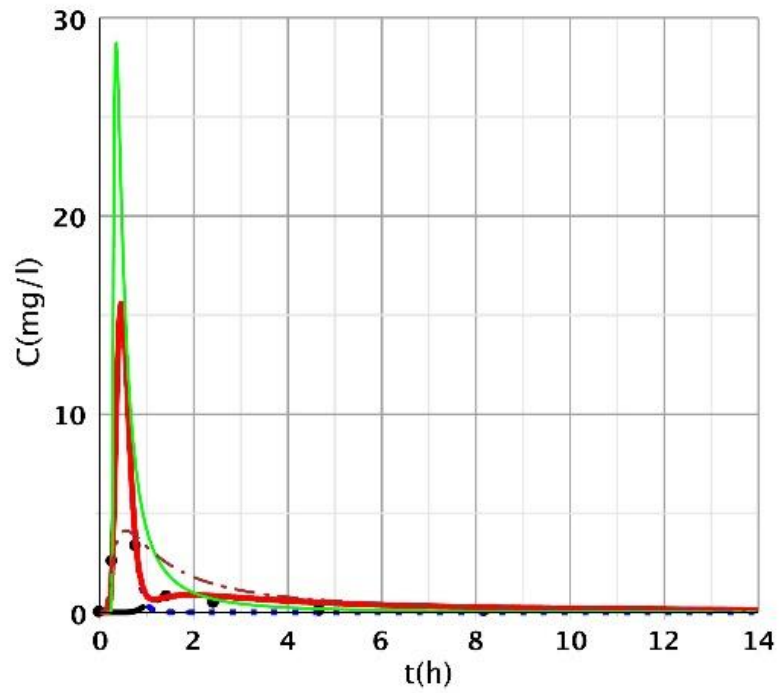
202. ábra: Három modell illesztési eredményei (D-CDT, Fréchet, CDT) az S/3 VII. alsó ponton



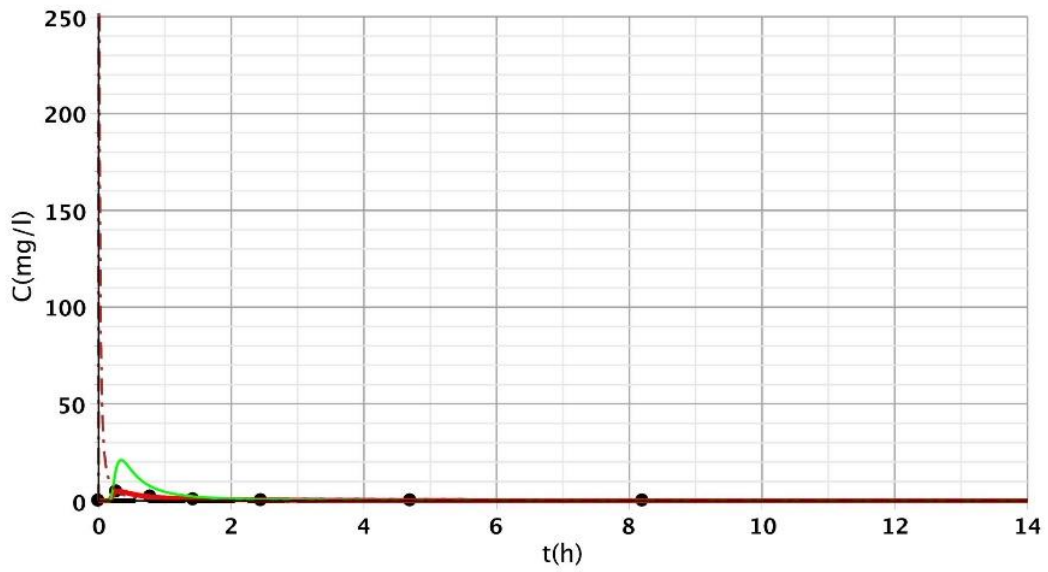
203. ábra: Három modell illesztési eredményei (D-CDT, Fréchet, CDT) az S/3 VIII. alsó ponton



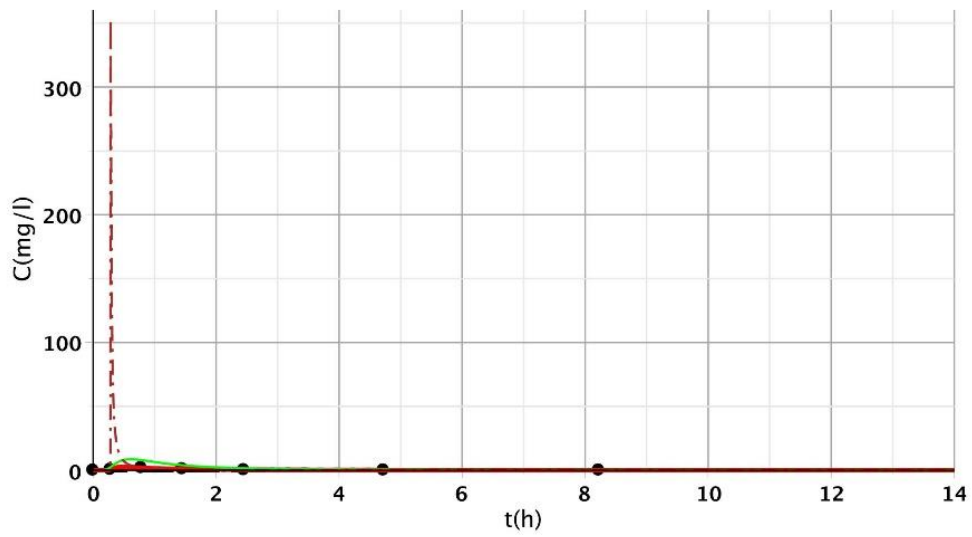
204. ábra: Három modell illesztési eredményei (D-CDT, Fréchet, CDT) az S/3 IX. alsó ponton



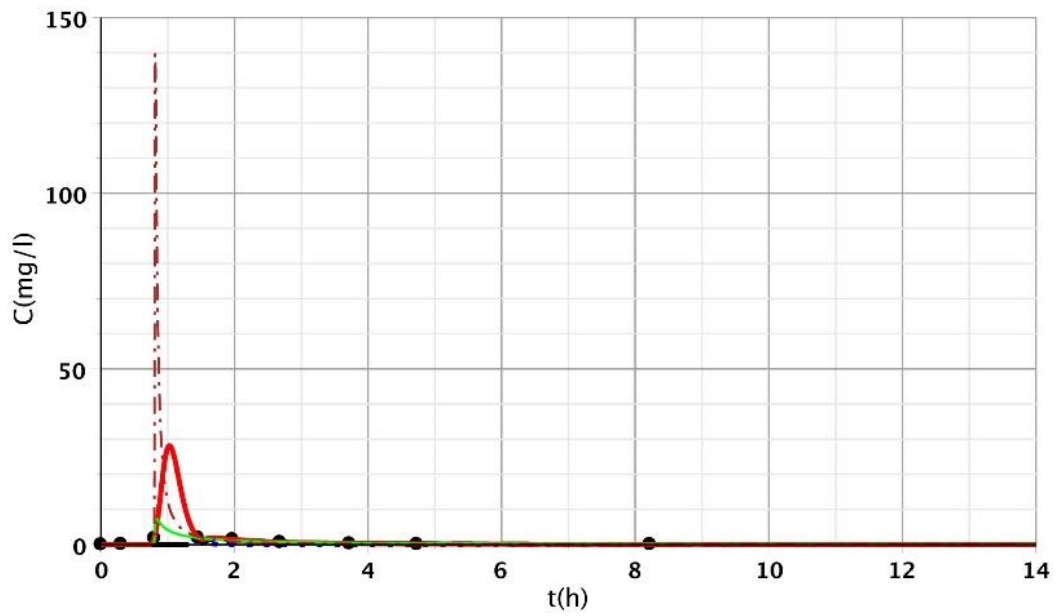
205. ábra: Három modell illesztési eredményei (D-CDT, Fréchet, CDT) az S/4 I. felső ponton



206. ábra: Három modell illesztési eredményei (D-CDT, Fréchet, CDT) az S/4 II. felső ponton

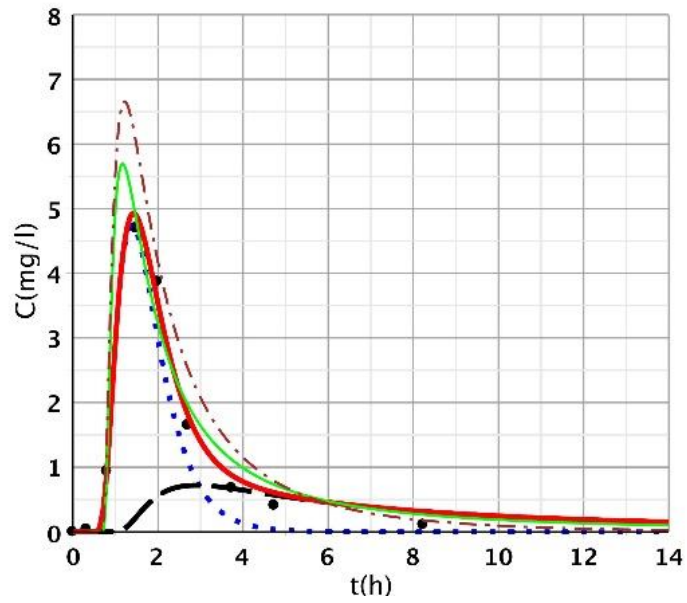


207. ábra: Három modell illesztési eredményei (D-CDT, Fréchet, CDT) az S/4 III. felső ponton

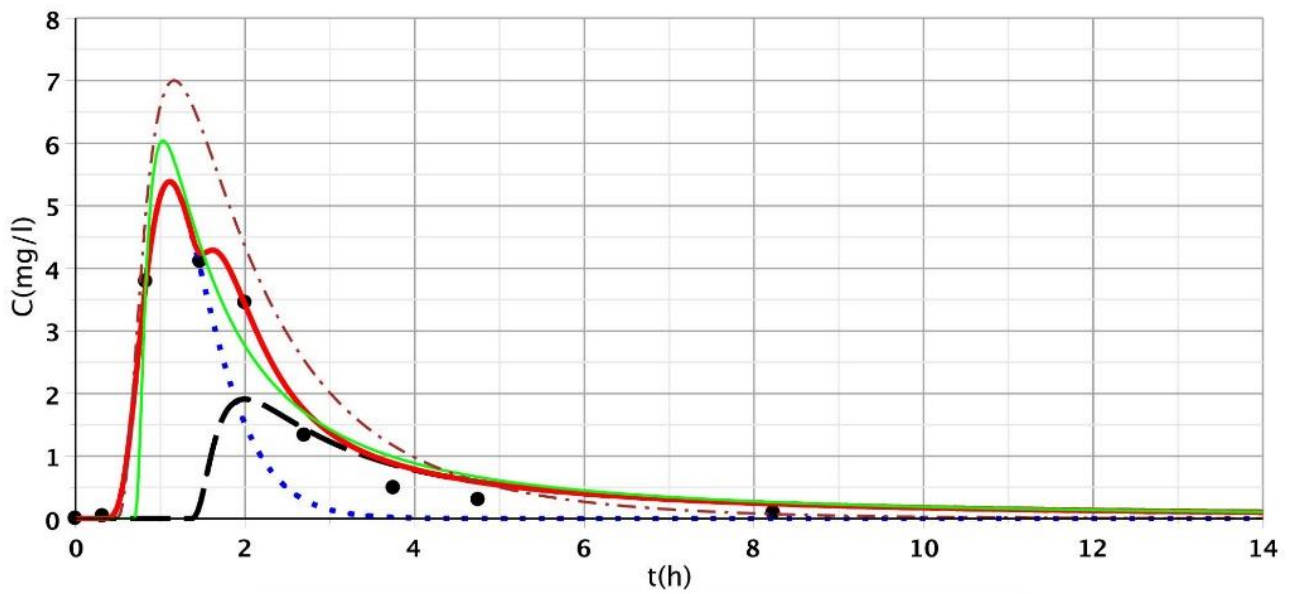


208. ábra: Három modell illesztési eredményei (D-CDT, Fréchet, CDT) az S/4 IV. felső ponton

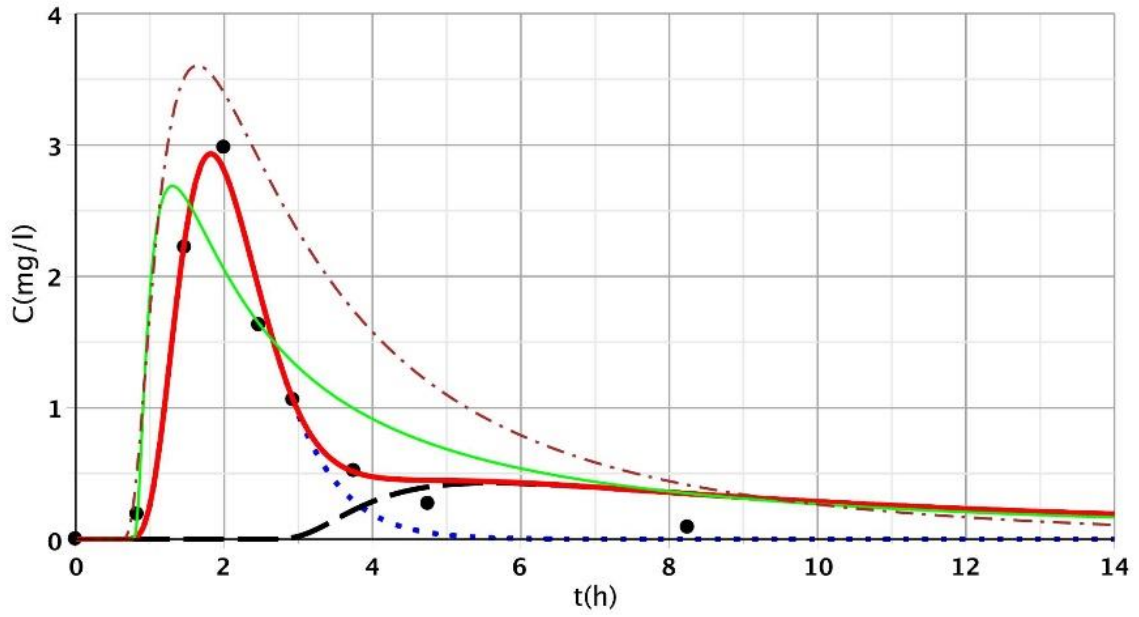




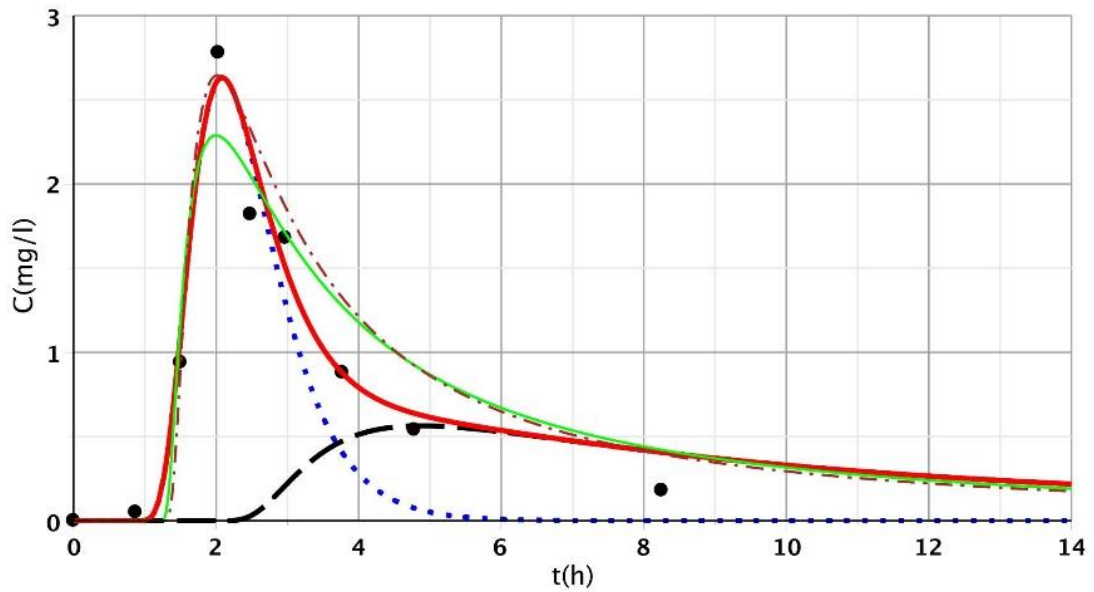
209. ábra: Három modell illesztési eredményei (D-CDT, Fréchet, CDT) az S/4 V. felső ponton



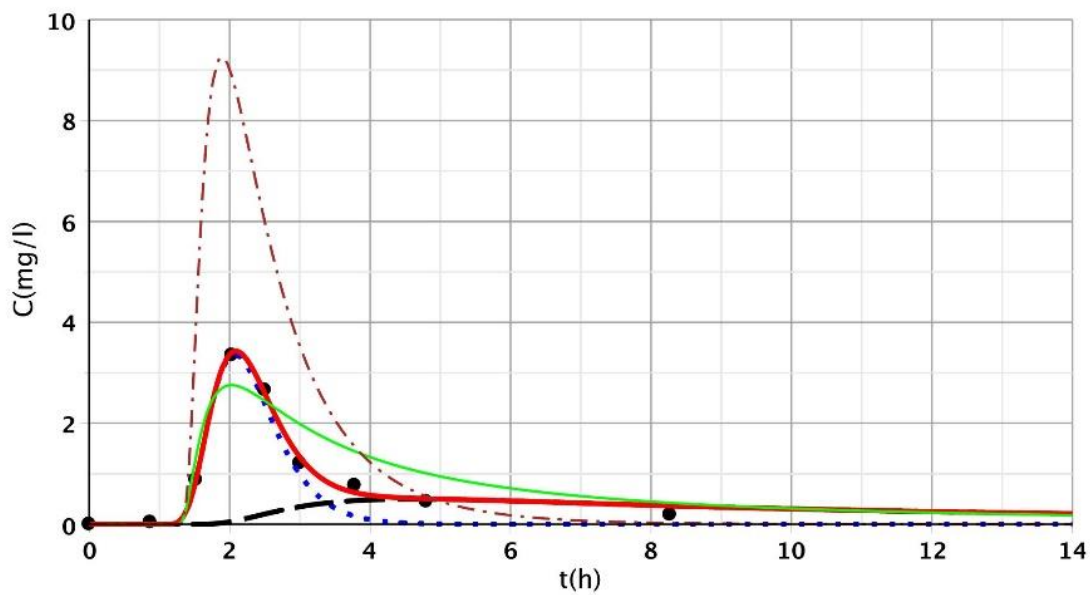
210. ábra: Három modell illesztési eredményei (D-CDT, Fréchet, CDT) az S/4 VI. felső ponton



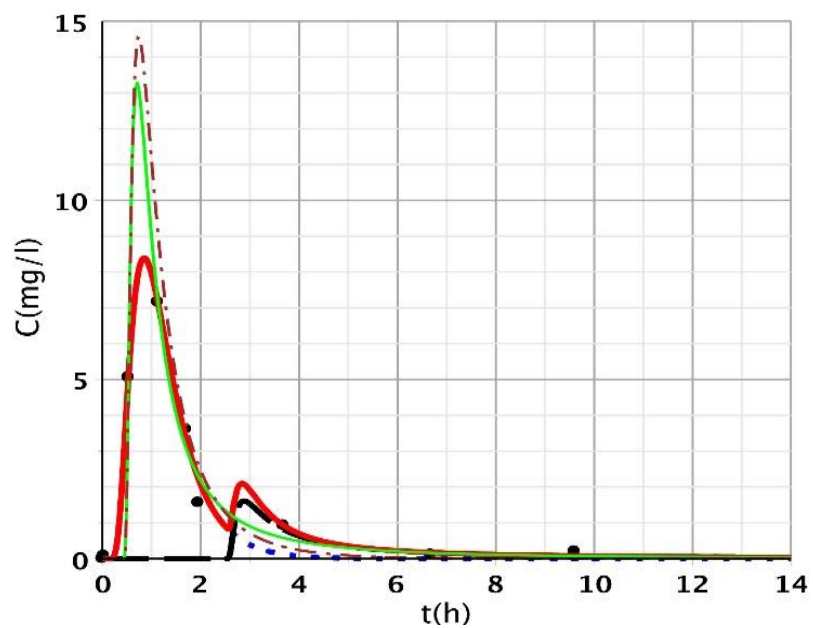
211. ábra: Három modell illesztési eredményei (D-CDT, Fréchet, CDT) az S/4 VII. felső ponton



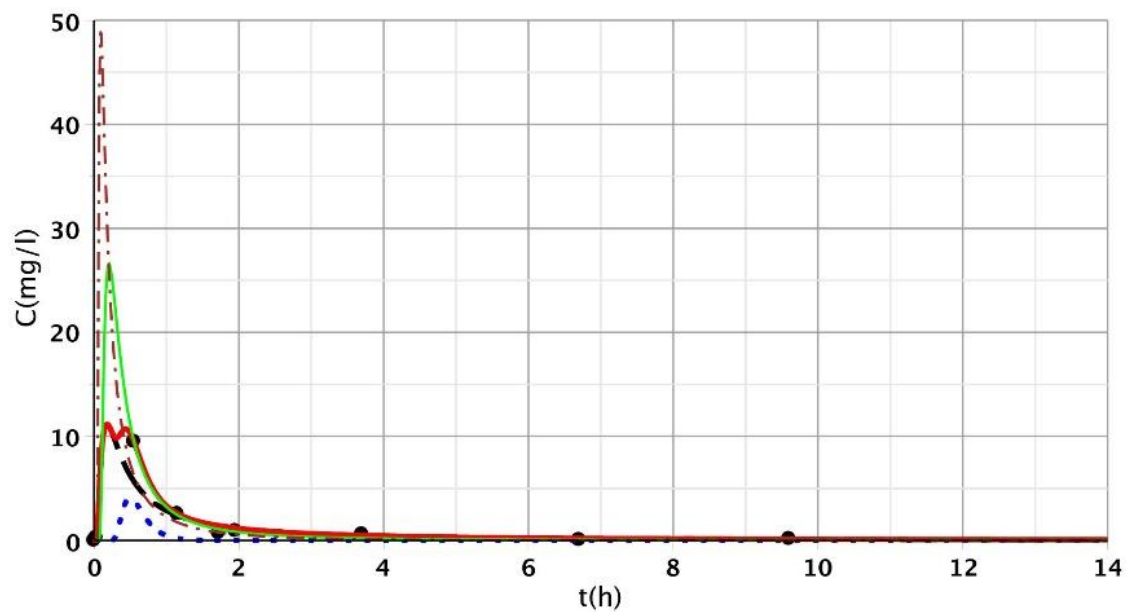
212. ábra: Három modell illesztési eredményei (D-CDT, Fréchet, CDT) az S/4 VIII. felső ponton



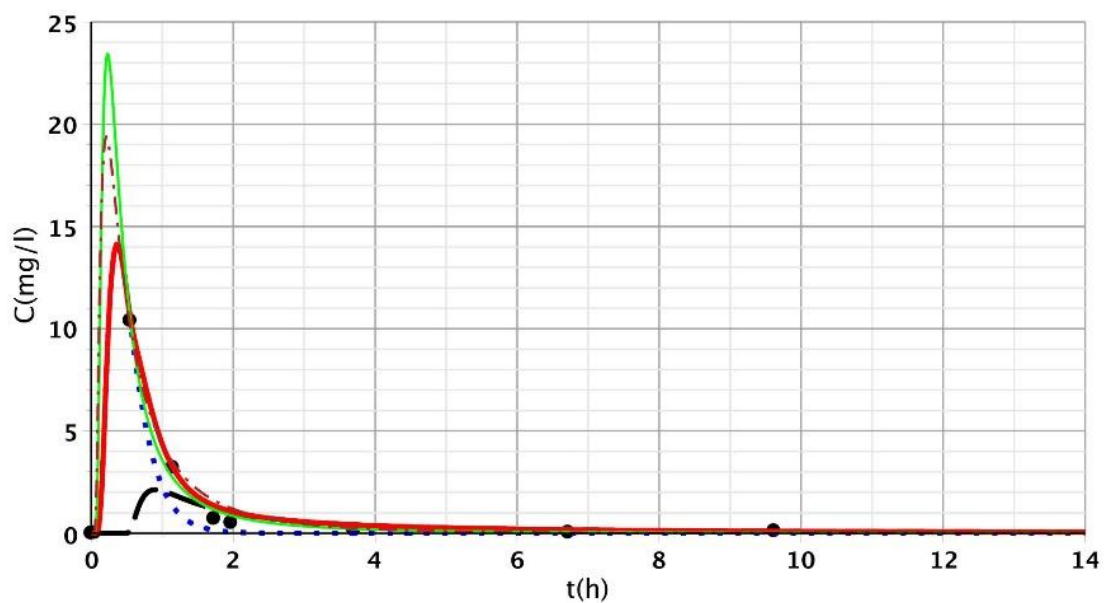
213. ábra: Három modell illesztési eredményei (D-CDT, Fréchet, CDT) az S/4 IX. felső ponton



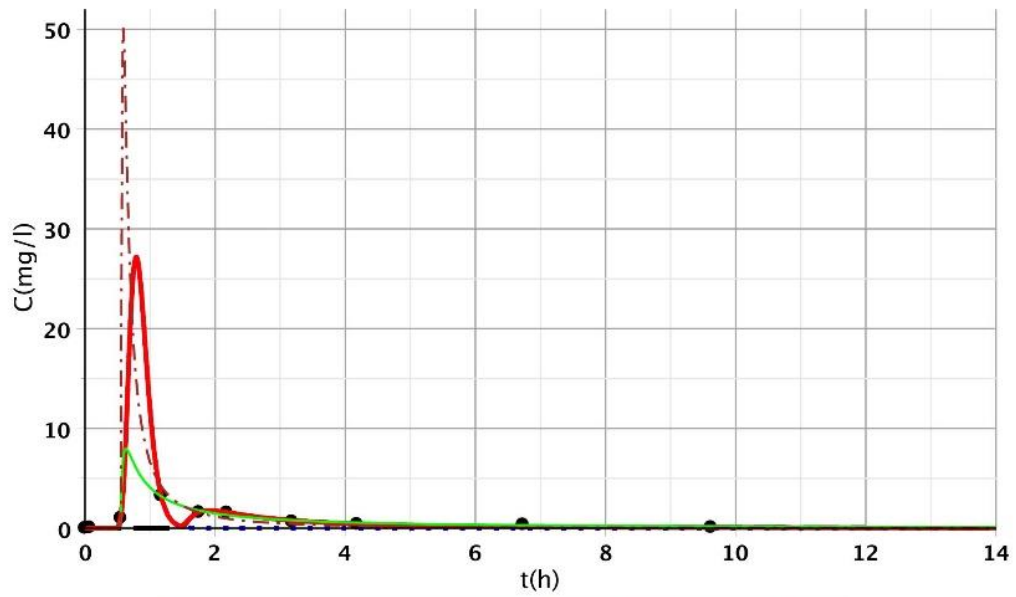
214. ábra: Három modell illesztési eredményei (D-CDT, Fréchet, CDT) az S/4 I. alsó ponton



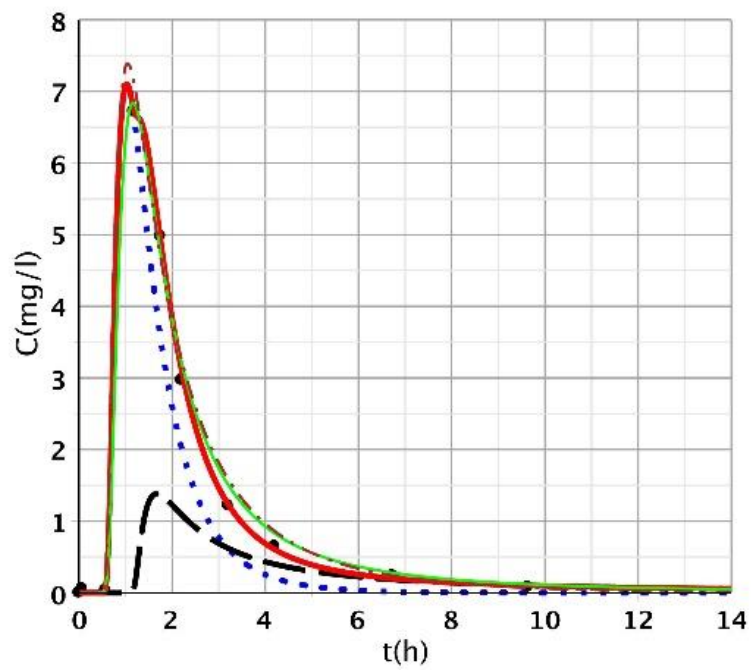
215. ábra: Három modell illesztési eredményei (D-CDT, Fréchet, CDT) az S/4 II. alsó ponton



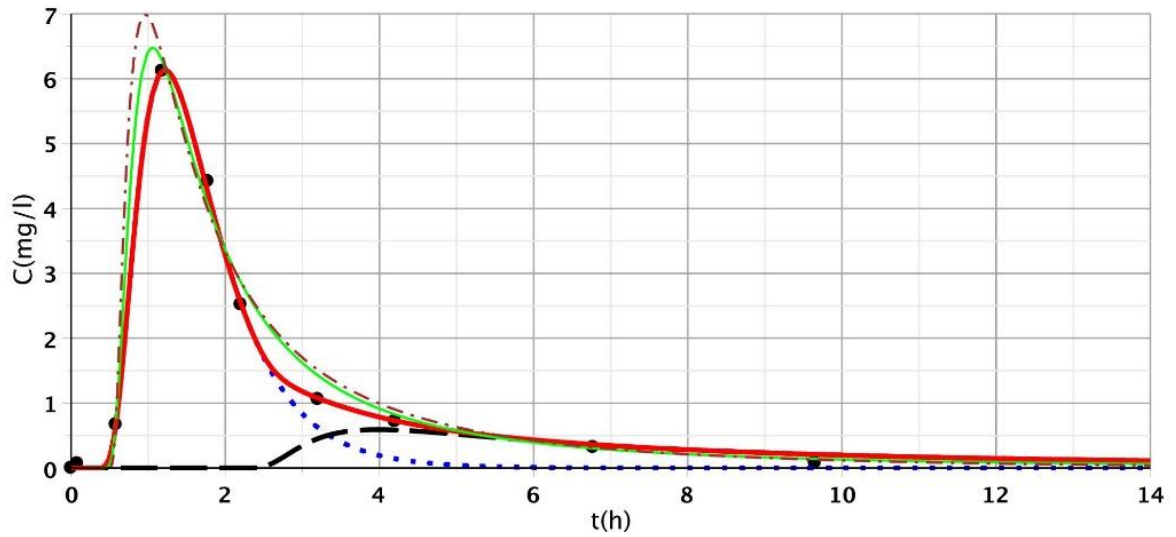
216. ábra: Három modell illesztési eredményei (D-CDT, Fréchet, CDT) az S/4 III. alsó ponton



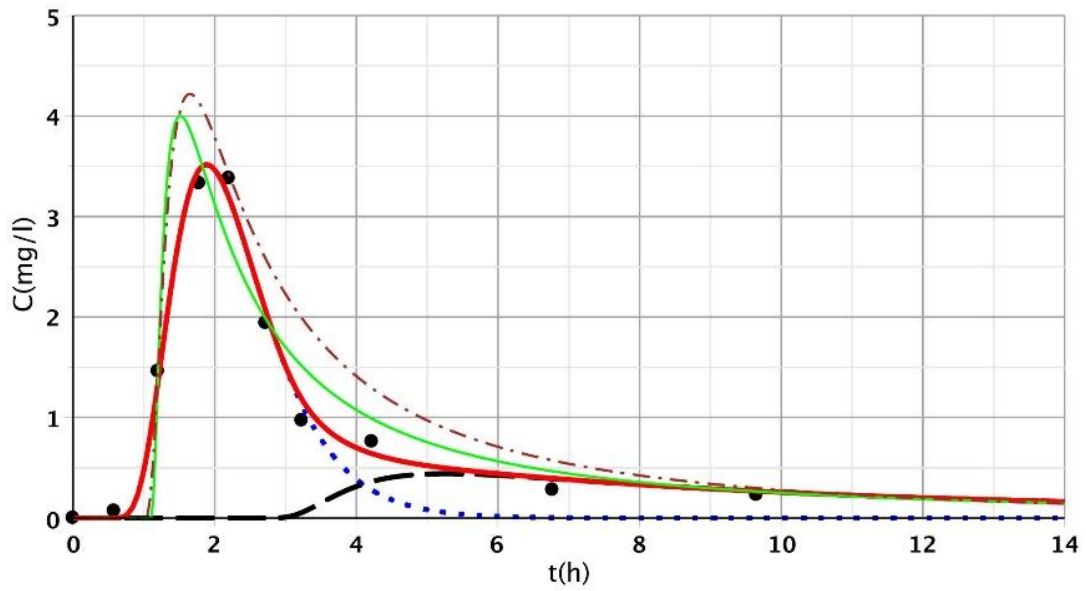
217. ábra: Három modell illesztési eredményei (D-CDT, Fréchet, CDT) az S/4 IV. alsó ponton



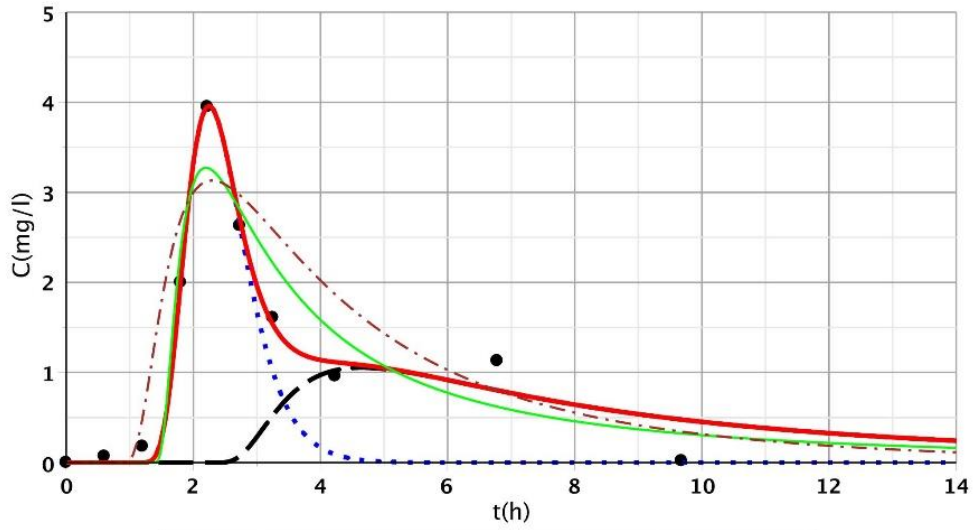
218. ábra: Három modell illesztési eredményei (D-CDT, Fréchet, CDT) az S/4 V. alsó ponton



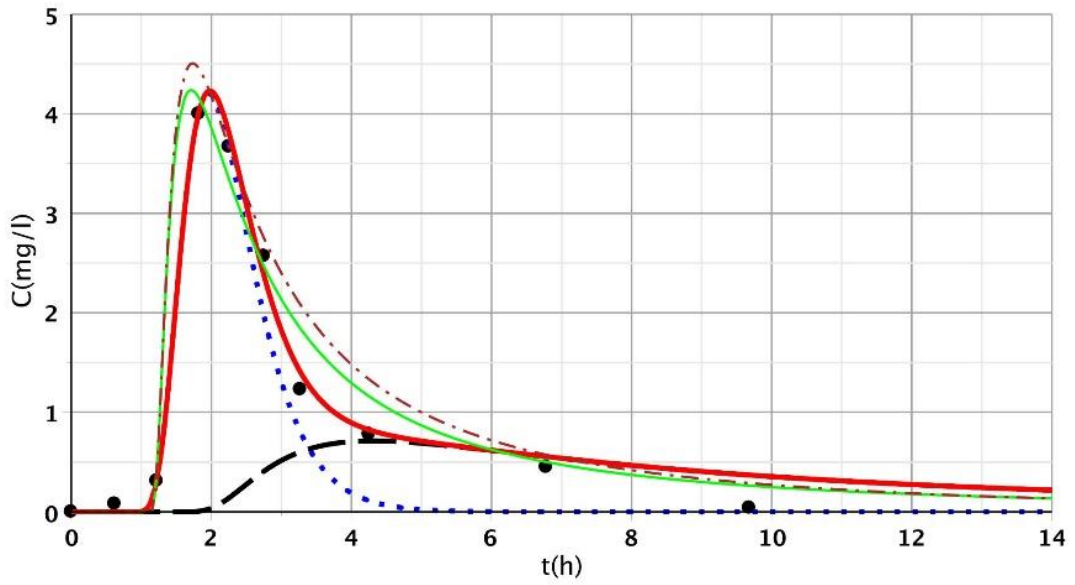
219. ábra: Három modell illesztési eredményei (D-CDT, Fréchet, CDT) az S/4 VI. alsó ponton



220. ábra: Három modell illesztési eredményei (D-CDT, Fréchet, CDT) az S/4 VII. alsó ponton



221. ábra: Három modell illesztési eredményei (D-CDT, Fréchet, CDT) az S/4 VIII. alsó ponton



222. ábra: Három modell illesztési eredményei (D-CDT, Fréchet, CDT) az S/4 IX. alsó ponton